

유전자교정작물: 식량안보의 게임체인저

글 한지학

(주)바이오텍크롭컨설팅 대표

그림 신인철

한양대 생명과학과 교수

편집 윤신영 기자

기획 사단법인 집현네트워크

조선시대 한양의 저잣거리에 가면 무엇을 볼 수 있었을까. 나름 풍요로웠던 영·정조 때인 약 300년 전 시장에서는 어떤 먹거리를 살 수 있었을까. 철마다 다르겠지만 쌀, 보리, 조, 콩 등을 파는 곡물전과, 배추, 무, 파, 마늘 등을 파는 채소전, 배, 감, 대추, 밤, 참외 등의 계절 과일을 파는 과일전이 별도로 있었다고 한다. 하지만 그때의 먹거리는 지금의 먹거리와 이름은 동일할지언정, 품질 차원에서는 완전히 다른 먹거리다. 옛날 종자는 대부분 재래종이어서 현재의 개량된 품종과는 차이가 많다. 우리가 지금 마트나 시장에서 구입하는 먹거리는 대부분 육종을 통해서 탄생한 신품종으로, 계절과 관계없이 재배되면서 맛있고 영양도 풍부하다. 생산성도 좋고 병해충에 강하며 농가에서 재배하기 쉽다. 이렇게 품질이 월등하게 개량된 다양한 채소류, 과일류, 곡류를 우리 조상들이 접하지 못했다는 점에 대해 안타까움을 느낀다 (그림 1).



[그림 1] 옛날 종자는 대부분 재래종이어서 현재의 개량된 품종과는 차이가 많다.

학계에 따르면, 인류가 경작을 시작한 시대는 마지막 빙하기가 끝나는 약 1만 2000년 전부터다. 기후가 따뜻해지고 생태계가 재편되면서 농경이 시작됐다. 농경은 중동, 중국, 동남아시아, 아프리카, 메소아메리카, 남북아메리카 등 여러 지역에서 독립적으로 발생했다. 밀·보리·조·기장·벼 같은 곡류(곡물)가 가장 먼저 작물화됐고, 이어 두류(콩과)와 채소류가 뒤따랐다. 기원전 6000년부터 기원전 3000년 사이에는 포도, 올리브, 대추야자 등 과일이 재배됐다.

과거 인류는 육종에 대한 과학 지식은 없었다. 하지만 농경 초기 농부들은 무의식적 선발로 가장 건강하거나 수확량이 좋은 개체의 씨앗을 골라서 다음 해에 심는 방식을 택했다. 기원전 7000년~3500년경에는 형질을 보고 의식적으로 골라 심는다는 의식적·체계적 선발이 이뤄졌다. 이후 기원전 2000년경 수그루의 꽃가루를 골라 암그루에 인위적으로 옮기면 열매의 질이 달라진다는 인공교배 개념이 확립됐다 (표 1).

[표 1] 인류가 약 1만 2000년 전부터 종자를 선발하고 재배, 수확한 역사의 단계별 정리.

단계	내용	시기·지역
무의식적 선발	좋은 씨앗을 계속 남김	약 1만~1만 2000년 전, 근동·중국·아메리카 등
의식적 형질선발	안 떨어지는 이삭 등을 의도적으로 골라 냄	기원전 7000~기원전 3500년경, 메소포타미아·이집트
인공교배 인지·실행	암수를 골라 인위적으로 수분	기원전 2000년경, 메소포타미아(대추야자)
최초의 과학적 인공교잡종	서로 다른 종 의도적 교배	1717년, 영국 페어차일드 물(패랭이·카네이션 교잡 꽃)
조직적 산업 육종	계통선발+교배 체계화	1840~1870년대, 프랑스(빌모린)
과학적 육종학 확립	유전법칙 기반 예측 육종	1865년, 오스트리아(멘델)

과학적으로 기록된 최초의 인공교배를 수행한 사람은 1716~1717년 영국의 토머스 페어차일드(Thomas Fairchild)였다. 그는 종(種)이 다른 수염패랭이꽃(Sweet William, *Dianthus barbatus*)과 카네이션(*Dianthus caryophyllus*)을 교배해 페어차일드 물(Fairchild's Mule)이라는 인공교잡 꽃을 만들었는데, 이것이 과학적으로 기록된 최초의 인공교배종이다[1].

이후 종자기업에서 체계적 육종 산업을 시작했다. 프랑스 종묘회사 빌모린(Vilmorin)이 1840년대부터 계통선발 기법을 개발했고, 1870년대부터는 밀 등 작물에서 교배와 선발을 체계적으로 시행해 회사 차원의 조직적 육종 프로그램을 시도했다. 이후 현대 육종학의 과학적 토대는 멘델(Gregor Mendel)의 유전법칙에 의해 정립됐다[2].

| 다양한 육종기술이 탄생하다

20세기 이후, 새로운 품종을 개발하기 위한 전통육종기술 체계가 갖춰졌다. 전통육종기술의 기본 개념은 모든 유전자원을 이용해 다양한 교배 및 선발 과정을 거쳐서 상업적 가치가 큰 새로운 유전자원을 개발하는 것이다.

크게 두 가지 시스템을 활용한다. 먼저, 좋은 형질을 보유한 유전자원을 유전적으로 고정해 계통을 만든다. 그 계통들의 상호교배를 통해서 잡종강세의 형질을 갖는 교잡종(hybrid), 즉 제1대 교잡종(F1 hybrid)을 선발해 품종으로 판매한다. 주로 고추, 토마토 등 다양한 채소와 옥수수가 여기에 해당한다. 둘째는 유용한 유전자원들을 상호 교배한 뒤 선발된 좋은 개체를 자가수분을 거쳐서 유전적으로 고정된 계통을 만들고, 그 계통 자체를 품종으로 상품화하는 경우다. 콩이 대표적이며, 대부분 한 해 전에 생산된 종자를 이듬해에 재배하고 수확하는 자식종이어서 교잡종이 아닌 종자로 직접 판매된다.

