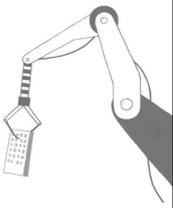
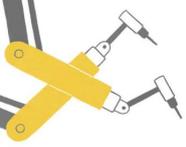


신육종기술(NPBTs)

박지현 · 홍미영 · 한지학





Contents

 제1장 개요	3
 제2장 기술동향	6
 제3장 산업동향	16
 제4장 정책동향	19
 제5장 R&D 투자동향	23
 제6장 결론	27



제1장 개요

1.1 작성배경

 최근 유전자가위기술(CRISPR/Cas9)*의 확산과 함께 신육종기술(NPBTs)**이 미래 농산업의 발전 및 식량 생산 제고에 영향을 크게 미칠 수 있는 기술로 주목됨

* 유전자가위기술은 SDN(Site Directed Nuclease) 기술의 대표적인 시스템으로 특정 부위의 DNA를 제거/수정/삽입하는 것으로 작물 외에도 질병 치료 등 다양한 분야에서 활용

** 신육종기술(NPBTs: New Plant Breeding Techniques)이란 품종개량 등 식물 육종에 이용 가능한 다양한 육종기술로서 유전자가위기술을 포함한 총 8개 기술을 의미

● EU에서 처음으로 8개의 신육종기술을 선정하고, 관련 기술개발 현황 보고서를 발표('11.11) 하면서 세계 각국에서 관련 기술의 개발·이용 및 규제 방식에 관한 토의가 활발해짐¹⁾

* 초기에는 유전자조작에 대한 반대운동을 하던 EU도 육종 관련 다양한 신기술의 중요성을 인식하고, 관련 연구그룹을 구성해 학술논문, 특허, 개발기업에 대한 청취조사 등을 실시하여 조사결과를 발표하게 됨

● OECD는 과학기술정책위원회 산하 바이오/나노/융합기술 작업반을 통해 참가국을 대상으로 워크숍을 개최²⁾하였으며, 유전자가위기술을 포함한 신육종기술의 확장성에 대해 논의

● 우리나라는 곡물자급률 제고와 사료작물 등 수입대체 작물 개발이 시급한 여건³⁾을 감안하여 기존 육종기술에 신육종기술의 접목과 활용에 대한 검토가 요구됨

 신육종기술은 새로운 농업혁명을 일으킬 수 있는 플랫폼기술로서 기술개발 지원 및 국내 종자기업의 영세성을 극복하기 위한 정부 지원방안 논의가 필요함

1) 농촌진흥청(2014.6). 새로운 육종기술 'NBT'란?, 월드포커스 Vol.42

2) OECD는 '생물다양성협약'의 부속 의정서인 바이오안전성의정서 이행과 회원국 간의 생명공학기술 규제법 및 제도와 관련 조화를 유지하고, 수출입에 따른 무역마찰을 최소화하기 위해 전문가 그룹회의를 구성·운영, 신육종기술에 관해서는 2015~2016년 생명공학 규제감시조화 작업반(Working group on Harmonization of Regulatory Oversight in Biotechnology)에서 주로 논의

3) GMO 대체할 유전자편집 등 신육종기술 활용 절실, 식품음료신문(2016.10.24.)

- 그동안 우리나라의 경우 정책·제도적 한계로 인해 신육종기술 기반 품종개발에 기업주도의 적극적인 투자가 이루어지지 않았음
- 정부주도의 연구개발 투자를 통해 신육종 플랫폼기술을 확보하고, 이를 국내 종자기업에 이전함으로써 국가 육종 기술개발 경쟁력 향상을 도모할 필요가 있음

본고에서는 신육종기술의 기술·산업 동향을 분석⁴⁾하고, 국내외 정책 및 R&D 투자현황에 대한 검토를 통해 향후 정부 R&D 투자 정책 수립 시 기초자료로 활용하고자 함

1.2 기술의 정의 및 범위

신육종기술은 최종 개발된 식물에 외부에서 도입된 유전자가 존재하지 않지만 변형된 특성을 갖는 새로운 품종을 확보하는 기술임

- 전통육종기술의 한계를 극복함과 동시에 그간의 상용화된 GM작물에 대한 안정성 논란을 회피하거나 완화할 수 있는 기술로 <표 1>과 같음

<표 1> 신육종기술의 종류 및 특징

	조사 대상 기술	기술 특징
1	SDN (Site Directed Nucleases)	DNA nuclease 기능을 갖는 단백질 복합체를 이용하여 유전체 특정 부위에 DNA 결손이나 수정 및 삽입을 유도함으로써 식물의 형질을 전환할 수 있는 방법
2	동종기원 (Cisgenesis)	상호 교배가 가능한(cross-compatible) 종에서 유래된 유전자를 도입하는 기술로서 선발 마커/백터 backbone이 제거되어 목표 유전자만 전달
3	역육종 (Reverse Breeding)	RNA interference 기작을 이용하여 heterozygous 개체의 meiotic recombination을 방해하고 목적형질을 갖고 있는 배우자를 선발한 후, 조직배양을 통해 반수체 식물체로 만들고 순차적으로 상동2배체를 만드는 방법
4	접목 (Grafting)	병저항성이나 성장초세가 강하게 만들어진 GM 식물의 줄기(대목)에 Non-GM 식물(접수)을 접목하여 육묘의 생육을 증진하면서 최종 산물인 non-GMO를 확보
5	Agroinfiltration	재조합된 유전자를 아그로박테리움을 매개로 이용하여 특정 조직에 직접 감염하여 단시간에 고농도의 유전자를 일시적으로 발현이 되도록 하는 기술

- 그 밖에도 ODM(Oligonucleotide-directed Mutagenesis), RdDM(RNA-dependent DNA Methylation), 합성유전체학(Synthetic Genomics)과 같은 기술이 있으며, 이들 기술을 포함하여 EU는 신육종기술을 총 8개로 분류함

4) 본 동향브리프는 2017년도 KISTEP 기관고유 사업으로 수행한 '2017 급부상 및 한계돌파형 기술(산업) 동향 분석' 중 제8장 '신육종기술'의 연구결과를 정리·보완한 내용임

☞ 현재의 육종기술은 첨단과학 기술이 시대적으로 융합되면서 관행육종부터 유전자 가위기술까지 전부를 포괄하며 다양한 기술이 집약된 형태로 발전⁵⁾

- 품종 육성에 활용되는 주요 육종기술은 크게 관행육종기술, 분자육종기술, 유전자변형기술로 분류될 수 있으며 앞으로 유전자가위기술을 포함한 신육종기술의 역할이 클 것임
- 제1대 교잡종(F1)을 만드는 관행육종기술은 1930년대 이후부터 생산성 제고를 위해 많은 작물을 상대로 교배육종, 도입육종, 여교배 등과 같은 다양한 기술이 사용됨

〈표 2〉 관행육종기술의 종류

육종기술 종류	내용
분리육종	자연적으로 생성된 유전체를 대상으로 선발하거나 인공교배 과정이 없이 우수한 개체나 집단을 선발(재래종)
교배육종	인공 교배과정을 통해 나타난 다양한 유전체 변이체를 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 한쪽 친과 다시 교잡하는 방법으로 특정 타겟 형질을 고정하여 새로운 계통육성에 많이 적용
잡종강세육종	모부계 계통 육성 후 F1의 성능검정을 통해 우수한 교배조합을 선발하며, 종자생산의 경제성을 고려하여 MS(male sterile; 웅성불임), SI(self-incompatibility; 자가불화합성)를 사용
조직배양 육종	화분 반수체를 세포배양하여 2배체(약배양)로 만들고 Homo화/고정화/계통화/시간단축을 가능하게 하며, 화분외에도 식물의 여러 조직세포를 배양하여 식물체를 확보
돌연변이육종	방사선, 화학물질로 다양한 유전적 변이체를 유기하여 선발한 다음, 육종소재로 활용
종속간 육종	종간의 교잡, 속간의 교잡으로 새로운 작물을 개발함

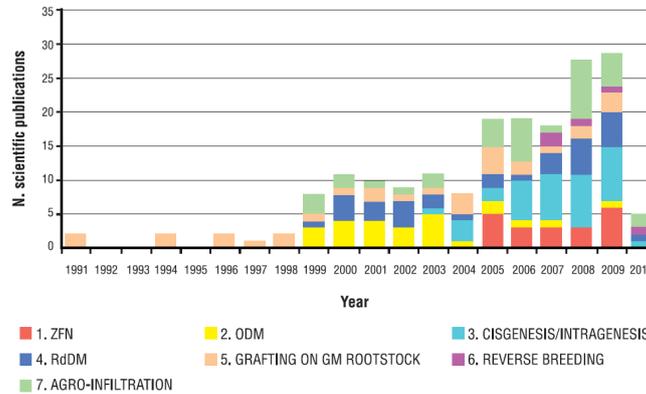
* 출처 : 식량생산 제고를 위한 신육종기술(2017)

