

## 유전체 정보를 이용한 환경식물생명공학의 현황과 전망

곽상수 · 권석윤

한국생명공학연구원 환경생명공학연구소

식물은 토양에 뿌리를 내리고 고착생활을 하면서 다양한 토양 미생물을 비롯하여 식물체내와 식물체 표면에 서식하는 미생물과 상호관계를 유지하면서 생활하고 있다. 미생물 가운데는 질소고정균을 비롯하여 식물의 생장을 촉진하는 미생물과 병원균의 생장을 저해하는 길항미생물과 같이 식물에 도움을 주는 미생물 등이 있다. 따라서 식물과 상호작용하는 미생물은 식량의 안정적인 공급 뿐 아니라 생태계의 균형을 유지하는데 매우 중요한 역할을 하고 있어 지구규모의 식량문제와 환경문제가 심화되고 있는 현실을 고려할 때 이 분야의 연구는 활발하리라 기대된다. 최근 유전체 연구에 힘입어 식물과 상호작용하는 미생물 유전체가 급속히 진행되고 있다 (김 등, 2002). 유전체정보를 이용한 환경친화형 식물개발에 있어서도 건조 등 열악한 환경조건에서 식물의 생장을 촉진하고 공생하는 미생물의 개발이 함께 이루어져야 할 것이다. 본고에서는 먼저 심각한 환경문제의 일반현황을 소개하고, 유전체정보를 이용한 환경식물생명공학의 구체적인 연구로서 환경재해 내성식물 개발 (stress-tolerant plant)과 식물을 이용한 환경정화 (phytoremediation)에 관한 최근의 연구동향과 전망에 대하여 기술한다. 복합환경재해 내성식물 개발에 관해서는 식물의 항산화연구를 중심으로 한 필자 연구팀의 성과를 소개한다.

### 1. 환경문제의 일반현황

식물 (plant)은 태양에너지를 이용하여 이산화탄소를 고정하고 인간 생존에 필수인 산소와 식량 뿐 아니라 각종 의약품과 산업용소재를 생산하는 지구상에 가장 효율적인 공장 (plant, factory)이다. 그러나 지금 식물공장이 지구온난화, 오존층의 파괴, 산성비, 삼림파괴, 사막화 등 지구규모의 환경문제에 의해 위기에 처해 있다. 따라서 이러한 위기에 처한 식물생태계를 보전하는 일은 우리 인류가 해결하여야 할 최우선의 과제이다.

인구증가와 산업화에 따른 석탄, 석유 등 화석에너지 (fuel energy)의 소비량은 비약적으로 증가하고 있다. 1800년 전후한 산업혁명 이후 화석에너지의 연소에 따라 대기중의 이산화탄소 농도가 급격히 상승하게 되었고, 이것이 지구온난화 등 지구환경문제를 일으킨 중요한 원인이 되고 있다 (그림 1). 특히 1950년대 이후의 화석에너지의 급격한 사용은 지구환경을 심각한 상태로 만들고 있으며, 이러한 추세라면 21세기 초기에는 인류생존을 크게 위협할 것이 설득력 있게 예측되고 있다. 유엔환경계

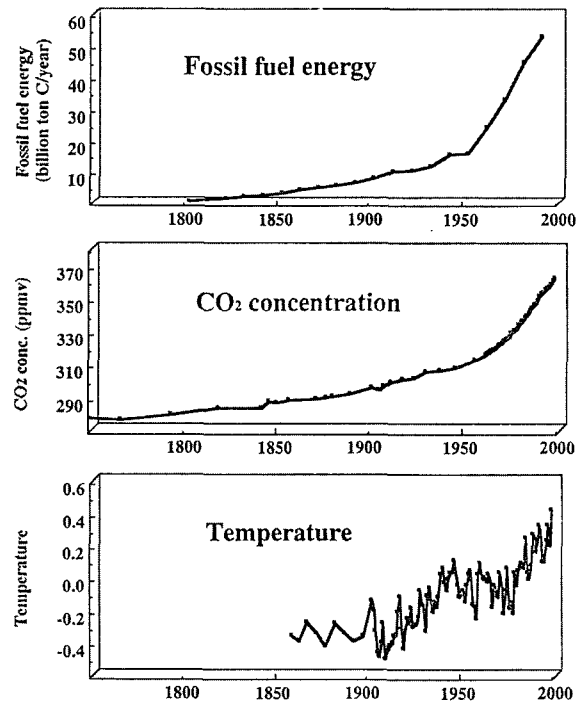


그림 1. 산업혁명 이후 화석에너지(fuel energy)의 과다한 사용에 따른 대기중 이산화탄소 농도와 지구 평균온도의 현저한 증가.