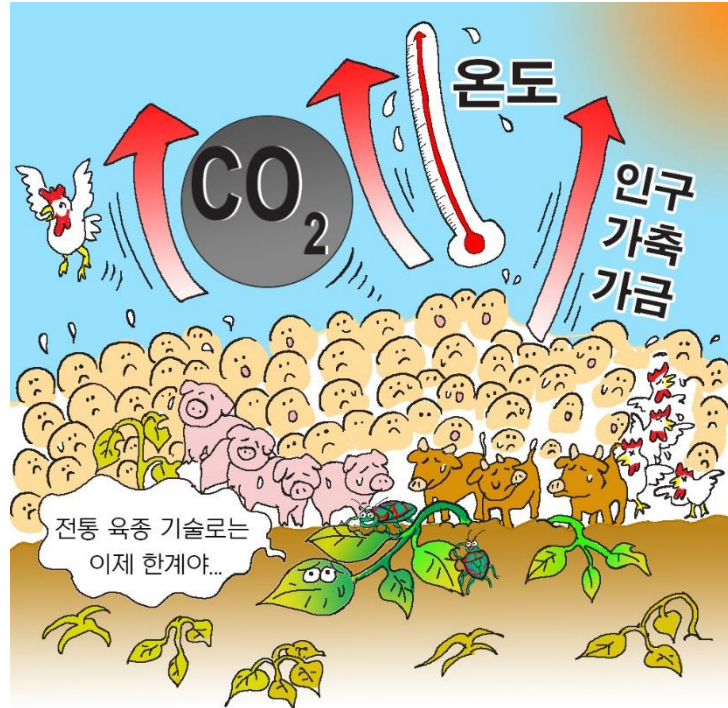
전통육종기술이 구축된 덕분에, 과거 재래종보다 고품질의 신품종을 다양하게 개발, 보급할 수 있었다. 물론 1950년 이후 비료와 농약의 발달 역시 생산량을 증가시키는 데 크게 기여했지만, 육종기술이 없었더라면 인류와 가축, 가금류의 먹거리를 책임져 온 신품종 역시 존재하지 않았을 것은 분명하다.

그렇다면 우리는 왜 계속 새로운 육종기술을 필요로 하고, 더 많은 생산량을 요구할까.

첫째, 1920년 이후 전 세계의 인구와 가축, 가금 수는 계속해서 증가했다. 인구는 2050년 약 100억 명으로 늘어날 것으로 예상된다. 막대한 식량이 필요해진다. 인간의 단백질 공급을 위해 사육되는 가축과 가금류에게도 사료가 필요하다. 인간의 식량 자원과 경쟁하게 됨으로써 전체 식량 생산에 대한 압박은 더욱 커질 것이다[3]. 현재 재배하는 식량의 1.7배를 확보해야 한다. 하지만 오히려 경작지는 줄고 있는 상황이므로, 생산성 제고 품종을 위해 첨단 육종기술이 필요해진다.

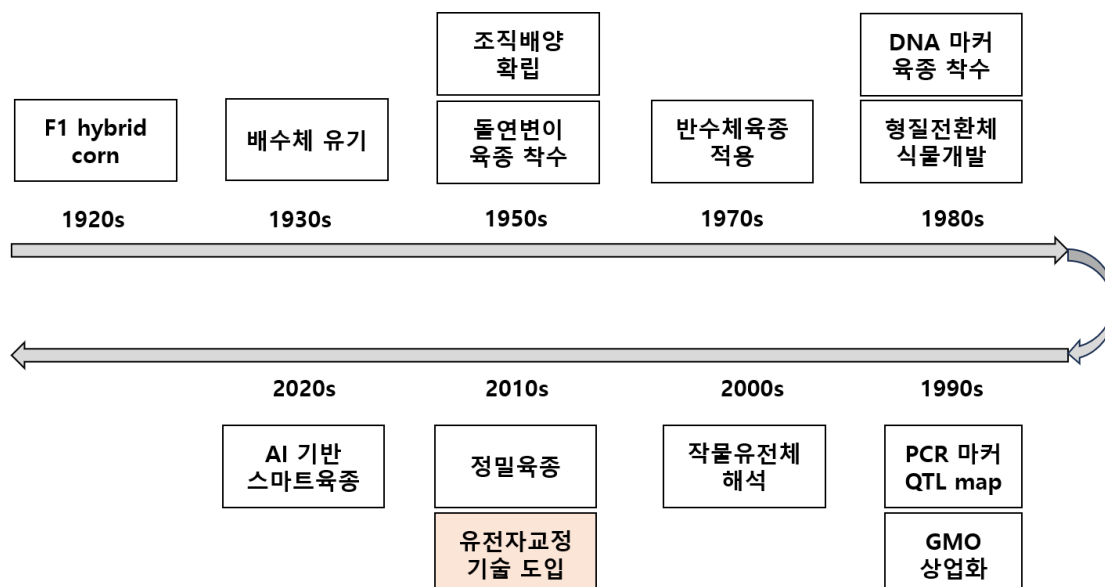
둘째, 기후변화가 식량안보에 미치는 영향이 크다. 2050년에는 현재보다 이산화탄소 농도가 더 증가할 것이며 온도 역시 상승할 것으로 예측되고 있다[4]. 온도가 높아지면 가뭄, 고온, 홍수, 염류 집적과 같은 피해가 발생한다. 대다수의 과학자들은 이런 피해가 자연적인 주기 안에서 일어나는 변화가 아니라, 인류의 물질문명이 지구의 탄소순환사이클을 무너뜨려 자초한 결과라고 보고 있다. 기후변화에 잘 견디는 새로운 품종을 개발하기 위한 새로운 육종기술이 절실한 이유다.

셋째, 전통육종기술이 식량 생산에 많은 도움을 줬지만 특성(형질, trait)의 다양성을 구축하는 데에는 기술적 한계가 있다. 특히 기능성, 재배 용이성, 저장성, 제초제 내성 및 병해충 내성을 위해서는 첨단 육종기술을 반드시 개발해야 한다 (그림 2).



