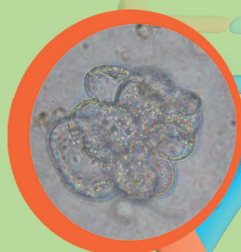


식량안보시리즈 제 7 권

식량생산 제고를 위한 신(新)육종기술

한지학, 정 민 공저



KFSRF
한국 식품안전연구원

도서출판 식안연

식량생산 제고를 위한

신(新)육종기술

한지학, 정 민 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 농업과 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(食安研)은 재단의 출판사업을 수행하고 있다.

식량생산 제고를 위한 신(新)육종기술

인쇄	2017년 5월 25일
발행	2017년 5월 30일
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 • 979-11-86396-40-7 (95300)

정가 12,000원

* 이 책의 무단 전재 또는 복제를 금합니다.

전자책 발행일 2017년 6월 19일

식량생산 제고를 위한 신(新)육종기술





과거 인류의 조상들은 채집과 수렵으로 먹거리를 구해 왔으며 대부분 대자연으로부터 생존경쟁을 위하여 각자도생의 길을 선택하였고 오랜 기간 동안 비교적 독립적인 삶을 유지하였다. 그러나 항상 먹음양식에 대한 걱정과 주위의 위협 속에서 살아남기 위해서는 수 많은 노력을 하였을 것이고 그 가운데서 좀 더 깨우친 인간들은 먹거리 확보를 위해 더 효과적인 방법을 찾기 시작하였을 것이다. 가장 성공적인 결과로는 인류가 사회·집단을 이루고 특정 지역에 정착을 하면서 농경지를 구축하고 가축을 키우게 된 사실이 아닐까 사려 된다. 즉 농사를 터득하게 됨으로서 많은 것이 달라졌을 것이다. 우리 조상들은 계절이 바뀌는 자연의 법칙과 기후변화 속에서도 어떤 먹거리를, 어떻게 만들고, 어떻게 저장하여, 지속된 삶을 마련할 수 있는 방안을 알게 된 것이다. 인간은 이 덕분에 지금 이 지구상에서 자손 대대 번창하였고, 많은 인구가 잘 살고 있으니 고맙고 감사할 뿐이다.

실상 이런 일련의 안정적인 식량 자급 과정의 역사는 불과 1만년 정도로 유추되고 있으며 당시 전 세계 인구는 1-2천만 명이 되지 않았던 것으로 추측된다. 상상하건대 그 소수의 인간들이 집단적으로 서로 다른 지역에 이주하면서 지구상에 자연적으로 존재하고 있는 수많은 종 중에서 어떤 것이 먹을 수 있는 것이라는 것을 스스로 스크리닝 했었을 것이고 이를 채취하여 파종하고 재배하고 수확하는 과정을 정확히 알고 있었을 것이다. 좀 더 나아가 자연스럽게 육종을 하지 않았을

까 생각된다. 그 대표적인 예가 중앙아메리카에서만 존재하는 테오신테(teosinte)라는 잡풀과 옥수수와의 관계이다. 옥수수의 조상식물을 조사하던 과학자들이 약 7천년전서부터 초기 농부들이 테오신테를 선택적으로 재배하면서 선발을 계속하여 옥수수원조를 만들었다고 밝혔다. 이를 증명하기 위하여 DNA를 조사한 결과 테오신테와 옥수수의 유전체가 거의 비슷하다는 것과 야생 테오신테와 옥수수가 상호 교배가 될 수 있어서 같은 종이라는 것도 밝혀졌다. 현재 우리가 먹는 옥수는 중앙아메리카 농부들이 만들었던 재래종 옥수수 재료를 가지고 20세기 초에 계통육성을 통해서 현대화 되었고 이후에도 계속 육종을 하여 만들어진 신품종인 것이다. 실상 인간은 옥수수 외에도 여러 식량 작물들을 선택적으로 선발하여 유지하고 있었으며 이들을 20세기초부터 계통육종을 통해 지금까지 새로운 품종을 개발해 왔다.

우리가 왜 육종을 하는 것일까? 육종이란 작물의 생산성, 품질, 병해충 내성, 환경 적응성 등 농업형질의 유전적 능력을 개량하여 우량품종을 육성하는 업무이며 작물의 유전학적 형질을 개선하여 이용가치가 높은 새로운 품종을 육성해내는 일이다. 모든 형질들이 다 중요하지만 최근에 들어서 생산성 제고라는 화두가 뜨거운 감자가 되었다. 그 이유는 이 지구상에 살고 있는 사람들의 폭발적인 증가 때문이다. 전세계 인구는 2015년 기준으로 약 73억 명이며 과거 1960년 인구수에 비해 약 2배로 증가하였다. 그리고 2050년에는 약 97억 명으로 늘어날 것으로 예측되고 있어서 향후 인구 과밀에 의한 여러 문제점이 발생할 것으로 사려 된다. 그중에서 가장 걱정스런 문제는 인류를 위한 충분한 식량이 인구팽창률에 미치지 못하고 있다는 점이다. 인간이 2050년 지구상의 인구와 가축을 먹여 살리려면 지금보다 약 70%의 식량이 더 생산되어야 한다. 이를 위해선 여러 가지 새로운 품종육성기술과 더불어 식

량생산량 증대기술이 개발되어야 하고 이를 통한 고부가가치 신품종이 개발되어서 실질적으로 식량이 안정적으로 공급되어야 할 것이다.

품종개발에 필요한 관행적 전통 육성기술로서는 교잡육종, 여교배 등이 있다. 그리고 새로운 유전자원을 개발하기 위한 기술로서는 돌연변이, 조직배양, 세포융합, 유전자변형(GM) 기술들이 있으며 이외에 DNA 마커를 이용한 육성방법들이 있다. 이 중에서 최고의 생산성 제고 육성기술은 GM기술이다. 지난 20년간 GM작물을 재배함으로써 제초제, 농약 사용이 줄어들었고 생산성이 늘었다. 향후에도 반드시 필요한 기술이며 기후변화 저항성, 병충해 저항성을 비롯하여 광합성과 질소 동화작용 효율제고 작물, 해수이용 작물, 우주재배작물 등 미래농업의 중심이 될 것이다. 왜냐하면 일반 관행육종방법으로서는 이런 특정 작물을 개발할 수가 없기 때문이다. 그러나 문제는 GMO(유전자변형생물체) 개발 비용의 부담이 너무 크고(1품종 1500억 원), 위해성평가를 통과해야 하는 현 규정상 많은 노력이 요구되며, 그리고 아직도 시민단체의 오해와 거부가 심화되어 있는 사회에선 크게 확대하기에는 문제가 있어서 국내에서는 거의 불가능한 상태이다. 따라서 정책적으로 이 원화가 필요하다. 즉 GMO 개발은 그대로 미래지향적으로 운영하되 다른 첨단 육성기술들을 개발하고 적용해서 빠른 기간 내에 식량안보를 갖출 수 있는 방안이 제시되어야 한다.

이를 위해서 본 책에서는 먹거리의 원천자원인 종자에 대해서 기본적인 개념, 그의 중요성과 종자산업의 현황을 다루었고 특히 국내에서도 적극적으로 사용가능한 여러 신육종기술들을 검토하였다. GMO를 대체할 수 있고 대사공학에 활용할 수 있는 유전체편집 기술, 종속간에 교배가 어려울 때 유전자를 이전할 수 있는 cisgenesis(동종기원), 핵이나 세포질을 치환하여 새로운 유전자원을 만들 수 있는 세포융합들을

집중적으로 다루었다. 이런 기술들과 기 보유하고 있는 관행육종 기술과 접목하고, 마커를 이용한 여교배와 연계하여 활용한다면, 새로운 신육종기술 시스템을 구축할 수 있으며 신품종개발과 생산량 제고에도 도움이 될 것이다. 특히 곡류자급률이 23.8% 밖에 되지 않고 식량안보에 집중해야 할 우리나라는 이런 신육종기술의 접목과 적용이 필수이다.

문제는 이런 연구 자체가 국내에서 활발히 진행되고 있지 않다는 것이다. 국내는 이제 막 시작한 단계이며 개념 파악을 할 정도이지만 반면에 다국적기업들은 이미 적극적으로 품종을 생산하고 있어서 많은 격차가 있다. 그러나 기반기술이 국내에도 다 갖추어져 있어서 연구비만 제대로 지원된다면 바로 추격할 수 있으며 수입대체 및 식량자급률을 제고할 수 있다. 따라서 국가의 식량안보 및 식량생산 제고를 위한 대형 국책연구사업 구축을 제안한다. 신육종기술을 활용한 식량생산 제고 및 고품질 품종개발 분야가 국가연구사업으로 정착할 수 있도록 사업계획을 만들고 미래농업을 책임질 수 있는 국가적 대(大)투자를 제안하며 정책적인 지원을 바란다.

이 책은 한국식량안보연구재단에서 지원한 기획과제인 “식량생산 제고를 위한 육종기술 고찰”을 재편집하여 저술하게 되었다. 그 연구과제를 지원하시고 책자를 저술할 수 있도록 도와주신 한국식량안보연구재단의 이철호 이사장님께 진심으로 감사를 드린다. 그리고 책 전체를 감수하고 자료를 제공해주 공저 저자인 정민박사와 재단의 편집을 담당하신 여러 선생님들께 감사를 드린다.

2017년 5월
(주)농우바이오 R&D
본부장 한 지 학



‘농부는 굶어죽어도 씨앗주머니를 베고 죽는다’는 말이 있듯이 종자(seed)는 농사의 가장 중요한 요소이고 씨앗이 농사의 절반을 차지한다고들 한다. 예전에는 농부가 수확한 가장 충실한 열매를 정성스레 갈무리해 다음해 종자로 사용했다. 그러나 농업기술이 발전하여 스스로 거둔 씨앗보다 더 우수한 교잡종들이 육종가들에 의해 만들어 지면서 자가 채종 관행은 줄어들고 종묘상에서 구입한 종자를 사용하는 것이 일반화되었다. 자연계에서 얻기 어려운 초우량 종자들이 육종되면서 농사에 사용하는 종자의 가지 수가 줄어들고 전래의 다양한 토종들이 사라지는 부작용도 발생하고 있다. 종의 다양성을 유지하면서 우수한 종자를 계속 개발하려는 노력들이 세계적으로 진행되고 있다.

우리가 필요로 하는 재배 특성이나 품질특성을 가진 신품종에 대한 욕구는 늘 있어 왔고 앞으로 계속될 것이다. 수천년간 사용해온 재래종 씨앗이 멘델의 유전법칙이 밝혀지면서 교잡종이 만들어져 잡종강세의 우수품종들로 대체되기 시작한 것은 1930년대의 일로 백년도 안 되는 일이다. 그 동안 육종기술은 눈부시게 발전해 1960년대에는 방사선을 아용한 인위적인 돌연변이 육종이 시작되었으며, 유전자의 분자구조가 밝혀진 이후 1990년대부터는 유전자를 인위적으로 재조합한 분자육종 유전자변형(GM)작물이 보편화되고 있다.

이로서 인류는 병충해에 잘 견디고 수확량을 획기적으로 높이고 유용한 기능성 성분을 함유한 신품종을 자유자재로 설계하여 만들어 낼

수 있게 되었다. 가히 신의 영역을 넘보는 수준이라고 생각될 정도이다. 이와 같이 급속한 육종기술의 발달은 필연적으로 속도감에 대한 소비자의 우려를 자아내게 했다. 지금 우리가 격고 있는 일부 사람들의 반GMO운동은 과학기술의 발전 속도에 적응하기 위한 조정 국면이라고 볼 수 있다.

세계 굴지의 기업들은 이들 신육종기술을 재빠르게 받아들여 타의 추종을 불허하는 신품종을 만들어 세계 종자시장을 석권하고 있다. 종자시장을 제패하면 세계 농업을 좌지우지 할 수 있게 되고 세계 인류가 한 두개 종자회사에 식량을 의존해야 하는 사태가 발생 할 수 있다. 우리가 필사의 노력으로 자체 육종기술을 개발하고 발전시켜야 하는 이유이다.

그러나 우리의 현실은 이 중차대한 종자산업의 중요성에 대해 제대로 인식하는 사람들이 별로 없고 오히려 첨단 생명공학 기술의 활용이나 연구 활동에 부정적인 인식을 가진 사람들이 많다. IMF사태가 발생했을 때 우리나라 주요 종묘회사가 모두 외국에 팔려나간 것을 보면 농민이 죽으면서도 지킨다는 종자 산업을 우리가 얼마나 소홀히 여기는지 알 수 있다.

저자들은 육종현장에서 땀흘리며 노력하는 육종 전문가로서 이러한 현실에 대해 안타까워하는 마음을 전하고 있다. 전 세계가 맹렬히 가고 있는 새로운 육종기술 개발에 대해 자세히 설명하면서 어떻게 하면 우리가 이들 기술을 활용하여 세계를 선도하는 종자 강국이 될 수 있는지를 고민하고 있다.

국내 대학과 국책연구기관, 종자기업들이 협력해서 실질적인 성과가 나타나기를 바라며, 정부의 골든씨드프로젝트(GSP)도 첨단 신육종 기술 도입에 좀 더 노력할 것을 주문하고 있다. 또한 국가 식량안보와

식량생산제고를 위한 대형 국책연구사업을 조속히 구축할 것을 제안하고 있다.

이 책을 통해 새로운 육종기술에 대한 우리 국민의 이해와 신뢰가 높아지고 우리나라가 종자전쟁에서 승리하는 계기가 마련되기를 바란다.

2017년 5월

한국식량안보연구재단 이사장 **이 철 호**



01 종자(種子, Seed) 15

- 1.1 종자에 대한 기본개념 15
- 1.2 종자의 종류 21

02 종자산업의 개요 25

- 2.1 종자산업의 역사 25
- 2.2 종자산업의 중요성 28
- 2.3 종자기업의 사업과정(국내기업 경우) 32

03 국내외 종자시장 현황 35

- 3.1 국내 종자시장 규모 및 분포 35
- 3.2 세계 종자시장의 규모 38
- 3.3 세계 종자시장의 품목분포 40
- 3.4 다국적 기업의 종자판매 실적 42
- 3.5 채소 종자시장 44
- 3.6 GMO 종자시장의 변화 45

04 식량생산 47

- 4.1 식량생산의 중요성 47
- 4.2 식량안보현황 49

4.3 식량생산 제고 방안	51
4.3.1 식량생산 제고를 위한 육성목표 설정	51
4.3.2 육성목표를 위한 첨단 기술의 확보	52

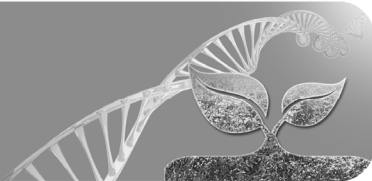
05 식량생산 제고를 위한 육종기술 55

5.1 육종방법의 역사	55
5.2 육종기술의 종류	57
5.2.1 관행육종기술	57
5.2.2 DNA 마커를 이용한 분자육종기술	62
5.2.3 유전자변형(genetically modified)기술	65
5.2.4 국내외 종자기업에서 보유하고 있는 육종기술 및 활용정도	70
5.3 식량생산 제고를 위한 육종의 당위성	73

06 신육종기술의 활용 75

6.1 유전체편집기술	75
6.1.1 필요성 및 개요	75
6.1.2 CRISPR	77
6.1.3 CRISPR/Cas9 유전자가위의 탄생	78
6.1.4 CRISPR/Cas9 유전자가위의 활용	83
6.2 동종기원(Cisgenesis)기술	99
6.2.1 필요성 및 개요	99
6.2.2 Cisgenesis vs GMO vs 일반육종의 비교 ...	102
6.2.3 Cisgenesis 기술의 활용	104
6.3 세포융합 기술	110
6.3.1 필요성 및 개요	110
6.3.2 원형질체융합 기술의 활용	111

6.4 식량생산 제고를 위한 육성기술 활용방안	131
6.4.1 생산성 제고를 위한 현 운영기술	131
6.4.2 생산성 제고를 위한 미래 기술적 인프라	133
6.4.3 기술간 연계	138
07 육종기술과 GMO (LMO)와의 차이 해석	141
7.1 유전체편집 기술과 GMO (LMO)와의 차이	141
7.2 Cisgenesis와 GMO (LMO)의 차이	144
7.3 기술활용에 대한 이해도	145
08 시사점 및 제언	147
8.1 시사점	147
8.2 문제점	149
8.3 제언	152



1.1 종자에 대한 기본개념

종자는 생명의 근원이다. 식물 수술의 꽃가루가 암술에 댈히면서 수정이 되는데 식물체 내에서 처음 만들어지는 종자형태는 접합체(zygote)이다. 접합체 형태의 종자가 서서히 자라면서 작은 배(胚, embryo)로 발달하게 되는데 이후 여러 형태의 배 조직으로 바뀌면서 후기 심장형배(late heart) 조직으로서 존재하게 된다(그림 1). 따라서 종자 자체는 살아있는 존재로서 어느 정도 성장하다가 종자내 수분이 적어지면 휴면상태로 유지하게 된다.

식량생산 제고를 위한 신(新)육종기술

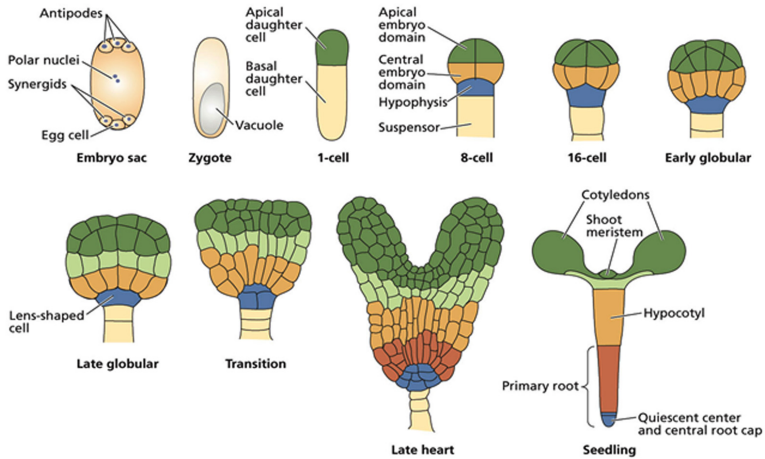


그림 1 식물이 수정후 접합체로 형성된 다음 종자 내에서 일어나는 배 발생 과정¹⁾

배 조직을 가장 쉽게 관찰할 수 있는 종자는 감 씨앗이며 씨앗을 절개하였을 때 수저처럼 보이는 것이 다 성장한 배(胚)이다(그림 2). 배 조직세포안의 DNA가 외부환경에 의해 자극을 받으면 성장 프로그램을 작동시키게 되며 이로서 종자의 성장이 시작된다. 특히 종자를 파종한 후 물을 주면 발아가 되며 이후 성장과 발달이 촉진된다. 즉 종자가 수분을 흡수하면 발아되면서 배 발

1) Embryo sac: 배낭; Antipodes: 반측세포; Polar nuclei: 극핵; Synergids: 조세포; Egg cell: 난세포; Zygote: 접합체; Vacuole: 액포; 1-cell: 1 세포시기; Apical daughter cell: 정단말세포; Basal daughter cell: 기저말세포; 8-cell: 8 세포시기; Apical embryo domain: 정단배역; Central embryo domain: 중앙배역; Hypophysis: 원근층; Suspensor: 배병(배자루); 16-cell: 16 세포시기; Early globular: 초기 구상배; Late globular: 후기 구상배; Transition: 전환배; Late heart: 후기 심장형배; Seedling: 어린묘; Cotyledons: 자엽; Shoot meristem: 순(筍)분열조직; Hypocotyl: 배축; Quiescent center and central root cap: 정지부 및 중앙근관

생이 촉진되어 종자 밖으로 배가 뚫고 나오게 된다. 그리고 동시에 밑의 뿌리 조직과 상부의 떡잎으로 자라면서 결국 여러 기관을 형성하게 된다(그림 3, 4).



그림 2 감 씨앗의 절단된 단면. 내부의 수저 모양이 배(胚).



그림 3 배 발생과정

(종자가 휴면상태로 유지하다가 수분을 흡수하기 시작하면 배의 발생과정이 촉진이 되면서 뿌리와 떡잎을 만들어 낸다)

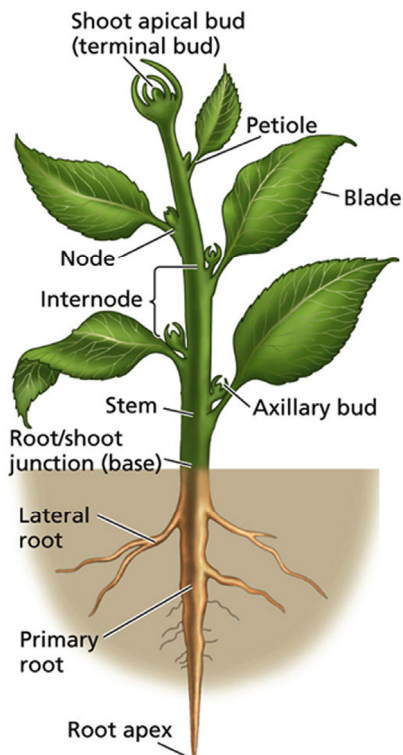


그림 4 배 발생이후 광합성 정도와 영양분 상태에 따라
진행속도는 다르지만 기관발생을 하게 된다¹⁾

1) Shoot apical bud: 순정아(筍頂芽); Petiole: 엽병; Blade: 잎; Node: 결절마디;
Internode: 절간; Axillary bud: 액아(腋芽); Stem: 줄기; Root/shoot junction(base):
근순접합면; Lateral root: 결뿌리; Primary root: 일차근; Root apex: 근단

그리고 다 성장한 개체는 암술과 수술을 만들어 내면서 수술의 꽃가루에 의해 타가 또는 자가 수분이 되어 종자를 맺히게 된다. 이 모든 과정이 하나의 사이클이 되면서 세대가 이어지게 되는 것이다(그림 5).

종자는 식량작물인 콩, 밀, 보리, 옥수수, 벼처럼 종자자체로서 음식 또는 식량이 되지만 채소나 화훼작물처럼 종자를 심어서 고추, 수박, 배추, 장미, 나리 등 생산물을 확보해서 활용하는

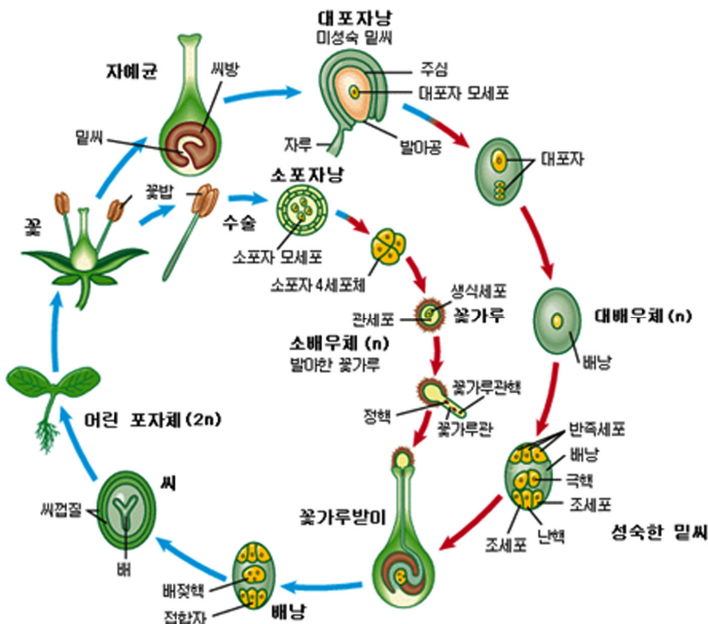


그림 5 종자 생성 후 개체 발생이 되고 이후 성장과 발달을 통해 암술, 수술에서 생식세포를 만들면서 다시 수정에 의해 종자를 맺게 하는 식물의 세대교번 과정

경우로 나뉘어진다(그림 6). 어느 경우든지 종자를 파종하고 재배해야 되기 때문에 종자를 생산해야 하는 것은 매우 중요한 일이며 어떤 종자를 개발해서, 어떻게 재배하고, 어떻게 생산해야 하는지에 많은 연구가 요구된다.



그림 6 여러 종류의 종자 [옥수수과 콩은 종자자체를 음식으로 활용하며 고추, 박종자, 십자화과 종자는 파종하여 재배하면서 과실과 잎(엽)을 섭취한다]

1.2 종자의 종류

종자는 크게 4가지로 나누어진다(표 1). 1) 야생종은 자연상태에서 만들어진 종자이며, 2) 재래종은 오랫동안 인간에 의해서 토착되어 내려온 지역 특산 종자이고, 3) 계통은 여러 종류의 종자를 육성가가 자가수분 또는 타가수분을 거쳐 유전적으로 안정시킨 종자로서 모계와 부계로 나뉘어진다. 그리고 4) 품종은 육성가가 유전적 개량을 위하여 각 계통을 교배하여 만든 품질이

표 1 종자의 종류

종자	정의
야생종	산이나 들에서 자연적으로 교배되어 생육되는 식물체 또는 그 종자. 야생종은 생존, 도태, 번이가 자연적으로 획득됨
재래종	예전부터 전하여 내려오는 농작물 또는 그 종자. 오랫동안 한곳에서 재배되어 그 풍토에 토착화되거나 격리된 환경에서 자연방임 교배를 통해 유전적 형질이 자연적으로, 부분적으로 고정된 경우임. 일반종이라고 말함
계통	육종가가 야생종이나 재래종을 활용하여 자가수분 또는 타가수분을 거쳐 유전적으로 고정시킨 개체 또는 그 종자. 모계와 부계를 육성하여 교배조합을 통해 품종을 개발함
품종	유전적 개량을 위하여 육종가가 각 계통을 개발하고 인위적으로 교배한 다음, 선발된 개체군. 원예적으로 형질이 같은 제1대교잡종(F1, filial 1)이며 양친보다 생육이나 특성이 우수한 성질을 갖는 잡종강세(雜種彈勢) 특성이 있음

우수한 개체이며 상업적으로 판매한다. 실상 이 모든 종자 종류들은 곧 유전자원이다. 육종가는 유전자원을 이용하되 여러 형태의 육종기술을 활용하여 원하는 품종을 개발하게 된다. 특히 최근에는 다양한 생명공학기술이 육종에 접목하다 보니 육종에 사용되는 생명공학기술을 폭넓게 육종기술이라고 한다.

종자개발과 유전자원은 상반적인 관계가 있다. 원래 지구상에는 엄청나게 많은 유전자원이 있었지만 인류가 식량의 생산성 때문에 인위적인 육성(domestication)을 하다 보니 선발을 통해서 소수의 유전자원만 활용하게 되었다. 따라서 많은 자연적 유전자원들이 방치되어 도태되었고 특히 20세기 들어오면서 인위적인 육종을 본격적으로 착수하다보니 사용하는 유전자원의 감소가 심화되었다.

그러나 다행스러운 것은 기 유전자원을 활용하여 새로운 계통과 품종을 만들게 됨으로서 신유전자원이 증가되고 있다. 각국에서는 소위 유전자원센터를 운영하면서 기존의 남은 유전자원과 새로운 유전자원을 보유하고 있다. 한국의 경우는 농촌진흥청 산하 유전자원센터에서 약 26만점의 유전자원을 확보 중이며 국내 각 종자기업에서는 육성가들이 수집해놓은 상당량의 유전자원이 있다.

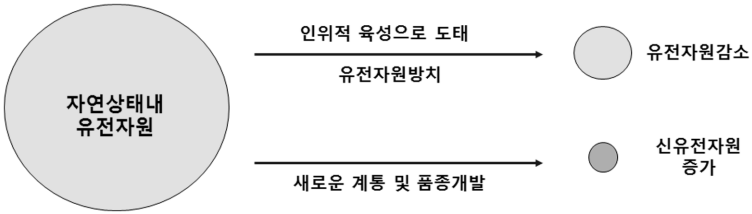
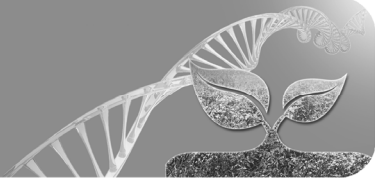


그림 7 종자개발에서 가장 중요한 것은 유전자원이며 식량안보는 이 유전자원과 직결됨. 과거 약 1만년 전부터 인류가 많은 자연유산인 유전자원을 방치하면서 극소수만 운영하다보니 자연적으로 도태가 많이 되었음. 현재 각 국가의 유전자원센터에서 보유하고 있는 자원이 전부라고 해도 과언이 아님



2.1 종자산업의 역사

종자산업은 결국 자연적으로 또는 인위적으로 확보된 종자를 수집, 개발, 생산, 유통, 재배, 수확하는 전과정에 필요한 산업과, 그리고 결과물을 가공하여 만들어지는 산업으로 이루어진다. 1930년 최초로 옥수수의 잡종강세 품종인 F1 hybrid(제 1대 교잡종)가 만들어지면서 수확량 증가와 우수형질로 센세이션이 일어났으며 당시 경제공황으로 힘들었던 미국경제를 살려준 하나의 요인이 되었다. 이후 F1 종자개발 방법이 세계적으로 빠르게 전 해지면서 농산업을 성장하게 되었으며 유럽과 북미를 중심으로 다양한 작물에 대해 적용되었다. 아시아에서는 일본이 가장 빠르게 채소종자개발에 앞장섰으며 엽채류, 양채류 등 좋은 품종을 개발하였다.

국내에는 1950년 이전까지는 F1 종자개발을 하지 못하고 있다가 1950년 우장춘박사가 한국에 오면서 처음으로 F1 종자개발 및 기술 보급으로 급성장하였으며 종자를 중심으로 한 농업 자체가 모든 산업의 기반이 되었다(그림 8). 그러나 1970년 이후 제조업, 중공업 등을 포함하여 모든 기간산업들의 성장으로 농업은 사양



그림 8 종자산업의 역사를 주요 변화별로 요약한 모식도¹⁾

길로 접어들었고 심지어 국내에서도 일반 농과대학 대신에 생명 산업대학, 환경생명공학대학 등으로 명칭을 바꾸면서 농학관련 분야는 3D 업종으로 전략하고 말았다.

