

## 기후변화에 대응한 농업생명공학의 기회와 도전

장안철 · 최지영 · 이신우 · 김동현 · 배신철

### Agricultural biotechnology: Opportunities and challenges associated with climate change

Ancheol Chang · Ji-Young Choi · Shin-Woo Lee · Dong-Hern Kim · Shin-Chul Bae

Received: 11 May 2011 / Accepted: 25 May 2011  
© Korean Society for Plant Biotechnology

**Abstract** Considering that the world population is expected to total 9 billion by 2050, it will clearly be necessary to sustain and even accelerate the rate of improvement in crop productivity. In the 21st century, we now face another, perhaps more devastating, environmental threat, namely climate change, which could cause irreversible damage to agricultural ecosystem and loss of production potential. Enhancing intrinsic yield, plant abiotic stress tolerance, and pest and pathogen resistance through agricultural biotechnology will be a critical part of feeding, clothing, and providing energy for the human population, and overcoming climate change. Development and commercialization of genetically engineered crops have significantly contributed to increase of crop yield and farmer's income, decrease of environmental impact associated with herbicide and insecticide, and to reduction of greenhouse gas emissions from this cropping area. Advances in plant genomics, proteomics and system biology have offered an unprecedented opportunities to identify genes, pathways and networks that control agricultural important traits. Because such advances will provide further details and complete understanding of interaction of plant systems and environmental variables, biotechnology is likely to be the most prominent part of the

next generation of successful agricultural industry. In this article, we review the prospects for modification of agricultural target traits by genetic engineering, including enhancement of photosynthesis, abiotic stress tolerance, and pest and pathogen resistance associated with such opportunities and challenges under climate change.

**Keywords** agriculture, crop, biotechnology, climate change, photosynthesis, environmental stress, tolerance, resistance

#### 서론

벼씨 한 알을 심으면 벼 1,500~3,000알이 생긴다. 벼를 심고 수확하기까지 걸리는 약 135일 만에 무려 3,000배가 늘어난다. 인류는 이 같은 씨앗의 왕성한 작물의 생산력에 의존해 삶을 지속할 수 있었다. 농업은 일찍이 선진국의 사회 경제적 성장의 근간이었다. 세계적으로 노동력의 절반이 아직 농업에 종사하고 있고 세계경제에서 농업이 차지하는 비중은 25%에 이른다 (Fisher et al. 2002). 하지만 지금의 68억 세계인구가 2026년에는 80억, 2050년에는 90억 명으로 증가할 것으로 전망되는 가운데 이미 약 8억 명의 인구가 식량부족으로 고통 받고 있다 (Fisher et al. 2002).

여기에 더해 금세기에 들어 인류는 식량 생산에 커다란 피해를 주고 있으며, 앞으로도 농업의 잠재적 생산력에 큰 영향을 미칠 환경위협, 즉 기후변화에 직면하고 있다. 1998년 기상악화로 인한 개발도상국의 경제적 손실은 약 420억불로 추정되었다 (Fischer et al. 2002). 지난 250년 동안 대기 중 이산화탄소는 280 ppm에서 381 ppm으로 증가했다 (IPCC 2007). 이러한 증가양상은 지난 65만년

A. C. Chang · J.-Y. Choi · D.-H. Kim · S.-C. Bae (✉)  
농촌진흥청 국립농업과학원, 경기도 수원시 권선구 수인로 150  
(National Academy of Agricultural Science & Technology, Rural  
Development Administration, Suwon, Korea, 441-707)  
e-mail: scbae@korea.kr

S.-W. Lee  
경남과학기술대학교 생명자원과학대학, 경남 진주시 칠암동 150  
(College of Life Sciences & Natural Resources, Gyeongnam  
National University of Science & Technology, Jinju, Korea,  
660-758)

동안의 증가수치를 훨씬 뛰어넘었다. 대기 중 이산화탄소 농도는 2050년에는 550 ppm까지 증가할 것으로 전망되었다 (IPCC 2007). 지난 1800년대 이후 대기 중 이산화탄소와 기타 온실가스 농도의 증가로 지구 지표면 온도는 평균 0.76°C 상승했으며 이런 상황이 지속될 경우 2050년까지는 1.3°C ~ 1.8°C의 지구 지표면 온도상승이 전망된다 (IPCC 2007). 이와 같은 지구온난화는 일반적으로 증발량을 증가시켜 강수량을 증가시키는데 강수량의 지역별, 시기별 변이도 더욱 커질 것으로 예상된다. 따라서 가뭄과 홍수 등에 대한 위험도 더욱 커질 전망이다 (IPCC 2007).

지구환경 변화가 전 세계 식량생산에 중요한 영향을 미칠 것으로 예상되므로 기후변화에 대응한 농업연구개발이 더욱 절실하다. 가장 중요한 것은 바로 지구 환경에 대한 부담을 최소화함과 동시에 불리한 기상상황에 잘 적응할 수 있는 안정적 식량생산 시스템을 구축하는 것이다. 이를 위해서는 작물 내 물질의 전류와 저장에 대한 이해, 병해충 피해, 물 등 자연자원의 효율적 사용, 고온과 고농도의 이산화탄소 등 환경스트레스에 대한 작물반응, 온실가스 효과 감축, 해수면상승과 염분 유입에 따른 내염성, 생물다양성 보존 등에 대한 연구개발을 통해 인류에게 필요한 식량을 충분히 지속적이고 안정적으로 생산해야만 할 것이다. 단적인 예로 병해충 피해와 잡초와 결합으로 인한 작물생산 손실은 약 42%에 이르고 (Fischer et al. 2002), 기존 육종을 통한 작물 품종의 생물적, 물리적 생산성은 거의 한계에 도달했다. 그 어느 때보다 어려운 상황에서 작물 생산량 증대라는 중대 과제를 해결하는데 있어서 농업생명공학기술이야말로 중추적 역할을 해야 할 것이다. 따라서 본 보고에서는 불리한 기후변화여건을 극복하고 인류생존에 필요한 식량의 생산성 향상을 중심으로 농업생명공학분야의 주요 연구개발 내용과 앞으로 맞이하게 될 기회와 도전과제에 대해 논하고자 한다.