획 (UNEP)은 2002년 5월 지난 30년 간 지구 환경변화를 평가하고 향후 30년 동안 지구환경에 영향을 끼칠 정책방향을 담은 보고서 (Global Environmental Outlook 3, GEO-3)에서 무분별한 개발로 인한 산림파괴와 물 부족 등에 대한 비상대책이 마련되지 않으면 향후 30년 내에 지구의 모습은 매우 황폐할 것이라고 경고했다. GEO-3 보고서에서는 1990년 환경파괴에 따른 홍수, 가뭄 등 각종 자연재해로 피해를 입은 사람의 수는 2억 1100만 명 수준이며, 자연재해로 인한 세계의 재산 손실액은 1000억 달러가 넘는 것으로 추산하였다.

필자는 최근 황사의 최대 진원지인 중국 신장위구르자치구 (대한민국 면적의 약 17배)에 있는 다클라마칸사막과 황토고원을 두 차례 방문한 적이 있다. 다클라마칸사막은 동서문화의 통로인 비단길로 우리에게 잘 알려져 있다. 사막지역이라 농작물 재배를 위한 관개사업과 강한 바람을 막기 위한 방풍/방사립 조성사업이 대대적으로 이루어지고 있었다. 그럼에도 불구하고 현지 안내인은 지속적인 가뭄과 바람으로 매년 사막지역이 눈에

피게 확대되고 있다고 말했다. 갈수록 심각해지는 황사는 중국의 무리한 개간과 방목이 초래한 인재이다. 중국정부 추정에 따르면 현재 한반도의 4배에 달하는 사막과 황토고원이 내몽고, 간쑤, 신장을 중심으로 매년 2330 km<sup>2</sup>씩 늘어나고 있다. 즉 한 해에 제주도보다 넓은 면적이 사막화되는 것이다. 몽골은 국토의 90%가 사막화위기에 처한 가운데 과거 30년 동안 목초는 6만9000km<sup>2</sup> 감소하고 식물종류도 4분의 1로 감소하였다. 국제 농업기구 (FAO)는 중국의 인구가 13억 명으로 불어나면서 소, 염소, 양 등 가축은 1961년 1억7100만 마리에서 2000년 4억 700만 마리로 늘어나 사막화가 가속되고 있다고 보고있다. 즉 소득이 증가하면서 식물성단백질에서 동물성단백질로의 식생활 패턴 변화가 식량문제 뿐 아니라 사막화를 가속시키고 있다. 중국 정부는 오염으로 죽어 가는 보하이(발해)만을 2015년까지 청정해역으로 되살리기 위해 2001년부터 6백억위안(약 9조원)을 투입한다는 '보하이 벽해 행동계획'을 세웠으나 아직 효과를 보지 못하고 있다.

중국의 황사를 포함한 환경문제는 바로 인접국인 우리의 문제로 인식하여야 한다. 이러한 점에서 환경공동운명체인 한국, 중국, 일본 등 동북아시아 국가의 협력연구를 통한 환경내성 식물 개발이 요구된다. 일차적으로 건조와 고온으로 사막화가 급속도로 진전되고 있는 중국과 몽골지역에 나무를 심는 일부터 시작되어야 할 것이다. 이를 위하여 기존의 토목공학적인 방법으로 나무를 심으면서 보다 적극적으로는 생명공학기술을 통하여 건조 등 복합재해에 강한 환경친화형 식물을 개발하여야 할 것이다.

## 2. 환경재해내성 식물개발 현황

### a. 국내외 연구현황

스트레스내성식물(stress-tolerant plants) 분야는 나빠지는 지구생태계의 예방, 정화 뿐 아니라 식량 문제 해결에 중요한 분야로 대두되고 있어 최근 식물의 환경스트레스 극복기구에 대한 생명공학연구가 활발히 국내외적으로 진행되고 있다.

가뭄, 냉해, 높은 염분농도 등의 환경스트레스는 작물의 생산성을 저하시키는 주요 요인 중의 하나로 병충해에 의한 손실의 약 10배 정도가 매년 환경스트레스에 의해 유실되고 있다. 지구상에서 농경 가능한 토지는 지구면적의 약 10%이지만 이 중에서 환경스트레스가 적은 지역은 10-20%에 불과하고 80% 이상의 농지가 스트레스를 받고 있다. 이들 80% 중 26%가 건조 스트레스 지역이며, 무기영양분 결핍지대가 24%, 토심층이 얇아 경작이 힘든 토양이 15%, 저온지대가 4%를 차지한다.

1998년 일본에서 개최된 "Beyond the horizon of the science: Can plant biotechnology save the global crises of food and environment?" 주제의 국제심포지엄에서 21세기 인류가 당면한 환경문제 및 식량문제의 해결은 식물스트레스에 초점을 두어야

한다는 결론을 내렸다. 2002년 7월 영국 Oxford에서 개최된 Gordon Research Conference의 주제가 "Cellular basis of adaptation to salt and water stress in plants" 인 점으로 미루어 지구환경문제로 인한 식물의 환경적응기구에 대한 이해와 스트레스내성 식물 개발의 중요성이 강조되고 있다.