그러나 1990년 중반서부터 미국을 중심으로 신품종개발을 위하여 생명공학기술이 접목하기 시작하였으며 최근 들어서는 종자산업 자체가 급성장하기 시작하였다. 이때부터 비료, 화학회사들이 종자회사를 M&A하면서 다국적기업들로 성장하였고 이어

1) Dirty: 더러운; Difficult: 어려운; Dangerous: 위험한; Diligent: 근면한; Different: 다른; Delicate: 섬세한; New cultivation: 새로운 경작

서 제약회사까지 통합하여 외연관계를 넓히고 있는 중이다. 따라서 전 세계의 대형 기업들은 종자산업이 미래사업의 근원이 된다는 중요성을 인지하게 되었고 이어 지난 2016년 2월에 중국화공이 신젠타를 430억 불(52조4천억 원)에 인수하게 되었다. 덩달아 독일의 화학·제약 업체 바이엘은 2016년 9월 세계 최대 종자회사인 미국의 몬산토를 660억 달러(74조8천억 원)에 인수함으로써 종자업계에서 커다란 지각변화가 생겼다.

따라서, 농역 - 비료 - 종자 - 제약 - 유통까지 전부 장악하게 되는 초 대형기업이 생기면서 기존 육종사업이 ICT와 접목되어 융복합사업으로 전환되기 시작하였다. 그리고 향후 미래의 종자산업 소위 유전체정보와 빅데이터를 활용한 컴퓨터 육성(In silico breeding)을 통한 종자개발이 이루어질 것이며 해수, 사막, 우주 공간에서 자랄 수 있는 미래 종자개발과 연계산업이 성장할 것으로 사려된다.

2.2 종자산업의 중요성

모든 작물은 종자로부터 만들어진다. 따라서 식량생산 증대 및 식량안보유지를 위해선 우수품종개발 여부와 직결되며 개발된 종자는 생산이 되고 유통이 되면서 세계 곳곳에 보급이 되어야 함으로 종자산업이 발달되어야 한다. 종자산업의 중요성은 크게 5가지로 요약될 수 있다.

첫째, 종자를 개발하고 생산하여 판매를 하는 산업이 인류의 먹거리를 좌지우지하기 때문에 국가의 식량안보와 직결되어 있다는 것이다. 실제로 2008년 많은 곡류를 에너지소비로 전환하는 것이 유행이 되자 곡류파동이 나면서 세계적으로 식량위기를 경험한 적이 있었다.

둘째, 종자산업은 기술·자본집약적 산업이다. 종자 1립 값은 미천하나 생산물은 매우 고가이다. 예를 들어 국내 수박 접수종자와 대목종자는 각각 100원과 50원, 이를 접목한 육묘는 약 600원인데, 이를 재배하여 1통의 수박을 생산하면 소매가격으로 15,000-20,000원이다. 기후변화나 병충해가 심하지 않으면 충분히 농가수익을 올릴 수 있는 것이다. 또한 고가의 종자는 같은 무게 하에서 금보다 2-3배는 비싸서 고부가가치 산업이다(그림 9).



그림 9 고부가가치 종자의 가격은 같은 무게 하에서 금값의 2~3배가 된다. 물론 모든 종자가 그렇지는 않으며 값싼 무 종자 같은 경우 같은 1g에 1000원도 안되는 것도 있다

셋째, 회사가 보유하고 있는 종자는 100% 기업자본이며 원종인 모계, 부계 생산비가 저렴하면서 새로운 유전자원을 계속 개발할 수 있기 때문에 원료비용이 작다. 따라서 종자기업 평균 순이익률이 약 15-25% 정도이며 이는 일반 제조업체의 평균 순이익률 3-5%에 비해 매우 높은 것이다.

넷째, 지금은 옛날처럼 다른 국가의 종자를 마음대로 가져올 수 있는 상황이 아니다. 각 국가 간 자국의 유전자원을 보존하기 위해서 식물특허출원을 하거나 검역강화를 통해서 유출을 막고 있다. 특히 최근에는 개발도상국들도 자국의 농산물 보호, 종자

보호를 위하여 생물다양성협약¹⁾, 나고야의정서²⁾ 등의 국제협약을 통한 통제를 원하고 있다. 따라서 유전자원의 부족으로 신품종개발에 제약이 따르고 있기 때문에 고품질 품종개발에 종자기업간의 치열한 경쟁을 하고 있다.

다섯째, 종자산업은 인류의 먹거리를 책임지는 것 외에도 바이오에너지, 의약품, 신소재, 건강기능식품, 화장품 등 새로운 연계산업과 융복합이 되고 있다(그림 10). 즉 종자가 미래 원료산업의 근간이 되고 있다는 것이다. 선진 다국적기업들은 종자의 현재와 미래의 가치와 중요성을 잘 알고 있었기 때문에 M&A(기업인수합병)를 통해서 제약, 비료, 농약, 유통, 종자를 하나의 세트로 구축하고 있다. 종자를 개발할 때 재배에 필요한 비료와 농약이 종자 특성과 맞춤형 기반을 갖고 수확 후 유통을 조정하여 안정적인 시장구조를 만들면서 작물 안에 있는 특정 활성생리성분을 의약품이나 소재로 변형되어 수익을 창출하는 것이다. 종자서부터

-
- 1) 생물다양성협약: Convention on Biological Diversity(CBD). 1992년 5월 22일 국제연합환경개발회의에서 채택하여 2012년 7월 기준으로 193개국이 가입한 국제협약임. 생물종의 급격한 감소 및 생태계 파괴 우려 증가속에서 생물자원의 지속가능한 이용을 위해 국제적 체제를 마련하기 위해 UN 등에서 논의가 되었음. 기존 환경협약들을 보완해서 (1) 생물다양성의 보존, (2) 생물다양성 구성요소의 지속가능한 이용, (3) 유전자원의 이용으로부터 발생하는 이익의 공정하고 공평한 공유를 목적으로 함.
 - 2) 나고야의정서: 1992년 전 세계에 현존하는 유전자원은 함부로 허가 없이 활용할 수 없으며 그 유전자원을 보유하고 있는 국가의 권리로 인정하면서 유전자원의 접근 및 이용은 공유해야 한다는 국제협약이 만들어짐. 이를 위하여 유전자원의 접근 및 이익공유(ABS: Access to genetic resources and Benefit Sharing)에 대한 가이드라인이 만들어졌고 2010년 생물다양성협약 당사국총회가 일본 나고야에서 개최되면서 국제협약의정서로 채택이 됨.

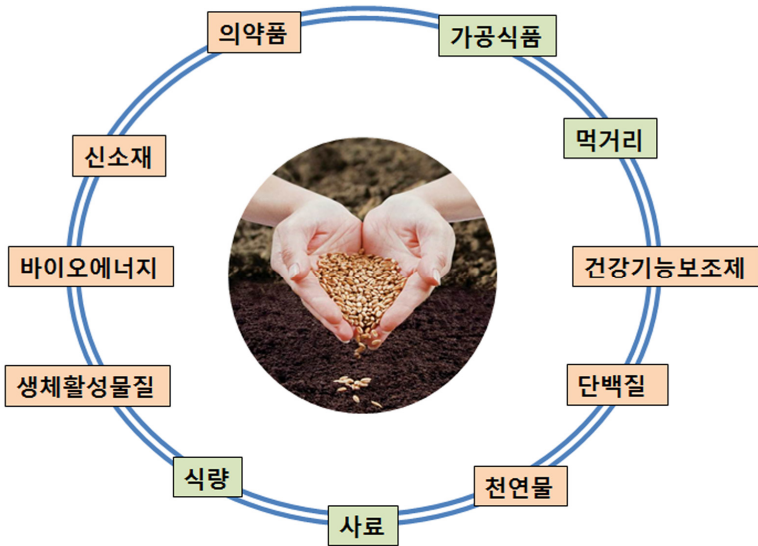


그림 10 종자는 융복합산업의 근간이며 미래산업의 원료임. 종자산업이 기존의 식량, 식품, 먹거리분야를 탈피하여 다른 산업을 창출하고 있는데 친환경 신소재, 바이오에너지 원료를 다루는 환경산업과 건강기능보조제, 의약품, 단백질, 천연물, 생체활성물질 등의 바이오산업으로 전환되고 있어서 여러 연계산업의 미래원료로 주목 받고 있다

하나의 융복합적인 파이프라인을 형성하면서 최종 소비자에게 다양한 산물로 전달할 수 있는 주요산업인 것이다.

여섯째, 종자산업은 농산업의 기반이다. 농산업이 약한 선진국은 없으며 선진국에 진입하려면 농산업전반에 대한 국제적 경쟁력이 필요하다. 생명공학은 최첨단 학문으로서 국제경쟁력을 대표하며 종자개발에 생명공학기술이 융합되지 않으면 종자산업

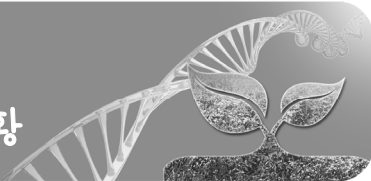
이 성장할 수 없다. 즉 종자산업이 첨단육종기술로 무장되지 않으면 농산업 전체가 육성되지 않는다는 뜻이다.

2.3 종자기업의 사업과정(국내기업 경우)

종자회사는 나름 확보된 유전자원이 있어서 이를 활용하여 연구개발을 통하여 새로운 품종을 개발한다. 먼저 육성가가 선발한 다음 여러 포장 검정을 통해서 최종 품종을 선정하게 되면 해외의 전문 종자생산업체에 의뢰하여 대량생산한다. 생산된 종자는 국내로 다시 수입하여 종자검사를 통해서 병, 발아, 순도를 검정한 다음 여러 가공처리를 한 후 포장을 하게 된다. 포장된 종자는 국내 대리점에 납품하게 되어서 종자기업의 비즈니스는 여기서 끝나게 된다(그림 11). 이후 대리점에서 종자를 육묘장에 팔고, 육묘장에서는 육묘를 만들고 이를 농가에 팔면, 농가는 이를 재배하여 수확을 하게 된다. 종자 한 개를 개발하여 판매해서 식탁에 올라오는데까지 작물별 다르지만 육성기간 포함하여 약 7-10년 걸리는 장기 사업이다.



그림 11 국내 종자기업에서의 종자사업 과정(주로 채소종자사업). 전체적인 사업과정은 외국기업이나 한국기업이나 큰 차이는 없다. 일반적으로 종자기업은 대리점에 종자를 납품하는 것으로 끝나지만 육묘장이나 농가에 직접 방문하여 재배관리에 대해서 서비스를 한다



3.1 국내 종자시장 규모 및 분포

한국의 종자시장 규모는 조금씩 증가하고 있으며 2015년 기준으로 약 1조 1천억 원으로서 전 세계 종자시장의 약 2%를 차지한다(그림 12). 이는 최근 육묘산업도 종자산업으로 간주함으로

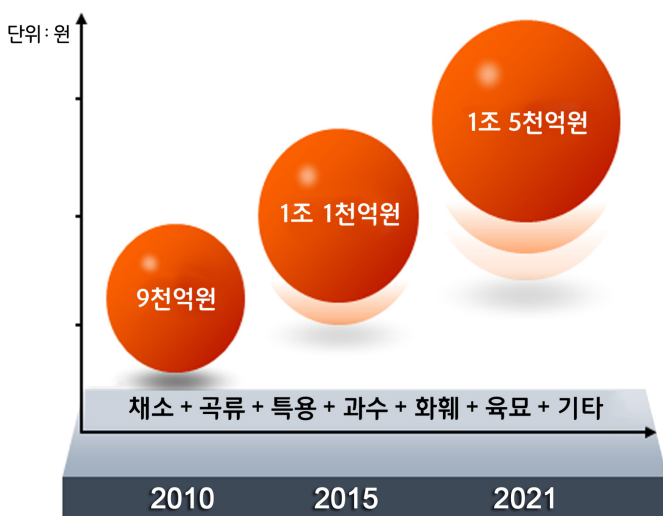


그림 12 국내 종자시장규모(농우바이오 추정치)

서 규모가 성장한 것으로 산출되었다. 벼와 곡류들은 식량안보차원에서 국가에서 관리하고 있다.

그리고 일반기업에서는 채소, 화훼, 과수 등을 취급하고 있는데 종자산업을 리드하는 기업은 대부분 채소종자를 다루고 있으며 그 외 화훼나 과수 종자들은 소기업 또는 대리점 수준에서 운영되고 있는 실정이다. 이들 중 먹거리와 직결되는 곡류, 채소, 과수의 종자시장은 약 6천억 원 정도이며 이들이 재배되었을 경우 2014년 생산액은 식량작물 9조 4천억 원, 채소 8조 9천억 원, 과실 3조 6천억 원, 도합 23조 9천억 원(2015년, 농촌경제연구원)이다. 그리고 지난 몇 년간 매년 5-8% 정도 줄고 있다는 것도 현실이다.

국립종자원에 등록된 종자기업이 약 1700여개 되지만 대부분 영세기업이고 연구, 생산, 품질관리, 국내외판매를 할 수 있는 회사는 극소수이다. 한국에는 불행하게도 다국적기업이나 대기업이 없어서 국내 수요를 만족시켜줄 수 있는 상황이 아니며 작물재배 및 유통단가가 높아서 많은 양의 작물들은 오히려 수입에 의존하고 있는 실정이다.

국내 종자시장의 분포는 곡류와 채소가 약 20% 정도로 비슷하고 그 다음 화훼, 과수, 육묘, 특용작물, 사료 순이다(그림 13). 즉 한국 사람들의 식량이라고 간주되는 곡류와 채소가 전체 종자시장의 약 40%만 차지하고 있다.

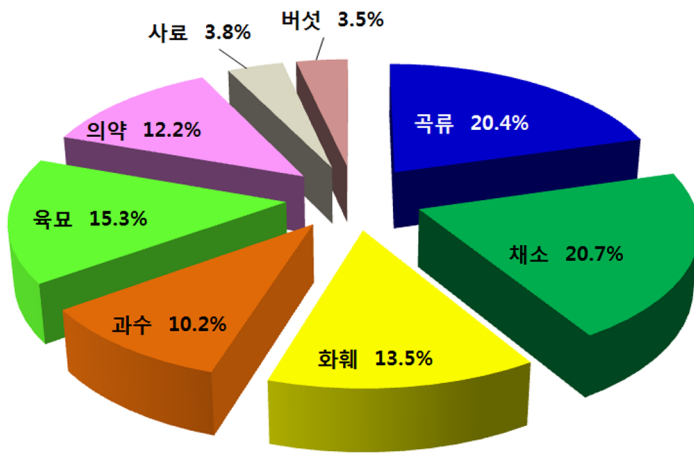


그림 13 국내 종자시장의 품목별 분포도. 곡류와 채소의
종자시장 비중은 거의 같음(RDA, 2013)¹⁾

1) RDA, 2013 참고문헌

3.2 세계 종자시장의 규모

세계 종자시장의 규모는 실제 정확하지 않으며, 여러 정보매체에 의해, 어느 작물까지 범위를 두느냐에 따라 다양하다. 곡류, 화훼, 채소, 과수, 약용작물, 버섯 등으로 부터의 종자시장을 국가별로 취합하면 2012년에 약 450억 불 규모가 된다(표 2).

미국의 종자시장이 120억 불로 가장 크며 중국이 그 뒤를 잇고 있다. 상위 10개국에서 아시아국가로서는 중국, 인도, 일본 3개국이 들어가 있으며 전체 종자시장의 약 30%를 차지하고 있다. 아시아권 인구에 비해서 시장 점유율이 적은 이유는 종자값이 훨씬 싸기 때문이다.

또한 종자시장 규모는 매년 적은 비율이지만 계속 증가하는 추세이어서 2015년에 482억 불, 2020년에는 약 615억 불 정도가 될 것으로 추정하고 있다(표 3).

이런 수치 외에도 세계 종자산업 규모에 관한 자료는 여러 기

표 2 국가별 종자시장 규모(2012, ISF)

미 국	중 국	프랑 스	브라 질	캐나 다	인 도	일 본	독 일	아르헨 티나	이탈 리아	기 타	총 (억불)
120	99.5	28	26.3	21.2	20	13.5	11.7	9.9	7.7	91.5	449.3

표 3 세계종자시장 규모(2014, 농우바이오 추정)

1975	1985	1996	2006	2009	2010	2011	2012	2015	2020	년
120	180	300	340	380	420	430	450	482	615	억불

관 조사에 따라 차이가 나게 언급이 되고 있지만 최근 몇 년간 다국적기업의 매출규모가 크게 증가하지 않고 어느 정도 답보상태에 있어서 생각했던 것 보다 빠른 속도로 종자시장규모가 증가하는 것은 아니다.

3.3 세계 종자시장의 품목분포

품목 중에서 가장 큰 종자시장을 가지고 있는 작물은 옥수수로서 전체의 약 32%를 차지하며 옥수수를 포함하는 곡류 및 식량작물은 전체 종자시장의 약 76%이다(그림 14). 채소는 18%를 차지하고 있으며 화훼작물 중에서 가장 큰 해바라기 종자가 약 2% 정도 된다. 따라서 과수, 약용, 버섯 및 기타 화훼작물 규모가 약 6% 정도로 추정될 수 있다.

상업적으로 판매되는 농작물 종자는 크게 3가지로 나누어진다(표 4). 첫 번째는 오래전서부터 각 지역별 특색을 유지하고 있는 재래종으로서(OP: open pollination) 종자기업에서 선발하여 자

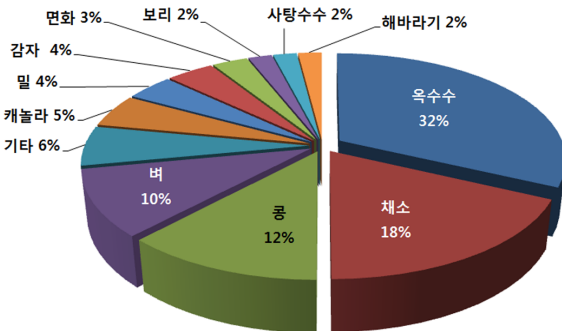
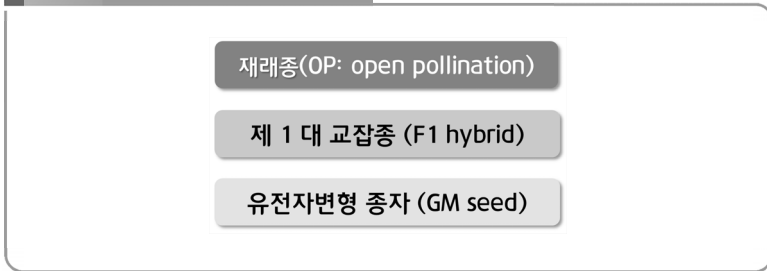


그림 14 세계 종자시장에서 각 품목별 차지하는 비율(% , ISF 2013)¹⁾

1) ISF 2013 참고문헌

표 4 상업적으로 판매되는 종자의 종류



가수분을 통하여 대량생산하여 판매한다. 둘째는 종자기업에서 선발한 제1대 교잡종으로서 잡종강세를 나타내는 품종(F1 hybrid)이다. 마지막으로 특정 유전자를 삽입하여 고부가가치를 갖는 GM종자(genetically modified 종자: 유전자변형종자)로서 유전자 삽입이후의 육성방법은 품종(F1 hybrid)개발과 동일하다. 개발도상국이나 후진국은 OP 종자가 아직도 전체시장의 약 70% 정도로 지배적이지만 점차 고가(高價) 고품질인 F1 종자시장으로 전환되고 있는 실정이다. OP 종자는 R&D 투자가 거의 필요 없고 생산지만 있으면 되지만, F1 종자를 개발하려면 육성재료 확보 및 개발, 전통육종기술과 생명공학기술의 개발 및 활용 등을 위하여 적극적인 R&D 투자가 필요하다. 투자와 생산 비용이 증가하면 결국 종자 단가가 상승됨으로서 전체 시장의 규모가 커질 수 있다. 따라서 세계 종자시장의 변화는 종자개발을 위한 첨단시스템을 갖춘 대형 종자기업에 의해 결국 좌지우지된다고 볼 수 있다.

3.4 다국적 기업의 종자판매 실적

다국적기업의 종자판매 실적을 통해 종자시장규모를 간접적으로 알 수 있다. 몬산토의 2015년 총 매출은 약 150억 불이며 그중에 종자는 약 100억 불로서 전 세계 종자매출 1위이며 약 20%를 차지하고 있다(표 5). 상위 10개의 종자매출 규모는 약 75%이며 상위 4개 업체가 약 50%를 차지하고 있어서 다국적기업들이 전체 종자시장을 좌지우지 하고 있다고 해도 과언이 아니다.

표 5 기업별 종자매출 규모(각사의 annual report를 참조)

순위	회사	2013년 (백만불)	2014년 (백만불)	2015년 (백만불)	주요작물
1	몬산토	10,340	10,740	10,243	옥수수 > 대두 > 채소 > 목화
2	듀폰 파이어나이	8,181	7,614	6,760	옥수수 > 대두
3	신젠타	3,204	3,155	2,838	옥수수 > 채소 > 대두
4	리마그린	1,904	2,038	2,324	채소 > 옥수수
5	다우	1,614	1,604	1,427	옥수수 > 목화 > 대두
6	바이엘	974 (MEuro)	1,104 (MEuro)	1,277 (MEuro)	채소 > 목화 > 대두
7	KWS	923 (MEuro)	986 (MEuro)	1,037 (MEuro)	옥수수 > 목화 > 대두
8	AgReliant Genetics	695	692	-	옥수수 > 대두
9	DLF Trifolium	3325 (MDDK)	3391 (MDDK)	3565 (MDDK)	기타 작물
10	릭주안	-	-	440	채소
11	사까타	-	-	370	채소 > 화훼
12	다끼이	260	271	278	채소 > 화훼

* Euro, \$, DDK의 환율 차이로 매출이 달라질 수 있어서 Euro와 DDK는 그대로 표시함.
다끼이와 사까타의 종자매출은 전체매출의 65%로 추정한 금액임. 참고로 몬산토와
국내 1위 기업인 농우바이오와의 전체 종자 매출규모를 비교하면 약 120배, 채소종
자만 비교하면 약 10배 정도 차이가 남

3.5 채소 종자시장

채소종자는 세계 종자시장내에서 빠르게 상승하고 있다. 2020년에는 88억 불, 2025년에는 133억 불로서 2015년 보다 약 2배 정도로 약진할 것으로 보고 있다(표 6). 그 이유는 채소 작물 자체가 좀 더 기능적으로 전환되면서 F1 hybrid의 고부가가치 밸류가 높아져서 값이 상승하고 있으며 특히 아시아권의 주식(主食)이 채소 위주가 많아서 인구증가와 함께 채소 소비가 많아지고 있다. 각 종자기업체 중에서 채소종자 매출만을 산출한다면 역시 몬산토가 1위이며 빌모린이 그 뒤를 잇고 있다(표 7). 리마그린이 빌모린의 모기업이며 빌모린은 리마그린 산하의 HM·Clouse, Hazera, 미카도교와 등의 채소종자기업들을 대표하고 있다.

표 6 채소종자의 시장규모(www.contextnet.com)

2012	2015	2020	2025년
50	60	88	133억 불

표 7 기업별 채소종자 매출금액(각사의 annual report를 참조)

2015	몬산토	빌모린	신젠타	뉴넴	릭주완	다끼	엔자 자덴	베조	사카다
억원	8956	8114	6982	5019	4277	2906	2881	2856	2038

3.6 GMO 종자시장의 변화

ISAAA(농업생명공학 응용을 위한 국제서비스)의 발표에 의하면(표 8) (ISAAA, 2016) 생명공학작물의 재배면적은 1996년 170만ha에서 2015년 179.7백만ha로 약 100배 증가하였다.

또한 전 세계적으로 28개국에서 1800만 명에 이르는 농민이 GM작물을 경작하고 있으며 2015년 GM작물 총 경작면적은 세계 총 작물경작지의 약 10%에 달하고 있다. 총 10개 작물(옥수수, 콩, 면화, 유채, 사탕수수, 알팔파, 파파야, 호박, 포플라, 감자, 가지)이 재배되고 있으며 특히 전 세계 콩의 83%; 면화의 75%; 옥수수의 29%, 캐놀라의 24%가 GMO이다.

국가마다 다르지만 미국에서 생산하는 콩과 옥수수 약 95%는 GM작물이며 GM작물의 특성은 제초제저항성, 곤충저항성, 바이러스저항성, 아밀로스프리 등이며 특히 제초제저항성과 곤충

표 8 연도별 GM종자시장 규모의 변화(ISAAA, 2016) (단위: 억불)¹⁾

1996	1998	2000	2004	2006	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
0.9	15	24	51	67	90	104	117	132	146	156	157	153

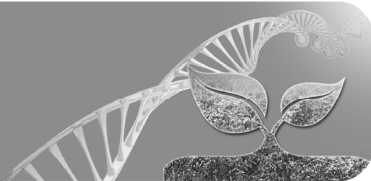
* Global market value of biotech crops = biotech seed + technology fee

1) James C, ISAAA Brief 51-2015: Executive Summary. ISAAA(Int ernational Service for the Acquisition of Agri-biotech Application), 2016

저항성 형질이 같이 들어가 있는 경우가 늘고 있다(stacking).

전체 GM 종자시장은 1996년 0.93억 불에서 2015년 153억 불로 성장하였으며 전체 종자시장(약 482억 불)의 31.7%에 해당되어 인류역사상 농업에 특정 기술이 이렇게 빠르게 적용되는 경우는 없었으며 수확량 증가와 농약절감에 지대한 역할을 하고 있다. 그러나 2013년서 부터 경작지 면적이나 GM종자시장 규모가 답보상태에 있는 것이 특징인데 고개발비용과 소비자들의 불안감(public concern)이 심해서 비즈니스 확대에 걸림돌이 되고 있다고 사려 된다.

또한 토마토, 피망 GM채소는 재배허가를 받았지만 실제로 GM종자가 유통되고 있지는 않으며 호박과 신선옥수수가 GM채소로 미국에서 판매되고 있으며 2013년서부터 GM가지가 방글라데시에서 소량 재배 중에 있다.



4.1 식량생산의 중요성

1930년에 약 20억 명이었던 세계 인구는 2차 세계대전 이후 인구가 급속하게 증가하기 시작하여 2000년에 60억 명, 그리고 2010년에 70억 명을 넘었으며 2050년에는 약 97억 명이 될 것으로 예상하고 있다(표 9). 1980년대까지는 식량의 생산과 소비가 크게 차이가 나고 있지 않았지만 이후 생산보다 소비가 많아져서 아프리카를 포함한 저개발국가에서는 식량이 턱없이 부족하게 되었으며 2014년 기준으로 전 세계적으로 9억 명이 영양실조 상태이다. 여러 가지 이유가 있겠지만 첫째로 중국이나 인도 등 신흥 개발국가들의 인구가 대폭 증가되어 식량소비가 많아졌으며 앞으로도 이런 국가들은 식량소비의 블랙홀이 될 것이다. 둘

표 9 역사상 세계인구 수의 변화

연도	BC3500	AD 1	1650	1850	1930	1975	2000	2011	2025	2050
억명	0.35	2.5	5.5	11.7	20.2	40.3	60.0	70.0	83.0	97.0

째는 식량재배지 자체가 현재 늘고 있지 않고 오히려 줄어들고 있다. 즉 수확량은 한정되어 있거나 천천히 증가하는데 비해 인구증가에 따른 소비가 수확량 증대보다 더 빠르기 때문에 식량이 당연히 부족하게 된 것이다. 셋째는 식량 소비가 많아지면 이에 따른 육식 소비가 늘기 때문에 가축생산이 많아지고 이를 위한 가축 사료가 더 요구됨으로서 식량부족이 가속화 되고 있는 실정이다. 넷째로 기후변화가 심하여 가뭄, 냉해 등으로 수확감소가 발생하고 있고 특히 지구온난화에 따라 병균, 해충 출몰이 극대화되고 있어서 이에 따른 작물 피해로 생산량 감소가 가속한다는 것이다. 2050년에는 현재 생산되고 있는 식량의 약 70%를 더 증산해야 인류가 이 지구상에서 생존할 수 있다. 따라서 식량생산은 국가의 식량안보와 직결되는 문제이어서 현 상황을 총칼 없는 종자전쟁, 식량전쟁이라고 말하고 있는 것이다.

식량은 곡류인 옥수수, 밀, 보리, 벼, 콩 등과 구황작물인 감자, 고구마 등을 포함하여 원예, 채소, 과일 등 까지 먹거리에 관한 모든 작물을 말한다. 어떻게 해야 식량안보 차원에서 세계를 먹여 살려야 하는지가 농업에 관련된 모든 사람들의 숙제이다. 선진국들은 이미 농업생산 수준이 높음에도 불구하고 식량생산에 만전을 기하고 있는데 특히 식량의 근본인 종자개발, 우수품종개발에 많은 투자를 하고 있다. 생산성향상, 기후변화에 따른 환경내성, 병해충내성 등을 위한 품종개발이 향후 인류의 식량안보를 위한 해결목표이자 방안이다.

4.2 식량안보현황

한국은 벼를 95% 이상 자급 생산하고 있어서 쌀 식량자급 자체로는 충분히 수요를 충족할 수 있다. 그러나 벼 외에는 다른 식량작물(밀 0.7%, 옥수수 0.8%, 콩 11.3%, 보리 24.8%)들의 평균자급률이 약 10% 미만 밖에 되지 않아서 2015년 전체 식량자급률은 약 50% 정도를 유지하고 있다(표 10). 곡물자급률만 보면 더 심각하다. 많은 양의 사료를 수입하고 있는 실정이어서 자급률이 2015년에 23.8% 정도 밖에 유지되지 않으며 OECD 국가 중에서 최하위 수준이다.

