

# 식물 디지털 육종 기술의 발전과 미래의 종자산업

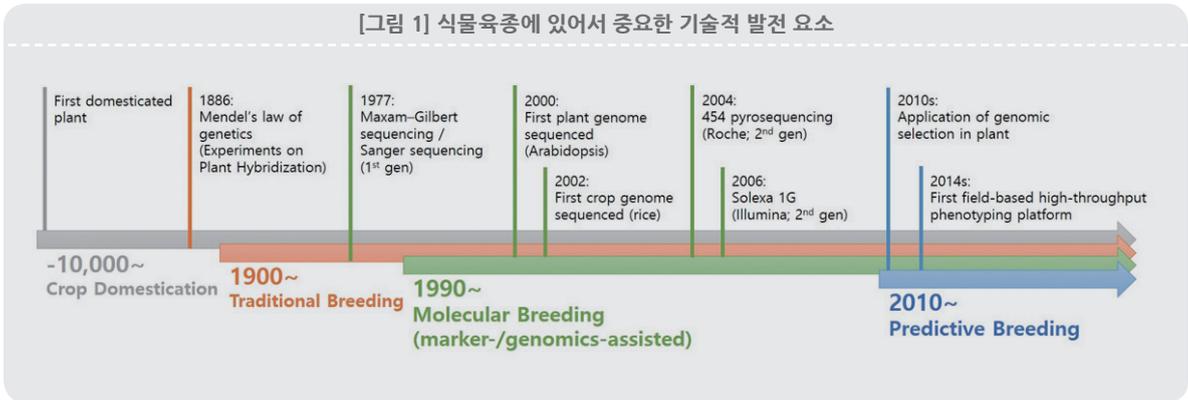
김창수 교수 충남대학교

김재윤 교수 공주대학교

## 📌 식물 육종의 발전사

인간이 약 12,000년 전부터 정착 농경을 시작한 이래로 식물 육종은 농부들에 의해서 자연스럽게 수행되어 왔다. 이는 주로 이듬해에 파종할 종자를 채종하는 형태로 진행이 되었는데 농부들은 수량이 많이 나오거나 특정한 병충해에 잘 견디는 개체들을 선발하여 저장하는 방법을 이용했으며 특별한 과학적인 배경이 없이 지극히 주관적인 관점에서 지속적으로 수행되어 왔다. 육종의 모든 과정의 배경에는 유전학이라는 학문이 존재를 한다. 흔히 표현형(우리가 눈으로 확인해볼 수 있는 개체의 물리적 형질)은 유전자와 환경의 상호작용에 의하여 발현이 되지만 이러한 체계적인 이해가 부족한 상황에서 수행된 식물 육종은 발전속도가 매우 더디고 학문의 영역이라기 보다는 관행적으로 수행되는 일련의 농업적인 과정으로 인식되어 왔다. 1866년 그레고어 멘델이 '식물의 잡종 연구' 라는 논문을 발표하면서 유전학 연구의 패러다임은 급속도로 변하게 된다. 그 당시까지만 하더라도 유전학은 연속적인 변이(혼합 유전설)로 설명이 되어왔기 때문에 이를 수치화 시킨 멘델의 연구는 크게 주목을 받지 못했다. 멘델이 당시 대학이나 연구소의 저명한 학자가 아니라는 점도 냉대의 원인으로 작용했으리라 생각된다. 그러나 현미경의 발명으로 염색체의 실체가 발견되고 1900년에 비로소 두명의 생물학자 휘호 더프리스와 카를 코렌스에 의하여 멘델의 법칙이 재발견되고 새로운 조명을 받게 되었다. 식물 육종은 유전학의 발전과 밀접한 관계가 있다. 20세기 이후부터 과거 선발에 의존하던 육종법에서 인공 교배에 의하여 새로운 형질을 도입하는 교배육종법이 널리 연구가 되어 왔으며 이는 현재까지 지속적으로 수행되어 식량의 증산 및 안정 생산에 기여하고 있다.