- 분자육종기술은 1980년대 이후 각 작물별로 유전체 정보가 밝혀지면서 DNA마커를 이용하여 보다 세밀한 육종을 가능하게 하는 기술이며, 종자기업에서는 주로 SSR, SNP 마커*를 사용하여 내병성, 기능성, 대량 순도검정 등에 활용
 - * 종자 개발이나 종자 품질조사에 사용되는 DNA 마커 종류로서 단순반복염기서열(SSR, Simple Sequence Repeat)과 단일염기다형성(SNP, Single Nucleotide Polymorphism)을 가장 많이 사용
- 유전자변형(Genetically Modified)기술은 외부 유전자를 삽입하거나, 식물체 내부 유전자를 변형시켜 특정 형질을 갖게 하는 것으로 1990년대 중반 이후 GMO 작물이 개발되면서 세계 종자시장에 큰 변화를 일으켰으며 다국적 기업들은 현재 옥수수, 콩 등 GM품종을 판매 중임

5) 한지학, 정민(2017), 식량생산 제고를 위한 신육종기술

제2장 기술동향

- 신육종기술 관련 논문, 특히 현황을 살펴보면, 2000년대 이후 관련 연구가 가장 활발하게 이루어지고 있으며, 주로 미국, 유럽을 중심으로 적극적으로 추진⁶⁾
- 지난 10년(1999년~2009년) 동안 접목(Grafting)을 제외하고 대부분의 신육종기술에 대한 논문이 발간되었으며, 지속적으로 관련 연구가 증가하는 추세



[그림 1] 신육종기술 관련 연구 논문 발표 동향

- 지역별로는 유럽과 미국이 관련 분야 특히 비중이 높아 가장 활발하게 연구개발을 추진해 왔음을 시사

Assignee country	ZFN	ODM	CIS/INTRA	RdDM	GRAFT	REV. BREED.	AGRO-INFILTR.	Total	% in total
USA	18	20	7	-	11	-	6	62	65
EU-27	2	6	9	1	-	2	5	25	26
NL	-	4	7	-	-	2	-	13	14
UK	-	1	2	-	-	-	1	4	4
Germany	1	1	-	1	-	-	1	4	4
France	1	-	-	-	-	-	2	3	3
Italy	-	-	-	-	-	-	1	1	1
Israel	1	-	-	-	2	-	-	3	3
Russia	-	-	-	-	-	-	2	2	2
New Zealand	-	-	2	-	-	-	-	2	2
Singapore	-	1	-	-	-	-	-	1	1
South Africa	-	-	-	-	-	-	1	1	1

[그림 2] 신육종기술 관련 특허

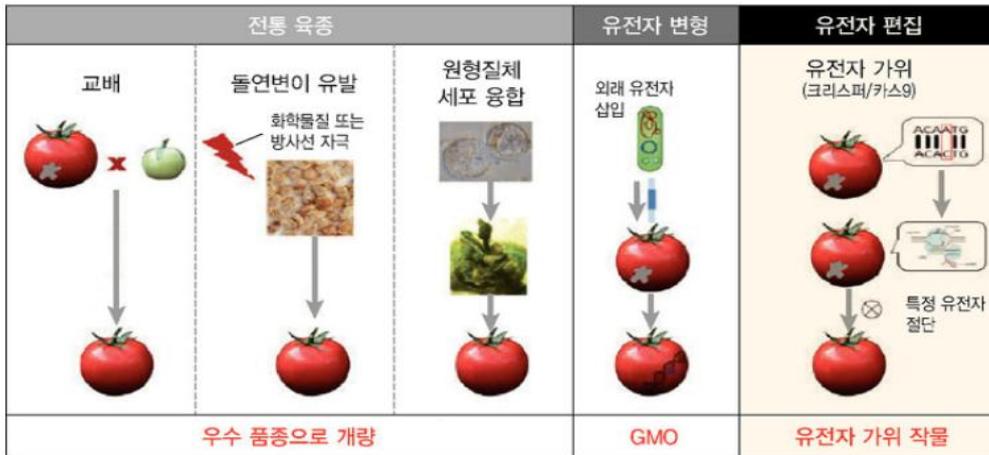
6) JRC(2011), "New plant Breeding Techniques: State-of-the-art and prospects for commercial development" in JRC Scientific and Technical Reports, EUR 24760 EN

본 장에서는 EU에서 분류한 8개 신육종기술의 개념을 소개하고, 국내외 최근 연구개발 동향을 고찰함

2.1 유전자가위기술

유전자가위기술은 우수한 형질을 식물에 도입하거나, 원치 않는 형질을 제거하는 등 기존 전통육종 방식의 한계를 극복하는 기술

- 2000년대 중반 1세대 유전자가위인 ZFN이 개발된 이래 2세대 유전자가위인 TALEN을 거쳐 가장 혁신적인 유전자교정 기술로 주목받고 있는 현재의 3세대 유전자가위인 CRISPR/Cas9에 이르기까지 매우 빠른 속도로 발전
 - ※ 1~3세대 유전자가위까지 잘 알려져 있으나 최근에 3.5세대인 Cpf1 효소가 밝혀져서 연구 중에 있음
 - (1세대) ZFN(Zinc Finger Nuclease) : 원하는 위치의 유전체 서열 교정을 가능함을 보여준 첫 유전자가위로서 의미가 크나 징크핑거 단백질을 인식할 수 있는 DNA 서열이 제한적
 - (2세대) TALEN(Transcription Activator-like Effector Nuclease) : ZFN과 구조와 작동 방식이 유사하지만, 유전자가위의 크기가 매우 크다는 단점이 있음
 - (3세대) CRISPR/Cas9(Clustered regularly interspaced short palindromic repeats) : RNA-단백질 복합체 구조로 구성되어 있으며, 쉽고 효율적으로 제작할 수 있어 기술적 파급력이 큼
- ZFN, TALEN에서는 단백질 모듈들이 DNA를 인식하는 역할을 수행했던 것과는 달리 CRISPR/Cas9은 가이드 RNA가 DNA 서열을 인식함
 - 가이드 RNA를 통해 표적 DNA에 결합하게 되면 Cas9 단백질이 가지고 있는 두 개의 DNA 절단 도메인이 활성화 되어 표적 DNA를 자르게 됨
 - 가이드 RNA는 ZFN, TALEN의 DNA 결합모듈 단백질에 비해 쉽고 효율적으로 제작이 가능하기 때문에 현존하는 유전자가위 중에서 가장 기술적 파급력이 커 생명공학 연구 및 산업분야 적용이 활발



* 출처 : 네이처 제네틱스 2016년 2월호

[그림 3] 작물 품종개량 방법 비교

☞ 작물 분야에서 주목할 만한 변화는 주로 GMO를 개발하던 다국적 기업들이 유전자가위기술 도입에 발 빠르게 나서면서 종자개발에 적극적으로 활용

- 다우 어그로사이언스는 1세대 ZFN 기술 기반으로 토양오염원을 생성하는 IPK 효소를 제거한 옥수수를 개발하여 보고한 바가 있으며, 최근 몬산토는 3세대 CRISPR/Cas9 기술과 후속 세대인 Cpf1 기술까지 도입하였음을 발표
- 몬산토의 경우 본 기술과 관련한 기술 도입에 매우 적극적인데, 1세대 유전자가위 ZFN 기술을 다우 어그로사이언스로부터 도입하기도 하였고, Nomad로부터 관련 응용특허를 도입하기도 했으며, 최근에는 툴젠으로부터도 유전자가위 라이선스를 도입
- 듀폰 역시 3세대 CRISPR/Cas9 기술을 도입하여 이 기술을 기반으로 개발한 첫 번째 작물인 아밀로펙틴 옥수수를 향후 5년 이내에 상업화하겠다고 발표

☞ 산업계뿐만 아니라 학계에서도 유전자가위기술 기반의 작물개발 사례들이 꾸준히 보고되고 있음

- 미국 펜실베이니아 주립대학의 Yang 박사팀은 CRISPR/Cas9 기술로 갈변 현상을 방지한 양송이버섯을 개발하였으며, 중국 과학원 소속 Gao 박사팀은 TALEN을 이용하여 흰가루병 저항성을 가진 밀을 개발하는데 성공

☞ 한국은 3세대 유전자가위 CRISPR/Cas9 원천기술을 확보한 나라로서 유전자가위기술 자체의 수준은 세계 최고 수준이나, 산업화까지 연계가 미진