지금까지 건조스트레스 등 특정 스트레스에 대한 내성기구 규명에 관한 연구가 국내외적으로 이루어져 왔다. 그러나 열악한 환경지역은 복합적인 재해를 받기 때문에, 복합재해에 강한 유전자와 발현 프로모터를 이용한 발현기술 개발이 요구된다. 최근 스트레스 유도성 유전자의 전사인자 (transcription factor)를 이용한 형질전환체가 여러가지 스트레스에 내성을 갖는다는 보고가 주목을 받고 있다. 일본 이화학연구소 (RIKEN)의 Shinozaki 박사 연구팀은 건조에 반응하는 cis-element인 dehydration responsive element (DRE)를 분리하여, rd29 stress-inducible promoter에 DRE 결합단백질인 DREB1A을 도입한 애기장대 (*Arabidopsis thaliana*) 식물체가 건조, 염류, 냉해에 강한 내성을 갖는 것을 발표하여 분자육종에 의한 복합재해 내성 식물 개발의 가능성을 시사하였다 (Kasuga et al. 1999).

우리나라의 경우 환경의 주무부처인 환경부에서는 토목공학 중심의 환경문제 해결에 대한 연구가 주류이며, 생명공학기술을 이용한 환경문제 해결은 아직 초보적인 단계이다. 과학기술부와 농촌진흥청이 주관하는 사업단에는 스트레스내성 유전자 발굴 및 재해내성 농작물 개발에 대한 연구가 시도되고 있다. 2001년 "농업식물 스트레스 연구센터"가 신규 SRC로 선정된 것은 시대의 흐름을 반영하고 있다고 하겠다.

경상대학교 윤대진교수는 nucleoside diphosphate kinase (NDPK) 유전자를 애기장대에 도입한 결과 저온, 염류 등 복합 스트레스에 내성을 갖는 것을 밝혔다(Moon et al. 2003). 명지대학교 김주곤교수는 최근 트레할로스 생합성유전자 이식발현을 통해 트레할로스 함량을 증가시킨 결과, 여러 가지 바람직한 농업적인 특성 즉 건조와 저온, 소금 등 다양한 식물환경 스트레스에 강한 형질전환 버를 개발하였다 (Garg et al. 2002; Jang et al. 2003).

### b. 연구팀의 연구결과

필자의 식물항산화연구팀은 21세기 인류가 당면한 환경문제, 식량문제 해결에 기여하기 위한 연구로 식물의 항산화기구 (antioxidative mechanism)의 기초연구 및 이용기술에 관한 연구를 수행하고 있다. 연구팀은 엽록체의 항산화기구의 대사조절에 주안점을 두고 있다. 엽록체는 식물공장의 핵심부위로서 각종 스트레스 조건에서 높은 산화스트레스(oxidative stress)를 받기 쉬운 곳이다. 엽록체는 수십 mM농도의 ascorbate (비타민 C)를 비롯하여 CuZn-SOD 등 매우 발달된 항산화기구를 가지고 있다 (그림 2)(Asada 1999). 그러나 높은 환경스트레스는 엽록체의 산화스트레스를 초래하여 식물의 생산성에 결정적인 영

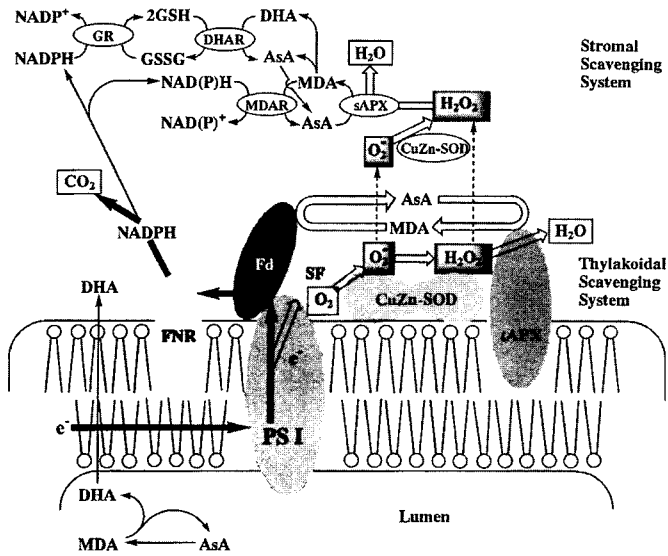


그림 2. 엽록체(chloroplast)의 항산화기구(antioxidative mechanism)을 나타낸 모식도 (Asada 1999).

