

분자육종을 통한 조건불리지역 친환경 산업용 고구마 개발 전략

김명덕 · 안영욱 · 김윤희 · 김차영 · 이증주 · 정재철 · 이행순 · 목일진 · 곽상수

Strategies of development of environmentally friendly industrial sweetpotato on marginal lands by molecular breeding

Myoung Duck Kim · Young Ock Ahn · Yun-Hee Kim · Cha Young Kim · Jeung-Joo Lee · Jae Cheol Jeong · Haeng-Soon Lee · Il-Gin Mok · Sang-Soo Kwak

Received: 2 September 2009 / Accepted: 8 September 2009
© Korean Society for Plant Biotechnology

Abstract The food self-support rate on the basis of cereals in Korea is approximately 27%, which will threaten the national food security. The dramatic increase in population accompanied by rapid industrialization in developing countries has caused imbalances in the supply of food and energy. To cope with these global crises over food and energy supplies as well as environmental problems, it is urgently required to develop new environmentally friendly industrial crop varieties to be grown on marginal lands including desertification areas for sustainable development. Sweetpotato (*Ipomoea batatas* (L.) Lam.) ranks seventh in annual production among food crops in the world. Its wide adaptability on marginal lands and rich nutritional content provide a high potential for preventing malnutrition and enhancing food security in the developing countries. In addition, sweetpotato can be developed as a bioreactor to produce valuable industrial materials including bio-ethanol, functional

feed and antioxidants by molecular breeding. In this respect, we focus on the molecular breeding of sweetpotato with multi-function on marginal lands. The strategies for development of environmentally friendly industrial sweetpotato will be introduced and discussed.

서론

고구마 [*Ipomoea batatas* (L.) Lam.]는 세계 7대 농작물로 식량뿐 만 아니라 사료, 전분, 주정 등으로 이용된다. 고구마는 개발도상국의 구황작물로서 주로 재배되어 왔으나, 최근 21세기 최고의 산업용 식물의 하나로 재인식되고 있다 (Liu 2008). 국제감자연구소 (International Potato Center, CIP)는 고구마 유전자원 확보, 관리를 비롯하여 주로 아프리카 등 개발도상국가에 적합한 베타카로틴 고함유 신기능성 고구마 등을 개발하고 있다. 일본 토요타자동차는 생분해성 플라스틱, 가축사료 등을 생산하기 위하여 인도네시아에서 고구마를 상업적으로 재배하고 있다 (www.toyota.co.jp). 미국 농무성 (USDA)은 2008년 바이오에탄올 생산 작물인 옥수수, 카사바, 고구마를 재배한 결과 고구마가 조건불리지역 (marginal land)에 가장 적합한 바이오에너지작물로 평가하였다 (www.ars.usda.gov). 최근 미국공익과학단체 (CSPI)는 2007년 최고의 건강식품 10종을 선별하면서 고구마를 첫 번째로 열거하였다. FAO 2007년 통계에서 고구마는 전 세계 8,751천 ha에서 129,404천톤을 생산하고 있다. 이 가운데 중국에서 82.8% (19,717만톤)을 생산하고 있고, 한국은 0.2% (29만톤)을 생산한다. 최근 우리나라 농림수산식품 R&D 투자실적 분석에서 33개 주요 농축산물 가운데 고구마는 투자금액이 24위인데 비

M. D. Kim · Y. O. Ahn · Y.-H. Kim · J. C. Jeong · H.-S. Lee · I.-G. Mok · S.-S. Kwak (✉)
한국생명공학연구원 환경바이오연구센터
(Environmental Biotechnology Research Center, Korea Research Institute of Bioscience and Biotechnology (KRIBB), Yuseong, Daejeon 305-806, Korea)
e-mail: sskwak@kribb.re.kr

C. Y. Kim
한국생명공학연구원 생물산업기술연구센터
(Bioindustry Research Center, Korea Research Institute of Bioscience and Biotechnology (KRIBB), Yuseong, Daejeon 305-806, Korea)

J.-J. Lee
경상대학교 농생명학부
(Department of Applied Biology & Environmental Sciences, Gyeongsang National University, Jinju 660-701, Korea)

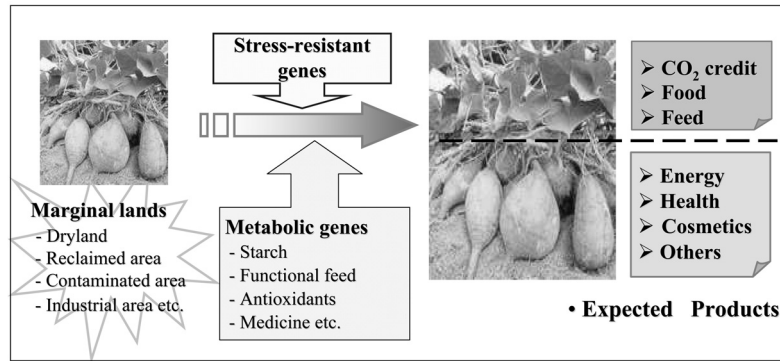


Fig. 1 Strategy for development of environmentally friendly industrial sweetpotato on marginal lands