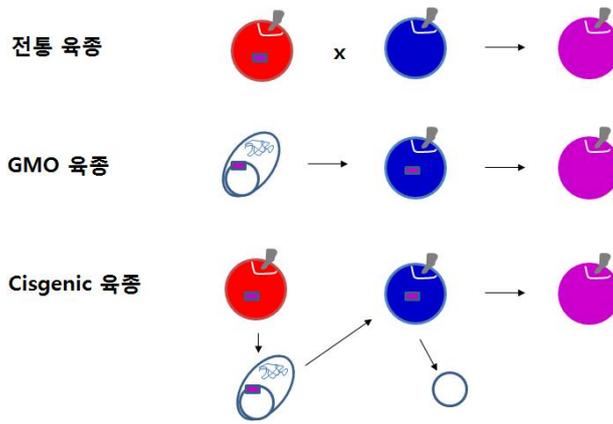
- CRISPR/Cas9 기술을 개발한 서울대 연구팀이 상추 등의 작물에서 최초로 유전자 교정에 성공한 이래, 콩, 토마토, 쌀 등의 작물에서 유전자 교정이 성공하였음이 학회 등을 통해 수차례 보고된 바 있음
- 국내에서도 관련 연구가 활발하게 이루어지고 있는데 기초과학연구원(IBS) 유전체교정연구단의 식물 유전체 연구팀은 CRISPR/Cas9 기반으로 곰팡이병에 저항성을 지닌 바나나를 개발하고 있는 중
- 하지만, 국내 여건상 본 기술을 적용한 작물의 실용화를 위한 규제 문제가 명확치 않은 관계로 기술의 산업화 혹은 응용 특히 확보는 상당히 더딘 모습을 보이고 있음

2.2 동종기원(Cisgenesis)

 동종기원기술은 동종(種)내 재래종이나 야생종으로부터의 우수형질을 집적하는 기술로 빠른 시간 내에 특정 형질을 고정하기 위한 방법

- Cisgenic 육종은 cDNA형태가 아닌 전체 유전자(promoter, exon, intron)를 형질전환하여 재분화시키면서 목표형질이 발현된 개체를 선발하되 유전자만 들어가고 나머지 형질전환벡터 또는 관련 부위는 전부 도태(selection-out)됨
 - Intragenesis⁷⁾ 경우는 Cisgenesis와 같은 방법을 이용하지만 유전자의 구성이 다른 종의 promoter(프로모터), coding(유전자)부위를 섞어서 in vitro(시험관내)에서 제작한 후 사용하는 것이 다르며, 타종의 유전자를 유입시키기 때문에 GMO 논란 가능성이 있음
- 형질전환시 재조합 분리되는 특정 벡터를 사용하기 때문에 나중에 타겟 유전자만 옮겨져 최종 산물이 non-GMO가 되는 특징을 지님
- 각 육종방법별 육성기간을 계산하면 전통육종의 경우 평균 최소 7~8년, 그리고 GMO 육종의 경우는 형질전환기간을 포함하여 10년 이상 걸린다고 볼 수 있는 반면에 Cisgenic 육종의 경우 형질전환기간을 포함하여 3~4년이면 충분히 가능

7) Schouten HJ and Jacobsen E.(2008) Cisgenesis and intragenesis, sisters in innovative plant breeding, Trends Plant Sci. Jun; 13(6):260-1



* 출처 : 식량생산 제고를 위한 신육종기술(2017)

[그림 4] Cisgenic 육종과 다른 육종과의 차이점

국내외 모두 정책적으로 지원된 바 없으나 GMO 대체 기술로 선호하는 기술이며, 최근 들어 사과, 감자 등 내병성 품종 개발에 성공한 사례가 나오고 있음

- 사과 더닝이병 저항성 유전자를 재조합 벡터[그림 4]에 삽입하여 형질전환하였고 실제로 이를 통해 더닝이병 내성 사과 품종(non-GM)을 개발하였음⁸⁾
- 이 외에도 감자 역병저항성 유전자 여러 개를 동종기원기술을 통해 스택킹하였고 이어 강력한 역병저항성을 지닌 감자를 개발하는데 성공⁹⁾

2.3 역육종(Reverse Breeding)

RNA interference 기작을 이용하여 목적형질을 갖고 있는 배우자를 선발한 뒤, 반수체 식물체를 만들고 순차적으로 상동2배체를 만드는 기술

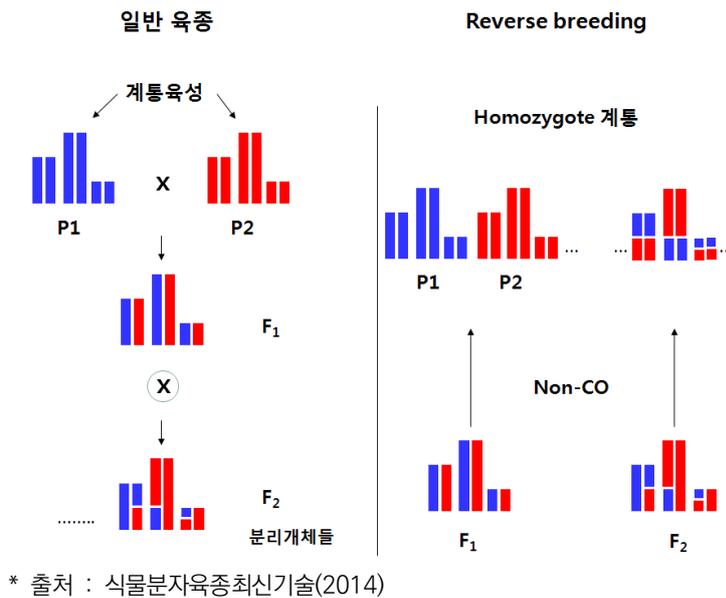
- 생식세포가 분열할 때 염색체간, 유전자간 재조합을 한 후에 감수분열을 하여 딸세포를 만드는 과정에서 non-recombination, 즉 염색체간의 교차가 일어나지 않게 되면 감수분열 전의 염색체 구성과 배열 상태가 그대로 딸세포로 전해질 수 있으며 궁극적으로 약배양 등을 이용하여 DH(doubled haploid, 배가반수체) 개체들을 얻을 수 있음
- 최종적으로 transgene이 없는 homozygote가 선발되면 자가수분 등을 통해 여러 세대를 계속 유지될 수 있으며 또한 형질전환을 통해 많은 개체가 만들어지면 개체 간 상호 교배를

8) Vanblaere et al.(2011) The development of a cisgenic apple plant. Journal of biotechnology 154:304-311

9) Jo et al.(2014) Development of late blight resistant potatoes by cisgene stacking. BMC Biotechnology May 29;14:50

통하여 더 다양한 유전자원을 만들 수 있음

- GMO 개발기술을 이용하여 우수형질 개체를 확보할 수 있는 non-GMO 개발 기술로 보는 견해도 있으나, 이럴 경우 최종 산물이 GMO가 아니라는 것을 증명하기 위한 유전체 분석이 요구됨
 - 형질전환되어 만들어진 생식세포 중 50%는 transgene이 들어 있어 형질전환과정이 끝나고 DH line을 확보할 때 PCR로 분석하여 transgene이 들어 있는 개체를 제거하는 것이 중요



[그림 5] 역육종과 일반 육종과의 차이

☞ 국내는 형질전환기술의 인프라가 갖추어져 있어서 본 기술을 활용한다면, 고품질 특성을 많이 축적할 수 있으며 경쟁력 있는 품종개발이 가능

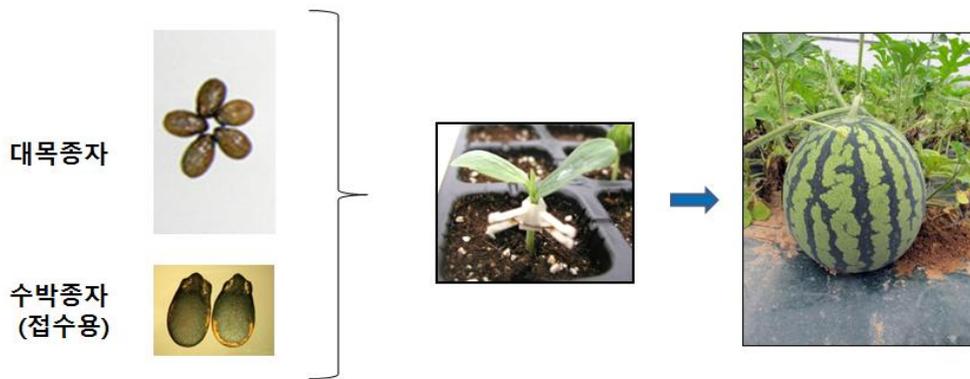
- 기업에서의 연구활동은 활발하지 않으나, 네덜란드 와게닝겐 대학, 미국의 UC Davis 등 학계를 중심으로 애기장대와 같은 작물을 대상으로 연구가 진행 중
- 최근에 염색체공학(chromosome engineering)이란 개념¹⁰⁾으로 염색체를 조절하여 유전 양식을 바꾸는 연구가 진행되고 있으며, 여러 방법들이 발표되고 있는데 이 모두가 관행육종의 한계를 도와주려는 기술들임
- 본 기술은 2011년 국내학회에 초청된 외국연사 발표를 통해 소개되었으며, 국내는 아직 이 기술의 정의나 논문을 학습하는 정도

10) Chan S(2010) Chromosome engineering: power tools for plant genetics. Trend in Biotechnology 28:606-610

2.4 접목(Grafting)

내병성 또는 성장초세 등 유용형질을 갖는 GM대목에 non-GM 접수를 접목하여 육묘의 생육과 발달을 증진시키면서 최종 산물인 non-GMO를 확보하는 기술