반면에 중국은 벼, 밀, 옥수수의 자급률이 98%이며 최근 들어서 식량안보차원에서 수출을 하지 않고 있다. 따라서 국제적으로 곡류파동이 나거나 각국의 식량안보정책이 급작스럽게 변하면 우리나라의 경우 식량이 필요하더라도 식량 수입 자체가 어려워질 수 있다는 것이다.

표 10 식량자급률 및 곡물자급률(농촌경제연구원, 2016) (%)

연도	2011	2012	2013	2014	2015
식량자급률	45.2	45.7	47.5	49.7	50.2
곡물자급률	24.3	23.7	23.3	24.0	23.8

결국 국내 식량안보는 전적으로 외국 식량수입량에 의존하고 있다는 것이며 수입가격은 국제시장의 농산물 안정도에 따라 부르는 게 값이 될 수밖에 없는 처지임으로 여기서 탈출하기 위해서는 식량생산에 각고의 노력을 해야 한다.

따라서 생산성제고 방안을 R&D 측면에서 검토하여 여러 방법을 제안하고 이를 위한 정책적 지원사업을 마련하여 빠른 기간 안에 안정된 식량안보 유지 방안이 마련되어야 할 것이다.

4.3 식량생산 제고 방안

4.3.1 식량생산 제고를 위한 육성목표 설정

지난 한 세기 동안 농업에 있어서 녹색혁명은 크게 3가지로 보고 있다. 1) F1 hybrid가 탄생하면서 곡물의 생산성을 향상시키면서 대량 수확할 수 있는 육성체계를 만들었으며, 2) 비료, 농약 등으로 다수확이 가능했으며 또한 병해충으로 부터 피해를 막을 수 있게 되었고, 3) 생명공학기술을 이용하여 과거 불가능했던 새로운 첨단 품종(GMO)들을 개발하게 된 것이다. 이 세 가지 녹색혁명의 공통점은 식량생산량 제고이었다. 그 덕택에 가축생산량도 극대화되었고 다양한 먹거리와 가공식품이 창출되었으며 따라서 인간의 수명이 연장된 것이다. 즉 연구개발에 의한 품종육성이 인류번영에 미친 영향은 막대한 것이다. 따라서 향후 미래에 대한 식량생산 제고 방안도 마찬가지이다. 제일 먼저 해야 할 일이 미래식량안보를 위한 육종 타겟(표 11)을 설정해야 하고 이를 위한 첨단 육종기술개발 및 활용하는 것이다.

표 11 식량생산 제고를 위한 육성 목표 및 종류

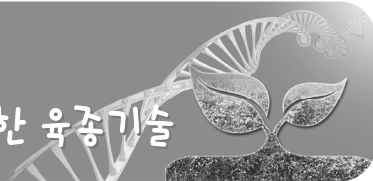
육성 목표	종류
기후변화에 대한 내성	가뭄내성, 내한성, 내서성, heat 내성, 내냉성, 범람내성
내충성	각종 해충 내성
내병성	바이러스, 곰팡이, 세균에 대한 내성 또는 저항성
생산성	광합성, 질소동화작용 제고
고품질	과실 크기, 맛, 색깔, 향기
기능성	건강기능성, 약성, phytochemical 함량 조절
세대단축	육성세대를 단축하여 비용 및 육성기간 절감
재배용이성	농가에서 쉽게 재배할 수 있는 특성
개발용이성	GMO처럼 고가비용을 제외한 저가비용의 품종개발

4.3.2 육성목표를 위한 첨단 기술의 확보

○ 기후변화, 자연재해, 병해충에 대응한 작물 품종 육성이 세계적으로 요구 되고 있다. 그 동안에 많은 연구를 통해 성공 사례가 있으나 내성품종을 개발하면, 바로 이어서 그 내성을 무너트리는 자연적 변화가 있어서 반복적인 상호공방이 되고 있으며 생물이 지구상에 존속하는 동안 계속 문제가 될 것이다. 다만 이분야가 어느 정도 해결이 되어야 적은 재배면적에 다 수확이 가능해질 것이고 이를 위해서는 합당

한 유전자원이 요구되며 내성 품종 개발에 필요한 육성 도구(tool box)가 필요하다고 본다.

- 생산성, 고품질, 기능성 제고는 미래종자산업의 필수임으로 이를 위해서 관행육종방법이 아닌 첨단육종기술적 고찰이 필요하다.
- 세대단축, 재배용이성, 개발용이성은 육성자체를 좀 더 능가 친화적이며 쉽게 농사를 지을 수 있는 방안이며, 저비용으로 최대의 효과를 보고자 하는 것인데 관행육성으로서는 이를 해결할 수 없어서 한계가 있다.
- 전체적으로 육성목표를 잘 수행하기 위해선 관행적 육종방법과 접목할 수 있는 첨단육종기술이 필요하며 이를 어떻게 확보하고 활용해야 하는 것이 당면숙제이다.
- 상기 목표를 위해서는 지금까지 도출되어 있는 활용 가능한 첨단육종기술들 고찰할 필요가 있으며 국내에서 이 기술들을 어떻게 활용할 수 있는지 검토하면서, 기술을 공유하고 널리 사용할 수 있도록 권장함으로서 국가의 식량안보에 도움이 되도록 해야 한다.



5.1 육종방법의 역사

1865년 멘델이 완두의 인위적 교배 실험으로 유전자와 유전법칙을 발견하여 육종의 이론적 토대를 마련하였다. 이후 20세기 초부터 옥수수의 유전연구가 활발히 진행하다가 미국의 종자기업에서 다수의 계통(모계와 부계)을 육성하였다. 이후 상호교배 조합을 통해서 우수개체를 선발하는 F1 hybrid(제1대교잡종)개발 방법이 본격적으로 시작을 하였으며 1930년부터 이를 통해서 옥수수를 대량생산을 하기 시작하였다(그림 15). 바로 이때부터 F1 hybrid가 작물의 생산성 제고의 근간이 되었으며 F1 선발방법은 지금도 육종의 가장 중추적인 역할을 하고 있다. 이후 1960년대에 방사선을 이용하여 인위적인 돌연변이를 일으켜서 새로운 특성을 갖는 유전자원을 확보한 다음 육성을 하는 돌연변이 육종이 시작이 되었다. 동시에 생식세포인 화분을 배양해서 식물체를 유기하는 조직배양 방법이 생김으로서 특정 형질을 갖는 개체를 유전적으로 바로 고정할 수 있게 되었다. 1980년 대 이후에는 DNA를 활용하는 여러 기술들이 나와서 분자생물학이 꽃을 피우게 되었으며 DNA 마커가 농업연구에 처음으로 활용되기 시작하

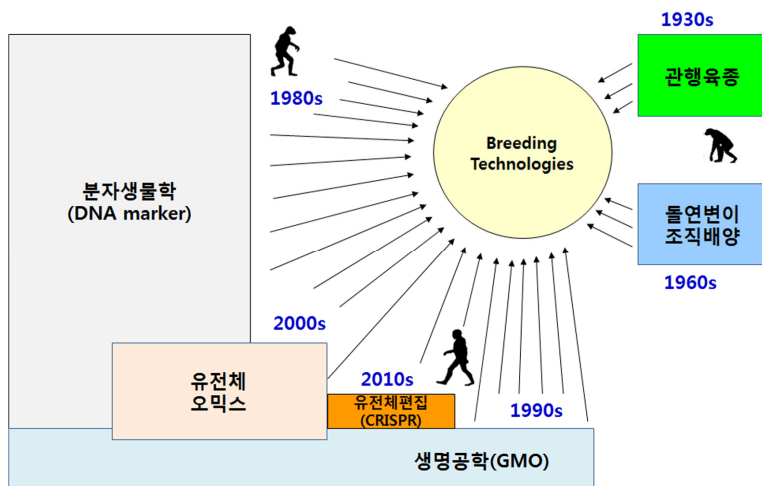


그림 15 첨단과학 기술이 시대적으로 육종기술에 집적되었음. 현 육종기술들(Breeding technologies)은 관행육종에서부터 유전체편집기술 까지를 전부 포함하고 있음

였다. 이후 GMO라는 유전체변형 작물이 개발되어서 1990년 중반부터 세계종자업계, 작물시장에 커다란 변화를 일으키게 되었다. 또한 2000년대 초 이후부터 작물별 유전체 정보가 집성화 됨에 따라 유전체 정보를 이용한 연관마커나 SNP(single nucleotide polymorphism, 단일유전자변이)마커가 엄청 쏟아져 나왔으며 모든 작물 육성프로그램에 직접적으로 활용되었다. 그리고 최근 수년전에 유전체 연구를 바탕으로 새로운 획기적인 육성 방법인 유전체편집기술이 탄생하였는데 현재 다국적기업을 비롯해서 육종 프로그램에 빠르게 접속되고 있다.

5.2 육종기술의 종류

현재 육성에 활용되고 있는 주요 3대 육종기술은 1) 관행육종 기술(F1, 제1대 교잡종을 만드는 기술), 2) DNA 마커를 이용한 분자육종기술, 3) GM(genetically modified)기술을 포함한 ICT 융합기술이며, 어느 기술이 더 활용되느냐는 각 국가의 농업기술 수준에 따라 다르며 선진국이나 다국적기업들은 여러 기술들을 서로 연계함으로서 시너지효과를 보고 있다. 그러나 어떤 기술을 이용하든지 최종 산물은 F1 hybrid이다.

5.2.1 관행육종기술

1930년 이후부터 생산성 제고를 위해 많은 작물을 상대로 여러 종류의 관행육종 기술이 사용되어 왔다(표 12). 육종가들은 본 기술들을 잘 알고 있으며 육성목표에 따라 적절히 활용하고 있다.

표 12 관행육종 기술의 종류

육종기술 종류	내용
분리육종	자연적으로 생성된 유전체를 대상으로 선발. 인공교배과정이 없이 우수한 개체나 집단을 선발(재래종)
교배육종	인공교배과정을 통해 나타난 다양한 유전체변이체를 대상으로 선발하거나 F2 세대 분리세대에서 다양한 유전자원을 선발한 다음, 계속 자가교배를 통해 고정
도입육종	우수 F1 hybrid에서 분리하여 고정한 다음 모계든 부계든 계통으로 활용
여교배	F1과 모부계 중 한쪽친과 다시 교잡하는 방법. 특정 타겟 형질을 고정하여 새로운 계통육성에 많이 적용함
잡종강세육종	모부계 계통 육성후 F1의 성능검정을 통하여 우수한 교배조합을 선발. MS, SI를 사용하여 종자생산의 경제성을 고려함
조직배양 육종 (DH, double haploid)	화분 반수체를 세포배양하여 2배체(약배양)로 만들. 이 방법으로 Homo화/고정화/계통화/시간단축이 가능하게 됨. 2배체와 4배체를 교잡하여 3배체 품종을 만들 수도 있음
돌연변이육종	방사선, 화학물질을 이용하여 다양한 유전적 변이체를 유기하여 선발한 다음 육종소재로 사용
종속간 육종	종간의 교잡, 속간의 교잡으로 새로운 작물을 창조함

DH: double haploid(배가반수체)
 MS: male sterile, 웅성불임
 SI: self-incompatibility, 자가불화합성

상기 관행육종 기술 중에서 가장 대표적인 예를 들어보기로 한다.

(1) 교배육종

A와 B를 교배한 다음 F₂ 세대에서 좋은 형질을 갖는 개체를 선발하고 계통육성을 시작한다. 계속 자가수분을 거쳐서 고정한 다음 여러 번의 현지 적응시험을 거쳐서 최종적으로 특정 지역에서 잘 재배되는 개체를 품종화하는 것이다(그림 16).

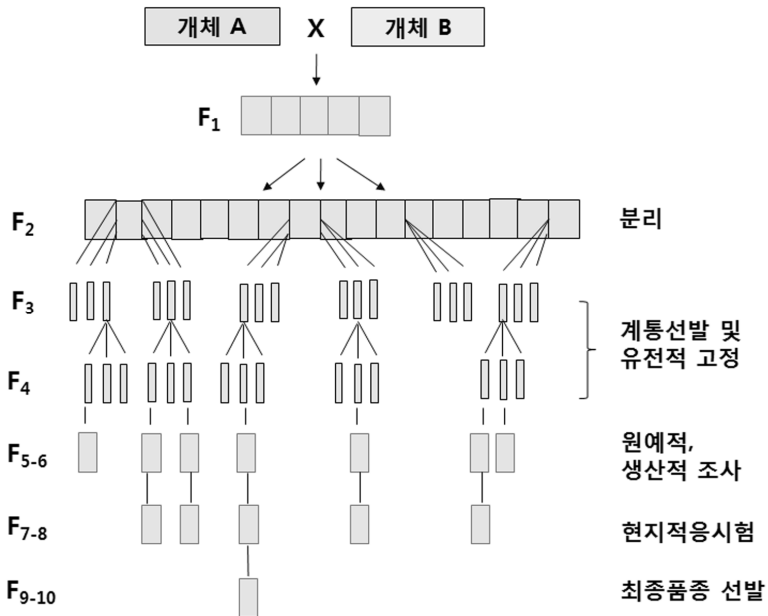


그림 16 대표적인 교배육종으로서 선발과 자가수분을 거쳐 유전적으로 고정하여 품종화 하는 경우이다

(2) 도입육종

타회사의 우수한 F1을 자가수분하여 다음 세대에서 분리되는 정도를 보고 우수한 유전자원을 선발한다. 이를 계속 자가수분을 거쳐 고정하여 계통화한다(그림 17).

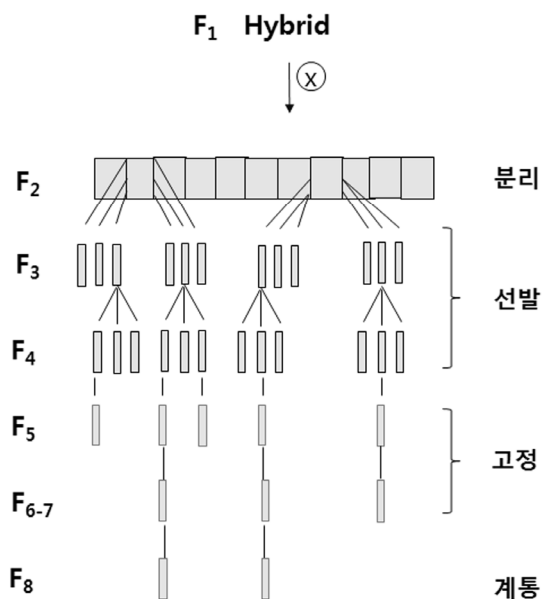


그림 17 타 기업이 개발한 F1 우수품종을 자가수분시켜서 F2 세대를 보고 분리된 유전자원에서 좋은 형질의 개체를 선발하고 지속적인 자가수분으로 고정하여 계통화 함

(3) 여교배

모부계 중의 하나를 반복친(recurrent line, P1), 또 다른 하나를 공여친(donor line, P2)으로 교배하는 방법이다. P2는 원예적으로 좋은 개체는 아니지만 아주 좋은 형질 X를 보유하고 있으며 P1은 우수 계통이어서 P2의 X를 P1으로 옮기는 경우이다(그림 18).

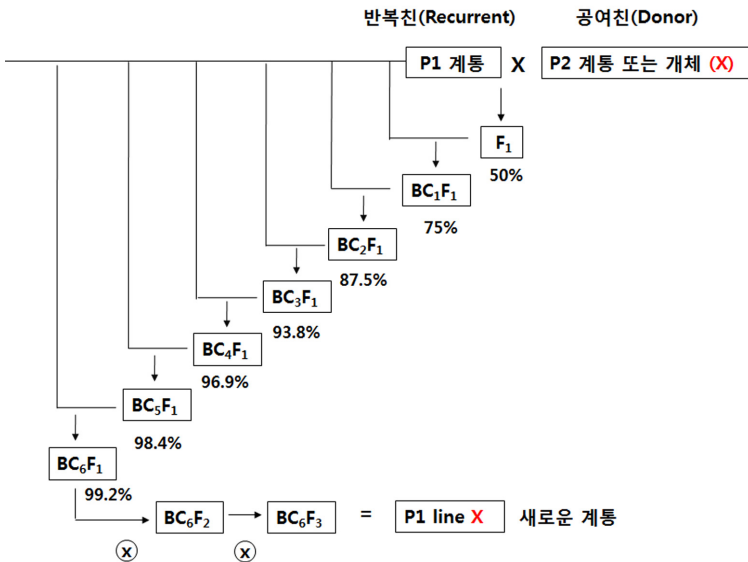


그림 18 전형적인 여교배 방법. 좋은 형질인 X를 반복친에 도입하는 교배도식으로서 특정 도입형질이 있을 때 주로 사용한다. %는 각 교배시 P1 계통이 함유하고 있는 유전체 비율을 나타냄

5.2.2 DNA 마커를 이용한 분자유종기술

유전체 정보가 각 작물별로 밝혀짐으로서 유전체 정보를 이용하여 좀 더 세밀한 육종이 전개되고 있다. DNA 마커의 정의는 어떤 특정 원예적형질을 대변하는 유전자 그 자체의 DNA 염기서열 일부, 또는 그 유전자와 매우 가깝게 위치하고 있는 DNA 염기서열 일부로서(그림 19) 유전자형이나 표현형을 대신해 주는 역할을 한다. DNA 마커를 분자표지, 분자마커, 연관마커 등으로도 표기되는데 실제 유전자를 찾기 쉽지 않아서 대부분 유전자와 근접해 있는 연관마커를 사용하게 된다. 고추의 반점세균병 저항성 유전자 *BS2*의 연관마커(그림 20)를 예로 들 수 있는데 저항성 유전자로부터 0.9 cM¹⁾ 떨어져 있는 유전자위에서 특정 염기서열을 확보하여 연관마커로 사용하고 있다. 저항성 마커, 이병성 마커, 그리고 저항성이지만 hetero 상태의 마커를 선발하고 DNA 마커를 인식할 수 있는 방법인 PCR(polymerase chain reaction 중합효소 연쇄 반응)을 통해서 마커의 패턴을 볼 수 있다(그림 21).

1) cM(centi Morgan, 센티모르간): 유전학에서 염색체 상의 표지(마커, 또는 유전자)들 사이의 유전자 재조합(recombination) 발생 빈도를 나타내는 단위임. 1cM은 한 유전자 위치가 다른 유전자 위치와 교차(crossing over)에 의해 서로 분리될 가능성이 1%임을 뜻함. 1cM은 고추에서 평균 100만 염기쌍과 동일하다.

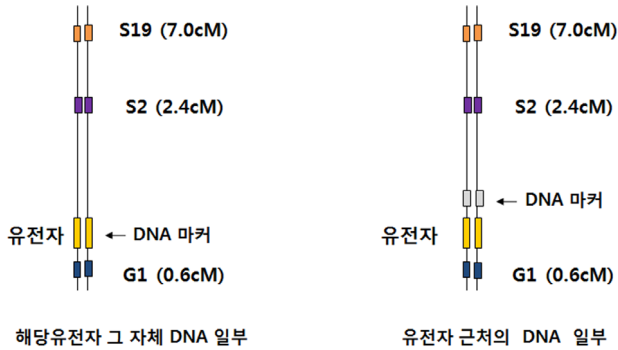


그림 19 DNA 마커의 정의. 원예적 형질을 나타내 주는 유전자의 염기서열 일부 또는 그 유전자 근처에 있는 염기서열의 일부. 유전자 근처에 있는 염기서열의 일부를 연관마커라고 한다

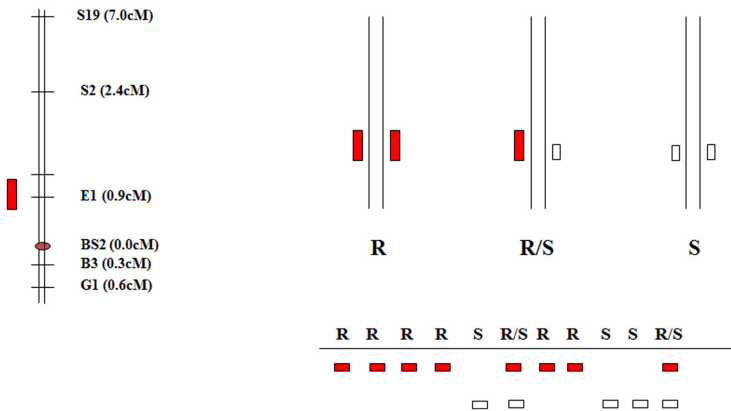


그림 20 고추 BS2의 연관마커의 모식도. 저항성, 이병성 고추 집단을 확보하여 실제로 내병성 유전자로부터 0.9 cM 떨어진 부위에서 연관마커를 확보하였음.
R: resistance, 저항성; S: susceptibility, 이병성; R/S: 저항성 hetero.
M: marker로서 젤상에서의 DNA 크기를 표시; F1: 제 1대 교잡종; F2: F1을 자가수분시킨 그 다음대의 개체들

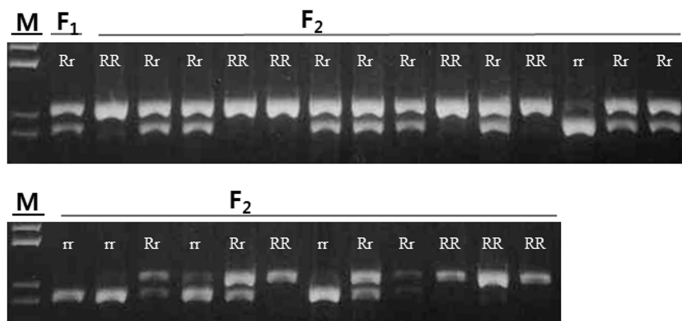


그림 21 DNA 마커를 PCR primer(프라이머: 상보적 짧은 DNA 결합체)로 사용해서 PCR을 수행한 다음 2% 아가로스 젤로 전기영동을 한 모습. F1과 F2 집단의 각 개체별로 조사한 실험. RR: 저항성, Rr: 저항성, hetero 상태, rr: 이병성. 따라서 각 개체별 저항성 유무를 판정할 수 있으며 본 실험은 육묘기 때 할 수 있기 때문에 포장에 나가 정식을 하기 전에 1차 선발이 가능하게 된다. 이로서 DNA 마커 활용은 시간절약, 비용절약이 됨으로서 육성에 많은 기여를 하고 있다

상기의 경우 SSR(simple sequence repeat) 마커를 사용했는데 이외에도 목적에 따라 여러 마커를 사용할 수 있다(표 13). 최근 들어서 사용하는 마커는 SNP(single nucleotide polymorphism, 단일염기다변형)로서 염기서열 1개 차이를 정확히 분별할 수 있어서 여러 기능에 적용하고 있다. 종자기업에서는 주로 SSR이나 SNP 마커를 이용하여 가) 내병성(바이러스, 세균, 곰팡이 내성 등), 나) 기능성(색, MS [male sterile: 웅성불임]; SI [self-incompatibility: 자가불화합성 등]), 다) 품종 유사성 구별, 라) 대량 순도검정 등에 활용하고 있다. 즉 DNA 마커는 종자기업에서 종자개발, 종자 품질조사에 필수로 사용되고 있다고 해도 과언이 아니다.

표 13 DNA 마커의 종류

DNA 마커 종류	약자 풀이
RAPD	Random Amplified Polymorphic DNA
AFLP	Amplified Fragment Length Polymorphism
ISSR	Inter Simple Sequence Repeats
SRAP	Sequence Related Amplified Polymorphism
NBS-LRR	Nucleotide Binding Site-Leucine Rich Repeat Region
RAMP	Random Amplified Microsatellite Polymorphism
SSCP	Single Strand Conformation Polymorphism
SSR	Simple Sequence Repeat
SNP	Single Nucleotide Polymorphism
SCAR	Sequence Characterization Amplified Regions
CAPS	Cleaved Amplified Polymorphism Sequence

5.2.3 유전자변형(genetically modified)기술

(1) GM기술

외부 유전자(transgene)를 대상 식물체에 삽입하여 그 유전자의 특성을 갖게 하거나 식물체 내부 유전자를 변형하여 그 유전자의 발현을 약하게 하는 유전자변형 기술이다. 다국적기업에서 옥수수와 콩을 중심으로 지난 20여 년간 상업화를 하였고 전체 종자시장의 약 30% 정도 차지하고 있다. GM 품종을 개발하고 판매할 때까지 매우 어려운 첨단기술이 융합되기 때문에 이를 수행할 수 있는

국내 기업 인프라가 없다. 따라서 국내에서도 GM종자가 다수 개발되었으나 상업화된 적이 없는 것이다. 실제로 재배허가를 받는 것 자체가 일반 시민연대의 반대에 부딪쳐서 어려울 것이라는 것이 정평이다. 따라서 식량안보를 위해서 어쩔 수 없이 국내에서는 가공용, 사료용으로 GMO를 수입하고 있으며 그 양은 무려 일년에 약 3조원이나 된다. 국내는 해당 GMO가 없기 때문에 앞으로 10년 내에도 수입대체가 불가능하다는 것은 슬픈 현실이다.

그림 22는 가장 전형적인 GMO 삽입유전자를 보여주고 있다. 일반적으로 형질전환을 할 때 유전적으로 고정된 계통을 사용하며 이는 향후 선발과 고정을 간편하게 하기 위함이다. 그림 23은 고추 내 *Cry1Ac1* 유전자를 넣어서 담배나방 저항성 GM고추를 개발한 경우이다.

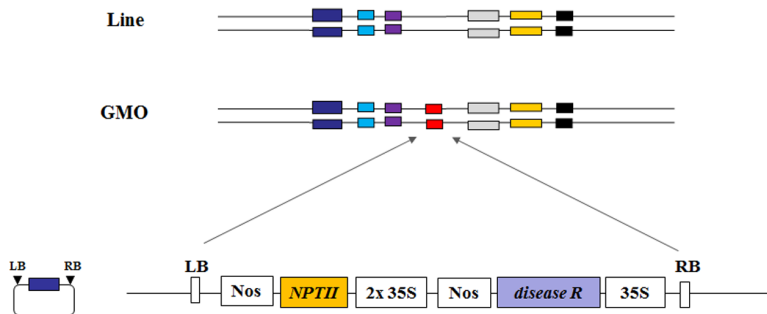
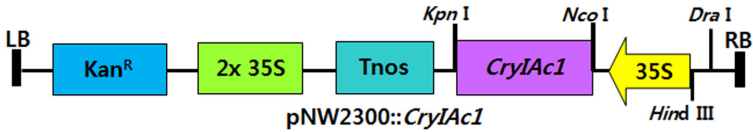


그림 22 벡터를 이용하여 LB-RB 안에 있는 유전자가 일반 계통에 삽입하게 됨(빨간 박스). LB: left border; RB: right border. LB-RB가 식물유전체에 삽입되면 Kanamycin 저항성 유전자인 NPTII가 35S promoter(프로모터, 촉진유전자)에 의해 발현될 것이며 병저항성 유전자인 disease R 역시 35S promoter에 의해 발현될 것이다. Nos: 터미네이터



Control

GM (T₁)

그림 23 *CryIAC1*는 박테리아인 *Bacillus thuringiensis*(토양박테리아로서 곤충병원균)로부터 추출한 유전자로서 Crystal protein(크리스탈단백질)을 만들며 나비목 해충의 소장을 크리스탈화하여 특히 유충을 죽게 하는 역할을 한다. *CryIAC1* 유전자를 고추에 삽입하여 담배나방에 저항하는 GM고추를 개발하였고 이를 유전적으로 고정한 연구결과이다. LB-RB가 GM고추 유전체내에 삽입되어 있으며 본 GM고추는 담배나방에 저항성을 갖고 있다. Tnos: 터미네이터; pW2300: 유전자를 식물에 운반하는 벡터; Kan^R: 카나마이신 저항성 유전자; KpnI, NcoI, DraI, HinIII: 제한효소 종류. Control: GMO가 아닌 정상 고추; GM(T₁): 유전자변형고추 제 1세대

(2) GMO의 장단점

GM작물의 재배면적은 지난 20년간 매년 증가하고 있으며 시장규모도 153억 불에 달함으로서 작물 육성을 비롯한 산업 전반에 걸쳐 GMO의 보편적 가치가 매우 중요한 이슈가 되고 있다.

그러다 보니 개발 그 자체가 마치 스마트폰이나 신형자동차 처럼 1-2년간 예산만 집중하면 누구나 쉽게 만들 수 있는 것처럼 생각하기 쉬운데 실상은 그렇지 않다. 한 점의 GMO를 개발하기 위해서는 여러 복잡하고 어려운 과정을 거쳐야 한다. 첫째는 전 과정이 매우 복잡한 파이프라인으로 되어 있으며 하나가 성공해야 그 다음 단계로 갈 수 있고 각 단계마다 여러 작은 단계를 통과해야 하며 첨단생명공학기술 및 육종기술이 요구되기 때문이다. 둘째는 오랜 시간과 많은 경제적 뒷받침이 필요하다는 점이다. 품종을 육성하는데 최소 8-10년이 걸리는데 이 기간 외에도 위성 평가기간이 최소 약 3년, 그리고 안정성이 입증된 GMO가 재배허가를 받고 사회적 합의 및 논란을 거쳐서 실제로 상업화하기 위해서는 몇 년이 더 소요된다.

농업생명공학 응용을 위한 국제서비스(ISAAA: International Service for the Acquisition of Agri-biotech Application)의 보고에 의하면 한 개의 새로운 유용특성을 발굴하고, GM작물을 개발하여 상품화하는데 드는 비용이 1억 3천 5백만불(한화 1천 5백억 원)이라고 한다. 그러나 이것은 무에서 유를 창조하기 위한 모든 단계를 합친 경우이고 기존에 있는 유전자를 이용하여 작물과 계통을 달리할 경우, 이미 다국적기업처럼 파이프라인이 구축되어 있다면 1개의 GM작물을 상업화 하는데 4백억 원 정도의 비용이면 가능하다. 그러면 한국 내에서는 어떨까? 우리는 이렇게 많은 돈을 투자할 수 있는 여건이 전혀 안되어 있으며 다만 외국과 비교하여 인건비나 연구비용, 시설을 작게 할 수는 있다.