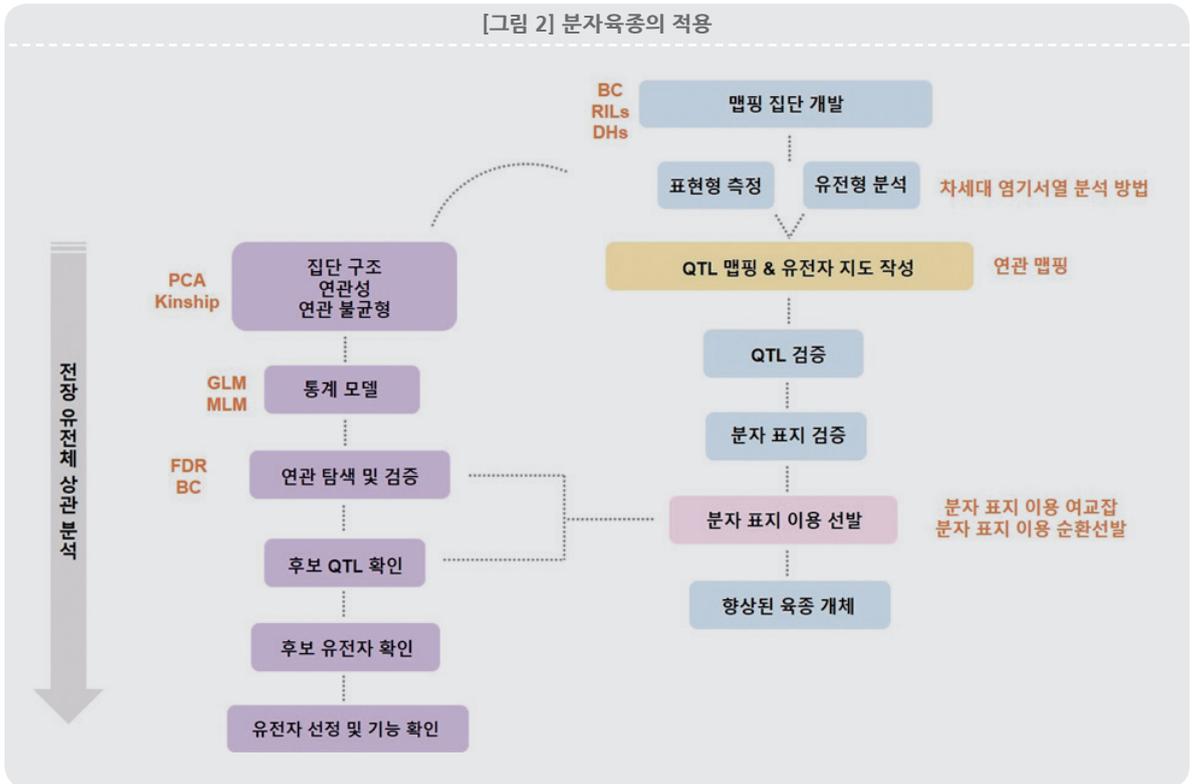
[그림 1] 식물육종에 있어서 중요한 기술적 발전 요소



출처: Kim et al. 2020

2050년까지 세계 인구는 약 96억명에 달할 것으로 예상되고 있다. 이는 식량의 증산이 절실히 필요하고 경지 이용 효율을 높여야 함을 의미한다. 새로운 경작지를 만드는 것보다 식물 육종에 의한 생산성의 향상에 노력을 기울여야 기하급수적으로 늘어나는 인구를 부양할 수 있다. 식물 육종은 교배육종의 도입 이후에 지속적으로 생산성 향상에 기여해 왔지만 현재 세계가 직면하고 있는 기후변화 문제와 더불어 혁신적인 기술적 전환이 필요하다는데 인식을 같이 하고 있다. 앞서 언급하였듯이 식물 육종의 발전은 유전학(또는 유전체학)의 발전과 함께 지속적인 발전이 가능하다. 그림 1은 식물 육종이 발전하는데 기여한 기술들과 식물 육종의 트렌드를 보여준다 (Kim et al. 2020). 앞에서 서술한대로 식물의 육종은 작물의 순화(crop domestication)으로부터 시작되었으며 멘델의 법칙이 발견된 이후에 교배육종법이 도입되어 획기적인 발전을 해왔다. 1977년에 Maxam-Gilbert 염기서열법이 개발되면서 육종가들은 식물의 표현형과 함께 그러한 표현형들을 발현할 수 있는 유전자를 연구할 수 있게 되었으며 이 시점에서 우리가 흔히 이야기하는 전통육종법과 분자육종법이 나누어지는 시점이라고 할 수 있다. 분자육종법의 도입은 현대 육종의 방법론을 크게 바꾸어 놓는 시점이 된다. 전통육종법의 경우 육종가의 역량에 따라 육종의 성패가 좌우되는데 이는 육종의 방법이 단순한 교육으로 이루어 질 수 없으며 다년간의 현장경험과 감각에 크게 의존하기 때문이다. 쉽게 설명하면 전통적인 육종법은 목표형질에 대하여 육종가가 선호하는 개체를 선발하는 방법으로 수행되기 때문에 이를 후배 육종가에게 단순하게 전달을 하는 것이 매우 어려운 일이다.