- 접목된 육묘는 생육이 강한 GM대목으로부터 무기질과 수분을 섭취하면서 잘 성장할 것이며 결과적으로 수확되는 생산물, 즉 먹는 부분은 non-GMO임
- 내병해충성 형질 또는 다른 유용형질을 삽입하여 GM대목을 만들고 접수는 고품질의 원예적 형질을 그대로 유지하는 전략



* 출처 : (주)농우바이오(2007)

[그림 6] GM대목을 이용한 non-GMO 생산 과정

국내 연구진이 세계 최초로 기술개발에 성공¹¹⁾하였으나, GM작물의 위해성 평가 논란으로 추가 연구가 진행되고 있지 않은 반면 해외에서는 연구가 지속적으로 이루어지고 있음

- 최근에 채소작물(가지과, 박과)의 경우 대부분 접목을 통해 육묘를 재배하고 있어 본 기술의 적용 가능성은 높으나, 국내에서는 GM작물의 위해성 평가라는 사회적 이슈로 현재는 연구 과제 수행이 종료된 상태
- 채소 및 과수 접목에 대한 연구는 오랜 역사를 가지고 있으며 최근에도 해외에서는 GM대목에 대한 연구를 계속하고 있음¹²⁾

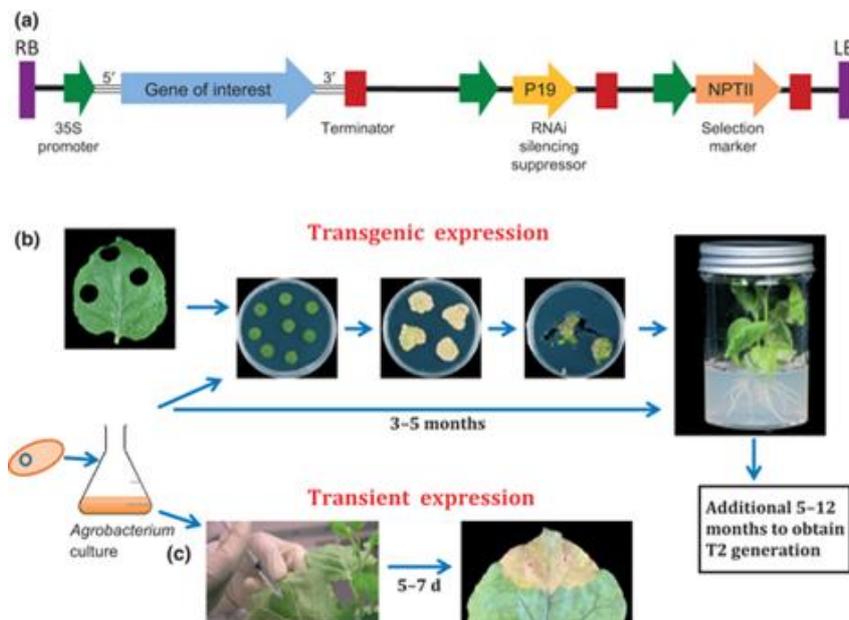
11) Park et al.(2005) Transgenic watermelon rootstock resistant to CGMMV(cucumber green mottle mosaic virus) infection. Plant Cell Rep 24:350-356

12) Hily JM et. al.(2018) Metagenomic-based impact study of transgenic grapevine rootstock on its associated virome and soil bacteriome, Plant Biotechnol J. Jan;16(1):208-220

2.5 Agroinfiltration

재조합된 유전자를 아그로박테리움을 매개로 이용하여 특정 조직에 감염하여 단시간에 고농도의 유전자를 일시적으로 발현이 되도록 하는 기술

- 유전자의 일시적인 발현을 통해 유전자의 기능 또는 세포내 위치, 단백질-단백질 상호작용 등을 연구하거나, 단백질을 대량 생산하기 위해 최근 10년 전부터 식물 생물학 및 식물 생명공학 연구에서 널리 사용되는 기법
- 기술적 장점은 속도와 편리성이기 때문에 식물 육종에서 특정 형질(내병성 유전자 등)을 가진 식물을 찾는데 주로 사용하고 있으며, 식물에서 재조합단백질 생산을 위한 분자농업에도 사용하고 있음
- 식물에 아주 국부적으로 적용되기 때문에 원칙적으로 유전물질은 생식 세포계에 도입되지 않아 자손에게 전염되지 않기 때문에 GM 대상에서 벗어날 수 있는 가능성이 있음



[그림 7] 형질전환체 개발과 일시적 발현의 시간적 비교

내병성 품종 육성, 육종 시간 단축, 고가의 재조합 단백질 생산 등에 적용될 수 있으며, 최근 들어 산업계 주도의 연구가 상당 부분 진행

- Agroinfiltration ‘sensu stricto’는 곤충 매개체를 사용하지 않고 식물 일부에 식물 바이러스를 통제적이고 특이적으로 도입하는 매력적인 대체방법으로 제안

- 최근 사과 잠재성 구형 바이러스(ALSV) 벡터를 이용하여 꽃 개화시기 관련 유전자 발현을 억제하여 사과의 조기 개화를 유도함으로써 육종 시간을 단축시킬 수 있는 연구 사례가 발표되었음
- 대규모 일과성 발현 작업을 위해 효율적인 도입 유전자 전달 방법의 개발 등이 학계와 정부 주도 하에 진행되었으며, 최근에는 산업계 주도의 식물 유래 백신 연구가 많이 진행되고 있음

Agroinfiltration 기술은 잘 발달되어 있으며, 특정 식물에서는 당장에 그 기술이 적용할 수 있는 가능성이 높음

- 2011년 유럽 JRC 보고서의 설문에 참여한 회사 중 감자, 유채 및 상추와 같은 작물에 대한 육종 연구에 본 기술을 현재 사용하고 있다고 답변함
- 특정 장비가 필요 없는 저렴한 기술로서 실험 후 며칠 내에 결과를 얻을 수 있다는 장점 덕분에 국내의 식물생명공학기술과 접목하여 품종개발에 직접 활용할 수 있음

2.6 기타

(1) ODM(Oligonucleotide-directed Mutagenesis)

기존의 상동재조합을 활용하는 유전자치환에 해당하는 것으로 원하는 염기서열을 특정 부위에 도입시키는 기술

- 식물세포로 작은 단편의 합성된 DNA 분자가 도입되어 진행되며, 식물체의 복구기작(repair mechanism)이 도입된 oligonucleotide를 template로 하여 존재하는 변이가 식물체의 게놈으로 전이됨
- 이러한 과정을 통해 원하는 형태로 타겟 DNA 서열이 변화되며, oligonucleotide 자체는 게놈으로 삽입되지 않고, 작은 범위의 서열차이(1~5 bp/nucleotide)만을 가짐
- ODM에 의한 돌연변이는 전통적인 돌연변이 유기방법(방사선 조사 등)과 유사하지만, 원하지 않는 돌연변이를 생산할 필요가 없어 시간을 단축할 수 있다는 장점이 있음

(2) RdDM(RNA-dependent DNA Methylation)

 목표 염기서열 속의 DNA cytosine 잔기를 메틸화하여 목표유전자의 발현을 억제 또는 촉진하는 기술

- DNA의 염기서열 자체는 변화시키지 않으면서 DNA의 메틸화 상태 변화를 초래시키기 때문에 일반적으로 후성유전학적 변화(epigenetic modification)라고 함
- 특정 식물 유전자의 발현을 억제하기 위해 식물의 RISC(RNA-induced silencing complex) 시스템을 이용함
- Methylation은 안정적으로 유지되지 않고 세대가 진전됨에 따라 사라지는 경향이 있으며, 아직까지 이 기술을 활용한 상업화 사례는 없음

(3) 합성유전체학(Synthetic genomics)

 합성 염색체를 제작하는 과정에서 필요 없는 유전자는 제거하고 필요한 유전자만 넣어 원하는 산물을 최대로 얻을 수 있도록 생물학적 과정을 조작하는 기술

- Genome 수준으로 유전자를 개조 및 조작하는 기술로 DNA 조각을 제작하여 염색체 수준으로 긴 단편을 만드는 기술이 포함됨
- 대장균, 효모에 관한 연구는 비교적 활발하게 이루어지고 있는 반면 식물에서는 아직 합성 유전체학기술이 적용되고 있지 못함
- 해외에서는 일부 C4 작물의 개발¹³⁾, 질소고정 작물 개발¹⁴⁾ 등 도전적 연구가 이루어지고 있으나, 최종 산물이 GMO이기 때문에 적용 작물이 제한적임

13) <http://c4rice.irri.org>

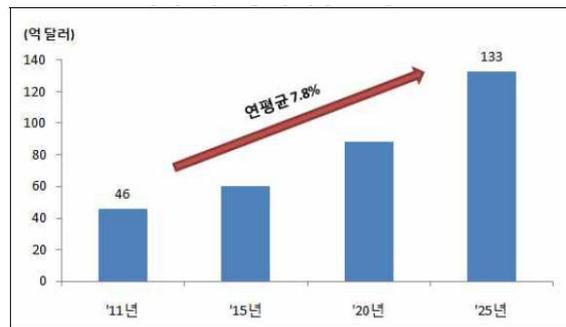
14) Mus F et al.(2016) Symbiotic nitrogen fixation and the challenges to its extension to nonlegumes. App. Env. Microbiol. 82(13):3698-3710