국내에서 이미 형성된 인프라를 활용한다면 약 10년간 최소비용으로 총 100-150억 원을 집중 투자하면 1개의 GM작물을 개발에서부터 상품화까지 가능할 수 있다고 사려 된다.

왜 이렇게 많은 경비와 시간을 투자해서 GM작물을 개발하려고 하느냐? 라고 질문이 나올 수 있는데 결국 그 장점으로서는 첫째 이 기술로 창출되는 고부가가치 때문인데 친환경, 생산성, 고품질 등 부가가치가 매우 높은 품종을 개발할 수 있기 때문이다. 둘째는 유전자원의 한계 때문에 새로운 품종을 개발할 수 없는 반면 GM기술의 적용으로 무한한 가능성을 확보할 수 있기 때문이다. 예를 들어서 건조한 사막기후에서, 열대우림에서, 추운 극지방에서, 해수에서, 우주에서 재배가 가능한 작물을 관행육종방법으로는 안되지만 GM기술로서는 가능하다는 것이다. 셋째는 GM기술로 의약, 건강기능소재, 에너지 등 여러 산업과 연계되어 신시장을 창출할 수 있기 때문이다.

한국에서는 GM작물에 대한 일반인들의 인식이 아주 나쁘게 작용하고 있어서 한국 내에서 개발하고 상업적으로 재배하여 판매하는 것은 현재 불가능하다. 실제로 개발된 GMO에 대해서 위해성평가 후 재배허가를 받더라도 과연 GMO를 재배할 수 있는 간(肝)큰 기업이 없을 것으로 본다. 위해성평가를 통과하여 안전하더라도 사회적으로 안전성을 인정받지 못한다는 것이다. 다만 GMO를 수입한 다음 가공하여 사료나 특정한 성분의 식재료로서 사용하거나 판매되는 것은 무방하다.

5.2.4 국내외 종자기업에서 보유하고 있는 육종기술 및 활용정도

한국의 관행육종기술이나 DNA 마커를 활용하는 분자육종기술은 국제경쟁력이 있어서 세계 상위 대열에 있다고 해도 과언이 아니다(표 14의 기술 1-7). 다만 국내에서는 생명공학기술(표 14의 기술 8-20)을 육종에 접목하는 새로운 육성방법은 늦게 도입이 되었다. 또한 도입이 되었다 해도 활용을 할 수 있는 여건이 되어 있지 않은 기술도 있다. 따라서 국내 종자기업이 보유하고 있는 기술들은 다양한 기술적 시너지와 첨단 기술인프라를 확보하고 있는 외국 다국적기업과는 경쟁이 되지 못한다. 또한 국내에서는 GM기술을 활용하여 경쟁력이 있는 신품종을 개발한다는 것 자체가 요원한 상태이다. 최근에 저비용으로 GMO에 버금가는 특성을 지닌 non-GMO를 개발할 수 있는 유전체편집 기술이 등장하여서 이 기술을 적극적으로 적용하거나 기존 존재하고 있는 기술을 잘 융합하여 새로운 품종개발 방안을 구축할 필요가 있다. 외국기업에서는 첨단 ICT(정보통신)기술과 생명공학기술들이 육종에 사용되고 있어서 실상 이들 자체가 육종기술로 간주된다. 즉 특정 기술이 육종기술에 접목되면 자연스럽게 육종기술이 되는 것이다.

표 14 주요 육종 기술으로서 국내외 육종기업에서 육성에 활용하고 있는 정도

	기술 종류	활용 유무	
		한국	선진국, 다국적기업
1	일반 교배육종	0	0
2	여교배	0	0
3	잡종강세	0	0
4	DH(double haploid, 배가반수체) & ploidy analysis(배수체분석)	0	0
5	돌연변이(방사선, 화학물질)	0	0
6	DNA 마커개발	0	0
7	MAS(marker-assisted selection, 마커를 이용한 선발)	0	0
8	MAB(marker-assisted backcrossing, 마커를 이용한 여교배)	한국에선 1-2개 회사만 활용	0
9	대용량 마커분석	한국에선 1개 회사만 활용	0
10	Genetic fingerprinting for stock seed (원종에 대한 유전자감정)	한국에선 1개 회사만 활용	0
11	병리연구 및 병동정	0	0
12	물질대사연구	0	0
13	유전자 발굴 및 기능분석	0	0
14	GBS(genotyping by sequencing), GWAS (genome-wide association study)	한국에선 1개 회사만 활용 또는 아웃소싱	0
15	GMO 개발기술 및 위해성평가기술	기술은 가지고 있으나 상업화 전무	0

식량생산 제고를 위한 신(新)육종기술

	기술 종류	활용 유무	
		한국	선진국, 다국적기업
16	세포융합기술	한국에선 1개 회사만 활용	0
17	유전체편집기술	한국에선 1개 회사만 활용	0
18	Phenotyping(표현체)기술	X	0
10	Tilling analysis(틸링돌연변이분석)	X	0
18	ICT(정보통신기술), Big data(빅데이터) 활용	X	0
19	Cisgenesis(동종기원)	X	0
20	Reverse breeding(역교배)	X	0

한국의 종자기업들은 대부분 영세하여 상기 표 14의 기술 1-5 정도에서 멈추어 있고 마커를 이용한 육종을 할 때는 다들 아웃소싱을 한다. 기업자체 스스로 투자를 통해서 마커육성 연구인프라를 구축하기에는 한계가 크다. 표 14에서 보는 것처럼 국내 기업중에서 모든 기술을 활용할 수 있는 기업은 없으며 특정 생명공학기술을 활용 가능한 기업조차 1개 회사정도로 극히 드물다. GMO 기술은 있으나 여러 이유와 사정으로 상업화를 못 하고 있는 실정이다. 특히 기업자체가 규모상 영세기업이 대부분이고 phenotyping(표현체) 기술, 빅데이터 활용, cisgenesis(동종기원)

나 reverse breeding(역육종)에 관한 내용은 정보조차 익숙하지 않아서 실용적으로는 감히 접근하기 쉽지 않다.

최근 들어서 국내에서도 마커를 이용하여 품종개발에 활용하는 트렌드가 활발해지고 있으며 대학이나 국가연구기관, 일부 마커관련 벤처기업에서 특정한 형질관련 연관마커를 개발하고 있다. 그리고 GSP(golden seed project) 사업이나 차세대바이오그린 사업 같은 국가연구출연금이 이를 지원하고 있어서 다행이다. 따라서 영세기업도 마커활용을 하는데 돈만 있으면 충분히 작물 육성에 적용할 수 있게 되어 있다.

5.3 식량생산 제고를 위한 육종의 당위성

선진국 중에 농업이 발달되어 있지 않는 나라는 없다. 우리가 선진국 대열에 접하기 전에 반드시 인지해야 할 것은 종자산업이 더 이상 과거 3D 업종이 아니라는 사실이며 오히려 최첨단 장치 산업으로 탈바꿈하고 있다는 것이다. 실제로 국제적으로 빠르게 성장하는 종자산업을 이해하고 대응하기 위해서 여러 정책이 요구되는 실정이다. 표 14의 기술 중에 국내기업이 엄두를 내지 못하는 기술들에 대해 식량안보, 식량정책 차원에서 집중적으로 지원해야 할 기술들을 선별해야 한다.

과거 F1 개발 및 이에 따른 수확량 증가, 비료와 농약 개발 및 이용 등으로 획기적인 생산성 증대, GMO 등장으로 과거 만들어지지 못했던 특정한 신품종 등의 공통분모는 기술개발이다.

육종 기술개발을 통해서 가) 식량-가축 생산 극대화, 나) 다양한 먹거리창출, 다) 인간수명연장, 라) 인류 번영에 미친 영향이 매우 크다고 본다.

앞으로 국가적으로 식량생산 경쟁에서 살아남기 위해서는, 1) 농업생산량 제고, 농식품산업 발전을 위한 전략이 필요하고, 2) 생산성과 품질제고를 위한 새로운 육종기술개발이 필수이다. 따라서 첨단육종 기술개발과 활용이 무엇보다도 중요하다. 특히 기후환경 내성, 내병해충성, 건강·의약기능성, 생산성(광합성 등), 고품질, 육성기간과 비용단축, 재배용이성 등에 필요한 품종이 요구되며(그림 24) 이들을 개발하기 위해서는 첨단육종기술이 우선 개발되고 활용되어야 한다.

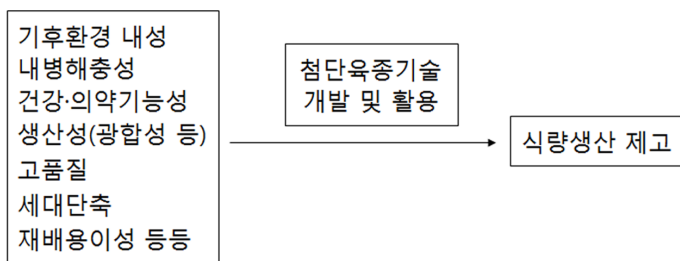
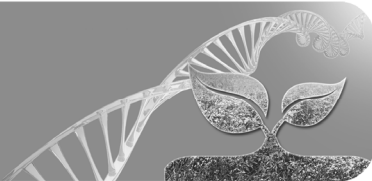


그림 24 식량생산제고, 필요형질, 기술활용과의 관계



6.1 유전체편집기술

유전체편집기술(Genome editing)은 유전체교정, 유전자편집, 유전자교정, 유전자가위 등 같은 기술을 여러 표현으로 사용하고 있으며, 농업생명공학에서는 유전체의 특정 염기배열을 인위적으로 결손하거나 삽입하여 새로운 형질을 얻게 함으로서 유용한 품종 및 작물을 개발하는 것을 목적으로 한다.

6.1.1 필요성 및 개요

육종가가 필요로 하는 유전자형을 만들어 내는 기술의 필요성이 높아짐에 따라 지금까지 알려진 유용한 기능의 유전자를 활용하여 새로운 유전자원을 만드는 방법, 즉 형질전환에 의한 유전자변형(GM)기술이 개발되었으나 GMO는 상대적으로 품종으로서의 높은 규제 벽, 상업화를 위한 천문학적 비용, 육성기간 및 활용 작물범위가 제한되어 있다. 최근 화두인 유전자가위라는 분자생물학도구를 사용하여 수행되는 유전체편집(genome editing) 기술의 경우, 기초과학과 의학 및 농축산 등 생명과학의 전분야

에 중요한 핵심 첨단 기술로 주목을 받고 있게 되었다. 유전체편집 기술은 2011년 Nature Methods에서 올해의 기술, 그리고 2013년에 breakthrough of the year의 runner-up으로 선정(Science)되면서 인간을 포함한 동물, 미생물 학계의 넓은 관심을 반영하고 있다.

기존 ZFN(Zinc-Finger Nuclease), TALEN(Transcription Activator-Like Effector Nuclease)이라는 유전체편집기술 외에 최근 CRISPR/Cas9(또는 RNA-Guided ENdonuclease, RGEN)이라는 새로운 유전자가위가 개발되어 유전체에서 정교하게 원하는 위치를 안전하게 세포 내에서 절단 할 수 있게 됨으로서 맞춤형 육종에 획기적 활용이 가능해 졌다. CRISPR/Cas9는 2015년 생물학 분야에서 가장 혁신적인 연구 성과를 지정하는 “2015 Breakthrough of the Year”에 선정되었다(그림 25) (Travis J. 2015, Science News).¹⁾



그림 25 유전자가위가 2015년 혁신성과라는 이미지(Science)¹⁾

1) Travis J (2015) Making the cut. CRISPR genome-editing technology shows its power. “2015 Breakthrough of the Year” Science 350:1456-1457

이 기술이 작물 육종분야에 최근 이용되기 시작하였으며 향후 새로운 육종 기술로 자리 매김할 것으로 사려 된다. 국내에선 틀젠이란 벤처회사에서 CRIPR/Cas9 complex(혼합체)를 구축하여 세계 top 수준의 기술특허를 보유하고 있다. 국내 바이오업계와 종자업계가 협업과 융합을 통하여 새로운 영역을 구축할 필요가 있다. GMO가 가지고 있는 특성만큼 우수한 형질을 유전자편집 기술로 대신하여 non-GMO를 개발함으로써 GMO 대체산물을 개발할 수 있으며 이외에도 여러 가지 신품종 개발에 본 기술을 활용할 수 있다.

6.1.2 CRISPR

CRISPR은 Clustered Regularly Interspaced Short Palindromic Repeats의 약자(그림 26)이고 cas9의 cas는 CRISPR associated gene의 약자로 번역을 하면 “주기적으로 간격을 띠면서 분포하는 짧은 회문구도 반복서열”이다. 여러 세균의 유전자 전체를 분석해 보면 어떤 서열은 종의 구분 없이 반복되는 회문구조의 염기 서열이 공통적으로 관찰되는데 이것들은 세균이 바이러스

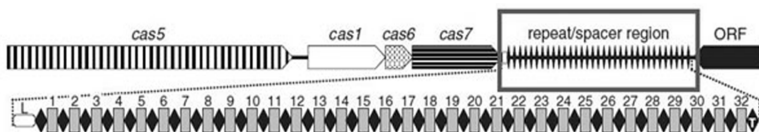


그림 26 염기서열이 반복되어 있는 repeat/spacer 지역

에 저항할 때 필요한 면역역할을 하고 있다. 예를 들면 유산균이 박테리오파지(바이러스)에 감염되면 다 죽는데 이 때 일부 살아남는 유산균은 박테리오파지에 내성을 가지고 있으며 그 내성역할에는 CRISPR이란 반복염기서열이 작용한다는 것을 알게 되었다. 즉 유산균은 박테리오파지가 침투했을 때 그 DNA를 잘라 자기 유전체에 반복적으로 융합한 뒤 박테리오파지가 다시 침입하면 박테리오파지의 DNA를 상보적으로 인식하여 면역반응을 나타낸 것이다.¹⁾

6.1.3 CRISPR/Cas9 유전자가위의 탄생

바이러스와 박테리아의 관계로서 바이러스가 하는 일은 박테리아에 감염, 증폭, 용해 작용을 하는데 바이러스가 박테리아에 삽입되어 증폭될 때 바이러스 유전체일부가 박테리아 유전체 일부에 삽입하게 된다(그림 27). 이런 행위는 바이러스와 박테리아간에 일반적인 현상이며 상기에서 언급했다시피 CRISPR은 바이러스의 유전자를 자를 수 있는 면역작용이 있다는 것이 밝혀졌다.

이후 세균에 기억된 바이러스 DNA가 RNA로 전사되고, 이것이 세균에 있는 Cas9 단백질과 결합해 외부에서 침투한 바이러스의

1) Barrangou, R., C. Fremaux, H. Deveau, M. Richards, P. Boyaval, S. Moineau, D. A. Romero and P. Horvath (2007). "CRISPR provides acquired resistance against viruses in prokaryotes." Science 315:1709-1712

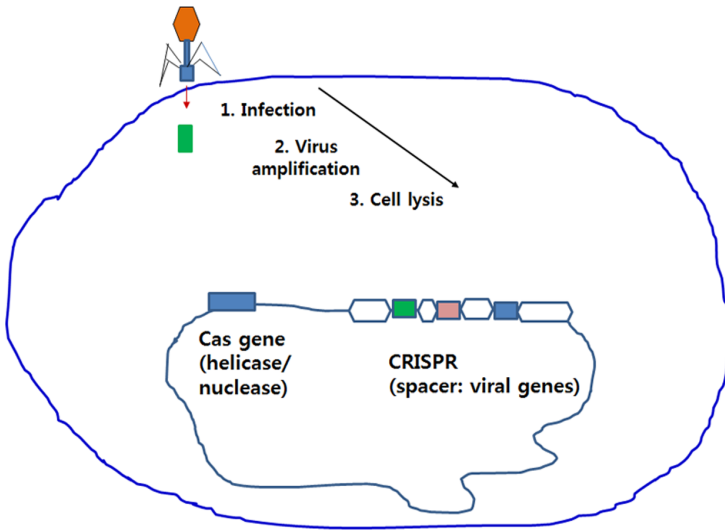


그림 27 바이러스와 박테리아와의 관계 [바이러스는 박테리아에 침입을 하며(1. virus infection), 박테리아 내부에서 증식을 하고(2. virus amplification), 박테리아를 용해(3. cell lysis)하면서 밖으로 확산된다]

DNA를 인식해 잘라준다는 사실을 밝혀내면서 Cas9 단백질이 규명된다((Jinek et al., 2012, Science; J. Doudna & E. Charpentier 공동실험)¹⁾(그림 28).

1) Jinek M, Chylinski K, Fonfara I, Hauer M, Doudna JA, Charpentier E (2012) A programmable dual-RNA-guided DNA endonuclease in adaptive bacterial immunity. Science 337(6096):816-21. doi: 10.1126/science.1225829.

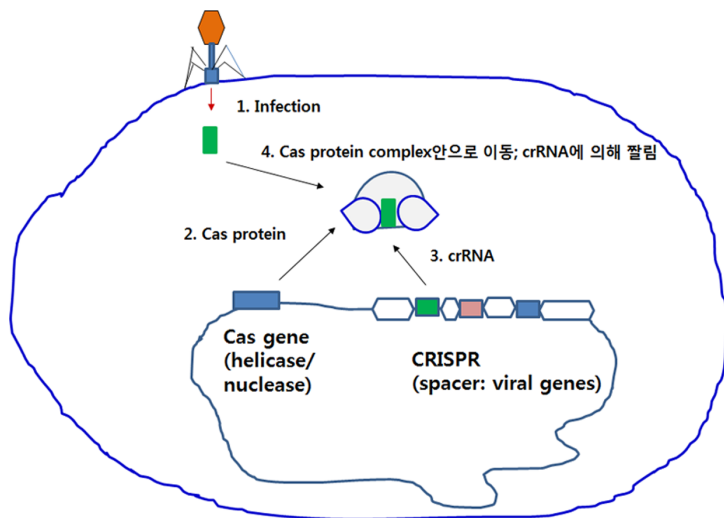


그림 28 바이러스가 박테리아 침입 후 발생하는 일련의 과정. 바이러스 유전체가 박테리아로 침입하면, 박테리아 유전자 Cas gene이 Cas 단백질을 만들어내고 Cas protein complex(혼합체)를 형성하게 된다. 또한 박테리아의 CRISPR 좌위에서 crRNA가(3)만들어진 다음 Cas protein complex 안으로 이동한다(4). 침입한 바이러스 유전체는 Cas protein complex에서 crRNA의 RNA와 상보적으로 만나고 Cas protein에 의해 잘리게 된다. 이렇게 함으로서 바이러스의 감염으로부터 바이러스의 증폭을 막게 된다. 일종의 박테리아의 면역 반응이며 방어 전략인 셈이다

Cas 유전자는 helicase와 nuclease 2개의 기능을 가지고 있다. Spacer는 박테리아 유전체에 오래전서부터 유입되어 정착된 바이러스 유전자들이다. 특정 바이러스가 침입해 들어올 때 바이러스 유전자와 spacer간의 동일성 또는 유사성이 있으면 그 부위가 crRNA를 만들게 된다.

그들은 나아가서 Cas9에 결합하는 RNA를 바꾸면 바이러스의 유전자가 아닌 다른 유전자 서열도 자를 수 있다는 사실을 확인하였다. 즉 목표로 하는 유전자의 상보적 RNA를 CRISPR에 붙이고 안정적으로 Cas9 단백질에 유지될 수 있도록 tracrRNA를 만들어주는 것이다.

따라서 타겟(목표) 유전자는 Cas9 complex에 들어가서 상보적 crRNA와 만나고 2중나선으로 되어 있을 때 Cas9 단백질이 nuclease역할을 하면서 목표유전자를 자르게 된다(그림 29 A, B). 이런 연구에 기초하여 전 세계 많은 실험실에서 CRISPR/Cas9 complex를 활용하여 다양한 돌연변이체를 만들기 시작하였다. 그리고 CRISPR/Cas9 유전체편집기술은 사람, 동물, 농작물, 어류, 곤충, 미생물 등의 여러 생물체를 상대로 많은 연구가 진행 중이다.

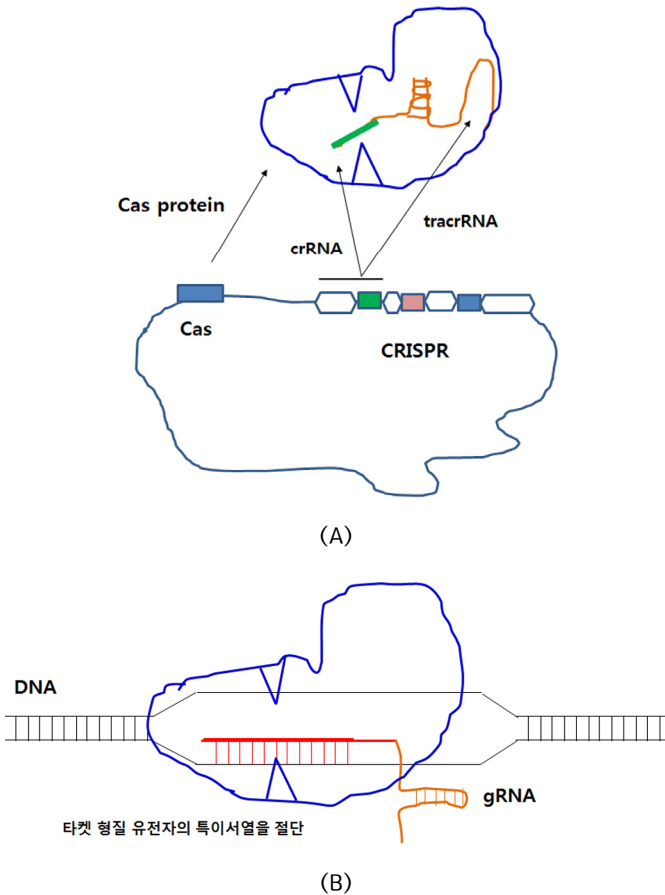


그림 29 A: CRISPR/Cas9 유전자가위. 특정 DNA 염기서열 또는 유전자(녹색박스)가 타겟이 될 경우 인위적으로 crRNA와 tracrRNA가 만들고 Cas9 protein내에서 complex를 형성함. B: 타겟유전자는 상보적으로 crRNA와 만나고 이중나선(double strand)상태로 되었을 때 Cas9이 특정부위를 자르게 된다. crRNA: a target-specific CRISPR RNA; tracrRNA: a target-independent trans-activating crRNA; crRNA와 tracrRNA는 합쳐져서 a single-chain guide RNA, 즉 gRNA라고 불리운다

6.1.4 CRISPR/Cas9 유전자가위의 활용

(1) 실용화를 위한 기술적 접근

그동안 품종육성의 한 방법으로 인위적인 돌연변이 연구를 통해 많은 유전자원이 만들어져왔다. CRISPR/Cas9도 나름 돌연변이 기술이지만 기존에 행해졌던 random(무작위)형식의 돌연변이가 아니다. 정확하게 특정 유전자를 타겟할 수 있어서 매우 효과적이다. 또한 대부분의 작물에 대해서 유전체정보가 확보되어 있기 때문에 어떤 작물의 특정 유전자를 타겟하는 돌연변이(gene target mutation) 구축이 가능하게 된 것이다.

작물에 활용하기 위해서는 그 작물의 원형질체(protoplast)가 필요하며 그 원형질체로부터 재분화하여 식물체로 만드는 절차가 요구되는데 실험실상에서 그리 어려운 일이 아니기 때문에 문제가 크게 되지는 않는다. 또한 특정한 타겟 부위를 가지고 CRISPR/Cas9 complex를 만드는 것도 이제 아웃소싱을 줄 수 있어서 편하다. 따라서 CRISPR/Cas9 유전자가위 기술을 이용하여 돌연변이체를 개발하는 연구업무는 실험실에서 빠르게 활성화 될 수 있기 때문에 아마도 향후 PCR처럼 일반화 될 확률이 높은 아주 편리한 기술일 것으로 사려 된다(그림 30). 또한 재분화된 유식물체도 DNA 마커를 이용하여 쉽게 선발이 되기 때문에 여러 기술들을 통합하게 되면 새로운 유전자원, 특히 정확히 타겟되어 원하는 개체를 확보할 수 있어서 그 연구결과에 대한 기대가 크다.¹⁾

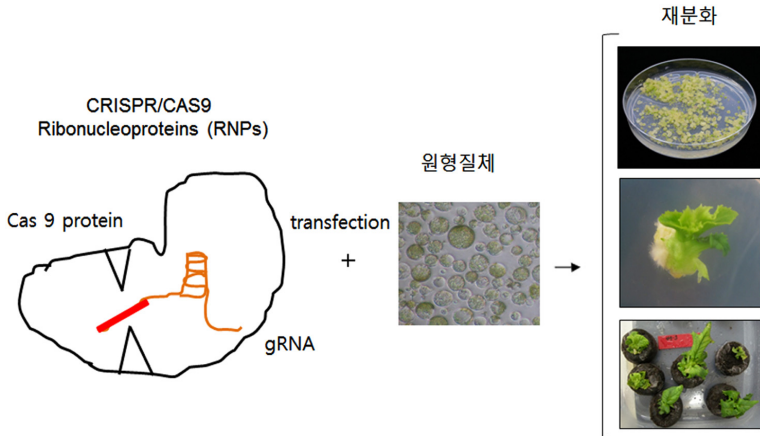


그림 30 CRISPR/Cas9 시스템을 식물에 도입하여 새로운 유전자원을 개발하는 과정.

Ribonucleoprotein: RNA와 단백질이 합쳐져 있는 혼합체. Transfection (형질주입): DNA 또는 RNA를 배양세포 또는 세포의 현탁액(懸濁液)에 도입하여 세포내 유전체에 삽입되는 과정

(2) 국내외에서의 이용 정도

<국 외>

외국에서는 이미 유전체편집기술이 학문적으로 지난 10여년간 연구가 진행되었으며 시기적으로 차이가 있지만 4개의 세대로 구분되어진다(표 15).

- 1) 재분화(regeneration): 식물세포는 동물세포와 달리 충분한 영양과 조건을 갖추어 세포배양을 하게 되면 세포가 배양되어 조직을 만들게 되고 그 조직에서 기관이 형성됨. 실제 세포를 분리한 식물체와 동일한 식물체를 만들 수 있음. 식물세포의 이런 능력을 개체형성능(totipotency)이라고 하며 작물 육종에서 매우 유용하게 사용하는 조직배양기술이다.

표 15 세대별로 나누어진 endonuclease 기술

세대	Endonuclease
ZFN(1세대)	Zinc-Finger Nuclease
TALEN (2세대)	Transcription Activator-Like Effector Nuclease
CRISPR/Cas9 (3세대)	- CRISPR: Clustered Regularly Interspaced Short Palindromic Repeats - Cas9: CRISPR associated 9 gene, endonuclease - RGEN: RNA guided endonuclease
CRISPR-Cpf1 (4세대)	Cpf1: 포도상구균에서 발견한 endonuclease. Cpf1은 Cas9보다 훨씬(1/3) 작은 미니 효소이기 때문에 성숙한 세포 속으로 쉽게 들어갈 수 있다는 장점이 있음
* 1-3세대까지 잘 알려져 있었으나 최근에 4세대인 Cpf1 효소가 밝혀져서 연구 중에 있음	

Endonuclease 효소는 DNA를 절단하는 기능이 있으며 최근에 CRISPR/Cas9을 통하여 정교하고 좀 더 간단하게 유전자를 자르거나 삽입할 수 있어서 지난 수년간 유전체의 돌연변이 연구에 엄청나게 활용을 하고 있다. 특히 식물종으로는 모델식물인 애기장대와 벼를 비롯하여 토마토, 담배, 밀, 옥수수, 콩, 버섯 등으로 유전체 교정 기술이 성공적으로 이용되었다. 유전체 편집 기술을 다양한 식물에 적용한 목적은 각 식물에서 이러한 기술이 적용되는 지를 확인하는 것도 있지만, 궁극적으로는 농업형질 개선을 위해 불필요한 유전자 기능을 마비시키는 것이다. 상업화가 가능한 작물의 대표적인 성공사례로서 옥수수와 버섯을 들 수 있다.



그림 31 CRISPR/Cas9 기술로 PPO(polyphenol oxidase) 유전자를 변이로 만들어서 색깔이 갈색으로 변하지 않는 버섯 변이체

펜실베이니아 주립대학의 식물 병리학자인 Yinong Yang은 CRISPR-Cas9 기술을 이용하여 양송이(*Agaricus bisporus*) 버섯이 갈변하지 않도록 만들었다(그림 31). 이러한 형질 변화는 버섯의 외관을 좋게 만들고 보관 기간을 늘려주게 된다. Yang은 여러 과일과 채소들에서 갈변을 유발시키는 효소인 PPO(polyphenol oxidase)를 인코딩하는 유전자 6종 중 하나의 기능을 결실 시켜 이런 효과를 냈다. 이에 미 농무부는 “유전자편집 기술을 이용해 만든 버섯은 GMO와 같은 규제를 받을 필요가 없다”고 밝혔다(Waltz E, 2016, Nature 뉴스).¹⁾ 따라서 이 버섯은 ‘크리스퍼’ 방식의 유전

1) Waltz E (2016) Gene-edited CRISPR mushroom escapes US regulation. Nature 532, 293 (21 April 2016) doi:10.1038/nature

체편집 기술로 탄생한 농작물로선 처음으로 GMO 규제를 받지 않게 되었다.

