

유전자 전환작물 개발 연구 현황과 과제

정태영

성균관대학교 생명공학부 유전공학과

Development of Transgenic Crops and Research Projects for Biotechnology Application

CHUNG, Tae Young

Department of Genetic Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon, 440-746, Korea

ABSTRACT The main objective of this topic is to establish strategies and to plan biotechnology researches which are related to the agricultural improvements especially focusing on the crop breeding in Korea. From 1960's to 1980's government policy had been emphasized to develop high yielding cultivars for the self sufficient supply of the staple food crops. As a result, considerable increase of rice production has been made with accumulating technology and man's powers. Recently genetically modified crops harboring useful characteristics have been developed using biotechnology and released in the developed countries. National research institutes and private companies have been developed biotechnology researches to establish competitive capabilities, however they have not been successfully used in commercialization. Therefore it is necessary to promote the practical application by connecting molecular technology with conventional breeding. Proposed research projects are; (1) basic researches including plant genome studies, (2) developing new cultivars through gene transformation, (3) screening and producing antioxidants, secondary metabolite substances and edible vaccines. To set a government policy, both domestic and international research trends were reviewed and possibility of success based on the economic view point were discussed. The intellectual property and preservation of environment play a key role to decide the research priority. It is also necessary for us to make one step system for the distribution of research resources such as microorganisms, genes cloned, plant seeds and research informations for promoting research activities.

Key words: Functional genomics, genome, gene-cloning, gene transformation, secondary metabolites

서 론

21세기를 맞으면서 세계인의 관심을 집중시키고 있는 과제 중에 하나는 생명공학 기술을 어떻게 농업생산에 이용하여 점점 부족해져 가는 절대 식량을 공급하는가 하는 과제일 것이다. 세계 인구는 2000년 초에 60억을 넘어서고 2030년에는 100억을 바라보고 있으나 식량을 생산할 수 있는 경지면적은 확대가 둔화되고 화석연료의 가격 상승과, 기후이변 등 식량 생산 여건이 불리해져 가는 와중에 세계무역기구 (WTO) 출

범은 농업생산물의 상품화를 가속시켜 영세한 농업의 생산기반 전부를 붕괴로 몰아가는 현상이 나타나고 있다.

그 동안 벼, 밀에서 다수성 품종개발 등 획기적 농업기술 발전으로 녹색혁명을 이루어 식량자급을 어느 정도 유지해 왔으나 세계 인구의 계속적 증가는 전통 육종 기술의 발전 속도를 능가하여 지속적인 식량문제를 야기하고 있다. 최근에 발전하고 있는 생명공학 기술은 전통 육종기술의 약점을 보완할 수 있는 잠재 기술로 인식되어 부족한 세계 식량공급에 유일한 대안으로 제시되고 있고, 따라서 세계 각국은 기술투자를 강화하고 원천기술을 특허화하는 등 농업에서 세계 경쟁력을 확보해 나가고 있는 추세이다.

이러한 시점에서 농업관련 연구와 과학기술 관련 연구가

*Corresponding author. Tel 031-290-7867 Fax 031-290-7870

Email chung@yurim.skku.ac.kr

참여할 수 있는 차별화된 연구방향을 모색하고 이에 따라 정부, 학계, 민간업체가 협력하여, 농업생산의 국제경쟁력을 재고할 수 있는 방안을 도출하는 것은 중요한 일이라고 생각된다.

본 원고에서는 생명공학과 관련되어 있는 농업 분야 중에서 작물분야에 한정하여 현재 당면한 문제점을 분석하고 이러한 문제점을 극복할 수 있는 연구방향을 제시하고자 하였다.

본 론

1. 우리나라 식량작물의 개발 현황과 문제점

우리나라 식량작물의 개발은 1910년부터 시작되었다고 볼 수 있지만 우리기술로 새로운 품종을 개발 보급한 것은 1960년부터라고 할 수 있다. 특히 1970년 이후 국가 연구기관의 주도로 통일형 품종의 육성 등 새로운 품종을 많이 육성 보급하여 생산성이 크게 향상되었다. 80년대 중반 이후 통일계 품종이 감소하면서 일시적으로 쌀의 생산능력이 다소 감소하였다가 다시 단보당 수량이 550 kg을 넘어가는 일본형 벼 품종들을 육성하면서 수량성 증대에 괄목할 만한 발전을 보여왔고, 따라서 쌀에서만큼은 우리나라에서 소비하는 물량을 충분히 공급할 수 있는 능력은 갖추었다고 볼 수 있다.

보리와 콩에 있어서도 품종개량에 의한 수량성 향상은 10a 당 수량이 보리에서 390 kg, 콩에서 300 kg까지 높여졌으나 농가 수익성의 문제 등으로 재배가 어려워 개량효과가 실현되고 있지 않다.

한국 농촌경제 연구원에서 우리나라 벼를 대상으로 평균 수량의 결정요인을 분석한 결과 품종 보급 요인이 50.8%, 재배 요인이 26.0%, 기상요인이 23.2%로 새로 개발한 품종을 적응지역에 보급 재배하는 것이 증산에 가장 중요한 요인이라고 지적하고 있다. 그러나 농민들의 품종 선호도는 생산성 증가에만 기인되는 것이 아니라 품질이 양호하고 상품성이 높아 수량보다는 수익성 증가에 더 많은 관심이 있다는 점을 간과해서는 안 된다. 또한 작물생산을 안정적으로 유지시키려면 재해저항성 및 병·충해 저항성도 높여야 한다. 이러한 측면에서 벼육종 사업에서는 도열병과 줄무늬 잎마름병에 저항성 품종을 개발 보급하여 최근 병해감수 현상은 거의 나타나

지 않고 있으나 벼멸구와 도복의 피해는 해마다 발생하여 벼 생산량을 크게 감소시키고 있다.

보리에 있어서는 도복에 강하며 추위에 견디는 품종을 육성 보급하여 어느 정도 목표를 달성하고 수확의 안전성을 유지하고 있지만 벼 뒷그루 재배를 위한 조숙성 품종의 육성효과는 크게 나타나지 않고 있고, 콩에서는 Virus병에 저항성 품종 육성이 재배 안전성을 높이는 데 필수적으로 생각된다.