[그림 2] 분자유종증의 적용

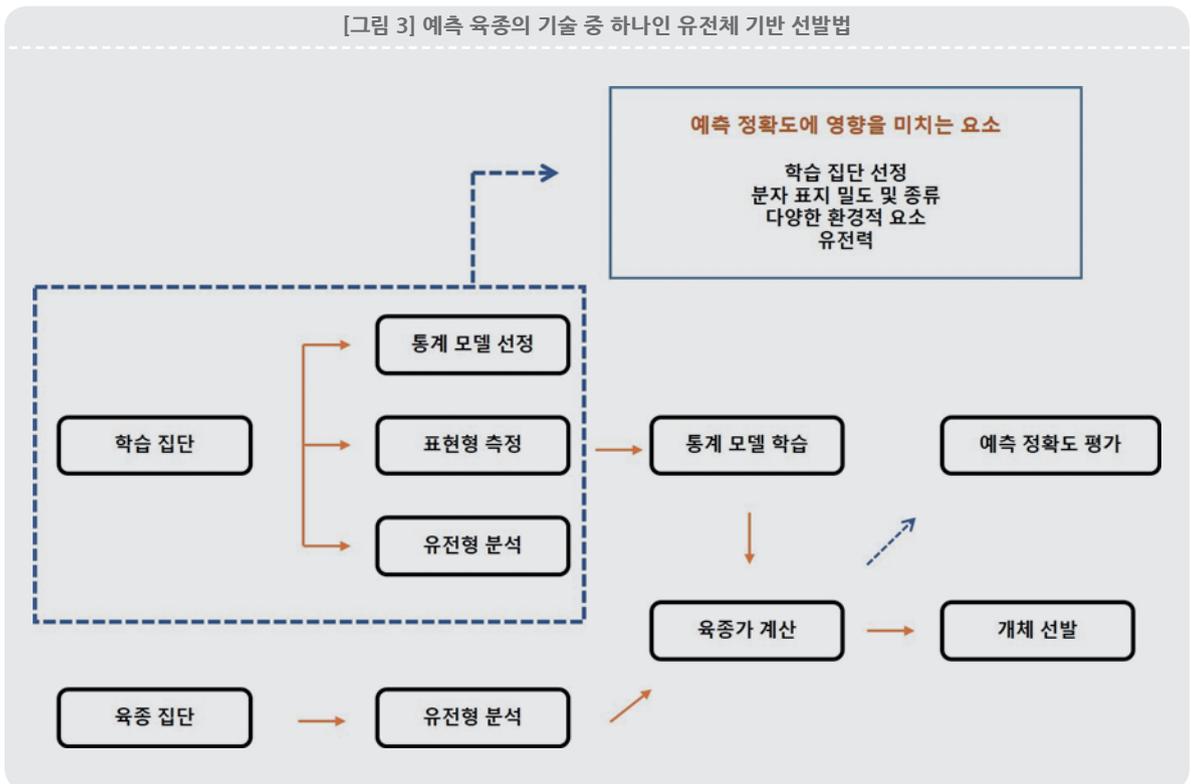


출처: Jeon et al. 2022, 심사중 논문 발췌

분자유종증의 경우 유전자에 포함되어 있는 변이를 분자표지라는 방법으로 선발을 하기 때문에 과학적인 기초를 가지고 있으며 매우 객관적인 방법으로 수행이 된다. (그림 2) 그리고 분자표지를 이용하게 되면 식물을 성숙기까지 키울 필요없이 초기에 선발을 할 수 있으므로 육종의 연한을 줄일 수 있다. 이는 당시 획기적인 전환으로 많은 학자들이 다양한 형질의 분자표지 발굴에 연구역량을 집중했던 시점이다. 분자유종증은 21세기 이후에 염기서열분석법의 비약적인 발전(2세대 염기서열 분석법, Next Generation Sequencing)으로 생물학적 빅데이터를 저렴한 가격에 생산함으로써 더욱더 가속화된다. 새로운 기술을 통하여 각종 식물의 표준유전체 염기서열이 구축이 되고 분자표지를 이용하여 전체 유전체를 스캔함으로써 더욱 정밀한 분자유종증이 가능해졌다. 그러나 분자유종증법을 20년정도 연구를 했음에도 불구하고 그 한계점이 명확히 드러나게 되었는데 이는 멘델의 법칙이 처음 발표되었을 때의 논쟁으로 돌아가보면 그 원인을 알 수 있다. 멘델의 법칙이 발표되었을 당시 학자들은 유전은 연속적인 현상이며 멘델의 경우처럼 수치화 될 수 없다고 주장하여 멘델의 법칙은 발표 당시에는 관심을 받지 못했었다. 사실 이는 둘다 맞는 주장으로서 유전학이 발전하면서 유전의 변이는 연속

적인 변이와 불연속적인 변이 모두에 의하여 지배될 수 있다는 사실이 밝혀졌다. 이는 양적형질과 질적형질로 설명될 수 있는데 양적형질의 경우 하나의 표현형에 여러개의 유전자가 관여하는 경우를 말하고 이는 연속적인 변이를 갖는다. 질적형질의 경우 반대로 하나의 표현형에 소수의 유전자가 관여하는 경우이며 불연속적인 변이를 갖는 특징을 나타낸다. 