또한 CRISPR 기술을 동원하여 가공식품, 접착제, 고광택 종이와 같은 일상품에 이용되는 다당류인 아밀로펙틴(amylopectin)만으로 구성된 전분을 함유하는 찰옥수수를 듀풍에서 개발했다. 전분은 아밀로스(amylose)와 아밀로펙틴으로 되어 있는데 듀풍 과학자들은 아밀로스(amylose) 합성 효소 유전자인 *Wx1*의 기능을 결손 시킴으로써 옥수수 전분에서 아밀로스가 없고 아밀로펙틴만 생성되는 옥수수를 개발한 것이다(표 16). 이외 기존 유전체편집기술인 ZFN, TALEN 방법으로 개발한 작물은 다양하며 그동안 GMO 규제 대상에서 제외된 농작물은 30여종에 이른다.

표 16 유전체편집기술로 개발된 작물

작물	유전체 편집기술	목표형질	특징	개발자
옥수수	ZFN	IPK	제조제저항성	Dow
옥수수	Mega-nuclease	밝히지 않음	수확량증가	Benson Hill Biosystems
옥수수	Mega-nuclease	밝히지 않음	전분함량증가	Agrivida
옥수수	CRISPR-Cas9	Wx1	아밀로펙틴이 주 성분	Dupont Pioneer
감자	TALEN	Inv	환원당의 감소	Calyxt
벼	TALEN	OS11N3, OS8N3	Bacteria bright 병저항성	Iowa State Univ.
콩	TALEN	FAD2	고함량올레익산과 저함량 리노레익산	Calyxt
콩	TALEN	FAD3	고함량올레익산과 저함량 리노레익산	Calyxt
밀	TALEN	MLO	Powdery mildew 병저항성	Calyxt
버섯	CRISPR-Cas9	PPO	Brown color 저항성	Pennsylvania State Univ.

<국 내>

국내에서는 기초과학연구소(IBS)의 김진수교수와 그가 설립한 툴젠이라는 회사가 유전체편집기술 제 1세대, 2세대, 3세대, 4세대까지 전부 섭렵한 연구업적이 있는데 실제로 세계적으로도 아주 드문 경우이다. 특히 제 3세대인 CRISPR/Cas9을 활용하여 최초로 인간세포에서 유전자 교정을 다룬 것은 한국의 김 교수팀이었다(Cho et al., 2013, Nature Biotechnology).¹⁾ 또한 김 교수팀은 공동연구(연변대 윤희준 교수)로 이 유전자를 제거한 돼지 체세포를 복제해 돼지를 만든 결과 대퇴부가 커져서 근육질의 돼지를 개발할 수 있다는 사실을 확인했다(2015, Nature News).²⁾ 김 교수 팀은 현재, 동물, 식물 등 여러 개체에 본 기술을 통해 유전자교정을 하고 있다. 식물 유전자도 교정하였는데 Cas9 단백질과 RNA만 전달해서 최초로 식물 유전자를 교정해 호르몬 대사 흐름을 바꿀 수 있는 상추를 개발했다(최성화 서울대교수팀과 IBS 김진수교수팀 공동연구, Woo et al., 2015, Nature Biotechnology)³⁾ (그림 32).

-
- 1) Cho SW, Kim S, Kim JM, Kim JS (2013) Targeted genome engineering in human cells with the Cas9 RNA-guided endonuclease. Nat Biotechnol. 2013 Mar; 31(3):230-2. doi: 10.1038/nbt.2507. Epub 2013 Jan 29
 - 2) Cyranoski D (2015) Nature 523:13-14 doi:10.1038/523013a
 - 3) Woo JW, Kim J, Kwon SI, Corvalán C, Cho SW, Kim H, Kim SG, Kim ST, Choe SH, Kim JS (2015) DNA-free genome editing in plants with preassembled CRISPR-Cas9 ribonucleoproteins. Nature Biotechnology 2015; doi:10.1038/nbt.3389

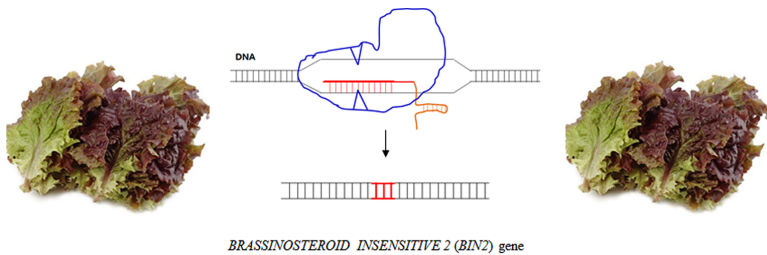


그림 32 상추에서 애기장대의 brassinosteroid(BR) signaling pathway(브래시노스테로이드라는 식물호르몬의 신호전달경로)에 negative regulator(음성 조절자)로 작용하는 *BIN2* 유전자를 타겟하여 CRISPR/Cas9 complex를 만든 다음 상추의 원형질체에다 transfection시킴. *BIN2* 유전자에 변이를 만든 다음 재분화를 거쳐 변이체 상추를 개발함¹⁾. 즉 왼쪽에 있는 상추를 변이시켜서 오른쪽 상추를 만든 것임

또한 주식회사 툴젠은 CRISPR/Cas9 complex를 만들어 주는 아웃소싱 서비스를 통해서 국내 연구자들에게는 여러 연구를 할 수 있는 기회를 제공하고 있다. 이외에도 CRISPR/Cas9 유전자가 위 기술은 지난 약 2년서부터 일반 대학이나 연구기관에서 유전자 기능분석에 사용하기 시작하였다. 과거 GM기술을 이용하여 유전자의 knock-out(유전자제어)이나 유전자를 삽입했던 연구들을 유전체편집 연구로 대신하고 있는 것이다. 그러나 아직 연구 수준이며 종자기업체에서는 (주)농우바이오가 처음으로 유전체 편집기술을 작물의 육종사업에 활용하고 있다.

1) Woo et al., 2015

(3) 경제적·산업적 중요성

그동안 여러 생명공학기술들이 지난 수십 년 동안 이정표 형태로 등장하였다. 예를 들어서 DNA strand sequencing(DNA 염기 분석), Restriction enzyme and cloning(제한효소와 클로닝), PCR (polymerase chain reaction, 중합효소연쇄반응), GM technology (유전자변형기술) 등은 그 연구업적으로 모두 노벨상을 수상하였다. 즉 이런 기술들은 생명공학연구에 커다란 변화를 만들었다. 재미나는 현상은 이런 어마어마한 기술들이 이제는 일반 실험실에서 보편 타당하게 실험 도구로 활용되고 있다는 것이다. 이런 활용 간편성 때문에 모든 산업에 큰 변화가 생겼고 이를 통한 여러 비즈니스들이 다양하게 창출되면서 인류문명발전에 크게 기여를 하게 된 것이다. 결과적으로 상기 기술들은 Red Bio, White Bio, Green Bio 분야가 생기면서 엄청난 산업 시장을 형성하게 되었다(그림 33).

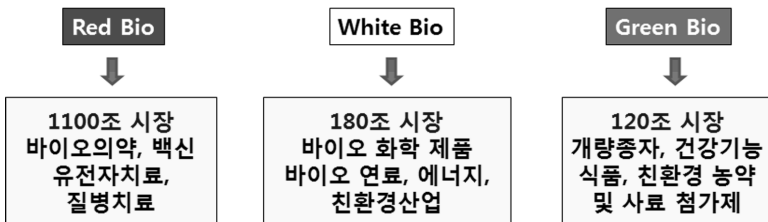


그림 33 생명공학의 발달로 새롭게 생긴 산업

유전체편집 기술 또한 상기 기술 못지 않게 엄청난 기술이다. 상기 이정표를 만든 기술들과 버금가거나 훨씬 더 강력한 기술이다. 동식물 세포의 염기서열을 제거하거나 치환하여 특정 유전자의 기능을 마비시키거나 새로운 기능을 형성하기 때문에 유전자 기능 검정에서부터 인간 유전병 치료에 이르기까지 그 활용 범위가 확대되고 있다. 펜실베이니아 주립대 연구진이 골수종, 흑색종, 육종 등 암 환자의 몸에서 꺼낸 T세포를 유전자 교정하고 복원도입하여 유전자가위 치료에 사용되고 있으며 암환자 치료를 위한 임상시험을 허가받은 상태이다.

식량생산성 제고에도 각광을 받을 것이다. 새로운 품종개발에 새로운 육종방법으로 사용될 것이며 내병충해성, 내환경성, 생산성 등 작물의 개량에 크게 이바지 할 것이다. 특히 교배육성을 하면서 나쁜 형질이 계속 따라다니는 연관유전성(linkage dragging, 연관지체)을 타파할 수 있다. 특정 나쁜 형질의 유전자를 정확히 타겟하여 제거할 수 있는데 과거 관형육종으로서는 감히 엄두도 내지 못하는 육성방법이다. 따라서 사람을 포함 모든 생물체에 적용 가능함으로 그 산업성과 경제성은 계산하기 어려울 정도로 무궁무진하다.

유전체편집 기술은 지금 막 시작을 했다고 봐도 과언이 아니다. 외국과 비교하여 결코 뒤지지 않는 기반을 만들어 갈 수 있기 때문에 식량생산 제고 분야에 충분히 가용될 수 있다. 또한 유전체편집 기술이 좀 더 다양하게 도출될 수 있어서 여러 기본 기술이 잘 정리가 되어 있는 기관은 향후 새로운 분야를 창궐할 수

있다. 예를 들어서 CRISPR/Cpf1 등장으로 제4세대 유전자가위가 최근에 급속도로 연구에 활용되고 있어서 유전자가위 기술이 급속도로 진화하고 있다. 아산생명과학연구원(이상욱·성영훈 교수팀)은 CRISPR/Cpf1을 이용해 암과 면역부전의 생쥐를 만들었다고 밝혔다(Kim Y et al., 2016, Nature Biotechnology).¹⁾

한편 같은 시기에 독립적으로 김진수 교수팀과 툴젠 공동연구에서도 Cpf1 유전자 가위로 생쥐의 특정 유전자를 잘라 내 변이를 일으키는데 성공, 우연히 같은 온라인 판에 함께 논문이 실렸다(Kim D et al., 2016, Nature Biotechnology).²⁾ 이처럼 새로운 화두를 몰고 있는 CRISPR/Cpf1 유전자가위는 Cas9 단백질 대신 Cpf1 단백질을 사용하는데 Cpf1는 2015년에 MIT(브로드 연구소)의 Feng Zhang 그룹이 CRISPR/Cas II 시스템의 RNA 유도 제한효소로 발견한 것이다(Zetsche et al., 2015, Cell).³⁾ 두 가지 박테리아(Prevotella와 Francisella)에서 발견되었으며 Cas9에 비해 분자 크기가 작고 단순해 유전질환 등에 적용하는 데 효용성이 훨씬 크다. 2015년 9월 학계에 최초로 보고된 이후, 최근

-
- 1) Kim Y, Cheong SA, Lee JG, Lee SW, Lee MS, Baek IJ, Sung YH (2016) Generation of knockout mice by Cpf1-mediated gene targeting. Nat Biotechnol. 2016 Aug; 34(8):808-10. doi: 10.1038/nbt.3614.
 - 2) Kim D, Kim J, Hur JK, Been KW, Yoon SH, Kim JS (2016) Genome-wide analysis reveals specificities of Cpf1 endonucleases in human cells. Nat Biotechnol. Aug; 34(8):863-8. doi: 10.1038/nbt.3609.
 - 3) Zetsche B, Gootenberg JS, Abudayyeh OO, Slaymaker IM, Makarova KS, Essletzbichler P, Volz SE, Joung J, van der Oost J, Regev A, Koonin EV, Zhang F (2015) Cpf1 is a single RNA-guided endonuclease of a class 2 CRISPR-Cas system. Cell. 163(3):759-71. doi: 10.1016/j.cell.2015.09.038.

국내 연구진들이 동물에 적용해 세포 내에서의 기능을 확인하고, CRISPR/Cas9에 비해 정확도가 높고 성능이 좋다는 것을 입증한 것이다. 또한 가장 최근에 국내에서 Cpf1 유전자가위 gRNA의 효율 및 정확성을 대용량으로 검증할 수 있는 시스템을 구축하여 비용 및 노동력 절감을 이루어 효율적인 유전자가위 생산을 할 수 있게 되었다(Kim HK et al., 2016, Nature Methods).¹⁾ 즉 기술적으로는 CRISPR/Cpf1에 대한 연구가 국외와 국내 연구진들 간의 기술적 차이가 거의 없다는 것이며 앞으로 식물이나 작물에 활용될 수 있어서 기대가 매우 크다.

(4) 종자기업에서 유전체편집기술을 활용한 향후 목표

- 1) 대사공학: 향후 주요 phytochemical(파이토케미칼, 식물의 대사활성물질, 식물의 생리활성물질) 관련 대사경로에 속하는 효소들은 연구타겟이 될 것이다. 유전체편집기술을 활용하여 물질대사 과정을 적절히 조절함으로써 건강에 좋은 약성물질이 고함량 들어 있는 작물개발을 할 수 있으며 또한 그 물질을 추출하여 건강기능보조제 또는 의약품으로 제조하여 판매가 될 것으로 보인다(그림 34). 예를 들면 카르테노이드 대사경로의 루테인, 라이코펜, 지아잔틴 고함량 토마토나 당근을 유추할 수 있다.

1) Kim HK, Song M, Lee J, Menon AV, Jung S, Kang YM, Choi JW, Woo E, Koh HC, Nam JW, Kim H (2016) In vivo high-throughput profiling of CRISPR-Cpf1 activity. Nat Methods. 2016 Dec 19. doi: 10.1038/nmeth.4104.

Phytochemical manipulation

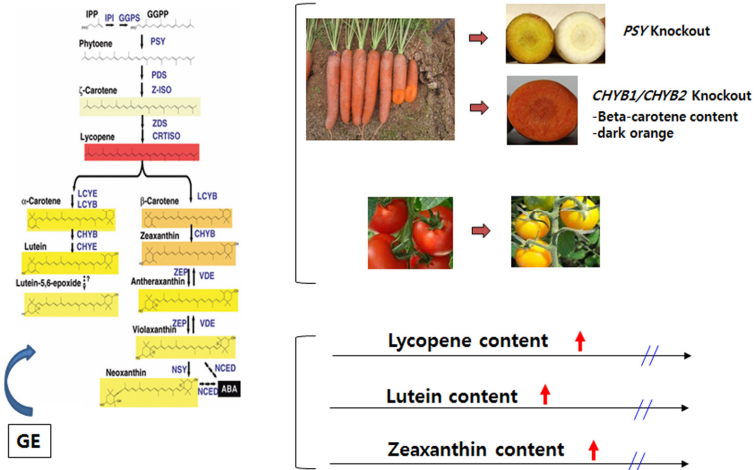


그림 34 GE(genome editing) 방법으로 물질대사의 경로에 있는 많은 효소들을 변형하여 내부적으로 주요 phytochemical을 축적하고자 한다. 이로써 약성이 있는 좋은 성분이 많이 있는 작물을 섭취하거나 정제로 제조할 수 있다. Phytochemical manipulation: 식물생리활성물질의 변형; Knockout: 억제 또는 제거. Lycopene(라이코펜); Lutein(루테인); Zeaxanthin(지아잔틴)

- 2) 다양한 돌연변이에 창출: Multiple 돌연변이를 만들 수 있기 때문에 새로운 유전자원 확보에 좋은 방법이 될 수 있다(그림 35).

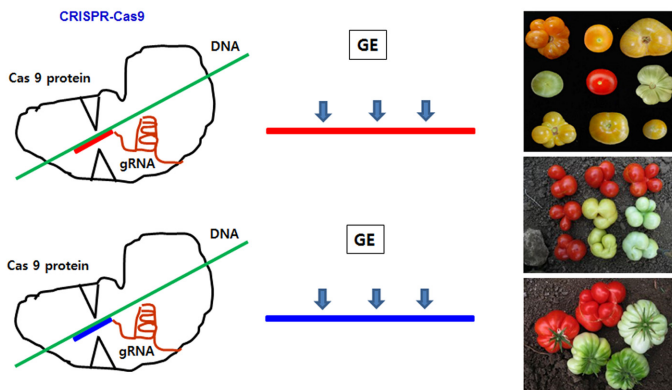


그림 35 다양한 CRISPR/Cas9 complex를 만들어 동시에 트랜스펙션(transfection)을 할 수 있어서 많은 수의 돌연변이 pool(집단)을 만들 수 있음. 따라서 새로운 유전자원을 만드는 좋은 방법이 될 수 있다

- 3) 연관지체: 육성가들이 작물 육종을 할 때 가장 어려운 점이 교배를 한 다음 나쁜 형질이 계속 따라 다니는 경우이다. 이런 경우 linkage drag(연관지체)이라고 하며 이 linkage drag은 유전체편집을 통해서 피할 수 있다. 예를 들어 고추의 *BS2* 저항성 형질이 있는 고추 개체를 다른 고추 개체와 교배시 과일이 작아지는 형태가 계속 따라 온다(표 17). 이런 경우를 없애는 방법은 이론적으로 집단을 엄청나게 크게 만들어서 재조합을 유기하여야 하는데 현실적으로 어렵다. 이런 건은 육성에 있어서 오랫동안 묵은 숙제이었지만 유전체편집을 통해서 충분히 교정할 수 있다.

표 17 교배육성시 나타나는 연관된 나쁜 형질들

Donor trait (제공되는 형질)	Phenotype dragged (지체되고 동반되는 표현형)
PMMoV(Tm3) resistant (바이러스 저항성)	Weak vigor & low fertility (초세가 약해지고 생식력저하)
Powdery mildew resistant (흰가루병 저항성)	Smaller & thicker leaf (잎이 작아지고 두꺼워짐)
BS2 resistant (박테리아 저항성)	Smaller fruit (소과)

- 4) GMO 대체: 제초제저항성 non-GMO를 개발하여 제초제저항성 GMO 수입을 대체할 수 있다. 예를 들어서 EPSPS는 아미노산합성에 관여하는 효소인데 기질(substrate)과 잘 반응을 하면서 정상적으로 단백질이 만들어지고 따라서 작물이 생존하게 된다. 그러나 제초제를 뿌리면 제초제가 기질과 화합하여 효소들이 기질과 반응할 수 없게 되고 아미노산과 단백질 합성이 이루어지지 않게 됨으로 결국 작물이 죽게 된다. 만약 우리가 이런 효소들을 유전체편집을 통해서 변형하여 제초제와 결합하지 못하게 한다면 작물은 아미노산과 단백질을 합성하게 될 것이고 작물은 생존하게 된다 (그림 36). 이런 방법으로 신품종을 만드는데 많은 비용이 드는 제초제저항성 GMO를 대체 할 수 있는 것이다.

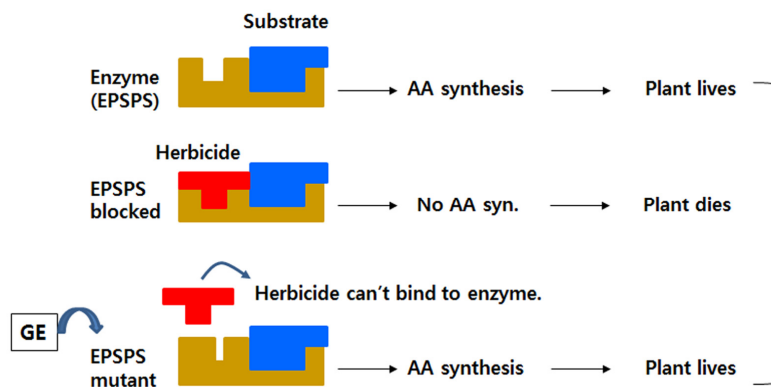


그림 36 EPSPS와 기질, 그리고 제초제와의 상관관계를 모식화 함. GE(genome editing, 유전체편집)를 활용하여 EPSPS 돌연변이를 만들면 제초제를 처리해도 아미노산이 합성되어 식물이 정상적으로 살게 된다. EPSPS: 5-enolpyruvylshikimate-3-phosphate synthase라는 효소

6.2 동종기원(Cisgenesis)기술

동종(種)내 재래종이나 야생종으로 부터의 우수형질을 집적하는 기술을 동종기원(Cisgenesis)기술이라고 한다. 전통적인 여교배와 자가수분을 통해서 육성하는 전통육종방법을 탈피하여 빠른 시간 내 특성을 고정하기 위한 방법이다.

6.2.1 필요성 및 개요

여교배는 공여친에 있는 유용 유전자를 반복친으로 이전하는데 많은 도움이 되지만 동시에 열성 유전자들이 연관지체가 될 확률이 높아서 고품질 계통육성에 장벽이 된다. 반면에 cisgenesis는 cis와 genesis를 붙여서 같은 선상에서 새롭게 만든다는 의미로 공여친에 있는 유용유전자를 반복친으로 이전할 때 형질전환 방법을 이용하게 된다. 이 때 transgene(도입유전자)은 cDNA가 아니고 genomic DNA(유전체 DNA)이며 genomic DNA 안에는 promoter(프로모토), exon(엑손), intron(인트론) 구조가 있는 whole gene(1개 유전자 전체 염기서열)이 있어서 기존의 형질전환 방식과 매우 다르다. 형질전환하는 벡터는 나중에 재조합 분리되어 타겟 유전자만 전이가 되고 벡터는 빠져나오기 때문에 non-GMO가 된다.

외국에선 이 기술을 이용하여 사과 더듬이병 저항성 유전자

를 형질전환하였고 실제로 이를 통해 더탱이병 내성 사과 품종(non-GM)을 개발하였다. 이 외에도 감자 역병저항성 유전자 여러 개를 축적(stacking)하여 강력한 역병저항성 감자를 개발하였는데, cisgenesis는 활용가치가 커서 향후 여러 작물에 넓게 사용될 가능성이 크다. 이 기술의 특징은 GM기술을 이용하여 유용유전자를 집적한 다음 궁극적으로는 non-GMO를 개발하는 것이다. 관행육종 방법으로 도입이 어렵고 시간이 많이 걸리거나 특히 야생자원에서 도입하고자 하는 특정형질일 경우에 유용한 방법이다.

육종가가 같은 종(種)안에서 특정 재래종이나 야생종에 우수형질이 있다고 할 때(공여친, donor), 이를 다른 계통(반복친, recurrent)으로 이전하여 그 우수 형질을 집적하고 싶다면, 여러 번의 여교배와 자가수분을 거쳐서 계통육성을 할 것이다. 앞서 설명한 그림 18은 전형적인 여교배 방법인데 P1이 반복친계통으로서 P2 공여친의 특정한 내병성형질을 교배를 통해서 P1으로 이전하려는 것이다. F1의 유전체는 P1과 P2 절반씩 함유하고 있으며 많은 F1 중에서 내병성형질을 보유한 개체를 선발한다. 이를 다시 P1 계통으로 교배하여 유전체 기반을 P1으로 채우고자 여교배를 계속 진행한다(그림 37). BC6F1이면 유전체 99.2%가 P1이며 이전(移轉) 목표형질인 내병성형질을 확보하게 된다. 이후 유전적으로 고정하고자 자가수분을 하게 되는데 BC6F4 세대 정도면 P1 계통이면서 내병성형질을 갖는 그리고 고정된 우수계통을 확보하게 된다. 상업육성을 하는 육종가들은 대부분

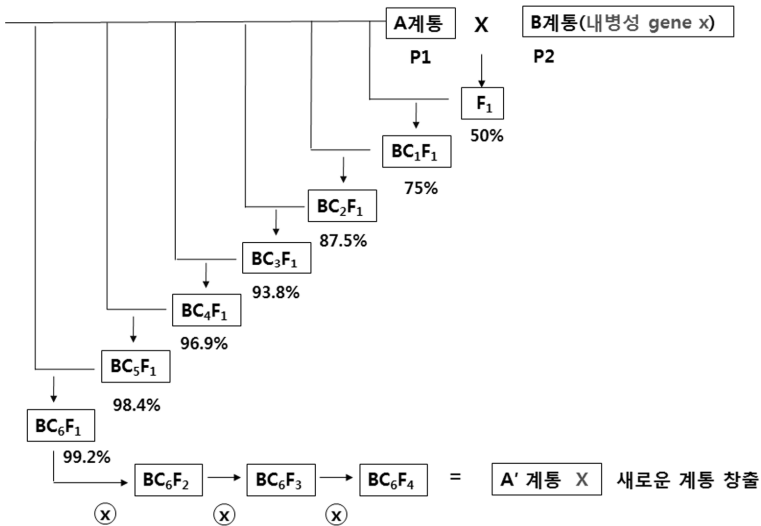


그림 37 여교배 과정이며 각 작물별로 세대 수가 다를 수 있음. %는 A 계통의 유전체 비중을 나타냄. 여교배는 좋은 육성방법이지만 시간이 많이 걸림

이런 과정을 통해서 계통육성을 한다. 다만 작물별 세대를 끌고 나가는 과정이 고추나 토마토처럼 과채류는 좀 짧지만 양파 등 다른 작물들은 길다. 이 여교배의 단점은 donor에 있는 열성 유전자들이 원하는 내병성형질과 연관되면서 같이 끌고(dragging) 다닐 수 있다. 연관성이 강할수록 교배를 통해서 거의 도태가 되지 않는다. 따라서 이런 경우 앞서 언급했던 1) 유전체편집과정을 통해서 해결할 수 있으며 2) 여기처럼 cisgenesis를 통해서 완벽하게 해결할 수 있다.

6.2.2 Cisgenesis vs GMO vs 일반육종의 비교

Cisgenesis는 유용유전자를 반복친으로, 인위적으로 이동하여 육성시키는 방법인데, 다만 상호 교배를 통하여 우수 유전자를 이전하는 것이 아니고 형질전환방법을 이용하여 유전자를 이전하여 개체를 육성한다는 것이다. 이때 이전하려는 우수 도입유전자(transgene)는 cDNA가 아니고 genomic DNA 안에는 promoter, exon, intron 구조가 있는 whole gene이 포함되어 있어서 기존의 형질전환 방식과 매우 다르다(그림 38).

그림 38에서는 3개의 육종방법을 상관 비교하였는데 전통육종은 결국 여교배를 말한다. 빨간사과와 파란사과를 교배해서

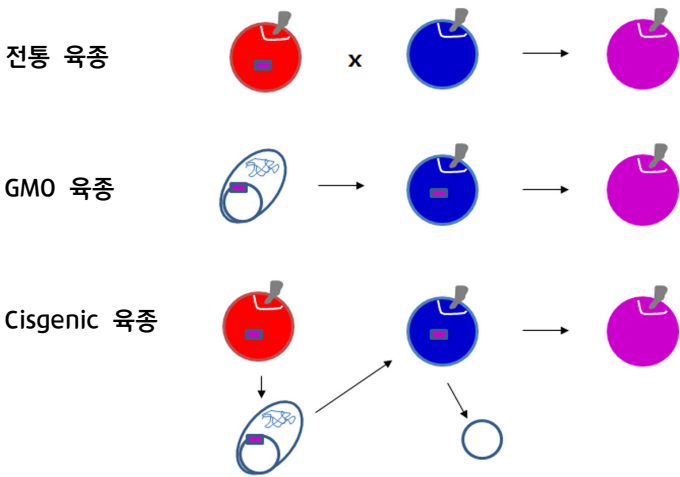


그림 38 Cisgenic 육종과 다른 육종과의 차이점

특정유전자(그림 38에서 작은 box: 보라색 사과를 만드는 유전자)가 발현되도록 하여 여교배 세대를 거치면서 보라색 사과를 선발하는 것이다.

GMO 육종(transgenesis)은 특정유전자를 직접 파란사과에 주입하여 그 발현이 되는 보라색사과를 선발하는 경우이다. 형질전환 후 재분화하여 선발한 개체를 여교배를 통해서 GM계통을 만들어야 하니 오랜 기간이 소요된다.

Cisgenic 육종은 cDNA형태가 아닌 whole 유전자(promoter, exon, intron)를 형질전환하여 재분화시키면서 보라색사과를 선발하되 유전자만 들어가고 나머지 형질전환벡터 또는 관련 부위는 전부 도태(selection-out) 되는 과정을 밟기 때문에 엄밀히 GMO가 아니다.

Cisgenesis와 transgenesis와의 차별화 부분은 형질전환을 하는 유전자가 whole 유전자냐, cDNA이냐 따라 cisgenesis와 transgenesis로 다른데, cisgenesis는 교배 가능한 종으로 국한되어 있으며 transgenesis는 유전자의 source가 동물, 미생물, 식물이든지 상관없다는 것이 또 다른 차이이다.

각 육종방법에서의 소요기간은 작물마다 다르지만 일반적으로 전통육종은 6-8년 이상, GMO육종은 약 10여년 이상, Cisgenic 육종은 3-4년 정도면 가능하다. Cisgenic 육종방법을 사용하면 새로운 유전자원을 개발하는데 시간이 절약되며 같은 종내에서 유전적으로 근연관계가 상당히 멀어도 여교배 없이 간단히 그 특성을 집적할 수 있다.

즉 야생종의 형질을 옮길 때는 관행육종으로 교배하기 어려운 점이 많은데 이런 방법을 통해서 새로운 유전자원을 확보할 수 있다.

6.2.3 Cisgenesis 기술의 활용

(1) 실용화를 위한 기술적 접근

Cisgenesis를 수행하는 데 있어서 가장 중요한 조건은 i) 이전하고자 하는 유전자 즉 whole gene을 확보할 수 있는지 여부이며, ii) 사용하는 형질전환 방법이 marker-free transformation(선발마커가 없는 형질전환) 이기에 recombination-out(재조합탈락) 벡터를 이용해야 하며, iii) transgene 이외의 모든 벡터 부위는 형질전환체에서 제거가 되어야 한다는 것이다. 따라서 형질전환 방법을 이용하여 유전자를 이전한 형질전환체, 즉 GM개체를 개발하였지만 궁극적으로는 whole gene 유전자만 남기 때문에 non-GMO이다.