향을 미칠 것으로 생각된다. 또한 연구팀은 우수한 환경재해내성 식물을 개발하기 위해서 각종 스트레스 조건에서만 발현되는 스트레스 유도성 유전자 promoter의 개발에 주력하고 있다. 연구팀이 개발하는 최적 유전자발현시스템은 거의 모든 식물과 스트레스에 적응할 수 있는 기반기술 (platform technology)로 간주될 수 있다. 즉 물이 부족한 건조지역, 염 농도가 높은 간척지역, 환경오염이 심한 공장지역 등 복합재해에도 잘 견딜 수 있는 식물개발에 적용 가능하리라 기대된다.

엽록체 항산화기구 대사조절연구로서 CuZn-SOD와 ascorbate peroxidase (APX)를 엽록체에 동시에 발현하는 형질전환 담배식물체 (CA 식물체)는 활성산소종을 과량생산하여 제초활성을 나타내는 paraquat (methyl viologen, MV)에 대단히 강한 활성을 나타내었다 (Kwon et al. 2002). CA 식물체는 MV이외 건조, 저온, 중금속 등 여러 가지 스트레스에 강한 내성을 나타내었다. 활성이 없는 산화형 dehydroascorbate (DHA)를 활성형인 환원형 ascorbate로 변환하는 DHA reductase (DHAR)을 사람 cDNA library에서 분리하여 도입한 형질전환 담배식물체 (DHAR 식물체)는 생체내 ascorbate 함량을 증가시켜 MV를 비롯하여 과산화수소, NaCl 등에 내성을 나타내었다 (Kwon et al. 2001, 2003). CA 식물체와 DHAR 식물체는 항상적으로 발현하는 CaMV 35S promoter를 사용한 결과이다.

스트레스 유도성 식물유전자 promoter의 분리는 식물배양세포에 특이적으로 고발현하는 peroxidase (POD) 유전자를 대상으로 하였다. 대부분의 식물배양세포는 식물체와 달리 중금속영양을 하며 인위적인 배양조건으로 높은 산화스트레스를 받으면서 배양되고 있다고 간주된다. 연구팀은 100 종 이상의 다양한 식물유래의 배양세포주를 대상으로 항산화활성을 조사한 결과, 배양세포는 식물체보다 매우 높은 SOD와 POD 활성을 나타내는

것을 확인하였다 (김 등, 1994; 유 등, 1996). 특히 조사한 세 포주 가운데 카사바(*Manihot esculenta*)와 고구마(*Ipomoea batatas*) 배양세포는 가장 높은 SOD 활성과 POD 활성을 각각 나타내었다 (Kwak et al. 1995). 카사바와 고구마배양세포에서 SOD와 POD 유전자를 분리하고 스트레스 관점에서 유전자의 발현특성을 조사한 결과, 배양세포에서 분리한 이들 유전자 가운데는 여러 가지 스트레스에 특이적으로 강하게 발현하는 것이 대부분이었다 (Huh et al. 1997; Lee et al. 1999; Kim et al. 1999; Park et al. 2003).

특히 고구마에서 분리한 산성 POD 단백질을 코딩하는 SWPA2 유전자는 배양세포 특이적으로 강하게 발현하지만 정상적으로 재배되는 고구마 식물체에서는 잎, 줄기, 뿌리에서는 발현되지 않았다. 그러나 SWPA2 유전자는 저온, 오존, 상처 등에 의해 발현이 강하게 유도되어, 이 유전자는 스트레스 유도성 promoter에 의해 조절됨이 시사되었다 (Kim et al. 1999). 연구팀은 SWPA2 promoter를 분리하여 형질전환 담배식물체와 배양세포를 개발하여 프로모터의 특성을 조사한 결과, 담배에서도 고구마에서와 유사한 활성을 나타내었다 (Kim et al. 2003). 따라서 SWPA2 promoter는 복합스트레스내성 산업용 형질전환 식물체 및 각종 부가가치 단백질을 생산하는 형질전환 식물세포주 개발이 기대된다. SWPA2 promoter를 사용하여 CuZn-SOD, APX, DHAR를 동시에 엽록체에 발현하는 벡터와 복합재해내성을 나타내는 NDPK2 등을 결합한 벡터를 제작하여 각종 농작물을 개발하고 있다(그림 3). 아울러 SWPA2 promoter를 사용하여 인체 락토페린 단백질을 고생산하는 약용식물 배양세포를 개발한 바 있어 상업적 대량생산이 기대된다(Choi et al. 2003).