품질개량 면에서의 작물육종의 성과는 괄목할 만한 발전을 거듭하여 최근 육성하는 벼 품종은 소비자의 기호에 적합한 쌀을 생산하여 불편이 없는 실정이고, 특히 유색미 등 소비자 기호에 맞게 다양한 품질의 벼 품종을 보급하여 생산소비를 원활하게 하고 있으며 취반용 보리의 식미를 개선하여 보리 소비를 촉진하게 하고 있다. 1984년에 육성한 찰보리는 보리의 취반 특성을 크게 개선하여 혼식으로 인한 불편을 덜어주고 있으며 특히 βglucan의 다량 함유로 당뇨병 등 성인병에 좋은 효과를 보임으로써 찰보리 소비가 계속 증가하고 있다. 이러한 것은 품질개량의 측면에서 높이 평가할 만한 일이다. 그러나 우리나라 농업 생산에서 해결해야 할 문제도 많다.

첫째로 생산비 절감을 위한 기계화가 절실히 요구되고 있다. 우리나라의 주곡작물인 쌀의 경우 생산비가 미국, 중국, 태국 등 쌀 수출국에 비하여 5~8배 정도 많이 들어 국제경쟁력이 뒤처지고 있다. 생산비 중 큰 비중을 차지하는 것이 노동비와 토지 용역비이므로 대규모 기계화재배를 하지 않으면 생산비를 절감시키기 어려운 실정이다. 농어촌진흥공사가 수행하고 있는 영농 규모화사업의 가상적 효과 분석에 의하면 장기적으로 20~25 ha의 경작 규모로 농사를 지었을 때 농기계의 수익률이 가장 큰 것으로 검토 보고하고 있다. 이러한 영농규모확대는 날로 고령화되고 있는 농촌 노동력 문제를 해결할 수 있는 유일한 대안이므로 기계화 재배에 대비한 작물재배 기술과 품종개발이 필요할 것으로 전망된다.

둘째로 환경 친화적 저 Energy 투입 농업 기술을 개발하여야 한다. 우리나라 농업은 그 동안 식량증산 위주의 정책을 추진하여 비료, 농약을 과다하게 사용함으로써 토양의 질을 가속적으로 황폐화시키고 있을 뿐 아니라 농업환경을 파괴함으로써 지속적 농업생산을 유지하기가 어려워지고 있다. 우리나라의 단위 농지당 비료소비량은 1970년 162 kg/ha이던 것이 최근에는 406 kg/ha로서 일본보다 20% 정도 높은 수준이고 태국이나 미국보다는 4~10배를 더 투입하는 실정이다. 이로 인하여 논에서 질소과다 현상이 나타나고 지하수와 하천

Table 1. Varietal improvements of yield potential in Korea.

Crops	Years			
	1970's	1980's	1991~1995	1996~1998
Rice (Kg/10a)	447~468	478~534	467~532	504~557
Barley (Kg/10a)	197~338	288~308	332~369	341~390
Soybean (Kg/10a)	206~213	209~276	192~289	233~297

Cited from Kim GH. et al (1999), Breeding strategies to increase production potential of major food Crops in Korea. The Symposium processing of "Food crisis in 21st century and overcome strategies".

Table 2. Self-sufficiency ratio of food crops from 1965 to 1998 in Korea.

Year	1965	1970	1975	1980	1985	1990	1994	1995	1996	1997	1998
Percent	93.9	80.5	73.1	56.1	48.4	43.1	29.2	28.0	26.4	30.4	31.7

Agriculture and forestry statistical year book 1999.

을 오염시켜 자연환경을 회복이 불가능한 수준까지 악화시키고 있다. 또한 살균제나 살충제 등의 농약 사용량도 꾸준히 증가하여 농산물의 잔류 독성의 문제를 야기시키고, 천적곤충이나 유익한 토양 미생물까지 제거하여 지속 농업생산 기반을 저해하고 있다. 따라서 앞으로 식량의 증산은 농약, 비료를 적게 사용하여도 생산성은 유지 또는 증가할 수 있고 환경오염도 회복시킬 수 있는 연구방향이 시급히 요청되고 있는 것이다.

셋째로, 식량안보를 위한 대책이 필요하다. 우리나라의 식량 자급률은 1965년도에 93.9%이던 것이 연평균 3.8%씩 지속적으로 감소하여 1996년에 26.4%까지 감소하였다가 1998년에 30%대로 회복되고 있다 (Table 2). 그러나 도시확장에 따른 경지면적의 지속적 감소, 유가 인상에 따른 생산비의 상승 등의 경제적 여건이나 국제 무역기구 (WTO)의 협약이행 등의 국제정세로 보아 자급률 향상을 위한 정책적 노력에도 불구하고 자급률은 더욱 감소될 것으로 전망된다. 따라서 식물작물의 연구방향은 식량안보를 어떻게 지킬 것인가에 그 초점이 맞춰져야 한다.

2. 원예작물 개발 현황과 문제점

원예작물의 종묘산업은 1960년대에 소규모 판매상으로 출발한 홍농종묘, 중앙종묘가 근대적 회사로 설립하면서 시작되었다고 할 수 있으며 1989년에 이르러 종자수입이 자유화되고 1997년 청원종묘, 서울종묘, 홍농종묘, 중앙종묘가 일본, 미국 등 선진국 기업에 판매되면서 명실상부하게 국제화, 개방화를 이루고 있다. 그러나 우리나라의 종묘 시장규모는 약 1,150억 (1억불)에 불과하여 세계 종묘시장 규모를 300억불로 추정하면 규모가 1/300에 미치지 못하고 있다. 특히 종자의 교역 규모를 보면 미국 등 선진국이 약 28억불을 차지하고 있어 세계 교역량의 약 82%를 차지하고 있으며 이들 선진국들은 자국의 종자공급은 물론 외국에서의 국제경쟁력도 높다. 우리나라는 1998년 현재 1천6백만 달러를 수출하고 있어서 세계 20위를 차지하지만 다른 선진국과 비교하여 많은 문제점을 가지고 있다.