1) Cisgenesis용 형질전환벡터 구축 및 형질전환

형질전환벡터는 recombinase라는 유전자를 함유하고 있어서(그림 39) 이 유전자가 발현하여 효소 활동을 할 경우, 벡터 내 특정 RS(recombination site, 재조합좌위) 부위를 자르게 된다. 이로서 삽입유전자만 남고 벡터 내 구성 되어 있는 다른 유전자들은 재조합으로 제거되는 것이다. 형질

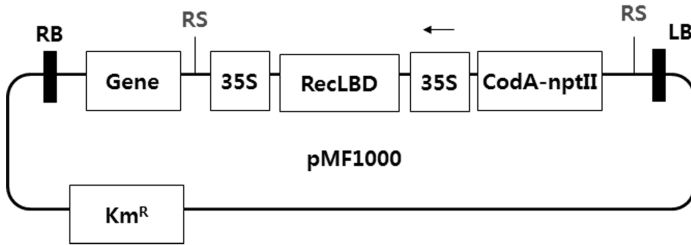


그림 39 Recombinase 유전자(RecLBD)가 삽입된 벡터. RB: right border; LB: left border; RS: recombination site; 35S: 프로모터; CodA-nptII: 카나마이신 저항성 유전자. pMF1000: 제조된 벡터

전환은 가장 우수 계통을 중심으로 수행하는 것이 이상적이지만 실제로 형질전환 효율이 계통이나 유전자형에 의존하는 경우가 많아서 육성가와 협의하는 것이 중요하다.

2) 삽입된 whole gene의 보존 및 다른 유전자들의 recombination-out(재조합탈락)

형질전환 후 explant(유식물체)를 배지에서 키울 때 dexamethasone(dex)을 첨가하여 벡터 내 recombinase가 활성화가 되는 것을 유도 한다(그림 40). 결국에는 whole gene만 식물 유전체에 남게 된다.

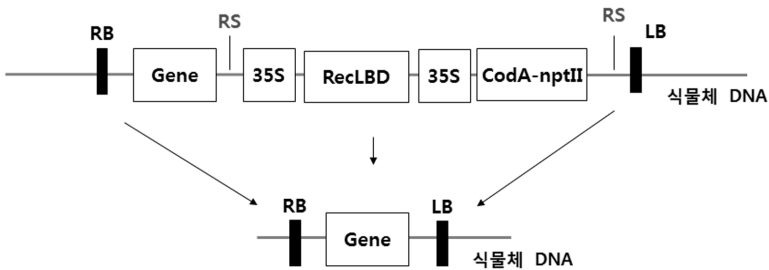


그림 40 형질전환 후 callus(캘러스)¹⁾를 유도한 다음, 선발배지에 dexamethasone (dex)를 첨가하게 되면 캘러스 세포내에서 recombinase가 활성화가 됨. 이 때 RS(recombination site)부위가 잘려나가게 됨으로서 유전자만 삽입된 개체를 선발할 수 있다

(2) 국내외에서의 이용정도

<국 외>

사과 더닝이병 저항성 유전자를 recombination 벡터(그림 41)에 삽입하여 형질 전환하였고 실제로 이를 통해 더닝이병 내성 사과 품종(non-GM)을 개발하였다(Vanblaere et al. 2011).²⁾

이 외에도 감자 역병저항성 유전자 여러 개를 축적(stack)하여 강력한 역병저항성 감자를 개발하였는데, cisgenesis는 활용가치가 커서 향후 여러 작물에 넓게 사용 될 가능성이 크다.

-
- 1) 캘러스: 미분화 또는 탈분화된 식물세포 덩어리로서 호르몬 처리를 통해 캘러스에서 유식물체를 유도할 수 있음.
 - 2) Vanblaere T, Szankowski I, Schaart J, Schouten H, Flachowsky H, Brogini GA, Gessler C (2011) The development of a cisgenic apple plant. Journal of biotechnology 154:304-311

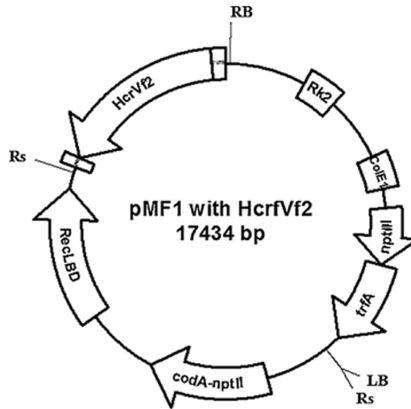


그림 41 pMF1 형질전환벡터. Left(LB)와 right border(RB) 부위 사이에 덤핑이병 저항성 *HcrVf2* 유전자를 가지고 있으며 형질전환에 의해 양 border 부분이 식물체 안에 삽입이 된다. 이후 dexamethasone(dex)을 첨가하면 RS가 selection-out이 되면서 *HcrVf2* 유전자만 식물체에 삽입되는 것이다.¹⁾

<국 내>

국내에서 이런 연구를 한 연구자가 없다. 육성을 하는 연구자들과 생명공학을 하는 연구자들 간의 소통부재 때문이다. 야생종에서 특정 형질을 가져오거나, 종(種)이 다르지만 같은 속(屬)내에서 형질을 가져오기 위해서 육성가들은 다양한 교배를 하는데 교배가 잘 안되거나 종자가 안 맺히거나 힘든 상황이 되면 대부분의 경우 중간에 포기를 한다. 이런 어려움을 서로 논의를 하고 cisgenesis 같은 방법을 찾아야 하는데 실제로 종자회사인 농우바이오에서도 시작조차 하지 못하고 있다는 것이 아쉽다.

1) Vanblaere et al., 2011

<Cisgenesis의 장단점>

a) 장점

- 원연관계의 작물에 있는 우수 형질의 이전 가능
- 여교배에서 나타나는 열성인자의 연관지체(linkage dragging)를 해결
- Cisgenesis 후 계통육성을 더 할 필요가 없어서 세대단축이 가능
- 우수 형질들 간의 집적 용이

b) 단점

- 벡터 구축
- 형질전환 효율이 낮으면 장기간 소요
- GMO가 아니라는 것을 증명하기 위한 분자생물학적 분석 동반

c) Intragenesis(屬內기원)와의 차이

Cisgenesis는 일반적으로 같은 종의 whole gene자체를 이용하는 것으로서 유전체 안에 있는 도입유전자의 구성은 promoter(프로모터), introns(인트론), exons(엑손), terminator(터미네이터)로 구성된다. 그러나 intragenesis(Schouten and Jacobsen, 2008)¹⁾ 경우는, cisgenesis와 같은 방법을 이용하지만 유전자의 구성이 다른 종의 promoter(프로모터), coding(유전자)부위를 섞어서 *in vitro*(시험관내)에서 제작하여 사용하는 것이 다르다.

1) Schouten HJ, Jacobsen E (2008) Cisgenesis and intragenesis, sisters in innovative plant breeding. Trends in Plant Science 13:260-261

(3) 경제적·산업적 중요성

본 기술은 일반 특성을 쉽게 가져오지 못할 때 활용성이 크다. 주로 같은 종내 야생종들과는 교배가 쉽지 않는 경우가 많고 종차 발아율도 약할 수가 있다. 또한 종간의 이전하고 싶은 유용한 형질도 많지만 교배문제로 어려움이 있을 수 있다. 이럴 경우 이 방법을 사용하여 얼마든지 새로운 유전자원을 만들 수 있다. 예를 들어 고추의 탄저병저항성 인자는 *Capsicum baccatum*에 있는데 육성계통은 전부 *Casicum annum*이다. 두 종간의 교배가 매우 힘들어서 특정 인자를 옮기가 어렵지만 상기 cisgenesis 방법을 사용하면 whole 유전자를 옮길 수 있게 된다. 탄저병에 의해 생산량 감소와 농가피해가 세계적으로 매우 크기 때문에 이 기술이 절실하다는 것이다. 최근 탄저병저항성 인자를 간신히 *annuum*으로 옮겼고 마커를 개발하여 탄저병저항성 고추를 개발하였다. 약 20여년에 걸쳐서 완성되었지만 상기 기술로는 3-4년이면 완성되는 경우인데 아쉬운 결과이다. 또한 사과나 감자들도 오랜 시간을 걸쳐 간신히 병저항성 품종을 만들었지만 저항성을 타파하는 새로운 균에 의해 무너지기 때문에 저항성 유전자 여러 개를 같이 넣어줘야 한다. 이런 경우 cisgenesis의 기술이 필요한 것이다.

Cisgenesis 기술은 형질전환 기술을 접목해야 하기 때문에 쉬운 과정은 아니어서 전 세계적으로 많이 이용하고 있지는 않다. 국내는 형질전환 기술의 인프라가 잘 갖추어져 있어서 본 기술을 잘 활용한다면, 생산성제고에 관련된 좋은 형질을 많이 축적할 수 있으며 경쟁력 있는 품종개발이 가능하다고 사려 된다.

6.3 세포융합 기술

세포융합(cell fusion)기술은 종(種)내·종(種)간 신유전자원 개발에 활용되는 기술로 순도고정, 육성기간 단축, 특성형질 이전(移轉)을 통하여 새로운 유전자원을 개발하기 위한 기술이다. 일반적으로 고전 육종방법으로는 원연 간 또는 종속(種屬) 간의 교잡이 어려워, 원하는 유전자 도입이 개체 간에 불가능하다. 그러나 세포융합(원형질융합)기술은 체세포를 인위적으로 융합하여 잡종세포를 만들고 이 세포로부터 식물체를 유도하는 작업이어서 식물체의 종속을 넘나들면서 새로운 작물을 개발할 수 있기 때문에 다양한 유전자원을 개발할 수 있다.

6.3.1 필요성 및 개요

과거 다국적기업과 외국대학에서 대칭융합이 아닌 비대칭융합기술(세포질을 치환 기술)을 이용하여 세포질 내 있는 CMS (cytoplasmic male sterile, 세포질웅성불임) 형질을 다른 종내 세포질로 도입하여 새로운 십자화과 유전자원을 만들 수 있었으며 이를 특허 등록하여 기술적 독점화가 된 적이 있다. 최근 국내기업(농우바이오)에서도 동일한 기술을 이용하여 CMS 양배추를 포함하여 여러 양배추를 개발하였고 세계 최초로 CMS 배추를 개발 중에 있다. 세포질 형질 융합 외에도 같은 종내에서 핵을 치환함으로서(핵치환기술) A(MS: male sterile, 웅성불임), B(MF:

male fertile, 웅성가임) 계통의 순도를 제고하거나 다른 우수품종의 핵을 도입할 수 있다. 특히 육성기간이 10-15년 걸리는 양파, 당근 등의 A, B 계통 구축에 필요한 순도고정기간을 대폭 단축할 수 있다는 것은 획기적인 육종기술이 아닐 수 없다.

또한 타사의 우수품종을 이용하여 교배육종을 하려는데 그 우수품종이 MS가 되어 있어서 세대를 분리할 수 없을 때, 이 방법을 적용하면 육성기술의 격차를 즉시 없애면서 고부가가치 유전자원을 다양하게 구축할 수 있게 된다.

국내에서도 세포융합의 성공적인 사례를 위해 과거 많은 실험을 했으나 제대로 만든 육성재료는 전혀 없다. 그 이유는 세포융합체의 선발과정이 매우 어려웠기 때문이다. 최근 들어서 DNA 마커 기술이 발달함에 따라 국내 기업체(농우바이오)에서 여러 작물에 이 기술을 적용하였고 아주 귀중한 유전자원들을 성공적으로 개발하여 육성에 사용하고 있다. 현재 많은 육종가들이 현장에서 매우 부러워하고 있는 육성 도구임으로 여러 작물에 보급한다면 생산량제고에 공헌할 수 있을 것으로 판단된다.

6.3.2 원형질체융합 기술의 활용

(1) 실용화를 위한 기술적 접근

식물세포는 세포벽을 가지고 있으며, 분화(differentiation)된 이후 형성된 다양한 조직으로부터 다시 온전한 식물체로 재분화(regeneration)되는 전형성능(totipotency)을 가지고 있다(Vasil et

al., 1972).¹⁾ 이러한 장점을 이용하여 원형질체들을 융합하고 증식한 후, 식물체로 재생할 수 있다면 새로운 유전자원을 확보하거나 육성세대를 단축하는데 크게 활용될 수 있다.

원형질체융합(protoplast fusion)은 서로 다른 종간(interspecific) 또는 같은 종내(intergenic)의 두 개 이상의 세포를 융합하여 한 개의 세포로 만드는 기술이며, 융합된 세포로부터 재분화시킴으로써 다양한 유전자원을 창출할 수 있다. 또한 같은 작물이나, 다른 두 작물의 체세포를 융합하기 때문에 체세포잡종(somatic hybridization)이라고도 하며, 또한 융합체는 세포와 세포간의 잡종이어서 cybrid(cell hybrid)라고도 한다. 따라서 단어를 정리하면 여기에서 언급하고 있는 세포융합(cell fusion)의 경우, 체세포로부터 원형질체를 분리하여 융합을 하는 기술이어서 원형질체 융합(protoplast fusion) 또는 cybrid라고 표현하며 같은 의미로 사용될 수 있다.

1) 원형질체 분리 및 배양

성공적인 원형질체융합을 위하여 식물 각 조직에서 분리한 원형질체로부터 완전한 식물체를 재생할 수 있는 기술이 확립되어 있어야 한다. 조직배양을 이용해서 식물체 재분화가 어려운 작물들은 원형질체 배양을 통한 식물체 재분화 또한 어려운 경우가

1) Vasil IK, Vasil V (1972) Totipotency and embryogenesis in plant cell and tissue cultures. In Vitro 8:117-127

많기 때문에 양친의 원형질체 재분화와 융합 후 재분화 조건의 확립이 무엇보다 중요하다.

원형질체분리에 사용할 식물 재료는 자엽(cotyledon), 하배축(hypocotyl), 줄기(Stem), 배(embryo), 화분(pollen), 캘러스(callus) 및 현탁배양세포 등 다양한 조직과 세포가 가능하다. 일반적으로 원형질체분리는 cellulase, pectinase, macerozyme, viscozyme과 같은 다양한 종류의 효소를 이용하여 식물벽(cell wall)을 분해하고 세포막으로 구성된 원형질체를 분리할 수 있다. 분리된 원형질체가 완전한 식물체로 발달하기 위해서 다양한 재분화 조건을 통하여 원형질체에서 식물체로 재분화를 유도한다(그림 42).

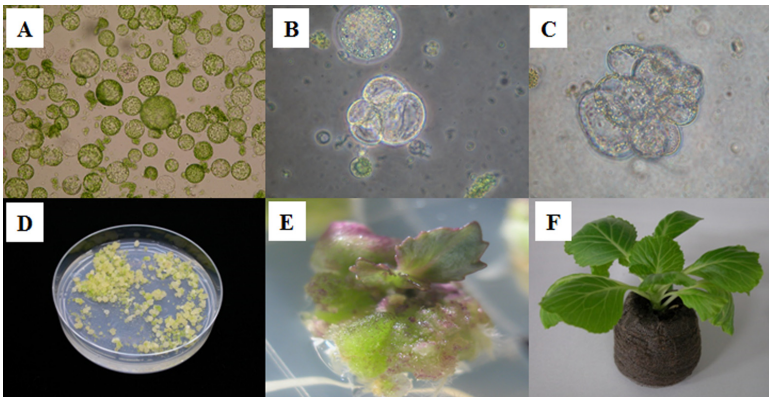


그림 42 양배추 원형질체배양을 통한 식물체 재분화. A: 양배추 자엽에서 분리된 원형질체; B, C: 초기원형질체분열; D: 평판배지 치상 38일째 초기 미소괴(micro callus); E: 배양 65일째 신초형성; F: 원형질체 유래 양배추 재분화체 확보

2) 원형질체의 융합 방법

원형질체융합은 여러 방법으로 구분되는데 비의도적으로 세포와 세포가 붙어 원형질연락사(Plasmodesmata)가 연결됨으로 세포가 합쳐지는 자발형 원형질체융합(Spontaneous protoplast fusion)과 기계적 방법, 화학적인 방법 그리고 전기적인 방법으로 유도형 원형질체융합(Induced protoplas fusion)이 있다. 그러나 여러 가지 경험상 전기적융합(Electrofusion)(그림 43)의 효율이 가장 좋으며, 융합기계를 이용하며 전류를 통과시킬 수 있는 챔버(chamber)에 원형질체 용액을 넣고, 교류 전류를 이용하여 순간적으로 고전압의 짧은 직류 펄스를 주면 밀착되어 있던 원형질체가 서로 융합된다. 그리고 현미경을 통해서 융합세포들을 관찰할 수 있다(그림 44).

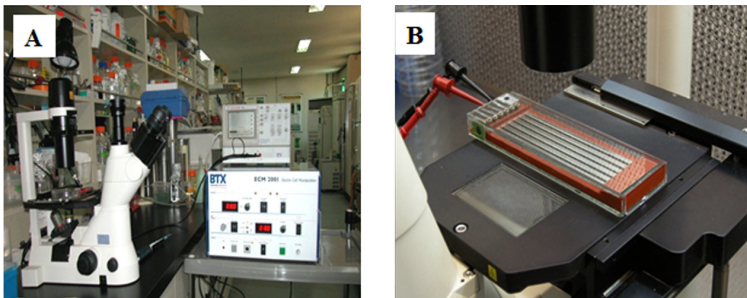


그림 43 전기적 융합장치. A: 원형질융합기와 현미경 B: 융합 챔버(Fusion chamber).
융합 챔버는 자체 제작된 것으로 각 lane(줄)에 6 ml의 원형질체 배양액을 넣고 260-280 volt에 3-8초간 전기충격을 가하면 원형질체들이 순간적으로 융합하게 된다

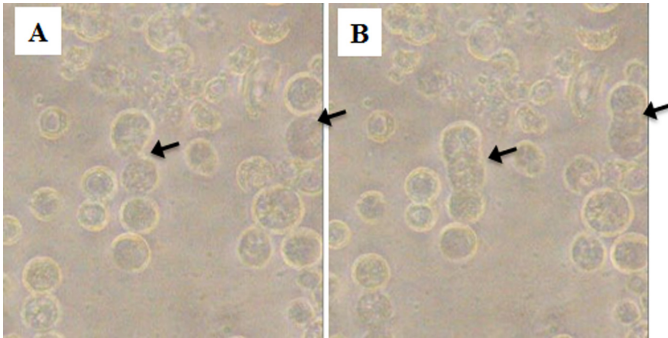


그림 44 당근 원형질체의 전기적 세포융합 모습. A: 융합 전 원형질체 세포 B: 융합 후 전기적 충격으로 원형질체 세포가 융합되는 모습(화살표: 융합된 세포)

3) 원형질체융합의 분류

원형질체 융합은 크게 대칭융합(symmetric protoplast fusion)과 비대칭융합(asymmetric protoplast fusion) 2가지로 나뉘어지는데(그림 45) 대칭융합은 전처리 하지 않은 두 원형질체를 직접 융합하여 원하는 개체를 선발하는 경우이며 주로 이종간 핵 융합을 통한 새로운 유전자원 확보를 목표로 하지만, 대부분 성공사례가 드물어서 활용성이 낮다(그림 45 A). 비대칭융합은 세포질이나 핵을 치환하기 위하여 방사선처리나 화학처리를 통하여 원하는 핵과 세포질을 갖는 개체를 선발하는 방법이다(그림 45 B). 유전적으로 비정상적인 융합체의 출현을 낮출 수 있으며, 식물육종의 활용은 대부분 비대칭융합이 활용된다.

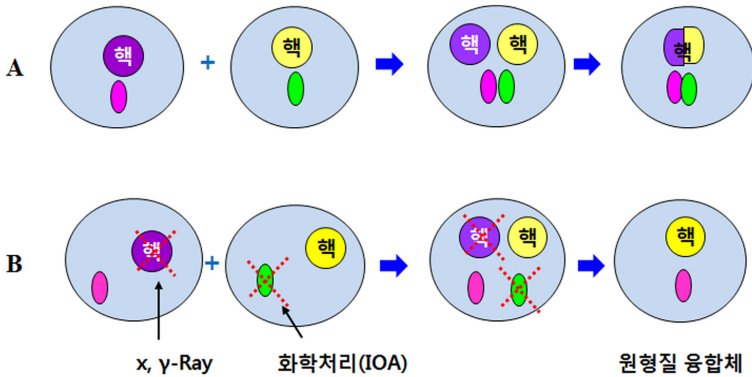


그림 45 원형질체융합 모식도. A: 대칭원형질체융합; B: 비대칭원형질체융합. X, γ -Ray: 방사선

4) 원형질체융합의 실지 예(example) I

4-1) MS형질 도입

비대칭융합으로서 예를 들면, 무의 미토콘드리아에 있는 CMS (웅성불임: 꽃가루가 나오지 않는 형질, cytoplasmic male sterility, 일반적으로 MS라고도 함)¹⁾ 형질을 양배추와 비대칭융합을 시킨 경우이다. 무에서 분리된 원형질체에 물리적 방법으로 γ 선을 처

1) - 웅성불임: Male Sterile(MS). 식물에서는 웅성기관의 형태적 또는 기능적 이상 때문에 웅성세포인 꽃가루가 아예 생기지 않거나, 꽃가루가 있어도 기능이 상실되어 수정능력을 잃어버리는 현상임. 즉 수분, 수정이 안되니 종자가 생기지 않는 현상을 말함. 웅성불임은 환경적인 일시적 변이로서 발현하는 경우와 유전형질로서 발현하는 경우가 있음. 전자는 영양조건의 불균형, 온도, 일조 등의 이상에 의하지만 후자는 화분불임성, 웅성불임성, 수정 불능 등에 의한다.

- 웅성가임: Male Fertile(MF). 식물의 웅성기관에 정상적인 꽃가루가 생겨서 수정이 되고 종자가 맺히는 지극히 정상적인 현상임. 임성회복이라고도 한다.

리하여 핵을 불활성화 시키고, 양배추의 원형질체에는 Iodoacetate (IOA)를 처리한 후 미토콘드리아(mitochondria) DNA의 복제를 억제시켜 불활성화하게 만든다. 이후 핵과 세포질이 불활성화된 원형질체를 1:1 혹은 1:3비율로 혼합한 후 전기적 융합 방법으로 융합세포를 만든다(그림 46).

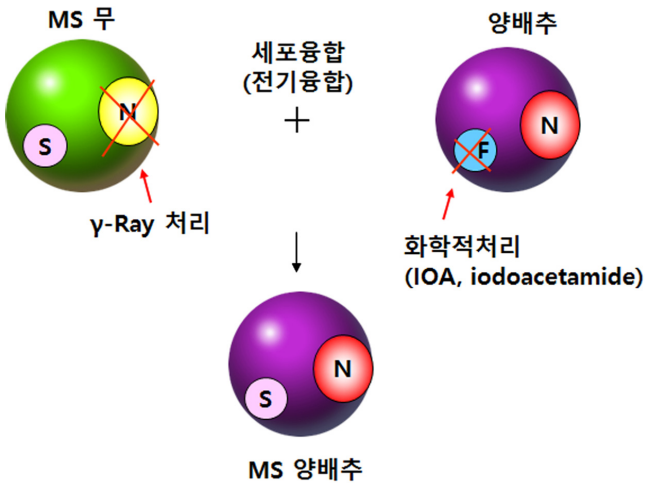


그림 46 무 미토콘드리아 내 존재하는 NWB-CMS 형질을 양배추 세포질에 넣기 위한 융합방법. 무와 양배추의 원형질체를 확보한 다음 무의 핵을 방사선으로 파괴하고 양배추의 세포질을 비활성화시킨 다음 전기융합으로 융합체를 확보함. 최종산물은 양배추에 무의 세포질과 NWB-CMS가 융합된 양배추 개체가 됨

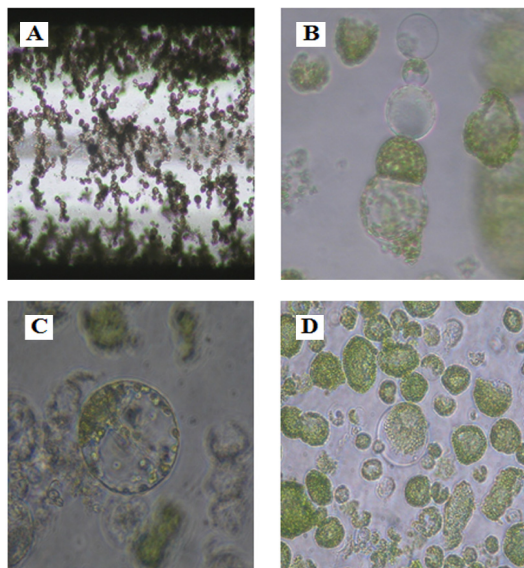


그림 47 전기적 융합을 통한 양배추와 무의 원형질체 융합. A: 교류전류에서 원형질체의 정렬; B: 직류전류에서 원형질체의 융합; C, D: 6일 경과 후 생존한 원형질체

원형질 융합체가 발달하면서 기 서술한 그림 42처럼 식물세포에서 캘러스를 유기하고 캘러스를 재분화시켜서 식물체로 만든다. 융합체 실험을 하다보면 항상 완전하게 만들어지는 것이라기보다, 많은 개체 중에서 원하는 개체를 선발해야 하는 경우가 대부분이다. 무와 양배추간의 융합과정에서는 융합후 식물체를 확보한 이후 재배과정에서 융합체의 초형이 무와 양배추의 중간형태(그림 48 A, B, C)와 무의 초형(그림 48 D), 그리고 양배추형태(그림 48 E, F) 등 다양하게 나타나는 것을 볼 수 있다. 이런 경우 육안검정을 통해 표현형적으로 올바른 개체를 선발할 수 있다.

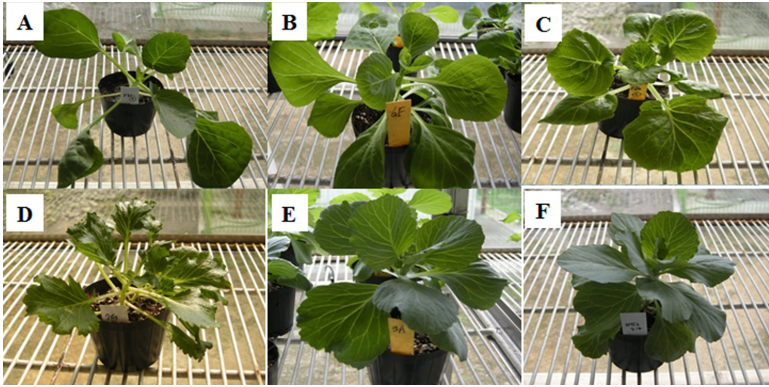


그림 48 양배추 융합체 생산.

A, B, C: 무와 양배추 중간형태; D: 무의 초형; E, F: 양배추 형태

4-2) DNA 마커를 이용한 분자생물학적 검정

CMS 유전자는 무의 세포질 내 미토콘드리아에 위치하고 있기 때문에 미토콘드리아 게놈(genome: 유전체)과 핵 내 게놈의 염기서열 차이를 이용하여 다양한 선발마커를 개발할 수 있다. 즉 핵 구분 마커와 세포질구분 마커, 그리고 CMS 형질마커를 이용해 융합 후 유도되는 캘러스나 식물체 중에서 효과적으로 융합체를 선발할 수 있다는 것이다. 세포융합기술은 엄청나게 강력한 기술이지만 과거에는 선발과정에서 융합체를 선발하는 것 자체가 어려워서 많은 실패를 하였다. 이제는 DNA마커 분석기술의 등장으로 훨씬 간편하게 선발이 가능하므로 세포융합기술이 새로운 육성기술로 재탄생하게 된 것이다.

실제로 특정 무 계통의 미토콘드리아에 있는 특이적인 NWB-



그림 49 양배추 융합체 세포질구분 마커(NWB-CMS3)를 이용하여 식물체 검정. 1-27: 융합 후 유도된 양배추; 28-29: Ogura 양배추; 30-31: control 양배추; 32: NWB-CMS 무(대비용 control)

CMS3의 세포질 구분 마커를 선발하였다(Nahm et al., 2005).¹⁾ 그리고 이 마커를 이후, 무와 양배추의 융합체 선발에 활용하여 융합체를 성공적으로 선발할 수 있게 되었다(그림 49).

4-3) 새로운 CMS 십자화와 작물

형태적으로 양배추인 개체를 먼저 선발하고 이후 DNA 마커를 이용하여 MS형질을 확인한 융합체들을 선발하였다(그림 50). 이 융합체들을 계속 재배하여 화분을 조사하였는데 예상한대로 융합체들은 화분낭이 비정상형태로 발달하여 화분이 나오지 않았다(그림 51). 즉 MS 융합체(양배추)를 확보하게 되었고 이 양배추 암술에 정상 양배추, 브로콜리, 컬리플라워, 콜라비의 꽃가루를 교배해서 그 다음 대에 CMS 계통을 개발하게 되었다(그림 52). 이로서 새로운 CMS 십자화와 작물을 개발하게 되었고 이는 새로운 유전자원으로 식량생산제고에 널리 사용될 것이다.

