식량안보시리즈 제 3 권

GMO 바로알기

(유전자변형생명체)

박수철, 김해영, 이철호 공저

KFSRF 한국식량안보연구재단 도서출판 식안연

GMO 바로알기

(유전자변형생명체)

박수철, 김해영, 이철호 공저

한국식량안보연구재단(www.foodsecurity.or.kr)
본 재단은 세계적인 식량위기 상황을 분석하고 평가하여 우리나라 식량안보에 미칠 영향을 미리 예측하고, 이에 대비하기 위한 국가적 정책개발과 국민 의식개혁 운동을 선도하기 위해 2010년 4월 설립된 순수 민간 연구기관이다. 재단은 안정적인 식량공급을 위해 농어업과 식품산업이 식량공급의 주체가 되는 새로운 식량정책의 개발에 힘쓰고 있다. 특히 식품산업의 식량안보적 기능을 강화하고, 식품산업이 사회적 책임을 다하도록 노력하고 있다. 재단은 독지가들의 후원금을 모아 식량안보에 관한 학술활동을 지원하며 출판사업과 관련 자료를 수집하고 공유하는 일을 하고 있다. 재단은 식량자급실천 국민운동 추진본부로서 식량부족의 위험이 없는 사회를 다음세대에게 물려주기 위한 국민실천운동을 전개하고 있다. 도서출판 식안연(食安硏)은 재단의 출판사업을 수행하고 있다.

GMO(유전자변형생명체) **바로알기**

초판 1쇄 발행 2015년 4월 30일
2쇄 발행 2015년 5월 29일
전자책발행 2015년 5월 29일

발행인 이철호(한국식량안보연구재단)
발행처 도서출판 식안연
주소 서울시 성북구 안암로 145, 고려대학교 생명과학관(동관) 109A호
전화 02-929-2751
팩스 02-927-5201
이메일 foodsecurity@foodsecurity.or.kr
홈페이지 www.foodsecurity.or.kr
편집·인쇄 한림원(주) http://www.hanrimwon.com

ISBN • 979-11-86396-21-6
전자책 ISBN • 979-11-86396-25-4 **정가** 12,000**원**

이 전자책은 저작권법에 의하여 보호를 받는 저작물이므로 무단전재와 무단복제를 금합니다. 이를 위반하면 민 · 형사상 책임을 질 수 있습니다.

All rights are reserved. Produced in Korea. No part of this book may be reproduced in any form without permission in writing from the publisher.

본 콘텐츠는 PDF형식으로 서비스합니다.

GMO 바로알기
(유전자변형생명체)

머리말
Introduction

유전자변형기술의 안전성에 대한 논란이 지난 20여 년간 세계를 뜨겁게 달구었다. 확신과 기대에 가득 찬 과학자들의 연구 노력에도 불구하고 일부 환경운동가들과 시민단체들이 유전자변형 기술에 대해 끈질기게 문제를 제기하고 공포심을 확산해 왔다. 여기에 편승하여 유럽 국가들은 자국의 농업을 보호하기 위한 수단으로 유전자변형(GM) 농산물의 수입과 유통을 까다롭게 하여 무역장벽으로 이용하고 있다. 그러나 1996년 유전자변형 콩과 옥수수가 상용화된지 18년이 지난 지금 세계 콩 재배면적의 79%, 옥수수 경작지의 32%에서 GM종자를 심고 있으며 세계 28개국 1억 8,150만 헥타르에서 GM작물이 재배되고 있다. 세계 최대 곡물 수출국인 미국에서 생산되는 옥수수와 콩의 90% 이상이 GM품종이다. 미국의 3억 인구가 지난 18년 동안 이들 GM곡물을 아무런 표시 없이 먹고 있으나 이로 인해 부작용이나 이상반응을 보인 사례가 한 건도 없었다. 유럽의 과학자들도 GMO의 안전성은 이제 더 이상 논란의 대상이 아니며 그 사용 여부는 각 나라의 정치적인 이슈라고 말하고 있다. 그동안 GMO의 이용을 적극적으로 막았던 유럽의 반대론자들도 그들의 잘못을 인정하고 GMO 전도사로 탈바꿈하고 있다. 이제 유전자변형가술을 이용한 농업 생명공학은 세계적인 대세이며 인류의 생존을 위해 반드시 발전시켜야 할 과학기술이 된 것이다.

얼마 전 한국식품과학회 총회에 초청된 한 미국 학자가 미국의 GM작물 생산 현황과 이용 실태에 대해 강연을 하였다. 강연이 끝난 후 질문시간에 한국에서도 대학에서 유전공학의 안전성과 유용성에 대해 열심히 강의하고 있으나 국민 대부분은 GMO에 대해 불안감을 가지고 있는데 미국에서는 어떻게 국민을 그토록 잘 설득했느냐는 질문에 대해 두 가지 점을 강조했다. 첫째 미국 국민은 정부를 믿는다는 것이다. 미국 식품약품국(FDA)이 GM곡물은 일반 곡물과 다름이 없으므로 안전하다고 발표했기 때문에 국민은 별다른 의심 없이 먹고 있다는 것이다. 둘째로 미국 정부는 유전자변형 기술이 상용화될 때 누구보다 먼저 국민이 신뢰하는 전문가 그룹, 예를 들어 의사, 약사, 간호사 등에게 유전자변형기술에 대한 객관적이고 과학적인 근거를 충분히 홍보하려고 노력했다는 것이다. 실제로 미국 국가연구위원회(National Research Council)와 미국 의학협회(Institute of Medicine)가 공동으로 '유전자조작 식품의 안전성(Safety of Genetically Engineered Foods)' 단행본을 미국한림원출판부(National Academies Press, 2004)에서 출판하였다. 이 책은 기존의 육종 기술과 비교하여 GM종자에서 발생할 수 있는 비의도적 건강상의 영향을 검증하는 방법과 그 결과들을 상세히 기술하고 있다.

유전자변형기술을 이용한 의약품과 산업용 소재는 현재 광범위하게 생산 이용되고 있다. 유전자변형 미생물을 이용하여 당뇨병 치료제인 인슐린을 생산하고, 치즈 생산을 위해 동물 조직에서 뽑아내던 응유효소를 GM미생물에서 대량 생산하는 것에 대해서는

아무도 거부감을 갖지 않는다. 가축사료는 거의 전량 GM곡물로 만들어지지만 여기에 대해 문제를 제기하는 사람은 없다. 유독 GM농산물에 대해 '괴물GMO'라고 반대하고 국민을 겁주는 일을 서슴지 않는 사람들이 있다. 전기장치가 처음 발명되었을 때 '후랑켄슈타인'이라고 겁먹은 것과 다를 바 없다. 중국이 화약을 세계 최초로 발명하였으나 그 폭발력에 겁먹고 불꽃놀이에만 사용하였으나 유럽은 다이나마이트를 만들어 도로를 뚫고 광산을 파헤쳐 엄청난 산업발전을 이룩하였다. 모든 과학기술은 그것이 주는 혜택 못지않게 부작용도 가지고 있다. 기술을 관리하여 혜택을 극대화하고 부작용을 줄여나가는 것이 과학기술의 발전이며 인류 문명이 걸어온 길이다.

이 책은 앞으로 예견되는 인류의 식량문제를 해결하기 위한 기술로 GM작물의 개발과 이용 확대를 위해 한국식량안보연구재단의 식량안보시리즈 세 번째 기획으로 저술되었다. 전통적인 육종방법과 생명공학을 이용한 분자육종의 차이를 적시하고 유전자변형기술의 이론적 배경과 발전과정을 소상히 소개하였다. GM작물의 환경 영향 평가와 식품 안전성 평가에 대한 국내외 규정과 관리현황을 소개하고 세계적으로 확대되고 있는 GM작물의 재배와 교역현황을 정리하였다. 또한 우리나라 GM곡물 수입 이용 현황과 표시제도의 국제비교를 실었다. 그동안 GMO의 안전성 문제를 일으킨 여러 가지 사건에 대한 진위를 밝히고 이로 인해 야기된 국민의 부정적 의식 정도를 조사한 자료를 실었다. 이 책은 우리사회의 여론을 이끌어 가는 전문직 지식인들의 과학적 호기심을 충족하기

위해 만든 참고서이다.

바쁜 중에도 이 책의 저술에 동참해준 박수철 박사와 김해영 교수의 열정에 감사드리며 귀중한 자료들을 보내준 크롭라이프코리아의 김태산 대표와 여러 전문가들의 협력에 감사드린다. 식량안보시리즈 출판을 위해 한결같은 도움을 주시는 김유원 사장님과 (주)한림원 김흥중 사장님과 직원들의 노고에 감사를 드린다. 또한 한국식량안보연구재단의 사업을 공감하여 지원과 협력을 아끼지 않는 재단 이사님들과 후원자 여러분의 성원에 대해 이 자리를 빌어 심심한 감사의 말씀을 전한다.

2015년 4월

(재)한국식량안보연구재단

이사장 **이 철 호**

차 례
Contents

01 유전자의 발견과 생명체 13

1.1 유전자의 발견 ····· 13

1.2 유전자와 생명체의 진화 ····· 16

1.3 전통적인 육종방법 ····· 28

1.3.1 분리육종법 ····· 28

1.3.2 교배육종 ····· 29

1.3.3 돌연변이육종 ····· 35

1.3.4 잡종강세육종 ····· 36

1.4 육종과 생명공학 ····· 38

02 유전자변형기술의 발전 43

2.1 유전자변형기술의 발전 역사 ····· 43

2.2 유전자변형기술 ····· 50

2.2.1 미생물 유전자변형 기술 ····· 50

2.2.2 동물 유전자변형 기술 ····· 52

2.2.3 식물 유전자변형 기술 ····· 55

2.3 유전자변형기술의 이용 ····· 59

2.3.1 GM의약품 생산 ····· 59

2.3.2 GM미생물을 이용한 효소 생산 ····· 61

2.3.3 GM식물 생산 ····· 63

03 유전자변형(GM) 작물의 개발 현황 69

3.1 GM작물의 역사 ····· 71

3.2 GM작물의 개발 현황 ····· 73

3.2.1 과숙억제 토마토 FLAVR SAVR® ····· 73

3.2.2 제초제내성 GM콩 ····· 74

3.2.3 해충저항성 Bt 면화 ····· 77

3.2.4 바이러스 저항성 GM작물 ····· 79

3.2.5 황금 쌀(Golden Rice) ····· 81

3.2.6 가타 영양강화 GM작물 ····· 83

3.2.7 가뭄저항성 옥수수 ····· 84

3.3 GM작물의 개발 과정 ····· 86

3.3.1 시험연구단계 ····· 88

3.3.2 상업용 GM작물 개발단계 ····· 89

3.3.3 상업화 승인 단계 ····· 91

3.3.4 상업화 단계 ····· 92

3.4 상업용 GM작물 개발 동향 ····· 94

3.5 우리나라 GM작물 개발 현황 ····· 98

3.5.1 GM작물 개발 기술경쟁력 확보를 위한 고려 사항 ····· 108

04 GM작물의 환경 위해성 평가 111

4.1 국제적인 GM작물 환경위해성 평가기준 ····· 111

4.2 우리나라 GM작물 환경위해성 평가기준 ····· 113

4.2.1 GM작물의 유독물질 생성여부 평가 ····· 122

4.2.2 GM작물의 잡초화 가능성 여부 평가 ····· 124

4.2.3 GM작물의 주변 생물 및 생태계에 미칠 수 있는 영향 평가 ····· 126

4.2.4 GM작물을 도입하고자하는 환경에 대한 평가 ····· 128

05 GM작물의 안전성 평가 131

5.1 국제적인 GM작물 안전성 평가기준 ····· 131

5.2 우리나라 GM작물 안전성평가 기준 ····· 136

5.2.1 GM작물의 분자생물학적 평가 ····· 141

5.2.2 GM작물의 독성 평가 ····· 145

5.2.3 GM작물의 알레르기성 평가 ····· 150

5.2.4 GM작물의 성분분석 및 동물사양 실험 ····· 156

5.3 국내 GM작물 승인 현황 ····· 159

06 GM작물의 재배 및 교역 현황 161

6.1 세계의 GM작물 재배 현황 ····· 161

6.1.1 국가별 GM작물 재배 현황 ····· 161

6.1.2 작물별 재배면적 ····· 165

6.2 GM작물 교역 현황 ····· 170

6.2.1 세계 총 곡물 교역량 ····· 170

6.2.2 GM옥수수 교역량 ····· 171

6.2.3 GM콩 교역량 ····· 172

6.2.4 국제 곡물가격 변화와 non-GM곡물 프리미엄 ····· 173

6.3 우리나라의 GM 작물 수입 및 사용 현황 ····· 175

6.3.1 GM작물 수입 현황 ····· 175

6.3.2 옥수수의 용도별 수입현황 ····· 180

6.3.3 콩의 용도별 수입현황 ····· 183

6.4 GM식품의 표시 현황 ····· 185

07 GMO의 안전성에 대한 논란 193

7.1 GMO의 유해성에 관한 보도와 실제 상황 ····· 193
7.1.1 영국 푸스타이 사건 ····· 195
7.1.2 스타링크 옥수수 사건 ····· 197
7.1.3 Bt 옥수수의 제왕나비 사건 ····· 199
7.1.4 러시아 에르마코바 사건 ····· 200
7.1.5 인도 Bt 면화 사건 ····· 202
7.1.6 프랑스 세라리니 사건 ····· 203
7.1.7 GM작물 개발과정에서 발생한 사건들 ····· 204
7.2 영국의 환경운동가 마크 라이너스의 공개 사과 ····· 206
7.3 GM식품 수용도(acceptability)의 변화 ····· 221

08 GMO의 미래 227

8.1 글로벌 기후변화와 식량생산 ····· 227
8.2 식량안보를 위한 생명공학의 기여 ····· 231
8.3 차세대 GMO 개발 현황 ····· 235
8.3.1 미래 개발될 GM작물 ····· 237
8.4 GMO에 대한 올바른 이해의 필요성 ····· 246

09 우리나라 식량안보를 위한 GMO 정책 제언 249

CHAPTER

01 유전자의 발견과 생명체

1.1 유전자의 발견

오스트리아의 수도사였던 그레고어 멘델(G. J. Mendel, 1822-1884)은 완두콩을 이용한 실험을 통해 유전법칙을 발견하고 처음으로 유전자의 개념을 정립하였다. 즉, 완두콩의 색깔과 모양이라는 생물체의 고유한 형질이 세대를 거듭하면서 자식세대에서 일정한 법칙에 따라 이어진다는 유전원리를 통계학적으로 증명해 보인 것이다.

멘델의 유전법칙은 발표 당시 생물학자들에게 인정을 받지 못했다. 그가 사망한 후인 1900년 무렵 휘호 더프리스(H. de Vries), 카를 코렌스(C. Correns), 에리히 폰 체르마크(E. V. Tschermak)와 같은 유럽의 과학자들이 멘델이 발표한 유전법칙을 재 입증함으로서 그의 발견이 빛을 보게 되었고 현재 멘델은 현대 유전학의 아버지로 추앙을 받고 있다.

멘델의 유전법칙이 학계에서 인정된 이후 과학자들은 멘델이 예상했던 유전물질이 무엇인지를 찾아내기 위한 연구에 집중했다. 1909년 덴마크의 식물학자인 요한센(W. Johannsen)은 멘델이 주장한 유전인자를 '겐(Gen)'이라는 용어로 이름 붙였으며 이것이 현재 '유전

자(Gene)'의 기원이 되었다. 반면 1910년 토머스 헌트 모건(T.H. Morgan)이 초파리 연구를 통해 유전자가 염색체상에 존재하면서 부모의 유전형질을 다음세대로 전달한다는 것을 증명함으로서 개념상으로만 존재하던 유전자의 실체가 서서히 밝혀지기 시작하였다.

이후로 유전자가 어떤 물질로 이루어졌는지를 밝히려는 노력이 시도되었다. 초기에는 단백질이 유전자라는 설이 일반적이었으나 이 가설로는 유전자의 전달과정 및 이에 따른 유전법칙을 설명할 수가 없었다. 1928년에는 영국의 미생물학자인 그리피스(F. Griffith)가 폐렴쌍구균을 이용한 실험을 통해 세균의 특성을 변화시킨 물질이 단백질이 아닌 DNA(deoxyribonucleic acid)라는 사실을 증명함으로서 DNA가 유전물질이라는 것을 최초로 확인하였다. 이를 이어받아 1943년에 에이버리(O. T. Avery)가 시험관내에서 DNA를 따로 분리하고 이를 주입한 생물체의 특성이 변한다는 형질전환(形質轉換: transformation) 실험을 통해 DNA가 유전물질이라는 사실을 직접적으로 증명하였다.

그러던 1953년 제임스 왓슨(J. D. Watson)과 영국의 생물학자인 프랜시스 크릭(F. Crick)은 DNA의 이중나선 구조를 밝히면서 현재 우리가 이해하고 있는 유전자의 개념을 확립하게 되었고 유전법칙의 원리가 확실하게 증명되는 결정적 역할을 하게 된다. 당시 각각 35살과 22살의 젊은 생물학자인 미국의 제임스 D. 왓슨과 영국의 프랜시스 크릭은 1953년 4월 25일 과학학술지 "네이처"에 "핵산의 분자구조: 디옥시리보핵산의 구조(Molecular structure of Nucleic Acids: A Structure for Deoxyribose Nucleic Acid)"라는

2페이지 128줄의 짧은 논문을 발표하였다.[1] 이 논문에서 두 가닥의 DNA가 서로 상보적인 염기쌍의 결합으로 이루어져 있다는 이중나선 구조모델이 제시되었으며, 이러한 상보적 이중나선 구조로 인해 유전물질인 DNA가 복제가 가능하고 어떻게 다음 세대로 전달될 수 있는지에 대한 해석이 가능하게 된 것이다. 이들의 발견은 유전자의 실체를 밝혀냄과 동시에 생명의 기능이 분자수준에서 어떻게 유지되고 유전되는지에 대한 결정적인 정보를 제공한 획기적인 발견으로서 현대 분자생물학을 탄생시키는 동시에 생명공학 시대를 알리는 위대한 서막이었던 것이다. 왓슨과 크릭은 이 업적을 인정받아 1962년 노벨상을 수상하게 된다(그림 1-1).

그림 1-1 ◂◂ 왓슨과 크릭의 DNA 나선형 구조와 복제 도해

1) Watson, J.D. and Crick, F., 1953, Molecular structure of Nucleic Acids: A Structure for Deoxyribose Nucleic Acid, Nature, 25;171,737-738(1953)

1.2 유전자와 생명체의 진화

유전자란 각 생물체 고유의 형태와 특징을 다음세대에 전달하는 유전정보의 단위이다. 유전자는 DNA라는 분자구조물로 구성되어 있으며 세포내 염색체의 일부분으로 존재하고 있다. 이 유전자들은 각 세포별로 필요한 시기에 그들의 정보를 전달하여 단백질이라는 분자구조물을 만들어냄으로서 그 생물체가 필요한 형질을 표현한다(그림 1-2). 유전자의 정보를 복사하여 전달하는 분자물질을 RNA(ribonucleic acid)라고 하며 이 RNA를 통해서 최종적으로 각 유전자가 지정한 단백질을 만들어 낸다. 즉, 피부색, 키, 보조개 등 각 생물체의 특성이나 형태를 결정하는 정보는 DNA로 구성된 유전자에 보관되어 있다가 필요한 시기 또는 외부와의 상호반응을 통해 유전정보를 번역하여 표현형질로 나타나게 하는 것이다.

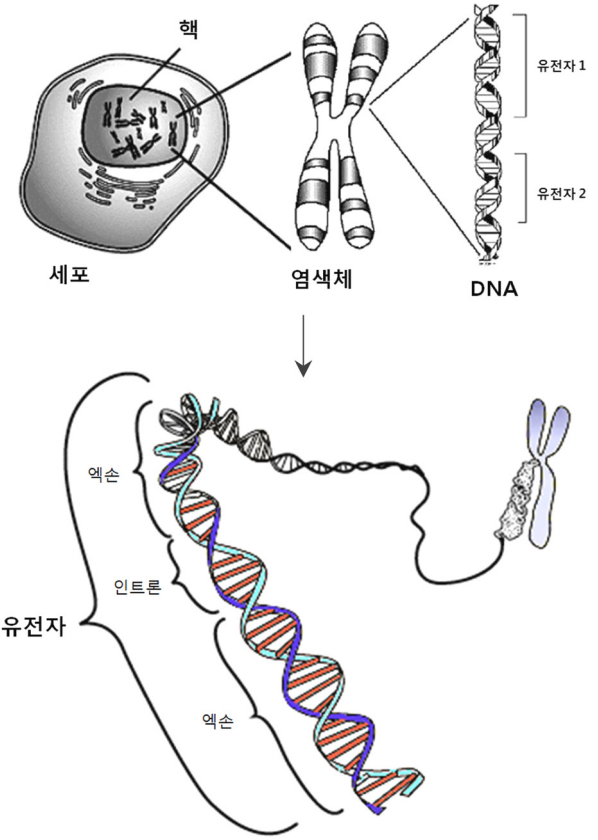


그림 1-2 ◂◂ 세포 핵과 염색체 그리고 유전자(gene)의 구조[1)]

1) Resource Center in the National Health Museum(Courtesy; National Human Genome Research Institute and Artist Darryl Leja)

그림 1-3 ◂◂ 유전현상-피모의 유전[1)]

이들 유전자는 부모의 생식세포를 통해 자식에게 전달되고 자식의 성장발달과정에서 이들 유전자들의 유전정보가 단백질이라는 분자물질로 표현되면서 생물체의 고유한 특성과 형태가 결정되는 것이다(그림 1-3).

이렇게 유전자의 정보가 전달되어 최종 단백질로 만들어지는 현상을 유전자가 발현한다고 하는데, DNA가 RNA에 복사되는 전사(transcription)와 RNA가 단백질로 바뀌는 번역(translation) 과정을 말한다. 이렇게 해서 만들어진 단백질이 생체 내에서의 모든 생화학적 작용을 함으로써 유전자의 정보가 실질적으로 표

1) 유전자변형작물 이해하기, 농촌진흥청 국립농업과학원 생물안전성과, 2012.9.

현이 되게 되는데. 이러한 과정을 생물학에서는 생명의 중심원리(Central Dogma)라고 부른다(그림 1-4).

생명의 중심원리(Central Dogma)는 DNA의 자기 복제로부터 시작된다. DNA가 자기 복제를 할 수 있는 것은 이중나선 구조로 이루어져 있기 때문이다.

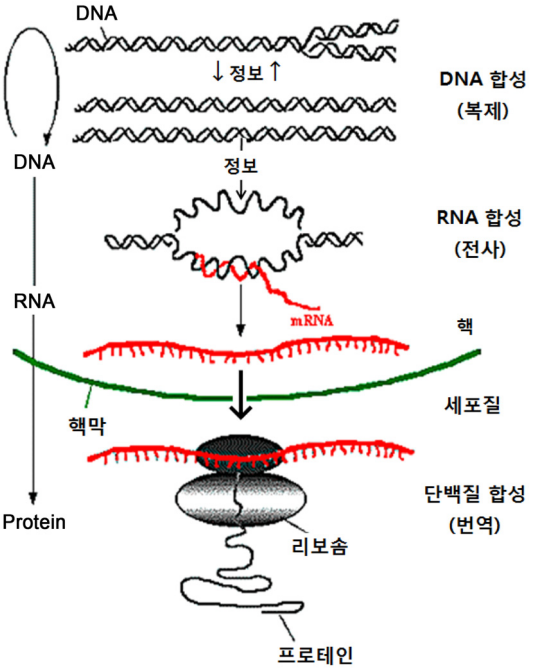
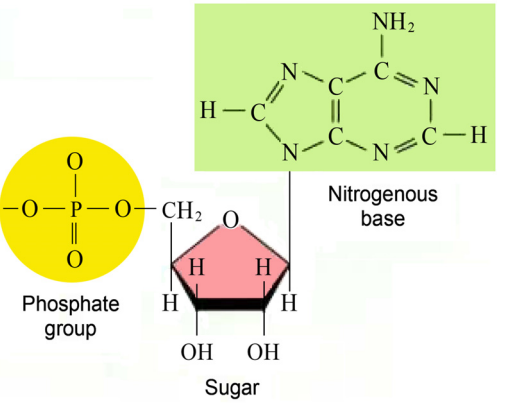


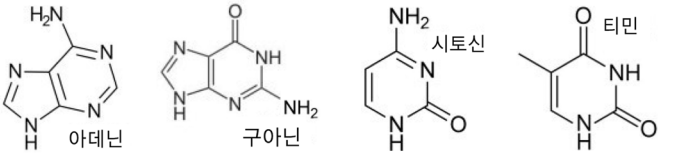
그림 1-4 ◂◂ 생명의 중심원리; DNA의 전사와 번역 과정[1)]

1) Resource Center in the National Health Museum

DNA를 구성하는 기본단위는 뉴클레오티드(nucleotide)로서 그림 1-5에서 보는바와 같이 5탄당(sugar, 자색), 인산기(Phosphate group, 노란색), 염기(Base, 녹색)로 구성되어 있다. 이 뉴클레오티드는 염기 부분만 서로 다른 4가지로 구분되는데, 각각의 염기구조에 따라 아데닌(A), 구아닌(G), 티민(T), 사이토신(C)이라 명칭한다. 이 A, G, T, C의 4가지 염기들의 서열이 DNA의 유전 정보가 되는 것이며, 이 정보에 따라 단백질이 합성된다.



<DNA 구성단위인 뉴크레오타이드>



<4종류 뉴크레오타이드의 염기차이>

그림 1-5 ◂◂ DNA의 구조

이와 같이 4종류의 뉴클레오티드 분자가 임의적 배열로 연결된 DNA 사슬이 모여서 하나의 유전자를 구성하고 이들이 모두 모여 염색체를 구성한다. 염색체에 존재하는 각 유전자에 배열되어 있는 뉴클레오티드(A, G, T, C)의 3개 조합이 단백질의 구성원인 아미노산 1개를 만드는 암호이므로, DNA 사슬의 염기구성과 순서에 따라 특정한 단백질을 만들게 된다.

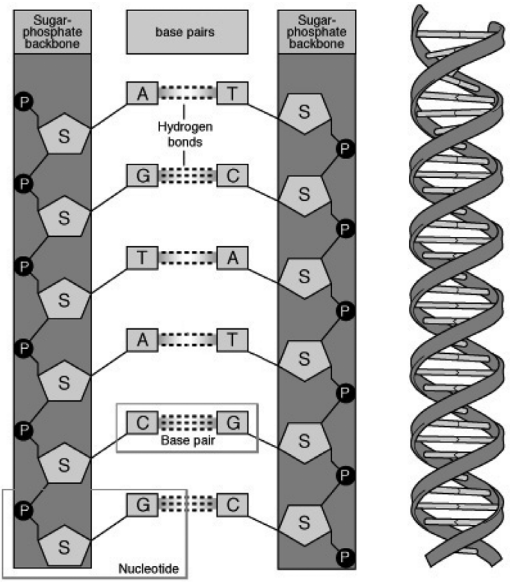


그림 1-6 ◂◂ DNA 이중나선의 생성원리[1)]

1) Resource Center in the National Health Museum(Courtesy; National Human Genome Research Institute and Artist Darryl Leja)

중요한 점은 이 4가지의 염기는 A와 T가 서로 결합할 수 있으며, G와 C가 서로 결합할 수 있다는 것이다. 이러한 특성 때문에 DNA는 A와 T, G와 C가 서로 결합되면서 연결된 이중나선 구조를 가지게 된다(그림 1-6).

DNA 복제는 이중나선의 DNA가 풀어지면서 시작된다. 풀어진 2개의 DNA 사슬을 주형으로 각각의 뉴클레오타이드가 자기와 상보성을 갖는 뉴클레오타이드(A-T, C-G)를 찾아서 결합함으로서 기존과 동일한 새로운 이중나선의 DNA 사슬을 복제하게 되는 것이다(그림 1-7).

인간은 단 한 개의 세포인 수정란에서 무수히 분열해 약 60조개의 세포를 가진 생명체가 되는데, 수정란이 분열되면서 DNA도 동시에 복제되어 나눠지므로 모든 세포는 100% 똑같은 유전자를 갖게 되는 것이다.

이와 같이 자신을 복제하여 자식에게 유전형질을 전달하는 DNA는 자신이 어떤 단백질을 만들어 낼지에 대한 유전정보를 담고 있다. 반면 DNA는 한번 손상되면 회복되기가 어렵기 때문에 DNA를 직접 이용하지 않고, 자신을 복사한 RNA 합성을 통해 자신의 정보를 전달하여 단백질을 합성하게 만든다. 이와 같이 DNA가 자신의 정보를 복사하여 RNA를 만드는 것을 전사(transcription)라고 하며, 이렇게 전사된 RNA를 mRNA(메신저 RNA)라고 한다. 이 mRNA는 새포내에 핵에서 합성된 후 핵공을 지나 핵 밖으로 이동하면 세포질에 있던 리보솜(ribosome)이 mRNA에 부착되어 단백질 합성을 시작할 준비를 한다. 단백질 합성은 단백질의 기본

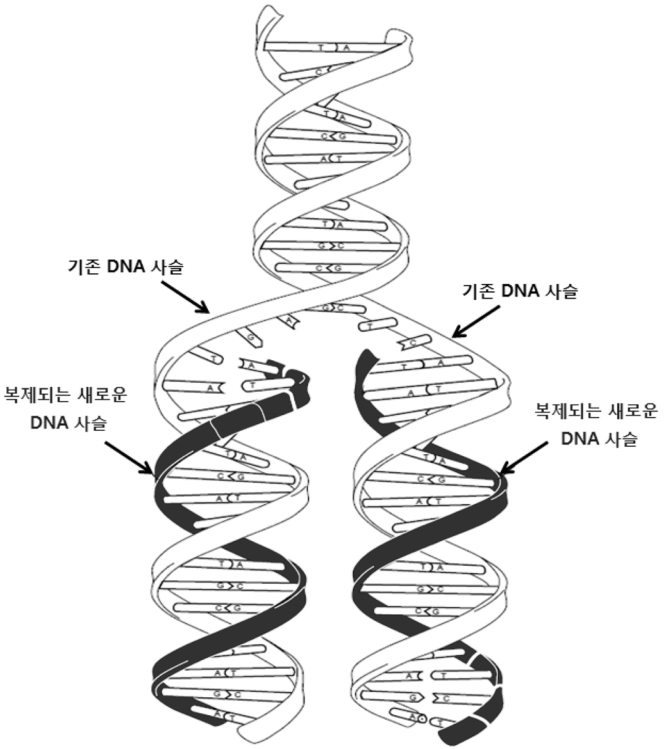


그림 1-7 ◂◂ DNA의 복제[1)]

단위인 각각의 아미노산을 운반할 수 있도록 특이구조를 가진 tRNA가 mRNA가 보유한 유전정보에 맞는 아미노산을 운반해 오면서 시작된다. tRNA에 실려 온 아미노산은 리보좀내에 부착되어 있는 mRNA 염기배열에 따라 정돈된다. 즉, mRNA의 각각

1) Resource Center in the National Health Museum(Courtesy; National Human Genome Research Institute and Artist Darryl Leja)

3개 염기로 이루어진 코돈(codon)에 부합되도록 아미노산이 정렬되고, 각 아미노산은 펩타이드 결합을 통해 서로 연결되어 폴리펩타이드 사슬이 만들어진다. 이렇게 만들어진 폴리펩타이드들이 상호 결합 또는 적절할 구조를 이루면서 DNA가 가진 유전정보를 충실히 실행할 최종 단백질로 완성되는 것이다. 이와 같이 DNA의 유전 정보를 가진 mRNA로부터 단백질이 합성되는 과정을 번역(translation)이라고 한다(그림 1-8).

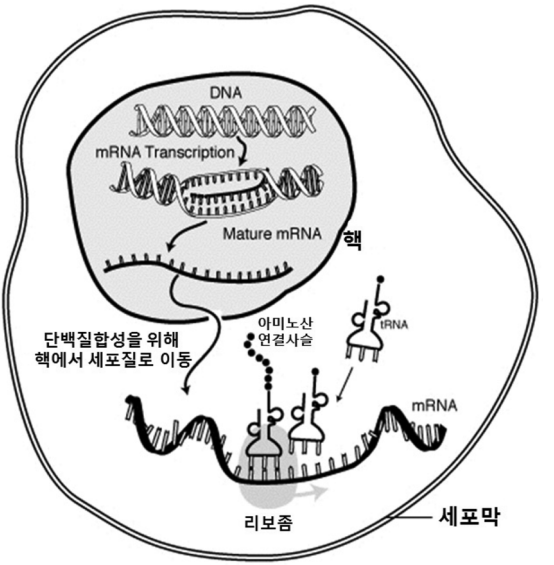
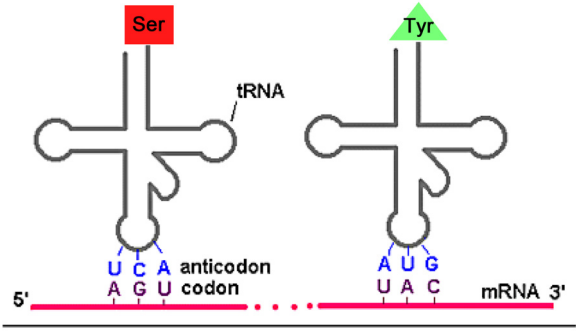


그림 1-8 ◂◂ 단백질 합성[1)]

1) Resource Center in the National Health Museum(Courtesy; National Human Genome Research Institute and Artist Darryl Leja)

재미있는 사실은 ATCG 4개로만 이루어진 DNA 정보로 단백질 합성에 필요한 20개의 아미노산을 정확히 암호화하여 수많은 단백질을 만들어낸다는 사실이다. 이에 대한 비밀은 1961년 DNA의 구조를 밝힌바 있는 크릭이 유전암호(genetic code)가 코돈(codon)이라 불리는 서로 중첩되지 않는 3개의 염기(triplet codon)로 이루어졌다는 것을 밝힘으로서 풀려지게 되었다. 즉, 염색체를 구성하는 DNA는 다수의 뉴클레오티드로 이루어져 있는데, 이 중 3개의 연속된 뉴클레오티드가 결과적으로 1개의 아미노산의 종류를 결정하게 되는 것이다. 이 3개의 뉴클레오티드를 트리플렛 코드라 부르며, 이것을 현재 코돈이라는 단위로 표시하게 된 것이다. 이와 같은 유전암호에 따라, mRNA의 각 코돈에 상응하는 아미노산을 tRNA들이 운반해오고 이들 아미노산들이 리보좀안에서 상호 결합하여 단백질의 전신인 폴리펩타이드 사슬이 만들어지는 것이다. 이러한 법칙에 따라 1개의 폴리펩타이드를 합성할 수 있도록 구성된 DNA 염기서열 단위를 1개의 유전자로 구분하는 것이다(그림 1-9).

모든 생명체는 이와 같이 자신들의 고유 유전자들을 통해 주위 환경에 적응하며 살고 후손에 그들의 유전자를 물려주면서 지구상에서 그들만의 고유성을 유지하면서 생존하고 있는 것이다. 문제는 주위 환경의 변화이다. 주위 환경이 변할 경우 이에 대처할 적절한 형질이 없는 생명체는 생존이 어려워 멸종의 안타까움을 겪게 된다. 빙하기 추위에 대한 대비가 없던 많은 생물종이 멸종이 된 것은 우리가 너무 잘 알고 있는 사실이다. 그런 이유로 모든



2nd base in codon

1st base in codon	U	C	A	G	3rd base in codon
U	Phe	Ser	Tyr	Cys	U
	Phe	Ser	Tyr	Cys	C
	Leu	Ser	STOP	STOP	A
	Leu	Ser	STOP	Trp	G
C	Leu	Pro	His	Arg	U
	Leu	Pro	His	Arg	C
	Leu	Pro	Gln	Arg	A
	Leu	Pro	Gln	Arg	G
A	Ile	Thr	Asn	Ser	U
	Ile	Thr	Asn	Ser	C
	Ile	Thr	Lys	Arg	A
	Met	Thr	Lys	Arg	G
G	Val	Ala	Asp	Gly	U
	Val	Ala	Asp	Gly	C
	Val	Ala	Glu	Gly	A
	Val	Ala	Glu	Gly	G

그림 1-9 ◂◂ 아미노산을 결정하는 유전암호[1)]

생명체는 진화를 통해 주위 환경에 적응하면서 생존을 하고 있는 것이다. 특히, 인간의 경우 자체적인 진화뿐만 아니라 인간의 생존에 필요한 식용 또는 의료 등 산업용으로 사용하는 동식물을 진화시키면서 생존을 이어오고 있는 것이다. 이러한 진화의 가장 필수

1) Resource Center in the National Health Museum

요소는 유용 유전형질을 확보하는 것으로서, 생물체가 진화하는 과정자체를 생존을 위한 유전변이라고 통칭할 수 있을 것이다. 이와 같이 인류가 유전자 재조합을 포함한 유전변이를 통해 인류가 필요로 하는 유용 형질을 가진 작물을 개량하는 농업기술을 육종이라고 한다. 즉, 유전변이를 통한 육종기술은 인류생존에 필요한 가장 핵심기술인 것이다. 그림 1-10은 자연계에서 옥수수의 진화과정을 보여주고 있다. 야생 옥수수에서 재배용 옥수수로 자연 진화하는데 1천년이 걸렸고 재배용 옥수수를 선별 육종하여 오늘날의 옥수수로 만드는데 1백년이 걸렸다.

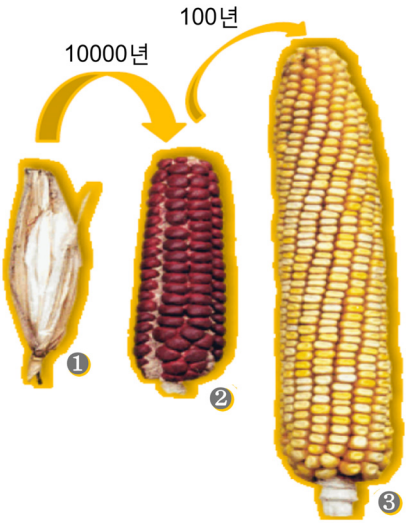


그림 1-10 ◂◂ 작물의 자연적인 진화 과정

1.3 전통적인 육종방법

육종(breeding)은 우리 인류를 발달시키고 유지시킨 엄청난 과학기술이며 지속적인 작물육종은 그 방식에 따라 크게 전통적인 방법과 분자육종 방법의 두 가지로 나눌 수 있다. 먼저 전통적인 방법에는 교배육종, 돌연변이육종, 잡종강세 등이 있다. 교배육종은 근연, 원연식물 간에 교배하여 특성이 우수한 개체를 선발하는 과정을 반복적으로 수행함으로써 새로운 품종을 육성하는 방식이다. 돌연변이육종은 집단 내에 출현하는 유전자의 돌연변이를 이용하여 희망하는 특성을 가진 것으로 개량하는 방식이다. 한편, 잡종강세는 서로 다른 품종 또는 계통간 교잡을 통해 F1의 잡종식물체가 양친보다 왕성한 생육 상태를 나타내는 현상을 활용한다. 이러한 방법은 인간이 식물을 재배하기 시작한 때부터 사용된 방식으로 신품종의 개발, 종자 보존, 생산량 증대 등에 상당부분 기여했다. 하지만 한정된 유전자원만을 사용함으로써 생산성 증대를 통해 식량문제를 해결하는 데에는 한계가 있다.

1.3.1 분리육종법

우리가 현재 먹고 있는 대부분의 작물에 대한 육종은 선사시대 농경문화와 함께 시작되었다. 신석기인 들은 그들이 채취한 야생식물을 주거지 인근에 재배하기 시작하였으며, 그들 중 우수한

개체를 선발해 이를 다음 해에 심는 방식의 선발육종을 실시하였다. 이러한 선발육종의 결과 현재 각 지역별 기후특성에 적합한 재래종이 정착하게 되었고 이들의 지속적인 개량을 통해 오늘날 우리가 먹는 수많은 품종들이 탄생하게 된 것이다. 현대 육종학자들은 이러한 선발육종 방법을 '분리육종법'이라고 한다.

1.3.2 교배육종

작물육종 역사상 가장 획기적인 사건은 아마도 인위적인 교배를 통해 작물을 개량하는 교잡육종(交雜育種, crossbreeding) 방법을 개발한 것일 것이다. 분리육종의 경우 과학적 지식이나 이론이 아닌 주로 영농자의 경험과 직관에 의지하여 진행되어 왔다. 반면, 멘델의 유전법칙이 인정받고 유전자의 개념이 도입되면서 육종기술도 과학적 이론을 바탕으로 발전하게 된다. 즉, 분리육종의 경우 재배 집단의 유전적 다양성의 한계로 더 이상의 유전적 변이를 통한 작물개량에 한계를 느낀 육종가들이 유전적 특성이 다른 두 계통간에 교배를 통해 엄청난 유전적 변이를 창출하게 된 것이다. 이렇게 생성된 다양한 유전적 변이 집단으로부터 가장 바람직한 유전적 특성을 갖춘 개체를 선발하고, 이를 유전적으로 고정화하함으로서 안정화된 새로운 품종을 육성하는 방법이 교배육종이다. 이 기술을 이용할 경우 개량하고자 하는 목표에 따라서 알맞은 교배친(parents)을 선정하고 교배 후 두 개의 교배친이 가지고 있는 유전자들의 조합에 의하여 나타나는 변이체 중에서 우량 유전

자들이 조합된 보다 우수한 개체를 선발하여 우리가 원하는 품종을 만들 수 있다. 이 교배육종기술을 처음 사용한 것은 불과 2~300년전으로서 주로 화훼나 채소종자의 육종을 시작으로 적용되었으며 이후 거의 모든 작물에 적용되어 현재 전 세계에서 재배되고 있는 품종은 거의 이 방법으로 육성된 것으로 생각되며 지금도 지속적으로 사용되고 있는 핵심 육종기술이다.

(1) 통일벼의 개발

교배육종 기술은 전 세계적으로 식량문제 해결에 기여하면서 녹색혁명을 이룩한 실로 대단한 성과를 이룩하였다. 우리나라의 경우도 이 기술을 통해 온 국민의 소원이었던 주곡인 쌀의 자급자족을 이룩하게 된다. 1965년 당시만 해도 우리의 쌀 품종은 키가 크고 수량이 낮아 국민들의 배고품을 충족시키지 못하였다. 이러한 어려움을 극복하기 위하여 당시 육종학자였던 서울대학교 허문회 박사는 키가 작은 인디카 1품종과 우리나라에서 재배되던 자포니카 2품종을 교잡하는 3원 교배를 실시하였다. 이후, 이들로부터 만들어진 잡종 집단에서 키가 작고 수량성이 높은 계통을 계속 선발 교배하는 등 당시 벼 육종기반이 잘 갖춰진 농촌진흥청과의 공동연구를 통해 1971년 드디어 다수확품종인 통일벼를 개발하게 되었다(그림 1-11).

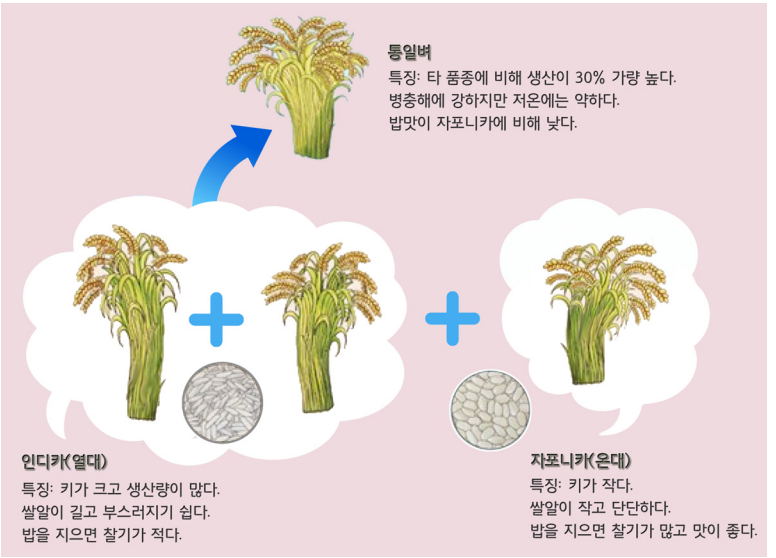
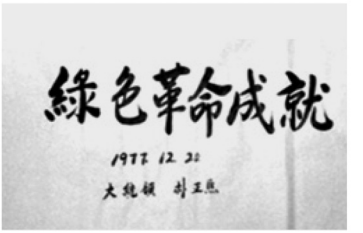
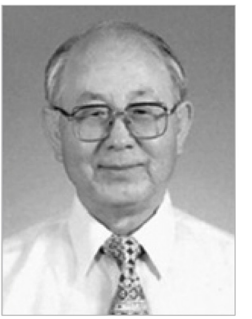


그림 1-11 ◂◂ 교배육종에 의한 통일벼의 품종개량 특징

이렇게 만들어진 통일벼는 당시 다른 품종들보다 30% 정도 생산성이 높은 다수확 품종이었고 병해충에도 강한 특성이 있었다. 이 통일벼는 1972년부터 농가에 보급되어 재배되기 시작했다. 1976년 '통일벼'의 재배 면적이 전체 벼 재배 면적의 44%로 확대되면서 평년보다 21.8% 증가한 521.5만 톤의 쌀을 생산해 내면서 마침내 우리의 숙원이었던 쌀의 자급자족을 달성하게 되었다. 우리나라의 녹색혁명으로 일컬어지는 통일벼 개발의 업적은 50년이 지난 2009년에 실시한 국가연구개발 반세기 최고 연구성과 선정평가에서, 식량문제 해결과 동시에 국가 경제발전을 이룩한 핵심

원동력으로 인정받아 10대 성과 사례 중 당당히 1위로 선정된바 있다(그림 1-12, 표 1-1).





<보릿고개에서 해방시켜준 '기적의 볍씨' 통일벼> <통일벼의 아버지, 고 허문회 박사>

그림 1-12 ◂◂ 통일벼 개발 기념비와 허문회 박사

표 1-1 국가연구개발 반세기의 10대 연구성과 사례[1)]

구분	성 과 사 례
1	통일벼 개발
2	전전자교환기(TDX) 상용화
3	CDMA기술 상용화
4	메모리 반도체 개발
5	한국형 표준원자로 개발
6	선발설계 핵심기술 개발
7	한국형 고속열차 개발
8	의료용 사이클로트론 개발
9	아리랑 2호 발사
10	파이넥스 공법 상용화

(2) 녹색혁명

국제적으로도 교배육종은 우리 인류에 엄청난 성과를 가져다주었다. 그중 대표적인 성과는 미국의 농학자인 노먼 볼로그(Norman Borlaug) 박사가 개발한 다수확 밀 품종인 "소노라" 개발을 통해 이룩한 녹색혁명(Green revolution)일 것이다. 미국의 농학자인 볼

1) 한국과학기술기획평가원, 2009.7

로그 박사는 멕시코에 위치한 국제옥수수밀육종센터에서 수확량이 많고 병에 강한 키 작은 밀을 개발하였다. 블로그 박사가 개발한 이 다수확 밀 품종은 멕시코, 파키스탄 그리고 인도 등 개발도상국의 식량문제 해결하는데 크게 기여하였다. 이 공로를 인정받아 볼로그 박사는 1970년 노벨평화상을 수상하였다(그림 1-13). 이 육종기술의 성과는 이후 획기적인 식량증산으로 이어지면서 수십억명의 사람들을 기아와 배고픔에서 해방시키는 녹색혁명으로 이어지게 된다. 이 녹색혁명 기술은 2014년 위클리 비지니스가 창간 85주년을 기념하기 위해 선정한 "세계를 바꾼 85종의 혁신기술" 중 전체 3위를 차지하는 평가를 받았다(그림 1-14).

그림 1-13 ◂◂ 녹색혁명을 주도한 다수확 단간 밀 품종 "소로보"와 노먼 블로그 박사

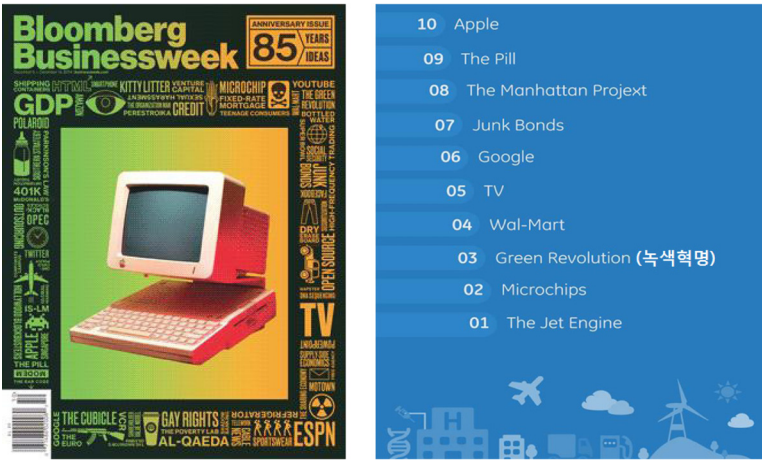


그림 1-14 ◂◂ 비즈니스위크 선정 세상을 바꾼 혁신 아이디어 85개[1)]

1.3.3 돌연변이육종

새로운 유전인자를 도입하는 교배육종이 커다란 성과를 보이면서 육종가들은 보다 새로운 유전변이 창출을 통한 품종개량을 연구하기 시작하였다. 1942년 뮬러(Muler)가 초파리에 X-선을 처리하여 인위적으로 돌연변이를 일으킴으로서 방사선 처리를 통한 돌연변이 육종의 가능성이 연구되기 시작하였다. 이후 특정 화학약제나 방사선 등을 종자에 처리하여 다양한 유전자들의 변이를 유도시킨 후 표현형 검정을 통해 유용한 변이체를 찾아내고, 그것을 고정하여 품종으로 육성하는 돌연변이 육종이 시도되었다. 그

1) GE코리아 블로그

러나 돌연변이 육종의 문제는 특정한 위치에 있는 특정 유전자에서만 돌연변이를 일으키게 할 수 없다는 것이었다. 지금은 생명공학기술의 발달로 원하는 특정 유전자만 돌연변이 시키는 방법이 개발되었지만 당시에는 무작위로 돌연변이를 일으킨 후 다른 유전자에는 영향이 없는 유용한 변이체를 찾아내고, 그것을 고정하여 품종으로 육성하는 어려운 작업을 거쳐야만 했다. 이러한 어려움이외에도 장구한 세월을 거쳐 고정된 재배종에서 일어나는 대부분의 돌연변이는 작물에 긍정적 효과 보다는 부정적 영향이 크기 때문에 새로운 유전자의 도입만큼의 성과를 기대하기는 어렵다는 것이 일반적인 의견이다.

1.3.4 잡종강세육종

작물육종 역사상 또 다른 큰 사건은 잡종강세 육종기술의 탄생이다. 이 잡종강세 육종기술은 서로 다른 품종 또는 계통간 교잡을 통해 생산된 F1의 잡종식물체가 양친보다 왕성한 생육 상태를 나타내는 잡종강세 현상을 활용한 것으로서 종자의 상업화 시대를 가져온 주요 계기가 된 발견이다. 미국에서는 1940년대부터 옥수수의 일대교잡종(F1)을 상업적으로 재배하기 시작하였으며, 현재 주요 채소를 포함한 모든 타가수정 작물들이 일대교잡종 종자의 생산 판매를 통해 재배가 이루어지고 있다. 벼와 같은 자가수정 작물의 경우에도 이 기술을 활용하고 있다. 중국에서는 웅성불임을 일으켜 자가 수정을 방지한 후 인공수정을 통한 하이브리드(일

대교잡종) 벼종자를 생산하고, 이들의 재배를 통해 수량성을 높이는 잡종강세 육종기술을 이용하고 있다. 이러한 잡종강세육종기술은 농민들로 하여금 자가 채종된 종자를 일부 남겨서 재배하던 방식에서, 일대교잡종의 종자를 매년 종자회사로부터 구입하여 재배하는 새로운 종자 산업의 발달을 가져오게 하였다.