제3장 산업동향

3.1 국외 산업동향

식량 수요 증가 등으로 인해 세계 종자시장은 지속적으로 성장하고 있는 추세이며, 향후에도 성장가능성이 높을 것으로 예측

- 세계 식량종자시장 규모는 2010년 291억 달러에서 2025년 585억 달러로 연평균 4.7% 성장할 것으로 보이며, 세계 채소종자시장도 2011년 46억 달러에서 2020년 133억 달러로 연평균 7.8%의 성장세를 보일 것으로 예상



* 출처 : CONTEXT(2011), 김기홍(2017) 재인용

[그림 8] 세계 식량종자 시장(좌), 세계 채소종자 시장(우)의 시장 규모

GM작물의 경우 세계적인 재배면적 비중이나 시장에서의 종자 가치 등을 고려할 때 상당 부분을 차지¹⁵⁾

- GM작물의 재배면적은 미국, 브라질 등을 중심으로 꾸준히 증가해왔으며, 세계 경작면적 중 4대 작물(대두, 옥수수, 면화, 캐놀라)의 GM작물 비중이 약 49%를 차지
- GM종자의 시장가치는 2016년 기준으로 158억 달러이며, 세계 종자 시장가치인 450억 달러의 35% 수준으로 예상

15) 한국바이오안전성정보센터(2016.5), 2016년 GM작물 재배 현황 및 최근 동향

☞ 종자시장 중에서도 유전자가위기술을 적용한 시장은 지속적으로 성장할 것으로 전망되고 있으며, 농산물 분야에서도 활용도가 높을 것으로 예상됨

- 글로벌 유전자가위 시장은 2014년 2억 달러 수준에서 연평균 36.2% 성장하여 2022년까지 지금의 시장규모보다 10배 이상 증가한 23억 달러에 이를 것으로 전망됨¹⁶⁾
- 유전자재조합식품의 시장규모는 2022년까지 3억 6,800만 달러 수준으로 증가할 것으로 보이며, 유전자재조합식품 분야의 경우 현재의 기술 수준으로 보았을 때 유전자가위기술을 가장 빨리 상용화하여 제품군으로 만들 수 있는 분야로 언급됨¹⁷⁾
- 지역별 시장 규모는 북미 지역이 가장 크며, 그 규모는 2014년 기준 1,008백만 달러 수준에서 연평균 13.4% 성장하여 2019년에는 1,888백만 달러에 이를 것으로 예측
- 아시아 지역의 시장규모는 현재 252백만 달러 수준이며, 연평균 15.2%의 성장률을 보여 2019년에는 511백만 달러에 이를 것으로 예측

☞ 유전자가위기술을 활용하면 단시간에 저비용으로 종자개발이 가능하기 때문에 소규모의 바이오기업들도 기술개발에 적극적이며, 기업 간 제휴도 활발

- 그 대표적인 예인 2세대 TALEN 유전자가위에 기반한 기업 Calyxt는 트랜스지방이 생성되지 않는 고올레인산 대두, 아크릴아마이드가 생성되지 않는 감자, 저온당화가 지연된 감자, 포화 지방산이 감소된 카놀라, 글루텐프리 밀 등을 개발하고 있는 중임
- 듀폰은 CRISPR 전문 바이오기업(Caribou Biosciences)과 제휴를 체결하여 향후 5년 이내 CRISPR/Cas9 기술을 적용한 종자 출시를 목표로 함
- 몬산토는 Pairwise라는 유전자가위기술 스타트업에 1억2천5백만 달러를 투자하면서 식품 및 종자산업에 적극적으로 진출하고 있으며, 저장기간이 길면서 단맛이 증가한 딸기를 몇 년 안에 출시할 것임
- 최근 켐차이나-신젠타는 유전자가위기술을 이용하여 채소 품종 육성을 진행하고 있음

16) 식품의약품안전처, 식품의약품안전평가원(2017.5), 유전자가위기술 연구개발 동향 보고서

17) 바이오협회(2017), 크리스퍼 기술개발 진단과 시장 전망

3.2 국내 산업동향

최근 국내 종자기업 간 인수합병과 대기업의 자본 출자로 경쟁력을 높이고 있으나, 분자유종 등 생명공학기술을 활용한 산업화에는 한계

- 농협이 농우바이오의 지분을 인수하고 LG화학이 팜한농을 인수하고, CJ브리딩, 더기반(노루 페인트)이 설립되는 등 새로운 종자기업의 등장은 향후 국내 종자산업의 활성화를 이끌 것으로 보임
- 유전체 정보를 전문적으로 분석하는 중소규모의 벤처 기업들은 많이 있으나 분자마커 분석은 대학, 소규모 기업에서 이루어지고 있어 산업화로 이어지지 않고 있음

신육종기술 관련해서는 1세대부터 3세대까지의 모든 유전자가위기술을 보유하고 있는 툐젠이 원천특허 확보 및 유전자가위기술 확산에 주력함

- 툐젠의 CRISPR 원천특허는 세계 10개국에서 심사가 진행되고 있으며, 최근에는 농우, 농협 종묘와 공동연구를 통해 3세대 유전자가위기술을 이용한 영양성분이 강화된 색변환 당근 품종을 개발하고 있음

GMO 작물은 규제 여부에 따라 막대한 개발 비용이 소요되기 때문에 국내 종자기업의 영세성을 고려한다면 신육종기술을 활용한 작물 개발이 중요함

- GMO 작물을 상업화할 때까지 약 1천억 원 이상의 개발 비용과 위해성검사 등 10년 이상의 기간이 필요하기 때문에 다국적 종자회사 규모의 대기업이 아니고서는 시장 진입 자체가 매우 어려움
- 유전자가위기술이 규제에서 자유로워진다면, 한 품종 개발 비용을 약 3~5억 원 정도로 추정할 경우 200배 이상 비용을 절감할 수 있어 동 분야 중소 종자기업의 시장 진입을 촉진할 수 있음

제4장 정책동향

4.1 국외 정책동향

- EU에서 신육종기술 발표('11.11)를 전후하여 다양한 학술잡지에 신육종기술에 관한 연구자의 의견과 사고방식이 표명되게 되었고, 이와 같은 국제적 논의의 영향으로 미국을 비롯한 주요국에서 신육종기술에 관한 논의가 확산
 - 국제 사회에서는 유전자가위기술을 비롯한 신육종기술로 개발된 작물에 대한 규제 및 허가 방법에 대한 논의가 진행
 - 유전자가위기술을 활용한 품종 개량이 잇따르면서 미국과 유럽에서 새로운 유전공학 품종을 어떻게 다뤄야 할지에 관한 논의가 진행
- (EU) 회원국들의 요청에 따라 생명공학기술의 발달을 고려하여 새로운 식물육종 기술을 GMO 규제 범주에 포함시킬지 여부를 평가하는 작업반을 2007년에 구성하여 지속적으로 논의하고 있음¹⁸⁾
 - 유럽연합위원회는 현행 EU의 GMO 규정에 명시된 GMO의 정의에 신육종기술의 해당 여부를 검토하고 있으며, 유럽 각국은 EU의 최종 결정을 기다리고 있음
 - EU는 2011년부터 유전자가위기술을 적용한 농축산물에 대한 규제를 논의하였고, 조만간 그 규제에 대한 결론이 내려질 것으로 예상됨
 - 최근 유럽사법재판소(European Court of Justice)는 유전자가위기술 등 새로운 돌연변이 유발기술을 통해 얻어진 생물체는 GMO 규제에 적용 받을 필요가 없다는 의견을 제시¹⁹⁾

18) 질병관리본부(2016), 유전자가위(CRISPR) 등 새로운 유전자변형생물체 개발기술에 대한 인체유해성 평가기준 개발 연구

19) 생명공학정책연구센터(2018), BiolNwatch(2018.4.17)

☞ (OECD) 생명공학 규제감시조화 작업반은 식물 및 동물 분야 각각의 환경위해성 평가기술합의서를 마련하고 신육종기술과 관련해 참가국의 정보를 교환하는 역할을 담당²⁰⁾

- 유전자가위기술을 포함한 신육종기술은 OECD 과학기술정책위원회 산하 바이오/나노/융합 기술(BNCT) 작업반이 맡고 있는데, OECD는 이 신육종기술의 확장성에 주목

☞ (미국) 국립과학아카데미(NAS)는 2016년 유전공학 작물의 기술 현황을 종합한 보고서를 내어 유전자가위기술이 유전공학의 정밀도를 높여 GMO를 넘어서는 유망한 기술로 떠오르고 있다고 평가함²¹⁾