원예작물 육종 사업의 문제점으로는 첫째로 소규모 회사가 많은 작물종자를 취급하여 전문성이 결여되고 있다. 현재 국내에는 한국 종자협회에 등록된 회사가 51개사이다. 이들 종묘회사들이 품종을 등록한 품종을 분류하여 보면 16개 회사가 채소전반의 종자를 육종 판매하는 것으로 나타났으며 17개 회사는 2~3개 과에 속하는 채소종자, 나머지 회사는 한두종의 종자만을 취급하는 것으로 나타났으며, 대부분의 회사는

100명 이하의 고용원으로 회사를 운영하고 10명 미만의 회사도 28개나 된다. 그러므로 각 작물종자의 육종 system을 갖출 수 있는 능력이 없을 뿐 아니라 특정한 작물에 대하여 전문성을 갖고 있는 연구원들이 거의 없는 실정이다.

작물 육종기술은 각 작물마다 특성이 다양하고 취급하는 방법과 적용하는 기술이 달라 작목별로 모든 단계의 작업과 기술을 갖추어야 좋은 품종의 종자를 생산할 수 있다. 따라서 종묘회사들 간에 작물별로 전문성을 확보하여 집중 개발하여야 종자 판매의 세계 경쟁이 가능하고 종자의 판매 규모도 확대될 수 있을 것이다.

둘째로, 작물별 육종방법과 연구 목표가 다양하여 일률적 기술 발전이 어렵다. 원예작물의 육종기술은 채소에 있어서 1대 잡종육종이 가장 많고, 과수에 있어서는 돌연변이 육종이 주종이며 재배면적이 적은 작물들은 자식성 작물과 같이 자연적으로 생산되는 종자를 수확 판매하는 육종방법이 가장 보편적이다. 그러므로 대부분의 원예작물 육종에서 해결해야 할 제일 중요한 문제점은 F₁ 채종을 위한 잡종종자 생산 system을 개발하는 것이다. 자가불화합성을 이용한 배추 등 십자화과 채소들은 자가불화합성의 불안정한 발현으로 종자의 순도가 90% 정도이나 외국에서는 종자 순도가 99% 이상을 요구하고 있기 때문에 새로운 잡종종자 생산체계를 필요로 하고 있다. 특히 양배추, 파, 당근, 상추 등과 같이 잡종종자 생산이 어려워 고정종을 쓰고 있는 작물에서는 잡종종자 생산체계 개발연구가 무엇보다 필요하다.

셋째로 앞으로는 환경친화형 재배양식이 도입될 것에 대비하여 각종 병해에 강한 품종의 육성이 시급하다. 주요 병해로는 무, 배추의 바이러스병, 노균병, 무사마귀병, 뿌리마름병, 무름병, 고추바이러스병, 세균성 점무늬병, 탄저병, 역병 등이다. 우선은 각 병해에 단일 저항성을 가진 품종을 육성하고 장기적인 목표로 복합병해 저항성인 품종을 육성하여야 할 것이다. 그러나 이들 중 몇몇 병을 제외하고는 저항성 소재가 없거나 저항성 기작이 간단하지 않다. 따라서 새로운 저항성 소재를 부단히 탐색하는 동시에 분자유전학 등의 새로운 기술을 적용하여야 내병성 품종 육성에 성공할 수 있을 것이다. 이 경우 큰 기업으로 흡수된 몇몇 대기업들은 자체적으로 문제를 해결할 수 있을 것이나 이들을 제외한 나머지 기업은 공공 (국가 연구소 및 대학)의 도움 없이는 사실상 육성의 어려움이 적지 않을 것이므로 새로운 연구협조 체계가 제시되어야 할 것이다.

끝으로 중요한 것은 가공 적성과 관련된 특성이 연구되어야 한다. 특히 김치의 수출이 연간 4000만 달러에 이르고 (농수산물유통공사, 1998) 국내시장도 끊임없이 확대되고 있는

가운데 업계는 균일한 제품을 생산하기 위한 원료의 계절 간 불균일성에 부심하고 있다. 현재는 가을에 수확되는 배추와 무는 김치를 제조하는 데 적합하나 봄과 여름에 생산되는 것은 대체로 수분의 함량이 많고 조직감도 떨어지는 등 김치 가공 적성에 맞지 않는 형편이다. 따라서 가공적성이 높은 품종의 개발이 시급하나 가공적성 특성에 관한 것은 밝혀진 것이 거의 없어 시급한 연구가 필요하다.

3. 작물유전체 연구개발 과제

최근 분자유전학 기술의 발전은 작물의 유전체의 구조를 밝히는 structure genome 분야의 획기적 발전을 이룩하여 유전자 지도의 작성, 유전자 marker를 이용한 선발법의 확립, 유전자 염기서열 분석 등 많은 연구 발전을 가져왔다. 또한 유전자의 기능을 탐구하는 functional genome 기술과 더불어 computer와 연결하여 분석할 수 있는 bioinformatics 기술이 새로이 창안되고 전세계적인 관심 속에서 발전하고 있다. 현재 세계적으로 벼, 옥수수, arabidopsis 등 몇몇 중요한 작물에서 상당한 양의 염기서열이 결정되고 유전자의 기능이 밝혀지는 등 실용성이 가시화되고 있지만 아직은 제한적인 작물에서 일부의 유전자가 개발되고 있으므로 우리나라에서도 적절한 투자와 노력을 기울이면 유전자를 대량으로 개발하여 생명공학 수준의 획기적 발전은 물론 특허권을 주장할 수 있는 기본재료와 원천기술을 확보할 수 있을 것으로 전망된다. 그러나 이 연구는 작물 전체 계통의 염기서열을 대상으로 하기 때문에 많은 투자와 상당한 시일을 요하는 대규모 사업이므로 중요한 작물들의 우선 순위를 결정하고 집중적 연구를 추진하여야 소기의 목적을 달성할 수 있을 것이다.