이와 같이 육종은 우리 인류를 발달시키고 유지시킨 엄청난 과학기술로서 인류가 문명을 만들기 이전부터 시작되었고 지금까지도 계속 발전되고 있는 인류생존의 필수 농업기술이다. 현재 우리가 먹는 대부분의 먹을거리는 이러한 육종연구 결과의 혜택으로 인한 것이라 할 수 있다.

이러한 육종기술은 크게 5단계의 획기적 발전을 거치게 되는데 분리육종-교배육종-돌연변이 육종-잡종강세육종-생명공학육종으로 구분할 수 있다. 우리는 현재의 생명공학육종 전단계를 전통육종이라고 구분해서 말하고 있지만 실질적으로는 생명공학육종도 육종기술의 발전과정의 일부라고 생각하면 될 것이다.

1.4 육종과 생명공학

지금까지 소개한 전통적인 육종기술의 성과는 실로 대단한 것으로, 선사시대부터 현대에 이르기까지의 폭발적인 인구증가와 수많은 병해충 및 불량환경을 극복하면서 우리 인류의 먹거리를 마련한 인류 역사상 가장 위대한 기술인 것이다. 그림 1-15는 선사시대로부터 시작된 육종기술의 결과 야생 잡초와 같던 식물들이 현재 우리가 주식으로 먹는 쌀과 옥수수로 변화된 것을 보여주고 있다. 만약 육종기술이 없이 그 당시의 형태로 현재까지 이용되었다면 우리 인류의 생존과 문명의 발달은 불가능했을 것이다.

<야생원종> <현재의 개량종>

그림 1-15 ◂◂ 전통육종의 성과; 쌀과 옥수수의 기원

특히, 교배육종의 경우 그 성과는 녹색혁명을 이룩하면서 인류의 생존에 지대한 기여를 하였다. 이러한 교배육종이 놀랄만한 성과를 낸 것은 유전자 재조합이라는 방식을 도입하였기 때문이다. 요즘 사회적 이슈로 논의되고 있는 유전자 재조합은 실지로 이 교배육종으로부터 시작되었다고 볼 수 있다. 다만, 교배를 통한 품종 육성은 유전자 수준에서의 정밀한 재조합이 아니라 교배친들이 가진 유전정보 전체의 재조합을 통하여 나타나는 결과를 이용하는 것이며, 인위적 교배가 가능한 근연 또는 원연작물 간에만 가능하다는 것이 다를 뿐이다. 그림 1-16은 전통적 교잡육종과

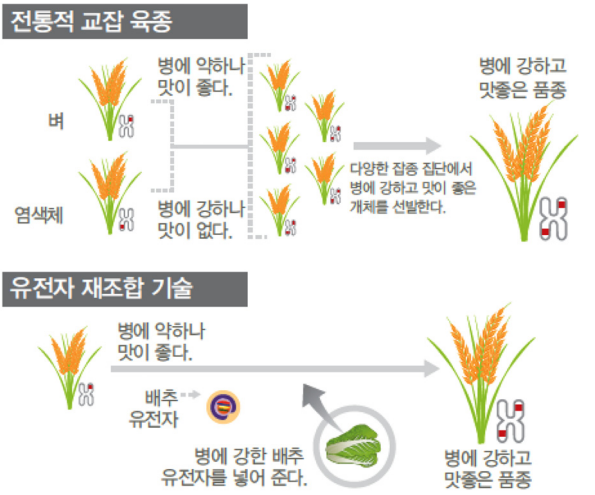


그림 1-16 ◂◂ 전통 교잡육종과 유전자 재조합 기술[1)]

1) Biosafety Vol. 15(GM작물의 세계)

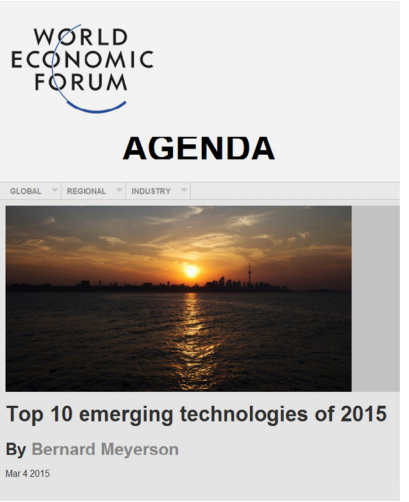
유전자 재조합에 의한 생명공학 육종의 차이를 설명하고 있다.

전통적인 교잡육종의 문제는 유전변이의 한계에 있다. 즉, 교배가 가능한 한정된 유전자원만을 사용하는 교배육종의 경우 지금까지 엄청난 성과를 거두면서 우리 인류의 먹거리를 해결해 주었지만, 기하급수적인 인구증가와 함께 기후변화에 따른 이상기후와 돌발병해충의 발생 등에 따른 식량의 폭발적 수요를 충족시키기에 부족하다는 것이 전문가들의 지적이다. 특히, 화석연료의 감소와 온실가스 발생 문제에 따른 바이오에너지 우선 정책에 따라 농산물이 바이오에탄올이나 바이오디젤 등 산업소재로 활용됨에 따라 이제 더 이상 기존의 전통육종으로는 인류의 농산물 소비량을 충족시키기 어렵다는 것이다.

이러한 시대적 요구에 따라 다양한 유용 유전변이의 창출이 가능한 생명공학 육종기술이 탄생하게 된 것이다. 생명공학육종 기술은 식물, 동물 또는 미생물의 유용 유전자를 대상 식물에 도입하여 우리 인류가 원하는 유용형질을 식물이 획득하는 유전자 재조합 기술인 것이다. 생명공학 육종기술은 전통육종기술과 조화를 이루어 1996년 처음으로 상업화 종자를 개발하여 재배가 시작되었으며 이후 지속적으로 재배면적이 확대되어 현재 상업화 초기보다 재배면적이 100배 이상 증가되는 등 이미 중요한 육종기술로 자리 잡고 있다

세계경제포럼(WEF, World Economic Forum)은 2015년에 전 세계적으로 사회, 경제 그리고 환경면에서 중대한 영향을 미칠 10대

첨단기술을 선정 발표하였는데 그중 하나가 생명공학 기술에 의한 제2의 녹색혁명이다(그림 1-17). 즉, 앞으로 환경을 보호하면서도 더 많은 식량과 생물소재를 생산하는 기술혁신이 필요하며, 이러한 환경 친화적 2차 녹색혁명은 첨단 생명공학 육종기술인 GM작물 개발 기술을 어떻게 활용하는가에 달려있다고 판단하고 있는 것이다.



세계경제포럼 선정 2015 떠오르는 10대 기술

1. Fuel cell vehicles
2. Next-generation robotics
3. Recyclable thermoset plastics
4. Precise genetic engineering techniques(정밀한 유전공학기술)
5. Additive manufacturing
6. Emergent artificial intelligence
7. Distributed manufacturing
8. 'Sense and avoid' drones
9. Neuromorphic technology
10. Digital genome

그림 1-17 ◂◂ 2015 세계경제포럼(WEF)이 선정한 사회, 경제, 환경에 영향을 미칠 세계 10대 첨단기술

CHAPTER

02 유전자변형기술의 발전

2.1 유전자변형기술의 발전 역사

유전자변형(Genetic modification) 기술은 생명공학기술을 이용하여 생물의 유전자 중 유용한 유전자를 분리하여 개량을 원하는 생물종에 인위적으로 도입함으로서 개발자가 원하는 특성을 갖도록 DNA의 일부를 변형시키는 기술이다. 이러한 유전자변형 기술로 만들어진 생물체를 유전자변형생물체(GMO)라고 부른다.

DNA는 세포 핵 속에 있는 염색체(chromosome)에 주로 존재하지만 미생물 세균의 경우에는 염색체 밖에도 존재하는데 이것을 플라스미드(plasmid)라고 한다. 식물체에는 미토콘드리아(mitochondria)나 클로로플라스트(chloroplast)에도 DNA가 존재한다. 초기의 유전자변형기술은 세균의 플라스미드에 있는 DNA를 잘라내고 여기에 다른 DNA 조각을 삽입하여 붙이는 방법에서 시작되었다. 1970년 테민과 볼티모어(H. M. Temin and D. Baltimore)는 바이러스 RNA의 가역적 전사효소(reverse transcriptase)를 발견함으로서 DNA 조각을 떼고 붙이는 유전자조작(genetic engineering)의 가능성을 보여주었다. 1972년 버그(P. Berg)는 최초로 재조합(recombinant) DNA분자를 만들었다. 이어 1973년에는 보이어와 코헨(H. Boyer

and S. Cohen)이 여러 가지 다른 세포에서 유전자조작 DNA를 만들어 냈으며, 인류 역사상 최초로 유전자조작에 의한 체세포 변종 토마토와 감자가 이 해에 만들어 졌다. 1977년에는 상거(F. Sanger)가 유전체 서열을 최초로 해독하였으며, 1980년에는 고돈과 루들(J. Gordon and F. Ruddle)이 최초의 유전자전이(transgenic) 동물(마우스)을 탄생시켰으며 미국에서는 유전자변형 미생물의 특허가 승인되었다. 1983년에는 아그로박테리움(Agrobacterium)을 이용하여 유전자전이 식물체가 최초로 만들어 졌으며, 1985년에는 GM돼지(Beltsville Pigs)와 GM쥐(Oncomouse)가 탄생했다. 이 GM쥐는 1988년 세계 최초로 유전자전이 동물로 특허를 받았다. 1990년 GM미생물로 만든 응유효소 카이모신(Chymosin)이 치즈 제조에 사용하도록 승인됨으로서 GM식품의 상용화가 시작되었다. 표 2-1은 유전자변형기술의 발전 역사를 간추린 도표이다.

표 2-1 생명공학기술의 발전 역사[1)]

년 도	내 용
기원전 4000~2000년	• 이집트에서 효모를 사용해 빵과 맥주의 발효 시작 • 수메리아, 중국, 이집트에서 치즈를 생산하고 포도주를 발효시킴 • 대한해협연안 원시토기문화시대의 발효기술 발전
기원전 500년~서기 100년	• 한반도와 동북아시아의 양조기술, 염장기술, 두장(콩발효)문화의 발달 • 중국에서 최초 항생물질인 곰팡이가 핀 두부로 종기를 치료 • 최초 살충제가 국화에 살포됨

1) 2003 생명공학백서(미국생물산업협회에서 발간한「Bio Editors' and Reporters' Guide to Biotechnology 2002-2003」의 'A Time Line of Biotechnology' 참조)

년 도	내 용
1663년	Hooke, 세포의 존재를 발견
1675년	Leeuwenhoek, 박테리아를 발견
1761년	Koelreuter, 다른 종의 농작물의 성공적인 이종교배를 보고
1797년	Jenner, 아이들에게 천연두를 막기 위한 바이러스성 백신을 접종
1830년	단백질 발견
1833년	최초로 효소가 발견되고 분리됨
1835~ 1855년	• Schleiden와 Schwann, 모든 유기체는 세포들로 구성되어 있다고 제안 • Virchow, 모든 세포는 세포에서 생겼다고 선언
1857년	Pasteur, 미생물들이 발효를 유발한다고 제안
1859년	찰스 Darwin, 자연 도태의 진화론을 발표(1800년대 후반 유전학의 무지에도 불구하고 선택된 부모와 도태된 다양한 자손에 대한 개념은 동식물 사육사들에게 매우 큰 영향을 줌)
1865년	• 유전학의 과학적 연구 시작 • Gregor Mendel, 완두를 연구하여 유전법칙에 의해 예측 가능하게 유전적 특징이 부모로부터 자손에게 물려진다는 점을 발견함
1870~ 1890년	• Darwin의 이론을 이용하여 면화를 이종교배하고 우성의 수 백 가지의 품종을 개발함 • 최초로 농부들이 수확량을 늘리기 위해 농지에 질소고정 박테리아 미생물을 섞어 넣음 • William James Beal, 최초로 실험실에서 실험용 옥수수 잡종을 생산
1877년	Koch, 박테리아를 염색하고 동종확인을 위한 기술 개발
1879년	Fleming, 후에 염색체라 불려지는 세포핵 안쪽의 봉모양의 염색질을 발견
1900년	초파리가 유전연구 초기에 사용됨
1902년	면역학이라는 용어가 처음으로 나타남

년 도	내 용
1906년	유전학 용어가 소개됨
1911년	Rous, 최초로 암을 유발하는 바이러스 발견
1915년	세포를 괴멸하는 세포 Phages(박테리아성 바이러스)가 발견됨
1919년	최초로 생명공학의 단어가 출판물에 사용됨
1920년	Evans와 Long, 인간성장 호르몬이 발견
1928년	• Alexander Fleming, 항생물질인 페니실린 발견 • 유럽에서 조명충 나방제어에 대한 소규모의 Bacillus thuringiensis (Bt) 테스트가 시작됨
1933년	1920년대 Henry Wallace에 의해 개발된 잡종옥수수가 상업화됨
1938년	분자 생물학이란 용어가 생김
1941년	유전공학이란 용어가 폴란드 Lwow의 기술학교에서 효모복제에 관한 강의를 맡고 있는 덴마크의 미생물학자 A. Jost에 의해 최초로 사용됨
1942년	• 전자 현미경이 박테리아를 감염시키는 bacteriophage를 규명하고 확인하기 위해 사용됨 • 페니실린을 미생물 안에서 생산함
1944년	• Avery와 그 외 다른 사람들에 의해 DNA가 유전정보를 운반한다는 점이 입증됨 • Waksman, 결핵에 효과적인 항생제인 streptomycin을 분리(추출)
1946년	새로운 타입의 바이러스를 형성하기 위해 다양한 바이러스로부터의 유전물질이 결합할 수 있다는 일종의 유전자 재결합이 발견됨
1947년	McClintock, 옥수수에서 소위 움직이는 유전자(jumping genes)이라 불리는 전이요소를 발견
1951년	냉동정액을 사용한 가축의 인공수정이 성공적으로 수행됨
1953년	과학저널 Nature는 현대적 유전학의 출발을 상징하는 DNA의 이중 나선구조를 묘사한 James Watson과 Francis Crick의 원고를 출판함

년 도	내 용
1955년	핵산 합성에 관한 효소가 처음으로 추출됨
1956년	Kornberg, DNA 복제의 이해를 이끄는 효소 DNA 폴리메라아제(polymerase)를 발견
1958년	• 겸상 적혈구 빈혈증이 단일 아미노산의 변화 때문에 발생한다고 밝혀짐 • DNA가 처음으로 시험관에서 만들어짐
1959년	조직 살균제가 개발되었으며, 단백질 생합성의 첫 단계가 그려짐
1950년대	• 바이러스 증식억제 물질(interferons) 발견 • 최초 합성 항생 물질 개발
1960년	기초 시냅시스를 이용해 잡종 DNA-RNA 분자가 만들어졌으며, Messenger RNA발견
1963년	노르만인 Borlaug에 의하여 개발된 신품종 밀에 의해 생산량이 70% 상승함
1964년	필리핀의 국제 쌀 연구소는 새로운 품종을 통해 녹색 혁명을 시작
1965년	해리스와 Watkins는 성공적으로 생쥐와 사람 세포를 융합시킴
1966년	유전정보가 해석되고 일련의 3개의 뉴클리오티드가 20개의 아미노산 각각을 결정한다고 밝힘
1970년	유전물질을 자르고 잇는 제한 효소의 발견으로 유전자 복제의 장을 염
1971년	최초로 유전자 합성이 완성됨
1972년	• 인간의 DNA 구성이 침팬지와 고릴라의 DNA와 99% 유사함이 발견됨 • 최초로 배이식(胚移植)이 시도됨
1973년	Stanley Cohen와 Herbert Boyer, 제한효소와 리가제(ligases)를 사용해서 DNA를 자르고 붙이는 기술과 박테리아에서 새로운 DNA를 복제하는 기술을 완성함
1977년	최초로 박테리아에서 인간유전자 구현

년 도	내 용
1978년	재조합 인간 인슐린이 최초로 생산됨
1979년	최초로 인간성장 호르몬이 합성됨
1970년대	폴리메라아제(polymerases)의 발견 및 뉴클리오티드(nucleotides)의 빠른 나열기술 완성
1980년	단백질 인터페론(바이러스 증식억제 물질)의 특징을 규정하는 인간 유전자를 박테리아안에서 성공적으로 밝혀냄
1981년	중국의 과학자가 최초의 복제 물고기 금잉어를 만듬
1982년	• 가축을 위한 유전자 재조합 DNA 백신 개발 • 최초의 유전자 변형식물인 피튜니아 생산
1983년	• 폴리메라아제(polymerase) 연쇄반응(PCR) 기술이 소개 • TI 플라스미드에 의한 식물 세포들의 유전학적인 변형이 수행됨 • 최초로 피튜니아 식물을 통해 유전자변형식물의 새로운 특징이 자손에게 전달됨을 확인함
1984년	• DNA를 이용한 유전자 지문검색 기술이 개발됨 • HIV 바이러스의 전체 게놈이 복제되고 나열됨
1985년	최초로 곤충과 박테리아, 바이러스에 저항력이 있는 유전자 이식 식물이 시험됨
1986년	• 유전자 재조합 B형 간염 백신 최초 개발 • 최초의 유전공학 항암치료제 인터페론 생산 • 유전자 이식식물(담배)의 실제 실험이 수행됨
1987년	• 최초로 실제실험을 거친 항바이러스 토마토가 승인됨 • 농작물의 서리형성을 억제하는 유전자 변형 박테리아인 Frostban이 캘리포니아에서 딸기와 토마토 작물에 실지실험 되었고, 이러한 유전자 재조합 박테리아의 외부 실험도 승인됨
1988년	합성세제에 사용할 수 있는 항표백 단백질 분해효소를 만들 수 있는 연구권한이 부여됨
1989년	• 최초로 유전자변형 해충방지 면화의 실지실험 승인 • 식물 게놈 프로젝트 시작

년 도	내 용
1980년대	• 유럽에서 유전자 재조합 동물백신의 사용 승인 • 기름 청소에 미생물을 이용한 생화학적 치료기술 사용
1990년	• 미국 최초의 유전자재조합 식품으로서 치즈제조에 쓰이는 인공적으로 제조된 chymosin 효소인 Chy-Max™이 소개됨 • 해충에 강한 옥수수인 Bt 옥수수 생산 • 영국 최초로 유전자변형 효모식품이 승인됨
1992년	미국 FDA는 유전자 이식 음식이 유전적으로 위험하지도 않고 특별한 규정도 필요없다고 선언
1994년	미국 FDA, 생명공학으로 만들어진 FLAVR SAVR™ 토마토를 승인
1995년	암 정복을 위해 병원에 면역시스템 모듈, 유전자 재조합 항체형성과 같은 유전자 치료가 도입됨
1997년	해충방지 농작물인 Roundup Ready™ 콩과 Bollgard™ 해충방지 면화와 같은 작물이 상업화됨
1998년	• 인간 배아줄기세포선이 확립됨 • 30,000개의 이상의 유전자 위치를 보여주는 인간 게놈지도의 초안 완성
1990년대	미국에서 농약을 기본으로 한 생명공학 제품판매가 승인됨
2000년	최초로 애기장대(학명 Arabidopsis thaliana)의 게놈지도가 개발됨
2001년	• 최초로 쌀의 게놈지도와 땅콩의 종합적 분자지도가 완성됨 • 완성된 인간게놈배열을 과학전문지에 출판함
2003년	46개 염색체의 위치와 서열 정보를 제공하는 인간게놈프로젝트 완성

2.2 유전자변형기술

2.2.1 미생물 유전자변형 기술

유전자변형기술은 대장균과 같은 세균들이 염색체 DNA 말고도 플라스미드(plasmid)라고 불리는 고리 모양의 작은 DNA를 가지고 있다는 것을 발견하면서부터 시작되었다(그림 2-1). 박테리아의 염색체 DNA와는 달리, 플라스미드는 다른 박테리아로 옮겨갈 수도 있고 다른 개체로부터 받을 수도 있다. 이러한 특성을 이용하여 플라스미드를 추출한 후 그 플라스미드에 외래 유전자를 삽입한 유전자 운반체(Vector)를 동물이나 식물의 염색체에 주입하여 유전자 변형 생물체를 개발할 수 있는 것이다. 이 유전자 운반체인 벡터를 식물의 경우 유전자총이나 아그로박테리아를 이용하고, 동물의 경우에는 미세주입법 등을 통해 도입시키는 것이다.

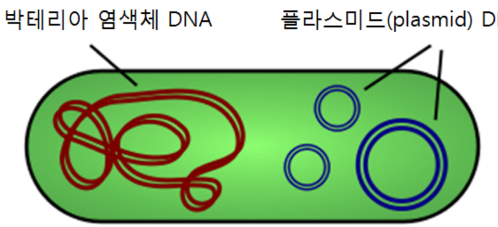


그림 2-1 ◂◂ 박테리아의 플라스미드

대장균에서 플라스미드를 추출한 뒤, 유전자 가위로 불리는 제한효소로 이용하여 플라스미드 일부를 잘라내고, 그 부위에 원하는 외래 유전자를 유전자 접착제인 라이게이제(ligase)로 결합시킨다. 외래 유전자와 결합된 플라스미드를 대장균이 들어 있는 배지에 넣고 배양시키면, 플라스미드가 다시 대장균 속으로 이동

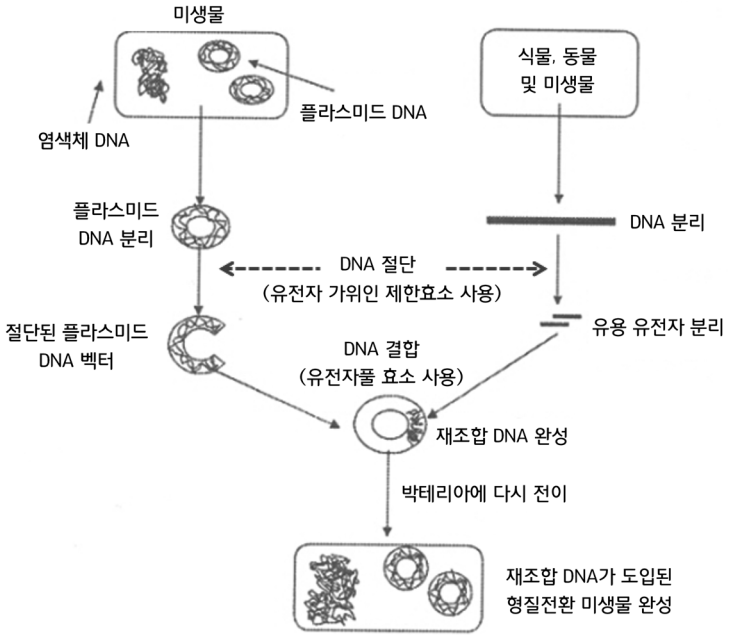


그림 2-2 ◂◂ 미생물 세균 세포내의 유전자 재조합 과정[1)]

1) Lee, C.H., Chapter 5. Food Biotechnology, in Food Science and Technology, Ed. G. Campbell-Platt, Wiley-Blackwell(2009)

한다. 이렇게 와래 유전자가 삽입된 플라스미드를 보유한 대장균을 배양하면 원하는 물질을 대량생산 할 수 있다(그림 2-2). 이러한 방법으로 인슐린을 생산하는 사람의 유전자를 박테리아에 도입한 후 인공 배양을 통해 당뇨병 치료제로 쓰이는 인슐린을 대량생산하는 등 다양한 고가의 의료용 단백질 생산이 현실화 되고 있다.

2.2.2 동물 유전자변형 기술

형질전환 동물이란 인위적으로 유전형질이 조작된 동물을 말하는데, 지금까지 수만 마리의 형질전환 동물들이 생산되었으며, 이 중 몇몇은 특허동물로 등록되었다. 형질전환 동물을 생산하기 위해서는 그림 2-3에서 보는 바와 같이, 우수한 유전자들을 확보하고 이들을 유전자변형기술로 변형한 유전자를 수정란의 전핵에 미세주입하고 대리모에 이식하여 새끼를 얻는 수정란 조작기술이 사용된다.

형질전환동물을 생산하기 위하여 재조합 유전자를 수정란의 게놈(genome)에 삽입하는 방법으로는 미세주입법(Microinjection), 유전자 변형된 배아줄기세포를 이용하는 방법(Blastocyst Injection of Genetically Modified ES Cells), Retroviral Vector를 이용하는 방법, 정자를 이용하는 방법(Sperm-Mediated Gene Transfer), 핵이식방법(Nuclear Transfer) 등이 있다.

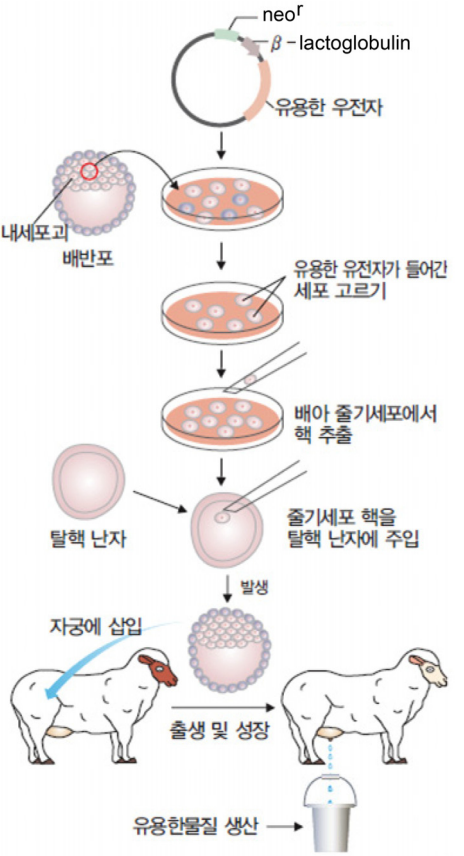


그림 2-3 ◂◂ 동물 형질전환을 이용한 유용물질 생산[1)]

이와 같은 형질전환 동물 생산기술은 보다 효율적인 생산능력을 가진 가축 개량과 함께 고가의 의료용 단백질을 대량 생산하거

1) Biosafety(이홍우, 2010.12)

나 인체 이식을 위한 이종장기 생산 등 고부가가치 형질전환동물 생산에 활용되고 있다. 특히, 형질전환 동물을 이용하여 의학적으로 유용한 단백질을 대량으로 생산하는 기술은 '바이오파밍(Biopharming)'이라는 명칭으로 바이오의약품 산업에 새로운 분야를 형성하고 있다. 현재 토끼, 돼지, 염소, 양, 소 등 대부분의 가축종에서 형질전환을 통해 유즙으로 의약품 가치를 지닌 단백질을 발현하는 것이 보고되었으며 이미 실용화가 진행되고 있다. 또한 인공장기 생산용 형질전환동물에 관한 연구도 활발히 진행되고 있어, 지구상의 장기이식을 기다리는 많은 환자들이 조만간 이용할 수 있을 것으로 기대되고 있다(그림 2-4).

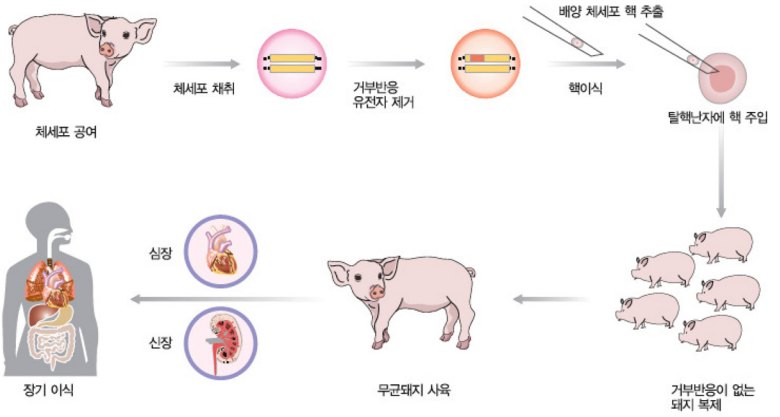


그림 2-4 ◂◂ 형질전환 돼지를 이용한 장기이식[1)]

1) Biosafety(이홍우, 2010.12)

2.2.3 식물 유전자변형 기술

유전자를 식물체에 도입하는 방법으로는 원형질체 융합법(Electroporation), 유전자총법(Particle Bombardment), 침지법(Dipping), 미세주사법(Microinjection) 등 여러 가지 방법이 사용되고 있다. 반면, 상업용 GM작물 개발에는 가장 안정되고 확실한 아그로박테리움 이용 유전자재조합 방법을 사용하고 있다(그림 2-5, 2-6).

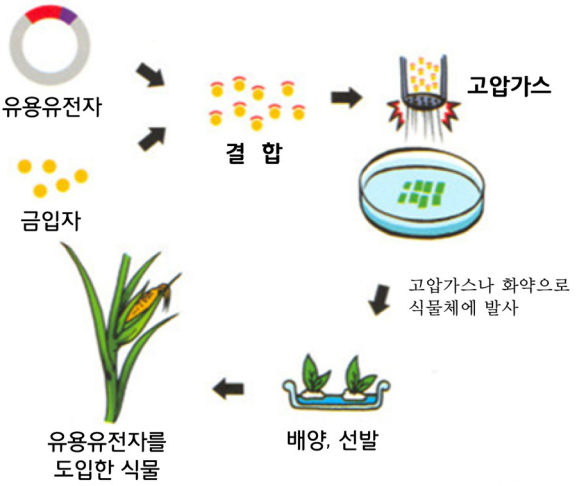


그림 2-5 ◂◂ 유전자총 이용 식물형질전환 기법

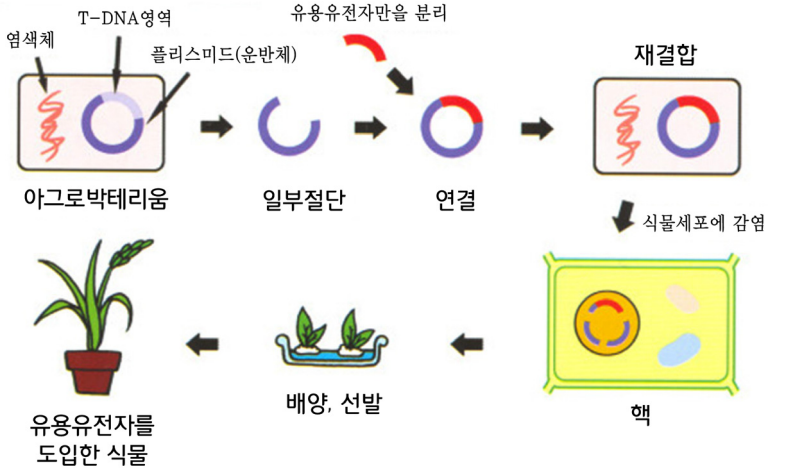


그림 2-6 ◂◂ 아그로박테리움 이용 식물 형질전환 기법

식물 유전자재조합 기술은 지극히 자연적인 "식물과 미생물의 공존현상"으로부터 유래되고 이를 과학적으로 발전시킨 것이다. 아그로박테리움을 이용한 형질전환방법의 개발은 토양 내에 존재하는 미생물인 아그로박테리움이 식물체에 자신의 유전자를 이식시키는 것을 발견함으로서 시작되었다. 토양 미생물인 아그로박테리움은 자신이 살고 있는 토양의 양분이 부족해지면 식물에 침투하여 기생하는 특성을 가지고 있다. 이때, 이들은 자신이 보유한 플라스미드 DNA의 일부(T-DNA라고 불리는 부분)를 절단하여 식물의 유전체 내에 도입하여 생장조절제 등 자신이 필요로 하는 양분을 생산하도록 만든다. 아그로박테리움의 유전자가

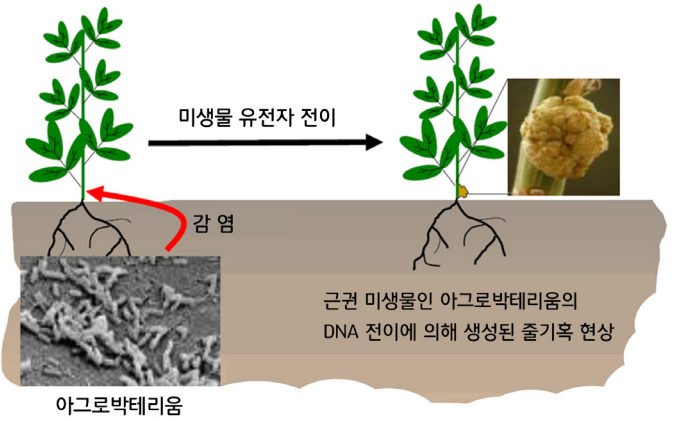


그림 2-7 ◂◂ 아그로박테리움에 감염되어 식물의 줄기에 Crown Gall(혹)이 생기는 과정

이식되는 과정에서 식물생장조절제의 작용에 의해 세포분열이 촉진되면서 식물체의 줄기 혹은 뿌리에 크라운 골(Crown Gall)이라는 비정상적인 혹이 생긴다(그림 2-7). 생명공학자들은 이러한 자연현상에 대한 연구결과 이식되는 아그로박테리움의 Ti 플라스미드 내 일부 DNA의 양 끝에 존재하는 약 25bp[1]의 DNA염기서열이 DNA 단편을 식물체에 삽입시키는 주요 기작이라는 것을 밝혀냈다. 이 같은 자연적 유전자 이식현상을 응용한 것이 식물 유전자 재조합기술이다. 먼저 아그로박테리움의 플라스미드 중

1) bp; base pair의 약자로서 DNA의 이중나선 구조에서 서로 쌍을 이루는 2개의 nucleotide들을 말함. Adenine염기는 Thymine 염기와 2중 수소 결합을, Guanine 염기는 Cytosine과 3중수소 결합을 이룸.

"크라운 골(혹)"을 만드는 유전자(T-DNA 영역)를 제거하고 목적하는 유용유전자를 연결시켜서 아그로박테리움에 다시 넣은 후, 이를 식물세포에 인위적으로 감염시켜 유용유전자를 식물세포 내로 도입하는 것이다(그림 2-8). 이러한 과정을 통해 유용유전자를 식물세포의 염색체에 안정적으로 삽입함으로서 우리가 필요로 하는 유전자재조합 식물체를 만들 수 있게 되는 것이다. 즉, 지극히 자연적 현상인 아그로박테리움과 식물간의 유전자재조합 현상을 과학적으로 밝히고 응용하여 현재 우리가 사용하는 생명공학육종 기술인 "GM작물 개발기술"이 개발된 것이다.

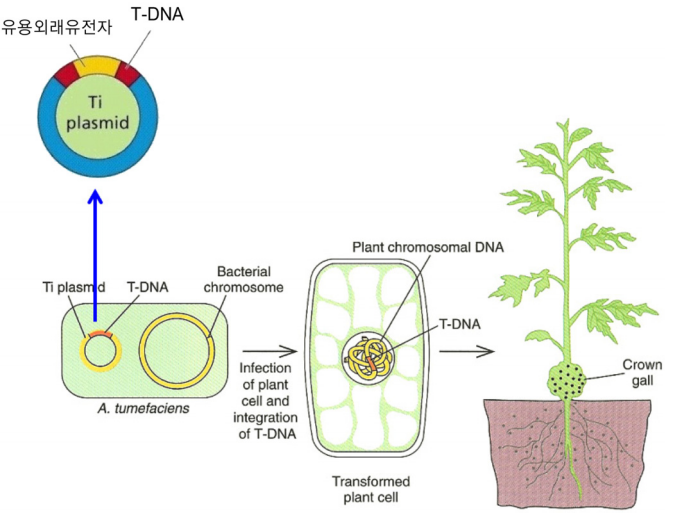


그림 2-8 ◂◂ 아그로박테리움의 Ti 플라스미드를 이용한 외부 유전자 도입 모식도

2.3 유전자변형기술의 이용

2.3.1 GM의약품 생산

유전자변형 기술이 가장 먼저 도입된 분야는 농업이 아니라 의학 분야였다. 가장 잘 알려진 성과는 유전자변형을 통한 사람의 인슐린 생산이다. 인슐린은 혈당을 조절하는 매우 중요한 호르몬성 단백질로서 만약 인슐린이 제대로 기능하지 못하면 당뇨병을 일으키게 되는 것이다. 따라서 당뇨병 환자의 경우 지속적으로 인슐린을 투여하게 된다. 하지만 1970년대까지만 하더라도 인슐린의 인공합성이 어려워서 당뇨병 환자들은 돼지나 소와 같은 동물의 췌장에서 뽑아낸 인슐린을 사용해야 했다. 하지만 이렇게 추출되는 인슐린은 값도 비쌌고 인간과 맞지 않는 경우도 많았다. 이러한 시점에 제네텍(Genetech)이라는 생명공학회사가 유전자변형기술을 이용하여 대장균으로부터 인슐린의 인공 합성을 시도하였다. 즉, 사람의 인슐린 유전자를 재조합기술을 이용하여 대장균에서 추출한 플라스미드 DNA에 삽입한 후 사람 인슐린 유전자가 들어 있는 플라스미드를 다시 대장균 속으로 집어넣은 후 인공배지에서 배양하여 대장균이 인슐린 단백질을 만들어내게 한 것이다(그림 2-9).

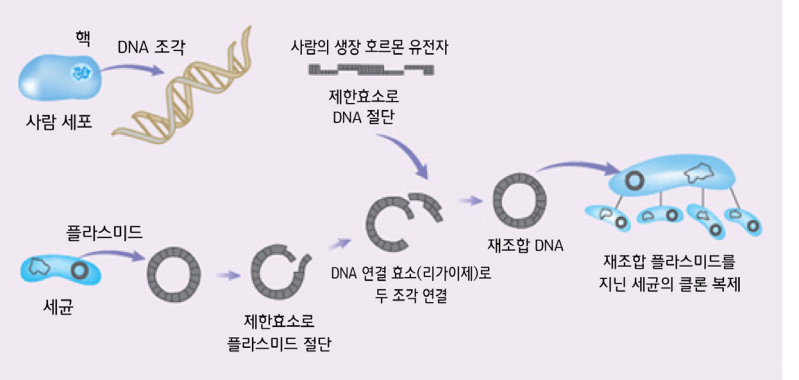


그림 2-9 ◂◂ 유전자재조합 기술을 이용한 인슐린의 생산[1)]

당시 대장균이 만들어낸 인슐린을 바로 사용하기가 적절치 않아 정제 과정을 통해 1980년대 초반 드디어 사람이 사용할 수 있는 재조합 인슐린단백질을 생산하고 시장에 선을 보이게 된다. 이 인슐린은 동물의 췌장에서 뽑아낸 인슐린에 비해 부작용이 나타날 가능성도 적었고 값도 저렴했기 때문에 당뇨 환자들의 건강을 유지하는데 크게 기여하였다. 이러한 재조합 인슐린의 성공 이후 많은 의약제품들이 유전자변형기술을 통해 만들어지고 있어 의학 발전과 인류 건강에 많은 기여를 하고 있다.

1) Biosafety(2009. 8, 이은희)

2.3.2 GM미생물을 이용한 효소 생산

식품이나 산업용으로 사용되는 효소(enzyme)는 전통적으로 식물이나 동물 조직에서 추출 농축되었다. 당분을 분해하는 아밀라아제(amylase)는 맥아에서, 치즈 응유효소 렌닌(renin)은 어린 돼지의 창자에서 구했다. 그러나 20세기 미생물학의 발달로 대부분의 산업용 효소들이 미생물로부터 만들어 지게 된다. 이들 효소를 효과적으로 생산하기 위해 미생물의 돌연변이 기술이 발달하였으며 화학약품이나 방사선 처리로 효소 역가가 높은 변이체를 만들었다. 그러나 무작위적 돌연변이 현상에서 원하는 변종을 찾아내는 것은 확률적으로 대단히 낮고 좋은 결과를 얻기 어려웠다. 생명공학 기술이 발달하면서 특정 미생물의 유전체에 특정 기능을 가진 외부 유전자를 삽입함으로서 효소 생산 능력을 획기적으로 향상할 수 있게 되었다. 1980년 치즈 응유효소 카이모신(chymosin)을 GM곰팡이(Aspergillus niger)에서 대량 생산하면서 GM미생물을 이용한 식품 및 산업용 효소의 생산이 본격화 되었다. 현재 상업적으로 생산 유통되는 효소의 대부분이 GM미생물에 의해 생산되고 있다(표 2-2).

표 2-2 GM미생물로 만든 상업용 식품 효소의 예[1)]

Enzyme	Production organism	식품 응용
Alpha-acetolactate decarboxylase	*Bacillus amyloliquefaciens or subtilis*	음료
Alpha-amylase	*Bacillus amyloliquefaciens orsubtilis*	베이킹, 음료
Aminopeptidase	*Trichoderma reesei orlongibrachiatum*	치즈, 유제품
Arabinofuranosidase	*Aspergillus niger*	음료
Beta-glucanase	*Bacillus amyloliquefaciens orsubtilis*	음료
Catalase	*Aspergillus niger*	달걀 제품
Chymosin	*Aspergillus niger*	치즈
Cyclodextrin-glucosyl transferase	*Bacillus licheniformis*	전분
Glucoamylase	*Aspergillus niger*	음료, 베이킹
Glucose isomerase	*Streptomyces lividans*	전분
Glucose oxidase	*Aspergillus niger*	베이킹
Hemicellulase	*Bacillus amyloliquefaciens orsubtilis*	베이킹, 전분
Lipase, triacylglycerol	*Aspergillus oryzae*	지방
Maltogenic amylase	*Bacillus amyloliquefaciens orsubtilis*	베이킹, 전분
Pectin lyase	*Aspergillus niger*	음료
Pectinesterase	*Trichoderma reesei or longibrachiatum*	음료
Phospholipase A	*Trichoderma reesei or longibrachiatum*	베이킹, 지방
Phospholipase B	*Trichoderma reesei or longibrachiatum*	베이킹, 전분
Polygalacturonase	*Trichoderma reesei or longibrachiatum*	음료
Protease	*Aspergillus oryzae*	치즈
Pullulanase	*Bacillus licheniformis*	전분
Xylanase	*Aspergillus niger*	베이킹, 음료

1) Lee, C.H., Chapter 5. Food Biotechnology, in Food Science and Technology, Ed. G. Campbell-Platt, Wiley-Blackwell(2009)

2.3.3 GM식물 생산

유전자변형기술의 발전으로 농업에 생명공학시대가 전개되는 결정적 계기를 마련하게 되었다. 즉, 작물재배에서 많은 어려움을 겪으면서도 기존 육종으로는 해결이 불가능하던 문제들을 해결하는 엄청난 성과를 이루게 된 것이다. 현재 가장 많이 상업화 재배되고 있는 두 종류의 GM작물인 “제초제내성 GM작물”과 “해충저항성 GM작물”은 유전자변형기술이 어떻게 우리에게 혜택을 주었는지를 잘 보여준다.

(1) 제초제내성 GM작물

제초제내성 GM작물은 잡초와의 전쟁에서 인간이 승리할 수 있게 만든 대표적인 생명공학작물이다. 제초제내성 GM작물은 특정 제초제 성분에서 생존이 가능한 토양 미생물로부터 제초제내성 유전자를 분리하여 작물에 도입하여 만든 것이다. 제초제내성 GM작물은 잡초들과 작물이 함께 자랄 때 특정 제초제를 살포하여 잡초들만 효과적으로 제거할 수 있게 만든 그야말로 노동절감형 작물인 것이다. 즉, 작물을 재배 시 무수히 많은 잡초를 작물에 피해 없이 제거하기 위해서는 일일이 손으로 제거 하거나 작물에 피해를 안주고 특정 잡초만 제거할 수 있는 선택성 제초제를 여러 번에 걸쳐 살포하여야 하는 등의 어려움을 해결해 준 것이다. 제초제내성 GM작물의 경우, 특정 제초제를 살포함으로서

재배하는 작물에는 전혀 피해가 없이 모든 잡초를 한 번에 모두 제거함으로서, 노동력 절감, 생산량 증대, 농약사용량 저감 등 농민들에게 경제적 환경적 혜택을 주게 된 것이다(그림 2-10). 이렇게 해서 만들어진 제초제내성 콩, 옥수수, 면화, 사탕수수 등은 생산비 절감 및 생산량 증대를 통해 농민들에게 많은 혜택을 줌과 동시에 필요한 수요량을 적시에 공급할 수 있게 됨으로서 농산물 수급과 의류, 사료 및 식품산업의 발전에 막대한 기여를 하고 있다. 우리나라의 경우도 농사에서 가장 힘든 작업은 잡초 제거인 것을 보면 이 제초제내성 생명공학작물의 유용성과 필요성은 세계 모든 국가에 적용되는 것이다.

<이 전>

<이 후>

그림 2-10 ◂◂ 제초제 내성 GM콩

(2) 해충저항성 GM작물

다음으로 소개할 유전자변형기술 적용사례는 토양미생물인 바실러스 튜린겐시스(*Bacillus thuringiensis*, *Bt* 박테리아로 불리고 있음)의 유전자를 도입한 해충저항성 GM작물의 개발이다. *Bt* 박테리아는 특정 곤충에 대하여 살충 효과를 내는 Cry라는 독소 단백질을 만들어 낸다. Cry단백질은 면화에 해를 입히는 면화씨벌레, 옥수수를 갉아먹는 조명나방의 애벌레 등의 소화관에서 알칼리성 소화액에 의해 분해되면서 소화관에 구멍이 뚫어 해충을 죽게 만든다. Cry단백질을 생산하는 유전자(*Bt* 유전자)를 도입하여 만든 유전자변형작물이 *Bt*옥수수, *Bt*면화 등이다. *Bt* 독성물질은 식물에서 생산될 때에는 독성이 없는 전구물질이었다가 곤충의 내장과 같은 알칼리 상태에서 활성화되면 독성을 나타내게 된다. 포유류의 위는 강한 산성 상태이므로 독성 전구물질이 활성화되지 않고 파괴되어 버린다. 그래서 *Bt* 독성물질이 인간을 포함한 포유류에는 조금도 해가 없다. 실제로 바실러스 튜린겐시스 미생물은 프랑스에서 유기농약 생물제제로 이미 이용되고 있어 그 살충효과와 함께 인체에 대한 안전성이 공식적으로 인정된 물질이다. 해충저항성 GM작물 개발로 농민들은 해충으로부터 수확량 손실을 방제할 수 있게 되었고 화학 살충제의 양을 상당히 줄일 수 있게 되었다. 특히 옥수수 해충의 경우 옥수수대에 해충이 파고들어 농약으로도 방제가 불가능하였는데 해충저항성 GM옥수수 개발로 옥수수 수확량이 크게 증가하였다(그림 2-11, 2-12).

<재래종 옥수수> <해충저항성 *Bt* 옥수수>

그림 2-11 ◂◂ 옥수수대에 파고들어 피해를 입히는 옥수수 해충

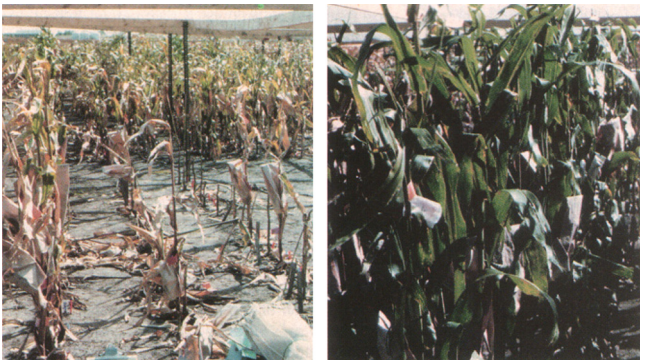


그림 2-12 ◂◂ 일반옥수수(좌)와 해충저항성 GM옥수수(우)

<아플라톡신> <푸모니신>

그림 2-13 ◂◂ 옥수수에 오염된 곰팡이 독소 아플라톡신(Aflatoxin)과 푸모니신(fumonisin)

더욱이, 이 해충저항성 옥수수의 경우 발암물질로 알려진 곰팡이 독소 "아플라톡신(Aflatoxin)"과 "푸모니신(fumonisin)"의 감염율이 일반 옥수수에 비해 70%~90%나 줄어든다고 한다. 아플라톡신과 푸모니신은 해충에 상처를 입은 옥수수에 기생하는 곰팡이(*Aspergillus* 또는 *Fusarium*)에 의해 만들어 지므로 해충의 피해가 많은 일반 옥수수에서 곰팡이 독소의 감염이 심한 것이다 (그림 2-13).

국제연합 식량농업기구(FAO)에 따르면, 현재 전 세계에서 생산되는 식량 작물의 25%가 병충해의 피해를 보고 있으며, 이로 인해 유실되는 식량 자원은 연간 5억 톤에 달한다고 한다. 우리나라의 연간 곡물 소비량이 2천만 톤에 달한다는 것을 고려해볼 때 실로 엄청난 식량자원의 손실인 것이다. 따라서 해충저항성 GM작물은 식량자원의 보존에 큰 역할을 하고 있는 것이다. 실제로 남아프리

카에서 기존의 재래종 옥수수와 Bt옥수수를 재배한 결과, Bt옥수수가 기존의 옥수수보다 적게는 21%에서 많게는 62%까지 높은 생산량을 보였다고 한다. 이밖에도 유전자재조합기술을 이용하여 농작물의 생산량 증대와 더불어 불량환경저항성, 품질개선, 고부가 산업소재 생산 등에 사용되는 다양한 GM작물들이 개발되고 있다.

아쉬운 사실은 미생물을 이용한 의학용 유전자재조합기술에 대해서는 우려와 반대보다는 격려와 칭찬위주의 관심이 대부분인 반면, 우리의 먹거리를 책임지는 유전자재조합 작물개발에 대해서는 과학적으로 검증되지 않은 지나친 우려와 반대의견으로 많은 국민들에게 막연한 두려움을 야기 시키고 있다. 유전자재조합기술을 이용한 의약품 생산용 GM작물 개발이 활성화 되는 이 시점에서 우리는 아직도 농업생명공학의 가치를 제대로 인식하지 못하고 있다. 우리 농업이 외국의 선진농업처럼 첨단산업화가 되려면 유전자재조합기술의 적극적인 활용이 절실히 필요한 것이다.

CHAPTER

03 유전자변형(GM) 작물의 개발 현황

GM작물이 개발되어 실질적으로 상업화된 시점은 1996년으로 보고되고 있다. 당시 상업용으로 재배되기 시작한 최초의 GM작물은 현재에도 가장 많이 재배되고 있는 제초제내성 작물과 해충저항성 작물이다. GM작물의 재배를 통해 농민들은 농약 사용과 노동력을 줄일 수 있게 되었고 생산비가 절감되고 수확량이 늘어 농가 소득이 증대하게 되었다. 이로 인해 농민들은 GM작물 재배 면적을 점점 더 확대하기 시작했다. 이렇듯 1세대 GM작물은 소비자 보다는 주로 생산자에게 혜택을 주도록 개발되었다. 이후 영양성분 개선 등 농산물의 품질을 높이거나 저장성을 높인 GM작물이 생산되면서 소비자와 가공유통업자들에게도 혜택을 주는 2세대 GM작물 개발로 발전되었다. 최근에는 고가의 의약품이나 보다 환경 친화적 산업소재를 식물로부터 생산하는 식물공장 개념의 3, 4세대 GM작물이 활발히 개발되고 있다. 이러한 3, 4세대 GM작물은 농작물에 새로운 부가가치를 창출함으로서 생산자, 기술수요자, 소비자 모두에게 혜택이 돌아가 그 경제적 가치가 수직 상승할 것으로 예측되고 있다. 즉. 생산 농가에는 고소득 작물로, 소비자에게는 저렴한 가격과 보다 환경 친화적인 생활소비재 공

급으로, 기술 수요자인 산업체에는 새로운 생물 산업을 창출할 수 있는 신소재 제공의 혜택을 부여하는 것이다. 이렇듯, GM작물은 생산량 증대를 통한 안정적인 식량 확보의 기능을 넘어서, 기후변화 및 화석연료 고갈에 따른 미래 글로벌 문제해결과 동시에 농업을 단순한 먹거리 생산에 필요한 1차 산업에서 고부가 친환경 산업소재를 생산하는 첨단 융복합산업으로 확대시키는 전기를 마련해 주고 있다.