## CO<sub>2</sub> 증가에 대응한 작물 개발

CO<sub>2</sub> 증가는 일차적으로 C<sub>3</sub>식물과 C<sub>4</sub>식물의 기공 전도력을 감소시키고, C<sub>3</sub>식물에서는 광합성을 촉진해 생산성을 향상시킨다 (Drake et al. 1997). 이러한 이점을 최대한 활용하기 위한 방법으로 종래 핵심 탄소동화 효소이자 광합성 제한인자로 작용해온 Rubisco의 이산화탄소에 대한 친화력을 높임으로서 광 호흡에 의한 탄소손실을 회피하려는 연구가 진행되었다 (Reynolds and Borlaug 2006). 하지만 Rubisco의 CO<sub>2</sub>에 대한 친화력과 촉매율 사이의 부의 상관관계가 장애요인으로 작용해왔고 현재 C<sub>3</sub>식물 대부분의 rubisco는 적응을 거쳐 CO<sub>2</sub>에 대한 친화력을 200

ppm 정도로 진화해 온 것으로 알려졌다. 따라서 CO<sub>2</sub> 농도가 더 높을 것으로 전망되는 2050년경의 적절한 rubisco는 CO<sub>2</sub>에 대한 친화력이 낮고 촉매율이 높아야 할 것이다. C<sub>3</sub>식물의 Rubisco와는 달리 CO<sub>2</sub>에 대한 낮은 친화력과 높은 촉매율을 가진 해조류의 Rubisco로 C<sub>3</sub>식물의 Rubisco를 대체하는 방안도 연구되고 있다 (Zhu et al. 2004). 그러므로 생명공학을 이용해 Rubisco의 촉매성질을 향상시키는 것도 실용적인 목표가 될 수 있을 것이다. 한편으로는 CO<sub>2</sub> 증가에 대응해 Rubisco의 양을 줄이는 대신 CO<sub>2</sub> 수용체인 ribulose-1,5-biphosphate(RuBP)의 재생능력을 향상시켜 증가된 동화량과 조화를 이루게 할 수도 있을 것이다.

CO<sub>2</sub> 증가에 반응해 식물 앞에서 탄소동화물의 축적이 증가하는 것에 대해서는 잘 알려져 있다 (Long et al. 2004). 그러나 식물체내에서 탄소동화물이 어떻게 감지되고, 다른 경로를 통해 탄소의 흐름을 조절하고, 생장과 물질의 분배에 영향을 미치는지에 대해서는 명확히 밝혀져야만 증가된 CO<sub>2</sub>를 최대한 활용할 수 있는 작물개발이 가능할 것이다. 최근 한 연구에 의하면 현재 CO<sub>2</sub> 농도에서 옥수수, 밀, 콩 등의 생산성은 광합성 능력보다는 탄소 동화산물의 저장능력에 의한 제한이 더 큰 것으로 밝혀졌다 (Borras et al. 2004). 이와는 반대로 증가된 CO<sub>2</sub> 농도하에서는 광합성량의 증가에 따라 수량도 증가했다 (Long et al. 2006). 이와 같이 서로 상반된 연구 결과로 볼 때 작물 생산량을 극대화하기 위해서는 광합성량을 증가시키면 여기에 비례해 저장능력도 함께 증가시킬 수 있도록 해야 할 것이다.

작물의 수량구성요소 측면에서 보면, 지금까지의 유전적 형질 개량을 통해 수많은 작물의 생산량을 증가시켜왔는데 이러한 생산량 증가는 수확지수와 밀접한 관련이 있었으나 수확지수 개선을 통한 생산량 증대는 한계에 달한 것으로 보인다 (Austin 1999). 하지만 수확지수와 상관없이 단위면적당 지상부 총 바이오매스 증가는 궁극적으로 작물 생산량을 증가시키는 주요 요인임이 밝혀졌다. 증가된 CO<sub>2</sub>하에서 재배된 콩은 15%, 벼는 13%씩 수량이 각각 증가했으나 수확지수는 관행재배 대비 모두 매우 낮았다 (Kim et al. 2003; Morgan et al. 2005). 증가된 CO<sub>2</sub>에서 재배된 벼의 경우 유효경수와 등숙율이 낮음에도 불구하고 단위면적당 경수와 수당 입수가 증가해 수량을 증대시켰다. 그러나 CO<sub>2</sub> 증가는 작물의 종자 크기나 무게에는 크게 영향을 미치지 않았다 (Morrison et al. 2000). 그러므로 종자의 크기나 무게를 향상시키기 위한 연구보다는 총 바이오매스 증가와 저장능력 향상을 통한 생산성 증대를 꾀하는 것이 더 효과적일 수 있을 것이다.