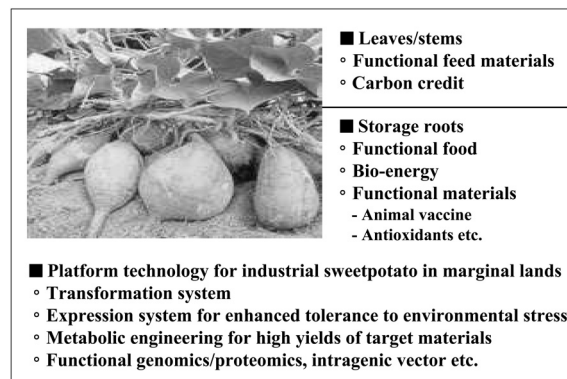


Fig. 2 Metabolic engineering for industrial sweetpotato plants with a multi-purpose for sustainable development on marginal lands at Korea Research Institute of Bioscience and Biotechnology (KRIBB)

하여 2007년 생산액에서는 작물 가운데 쌀 다음으로 높게 나타났다 (ICALS 2009). 고구마는 국민이 좋아하고 농민이 선호하는 작물인 점을 고려한다면 연구개발에 보다 많은 투자를 할 필요가 있다.

급속한 산업화와 인구증가는 세계적인 에너지문제, 환경문제, 식량문제를 일으키고 있다. 2050년 세계 인구는 90억이 넘을 것이며, 지금보다 약 2배의 식량이 필요할 것으로 추정된다. 특히 중국을 포함한 개도국의 소득증가는 동물성단백질 섭취량의 비약적인 증가로 이어진다. 월드워치연구소 Rester Brown (1995)은 보고서 ‘누가 중국을 먹여 살릴 것인가’를 발표한다. 정상적인 경작지에서 재배되는 농작물은 식량으로 활용되어야 할 것이며, 조건 불리지역에서 확보되는 산업용 농작물은 개발자의 용도에 맞게 이용될 수 있을 것이다. 기후변화로 건조지역이 확산되고 화학비료와 농약의 사용으로 생산성이 감소하는 점 등을 고려한다면, 사막화지역, 간척지역, 공해지역 등 국내·외 조건 불리지역에도 재배 가능한 농작물을 개발할 필요가 있다. 이런 관점에서 저자들은 중국 사막화지역을 포함하여 조건 불리지역에 잘 자라면서 고부가가치를 창출하는 친환경 산업용 고구마를 개발하고 있다 (Fig. 1). 본 논문에서는 저자들이 수행하는 연구를 중심으로 친환경 산업용 고구마 개발전략과 전망에

대하여 소개한다 (Fig. 2).

복합 환경재해 내성 유전자 발현시스템 구축

조건 불리지역에 적합한 산업용 식물을 개발하기 위해서는 복합 환경스트레스에 내성을 갖는 최적의 발현시스템을 구축해야한다. 이를 위해서는 환경스트레스 유도성 프로모터 조절로 복합 환경내성 유전자를 발현시킬 필요가 있다. 저자들은 고구마 배양세포에서 산화스트레스에 강하게 발현하는 퍼옥시다제 (SWPA2) 프로모터를 개발하여 항산화효소 유전자 (SOD와 APX)와 스트레스 조건에서 항산화유전자를 조절하는 전사인자 NDPK2를 발현하는 형질전환 고구마를 제조하여 제반 특성을 조사하였다 (Kim et al. 2003; Lim et al. 2007; Kim et al. 2009b). 현재는 건조지역, 추운지역 등 특정지역에 적합한 환경 재해 내성 고구마를 제조하고 있다. 중국농업과학원 고구마연구소와 협력하여 중국 사막화지역에 적합한 고구마 유전자를 선발하여 분자유종 등으로 건조지역에 적합한 친환경 산업용 고구마를 개발하고 있다 (Mok et al. 2009). 이를 위하여 저자들은 고구마 잎을 대상으로 항산화활성이 높은 품종을 선발하고 있다 (Kim et al. 2009c).

열대가 원산지인 고구마는 저온에 민감한 작물이다.

2007년 FAO 통계에 의하면 북한의 고구마 재배면적은 남한보다 약 1.87배 많지만, 단위면적당 생산은 북한이 남한의 67.7%밖에 되지 않는다. 낮은 생산성의 가장 큰 이유는 북한지역이 춥기 때문이다. 저온에 잘 견디는 고구마를 개발하면 북한지역에 높은 수량을 기대할 수 있다. 이를 위해 저자들은 대두에서 분리한 SCOF-1 유전자와 박테리아에서 분리한 levansucrase 유전자를 도입한 고구마를 제조하고 있다 (Song et al. 1993; Kim et al. 2001).