그림 3-1 ◂◂ GM작물의 진화[1)]

1) 농업생명공학바로알기협의회, 식탁위의 생명공학, 푸른길(2009)

3.1 GM작물의 역사

GM작물의 역사는 1973년 아그로박테리움을 이용한 유전자 재조합기술의 발견으로부터 시작되었다. 이 기술을 통하여 외래 유용 유전자를 식물체에 도입시켜 우리에게 유용한 형질을 가진 새로운 세포를 만들 수 있게 되었다. 또 하나의 중요한 기술은 식물체의 조직배양 기술이다. 식물은 완전체 배양능력(totipotency)을 가지고 있어서 일부 세포가 완전한 식물체로 성장하는 능력을 보유하고 있다. 즉, 유전자재조합 기술을 통해 하나의 세포내에 있는 염색체에 원하는 유전자를 삽입한 후 적절한 배양액에서 키우면 유전자가 전이된 세포가 다시 완전한 식물체로 재 분화되는 것이다. 이렇게 재 분화한 식물체의 모든 세포는 각각의 염색체에 동일한 외래 유전자를 포함하게 됨으로서 안정적인 형질전환식물체가 되는 것이다. 식물에 외래유전자를 도입한 유전자 식물체가 처음으로 개발된 것은 1983년으로, 항생제 카나마이신 저항성 담배와 페튜니아의 개발이 이때에 이루어지기 시작하였다. 하지만 이들은 모두 상업용이 아닌 연구용으로 개발된 것이며, 본격적인 상업용 GM작물개발은 1986년부터 시작되었다. 이때부터 저장성이 향상된 GM 토마토, 생산성을 높이는 제초제내성 GM 콩, 해충저항성 GM 옥수수, 해충저항성 GM 면화가 개발되기 시작하였다. 이중 과숙억제토마토가 최초로 상업화되어 FLAVR SAVR®란 상품명으로 시판되었으나 소비자들의 외면으로 시장에

표 3-1 GM작물 기술개발의 역사

기초 단계	1953	DNA 구조 구명
	1968	DNA 절단 및 접착기술 개발
	1973	DNA 재조합 기술개발
	1977	DNA 염기서열분석법 개발
응용 단계	1983	최초의 GM작물인 카나마이신저항성 담배 개발 (연구용)
	1986	최초의 농업형질 개선 GM작물 개발 (제초제내성 담배 개발 및 재배실험
실용화 단계	1994	GM작물 최초 상업화 (쉽게 무르지 않는 토마토 Flavr Savr)
	1995	GM종자 개발 및 본격 시판 (제초제내성콩, 해충저항성 옥수수와 면화)
	1996	GM작물 본격 재배
	2000	황금쌀 (Golden Rice) 개발
	2014	27작물 336종 상품화

서 곧 사라지고 말았다. 반면, 생산량 증대에 초점을 맞춰 개발된 제초제내성콩, 해충저항성옥수수, 해충저항성면화가 1995년 종자 시판을 시작으로 1996년 농가에서 대규모로 재배함으로서 본격적인 GM작물의 상업화가 시작되었다. 이후 바이러스저항성 파파야, 전분함량이 증가된 감자, 지방산 조성이 변화된 유채 등 다양

한 GM작물이 개발되어 상업화 되었다. 이와 함께 서구와 아시아의 주식인 밀과 벼에 대한 GM작물 개발도 활발하게 진행되어 2000년 비타민 A 함량이 증가된 GM벼 “황금쌀이 개발되었다. 이후 지속적인 기술개발로 동물 또는 인간 질병을 예방하는 치료용 백신을 생산하는 작물 등 다양한 GM작물들이 활발히 개발되고 있다(표 3-1).

3.2 GM작물의 개발 현황

3.2.1 과숙억제 토마토 FLAVR SAVR®

최초의 상업화 GM작물인 과숙억제 토마토는 미국의 칼진(Calgene Inc.)사에서 1988년 개발을 시작하여 1994년 최초로 판매를 시작하였다. 이 GM 토마토는 과일의 숙성에 관여하는 세포막 분해효소인 폴리칼락투로나제를 생산하는 유전자의 활동을 억제시킴으로서, 출하 후 장시간 유통기간에도 과일이 무르지 않고 싱싱함을 유지시킬 수 있도록 만든 것이다(그림 3-2). 이러한 형질개선은 유통업자와 생산자들에게는 환영을 받았으나, 교통의 발전으로 운송기간이 단축됨과 동시에 두꺼운 과피로 인한 소비자들의 외면으로 시장에서 실패를 맛보고 곧 사라지게 되었다. 이러한 실패는 개발자들에게 기술 수요자인 농민과 농산업자 외에도 소비자의 요구와 미래 트랜드의 변화 등 마켓팅의 중요성을 일깨워 주는 교훈을 주게 된다.

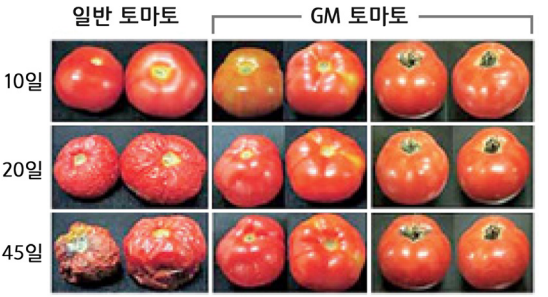


그림 3-2 ◂◂ 일반 토마토와 GM토마토 FLAVR SAVR®의 저장성 비교

3.2.2 제초제내성 GM콩

본격적인 GM작물의 상업화는 제초제내성작물과 해충저항성작물의 개발로부터 시작되었다. 즉, 생산자인 농민들의 어려움을 해결하면서 생산량을 높이는데 역점을 두었고 이러한 방향설정은 GM작물 상업화의 성공을 가져다주게 된 것이다. 잡초는 병해충, 불량환경 등과 함께 생산량을 감소시키는 가장 큰 저해요인의 하나이며 지금도 많은 작물들이 잡초와 경합을 벌이면서 수확량 감소의 피해를 겪고 있다. 잡초제거의 가장 기본적인 문제점은 제초제를 처리할 경우 잡초뿐만 아니라 농작물에도 피해를 준다는 것이다. 이러한 이유로 수작업으로 잡초를 제거하거나 특정 잡초만 공격하는 제초제를 여러 번 사용하는 방법이 사용되고 있는 것이다. 전통적인 잡초제거 방법은 많은 노동력이 소요되며, 과다한 제초제 살포로 인한 생산비 증가와 함께 환경오염의 문제점을 발생시키게 된다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 과학자들은 글

리포세이트(glyphosate)와 같이 당시 일반적으로 사용하던 제초제에 내성을 가진 유전자를 작물에 도입함으로써 해당 농작물에는 전혀 해를 주지 않고 잡초들만 완벽하게 죽이는 획기적인 제초제 내성 GM작물을 개발하게 된 것이다.

제초제는 식물에 필요한 효소 단백질과 결합하여 기능을 저해함으로써 식물을 고사시킨다. 생명공학 작물은 제초제의 작용점이 되는 표적 효소와 구조가 달라서 제초제와 결합하지 않는 돌연변이 효소 유전자 혹은 유사한 대체 효소 유전자를 다른 생물종에서 분리하여 이식 발현시킴으로써 제초제의 활성을 극복하는 방법과 제초제 자체를 불활성화 시키는 변형 효소의 유전자를 이식 발현시키는 방법 등을 쓴다(그림 3-3).

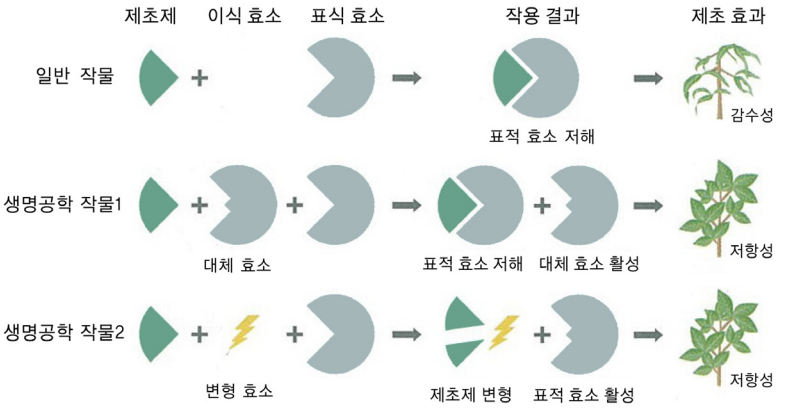


그림 3-3 ◂◂ 제초제내성 유전자의 작용 원리[1)]

1) 식탁위의 생명공학

<잡초방제가 어려운 일반콩> <잡초방제가 쉬운 GM콩>

그림 3-4 ◂◂ 제초제내성 GM콩의 잡초방제 효과

이 기술을 응용한 최초의 상업용 제초제내성 GM작물은 1996년에 미국 몬산토(Monsanto)사의 라운드업 레디(Round up Ready)라는 제품으로 판매된 GM콩이며 이후 제초제내성 옥수수, 목화 등이 개발되었다. 이 제초제내성 GM작물은 제초제 사용량과 작업시간을 크게 줄일 뿐만 아니라 경작자의 제초제 노출을 줄이고 농약으로 인한 토양 및 환경오염을 획기적으로 줄이는 등 농업 분야의 발전에 크게 기여하였다. 이러한 확실한 효과로 인해 제초제내성작물은 현재도 전 세계적으로 가장 많이 재배되고 있는 GM작물이며, 최근에도 더욱 효과적인 제초제내성 GM작물들이 계속 개발되고 있다(그림 3-4).

3.2.3 해충저항성 Bt 면화

해충저항성작물 개발은 1980년대 초에 토양미생물인 고초균(Bacillus thuringienis)에서 곤충을 죽이는 단백질인 Bt 독소가 발견되면서 본격화 되었다. 이 토양미생물은 오래전부터 유럽의 농민들이 직접 농작물에 뿌려서 해충을 방제하는데 이용해 왔으며 유기농업에서도 유일하게 사용이 허가되어 지난 35년 동안 많은 농민들이 식물 살충제로 이용해온 안전한 미생물이다. 이 토양미생물이 생산하는 Bt 독소 단백질은 알칼리성인 곤충의 위에서만 활성화되어 사람이나 가축에게는 전혀 해가 없으며, 곤충의 경우에도 목표로 하는 특정 곤충에게만 작용하여 다른 종류에는 영향을 미치지 않는다. 또한 자외선에 의해 빠르게 변성되어 토양이나 물을 오염시키지 않으며 먹이사슬로 전달되지 않는 등 해충저항성 GM작물 개발에 매우 좋은 장점을 가지고 있다. 이러한 Bt 독소 유전자를 분리하여 농작물에 도입함으로서 특정 해충으로부터 농작물을 보호하고 농약사용량을 줄이려는 연구가 1980년부터 본격적으로 추진되었다. 이를 응용한 최초의 작물 개발 사례는 미국 몬산토사의 목화로 '볼가드(Bollgard)'라는 상품명으로 1996년에 상용화되었으며, 이후 각종 해충에 저항성을 갖는 감자, 옥수수 등이 차례로 개발되어 상품화 되었다. 이러한 해충저항성 GM작물 들은 현재까지도 계속 재배면적이 늘어나고 있다. 또한 여러 가지 Bt 독소 단백질 생산 유전자들 동시에 식물체에 삽입하여

다양한 해충에 복합저항성을 가지게 함으로서 해충 방제효과가 더욱 높아진 해충저항성 GM작물 개발을 지속적으로 추진하고 있다(그림 3-5).

Bt 단백질 독소는 일칼리성인 곤충의 위속에서 용해된 후 소화 효소에 의해 가수분해 됨으로써 활성화 되고 , 곤충의 창자 세포막에 존재하는 특이한 수용체에 결합하면 세포막에 구멍을 뚫어 살충 효과를 나타낸다. 그러나 곤충의 종류에 따라서 수용체의 구조가 다르기 때문에 특정한 Bt 단백질은 특정한 종류의 표적 곤충에만 작용하고 다른 비표적 곤충에게는 영향을 주지 못한다. 특히, 위액이 산성인 사람과 가축 등 동물에게는 전혀 해가 없으므로 안전하게 사용될 수 있다.

<병충해에 약한 옥수수>　　<병충해에 강한 옥수수>

그림 3-5 ◂◂ 해충저항성 GM옥수수의 해충방제 효과

3.2.4 바이러스 저항성 GM작물

농작물 피해의 주요 원인 중의 하나인 바이러스 병해에 저항성을 갖는 GM작물개발도 오랜 기간 연구되어 왔다. 1992년 중국이 바이러스저항성 담배 개발을 성공한 이후 감자, 호박 등 다양한 바이러스저항성 작물이 개발되어 상업화가 이루어졌다.

이중 가장 성공적인 사례는 PRSV(Papaya Ringspot Virus)저항성 파파야의 개발과 상업화다. 1992년을 시작으로 PRSV의 발병으로 하와이의 파파야 생산량이 40%까지 감소하는 심각한 상황이 발생하게 되었다(그림 3-6).

그림 3-6 ◂◂ 파파야 바이러스 감염포장[1)]

1) 온난화대응농업연구센터

이에 코넬대학의 Dennis Gonsalves 박사와 하와이에 위치한 미 농무부 태평양해역농업연구센터(Pacific Basin Agriculture Research Center)의 연구자들이 바이러스저항성 GM파파야를 개발하여 1999년도부터 하와이의 농민들로 하여금 재배를 시작하게 하였다. 이러한 시도는 성공적인 바이러스 피해 방지로 이어졌고 4,700만 달러 규모의 하와이 파파야 산업을 구하는 획기적인 성과를 거두게 된다. 이러한 성공적 효과가 알려지면서 이후 중국 등 세계 여러 지역으로 재배가 확대되는 등 광범위한 상업화가 이루어지게 되었다. 한편, 바이러스저항성 파파야는 글로벌 대기업이 아닌 학계와 연구소의 과학자들이 지역 농민들의 어려움을 해결해 준 성공적인 사례이며 최초의 식용 GM작물이라는 점에서 GM작물 개발 역사에서 매우 상징적인 의미를 갖게 된다.

바이러스저항성 작물개발의 원리는 사람이 맞는 백신주사와 같이 바이러스의 외피 단백질을 생산하는 유전자를 식물의 체내에 이식시켜 식물이 면역력을 갖게 함으로서 바이러스가 침입할 때 저항성을 나타내도록 하는 것이며, 최근에는 바이러스 게놈의 일부를 식물에 미리 도입시켜 침입한 바이러스의 RNA 합성(전사)을 방해하는 침묵현상(Post-transcriptional gene silencing)을 많이 이용하고 있다.

3.2.5 황금 쌀(Golden Rice)

초기 유전자재조합 작물은 주로 작물의 생산성 증대를 목표로 진행되었으나, 최근에는 해당 식물의 품질이나 부가가치를 높여 생산자와 소비자 모두에게 혜택을 주는 방향으로의 연구도 활발하게 이루어지고 있다. 이러한 고품질 고부가 형질 개선의 대표적인 사례로 스위스의 Ingo Potrykus 박사와 Peter Beyer 박사가 개발한 일명 황금 쌀(Golden Rice)이라 불리는 비타민 A 성분 보강 GM 쌀을 들 수 있다. 이 황금쌀은 2000년 미국 과학학술지 '사이언스'를 통해 처음 알려졌다. 당시 개발된 1세대 황금쌀은 수선화와 미생물에서 베타카로틴 형성에 관여하는 유전자를 찾아내어 벼 염색체에 도입하여 만들었다. 이 초창기 황금쌀은 베타카로틴 생산량이 충분치 못하여 비타민 A 공급원으로서의 활용가치에 의문을 제기하는 지적이 많았다. 이후 지속적인 연구를 통해 수선화의 유전자를 옥수수로 대치하는 2세대 황금쌀을 만들었는데, 1세대보다 베타카로틴 함량을 23배 이상 늘림으로서 보통 사람의 양만큼 황금쌀밥을 먹으면 비타민 A 필요량을 채울 수 있게 되었다. 비타민 A 결핍은 야맹증으로 인한 시력감퇴의 주원인으로서 지속적인 공급 부족은 결국 실명과 죽음으로 이어지는 무서운 증상이다. 세계보건기구(WHO)의 보고에 따르면 해마다 전 세계 25~50만명의 어린이들이 비타민 A 결핍으로 인한 야맹증으로 시력을 잃고 있으며, 그중 절반이 12개월 이내에 사망하고 있는 것으로

추정하고 있다. 안타까운 것은 이 야맹증은 제때에 비타민 A만 충분히 공급받으면 얼마든지 막을 수 있는 '치료 가능한 질환'이라는 사실이라는 것이다. 현재, 황금쌀은 안전성 평가와 승인을 거쳐 필리핀에서 상업용 재배를 준비하고 있는 중이다. 황금쌀은 쌀을 주식으로 하는 아시아 지역이나 아프리카와 남미 등 경제적으로 어려운 지역에서 비타민 A 결핍 문제를 개선할 수 있을 것으로 기대된다(그림 3-7).

유전자재조합 황금쌀(Golden Rice)은 옥수수와 미생물로부터 베타카로틴의 생합성에 필요한 효소를 생산하는 유전자를 분리한 후 쌀의 염색체에 삽입하여 만들었다. 먼저 "파이토인(phytoene)" 생합성 효소는 옥수수에서 분리하여 벼에 삽입된 삽입유전자를 통해 생산하고, 파이토인에서 라이코펜(lycopene)으로 전환하는 두 단계에 작용하는 효소는 미생물에서 분리한 유전자로부터 생산하게 된다. 마지막으로 라이코펜은 벼에 이미 존재하고 있는 효소 "라이코펜 싸이클라제(cyclase)"에 의해 비타민 A의 전구체인 베타카로틴으로 전환됨으로서 최종적으로 벼에서 비타민 A를 생산할 수 있게 만든 것이다.

그림 3-7 ◂◂ 노란색의 황금쌀과 일반 쌀의 비교[1)]

3.2.6 가타 영양강화 GM작물

황금쌀 이외에 다양한 고품질 GM작물이 개발되고 있다. 몬산토사에서는 인류가 등푸른 생선를 통해서만 섭취해 오던 오메가-3 지방산을 콩에서 생산하는 연구를 진행하여 이미 성공을 거두고 상업화를 준비 중에 있다. 올레인산(*Oleic* acid) 함량이 높은 GM콩도 개발되어 이미 상업화되었다. 올레인산은 튀김이나 식품 가공에 사용될 때 기름의 안정성 증가에 매우 중요한 지방산으로 올레인산의 함유량을 높인 콩을 개발하여 이미 상품화 되었다. 고 올레인산 함유 GM콩의 경우 상대적으로 트랜스지방과 포화지방산의 수치가 낮아 버거킹 등 패스트푸드 업체에서 만드는 프랜치프라이를 거의 건강식품 수준에 근접하도록 만들 수 있게

1) Biosafety

되었고, 닭을 튀겼을 때에도 포화지방, 트랜스지방 수치를 줄일 수 있었다. 이밖에 전분 함량을 높인 GM감자도 상업화 되어 식품 가공 산업 발전에 크게 기여하고 있다.

3.2.7 가뭄저항성 옥수수

가뭄저항성 GM작물 개발은 인구증가 및 기후변화로 인한 지구촌 식량문제 해결을 위한 가장 희망적인 해결책으로 부상하고 있다. 가뭄저항성은 하나의 유전자로 조절되는 질적 형질(qualitative trait)이 아닌 다양한 유전자군에 의해 조절되는 양적 형질(quantitative trait)이므로 기존의 육종 프로그램 뿐만 아니라 생명공학 기술로도 저항성품종 개발이 몹시 어려운 형질이었다. 2012년 미국의 몬산토사가 독일의 바스프(BASF)사와 공동으로 건조저항성 GM옥수수를 개발하여 처음으로 상품화 하였다. 몬산토가 개발한 가뭄저항성 GM옥수수는 토양미생물(*Bacillis subtilis*)에서 유래한 'cold shock protein B'(이하 'cspB') 유전자를 도입해서 만들어졌다. 이 유전자는 RNA를 보호하는 RNA chaperone 단백질을 만들어 내는 유전자이다. 보통은 가뭄 스트레스를 받으면 RNA가 파괴되어 작물의 정상적인 생리대사와 생육발달이 저하되는데 이 단백질이 건조 스트레스 하에서 RNA를 감싸 파괴되지 않고 수명을 연장시킴으로써 작물에 가뭄저항성을 부여하는 것으로 추정되고 있다. 몬산토에서는 이 cspB 유전자가 도입된 GM옥수수 여러 계통을 미국에 있는 200곳 이상의 지역 시험포장에서 가뭄저항성

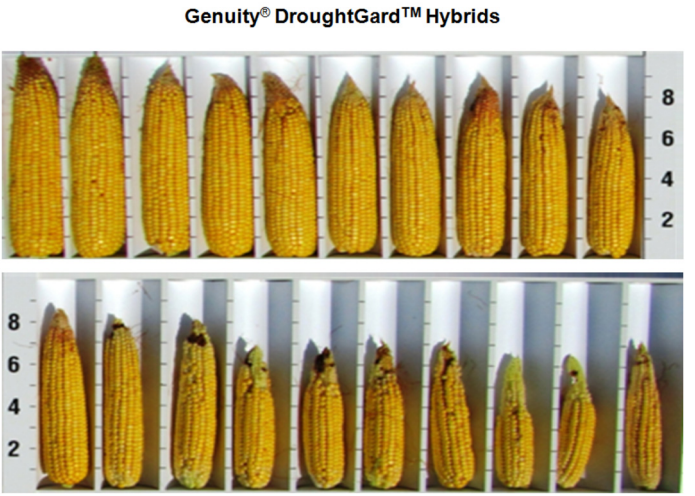


그림 3-8 ◂◂ GM옥수수(상)와 일반옥수수(하)의 가뭄저항성 비교

재배시험을 실시하였다. 그 결과 이 GM옥수수가 평상시에는 일반 옥수수와 유사한 생육상태를 보이지만 가뭄 조건하에서 일반 옥수수가 50%가량의 생육저하 피해를 입는 데 반해, GM옥수수는 엽록소 및 광합성 효율 증대 등의 효과로 약 24% 정도의 생육저하만을 나타냄으로써 건조저항성을 보여주었다고 밝혔다. 가뭄저항성 GM옥수수는 2011년에 미국 농무부(USDA)의 안전성 심사를 통과하여 2012년에 "DroughtGard"라는 품종명으로 출시되어 2013년부터 미국의 가뭄지역에서 재배되고 있다. 몬산토사에서는 옥수수 이외에도 가뭄저항성 GM면화와 GM콩에 대한 연구개발을 추진하고 있으며 다른 다국적 종자회사들도 건조저항성 GM옥

수수 개발을 이미 시작하여 좋은 결과를 도출한 것으로 알려져 있다. 한편 가뭄으로 고통을 받고 있는 각 나라에서도 가뭄저항성 GM작물 개발 연구가 적극적으로 추진되고 있다. 호주 정부는 가뭄저항성 GM밀을 개발 중에 있으며 이러한 가뭄저항성 작물의 개발은 향후 호주의 기후변화 대응에 큰 도움이 될 것으로 기대하고 있다.

3.3 GM작물의 개발 과정

현재 미국과 유럽 등 선진국들이 글로벌 종자기업과 함께 GM작물 개발을 주도하고 세계 GM종자 시장을 독점하고 있다. 우리의 경쟁국인 중국과 브라질의 경우는 정부차원에서 GM작물 개발을 집중 추진하고 있으며, 글로벌 기업의 연구소를 유치하여 기술축척 및 연구개발 인프라를 구축하고 있다. 중요한 사실은 상업용 GM작물의 개발이 생각보다 매우 어렵다는 점이다. 많은 사람들이 GM작물을 글로벌 종자 기업이 독점하고 있다고 알고 있고 이것을 GM작물 개발을 반대하는 이유로 제시하는 경우가 많이 있다. 그러나 GM작물은 개발에 엄청난 연구비와 장기간의 개발기간과 함께 고도의 융·복합 종합 과학기술을 필요로 하기 때문에 보통 규모의 기업이나 연구소가 수행할 수 없는 일이라는 점이다. GMO의 안전성에 대한 과학적 입증 요구수준이 비상식적으로 과할수록 (예를 들어 100년 이후의 차세대 장기 효과 등) 연구 개발비는 기하급수적으로 높아지고 우리나라와 같은 후발 주자들이 도전할 수 없

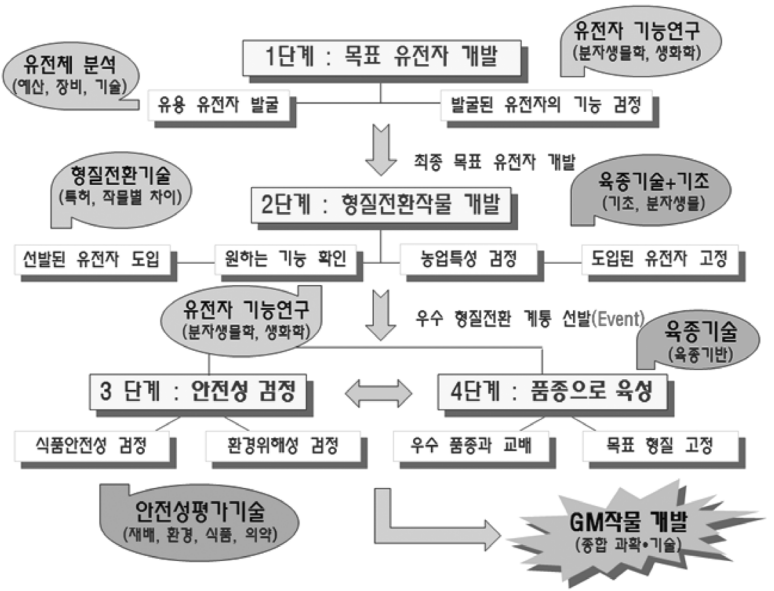


그림 3-9 ◂◂ GM작물 개발 단계 및 단계별 필요기술

는 일이 되는 것이다. 현재 요구되고 있는 GMO 안전성 평가 수준은 우리가 먹고 있는 어느 식품도 그렇게 철저히 안전성이 평가된 것이 없을 정도로 높은 수준이라는 것이다. 그림 3-9는 GM작물 개발 단계와 각 단계에 필요한 기술들을 도표로 표시한 것이다.

GM작물개발의 특징은 일반 작물품종 개발에는 포함되지 않는 안전성평가라는 과정이 필요하다는 것이다. GM작물은 막대한 연구비 투자와 고도의 융복합 생명공학기술을 적용함과 동시에, 일반 육종 품종과는 달리 철저한 안전성 평가와 엄격한 안전성심사

라는 승인 절차를 거쳐야 한다. 즉, 잠재적 위해성에 대한 우려를 불식시키기 위해 개발단계부터 철저한 안전관리 하에서 진행되며, 개발 후 엄격한 안전성평가와 안전성심사를 통과해야만 상업화가 가능하도록 제도화 되어 있다. 이와 같이 GM작물은 일반인이 생각하는 이상으로 인류가 지금까지 경험해온 그 어떤 작물보다도 더 철저한 안전성 평가와 정부 관련기관의 검증과정을 거치며 개발되고 있는 것이다. 사실 GM작물의 안전성에 대한 불안감은 개발과정의 철저한 안전성평가 과정을 알면 충분히 해소될 것이라고 생각된다. GM작물이 어떠한 과정을 거치면서 개발되며 상업화되기까지는 어떠한 절차를 거쳐야 하는지에 대해 자세히 알아보기로 한다.

3.3.1 시험연구단계

개발자가 GM작물을 개발하기 위해서는 필요한 유전자를 분리하고 이들이 개선하고자 하는 작물 내에서 과연 그 기능을 할 수 있는지를 검정하기 위해, 분리된 유전자가 도입된 실험용 형질전환작물을 만들어 원하는 기능이 개선될 수 있는지를 확인하는 실험을 실시하게 된다. 이러한 실험을 하기 위해서는 격리온실과 격리포장 등의 안전관리 시설을 갖추고 목적하는 실험계획을 관련 중앙부처에 제출하여 실험허가를 받은 후 안전관리 규정을 준수하면서 연구를 수행하게 된다.

국내에서 GM작물을 개발할 경우 연구용이거나 상업용이거나 모두 안전관리 시스템을 갖추고 관련 정부기관의 승인을 득한 후에 연구개발을 진행하여야 한다. 즉, GM작물을 개발하기 위한 초기 단계인 실험실 수준의 연구 단계부터 온실과 포장단위의 환경방출 실험까지의 전 과정에서 요구되는 밀폐 및 격리기준과 방법, 보관 및 운반, 실험 후 폐기 등에 대한 지침에 맞는 계획을 작성하고 이에 필요한 시설 장비를 완비하여 사전 승인을 득한 후 실험 및 연구개발을 수행하여야 한다. 이러한 사전승인 없이 연구를 진행하거나 승인된 사항을 위반하여 실험을 진행하다 적발되는 경우 벌칙 및 과태료가 부과된다.

3.3.2 상업용 GM작물 개발단계

(1) 형질전환체(Event) 선발

시험연구단계 실험을 통해 기능이 확인된 유전자는 그 기능을 최대한 적절하게 발휘하게 하기 위하여 최적 프로모터, 선발마커 등 여러 가지 필요한 요소를 조합하여 최종 운반체(vector)를 제작하게 된다. 이렇게 만들어진 운반체를 목적하는 작물에 도입하여 다수의 형질전환체를 육성한다. 이때 육성된 수백 수천개의 형질전환체 각각을 이벤트(Event)라고 지칭한다. 이들 각 이벤트들은 자신의 유전체상에 도입된 외래 유전자의 삽입 부위가 각각 다르며, 이러한 삽입부위의 차이로 인해 각 이벤트의 표현형이 크게

달라질 수 있다. 이들 각각의 이벤트들에 대하여 목표한 기능이 개선되었는지 또는 중요한 농업적 특성이 잘 유지되었는지 등을 격리 포장에서 평가한다.

만약 특정 해충에 대한 저항성 증대를 목적으로 만들어진 형질전환체(이벤트)가 목표하는 해충에 대한 저항성을 증가시키는 데는 성공하였지만, 외부 유전자가 도입되지 않은 원래의 작물에 비교할 때 수량이 현저히 감소하거나 다른 병해충에 대한 저항성은 잃어버리는 경우에는 상업용 GM작물로서 가치가 상실되고 안전성심사에서도 통과가 어려우므로 이 단계에서 과제가 중단된다.

(2) 선발된 형질전환체의 유전적 안정성 시험

형질전환체 선발 과정을 통과하면 도입된 유전자가 유전체내에 잘 삽입되어 유전적으로 확실하게 고정 되었으며 후대에서도 안정적으로 잘 발현하는지를 확인하는 과정을 거친다. 많은 경우 선발된 우수 이벤트가 몇 세대를 거친 후 도입된 유전자의 불활성화로 후대에서 발현이 안 되는 경우가 발생할 수 있기 때문이다. 이와 같은 사항들을 철저히 점검하면서 우수한 이벤트들을 지속적으로 선발하고, 최종적으로 원래의 농업적 특성을 잘 유지하면서 목표하는 형질개선이 이루어진 가장 우수한 1개의 이벤트(Lead Event)를 선발하여 안전성 평가를 실시하게 된다.

(3) 최종 형질전환작물의 안전성 평가

이렇게 선발된 최종 형질전환작물(Lead Event)은 상업화하기 전에 우선적으로 인간이나 생태계에 잠재적 위해성이 있는지에 대한 안전성평가를 실시하게 된다. 안전성평가는 개발자 또는 개발된 GM작물을 상업적으로 이용하고자 하는 자에 의해서 수행되는데 환경위해성 평가와 인체위해성 평가로 크게 나눈다. 안전성평가를 통해 위해성이 없다는 과학적 평가결과가 나오면 이들 평가결과를 토대로 안정성 심사서를 작성하여 해당 GM작물의 안전성심사를 담당하는 해당 부처에 안정성심사를 신청한다. 이러한 이벤트 육성과 안전성평가를 위한 전체 실험과정 역시 각 국가별로 제정된 엄격한 안전성관리 규정에 따라 수행하게 된다.

3.3.3 상업화 승인 단계

안전성심사 요청이 해당 국가의 관련 부처에 접수되면 해당 부처에서 운영 중인 안전성심사위원회에 상정되어 심사를 받게 된다. 안전성 심사는 각각의 전문가들이 분야별로 충분한 기간을 가지고 심층검토를 거치며 진행되는데, 필요한 경우 추가 자료 및 추가 실험 등을 요청하는 등 엄격하게 진행된다. 이러한 전문가 그룹의 심사를 거쳐 위해성이 없다는 사실이 과학적으로 인정되면 요청한 GM작물이나 이들의 농산물 또는 이들을 이용하여 만들어진 식품 등을 상업화에 이용할 수 있도록 승인을 해주게 되는 것이다. 안전성 심사는 국가별로 각각의 정책과 사회적 수용

도 등을 감안하여 국가별로 적절한 형태의 제도와 규정을 정하여 운영하고 있다. 즉, 해외에서 개발되어 그 국가에서 안전성심사 승인을 받은 GM농산물의 경우도 다른 국가에 수출할 경우 수입국에서 운영 중인 심사제도와 규정에 의거하여 안전성심사를 통과하여야만 수출이 가능하다. 우리나라 GM작물의 환경위해성 평가기준과 식품안전성 평가기준은 4장과 5장에 자세히 기술되어 있다.

3.3.4 상업화 단계

안전성이 확인되어 상업화 승인이 된 GM농산물과 이들을 이용하여 만든 식품들은 소비자의 선택권 보장을 위해 유통 시 각각의 이용 범위를 고려하여 만들어진 관련 규정에 따라 표시를 하도록 법적으로 규정되어 있다. 이 표시제는 각 국가의 정책과 사회적 수용도 등을 감안하여 국가별로 시행여부와 시행범위에 차이를 보이고 있다. 각국의 GM농산물 및 식품 표시제에 대해서는 이 책의 6장에서 자세히 언급되어 있다. 수입된 LMO[1]의 비의도적 환경방출이나 안전성심사 승인이 안된 LMO의 비의도적 유입 또는 유통에 대한 주기적 조사·분석 검사 등 지속적인 사후 안전관리도 철저히 수행하고 있다.

이상 설명한 바와 같이 LMO 안전관리는 국가정책과 사회적

1) LMO : Living Modified Organism, 환경분야에서 GMO를 살아있는 생명체라는 점을 강조하여 사용하는 용어

공감대 등 국가별로 각각의 사정에 맞도록 규정과 제도를 구비하여 시행하고 있다. 그림 3-10은 국내 개발 GM작물의 안전성 평가 및 심사 과정을 도표로 나타낸 것이다. 그러나 국내에서 자체적으로 개발된 GM작물의 안전성 심사가 승인되어 상업화가 이루어진 사례는 현재까지 한건도 없다. 그림 3-11은 수입 GM농산물에 대한 우리나라의 단계별 국가 안전관리 시스템을 간단히 도식화한 것이다. 우리나라에서 현재 유통되고 있는 모든 GM농산물은 국내 관련법과 규정에 의해 안전성이 확인된 것들이다.

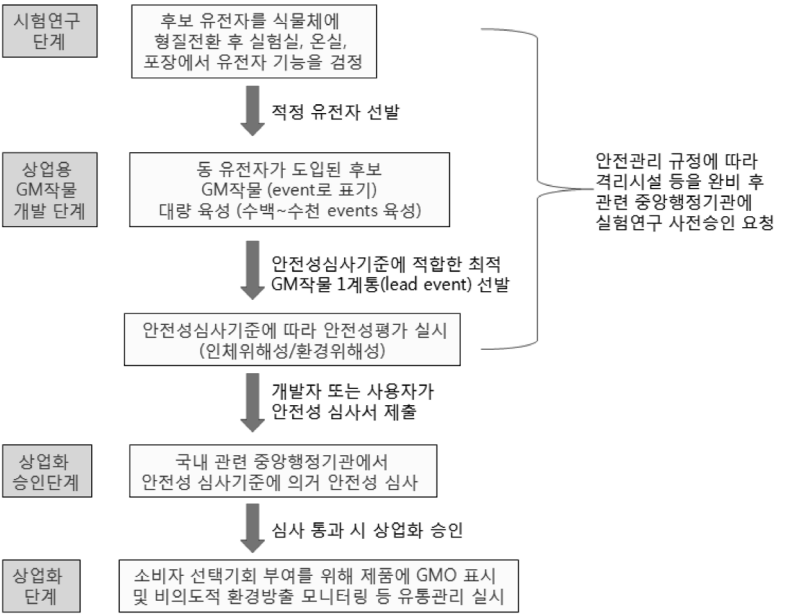


그림 3-10 ◂◂ 국내 개발 GM작물의 단계별 안전성 관리

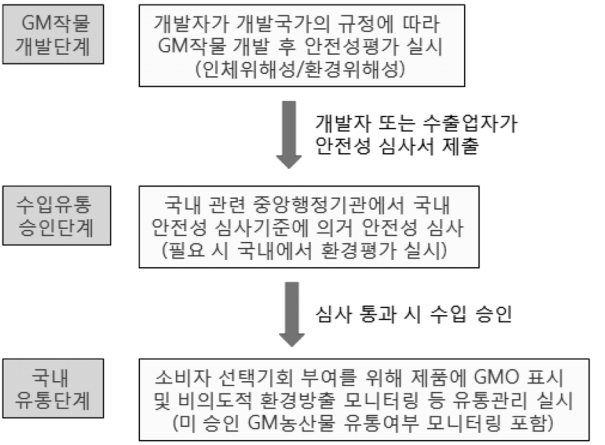


그림 3-11 ◂◂ 수입 GM 농산물의 단계별 안전성 관리

3.4 상업용 GM작물 개발 동향

상업용 유전자변형 신품종(GM종자) 개발은 아직까지 선진국들이 주도하고 있다. 이들은 주로 글로벌 종자기업을 중심으로 기술개발과 상업화가 이루어지고고 있다. 세계 10대 글로벌 종자회사는 2009년 기준으로 전체 종자시장의 74%를 점유하고 있다. 주목할 사실은 이들 10개 글로벌 종자 기업이 대부분 GM종자를 개발하고 있다는 것이다. 특히, 듀폰, 신젠타, 바이엘 등 농화학회사의 종자산업 진출을 눈여겨봐야 할 것이다. 이들은 세계적인 화학기업들로서 바이오 소재산업으로 적극 전환하고 있다. GM종자 산업이 향후 바이오산업과 녹색산업을 주도할 것이라는 사실을 예

고하는 것이다. 또한 안전성 문제도 과학적인 분석을 통해 문제가 없으며 GM종자가 결국에는 기존 육종종자와 별 차이가 없이 취급될 것이라고 보는 것이다. 최근, 이들 기업들은 상호 협력연구를 통해 GM종자 개발 전략을 추진하고 있으며, 각국의 기초연구팀들과의 공동연구를 통해 유용 유전자의 조기 확보와 이들의 기능검정연구를 추진하고 있다. 유럽의 경우 과도한 규제로 대부분의 유럽국가에 본부를 둔 글로벌기업들이 미국 내에 연구소를 설립하고 GM종자 개발을 추진하고 있다. 특히, 미국 노스캐롤라이나의 소도시 트라이앵글은 다국적 종자기업의 연구소들이 집중되어 있어 GM종자 연구개발의 메카로 널리 알려져 있다.

국가적으로는 중국, 브라질, 인도 등 후발주자들의 적극적인 GM작물 개발 열기가 주목되고 있다. 이들 국가들은 독자적인 GM작물 개발기술 구축과 함께 고유의 GM종자 개발을 위한 노력을 기울이고 있다. 중국은 이미 세계 6위의 GM작물 재배 국가이며 해충저항성 벼와 영양성분 강화 옥수수 등을 개발하여 상업화를 위한 막바지 준비를 하고 있다. 브라질은 가장 주목받는 국가로서 기업, 정부, 대학연구소 등이 협력하여 자체 기술을 확보하고 있다. 브라질은 국가 차원에서는 근래 GM작물 개발 속도가 가장 빠른 국가로 부상하고 있다. 이와 같은 기술발전은 브라질 정부의 정책의지와 국민들의 높은 수용도에 기인하고 있다. GM작물 재배면적에서도 전 세계 2위를 차지하고 있으며 미국과의 격차를 지속적으로 좁혀 가고 있다. 특히 브라질 농업연구청(EMBRAPA)에서 자체 기술로 개발한 유전자변형 바이러스 저항성 콩이 상업

화를 위한 안전성 재배 승인을 받아, 브라질은 개발・보급・승인 면에서 GM작물과 관련된 새로운 기술국가로의 능력을 입증 받고 있다.[1] 표 3-2는 2014년도 현재 GM작물 재배가 허용된 28개국에서 재배되고 있는 상용화 GM작물을 열거한 것이다.

표 3-2 전세계 GM작물 국가별 재배 현황(2014년)[2]

순위	국가	면적(백만ha)	유전자변형 작물
1	미국	73.1	옥수수, 대두, 면화, 카놀라, 사탕무, 알팔파, 파파야, 호박
2	브라질	42.2	대두, 옥수수, 면화
3	아르헨티나	24.3	대두, 옥수수, 면화
4	인도	11.6	면화
5	캐나다	11.6	카놀라, 옥수수, 대두, 사탕무
6	중국	3.9	면화, 파파야, 포플러, 토마토, 피망
7	파라과이	3.9	대두, 옥수수, 면화
8	파키스탄	2.9	면화
9	남아공	2.7	옥수수, 대두, 면화
10	우루과이	1.6	대두, 옥수수
11	볼리비아	1.0	대두
12	필리핀	0.8	옥수수

1) Global Status of Commercialized Biotech/GM Crops 2012(International Service for the Acquisition of Agro-biotech Application, ISAAA)

2) ISAAA Brief No 49 (2014)

순위	국가	면적(백만ha)	유전자변형 작물
13	호주	0.5	면화, 카놀라
14	부르키나파소	0.5	면화
15	미얀마	0.3	면화
16	멕시코	0.2	옥수수
17	스페인	0.1	면화, 대두
18	콜롬비아	0.1	면화, 옥수수
19	수단	0.1	면화
20	온두라스	<0.1	옥수수
21	칠레	<0.1	옥수수, 대두, 카놀라
22	포르투갈	<0.1	옥수수
23	쿠바	<0.1	옥수수
24	체코	<0.1	옥수수
25	루마니아	<0.1	옥수수
26	슬로바키아	<0.1	옥수수
27	코스타리카	<0.1	면화, 대두
28	방글라데시	<0.1	가지

3.5 우리나라 GM작물 개발 현황

국내의 경우 2000년대 초반부터 본격적으로 시작된 농업생명공학연구 활성화로 GM작물 개발 건수가 급속 증가하여, 국내 전체로 약 40여 작물에서 200여종의 GM작물 개발이 추진 중인 것으로 추정되고 있다. 이들 중 농약사용량을 줄이면서 해충피해를 방지할 수 있는 해충저항성벼 등 1세대 GM작물 개발에 성공함으로서 우리 농업의 어려움 해결을 위한 농업생명공학기술의 활용가능성을 확인시켜 주었다(그림 3-12). 이와 함께 비타민 A 성분이 보강된 황금쌀과 함께 시력개선 및 노화방지용 컬라쌀 등 소비자에게 혜택을 주는 2세대 GM작물의 개발도 순차적으로

그림 3-12 ◂◂ 국내에서 개발된 해충저항성벼의 혹명나방방제 효과

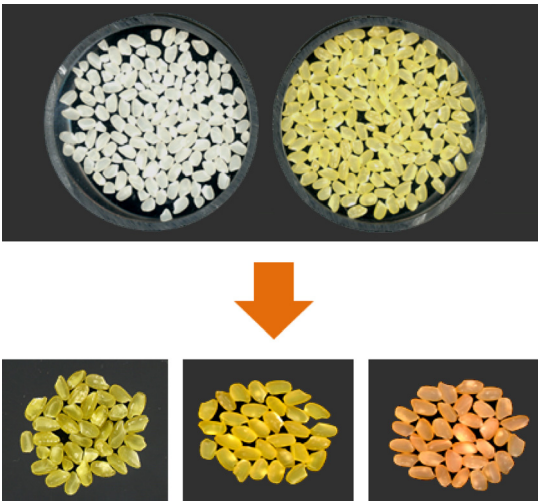


그림 3-13 ◂◂ 영양성분이 강화된 고부가 GM 칼러쌀

성공을 거두는 등 첨단농업기술에 대한 국가 기술경쟁력 확보가 가능하다는 것도 증명해 보이고 있다(그림 3-13).

미래 기후변화에 대비한 가뭄저항성 작물개발도 좋은 성과를 거두었는데, 김주곤 교수가 개발한 가뭄저항성벼의 경우 그 우수성을 인정받아 외국 종자회사들로부터 기술이전을 계약하는 성과를 거두는 등 글로벌 종자시장 진출의 가능성도 확인한바 있다(그림 3-14). 이밖에도 조혈촉진제 생산작물, 간염바이러스 예방용 백신작물 등 3세대 GM작물도 활발히 연구가 진행되는 등 미래 GM작물 기술 경쟁력확보를 위한 노력도 꾸준히 진행되고 있다. 이러한 기술력 확보에는 농업생명공학연구를 통한 우

그림 3-14 ◂◂ 가뭄저항성 GM벼와 국내외 소개기사

리농업의 첨단산업화를 지향하는 정부의 정책의지가 큰 몫을 담당하였다. 특히, 2001년부터 시작된 당시 과학기술부와 농촌진흥청이 공동 지원하는 프론티어21사업의 작물기능유전체사업과 농촌진흥청의 바이오그린21사업의 추진이 농업생명공학 기반구축에 큰 힘이 되었다고 볼 수 있다. 이외에 농업생명공학 연구개발의 필요성에 대한 국회, 언론, 그리고 많은 일반 시민들의 지원 또한 GM작물 개발에 필요한 국가 기술경쟁력 확보에 큰 힘이 되었다.

하지만, 위에 소개한 GM작물들은 상업화용으로 개발된 GM작물은 아니다. 다만, 생명공학기술을 통해 우리나라의 주요 작물들을 보다 유용하게 개선할 수 있다는 것을 보여준 연구결과일 뿐이다. 현재 이들 중 일부는 안전성심사기준에 맞게 새롭게 만들어지고 있으며, 일부 작물들은 조만간 안전성평가를 추진할 계획으로 있다. 이와 같이, 우리의 경우 아직까지 상업화에 필요한 안전성

심사가 통과된 국내 개발 GM작물은 1건도 없는 실정이다. 즉. 선진국 대비 상용화 GM작물 기술력 확보가 매우 미흡하며 이에 따라 향후 다가올 GM작물 상용화 시대에 대비한 준비가 매우 부족한 것이다.

이미 설명한 것처럼 GM작물은 기존 육종기술로 해결이 어려운 농업현장의 문제를 극복해 줄 수 있는 최첨단 농업기술로서 국가 경쟁력 차원에서 필히 확보할 국가 핵심기술인 반면, 많은 국민들이 안전성에 대한 우려를 보이는 것도 사실이다. 또한 막대한 연구비 투자와 고도의 생명공학기술을 적용함과 동시에 일반 육종 품종과는 달리 철저한 안전성 평가와 엄격한 안전성심사라는 승인 절차를 거쳐야 하므로, 이들의 개발과 실용화를 위한 전략적 접근과 적정한 방향 정립이 매우 중요하다. 이런 차원에서 GM작물은 소비자나 수요자의 요구도 중요하지만 안전성 기준을 잘 고려하여 개발하는 것도 매우 중요할 것이다.

이에 농촌진흥청에서는 2011년부터 GM작물실용화사업단(2015년부터 'GM작물개발사업단'으로 개칭)을 출범시켜 안전성 기준에 맞고 소비자와 수요자가 필요로 하는 GM작물 개발에 본격적인 노력을 기울이고 있다. 이 "GM작물개발사업단'은 농촌진흥청의 농업생명공학 및 작물육종 연구기반을 중심으로 대학, 국공립 연구소, 민간기업의 전문연구팀이 공동으로 국내 농업의 어려움을 해소할 국내용 고부가 GM작물과 함께 글로벌 종자시장에 진출할 글로벌 GM작물을 산학관연 공동으로 개발하고 있다. 현재 사업단에서 향후 국내 상용화를 대비하여 개발 중인 GM작물은

표 3-3 국내용으로 개발 중인 GM작물

목표 형질	대상 작물						합계 (13작물)
	벼	콩	배추	고추	화훼류* (5작물)	기타** (4작물)	
불량환경 내성	9	1	2		3	3	18
병·해충저항성	5	3	2	2	6	1	19
생산성	6	1				1	8
품질/기능성	4	1	2		4	2	13
계	24	5	6	2	13	7	58종

* 화훼류: 국화, 장미, 카네이션, 백합, 난
** 기타 : 감자, 토마토, 마늘, 사료작물

총 13작물 58종이다(표 3-3). 이들은 특허권 최소화, 도입 유전자의 독성 및 알레르기 유발 가능성 사전 검토 등 개발 초기 단계부터 안전성심사 기준에 맞게 새롭게 제작되고 있으며, 단계별 철저한 정밀 검정을 통해 안전성 평가에 투입 가능한 적격 GM작물로 육성 중에 있다.

또한 사업단에서는 GM작물 상용화 기술기반 구축 및 성공사례 도출을 위해, 현재까지 개발된 유용 GM작물 중에서 안전성심사기준을 충족시키는 최종 후보인 4종을 선발하여 안전성평가를 실시하고 현재 안전성심사서 작성을 준비 중에 있다. 이들 4종에 대한 안전성심사가 통과되더라도 국민정서상 당장의 상용화

는 어려울 것이다. 하지만, 우리가 개발한 GM작물의 안전성이 검증될 것이며 우리나라도 상용화 GM작물 기술력을 확보한 것으로 인정받을 수 있을 것이다

(1) 제초제내성 GM잔디

안전성심사를 수행할 첫 번째 작물은 비식용인 제초제내성 GM잔디이다(그림 3-15). 다른 작물과 마찬가지로, 잔디의 경우도 잡초발생이 많아 제초작업에 많은 농약 및 노동력이 소요되고 있는 등 잡초관리에 많은 고생을 겪고 있다. 만약, 제초제내성 GM잔디가 안전성심사를 통과하여 상용화가 될 경우, 제초제 사용량과 노동력 절감을 통해 잡초관리 비용을 1/5로 줄일 것으로 예상되어 국내 잔디관리 애로사항 해결에 크게 기여할 것으로 기대되고 있다.

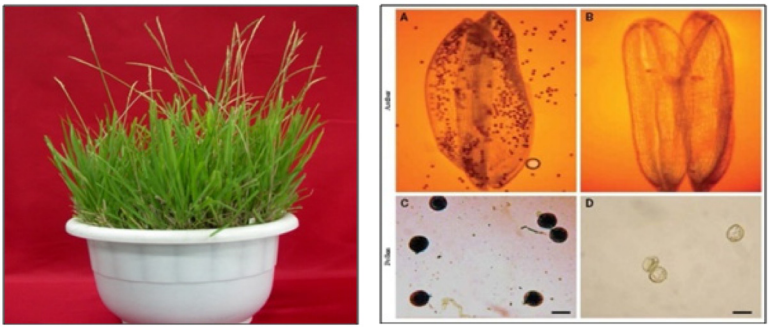


그림 3-15 ◂◂ 제초제내성 웅성불임 GM잔디

(2) 바이러스저항성 GM고추

두 번째 안전성심사 예정 작물은 바이러스저항성 GM고추이다(그림 3-16). 고추는 바이러스에 의한 수량 감소 및 품질저하가 심각한데, 피해발생시 생산량의 20~50%가 감소되는 매우 심각한 병이나 일반 육종으로는 저항성품종 육성이 불가능하다. 반면, 우리 기술로 개발된 바이러스 GM고추는 바이러스 피해의 80% 이상 보호가 가능하므로 상용화 될 경우에 생산량 보존 및 농약사용 절감으로 고추 농가의 수익증대에 크게 기여할 것으로 기대되고 있다. 현재 이 GM고추도 안전성평가를 마치고 안전성심사를 준비 중에 있는데, 심사를 통과할 경우 당장의 국내 상용화가 어려운 만큼 인도 등 다른 국가에 적합한 품종 육성을 위한 육종소재로 활용하는 등 세계시장 진출 가능성을 검토할 수 있을 것이다.