분자유종의 경우에는 단일 분자표지를 이용하여 선발을 하기 때문에 질적형질에는 우수한 효율을 보이지만 양적형질의 경우에는 효율을 얻어내기 힘든 단점이 있다. 불행히도 대부분의 농업적인 형질은 다수의 유전자가 상호작용을 하는 양적형질의 경향을 나타낸다. 따라서 분자유종의 적용은 명확한 한계를 드러낼 수 밖에 없다. 분자유종법이 널리 연구되던 시기에는 양적형질의 육종을 위하여 전통적인 육종법이 지속적으로 사용되었다. 이는 육종기술이 아무리 발전하더라도 목표형질에 따라서 다양한 육종법이 복합적으로 적용되어야 최고의 효율을 얻을 수 있음을 암시한다.

[그림 3] 예측 육종의 기술 중 하나인 유전체 기반 선발법



출처: Jeon et al. 2022, 심사중 논문 발췌

전통육종과 분자육종의 단점을 보완하고 농생명빅데이터를 육종에 적용하기 위하여 2010년 이후부터 예측육종법(predictive breeding)이 널리 연구되고 적용이 되고 있다 (그림 3). 이는 육종가의 경험과 지식을 학습집단(training population)을 통하여 기계학습법(machine learning)을 통하여 학습시킨 후 모델을 작성하고 실제 육종집단에 적용하여 선발을 하는 방법으로서 많은 시행착오를 거치고 있지만 차세대육종법으로 자리를 잡고 있음은 명확한 사실이다. 그러나 전통육종법과 분자육종법은 종자산업 전반에 널리 이용이 되고 있지만 예측육종법은 아직 시작 단계에 있으며 산업적인 이용사례는 매우 드물다.

이와 같이 식물의 육종은 유전학 및 유전체학의 발전과 더불어 비약적인 성장을 해왔으며 세계적 식량안보에 많은 부분을 이바지했다. 현재의 식물육종 기술은 과거에 비하여 매우 발달한 상태이므로 식물육종시에 최신의 육종법을 도입하기보다는 육종의 목적에 맞는 방법을 선택하여 목표형질을 도입하는 것이 가장 효율적이라고 할 수 있다.