우리나라의 가장 중요한 식량인 벼의 genome 연구는 1990년부터 관행 육종과 분자 육종 기술을 연계 발전시키기 위하여 벼DNA 단편을 이용한 RFLP 유전자 지도를 작성하면서 시작되었다. 그 동안 작물육종 방법은 한 작물 내의 변이 중에서 우수한 개체를 선발 재배하여 좀더 우량한 품종을 부단히 개발 보급하여 왔으나 각 작물이 갖고 있는 유전적 변이의 실체를 정확히 평가 선발하는 기술이 확실히 못하기 때문에 어떤 특성들은 오랫동안 반복 선발하지 않으면 개량이 불가능하였고 또한 재배 환경 조건에 따라 발현양상이 달라 선발 효율이 낮고 검정에 소요되는 비용도 많이 들었다. 그러나 생명공학 기술의 발달로 DNA 단편을 쉽게 얻을 수 있고 PCR marker 등의 개발로 작물이 갖고 있는 유전자를 이용하여 환경변이를 배제하고 유전적 변이만을 선발할 수 있는 방법이 창안되고 있다.

농업과학기술원에서는 일본형 벼인 기호벼와 인도형 벼인 밀양 23호를 교배하여 single seed descending 방법으로 recombinant inbred line 164계통 (16세대) 육성하였으며, 이 재료를 이용하여 표현형 유전자, DNA marker, PCR marker, QTL 유전자 등 1,000개 이상의 유전자를 12개 염색체에 위

치시킴으로써 선발지표 및 map-base cloning에 이용할 수 있도록 유전자 지도를 만들었다. 이 지도를 이용하면 DNA 단편의 존재 유무를 근거로 유망한 형질, 즉 수량, 품질, 숙기, 용성불임 등의 존재 여부를 간접적으로 확인할 수 있으므로 여교잡을 이용한 multiline의 육성 또는 선발이 어려운 품질 관련 형질을 선발 육종할 경우 이용가능성이 높다. 특히 수량, 내병성, 품질 등 육종가들이 관심을 가지는 양적 형질의 유전자들은 환경에 의하여 변화되는 부분과 변화되지 않는 부분의 감별이 가능하여 60여 항목의 양적 형질들을 tagging 하므로써 이들 형질의 선발에 크게 기여하고 있다. 그러나 이 고밀도 유전자 지도의 육종적 이용이 부진하여 실용화 촉진 연구가 필요하다.

또한 핵산지문법을 이용하면 개체나 종의 판별이 가능하므로 육종계통의 고정도 또는 타품종의 혼입 등을 감별하는 데 편리하게 이용된다. 우리나라의 잡초성 벼에서 분리한 DNA 단편인 pKRD는 벼 genome에서 많은 copy 수를 갖고 있어서 품종마다 다양한 hybridization pattern을 보였다. 이 염기 배열 정보를 근거로 고안한 40여 종의 primer는 벼의 품종분류는 물론, 미생물, 동물종을 PCR로 분류하는 데 탁월한 효과가 있음이 밝혀졌다. 지금까지의 연구결과를 종합하여 보면 Universal Rice Primer (URP)는 20개의 핵산으로 구성된 oligomer로 55°C 이상의 annealing 온도에서 종간, 종내 계통간 특이적이며 재현성 높은 PCR Banding pattern이 보임으로써 종 구분 또는 혼종 구별에 확실하고 간편한 방법으로 이용성이 높음이 입증되었다. 현재 서린 과학에서 이 기술을 이용하여 SRILS Uniprimer Kit를 개발하여 판매하고 있으며 사용자가 차츰 증가하는 추세에 있다.

Random cDNA 단편 염기서열 분석으로 유용 유전자를 탐색하는 연구는 cDNA 카탈로그 작성, 발현 유전자의 단백질 정보 추정 및 성장 단계의 유전자 선별에 효과적으로 이용될 수 있다. 현재 벼 cDNA 분리 및 염기서열 분석은 일본형 벼의 미숙 종자로부터 만든 cDNA로부터 9,000여 개의 clone 부분 또는 전체 염기서열을 분석하고 그 유사성을 data base에서 비교함으로써 벼 유용 유전자 cloning에 필요한 정보를 얻어내고 있다. 현재 선진국에서는 유전자원의 보존과 함께 국제 유전정보 등록기관을 설치, 각국의 유전정보를 입수, 보존함과 동시에 자국의 유전정보에 관한 지적재산권을 보호하려는 노력을 하고 있다. 농촌진흥청 농업과학기술원과 명지대학교는 그 동안 국내에서 분석한 벼 유전정보를 모두 data base화하여 "Korea Rice Genome Data base Network"를 설치하고 미국 농무부에서 주관하는 rice genome internet mirror site를 구축하여 필요한 정보를 연구원에게 제공하고 있다. 그러나 벼 cDNA 유전자는 50,000개 정도로 추정되고 특히 조직 특이적 유전자 등은 거의 연구된 바가 없으며, 품종별 또는 근연 종간의 유전자 차이 등 많은 연구가 계속되어야 할 것이다. 특히 최근 미국, 일본 등 선진국에서 대규모 연구사업을 추진하고 있을 뿐 아니라, 몬산토 등 기업체에서

Table 3. Genome research projects to be pursued for rice and chinese cabbage in Korea.

Cloning of genes with useful functions
Expressed sequence tag (EST) analysis and full length cDNA cloning of tissue specific expressed gene
Cloning of abiotic or biotic stress-related Genes
Functional genomics
Insertional mutagenesis and mass screening of inactivated genes with T-DNA tagging populations
Mass screening of AC/DC insertional mutants and functional analysis
High-density DNA microarray using specific nucleotide sequence
Functional analysis of homeotic sequences
Gene mapping for rice and chinese cabbage
Comparative linkage mapping with DNA markers and quantitative traits
Comparative physical mapping on Korean cultivars
Establishment of near isogenic lines with useful traits

도 벼 genome 연구를 추진하고 있어, 국제 경쟁력을 얻기에 어려움이 예견된다. 따라서 벼 육종 연구에서 지속적으로 우위를 점하려면 세계적으로 실시되는 genome 연구사업에 참여하여 어느 정도의 지분 (지적 소유권)을 확보해야 하며 그렇지 못한 경우 유전자 활용에 어려움이 따를 것으로 추정되므로 획기적인 연구투자를 필요로 하고 있다.