<GM고추> <일반고추>

그림 3-16 ◂◂ 바이러스저항성 GM고추

(3) 가뭄저항성 GM벼

세 번째는 가뭄저항성 GM벼로서, 당장의 상용화는 아니지만 향후 기후변화를 대비한 육종소재로 활용하기 위해 안전성평가를 수행하고 안전성심사를 준비 중에 있다. 실지로 기후변화에 따른 전 세계적 가뭄 발생으로 작물피해가 급증하고 있는데, 매년 600만 ha가 사막화 되면서 2015년에는 약 70% 인구가 물 부족 지역에 거주할 것으로 예상되고 있다. 국내의 경우도 매년 가뭄 위험성이 증대되고 있으므로 가뭄 피해 확대에 대비한 가뭄저항성 작물 개발이 매우 필요하나, 가뭄저항성은 일반 육종으로는 해결이 매우 어려운 농업형질로 알려져 있다. 반면, 국내 개발된 고유 유전자를 이용하여 만든 이 가뭄저항성 GM벼는 가뭄조건하에서 일반 벼에 비하여 20% 내외의 생산량 보존 효과가 있는 것으로 보고된바, 향후 기후변화 대비 작물 육종소재로 크게 기여할 것으로 기대된다 (그림 3-17).

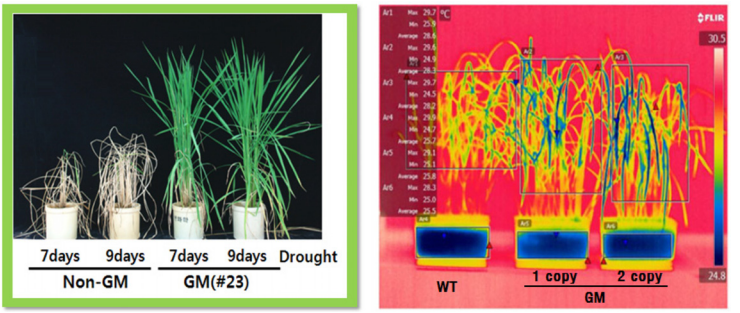


그림 3-17 ◂◂ 기후변화 대응 가뭄저항성 GM벼(척박지 및 직파재배용)

(4) 대사성질환예방 GM쌀

마지막으로 안전성평가를 수행하고 안전성심사를 준비 중인 작물은 대사성 질환 예방용 기능성물질 생산 고부가 GM쌀이다. 이 쌀은 동물실험을 통해 당뇨, 고혈압 등 대사성질환 예방 및 비만 억제에 도움이 되며 미백 효과도 탁월한 것으로 확인이 되면서, 쌀을 주식으로 먹는 우리 국민들의 건강에 도움이 되는 동시에 향후 산업소재로 활용가치가 높을 것으로 기대되고 있다(그림 3-18). 향후 이 GM쌀이 국민들의 공감대가 조성되어 상용화 될 경우 우리 쌀의 가치 증진과 함께 소비/수요확대를 통한 농가소득 증대와 식량안보의 기본인 주곡의 안정적 생산기반 확보에 크게

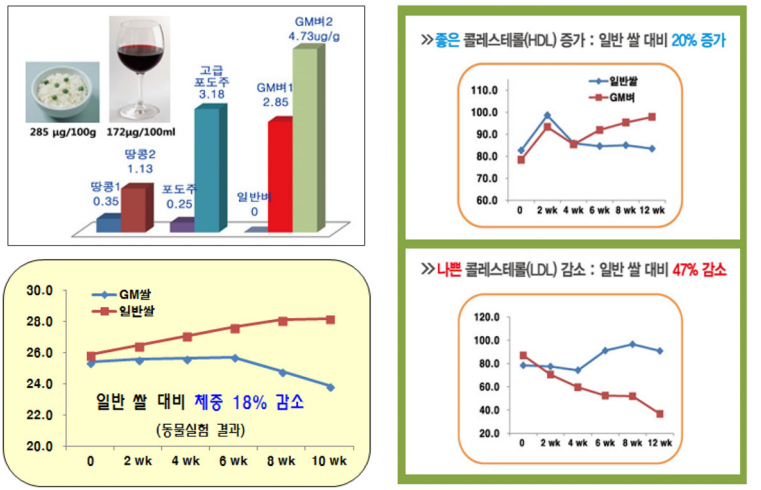


그림 3-18 ◂◂ 레스베라트롤 생합성 고부가가치 GM벼의 동물실험 결과

기여할 것으로 기대된다. 쌀 시장이 개방된 현재 우리 쌀의 품질과 가격 경쟁력 확보는 매우 중요한 숙제임이 틀림없다. 하지만 GM쌀이 안전성심사를 통과하더라도 당장의 농가재배 등 상용화가 어려운 만큼, 밀폐된 공간에서 캘러스 및 세포배양액을 활용한 고가 화장품이나 기능성물질 등 산업소재 생산을 우선 추진하는 방안이 바람직하다는 것이 전문가들의 의견이다. 이럴 경우 우리 쌀 가공물의 수출 등으로 수요확대가 가능한 만큼 우리 주곡의 안정적 생산기반 확보와 함께 우리 농업이 국가경제를 견인할 수 있는 첨단농업의 전기를 마련할 수 있는 좋은 성공사례가 될 것이다.

이 밖에, 글로벌 시장 진출용 GM작물도 병행 개발 중에 있으나, 아직까지는 유전자 기능 검정용이 대부분이다. 이들 글로벌 시장진출용 형질전환작물의 주요 목표형질은 가뭄저항성이며, 다수확, 비료효율 증대, 병해충저항성 등도 주요 연구대상이다. 향후 종자시장은 GM종자가 주를 이룰 것으로 예측되고 있다. 즉, 고유 유전자 발굴 후 국내외 종자기업과 공동연구로 GM종자를 개발하여 글로벌 시장에 진출하는 것이 바람직하다고 생각한다. 주요 연구대상은 가뭄저항성, 다수확, 질소비료 저감 등이며 글로벌 곡물시장의 주요 품목인 옥수수와 콩 등이 대상작목이 될 것이다. 현재 국내 GM곡물 수입은 매년 3조원에 이르는 막대한 양이다. 이를 대체하기 위한 방안은 결국 자체 GM종자 개발을 통한 해외재배 후 도입 등의 노력이 필요하며, 더 나아가서 우수한 글로벌 GM종자 자체개발을 통해 세계 종자시장으로 진출하

는 능동적이고 적극적인 노력이 필요하다고 본다. 2014년 기준으로 이미 글로벌 종자시장 가치의 35% 이상인 156억 달러를 차지하고 있는 GM종자 시장은 향후 지속적으로 증가하여 2015년도에 GM종자 시장이 200억 달러로 증가할 것으로 전문가들은 예측하고 있다. 2014년 기준으로만 보더라도 156억 달러의 GM종자 가치를 생산액 기준으로 환산하면 약 190조원, 식품 등 가공용으로 확대 시 최소 300조원 이상의 엄청난 산업시장인 것이다. 우리 농업이 국가 식량안보 및 국민의 안전한 먹거리와 건강유지를 책임지고 있는 중요한 기반 산업임은 우리 모두가 잘 알고 있다. 하지만 창조경제 시대에 우리 농업이 국내 경제를 리드할 창조농업으로 탈바꿈하기 위해서는 이러한 막대한 글로벌 시장에 진출하기 위한 창조적이고 진취적인 노력이 필요하다고 본다.[1)]

3.5.1 GM작물 개발 기술경쟁력 확보를 위한 고려 사항

GM작물의 경우 고도의 생명공학기술을 적용함과 동시에 일반 육종 품종과는 달리 안전성심사라는 승인 절차를 거쳐야 하므로 이들의 실용화를 위해 해결해야 할 문제들이 많다. 첫째로 GM작물의 실질적 동등성에 대한 인식부족이다. GM작물의 국내연구는 실용화에 초점을 맞추기보다는 유전자의 기능검정에 그치는 경우가 대부분이다. GM작물연구는 온실이나 생육상 등에서 소수의 이벤트를 대상으로 수행한 결과 후기세대에 다다르면 비형질전환

1) 2013 바이오안전성백서, GM작물개발사업단 보고서 등

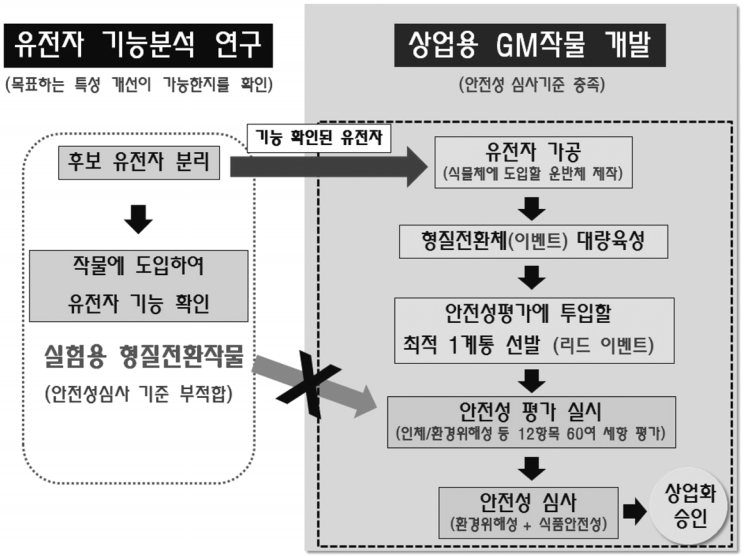


그림 3-19 ◂◂ 상업용 GM작물 개발 절차

체와 실질적 동등성이 크게 차이가 나타나 품종실용화 요구조건에 부적합하다. GM작물의 실용화를 위해선 포장검정이 필수적이며 포장선발은 형질전환체의 충분한 이벤트를 대상으로 분자생물학자와 고도로 숙련된 육종가에 의한 초기세대(T1- T3)의 표현형 선발이 이루어져야 가능하다. 국내 형질전환 작물의 포장검정은 소면적 소수의 이벤트를 대상으로 진행되어 왔으므로 실용화 품종개발이 미흡한 실정이다(그림 3-19).

두번째로는 GM작물 실용화를 위한 검정시스템의 부재를 들 수 있다. 지금까지의 GM작물개발 연구는 단지 유용한 유전자를

작물에 도입시킨 뒤 어느 정도 형질이 발견되면 안전성평가를 진행시켜왔다. 하지만 검증 시스템의 부재로 이벤트로 개발 중인 대부분의 GM작물들이 안전성평가 단계에서 유전특성(유전자 도입 위치 및 copy 수, 플라스미드 backbone 포함 여부, 도입유전자 casette 온전성 여부, 복수 세대에서 도입유전자의 안정성) 의 문제로 개발이 중단되어 많은 인력과 시간을 낭비하고 있는 실정이다. 따라서 GM작물 실용화를 위한 연구체계 및 검정시스템의 개발이 절실히 요구된다.

이러한 기술적 문제 외에 실용화에 가장 중요한 문제는 국가정책 의지와 소비자들의 인식이라고 볼 수 있다. 우리나라는 세계적으로 GM작물에 대한 부정적 인식이 높은 편이며 이러한 현상은 객관적, 과학적 근거에 기초한 생각보다는 어느 한편의 일방적인 주장이나 막연한 불안감에 크게 좌우된 판단이라고 볼 수 있다. 이러한 부정적 인식은 GM작물의 상업화 및 실용화를 가로막고 있으며, GM작물개발 연구에도 큰 걸림돌로 작용하고 있다. 따라서 좀 더 객관적이고 과학적인 정보제공을 바탕으로 이들에 대한 인식개선을 위한 소통과 노력이 필요하다. 국가적으로는 국가별로 중점 대상기술인 GM작물 기술개발에 대한 투자와 정책의지가 중요하다. 특히 글로벌 종자기업과 같이 막대한 기술 개발비를 투입하는 선진국과의 기술경쟁력을 확보하기 위한 범국가적 노력과 우리 농업의 첨단산업화를 주도할 농업생명공학기술 활용을 위한 국가 차원의 투자와 지원이 절실한 상황이다.

CHAPTER

04 GM작물의 환경 위해성 평가

4.1 국제적인 GM작물 환경위해성 평가기준

GM작물에 대한 일반 소비자들의 시각은 GM작물이 환경 또는 자연 생태계를 교란시켜 생물의 다양성이 파괴되고 슈퍼잡초의 탄생 및 내성 곤충의 조기 출현 가능성, GM작물의 잡초화 가능성, GM작물에 도입된 유전자가 야생종 및 토양미생물과 같은 다른 생물종으로 전이될 가능성 등을 우려하고 있다. 이러한 환경위해성에 대한 논란을 잠재우고 안전성을 확보하기 위해, GM작물 개발자의 자발적인 안전성 검사와 함께 세계 각국의 정부는 객관적인 안전성을 확보하기 위해 제도적인 장치를 마련하여 규제 및 관리를 하고 있다.

대부분의 OECD 회원국이나 비회원국들은 환경방출용 GM작물에 대한 규제 관리 시스템을 가지고 있다. 그러나 GM작물에 대한 위해성 평가 기준 및 방법에 대한 국제적인 표준 지침이 없어서 규제관리에 대한 국제간 조화를 위해 국제기구인 OECD의 '생명공학의 규제 조화를 위한 실무 그룹회의'에서 과학적 근거에 기반하여 유전자변형생물체에 대한 위해성 평가 기준, 방법, 제도 등의 내용을 답은 합의 보고서(Consensus Documents)를 만들

었다.[1)]

LMO(Living Modified Organisms)의 국가 간 이동으로 인해 발생할 수 있는 인체 위해 및 환경 위해를 방지하기 위한 국제적 노력으로 생물다양성협약의 부속의정서로 2000년 1월에 채택된 바이오안전성의정서는 사전예방원칙을 적용하고 있다.[2)]

이 바이오안전성의정서에서는 위해성 평가의 목적을 '잠재적인 수용환경에서 생물다양성의 보존과 지속가능한 이용을 달성하기 위하여, 인간의 건강에 대한 위해를 고려하여 유전자변형생물체가 미칠 수 있는 잠재적인 부정적 영향을 확인하고 평가하는데 있다'라고 밝히고 있다. GM작물의 환경위해성 평가의 국제적 원칙으로 과학적 근거주의(Science-based), 증거주의(Evidence-based), 사전예방주의(Precautionary Approach), 그리고 각국의 사안별평가 인정주의(Case-by-case) 등이 요구되고 있다.

이와 같이 GM작물에 대한 환경위해성 평가는 환경에서 예측가능한 모든 요소들에 대하여 사안별 평가(case-by-case) 및 비교분석을 통해 과학적 지식과 경험에 근거하여야 하며, 그 범위 내에서 평가가 이루어져야한다는 공감대가 형성되었다. GM작물에 도입된 유전자의 종류 및 형질, 그리고 새로운 유전자가 도입된 생물체의 종류와 방출 환경에 따라 매우 다르므로 기존의 농약이나 의약품과 같은 화학물질에 대한 환경위해성 평가와는 달리 GM작

1) OECD, Consensus documents on BIOSAFETY(Environmental safety) (http://www.oecd.org/science/biotrack/)

2) Cartagena Protocol on Biosafety to the Convention on Biological Diversity. Montreal, 29 January 2000

물의 환경위해성 평가에는 사안별 평가(case-by-case) 시스템을 적용하고 있으며, GM작물을 기존 작물과 비교하여 새로이 도입된 유전자로 인해 차이점은 없는지 비교분석하고, 재배로 인해 환경에 미치는 영향은 없는지를 평가하게 된다.

4.2 우리나라 GM작물 환경위해성 평가기준

2000년대에 들어 GM작물에 대한 연구개발과 상업화가 늘어나면서 원료 농산물 수입을 관장하고 있는 농림부(현재 농림축산식품부)는 유전자변형 농산물 생산과 수입 단계에서 안전성을 확보하기 위하여 2002년 1월 9일 농림부고시 제2002-2호로 '유전자변형 농산물의 환경위해성 평가심사 지침'을 고시하고, 농촌진흥청을 GM작물 환경위해성 심사기관으로 지정하여, 외국으로부터 국내에 수입된 식품 및 사료용의 목적으로 비의도적 환경방출 가능성에 대한 심사를 유전자변형 농산물의 환경위해성 평가심사지침에 따라 2003년 9월부터 국내로 수입되는 모든 GM작물에 대해 심사를 진행하였다.

LMO법이 발효된 2008년 1월 1일부터 현재까지 유전자변형생물체(이하 'LMO')의 환경위해성심사는 유전자변형생물체의 국가 간 이동 등에 관한 통합고시(이하 'LMO 통합고시')'에 따라 농업용, 임업용, 축산용 등 모든 LMO에 대해서 환경위해성 심사를 실시하고 있다. 그러나 2014년 12월말 현재 우리나라에서 환경위해성 심사가 이루어진 GM작물은 모두 식품, 사료, 가공용으로

서 국내에서는 재배 및 생산하지 않는다는 조건이 붙어 있다. 환경 방출용이 아닌 GM작물의 경우에는 이와 같이 전 세계 대부분의 국가에서 수출국의 환경위해성 평가 자료를 토대로 승인이 이루

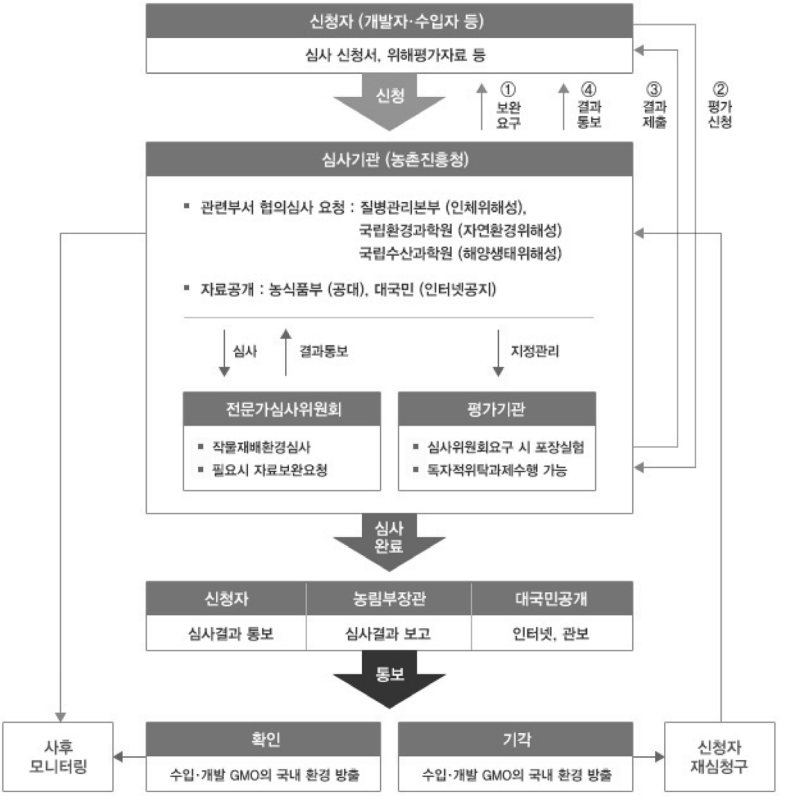


그림 4-1 ◂◂ 우리나라의 GM작물의 환경위해성 심사 절차[1)]

1)농촌진흥청(http://kabic.naas.go.kr)

어지고 있다. 현재 농림축산업용 유전자변형생물체에 대한 환경 위해성 심사는 농촌진흥청에서 주관하고 있으며, 심사 절차를 그림 4-1에 도식화 하였으며, 2014년 12월말 기준으로 5개 작물인 콩, 옥수수, 면화, 카놀라, 알팔파에 대해 총 104건이 승인되었다 (그림 4-2).

개발된 GM작물에 대한 환경위해성의 정확한 평가로 의도적 혹은 비의도적으로 환경에 방출되었을 때 토종자원의 오염이나 다른 작물 및 재배환경에 영향을 미치는지 여부를 과학적인 근거 자료를 바탕으로 평가하고 있다. 이를 위해 제출되는 심사신청

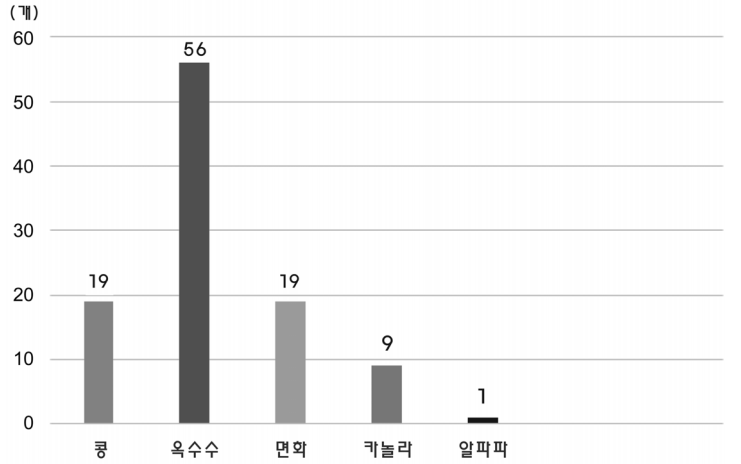


그림 4-2 ◂◂ 농촌진흥청의 GM작물별 승인 현황(2014. 12. 31 기준)[1)]

1) 농촌진흥청

자료는 LMO 통합고시 별표 10-1에 제시된 항목을 충족하여야 한다(표 4-1).

우리나라에서 GM작물의 환경위해성 평가를 위해 개발자가 제출하여야 할 심사 자료에는 개발의 목적 및 용도에 관한 자료, 숙주생물체에 관한 자료, 공여생물체에 관한 자료, 운반체(vector)에 관한 자료, 도입유전자에 관한 자료, 유전자변형생물체의 개발에 관한 자료, 유전자변형생물체 특성에 관한 자료, 유전자변형생물체와 비변형생물체의 비교자료, 세부 위해 영향 자료, 유전자변형생물체의 환경방출·모니터링·폐기에 관한 자료, 해외 인가 및 이용 상황에 대한 자료 등이 있다.

표 4-1 유전자변형생물체 위해성평가 자료

1. 개발의 목적 및 용도에 관한 자료

가. 개발의 목적

나. 개발의 유용성 및 용도

2. 숙주생물체에 관한 자료

가. 분류학상 위치(학명, 일반명, 품종·계통명 등을 포함)

나. 자연생태계 또는 해양생태계에 있어서 분포 상황

다. 인류에 의한 이용 내력(국내외에서의 이용 상황, 재배(배양) 또는 양식 및 품종 개량의 역사, 원산지 및 유전적 다양성의 중심지 등 포함)

라. 생물학적 특성(자연환경 또는 해양수산환경과 이를 반영하는 시험 조건하의 생존 및 생식·번식 능력)

(1) 자연생태계 또는 해양생태계에서 다른 생물과의 상호작용(천적, 병원성생물, 경쟁자, 포식자 등)

(2) 생식양식 및 다른 품종 또는 근연종과의 생식 호환성

(3) 산포(화분·종자의 산포 특성, 산포에 영향을 주는 환경요인)
(4) 이동(해양수산생물의 경우)
마. 유해 물질의 생산 가능성(근연종의 유해물질 생산가능성 포함)
바. 숙주 및 근연종에서의 독소 생산성 및 알레르기 유발성 보고 자료
사. 병원성 및 외래인자(바이러스 등)의 오염여부
아. 기생성 등 기타 주요한 생리학적 성질
자. 미생물인 경우, 병원성 존재 여부 또는 알려진 병원체와의 관련성에 관한 조사자료
차. 잡초화(또는 야생형화) 가능성 및 해양수산생물일 경우, 국내 생태계 토착화 가능성

3. 공여생물체에 관한 자료

가. 분류학상 위치(학명, 일반명, 품종·계통명 등을 포함)
나. 자연생태계 또는 해양생태계에 있어서 분포 상황
다. 인류에 의한 이용 내력
라. 생물학적 특성
라. 유독 물질의 생산 가능성
마. 공여생물체 및 근연종에서의 독소 생산성 및 알레르기 유발 가능성
바. 미생물인 경우, 병원성 존재 여부 또는 알려진 병원체와의 관련성

4. 운반체(vector)에 관한 자료

가. 명칭 및 유래(GenBank Accession No. 등)
나. DNA분자량
다. 운반체 구성요소에 관한 정보(유래, 기능, 크기, 염기서열 등)
라. 제한효소에 의한 절단지도(벡터 내 유전적 요소, 위치, 방향성, 염기서열 등 포함)
마. 유해 염기배열 등의 유무
바. 벡터가 다른 세포로 전달될 가능성 및 해양수산생물일 경우, 국내 생태계 토착화 가능성 또는 숙주 의존성
사. 운반체 대량발현을 위한 중간 숙주 이용 시 중간숙주 내 유전요소의 확인 및 기능
아. 필요 시, 중간숙주의 독소생산성, 알레르기성, 병원성 보고자료

5. 도입유전자에 관한 자료

가. 도입된 유전자의 분자량, 기능 및 특성

나. 도입 유전자의 구성요소에 관한 정보(유래, 기능, 크기, 염기서열 등)

(1) 도입유전자

(2) 프로모터 및 조절인자(전사개시인자 및 종결인자 등)

(3) 선발표지유전자

(4) 그 밖의 조절인자 및 DNA 기능에 영향을 주는 기타 인자이용을 위하여 유전자를 변형한 내용

다. 위해염기서열의 존재 유무

라. 완성된 벡터 내에서의 도입유전자 염기서열 위치 및 방향성

마. 외래전사해독 프레임의 유무와 그 전사 및 발현 가능성

6. 유전자변형생물체의 개발에 관한 자료

가. 유전자변형 방법(형질전환 방법)

나. 유전자변형생물체의 개발 과정에 대한 설명(재배, 배양, 육종법 등)

7. 유전자변형생물체 특성에 관한 자료

가. 유전자변형생물체 내 도입유전자에 관한 자료

(1) 유전자변형생물체 내 도입유전자 구성 요소 확인

(2) 유전자의 도입 위치(염색체 또는 세포 미소기관) 및 염기서열(숙주 게놈 주변염기서열 포함)

(3) 도입 유전자의 복제수

(4) 도입유전자의 검출 및 발현의 확인에 사용된 방법

(5) 도입유전자 안정성에 대한 자료

(가) 도입된 유전자의 복수 세대 동안 후대 안정성

(나) 도입된 유전자의 생장시기(Growth Stage)별, 생장부위(Growth Site)별 복수세대 동안 유전자 수준 변화 확인

(6) 유전자변형생물체 게놈에 도입된 유전자가 독소, 알레르겐을 암호화하지 않음을 증명하는 자료

나. 도입유전자 발현산물에 관한 자료

(1) 유전자산물의 기능 및 형질 특성(단백질, 비번역 RNA 등)

(2) 유전자산물의 구조적 평가(단백질생성 후 변이 여부에 대한 평가자료)

(3) 유전자산물의 복수세대 동안 발현부위, 발현시기, 발현량에 대한 평가 및 측정방법과 사용된 실험 및 기기에 대한 민감도
(4) 유전자산물이 대사경로에 미치는 영향
(5) 선발표지유전자 도입 시, 이에 대한 발현산물에 관한 자료[(1)~(4)]
(6) 유전자변형생물체 발현산물의 검출에 대한 확인 방법 및 결과

8. 유전자변형생물체와 비변형생물체의 비교자료

가. 유전자변형 후의 개선된 특성 및 성질
나. 숙주와 유전자변형생물체의 생존, 증식 및 불활성화 방법의 차이 비교
다. 숙주 또는 숙주가 속하는 생물종과의 차이점
(1) 자연환경 또는 자연환경을 반영하는 시험 조건하의 생존 및 생식·번식 능력
(2) 생식·번식양식 주기 및 교잡성
(3) 자연생태계 또는 해양생태계에서 다른 생물과의 상호작용(천적, 병원성생물, 경쟁자, 포식자 등)
(4) 생식양식 및 다른 품종 또는 근연종과의 생식 호환성
(5) 산포(화분·종자의 산포 특성, 산포에 영향을 주는 환경요인)
(6) 이동(해양수산생물의 경우)
(7) 유해물질 생산 및 생태계 잔류 영향
(8) 체조성성분 비교자료

9. 세부 위해 영향 자료

가. 유독 물질의 생성과 관련된 정보(생물체가 분비하는 독성 물질의 여부 등)
나. 주변 생물 및 생태계에 미칠 수 있는 영향에 관한 정보
다. 잡초(야생)화 및 토착화 가능성 관련 정보
라. 유전자변형생물체를 도입하고자 하는 환경에 대한 정보
(1) 유전자변형생물체 원산지와의 거리
(2) 지리적, 기후, 주변 동식물의 생태학적 특성에 관한 정보
마. 유전자변형생물체의 독성에 관한 자료
(1) 조사자료
(가) 유전자산물 또는 이의 대사산물이 일으킬 수 있는 잠재적 독성
(나) 유전자산물 및 이의 대사산물 등과 이미 알려진 독성 단백질과의 구조적 상동성 유무

(다) 작업자, 최종 이용자가 흡입, 섭취 등의 방법으로 유전자변형생물체에 노출되는 평균 노출량 산출

(라) 미생물 등에서 대체 생산된 발현단백질을 이용하여 독성실험 등을 하는 경우, 유전자변형생물체 내 발현단백질과의 생물학적 동등성 평가

(2) 독성 실험자료

(가) 단회투여독성

(나) 필요시 기타 독성

바. 유전자변형생물체의 알레르기성에 관한 자료

(1) 조사자료

(가) 유전자산물의 잠재적 알레르기성

(나) 유전자산물 및 이의 대사산물 등과 이미 알려진 알레르겐과의 구조적 상동성 유무

(2) 숙주 또는 공여체가 알레르기 유발성이 있는 경우 또는 유전자산물이 알려진 알레르겐과의 구조적 유사성이 확인될 경우, 환자특이적 IgE 항체와의 교차반응 평가

10. 유전자변형생물체의 환경방출·모니터링·폐기에 관한 자료

가. 원형상태의 식용·사료용·가공용 유전자변형생물체의 경우(해당 유전자변형 생물체 생산국 자료)

(1) 환경방출 기간 및 일시

(2) 환경방출 장소(지리학적 특성, 지질학적 특성, 해양수산환경 특성, 자연환경 보전지역 등 생물학적 중요 보호구역과의 관계)

(3) 방출 생태계(방출지역의 근연종 등 생물체 종류 및 분포)

(4) 방출 방법 및 방출 양

(5) 실시 결과 및 데이터

(6) 기존 방출인가 정보(인가국가, 인가일시, 인가번호)

(7) 모니터링 시행 계획(방법, 기간, 빈도)

(8) 유전자변형생물체의 불활성화 방법

(9) 긴급 상황 대응 계획(확산방지)

(10) 폐기물의 처리 방안

나. 재배용(이식용) 유전자변형생물체에 해당하는 경우(국내 포장 및 격리 시험정보)
(1) 실시시간
(2) 실시방법
(3) 실시규모
(4) 종료 시의 처리방법
(5) 실시 결과 및 데이터
(6) 모니터링 시행 계획(방법, 기간, 빈도)
(7) 유전자변형생물체의 불활성화 방법
(8) 긴급 상황 대응 계획(확산방지)
(9) 폐기물의 처리 방안

11. 해외 인가 및 이용 상황

가. 국가명
나. 기관명
다. 위해성평가기관
라. 인가번호
마. 인가자료
바. 이용 상황 등

12. 표준품 제출

유전자변형생물체 정성 및 정량 검정을 위한 유전자 염기서열 정보 및 표준시료(표준 시료는 국가의 검역, 유통 감시업무에 활용할 수 있도록 종자당 등 원재료 상태로 제출)

가. 해당 유전자변형생물체와 숙주 생물체의 불활성 종자(또는 개체) 각각 50종자(또는 개체) 및 혼합시료 1kg

마. 해당 숙주 생물체에 특이적이며, 게놈(genome)에 존재하는 내재유전자의 염기서열(sequence) 정보

바. 해당 유전자변형생물체의 특이적 검출을 위한, 숙주 생물체의 게놈(genome) 유전자와 외래도입 유전자의 5′ 및 3′ 말단 부분과의 양 연결부위에 대한 염기서열(sequence) 정보

사. 기타 분석방법 개발에 필요한 유전정보 등

유전자변형생물체의 위해성 평가 및 심사에 대한 전문성 및 공정성을 확보하기 위하여 전문가 심사위원회를 설치·운영하며, 전문가심사위원회는 신청된 사안별로 학계, 민간, 관계 등의 식물, 육종, 환경, 생태, 생리, 곤충, 조류, 미생물, 분자생물에 대한 전문가 중에서 농촌진흥청장이 위촉하는 15인 이내의 위원으로 구성하여 일반자료분과, 분자생물학 자료분과, 생리·생태자료분과, 유전·육종자료분과, 독성 및 타생물영향자료분과 등 5개분과별로 검토내용을 중점적으로 심의한다. 심사자료에 대하여 재배시험이 필요하다고 환경위해성 전문가심사위원회의 결정이 내려지면 언제든지 국내 지정된 환경위해성 평가기관에서 재배시험을 실시하도록 되어 있다. 전문가심사위원회에 제출한 자료의 과학적 타당성이 인정되고, 이들 제출자료를 심사한 결과 심사지침에 따른 안전성평가가 이루어졌음이 확인되면 농림부장관은 취급관리, 국경감시, 사회적 인식 등을 종합적으로 고려하여 최종 승인된다.

다음은 GM작물의 위해성 평가 시 제출되는 여러 가지 자료 중에서 유독물질 생성여부 평가, 잡초화 가능성 여부 평가, 주변 생물 및 생태계에 미칠 수 있는 영향 평가, 도입하고자하는 환경에 대한 평가에 대해 서술하고자 한다.

4.2.1 GM작물의 유독물질 생성여부 평가

GM작물의 유독물질 생성여부를 평가하기 위해서 GM작물에 도입된 유전자에 의해 발현되는 단백질의 독성 여부와 생태계 잔류 영향을 확인하게 된다. 먼저 GM작물이 분비하는 물질의 독성

여부는 일반적으로 다음 6가지 평가 항목에 따라 평가하게 된다. 환경위해성평가를 위한 여러 평가 방법에서도 해당 단백질의 식품안전성평가에 사용하는 항목들을 동일하게 사용하고 있다.

1) 안전한 식경험의 유무에 대한 평가방법은 유전자 산물 및 유전자 산물이 포함된 생물체의 식경험 유무를 확인하고, 식경험이 있는 경우 섭취방법, 유전자산물의 안전한 최대 섭취량 등의 자료를 검토한다.

2) 알려진 독성물질과의 아미노산 서열 상동성 평가방법은 GM 작물에 도입된 유전자에 의해 발현되는 유전자산물이 기지의 독성을 나타내는 물질 및 항영양소의 아미노산 서열과 유사성을 나타내는지 여부를 확인한다.

3) 펩신에 의한 *in vitro* 소화도 평가는 인공위액에 의한 단백질의 분해시간을 측정하여, 소화 안정성을 가지고 있는지 여부를 확인한다.

4) 판크레아틴에 의한 *in vitro* 소화도 평가는 인공장액에 의한 단백질의 분해시간을 측정하여, 소화 안정성을 가지고 있는지 여부를 확인한다.

5) 열안정성 평가는 유전자 산물이 열처리에 안정성을 가지고 있는지 여부를 검토한다.

6) 급성경구독성 평가는 유전자 산물의 잠재적인 독성을 평가하기 위해 급성 경구 투여 독성 실험을 실시하고, 아무런 악영향을 감지할 수 없는 농도인 최대무독성량(no-observed-adverse-effect

level, NOAEL)을 설정한다. 이러한 실험은 우수실험실운영기준(Good Laboratory Practice, GLP)을 인증받은 기관에서 국제적으로 인정된 독성학적 실험 방법으로 수행되어야 한다.

이러한 평가항목들을 종합적으로 분석하여 해당 유전자산물의 독성유무를 평가한다.

4.2.2 GM작물의 잡초화 가능성 여부 평가

GM작물은 식물생명공학기술에 의해 새로운 기능(제초제 내성, 해충 저항성 등)이 부여된 작물이다. 이러한 GM작물을 모본 작물과 비교하여 자연환경에서의 생존 및 증식에 차이가 없음을 비교하여 자연환경에 노출 시 우점종이 되거나 더 나아가 잡초화 될 가능성이 있는지 평가한다.

잡초는 경작지, 화단 등 우리가 원하지 않는 장소에 자라나는 풀로 재배하는 식물 이외의 것을 지칭한다. 이러한 잡초는 작물에 비해 생육이 빠르고 번식력이 강할 뿐 아니라 수명도 길며 직간접적으로 작물에 해를 입힌다. 작물의 잡초화는 야생식물 군락과 기타 작물의 생산량 모두에 악영향을 끼칠 수 있다. 만약 야생종과 함께 GM작물 혹은 그 교배종의 야생종집단이 반자연 혹은 자연서식지에 자리 잡고 번성한다면, 야생식물의 개체수와 다양성이 줄어들 수 있다. 뿐만 아니라 야생식물을 주식으로 섭취하거나 은신처로 이용하는 생물들 또한 피해를 입을 수 있다. 예를 들어 만약 GM 콩이 관행품종 콩보다 자생식물 잡초가 될 가능성이 더 높다면 다른 작물의 생산성 또한 영향을 받게 된다. 자생식물은 경쟁을

통해서 직접적으로 작물 생산량을 감소시키며, 병해충을 옮기는 매개체 역할을 함으로써 간접적으로 작물 생산량을 감소시킨다.

세계적으로 나타난 잡초화 발생 기록과 보고된 잡초와의 분류학적 관계를 알아보는 것은 특정 식물의 잡초화 가능성에 대한 중요한 지표가 될 수 있다. 일반적으로 인간의 경종체계로 들어와 육종된 작물들은 육종과정에서 생산성, 맛, 재배 편이성 등이 강화되어 인간의 보살핌이 없는 자연환경에서는 일반적으로 쉽게 도태된다. 면화의 경우에서 나타나는 바와 같이 지난 수세기 동안 전 세계적으로 재배되었지만 심각한 잡초화 성향을 나타낸 사례는 보고되지 않았으며, 세계적으로 재배되고 있는 약 50종의 *Gossypium* 속 작물 중 어느 것도 심각한 잡초화 사례가 보고된 적이 없다.

잡초화 가능성과 관련된 일반적인 특성으로는 종자 휴면, 종자의 토양 내 잔존, 극한 환경 조건 하에서의 발아, 빠른 영양생장, 짧은 일생 주기, 매우 높은 종자 생산량, 높은 종자의 산포력과 원거리 산포력 등이 있다. 따라서 상기 항목과 관련하여 새로운 유전자가 삽입된 GM작물의 숙주 또는 숙주가 속하는 생물종 본연의 특성을 확인하고, 모본과 비교하여 GM작물의 잡초화 관련된 특성에 차이가 있는지 확인한다.

예를 들어, GM 콩의 경우에는 일반적인 콩의 몇 가지 특성이 농업에서 자생 잡초 군락을 형성하는 것을 어렵게 한다. 콩의 종실은 거의 휴면성을 나타내지 않으며 특정한 환경 조건에서만 월동이 가능하여 자생잡초로서 이듬해에 발아할 수 있다. 또한 종자는

꼬투리 안에 쌓여 있어서 종자 산포가 제한되고, 휴면성이 떨어져 어린 식물들은 어려운 겨울 환경조건에 노출되며, 다년생 식물에 비하여 경쟁력이 떨어진다.

따라서 앞서 언급한 이러한 자료들 통해 GM작물의 잡초화 가능성 여부를 평가한다.

4.2.3 GM작물의 주변 생물 및 생태계에 미칠 수 있는 영향 평가

현재 우리나라에서는 식품 및 사료, 가공용으로 GM 옥수수, 콩, 면화, 카놀라 등의 작물이 알곡의 형태로 수입되고 있어 수송, 가공 및 판매과정에서의 종자 유출 및 종자 오염 등 잠재적인 환경 방출 가능성의 우려가 있어 국내 환경 및 자연생태계에 미칠 수 있는 영향에 대해 평가를 수행 중에 있다.

GM작물 재배시 자연생태계에서 공존하게 되는 다른 동식물에 대한 영향평가를 실시한다. 특히, 해충저항성 GM작물의 경우, 해당 해충은 표적생물체가 되며, 이외의 다른 생물체는 비표적생물체가 된다. 이런 경우 일반적으로 무당벌레(ladybug), 반날개(Staphylinid beetle), 딱정벌레(Coleoptera), 노린재(*Orius* Flower bug), 꿀벌(Honey bee), 지렁이(Earth warm), 쥐(Mice), 메추라기(Bobwhite quail) 등이 독성평가에 사용되는 비표적생물체 지표종이다.

자연환경 내에서는 수많은 인자들이 이러한 생물체들과 서로 영향을 끼치기 때문에 제한된 요소의 차이만으로 이를 GM작물

의 영향이라고 단정하기는 쉽지 않다. 그럼에도 불구하고, GM작물의 주변 생물 및 생태계에 미칠 수 있는 영향평가를 위하여 재배환경 주위 생물체에 변이가 있는지를 모니터링 할 뿐만 아니라 지표종을 선택하여 실험실에서 표준화된 실험법으로 영향 유무를 평가하고 있다.

Bt 옥수수를 먹으면 나비가 죽는다? 군주나비 유충 사건

▸ 발단

1999년 코넬대학 연구원들은 제한적 실험실연구를 통해 해충저항성 Bt 옥수수의 꽃가루가 군주나비(monarch butterfly) 유충에게 위해하게 나타났다는 연구결과를 네이처(Nature) 논문에 발표한 바 있음

▸ 경과

- 코넬대학의 발표 이후 2001년 미농무부(USDA)와 대학 등(아이오와 주립대학, 메릴랜드 대학, 네브라스카 대학, 퍼듀 대학, 겔프 대학 등)의 관련 분야 연구진들이 특별 연구팀을 구성해 유사한 실험 시행.
- 실제 자연 환경에서 군주나비 유충이 해충저항성 Bt 옥수수의 꽃가루에 노출되는 경우는 극히 드물며 그 위해성도 극미하다고 결론지었음

▸ 결론

미 환경청(EPA) 역시 이후 GM 옥수수가 군주나비에 미칠 수 있는 잠재적 영향을 지속적으로 모니터링 및 관리하고 있으나 현재까지 위해성이 나타난 결과는 없었음

출처: 한국바이오안전성정보센터

4.2.4 GM작물을 도입하고자하는 환경에 대한 평가

GM작물의 위해성은 존재 가능한 잠재적 수용환경에서 non-GM 수용체나 공여생물체가 지닌 위해의 범위 내에서 고려하여야 하고, 사례별로 개별적으로 평가되어야 한다. 그러므로 위해성 평가 시, GM작물(옥수수, 콩, 벼, 등) 및 이의 용도(재배용, 식품 및 사료 또는 이의 가공용) 그리고 도입하고자 하는 환경 등에 따라 평가에 필요한 정보의 종류와 세부 수준이 달라질 수 있다.

GM작물을 도입하고자하는 환경에 대한 평가를 위해 일반적으로 존재 가능한 잠재적 수용환경의 생물 다양성과 기원 중심지에 관련된 정보를 포함한 수용환경의 위치, 그리고 지리적·기후적·생태학적 특성에 대한 정보 등이 요구된다. GM작물을 도입하고자하는 환경정보에 따라 평가에 필요한 정보의 종류와 세부 수준이 달라질 수 있다. 예를 들어, 주요 수입 GM작물 중 하나인 옥수수의 경우 근연종이라 할 수 있는 테오신테는 멕시코 등이 원산지이며, 국내에는 근연종이 존재한다고 알려지지 않았다. 그러므로 GM옥수수가 비의도적으로 국내 환경에 노출되더라도 근연종으로의 유전자 전이 등에 대한 우려는 없을 것이다. 그러나, 원산지가 한국, 중국 등 동북아시아로 알려진 콩의 경우에는, 국내에 야생종이 존재하기 때문에 GM작물의 위해성 평가 시 국내 환경으로의 노출에 따른 유전자 전이 등 부정적인 효과에 대해 추가적으로 고려해야 할 것이다.

또한 식품, 사료 및 이의 가공용으로 수입되는 GM작물의 경우, 비의도적 방출 등 환경 노출 가능성이 낮기 때문에 환경에 영향을 미칠 가능성 또한 매우 미비할 것으로 예상된다. 이에 한국을 포함한 대부분의 GM 작물 수입국에서는 재배 국가에서 수행된 시험자료를 사용하여 위해성 평가를 수행하고 있으며, 대만, 호주 등에서는 식품, 사료용 GM 작물에 대해서는 식품안전성 평가 외에 별도의 환경 위해성 평가를 수행하고 있지 않고 있다. 그러나 재배용의 경우 GM작물 재배를 통해 도입하고자 하는 환경에 대규모 노출이 예상되기 때문에, GM작물을 도입하고자하는 환경에서의 시험재배 및 이를 통한 GM작물의 주변생물 및 생태계에 미칠 수 있는 영향, 잡초화가능성 등의 분석을 통해 GM작물의 대규모 노출에 따른 부정적인 영향 및 그 파급효과를 계측하고 이를 근거로 GM 작물이 미칠 총체적 위해성에 대한 분석이 요구된다.

CHAPTER

05 GM작물의 안전성 평가

5.1 국제적인 GM작물 안전성 평가기준

1970년대 유전자재조합기술이 확립되고, 1980년대 이러한 기술이 농업분야에서 적용되고 실제로 새로운 품종이 개발됨에 따라 GM작물 유래 식품의 안전성 평가의 기본 개념과 원리를 1993년에 경제개발협력기구(OECD)가 '실질적 동등성(substantial equivalence)' 개념을 발표하였다. 그리고 이 평가 개념에 따라 OECD 회원국인 미국, EU, 일본 등을 중심으로 안전성 평가 제도를 정착해 나갔다.

GM작물의 식품 안전성 평가는 실질적 동등성을 바탕으로 하여 평가가 이루어진다. GM작물의 안전성을 평가할 때 적용하는 기본적인 원칙은 GM작물을 오랫동안 안전하게 먹어온 역사가 있는 기존의 식품과 비교하는 것이다. 비교를 할 때 비교의 대상이 되는 작물은 GM작물과 매우 근접한 품종이어야 하며, 해당 작물의 전형적인 위해요소를 비교하게 되는 것이다. GM작물 그 자체 또는 그것을 이용하여 생산된 새로운 식품이 기존 농산물 유래 식품과 비교하여 기존의 식품이 가지고 있지 않았던 새로운 위험요인을 함유하고 있는지, 만약 기존 식품이 가지고 있던 위험

요소라고 한다면 기존 식품에 들어있는 함량과 비교하였을 때 유의한 차이가 있는지를 비교 평가하여, 결과적으로 소비자들이 기존의 식품 대신 이 새로운 식품을 대체 사용하였을 때 건강에 위해를 주지 않고 영양상의 변화를 유발할지 또는 그렇지 않을지를 평가하는 것이 바로 실질적 동등성 개념이다.[1)]

이 실질적 동등성 개념은 이후 세계보건기구(WHO)와 농업식량기구(FAO) 산하의 국제식품규격위원회(Codex Alimentarius Commission, CODEX)를 중심으로 활발한 국제회의를 통해 '현대생명공학 유래 식품의 위해도 분석을 위한 원칙', '재조합-DNA 식물 유래 식품의 안전성 평가 실시에 관한 가이드라인'[2)] 등을 마련하여, 2003년 7월 CODEX 총회에서 채택함으로써 GM작물의 식품 안전성평가에 대한 국제적으로 합의된 지침을 마련하였다.

국제적으로 유전자변형식품 안전성 평가의 출발점이라 할 수 있는 이 '실질적 동등성' 개념은 GM 식품이 얼마나 안전하고 위험한지에 대한 절대적인 척도를 제시하기 위한 것이 아니고, 정상적인 가공과정을 거쳐 정상적으로 소비를 하였을 때 안전성면에서 기존의 식품과 비교하여 의도적 혹은 비의도적 차이가 무엇인지를 확인하고 차이가 있다면 이 차이에 안전성을 집중시키는 것이다.

CODEX의 '재조합-DNA 식물유래 식품의 안전성 평가 실시에 관한 가이드라인'에서 제시한 안전성평가 자료 제출 범위는 다음과 같다.

1) 김해영, 유전자재조합식품의 실질적 동등성 개념과 평가분석방법에 대한 연구(2003)

2) CODEX, Guideline for the Conduct of Food Safety Assessment of Foods Derived from Recombinant-DNA Plants(CAC/GL 45-2003)

- 재조합-DNA 식물체에 관한 자료
- 숙주와 그것의 식품으로서의 이용에 관한 자료
- 공여체에 관한 자료
- 유전자변형에 관한 자료
- 유전자변형체의 특성에 관한 자료
- 안전성 평가
  - 유전자산물
  - 주요 성분 분석
  - 대사산물 분석
  - 식품 가공
  - 영양학적 변화
- 그 밖의 검토 사항

재조합-DNA 식물체에 관한 자료로는 안전성 평가를 신청한 대상 GM작물의 특성(예를 들면 제초제 내성인지 해충 저항성인지 등)과 이 GM작물의 개발 목적 및 이용 방법 등이 요구된다.

숙주와 그것을 식품으로 이용한 이력에 관한 자료로는 숙주의 특성을 파악할 수 있도록 숙주의 일반명뿐만 아니라 학명, 분류학상의 분류, 재배품종 등과 같은 정보와 육종을 통한 재배 및 품종 개량 역사, 특히 사람의 건강에 악영향을 미칠 가능성이 있는 특성, 기존에 알려진 독소, 항영양소, 알레르기 유발물질 등 유해생리활성물질 생산 여부와 같은 안전성에 관련되는 숙주의 유전자형과 표현형, 숙주가 식품으로서 안전하게 이용되어 온 이력(식품

으로의 사용부위, 안전한 섭취를 위해 가공이 필요한 경우 그 가공 방법, 식이에서의 기여 정도)이 포함된다. 새로운 GM 작물을 개발함에 있어 현재까지는 우리가 안전하게 먹어온 식경험이 있는 식물들을 대상으로 연구개발이 이루어져 왔으며, 만일 식경험이 없었던 식물을 대상으로 GM작물을 개발한다면 그 숙주 식물체 자체에 대한 안전성을 먼저 평가 받아야 하기 때문에 그러한 GM작물이 식품으로서의 안전성을 승인 받기란 더 많은 시간과 비용이 들것이다. 이러한 이유로 아직까지 안전한 식경험이 없는 숙주를 GM작물로 개발하거나 승인 받은 사례는 없다.

공여체에 관한 정보는 GM작물에서 생산된 유전자산물의 안전성을 평가함에 있어 매우 중요한 정보이다. 형질전환에 사용되는 유전자들은 그 유래와 기능이 분명한 것이어야 하며, 유전자산물의 안전성을 평가하기 위해 그 유래가 되는 생물 즉 공여체에 대한 정보도 검토해야하는 것이다. 공여체에 관한 자료 역시 분류학적 특성(일반명, 학명, 계통 등)과 삽입 유전자의 공여체에 대한 안전한 식경험의 유무, 안전한 식경험이 있을 경우에는 재배 및 품종개량 역사와 식품으로서의 사용, 그리고 공여체의 독성, 항영양성, 알레르기성, 미생물일 경우에는 병원성 등을 포함한 안전성에 관련되는 정보가 포함된다.

이처럼 숙주와 공여체에 대한 항목들은 GM작물을 개발하는데 사용된 소재와 관련된 안전성에 문제가 없는지 검토하기 위해 필요한 정보인 것이다.

유전자변형에 관한 자료로는 숙주 식물체에 전달될 가능성이

있는 모든 물질을 확인하고 식물체에 도입된 DNA의 특성을 분석할 수 있도록 하기 위해 형질전환에 사용된 방법, 삽입 유전자의 생산 또는 가공에 사용한 생물 등의 중간 숙주 생물, 도입 유전자 및 벡터에 관한 정보와 같은 충분한 자료가 제공되어야 한다.

또한 유전자변형체의 특성에 관한 자료로는 식물 게놈에 삽입된 유전자와 GM작물에서 발현된 물질의 특성, 기능, 발현량 등에 관한 정보가 필요하고, 안전성 평가를 위해서 유전자산물의 독성과 알레르기 유발성에 관한 자료와 주요 성분의 조성분석, 대사산물에 관한 자료가 제공되어야 하며, 영양의 질이나 기능의 의도적인 변경을 목적으로 하여 개발된 GM작물의 경우에는 이러한 영양학적인 변화에 관한 자료도 요구된다. GM작물의 안전성 평가를 위해 요구되는 자료들 중에서 GM작물의 분자생물학적 평가, 독성 평가, 알레르기성 평가, 성분분석 및 동물사양 실험에 관한 내용은 뒤에서 다시 상세하게 알아보도록 하겠다.