[그림 2] 다양한 이유로, 우리는 계속 새로운 육종기술을 필요로 하고 있다.

지난 약 100년간 다양한 기술이 전통육종과 접목돼 새롭고 우수한 품종을 개발하는 데 기여했다. 각 기술들은 육종사업의 이정표를 만들었으며, 품질이 우수하고 생산성이 높으며 병해충에 강한 품종을 만드는 데 지대한 영향을 미쳤다 (그림 3).



[그림 3] 지난 약 100년간 작물 육종에 관련한 이정표 기술. 각각의 기술이 궁극적으로는 전통육종 방법과 연계돼 새로운 품종을 육성하는 데 많은 도움을 주고 있다. 필자 제공

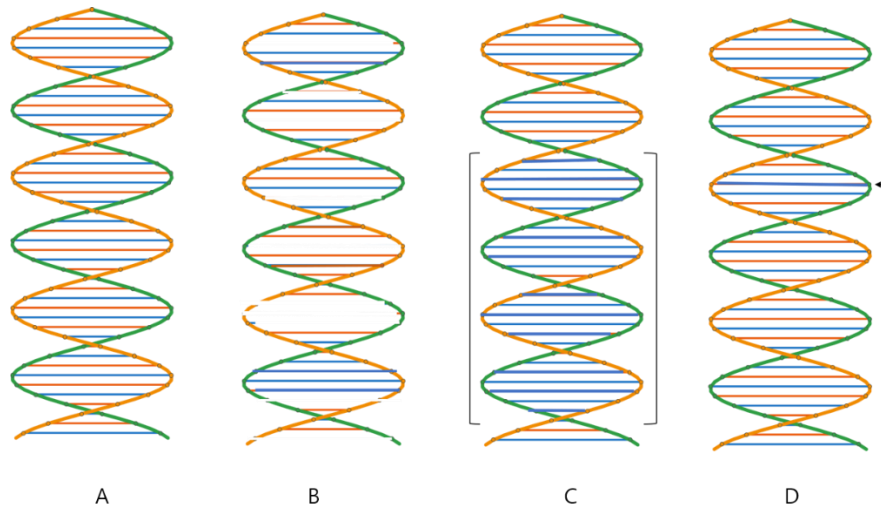
Ⅰ 판을 바꾸는 등장, 유전자교정기술

새로운 품종을 개발하기 위해서는 재래종, 야생종, 상업품종, 돌연변이체 등 여러 유전자원을 활용한다. 인위적 돌연변이체를 만들어서 유전자원으로 사용하는 방법은 1950년대부터 활발하게 이용되고 있다. 주로 방사선이나 화학물질을 이용한다. 새로운 유전자원 확보 측면에서는 유용하지만, 무작위 변이가 유발돼 DNA 상에 불필요한 변이가 많이 발생한다는 단점이 있다. 또한 돌연변이체를 선발하는 과정이 몇 세대를 거쳐야 해, 시간과 비용이 많이 들고 우수 개체를 확보하는 효율성이 낮다.

생명공학 작물인 유전자변형작물(GMO, Genetically Modified Organism)도 있다. GMO 는 외래 유전자 또는 특정 유전정보를 유전자변형기술(GM 기술)로 식물세포 내에 도입해 원하는 형질을 갖도록 개발한 변이 작물이다. GMO 는 형질이 우수해서 상업적으로 매우 성공했지만, 품종으로서 상품화하기까지는 십수 년의 기간과 엄청난 비용이 든다. 더구나 규제 문제가 있어서 다국적 종자기업이 아닌 일반 연구자나 소규모 기업에서는 개발을 엄두조차 내지 못하는 게 현실이다.

이에 비해 유전자교정기술은 가장 최근에 등장한 첨단 육종기술이다. 개발 비용과 기간이 적절해 기술 활용도가 점점 확대되고 있다. 이 기술로 개발된 작물이 유전자교정작물(GEO, Gene-Edited Organism)이다.

유전자교정기술은 특정 DNA 부위를 정밀하게 절단하거나 특정 염기를 다른 염기로 바꿔 DNA 서열을 변화시키는 기술이다 (그림 4). DNA 서열 내 표적(타겟)을 정확하게 변이시킴으로써 연구자가 원하는 형질을 보다 정밀하게 조절할 수 있다. 육종가의 꿈을 실현시켜줄 기술로 꼽힌다.



[그림 4] 각 변이에 따른 DNA 모식도. A: 정상 DNA. B: 방사선이나 화학물질에 의해 DNA의 염기서열이 결손되거나 삽입된 DNA. C: 특정 유전자가 삽입([] 표시)된 GMO의 DNA. D: 유전자교정기술에 의해 한 개의 염기가 바뀐(화살표) DNA. 유전자교정기술은 화살표처럼 염기 한 개 또는 소수의 염기를 삽입 또는 결실로 바꿀 수 있어서 변이가 가장 적다. 즉 정상(A)과 가장 유사하다. 필자 제공

유전자교정기술에는 징크핑거 뉴클레아제(ZFN), 탈렌(TALEN), 크리스퍼/캐스(CRISPR/Cas) 계열 등 여러 기술이 있으며, 현재 식물 분야에서는 크리스퍼/캐스 시스템이 가장 널리 활용되고 있다. 유전자를 교정하기에 가장 편리하고 간단하며, 형질전환 시스템을 활용해 교정체를 개발할 때 가장 보편적으로 쓰이고 있다.