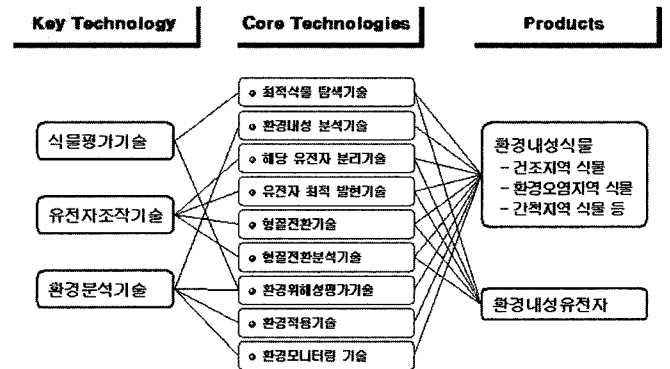


그림 3. 환경스트레스 내성식물(stress-tolerant plant) 개발을 위한 핵심기술.

### 3. 식물을 이용한 환경정화 (phytoremediation) 개발 현황

식물환경정화 (phytoremediation)는 식물을 이용하여 중금속, 방사성원소, 유기용매, 비료, 농약 등으로 오염된 토양과 물에서 오염원을 제거하거나 무독화시켜, 토양의 본래 기능을 회복시키는 기술이다. 종래에는 자연적으로 존재하는 식물 중에서 환경

을 정확할 수 있는 것들을 선발하여 사용하였으나, 현재 선진국에서는 유전공학적인 기술을 이용하여 자생식물보다 우수한 정화능력을 지닌 식물을 개발하여 이용하고자 하는 연구방향으로 진행되고 있다. 유독물질을 보다 더 많이, 빨리 흡수하고 그들의 독성에 잘 견디는 식물을 개발하는 것이 phytoremediation 기술의 경쟁의 초점이다.

식물을 이용한 환경정화는 전통적인 토양복원 기술인 물리, 화학적인 기술에 비해 비용이 1/6-1/10에 지나지 않는다. 이는 식물이 정화에 필요한 에너지를 궁극적으로 태양에너지에서 얻기 때문이다. 또한 물리적 토양복원의 대표적인 굴착법은 자연을 훼손시키며, 화학적 처리나 미생물 이용은 2차 오염의 위험이 있다. 이에 비하여 식물을 이용한 환경정화는 생태계와 생물다양성을 보호하며, 부차적인 오염을 일으키지 않는 환경친화적이라는 특징이 있다.

식물환경정화는 사람들이 선호하는 방법이며, 21세기에는 쾌적한 환경의 요구도가 계속 높아지고 있으므로, 앞으로 시장이 계속 커질 것이다. 이 기술은 10여 년 정도의 짧은 역사를 갖고 있으며, 식물학에 많은 비중을 두고 있다. 우리나라의 식물학 분야는 선진국 수준에 근접하고 있기 때문에 이 기술 개발은 국제경쟁력이 있을 것으로 기대된다.

Phytoremediation은 뿌리, 잎, 줄기 등 수확가능한 식물의 조직에 오염물질을 축적시켜서, 식물을 수확함으로써 오염물질을 제거하는 phytoextraction, 식물의 뿌리를 이용하여 오염물질을 걸러내거나 농축, 침전 흡수시키는 rhizofiltration, 복잡한 유기물질을 단순한 분자로 분해시켜 식물조직 구성물질로 전환시키는 phytotransformation, 뿌리로부터 유용물질을 분비하여 미생물이나 곰팡이의 분해과정을 촉진시키는 phytostimulation, 식물에 의한 금속오염물질들의 침전이나 흡수로 오염물질들이 지하수로 이동하거나 먹이사슬로 들어오는 것을 억제하는 phytostabilization 등으로 세분할 수 있다.

일본에서 발행하는 바이오전문지 Bioindustry 2002년 1월호 특집호에서 "지구환경과 바이오테크놀러지"에서는 phytoremediation의 새로운 전개와 시장성에 대하여 자세하게 보고하고 있다. 현재 미국에는 21만7천 장소가 오염되어 있으며, 이를 종래의 물리화학적 방법으로 오염지역을 복원하는데는 약 22조4,000억 엔이 소요된다고 한다. 2000년 세계 phytoremediation 시장은 60억엔 규모이나 2005년에는 5배 이상 증가할 것으로 전망하고 있다. 2000년 미국의 phytoremediation 시장은 적어도 50억엔을 넘었으며, 2005년에는 5배 이상 성장하여 최대 440억엔으로 추산하고 있다. 일본에서는 2000년 1.8억엔 규모이나 2005년에는 8억엔을 상회할 것으로 전망하고 있다. 현재 미국에서 phytoremediation을 전문으로 하는 기업이 10개 회사 (The Bioengineering Group Inc., Biotechnik North York, CH2M HILL, Ecolotree Inc., ERIN Consulting Ltd., Living Technologies, Occidental Petroleum Corp., Edenspace Systems

Corporation, Phytokinetics Inc., TreeTec Environmental Corp.)에 달하고 있다([http://www.mobot.org/jwccross/phytoremediation/pytorem\\_sponsors-corp.htm](http://www.mobot.org/jwccross/phytoremediation/pytorem_sponsors-corp.htm)) (Morikawa 2002).