위에서 언급한 이런 자료들을 통해 의도적인 변화에 대한 안전성을 평가하고 비의도적인 변화가 발생하였는지에 대한 확인 및 이것으로 인한 영향과 수용여부에 대한 평가가 가능하다.

미국은 유전자변형기술에 의해 생산된 GM작물과 재래적인 방식으로 생산된 non-GM작물의 차이가 없다는 전제하에 기존의 법과 규제 하에서 관리하고 있다. 미국의 식품의약국(FDA)은 GM작물과 같이 새로 개발한 식물 종(new plant varieties)을 이용해 생산된 모든 상업용 식품 및 식품 첨가물에 대한 안전성을 관장하고 있는데 생명공학 기술을 이용해 생산된 산물의 제조 과정

과 관련해서는 특별히 규제가 필요하지 않다는 입장을 유지하고 있다.

EU의 경우에는 유럽식품안전위원회(European Food Safety Authority, EFSA)에서, 일본은 후생노동성(Ministry of Health, Labor and Welfare, MHLW)의 안전성 심사 기준 등을 기본으로 식품안전위원회(Japanese Food Safety Commission, FSC)에서 GM작물의 인체위해성을 평가하고 있으며 국제적 평가 기준과 조화를 이루고 있다.

5.2 우리나라 GM작물 안전성평가 기준

농산물의 수입의존도가 높은 우리나라는 국제적으로 GM작물의 생산 및 유통이 활발해 지면서 이들 GM작물이 국내에 유입될 가능성이 매우 높아졌다. 이에 우리나라도 미국, EU, 일본 등에 이어 1999년부터 식품의약품안전청(현재 식품의약품안전처)가 유전자변형식품의 안전성 평가 제도를 운영하기 시작했다. 2004년부터는 식품위생법으로 안전성 평가를 의무화하여 안전성 심사를 통해 GM작물을 기존의 작물과 비교하여 안전성과 영양성면에서 동등하여 식품으로 적합하다고 사전에 심사 승인된 제품만이 국내 유통되도록 하고 있다. 안전성평가를 받지 않은 제품이 혼입된 경우 식품위생법 제4조 5항에 의해 수입 판매 등이 금지된다(표 5-1).

표 5-1 식품위생법의 유전자재조합식품 안전성평가 근거 및 관련 조항

식품위생법	조항 내용
제4조 (위해식품등의 판매 등 금지)	누구든지 다음 각 호의 어느 하나에 해당하는 식품등을 판매하거나 판매할 목적으로 채취·제조·수입·가공·사용·조리·저장·소분·운반 또는 진열하여서는 아니 된다. (생략) 5. 제18조에 따른 안전성 평가 대상인 농·축·수산물 등 가운데 안전성 평가를 받지 아니하였거나 안전성 평가에서 식용(食用)으로 부적합하다고 인정된 것
제18조 (유전자재조합 식품등의 안전성 평가 등)	① 식품의약품안전처장은 유전자재조합식품등을 식용(食用)으로 수입·개발·생산하는 자에게 최초로 유전자재조합식품등을 수입하는 경우 등 대통령령으로 정하는 경우에는 해당 식품 등에 대하여 안전성 평가를 받게 할 수 있다. ② 식품의약품안전처장은 제1항에 따른 유전자재조합식품등의 안전성 평가에 대한 심사를 위하여 식품의약품안전처에 유전자재조합식품등 안전성평가자료심사위원회(이하 "안전성평가자료심사위원회"라 한다)를 둔다. ③ 안전성평가자료심사위원회의 구성·기능·운영에 필요한 사항은 대통령령으로 정한다. ④ 제1항에 따른 안전성 평가의 대상, 안전성 평가를 위한 자료제출의 범위 및 심사절차 등에 관하여는 식품의약품안전처장이 정하여 고시한다.
동법 시행령 제9조 (유전자재조합 식품등의 안전성 평가)	법 제18조제1항에서 "최초로 유전자재조합식품등을 수입하는 경우 등 대통령령으로 정하는 경우"란 다음 각 호의 어느 하나에 해당하는 경우를 말한다. 1. 최초로 법 제10조에 따른 유전자재조합식품등(이하 "유전자재조합식품등"이라 한다)을 수입하거나 개발 또는 생산하는 경우 2. 법 제18조에 따른 안전성 평가를 받은 후 10년이 지난 유전자재조합식품등으로서 시중에 유통되어 판매되고 있는 경우

식품위생법	조항 내용
	3. 그 밖에 법 제18조에 따른 안전성 평가를 받은 후 10년이 지나지 아니한 유전자재조합식품등으로서 식품의약품안전처장이 새로운 위해요소가 발견되었다는 등의 사유로 인체의 건강을 해칠 우려가 있다고 인정하여 심의위원회의 심의를 거쳐 고시하는 경우
제92조 (수수료)	다음 각 호의 어느 하나에 해당하는 자는 총리령으로 정하는 수수료를 내야 한다. (생략) 2. 제18조에 따른 안전성 평가를 받는 자

식용 GM작물의 안전성 평가는 '유전자변형생물체의 국가 간 이동 등에 관한 법률(이하 'LMO법'이라 함)'과 '식품위생법'을 근거로 이뤄지고 있다. 식품위생법 18조 규정은 안전성평가를 받아야 하는 대상과 자료제출 범위, 심사절차, 수수료 등을 정하여 안전성평가에 대한 심사 업무에 적용하고 있다.

식품용 GM작물의 안전성 평가 기준은 기존의 일반 식품과 비교하여 GM 작물 유래 식품이 차이가 있는지를 검토하며, 차이가 있다면 그 물질이 독성이나 알레르기를 유발할 가능성이 있는지, 유전자 삽입으로 인해 발생할 수 있는 영양학적 변화 여부 및 의도하지 않았던 효과 발생 유무에 대해 평가한다. 현재 국내에서 GM 작물을 이용해서 생산된 식품 및 식품첨가물 등의 안전성 평가를 위해 개발자가 제출하여야 하는 심사 자료로는 GM작물의 개발목적 및 이용방법에 관한 일반 사항 자료, 숙주에 관한 자료, 공여체

에 관한 자료, 유전자변형에 대한 자료, GM작물의 특성에 관한 자료, 외국의 승인 및 이용현황에 관한 자료 등이 요구된다. 이러한 평가 방법은 유럽, 일본 등 다른 나라의 안전성 평가 방법과 동일하며 안전성에 문제가 없을 경우에만 식품으로 승인하고 있다.

우리나라의 안전성 평가 심사는 과학적이고 객관적인 평가 방법을 따르며, CODEX에서 2003년 제정한 '생명공학 응용 식품의 위해도 분석을 위한 원칙'[1]과 '재조합-DNA 식물 유래 식품의 안전성 평가 실시에 관한 가이드라인'과 같은 지침에서 요구하는 범위를 반영하고 있어 국제적 조화를 이루고 있다.

이러한 자료에 대한 안전성 평가 심사 업무는 과학적 접근법에 따라 이뤄져야 하며, 심사의 전문성, 객관성, 투명성을 확보하기 위해 각 분야의 전문가에 의한 자료 검토가 이뤄질 수 있도록 "유전자변형식품 등 안전성평가자료 심사위원회"를 구성하여 심사 자료를 검토하고 있다. 이 심사위원회는 각 분야별(식품일반, 분자생물학, 독성, 알레르기, 영양) 전문가 20명으로 구성되어 있다. 제출된 모든 자료를 근거로 심사위원회의에서 GM작물의 안전성에 대한 결론이 나면 최종 승인 여부를 결정하기 전에 심사결과 보고서를 일반인에게 온라인상으로 공개하여 의견 수렴 과정을 거침으로써 심사의 공정성과 투명성, 신뢰성을 확보할 수 있도록 하고 있다. 최종적으로 모든 심사가 완료되어 승인이 결정되면 이를 신청자에게 통보하고, 식품의약품안전처 홈페이지 및

1) CODEX, Principles for the Risk Analysis of Foods Derived from Modern Biotechnology (CAC/GL 44-2003)

관보를 통해 공표하고 있다. 심사기간은 안전성 평가를 신청 받은 날로부터 270일 이내에 심사를 완료하도록 되어 있다. 이러한 안전성 평가 심사 절차를 도식화하면 그림 5-1과 같다.

식품으로서의 안전성 심사 현황을 보면 2014년 12월 31일자 기준으로 식품의약품안전처에서 안전성 심사를 거쳐 식용으로 허가된 유전자변형작물은 총 122품목으로 그 중 GM콩 20품목, GM옥수수 64품목, GM면화 21품목, GM카놀라 11품목, GM감자 4품목, GM사탕무 1품목, GM알파파 1품목이 승인되었다(그림 5-2).

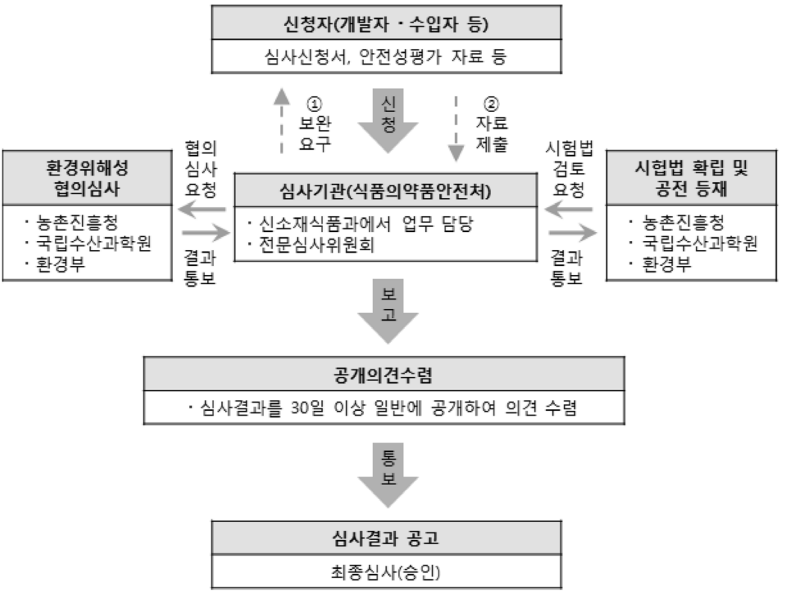


그림 5-1 ◂◂ 식품용 GM작물의 안전성 평가 심사 절차

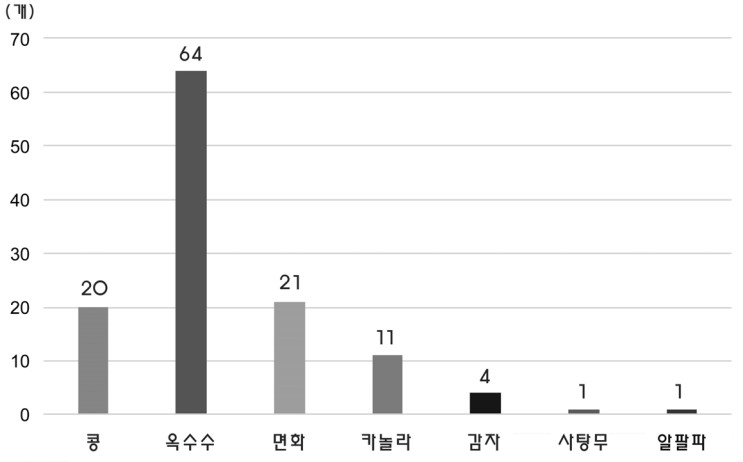


그림 5-2 ◂◂ 식품의약품안전처의 GM작물별 승인 현황(2014.12.31 기준)[1)]

5.2.1 GM작물의 분자생물학적 평가

GM작물에서 유래하는 식품의 안전성에 대한 명확한 이해를 위해서는 유전자변형의 분자적 생화학적 특성 평가를 포괄적으로 수행할 필요가 있다. 형질전환 과정에 대한 정보, 숙주의 게놈에 도입된 유전자에 관한 정보, 이 도입된 유전자에 의해 GM작물에서 발현되는 유전자산물에 관한 정보가 필요하다.

식품의약품안전처의 '유전자재조합식품 등의 안전성 평가 심사 등에 관한 규정'에 따른 GM작물에서 유래하는 식품의 분자생물학적 평가를 위해 요구되는 자료는 표 5-2와 같다.

1) 식품의약품안전처

표 5-2 GM작물의 분자생물학적 평가를 위해 요구되는 자료[1)]

4. 유전자재조합에 대한 자료

가. 형질전환 과정에 대한 정보

(1) 형질전환 방법(아그로박테리움법, 입자총법, 원형질체법, 미세주입법 등)

(2) 재조합에 사용된 벡터에 대한 정보

(가) 기원

(나) 숙주에서의 확인

(다) 숙주에서의 기능

(라) 제한효소 절단 지도

(마) 유해염기 서열 유무

(바) 전달성에 관한 정보

(3) 중간숙주에 대한 정보

나. 도입 유전자에 대한 정보

(1) 구성 유전자의 특성, 염기서열, 제한효소 절단지도

(가) 선발표지유전자

(나) 조절인자

(다) DNA의 기능에 영향을 주는 기타 인자

(2) 크기 및 명칭

(3) 완성된 발현 벡터내의 유전자 염기서열의 위치 및 방향성

(4) 구성 유전자의 기능

(5) 유해염기서열의 유무

(6) 외래전사해독프레임의 유무와 그 전사 및 발현가능성

(7) 목적하는 유전자 이외의 염기서열의 혼입(유전자의 순도)

5. 유전자재조합체의 특성에 관한 자료

가. 유전자재조합체 내 도입된 유전자에 관한 정보

(1) 유전자재조합체의 게놈에 삽입된 유전자의 특성 및 기능

(2) 삽입부위의 수

1) 식품의약품안전처 고시 제2014- 41호(2014.2.12. 개정)

(3) 각 삽입부위의 삽입유전자의 구성
(가) 복제수, 염기서열(주변염기서열 포함)
(나) 이미 알려져 있는 독소나 항영양소를 암호화하는 유전자가 없음을 입증하는 자료
(4) 삽입유전자 및 인접하는 숙주 게놈 유전자의 외래전사해독프레임의 유무와 그 전사 및 발현가능성
(5) 안정성에 관한 사항
(가) 복수세대에서 삽입된 유전자의 서열, 크기
(나) 복수 세대에서 발현부위, 발현시기, 발현량

나. 유전자산물에 관한 정보
(1) 유전자산물의 화학적 성질(단백질이나 번역되지 않은 RNA)
(2) 유전자산물의 기능
(3) 발현단백질의 아미노산 서열의 번역 후 변이 유무
(4) 발현단백질의 구조적 변화 여부
(5) 새로운 특성의 표현형
(6) 유전자산물의 발현부위 및 발현량

형질전환 과정에 대한 정보로는 숙주에 유전자를 삽입하기 위해 아그로박테리움법을 사용하였는지, 입자총법을 사용하였는지와 같은 형질전환에 사용된 방법을 제공해야 한다. 어떤 방법을 사용하였는지에 따라 형질전환 양상이 다르기 때문이다.

숙주의 게놈에 삽입된 유전자에 관한 정보로는 1) 삽입된 유전자의 기능 및 삽입 유전자로부터 발현·생산되는 단백질의 특성 및 기능, 2) 게놈상의 삽입 부위 수 및 형질전환 과정에서 도입된 각 삽입유전자의 복제수와 염기서열, 3) GM작물 내 도입유전자의 위치 및 주변염기서열, 4) 삽입유전자 및 인접하는 숙주 게놈 유전

자의 외래전사해독프레임의 유무와 그 전사 및 발현 가능성과 같은 자료가 필요하다.

GM작물에서 도입된 유전자에 의해 발현되는 유전자산물에 관한 정보로는 1) 유전자산물의 화학적 성질 및 기능, 2) 유전자산물로 인하여 새롭게 획득된 GM작물의 기능 및 표현형 설명과 더불어 의도하지 않은 새로운 특성의 발현 유무, 3) 발현 유전자 산물의 서열 및 발현량과 발현부위 등과 같은 정보가 필요하다. 그리고 도입 유전자의 검출 및 발현의 확인에 사용되는 방법도 요구된다.

이러한 정보는 GM작물에 도입된 유전물질의 염기서열이 잘 보존, 유지되고 있는지, 형질전환 과정 중에 도입유전자의 부가, 삽입, 결실된 염기서열이 있는지, 목적하는 도입유전자 외의 다른 유전자의 혼입은 없는지 등을 확인하기 위한 것이다. 또한 형질전환에 의해 의도된 모든 형질이 발현되고 유전자가 세대별로 변화하지 않고 유전 법칙에 따라 복수세대에 걸쳐 안정적으로 전달되는지를 확인한다. 그리고 숙주종에 새로운 유전자를 도입하는 과정으로 인해 숙주종의 내재 유전자를 교란하지 않았는지, 의도하지 않은 신규 융합 단백질이 있는지, 그 발현의 패턴은 어떤지 등도 확인하기 위함이다. 이러한 정보를 통해서 분자생물학적으로 형질전환이 의도한 대로 이루어져 안전성 측면에서 우려되는 비의도적 영향이 없음을 확인할 수 있다.

숙주에 도입된 DNA의 구조와 복제수를 확인함으로써 유전자가 어떻게 삽입되었는지, 도입된 유전자의 구조가 어떤지, 도입유전자가 1개뿐인가 아니면 중복해서 들어 있는가 또는 결실이

있는가를 확인할 수 있다. 이를 통해 숙주에 삽입된 DNA 부위의 배열을 명확히 하고 새로운 유전자의 도입에 의해 숙주 유전자 배열에 변화가 발생할 가능성이 없는지, 만약 변화가 발생한 경우에는 안전성에 문제가 없음을 명확히 해야 한다.

특히 유전자 도입 시에 돌연변이, 결실이나 재배열이 발생한 경우에는 그것에 의해 오픈리딩프레임(open reading frame, ORF)이 어떻게 변화했는가를 명확히 하기 위해 외래전사해독프레임의 유무와 그 전사 및 발현 가능성에 관한 자료가 요구된다.

5.2.2 GM작물의 독성 평가

GM작물은 새로운 유전자 도입으로 인해 발현된 단백질이 독성을 유발시킬 가능성이 있다는 대중의 우려는 GM작물 개발 초기뿐만 아니라 세계 각국에서 여러 GM작물이 승인되어 활발히 이용되고 있는 현재에도 여전히 독성에 대한 우려는 꾸준히 제기되고 있다. 독성 유발과 관련하여 GMO를 반대하는 사람들이 많이 인용하는 사례 중 하나로 2005년 러시아 과학자 에르마코바 박사의 글라이포세이트계 제초제에 내성을 갖는 제초제내성 콩을 쥐(rat)에게 먹인 실험이 있다. 본 연구는 국내 NGO와 언론을 통해 소개되면서 제초제내성 콩이 불임이나 기형아를 출산하도록 하는 가능성이 높다는 의혹이 확산되기도 하였다. 하지만 이 연구 결과에 대해 과학자들은 전체적인 실험 프로토콜의 문제를 지적하였고, 다른 연구결과에서는 에르마코바 박사의 실험결과와 달리 제초제내성 콩이 사망이나 성장에 영향을 주지 않은 것으로 나타났다.

GM작물의 새로 발현된 단백질의 안전성 평가 시 다음의 사항을 종합적으로 판단하여 독성여부를 판단한다.

- 유전자산물 및 유전자산물이 포함된 생물체의 식경험 유무
- 이미 알려져 있는 독소 및 항영양소와의 아미노산 서열 유사성
- 유전자산물의 물리화학적 처리에 대한 감수성(소화 안정성, 열처리에 대한 안정성)
- 발현 단백질의 단회투여독성

먼저, GM작물에 새로 도입된 유전자에 의해 생산된 유전자산물과 이것이 포함된 생물체의 식경험 유무를 확인하고 식경험이 있는 경우에는 섭취방법, 유전자산물의 안전한 최대섭취량 등의 자료를 검토한다. 식경험이 있는 경우에 섭취 방법을 알아보는 것은 다수의 식물이 조리 하지 않고 날것으로 먹으면 독성을 유발할 수 있지만 가공하는 동안에 그 독성성분이 제거되거나 감소되기 때문에 어떤 식품자원에 독성성분이 있다고 하더라고 식량자원이 될 수 있기 때문이다. 예를 들면 카사바에 포함된 청산가리 성분이나 콩의 경우 트립신저해제(trypsin inhibitor)나 렉틴과 같은 항영양소가 있어 날 것으로 먹으면 문제가 되지만 가열을 하는 등 적절히 가공하면 문제가 되지 않는다. 따라서 가공이 미치는 영향이나 정상적으로 소비하였을 때 소비자들이 얼마나 많은 양에 노출될 것인지에 대한 예측도 계산하여 비교한다. 가능하다면 예상 노출 수준이 높은 특정 부분을 파악하고 위해 평가 시 이를 검토해야 한다.

다음으로는 데이터베이스를 이용하여 생물정보학적 분석 방법으로 발현 단백질이 기지의 독성 및 항영양소와 생물학적으로 연관된 아미노산 서열 상동성을 보이는지 확인한다. 다양한 종류의 데이터베이스를 사용할 수 있으며 활용 가능한 충분한 데이터를 바탕으로 판단할 것을 권고하고 있다. 이 분석을 통해 신규 발현 단백질이 알려진 또는 추정의 독성 단백질과 구조적으로 연관되어 있지 않음을 확인한다.

또한 신규 발현 단백질의 물리화학적 처리에 대한 감수성을 알아보기 위해 인공위액과 인공장액에 대한 안정성 실험을 통해 소화에 대한 분해성을 확인하고 열처리에 안정성을 가지고 있는지에 대해서도 확인한다. 이 때 GM작물에서 유래하는 단백질 대신 미생물과 같은 다른 생물체에서 유래한 단백질을 사용하는 경우에는 생화학적, 구조적, 기능적으로 대체산물로써 적합한 것임을 증명해야한다.

현재 우리나라에서는 발현단백질의 안전성을 평가하기 위해 발현단백질의 단회투여독성 실험 자료를 요구하고 있다. 일반적으로 동물을 이용한 독성 시험은 농약이나 의약품처럼 그 물질의 화학적 성질이 잘 알려진 것으로 고순도의 물질을 사람이 노출될 수 있는 양보다 수십 내지 수천배에 상당하는 양을 단기 또는 중장기로 투여하여 사람에게 나타날지도 모르는 위해성을 찾아낸다. 하지만 GM작물에는 다양한 종류의 물질이 복합적으로 섞여 있는 혼합물 상태로 성분 조성도 개체마다 약간씩 차이가 있으며, 식물체 내에 타겟으로 하는 발현 단백질의 양 자체도 적기 때문에 충분

한 양의 실험물질을 GM작물에서 바로 추출하기 어렵다. 따라서 GM작물의 안전성 평가에서는 GM작물에서 유래하는 단백질 대신 미생물과 같은 다른 생물체에서 유래한 단백질을 사용하는 경우가 대부분이며 이를 위해 미생물 유래 단백질이 생화학적, 구조적, 기능적으로 GM작물에서 생성된 단백질의 대체 산물로 적합한 것임을 증명해야한다. 이를 평가하기 위해 단백질의 분자량 및 면역반응성, 특이적 효소 활성, 당화 여부, 펩타이드 질량분석, N-말단 서열 분석과 같은 자료가 요구된다. 이런 자료를 통해 미생물 유래 단백질이 대체 산물로 적합하다고 판단되면 이를 이용하여 단회 투여 경구독성실험을 실시한다. 현재 국내에서는 국제적으로 인정된 실험방법으로 수행된 독성 시험 결과를 권고하고 있으며, 우수실험실운영기준(GLP)의 원칙이나 이에 상당하는 조건에서 수행된 실험인지를 확인한다. 단회투여경구독성 실험에서 투여 물질의 농도는 OECD 가이드라인에서 제시한 2,000mg/kg을 권장하며 이 용량이 어려운 경우에는 용해도 등의 적합한 이유를 요청하고 있다. 단회투여독성 실험 시 사망률, 임상검사, 체중, 사료 소비량, 임상병리(혈액학 지표), 해부병리학적 관찰을 실시한다. 이를 통해 유전자 산물이 어떠한 독성 효과나 치사를 유발하는지 여부를 확인하여 안전성을 평가한다.

만약, 상기의 4가지 자료를 통해 안전성을 확인할 수 없는 경우에는 GM작물을 이용한 90일 반복투여독성과 같은 기타 경구독성 실험 자료를 요구하고 있다.

GMO가 태아에 위험? 러시아 과학자의 GM 콩 실험

▸ 발단

2005년 러시아과학아카데미 소속 이리나 에르마코바 박사가 유전자변형 콩을 섞어 먹인 쥐와 그렇지 않은 쥐를 임신 전부터 관찰한 결과, 유전자변형 콩을 먹인 쥐의 새끼의 사망률이 6배나 높았고, 태어난 새끼도 심각한 저체중 상태를 보였다고 발표함.

▸ 경과

- GM 콩가루의 출처와 성분에 관한 정보가 부족하고, 날콩(raw soy)은 유전자변형 여부와 관계없이 자연적으로 단백질 소화를 방해하는 트립신 억제제를 함유하고 있다는 등 실험에 이용된 프로토콜이 적절치 못했다는 비판이 제기됨
- 국제적 실험 기준에서는 생식(reproduction) 실험에 그룹 당 20개체의 임신한 쥐(pregnant females)를 요구하고 있는데, 실험에 사용된 쥐의 개체 수(그룹당 3 마리)가 너무 적어 의미 있는 결론으로 볼 수 없다고 보는 견해도 도출됨

▸ 결론

이리나 에르마코바 박사의 실험 프로토콜이 적절치 못하였고, 관련분야 전문가들의 객관적인 검증절차가 이루어지지 않았기 때문에 이를 통해 GMO의 인체위해성 문제를 제기하는 것은 과학적 근거가 없다는 견해가 많음.

출처: 한국바이오안전성정보센터

5.2.3 GM작물의 알레르기성 평가

알레르기는 어떤 특정 외래 물질에 대하여 정상과는 다른 과민 반응이 일어나는 것을 말하는데 식품알레르기는 특정 식품에 면역글로불린E가 생성되는 특정 개인에게만 발생하는 문제로 우리가 일상적으로 먹는 식품 중에도 알레르기를 일으키는 것이 많다. 이 식품알레르기 문제는 다만 GM작물만의 문제가 아니라 일반 식품을 통해서도 일어날 수 있는 것이다. 식품 알레르기의 주요인은 단백질로, 식품에는 수만의 단백질이 함유되어 있지만 이중 일부만이 알레르겐이다.

모든 GM작물은 삽입된 유전자에 의해 생산된 새로운 단백질이 알레르기를 유발할 가능성이 있는지 평가하게 된다. GM작물의 알레르기 유발 가능성과 관련된 대표적인 예가 바로 '브라질 넛' 사건이다. 하지만, GM작물이 알레르기를 일으켰다고 알려진 이 '브라질 넛' 사건은 실제로 제품이 상업화되어 알레르기 환자가 발생한 사례가 아니라 연구개발 단계에서 알레르기 가능성이 제기되어 개발을 중단한 사건이다. 이 사례는 새로이 도입된 유전자에 의해 발현되는 단백질의 안전성에 대한 평가가 연구개발 단계에서부터 철저히 이루어지고 있음을 확인 할 수 있는 좋은 사례이기도 하다. 실제로 지금까지 안전성 평가를 거쳐 상업화된 제품에 의해 알레르기성이 야기된 사례는 없다.

GM작물에서 새롭게 발현된 단백질의 알레르기성 평가 시에도

여러 종류의 정보 및 데이터를 바탕으로 단계적이고 종합적인 평가를 통해 이뤄진다. 알레르기성을 평가하기 위해서는 다음과 같은 정보가 필요하다.

- 도입된 유전자에 의해 발현되는 단백질의 기원(유래) 및 알레르겐으로 알려져 있는가
- 유전자산물의 물리화학적 처리에 대한 감수성(소화 안정성, 열처리에 대한 안정성)
- 이미 알려져 있는 알레르겐과의 서열 상동성
- 단백질 섭취량이 유의한 양을 차지하고 있는지에 대한 식이 노출 정보 등

알레르기 유발성 평가의 첫번째 단계는 먼저 도입된 유전자의 공여체 또는 유전자산물이 알레르겐으로 알려져 있는지에 대해 확인하는 것이다. 유전자산물 및 유전자의 공여체에 대한 안전한 식경험이 있는지를 알아보고 식경험이 있는 경우에는 섭취방법, 유전자산물의 안전한 최대 섭취량 등이 필요하다. 알레르기 유발 식품으로는 계란, 우유, 땅콩, 대두, 밀, 견과류, 생선, 갑각류 등이 대표적이다. 하지만 거의 대부분의 경우엔 GM작물 개발 시 유전자의 공여체를 선발할 때 이러한 우려를 애초에 배제하기 위해 일반적으로 알레르기 유발성 식품 또는 과민한 개인에 대해 글루텐 과민성 장질환을 유도할 수 있는 식품으로부터 유래된 유전자일 경우에는 반드시 알레르겐이나 글루텐 과민성 장질환을 유발

할 가능성이 없음을 과학적으로 증명하고 그렇지 않다면 되도록 피하고 있다.

대부분의 알레르겐들이 가지는 특징 중의 하나는 바로 소화와 가공에 안정하다는 점이다. 식품에 있는 알레르기 유발 단백질들은 대부분 위장에서 잘 분해되지 않고 안정한 특성을 띈다. 따라서 새로운 단백질이 알레르기 유발성을 가지고 있는지를 평가하기 위해 위액과 장액에 얼마나 잘 분해가 되는지를 분석한다. 어떤 단백질이 소화기관을 지나면서 분해가 잘 되지 않는다면 이것은 알레르기 유발 가능성이 높기 때문에 인공위액 또는 인공장액을 이용한 분석 결과에서 분해가 잘 되지 않는다면 추가적인 확인 시험이 필요할 것이다. 또한 단백질은 일반적으로 열에 대한 안전성이 약한 반면 알레르겐은 열처리 및 가공에 안정한 특성을 띄므로 다양한 온도조건에서 새로운 단백질을 처리 하였을 때 열처리에 안정성을 가지는지 분석하여야 한다. 이때 설정한 열처리 조건은 실제 가공이나 요리 조건 등을 고려하여 설정하는 것이 좋다.

GM작물에서 도입된 유전자에 의해 발현되는 유전자산물의 아미노산 서열이 알려지거나 혹은 추정되는 알레르겐과 생물학적으로 연관된 아미노산 서열 상동성을 보이는지 확인하기 위해 PIR, SWISS-PROT, EMBL, Protein DATA Bank, FARRP Allergen-Online database(http://www.allergenonline.org) 등의 알레르겐으로 알려졌거나 추정되는 단백질의 아미노산 정보를 제공하는 데이터베이스를 이용하여 생물정보학적 분석 방법으로 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 알레르기 유발물질인지를 예측한다. 아미노산 상

동성에 대한 검색 및 평가는 의학적으로 유의성 있는 결과를 도출하기 위하여 적절히 표준화된 방법이 사용되어야 한다. 알려진 또는 추정의 알레르겐과의 아미노산 서열 상동성 분석 시 검색 방법은 크게 1) FASTA 검색과 2) 연속하는 8개의 아미노산 서열 검색이다.

첫 번째 FASTA 검색은 유전자산물의 전체 아미노산 서열과 알레르겐 데이터베이스에 있는 모든 염기서열을 비교한다. 각각의 쿼리 펩타이드 서열의 평가는 80개 또는 그 이상의 아미노산 펩타이드가 알레르겐 서열과 35% 이상의 서열 상동성을 보이는지 조사하는 것이며, 이러한 기준에 부합되는 서열은 면역학적으로 유의한 상동성을 보이는 것으로 정의한다.[1] 두 번째, 연속하는 8개 아미노산 서열과의 유사성 검색은 8개 아미노산 블록으로 세분된 쿼리 서열을 알레르겐 데이터베이스 내 알려져 있는 알레르겐과 비교하여 항원결정부위 유사성 연구를 실시한다. 알레르겐 추정물질로 간주하는 기준은 알레르겐 단백질과 적어도 8개 이상의 연속되는 아미노산 서열에 대해 100% 일치할 때로 한다. 만약 이러한 분석을 통해 구조 유사성이 확인된다면 그 알레르겐에 대한 환자 IgE 항체[2]와 유전자산물을 이용한 면역블롯(Immunoblot) 등의 자료를 추가적으로 검토한다.

1) Codex Alimentarius Commission. Foods Derived from Modern Biotechnology, 2nd ed. Rome, Italy

2) Goodman RE, Vieths S, Sampson HA, Hill D, Ebisawa M, Taylor SL, van Ree R. 2008. Allergenicity assessment of genetically modified crops - what makes sense? Nat Biotech 26(1):73-81.

GM작물에서 새롭게 발현된 유전자산물이 1일 단백질 섭취량의 유의한 양을 차지하고 있는지에 관한 노출량 평가 자료도 알레르기를 유발하기에 가능한 양인지를 평가할 수 있는 기준이 된다. 해당 자료는 우리나라의 식품수급표, 국민건강영양조사 결과 보고서, 농림수산식품 주요통계 보고서와 같은 자료를 참고하여 수치를 추산할 수 있다.

GM작물의 알레르기성 평가에서 또 하나 중요한 부분은 숙주가 주요 알레르겐을 자기고 있는지 확인하고 만약 숙주가 주요 알레르겐으로 알려져 있을 경우에는 혈청 실험이 요구된다. 환자혈청과 GM과 non-GM작물의 추출액을 이용하여 면역블롯 또는 ELISA inhibition 등과 같은 실험 자료를 통해 알레르기성에 변화가 있는지 확인한다. 예를 들면 GM콩의 경우 콩은 알레르기를 유발하는 것으로 알려진 식품 중 하나이다. 따라서 형질전환 과정의 비의도적 결과 혹은 도입 유전자에 의해 발생할 수 있는 비의도적 효과로 인한 알레르기 유발성의 변화가 있었는지를 일반 콩과 비교하여 확인하여야 한다. 이때 혈청실험은 콩에 대해 알레르기가 있는 환자 혈청과 GM콩, 그리고 관행품종 콩 추출물을 이용하여 실험을 수행한다.[1)]

1) World Health Organization, Food and Agriculture Organization of the United Nations (2009).

GM작물을 먹으면 알레르기가 생긴다? 브라질 넛 사건

▸ 발단

세계적 종자 회사인 미국 파이오니어 하이브리드 회사는 1993년 콩의 필수아미노산(메티오닌, 시스테인) 함량을 증가시키기 위해 브라질 넛의 2S 알부민 유전자를 도입하여 유전자 변형 콩을 개발하였으나, 알레르기 가능성이 문제되어 개발을 중단한 사건임

▸ 경과

- 브라질 넛은 원래 알레르기를 일으키는 식품으로 잘 알려져 있기 때문에 콩에 도입된 "2S알부민"이 알레르기를 일으키는지에 대한 확인 절차가 필요했음
- 회사 자체 검사에서도 브라질 넛에 있는 "2S 알부민"과 LMO 콩에 있는 "2S 알부민"은 모두 알레르기를 일으키는 것으로 확인됨

▸ 결론

- "2S 알부민"이 원래 알레르기를 일으키는 물질이지 LMO 때문에 새롭게 알레르기 물질로 바뀐 것은 아니며, 상업화된 제품이 아닌 연구개발 단계에 있는 제품으로 사람이 섭취한 바 없음
- 개발자가 위해 가능성을 사전에 인지하여 100만 달러의 연구비만 날린 채 상업화를 포기하고 개발을 중단한 대표적인 사례임
- LMO 식품에 대한 안전성 평가·확인이 필요함을 다시 한 번 일깨워 주었으며, 안전성평가 시스템이 제대로 작동하고 있는 모범 사례로 간주될 수도 있음

출처: 한국바이오안전성정보센터

5.2.4 GM작물의 성분분석 및 동물사양 실험

영양성분 특성을 의도적으로 변화시킨 형질 전환 식물체가 아닌 경우 영양성분분석은 GM작물의 육성 과정 중에 어떠한 비의도적인 영향이 발생하였는지에 대한 다면적인 평가 방법 중 하나이다. 유전자변형 생물체와 대조군과의 비교를 통해 형질전환 과정 중에 또는 GM작물 내 형질전환 유전자의 발현으로 인해 생물학적으로 비의도적 변이가 발생하였는지에 대해 평가할 수 있다. 현재 재배, 유통, 소비되고 있는 GM작물과 관련된 항목들 또는 조성, 안전성, 건전성(wholesomeness)에 대한 실질적 차이가 없는가를 평가하기 위해서 영양성분 분석의 수행이 중요하다.

GM작물과 비형질전환 대조군, 관행품종 참조군 식물체를 대상으로 조성 성분에 대한 분석을 수행하여, 형질전환체와 비형질전환체의 비교 시 유사한 조성을 지니는지 아니면 통계적으로 유의차가 나타나지를 확인한다. 하지만 일반적으로 대부분의 작물들은 영양성분구성에 있어 상당한 변이성을 보인다. 특히 성분조성은 환경적 요인과 식물체의 유전형에 따라 막대한 영향을 받는다. 따라서 이러한 영양성분 분석 항목들에서 나타나는 변이가 자연적인 현상에 의한 것인지 안전성 평가적인 측면에서 생물학적으로 유의한 차이인 것인지를 판단하기 위해 각 영양성분 분석 결과를 관행품종 참조군의 범위와 비교하고 ILSI(International Life Science Institute) 작물영양성분데이터베이스에 수록된 자료 및 문

현상 보고된 자연적 편차 범위 자료와 비교한다.

분석항목은 OECD의 권장사항에 따를 것을 요구하고 있다.[1] OECD는 안전성 평가의 일환으로 수행되는 새로운 품종의 성분 분석을 위한 각 작물별 분석 항목을 권고하는 자료를 발간한바 있으며, 여기서 구성성분 분석의 대상은 식품 원료상에서 식이상의 상당한 영향을 준다고 알려져 있는 주요 영양성분과 이 종(種)에 본래 함유되어 있다고 알려진 주요 독성 성분의 분석적 비교이다.

주요 분석 항목으로는 주요 영양성분(단백질, 탄수화물, 지방, 회분, 섬유질), 무기질(칼슘, 인, 마그네슘, 칼륨), 아미노산, 지방산, 비타민, 항영양성분을 분석한다. 예를 들어, GM면화일 경우에는 면화 종자에서 일반적으로 나타나는 항영양성분인 gossypol 및 cyclopropenoid fatty acid에 대해 평가한다. 면화 종자는 항영양성분인 gossypol과 cyclopropenoid fatty acid를 지니고 있어 사료에 쓰일 수 있는 양이 제한된다. Gossypol은 면화 종자, 잎, 뿌리에 존재하는 terpenoid phytoalexin로써 동물 사료에 권장 사항 이상으로 면실박(cottonseed meal)이 함유될 경우, 그 양에 따라 Gossypol로 인한 비반추동물 또는 미성숙 가축에 대해 독성이 나타날 수 있다. Cyclopropenoid fatty caid는 항영양성분으로 간주되며 인축의 몸에서 stearic acid의 oleic acid로의 불포화를 저해하여 막투과성 변화 및 지방의 녹는점 상승을 유발하는 것으로 알려져

1) 식품의약품안전청, 유전자재조합식품 안전성평가 우수심사기준(2011)

있다. 이러한 영양성분 분석은 AOAC International의 공인 시험법과 기타 산업 표준 분석법에 따라 수행한다. 본 분석 결과를 통해 GM작물의 탄수화물, 단백질, 지방 등 영양성분, 항영양소 함량이 일반 작물과 차이가 있는지를 비교하여 식품으로 섭취했을 시 영양학적인 불균형을 일으킬 가능성에 대해 평가한다. 이러한 방법은 유럽, 일본 등 다른 나라의 안전성 평가 방법과 동일하며 안전성에 문제가 없을 경우에만 식품으로 승인하고 있다.

형질전환기술에 의해 의도적으로 또는 비의도적으로 새롭게 생길 수 있는 영양성분 등의 변화가 사람의 건강에 어떠한 영양을 미치는지에 대해 검토한다. 영양성을 평가하기 위해 육계 등의 동물사양실험 자료를 검토하는데 주로 육계 사양실험을 많이 실시하고 있다. 일반적으로 양계를 위해 많은 양의 콩이나 옥수수가 상업적인 사료 생산에 사용되고 있다. 특히 단기간 동안 체중을 늘려야 하는 육계(broiler chickens)의 경우에는 더 많은 양의 옥수수나 콩을 소비한다. 또한 그들의 매우 빠른 성장률 때문에 작은 양의 영양 성분의 변화에도 아주 민감하게 반응한다. 이러한 이유로 식이구성성분의 영양학적 영향을 평가하는데 있어서 매우 민감한 생물종으로 여겨진다. 육계 사양 실험 모델은 GM콩이나 GM 옥수수의 섭취에 따른 악영향의 유무를 평가하기 위해 이전부터 사용되고 있다. 영약학적 실험 자료로 동물사양실험 시 사망률, 임상관찰, 사료 소비 및 효율, 체중 및 조직 무게 등을 분석하여 GM작물로 제작한 사료를 섭취한 육계와 대조군 및 관행품종으로

제작한 사료를 섭취한 육계를 비교하였을 때 유리하거나 불리한 영향이 나타나는지 확인하고 일반 비형질전환 관행품종과 영양학적으로 동등하게 안전함을 평가한다.

앞서 언급한 이런 일련의 자료를 바탕으로 하여 규제당국에서는 GM작물에 대한 안전성 평가를 철저히 실시하고 있으며 이러한 관리체계 하에서 현재까지 안전성 평가를 거쳐 승인된 상업화 GM작물에 의해 사람을 비롯하여 각종 가축의 건강상에 문제가 발생한 예는 없다.

5.3 국내 GM작물 승인 현황

우리나라는 아직 국내에서 GM작물 재배가 허용되지는 않았지만, 많은 양의 GM곡물이 가축사료 및 식품용으로 수입되어 사용되고 있다. 우리나라의 GM곡물 안전성심사 승인은 2014년 12월 현재 7작물 123종의 이벤트가 승인되었고, 이중 사료용으로 104건과 식품가공용으로 122건의 이벤트가 승인되었다(표 5-3). 식품가공용 및 사료용으로 수입 승인되는 GM곡물은 매년 증가하여 2014년에는 총 980만 톤으로 금액으로 환산하면 약 28억7,757만 달러에 달하고 있다(표 5-4).

표 5-3 우리나라 GM곡물 안전성 심사 승인 현황(2014년 12월 기준)

작물	이벤트 수	승인 용도		
		사료용	식품용	재배용
옥수수	64	56	64	-
면화	22	19	21	-
콩	20	19	20	-
카놀라	11	9	11	-
감자	4	-	4	-
알팔파	1	1	1	-
사탕무	1	-	1	-
7작물	123종	104건	122건	0건

표 5-4 식용·농업용 LMO 수입승인 현황(2014년 11월 기준)[1)]

단위 : 천톤, 천달러

연도	전체		식용		농업용	
	총계	총금액	수량	금액	수량	금액
2008	8,572	-	1,553	732,618	7,019	-
2009	7,280	1,774,390	1,372	500,200	5,908	1,274,190
2010	8.482	2,136,889	1,916	620,149	6,567	1,516,740
2011	7,809	2,686,718	1,831	803,425	5,978	1,898,582
2012	7,884	2,686,718	1,959	859,313	5,925	1,827,405
2013	8,876	2,861,879	1,680	733,830	7,196	2,128,049
2014	9,880	2,877,569	2,070	873,454	7,810	2,004,115

1) LMO국가통합정보망

CHAPTER

06 GM작물의 재배 및 교역 현황

6.1 세계의 GM작물 재배 현황

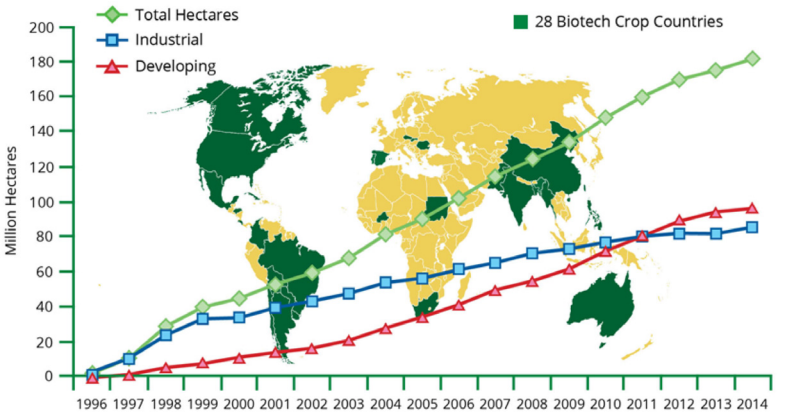
6.1.1 국가별 GM작물 재배 현황

1996년 유전자변형 농작물이 재배되어 처음 상업화된 이래 GM작물의 재배면적은 급속히 늘어났다. 처음 4년간은 주로 미국에서 재배면적이 급속히 늘었으나 2000년대에 들어와서는 인도, 브라질 등 개발도상국에서 GM작물을 재배하기 시작하여 그 재배면적이 급속도로 확장되고 있다. 2014년 전 세계의 GM작물 재배면적은 1억8,150만 헥타르로 전년도보다 약 630만 헥타르 증가했으며 GM작물 재배가 시작된 1996년의 170만 헥타르 보다 100배 이상 증가하였다(그림 6-1). 2014년 현재 전 세계 28개국에서 1,800만 명의 농민이 GM작물을 재배하고 있다. 생명공학 작물이 이와 같이 빠른 속도로 전 세계에서 재배면적을 넓혀나가는 이유는 농업 노동력을 크게 줄이고 적은 농약으로 많은 수량을 얻을 수 있기 때문이다. 유럽의 과학자단체가 147개 연구논문을 메타분석하여 발표한 최근의 보고서에 의하면 지난 18년간의 GM작물 재배로 수확량은 22% 증가했고, 농약 사용은 37% 감소

했으며, 농가수익은 68% 증가했다고 한다. 또한 산업선진국보다 개발도상국의 수확량 및 소득 증가가 더 높은 것으로 나타났다 (Klumper and Qaim, 2014).[1)]

전세계 생명공학작물 재배면적

단위: 백만 헥타르(1996-2014년)



2014년 28개국 1,800만 명의 농민이 1억 8,150만 헥타르(4억 4,800만 에이커)에 생명공학작물 재배 기록, 2013년 대비 꾸준히 3-4% 또는 630만 헥타르(약 1,600만 에이커) 증가

그림 6-1 ◂◂ 세계 GM작물 재배면적 변화 추이[2)]

1) Klumper W. and Qaim M., A Meta-analysis of the impacts of genetically modified crops, PLoS ONE 9(11):e111629.doi:10.1371/journal.pone.0111629

2) James, Clive. 2014. Global Status of Commercialized Biotech/GM Crops: 2014. ISAAA Brief No. 49. International Service for the Acquisition of Agri-biotech Applications, Ithaca, NY.

미국은 GM작물 재배 선도국가로서 2014년에 300만 헥타르의 재배면적 증가를 기록하여 GM작물 재배면적 7,310만 헥타르를 기록하고 있다. 미국의 GM작물 채택률은 2014년도에 전반적으로 크게 증가 했다. GM콩의 채택률이 2013년의 93%에서 94%로 증가했으며, 같은 기간 GM옥수수의 채택률은 90%에서 93%로, 면화의 채택률은 90%에서 96%로 증가했다. 특히 2013년 미국은 가뭄저항성(DT) 옥수수 DroughtQard^{TM} 5만 헥타르를 처음 재배하였는데 2014년에는 5.5배 증가한 27만5천 헥타르에서 재배되었다.

브라질은 미국의 뒤를 이어 6년간 2위 자리를 굳히고 있으며 다른 국가보다 높은 GM작물 재배면적 증가세를 보이고 있다. 2014년에는 전년도 보다 5% 증가한 총 4,220만 헥타르에서 GM작물이 재배되었다. 브라질에서는 2013년 첫 후대교배종 제초제내성/해충저항성 콩 220만 헥타르를 재배하였는데 2014년에는 520만 헥타르로 늘었을 뿐만 아니라, 자국에서 개발한 바이러스 저항성 콩의 상업화를 앞두고 있다.

아르헨티나는 주로 GM콩을 생산하는 나라로 2014년도 GM 재배면적 세계 3위로 2,430만 헥타르를 재배하였으며, 4위 인도는 Bt 면화 채택률이 95%로 높아 1,160만 헥타르에서 재배되었다. 5위 캐나다는 GM 카놀라의 채택률이 96%로 1,160만 헥타르에서 재배되었다. 이들 5개국이 연간 천만 헥타르 이상의 GM작물을 재배하는 나라들로 유전자변형 농산물의 생산을 주도하고 있다.

그 외에 중국(3.9Mha), 파라과이(3.9Mha) 파키스탄(2.9Mha), 남아프리카공화국(2.7Mha), 우루과이(1.6Mha) 등이 백만 헥타르(Mha)

이상의 GM작물을 재배하고 있다(그림 6-2).

특히 2012년부터 개발도상국의 GM작물 재배면적이 선진국을 능가하여 2013년에는 전 세계 GM작물의 재배면적이 개발도상국에서 54%(9,400만 헥타르), 산업선진국에서 46%(8,100만 헥타르)를 차지하였다. 또한 EU국가 중에서 스페인과 포르투갈, 그리고 동구권의 체코, 슬로베니아, 루마니아에서 GM작물을 재배하기 시작하였다. 2014년 유럽연합 5개국은 2013년 보다 3% 하락한 14만3천 헥타르에서 GM작물을 재배하였으며, 스페인이 Bt옥수수를 13만 1,538 헥타르를 재배하여 31.6%의 채택률을 보이면서

그림 6-2 ◂◂ 2014년도 GM작물 재배 국가 및 주요 재배작물[1)]

1) James, Clive. 2014

유럽연합의 GM작물 재배를 선도하고 있다. 2014년에는 방글라데시에서 병해충 저항성 Bt가지(brinjal/eggplant)의 재배가 시작되어 GM작물 재배 국가가 28개국으로 늘었다.

6.1.2 작물별 재배면적

현재 전세계에서 재배되는 GM작물은 콩, 옥수수, 면화, 카놀라가 주류를 이루고 있다. 이중 GM콩의 재배면적이 가장 넓어 전체 GM작물 재배면적의 49%를 차지하며 그 다음이 옥수수로 33%, 면화가 14%, 카놀라가 5%를 차지하고 있다(2013년 기준).

콩의 경우 세계 전체 콩 재배면적의 79%인 8천 450만 헥타르에서 GM콩이 재배되고 있다. 이것은 미국을 비롯하여 브라질, 아르

표 6-1 세계 GM작물의 재배 비율(2013년도)[1)]

단위 : 백만ha

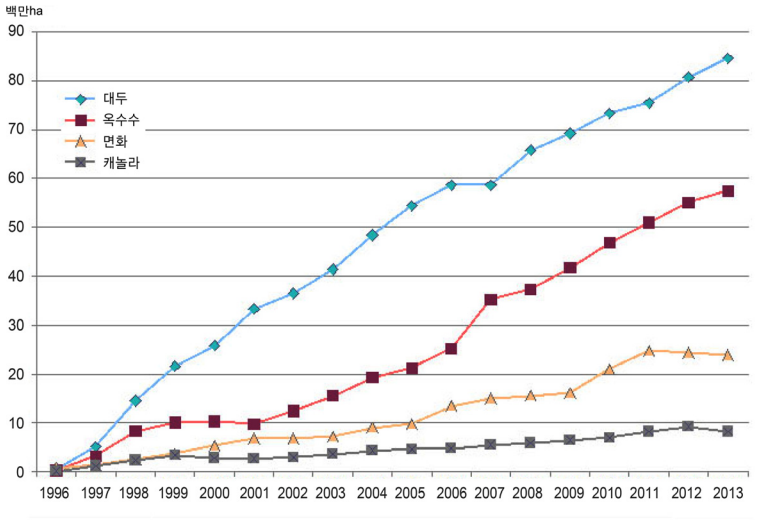
작 물	전체 재배면적(A)	LMO 재배면적(B)	비중(B/A)
콩	107	84.5	79%
면화	34	23.9	70%
옥수수	177	57.4	32%
유채(카놀라)	34	8.2	24%
합 계	352	174	49%

2013 FAO 통계(2012년 재배면적 데이터) 자료 : ISAAA(2013)

1) 한국바이오안전성정보센터(www.biosafety.or.kr)

헨티나 등 대규모 영농으로 콩을 수출하는 나라들이 GM콩을 재배하기 때문이다. GM옥수수는 세계 옥수수 재배면적의 32%에 달하는 5천 740만 헥타르에서 재배되고 있다. GM면화는 세계 전체 면화 재배면적의 70%에서, GM카놀라는 세계 전체 카놀라 재배면적의 24%에서 재배되고 있다(표 6-1).