- 2016년 5월 미국 농무부(USDA)는 유전자가위기술을 이용해서 만든 변색 예방 양송이버섯을 GMO 규제 대상에서 제외시켰으며, 또한 듀폰 파이오니아에서 유전자가위기술을 이용해 만든 찰옥수수도 GMO 규제 대상에서 제외한다고 발표
- 미국 농무부에 속한 유기농 분야 자문위원회는 2016년 11월 유기농법을 지켜 생산했다라도 유전자가위 작물이라면 ‘유기농’이란 표시를 해선 안 된다는 권고안을 내놓음
- USDA-APHIS는 2011년부터 ‘Am I Regulated’ 제도를 운영하여 33건의 온라인 서비스를 진행하였으며, 아그로박테리움 매개에 의해 신규 유전자가 도입된 LMO는 규제 대상이지만, 유전자가위가 적용된 후대 분리종에서 도입유전자가 없는 개체는 규제 대상에서 제외
- 미국 농무부는 2018년 3월 유전자가위기술을 포함한 신육종기술로 개발된 식물에 대하여 식물해충²²⁾을 이용하여 개발된 경우가 아니라면 규제할 계획이 없다고 발표²³⁾
- 미국 의회조사국은 CRISPR/Cas9 기술개발 현황과 정책적 이슈를 담은 보고서를 발표하고 에너지, 생태계 보전, 의료 등의 분야에서 혁신적인 변화를 가져올 것으로 전망²⁴⁾
 - 보건 및 의료 서비스 부문에서 CRISPR/Cas9 기술은 당뇨, 말라리아, 항생제 내성 등의 부문에 획기적인 해결책을 제공해 줄 것으로 전망되나, 유전자 조작의 결과가 세대를 걸쳐 발현할 수 있다는 점에서 어떻게 작용할지에 대한 논의가 이루어짐

20) 산업통상자원부·한국생명공학연구원·한국바이오안전성정보센터(2017), 바이오안전성백서

21) 유전자 가위 편집 작물 안전성, GMO와 다를까. 한겨레신문(2017.1.15)

22) 바이러스, 박테리아 및 이의 유전자를 이용하여 개발된 식물

23) U.S. Department of Agriculture, Secretary Perdue Issues USDA Statement on Plant Breeding Innovation(2018.4.5)

24) Advanced Gene Editing: CRISPR-Cas9, 2017.4.28.

- 산업바이오 분야에서 박테리아, 균류, 효모 등의 유전자 조작을 통한 화학제품의 생산, 생태계 관리 및 보전 측면에서 유전자 조작을 통해 생태계의 다양성을 확보할 수 있으나, 생태계에 미칠 영향 예측이 어려운 점이 주요 이슈로 다루어짐
- 기초연구로서 유전자 조작은 질병과 치료제 개발에 중요한 정보를 제공할 수 있으나, 유전자 조작의 결과 생성되는 생물학적 물질과 제품이 가진 파괴력은 잠재적으로 국가 안보를 위협할 수도 있음을 강조

(일본) 다부처 혁신증진전략(SIP: Strategic Innovation Promotion) 프로그램을 통해 유전자가위기술 증진 및 이를 이용한 식품 개발과 유전자변형 농산물의 상업화를 위한 연구활성화 정책을 펴고 있음

- 일본 농림수산성은 신육종기술 스터디그룹을 통하여 신육종기술의 특징, 현행 GMO 규제 체제에서의 신육종기술의 장점과 연구개발 활성화 전략연구 등에 대한 보고서를 작성하여 신육종기술의 과학적, 법률적, 사회적 고려와 대응 방안을 마련하고 있음

신육종기술을 통해 개발된 작물에 대하여 GMO 규제에 관한 국가적 합의가 필요한 상황으로 개발과정 또는 최종산물을 기준으로 할 것인지 등 충분한 검토 및 논의가 요구됨

- 미국은 기본적으로 최종 산물을 중심으로 평가하는 기초를 가지고 있고 친 GMO적인 정책으로 GMO를 관리하고 있어 최종 산물에 외부 DNA의 잔류 여부를 판단의 근거로 삼음
- EU에서는 유전자가위를 비롯한 다양한 신육종기술로 개발된 작물의 GMO 해당 여부에 관해 논의 중이며 각국의 현재까지의 기본 입장이 모두 다르게 나타나고 있음
- 일부 국가(아르헨티나, 이스라엘, 스웨덴 등)는 신규 유전물질 조합 및 최종 산물 중 삽입 유전자의 유무 등에 따라 GMO 규제 여부를 판단 기준으로 하는 정책을 확립하고 있음
- 독일은 ODM(Oligonucleotide-Directed Mutagenesis)을 이용해 개발한 식물은 GMO가 아니라고 결정했으나 반대측의 소송으로 법적 분쟁이 진행
- 호주는 보건 및 농업분야 연구를 획기적으로 가속시킬 것으로 예상되는 유전자가위기술 등 새로운 유전공학기술을 어떻게 규제할 것인가에 관한 법률을 새로 마련할 예정
- 이스라엘 식물보호청(Plant Protection Services Administration)은 CRISPR/Cas9을 활용해 유전자가 교정된 식물체의 자손을 GMO나 형질전환 식물체로 간주하지 않겠다는 결정을 승인

4.2 국내 정책동향

 국무조정실 규제혁신기관실에서 유전자가위기술 유래 동식물의 LMO 해당 여부에 대한 가이드라인을 마련하기 위해 2016년 3월 신산업투자위원회를 발족하고 소속 바이오헬스 분과위원회를 통해 규제개선 정책을 마련하고 있음

- 한국은 유전자가위를 이용한 생명체에 어떠한 기준을 적용해야 하는지에 대한 기준이 확립되지 않았음
- 머지않은 미래에 유전자가위를 이용한 농축산물이 증가할 것이기 때문에 글로벌 수준의 합의점을 찾을 수 있는 가이드라인을 확립하는 것이 필요

 「정부연구개발투자 방향 및 기준」에서 농림수산식품 분야의 투자방향으로 유전자 가위기술 등 첨단 육종기술에 중점을 두어 기후적응형, 수요맞춤형 종자개발에 관한 내용을 포함함

- 현재 과학기술정통부, 농촌진흥청 중심으로 작물 육종에 유전자가위기술을 접목하는 기초·응용연구를 수행

제5장 R&D 투자동향

5.1 국외 R&D 투자동향

 (미국) GM작물을 중심으로 연구개발이 활발하며, 2000년대 들어 신육종기술을 이용한 신품종 개발에 정부 차원의 투자가 이루어지고 있음

- 다양한 GM작물을 재배하고 있으며, 재배된 GM작물의 일정 부분은 국내에서 소비하고, 나머지는 해외로 수출
 - 미국에서는 GM작물의 시험재배가 다양하게 수행되고 있으며, 2015년에만 총 467건의 승인신청이 이루어졌으며 1990년대 초반부터 2002년까지 시험재배 신청/승인 건수가 크게 증가하다 이후부터는 일부 감소 추세를 보임
 - 작물로는 주로 옥수수, 대두, 면화, 감자, 토마토, 밀 등의 시험재배가 수행되고 있으며, 기본 형질 이외에도 가뭄내성, 냉해내성 등 극한 환경에서도 잘 자라거나 수확량이 증대된 작물 연구가 활발
- 미국 국립보건연구원(NIH)이 지원하는 CRISPR/Cas9 기술 관련 연구비 규모만 한화로 6,000억 원을 상회하는 수준으로 다양한 분야에 걸쳐 기술이 적용되고 있음
- 미국 국립보건연구원(NIH)과 국립 알레르기 및 전염병 연구소(NIAID)는 광범위한 전염병 위협에 적용되는 새롭고 신속한 제조 지향적인 생물 공정 플랫폼 기술에 연간 59억 달러를 지원하기로 결정함
 - ※ 생물테러(탄저병), 전염병(인플루엔자, 말라리아) 등이 포함

 (일본) 대부분 공공기관을 중심으로 연구를 진행하고 있으며, 일부 GM작물과 유전체 관련 연구를 수행

- 일본에서는 소비자들이 GM작물에 대해 꺼려하는 편이며, 규제 절차 또한 까다로워 비교적 연구가 더딘 속도로 진행
- 일본 농림수산성 주도로 2004년 벼의 전체 유전체 전장 분석을 완료한 후 벼 관련 중요한

유전자를 특허로 등록한 바 있으며 농업 혁신을 위한 유전체학 프로젝트를 지원(2008~2013)

- 최근에는 유전체 교정 분야에서 미국을 뛰어넘는 기술경쟁력 확보를 위해 독자적인 유전자 가위기술 개발에 향후 5년간 총 85억 엔(약 900억 원)을 투입할 계획²⁵⁾

 (중국) 민간 주체의 연구개발은 규제 적용으로 인해 제한적으로 이루어지고 있으며, 민간보다는 국가 주도의 연구개발을 진행

- 중국은 생명공학을 신산업전략으로 구분하여 많은 예산을 투입하고 있고 2014년 시진핑 주석의 연설에서 생명공학 연구에 대한 지지를 공식화 했으며, 상업화와 해외 기업들의 참여를 바탕으로 활성화 노력
- 2009년 자국의 기술로 개발한 GM작물인 피타아제(phytase)옥수수(사료)와 Bt쌀(식품)의 바이오안전증명서를 발급하여 상업화가 예상되었으나, 상업화가 지연
- 중장기계획인 ‘생명공학육성을 위한 국가 중장기계획(2010-2020)’은 벼, 밀, 옥수수, 면화와 같은 작물과 돼지, 소, 양과 같은 동물연구에 초점을 맞추고 있으며 도입 형질은 주로 해충 및 질병저항성, 스트레스 내성 유전자 등임