### 식물육종의 디지털화

디지털은 현재 우리나라 과학 및 산업 전반에 중요한 키워드로 자리 잡고 있지만 디지털이라는 용어는 역사가 오래된 것임을 독자들은 잘 알고 있을 것이다. 사전적인 의미의 디지털은 ‘물질, 시스템 등의 상태를 이산적인(이진법을 이용한) 숫자 또는 문자 등의 신호로 표현하는 일’을 뜻한다. 식물 육종에서의 디지털이라는 용어는 확실하게 정립이 되어 있지는 않은 개념이며 이를 연구하는 학자들에게는 오히려 더 모호한 개념일 수 있다. 따라서 필자는 표준화된 대량의 정보를 얼마나 사용하느냐에 따라 디지털 육종 기술의 단계를 자동차공학에 적용되는 자율주행기술 단계별 분류와 같이 나누어서 정리를 하고자 한다 (표 1 참조).

디지털 육종이라는 용어는 한가지 기술로 정의될 수 없기 때문에 기술 수준과 육종가의 개입 정도에 따라 총 6단계로 분류가 가능하다. 먼저 전통육종법은 육종가가 전 과정에 개입을 해야하며 표현형의 평가를 육종가에게 전적으로 의존하기 때문에 디지털 육종과는 명확히 구분이 가능하다. 다만 필자는 최근 활발한 연구가 진행되고 있는 빅데이터 기반의 예측육종법만이 아닌 분자육종도 낮은 수준의 디지털 육종으로 분류를 하고자 한다. 이는 최근에 발전한 대용량 염기서열 분석법에 따른 빅데이터를 활용한 분자표지의 대량 생산 및 개발이 가능하기 때문이다. 높은 수준의 디지털 육종으로는 유전체기반선발법(genomic selection)을 활용한 예측육종 부분이다. 예측육종에는 육종가의 개입은 있지만 표현형의 판단과 예측 부분이 통계모델에 기반한 기계학습에 의하여 수행되는 경우(단계 3, 조건부 자동화)가 그 시작점이라고 할 수 있으며 현재 식물 육종의 기술 수준은 단계 3의 도입 시기라고 정의할 수 있다. 현

[표 1] 디지털 육종의 단계별 기술 정의 및 자율주행 기술 단계별 분류와의 비교

단계	기술정의	육종통계모델	육종법	자율주행 기술정의 (SAE, 미국자동차공학회, 2016)
0	디지털기술 적용 없음	없음	전통육종	운전자 항시운행
				비자동화
1	분자표지 개발을 위한 분자수준의 데이터 이용	QTL (composite interval model)	분자육종	시스템이 차간거리 조향등 보조
				육종가(운전자) 적극 개입
2	분자표지 개발을 위한 빅데이터 이용	GWAS (GLM, MLM, FarmCPU, etc.)	분자육종	특정 조건에서 시스템이 보조 주행
				부분 자동화
3	양적형질에 대한 유전체기반 육종가 예측	GS (BLUP, LASSO, Bayesian, Machine learning, etc.)	예측육종	특정 조건에서 자율주행, 위험시 운전자 개입
				조건부 자동화
4	환경요소를 고려한 표현형의 예측	Phenotype prediction (ML, DL)	예측육종	운전자 개입 불필요
				고도 자동화
5	인공지능을 활용한 식물 육종의 완전 자동화	Automated breeding design of all processes (DL)	인공지능육종	운전자 불필요
				완전 자동화

재의 단계 3 기술이 성숙기로 발전하기 위해서는 목표 형질에 맞는 다양한 학습집단의 구축과 통계 모델의 개선 등이 선행이 되어야 할 것이다. 3단계 기술이 정착이 된다면 식물의 형질을 결정하는 중요한 인자인 환경요소를 고려한 디지털 육종이 기계학습과 딥러닝 기법으로 연구가 되어야 할 것이다(단계 4, 고도 자동화). 결국 이 모든 과정은 식물의 생육에 필요한 조건들과 유전력에 기초한 모든 자료들이 목록화 되고 육종가의 개입이 없이 완전자동화가 되는 5단계로 진화가 되어 모든 기술이 완성단계에 이르게 될 것이다.