1) Nahm SH, Lee HJ, Lee SW, Joo GY, Harn CH, Yang SG, Min BW (2005) Development of a molecular marker specific to a novel CMS line in radish (*Raphanus sativus* L.). *Theo Appl Genet* 111:1191-1200



그림 50 양배추와 무의 융합체로서 표현형적으로 양배추로 선발된 개체



비정상화분낭

정상화분낭

그림 51 양배추 융합체 선발 후 화기 구조 검정. 정상개체는 정상화분낭과 정상적인 수술이 형성되었지만 MS 융합체는 화분낭이 정상적으로 발달하지 않아서 수술이 형성되지 않음



그림 52 MS 융합체와 다른 양채류 작물들과 교배해서 새로운 MS 계통을 개발하는 방안. MS 융합체 양배추를 모계로 사용하고 같은 양채류인 브로콜리, 컬리플라워, 콜라비, 또 다른 양배추를 부계로 사용하여 서로 교배를 함. 상기 양채류는 같은 종(種)이어서 상호 교배가 가능하다

5) 원형질체융합의 실지 예(example) II

5-1) 핵치환을 통한 유전자원 확보

작물 육성하는데 많은 경우, 육성가들은 다양하고 우수한 모계 계통을 구축하려고 한다. 이를 품종 육성에 활용함으로서 유전자원의 보호 효과와 더불어 고순도, 고품질의 F1 품종이 개발될 수 있었기 때문이다. 그리고 그 품종의 종자를 생산하기 위하여 모계친을 웅성불임(MS, male sterility)으로 개발하고 있다. F1 품종 생산지에 MS 모계(A line)가 심겨도 유전자원 유출에 대한 가능성이 없는데 그 이유는 유지친(B line)을 육성가가 보유하기 때문이다.

최근에 들어서 많은 종자기업들이 F1 품종을 개발할 때 MS 형질을 도입하여 MS F1을 만들곤 한다. MS F1은 비정상화분낭을 가지고 있어서 꽃가루를 만들지 못하기 때문에 다른 육종가들

이 이 MS F1을 활용하여 분리육종을 할 수 없다. 즉 유전자원으로 활용할 수 없게 됨으로 개발자들은 품종을 보호할 수 있게 되면서 종자시장에서 특정 품종을 독점화할 수 있게 되었다. 따라서, 교배를 통한 우수한 유전자원 도입육종에 한계가 있게 된다.

MS로 보호된 F1 품종을 유전자원으로 활용하기 위해서는 MS 형질을 타파해야 하는데 이 때 원형질체융합기술이 필수적이다. 하나의 예를 들어 당근의 육종적 한계를 극복하고 빠른 시간 내에 품종육성 경쟁력을 갖는 계통을 육성하기 위하여 MS F1과 일반 MF 계통과 비대칭 원형질체융합을 실시하였다(그림 53).

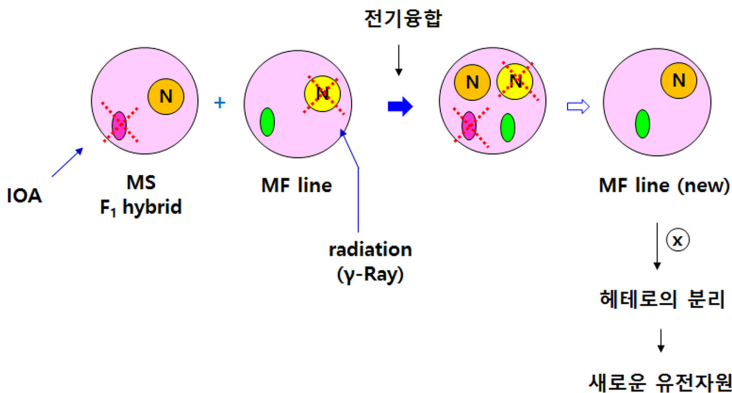


그림 53 당근 중의 MS(A 계통) F1 품종은 고색소 근특성을 갖고 있으며 대체로 품질이 우수한 품종임. MF(B 계통)는 일반 계통으로서 교배시 꽃가루가 정상인 개체임. 2개의 세포를 융합하게 되면 품질이 우수한 핵을 이전하게 됨과 동시에 꽃가루가 생겨서(임성회복) 자가수분될 수 있는 융합체가 됨으로 그 다음 대에 분리되는 여러 형질을 볼 수 있게 됨. 이와 같이 새로운 유전자원을 찾아서 빠른 시간 내로 경쟁력이 있는 당근을 육성할 수 있음

5-2) DNA 마커를 이용한 분자생물학적 검정

핵이 제대로 전이가 되었는지 세포질이 제대로 유지되고 있는지에 대해 핵과 세포질 특이 DNA 마커를 이용하여 분석하면 선발에 많은 도움을 줄 수 있다(그림 54).

실제로 임성을 회복시킨 융합체가 선발되었고 이를 자가수분시켜서 분리를 해 보았더니 여러 종류의 고색소인자의 우수한

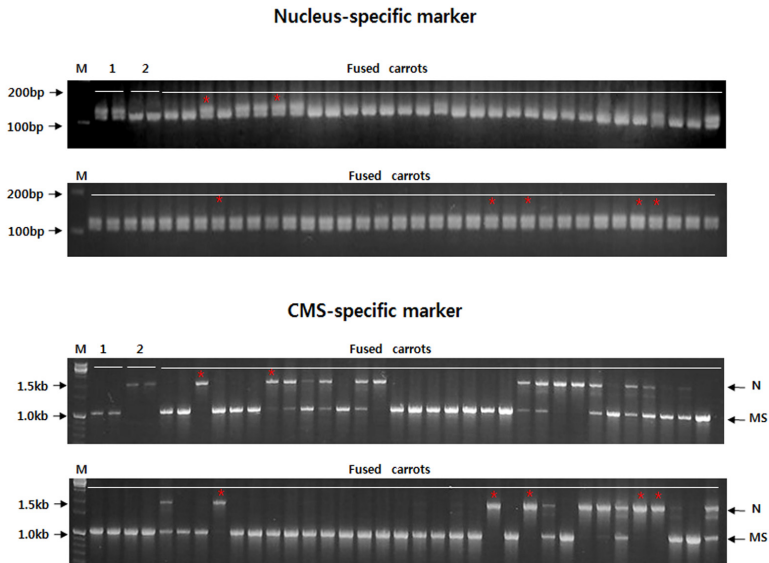


그림 54 Nucleus-specific marker: 핵특이 마커; CMS-specific marker: CMS 형질 특이 마커; M: 분자마커; 1: 핵제공 품종(MS 형질이 있음); 2: 핵접수 계통(MF 형질이 있음); Fused carrot: 원형질체융합으로 만들어진 합성된 당근. MS: male sterile(웅성불임); N: 정상이면서 male fertile인 웅성가임; * 최종 선발된 개체

형질 등을 갖는 융합체를 선발할 수 있게 되었다(그림 55). 향후 이러한 계통을 이용한 조합 작성으로 고품질, 고색소의 신품종 개발을 기대할 수 있을뿐더러 본 기술로 다양한 유전자원을 확보할 수 있어서 식량생산 및 신품종생산에 큰 도움이 될 것이다.



그림 55 당근 융합체를 생산하여 임성회복을 확인하고, 자가수분 후 세대를 진전시켜 확보한 C1(cybrid 1) 세대의 특성 검정. A: 융합전 당근(control, MS F1 품종); B: 융합한 다음 자가수분하여 분리된 유전자원 확보; C, D: 융합전 control 근색; E, F: 융합 후 근색 모습. 근색이 진한 특성을 갖는 개체들이 확보됨(E, F)

(2) 국내외에서의 이용정도

<국 외>

담배의 서로 다른 종인 *Nicotiana glauca*와 *Nicotiana langsdorffii*의 융합이 성공하였다(Carlson et al., 1972).¹⁾ 그리고 원형질체 융합 방법에 따라서 PEG(polyethylene glycol)를 이용한 융합(Kao et al., 1974;²⁾ Wallin et al., 1974)³⁾과 전기적인 융합이 개발되었다(Zimmermann et al., 1981)⁴⁾. 이후 1980-90년대 원형질체를 이용한 다양한 연구가 매우 활발하게 진행되었으며, 독일의 감자 원형질체융합이 성공적으로 보고되었다(Oberwalder et al., 1998).⁵⁾ 십자화과 작물의 경우는 적양배추와 무의 세포융합을 통하여 CMS인자를 도입하고자 하였고(Kameya et al., 1989),⁶⁾ Hoekstra 등(1990)⁷⁾은 순무의 Ogura CMS를 양배추에 원형질체

-
- 1) Carlson PS, Smith HH, Dearing RD (1972) Parasexual interspecific plant hybridization. Proc Nat Acad Sci. USA. 69:2292-2294
 - 2) Kao KN, Michayluk MR (1974) A method for high frequency intergenetic fusion of plant protoplasts. Planta 115:355-367
 - 3) Wallin A, Glimelius K, Eriksson T (1974) Induction of aggregation and fusion of *Daucus carota* protoplasts by polyethylene-glycol. Z. Pflanzenphysiol. 74:64-80
 - 4) Zimmermann U, Scheurich P (1981) High frequency fusion of plant protoplasts by electric fields. Planta 151:26-32
 - 5) Oberwalder B, Schilde-Rentschler L, Ruof B, Wittemann S, Ninnemann H (1998) symmetric protoplast fusions between wild species and breeding lines of potato - effect of recipients and genome stability. Theor. Appl. Genet. 97:1347-1354
 - 6) Kameya T, Kanzaki H, Toki S, Abe T (1989) Transfer of radish (*Raphanus sativus* L.) chloroplasts into cabbage (*Brassica oleracea* L.) by protoplast fusion. Jpn J Genet 64:27-34
 - 7) Hoekstra S, Kool AJ, Nootebos MG, Tan Mei-Lie MC (1990) Male sterile brassica plants. US5254802A

융합하여 특히 출원함으로서 양채류 MS 품종 시장을 선도하였다. 또한 무와 유채간의 종간 원형질체 융합을 통해서 CMS 인자를 도입하였으며(Sakai et al., 1990, 1996)^{1,2)} 당근 작물의 경우도 1976년 Dudits 등이 당근의 원형질체융합을 보고한 이후 1988년 Tanno-Suenaga 등은 당근의 원형질체에 X-선을 처리하고 비대 칭세포융합 방법을 이용하여 CMS(cytoplasmic male sterility, 세포질웅성불임) 형질을 도입한바 있다. 일본 육종 회사는 이러한 연구팀과 협력을 바탕으로 당근에서 웅성불임(male sterility) 모계육성과 웅성불임 F1 생산에 응용하여 품종 육성함으로서 유전자원의 보호 효과와 더불어 고순도, 고품질의 교배종 육성이 가능하였다(Tanno-Suenaga et al., 1988).³⁾

최근에 들어와서는 육종사업에 본 세포융합 기술을 잘 사용하지 않고 있는데 그 이유는 시간이 많이 걸리며 선발자체가 매우 어렵기 때문이다.

-
- 1) Sakai T and Imamura J (1990) Intergeneric transfer of cytoplasmic male sterility between *Raphanus sativus* (CMS lone) and *Brassica napus* through cytoplasm-protoplast fusion. Theor. Appl. Genet. 80:421-427
 - 2) Sakai T, Liu HJ, Iwabuchi M, Kohno-Murase J (1996) Introduction of a gene from fertility restored radish (*Raphanus sativus*) into *Brassica napus* by fusion of X-irradiated protoplasts from a radish restorer line and iodacetamide-treated protoplasts from a cytoplasmic male-sterile cybrid of *B.napus*. Theor Appl Genet 93:373-379
 - 3) Tanno-Suenaga L, Ichikawa H, Imamura J (1988) Transfer of the CMS trait in *Daucus carota* L. by donor-recipient protoplast fusion. Theor Appl Genet 76:885-860

<국 내>

국내에서도 이 원형질체융합 기술에 대하여 관심이 많았던 이유는 1960년 중반 이후부터 전통적으로 국내의 조직배양기술이 탁월하게 높았기 때문이다. 국내에서의 원형질체 융합 시도는 대구 카톨릭 대학의 유순남 교수가 초원심분리를 이용한 비대칭 원형질체융합을 통하여 CMS 유채를 이용한 품종 개발 시도하였고, 강원대 임학대 교수는 갖의 CMS를 십자화과에 옮기는 연구가 시도되었다(Lian et al., 2011).¹⁾ 그리고 농촌진흥청 김호일 박사는 양배추의 웅성불임주를 원형질융합에 이용하는 등 1990년대부터 2000년도 초반까지 각기 제한적인 영역에서 응용연구를 실시해 왔으며, 이외에 야생형 감자, 당근과 인삼 등의 원형질 융합이 수행된 바가 있다(Liu et al., 1992).²⁾

융합체 선발자체가 매우 어려워 육성에 사용할 만한 유전자원을 만들지는 못하였는데 최근 DNA 마커기술을 연계하여 선발이 가능하게 되었다. (주)농우바이오는 양배추, 당근, 배추, 브로콜리 등에서 융합을 통하여 새로운 유전자원들을 확보하고 있으며 여러 목적으로 계통육성을 하고 있다.

-
- 1) Lian YJ, Lin GZ, Zhao XM, Lim HT (2011) Production and genetic characterization of somatic hybrids between leaf mustard (*Brassica juncea*) and broccoli (*Brassica oleracea*). In Vitro Cell.Dev.Biol. Plant 47:289-296
 - 2) Liu JR, Lee HS and Kim SW (1992) Inter-family somatic hybridization between carrot (*Daucus carota*) and Korean ginseng (*Panax ginseng*). The 1st Korea-Germany Joint Symposium in Plant Biotechnology pp. 153-160

(3) 경제적·산업적 중요성

세포융합기술이 육성자체에 크게 성공한 경우로서는 Ogura CMS 형질을 양배추에 도입하여 Ogura CMS 십자화과 작물을 개발하여 다양한 계통들을 확보한 예이다. MS 계통이나 MS 원종은 종자기업에서 종자를 생산할 때 매우 중요하며 또한 원종유출을 막는데 반드시 필요하기 때문에 종자기업에서 활용가치가 크다.

융합기술은 MS 원종의 순도가 떨어져 있을 때 이를 빠른 시간 안에 교정할 수 있다는 장점이 있다. 일반적으로 MS 계통을 A line(모계)이라고 하고 이를 유지할 수 있는 유지친을 B line(MF, 부계)이라고 할 때 A, B 라인을 잘 유지하는 것이 매우 중요하다. A와 B 라인의 핵은 동일하며 다만 A 라인에 MS형질이 있는 것이다. 그러나 재배과정, 증식과정에서 여러 요인으로 A, B 라인 핵의 순도가 떨어져서 F1 생산에 차질이 생기게 된다. 이런 경우 순도를 정상으로 교정하기 위하여 핵을 치환할 수 있다. 이는 모든 MS 작물에 다 해당한다. 종자생산에 직접 도움이 됨으로 종자기업으로서 재정과 경영안정에 큰 도움을 받게 된다. 종자생산의 안정은 바로 작물생산제고에 직접적으로 영향을 줌으로 식량생산제고에 큰 기술임에 틀림이 없다.

육성가들은 일반적으로 모든 F1 품종을 유전자원으로 간주하여 계통육성에 많이 활용하고 있다. 그러나 MS F1 품종일 경우 꽃가루가 나오지 않아서 유전자원으로 사용하기 어렵다. 만약

그 MS F1 품종이 매우 우수한 품종일 경우 융합을 통해서 MF 계통으로 그 우수인자 즉 핵을 치환할 수 있다. 즉 MS를 타파할 수 있다는 것이다. 이를 통해서 새로운 유전자원을 확보할 수 있어서 엄청나게 좋은 육성자원을 확보할 수 있다.

결론적으로 원형질체융합기술은 다양한 식물에서 원형질체 재분화 시스템이 확립되면서 종내, 종간 식물의 유전자 도입에 관련 연구가 활발히 진행되었으며, 2개의 세포가 합쳐져 새로운 유전자원을 창출하고 재생산됨으로서 보다 다양한 유전자원의 확보기술로 자리매김하였다. 그러나 과거에는 선발이 매우 어려워서 진전이 없다가, 최근 들어서 DNA 마커분석 기술이 접목해지면서 새로운 유전자원 개발기술로 재조명을 받게 되었다.

6.4 식량생산 제고를 위한 육성기술 활용방안

6.4.1 생산성 제고를 위한 현 운영기술

식량의 생산성 제고를 할 수 있는 현재 운영되고 있는 육종기술들을 크게 나열하면 표 18과 같다. 각 기술들의 한계와 가능성을 볼 수 있는데 결국 한계를 넘어야하고 이 모든 기술들이 합쳐

표 18 식량증대(생산성 제고)를 위해 현재 진행되고 있는 기술과 한계

- 가) GMO 개발 기술
 - 기술적으로 최적합 및 이상적: 생산성 제고를 최고
 - 단점: 고비용, 시민반대운동에 의한 비확산성
- 나) 새로운 농약비료 개발 기술
 - 50~70년대 생산성 증가: 현재 1~2%
 - 기술적 한계
- 다) 파종 및 수확의 기계화, 시설재배 기술
 - 재배지역 확장(예: 새만금) 및 활용의 한계
 - 한국형 시설재배 및 스마트 팜 구현이 요구됨
- 라) 정밀농업(precision farming) 기술
 - 작물생육에 필요한 토양, 기후정보 활용
 - Big data에 의한 정보 생성, 수집, 공유, 활용(IoT)
 - 생산성 제고 가능, 그러나 이제 적용을 시작함
- 마) 품종육성 기술간의 연계
 - 모든 기술을 적용하는 pipeline 구성
 - 기술연계는 생산성 제고 가능, 그러나 이제 적용을 시작함
 - 국내기업은 영세이며 기술연계에서 리더쉽 부재

서 운영이 되어야 2050년 인류의 먹거리 해결에 어느 정도 접근할 수 있다.

(1) 종자육성 측면에서는 GMO기술은 혁명적이다. 일반 육종기술로 범접할 수 없는 현재진행형이고 미래지향적이다. 생산량 제고에 필요한 최적의 도구로서 각광을 받고 있고 향후 우주농업, 해수농업에도 유일하게 활용될 것이다. 다만 현재 위해성평가가 문제 때문에 너무 비용이 많이 들며 아직도 일반 시민의 반대가 높아서 GMO 자체를 식탁에 올리지는 못하고 가공형태나 사료로 많이 사용하고 있다. 또한 기술적, 비용측면에서 소수의 다국적기업들만 할 수 있어서 GM종자가 세계 종자시장의 30%를 확보하고 있지만 기술활용적인 측면에서는 일반 종자기업에 보편화되어 있지 못하고 있는 것은 사실이다.

(2) 농약과 비료는 농업의 또 다른 혁명이다. 지난 1950년 이후 1970년 중반까지 생산량을 매년 10% 이상 올렸으며 급증하는 세계 인구를 먹여 살릴 수 있게 된 중요한 계기가 되었다. 안타까운 것은 너무 많은 종류와 많은 양의 농약과 비료의 살포 때문에 농업환경이 많이 파괴되어 있으며 최근 개발되는 비료나 농약으로 생산량이 크게 늘지 않고 있다는 것이다.

(3) 전 세계적으로 농작물의 재배면적은 정체가 되어 있거나 크게 늘지 않고 있다. 바다를 메꾸면서 재배지를 확장하고 있지

만 내륙에서는 사막화가 심화되어 재배할 수 있는 면적이 줄고 있으며 브라질, 아프리카 등 삼림과 초원이 문명화로 파괴되고 있다. 단위면적당 고수확 생산량을 주는 품종개발이 시급하다.

(4) 시작한지 얼마 되지 않았지만 빅데이터(big data)와 스마트 팜을 이용한 정밀농업이 선진국의 다국적기업을 중심으로 성행하기 시작하였다. 일반 농업이 융복합산업과 연계되어 새로운 분야를 창출하고 있으며 융복합농업이 전 세계 농업의 기본 프레임 바꿀 수 있을 것이다. 육성의 목표와 과정, 그리고 결과를 보다 정밀하게 자동화-전산화 시스템으로 운영하여 생산량제고에 도움을 줄 것이다. 그러나 이 역시 새로운 육종기술로 개발하는 종자가 우선이어서 효과가 있다.

(5) 품종육성에 필요한 모든 기술들이 활용되며 종자개발 처음부터 설계를 하여 종자판매까지 파이프라인이 설정되어야 한다. 이는 생산성 제고를 위한 가장 이성적이고 논리적인 절차이다. 그러나 국내에는 육종파이프라인을 체계있게 운영하고 있는 기업이 거의 없어서 아직도 인프라구축이 선행되어야 한다.

6.4.2 생산성 제고를 위한 미래 기술적 인프라

현대 육종기술은 관행육종기술에만 국한 되어 있지 않다. 최근 미국에서 출간되는 육종학 교과서와 참고서에는 생명공학기술

식량생산 제고를 위한 신(新)육종기술

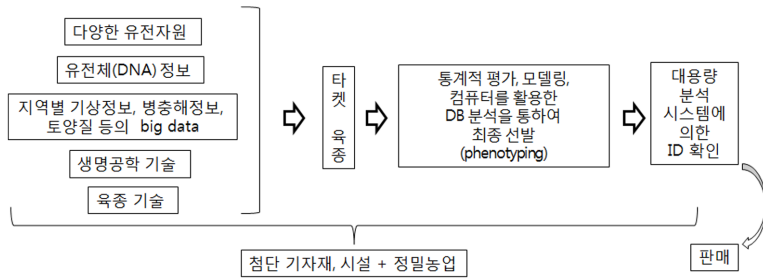


그림 56 다국적기업에서의 품종육성 과정. 품종목표와 개발, 선발, 검증, 판매까지의 파이프라인. Big data: 빅데이터; DB: data; phenotyping: 표현체; ID: identification, 동정

이 소개되어 있는데 작물 육성에 활용되는 생명공학기술은 전부 육종기술이 된다. 또한 최근에는 ICT정보를 활용하는 연계 연구를 통해 종자를 선발하고 육성하고 있는 것이다. 예로서 외국 다국적기업들의 종자개발서부터 판매하는 파이프라인을 보면 다음과 같다(그림 56).

<국 외>

다양한 유전자원을 확보하고 있고 모든 작물의 유전체정보를 알고 있으며 종자가 파종되어 생산될 지역의 모든 정보를 빅데이터로 분석하고 생명공학, 육종에 관한 대부분의 기술들을 동시에 활용하고 있다. 예를 들어서 미국 플로리다 주에서 대량으로 재배될 옥수수종자를 개발하고자 하는데 옥수수가 특정 곰팡이 병에 내성을 갖고 가뭄에 강하면서 다수확 품종을 목표(target)로 한다

고 정하자. 그럼 다국적기업에서는 육성가, 생명공학자, 마케팅 전문가, IT 담당자들이 모여 이런 형질을 갖는 옥수수를 어떻게 개발할건지에 대해 상의한다. 첫째 모부계의 정보를 찾아서 어떤 모계와 어떤 부계가 이런 원하는 형질을 갖고 있는지 스크리닝하고, 둘째 그 지역별 기후, 토지영양, 병해충, 지력, 지형 등 모든 정보를 빅데이터를 통해 확보하여 옥수수종자가 그 지역에서 적절히 재배되기 위해선 어떤 형질이 더 필요한지 확인한다. 셋째, 최적조건을 가지고 있는 모부계 교배를 통해서 계통을 육성하되 빅데이터의 정보를 적용한 품종육성을 통해서 최고의 품종경쟁력을 확보한다. 넷째, 계통육성은 좀 더 확실하고 경비도 절감되는 방안을 이용하되 생명공학과 육종의 총체적 기술들을 운영하면서 품종을 개발한다. 다섯째 우수조합은 표현체(phenotyping) 등 첨단 장비와 컴퓨터 분석을 활용하여 선발하고, 여섯째 그 최종 선발된 종자는 생산을 대량으로 한 다음 대용량분석을 통해 종자의 정체성을 확인한 다음 출고를 한다. 이 모든 과정은 첨단 기술과 분석, 그리고 오랜 육성경험과 마케팅과의 협의를 위한 종합적 인프라가 갖추어져야 가능한 것이다. 그림 56처럼 구성이 잘된 파이프라인은 식량생산 제고를 위한 육종사업 외에도 모든 품종육성 사업에 다 적용되어야 할 것이다.

<국 내>

국내에서 운영될 수 있는 여러 육종기술 분야 중에서 종자기업으로서 현재 할 수 있는 영역은 육종기술들 간의 연계이다. 즉 모든 육종기술을 활용하는 파이프라인을 잘 구성해서 생산제고 및 신품종개발에 최고의 효율을 올리는 것이다(그림 57). 즉 기 활용되고 있는 여러 기반기술들을 접목하는 것이다. 고전육종기술과 분자마커를 이용한 분자육종기술에 새로운 육종기술들을 융합하여 한 품종을 개발하는데 있어서 우수형질 집적과 세대단축을 동시에 할 수 있도록 하는 것이다.

문제는 국내의 종자시장은 주로 채소, 화훼, 과수에 국한되어 있어서 식량과 연관이 있지만 식량은 민간이 주도하는 종자시장에 속해 있지 않다. 식량종자의 품종육성은 농진청 소관이고 식량안보차원에서 벼 생산에 집중하여 충분히 자급하고 있다. 그러나 벼 외의 국내 식량작물의 경쟁력은 매우 약해서 품종을 개발하여 식량생산을 하기에는 모든 인프라가 부족하다. 따라서 식량 관련 전 작물에도 육종 파이프라인이 적용되어야 할 것이다. 특히 농진청산하 연구기관에서는 모든 기 육성기술들을 활용할 수 있는 원대한 기획을 세워야 하며 밀, 콩, 옥수수의 신품종개발 및 상업화에 집중 활용하여 수입대체를 할 수 있도록 한다. 이에 종자기업들과 협력이 하는 것이 바람직하다.

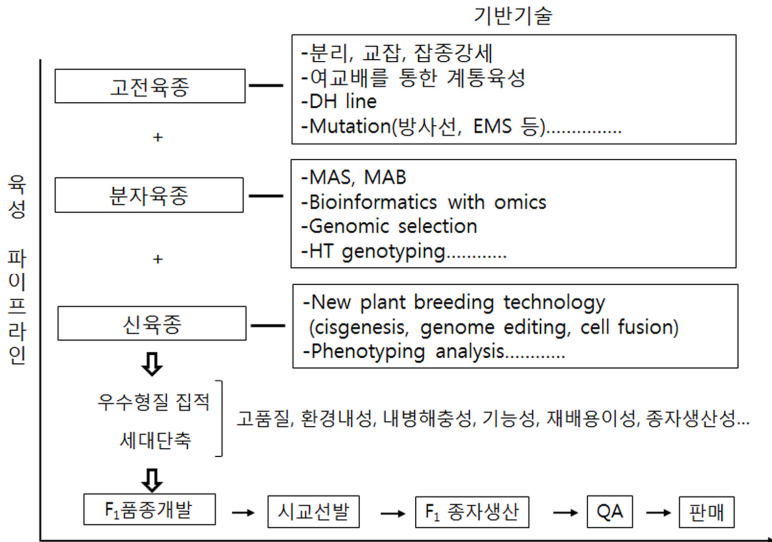


그림 57 국내기업에서의 이상적인 품종육성 과정이며 품종목표와 개발, 선발, 검증, 판매까지의 파이프라인을 나타내고 있다. 특히 본문에서 고찰된 세포융합, 유전체편집, cisgenesis 같은 기술들을 연계하면서 동시에 세대단축육성 도구인 MAB(marker-assisted backcross, 마커를 이용한 여교배)를 활용해야 고부가가가치이면서도 생산성이 제고되는 품종 개발에 많은 도움이 될 것이다. DH line: double haploid, 배가반수체 계통; Mutation: 돌연변이; EMS: Ethylmethane sulfonate; MAS: marker-assisted selection, 마커를 이용한 선발; MAB: marker-assisted backcross, 마커를 이용한 여교배; Bioinformatics: 생물정보; Omics: 오믹스는 체학(體學)으로 번역될 수 있으며, 생명체를 네트워크로 인식하고 그 네트워크의 구성물 간의 상호작용과 전체적인 새로운 행동 등을 연구하는 학문. 예를 들면 genomics, proteomics, glycomics, metabolomics, transcriptomics 등; Genomic selection: 유전체 정보를 이용한 선발; HT genotyping: high throughput, 대용량 유전자분석; New plant breeding technology: 신육종기술; phenotyping analysis: 표현형분석

6.4.3 기술간 연계

기 언급했던 유전체편집, 동종기원, 세포융합 같은 기술로 만들어진 계통들은 서로 연계할 수 있다. 즉 어떤 기술로 이미 만들어진 계통에다 여교배를 적용할 때 세대단축을 위해서 MAB (marker-assisted backcross, 마커를 이용한 여교배)를 사용할 수 있다. MAB의 기본 개념은 어떤 특정한 형질을 가지고 있는 계통(P2, 공여친)을 다른 계통(P1, 반복친)으로 여교배를 할 때 P1과 P2를 서로 구별 가능한 마커를 개발하여 원하는 반복친 계통으로 여교배하되, 마커를 이용하여 필요없는 공여친 유전체는

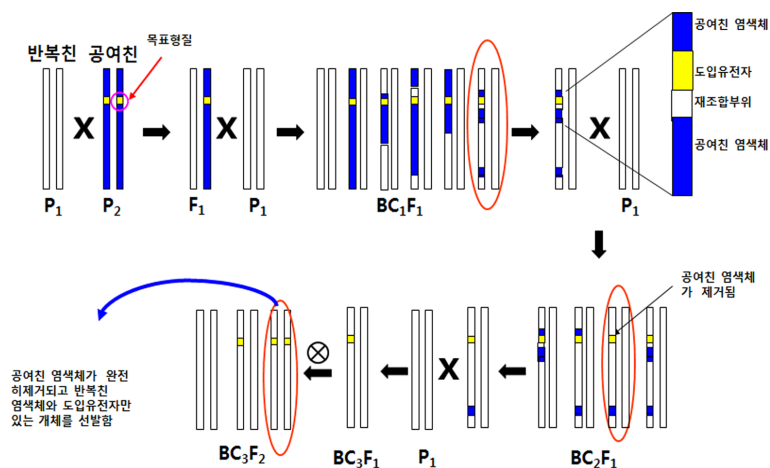
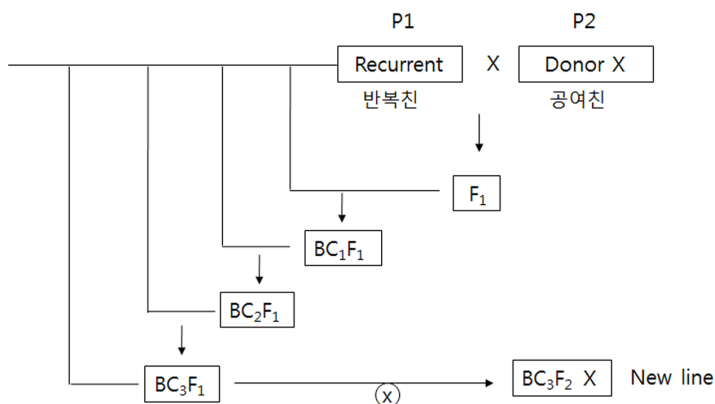


그림 58 P1, P2의 계능에 대한 마커를 이용하여 P2 유전정보를 보유한 개체를 도태함. 결국 P1 유전정보를 가지고 있는 개체만 선발되면서 동시에 P1에 목표형질을 갖게 된다

도태하는 기술이다(그림 58). 이에 필요한 SNP 마커는 염색체 당 약 10-20개 정도 만들어서 목표형질 마커와 같이 세대마다 활용하여 선발한다. 이렇게 함으로서 BC3세대 정도면 99% 이상 P1 반복친으로 유전체가 안정이 되고 목표형질도 확보하게 된다(그림 59). 실험적으로는 빠른 분석을 위해 chip based SNP (칩을 이용한 단일유전자변이, single nucleotide polymorphism) 분석을 통해서 선발하게 된다.