벼의 functional genome 연구는 T-DNA를 형질전환 시켜 유전자의 기능을 저지시킴으로써 표지의 유전자 기능을 탐구하는 연구가 arabidopsis에서 시작된 이래 많은 연구가 진행되고 있다. 최근 포항공대의 안진홍 교수팀은 T-DNA를 promotor가 없는 βglucuronidase (GUS) 유전자와 link 시킨 후 벼에 형질전환시켜 30,000개의 유전자 전환체를 얻고 T-DNA에 의하여 발생된 돌연변이 개체를 선발 분석하여 벼 유전자의 기능을 분석하기 시작하였다. 경상대학교 한창덕 박사팀 역시도 transposon element를 벼에 유전자 전환시키고 T₁ 세대의 집단을 만들어 돌연변이체를 선발함으로써 벼 유전자의 기능을 분석하고 있다. 이 functional genome 연구는 유전자의 기능은 물론 표현형 결과까지를 연결시키는 획기적 연구이므로 전문 육종가들의 적극적 참여와 집중적 노력이 필요한 연구 사업이다.

벼의 bioinformatics에 대하여는 농업과학기술원과 명지대학교 남백희 교수팀에서 벼의 표현형적 유전자와 분자 유전자 지도를 연계하는 data base를 필두로 하여 EST 유전자의 정보 수록 등 정보화 system은 갖추었으나 본격적인 사업인 functional genome 결과, 유전자 칩의 생산 이용 연구 등은 아직 착수도 못하고 있는 실정이다. 따라서 우리의 벼 Genome 연구는 참여인원도 적고 연구 예산도 제한되어 연구 전체가 시작에 불과하므로 벼 유전체 연구에 많은 투자와 노력을 경주하여야 벼 종자개량 기술의 종속을 탈피할 것으로 추정된다.

배추에 대한 분자 유전학적 연구는 품종들 간의 Restriction

Fragment Length Polymorphisms (RFLPs) 분석, 미토콘드리아 게놈분석, cDNA의 clone 분리 및 differential screening에 의한 유용 유전자 분리 연구 등이 선별적으로 이루어져 왔다. 최근에는 서울대학교 최양도 교수가 농업과학기술원 등 여러 연구실과 공동으로 배추의 callus, 뿌리, 잎에서 mRNA를 추출 cDNA Library를 만들고 2,800개 clone의 염기서열을 분석한 결과 그 중 1,295 clone은 새로운 expressed sequence tag (EST)이었으며 많은 유전자들이 arabidopsis에서 보고된EST와 높은 상동성을 보였다고 보고하였다. 충남대학교 임용표 교수 (500 clone)와 경상대학교 조무제 교수 (2,500 clones) 등도 유용한 유전자를 cloning하기 위하여 배추 cDNA의 염기서열 분석을 실시하였으며 다수의 유전자에 대하여 full sequence를 GeneBank 데이터베이스에 등록하고 있다.

한편 임용표 교수는 농업과학기술원과 공동으로 RFLP 및 AFLP marker를 이용하여 배추 유전자 지도를 작성중에 있으며 특히 양적 형질 유전자를 tagging하기 위하여 북방형 배추와 남방형 배추를 교배하여 Double haploid 133계통을 만들었고 이를 이용하여 양적 형질의 유전분석을 시도하고 있다. 그러나 배추가 김치의 주재료로서 중요성이 있음에도 불구하고 연구 우선 순위가 낮아 배추 유전체 연구가 부진하므로 많은 투자와 관심이 필요하다. 특히, 전 게놈의 염기서열 분석이 완료된 arabidopsis와 유사성이 높기 때문에 밝혀진 연구결과를 실용화하기 쉽고 또 선진국들은 배추보다는 양배추의 연구를 우선하기 때문에 배추 genome 연구는 국제적 경쟁력이 높은 작물이라고 볼 수 있다.

유전체 연구는 생명체가 갖고 있는 유전자들을 포함하는 염색체의 유전자 지도를 작성하고 유전자 배열을 결정하고, 궁극적으로 유전자의 기능을 밝혀 작물 개량에 이용하려는 연구이므로 자연계에 있는 250만 종의 생명체가 모두 대상이 될 수 있다. 그러나 한정된 예산과 인원으로 많은 작물에 대한 연구를 동시에 시작하는 것보다는 특정한 작물에 집중투자 개발하는 것이 보다 효율적이라고 생각된다. 전술한 벼와 배추는 이미 연구가 착수되어 진행되고 있을 뿐 아니라 우리나라에서 작물로서의 중요성이 매우 크며 세계 경쟁에도 유리하므로 연구를 계속 추진하는 것이 바람직하다. 그 외에 작물로 유전체 연구의 필요성이 있는 작물로는 고추, 콩, 감자 등이 있고 앞으로 발전 가능성도 있다. 고추는 김치의 부재료로 쓰이는 외에 색소, 파스의 원료 등 용도가 다양할 뿐 아니라 항산화성 물질과 같은 기능성 물질이 많이 생산되는 작물로서 우리나라에서는 소비량이 많은 관계로 연구하는 데 유리한 작물이다. 또한 콩은 단백질 함량이 가장 높은 작물일 뿐 아니라 우리나라와 만주가 원산지이므로 유전자원의 다양성이 어느 지역보다 많고 특히 virus 병저항성 등 유용한 유전자원은 미국을 비롯한 아메리카 대륙에서 재배의 제한 요인을 극복할 수 있을 것으로 추정되기 때문에 콩의 유전자를 분리 이용하는 연구는 국제적으로 경쟁력이 높을 것으로 전