우리나라는 임업연구원 생물공학과 및 대학 (포항공과대학, 세종대학 등)에서 실험수준의 연구를 수행하고 있으며 일부 demonstration project가 진행되고 있다. 특히 축산폐수의 정화를 위해 포플러를 이용하는 시험 연구가 이미 완결되어 현장 적용 단계에 와 있다. 국내에서 자생하는 포플러를 유전공학적인 조작을 통해 중금속 흡수의 극대화를 도모하는 연구가 진행되고 있다. 산림청 임업연구원에서 울창이에서 분리한 철을 저장하는 단백질의 유전자를 포플러에 발현시켜서 중금속 흡수능력이 보통 포플러의 3배까지 증가한 포플러를 개발하였다. 또한, 수은을 무독화시키는 유전자인 merA와 merB도 포플러에 형질전환을 시켜서 수은 저항성이 향상된 것을 보았다 (최 등, 2001). 난지도 쓰레기 매립지의 포플러 식재로 침출수 중 질소, 인 등 다양한 오염물질의 함량이 30~50% 감소됨이 확인되었고 부산의 을숙도 및 석대 쓰레기 매립지에 2002년부터 포플러 식재 준비에 들어가고 있다. 포항공대 이영숙교수 연구실 ([www.postech.ac.kr/~ylee/mail.html](http://www.postech.ac.kr/~ylee/mail.html))은 phytoremediation용 유전자 발굴 및 형질전환식물체 개발에 관해 과학기술부 국가지정연구실로 지정되어 활발한 연구를 수행하고 있다. 식물에서 알루미늄, 납의 흡수, 수송, 독성, 내성기작에 관한 연구성과를 도출하였고, 납과 카드뮴 축적과 내성에 뛰어난 벼의 변종들을 선발하여 내성기작을 규명하고 관련 유전자 등을 분리하고 있다 (Gha and Lee 1999; Kim et al. 2002).

이외에도 metallothionein을 과발현하는 형질전환 담배를 만들어 Cd에 대한 내성이 증가한 것을 보고된바 있다(Suh et al. 1998). 국내 벤처회사 중에서 phytoremediation에 관한 연구개발에 관심이 있는 회사가 있다고 하나 아직 가시적인 성과가 보고된바 없다. 폐광지역 등 오염된 특정지역을 정화하는 것은 사업성이 있기 때문에 우리나라도 서구에서와 같이 기업체에서 많은 관심을 가질 것으로 기대된다(그림 4).

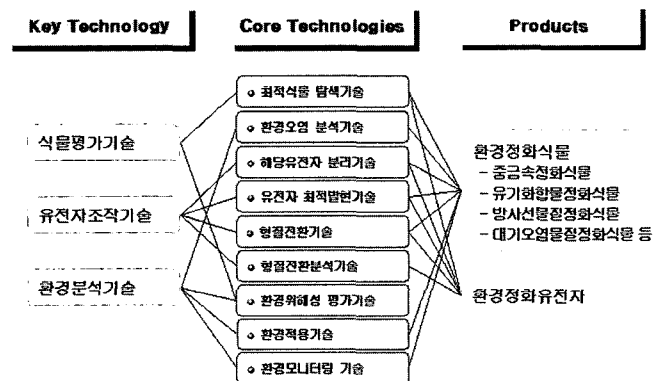


그림 4. 환경정화(phytoremediation) 식물 개발을 위한 핵심기술.

#### 4. 전망 및 우리의 각오

환경문제를 포함한 지구환경문제를 해결하기 위해서는 우리는 구체적으로 무엇을 하여야 하는가? 21세기는 인류가 당면한 환경문제, 식량문제, 보건문제 및 에너지문제를 해결할 수 있는 생명공학시대라 한다. 특히 식물생명공학은 이들 모든 문제를 동시에 해결할 수 있는 유일한 분야이다. 가뭄, 자외선, 온도변화, 환경오염물질 등 열악한 환경에도 잘 견디는 환경내성유전자를 분리하여 이용하는 식물분자육종 방법은 기존의 육종방법으로는 거의 해결이 불가능한 복합재해에 강한 새로운 식물 개발이 가능하게 되었다. 특히 건조지역, 환경오염지역 등 척박한 토양에도 잘 적응하는 우수한 농작물과 나무의 개발이 기대된다. 복합재해에 강한 농작물 개발은 식량자급률이 30%를 밑도는 우리나라의 식량자급률 향상에도 기여할 수 있고, 사막화가 진전되고 있는 중국과 북한의 척박한 토양에도 잘 자랄 수 있는 농작물 개발로 연계되어 동북아시아의 안정적인 식량공급에도 크게 기여할 것이라 기대된다.