5.2 국내 R&D 투자동향

 최근 국가 주도의 다양한 분자육종기술 및 신육종기술 기반 과제의 수행을 통해 육종 기술개발 경쟁력 확보 추진

- 농식품부, 농진청, 과기정통부 소관 국가연구개발 과제를 통해 신육종 플랫폼기술을 확보하고, 이를 품종육성 및 개량에 활용하고자 하는 연구가 추진되고 있음
- 신육종기술 연구가 상업화까지 성공한 사례가 많지 않고, 아직은 기초·원천연구 단계에서 투자가 이루어지고 있음

 최근 5년간('12~'16) 투자된 정부연구비 중 신육종기술과 관련한 투자는 총 269억 원으로 집계됨(NTIS기준)

- 유전자가위기술에 256억 원이 투자되어 총 투자의 94.9%를 차지

25) 생명공학정책연구센터(2016), BiolNwatch(2016.6.2)

- 역육종(Reverse Breeding), Agroinfiltration, 접목(Grafting) 기술 확보 차원에서 다수의 연구과제가 시도되었으나, 투자 규모가 5.1%로 미미한 수준임
- 동종기원(Cisgenesis)을 작물 육종에 활용하기 위한 기반기술 연구는 이루어지지 않았음

〈표 3〉 작물 분야 신육종기술에 대한 정부R&D 투자현황(2012-2016)

신육종기술 유형	정부연구비 (백만원)	비중 (%)
SDN(Site Directed Nucleases)	25,558	94.9
역육종(Reverse Breeding)	204	0.8
접목(Grafting)	847	3.1
Agroinfiltration	323	1.2
동종기원(Cisgenesis)	-	-
합계	26,932	100.0

자료 : NTIS

작물 분야에 신육종기술을 적용한 연구 중에는 유전자가위기술이 대부분을 차지

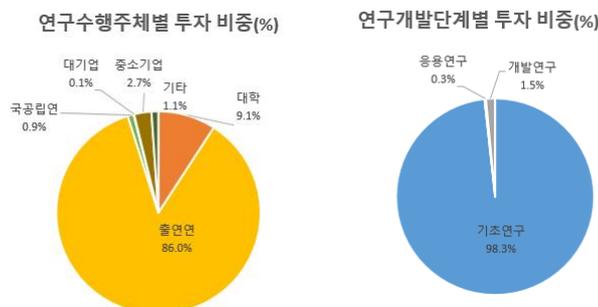
- 최근 5년간('12~'16) 유전자가위기술에 대한 정부R&D 투자는 256억 원이며, 부처별로는 과기정통부(226억), 농진청(22억) 위주로 투자가 이루어짐

〈표 4〉 작물 육종 분야 유전자가위기술에 대한 부처별 투자현황(2012-2016)

구분	과기정통부	농진청	농식품부	교육부	중기청	합계
예산 (백만원)	22,587	2,164	422	85	300	25,558
비중 (%)	88.4	8.5	1.6	0.3	1.2	100.0
과제 수	5	23	8	2	1	39

자료 : NTIS

- 연구수행주체별로는 출연연(220억), 대학(23억)을 중심으로 투자가 이루어짐
- 응용·개발연구의 비중은 1.8%에 불과하며, 투자비 전체가 기초연구단계에 집중되어 있는 형태로 투자 비중이 98.3%에 달함



〔그림 9〕 연구수행주체별(좌), 연구개발단계별(우) 정부투자(2012-2016) 비중

- 최근 5년간 정부R&D 사업 중 유전자가위기술을 작물 육종에 적용하는 연구에 가장 많은 투자가 이루어졌으며, 그 외 역육종(Reverse Breeding), Agroinfiltration, 접목(Grafting) 기술 등 여타 신육종기술에 대한 소액 투자가 진행됨
 - 농진청의 차세대바이오그린21사업과 과기정통부의 유전자교정연구단(기초과학연구원) 등에서 유전자가위기술 영역에 대해 256억 원의 정부연구비가 지원됨

〈표 5〉 작물 육종 분야 유전자가위기술 관련 정부R&D 투자현황(2012-2016)

부처명	사업명	연도	총투자 (백만원)
교육부	이공학개인지초연구지원	2016	51
	이공학학술연구기반구축	2016	34
농식품부	농생명산업기술개발	2012-2016	422
농진청	농업기초기반연구	2016	70
	농업첨단핵심기술개발	2015-2016	94
	차세대바이오그린21	2012-2016	2,000
과기정통부	개인연구지원	2016	300
	기초과학연구원 연구운영비지원	2014-2016	21,987
	중견연구자지원	2015	300
중기부	창업성장기술개발	2016	300
합계			25,558

자료 : NTIS

- 최근 5년간 역육종(Reverse Breeding), Agroinfiltration, 접목(Grafting) 기술에 대한 정부R&D 투자는 각각 2억, 3억, 8억 원으로 소액 규모로 투자

〈표 6〉 작물 분야 역육종, Agroinfiltration, 접목 기술 관련 정부R&D 투자현황(2012-2016)

기술명	부처명	사업명	연도	총투자 (백만원)
역육종 (Reverse Breeding)	교육부	이공학개인지초연구지원	2015-2016	102
		일반연구자지원	2012-2014	102
	소계			204
Agroinfiltration	교육부	일반연구자지원	2012-2014	103
	농식품부	첨단생산기술개발	2013	70
	농진청	차세대바이오그린21	2012-2014	150
	소계			323
접목 (Grafting)	농진청	원예특작시험연구	2012-2016	807
		차세대바이오그린21	2012	40
	소계			847

자료 : NTIS

제6장 결론

6.1 요약 및 정리

 관행육종기술의 품종개발 속도를 가속화시키고 GMO 대체 작물을 개발하기 위해서는 신육종기술의 접목과 활용이 중요함

- 신육종기술은 목표 유전자만 변이가 가능하도록 작용함으로써 품종개발 시간을 단축시켜 개발 비용을 감소시키고 기존에 교배가 불가능했던 작물에도 적용이 가능
- 관행육종기술, 분자육종기술 등과 접목하게 되면, 새로운 육종기술 시스템을 구축할 수 있는 플랫폼기술로서 활용도와 파급력이 큰 기술임
- 목표 형질의 전달을 통해 신품종 개발과 생산량 제고에 직접 기여할 수 있으며, 이는 곡물 자급률 제고와 수입대체 효과를 낼 수 있음

 GM작물 개발에 적극적인 다국적 종자기업의 유전자가위기술에 대한 관심이 증대되고 바이오기업과의 제휴 등을 통해 신기술 도입·적용에 적극적임

- 세계 종자 시장규모가 지속적으로 성장하고 있으며, 세계 인구 증가 및 식량 수요 증가로 인해 유전자가위기술 등을 활용한 작물 시장의 성장 가능성도 높을 것으로 기대
- Calyxt, 툴젠 등 유전자가위기술에 기반한 기업들의 연구개발 활동이 적극적이며, 듀폰, 몬산토 등은 스타트업과의 제휴를 통해 신육종기술을 적용한 품종 개발에 주력

 유전자가위기술을 포함하여 신육종기술을 통해 개발된 작물에 대한 GMO 규제에 관해 국제적, 국가적 논의가 활발하게 진행 중임

- EU 및 OECD를 중심으로 국제적 논의가 시작되었으며, 미국과 EU를 중심으로 견해의 차이가 있으나 세계 주요국들은 신육종기술을 활용하여 GMO를 대체할 수 있다는 점을 긍정적으로 평가

- 특히 미국은 농무부 장관이 유전자가위기술을 포함하는 혁신적인 육종기술을 통해 생산된 식물은 규제하지 않을 것이라는 성명서 발표 이후 유전자가위 작물 개발이 가속화될 것으로 전망됨

☞ 국내는 유전자가위기술을 작물 육종에 적용한 연구가 일부 이루어지고 있으나, 제도적인 한계로 다양한 연구가 시도되고 있지 못하고 있음

- 국내의 경우 다양한 신육종기술 확보를 위한 투자보다는 정부 차원에서 유전자가위기술을 적용한 작물개발 연구에 투자가 집중되어 왔음
- 신육종기술 연구에 대한 민간 기업의 추진 현황 및 성과가 미약하고 정부지원이 부족하여 연구의 연속성이 확보되지 못하고 있으며, 정부연구비도 269억 원('12~'16년) 규모로 저조한 수준

6.2 정책제언

☞ 국가별 사회적 수용도, 규제 적용기준이 상이하어 신육종기술을 이용한 작물 개발 시 사회적 합의를 바탕으로 한 관련 법·규제 정비가 선행되어야 함