망된다. 또한 콩은 근류균과 공생관계에 있으므로 이에 관련된 유전자를 분석 이용함으로써 모든 다른 작물에서도 근류균에 의한 질소비료의 공급이 가능토록 유도할 수도 있어 콩의 genome 연구의 당위성은 매우 높다고 할 수 있다. 남북 교류가 활발해질 것을 전제한다면 북한의 주식이 벼, 옥수수, 감자 순으로 중요성이 부각되기 때문에 감자 genome 연구는 북한의 감자 개량사업에 큰 도움이 될 것으로 전망된다. 몇 년 전 북한에서는 농산물 증산을 위한 유전공학 연구 개발을 미국 등 선진국에 지원 요청한바 있으며 구체적으로 벼, 옥수수, 감자의 유전공학 기술을 발전시키고자 하였다. 이러한 맥락에서 감자에 대한 genome 사업은 낙후된 감자 육종사업을 지원할 뿐 아니라 앞으로 남북통일에 대비한 연구사업이 될 것으로 추측된다.

4. 유전자 전환 작물 개발 방향과 연구 과제

생명공학 기술이 비약적으로 발전하여 거의 모든 작물에서 유전자 전환이 가능하게 되었고, 따라서 선진 각국에서는 옥수수, 콩, 감자, 토마토 등 39개 품목이 농가에 보급되어 재배되고 있으며 앞으로 해마다 6000만 ha 이상의 면적에서 유전자 전환작물이 재배될 것으로 추정되고 있다. 우리나라에서도 농촌진흥청, 생명과학연구소, 각 대학 유전공학연구실, 종묘회사 등에서 새로운 기능을 발현하는 유전자 전환작물 개발을 많이 성공하고 있으나 제초제 저항성 벼 등 일부 작물에서만 개발을 발표하였을 뿐 아직 농가에 보급하였다는 보고는 없다.

그러나 ISAAA (International Service for the Acquisition of Agri-biotech Application)에 의하면 2000년 초에는 유전자 전환 작물 시장이 전세계에서 300만\$까지 확대될 것으로 전망하고 있고, 미국 남아메리카, 중국 등지에서의 유전자 전

환 작물의 확대 재배추세로 보아 머지 않아 우리나라 농가 재배가 시작될 것이므로 유전자 전환 작물개발의 집중적 연구 투자가 필요하다.

지금까지 개발한 유전자 전환 작물의 특성을 분류하여 보면 제초제 저항성 작물이 옥수수, 유채, 콩, 목화 등 가장 많은 작물에서 1,450건이 시험 중에 있거나 보급되고 있어 전체의 30%를 차지하고 있으며, 해충 저항성이 24%, 농산물 품질개량이 20%, virus를 포함한 병해 저항성이 23%, 기타가 5%로 분석되고 있다. 따라서 우리나라의 유전자 전환 작물개발도 유용성이 입증된 특성들부터 시작하여 우리나라의 현실에 특별히 필요한 분야를 개발하는 것이 바람직하다.

특히 환경 스트레스 저항성 작물 개발 연구는 우리나라와 같이 경지면적이 협소하여 식량자급률이 낮은 지역에서 한계 농지에서 작물재배지로 확대할 수 있는 유일한 돌파구라고 생각되어 중요성이 더욱 크다. 즉, 벼 등 식량작물에서 염해 저항성이 증가되면 빠른 시일에 간척지 재배가 가능할 것이고, 건조 저항성이 높으면 야산 등 한계농지에서도 작물 재배가 가능할 것이며, 내한성이 증가되면 북한지역의 농업생산성이 크게 향상될 것이므로 환경 스트레스 저항성 작물개발 연구를 강화시켜 나가야 할 것으로 전망된다. 최근 농업과학기술연구소에서 건조 저항성 작물개발의 일환으로 연구개발하고 있는 trehalose 유전자, glucose phosphate dehydrogenase 유전자는 한발과 염해에 견디는 정도를 크게 높임으로써 환경저해 저항성 작물개발에 큰 희망을 주고 있다.

한편 의약품으로 사용되고 있는 많은 제품들이 동식물이 생산하는 물질을 추출하거나 일부 정제하여 사용하고 있으며 일부는 물질의 분자구조를 규명하고 합성하여 사용하고 있다. 그러나 합성물질은 부작용이 다소 있고 소비자의 정서가 자연물질을 선호하기 때문에 재배작물에서 생산하여 이용하는 것을 바라고 있다. 특히 오늘날에는 노화 등 건강과 관련된 식품 이용이 소비자의 관심을 끌면서 작물의 신 기능성 물질을 다량 생산하도록 유도함으로써 부가가치를 향상시키는 연구가 농업발전엔 큰 역할을 할 것으로 기대되고 있다.

활성산소는 주위로부터 전자를 뺏으려는 성질이 강한 산소, 즉 superoxide radical, hydroxyl radical, 과산화수소, single oxygen 등이 체내에서 각종 물리적, 화학적 요인으로 인하여 암을 비롯하여 뇌질환, 심장질환, 동맥경화, 소화기질환, 자기면역질환 등 각종 질병을 일으켜 노화를 촉진한다고 보고됨에 따라 이를 제거하기 위한 연구가 진행 중에 있다. 정상적인 세포에서는 어느 정도 free radical에 대한 방어기구로서 superoxide dismutase, catalase, peroxidase 등 항산화성 효소와 비타민 E, 비타민 C, glutathione, ubiquinone 등 전구물질이 존재함으로써 노화와 질병을 예방하고 있는데, 이들 물질들은 모든 생명체에 존재하는 물질이며 작물은 이러한 물질을 대량으로 값싸게 생산할 수 있는 체제를 구비하고 있다. 그러므로 천연 항산화물질을 식물에서 찾는 데 연구를 집중하고 있으며 항산화성이 우수한 물질을 찾을 경우 신선한 채

Table 4. Gene transformation projects to be pursued for crop improvement in Korea.