정부는 과학기술부 작물유전체기능연구사업단, 농촌진흥청 바이오그린21사업단에서 재해내성 식물개발에 필요한 연구가 시작되고 있어 다행스러운 일이다. 나아가 한국, 중국, 일본은 환경공동운명체라는 점을 인식하고 환경문제의 원인을 제거하는 일과 복합재해내성 식물개발에 공동의 노력을 기울여야 할 것이다. 지구적으로 벌어지는 환경문제 해결을 위해서는 이웃나라와의 국제적 공조가 필수적이며, “늦다고 생각될 때가 가장 빠르다”는 마음가짐으로 정부와 국민은 적극적으로 임해야 한다.

일본은 사막이라고는 없지만 오래 전부터 정부와 민간단체가 중심이 되어 중국의 사막화방지에 관한 연구와 녹화사업을 대대적으로 추진하고 있다. 동경대학 명예교수 한 분은 정년이후 중국 사막화지역을 누비면서 나무를 심는 일에 여생을 바치고 있어 우리에게 시사하는 바가 크다. 우리 정부와 기업 나아가 국민모두가 지구 환경문제를 해결하는 일은 더 이상 미룰 일이 아니며 인간 생존에 최우선과제로 생각하고 적극적인 대응책이 제시되어야 할 것이다.

한편 식물과 상호작용하는 미생물은 식량의 안정적인 공급 뿐 아니라 생태계의 균형을 유지하는데 매우 중요한 역할을 하고 있어 지구규모의 식량문제와 환경문제가 심화되고 있는 현실을 고려할 때 이 분야의 연구는 활발하리라 기대된다. 최근 유전체 연구에 힘입어 식물과 상호작용하는 미생물 유전체 연구가 급속히 진행되고 있다 (김 등, 2002). 유전체를 이용한 환경친화형 식물개발에 있어서도 건조 등 열악한 환경조건에서도 식물의 생장을 촉진하고 공생하는 미생물의 개발이 함께 이루어져야 할 것이다.

이제 우리 사회의 모든 분야에서 생태계를 먼저 생각하는 발상의 전환이 필요한 때이다. 인간중심의 생명관 (ethics of anthropocentrism)에서 지구는 인간 뿐 아니라 다양한 종류의 동물, 식물, 미생물 등의 생명체가 공존하는 생물중심의 생명관

(ethics of biocentrism)으로 바뀌어야 한다. 나아가 지구상에 존재하는 무생물도 함께 존재할 가치가 있는 생태중심의 생명관 (ethics of ecocentrism)으로까지 모두의 생명관이 확대되어야 위기에 처한 지구환경을 복원할 수 있을 것으로 기대된다.

#### 감사의 글

본 논문의 저자는 과학기술부 작물유전체기능연구사업과 농촌진흥청 바이오그린21사업의 지원으로 연구과제를 수행하고 있으며, 본 논문에 소개된 연구내용은 상기사업의 지원으로 수행된 연구결과이며 이에 감사한다.

#### 참고문헌

- 김수경, 곽상수, 정경희, 민성란, 박일현, 유장렬 (1994) Peroxidase 고 생산 식물세포주의 선발. *한국생화학회지* 27:132-137.
- 김지현, 최수근, 박승환 (2002) 식물과 상호작용하는 세균의 유전체 연구동향. *미생물과 산업* 28(2): 23-28
- 유순희, 김석원, 김상호, 유장렬, 곽상수 (1996) Superoxide dismutase 고생산 식물배양세포주의 선발 및 isoenzyme 분석. *식물조직배양학회지* 23:103-106.
- 장문석, 허경혜, 김석원, 박일현, 유장렬, 곽상수 (1996) 다양한 식물배양세포주에서 catalase 활성과 다른 항산화효소 활성의 비교. *식물조직배양학회지* 23:157-160.
- 최영임, 노은은, 한무석. 2001. 수은대사 유전자인 merA와 merB의 식물체 발현. 2001년도 식물과학 겨울학술회의. 초록집 p 19. 포항공과대학교
- Asada, K. 1999. The water-water cycle in chloroplasts: scavenging of active oxygens and dissipation of excess photons. *Ann. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* 50:601-639.
- Choi, S. M., O. S. Lee, S. Y. Kwon, S. S. Kwak, D. Y. Yu, H. S. Lee. 2003. High expression of a human lactoferrin in transgenic tobacco cell cultures. *Biotech. Lett.* 25:213-218.
- Garg, A. K., J. K. Kim, T. G. Owens, A. P. Ranwala, Y. D. Choi, L. V. Kochian, J. W. Ray. 2002. Trehalose accumulation in rice plants confers high tolerance levels to different abiotic stresses. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 99:15898-15903.
- Gha, C. H., Y. Lee. 1999. Aluminium uptake and aluminium-induced rapid root growth inhibition of rice seedlings. *J. Plant Biol.* 42:151-158.
- Huh, G. H., S. J. Lee, Y. S. Bae, J. R. Liu, S. S. Kwak. 1997. Molecular cloning and characterization of anionic and neutral peroxidase cDNAs from sweet potato suspension-cultured cells and their differential expression in response to stress. *Mol. Gen. Genet.* 255:382-391.
- Jang, I. C., S. J. Oh, J. S. Seo, W. B. Choi, S. I. Song, C. H. Kim, Y. S. Kim, H. S. Seo, Y. D. Choi, B. H. Nahm, J. K. Kim. 2003. Expression of a Bifunctional Fusion of the *Escherichia coli* Genes for Trehalose-6-Phosphate Synthase and Trehalose-6-Phosphate Phosphatase in Transgenic Rice Plants Increase Trehalose Accumulation and Abiotic Stress Tolerance without Stunting Growth. *Plant Physiol.* 131:516-524.
- Lee, H. S., K. Y. Kim, S. H. You, S. Y. Kwon, S. S. Kwak. 1999. Molecular characterization and expression of a cDNA encoding