(BOX) 세균의 바이러스 방어 기작, 크리스퍼-캐스 9

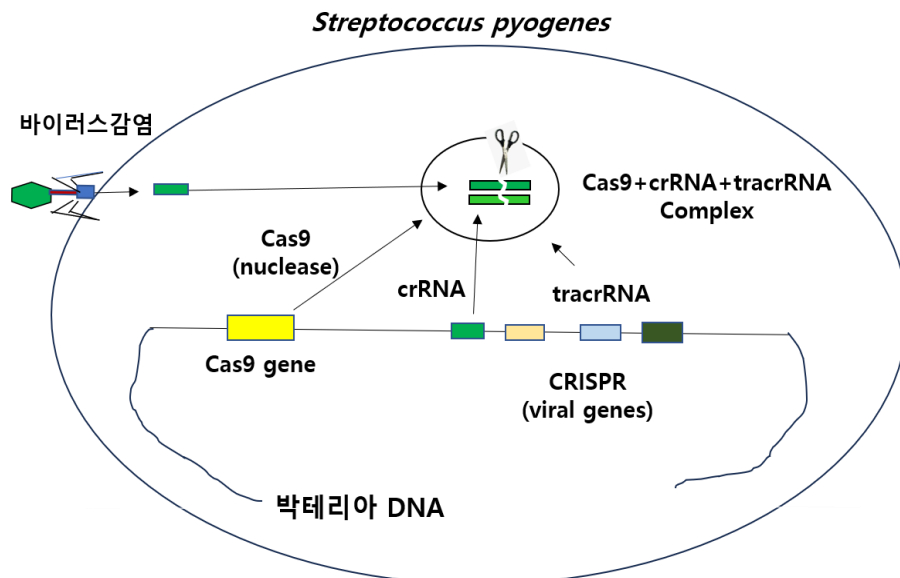
크리스퍼/캐스 계열의 대표인 크리스퍼-캐스 9은 원래 자연 상태에서 바이러스와 세균(*Streptococcus pyogenes*) 사이의 ‘밀고 당기는’ 관계에서 발견됐다.

바이러스는 세균에 침입해 증식한 뒤 세균 세포를 분해(lysis)하면서 밖으로 배출된다. 세균이 일방적으로 당하는 관계지만, 세균도 당하고만 있지는 않았다. 오랜 세월 동안 방어 기작을 진화시켰다. 과거에 침입했던 바이러스의 유전정보 일부를 크리스퍼 어레이(array)에 저장해 뒀다가, 같은 바이러스 또는 유사한 바이러스가 다시 침입하면 바이러스의 DNA를 인식하고 제거하기 위해서다. 크리스퍼 유전자는 바이러스 유전자와 상보적이므로, 세균은 이를 이용해 바이러스가 세균 내로 침입해 증식할 때 바이러스 유전자를 정밀하게 절단한다. 세균이 창안한 일종의 바이러스 면역시스템이다[5].

자연 상태에서 크리스퍼-캐스9은 몇 가지 핵심 구성 요소를 포함하고 있다.

- 1) crRNA(CRISPR RNA): 20개 염기서열이 목표 DNA와 상보적으로 결합
- 2) tracrRNA(trans-activating crRNA): crRNA를 캐스9 단백질에 단단히 고정시켜주는 역할
- 3) 캐스9: DNA를 자르는 뉴클레이즈라는 세균 효소

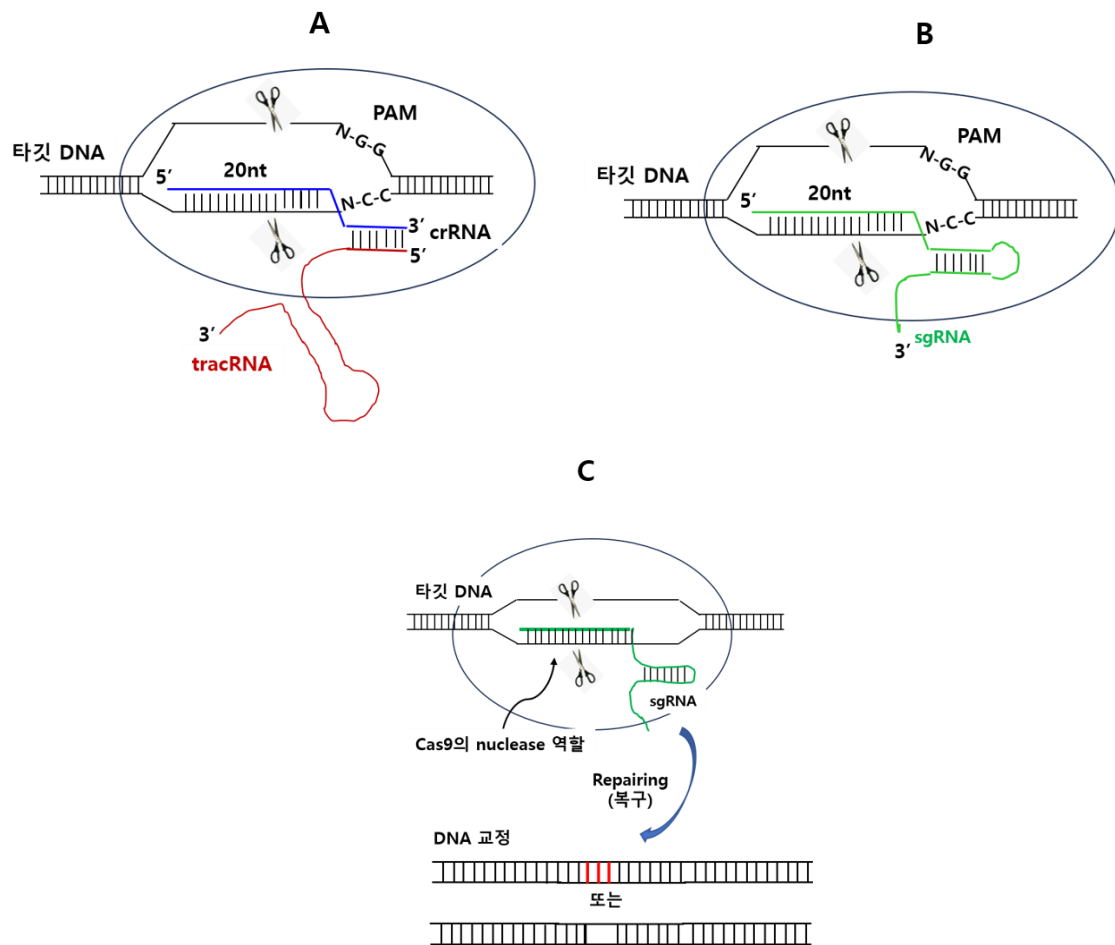
바이러스가 침투해 바이러스 DNA를 세균 내 투입하면, 먼저 crRNA와 tracrRNA가 전사된다. crRNA는 표적 DNA를 인식하고, tracrRNA는 crRNA와 결합해 캐스9이 RNA-DNA 복합체를 인식하고 작동할 수 있도록 한다. 이후 상보적으로 형성된 DNA 이중나선(duplex, 바이러스 DNA + crRNA)과 tracrRNA, 캐스9이 복합체를 형성하게 되면, 캐스9은 표적 DNA를 절단한다. 절단된 DNA는 세균의 DNA 복구(repairing) 과정에서 다른 염기들에 의해 채워진다. 결국 염기의 구성이 달라지고 변이체가 됨으로써 바이러스 DNA가 더 이상 증식되지 않게 된다 (그림 5).