Development of herbicide resistant rice, soybean, hot pepper and chinese cabbage
Development of disease resistant crops
Rice: blast disease-resistance
Hot pepper : resistance against anthracnose (<i>Bacillus anthrax</i>), phytophthora blight and virus
Chinese cabbage : resistance against <i>Erwinia carotovora</i> and Turnip mosaic virus
Cloning of genes related to plant defence signaling pathway and defense mechanism
Expression of the <i>hsp</i> genes and plant host interactions (Gene for gene interaction)
Development of pest resistant crops
Development of resistant plant against sucking insects
Development of resistant plant against broad spectrum insects by modification of <i>cry</i> genes
Development of systems for delaying acquired mutation of insects from transgenic plants

소에서 생산 식용하면 채소의 가격 상승을 유도할 수 있을 것으로 전망되고 있다. 따라서 이들 항산화성 물질을 생산하는 유전자를 식물체에 형질 전환한다든가 물질생산 유전자의 과발현을 유도함으로써 값싼 항산화물질을 생산하도록 하는 연구가 각광을 받을 것으로 전망된다.

또한, 최근 선진국의 조사보고에 따르면 현대인은 혈관이나 혈액의 이상으로 인한 사망이 전체 사망자의 39%로 악성종양에 의한 사망(20%)보다 훨씬 높을 것으로 나타나 있다. 생체 내에서 혈액은 응고와 용해작용이 항상 평형을 이루고 있으며 정상적인 경우 혈전은 형성되지 않는다. 그러나 여러 가지 원인으로 균형이 깨져 혈전이 형성되면 혈관을 막게 되고 따라서 산소공급이 중단되며 뇌혈전증이 일어나 뇌졸중, 심장마비 등을 일으킨다. 혈전은 주로 혈소판의 과도한 응집에 의하여 유도되며 arachidonic acid 대사계로부터 생합성되는 eicosanoid류의 물질이 기인한다고 한다. 어떤 종류의 채소나 향신료는 이들 항혈전, 항천식 작용을 하는 물질들을 생산하는 것으로 알려져 있으며 이러한 물질을 채소에서 다량 생산되도록 유도할 경우 채소의 소비량과 부가가치를 높일 수 있을 것이다. 특히 버섯류, 산채류 및 해조류 등이 이러한 항혈전 물질을 다량 함유하고 있으므로 이들의 추출 및 정제기술도 연구 대상이 될 것이다.

혈압조절 물질 생산 작물 개발연구는 혈압조절 물질인 Angiotensin I 변환효소(Angiotensin I converting enzyme; ACE)가 뱀독에서 발견된 이래 capyopriole, euarapriole 등 많은 peptide를 합성하였으며 각종 식품의 추출액이 ACE 저해 활성을 갖는 것이 보고되면서 옥수수, 밀, 대두, 쌀 단백질 및 정어리, 가다랭이 등에서 여러 종류의 ACE 저해 peptide가 연구되어 보고되고 있다. 따라서 이들 peptide성 저해물질은 단백질을 2차로 가수분해하고 정제하는 과정을 연구하여야 식품의 부가가치를 증진시킬 수가 있다.

한편으로는 그 동안 통용되고 있는 백신 접종도 수혜자에

게 예기치 않은 질병 감염 등 부작용이 알려지면서 경구투여 백신의 개발 이용이 논의되고 있고, 음식으로서 백신을 직접 사용할 경우에도 흡수가 가능하다는 연구 결과로 인하여 경구용 백신 유전자 전환 작물 개발이 각광을 받고 있다. 특히 미국, 영국 등 과학선진국에서는 의약품을 식품으로 대체하려는 노력이 진행되고 있어 개발 가능성이 높은 것으로 인식되고 있다.

경구용 백신은 장내에서 산과 효소작용에 의하여 분해되지 않고 흡수되어 혈액까지 도달되어야 하는 조건을 갖추고 있어야 하기 때문에 개발대상을 선정하기가 매우 까다롭다. 그러나 백신의 경구투여 시도와 그 효과가 보고된 이후 사용의 간편성과 소비자의 높은 선호도로 인하여 경구백신에 대한 연구개발에 많은 노력을 기울이고 있다. 현재 salmonella, diphtheria, cholera 및 bacteria antigen을 이용한 사람의 경구백신 생산작물을 개발하고 있고 또한 가축용 백신, 즉 닭의 Newcastle disease 나 개의 파보바이러스에 대한 백신작물도 연구개발 중에 있다.

요 약

유전공학 기술은 지금까지 발전 유지하여 온 전통 육종기술의 약점을 보완하고 연계할 때만이 무한한 잠재력을 발휘할 수 있기 때문에 농업생산에서 새로운 전기를 마련할 수 있는 품종개발을 전제로 연구 방향을 설정하는 것이 바람직하다. 따라서 우리나라의 품종 보급의 양대 축인 정부 주도의 식량작물 육종사업과 개인 종묘회사가 주도하는 원예작물 육종사업에 필요한 유전공학연구를 수행해야 할 것이며 철저한 현황파악과 성공가능성을 세계 경쟁의 입장에서 분석하여 연구의 우선 순위를 정하고 집중적인 인력 양성과 연구투자를 지속하여야 결실을 얻을 것으로 본다.

유전공학연구의 기본 방향으로는 실용화 촉진을 위한 연구와 원천기술확보를 위한 기초 연구로 대별하여 농가 또는 작물 육종기관에 필요한 연구는 농림부에서 주관하고 원천 기술 확보를 위한 기초연구는 과학기술부에서 주도하여 구체적이고 실현 가능한 정책을 수립 추진하여야 할 것이다.

구체적으로 실용화 촉진연구는 전통 육종 기술의 목표인 획기적 수량증대, 작물의 재배안정성 향상 및 품질 개량범주에 속하는 유전자 전환작물 개발 및 생리활성물질 생산 작물의 개발로 볼 수 있으며 기초 연구로서는 각 작물의 유전체 연구개발과제라고 생각된다.