몬산토, 신젠타, 파이오니어-듀폰과 같은 다국적 거대기업은 질소의 이용 효율향상을 위해 많은 투자를 하고 있다. CO<sub>2</sub>의 증가는 작물의 질소이용 효율을 증가시키는 것으로 알려져 있지만 (Drake et al. 1997), CO<sub>2</sub> 이용을 극

대화하고 총 바이오매스를 증가시키기 위해서는 질소 이용 효율 증진도 필수적일 것이다. C<sub>3</sub>작물은 잎에 있는 질소의 25%가량을 Rubisco의 낮은 촉매율을 보완하기 위해 소모한다 (Long et al. 2004). CO<sub>2</sub> 상승조건하에서 Rubisco 함량을 25% 줄일 수 있다면 여기에 소모되는 질소 6%는 식물생장이나 저장에 활용될 수도 있을 것이다. 최근 연구 결과에 의하면 CO<sub>2</sub> 증가 조건에서 작물을 재배했을 때 수량은 증가했음에도 불구하고 곡물 낱알의 단백질 함량이 10~15% 감소해 작물이 흡수하는 질소량이 부족하다는 것을 밝혀냈다 (Taub et al. 2008). 하지만 두과작물의 경우는 종실 단백질 감소가 1.4%에 그쳤는데 그 이유는 뿌리 공생균을 통해 대기 중 질소 고정으로 질소 부족분을 보충할 수 있었던 것으로 밝혔다. 두과작물의 질소 고정능력을 다른 작물에 도입하는 것은 작물의 질소흡수를 향상시켜 탄소증가에 따른 질소를 보충해 생산량을 극대화하는 동시에 화학비료 사용량 절감으로 환경부담도 줄일 수 있는 농업생명공학의 이상적인 목표중 하나가 될 것이다.

### 환경스트레스 내성 증진

작물 생산량의 효율적 향상을 위해서는 위와 같이 CO<sub>2</sub> 증가를 최대한 활용하는 위와 같은 전략이 필요하지만 전 지구적 기후변화여건 하에서는 시간적, 공간적 기후변이가 확대되고, 따라서 작물 생산 환경의 변화와 환경스트레스도 더욱 가중 될 것으로 전망되므로 작물의 환경스트레스에 대한 내성을 향상시키는 연구개발 또한 차세대 생명공학의 전략 또한 분명히 필요하다.

그 동안 작물 형질전환을 통해 제초제 저항성, 바이러스나 곰팡이 병 저항성, 영양성분 강화 작물 등의 개발에 있어 상당한 산업적 성공을 거둔 반면, 가뭄이나 염해 등과 같은 각종 환경스트레스에 대한 내성을 지닌 형질전환작물 개발 성과는 상대적으로 미흡한 실정이다. 그 이유는 환경스트레스를 지배하는 유전적 메커니즘이 단일 유전자에 의해 지배되는 형질보다 훨씬 복잡하고 다양하기 때문이다. 식물 형질전환을 통해 환경스트레스에 대한 저항성 향상을 위해 사용한 유전자를 보면 크게 구조 유전자와 조절유전자로 구분된다 (Grover et al. 2003). 구조유전자는 환경저항성과 관련된 생화학 반응이나 경로에 관련된 효소를 합성하는 유전자 들이다. 한편 조절 유전자는 구조유전자보다 상위에서 구조유전자의 발현을 제어하는 전사인자, 신호 유도나 신호수용에 관련된 단백질 등을 합성하는 유전자 들이다.

전사인자의 경우 애기장대나 담배에서 ABA 유도 단백질 유전자 (*abi3*), Zn finger 단백질 유전자 (*alfin1*), heat shock 전사인자 (*at-hsf1*), CRT/DRE 결합인자 (*cbf1*, *cbf3*) 등을 과

발현 시킴으로서 저온, 염분, 고온, 동해, 가뭄 등에 대한 내성이 향상되는 것을 확인하였으나 어떤 경우에는 부작용으로 식물체 왜소화 현상을 나타내었다 (Grover et al. 2003). 전사인자를 활용한 환경스트레스 내성 증진에 대해서는 아래에서 좀더 자세히 살펴보기로 한다. 신호 유도 및 전달과 관련해서는 칼슘 결합 단백질 유전자 (*cnb1*)와 세포순환 조절 단백질 유전자 (*at-dbf2*), 애기장대 *atght1*, Ca-dependent protein kinase 유전자 (*oscdpk7*) 등의 protein kinase 관련 유전자를 과발현 시켜 열, 염분, 저온, 삼투압, 가뭄 등에 대한 내성이 향상된 것을 확인하였다. 식물체 세포 해독과 관련해서는 주로 애기장대나 대장균으로부터 분리한 생합성 반응 및 경로와 관련된 유전자를 담배 등에서 과발현 시킴으로서 산화 스트레스, 저온, 동해 등에 대한 내성이 증진되는 것을 확인하였다. 한편 지방산 대사와 관련된 유전자를 활용한 연구에서도 고온, 저온, 염분, 가뭄 등에 대한 내성 증진을 확인하였다 (Grover et al. 2003).

환경스트레스 내성 증진을 위한 여러 종류의 단일 유전자 조절 연구결과와 환경스트레스에 반응은 다중 유전자가 복합적으로 다양한 경로를 통해 조절한다는 점을 고려할 때 궁극적으로는 식물시스템 전체를 기반으로 한 접근이 있어야만 생명공학의 성공적 적용이 가능하다는 것이다. 즉 목표 유전자를 발견하기 위해서는 시간적, 공간적 특이성을 통합한 전체 게놈의 발현 프로파일을 대상으로 하고, 목표 유전자의 선발은 신호전달과 유전자 간 네트워크에 대한 이해를 바탕으로 해야 할 것이다. 선발된 유전자를 활용해 형질전환체를 육성하고 포장에서 농업적 중요 형질과 함께 마이크로 어레이를 통한 전사체 분석을 통해 조기에 목표로 하는 형질전환체를 획득할 수 있을 것이다.