GM작물 중에서 콩의 재배면적이 가장 가파르게 증가하고 있다



단위: 백만ha

작물	1996	1998	2000	2002	2004	2006	2008	2010	2012	2013
옥수수	0.5	14.5	25.8	36.5	48.4	58.6	65.8	73.3	80.7	84.5
대두	0.3	8.3	10.3	12.4	19.3	25.2	37.3	46.8	55.1	57.4
면화	0.8	2.5	5.3	6.8	9	13.4	15.5	21	24.3	23.9
캐놀라	0	2.4	2.8	3.0	4.3	4.8	5.9	7	9.2	8.2

자료: ISAAA(2013)

그림 6-3 ◂◂ 주요 GM작물의 재배면적 변화 추이[1)]

1) 한국바이오안전성정보센터(www.biosafety.or.kr)

(그림 6-3). 이것은 콩을 주로 수출용으로 재배하는 미국, 브라질, 아르헨티나 등 대규모 영농에서 제초제 사용이 불가피하기 때문이다. 제초제 내성 카놀라의 사용도 점차 늘고 있다. 옥수수와 면화의 경우에는 해충저항성 Bt작물들이 주류를 이루고 있다.

용도별로는 제초제내성(herbicide tolerant, HT) 콩이 전체 GM 작물 재배면적의 37.8%를 점하여 가장 널리 사용되고 있으며, HT 옥수수가 18.8%, HT카놀라가 4.4%, HT면화가 2.1%, HT사탕무우가 0.2%를 점하고 있다. 해충저항성(insect resistant, IR 또는 Bt) 옥수수는 전체 GM작물 재배면적의 26.1%를 차지하고 있으며 Bt 면화는 10.6%를 점하고 있다.

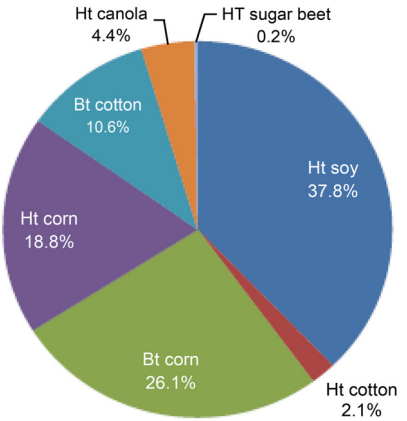


그림 6-4 ◂◂ GM작물의 용도특성별 재배면적 분포(2012년도)[1)]

1) Brookes G. and Barfoot P., GM crops: global socio-economic and environmental impacts 1996-2012, PG Economics Ltd., Dorchester, UK(2014)

GM작물의 재배를 받아들인 나라에서는 GM채택률이 빠르게 증가하고 있다. 2014년도 자료에 의하면 미국의 GM작물 채택률은 모든 작물에서 90%를 넘어 2012년도보다 크게 증가한 것을 알 수 있다(표 6-2). GM콩의 채택률은 미국 94%, 브라질 93%, 아르헨티나 100%, 파라과이 97%, 우루과이 100% 이다. GM옥수수의 채택률은 미국 93%, 브라질 81%(평균), 아르헨티나 80%, 캐나다 93%, 남아공 86%에 달한다. 미국의 경우 생물다양성을 유지하고 생태계교란을 최소화하기 위해 GM작물 재배자는 경작지의 10% 내외에 non-GM 작물을 심도록 의무화하고 있는 것을 감안하면 미국 농부들은 가용 토지에 GM작물을 100% 경작하고 있음을 알 수 있다.

표 6-2 주요 GM작물 생산국의 GM채택률(2014년도)[1)]

단위 : 백만ha

국가	작물	전체 재배면적 (A)	GMO 재배면적 (B)	비중(B/A)
미국	옥수수	37.10	34.50	93.0%
	콩	34.30	32.30	94.0%
	면화	4.50	4.30	96.0%
	사탕무	0.500	0.479	98.5%
	카놀라	0.729	0.685	94.0%

1) 한국바이오안전성정보센터(www.biosafety.or.kr)

국가	작물	전체 재배면적 (A)	GM0 재배면적 (B)	비중(B/A)
브라질	콩	31.8	29.10	93.20%
	옥수수	14.6	12.50	72.60%(여름) 90.00%(겨울)
	면화	0.9	0.60	65.10%
아르헨티나	콩	20.80	20.80	100%
	옥수수	3.75	3.00	80%
	면화	0.530	0.530	100%
캐나다	카놀라	8.40	8.00	95%
	옥수수	1.50	1.40	93%
	콩	2.30	2.20	95%
인도	면화	12.25	11.60	95%
중국	면화	4.20	3.90	93%
파라과이	콩	3.40	3.30	97%
남아공	옥수수	2.50	2.14	84-86%
	콩	0.600	0.552	92%
파키스탄	면화	3.20	2.85	89%
우루과이	콩	1.55	1.55	100%
	옥수수	0.11*	0.09	80%

6.2 GM작물 교역 현황

6.2.1 세계 총 곡물 교역량

세계 총 곡물생산량은 2000년 이후 계속적으로 증가하여 2000/2001년 18억 4,640만 톤에서 2011/2012년 23억 1,440만 톤으로 연평균 1.3% 증가하였다. 2007-2010년 3년간 평균 생산량은 22억 7천만 톤으로 여기에 콩 2억 3천만 톤을 합하면 연간 25억 톤에 달한다. 이 양은 지구촌 인구 70억 인에게 1일 1.0kg의 곡물을 공급할 수 있는 양이다. 식량은 생산지에서 소비하고 남은 것을 교역에 사용하는 재화이므로 교역률이 비교적 낮다. 밀의 교역률은 20%, 쌀 7%, 옥수수 11%이다. 콩은 최근 미국과 남미지역에서 수출용으로 대량 생산되어 교역률이 35%에 이른다(표 6-3). 이 중에서 GM종자가 사용되는 작물은 옥수수와 콩이다.

표 6-3 세계 총 곡물생산량과 교역량(2007-2010 평균)[1)]

종류	총생산량(천 톤)	총교역량(천 톤)	교역률(%)
밀	659,712	131,263	20
쌀	440,071	30,225	7
옥수수	802,389	91,788	11
콩	231,089	80,763	35

1) 이철호, 이숙종, 글로벌 식량위기와 한국의 대응방안, 식품과학과 산업, 44(3), 20-37(2011)

6.2.2 GM옥수수 교역량

2013/2014년도 세계 곡물 생산량은 전년도보다 8% 증가한 24억3,810억 톤으로, 이중 옥수수의 생산량은 9억8,928만 톤이며, 13.1%에 해당하는 1억2,962만 톤이 다른 나라로 수출되었다. 옥

표 6-4 옥수수의 세계 생산량, 10대 생산국, 수출국 및 수입국(2013/2014)[1)]

단위 : 1,000톤

순위	총 생산량 : 989,280 교역량(13.1%) : 129,628					
	10대 생산국		10대 수출국		10대 수입국	
	국가	생산량	국가	수출량	국가	수입량
1	United States	353,715	United States*	50,707	EU	15,816
2	China	218,490	Brazil*	22,041	Japan	15,121
3	Brazil	79,300	Ukraine	20,004	Mexico	10,954
4	EU	64,187	Argentina*	12,846	Korea South	10,406
5	Ukraine	30,900	Russia	4,192	Egypt	8,500
6	Argentina	25,000	India	3,889	Iran	5,500
7	India	24,190	Paraguay	2,714	Taiwan	4,400
8	Mexico	22,960	EU	2,401	Colombia	4,333
9	South Africa	14,750	South Africa*	2,104	Algeria	4,200
10	Canada	14,194	Serbia	1,736	Indonesia	3,500

* 주요 GM옥수수 생산국의 수출량 합계 8,769만 톤(전체 교역량의 67.7%)

1) USDA(2013/14)

수수 10대 수출국 중 4개국이 GM옥수수 재배국으로, 미국(생산량의 93%가 GM), 브라질(81%), 아르헨티나(80%), 남아공(85%)의 교역량을 합하면 전체 교역량의 67.7%에 달하는 8,769만 톤이 GM옥수수 재배국에서 수출되었다(표 6-4). 각 나라에서 GM재배 비율과 같은 비율로 수출되었다면 전 세계 GM옥수수 수출량은 7,710만 톤으로 추산되며, 이는 전체 옥수수 교역량의 약 60%에 해당한다.

6.2.3 GM콩 교역량

2013/2014년 콩의 세계 총 생산량은 2억8,530만 톤이었으며 이중 39.5%에 해당하는 1억1,283만 톤이 다른 나라로 수출되었다(표 6-5). 5대 수출국, 브라질, 미국, 아르헨티나, 파라과이, 캐나다. 모두 GM콩 생산국이며 각국의 2014년도 GM콩 생산비율(채택률)은 93%, 94%, 100%, 97%, 95%이었다. 이들 국가에서 수출된 콩의 양은 1억753만 톤으로 전체 교역량의 95.1%에 달한다. 각국의 GM콩 채택률에 비례하여 GM콩이 수출되었다고 가정하면 총 GM콩 교역량은 1억108만 톤이며 전체의 90%에 해당한다.

표 6-5 콩의 세계 생산량, 주요 생산국, 수출국 및 수입국(2013/2014)[1)]

단위 : 1,000톤

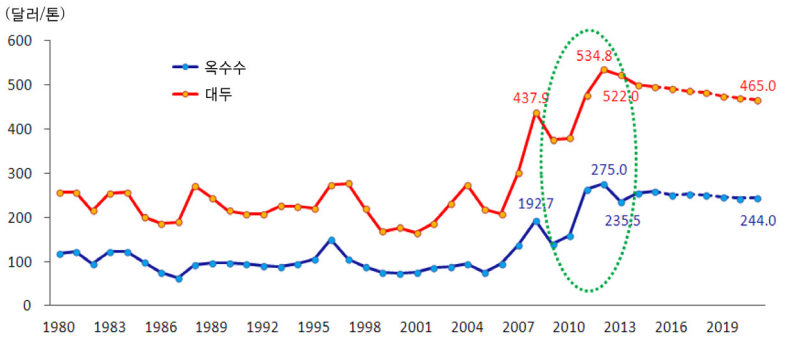
순위	총 생산량 : 285,302 교역량(39.5%)(1) : 112,829(수출량 기준)					
	7대 생산국		5대 수출국		10대 수입국	
	국가	생산량	국가	수출량	국가	수입량
1	United States	91,389	Brazil*	46,829	China	70,364
2	Brazil	86,700	United States*	44,815	EU	12,950
3	Argentina	54,000	Argentina*	7,841	Mexico	3,700
4	China	12,200	Paraguay*	4,400	Japan	2,894
5	India	11,000	Canada*	3,471	Taiwan	2,350
6	Paraguay	8,200			Indonesia	2,200
7	Canada	5,359			Thailand	1,798
8					Egypt	1,674
9					Turkey	1,608
10					Vietnam	1,350

* 주요 GM콩 생산국의 수출량 합계 107,356
(1) 수입량은 110,444(1,000 톤)

6.2.4 국제 곡물가격 변화와 non-GM곡물 프리미엄

그림 6-5는 세계 옥수수 가격과 콩 가격의 변화추이와 전망을 나타내고 있다. 평균 톤당 100달러 수준이던 옥수수 국제가격이 2007/2008 곡물파동을 겪으면서 200달러 수준으로 상승하였으며,

1) USDA(2013/14)



자료 : Thomson Reuters. FAPRI, *FAPRI-ISU 2012 World Agricultural Outlook.*

주 : 1. 옥수수는 GMO로 Corn No2 yellow를 의미함(CBOT 기준)
2. 대두는 GMO로 Soybean No1 Yellow를 의미함(CBOT 기준)
3. 일일 자료를 연평균으로 계산
4. 실적치는 센트/부셸을 달러/톤으로 환산
5. 옥수수 1부셸은 25.4kg, 대두 1부셸은 27.2kg을 적용
6. 2014년부터 FAPRI의 전망치임

그림 6-5 ◂◂ 세계 옥수수 및 콩 가격 추이와 전망[1)]

2013년 미국의 극심한 가뭄으로 275달러까지 치솟아 당분간 톤당 250달러 수준을 유지할 것으로 보인다. 콩의 경우 톤당 200달러 수준이던 것이 2007/2008년 곡물파동으로 440달러로 올랐고, 2013년에는 534달러를 기록했다. 콩의 국제가격은 당분간 톤당 500달러 수준에 머물 것으로 예측된다.

이부형 등(2014)의 연구에 의하면 non-GM콩으로 분류하여 수

1) 이부형 외, 국내외 주요 곡물수급 환경변화와 전망에 관한 연구, 현대경제연구원(2014)

입할 경우 non-GM콩의 프리미엄은 톤당 179달러로 계산되었다. 2008년부터 2012년까지 수입된 non-GM콩의 수입단가는 701달러로 GM콩의 수입단가 522달러보다 179달러, 34% 높은 것으로 나타났다. 옥수수의 경우에는 2013년 기준으로 non-GM 프리미엄이 60달러 수준으로 조사되었다. 옥수수 역시 non-GM 프리미엄이 25% 이상임을 알 수 있다.[1)]

6.3 우리나라의 GM 작물 수입 및 사용 현황

6.3.1 GM작물 수입 현황

우리나라에 수입되는 GM곡물은 최근 꾸준한 증가 추세를 보이고 있다. 2008-2012년 평균 GM곡물 수입물량은 800.5만 톤으로, 이중 사료용이 627.9만 톤으로 약 80%를 차지하였다. 2013년부터 GM곡물 수입량이 다시 늘기 시작하여 2014년에는 1천만 톤을 넘어섰다. 2014년도 GM곡물 총 수입 승인량은 1,082만 톤, 31억 2,230만 달러에 달했다(표 6-6).

이중 식용 GM곡물이 228만 톤(22%)이고 사료용(농업용) GM곡물이 853만 톤(78%)이었다.

1) 한국바이오안전성정보센터에 따르면, 2008년 기준으로 미국산 Non-LMO/GMO와 LMO/GMO의 옥수수 가격 차이는 톤당 57달러, 미국산 Non LMO/GMO와 LMO/GMO의 대두 가격 차이는 톤당 204달러(36.2%)로 발표

표 6-6 국내 GM작물 수입량 및 수입액 추이[1)]

단위: 천 톤, 천 달러

연도	전체		식용		농업용	
	총계	총금액	수량	금액	수량	금액
2008	8,572	-	1,553	732,618	7,019	-
2009	7,280	1,774,390	1,372	500,200	5,908	1,274,190
2010	8,482	2,136,889	1,916	620,149	6,567	1,516,740
2011	7,809	2,686,718	1,831	603,425	5,978	1,898,582
2012	7,884	2,686,718	1,959	859,313	5,925	1,827,405
2013	8,876	2,861,879	1,680	733,830	7,196	2,128,049
2014	10,821	3,122,301	2,283	935,273	8,538	2,187,028

작물별로는 GM옥수수가 가장 많아 연간 700만 톤 수준 수입되었으나 2013년에는 797만 톤, 2014년에는 962만 톤으로 증가하고 있다(표 6-7). 이중 사료용이 835만 톤으로 87%에 달했다. 식용으로 수입되는 GM옥수수는 연간 약 100만 톤 수준이다. 2008년의 곡물파동 여파로 2009년에는 옥수수 가격 상승으로 인한 상대적 가격 부담이 증가하여 원료로 이용되던 전분당을 설탕으로 대체하는 기업들이 많아져 GM옥수수 수입승인이 2008년 대비 34% 감소하였으나 2010년에는 2009년 대비 두 배 이상 증가하였다.

1) 한국바이오안전성정보센터(www.biosafety.or.kr)

표 6-7 국내 GM옥수수 수입량 및 수입액 추이[1)]

단위: 천 톤, 백만 달러

연도	전체		식용		사료용	
	총물량	총금액	물량	금액	물량	금액
2008	7,641	-	716	234	6,925	-
2009	6,281	1,325	471	82	5,810	1,243
2010	7,441	1,712	993	232	6,448	1,480
2011	6,827	2,202	1,025	342	5,847	1,860
2012	6,831	2,106	1,052	323	5,779	1,783
2013	7,967	2,357	918	280	7,049	2,077
2014	9,619	2,497	1,262	380	8,357	2,117

표 6-8 국내 GM콩 수입량 및 수입액 추이[2)]

단위: 천 톤, 백만 달러

연도	전체		식용		사료용	
	총물량	총금액	물량	금액	물량	금액
2008	837	498	837	498	2	-
2009	418	901	418	901	-	-
2010	923	387	923	387	0.2	0.09
2011	806	480	806	480	0.5	0.13
2012	897	535	897	535	0.001	소액
2013	729	430	729	430	소량	소액
2014	1,021	555	1,021	555	소량	소액

1,2) 한국바이오안전성정보센터(www.biosafety.or.kr)

국내에 수입되는 GM콩은 연간 약 80-90만 톤 수준이나 2014년에는 102만 톤이 수입되었다(표 6-8). 수입되는 GM콩은 거의 전량 식용으로 분류된다. 이것은 GM콩이 식용유 착유용으로 들어오기 때문이다. 식용유를 착유하고 남은 대두박은 대부분 사료로 사용된다.

표 6-9는 2014년도 수입된 GM작물의 품목별 수입량이다. 2014년에 수입 승인된 식품용 GMO는 228.3만 톤이었으며, 이중 GM 옥수수는 126.2만 톤(53.7%), 3억 8천만 달러에 달한다. 식용유로 이용되는 GM콩의 수입승인은 2013년 72.9만 톤에서 2014년 102.1만 톤으로 29.2만 톤 증가하였으며, 수입총액도 동기간에 4억3천만 달러에서 5억 5천만 달러로 상승하였다. 옥수수와 콩 이외에 GM면화에서 생산되는 종자 면실류가 농업용으로 18만 톤 수입되었다. 카놀라는 2013년도에 33,000톤 수입되었으나 2014년도에는 수입량이 미미하였다.

표 6-9 2014년도 품목별 GM작물 수입현황[1)]

단위: 천 톤, 백만 달러

	전체		식용		사료용(농업용)	
	물량	금액	물량	금액	물량	금액
옥수수	9,619	2,496	1,262	380	8,357	2,117
콩	1,021	555	1,021	555	소량	소액
면실류	181	70	-	-	181	70
기타	0.071	0.09	-	-	0.071	0.09

1) 한국바이오안전성정보센터(www.biosafety.or.kr)

수출국별 수입물량을 보면 미국이 전체 GM작물 수입량의 51%(556만 톤)를 수출하고 있으며, 전체 GM옥수수 수입량의 52%(504만 톤), 전체 GM콩 수입량의 44%(44.5만 톤)를 공급하고 있다(표 6-10). 금액으로는 16억 2,900만 달러로 2014년도 전체 GM작물 수입액 31억 2,200만 달러의 52%에 달한다. 그 뒤를 이어 브라질이 전체 수입량의 22%(233만 톤)를 수출하고 있다. 특히 브라질은 한국에 대한 GM옥수수 수출량이 미국을 능가하여 48만 6천톤을 수출하였다. 아르헨티나와 남아공은 한국에 GM옥수수를 수출하고 있으며 호주는 면실류를 수출하고 있다. 면실류는 미국과 호주 이외에도 인도와 중국에서도 소량 수입되고 있다. 이 외에도 캐나다,

표 6-10 우리나라 GM작물 수입 국가별 현황(2014년)

단위: 천 톤, 백만 달러

		미국		브라질		아르헨티나		남아공		호주		기타	
		물량	금액	물량	금액	물량	금액	물량	금액	물량	금액	물량	금액
옥수수	식용	706	246	289	68	-	-	50	13	-	-	217	53
	사료용	4,337	1,112	1,556	391	548	147	162	43	-	-	1,754	422
콩	식용	445	242	486	250	-	-	-	-	-	-	110	63
	사료용	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
면실류	식용	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	사료용	79	29	-	-	-	-	-	-	61	25	41	15
총 계		5,567	1,629	2,331	710	548	147	212	56	61	25	2,122	553

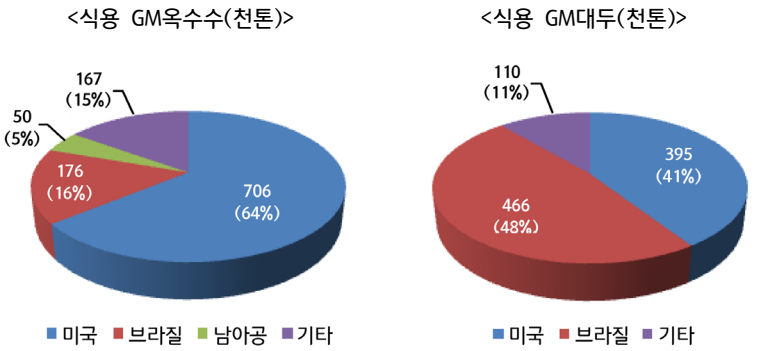


그림 6-6 ◂◂ 2014년 국내에 수입된 식용 GM작물의 작물별 주요 수출국 현황[1)]

필리핀, 파라과이, 루마니아 등지에서도 GM작물이 소량씩 수입되고 있다.

그림 6-6은 국내에 수입되는 식용 GM옥수수와 GM콩의 수출국별 공급량을 도표로 나타낸 것이다.

6.3.2 옥수수의 용도별 수입현황

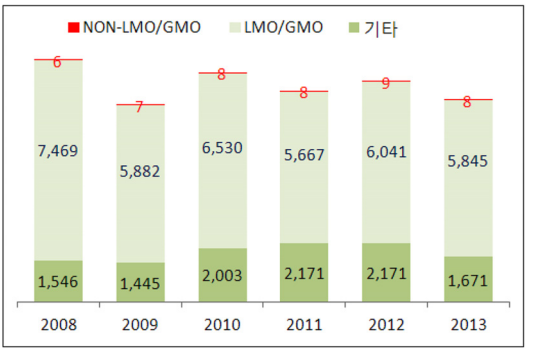
용도별 옥수수 수입현황을 보면 팝콘용 옥수수는 100% non-GMO, 사료용 옥수수는 100% GMO이다. 한편 기타로 분류된 가공용 옥수수의 55.8%는 non-GMO, 44.2%는 GMO로 조사되었다.[2)] 조사 결과에 의하면 가공용 옥수수 중 GMO 비중은 2008년 46%,

1) 한국바이오안전성정보센터(www.biosafety.or.kr)

2) 이부형 외, 국내외 주요 곡물수급 환경변화와 전망에 관한 연구, 현대경제연구원(2014)

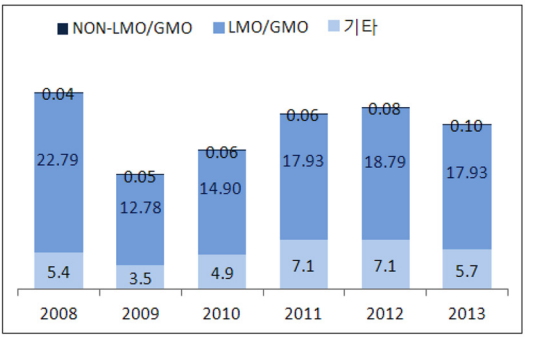
2009년 29%, 2010년 48%, 2011년 45%, 2012년 46%, 2013년 51%를 차지하는 것으로 나타났다. 2012년의 경우 기타로 분류된 수입 옥수수 217만 톤 중 100만 톤이 GMO이고 117만 톤이 non-GMO라는 계산이 나온다. 가공용 옥수수는 식품 재료로 사용되는 전분과 전분당(물엿) 제조에 주로 사용된다. 따라서, 국내 옥수수 수입량 중 가공용 일부가 GMO이며, 그 비중은 GM옥수수가 87% 정도이고, non-GMO 가공용 옥수수가 약 13% 수입되는 것으로 추정된다(그림 6-7). 국내에서 생산된 옥수수 6만 톤(0.7%)을 합하면 총 공급량 828만 톤 중 식용으로 사용한 non-GM옥수수의 양은 124만 톤, 15% 수준임을 알 수 있다. 그러나 수입액으로 계산하면 2012년의 경우 non-GM옥수수의 수입액이 전체의 27%에 달한다. non-GM 프리미엄의 효과를 나타내는 것이다.

(천 톤)



<LMO/GMO 및 Non-LMO/GMO 옥수수 수입 규모 추이>

(억달러)



<LMO/GMO 및 Non-LMO/GMO 옥수수 수입액 추이>

자료 : 관세청

주 : 1. Non-LMO/GMO는 팝콘용, LMO/GMO는 사료용, 기타는 Non-LMO/GMO와 LMO/GMO 혼재된 가공용임.

2. 2013년은 1월부터 11월까지임.

그림 6-7 ◂◂ 옥수수의 용도별 GM옥수수와 non-GM옥수수의 수입 현황[1)]

1) 이부형 외, 국내외 주요 곡물수급 환경변화와 전망에 관한 연구, 현대경제연구원(2014)

6.3.3 콩의 용도별 수입현황

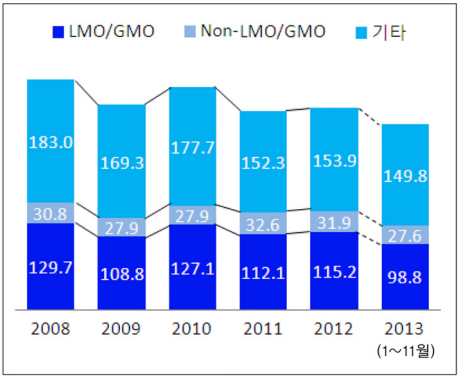
콩의 경우에는 대두유와 경화유 제조에 사용되는 착유용 대두와 사료용 콩은 모두 수입 GM콩이다. 콩 가공제품으로 수입되는 사료용 대두박, 제과 제빵에 사용되는 경화유와 2차 유지가공 제품들은 기타로 분류되며 모두 GM콩으로 만들어 진다. 기타로 분류된 수입 대두박과 경화유 등 2차 유지가공제품의 수입량은 전체 두류 수입량의 1/2 수준에 달하며 2012년도 수입량은 153.9만 톤이다.[1] 식용으로 사용되는 콩나물콩과 두부와 장류 제조에 사용되는 콩은 non-GM콩이다. 2012년 착유용과 사료용으로 사용되는 GM콩 수입량은 115.2만 톤이며, 식용으로 사용되는 non-GM콩의 수입량은 31.9만 톤으로 전체의 28%이었다(그림 6-8). 2012년도 국산콩 생산량은 12.9만 톤으로 국내 non-GM콩 공급량은 44.8만 톤으로 추산된다.[2] 따라서 연간 국내 공급되는 콩 160만 톤 중에서 non-GM콩은 28%로 추산된다(2012년 기준)(그림 6-9).

2012년 GM콩 수입액은 7.3억 달러이며 non-GM콩 수입액은 2,5억 달러이다(그림 6-8). non-GM콩의 수입액 비중은 전체의 22%이다. 수입물량 비중보다 수입액 비중이 낮은 것은 식용으로 들어오는 수입 콩 대부분이 저율관세할당물량(TRQ)으로 들어오기 때문이라고 생각된다.

1) 진현정, GMO표시제 확대가 식품산업과 국내 경제에 미치는 영향에 대한 연구, 농업경영・정책연구 제36권 제2호(June 2009)

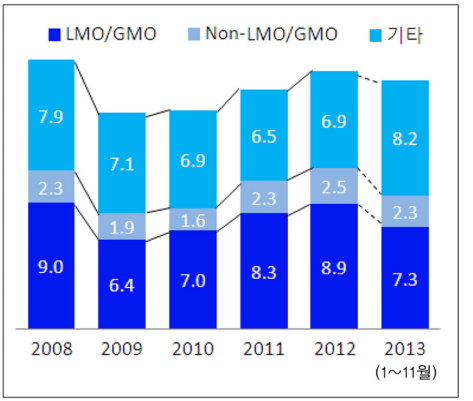
2) 이철호, 문헌팔, 김용택, 이숙종, 이꽃임, 선진국의 조건 식량자급, 도서출판 식안연(2014)

(만 톤)



<LMO/GMO 및 Non-LMO/GMO 대두 관련상품 수입규모 추이>

(억 달러)



<LMO/GMO 및 Non-LMO/GMO 대두 관련상품 수입액 추이>

자료 : 관세청

주 : 1. 대두박과 대두유를 포함한 수치로 기타에 해당.

2. LMO/GMO와 Non-LMO/GMO 구분은 진현정(June 2009), GMO표시제 확대가 식품산업과 국내 경제에 미치는 영향에 대한 연구, 농업경영·정책연구 제36권 제2호에 따름.

그림 6-8 ◂◂ 콩의 용도별 GM콩과 non-GM콩 수입 현황[1)]

1) 이부형 외, 국내외 주요 곡물수급 환경변화와 전망에 관한 연구, 현대경제연구원(2014)

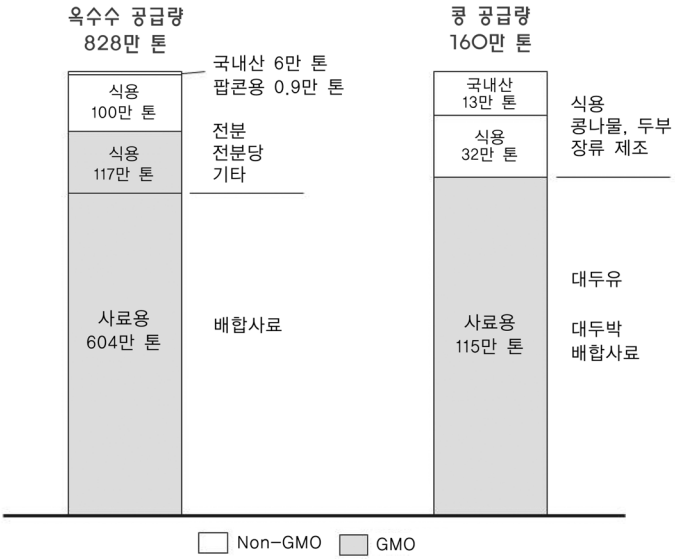


그림 6-9 ◂◂ 국내 옥수수 및 콩 공급량 중 GMO와 non-GMO 비율과 용도 구분(2012년 기준)

6.4 GM식품의 표시 현황

유전자변형생물체에 대한 표시제도는 현재 우리나라를 포함하여 EU, 일본, 호주, 뉴질랜드 등 전 세계 20여 개 국에서 시행되고 있다. GMO표시제도는 GM농산물에 대한 표시 의무화 제도와 GM농산물을 원료로 사용한 식품에 대한 표시제도로 구분할 수 있다.

우리나라의 GM농산물에 대한 표시제도는 2001년 3월 '유전자변형농산물 표시요령'(농림부고시 제2000-31호)에 근거하여 시

작되었다. 표시대상 품목은 식품의약품안전처의 유전자변형식품 안전성 평가 심사를 거쳐 수입이 허용된 유전자변형 콩, 옥수수, 면화, 감자, 카놀라(유채), 알팔파, 사탕무 등 7개 품목이다. 이들 농산물에 대한 비의도적 혼입허용치[1]는 3%이다.

비의도적 혼입허용치는 non-GM농산물의 보관 유통과정에서 부득이하게 혼입될 수 있는 GM작물의 허용 최대치를 규정한 것으로 통계적 근거에 의해 결정하는 것이나 각 나라마다 GM관리 수준에 따라 다르게 정하고 있다. 자국의 식량이 충분히 자급되고 값싼 외국의 GM농산물 유입을 제한해야 하는 중국과 러시아는 0%, 유럽연합은 0.9%를 적용하고 있으나 브라질, 호주/뉴질랜드, 사우디아라비아는 1%, 식량이 모자라 외국의 식량을 수입해야하는 한국은 3%, 일본, 대만 등은 5%를 허용하고 있다(표 6-11).

우리나라의 GM식품 표시제도는 식품의약품안전청이 제정한 '유전자재조합식품 등의 표시기준'(식품의약품안전청고시 제2000-43호)에 의하여 2001년 7월부터 시행되었다. 유전자변형 원재료를 주요 원료(함량 5순위)로 사용한 식품 중 유전자변형 DNA 또는 외래단백질이 남아있는 식품은 GMO 표시를 의무적으로 하도록 규정하고 있다. 표시 대상은 안전성 심사평가를 거쳐 수입이 허용된 GM 콩, 옥수수, 면화, 카놀라, 사탕무 등 5종이며 이를 주요 원료로 사용한 가공식품이다. 최종제품에 유전자변형

1) 비의도적 혼입허용치 : GMO가 아닌 농산물을 구입하는 경우에도 수출국에서 재배 시 다른 GM 작물로부터 꽃가루가 오염되거나 수확 및 유통 단계에서 보관 중 GM 농산물과의 불가피한 비의도적 오염 가능성을 감안하여 혼입을 허용한 수치

DNA 또는 외래 단백질이 남지 않는 간장, 전분당, 식용유지 등은 의무표시에서 제외된다(표 6-11). 유전자변형 원재료를 사용하지 않은 식품은 Non-GMO 표시를 허용하고 있다. 그러나 Non-GMO 표시를 한 제품에서는 비의도적 혼입을 허용하지 않으므로 GM 물질이 검출되어서는 안 된다.

GM식품 표시제도는 나라마다 그 나라의 사정에 따라 다르게 운용되고 있다. GM 종자개발을 주도하고 있는 미국은 실질적 동등성(substantial equivalence) 원칙을 내세워 GM작물이 전통적인 기존작물과 성분과 기능이 다르지 않으므로 표시를 의무화하지 않고 있다. 다만 일반표시기준에 따라 기존 식품과 영양성이나 알레르기성 등이 현저하게 차이가 날 경우에만 표시하도록 되어 있다. 그러나 값싼 외래 농산물의 유입을 제한하고 자국의 농업을 보호해야 하는 유럽연합(EU)은 유전자변형 DNA 또는 외래단백질의 잔류여부와 관계없이 모두 표시하도록 의무화하고 있다. 이 경우에는 GMO 혼입 여부를 검출할 수 없는 경우가 많으므로 이력추적(traceability) 방법으로 관리할 수밖에 없다. 유럽과 같이 생산과 유통과정이 투명하고 신뢰가 쌓인 국가에서는 이력추적 제도가 가능하지만 대부분 이 제도의 실행이 어렵다. 중국과 브라질 등이 유럽과 유사한 GM식품 표시제도를 표방하고 있지만 실제로 관리되지 않고 있다. GM농산물을 수입하여 식량으로 사용해야 하는 한국, 일본, 대만은 분석방법으로 GMO를 판별해야 관리할 수 있으므로 유전자변형 DNA 또는 외래단백질을 잔류하지 않는 제품은 표시 대상에서 제외하고 있다.

표 6-11 주요 국가의 GM식품 표시기준[1)]

구분	국가 (시행일)	표시기준	표시대상식품	비의도적 혼입치
식량수입국	한국 ('01.3월)	(의무표시) • 유전자변형 원재료를 **주요원재료(함량 5순위)**로 사용한 식품 중 유전자변형 DNA 또는 외래단백질이 남아 있는 식품 (자율표시) • 유전자변형 원재료를 사용하지 않은 식품은 Non-GMO라는 표시 가능(비의도적혼입치 인정하지 않음)	• 승인된 GMO 5종(콩, 옥수수, 면화, 카놀라, 사탕무)과 이를 주요 원재료로 사용한 가공식품 * 간장, 전분당, 식용유지 등 표시제외	3%
	일본 ('01.3월)	(의무표시) • 유전자변형 원재료를 함량 3순위 이내로서, 원료 함량비 5% 이상으로 사용한 식품 중 유전자변형 **DNA 또는 외래단백질이 남아** 있는 식품 (자율표시) • 유전자변형 원재료를 사용하지 않은 식품은 Non-GMO라는 표시 가능	• 승인된 GMO 8종(콩, 옥수수, 면화, 카놀라, 사탕무, 감자, 알팔파, 파파야)과 이를 원재료로 사용한 가공식품 및 고올레인산 대두 제품, 고라이신 옥수수 제품 * 간장, 전분당, 식용유지 등 표시제외	5%
	대만 ('03.1월)	(의무표시) • 유전자변형 **콩, 옥수수**를 사용한 식품으로서 유전자변형 **DNA 또는 외래단백질이 남아** 있는 식품	• 승인된 GMO 2종(콩, 옥수수)과 이를 원재료로 시용한 가공식품 * 간장, 전분당, 식용유지 등 표시제외	5%

구분	국가 (시행일)	표시기준	표시대상식품	비의도적 혼입치
식량수출국	미국 ('01.1월)	(자율표시) • 일반표시기준에 따라 기존 식품과 **영양성, 알레르기성 등이 현저하게 차이**나는 경우만 표시	• 승인된 GM 고올레인산 대두 및 그 대두유	규정 하지 않음
	EU ('97.5월)	(의무표시) • 유전자변형 DNA 또는 외래 단백질 **잔류여부와 관계없이** 모두 표시	• 승인된 GMO 6종(콩, 옥수수, 카놀라, 면화, 사탕무, 감자)과 이를 원재료로 사용한 모든 식품 * GM 사료를 먹인 가축의 생산물(육류, 우유, 달걀 등)은 표시제외	0.9%
	중국 ('02.3월)	(의무표시) • 유전자변형 DNA 또는 외래 단백질 **잔류여부와 관계없이** 표시	• 승인된 GMO 5종(콩, 옥수수, 면화, 카놀라, 토마토)과 이를 원재료로 사용한 17개 가공식품	인정 하지 않음
	호주 ('01.12월)	(의무표시) • 유전자변형 **원재료량과 관계없이** 유전자변형 DNA 또는 **외래단백질이 남아** 있는 식품 • 일반식품과 비교하여 기존 특성(영양학적 변화 등)이 변화된 경우 표시	• 승인된 GMO 8종(콩, 옥수수, 카놀라, 면화, 사탕무, 감자, 알파파, 쌀)과 이를 원재료로 사용한 모든 식품 * 전분당, 식용유지 등 표시제외	1%

1) 식품의약품안전처

우리나라 일부 시민단체에서 소비자의 알권리를 내세워 GM식품의 표시확대를 요구하고 있다. EU와 같은 수준으로 표시제도를 확대하자는 것이다. 그러나 GM식품 표시제도의 확대는 득보다 실이 크고 우리나라의 상황에서 시행하기 어려우며 국가적 손실과 부담이 크다는 이유로 받아들여지지 않고 있다. 이 문제에 대한 경규항 교수의 견해를 여기에 소개한다.

GMO 표시와 국가전략

앞에서 언급한 대로 EU에서는 농산물을 수입하지 않아도 전혀 문제가 되지 않는다. 적은 양의 식용 콩은 외국으로부터 수입하는데 Non-GMO콩을 수입(주공급원: 브라질)하는데 별 문제가 없다. 기타 옥수수와 같은 식용 농산물은 자급하고도 남으며 사료용 농산물을 일부 외국으로부터 수입한다. EU에서 식품과 사료는 GMO인 경우 표시를 하도록 되어 있지만 자체 생산하는 Non-GMO 농산물만 가지고도 식량으로는 넉넉하기 때문에 수입한 GMO 사료를 먹여 기른 가축이 생산한 축산물(계란, 우유, 고기 등)에 대해서는 GMO 표시를 하지 않아도 되게 정했으므로 축산농민들은 비교적 값싼 GMO 사료를 먹여 같은 가격의 축산물 생산 판매(수출)할 수 있으므로 경제적으로 이득이 된다. 사료용으로 수입하는 곡물에는 아예 GMO 표시를 해서 사료용으로만 사용한다. GMO인지 non-GMO인지 구별할 필요조차 없으니 수입업자들은 구분유통증명서도 요구하지 않고 공급자 측에서는 구분유통을 할 필요도 없으며 GMO인지 Non-GMO인지 확인하기 위한 분석을 하지 않아도 되니 공급가격이 상대적으로 저렴할 수밖에 없다.

EU에서는 GMO식품에 표시 제도를 시행하고 표시해당 범위도 넓으며, 이 표시제도에 대한 관리를 강화하기 위해 서류상의 추적성까지도 요구하는 까

다로운 제도를 다른 나라에 앞서 도입하면서도 EU의 어느 구성원도 손해를 보지 않는다는 점이 우리와는 다르다. 환경단체와 소비자단체 등의 요구사항도 자연스럽게 들어주면서, EU 여러 국가의 축산농민이나(GMO 및 Non-GMO) 농산물 생산 농민, 식품가공업자, 소비자 그리고 어느 누구라도 손해를 보지 않는 상황이며, 동시에 미국의 GMO 곡물이나 GMO 식품이 EU에서 경쟁력을 가지지 못하도록 하는 전략적 이점까지도 확보하고 있는 것이다.

그런데 우리나라는 외국에서 식용농산물(뿐만 아니라 사료용 농산물)을 반드시 수입해야만 하는 입장에 있음에도 불구하고, 국민들은 GMO 식품을 원하지 않는다. 따라서 가공업체들은 소비자의 거부를 우려해 Non-GMO 농산물을 수입하려고 하니 Non-GMO 프리미엄을 지불하는 것은 물론 값비싼 검사장비를 구입하고 인력을 배치해서 분석검사실을 운영해야 한다. 정부나 감시단체는 표시를 적절하게 하는지를 감독하기 위해 똑같이 고가 장비를 구입하고 인력을 배치하며 모니터링과 관리에 매달려야 한다. 이렇게 추가 지불된 경비는 소비자 물가와 세금에 전가되는 것이 당연할 것이며 따라서 우리나라에서는 식품가공업자나 국민, 그리고 국가 모두가 손해를 보게 되는 점이 EU와는 다르다. EU의 GMO 표시제도나 추적성을 우리나라의 정책 모델로 삼는다는 것은 EU의 식량수급 환경과 우리나라 환경의 차이를 이해하지 못하는 상황에서 일부의 정제되지 않은 순진한 주장인데 이를 여과 없이 수용한다는 것은 국가 전략의 부재가 원인이라고 생각한다.

출처: 경규항, 세계 GMO 표시제 현황, 세계농업 157호(2013)

CHAPTER

07 GMO의 안전성에 대한 논란

7.1 GMO의 유해성에 관한 보도와 실제 상황

유전자재조합기술이 처음 알려진 1980년대 초만 하더라도 코끼리만한 돼지를 만들 수 있다는 기대감으로 전 세계가 흥분했다. 생명공학은 신의 영역으로만 알았던 생명의 신비를 인간이 들여다보고 조정할 수 있게 하는 강력한 도구로 인식된 것이다. 생명공학의 혜택과 기대가 크게 부각되면서 동시에 이 기술에 대한 우려도 커지게 되었다. 인간 복제가 가능해지고 유전자조작으로 인류에게 유해한 생명체가 만들어질 수도 있다는 염려가 제기되기 시작한 것이다. 이러한 GMO 반대 움직임은 일부 종교계와 환경단체를 중심으로 조직화되었다. 유럽의 그린피스(Greenpeace)와 소비자단체들이 GMO 반대운동에 앞장섰다. 그들은 일부 과학자들이 실험을 통해 얻어낸 GMO의 유해성을 전 세계에 알리면서 GMO의 개발과 사용을 막는 일에 매진하였다. 표 7-1은 GMO반대론자들이 주로 거론하는 위해성 사례를 모은 것이다. 생명공학기술이 위해성 논란에 휘말리면서 GMO에 대한 불안감과 반대여론이 세계적인 대세가 되었고 생명공학연구에 적지 않은 타격을 주었다.

표 7-1 유전자변형작물의 위해성 논란 사례

발표자	문제제기 내용	재심사 및 후속조치
영국(1998) 로세트연구소, 푸스타이 박사	렉틴 유전자 이식 GM감자가 동물실험에서 독성 유발. 유전자재조합기술의 불특정성 주장	반복된 실험에서 재현성 검정 실패. 영국과학한림원이 푸스타이 박사의 과실을 공식 인정
미국(1999) 코넬대, 죤 로시 교수	Bt 옥수수 꽃가루를 먹고 제왕나비 사멸 - 실험실 연구결과(네이처지 발표)	재배포장에서 재현 불가능. 미국 환경청 위해 없음을 공식 발표. 독일, 스위스에서도 인정
미국(2000) 스타링크 GM옥수수 사건	사료용 GM옥수수가 식품에 사용. 승인되지 않은 일본, 한국에서도 사료 및 식품에서 검출	미국 환경청이 승인 취소. 혼입식품 전량 회수 폐기, 구분유통의 관리문제
러시아(2005), 과학아카데미 에르마코바 박사	GM콩 사료를 먹인 쥐들이 사망률 6배 증가, 저체중 상태-학술심포지엄에서 발표	공인 학술지에 발표된 자료가 아님. 네이처지에서 심사결과 신뢰성이 낮은 것으로 평가
인도(2006) GM면화 사건	GM면화를 먹고 양과 염소가 과사했다는 소문	같은 GM면화를 재배한 미국, 중국, 호주, 브라질 이상 없음. 인도정부 낭설임을 공식 발표
프랑스(2012) 칸대학 세라리니 교수	GM옥수수를 먹인 쥐에서 종양이 2배 더 발생-미국 독성학회지 온라인판에 발표	유럽식품안전청이 정밀심사-연구과정의 결함 확인,
미국(1996) 파이어니어 하이브리드사	함황아미노산 함량이 높은 GM콩 개발과정중 이식 브라질너트 유전자에 의해 알레르기 발생	100만 달러들인 연구프로젝트 중단 및 폐기

발표자	문제제기 내용	재심사 및 후속조치
호주(2005) CSIRO연구팀	해충저항성 GM완두콩을 개발하는 과정에서 쥐실험 면역반응 확인	연구 중단
미국(2013) 오리건주, 실험중 GM밀 유출	미국 오리건주, 몬태나주에서 비승인 GM밀이 발견됨. 몬태나주에는 GM밀 시험포장이 있었음.	유통중인 밀에 혼입 흔적 없음. 일본, 한국 수입밀 조사, 시험 연구용 GM품종 관리 철저

이러한 반대여론에도 불구하고 과학계는 유전자재조합기술의 유용성을 인정하고 이 기술에서 파생되는 여러 가지 부작용을 최소화하여 안전하게 이용할 수 있도록 계속적인 노력을 하고 있다. 그동안 거론되었던 GMO 유해론의 실체는 대부분 잘못된 실험 결과이거나 부적절한 해석이었다는 사실이 과학계에서 확인되고 있으나 반대론자들은 여전히 잘못된 연구결과를 사실인 것처럼 과장 보도하고 있다. 본 장에서는 그동안 발생한 주요 안전성 논란에 대해 그 전말을 소개하고자 한다.

7.1.1 영국 푸스타이 사건

영국 아버딘의 로웨트연구소(Rowett Research Institute) 푸스타이(Arpad Pusztai)박사는 저명한 렉틴(lectin, 식물체에 있는 탄수화물 결합 단백질) 연구자였다. 그는 아네모네의 일종인 스노드롭(snowdrop)에서 인체에 무해한 해충저항성 렉틴 유전자를 잘라

내어 감자에 이식했는데 이 GM감자가 실험동물에서 독성을 나타내었다. 1998년 6월 푸스타이 박사는 TV인터뷰에서 이러한 실험 결과를 말하면서 진행자가 GM식품의 안전성에 대해 염려하느냐는 질문에 그렇다고 말했고 GM식품을 먹지 않겠다고 말했다. 더 나아가 GM식품을 보급해 국민을 실험동물 취급하는 것은 옳지 않다고 말했다. 저명한 과학자의 이 말 한마디로 GMO 반대론자들은 큰 힘을 얻게 되었고 그린피스를 비롯한 유럽의 GMO 반대운동은 활기를 띠게 되었다. 더 란세트지(The Lancet)와 영국의학협회는 안전성이 확인될 때까지 모든 GM식품의 사용을 금지할 것을 촉구했다.

영국과학한림원(British Royal Society)이 푸스타이 박사의 실험결과를 재심사한 결과 그의 실험 설계와 분석에서 결함이 많은 것으로 결론지었다. 반복된 재실험에서 푸스타이 박사는 그의 실험 결과에 대한 재현성 검정에 실패하였으며, 그의 주장을 뒷받침하지 못했다. 그와 함께 연구를 했던 연구자들도 그의 발언에 대해 동의하지 않았다. 푸스타이 박사는 TV인터뷰 이틀 후에 연구소에서 해고 되었다. 그러나 유전자재조합기술은 외부 유전자를 숙주 게놈의 원하는 위치에 정확하게 삽입할 수 있는 기술이 아니며 어디에 들어갈지를 예측도 못한다는 푸스타이 박사의 주장은 맞는 말이다. 그렇기 때문에 유전자재조합 과정에서 만들어 지는 많은 변이체 중에서 우리가 원하는 특성과 안전성이 확인된 변이체만을 골라내는 과정을 반드시 거쳐야 하는 것이다. 푸스타이 박사는 과학자로서 경솔하게 GMO의 안전성

에 대하여 과장된 우려를 표시했다는 비난을 받고 있지만 이 일로 인해 GMO의 안전성에 대한 평가와 규제가 한층 강화된 것은 인정해야 한다.[1~3)]

7.1.2 스타링크 옥수수 사건

스타링크(Starlink)는 토양세균(*Bacillus thuringiensis(Bt) sp. Tolworthi*)으로부터 분리된 살충성 단백질 Cry9C를 포함하는 유전자변형 옥수수 품종으로 미국 아벤티스(Aventis)사에서 생산한 GM옥수수 일대잡종의 상표명이다. 미국의 몇몇 종묘회사를 통해 동물사료용 옥수수 종자로 공급되었다. 미국 환경부(EPA)는 1998년 산업용 동물사료로만 사용할 수 있도록 이 품종을 승인한 것이다. 그 이유는 도입된 살충성 단백질인 Cry9C 단백질이 열에 강하여 인간의 소화체계에서 쉽게 분해되지 않을 가능성이 있고, 알레르기를 유발할 가능성이 있으므로, 인체에 대한 안전성이 완전히 입증될 때까지는 식용사용이 보류된 것이다. 그러나 2000년 9월 미국에서 판매되는 타코쉘이라는 멕시코 음식에서 스타링크 옥수수 성분이 검출되어 워싱턴 포스터지에 보도되면서 스타링크 문제가 야기되었다. 타코쉘을 제조 판매한 크래프트(Kraft)사는 자발적으로 모든 타코쉘을 시장으로부터 회수하였다. 그 후 소매상

1) http://www.energygrid.com/gmo/2002/10jm-pusztai.html
2) http://www.aec.org.ua/pdf/gmo/LivingLegends_Biotech_05_Apr_08.pdf
3) 경규항, GMO 이슈의 관리정책 이해하기, 한국식품산업협회(2014)

에 의한 다른 리콜이 빈번히 발생하였고, 11월에 미국 식품의약품 안전청은 300개가 넘는 옥수수 생산품을 회수하도록 조치하였다. 2000년 10월에는 일본의 소비자 연맹이 일본에서 판매되는 스낵과 동물사료에서 스타링크 성분을 발견하였다. 스타링크는 일본에서 어떤 용도로도 허가가 나지 않았으므로 수입 옥수수의 스타링크 잔존량은 없어야 했다. 미국 옥수수의 두번째 수입국인 우리나라도 2000년 11월 초순 수입된 타코쉘에서 스타링크 성분이 검출되어 전량 회수하였다.