- 개발되는 최종 산물에 외래 유전물질이 함유되어 있지 않아 GMO로 인식되지 않을 수 있으나, 명확한 기준이 없으므로 사회적 합의에 바탕을 둔 규제 또는 법의 정비가 필요
- 국내 연구진에서 선도적인 성과를 내고 있는 유전자가위 연구결과의 산업화를 위해서는 미국의 'Am I regulated?'와 같은 규제관리 시스템 도입이 시급
- 유전자가위 작물에 대한 규제 등 법령 정비가 이루어져야 국내 산업화를 촉진시킬 수 있으므로 신육종기술이 육종 분야에 미치는 과학기술적, 경제적 파급효과 등을 고려하여 GMO 규제 여부를 국가 차원에서 신중하게 검토할 필요

☞ 신육종기술에 대한 관심이 증대되고 있는 상황에서 GMO 규제를 회피할 수 있는 기술에 대한 연구개발 관련 지원 확대가 필요함

- 우리나라는 유전자가위 원천기술을 보유하고 있지만, 관련 기술을 작물 개발에 적용하기 위한 기술개발 및 지적재산권 확보를 위해 노력할 필요
- 신약 개발에서 다양한 플랫폼기술이 중요하듯이 신식품 개발에 있어서도 신육종기술의 개발 및 활용이 중요하며, 이를 위해 다양한 육종기술 시스템을 접목한 연구 병행 필요

- 세계적으로 기술력이 우수한 국내 생명공학기술을 농업 분야에의 적용을 확대하는 기초로 신육종기술을 확보하고 관행육종기술과 접목하여 새로운 육종기술 시스템을 구축하기 위한 연구개발투자 확대가 필요

작물 개발에 유전자가위기술 등 신육종기술을 도입할 경우 초기 투자비용이 높으므로, 기술개발의 목표 및 타겟 시장을 명확히 설정해야 함

- 유전자가위 적용을 위한 유전자 타겟 연구, 유전자가위 전달 기술, 작물 조직 배양 및 재분화 연구 등 다양한 기반기술 확보와 유전자가위기술의 적용 범위 확장을 위해 노력 지속
- 현행 국내법상 유전자가위 작물의 국내 산업화가 어려운 상황에서 국내 개발 제품을 역수입 당할 우려가 존재하므로, 해외 라이선싱이나 해외 판로를 개척할 수 있는 방향의 기술개발을 고려
- 제초제 저항성 작물 등 국내 수입량이 많은 GM사료작물을 대체할 수 있는 기술을 국내 기업을 통해 개발하여 수입대체 효과를 내는 방안을 고려할 필요

대학, 출연연 중심의 R&D를 지원하되, 민간 기업의 참여가 확대될 수 있도록 기존 육종 인력을 활용한 민간과 공동 협력연구 활성화가 필요함

- 유전자가위기술의 경우 막대한 자본을 확보하고 있는 다국적 종자기업의 지적재산권 및 시장 선점이 예상되고 있어, 이에 대한 우리나라 정부 차원의 빠른 대응이 필요
- 대학, 출연연 중심의 기초·원천기술 개발을 추진하되 산학, 산연, 산학연 등의 협력을 통해 산업체의 니즈를 반영한 원천기술을 기업체에 이전하여 산업화하는 전략을 구사
- 유전자가위기술을 적용한 작물 개발의 경우 중소기업의 진출이 용이할 수 있지만, 영세한 규모의 민간 기업이 원천기술 확보를 위해 자발적 기술개발을 추진하도록 협업 체계가 마련될 필요

육종기술 경쟁력 제고를 위해 신육종기술 기반의 기초연구를 적극 지원하고, 장기적으로 연구개발 전주기 지원을 위해 관련 부처 간 역할 조정이 요구됨

- 신육종기술의 확보 및 이들 원천기술 간의 접목을 통해 첨단육종기술 경쟁력을 갖추기 위해서는 기존 또는 신규 인프라 지원을 통해 다양한 기초연구를 적극 지원할 필요
- 장기적으로는 신육종기술 관련 기초연구부터 응용·개발 및 산업화 연구를 지원하는 관련 부처 간 역할분담 방안을 마련하여 효율적으로 추진

| 참고 문헌 |

- 농촌진흥청(2014.6), 새로운 육종기술 'NBT'란?, 월드포커스 Vol. 42
- 생명공학정책연구센터(2016), BioINwatch(2016.6.2)
- 생명공학정책연구센터(2018), BioINwatch(2018.4.17)
- 식물분자육종사업단(2014), 식물분자육종최신기술
- 식품의약품안전처, 식품의약품안전평가원(2017.5), 유전자 가위기술 연구개발 동향 보고서
- 이민경(2017), 생명을 디자인하는 유전자 가위의 기술·산업 동향 및 연구 과제, 산은조사월보 제743호
- 질병관리본부(2016), 유전자가위 등 새로운 유전자변형생물체 개발기술에 대한 인체위해성 평가 기준 개발 연구
- 한국과학기술한림원(2016), 글로벌 유전자교정 기술동향 보고서
- 한국바이오안전성정보센터(2016.5) 2016년 GM작물 재배 현황 및 최근 동향
- 한국바이오안전성정보센터(2017), 바이오안전성백서(Biosafety white paper 2017)
- 한국바이오협회(2017), 크리스퍼 기술개발 진단과 시장 전망, Bio Economy Report
- 한지학, 정민(2017), 식량생산 제고를 위한 신육종기술
- Jo KR, Kim CJ, Kim SJ, Kim TY, Bergervoet M, Jongsma MA, Visser RG, Jacobsen E, Vossen JH(2014) Development of late blight resistant potatoes by cisgene stacking, BMC Biotechnology May 29;14:50
- Vanblaere T, Szankowski I, Schaart J, Schouten H, Flachowsky H, Brogginini GA, Gessler C(2011) The development of a cisgenic apple plant. Journal of biotechnology 154:304-311
- Chan S(2010) Chromosome engineering: power tools for plant genetics. Trend in Biotechnology 28:606-610
- JRC(2011), "New plant BreedingTechniques: State-of-the-art and prospects for commercial development" in JRC Scientific and Technical Reports, EUR 24760 EN
- Mus F et al.(2016) Symbiotic nitrogen fixation and the challenges to its extension to nonlegumes. App. Env. Microbiol. 82(13):3698-3710
- Park SM, Lee JS, Jegal S, Jeon BY, Jung M, Park YS, Han SL, Shin YS, Her NH, Lee JH, Lee MY, Ryu KH, Yang SG, Harn CH(2005) Transgenic watermelon rootstock resistant to CGMMV (cucumber green mottle mosaic virus) infection. Plant Cell Rep 24: 350-356

- Schouten HJ and Jacobsen E.(2008) Cisgenesis and intragenesis, sisters in innovative plant breeding, Trends Plant Sci. Jun;13(6):260-1
- Hily JM, Demanèche S, Poulicard N, Tannières M, Djennane S, Beuve M, Vigne E, Demangeat G, Komar V, Gertz C, Marmonier A, Hemmer C, Vigneron S, Marais A, Candresse T4 Simonet P, Lemaire O(2018) Metagenomic-based impact study of transgenic grapevine rootstock on its associated virome and soil bacteriome, Plant Biotechnol J. Jan;16(1):208-220
- <http://c4rice.irri.org>
- <http://scienceon.hani.co.kr/482682>
- <http://www.thinkfood.co.kr/news/articleView.html?idxno=71324>
- <http://health.hankyung.com/article/2017083068271>
- <http://health.hankyung.com/article/201708246144f>
- <http://news.joins.com/article/20373403>
- http://www.hani.co.kr/arti/science/science_general/780156.html
- <http://www.medigatenews.com/news/1540292025>
- <https://www.usda.gov/media/press-releases/2018/03/28/secretary-perdue-issues-usda-statement-plant-breeding-innovation>

| KISTEP 기술동향브리프 발간 현황 |

발간호	제목	저자 및 소속
2018-01	블록체인	유거송(KISTEP), 김경훈(KISDI)
2018-02	독일의 연구개발 동향	이주석·김승연(KISTEP)
2018-03	휴먼 마이크로바이옴	황은혜·김은정(KISTEP) 남영도(KFRI)
2018-04	신육종기술(NPBTs)	박지현·홍미영(KISTEP) 한지학(㈜틀젠)

| 저자 소개 |

박 지 현

한국과학기술기획평가원 생명기초사업센터 연구위원

Tel: 02-589-2275 E-mail: jihyun@kistep.re.kr

홍 미 영

한국과학기술기획평가원 예비타당성조사2센터 연구위원

Tel: 02-589-2196 E-mail: myhong@kistep.re.kr

한 지 학

(주)툴젠 상임고문

Tel: 02-873-8168 E-mail: chharn@hanmail.net

※ 본 KISTEP 기술동향브리프의 내용은 필자의 개인적 견해이며, 기관의 공식적인 의견이 아님을 알려드립니다.

KISTEP 기술동향브리프 | 2018-04호

신육종기술(NPBTs)