작물의 환경스트레스 내성 증진을 효율적으로 달성하기 위한 앞으로 도전과제는 다음과 같다. 첫째, 목표 유전자의 프로모터로는 *CaMV35S*, *ubiquitin1* 혹은 *actin1*과 같은 상시 발현 프로모터를 사용했는데 도입유전자와 그 아래 관련 경로가 모든 기관에서 전 생육시기에 걸쳐 과발현 되므로 인해 세포내 에너지 대사에 부담을 주고, 또 여기에 따른 부정적 영향으로 성장과 생리적 불균형을 초래할 수 있다는 것이다 (Kasuga et al. 1999). 따라서 특정 스트레스에 의해 유도되는 프로모터의 개발과 활용방법에 대한 연구가 필요할 것이다. 둘째, 지금까지 대부분 유전자 형질전환은 도입유전자 단백질이 기주식물 세포질에서 발현되도록 해왔다. 하지만 세포내 소기관 즉, 엽록체, 소포체, 액포, 미토콘드리아 등과 같은 세포기관에서 목표형질을 발현시킬 수 있는 발현 벡터의 개발이 필요하다. 셋째, 단일유전자가 아닌 복수의 복합 유전자를 형질전환하고 발현시킬 수 있는 벡터와 여기에 필요한, 프로모터, 선발 마커 등의 개발도 필요하다. 넷째, 형질전

환 대상 식물이 주로 애기장대와 담배에 치중되었지만 앞으로는 실용적인 작물에 해당 유전자를 도입할 수 있는 형질전환 기술 개발이 필요하다. 다섯째, 형질전환 대상 작물의 품종 선별에도 주의를 기울여야 하며 형질전환체 개발 후 고정 계통 육성, 발현변이 분석, 수량을 포함한 중요 농업적 형질 평가 등 실제 포장시험을 통해 유전학 및 육종가와 협력으로 광범위한 평가가 효과적으로 이루어 질 수 있도록 해야 할 것이다.

## 해충과 병 저항성

지금까지 기후변화가 농업생산성에 대해 미칠 영향에 대한 평가는 많이 있었지만, 실제 작물과 끊임없이 상호작용을 하며 농업생산성에 주요 영향을 미치는 해충과 병원균과 같은 요소는 기후변화에 대한 평가대상에서 그다지 많은 주목을 받지 못했고 관련 연구도 매우 미흡한 실정이다. 하지만, 작물생산시스템에서 해충과 병에 대한 고찰과 이해는 기후변화 여건 하에서 식량안보를 강화하는데 있어 반드시 필요하다. 해충과 관련된 몇몇 연구사례의 경우를 보면 온도와 CO<sub>2</sub>가 상승된 조건하에서 곡물 진디 (*Rhopalosiphum padi*)는 개체군 밀도 최성기가 10% 앞당겨지고, 날개가 달린 진디 개체수도 10% 증가해 이 진디가 매개하는 보리 황화 왜화 바이러스의 확산과 발병률이 현저히 증가했다 (Newman 2004). 농업생태계 특징 중 한 가지는 초식 곤충이 먹는 작물이 일반적으로 해충저항성을 가지도록 선발되어왔기 때문에 해충피해를 감소시킬 수 있는 특정 형질을 가지고 있다는 것이다 (Russell 1978). 이렇게 선발되어온 작물은 해충에 길항적으로 작용하는 특정 합성물을 생성하는 형질을 가지고 있는 것으로 알려졌는데, 기후변화는 이러한 작물의 해충저항성에도 변화를 일으킬 수도 있다. CO<sub>2</sub> 상승조건에서 재배된 콩에서 초시류 특이 억제물질인 cysteine proteinase 생성 유전자의 발현이 억제되었다 (Zavala et al. 2008). 그 결과 콩 수량에 큰 영향을 미치는 옥수수 뿌리벌레 (*Diabrotica virgifera virgifera*)와 알풍뎅이 (*Popilla japonica*)에 대한 작물의 감수성이 증가했다. 기후변화로 인해진 간접저항성이 변화된 사례도 밝혀졌다. CO<sub>2</sub> 상승조건에서 재배된 양배추 (*Brassica oleracea*)의 경우 배추좀나방 (*Plutella xylostella*)의 천적 (*Costesia plutellae*)을 유인하는 휘발성 방어물질 생성을 변화시켜 천적의 효력을 떨어트렸다 (Vourinen et al. 2004). 또한 CO<sub>2</sub>와 온도 상승 조건은 작물과 해충 간 상호작용에 약리적 효과를 가지는 식물의 2차대사 물질 생성에도 영향을 미칠 수 있다. CO<sub>2</sub> 상승은 담배에서는 nicotine을, 독말풀에서는 scopolamine 농도를 증가시켰다 (Ziska et al. 2008).

CO<sub>2</sub> 상승은 직접적으로 식물생장에 영향을 주기도 하

지만 간접적으로는 식물의 유도저항성 발현을 감소시키기도 한다 (Pangga et al. 2004). 또한 오존과 CO<sub>2</sub> 상승은 직접적으로 병 저항성 유전자 발현에도 영향을 준다 (Plessl et al. 2005). CO<sub>2</sub> 상승과 병원균에 긍정적 혹은 부정적으로 작용할 수 있지만 대부분의 연구결과에서는 병 발생이 증가하는 것으로 알려 졌다 (Chakraborty et al. 2000). 기존의 작물 병 저항성 유전자는 온도나 가뭄스트레스에 의해 기주와 병원균간 상호작용에 있어 차별적 반응을 보여 저항성을 잃는 보고도 있었다 (Jones 2003; Newton and Young 1996). 따라서 현재의 작물 병 저항성 유전자는 새로운 유형이나 종의 병원균 출현에 의해서뿐만 아니라 기후변화와 같은 불리한 환경조건에서도 그 효력을 잃을 수도 있을 것이다. 특히 병원균은 불리한 환경조건을 극복하거나 스트레스 환경에서도 생존할 수 있는 여러 가지 탁월한 능력을 지니고 있다. 대표적인 예로는 retrotransposon에 의한 변이체 생성 (Anaya and Roncero 1996), adaptive mutation and amplification (Hastings et al. 2000), alternative intron processing (Costanzo et al. 2007) 등이 있다. 기후변화는 병원균의 생식력을 증가시키고 진화를 가속화해 새로운 병이 돌발적으로 발생하고 다른 곳으로 전염될 경우 방대한 감염 면적에 대한 즉각적인 방제가 매우 어렵다는 점을 고려할 때 세계 식량안보에도 치명적인 영향을 줄 것으로 예상된다. 따라서 기후변화, 작물 생산성, 해충, 병원균간의 상호작용에 대한 전체적 이해를 바탕으로 지속가능한 병해충 저항성 작물개발 또한 생명공학이 도전하고 해결해야할 과제임이 분명하다.