2001년 아벤티스사는 스타링크 종자가 미국내에서 판매되지 않도록 조치하고 자발적으로 미국 환경청(EPA)이 스타링크에 대한 사료용, 산업용 사용 등록을 취소하는데 동의하고 시장에서 이 상품을 회수하였다. 이 사건은 식품으로 허가되지 않은 GM작물이 식품에 오염된 첫 번째 사건이다. 곡물의 생산 유통 현장에서 구분유통이 용이하지 않은 상황에서 동물사료용으로만 사용허가를 승인하는데 문제가 있는 것이다. 또한 다른 나라에서 승인이 되었으나 우리나라에서 아직 안전성 검사 평가가 끝나지 않은 미승인 GM작물이 혼입되어 수입될 가능성이 제기되는 것이다. 스타링크 사건으로 철저한 구분유통의 필요성과 미승인 GMO의 관리문제가 표면에 드러나게 되었다.[1)]

1) 조현석, 스타링크 옥수수 논쟁 사례, GMO 논란 사례 연구, 농촌진흥청 농업생명공학연구원(2005)

7.1.3 Bt 옥수수의 제왕나비 사건

미생물*(Bacillus thuringiensis*)로부터 분리한 Bt라는 독소유전자를 이용하여 해충저항성 GM옥수수와 GM면화를 개발하여 상업적으로 재배하고 있다. Bt 옥수수는 옥수수 종실을 파먹는 벌레(borer)를 퇴치하는 유용한 종자이다. 1999년 5월 미국 코넬대 죤 로시(John Losey)교수 연구팀은 천연기념물로 보호되고 있는 제왕나비(*Daunus plexippus*)가 Bt 옥수수의 꽃가루를 먹고 사멸할 수 있다는 논문을 네이처지(Nature)에 발표했다. 이 논문은 GMO 반대운동론자들 뿐만 아니라 많은 지식인과 환경운동가들의 관심을 끌었으며 타임지에 소개되었다. 그린피스는 Bt 옥수수 재배로 140종의 유럽 나비들이 위기에 처해있다며 대대적인 GMO반대 캠페인을 벌였다.

해충저항성 Bt 독소로 인해 목표 해충이 아닌 다른 벌레들이 피해를 볼 수 있는 가능성은 있다. 특히 목표 해충과 유사한 근연종 곤충이 피해를 볼 수 있다. 이러한 가능성에 대한 많은 연구가 수행되었다. 2001년 미국과 캐나다의 6개 연구팀이 Bt 옥수수 재배포장에서 정밀 실험을 수행한 결과 로시 교수가 실험실에서 얻은 결과로 예측한 현상들이 실제에서는 관측되지 않는다는 것을 확인하였다. 연구자들은 Bt 옥수수의 꽃가루에는 독소 유전자가 매우 약하고, 4000개 정도의 꽃가루를 먹기 전에는 생육이 저해되지 않았으며. 먹이가 되는 잡초의 잎 면적 평방 cm당 쌓일 수

있는 꽃가루의 수가 약 120개이므로 제왕나비 애벌레가 위험에 노출될 확률은 거의 없다는 결론을 얻었다. 미국 환경청(EPA)은 이들 연구 결과를 바탕으로 Bt 옥수수에 의해 제왕나비와 같은 생물이 멸종되는 일이 생길 수 없다고 공식 발표했다. 독일과 스위스에서 거미, 풀잠자리, 등애, 딱정벌레, 지렁이 등에 대해 수행된 연구에서도 같은 결과를 얻었으며, 오히려 전통적 방법으로 옥수수 밭에 해충을 방제하기 위해 농약을 살포했을 때 더 많은 불특정 곤충들이 사멸하는 것으로 밝혀졌다.[1,2)]

7.1.4 러시아 에르마코바 사건

2005년 10월 러시아 과학아카데미 소속의 이리나 에르마코바(Irina Ermakova) 박사가 러시아 비정부 단체의 유전자변형 심포지엄에서 쥐(rat)를 대상으로한 실험에서 GM콩(몬산토 Roundup Ready line 40.3.2)을 먹은 경우가 일반 콩을 먹은 경우에 비해 생후 3주 안에 사망률이 6배 높았고 일부는 저체중 상태를 보인다고 발표했다. 이 내용이 각종 언론 매체와 트위터를 통해 전 세계에 전파되었고, GM반대론자들에게는 GM작물의 유해성을 알리는 과학적 증거로 사용되었다. 이 사건으로 미국 환경의학아카데미는 GM작물의 안전성에 대한 독립적인 추가연구를 촉구했고, 호주 의회에서는 GM작물의 재배를 금지하는 논의에 인용되기도

1) http://www.biosicherheit.de/de/archiv/2004/314.doku.html
2) 권순종, Bt 옥수수의 환경에 대한 영향, GMO 논란 사례 연구, 농촌진흥청 농업생명공학연구원,(2005)

하였으며, 여러나라의 GMO 안전성 평가체계를 재점검하는 계기가 되었다.

그런데 문제는 같은 분야의 전문가 검증을 거쳐야 하는 공인 학술지에 발표되지 않은 자료를 보도함으로서 신뢰성에 하자를 보인 것이다. 이 사건에 대해 네이처지(Nature Biotechnology)는 에르마코바의 연구결과를 자세히 기술 받아 전문가그룹(Bruce Chassy, L. Val Giddings, Alan McHughen, Vivian Moses)의 심사를 거친 결과를 2007년 9월호에 계재 했다. 전문가 그룹은 에르마코바의 연구결과는 신빙성이 낮은 것으로 결론지었다. 그 이유는 ▲실험동물의 사료 조성이나 개체의 섭취량이 명확하지 않고, 성별 구분이 안 되었으며, 비교그룹의 사양조건이 부실한 점 등 실험 설계가 국제적으로 공인된 실시요강에 부합되지 않고 ▲기존에 발표된 연구 결과들과 크게 상반된 결과임에도 그에 상응하는 철저한 비교 분석이 되어있지 않다는 것이다. 쥐(mouse)에 대해 4세대에 걸친 GM콩의 영향에 대한 실험에서 GM콩이 쥐의 사망률이나 성장에 영향을 주지 않는다는 결과가 2004년에 이미 저명한 학술지에 발표되었기 때문이다(Brake, D.G. and Evenson D.P., 2004).[1~3)]

1) http://www.nature.com/nbt/journal/v25/n9/full/nbt0907-981.html
2) Andrew Marshall1, GM soybeans and health safety－a controversy reexamined, Nature Biotechnology 25, 981 - 987(2007)
3) Brake, D.G. and Evenson D.P., A generational study of glyphosatr-tolerant soybeans on mouse fetal, postnatal, pubertal and adult testicular development, Food and Chemical Toxicology, 42, 29-36(2004)

많은 전문가들이 이들 연구결과에 대해 검증 작업을 벌였고 결국 2005년 12월 영국식품기준청(FSA)의 신식품공정자문위원회(ACNFP)는 에르마코바 박사의 연구에서 여러 가지 문제점을 발견하고 그 연구 결과의 부적절성을 지적하는 성명서를 발표하였다.

7.1.5 인도 Bt 면화 사건

2006년 GMO 반대론자들에 의해 GM면화를 재배하는 인도에서 양과 염소가 괴사했다는 소문이 퍼졌다. KBS도 이 내용을 방송했다. 해충 저항성을 가진 Bt면화를 먹은 인도 안드라프라데시(Andhra Pradesh) 지역의 양과 염소가 죽었다는 것이다. 그러나 Bt 단백질은 특정 곤충에는 작용할 수 있지만 양이나 염소에는 작용하지 않는다. 만약 GM면화 때문에 양과 염소가 인도에서 괴사했다면 다른 지역에서도 괴사해야 한다. 그러나 같은 GM면화를 재배하는 미국, 중국, 호주, 브라질 등 다른 나라와 인도의 다른 지역에서는 유사한 사례가 보고되지 않았다. 인도 안드라프라데시의 정부 관계자는 2007년 4월 양과 염소의 죽음이 GM면화 때문이 아니라고 공식 발표했다. 2008년 6월 한국소비자연맹 임원, 중앙일보 기자, 서울대, 명지대, 경희대 교수로 구성된 조사단이 이 지역을 방문하여 이 소문이 근거 없는 낭설이었음을 확인했다.[1)]

1) 농업생명공학기술바로알기협의회, 식탁위의 생명공학, 푸른길(2009)

7.1.6 프랑스 세라리니 사건

2012년 9월 프랑스 칸대학 세라리니 교수팀이 미국 식품화학독성학(FCT)지 온라인판에 발표된 실험 논문을 통해 200마리의 실험 쥐에게 2년간 제초제에 강한 유전자변형 옥수수를 먹인 결과 다른 쥐에 비해 종양이 2배 정도 더 발생했다고 주장했다. 이에 대해 유럽식품안전청은 같은 해 10월 4일의 1차 공식 성명서와 11월 28일 최종 성명서를 통해 세라리니 연구팀의 실험이 연구 설계부터 보고서 작성, 해석 과정까지 세부 데이터가 부족하며, 연구자의 결론이 과학적이라고 볼 수 없다고 평가했다. 유럽식품안전청이 지적한 주요 문제점은 ▲해당 실험에서 너무 적은 수의 동물을 사용하는 등 샘플크기에서 OECD 기준을 충족시키지 못했으며 ▲쥐에게 투여한 사료 제조 및 섭취량에 대한 정보가 부족하고 ▲불명료한 연구목적, 처리구 조성의 부적절, 사용한 통계방법의 핵심 정보 부재, 불완전한 결론이 도출되었다는 점 등이다. 이에 앞서 독일연방 위해성평가원(BfR)은 이번 연구가 장기간에 걸친 발암연구에서 사용되는 국제적 기준을 따르지 않은 점 등을 근거로 연구 과정에 결함이 있다고 평가했으며, 이러한 이유로 연구자의 핵심 주장이 실험적 근거에 의해 충분히 뒷받침되지 않고 있다고 연구결과를 일축했다. 또한 네덜란드, 호주의 정부기관 및 벨기에의 연구기관 등에서도 연구결과의 재검토가 필요하다는 주장이 제기됐다. 특히 유럽식품안전청의 최종성명은 6개 EU회

원국인 벨기에, 덴마크, 프랑스, 독일, 이탈리아 및 네덜란드 정부 기관이 발표한 독자적 평가보고서도 참고하였다.[1~3)]

7.1.7 GM작물 개발과정에서 발생한 사건들

(1) 브라질너트 사건

세계적 종자회사인 미국 파이어니어 하이브리드사는 1996년 브라질너트(Brazil nut)의 2S 알부민 유전자를 이식해 필수 아미노산인 메치오닌과 시스틴 함량이 높은 GM콩을 개발했다. 그러나 브라질 너트에서 나타나는 알레르기가 2S 알부민 유전자를 이식한 콩에도 나타난다는 사실을 알게 되어 100만 달러의 연구비를 들인 이 연구를 중단했다. 이것은 GMO 연구 개발단계에서 안전성에 문제가 발견되어 연구가 중단된 사례로서 생명공학 작물은 아무리 연구비를 많이 들였어도 안전성이 보장되지 않으면 연구를 중단할 수밖에 없는 것이다.

(2) 호주 바구미저항 완두콩 사건

2005년 호주의 연구기관 CSIRO 연구팀이 곡물을 갉아먹는 해충인 바구미(weevil)에 저항력이 높은 완두콩을 개발하기 위해

1) http://www.aec.org.ua/pdf/gmo/LivingLegends_Biotech_05_Apr_08.pdf
2) European Food Safety Authority, Review of the Seralini et.al.(2012) publication on a 2-year rodent feeding study with glyphosate formulations and GM maize NK603 as published online on 19 September 2012 in Food and Chemical Toxycology, EFSA Journal, 10(10), 2910(2012)
3) 그롭라이프코리아 보도자료, 2013년 1월 14일

일반 콩의 소화효소 저해 단백질 유전자를 삽입하여 GM완두콩을 만들었다. 그러나 동물실험 결과 쥐에서 면역반응이 확인되어 연구를 중단하게 되었다. 이것도 GMO 개발 연구단계에서 안전성에 문제가 발견되어 연구가 중단된 사례로서 안전성에 문제가 있는 생명공학 작물은 연구 단계에서 우선적으로 걸러지는 것을 잘 보여주는 사례이다.

(3) 미국 실험 GM밀 유출 사건

2013년 5월 미국 오리건주 한 농장에서 제초제 내성 GM밀이 발견되었다. 또 2014년 7월에는 미국 몬태나 주립대학교 남부농업연구센터에서 GM밀이 발견되는 사건이 발생했다. 미국에서 GM밀이 상업적으로 재배 승인된 적이 없고 판매되지도 않았는데 밭에서 GM밀이 자라고 있는 것은 승인되지 않은 GM밀이 환경으로 방출된 사건이어서 관계기관의 비상한 관심을 모았다. 조사 결과 두 장소에서 검출된 밀은 몬산토사의 글리포세이트(glyphosate) 제초제 내성 품종이었으며, 두 품종은 서로 다른 유전물질이 포함되어 있었다. 몬태나주 남부농업연구센터는 2000-2003년 사이에 동식물검역소의 승인하에 유전자변형 밀과 관련하여 포장시험을 실시한 곳이었다. 미국 동물검역소는 GM밀의 유통 여부에 대해 일제 조사를 실시했으며 일본, 한국 등 미국밀 수입국에서도 GM밀이 혼입되었는지 광범위한 조사를 실시 했다. 조사 결과 GM밀의 혼입은 확인되지 않았다. 미국은 1994-2005년 사이에 16개

주에서 라운드업 제초제내성 유전자변형 밀 품종 포장시험 158건을 승인한바 있다. 환경 및 인체 안전성이 어느 정도 인정되어 포장시험이 허용된 품종이긴 하지만 미승인된 GM품종이 환경에 방출, 오염되었다는 사실은 심각한 문제로 지적되며 시험 연구 중에 있는 GM품종의 관리를 더욱 철저히 해야 한다는 교훈을 얻었다.[1)]

7.2 영국의 환경운동가 마크 라이너스의 공개 사과

유전자변형생명체(GMO)의 사용을 반대해 오던 영국의 환경운동가 마크 라이너스(Mark Lynas)가 2013년 1월 3일 옥스퍼드농민대회에서 GMO 반대운동에 앞장서온 자신의 행동이 과학을 무시한 잘못된 것이었음을 시인하고 공개 사과 했다. 마크 라이너스는 에딘버러대학에서 역사정치학을 공부한 인문학도로 과학의 깊은 지식이 없이 1990년대 중반부터 GMO 반대 운동에 앞장섰다. 당시 유럽 국가들은 WTO 무역자유화로 농산물 시장이 개방되어 미국이나 중남미국가에서 들어오는 값싼 GM 곡물로부터 자국의 농업을 보호하기 어려운 상황에서 GMO의 안전성 논란은 국익에 부합되는 일이었다. 대부분의 식량을 자급하고 있는 유럽 국가들은 GM 농산물에 대한 표시제를 강화함으로서 값싼 외국 농산물의 수입을 막는 무역장벽으로 활용하고 있다.

1) 식품의약품안전처, 미 오리건주 등 GM밀 검출 조사결과 발표 관련보고, 2014. 10.14.

마크 라이너스는 시민운동가로서 그가 한 일 중에서 GMO 반대운동은 가장 성공적인 운동이었다고 자평한다. 유럽에서 시작된 GMO 유해론은 아프리카와 아시아로 퍼져나가 미국을 제외한 전 세계에서 GM 작물 불매운동이 일어난 것이다. 후일 환경운동가로서 온실가스에 의한 지구 온난화에 대한 책(대표작: 6 Degrees: Our Future on a Hotter Planet, 6도 더워진 지구에서 인류의 미래)들을 쓰면서 그는 과학을 공부하기 시작했고, 그가 주장했던 GMO 유해론이 과학적 사실을 무시한 잘못된 판단이었음을 깨닫게 된다. 그의 잘못된 판단으로 아프리카나 아시아의 많은 가난한 사람들이 생명공학 기술의 혜택을 받지 못하고 굶주림에 시달리게 되었다고 자책하고, 그의 잘못된 행동에 대해 용서를 구하는 공개 사과를 한 것이다. 2013년 4월 29일 미국 코넬대학 강연에서 그는 GMO반대 음모론을 제기하고 과격 환경단체들의 실상을 폭로하여 세계적인 관심을 받고 있다.

마크 라이너스가 GMO 반대운동에 대한 본인의 잘못을 인정하게 된 첫 번째 이유는 지난 18년간 미국인을 비롯한 세계 수억 인이 GM 곡물을 먹고 있으나 아직 GM 곡물을 먹고 이상 징후를 나타내었다는 보고가 한건도 없다는 사실이다. 그래서 유럽 과학자들도 GMO의 안전성 검증은 이제 끝났다고 보고 있다.

한국식량안보연구재단은 2013년 6월 마크 라이너스를 초청하여 'GMO의 과학적 진실과 이용' 세미나를 서울 프레스센터에서 개최하였다. 다음날에는 고려대학교에서 '글로벌 기후변화와 식량안보'라는 주제로 특별강연을 했다. 마크 라이너스 초청강연 내용 전문을 여기에 싣는다.

마크 라이너스 초청강연

- GMO의 과학적 진실 -

2013년 6월 4일, 서울 프레스센터

친애하는 신사 숙녀 여러분

오늘 이 자리에서 연설하도록 초대해주셔서 큰 영광이며 겸허한 마음으로 임하겠습니다. 저는 과학자는 아니지만 중요한 토론의 양 측면을 모두 지켜본 사람으로서 제가 고찰한 내용 중 몇 가지를 여러분과 공유하고 싶습니다.

제가 다룰 주제는 사람들에게 격한 감정을 야기할 수도 있다는 점을 알고 있습니다. 그래서 오늘 이 주제에 대해 조금 후 토론을 펼칠 전문가 패널이 우리와 함께하는 것을 특히 기쁘게 생각하고, 그들의 의견을 고대하고 있습니다.

저는 환경운동가이자 전 세계의 지속가능성과 식품 안보에 열정을 품고 있는 사람으로서 몇 말씀 드리려 합니다. 지난 십 년 동안 저는 기후 변화가 인류와 지구에 심각한 위협을 가한다는 인식을 높이는데 많은 시간을 바쳤습니다. 이 주제에 관해 세 권의 책을 썼고, 2년 반 동안 몰디브의 국가 원수이셨던 대통령을 위해 환경변화 관련 고문으로 일했습니다.

기후변화는 극지방의 만년설을 녹게 만들어 전체 해수면 상승을 유발했고, 이로 인해 조그만 섬나라 몰디브는 소멸할 위기에 처해 있습니다. 저는 기후변화와 관련된 국제협상에서 몰디브의 대표자였고, 대한민국의 동료들과 함께 일하며 여러 차례 도움을 받았습니다.

저는 예전에도 서울을 방문하여 녹색 성장 정상회담에 참석하는 기쁨을 누렸고, 온실가스 배출 감소를 목적으로 원자력 및 재생 가능한 에너지원에

투자하는 방안을 포함해 한국이 저탄소 성장을 위해 도입한 전략에 대해 한층 더 잘 알게 되었습니다. 이 모든 분야에서 대한민국은 전세계 다른 국가에 모범이 되는 국제적 리더라 생각합니다. 한국의 매우 빠른 발전은 국민의 극적인 번영을 가져왔고, 이와 동시에 많은 중요한 영역에서 환경보호의 수위를 높여왔다는 점에서 한국은 타의 모범이 되는 국가라고 생각합니다. 무엇보다 한국이 과학과 기술에 초점을 맞춘 점은 인도나 급속한 성장을 이루고 있는 여타 아시아 개발도상국들이 고려해야 할 모델이라 생각합니다.

세계의 어느 곳도 지구 온난화로부터 안전하지 못하지만, 한국은 특히 미국에서 수입된 주곡작물에 많이 의존하기 때문에 더욱 큰 위험에 노출되어 있습니다. 이는 즉 기후변화와 관련된 사건들로 인해 전 세계의 작물 공급이 경색될 경우 한국인은 급속한 식품 가격 상승에 직면하게 될 것이고, 식품 안보는 물론 국가 경제가 타격을 입을 것이라는 의미입니다.

바로 이번 달 사상 처음으로 대기 중 CO_2수치가 400ppm을 초과하는 중대한 사건이 발생했습니다. 과거에 마지막으로 대기 중 CO_2 수치가 이처럼 높았던 시기는 인간이 진화하기 전으로, 전 세계의 기후는 지금보다 훨씬 더 뜨거웠습니다. 이는 지금으로부터 삼백만 년 전의 일입니다. 향후 탄소 방출의 증가를 억제하는 조치를 취하지 않는다면, 금세기 우리는 지구 온도가 섭씨 6도 상승하는 것을 목격하게 될 것입니다.

세계는 아주 분명한 제약에 직면해 있습니다. 전 세계 인구는 2050년까지 90억 명 혹은 그 이상에 달할 것입니다. 이러한 인구 증가의 대부분은 유아 사망률 감소와 평균수명 증가 때문입니다. 출생률은 그다지 높지 않으며, 사실 현재 세계의 평균 출생률은 여성 한 명 당 2.4명 가량이고, 인구대체율은 대략 2.1명입니다. 이 같은 사실은 향후 35년 내에 적어도 20억 명을 추가로 먹여 살려야 한다는 의미입니다. 이는 명백히 막중한 과제이고, 세계 식품 시장이 한계에 다다를 것입니다.

다른 종류의 제약도 존재합니다. 전세계 담수가 고갈되고 있습니다. 중국과 인도 그리고 미국에서는 지하수를 무분별하게 사용하여 지속 가능성이 없습니다. 가뭄이 더욱 빈번하게 발생할 위험성이 있고, 이러한 가뭄이 한층 극단

적인 기후현상과 결합된다면 우리의 가장 중요한 주곡생산 지역의 수확량에 악영향을 미칠 수 있습니다.

이러한 문제가 한국과는 거리가 먼 일로 보일 수 있습니다만, 세계 식품 시장과 한국의 높은 수입 의존도를 고려할 때 미국의 옥수수 재배지대에서 발생한 가뭄은 분명 한국의 소비자에게 영향을 미칠 수 있습니다.

또 다른 문제도 있습니다. 전 세계적으로 농민들은 너무 많은 양의 질소를 사용합니다. 질소의 과다 사용은 담수 생태계를 파괴하고 바다에서 생물이 생존할 수 없는 지역인 데드존을 형성하게 됩니다. 미시시피 강 하류에서 멕시코 만에 이르는 곳에는 매년 여름 20,000평방 킬로미터에 달하는 데드존이 발생합니다. 아시아 전역에 걸쳐 특히 중국 삼각주 주변에서 형성되는 연안의 데드존 문제는 점차 중요한 사안이 되고 있습니다.

이 모든 문제의 기저에는 생물다양성을 위협하는 글로벌 위기가 도사리고 있습니다. 세계 각지에서 생명체가 대량으로 멸종하는 위기의 목전까지 와 있으며 이는 공룡이 멸종한 이래 예상치도 못한 일입니다. 농업으로 인한 서식지 파괴는 종의 멸종을 유발하는 가장 큰 단일 원인이기 때문에 생물다양성 상실의 최대 동인(動因)은 바로 농업입니다.

오늘 농업에 관한 과학 컨퍼런스에서 여러분이 듣게 될 가장 중요한 말이 '환경 파괴 없이 지속 가능한 증대'인 것은 바로 이런 이유에서입니다. 우리의 과제는 세계의 식량 생산을 두 배로 늘리는 것입니다. 다시 말해 식량을 100% 증산해야 하고, 이 일은 더 적은 물과 더 적은 질소를 사용하되 거의 동일한 경작지 면적에서 수행해야 하며, 더욱이 향후 35년 내에 모두 달성해야 합니다.

이 과제는 원래의 녹색 혁명만큼이나 큰 도전입니다. 1960년대 세계가 대기근의 위기에 처했을 때, 미국의 식물육종가인 노먼 볼로그(Norman Borlaug)를 비롯해 일군의 과학자들은 생산량을 증가시킬 최선의 방법은 밀과 쌀의 높은 수확량을 가능케 할 왜화(矮化) 품종을 개발하는 것이라 결정했습니다. 이에 따라 생명공학이 시행되었습니다. 초창기에는 이 같은 개량의 기조를 이룬 정확한 유전적 변화를 제대로 이해할 수 없었습니다. 그 당시에는 게놈의

서열을 분석하거나, 오늘날에는 살펴볼 수 있는 DNA의 정확한 변화를 파악할 수 없었기 때문입니다.

노먼 볼로그는 십억 명의 생명을 구한 공로로 1970년 노벨평화상을 수상했습니다. 그리고 저는 그가 열대우림도 구했다고 생각합니다. 녹색혁명 덕분에 우리가 목격할 수 있었던 막대한 생산성 증대는 약간의 경작지가 늘어났을 뿐이지만 오십억, 육십억, 나아가 칠십억 인구에게 식량을 공급하도록 해주었습니다.

대조적으로, 오늘날 우리가 현 인구를 먹여 살리기 위해 1960년대의 기술을 이용하려 했다면, 남미의 두 배에 달하는 우림지대가 경작을 위해 훼손되었을 것이며, 이 면적은 다 합쳐 30억 헥타르에 달했을 것입니다. 세계 그 어느 곳에도 우림지대나 자연보호 구역이 남아있지 않았을 것이고, 오늘날 모든 여분의 자투리땅에는 곡식들이 자라고 있었을 것입니다.

그렇다면 어떻게 이러한 개선을 이룰 수 있을까요? 농업 관련 과학과 기술에 그 답이 있습니다. 화학의 발전은 농작물을 해충으로부터 보호하면서도 이전 제품들보다 독성이 덜한 개량된 비료와 농약을 내놓았습니다. 또한 생물학의 발전은 한층 더 생산적인 동시에 더 믿을 만한 수확을 가능케 하는 새로운 교잡품종의 개발을 이끌어 냈습니다. 오늘날 생명공학은 이 두 분야를 통합했습니다. 생명공학은 유독한 농약을 농작물에 살포할 필요 없이 특정한 해충에 내성이 강한 농작물을 개발해왔습니다. 예를 들어, Bt 면화와 옥수수는 세계 농약 사용을 10% 감소시켰습니다.

중국에서 재배되고 있는 GMO Bt 면화에 대한 과학적 연구는 살포용 농약 사용이 줄어듦에 따라 살충 표적이 아닌 유익한 곤충들은 더 이상 죽지 않았다고 밝혔고, 이 점은 생명공학이 생물다양성에 이로운 역할을 하고 있음을 매우 명백히 보여주는 예입니다. 다시 말해 더 많은 곤충들과 새들이 살아남고, 생태계 일반에 도움이 되었다는 의미입니다.

또한 화학약품 구입에 드는 경비를 줄일 수 있고, 독소에 덜 노출된다는 점에서 농민들에게도 이득이 됩니다. 면화 재배와 관련하여 인도에서는 농약

사용이 60%나 줄었고, 중국에서도 40%까지 감소했습니다.

더불어 생명공학은 질소대사가 한층 효율적인 농작물을 개발하여 비료 사용을 줄임으로써 환경오염 및 온실가스 방출을 감소시키는데 기여하고 있습니다. 궁극적으로, 질소 고정 비두과(非豆科) 작물을 개발하는 일까지 가능해진다면 옥수수와 밀 그리고 쌀도 완두콩이나 대두처럼 스스로 질소를 고정할 수 있게 될 것입니다. 하지만 이 같은 일은 DNA 재조합 기술이 없이는 불가능하고, 심지어 그 기술을 사용할 경우에도 매우 어려운 일입니다.

전 세계 과학자들은 현재 난제들을 해결하기 위해 흥미로운 신규 작물 품종을 개발하고 있습니다. 이곳 한국에서도 바이러스 내병성 고추의 개발이 한창 진행 중입니다. 하와이에서 개발된 바이러스 내병성 파파야는 몇 년 전 확산된 새로운 병해의 폐허로부터 파파야 재배산업 전체를 구했습니다. 저는 지난달 코넬 대학으로 출장을 갔다가 GMO 파파야를 먹어볼 기회가 있었는데, 아주 달콤한 맛에 풍부한 풍미를 지녀 매우 맛이 좋았습니다.

또한 어린 아이들의 비타민 A 결핍을 막기 위해 만들어진 '황금 쌀'처럼 영양적으로 강화된 농작물도 있습니다. 비타민 A 결핍으로 매년 수십만 명의 아이들이 목숨을 잃고 더 많은 아이들이 시력을 잃었습니다. 이 황금 쌀은 비타민 A를 충분히 함유하고 있어 이러한 생명을 구할 수 있으며, 현재 필리핀에서 시험 재배되고 있습니다.

생명공학을 가장 유익하게 이용하는 사례는 개발도상국들에서 찾아볼 수 있습니다. 빌 앤드 멜린다 게이츠 재단은 아프리카의 척박한 토양에 적합하도록 개량된 옥수수와 같이 새로운 곡물의 개발에 수억 달러를 지출하고 있습니다. 이 같은 프로젝트는 비료를 구할 수 없는 지역이거나 농민이 비료를 구입할 능력이 없는 경우에도 수확량을 50% 이상 증대할 수 있도록 하기 위한 것입니다.

'아프리카를 위한 가뭄 저항성 옥수수'라 불리는 민관 파트너십도 있습니다. 이 프로젝트는 생명공학으로 가뭄에 잘 견디는 옥수수를 개발하여 특히 기후변화로 인한 문제들에 직면한 아프리카 소작농들을 돕기 위한 것입니다. 또한 쌀의 광합성 능력을 개량한 C4 쌀 덕분에 쌀의 산출량은 극적으로 증가

하였습니다.

이러한 사례는 더 있습니다. 동아프리카의 생합성영양작물인 쿠킹 바나나와 나이지리아 및 기타 지역의 철과 단백질 그리고 비타민 A가 강화된 카사바도 있습니다. 현재 사하라 사막 이남의 아프리카에서 급속히 확산되어 아프리카인 다섯 명 중 두 명분의 주식 작물을 위협하는 병해, 카사바 갈색 줄무늬병에 대한 저항 품종도 있습니다.

인류의 가장 중요한 주식 중 하나인 밀을 위협하는 세계적 유행병을 저지하기 위해 분자 수준에서 밀의 녹병에 대한 저항력을 부여하는 데 초점을 맞춘 형질전환기법도 물론 이러한 사례 중 하나입니다.

여러분은 이제 생명공학에서 많은 잠재력을 보게 될 것입니다. GMO 작물이 묘책은 아니지만, 우리가 이처럼 발전된 기술을 사용하지 않는다면 앞으로 수십 년 동안 환경 파괴 없이 지속적으로 전 세계에 식량을 공급하는 일은 더욱 어려울 것입니다. 새로운 도전은 새로운 발명을 필요로 합니다. 농업의 진전을 포기하는 것은 말을 탄 채 달에 도착하려는 것과 같습니다.

그러나 여기에는 문제가 하나 있습니다. 오늘 제가 여러분께 연설을 하는 이유도 바로 이 때문입니다. 전 세계에 있는 수백만의 사람들, 아니 어쩌면 수십억에 이르는 사람들이 GMO 작물은 뭔가 우리의 건강과 환경에 위험하다는 잘못된 생각을 갖고 있습니다.

이것은 아마도 현대과학 역사상 가장 심각한 의사소통 실수일 것입니다. 전 세계의 모든 명망 있는 과학 기관이 GMO 작물의 안전성을 밝혔지만, 세계 각지의 사람들은 GMO 작물 섭취를 거부하고 있습니다. 또한 전문적인 NGO 활동가들은 GMO 작물은 영원히 금지되어야 하고 관련 과학도 중단되어야 한다고 주장합니다.

아시는 분도 계시겠지만, 예전에 저는 유럽에서 GMO 작물에 반대한 초기 환경 운동가 중 한 사람이었습니다. 저는 동료들과 함께 현장에서 GMO 작물을 수없이 망가뜨렸고, 이러한 새로운 품종의 작물들은 유해하고 위협적이라며 유럽을 중심으로 어떻게 해서든 여론을 설득하려 했습니다. 이 캠페인은 제가 참여했던 그 어떤 캠페인보다 성공적이었습니다. 시작한지 불과 몇 해

만에 우리는 일명 프랑켄 푸드(Frankenfoods)라 불리는 유전자변형 식품이 위협적이고 두려운 것이므로 반드시 금지되어야 한다고 모든 사람을 설득할 수 있었습니다. 저는 이제 GMO 반대 운동가로 활동했던 것이 제 인생 최대의 실수였다는 점을 아주 분명히 말씀드릴 수 있습니다. 저는 향후 수십 년간 수백만 명의 목숨을 살리는 데 필수적인 역할을 할 기술에 대해 사람들이 비이성적인 두려움을 품도록 만드는 상황에 일조했습니다. 저는 이미 영국에서 이 점에 대해 사과했고, 오늘 다시 한국 국민들께 사과드립니다. 죄송합니다.

한국의 여론도 아직 GMO에 대해 매우 강하게 반발하고 있다는 점을 알고 있습니다. GMO 반대 캠페인은 하나의 실수이고, 거기에는 아무런 과학적 증거도 없다는 사실을 사람들이 인식하는 것이 매우 중요한 이유는 바로 여기에 있습니다. 점점 더 많은 수의 전 세계 환경운동가들이 이 관점에서 현실을 깨닫기 시작했고, 자신들의 생각이 틀렸으며 환경운동도 변화되어야 한다는 메시지를 전달하기 위해 노력하고 있습니다.

사람들은 저에게 묻습니다. '어떻게 당신이 틀렸다는 것을 깨닫게 되었나요?' 물론 그린피스와 같은 환경단체들은 여전히 GMO에 반대하고 있고, 자신들의 생각을 바꿀 기색이 전혀 없어 보이기 때문입니다.

저는 명백한 과학적 사실을 부정하고 있다는 것을 깨달았기 때문에 마음을 바꾼 것입니다. 저의 이 대답은 진실입니다. 명백한 과학적 사실을 부정하는 것은 기후변화에 대한 현실을 부정하는 것과 마찬가지입니다. 저는 수년 동안 지구 온난화를 믿으려 하지 않는 사람들과 논쟁해왔습니다. 기후변화에 대해 의심을 품는 사람들을 설득하기 위해 저는 항상 다음의 미국과학진흥협회에서 작성한 글처럼 과학적 일치에 대한 성명들을 인용했습니다.

"과학적 증거는 분명하다. 인간의 활동이 유발한 지구의 기후변화는 현재 일어나고 있고, 이로 인해 사회에 대한 위협도 나날이 증가하고 있다. 전 세계에서 축적된 데이터들은 기후변화가 야기한 광범위한 종류의 영향을 보여준다. 빠른 속도로 녹아내리는 빙하, 주요 빙상의 불안전성, 극단적인 기상이변의

증가, 해수면 상승, 생물종의 분포 역이동 등이 그것이다. 변화의 속도와 피해의 증거는 최근 5년간 현저히 증가했다. 온실가스 방출을 제어할 수 있는 때는 바로 지금이다."

97% 혹은 그 이상의 전문가들이 지구 온난화가 심각한 문제라는 점에 동의한 것은 매우 분명한 사실입니다. 그러나 앞서 언급했던 미국과학진흥협회는 GMO 식품의 의무표시제에 반대하는 성명도 발표했습니다. 그 성명의 내용은 GMO에 대한 피해의 증거가 없기 때문에 과학적 근거에 기반해 의무표시제는 불필요하다는 것이었고, 여기에 그 일부를 인용합니다.

"과학은 매우 분명하다. 생명공학의 현대 분자기술로 개량된 작물은 안전하다. (……) 세계보건기구, 미국의사협회, 미국국립과학원, 영국왕립학회 및 관련 증거를 검사한 기타 존경받는 조직들은 모두 동일한 결론에 도달했다. GM 작물에서 유래한 성분을 포함하는 음식의 섭취는 기존의 농작물 개량 기술로 변형된 농작물 성분을 포함하는 동일한 음식의 섭취보다 위험하지 않다."

분명히 말씀드리지만 별개의 두 가지 주제, 기후와 GMO에 대해 매우 분명한 성명을 내놓은 것은 동일한 과학 기관입니다. 여러분은 대부분의 NGO 활동가들이 하는 것처럼 이 두 가지 성명 중 하나만 수용하고 다른 하나는 거부할 수 없습니다. 미국과학진흥협회가 내놓은 성명을 모두 수용하든가, 수용하지 않든가 둘 중 하나입니다. 만약 수용하지 않는다면, 여러분은 과학의 친구가 아닌 것입니다.

제가 생각하기에 오늘날 GMO 반대 운동은 아주 위험한 방향으로 나아간 것 같습니다. 인터넷 상에 많은 음모론이 떠도는데, 몬산토가 어떻게 사람들을 중독시키고 세계의 식량 공급을 접수하려는지에 대한 음모론이 한 예입니다. 여러분이 이러한 주장을 확인해보면 아시겠지만, 그들의 음모론은 절대 사실이 아닙니다. 인도에는 농민들이 GMO 종자를 구입한 후 자살했다는 근거 없는 믿음이 있습니다. 그러나 진실은 농민들이 GMO로 인해 혜택을 입었고, 그에

따라 자살률이 떨어졌다는 것입니다.

GMO 작물은 자가 채종을 할 수 없다는 믿음도 있습니다. 그러나 진실은 이른바 '터미네이터 기술'은 결코 개발된 적이 없다는 것입니다. 그리고 GMO 작물은 오로지 거대 기업들에게만 유용하다는 믿음이 있습니다. 전 세계의 공공부분 학술 기관들은 실제로 이 분야에 많은 투자를 하고 있습니다.

불행하게도 이들이 개발하는 작물의 거의 대부분은 정작 필요로 하는 농민들의 손에 닿지 못합니다. 유럽의 경우처럼 규제 시스템이 완전히 망가졌거나, 규제 당국이 요구대로 수천 장의 서류를 모두 준비하려면 수천만 달러의 비용이 소요되기 때문입니다.

GMO 작물에 대한 과도한 규제가 오히려 오직 거대기업들만 생명공학 작물을 시장에 내놓을 수 있도록 만들었다는 사실은 아이러니합니다. 몬산토에 반대한다고 말하는 사람들은 아무도 몬산토가 시장에서 차지하는 지위에 도전할 수 없게끔 만드는 장본인인 셈입니다.

여기서 한 가지는 분명히 집고 넘어가야할 것 같습니다. 지난 20년 동안 GMO 식품을 섭취함으로써 피해를 입은 사례는 단 한 건도 없었습니다. 이 기간 동안 사람들은 GMO 성분이 함유된 식사를 2조(兆)번 혹은 3조(兆)번이나 했지만 이 같은 피해 사례는 전무합니다.

얼마 전 저는 옥스퍼드에서 연설을 하며 당신이 GMO 식품으로 해를 입을 확률은 소행성에 치어 죽는 것과 유사하다고 말했습니다. 그런데 저의 이 말은 확실히 틀린 것이었습니다. 1월에 이 말을 한 뒤 실제로 러시아에서 소행성 충돌 사건이 발생하여 많은 사람들이 다쳤지만, 아직까지도 GMO 식품을 먹고 해를 입었다는 사람은 없기 때문입니다.

이 점은 생명공학 작물이 위험하지 않을 뿐만 아니라 지금까지 인간이 개발한 그 어떤 식량보다도 안전한 식량원이라는 사실을 보여줍니다. 사람들이 건강에 더욱 좋을 것이라 생각하여 구입하는 유기농 식품은 실제로 GMO보다 훨씬 더 위험합니다.

이에 대한 예가 2011년 독일에서 발생한 유기농 콩나물의 병원성 대장균

(E-coli) 오염입니다. 이 대장균으로 50명이 사망했고, 3,000명 이상이 심각한 증상을 겪었습니다. 이 같은 감염 발생은 아마도 유기농 콩에 재배시 사용한 거름의 박테리아 잔류물 때문인 것으로 추정됩니다. 그래서 요즘 저는 아내가 유기농 콩나물을 살 때마다 아주 깨끗하게 씻으라고 부탁합니다.

저는 이곳 한국에서 유전자변형 식품에 대한 의무표시제도와 관련하여 큰 논쟁이 일고 있고, 이미 법제화되었다는 사실도 알고 있습니다. 현재 논쟁은 기름이나 설탕처럼 원래의 DNA를 추적할 수 없는 식품류의 의무표시제와 관련된 것이고, 이는 비(非) GMO 원료에서 유래한 식품과 구분이 되지 않는 식품들입니다.

소비자의 알 권리라는 생각은 강력하고 감정을 자극하는 주장이지만, 여기서 문제는 알아야 할 가치가 있는 것이 전혀 없다는 사실입니다. 물병 두 개의 화학 성분이 동일한 것처럼 두 종류의 식품이 화학적으로 동일하다면 대체 무엇을 표시하겠다는 것일까요? 전자현미경을 갖춘 실험실에서 이 식품들을 검사한다 하더라도 두 가지 식품을 구별 지을 방법은 없습니다. 이 식품들은 동일하기 때문입니다! 이는 아무리 의무표시제를 법제화한 경우에도 그것의 시행을 가능케 할 방법은 없다는 의미입니다.

또한 GMO에서 유래한 식품을 별도 표시하는 것은 사람들의 오해를 불러일으키고 겁을 집어먹게 합니다. 저는 바로 이런 이유에서 운동가들이 의무표시제를 요구한다고 생각합니다. 자신들의 의견을 뒷받침할 과학의 실제적 증거를 전혀 찾지 못한 그들에게 공포야말로 가장 강력한 무기이기 때문에 사람들이 겁먹기를 원하는 것입니다. 또한 운동가들은 의무표시제가 완전한 금지라는 최종 목표를 향한 단계에 불과하다고 분명히 밝힙니다. 그렇다면 그들은 실질적인 소비자의 선택을 원하지 않는 것이고, 되레 자신들이 승인하지 않은 음식은 금지시킴으로써 소비자가 선택할 권리를 부정하는 것입니다. 이와 관련한 미국의 정책은 매우 분명합니다. 건강을 해칠 뚜렷한 위험이 있어 소비자에게 알려야 할 경우 의무표시제는 의무입니다. 미국과학진흥협회의 과학자들은 피해에 대한 그 어떤 증거도 없는 경우 "의무표시제와 같은 법제

화는 오직 소비자에게 오해와 거짓 경고를 야기할 뿐"이라 결론지었습니다.

GMO 식품에 대한 반대와 관련해 제가 생각할 수 있는 가장 명확한 비유는 종교와 연관 짓는 것입니다. GMO 식품 의무표시제는 마치 이슬람교도들을 위해 할랄(Halal) 식품이라 표시하고, 유대인을 위해 코셔(Kosher) 식품이라 표시하는 것과 같습니다. 하지만 이것은 과학적인 문제가 아니며 과학의 영역을 벗어난 사안입니다. 사람들이 비과학적인 이유로 GMO 식품을 회피한다면, 저는 그렇게 할 권리가 있다고 생각합니다. 과학자들은 증거와 관찰에 기반한 정보를 사람들에게 제공할 수는 있어도 어떻게 느껴야 하는지를 말할 수는 없습니다. 그리고 제가 아는 대부분의 분자생물학자들은 이 주제에 관해 사람들의 선택권을 존중합니다.

GMO에 대한 논쟁에서는 때때로 예방 원칙이 등장합니다. 사실 그린피스는 일주일 전 필리핀에서 Bt 가지의 시험재배를 중지시킬 목적으로 예방 원칙에 근거해 항소법원의 판사를 설득하려 했습니다. 이는 그린피스가 GMO 식품의 실제적 혹은 잠재적 피해에 대한 그 어떤 과학적 증거도 찾을 필요 없이 그저 자신들의 능동적인 상상력이면 충분하다고 생각하고 있음을 의미합니다. 그러나 여기서 제기되는 또 다른 주제는 기회비용인데 제가 보기에 이것이야말로 핵심적인 문제라 생각됩니다. 우리 대다수가 과학을 중지하고 중요한 분야에서 새로운 지식을 모으는 일을 중단하기로 결정한다면, 우리는 혁신을 통해 문제를 해결할 잠재력을 상실하게 될 것입니다.

이는 새로움이나 기술 혁신에 겁먹지 않는 다른 지역보다 뒤쳐진다는 의미입니다. 미래 식품 시장에서 경쟁 우위를 점하고 싶은 중국은 쌀과 다른 작물의 자국 생명공학 프로그램에 수십억 달러를 지출하고 있습니다. 반대로 유럽은 점점 더 뒤쳐지고 있습니다. 유럽은 최근 몇 년간 GMO 작물의 자국 내 재배에 대한 모든 승인을 거부했고, 농민들은 그에 대한 결과로 고통받고 있습니다. 사실상 제가 얘기를 나눈 모든 유럽 농민들은 적어도 어떤 씨앗을 심을지 선택할 권리를 갖고 싶어 했습니다. 그러나 이와는 반대로 유럽 대륙의 다른 정부들이 내린 결정 때문에 그들의 선택은 축소되었습니다. 그들은 몹시 좌절했고, 점점 더 화가 치밀기 시작했습니다.

예를 들어 영국에서 우리는 습한 여름에 작물을 황폐하게 만드는 곰팡이 감염, 감자잎마름병으로 골머리를 앓고 있습니다. 최근 수년간 유기농에 종사하는 농민들의 수확량은 대폭 감소했고, 기존의 농업 방식을 따르는 농민들도 생장철에는 매주 살포용 화학 약품인 살진균제를 대량으로 사용해야 했습니다. 이 문제를 해결해줄 잎마름병 저항성 GMO 감자는 이미 비상업적으로 개발된 상태였습니다. 완전히 안심하고 먹을 수 있는 이 감자의 새로운 유전자는 실제로 감자의 동류 작물에서 추출한 것입니다. 그러나 생명공학과 관련된 미신에 사로잡힌 유럽 연합으로부터 잎마름병 저항성 작물에 대한 재배 승인을 얻어낼 전망은 없어 보입니다.

당신이 이 점에 대해 생각하고 있다면, 그것은 매우 놀라운 일입니다. 공포와 오보를 퍼트리는 반과학주의 활동가들은 유럽 대륙 전체를 인질로 잡고 그 몸값으로 십 년 넘게 이루어온 농업혁신을 저지하려 듭니다. 유럽의 농업은 세계 그 어느 곳보다 낮은 생산성 향상을 목도하고 있고, 그래서 우리 유럽은 현재 브라질과 같은 다른 나라에서 더 많은 곡물을 수입하는 실정입니다.

유럽인들이 육류 제품을 섭취함으로써 방대한 양의 GMO 작물을 소비한다는 점은 여기에 숨어있는 아이러니입니다. 단지 자국 내 GMO 작물 재배 허가를 거부함으로써 생명공학이 선사한 한층 효율적인 종자의 혜택은 유럽 농민을 대신해 미국과 브라질 농민의 차지가 되었습니다.

저는 한국도 가축용 사료로 사용하기 위해 미국이나 다른 나라로부터 대량의 GMO 옥수수와 대두를 수입한다고 들었습니다. 그렇다면 한국의 상황도 유럽과 비슷합니다. 한국 농민들이 생명공학 작물의 생산성 향상을 공유하고 결과적으로 국가의 입장에서도 식품 안보를 개선할 수 있는 절호의 기회가 눈앞에 있습니다.

유럽인과 비슷하게 한국인에게도 GMO 작물을 회피하는 것은 더욱 비싼 식품과 더욱 낮은 생산성의 농업을 초래할 뿐입니다. 동일한 양의 식품을 생산하기 위해 더 많은 땅이 필요하고, 그만큼 더 많은 자연 지역이 파괴된다는 의미입니다. 기존의 농업 방식에 비해 산출량이 50%밖에 되지 않는 유기농업의 아이러니는 대지사용의 효과 측면에서 볼 때 전체적으로는 환경에 더

나쁜 영향을 끼칠 것이라는 점에 있습니다.

지구의 다른 지역에서 이 주제는 그저 선택이 아니라 삶과 죽음의 문제입니다. 우리는 기근이 들었던 2002년 잠비아가 범한 끔찍한 실수에서 배워야 합니다. GMO 작물에 독성이 있다는 소문을 믿은 잠비아 정부는 GMO 옥수수 원조를 거부했고, 그 결과 수천 명의 잠비아 국민들은 아사했습니다.

많은 운동가들은 과거로 돌아가 손으로 농사를 짓던 그 시절, 필시 농부들이 자신의 씨앗을 스스로 제어했을 그 시절을 뒤돌아보자고 합니다. 그러나 그들이 말하지 않는 사실은 그 과거의 시스템이 지구 전체 인구인 칠십억 혹은 구십억은 고사하고 겨우 십억 명조차 먹여 살릴 수 없다는 점입니다.

오늘날 우리 모두는 산업화된 농업의 기술적 발전 체계에 완전히 의존하고 있습니다. 이것은 현실입니다. 서울과 같은 거대도시에 사는 사람들은 캄보디아의 영년(零年)을 연상시킨 듯한 땅으로 돌아가지는 않을 것입니다. 과거에 대한 낭만적 환상이 우리의 눈을 가리도록 내버려둘 수는 없습니다.

정책입안자나 정부의 과제는 과학적 진보와 혁신을 장려하고 증진하는 것입니다. 이 같은 일은 이미 한국에서 진행되고 있습니다. 예를 들면 한국의 농림축산식품부 장관이 생명 과학의 주요 프로그램에 투자하고 있다고 알고 있습니다. 생명공학은 이 작업에서 중요한 부분이 될 것입니다.

저는 한국이 과거가 아니라 미래를 바라보고, 농업은 물론 기타 분야에서도 혁신과 기술적 우수성을 계속 장려하길 바랍니다. 국제사회에서 차지하는 한국의 중요성은 점차 커지고 있고, 많은 국가들이 한국이 이끄는 곳으로 따라오기 위해 지켜보고 있을 것입니다. 저는 한국이 유럽과 달리 과학과 혁신에서 멀어져 과거로 미끄러지지 않는 경로를 택하길 바랍니다. 오늘날 아시아가 경제적 번영의 엔진인 것처럼 생명공학 및 다른 많은 분야에서도 아시아는 기술적 진보의 추동력이 될 수 있습니다.

이 같은 일이 이루어진다면, 앞으로 다가올 세기에는 기후변화와 인구 증가가 유발하는 도전에도 불구하고 한층 개선된 식량 안보는 물론 환경 보호도 기대할 수 있으리라 믿습니다. 감사합니다.

7.3 GM식품 수용도(acceptability)의 변화

한국 바이오안전성정보센터는 2008년 LMO법이 발효된 후부터 GMO에 대한 대국민 인식조사를 수행해 왔다. 그 결과를 보면 'GMO는 인체에 해로운 영향을 미칠 것'이라고 생각하는 사람은 전체의 58.6%(2008), 49.0%(2009), 46.7%(2010)으로 점차 낮아지다가 2011년에는 다시 49.9%로 높아졌다. 이것은 최근 일부 시민단체들이 소비자의 알권리를 내세워 GM식품 표시확대를 주장하는 캠페인을 벌이는 것과 무관하지 않다. GMO에 대한 규제를 강화하고 표시를 확대할 필요가 있다고 생각하는 사람은 전체의 90% 수준을 꾸준히 유지하고 있다. GM식품에 대해 불안하다는 응답은 조사 장소에 따라 일반 장소에서는 73%이나 대형마트에서 구매 후에는 38%로 나타나 조사 장소에 따라 결과가 크게 달라질 수 있음을 보였다.[1)]

우리나라 소비자들이 식품을 구입할 시 우선적으로 고려하는 사항은 원산지(42.8%), 유통기한(25.2%), 맛(10.8%), 가격(9.4%), 영양가치(8.2%) 순으로 조사되었다(표 7-2). 원산지와 유통기한은 품질과 안전성에 관한 사항이므로 소비자들이 식품을 구입할 때 가장 중요하게 생각하는 것은 식품의 안전성이라는 것을 알 수 있다.

1) 한국바이오안전성정보센터, 유전자변형 콩이야기(2012)

표 7-2 우리나라 소비자 식품구입 시 우선 고려사항[1)]

단위 : 명, %

문 항	비 중
원산지	462(42.8)
유통기한	272(25.2)
맛	117(10.8)
가격	102(9.4)
영양가치	89(8.2)
상표	22(2.0)
기타	16(1.5)
합 계	1,080(100.0)

출처: GMO생산·유통실태파악 및 GMO표시비용/편익분석연구,2009

우리 국민이 GMO에 관한 정보를 획득하는 경로는 언론매체(82.9%), 시민단체(8.2%)로 언론매체의 역할이 대단히 중요함을 알 수 있고, 신뢰하는 정보 제공처로는 시민단체(37.6%), 과학자 및 학계(26.9%), 언론매체(26.5%), 정부기관(6.2%)의 순으로 나타났다.