[그림 5] 바이러스가 세균 세포 내 침입할 경우 이에 대한 방어 시스템 기작으로서 유전자교정이 일어난다. 바이러스 유전자가 복합체 안에서 crRNA와 상보적으로 이중나선을 형성할 때 캐스9에 의해 절단된다. 필자제공

| 인위적인 유전자교정 기작

2012년 제니퍼 다우드나와 에마뉘엘 샤르팡티에 교수 연구팀은 자연적으로 세균에 존재하는 유전자교정 시스템을 인위적으로 이용하기 위하여 crRNA와 tracrRNA를 하나의 링커 루프(linker loop)로 연결한 인공 RNA를 개발했다. 이것이 바로 sgRNA(single guide RNA)다. 표적 DNA 서열에 맞는 sgRNA를 설계하면 다양한 유전자의 특정 부위를 선택적으로 교정할 수 있게 돼 실험의 편의성과 효율이 극단적으로 향상된다[6, 7] (그림 6). 생명과학 분야에 기여한 공적으로 다우드나와 샤르팡티에는 2020년 노벨화학상을 받았다.



[그림 6] A: 자연적으로 발생하는 세균 내 유전자교정시스템. B: 제니퍼 다우드나와 에마뉘엘 샤르팡티에 연구팀에 의해 개발된 유전자교정시스템[6, 7]. sgRNA: crRNA와 tracrRNA를 연결한 단일 가이드 RNA(sgRNA). C: 타겟 DNA와 상보적으로 만난 DNA 이중나선 구조(duplex)를 뉴클레이즈(캐스9)가 자른 뒤, DNA가 복구(repairing)된다. 이때 복구과정에서 다른 염기의 삽입 및 결실 현상(indel)이 발생함으로써 원래 유전자의 특성이 발현되지 않게 된다. 필자 제공

그림 6C를 더 설명하면, DNA가 절단된 후에는 세포의 DNA 복구 과정이 진행된다. 이 과정에서 일부 염기의 삽입 또는 결실이 발생할 수 있다. 이런 변화가 유전자의 기능을 변화시키면서 새로운 형질이 나타날 수 있다. 이런 유전자의 염기서열 변화로 인해 코돈(아미노산 종류를 지정하기 위한, 연속해서 놓인 3개의 염기 서열, 유전 암호의 최소 단위)이 달라질 수 있으며 그로 인해 원래 있었던 유전자의 특성이 달라지는 것이다 (그림 7).

AGAAACCGTTAATACTTGATATCCGATTCCTATC	control
AGAAACCGTTAATAC--GATATCCGATTCCTATC	교정1
AGAAACCGTTAATACAAAGATATCCGATTCCTATC	교정2
AGAAACCGTTAATA----ATATCCGATTCCTATC	교정3

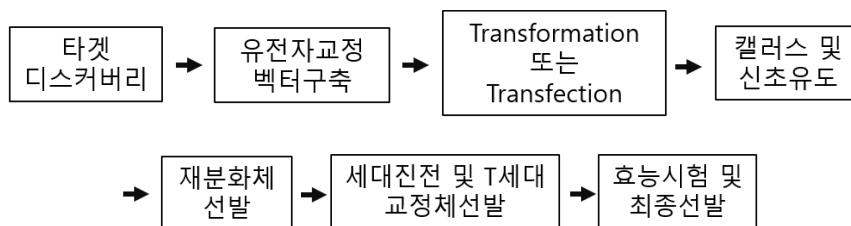
[그림 7] 대조군(Control)은 정상 DNA 염기서열이다. 교정 과정에서 교정1과 3은 결손(deletion), 교정2는 삽입(insertion)에 의해 DNA 염기서열 코돈에 변화가 일어나게 된다. 결국 본 유전자의 특성이 나타나지 않게 되면서 표현형도 달라진다. 필자 제공

| 유전자교정기술을 이용한 유전자교정작물 개발

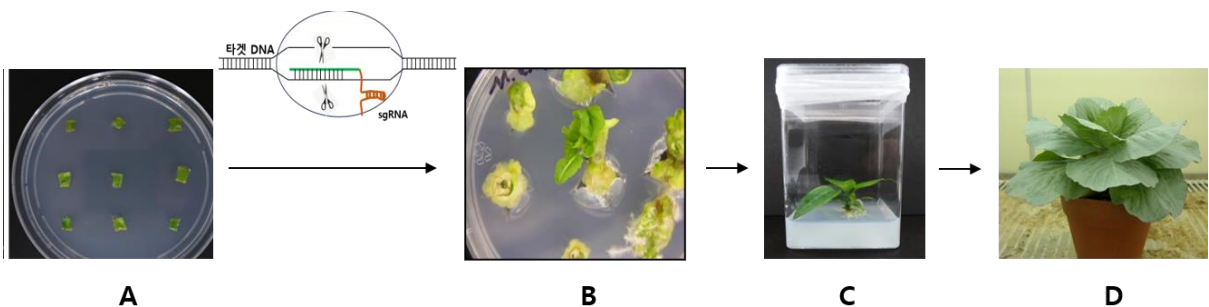
유전자교정작물(GEO)을 개발하는 과정은 크게 7단계로 나뉜다 (그림 8). 그러나 형질전환 이후 과정은 작물별로 다르다. 작물별로 또는 동일 작물에서도 계통별로 배양 조건이 다르고 효율이 달라서 여러 반복 실험을 통해서 개발자 스스로가 그 작물 교정의 전문가가 돼야 한다.