- copper/zinc superoxide dismutase from cultured cells of cassava (*Manihot esculenta* Crantz). *Mol. Gen. Genet.* 262:807-814.
- Kasuga, M., Q. Liu, S. Miura, K. Yamaguchi-Shinozaki, K. Shinozaki. 1999. Improving plant drought, salt, and freezing tolerance by gene transfer of a single stress-inducible transcription factor. *Nat. Biotech.* 17:287-291.
- Kim, K. Y., S. Y. Kwon, H. S. Lee, Y. K. Hur, J. W. Bang, S. S. Kwak. 2003. A novel oxidative stress-inducible peroxidase promoter from sweet potato: molecular cloning and characterization in transgenic tobacco plants and cultured cells. *Plant Mol. Biol.* 51:831-838.
- Kim, K. Y., G. H. Huh, H. S. Lee, S. Y. Kwon, Y. Hur, S. S. Kwak. 1999. Molecular characterization of two anionic peroxidase cDNAs isolated from suspension cultures of sweet potato. *Mol. Gen. Genet.* 261:941-947.
- Kim, Y. Y., Y. Y. Yang, Y. Lee. 2002. Pb and Cd uptake in rice roots. *Physiol. Plant* 16:368-372.
- Kwak, S. S., S. K. Kim, M. S. Lee, K. H. Jung, I. H. Park, J. R. Liu. 1995. Three acidic peroxidases from suspension-cultures of sweet potato. *Phytochemistry* 39:981-984.
- Kwon, S. Y., Y. O. Ahn, H. S. Lee, S. S. Kwak. 2001. Biochemical characterization of transgenic tobacco plants expressing a human dehydroascorbate reductase gene. *J. Biochem. Mol. Biol.* 34:316-321.
- Kwon, S. Y., S. M. Choi, Y. O. Ahn, H. S. Lee, H. B. Lee, Y. B. Park, S. S. Kwak. 2003. Enhanced stress-tolerance of transgenic tobacco plants expressing a human dehydroascorbate reductase gene. *J. Plant Physiol.* 160:347-353.
- Kwon, S. Y., Y. J. Jeong, H. S. Lee, J. S. Kim, Cho, R. D. Allen, S. S. Kwak. 2002. Enhanced tolerance of transgenic tobacco plants expressing both superoxide dismutase and ascorbate peroxidase in chloroplasts against methyl viologen-mediated oxidative stress. *Plant, Cell Environ.* 25:873-882.
- Morikawa, H. 2002. New frontier of phytoremediation. *BIO INDUSTRY.* 19:51-62.
- Moon, H. J., B. Y. Lee, G. T. Choi, D. G. Shin, T. Prasad, O. S. Lee, S. S. Kwak, D. S. Kim, J. S. Nam, J. D. Bahk, J. C. Hong, S. Y. Lee, M. J. Cho, C. O. Lim, D. J. Yun. 2003. Nucleoside diphosphate kinase 2 interacts with two oxidative stress-activated mitogen-activated protein kinases to regulate cellular redox state and enhances multiple stress tolerance in transgenic plants. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* 100:358-363.
- Park, S. Y., S. H. Ryu, S. Y. Kwon, H. S. Lee, J. G. Kim, S. S. Kwak. 2003. Differential expression of six novel peroxidase cDNAs from cell cultures of sweetpotato in response to stress. *Mol. Genet. Genom.* (in press).



곽 상 수 (sskwak@kribb.re.kr)

1976.3-1984.8 경북대 농학과 학사, 석사  
 1985.4-1988.3 동경대 농화학과 농학박사  
 1988.4-1990.3 일본 이화학연구소(RIKEN) 연구원  
 1990.3-현재 한국생명공학연구원 환경생명공학연구실 책임연구원  
 2002.4-현재 농촌진흥청 바이오그린21사업 발작물연구단장