## Transcription Factors (TFs)의 기회와 도전

최근 벼와 애기장대의 유전체 완전 해독을 포함한 식물 유전체와 시스템 생물학의 눈부신 발전으로 인해 중요한 형질을 조절하는 네트워크와 전사인자와 같은 조절유전자를 밝혀내기에는 전례 없이 좋은 기회를 맞이하고 있다. 전사인자는 자연상태에서 세포생명활동의 주된 조절인자로 작용하기 때문에 작물의 복잡한 형질을 재조합하기 위해 생명공학의 가장 좋은 목표 유전자로 기대되고 있다. 이와 같은 전사인자의 효과적 이용 성공사례는 과거의 순화와 재래 육종을 통해서도 이루어진 사례가 있다. 옥수수에서 *teosinte branched1* (*tb1*)은 세포증식 조절에 관련된 *TCP* family 전사인자군의 하나로 밝혀졌는데 (Cubas et al. 1999), *tb1*의 발현은 측지 생장을 억제시켜 옥수수 식물형태를 변화시킴으로써 생산량을 크게 증가시킬 수 있었다 (Doebley et al. 1997). 벼에서는 수수의 탈립을 조절하는 두개의 전사인자 (*qSH1*, *shattering4*(*sh4*))가 관여되어 있고 낱알 탈립을 억제함으로써 수확량을 크게 증가시킬 수 있었다 (Konishi et al. 2006). 획기적인 수량

증대를 통해 세계에 녹색혁명을 가져다준 가장 대표적인 예로는 반 왜성형 (semidwarf) 밀 품종 육성을 들 수 있다. 반 왜성형 밀 품종은 전사인자의 변화로 지베렐린에 비정상적으로 반응해 질소비료 공급에도 불구하고 작은 키를 유지해 바람이나 강우에도 도복이 되지 않아 수량증대에 획기적으로 기여했다 (Silverstone and Sun 2000).

이러한 전사인자 조절을 통한 생명공학기술은 앞으로 작물의 본질적 생산력 증가는 물론 기후변화에 대응해 작물의 안정적 생산에도 광범위하게 활용될 수 있을 것이다. 작물의 본질적 생산력은 광합성 능력 향상, 작물 형태 변화, 작물 생장을 증가 등을 통해 향상될 수 있을 것이다. 광합성 증대와 관련해서는 *NF-Y* (nuclear factor-Y) family 전사인자가 엽록체 발달을 조절하는 것이 밝혀져 (Miyoshi et al. 2003) 광합성 조절가능성을 보여 주었다. 또한 *WRKY*, *AP2/EREBP*, *MYB* family 등의 전사인자는 잎의 노화와 관련된 것이 밝혀졌는데 (Eulgem et al. 2000; Chen et al. 2002), 잎의 노화를 지연시켜 잎의 광합성 기간을 연장시킴으로써 광합성을 증대시키는 것도 가능할 것이다. 앞서 밀과 옥수수의 사례와 유사하게 식물 분화와 관련된 전사인자 조절을 통해 작물 초형을 변형함으로써 잎의 수광 능력을 극대화해 아래 부위 잎이 빛에 대한 경합을 최소화해 광합성량을 증대시킬 수도 있을 것이다. 최근 식물 형태분화와 관련된 유전자와 몇몇 핵심 전사인자가 밝혀졌다 (Wang and Li 2006). 한편 식물의 세포 순환을 조절하는 전사인자를 이용해서 생장을 증가 시킴으로써 바이오매스와 수량증대를 가져 올 수도 있을 것이다. 애기장대에서 *CDC6* 단백질 과발현을 통해 *E2F* 전사인자의 발현양상을 변화시킴으로써 세포분열과 세포크기를 증가 시켰다 (Beemster et al. 2005).

한편 작물의 생산량 측면에서는 각종 환경스트레스에 대한 내성, 병 저항성, 양분 이용 효율성 증진 등을 통해 불리한 성장조건 하에서도 안정적으로 확보될 수 있을 것이다. 가뭄, 염분, 열, 추위 등 각종 환경스트레스로 인한 곡물생산량 피해는 전 세계적으로 엄청난 양에 이르고 있다. 특히 수자원의 부족과 토양 염분피해가 더욱 확산일로에 있어 환경스트레스에 대한 내성 증진이 절실하다. 하지만 식물의 환경스트레스에 대한 반응은 매우 복잡한 다중 경로를 포함하고 있어 현재까지 도전해야 할 과제로 남아있다. 아직까지 상업화 가능성 여부는 불투명하지만 현재까지 가뭄 저항성 증진을 위해 가장 많은 연구가 진행된 전사인자중 하나는 dehydration-responsive element-binding protein (*DREB1*)으로 알려진 C-repeat binding factor (*CBF*) 유전자이다. 이 유전자를 밀, 토마토, 담배, 딸기, 벼, 유채, 감자 등에서 과발현 시켰을 때 모두 가뭄에 대한 저항성을 나타내어 (Umezawa et al. 2006) 환경스트레스에 대한 전사인자 활용 가능성을 보여 주었다. 또한 알팔파에서 유래한 *AP2/EREBP* 전사인자중 하나인 *WXP1*

유전자 과발현 알팔파 형질전환체에서는 큐티클 층의 왁스를 증가시켜 식물의 수분 보유력을 향상시켜 가뭄에 대한 내성을 향상시키는 것으로 밝혀져 (Zhang et al. 2005) 이와 같이 잎의 생화학적 특성을 변화시키는 것도 환경스트레스 내성 증진을 위한 방안이 될 수 있음을 보여 주었다.