조직배양 과정을 통해 교정체를 선발한 후 효능시험을 통해서 원하는 형질을 안정적으로 확보하게 되면 하나의 이벤트로서 향후 품종화를 거쳐서 상업화를 할 수 있게 된다.

(1)



(2)

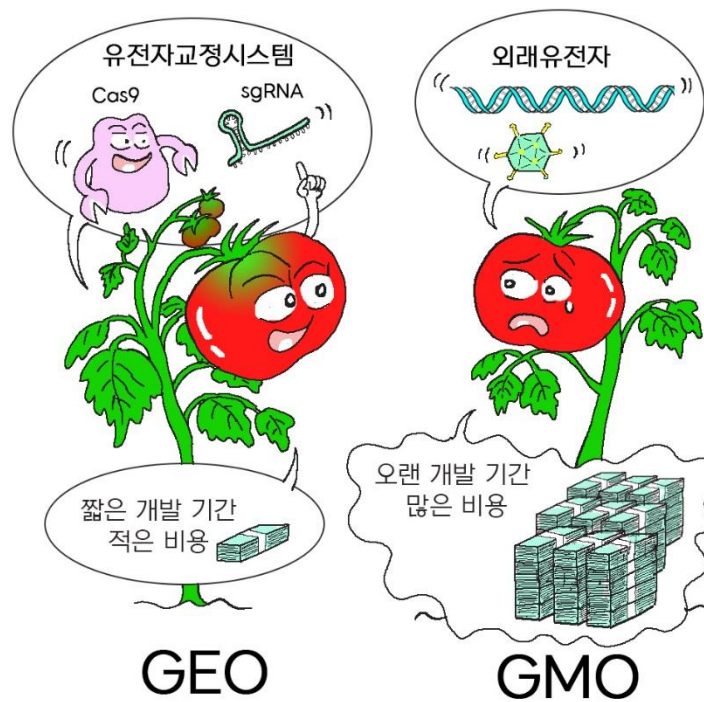


[그림 8] (1) 유전자교정체 개발의 7 단계. (2) 형질전환단계(A). 식물세포가 교정이 되면서 교정된 세포들이 자라서 신초(B, C)를 만들고 조직배양을 거쳐 유전자교정체가 완성된다(D). D 상태에서 자가수분을 하여 그 다음 세대에서 개발자가 원하는 특성을 분석한다. 최고 성적을 보여준 개체를 선발한 다음, 반복적으로 세대를 진전하면서 효능시험을 거쳐 최종 선발을 한다. 필자 제공

| 유전자교정기술이 품종 개발에 미치는 영향

유전자교정기술을 이용하면 새로운 형질을 갖는 유전자교정작물을 만들 수 있다.

- (1) 특히 작물 내 많은 유전자들의 역학 관계가 밝혀져 있지 않지만, 알려진 물질대사 경로에 교정기술을 적용한다면 그 경로 내 유전자들의 기능을 판단할 수 있으며 이를 통해서 육종에 바로 적용할 수 있다.
- (2) 육종가들은 좋은 형질을 보유하고 있는 유전자원이 있으면 주로 본인의 우수 계통으로 도입하고자 교배를 시도한다. 그러나 그 특정 형질의 유전자와 여러 나쁜 유전자들이 염색체상에서 연관돼 있다면 교배할 때마다 동행하게 되므로 계통 육성이 어렵다. 이럴 때 유전자교정기술로 유전자 사이의 연관을 절단해 좋은 형질만 선택적으로 육종에 이용할 수 있다.
- (3) 제초제에 민감한 특정 효소의 유전자를 염기교정(base-editing)해 원하는 염기를 치환함으로써(예를 들어 시토신(C)을 티민(T)으로 치환) 제초제가 효소에 영향을 미치지 못하게 하면서도, 효소 기능은 유지함으로써 제초제내성 작물을 개발할 수 있다.
- (4) 식물의 유전자 수는 약 3만~4만 5000개다. 이 가운데에서 약 10% 정도만이 기능적으로 밝혀져 있다. 유전자 기능 연구가 필수인 이유다. 복수의 표적을 만들어 다양한 변이체를 만들면 각 유전자의 기능을 파악할 수 있으며 이를 통해서 육종 사업에 많은 도움이 될 것이다.
- (5) GMO는 제초제내성과 해충내성 형질을 갖는 품종이 대부분이다. 반면 유전자교정기술은 다양한 형질을 확보하는 데 이용될 수 있다. 색을 바꾸거나 영양 성분을 늘리거나 성분을 바꾸는 등 다양한 기능적 형질을 확보하는 데 응용될 수 있다.
- (6) GEO 개발 비용도 GMO 개발에 비하면 약 100분의 1이며 개발 기간도 절반 이하 수준이다. 따라서 다국적기업만의 독점물인 GMO보다, 규모가 작은 벤처기업이나 중소기업 등이 상대적으로 낮은 비용으로 개발할 수 있다는 장점이 있다 (그림 9).



[그림 9] GEO 개발 비용도 GMO 개발에 비하면 약 100분의 1이며 개발 기간도 절반 이하 수준이다.

따라서 새로운 유전자원을 개발하는 데에 유전자교정기술의 활용성이 증가할 수밖에 없는 조건들이 갖춰져 있다. 인류와 가축의 식량안보를 위하고 지구 환경보호 특성을 갖는 미래 작물 개발에 활용될 것으로 기대하고 있다 (표 2).