### 디지털화된 식물 육종이 종자산업에 미치는 효과

이전 섹션에서 서술했듯이 현재 디지털 육종은 3단계(조건부 자동화) 기술 수준은 도입단계에 있다. 따라서 높은 수준의 디지털 육종법으로 만들어진 품종은 아직 없는 것으로 확인되지만 일부 글로벌 기업에서는 실제 품종의 개발까지 완료된 경우가 있는 것으로 판단이 된다. 그러나 아직 종자시장에 출시된 경우는 없는 것으로 조사가 되고 있지만, 만약 높은 수준의 디지털 육종이 상업화되고 주도적으로 시장을 이끌어 갈 경우에는 정의된 집단이 필요하게 되며 기존의 분자육종보다 더 다양한 유전자원의 확보가 유전집단과 육종집단으로 활용되어 그 성패를 결정할 것이기 때문에 국가 주도의 연구개발이 선행되어야 일반 기업의 기술 수준을 같이 상승시킬 수 있는 낙수효과가 나타날 것으로 생각이 된다. 글로벌 기업의 경우는

충분한 유전자원과 연구인력을 보유하고 있지만 현재 국내 종자산업은 매우 미미한 수준이며 식량작물의 경우 정부 중심의 육종 연구가 수행이 되고 있기 때문에 국내시장은 전무한 수준에 가깝다. 하지만 디지털 육종의 도입과 적용을 통하여 국내 종자산업 생태계가 바뀌는 순간을 맞이할 가능성은 현재 기술을 어떻게 연구하고 발전시킬지의 장기적인 계획을 수립하여 체계적으로 이행하는 것을 통해서 가능할 것으로 판단된다. 특히 예측육종법의 기술을 농업 생산 전반에 적용하여 농업 생산, 유통 및 판매에 이르는 디지털 벨류체인의 구축도 가능해 지기 때문에 종자산업 뿐만 아니라 전체 농업 시장에 미치는 영향도 매우 클 것으로 생각된다.

‘Seeds Market-Global Forecast to 2025’ 보고서는 세계 종자시장 규모가 현재 약 600억 달러 수준에서 2025년에는 860억 달러로 확대될 것으로 전망하고 있다. 생물학과 정보학의 융복합 기술을 활용한 첨단 디지털 육종 기술은 기존 육종 기술의 한계를 극복하고 글로벌 종자 산업의 혁신과 미래형 산업으로 발전될 것이다. 그러나 융복합 기술을 활용하는 예측육종 기술은 아직 산업에 적용되기는 부족한 부분이 많은 것이 사실이다. 국제 경쟁력을 갖춘 K-종자산업의 발전을 위해서는 장기적인 안목의 육종 연구 프로그램이 필요한 시점이지만 국내 종자관련 국가 과제는 그 규모가 축소되거나 폐지되고 있는 것이 현실이다. 디지털 육종의 산업화를 위해서는 종자산업의 특성을 고려한 장기적인 계획과 함께 단계별로 목표를 달성할 수 있는 국가주도의 사업이 필요하며 이와 함께 민간기업의 생태계를 늘리기 위한 다양한 시도가 요구된다.

< 참고자료 >

1. Kyung Do Kim, Yuna Kang, Changsoo Kim. 2020. Application of Genomic Big Data in Plant Breeding: Past, Present, and Future. Plants. 9:1454
2. Donghyun Jeon, Yuna Kang, Solji Lee, Sehyun Choi, Yeonjun Sung, Tae-Ho Lee, Changsoo Kim. Digitalizing breeding in plants: A new trend of next-generation breeding based on genomic prediction. Frontiers in Plant Science. Under Review.

Writer

김창수 충남대학교, 교수

Reviewer

김재윤 공주대학교, 교수

BIO ECONOMY BRIEF

발행 : 2022년 11월 | 발행인 : 오기환 | 발행처 : 한국바이오협회 한국바이오경제연구센터  
13488 경기도 성남시 분당구 대왕판교로 700 (삼평동, 코리아바이오파크) C동 1층, www.koreabio.org  
\* 관련 문의 : 한국바이오협회 한국바이오경제연구센터 e-mail : kberc@koreabio.org



한국바이오경제연구센터  
KOREA BIO-ECONOMY RESEARCH CENTER

Innovating Data Into Strategy & Business



9 772508 681005 72  
ISSN 2508-6812