병 저항성과 관련해서는 단일 유전자의 형질전환을 통해 상당한 저항성을 획득할 수 있었지만 궁극의 목표는 작물이 비유연관계의 다중 병원균에 대한 광범위한 스펙트럼의 병 저항성을 가지도록 하는 것이다. *AP2/EREBP* family의 *ERF* subfamily 유전자가 식물 병 반응에 관련되어 있다는 것이 밝혀지면서 그 이후 많은 연구가 진행된 결과 이 전사인자가 비유연관계에 있는 다중 병원균에 대한 저항성을 증진시키는 것이 밝혀져 (Gutterson and Reuber, 2004) 산업화가능성을 보여 주었다. 한편 생물적 스트레스에 반응하는 것으로 알려진 *ERF* 전사인자는 무생물적 스트레스에도 반응하는 것이 알려지면서 (Fujimoto et al. 2000) 단일 전사인자가 생물적, 무생물적 스트레스 양쪽 모두에 반응해 내성을 증진시킬 수 있는 잠재적 가능성도 보여주었다. 이와 같은 연구 결과로 미루어 보면 전사인자 조절을 통해 병원균에 비특이적으로 반응해 작물을 보호할 수 있는 광범위한 스펙트럼의 병 저항성을 가진 작물개발도 가능할 것이다.

질소는 식물 양분에서 제한인자로 작용하는 중요한 영양분중의 하나로 수량 증대를 위해 매년 많은 양이 투입되고 있다. 애기장대의 *MADS* family 전사인자인 *ANRI*은 질산에 유도반응을 보여 질소 반응경로를 조절하는데 유용한 전사인자로 알려 졌다 (Zhang and Forde, 1998). 또한 옥수수의 유기산 대사에 관련된 것으로 알려진 전사인자 *dof1*을 낮은 질소 환경조건하에서 애기장대에 과발현 시켰을 때 아미노산 함량과 질소 흡수율 증가는 물론 생장이 향상되는 것을 확인하였다 (Yanagisawa et al. 2004). 막대한 양분 투입에 따른 식량 생산비 증가와 환경에 대한 부정적 영향을 최소화하기 위해 전사인자를 이용한 작물의 양분 이용 효율을 증진시키는 것도 생명공학이 해결해야 할 과제중의 하나일 것이다.

앞서 본바와 같이 식물 전사인자는 새로운 농업생명공학을 주도할 매우 유용한 자원임에 틀림이 없지만 유전체학을 생명공학에 적용하고 이를 통해 농업생명공학 상품을 상업적 성공으로 연결시키기까지는 많은 도전이 도사리고 있다. 먼저 특정 전사인자를 모델 식물에서 밝혀졌을 때 목표로 하는 전사인자의 해당 경로가 해당 작물에 있는냐는 것이다. 지금까지 많은 사례를 통해 애기장대의 전사인자가 다른 종의 식물에서도 같은 작용을 한다는 것이 많이 알려져 있지만 대상작물의 유전적 배경을 비롯해 목표 전사인자가 작용할지 여부에 더 많은 주의가 기울여야 할 것이다. 둘째는 전사인자 활용기술은

앞서 본바와 같이 성장 지연과 같은 부작용을 수반하는 경우 이를 감소시키거나 산업적 가치를 가질 수 있는 바람직한 형질의 수준을 강화하는 등 최적화를 필요로 한다. 이때 최적화 비용과 노력을 최소화하기 위해서는 미리 도입유전자의 발현이 조직 특이적이거나, 발달과정에서 특이적으로 혹은 특정 환경조건하에서 적절히 유도될 수 있도록 적절한 프로모터를 사용하는 방안도 염두에 두어야 한다. 셋째, GMO 상업화를 위한 주요 장애중 하나는 안전성과 관련된 당국의 승인을 얻는 것인 바, 전사 인자를 통해 비록 기존에 존재하는 형질을 강화한 형질 전환작물의 경우 기존 작물에 비해 환경이나 보전에 대한 새로운 위험이 없다는 것을 증명해야 할 것이므로 여기에 대한 사전 대비도 필요 할 것이다.

## 결론

2050년 90억 명에 이를 전 세계인구에게 필요한 식량, 의류, 에너지 등을 공급하기 위해서는 반드시 작물의 생산성 향상이 필요하고 이를 위한 연구개발을 가속화해야 한다. 인류가 지금까지 이룩한 재래 육종기술과 생물다양성을 바탕으로 생명공학을 통해 작물의 본질적 수량, 환경스트레스 내성, 병해충 저항성을 증진시키는 것이야말로 가장 중요하다. 1990년대 후반 유전체연구로 시작된 제 2세대 생명공학 산물 가운데 2010년에는 12개 GM 작물이 29개 국가에서 148백만 ha 재배되는 등 생산 잠재능 증가를 실현하고 생산 안정성 확보에 있어서 이미 많은 역할을 하고 있다 (Clive 2010).