[표 2] 미래 유전자교정작물 개발 방향

특성 종류
복합내병성 + 제초제저항성 + 내충성 작물(다중 형질 집적)
고온, 저온 등 환경 스트레스 내성 작물
비농경지에서 잘 자라는 작물(예: 준사막 지역)
가뭄에 강하고 물 이용 효율이 높은 작물
염류 집적 토양에서도 재배 가능한 작물
백신을 비롯한 바이오 의약품 생산 작물
고농도 향산화물질 또는 고부가가치 파이토케미컬 함유 작물
광합성 및 질소동화 효율이 높은 작물
고생산성 및 다수확 작물
산업폐기물질, 방사성 물질, 중금속, 농약 등을 흡수하는 작물
대체육 원료 작물

| 상업화 관련해 보고된 유전자교정작물

유전자교정은 2012년 크리스퍼/캐스9 기술이 개발된 이후, 육종 기간을 획기적으로 단축시키면서 농업 분야에서 가장 빠르게 상업화에 적용되고 있다. 2026년 9월 시점에서, 상업화에 임박한 또는 실제 소비자에게 판매된 적이 있거나 상업화 중인 유전자교정작물은 다음과 같다[8, 9] (표 3).

[표 3] 각 개발자들에 의해 상업화 관련해 보고된 목록

품목	기업체	비고
올레산 함유량이 높은 대두유	미국 칼릭스트 (Calyxt)	2019년 판매 시작, 2023년 사이버스(Cibus)에 합병 후 판매 중지
GABA 토마토	일본 사나테크 시드 (Sanatech Seed)	현재 종묘를 판매 중
맵지 않은 갓	미국 페어와이즈 (Pairwise)	한때 판매를 했으나 현재 바이엘(Bayer)이 라이선스를 구입하여 유통에 참여할 계획
미니 감자 (Small potato)	미국 심플롯 (Simplot)	판매를 시작했다고 자체 보고
두라타(Durata) 감자	미국 심플롯 (Simplot)	판매를 시작했다고 자체 보고
사계성(Remontancy) 딸기	미국 심플롯 (Simplot)	묘목을 판매 중
찰옥수수(Waxy corn)	미국 코르테바 (Corteva)	판매를 예정하고 있음
갈변 억제 상추	미국 그린비너스 (Greenvenus)	현재 종자를 판매 중

가장 먼저 상업화가 된 GEO는 2019년 미국 기업 칼릭스트(Calyxt)의 대두유로, 지방 성분의 양을 바꿨다. 대조군(비교정체)의 올레산 함량이 약 30%인 반면, 교정체는 올레산 함량이 80% 이상이다. 올리브유의 올레산 함량이 약 70% 수준인 점을 고려하면, 이 대두유는 올리브유를 능가하는 고급 지방산 조성을 가지면서도 가성비가 뛰어난 미국 최초의 상업화 유전자교정 식용유다. 포화지방과 트랜스지방이 적으며, 산패가 되지 않아 튀김유의 수명이 늘어난다는 장점이 있다. 현재 칼릭스트가 사이버스(Cibus)에 의해 합병된 후 판매가 중지됐다.

일본 생명과학 기업 사나테크 시드(Sanatech Seed)는 신경안정제 역할을 하는 가바(GABA, 감마-아미노뷰티르산) 성분을 일반 토마토보다 약 4~5배 증가시킨 교정 토마토를 개발했다. 세계 최초로 직접 섭취할 수 있는 유전자교정작물이다. 2021년부터 일본에서 판매 중이다. 일반

소비자에게 종묘로 판매되고 있으며, 혈압 완화 및 스트레스 감소 등의 가능성을 홍보하고 있다.

미국의 생명과학 기업 페어와이즈(Pairwise)는 쓴맛과 매운맛을 없앤 갖을 만든 뒤 컨시어스 그린스(Conscious Greens)라는 샐러드 브랜드로 판매한 적이 있다. 최근 바이엘(Bayer)이 라이선스를 인수해 유통에 참여하면서 소비자용 샐러드 시장에 진출할 예정이다.

농업 생명과학 기업 코르테바(Corteva)가 유전자교정기술로 100% 아밀로펙틴(amylopectin) 전분인 찰옥수수(waxy corn)를 생산했다. 기존 찰옥수수보다 점성이 높아서 식품, 제지·섬유, 접착제, 제약, 전분산업에서 이용성이 높으며 일본에서 허가를 받아 산업적으로 이용할 예정이다.

최근에는 미국 식품 기업 심플렛(Simplot)에서 크기가 작은 덩이줄기(tuber, 괴경)를 갖는 감자와, 갈변 현상이 없고 검은 반점이 생기지 않는 감자(두라타, Durata)를 상업화한다고 보고했다. 심플렛은 꽃이 피어 있는 시간을 늘린 사계성(Remontancy) 딸기 품종을 최근에 시장에 묘목으로 출시했다. 그리고 그린비너스(Greenvenus)에서 갈변을 억제하는 상추를 종자로 판매하기 시작했다.

| 식량안보의 '게임체인저'...한국은 규제 문제 미해결

미국국립보건원(NIH)의 펍메드(PubMed) 웹사이트에서 유전자 교정 식물(gene edited plant)을 연구한 논문 수를 찾아보면 2013년에는 극소수였으나 2014년부터 급증해 2025년에는 1631편이 발표됐다[10]. 연구가 계속 증가하고 있어서 2026년 논문 수는 2025년을 능가할 것으로 예상된다.

유전자교정은 현재 맛, 영양, 저장성, 기능성 등 품질 향상에 초점을 맞추고 있다. 유전자교정작물은 소비자에게 직접적인 혜택을 제공하는 품질개선 형질이 먼저 상업화되고 있다고 볼 수 있다. 또한 상업화 단계에 근접해 있는 여러 연구가 마무리되고 있어서 앞으로 생산량 증대(생산성, 수량, 광합성 효율), 생산 안정성(가뭄·고온·염분·병해충 대응) 및 식량 손실 감소(저장성 향상, 갈변 방지, 유통기한 연장)에 기여하는 유전자교정작물들이 속속 탄생할 것이다. 식량안보의 게임체인저가 될 것이다.