실상 MAB는 유전체 정보만 있으면 바로 적용 가능함으로 어떤 세포융합, 유전체편집 등 어떤 육종기술과도 연계할 수 있다. MAB를 통해서 많은 작물들의 계통육성기간이 절반으로 줄 수 있어서 획기적인 육성시대가 열린 것이어서 같이 접목하면 시너지 효과를 얻을 수 있다.

즉 생산성 제고를 위해서는 생산성 향상에 관련된 어떤 유전자/형질을 변형하든지, 어떤 형질을 도입하든지, 어떤 계통·품종·재래종·유전자원과 교배하든지, 어떤 육성목표를 세우든지 간에 모든 현행 기술들과 연계하여 육종 파이프라인을 구축한다는 것이다.



Chip based SNP analysis

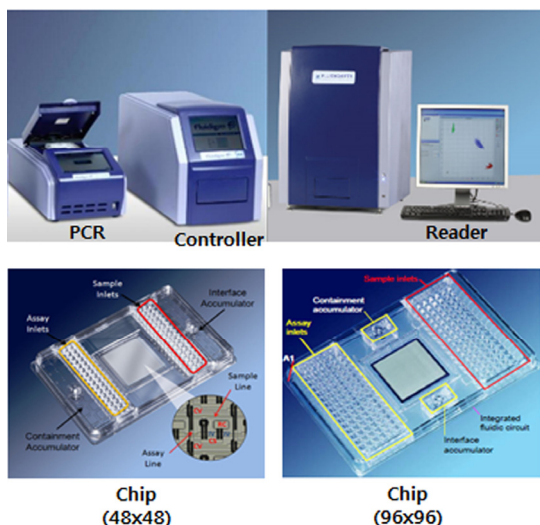


그림 59 BC3 세대 정도면 대부분의 P1 회복친의 유전적 기반이 안정적으로 될 수 있어서 세대단축에 많은 도움이 됨. 실험적으로는 각 세대의 DNA를 분리하여 chip에 찍어서 대량으로 SNP분석을 통해서 선발하게 된다

7.1 유전체편집 기술과 GMO(LMO)와의 차이

유전체편집 기술로서 ZFN, TALEN, CRISPR가 있는데 이 세 가지 기술의 공통분모는 이중나선의 DNA를 자르는 nuclease 역할이다. 따라서 특정 유전자를 타겟하여 자름으로 해서 결손돌연변이(deletion mutant)를 만들 수 있다는 점이 장점이다. 특히 CRISPR/Cas9 기술이 더 각광을 받는 이유는 활용이 더 간편하고 좀 더 정교하게 타겟을 하기 때문이다. 그러나 CRISPR/Cas9 경우 유전자를 또한 삽입할 수 있다. Nuclease에 의해 특정 유전자 또는 DNA가 잘린 다음 재접합(re-ligation)이 되는데 이 때 특정 DNA 부분이 삽입이 될 수 있다는 것이다. 이런 경우는 LMO 정의에 의해서 LMO가 된다. 즉 CRISPR/Cas9에 의하여 유전자가 knock-out(결손)되면 LMO가 아니고, knock-in(삽입)이 되면 LMO가 되는 것이다. 따라서 유전체편집기술을 활용할 경우 knock-in을 실시하면 LMO 규정에 따라야 한다. 카르테헤나 의정서를 근거로 LMO로 규정할 수 있는 것은 외래유전자의 존재 유무이다.

앞서 작성된 CRISPR/Cas9 기술활용에서 언급했듯이 미 농무

부는 비갈색(non-brown) 형질을 갖는 버섯은 유전체염기서열 중에서 결손(deletion)에 의한 것이기에 일반 육종 산물과 동일시 취급하며 GMO와 같은 규제를 받을 필요가 없다고 하였다. 목표 유전자의 변이만 유도되면 Non-GMO이다. 실상 CRISPR/Cas9 기술의 deletion 방법을 통해 신품종을 개발했다고 할 경우 유전체 상에서 돌연변이(mutation) 범위를 찾는다는 것은 거의 불가능하다. 왜냐하면 자연적으로 염기(bp) 한개가 돌연변이(point mutation) 되는 확률은 10^6 이다. 즉 백만 bp 중에 한 개의 bp가 변하는 비율이어서 일반 식물 경우 유전체 크기가 평균 10^9 bp 이기 때문에 약 1000개의 자연적 돌연변이는 항상 세대별로 발생할 수 있다는 것이다. 즉 품종출원시 정확한 명시를 하지 않으면(육성가가 어떻게 개발했는지 밝히지 않아도 됨) 알 길이 전혀 없다는 것이다.

유전자변형 생물체의 국가간 이동 등에 관한 통합고시에 따르면 유전자변형생물체(LMO, Living Modified Organisms)의 정의는 다음과 같다. “유전자변형생물체”라 함은 법 제2조 제2호에 정의된 바와 같이 다음 각 목의 현대생명공학기술을 이용하여 새롭게 조합된 유전물질을 포함하고 있는 생물체(동물, 식물, 곤충, 미생물 등)를 말한다. 또한 GM기술은 다음과 같이 포기한다.

- 가) 인위적으로 유전자를 재조합하거나 유전자를 구성하는 핵산을 세포 또는 세포 내 소기관으로 직접 주입하는 기술
- 나) 분류학에 의한 과(科)의 범위를 넘는 세포융합으로서 자연

상태의 생리적 증식이나 재조합이 아니고 전통적인 교배나
선발에서 사용되지 않는 기술

현재 ‘카르테헤나 의정서’³⁾를 근거로 LMO로 규정할 수 있는
것은 생물체에 외래유전자의 존재 유무이다. 따라서 유전자가위
를 이용한 유전체편집 기술에서는 생물체에 유전자가위의 존재
유무가 판단의 근거가 될 것이다. 따라서 유전체편집기술 중에
knock-in이 아닌 경우는 LMO 또는 GMO가 되지 않는다. 다만
knock-in방법이라도 선발과정에서 벡터 관련 외래유전자가 없는
개체를 선발하면 이것 역시 GMO가 아니다.

1) 카르테헤나 의정서: 바이오안전성의정서(The Protocol on Bio-safety)의 정식 명칭
은 ‘바이오 안전성에 대한 카르타헤나 의정서(The Cartagena Protocol on Biosafety:
CPB)’이다. 이 의정서는 1999년 콜롬비아의 카르타헤나에서 개최된 회의에서 제
안되었다. 유전자변형 농산물의 식품안전성과 생태계 교란 가능성에 대해 국제
NGO들을 중심으로 논란이 끊이지 않았고, 곡물 수입국들은 유전자변형 농산물이
일반농산물에 포함되었는지 여부를 확인할 수 있어야 한다고 제기하였다. 이에 유
전자변형 생물체(GMO, LMO)의 국가 간 이동에 관한 문제에 대해 2001년 1월 카
르테헤나 바이오안전성 의정서가 채택이 되었고 이 의정서는 생물다양성 협약의
부속 의정서이다. 그런데 생물다양성 협약과 마찬가지로 카르테헤나 협약 역시 각
국의 경제적 이해관계를 둘러싼 갈등이 발생하게 되었는데 미국을 비롯한 농산물
수출국들은 이 의정서의 채택에 반대하여 실효성을 반감시키고 있다.

7.2 Cisgenesis와 GMO(LMO)의 차이

Cisgenesis인 경우 유전자를 함유한 벡터가 식물 유전체에 삽입이 되기 때문에 일단 LMO인 것은 맞다. 그러나 결국 선발과정에서 벡터부분은 recombinase에 의해서 제거(selection-out)가 되고 원하는 타겟 유전자만이 삽입이 되는 경우이다. 다만 제거가 될 때 완전히 제거가 되느냐? 또는 벡터의 일부가 남아있지 않느냐에 대한 우려이다. 삽입과정에서 필요한 벡터의 boarder부분은 식물유전체에도 있는 경우이고 식물체에 남아있을 수 있는 벡터 sequence는 최소화 할 수 있어서 문제가 되지 않는다. 실제로 이런 실험들이 많이 유용되지 않아서 어떤 문제가 더 발생할지 모르지만 활용에 문제가 없는 벡터시스템으로 개선될 필요는 있다. Cisgenesis 기술의 큰 장점은 속, 종간의 교배가 어려운 상황에서 자연에 있는 유용 전체유전자(whole gene)를 이전하는 데는 최고의 방법이다. 그리고 성공할 경우, 벡터의 일부나 외래유전자의 삽입 부분을 찾기 어려워서 유전체상에서 문제될 것이 없으며 교배하여 얻은 육성방법과 동일하게 간주된다.

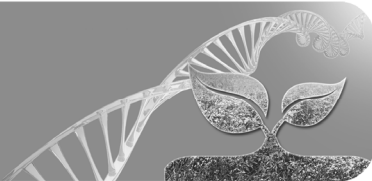
7.3 기술활용에 대한 이해도

근본적으로 EU는 GMO에 대해 규제를 하되 학문적 연구에는 문제를 삼지 않고 있다. 또한 GMO 재배허가 역시 EU 국가마다 다른 정책을 갖고 있어서 EU 전체의 결정이 각 국가의 정책과 다를 수 있다. 다만 GMO에 대한 편견은 GMO가 정치적, 경제적으로 EU 농업에 미치는 영향이 커서 보호차원이며 또한 선진화된 EU의 친환경정책을 유지시키려는 경향이 EU 자체적으로 매우 강하기 때문이다. 이해를 위해 EU 정책의 맹점을 한 예로 들어보자. EU는 GM 작물재배나 가공에 대해서는 굉장히 엄격한 규정을 갖는데 GM 사료를 대량수입하거나 EU에서 판매하는 것에는 규제가 없다. EU에서 허용하는 이유는 값이 싸기 때문이고 이를 먹고 자란 가축을 이용한 우유, 치즈, 가공유제품 및 고기는 EU에서도 편견 없이 소비되면서 다른 대륙으로 수출할 수 있기 때문이다. 즉 GM 사료를 이용한 육가공품은 위해성과 관련이 없다는 이율배반적 논리이다. 이는 단지 GM 사료를 재배하지 못하는 정치적, 경제적인 문제이지 전체적으로는 EU의 이익을 위해서는 최선의 방책인 것이다.

유전자편집기술에 대한 규제는 EU에서 공식적으로 정한바가 없다. Deletion(유전자결손)으로 유전자변이를 유도할 경우, 개발 단계에서부터 GMO로 판단할건지에 대해서는 논의중이다. 아직까지는 GMO와 동일한 규제를 해야 된다는 강력한 언급은 없으

며 EU 과학자들도 유전체편집은 GMO와 다르다는 공적적인 지원을 하고 있는 실정이다.

EU에서는 cisgenesis에 대해서 GMO라고 결정한 바가 있다. 개발초기서부터 유전자를 삽입하는 경우이기 때문이다. 그러나 결과를 볼 때는 일반 육성작물과 차이가 없어서 cisgenesis로 개발된 품종에 대해서 육성방법을 구지 얘기할 이유가 없다. 또한 한 계통을 이렇게 만들고 나서 이를 이용한 계통육성을 할 경우, 개발되는 모든 육성작물들이 GMO 정의에 맞지 않기 때문에 GMO가 될 수가 없다. Cisgenesis 기술에 관한 EU의 결정에 대해서는 앞으로도 계속 논의가 있어야 할 것이다.



8.1 시사점

급속하게 증가하기 시작한 세계 인구는 2050년에 약 97억 인구를 예상하고 있으며 현재 생산되고 있는 식량의 약 70%를 더 증산해야 인류가 이 지구상에서 생존할 수 있다. 즉 소비가 수확량 증대보다 더 빠르기 때문에 식량이 부족하게 되어 국가의 안보를 위협할 수 있는 상황이 될 수 있다. 따라서 경쟁에서 우위를 점하기 위하여 새로운 생명공학기술이 1990년대서부터 작물개발에 활용되었으며 생산량 증대, 친환경, 내병성, 내충성, 환경내성 등 기능강화 작물들이 개발하기 시작하였다. 최근 농작물 개발 산업은 종자, 제약, 유통, 비료, 농약, 바이오산업과 연계가 되어가고 있으며 향후 미래에는 빅데이터를 활용한 농업기반으로 모든 기술들을 활용하여 해수, 우주, 사막이든지 어느 환경에서도 재배 가능한 타겟농업이 전개될 것으로 사려 된다.

빠르게 돌아가는 국제정서에 국내의 식량안보사정을 점검해야 하는 것은 당위적이다. 우리는 과연 식량안보에 적절한 대응책이 있는가? 식량안보의 한 축으로서 식량생산성 제고를 명시한다면 우리는 과연 생산성증대를 위한 방안이 있는가? 농업과

학을 하는 연구자들과 종자육성 및 품종개발을 하는 기업체에서는 어떤 방안을 가지고 있는가? 종자전쟁중인데 현존하는 여러 기술들을 각개전투 식으로 전개하면 생산성제고에 대한 승산이 있겠는가? 다국적기업들의 첨단 연구능력에 대비하여 어떤 대안이 있나? 다국적기업의 연계사업과 산업영역 확대에 대한 대책은 있는가? ICT 활용한 첨단 융복합농업이 성행하고 있는데 국내 영세 종자기업에서 이 분야 활성화가 가능한가? 매년 엄청나게 수입해 들어오는 GMO에 대한 수입대체 방안이 있는가? 국가의 R&D 정책이 제대로 보이지 않는데 국가의 정책이 뭔지? 이런 질문들이 시사하는 바가 크지만 현재 상기 단 한 개의 질문에도 명확한 답이 없어 보이는 것이 국내 현실이다.

국내 여건에서 가장 빨리 접근할 수 있는 방안은 품종육성기술 제고측면이다. 관행적으로 수행했던 관행육성방법은 국내 연구진들도 세계 top 수준이기 때문이다. 유전체편집기술 같은 경우 수십년만에 한번 나올까 말까할 정도의 좋은 기술이다. 그러나 우리가 새로운 한 기술이 있다고 해서 모든 문제가 해결되는 것이 아니다. 신육종기술은 새로운 육종기술을 개발한다는 사고(思考)가 아니고 우리가 활용할 수 있는 모든 기술(새로운 기술 + 과거 및 활용 가능한 기술)을 접목하고 연계해서 잘 응용하여 새롭게 육성에 적용하자는 것이다(그림 60).

“신육종기술”의 정의

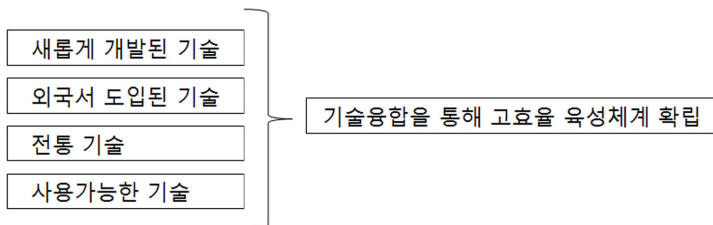


그림 60 신육종기술의 정의(저자의 개인적 의견)

8.2 문제점

- (1) 국내에서의 농생명 관련 연구 주축은 대학, 국가연구기관, 기업체이며 국책 연구과제에 상호 참여함으로써 공동연구를 하고 있다. 많은 연구과제를 수행하고 있지만 그동안 기업체가 활용할 만한 육종기술이나 도구를 개발한 성과가 미미하다. 또한 새로운 기술이나 도구가 외국에서 도입한다고 해도 국내에서 용이하게 활용하는 경우가 극히 드물다. 즉 기술을 확보해도 그 기술을 담을 수 있는 그릇이 없다는 것이 문제인 것이다. 미래의 육성사업은 첫째도, 둘째도, 셋째도 기술력에 의한 R&D 기반임으로 기술경쟁력 제고는 필수이다.

- (2) 대부분의 국내 종자기업이 영세이어서 아직도 관행육성방법을 이용하고 있다. 첨단육성 파이프라인을 운영하고 있는 기업은 1-2곳 정도이어서 종자산업이 성장하기 쉽지 않다. 더욱이 국내기업체가 품종개발에 글로벌 리더쉽을 발휘할 수 있는 상황이 아니어서 first mover(선도자)는 커녕 fast follower(추격자)도 될 수가 없는 실정이다.
- (3) 정부에서 GSP, 차세대바이오그린 사업, 김제 seed valley, 농진청산하연구사업 등 많은 사업을 펼쳐져가고 있는 실정이지만 연구사업 결과를 위한 전체적 control tower(주체)가 보이지 않는다. 연구과제들도 집약적, 중심적인 것보다 사업단 위주의 산발적, 각개전투식이어서 연구결과 후 시너지가 되지 않아서 어떻게 실용화, 산업화에 도움이 될 수 있을지 그 때 가봐야 알 수 있을 것이다.
- (4) GSP사업은 농축식품부가 내놓은 야심작이며 실제로 영세 종자기업들을 위해서 정말 훌륭한 사업인 것은 맞다. 따라서 GSP 사업이 향후 5년 더 진행되면(2021년까지) 대한민국 종자산업이 융성될 것으로 쉽게 생각할 수 있으나 현실은 그렇지 않다. 수출은 늘어날 수 있어도 현 참여하고 있는 종자기업들이 활용하고 있는 육종기술은 대부분이 관행육종 기술이다. 즉 결과로 내놓는 품종이 글로벌 경쟁에서 쉽지 않을 거라는 것이다. 또한 유전자원도 과거 보유하고

있는 것이나 외국 F1 도입종이 대부분이지, 새로운 유전자원 개발은 진행하고 있지 않다. 또한 본 사업을 위하여 과거의 농기평사업 연구비가 수평적으로 많이 이동됨으로 다른 연구비 사업이 부족하게 된 것도 사실이다. 현재 미래부, 산자부에서는 농업관련해서는 첨단 연구라도 지원을 하지 않고 있는데 이유는 농업이 농축식품부 소관이어서 중복하지 않겠다는 차원이다. 따라서 새로운 분야에 추구할 연구비가 없어서 실상 연구차원에서는 심각한 현실이다. 즉 생산성 제고를 위한 새로운 연구사업을 하려면 재원이 있어야 하는데 시기적으로 가장 중요한 이슈가 가장 어려운 시기를 맞이해서 향후 정착이 될 수 있을지 의문이다.

8.3 제언

(1) 국가 식량안보와 식량생산제고를 위한 대형 국책연구사업 구축을 제안한다.

가) 이를 위해 위원회를 구성하여 사업계획을 만들고 예비타당성 심의를 할 수 있도록 함.

나) 새로운 국책사업은 현 GSP와 농진청 차세대바이오사업을 지원할 수 있는 연구개발 사업으로 함.

(2) 본 연구에서 고찰한 기술들과 기존의 기술들을 연계하여 신육종기술 활용방안을 위한 정책을 제안한다.

가) 정책적으로 국내 영세한 종자기업들도 활용 가능한 육종 기술을 제공하고, 식량작물 및 원예작물에 다 적용하여 새로운 유전자원을 확보하여 다양한 고부가가치 신품종을 개발하도록 함.

나) 유전체편집 기술은 적은 비용으로 GMO를 대체할 수 있는 장점이 있어서 빠른 기간 안에 일반 대기업, 중견기업들 또는 농진청 식량과학원의 연구사업으로 정착이 되도록 함.

다) 기 제시한 신육종 기술들은 다국적기업과 기술경쟁력 측면에서 GMO만 제외하고는 크게 차이가 없음. 따라서 신규 연구사업에는 non-GMO 개발을 위해서 고찰된 기술들

과 기존에 보유하고 있는 여러 기술들을 융합한 고효율
신육종체계로 품종육성 및 고생산성 추진할 수 있도록
정책적으로 지원함.

- 라) 본 기술융합 파이프라인을 활용한 식량생산제고 및 고품
질 품종개발 분야가 국가연구사업으로 정착할 수 있도록
다부처공동연구사업으로 미래부, 농축식품부에 본 제안을
전달하고자 함.

도서출판 식안연 식량안보시리즈

제1권 나트륨, 건강 그리고 맛



식량안보시리즈 제 1 권

이숙중, 이철호 공저

국판 / 3쇄 준비중

값 8,000원

ISBN 978-89-967826-9-8

[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 세계 보건기구(WHO)가 제시한 나트륨 섭취권고량이 우리에게 합당한 것인지 재검토하고, 이를 근거로 하여 합리적인 기준을 가지고 현실성 있는 나트륨줄이기 운동을 전개할 것을 제안하였다.

제2권 건강 지킴이 보리의 재발견



식량안보시리즈 제 2 권

김영수, 최재성, 석호문,

신동화 공저

국판 / 166쪽

값 8,000원

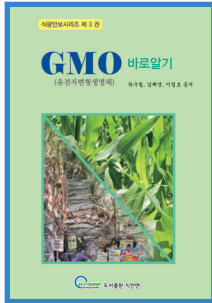
ISBN 979-11-86396-10-0

[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.

제3권 GMO 바로알기



식량안보시리즈 제 3 권
박수철, 김해영, 이철호 공저
국판 / 6쇄 / 올칼라
값 12,000원
ISBN 979-11-86396-21-6

[contents]

1. 유전자의 발견과 생명체
2. 유전자변형기술의 발전
3. 유전자변형(GM) 작물의 개발 현황
4. GM작물의 환경 위해성 평가
5. GM작물의 안전성 평가
6. GM작물의 재배 및 교역 현황
7. GMO의 안전성에 대한 논란
8. GMO의 미래
9. 우리나라 식량안보를 위한 GMO 정책 제언

앞으로 예견되는 인류의 식량문제를 해결하기 위한 기술로 GM작물의 개발과 이용 확대를 위해 저술되었다. 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.

제4권 쌀의 혁명



식량안보시리즈 제 4 권
이철호, 이숙중, 김미령 공저
국판 / 204쪽
값 10,000원
ISBN 979-11-86396-27-8

[contents]

1. 쌀의 이용 역사
2. 쌀의 영양가와 생리기능성
3. 쌀의 가치사슬과 가공산업
4. 쌀의 구조와 가공적성
5. 유럽의 밀 가공 연구
6. 일본의 쌀 식미연구
7. 쌀의 변신
8. 쌀의 식량안보적 기능
9. 우리쌀의 새로운 비전

우리의 주식인 쌀이 농업의 뿌리로 남아있게 하기 위하여 쌀의 수요 창출과 쌀 가공산업의 발전 전략을 제시하기 위해 저술되었다. 쌀의 영양학적 우수성과 생리기능성을 다시 짚어보고 쌀의 가치사슬과 산업 규모를 다시 평가하였다. 현대사회의 요구에 맞는 가공식품을 제조하기 위한 쌀의 물리화학적 가공특성을 살펴보고 유럽에서 빵의 연구를 위해 수행된 주요 연구개발 사례와 일본의 쌀 식미연구 동향을 소개하였다. 그리고 최근 우리나라에서 개발되고 있는 쌀 가공 신제품의 특징과 발전 가능성을 조사하였다.

제5권 식량낭비 줄이기



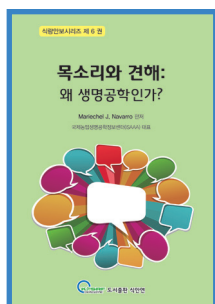
식량안보시리즈 제 5 권
채희정, 이숙중, 이철호 공저
국판 / 2쇄, 244쪽
값 12,000원
ISBN 979-11-86396-30-8

[contents]

1. 식량낭비의 원인과 실태
2. 식량낭비 저감화 기술
3. 식량낭비를 줄이기 위한 제도적 개선
4. 식량낭비를 줄이기 위한 정책제언

음식낭비를 줄이는 것은 식량자급률을 높이는 방법이다. 식량자급률이 60%이면 선진국 수준으로 식량안보를 크게 염려하지 않아도 된다. 농업생산으로 식량자급률을 1% 올리려면 1조 원의 비용이 드는 것으로 추산되고 있다. 정부와 국민이 힘을 합쳐 식량낭비를 줄이는 일에 매진해야 한다는 것은 너무나 당연한 일이다. 이 책은 우리나라의 식량낭비 구조를 분석하고 식량낭비를 줄이기 위한 기술적 방법과 제도적 개선 방안을 제시하고자 노력했다.

제6권 목소리와 견해: 왜 생명공학인가?



식량안보시리즈 제 6 권
Mariechel J. Navarro 편저
국판 / 229쪽
값 12,000원
ISBN 979-11-86396-32-2

[contents]

1. 인류를 위한 기술
2. 혜택과 잠재력 제공
3. 생명공학 옹호
4. 과학 커뮤니케이션
5. 기술을 넘어서는 생각

핀스트럽 앤더슨 박사는 “지속가능한 식량과 농업시스템을 성취 유지하고, 식량과 영양의 불안정을 완화하기 위한 과학의 역할과 전망은 매우 밝다”는 의견을 밝혔다. 그러나 주된 과제는 행동의 결과를 책임지지 않아도 되는 단체들의 반대를 극복하는 것이다. 이러한 다국적 기구의 무책임한 행동들을 처벌하는 국내 및 국제적 합의는 매우 중요한 단계라고 할 수 있다. 그는 많은 유럽의 정부와 다국적 NGO가 아프리카 정부에게 생명공학이 위험하다고 주장하고 있는 사례를 인용하였다. 남아프리카, 아르헨티나, 브라질, 중국, 인도, 그리고 기타 국가들의 소농들이 이미 GM 옥수수를 재배하고 있음에도 불구하고 유럽 정부들은 자국의 농민들이 GM 옥수수를 재배하지 않도록 막고 있다.

음식오케스트라

| 단순함에 아름다움이 있듯이 음식에도 철학이 있다 |



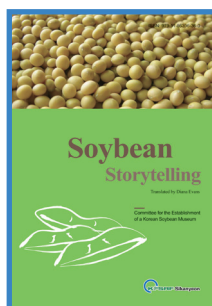
이철호 지음
국판 / 3쇄, 248쪽
값 8,000원
ISBN 978-89-967826-0-5

[contents]

1. 서양의 영양학이 일으킨 동보소동
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 식품 지식을 사람들에게 전파하려는 것이다.

Soybean Storytelling(콩 스토리텔링)



한국공백물관건립추진위원회 편
Translated by Diana Evans
국판 / 344쪽
값 20,000원
ISBN: 979-11-86396-36-0

[목차]

01. 콩의 기원
02. 콩과 장(醬)의 문화
03. 콩의 생육과 생태
04. 콩의 가공과 이용
05. 콩의 영양과 기능성
06. 콩의 미래

[contents]

01. The Origin of Soybeans
02. The Culture of Soybeans and Sauce
03. The Growth and Ecology of Soybeans
04. Processing & Utilization of Soybeans
05. Nutrition and Functionality of Soybeans
06. The Future of Soybeans

한국은 콩의 재배와 이용을 시작한 콩의 종주국임에도 불구하고 대부분의 한국 고대사가 그랬듯이 중국 문화에 묻혀 세계에 제대로 알려져 있지 않다. 이 책은 인류 역사상 가장 먼저 콩을 재배하고 식품으로 이용한 한(韓)민족의 콩 이용 역사를 세계에 알리기 위한 목적으로 경상북도 영주시에 설립된 공세계과학관 건립을 위해 수집한 자료를 스토리텔링 형태로 정리한 것을 국문과 영문으로 한권에 묶어 펴낸 것이다. 영문 번역은 미국 하버드대학 대학원에서 한국문학을 전공한 다이아나 에반스(Diana Evans)씨가 담당했다.

식량생산 제고를 위한 신(新)육종기술

이 책은 먹거리의 원천자원인 종자에 대한 기본적인 개념, 그의 중요성과 종자산업의 현황을 다루었고 특히 국내에서도 적극적으로 사용가능한 여러 신육종기술들을 검토하였다. GMO를 대체할 수 있고 대사공학에 활용할 수 있는 유전체편집 기술, 종속간에 교배가 어려울 때 유전자를 이전할 수 있는 동종기원(Cisgenesis)기술, 핵이나 세포질을 치환하여 새로운 유전자원을 만들 수 있는 세포융합기술들을 집중적으로 다루었다. 이런 기술들과 기보유하고 있는 관행육종 기술과 접목하고, 마커를 이용한 여교배와 연계하여 활용한다면, 새로운 육종기술 시스템을 구축할 수 있으며 신품종개발과 생산량 제고에 도움이 될 것이다. 특히 곡류자급률이 23.8% 밖에 되지 않고 식량안보에 집중해야할 우리나라는 이런 신육종기술의 접목과 적용이 필수이다.

- 머리말에서 -

값 12,000원



ISBN 979-11-86396-40-7