가장 최근에는 유전, 발현, 상호작용 데이터를 기초로 계층상에 존재하는 모든 유전자를 전사체 네트워크나 단백질체 상호작용 네트워크 구성을 통해 주요 생물적 작용을 총체적으로 이해하기 위한 '시스템 생물학'에 대한 연구노력이 활발하다 (Gutierrez et al. 2007; Keurentjes et al. 2007; Ma et al. 2007). 식물 시스템 생물학은 세포 형태와 환경변이를 고려한 분자적 유전관계를 총체적으로 설명할 수 있어야만 하기 때문에 그야말로 엄청난 일이 될 것이다. 하지만 세계 몇몇 기업에서는 초고성능 염기서열 분석능력과 단백질체학의 발전, IT기술의 접목 등을 통해 대규모로 전사인자에 상응하는 각각의 모든 단백질을 구명하려는 연구가 진행 중이며, 민간부문 뿐만 아니라 공공부문과 학계에서도 활발한 연구를 추진 중에 있어 완전한 식물 시스템 생물학 지도가 만들어질 가능성이 한층 더 높아졌다. 식물 시스템 생물학 지도가 점차 완성되면 유전자나 단백질 네트워크 상에서 최적의 조정 기점을 찾아내고, 고유 생산량이나 수량 안정성에 긍정적 이거나 부정적 영향을 주는 공통조절 유전자들을 밝혀낼 수 있을 것이다. 더 나아가서는 시스템 생물학 지도

를 이용해 기후변화에도 잘 적응할 수 있는 새로운 형질을 만들 수도 있을 것이며, 대사공학으로 농산물 영양성분을 향상시켜 제 3세대 GMO를 만들 수도 있을 것이다. 아직 제 2세대 GMO 개발이 한창 진행 중에 있지만 시스템 생물학 지도의 완성은 제 3세대 생명공학의 새로운 장을 열어 줄 것이 분명하다.

## 사사

본 연구는 농촌진흥청 국립농업과학원 농업기초연구사업 (과제번호:PJ907086)의 지원으로 수행되었으며, 연구개발비 지원에 감사드립니다.

## 인용문헌

- Anaya N, Roncero MIG (1996) Stress-induced rearrangement of *Fusarium retrotransposon* sequences. *Mol Genl Genet* 253: 89-94
- Austin RB (1999) Yield of wheat in the United Kingdom: recent advances and prospects. *Crop Sci* 39:1604-1610
- Beemster GT, Mironov V, Inze D (2005) Tuning the cell-cycle engine for improved plant performance. *Curr Opin Biotechnol* 16:142-146
- Borras L, Slafer GA, Otegui ME (2004) Seed dry weight response to source-sink manipulations in wheat, maize and soybean: a quantitative reappraisal. *Field Crops Res* 86:131-146
- Chen W, Provart NJ, Glazebrook J, Katagiri F, Chang HS, Eulgem T, mauch F, Luan S, Zou G, Whitham SA (2002) Expression profile matrix of *Arabidopsis* transcription factor genes suggests their putative functions in response to environmental stresses. *Plant Cell* 14:559-574
- Cubas P, Lauter N, Doebley J, Coen E (1999) The TCP domain: a motif found in proteins regulating plant growth and development. *Plant J* 18:215-222
- Chakraborty S, Tiedermann AV, Teng PS (2000) Climate change: potential impact on plant diseases. *Environ Pollution* 108: 317-326
- Costanzo S, Ospina-Giraldo MD, Deahl KL, Baker CJ, Jones RW (2007) Alternate intron processing of family 5 endoglucanase transcripts from the genus *Phytophthora*. *Curr Genet* 52: 115-123
- Doebley J, Stec A, Hubbard L (1997) The evolution of apical dominance in maize. *Nature* 386:485-488
- Drake BG, Gonzalez-Meler MA, Long SP (1997) More efficient plants: a consequence of rising atmospheric CO<sub>2</sub>? *Annu Rev Plant Physiol Plant Mol Biol* 48:609-639
- Eulgem T, Rushton PJ, Robatzek S, Somssich IE (2000) The WRKY superfamily of plant transcription factors. *Trends Plant Sci* 5:199-206
- Fischer G, Shah M, Velthuisen H (2002) Climate change and