또한 규제 측면에서 GMO와 다르게 취급되고 있다. GEO를 규제 면제·완화 또는 기존 육종과 유사한 방식으로 관리하는 국가가 증가하고 있다(남북미, 일본, 호주, 인도 등 60여 국가). 이런 국가들은 GEO 종자 개발 및 재배/생산을 토대로 글로벌 상업화를 선점할 수 있을 것이다. 최근에는 유럽연합(EU)에서도 외래 DNA를 삽입하지 않는 GEO에 대해서는 규제를 면제하기로 했다. 전 대륙에서 GEO에 대한 개발과 재배/생산이 자유롭게 성행할 것으로 보인다.

반면 국내에서는 아직도 GEO가 유전자변형생물체(LMO, Living Modified Organism)법에 묶여서 GMO처럼 취급받고 있기 때문에 GEO의 국내 재배가 어렵다. 따라서 한국에서는

LMO법 개정이 반드시 필요하다.

유전자교정작물의 개발 및 국내 재배/생산이 시급한 첫 번째 이유는 식량안보다. 국내 식량자급률은 47.9%이고 곡물자급률은 21.6%이다[11]. 격차가 큰 이유는 가축 사료용으로 들여오는 옥수수·대두 등 수입 곡물 비중이 매우 높기 때문이다. 쌀을 제외한 주요 곡물(밀, 옥수수 등)의 자급률이 현저히 떨어져서 전체 곡물 수요량 중 약 78% 이상을 해외 수입에 의존하고 있다. 특히 사료용으로 수입하는 옥수수와 식품 가공으로 수입하는 대두의 대부분이 GMO다[12]. 따라서 주요 GM 곡물의 안정적인 수입과 공급망 확보가 식량안보의 중요한 과제다.

하지만 우리는 GMO를 개발하고 상업화할 수 있는 경쟁력이 있는 종자기업이 없으며, 규제를 이겨낼 만한 여건이 갖춰져 있지 않다. 이대로라면 계속 GMO를 수입해야 한다. 수입 자체가 문제가 아니라 국제 정세에 따라 곡물 가격이 출렁일 때마다 수입 비용도 변화하기 때문에 국내 농산물 가격의 변동성 역시 클 수밖에 없다. GMO를 어느 정도 대체할 GEO 개발이 필수인 이유다. 그래야 수입 농산물 유통을 안정화하고, 식량안보를 유지할 수 있다.

둘째는 안정적인 기술경쟁력으로 글로벌 시장을 점유할 가능성이다. GEO는 아직 초기시장이다. 여러 국가들이 빠르게 제도를 정비했고 미국과 일본에서 상업화가 이뤄졌지만, 아직 시장 규모가 매우 작으며 영향력 있는 기업도 없다. 경쟁이 시작되는 단계인 만큼, 대한민국도 충분히 참여할 수 있다. 특히 한국의 ㈜톨젠은 GEO 개발에 필수인 크리스퍼/캐스9 원천 핵심 특허를 보유하고 있다. 유전자교정기술의 중요한 기반을 보유하고 있는 셈이다. 미국의 브로드 연구소와 특허 분쟁을 하고 있지만, 국내 연구자들이 크리스퍼/캐스9 기술을 이용하는 데엔 문제가 없다. 또한 국내 연구자들의 논문 수준은 매우 높으며, 유전자 기능 분석, 작물 형질개량 등 기초 실력도 탁월하다. GEO도 잘 만들고 있다.

유전자교정기술은 단순히 새로운 품종을 만드는 기술을 넘어, 기후변화와 식량 부족이라는 인류의 문제에 대응할 수 있는 새로운 육종 플랫폼이다. 한국이 가진 생명과학, 육종, CRISPR, 인공지능(AI), 정보통신기술(ICT) 역량을 효과적으로 결합한다면 GEO는 우리 농업과 종자 산업의 새로운 성장 기회가 될 수 있다. GEO 산업을 국가 전략산업으로 육성한다면, 한국은 글로벌 생명공학작물 시장에서 기술 선도국으로 도약할 수 있을 것이다.

| 참고문헌

1. Leapman, M (2001). The Ingenious Mr. Fairchild: The Forgotten Father of the Flower Garden. St. Martin's Press. [ISBN 978-0312276683](#).
2. Bateson, W (1909). Experiments in Plant Hybridization (Gregor Mendel의 영문번역본). Mendel's Principles of Heredity, Cambridge University Press, pp. 317-361; <http://www.mendelweb.org/>

3. Our World in Data / FAOSTAT, <https://ourworldindata.org/>
4. Our World in Data (CO2 & Greenhouse Gas),
<https://ourworldindata.org/co2-and-greenhouse-gas-emissions>
5. Barrangou, R., Fremaux, C., Deveau, H., Richards, M., Boyaval, P., Moineau, S., Romero, D.A. & Horvath, P (2007). CRISPR Provides Acquired Resistance Against Viruses in Prokaryotes. Science 315(5819): 1709–1712.
6. 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: 816-821.
7. Bortesi L, Fischer R (2015). The CRISPR/Cas9 System for Plant Genome Editing and Beyond. Biotechnol Adv. 33:41–52.
8. 한지학 (2025). 유전자교정기술을 활용한 국내·외 식품(작물) 연구개발사례 및 규제적 시사점에 대한 제언. 규제과학 PLUS+, Special Issue Vol.9: 19-28.
9. 한지학 (2026). 미국 USDA APHIS로부터의 생명공학작물 규제 및 규제면제. BioSafety Vol.27 No.1: 4-13.
10. NIH PubMed, <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/>
11. 농림축산식품 통계연보, mafra.go.kr
12. KBCH, <https://www.biosafety.or.kr/>

본 사업은 기획재정부의 복권기금 및 과학기술정보통신부의 과학기술진흥기금으로 추진되어 사회적 가치 실현과 국가 과학기술 발전에 기여합니다.