이미 선진국에서는 몬산토 등 대기업을 중심으로 대두, 옥수수, 감자, 유채 등 주요 작물에서 제초제 저항성, 내충성, 내병성 등 유전자 전환작물을 상용화하여 농업 생산비를 절감하고 수확성을 향상시키는 등 기술 부가가치를 높이고 있으며, 이들 수확물을 수출하거나 또는 종자로 수출하여 농업의 상업화와 국제화를 추진하고 있는 동시에 지적소유권을 선점

Table 5. Development of transgenic crops for producing commercially valuable substance in Korea.

Development of antioxidants producing Transgenic crops
Screening noble antioxidants from wild herbs
Identification of action mechanism of antioxidants
Cloning and expression of genes for antioxidant biosynthesis
Development of substance for anti-angiogenesis and anti-thrombosis producing transgenic plants
Screening of anti-inflammation, anti-angiogenesis and anti-thrombosis substances from the wild herbs and microorganisms
Screening of blood pressure regulating substances from the wild herbs and microorganisms
Cloning and expression of the genes for the anti-angiogenesis and thrombosis
Development of edible vaccines producing transgenic crops
Vaccines against diphtheria, cholera and salmonella
Vaccines against Newcastle disease, bacteria antigen and phabovirus

하고 그 기술까지 수출하고 있는 실정이다. 국내에서도 유전 공학 연구가 어느 정도 수행되어 벼를 비롯한 주요 농작물의 형질 전환 기술이 정립되었고 다양한 소재로부터 개발된 신 기능성 형질전환작물이 개발되고 있으나 아직은 농가 및 농장에 보급되지 못하고 연구소나 대학 실험포장에 격리 실험을 실시 중에 있다. 또한 기초 연구인 유전체 연구로 국, 공립 연구소 및 대학 실험실에서 벼, 배추, 고추 등 일부 작물에서 산발적으로 시작되어 유전자 지도 작성 및 유용 유전자 개발 등 필수적인 연구를 시작하고 있으나 연구비와 인력 부족으로 국제 경쟁력을 갖추지 못하고 있다. 그러므로 앞으로의 과제는 연구 중에 있는 과제들을 보다 활성화하여 연구결과를 조속히 얻도록 노력해야 하며 새로 시작하는 과제는 연구기관의 능력과 연구 후의 실용화를 촉진할 수 있도록 일괄 system 확립을 전제로 하는 협동연구체제로 수행하는 것이 바람직하다.

그 동안 식량작물의 종자개량 및 보급사업은 정부주도로 국공립 연구소를 중심으로 수행되어 왔으나 앞으로는 민영화 및 기업화를 촉진하는 정책을 추진하여야 외국의 종자회사 또는 농업 생산자와 경쟁할 수 있는 농기업 체제가 탄생될 것이다. 또한 국공립 연구 기관은 대학 및 개인회사연구소의 농업 연구를 지원하는 Infra system 확충을 목표로 연구 방향을 수정해야 할 것이며 유전 자원 연구, 작물 유전체 연구 등 직접적으로 수익성이 없는 기초적 연구에 치중하여 나라 전체의 연구 수준을 향상시키도록 노력해야 21세기에 농업에서 국제 경쟁력을 확보할 수 있을 것으로 보여진다.

인용문헌

- An GH (2000) T-DNA tagging in rice. Proceeding of first symposium of plant molecular genetics and breeding pp. 47-55, Seoul national university
- Byun MO, Kwon HB, Lee SB, and Bae SH (2000) Transgenic plants expressing trehalos biosynthetic gene, Reaserch trends and prospects of stress related genes (NIAST), pp. 1-99
- Chin HG, Choe MS, Lee SH, Park SH, Koo IC, Kim NY, Lee JJ, Oh BG, Yi GH, Kim SH, Choi HC, Cho MJ and Han CD (1999) Molecular analysis of rice plants harboring an Ac/Ds transposable element mediated gene trapping system. Plant J. 19:615-624
- Cho YG, McChouch SR, Kuiper M, Kang MR, Pot J, Groenen JTM and Eun MY (1998) Intergration map of AFLP, SSLP, and RFLP markers using a recombinant inbred population of rice (*Oryzae sativa* L.). Theor. Appl. Genet. 97:370-380
- Chung TY, Lee SS, Park HG, Lee YS, You CY and kwag JK (1999) Planning for horticultural crop improvements based on biotechnology application, Ministry of Science and Technology project report 98-PA-01-18-A
- Daniell H (2000) Novel approches in biotechnology: Engineering the chloroplast genome to cinfer biotic stress: Research trends and prospects of stress related genes, pp. 49-61
- Eun MY (2000) Recent progress of Korea rice genome research program. Molecular genetics and breeding pp. 67-74, Seoul national university.
- Gale MD and Devos KM (1998) Plants comparative genetics after 10 years. Science 282:656-658
- Kwon YS, Eun MY, and Sohn JK (2000) QLT mapping and marker-assisted selection (MAS) associated with anther culturability in rice. Plants & Animal Genome VIII Conference, SanDiego, CA, USA
- Kim KH, Kim SD, Park HW, and Moon HP (1999) Breeding strategies to increase production potential of major food crop in Korea. Proceeding of symposium of overcome food crisis in the 21th century, Korean Journal of Breeding, korean crop science
- Park HG (2000) Molecular breeding for plant disease resistance, prospects and problems. Proceeding of first symposium of plant molecular genetics and breeding pp. 33-44, Seoul national university
- Park HG (2000) Seed was in the 21th century and prospect. Proceeding of the symposium of seed was in the 21th century pp. 3-19, Korean plant breeding society
- Sohn JK and Yang SJ (1993) Genetic analysis of callus formation and plant regeneration in anther culture of rice. Korean J. Breeding 25:102-107
- Strauberg RL and Austin MJF (1999) Functional Genomics: technological challenges and opportunities; physiol. Genomics, pp. 25-32
- Sugimoto K and Takeoka Y (1998) Genetic analysis of plant regeneration in anther culture of rice (*Oryzae sativa* L.). Breeding science 48:115-121
- Sundaresan V, Springer P, Vlpe T, Haward S, Johnes JDG, Dean C, Ma H and Martienssen R (1995) Patterns of gene action in plant development revealed by enhancer trap and gene trap transposable elements. gened Dev 9:1797-1810