- agricultural vulnerability. IIASA, Vienna, Austria
- Fischer RA (2007) Understanding the physiological basis of yield potential in wheat. *J Agric Sci* 145:99–113
- Fujimoto SY, Ohta M, Usui A, Shinshi H, Ohme-Takagi M (2000) Arabidopsis ethylene-responsive element binding factors act as transcriptional activators or repressors of GCC box-mediated gene expression. *Plant Cell* 12:393–404
- Grover A, Aggarwal PK, Kapoor A, Katiyar-Agawal S, Agarwal M, Chandramouli A (2003) Addressing abiotic stresses in agriculture through transgenic technology. *Curr Sci* 84:355–367
- Gutterson N, Reuber TL (2004) Regulation of disease resistance pathways by AP2/ERF transcription factors. *Curr Opin Plant Biol* 7:465–471
- Gutierrez RA, Lejay LV, Dean A, Chiaromonte F, Shasha DE, Coruzzi GM (2007) Qualitative network models and genome-wide expression data define carbon/nitrogen-responsive molecular machines in Arabidopsis. *Genome Biol* 8:R7
- Hastings PJ, Bull HJ, Klump JR, Rosenberg SM (2000) Adaptive amplification: an inducible chromosomal instability mechanism. *Cell* 103:723–731
- IPCC (2007) Climate change 2007 : the physical science basis. *In* Solomon S, Qin D, Manning M, Chen Z, Marquis M, Averyt KB, Tignor M, Miller HL, eds, Contribution of Working Group I to the Fourth Annual Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp 996
- Clive J (2010) Global status of commercialized biotech/GM crops: 2010. ISAAA Brief No. 42. ISAAA, New York, USA
- Jones ERL (2003) Brown rust of wheat. United Kingdom Cereal Pathogen Virulence Survey 2002 Annual Report 19–31
- Kasuga M, Liu Q, Miura S, Yamaguchi-Shinozaki K, Shinozaki K (1999) Improving plant drought, salt, and freezing tolerance by gene transfer of a single stress-inducible transcription factor. *Nat Biotechnol* 17:287–291
- Keurentjes JJB, Fu J, Terpstra IR, Garcia JM, van den Ackerveken G, Snoek LB, Peeters AJM, Vreugdenhil D, Koornneef M, Jansen RC (2007) Regulatory network construction in Arabidopsis by using genomewide gene expression quantitative trait loci. *Proc Natl Acad Sci USA* 104:1708–1713
- Kim HY, Lieffering M, Kobayashi K, Okada M, Mitchell MW, Gumpertz M (2003) Effects of free-air CO<sub>2</sub> enrichment and nitrogen supply on the yield of temperate paddy rice crops. *Field Crops Res* 83:261–270
- Konishi S, Izaya T, Lin SY, Ebana K, Fukuta Y, Sasaki T, Yano M (2006) An SNP caused loss of seed shattering during rice domestication. *Science* 312:1392–1396
- Long SP, Ainsworth EA, Rogers A, Ort DR (2004) Rising atmospheric carbon dioxide: Plants FACE the future. *Annu Rev Plant Biol* 55:591–628
- Long SP, Ainsworth EA, Leakey ADB, Nösberger J, Ort DR (2006) Food for thought: lower than expected crop yield stimulation with rising CO<sub>2</sub> concentrations. *Science* 312:1918–1921
- Ma S, Gong Q, Bohnert HJ (2007) An Arabidopsis gene network based on the graphical Gaussian model. *Genome Res* 17:1614–1625
- Miyoshi K, Ito Y, Serizawa A, Kurata N (2003) OsHAP3 genes regulate chloroplast biogenesis in rice. *Plant J* 36:532–540
- Morgan PB, Bollero GA, Nelson RL, Dohleman FG, Long SP (2005) Smaller than predicted increase in aboveground net primary production and yield of field-grown soybean under fully open-air [CO<sub>2</sub>] elevation. *Glob Change Biol* 11:1–10
- Morrison MJ, Voldeng HG, Cober ER (2000) Agronomic changes from 58 years of genetic improvement of short-season soybean cultivars in Canada. *Agron J* 92:780–784
- Newman JA (2004) Climate change and cereal aphids: the relative effects of increasing CO<sub>2</sub> and temperature on aphid population dynamics. *Global Change Biol* 10:5–15
- Newton AC, Young IM (1996) Temporary partial breakdown of Mlo-resistance in spring barley by the sudden relief of soil water stress. *Plant Pathol* 45:970–974
- Peng J, Richards DE, Hartley NM, Murphy GP, Devos KM, Flintham JE, Beales J, Fish LJ, Worland AJ, Pelica F, et al (1999) ‘Green revolution’ genes encode mutant gibberellin response modulators. *Nature* 400:256–261
- Pangga IB, Chakraborty S, Yates D (2004) Canopy size and induced resistance in *Stylosanthes scabra* determine anthracnose severity at high CO<sub>2</sub>. *Phytopathology* 94:221–227
- Plessl M, Heller W, Payer HD, Elstner EF, Habermeyer J, Heiser I (2005) Growth parameters and resistance against *Drechslera teres* of spring barley (*Hordeum vulgare* L. cv. Scarlett) grown at elevated ozone and carbon dioxide concentrations. *Plant Biol* 7:694–705
- Russell GE (1978) Plant breeding for pest and disease resistance. Butterworths, London, UK
- Reynolds MP, Borlaug NE (2006) Applying innovations and new technologies for international collaborative wheat improvement. *J Agric Sci* 144:95–110
- Silverstone AL, Sun T (2000) Gibberellins and the green revolution. *Trends Plant Sci* 5:1–2
- Taub DR, Miller B, Allen H (2008) Effects of elevated CO<sub>2</sub> on the protein concentration of food crops: a meta-analysis. *Glob Change Biol* 14:565–575
- Umezawa T, Fujita M, Fujita Y, Yamaguchi-Shinozaki K, Shinozaki K (2006) Engineering drought tolerance in plants: discovering and tailoring genes to unlock the future. *Curr Opin Biotechnol* 17:113–122
- Vuorinen T, Nerg AM, Ibrahim MA, Reddy GVP, Holopainen JK (2004) Emission of *Plutella xylostella*-induced compounds from cabbages grown at elevated CO<sub>2</sub> and orientation behavior of the natural enemies. *Plant Physiol* 135:1984–1992
- Wang Y, Li J (2006) Genes controlling plant architecture. *Curr Opin Biotechnol* 17:123–129
- Yanagisawa S, Akiyama A, Kisaka H, Uchimiyama H, Miwa T (2004) Metabolic engineering with Dof1 transcription factor in plants: improved nitrogen assimilation and growth under low-nitrogen conditions. *Proc Natl Acad Sci USA* 101:7833–7838
- Zavala JA, Casteel CL, DeLucia EH, Berenbaum MR (2008) Anthropogenic increase in carbon dioxide compromises plant defense against invasive insects. *Proc Natl Acad Sci USA*

- 105:5129-5133
- Zhang JY, Broeckling CD, Blancaflor EB, Sledge MK, Sumner LW, Wang ZY (2005) Overexpression of *WXP1*, a putative *Medicago truncatula* AP2 domain-containing transcription factor gene, increases cuticular wax accumulation and enhances drought tolerance in transgenic alfalfa (*Medicago sativa*). *Plant J* 42:689-707
- Zhang H, Forde BG (1998) An Arabidopsis MADS box gene that controls nutrient-induced changes in root architecture. *Science* 279:407-409
- Zhu XG, Portis AR, Long SP (2004) Would transformation of C<sub>3</sub> crop plants with foreign Rubisco increase productivity? A computational analysis extrapolating from kinetic properties to canopy photosynthesis. *Plant Cell Environ* 27:155-165
- Ziska LH, Emche SD, Johnson EL, George K, Reed DR, Sicher RC (2008) Alterations in the production and concentration of selected alkaloids as a function of rising atmospheric carbon dioxide and air temperature: implications for ethno-pharmacology. *Global Change Biol* 11:1798-1807