한국소비자연맹은 2014년 6월 30일부터 9월 10일까지 19대 국회의원 198명과 수도권 거주 일반인 302명을 대상으로 'GMO 인식도' 조사를 실시한바 있다. 이 조사에서 국회의원은 일반인보다 GMO에 대해 들어본 적은 많으나 자세히 알고 있지는 못한 것으로 나타났다. 국회의원 92.9%가 'GMO에 대해 들어 본 적'이 있고

1) 한국바이오안전성정보센터(2012)

표 7-3 GMO 관련 정보 획득 경로 및 기관 신뢰도 조사 결과[1)]

단위 : 명, %

기관	정보획득 경로	신뢰하는 정보제공처(안전성, 영양)	신뢰하는 기관(테스트, 검사, 규제)	바람직한 정보 제공처
정부기관	16(1.5)	67(6.2)	99(9.2)	134(12.4)
언론매체	895(82.9)	286(26.5)	101(9.4)	231(21.4)
소비자단체 및 환경단체	89(8.2)	406(37.6)	462(42.8)	354(32.8)
식품업체	31(2.9)	30(2.8)	43(4.0)	47(4.4)
과학자 및 학계	49(4.5)	291(26.9)	375(34.7)	314(29.1)
합 계	1,080(100.0)	1,080(100.0)	1,080(100.0)	1,080(100.0)

출처: GMO생산·유통실태파악 및 GMO표시비용/편익분석연구, 2009

관심도 77.8%로 높은 편이나 '매우 잘 알고 있다'는 대답은 11.6%에 불과했다. 일반인은 'GMO에 대해 들어본 적 있다' 63.6%, '관심있다' 45.0%, '매우 잘 알고 있다' 2.3%로 국회의원에 비해 전반적인 인식이 낮았다. 국회의원이 GMO에 관심을 갖는 이유는 '안전성에 의문이 들어서(33.7%)'와 'GMO에 대한 불안감이 커서(21.3%)'가 대부분이고 '정책 대안이 필요한 분야라서(13.4%)', '이상기후로 인한 식량위기에 대응할 대안이라서(6.9%)' 순으로 나타났다. GMO의 안전성에 대해서도 부정적인 응답률이 높았다. 국회의원 10명중 3명(31.8%)은 안전성에 문제가 있다고 인식하고

1) 한국바이오안전성정보센터(2012)

있고 절반 이상인 63.1%는 판단을 유보했다. 일반인은 10명 중 4명(42.1%)이 안전성에 문제가 있다고 응답해 국회의원보다 GMO의 안전성에 대해 보다 더 우려하고 있는 것으로 조사됐다.

국내 GM작물 현황에 대한 인식도 역시 국회의원들은 국내에서 GM작물에 대한 유해성 평가를 시행하는지에 대해서 38.9%, 수입 승인된 GM작물에 대해서도 32.8%만이 알고 있으며 국내에서의 상업적인 GM작물 재배여부에 대해서는 40.9%가 모르고 있었다. GM식품의 구입에 대해서도 매우 부정적인 견해를 보였다. GM콩으로 만든 두부를 구입하겠다는 응답이 매우 낮고 특히 제초제내성 GM콩으로 만든 두부는 3.5%만이 구입하고 영양을 강화시킨 고올레인산 GM콩으로 만든 두부도 14.6%만이 구입하겠다고 응답했다. 반면 일반인은 제초제내성 GM콩으로 만든 두부는 6.6%, 고올레인산 GM콩으로 만든 두부는 27.8%가 구입을 하겠다고 응

표 7-4 일반인과 국회의원의 GMO에 대한 인식도 비교

단위 : %

내 용	일반인(%)	국회의원(%)
GMO에 대해 들어본 적이 있다.	63.6	92.9
GMO에 대해 관심이 있다.	45.0	77.8
GMO에 대해 매우 잘 알고 있다.	2.3	11.6
GMO의 안전성에 문제가 있다.	42.1	31.8
제초제내성 GM콩으로 만든 두부를 구입하겠다.	6.6	3.5
고올레인산 GM콩으로 만든 두부를 구입하겠다.	27.8	14.6

답해 국회의원보다는 보다 긍정적 태도를 보였다. 향후 GMO에 대한 전망도 매우 부정적이어서 '국민의 GMO에 대한 불안감 해소나 우리나라 GM작물 개발은 그리 밝지 않다'고 보고 있는 것으로 나타났다.

현재 국회의원의 대부분은 GMO를 안전하지 않다고 생각하고 있으며 향후에도 '인체나 환경에 해로운 영향을 끼칠 것'이라는 응답이 각각 44.9%로 가장 높고 '인류에게 손실보다는 더 많은 혜택을 제공할 것이다(25.3%)'와 우리사회에서 잘 받아들여질 것이다(6.6%)는 낮은 응답을 보였다. 일반인도 국회의원과 같이 GMO는 인체(53.6%)나 환경에 해로운 영향을 줄 것(41.4%)이라는 생각이 더 큰 것으로 조사됐다.

정부와의 GMO 소통을 위해서는 '올바른 정보 전달'이 필요하다는 국회의원은 절반이상(57.1%)에 달했고, 그 다음이 '안전성 검증(29.9%), 홍보 및 교육 강화(12.9%)순이었다. 소통에 있어 GMO 인식도에 영향을 주는 그룹으로는 국회의원 10명 중 7명이 미디어를 꼽았고 10명중 1명이 각각 학자(전문가), NGO그룹을 꼽은 반면 국회의원은 1.5%에 불과했다. 반면 일반인은 미디어의 영향이 크기는 하지만 절반 이하인 47.7%가 응답하고 NGO보다는 국회의원 영향을 8.6%가 응답해 국회의원 영향을 국회의원보다 더 많이 인식하고 있어 국회의원의 GMO에 대한 올바른 인식이 중요 소통원임을 나타내고 있다.[1)]

1) http://www.thinkfood.co.kr/news/articleView.html?idxno=60508, Hit: 32

GM작물의 생산량이 계속 늘고 세계 곡물시장에서 유통되는 콩과 옥수수가 대부분 GMO로 대체되면서 유전자변형식품에 대한 소비자 의식도 서서히 변화되고 있다. 특히 그동안 미국의 3억 인구가 GM식품을 아무런 표시 없이 먹고 있고 우리나라에서도 식용유, 물엿, 간장 등 GMO를 원료로 사용한 식품재료가 광범위하게 사용되고 있다는 사실이 알려지면서 '푸랑켄 푸드', '괴물 GM식품'으로 왜곡되었던 GM식품의 이미지가 많이 개선되고 있다. 더구나 영양을 강화하고 건강에 이로운 성분을 다량 함유한 새로운 GM식품들이 소개되면서 GMO에 대한 소비자 인식이 크게 개선된 것으로 전망된다. 실제로 벨기에 겐트대학 연구진이 생명공학 학술지(Nature Biotechnology)에 발표한 연구 데이터에 따르면 소비자들은 건강에 유익한 것으로 입증된 GM식품에 호의적이며 20-70%의 추가 비용을 지불하더라도 이를 구입할 의향을 갖고 있다고 한다.[1~3)]

1) Gray N. et al., Functional and healthy GM foods have large market potential, Nature Biotechnology, 33, 25-29(2015)

2) http://www.nutraingredients.com/Research/GM-foods-with-health-benefits-have-big-market-potential-Research

3) 푸드투데이, 2015년 1월 15일

CHAPTER

08 GMO의 미래

8.1 글로벌 기후변화와 식량생산

기후변화에 대한 국제간 협력기구(IPCC)의 발표에 의하면 온실가스의 효과 등으로 21세기 들어 지난 10년간 지구의 평균온도는 약 섭씨 0.5℃ 증가하였으며 2015년까지 1℃ 정도 오를 것으로 예측하고 있다. IPCC는 이대로 온실가스가 계속 생산되면 21세기 중 지구의 평균온도가 섭씨 2 - 4℃ 증가할 것으로 예측하고 있어 21세기 말에는 지금의 해안가에 있는 비옥한 농경지가 대부분 바닷물에 잠기게 된다. 뿐만 아니라 지구 온난화는 잦은 기상 이변을 일으켜 최근 경험하고 있는 바와 같이 국지적인 한발과 홍수가 자주 발생하여 식량생산을 어렵게 하고 있다. 이미 아프리카와 중앙아시아의 사막화가 급속히 확장되고 있으며 온도 상승으로 전통적인 농작물 생산 기반이 흔들리고 있다. 기온 상승으로 포도를 비롯한 과수의 생산 적지가 북으로 이동하고 있어 프랑스 포도주 산업의 미래를 걱정하고 있는 실정이다. 이러한 이유로 2080년에는 세계의 곡물생산량이 지금보다 1% 정도 감소할 것으로 추산된다(표 8-1). 기온상승으로 지금은 추워서 버려진 러시아와 캐나다의 초지들이 밀밭으로 변하게 되어 북방에 위치한 선진국들의

표 8-1 기후변화에 의한 세계 곡물생산량의 변화 예측[1)]

	1990-2080(% 변화)
세계 전체	-0.6 ~ -0.9
선진국	2.7 ~ 9.0
개발도상국	-3.3 ~ -7.2
동남아시아	-2.5 ~ -7.8
남아시아	-18.2 ~ -22.1
사하라 사막 이남의 아프리카	-3.9 ~ -7.5
라틴아메리카	5.2 ~ 12.5

식량 생산은 오히려 증가하는 반면 남부 아시아 지역에서는 20% 정도 감소할 것으로 예상하고 있다. 이 기간 동안 세계 인구수는 지금보다 1.5배, 100억 인으로 증가할 것을 감안한다면 식량부족 사태가 얼마나 심각해 질 것인지 가늠할 수 있다.

이외에도 개발도상국들의 경제성장이 가시화되면서 육류 등 동물성식품의 소비가 급증하고 곡물을 이용한 바이오 연료의 생산으로 식량 수요가 폭증하고 있다. 세계인구의 1/3을 차지하고 있는 중국(12억인)과 인도(10억인)가 빠르게 경제성장하면서 동물성 식품의 소비가 가파르게 증가하고 있다. 중국의 경우 1990

1) Tubiello, F.N. and Fischer, G., Reducing climate change impacts on agriculture: Global and regional effects of mitigation, 2000-2080, Technological Forecasting and Social Change 74, 1030-1056(2007)

년부터 2006년 사이 우유 소비량이 도시지역에서 4배, 지방에서 2.9배 증가했다. 육류소비는 도시 지역에서는 이미 상당히 높아 지방의 소비증가가 두드러지게 나타나고 있다. 중국은 우리와 마찬가지로 식용 곡물(주로 쌀)의 소비는 급감한 반면 동물성 소비가 크게 증가하여 이미 곡물 수출국에서 수입국으로 전락했으며, 많은 양의 콩과 옥수수를 수입하고 있다. 세계 인구의 1/3을 차지하고 있는 중국과 인도가 우리처럼 동물성식품을 먹기 시작하면 세계 시장에 나오는 사료곡물을 싹쓸이해도 모자란다는 것이다.[1)]

원유가격이 배럴당 100 달러를 넘으면 옥수수를 발효하여 에타놀을 생산해서 연료로 사용하는 것이 경제성이 있다고 한다. 2007-2008년도의 유류파동으로 미국에서 바이오 연료의 생산이 본격화되면서 곡물파동이 일어난 것이다. 2000년대 초부터 시작된 미국의 옥수수를 이용한 바이오 연료 생산이 2008년도에 전체 옥수수 생산량의 1/3로 급증하면서 세계 곡물가격이 2-3배로 오른 것이다. 석유의 고갈로 앞으로 원유가격은 계속 상승할 것으로 예측되므로 바이오 연료의 생산 역시 증가할 것으로 보인다. 식량으로 사용할 수 없는 볏짚이나 셀룰로오스를 분해하여 알코올을 생산한다면 더 없이 좋은 방법이나 현재의 기술로는 경제성이 없고 앞으로 상당기간 실현이 어려울 것으로 예측하고 있다. 따라서 바이오 연료의 생산은 식량 공급에 커다란 압박요인으로 작용할 것으로 보이며 2020년에는 세계 식량의 2%-5%를 바이오 연료 생산에 소비할

1) 이철호, 이숙종, 글로벌 식량위기와 한국의 대응방안, 식품과학과산업, 44(3), 20-37, (2011)

것으로 예측하고 있다.[1)]

앞으로 예견되는 세계의 식량 문제를 해결할 수 있는 유일한 방법은 과학 기술의 발전에 의한 식량생산의 획기적인 증가와 효과적인 저장기술의 개발이다. 과학자들은 생명공학에 의한 다수확 신품종의 개발을 상당 수준 성취하였으며 생명공학(GM)식량의 생산이 현실화 되고 있다. 또한 20세기 새로운 에너지로 개발된 핵에너지를 이용한 식품조사(IR) 기술이 상용화 되어 부패 변질되어 버려지는 식량을 크게 줄일 수 있고 식중독이나 유해 미생물의 피해를 줄일 수 있게 되었다. 그러나 소비자들이 이들 기술에 대하여 불안하게 생각하고 있어 그 이용이 늦어지고 있다.

식량을 대규모로 경작하는 나라에서는 병충해 예방이나 제초제에 잘 견디는 종자의 사용은 필수적이다. 우리나라 농민 100명이 경작하는 땅을 혼자서 경작해야 하는 미국 농민이 호미로 김을 맬 수는 없는 것이다. 비행기로 농약과 비료를 뿌려야 하는 대규모 농장에서 살포한 제초제에 살아남을 수 있는 GM작물을 심을 수 밖에 없다. 그런 이유로 GM작물의 재배가 급속히 늘어나 미국의 경우 재배되는 콩과 옥수수의 90% 이상이 GM 작물이다. 세계 곡물시장의 대부분을 차지하는 미국과 아르헨티나, 브라질 등에서 생산되는 콩과 옥수수의 대부분이 GM작물이므로 이들을 받아들이지 않으면 앞으로 세계시장에서 사올 수 있는 식량은 크게 제한받게 되며 우리나라의 식량공급이 어려워진다.

1) Joachim von Braun, The world food situation: New driving forces and required actions, International Food Policy Institute, Washintron D.C.(2007)

8.2 식량안보를 위한 생명공학의 기여

생명공학에 의한 신품종 개발이 세계 식량안보와 환경보전에 미친 영향에 대해 분석한 최근의 연구에 의하면 GM작물이 재배되기 시작한 1996년부터 2013년까지 농가 소득은 약 1,330억 달러 증가했으며, 그 증가 요인의 30%는 생산비 절감에 의한 것이며 70%는 생산량 증대에 의한 것으로 평가하고 있다.[1] 그동안 GM작물 생산으로 4억 4,100만 톤의 식량이 더 증산되었으며, 이 양을 전통적인 방식으로 생산하려면 1억 3,200만 헥타르의 경작지가 추가로 요구된다. 실제로 개발도상국에서 매년 손실되는 산림의 크기는 1,300만 헥타르에 달해 GM작물 재배로 산림 훼손이 크게 감소한

표 8-2 지난 17년간 GM작물이 세계 식량안보와 환경보전에 미친 영향(1996-2013)

구 분	단 위
농업 생산량 증대	4억 4,100만 톤
경작지 절감 효과	1억 3,200만 헥타르
농가 소득 증대	1,330억 달러
농약 절감	5억 kg
이산화탄소 절감	280억 kg(2013년도 한해)

1) Brookes G. and Barfoot P., GM crops: global socio-economic and environmental impacts 1996-2012, PG Economics Ltd., Dorchester, UK(2014)

것으로 평가된다. GM작물에 의한 농약 절감 효과는 약 9%로 조사되었는데 1996년부터 2012년까지 약 5억 kg의 농약이 절감된 것으로 계산된다. GM작물 재배로 2013년 한 해 동안 약 280억 kg의 이산화탄소 절감효과가 난 것으로 보고하고 있다(표 8-2). 생명공학 신품종으로 무경운 또는 저경운 농법이 가능해져 토양과 수자원 보호 효과도 얻을 수 있다.

세계 식량위기를 해소하고 지속 가능한 농업을 위해 현재 추진되고 있거나 실현된 세계적인 생명공학 협력 연구사업을 소개하면 아래와 같다.

(1) 방글라데시의 해충저항성 가지 생산

방글라데시 정부는 미국 코넬대 농업생명공학지원프로그램(ABSPII)과 인도 마히코(Mahyco)사의 기술 공여로 *cryl*Ac 유전자를 도입한 Bt가지를 개발하여 실용화하고 있다. 방글라데시에서 가지(Brinjal)는 극빈층에게 대단히 중요한 식량이나 해충방제를 위해 격일로 농약을 살포하여도 제대로 수확하지 못하는 상황이었으나 Bt가지의 상용화로 5만 헥타르, 15만 소농들이 혜택을 보게 되었다. 2014년 1차적으로 120농가에서 Bt가지를 재배하였다.

(2) 인도네시아의 가뭄저항성 사탕수수

세계에서 두 번째로 많은(년 240만 톤) 원당 수입국인 인도네시아가 가뭄저항성 사탕수수(Cane PRG Drought Tolerant NX1-4T)

의 재배를 2013년 승인했다. 이 GM품종은 인도네시아 국영 설탕 회사(PTPN-11)와 일본 아지노모토사, 그리고 인도네시아 동자바 젬버(Jember)대학이 협력하여 개발하였다. 이 가뭄저항성 신품종은 36일간의 건조스트레스에도 견디며 첫해 수확량이 기존 작물보다 훨씬 높은 것으로 평가되었다. 이 신품종은 2015년에 상업적 재배가 시작될 예정이다.

(3) 아프리카의 가뭄저항성 옥수수

몬산토사가 가뭄저항성(DT) 옥수수 DroughtGard^{TM}을 남아공, 케냐, 우간다, 모잠비크, 탄자니아 5개국에 공여했다. 이 GM옥수수는 WEMA(Water Efficient Maize for Africa)라는 이름으로 불리며 게이츠재단, 호와드버펫재단, USAID의 공동 후원으로 개발되었다. 케냐, 우간다, 남아공에서 DT옥수수의 시험재배를 5회 이상 실시하였으며 결과는 성공적이었다. 최초의 해충저항성/가뭄저항성(Bt/DT) 옥수수 변종도 2015년 케냐와 우간다에서 포장시험에 들어가며 남아공에서는 2017년에 시행할 계획이다. 이들 Bt/DT GM옥수수는 기존의 옥수수보다 20-35% 수확량 증가를 보이며 2-5백만 톤 증수를 기대할 수 있어 1,400-2,100만 명의 아프리카 사람들을 먹여 살릴 것으로 예상하고 있다.

(4) 바이러스 저항성 근채류

바이러스 저항성 GM감자의 개발로 아프리카와 아시아의 많은 사람들이 바이러스에 의한 감자 잎마름병으로 기근에 몰리는 것

그림 8-1 ◂◂ Rpi-vnt1 유전자 삽입 GM감자와 non-GM감자의 비교

을 막을 수 있다. 감자 잎마름병이 돌면 감자밭이 전멸하는 재난을 맞게 되는데 그림 8-1에서 보는 바와 같이 Rpi-vnt1이라는 유전자를 삽입한 GM감자는 바이러스의 피해 없이 잘 자라는 것을 알 수 있다.

사하라 남부 아프리카에서 유행하고 있는 근채류 바이러스병에 저항성을 가진 GM카사바가 개발되어 근채류를 주식으로 하는 이 지역 사람들의 기아문제를 해결할 것으로 기대된다.

앞으로 예견되는 세계 식량위기는 우리가 어떻게 준비하느냐에 따라 올수도 있고 극복할 수도 있다. 생명공학 기술의 적극적인 이용으로 온난화에 의한 아시아 지역의 쌀 생산 감소를 막고 러시아와 캐나다의 동토지대에서 밀이 자라고 아프리카와 중앙아시아의 건조지대에 가뭄에 견디는 옥수수가 자라며, 강 하구의 옥토에 염분에 강한 작물들이 자라난다면 우리는 세계적인 식량위기를 극복할 수 있다.

8.3 차세대 GMO 개발 현황

그동안 만들어진 유전자재조합 식물체는 주로 병해충에 잘 견디고 제초제의 피해를 덜 받고 살아남을 수 있는 종자들로 농업생산을 돕기 위한 종자개발이었다. 그러나 최근에는 농업 생산성 향상뿐만 아니라 작물의 영양가나 기능성이 향상된 GM작물 종자가 개발되고 있다. 2010년 사이언스지(C.J. Godfray, Science vol. 327)에 실린 식량안보 특집에 보면 앞으로 5-10년 이내에 영양 강화된 GM작물, 곰팡이 및 바이러스 저항성 작물, 해충(sucking insect) 저항성 작물, 가공 및 저장성 향상 작물, 가뭄 저항성 작물들이 개발될 것으로 전망하고 있다. 앞으로 10년-20년 사이에는 염분 저항성 작물, 고효율 질소 이용 작물, 고온에서 견디는 작물 등이 개발되고, 그 이후에는 무배생식(apomixis) 작물, 질소고정 작물, 탈질소저항 작물, 다년생전환 작물, 고효율 광합성 작물 등이 만들어질 것으로 예측하고 있다(표 8-3).

향후 5년 내에 이용 가능한 새로운 생명공학작물은 여러 가지가 있으며, 70여개 이상의 상업화 가능성 품목의 목록이 ISAAA보고서(2014)[1]에 수록되어 있다. 여기에는 새롭고 다양한 작물과 형질이 포함되어 있고, 병해충 저항성 및 제초제 내성 특징을 모두 가진 품목들도 포함되어 있다.

1) Clive, J., Global Status of Commercialized Biotech/GM Crops:: 2014. ISAAA Brief No. 49. International Service for the Acquisition of Agri-biotech Applications, Ithaca, NY.(2014)

표 8-3 유전자변형기술을 이용한 새로운 작물 개발 가능성 예측[1)]

기 간	목표 형질	목표 작물
현재	광범위한 제초제 내성	옥수수, 콩, 유채
	해충저항성(chewing insect)	옥수수, 면화, 유채
단기 (5-10년)	영양 강화	주곡작물, 감자
	미생물 및 바이러스 저항성	감자, 밀, 쌀, 바나나, 과채류
	해충저항성(sucking insect)	쌀, 과일, 채소
	가공 및 저장성 향상	밀, 감자, 과일, 채소
	가뭄 저항성	주곡작물, 근채류
중기 (10-20년)	염분 저항성	주곡작물, 근채류
	고효율 질소 이용	
	고온에서 견디는 작물	
장기 (20년 이상)	무배생식(apomixis)	주곡작물, 근채류
	질소고정	
	탈질소저항	
	다년생전환	
	광합성 효율 증대	

황금쌀의 포장시험이 진행되고 있으며, 방글라데시, 인도네시아, 인도에서는 감자역병 저항성 감자의 포장시험이 진행되고 있다. 미국에서는 이미 Simplot사가 역병 저항성과 저환원당의 특징을 가진 Innate^{TM}감자에 대한 승인요청을 한 상태이다. 특히 아프리카에서는 영양강화 바나나와 해충저항성 동부콩 등 빈곤 경감

1) Godfray C.J. et. al., 2010, Food security: The challenge of fooding 9 billion people, Science 327, 812-818(2010)

작물의 전망이 밝아 보인다. 민관 협력(Public-Private Partnership; PPP)을 통한 생명공학작물의 개발 및 승인이 비교적 성공적으로 이루어지고 있다.

8.3.1 미래 개발될 GM작물

아직 상업화 단계에 이르지 못했지만 새로운 기능이 보강된 다양한 GM작물이 개발되고 있으며, 일부는 상업화를 위한 준비가 진행 중에 있다. 즉, 소비자들의 다양한 요구를 충족시키기 위해 특별한 영양성분을 보강 또는 강화시킨 2세대 GM작물들과, 농산물의 부가가치 확대를 위해 식품이나 사료용이 아닌 산업용으로 이용할 수 있도록 특별한 기능을 부여한 3세대 GM작물들이 속속 개발되고 있는 중이다.

(1) 항산화 기능이 뛰어난 안토시아닌 함유 보라색 GM토마토

영국의 죤 인스(John Innes) 센터의 과학자들은 금어초에서 찾은 두 가지 유전자를 붉은 토마토에 도입하여 블루베리와 같은 보라색 토마토를 개발하였다(그림 8-2). 그 이유는 도입된 유전자로 인해 안토시아닌(anthocyanin)이 풍부하게 생산되기 때문이다. 안토시아닌은 항산화물질로 잘 알려져 있으며 관상동맥 심장질환이나 항암효과가 있는 것으로 보고되고 있다. 현재 이 GM토마토는 캐나다 기업을 통해 온실에서 재배되어 주스로 가공된 뒤 사람의 건강에 어떤 이로움이 있는지에 대한 임상실험을 진행 중에 있다.

그림 8-2 ◂◂ 안토시아닌 함유 보라색 GM토마토[1)]

토마토는 블루베리에 비하여 재배가 쉽고 가격도 저렴하기 때문에, 상업화가 성공될 경우 경제적 형편이 어려운 사람들이 천연색소인 보라색 토마토주스를 통해 좀 더 쉽고 싼 가격으로 유익한 영양소를 공급받을 수 있을 것으로 기대되고 있다. 한편, 보라색 GM토마토는 일반 토마토에 비해 저장성이 2배 이상 증가되었고, 수확이후 곰팡이에 대한 저항성도 증가하여 늦게까지 수확하고 먼 거리 운송도 가능하여 생산자나 유통가공업자들에게도 혜택을 줄 수 있다고 알려졌다.

(2) 갈변되지 않는 GM사과

2013년 캐나다 기업인 "오카나간스페셜티푸르츠(Okanagan Specialty Fruits)"는 사과를 칼로 썰거나 멍이 들어도 갈색으로 변하지

1) Biosafety, KBCH

<일반사과> <갈변억제 GM사과>

그림 8-3 ◂◂ 갈변되지 않는 GM사과

않도록 유전자가 재조합된 사과를 개발하고, 미국 시장에서 판매하기 위해 미국 정부에 안전성심사를 요청하였다. 사과를 자르면 시간이 지날수록 표면이 산화되어 갈색이 된다. 이를 방지하려고 보통 소금물에 넣거나 레몬즙을 뿌리기도 한다. 반면, 'Arctic Apple'로 불리는 해당 사과는 사과의 갈변에 영향을 주는 폴리페놀 산화효소(polyphenol oxidase) 유전자의 발현을 억제하여 어떠한 처리 없이도 갈변을 방지하도록 만들어 졌다(그림 8-3).

이 GM사과는 기존의 GM작물과는 차별화된 기술이 적용되었다. 기존의 GM작물은 외래 유전자를 도입해서 새로운 기능을 보강해 주는 원리인데 반해, GM사과에 적용된 기술은 식물체가 보유한 자기의 유전자가 RNA로 발현되는 것을 억제시키는 유전자 발현억제 기술을 이용해 만들었다. 이 기술의 원리는 미국 스탠퍼드대 앤드루 파이어 박사와 매사추세츠의대 크레이그 멜로 교수의 연구로부터 시작되었다. 이들은 이중가닥 RNA(double stranded

RNA, dsRNA)가 유전자를 침묵시켜 유전정보를 조절할 수 있다는 'RNA 간섭' 현상을 최초로 발견함으로서 분자생물학연구의 새로운 지평을 열었으며, 이에 대한 공로로 2006년 노벨 생리의학상을 공동 수상하였다. 그 이후 과학자들은 다양한 동식물체에서 많은 형태의 RNA 유전자 간섭 현상을 발견하였으며, 많은 생명공학자들이 이러한 기술을 이용하여 생물체에서 특정한 유전자의 발현이 억제되도록 조절할 수 있게 되었다.

GM사과도 이러한 유전자 침묵 기술에 의해 탄생한 품종이다. 사과가 잘리면 갈색으로 변하는 것은 PPO(poly-phenol oxidase)라는 효소 때문인데, 바로 이 효소를 생산하는 유전자의 발현을 억제시킬 수 있는 이중가닥 RNA를 도입하여 갈변이 되지 않도록 유전자를 재조합한 것이다. 이 갈변 방지 GM사과인 "아틱 그래니(Arctic Granny)"와 "아틱 골든(Arctic Golden)" 두 종은 2015년 2월 13일 미국 농무부(USDA) 산하 동식물검역국(APHIS)으로부터 최초로 상업화에 필요한 환경위해성에 대한 안전성심사가 승인되었고, 인체위해성에 대한 안전성심사도 미국 식품의약국(FDA)에서 현재 진행 중에 있는 등 곧 상업화가 이루어 질 것으로 전망되고 있다.

(3) 빛을 내는 램프대용 GM식물

자연에는 반딧불, 짧은꼬리 오징어, 낚시꾼 물고기, 세균 등 20개 이상의 빛을 발하는 생물체가 존재한다. 과학자들은 오래전부

터 이러한 발광생물체의 유전자를 식물이나 동물에 도입하여 형광물질을 생성케 함으로서 자외선을 쪼일 때 녹색 형광 빛을 발하게 하는데 성공한바 있다. 그러나 이들은 동식물 개량에 필요한 유전자와 함께 삽입하여 목표 유전자가 체내에 제대로 도입되었는지를 확인하기 위한 것이었으며, 이때 방출되는 녹색 빛도 특정한 물질이나 자외선 등을 처리할 경우에만 일시적으로 보이는 수준이었다. 반면, 화학작용이나 자외선 등 어떠한 처리 없이도 자체적으로 빛을 발사할 수 있는 발광 식물체가 오랜 시도 끝에 개발되었다. 2013년 12월에 미국 미주리주 소재 생명공학 벤처회사 바이오글로(Bioglow)는 유전자재조합기술을 이용해서 세계 최초로 자체적으로 빛을 발하는 자동발광식물을 개발하는 데 성공했다. 이들은 아메리카 대륙이 원산지인 알라타 꽃담배(Nicotiana alata)라는 관상용 화초의 엽록체에 해양세균의 발광 유전자를 삽입해 식물체가 살아있는 2-3개월간의 생명주기 동안 지속적으로 육안으로 볼 수 있는 빛을 발산하도록 만들었다. Bioglow 회사에서는 이 발광식물체에 '별빛 아바타'(Starlight Avatar)라는 상품명을 부여하고 회사 웹싸이트에 판매용 육성상자에 들어있는 "Starlight Avatar" 사진을 게재하는 등 적극적인 상업화 의지를 보이고 있다. 현재 이 식물의 밝기는 별빛의 강도와 유사하여 관상용으로 사용되지만, 향후 빛의 밝기가 개선되면 실내 조명기구나 야간 램프를 대체하는 등 다양한 용도로 사용될 수 있을 것으로 기대되고 있다 (그림 8-4).

<Starlight Avatar™ in light>　<Starlight Avatar™ in dark>　<판매예정인 Starlight Avatar™ 육성박스>

그림 8-4 ◂◂ 램프대용 빛을 내는 GM식물[1)]

(4) 질병예방을 위한 백신용 GM작물

콜레라 등 질병예방을 위해 주사로 맞던 병원균백신을 형질전환 식물체를 이용해 만들고자 하는 노력이 오래전부터 시작되었으며 그 성공가능성이 계속 보고되고 있다. 식물백신에 대한 기대가 큰 것은 병원균백신의 부작용이 없고 대량 생산으로 인해 값도 저렴할 뿐 아니라 실내 보관이 가능하므로 아프리카 등 전기시설이 부족한 낙후된 지역에 쉽게 보급이 가능하다는 것이다. 식물체를 이용한 경구백신(먹는 백신)의 기본원리는 항원유전자를 식물에 형질전환시켜 식물체에서 항원단백질을 생성하게 하는 것으로서, 이렇게 항원단백질을 생산하는 과일 등 농산물을 섭취함으로써

1) http://bioglowtech.com/glowingplant.html

면역반응을 유도하는 것이다.

형질전환 식물을 이용한 경구백신은 1995년 Science 잡지에 병원성대장균(enterotoxigenic E. coli)의 항체를 생산하는 형질전환 감자를 쥐에 사료로 먹인 결과 효율적인 면역반응을 유도한 결과가 발표되면서 성공 가능성이 주목받기 시작되었다. 이후 2002년에는 설사면역제를 생산하는 GM토마토가 개발되어 타임지가 선정한 2002년 세계 20대 발표의 하나로 선정되기도 하였다. 이외 같은 경구백신들은 아직 상업화에 이르지는 못하고 있지만 현재도 광견병, 콜레라, 구제역, 에이즈 등을 예방하기 위한 식물 경구백신이 지속적으로 개발 중이며 앞으로 수년 내에 상업화가 이루어질것으로 예상되고 있다.

반면 동물용 의약품 생산 GM작물의 상업화는 2013년 최초로 이루어졌다. 일본 경제산업성 산하 산업기술종합연구소(AIST)는 개(dog)의 치주염을 치료하는 항바이러스 인터페론을 생성하는 GM 딸기를 개발하여, 2013년에 상품등록을 마치고 2014년 3월에 마침내 상업용 판매를 시작하였다. 이들은 이 GM딸기를 밀폐형 온실에서 격리재배하고 수확한 딸기를 재료로 의약품을 제조하게 된 것이다. 이 GM딸기는 동물용으로 개발되어 안전성 승인등이 비교적 쉬웠다고 하지만, 다양한 질병에 고통 받고 있는 인류의 문제를 해결하기 위한 보다 값싸고 안전한 인간 질병 예방 및 치료용 GM작물의 상용화 시대도 곧 열릴 것으로 전망된다 (그림 8-5).

<GM딸기 생산용 밀폐형 실내온실>

<GM딸기로 만든 동물용 인터페론>

그림 8-5 ◂◂ 동물용 항바이러스 인터페론 생산 상업용 GM딸기

(5) 그 외의 미래 GM작물

이외에 좀 더 미래의 작물은 과연 어떠할 것인가에 대한 상상이 필요하다. 바닷물에서 식물을 재배하고, 감기와 암 등 인간을 끊임없이 위협하는 각종 질병을 예방하고 치료하는 의약용 작물들이 기존의 의약품들을 대체하기 위해 개발될 것이다. 지금은 옥수수나 콩의 종실에서 에탄올이나 경유를 추출하지만 이제 옥수수 대

또는 콩 잎파리 등 비식용 부위에서 경제적으로 연료를 생산하는 시대가 도래 할 것이다. 물이 없는 사막에서 벼를 키우고 추운 극지방에서 과일나무를 키우는 시대가 올 것이다. 작물이나 나무로부터 전기를 생산해내는 기술도 가능할 것이고 태양광을 에너지로 바꾸는 식물체의 생체 에너지 전환시스템을 활용한 전기 생산 시스템이 실용화 될 것이며 주변의 위험을 감지하고 경보를 전달하는 보안 식물체의 개발이 이루어 질 것이다(그림 8-6).

이러한 기술개발의 성공 전제조건은 물론 농업생명공학 기술의 지속적 발달을 보장하면서 이를 발전하기 위한 창조적 아이디어와 첨단기술의 새로운 접목일 것이다. 이미 생물학 분야에서는 합성생물학이 일반화 되고 있으며 또한 이를 이용한 산업화 연구도

그림 8-6 ◂◂ 지뢰 찾는 GM식물

진행이 되고 있다. 이러한 기술의 발전과정에 GM작물도 서 있으며 우리 후손들은 이러한 기술발전의 토대 위에 더욱 더 눈부신 과학기술의 발전을 이어갈 것이다. 그러한 관점에서 본다면 우리가 현재 봉착하고 있는 농업현안 문제해결 및 기후변화 등으로 야기될 미래의 국가적 식량안보 문제를 해결할 희망기술인 GM작물 개발은 국가차원에서 적극 추진되어야 한다.

8.4 GMO에 대한 올바른 이해의 필요성

이러한 미래 기술을 우리 자체 내에서 발전시키고 그 혜택을 우리가 누리려면 유전자변형에 대한 국민들의 올바른 이해와 과학자들에 대한 신뢰가 무엇보다 중요하다. 불행하게도 지난 20여 년 동안 일부 반대 운동론자들에 의해 GMO가 환경 생태계를 파괴하고 인체에 유해한 것처럼 알려져 소비자들의 불안감이 확산

그림 8-7 ◂◂ 국내외 GMO 반대운동

되었다. 또한, 일부 잘못되거나 의도적으로 왜곡된 실험결과가 과장 보도되어 소비자들을 불안하게 만들고 이 기술 자체가 문제가 있는 것으로 오해가 확산된 사례도 여러 번 있었다. 그들은 자연적인 것이 좋다는 논리를 펴서 소비자들의 복고적 향수를 자극하여 커다란 성과를 거두었다(그림 8-7).

물론 유전자재조합 생명체가 모두 안전한 것은 아니다. 수천가지의 재조합 생명체가 실험실에서 만들어지고 있으나 그중에서 안전하다고 인정되어 실험실 밖으로 나와 재배되고 상업적으로 생산되는 GMO는 백여 종류에 불과하다. 하나의 유전자재조합 생명체가 실험실에서 만들어진 후 그 안전성을 평가하는 기간이 4-5년 걸리고 여기에 드는 비용이 평균 1억 3,900만 달러가 소요된다고 한다. 안전성이 확인되어 재배 생산이 된 후 GM 작물을 외국으로 수출하려면 수입국에서 다시 그 나라의 기준에 따라 안전성 평가를 하는데 3-5년이 걸린다. 이렇게 철저하게 오랫동안 많은 비용을 들여야 GM 작물이 상업화되므로 웬만한 규모의 회사는 그 개발을 엄두도 내지 못하는 것이다. 그 결과 세계적인 글로벌기업들이 이 일을 주도하게 되고, 막대하게 들어간 개발비를 회수하기 위해 종자 특허를 통한 권리보호와 함께 종자판매가격도 높게 책정되는 결과를 초래하는 것이다. 이 문제를 해결하려면 GMO에 대한 지나친 불안감이 해소되고 안전성 입증 요구 수준도 막연한 우려가 아닌 과학적 판단에 기초한 적정 수준으로 조절되어 중견기업들도 보다 적극적으로 개발에 참여하고 상업화에 도전할 수 있어야 한다.

얼마 전 미국 오리건주에서 승인되지 않은 제초제 내성 GM밀이 발견되어 큰 화제거리가 되었다. 이 GM밀은 안전성 검사를 마친 후 포장시험 과정에서 유출된 것으로 인체에 안전성 문제는 없으나 법적 관리규정을 위반한 사항으로 결론 내려졌다. 이러한 사건에서 알 수 있는 것은 GMO 식품은 그냥 만들어 지는 것이 아니라 과학적인 연구개발과 철저한 안전성 시험을 거친 후 사용이 승인되며, 철저한 관리를 위한 제도를 만들어 안전하게 사용하도록 노력하고 있다는 사실이다.

생명공학 기술은 인류가 앞으로 이 지구상에서 생존과 번영을 유지하려면 필수적으로 받아들이고 발전시켜야 할 미래기술임에 틀림없다. 그동안의 유전자변형기술에 대한 안전성 논란은 이 신기술이 안전하게 인류에게 이용되기 위해 거쳐야 하는 혹독한 시험 과정이었다. 이제 이 기술의 안전성과 유용성이 확인된 만큼 GMO의 이용과 안전성에 대한 국민교육을 확대하여 온 국민이 이 기술을 받아들이도록 해야 한다. 온 국민이 GMO에 대한 과학적 진실을 올바로 알고 GMO가 인류의 미래를 열어줄 필요한 기술이라고 인식하면 표시를 확대하여도 문제가 없으며, 많은 사람들이 적은 비용으로 신품종을 개발하여 유용하게 사용하는 시대가 열릴 것이다.

CHAPTER

09 우리나라 식량안보를 위한 GMO 정책 제언

생명공학 기술의 실용화에 가장 중요한 문제는 국가정책 의지와 소비자들의 인식이라고 볼 수 있다. 우리나라는 세계적으로 GM작물에 대한 부정적 인식이 높은 편이며 이러한 현상은 객관적, 과학적 근거에 기초한 생각보다는 어느 한편의 일방적인 주장이나 막연한 불안감에 크게 좌우된 판단이라고 볼 수 있다. 이러한 부정적 인식은 GM작물의 상업화와 실용화를 제한하고 있으며, 또한 GM작물개발 연구에도 큰 걸림돌로 작용하고 있다. 따라서 좀 더 객관적이고 과학적인 정보제공을 바탕으로 이들에 대한 인식개선을 위한 소통과 노력이 필요하다. 국가적으로는 중점 대상 기술인 GM작물 기술개발에 대한 투자와 정책의지가 중요하다. 특히 글로벌 종자기업과 같이 막대한 기술 개발비를 투입하는 선진국과의 기술경쟁력 확보와 함께 우리 농업의 첨단산업화를 주도할 농업생명공학기술 활용을 위하여 국가 차원의 기술경쟁력확보를 위한 노력과 지원이 절실하다고 본다.

(1) GMO의 안전성과 유용성에 대한 국민 교육을 적극적으로 실시해야 한다

세계적으로 GM작물의 재배가 늘고 교역되는 콩과 옥수수의 대부분이 GMO인 상황에서 GM식품에 대한 국민의 잘못된 불안감이 계속되면 심각한 식량안보적 위기가 오게 된다. 현재 식품의약품안전처에서 GMO의 안전성에 대한 교육과 홍보를 주로 하고 있다. 국민의 식량공급을 책임지고 있는 농림축산식품부도 식량안보 차원에서 GMO의 안전성과 유용성에 대한 대 국민 교육에 앞장서야 한다. 실제로 국내에 상업화되어 활용되는 GMO의 많은 부분이 가축사료와 전분당, 식용유 등 식품용으로 사용되고 있는 등 우리 소비자뿐만 아니라 축산 및 식품업계 등 농림축산식품부가 관할하는 산업과 밀접히 관계되어 있다. 이런 관점에서 농림축산식품부에서 현재 수입된 GM농산물들이 우리나라 뿐 만 아니라, 국제적으로 얼마나 철저한 안전성평가와 심사를 거쳐 승인된 안전한 농산물인가를 교육하고 홍보하는 것은 당연하다.

(2) 농업생명공학기술에 적극적으로 투자하여 세계적인 제2의 녹색혁명대열에 합류해야 한다

GM작물 개발기술은 선진국들만이 실용화 상품개발에 성공하고 있는 선진국형 최첨단 농업기술이다. 현재 사료용, 가공용 위주의 GM종자가 상용화의 주를 이루고 있으나 조만간 주곡인 벼와 밀 등의 상용화가 이루어 질것으로 전망되고 있다. 이 경우 우리의

GM작물 육성기술과 기반이 확보되어 있어야 외국의 GM작물들이 국내 진입하여도 충분히 우리 GM작물로 경쟁이 가능하고, 더 나아가 글로벌 GM종자 시장으로 적극적으로 진출할 수 있을 것이다. 중국의 경우 상업화가 가능한 해충저항성 GM쌀과 소화성이 향상된 GM옥수수를 이미 개발하였으며, 2015년 3월 농업부 부부장(차관)을 통해 공식적으로 유전자변형농산물 재배확대가 식량안보 차원에서 불가피하다고 밝히고, 이에 따른 연구개발을 적극 추진할 의지를 분명히 하고 있다. 이러한 상황에서 민간기업의 참여가 어려운 우리의 경우도 10~20년 후를 대비해서 국가차원에서 농업의 최상위 기술인 GM작물개발을 적극 추진해야 할 것이다.

(3) 친환경농업과 첨단생명공학이 상호 보완적으로 상생할 수 있는 정책개발이 필요하다

우리나라 농업혁신의 가장 큰 걸림돌은 첨단 생명공학 기술을 농업에 적용할 수 없는 모순에 빠져있는 것이다. 우리 농업이 여전히 친환경농업과 유기농을 강조하고 GMO를 배척하면 창조농업혁신을 이룰 수 없다. 친환경 농업은 “친환경농업법”에 따라 우리 농업환경개선을 위해 지속 발전시키고, 첨단 생명공학기술을 활용한 농산물 부가가치 창출 등 창조농업혁신을 통한 제2녹색혁명도 동시에 병행 추진되어야 한다. 이를 위해서는 국내 창조농업혁신에 필요한 특성화된 GM작물 개발과 이들의 실용화 지원을 위한 정책적 의지가 필요하다. 고품질 기능성 영양성분을 강화하거나 고가의 의료 단백질 등 산업소재를 생산함으로서, 농산물의

가치를 높이고 농산물의 수요 확대와 새로운 산업을 창출하는 고부가 기능성 GM작물이야 말로 우리 농업을 살리는 주역이 될 수 있다는 확신을 가지고 농업 정책을 수립해야 한다.

또한, 친환경농업과 첨단생명공학이 상호 보완적으로 상생 발전할 수 있는 여건 마련이 필요하다. 병해충 저항성 신품종이나 질소비료 효율성강화 신품종 등으로 농약과 화학비료의 사용을 줄이는 GM작물의 환경 친화적 기능과 이점을 인정해주고, 서로에게 필요한 기술을 상호보완적으로 접목할 수 있는 긍정적인 분위기 조성과 함께 상호 동행발전에 필요한 정부 정책지원의 논리적 근거를 마련해야 한다.

(4) GM식품의 표시제 확대 논란을 조기에 종식시켜야 한다

GM식품의 표시제도는 GMO의 안전성에 대한 불안감에서 시작된 것이다. GMO의 안전 관리 체제가 확립되어 전 세계적으로 GMO의 생산 유통이 늘고 이용이 확대되는 상황에서 GM식품의 표시 확대는 득보다 실이 훨씬 크다. 특히, 비과학적이고 비상식적으로 잘못 알려진 일부의 부정적 주장들이 국민들에게 막연한 불안감을 증폭시키고 있는 현 상황에서, 소비자들의 객관적 판단은 기대하기는 어려울 것이다. 이와 같은 현실에서 각 나라마다 자국에 상황에 맞추어 시행되는 표시제도를 우리의 처지를 망각하고 유럽의 제도를 따르자는 주장은 GMO에 대한 불신만 조장하고 관련 산업을 위축하는 결과를 초래하게 된다. 일본, 대만 등과 유사한 현재의 GM식품 표시제도를 유지해야 한다.

(5) 생명공학 원천기술 연구개발에 국가적인 투자를 해야 한다

국제 특허에 묶여있는 기존의 유전자재조합기술을 뛰어 넘는 새로운 생명공학 원천기술의 개발이 절실하다. 논문건수와 단기적 성과 위주의 틀에 박힌 현행 연구평가 제도를 개선하고, 젊은 연구자들의 보다 창의적인 아이디어를 바탕으로 글로벌 선도가 가능한 미래 기술개발 과제를 발굴하고 이에 필요한 연구비를 장기적으로 과감히 투자하는 국가 연구지원 풍토가 필요하다. 현재 GMO에 대한 연구 성과가 국민들의 부정적 인식으로 실용화가 어렵다는 이유로 원천기술 투자가 위축된다면, 미래 차세대 생명공학 국가 기술력 확보를 포기하는 매우 중대한 실수를 범하게 되는 것이다. 이런 차원에서 GMO에 대한 부정적 인식이 개선되어야 하고, 특히 정부와 정치인들의 생명공학에 대한 신뢰와 기대가 되살아나야 한다.

나트륨, 건강 그리고 맛

나트륨 과잉 섭취에 의한 피해를 합리적으로 줄이기 위한 방안 모색!
한국인을 위한 나트륨 섭취권장량의 부적합성과 비현실성 지적!
현실성 있는 나트륨줄이기운동을 전개할 것을 제안!

식량안보시리즈 제 1 권

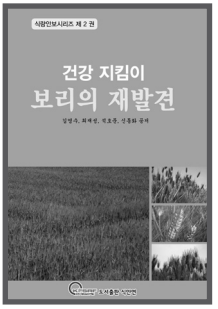
이숙종, 이철호 공저
국판 | 3쇄 준비중
값 8,000원

[contents]

1. 자연속의 나트륨
2. 음식속의 나트륨
3.우리 몸속의 나트륨
4. 고혈압과 나트륨의 관계에 대한 논쟁
5. 세계보건기구의 나트륨 섭취권고량은 합당한가?
6. 한국인의 적정 나트륨 섭취 권장량
7. 나트륨 저감화 기술개발
8. 외국의 나트륨 저감화 사례 및 전략
9. 우리나라 나트륨 줄이기 운동의 성과
10. 전문가 의견
11. 나트륨 줄이기 운동의 올바른 방향

이 책은 맛의 원천인 소금의 식품학적 기능을 다시 돌아보면서 세계보건기구(WHO)가 제시한 나트륨 섭취권고량이 우리에게 합당한 것인지 재검토하고, 이를 근거로 하여 합리적인 기준을 가지고 현실성 있는 나트륨줄이기 운동을 전개할 것을 제안하였다.

건강 지킴이 보리의 재발견



식량안보시리즈 제 2 권

김영수, 최재성, 석호문,
신동화 공저
국판 | 166쪽
값 8,000원

[contents]

1. 보리의 특성
2. 보리의 구조
3. 생산 및 분포
4. 육종 및 재배
5. 보리의 화학적 조성
6. 보리의 기능성 물질 및 생리적 기능
7. 보리의 가공 및 이용

제2의 주곡이었던 보리를 다시 생각해 보면서 과연 앞으로 보리를 어떻게 처리하는 것이 우리나라의 식량사정과 국민 건강을 위해서 바람직한 것인가를 돌이켜 보고자 하였다.

KFSRF 한국식량안보연구재단 도서출판 식안연
서울시 성북구 안암로 145, 고려대학교 생명과학관(동관) 109A호
T. 02-929-2751, F. 02-927-5201, foodsecurity@foodsecurity.or.kr

음식오케스트라

|단순함에 아름다움이 있듯이 음식에도 철학이 있다.|

이철호 지음
국판 | 3쇄, 248쪽
값 8,000원

[contents]

1. 서양의 영양학이 일으킨 똥보소동
2. 현대인의 음식딜레마
3. 화학조미료에 대한 나의 소견
4. 한국음식의 맛과 멋
5. 덴마크 어머니들의 지혜
6. 쇠고기 살 돈으로 12배의 콩을 산다.

지난 수년간의 강의를 통해 학생들과 공감하였던 무엇을 어떻게 먹을 것인가? 의 문제를 수필의 형식으로 쉽게 재구성한 것이다. 이 책은 무슨 새로운 효험을 가진 소위 건강식품을 소개하거나 새로운 보건 영양이론을 전개하려는 것이 아니다. 오히려 그러한 식품에 대한 편견이나 잘못된 신비주의 혹은 극단주의에 빠지지 않도록 건전한 식품지식을 사람들에게 전파하려는 것이다.

과학이 보인다

❶ 과학의 역사 – 서양과학을 중심으로

[contents]

- 서론_거대과학의 산물
- 제1장_뉴턴과학의 완성
- 제2장_산업혁명과 열역학
- 제3장_분자의 화학반응
- 제4장_전자기력의 이용
- 제5장_원자력과 소립자
- 결론_21세기 한국의 미래 모습

국내에서 처음으로 기초과학과 기술공학을 융합한 책이다. 과학도를 희망하는 학생들을 위해 노벨과학상의 기초를 닦을 수 있고 수능 대비에도 적합하도록 집필했으며, 일반인들도 필수 교양으로 읽을 수 있도록 쉽게 풀어 썼다.

❷ 동아시아의 과학 – 한국, 중국, 일본을 중심으로

양재승 지음
국판|248쪽 | 값 14,800원

[contents]

- 서론_중국의 자동차산업
- 제1장_동아시아의 전통과학
- 제2장_분야별 과학기술
- 제3장_과학기술의 전파
- 제4장_한의학의 형성
- 제5장_한중일 한의학의 특징
- 제6장_일본의 근대과학
- 제7장_한국의 근대과학
- 제8장_중국의 근대과학
- 결론_전통과학에서 근대과학으로

환경 파괴와 인간성 몰락으로 주춤하고 있는 현대과학의 진로를 찾기 위해서 새로운 융합과 과학철학의 태동이 요구되고 있다. 이러한 때에 과학기술의 역사를 쉽고 간결하게 재조명하고 이들 간의 대화와 네트워크의 가능성을 발견하게 하는 것은 대단히 의미 있는 일이다.

–한국식량안보연구재단 이사장–

KFSRF 한국식량안보연구재단 도서출판 식안연
서울시 성북구 안암로 145, 고려대학교 생명과학관(동관) 109A호
T. 02–929–2751, F. 02–927–5201, foodsecurity@foodsecurity.or.kr