고구마 뿌리 고발현 시스템 구축

고구마 뿌리를 유용소재를 생산하는 생체반응기 (bioreactor)로서 활용하기 위해서는 뿌리에 고발현하는 발현시스템을 구축할 필요가 있다. 일본 나고야대학에서 고구마 저장뿌리에 고발현하는 sporamin promoter에 대한 연구가 되어 있으나 아직 이를 이용한 산업용 고구마에 대한 보고는 없다 (Hattori and Nakamura 1988). 저자들은 건조 처리한 고구마 뿌리에서 확보한 ESTs와 GenBank D/B에서 뿌리특이적 고발현 유전자를 분리하였다 (Kim et al. 2009a). RT-PCR을 통하여 IbTIP1을 포함하여 수종의 뿌리 고발현 유전자의 프로모터를 분리하여 형질전환 고구마를 제조하여 프로모터의 활성을 조사하고 있다.

바이오에탄올 생산용 고구마 개발

고구마는 품종에 따라 차이가 있지만 생체중량의 약 26%, 건조중량의 약 79%가 전분이다. 고구마 전분은 아밀로스 약 15%와 아밀로펙틴 약 85%로 구성되어 있다. 바이오에탄올 생산용 고구마를 위해서는 기존의 유전자원 가운데 전분함량이 높은 것을 이용하는 것이 바람직하다. 또한 전분 생합성 관련 유전자를 이용한 대사공학으로 전분 함량을 증대할 수 있을 것이다. 저자들은 조건이 나쁜 지역에서 바이오매스를 증가시켜 바이오에탄올 생산하고자 한다. 또한 RNAi기술 등을 이용하면 고구마 전분의 용도에 맞추어 아밀로스와 아밀로펙틴의 조성을 달리하는 고구마를 제조하는 것이 가능하다. 일반적으로 생분해성 플라스틱 생산을 위해서는 아밀로펙틴 조성이 높은 것이, 바이오에탄올 용도로는 아밀로스 함량이 높은 것이 바람직할 것이다. ADP-glucose에서 아밀로스를 생합성하는 GBSSI를 RNAi방법으로 억제시킨 아밀로펙틴 고함량 고구마에 관한 연구가 있다 (Otani et al. 2007). 고구마에서 바이오에탄올 생산을 위한 전분 대사공학에 대해서는 Ahn 등 (2009b)을 참고 바란다.

기능성 사료용 고구마 개발

개발도상국의 소득증대로 인해 증가하는 동물성단백

질 요구는 세계적인 식량문제를 야기시키고 있다. 이런 관점에서 조건 불리지역에서 재배한 고구마는 가축 특히 돼지의 사료로 이용될 수 있다. 중국은 고구마 생산의 약 50%를 가축의 사료로 이용하고 있다. 저장뿌리와 함께 엽병, 잎 등 지상부도 가축의 매우 좋은 영양원으로 이용될 수 있다. 저자들은 기능성 사료첨가제로 이용되는 레반 (levan), 가축의 성장을 좋게하고 축산분뇨에서 인 (phosphate) 발생을 경감시키는 phytase, 돼지설사병 항원 단백질 등을 생산하는 고구마를 개발하고 있다. 레반은 발효다당류 프락탄의 일종으로 기능성 사료뿐만 아니라 식물체에서 가뭄에 대한 내삼투압 (osmoprotectant) 및 추위에 대한 내한성 증진에 효과가 있다. 저자들은 *Zymomonas mobilis*로부터 분리한 levansucrase 유전자 (Song et al. 1993)를 도입한 형질전환 고구마를 제조하고 있다. Phytase는 사료내의 이용되기 어려운 phytate를 분해하여 인의 흡수 이용을 증가시키고 가축 분뇨에 배설되는 인의 양을 감소시켜 환경오염을 경감시킬 수 있다. 세균(*Bacillus amyloliquefaciens* DS11)에서 분리한 phytase를 발현하는 고구마를 제조하여 증식하고 있다. 코로나비라계 바이러스에 의해 발생하는 돼지 유행성 설사병 (porcine epidemic diarrhea, PED)는 감염 후 3~4일에 폐사되는 중요 질병이다. PED virus의 스파이크 단백질을 코딩하는 유전자를 고구마에 발현시켜 항원단백질을 생산하는 고구마를 제조하였다 (Yang et al. 2005). 고구마 수확 후 잎에도 높은 항산화활성을 가지고 있어 수확 후 부산물인 지상부도 좋은 기능성 사료가 될 수 있음이 확인되었다 (Ahn et al. 2009a). 향후 이들 형질전환체의 기능성을 조사할 예정이다.

항산화물질 생산용 고구마 개발

고구마는 비타민C, 베타카로틴, 안토시아닌 등 항산화물질을 고함유하고 있어 척박한 땅에도 비교적 잘라고 건강식품으로 평가되고 있다 (Bovell-Benjamin 2007). 고구마 유래 항산화물질 특히 베타카로틴과 안토시아닌을 많이 생산하는 고구마는 조건 불리지역에 적합한 산업용 고구마로 이용이 기대된다. 저자들은 베타카로틴 생산을 최대화하기 위하여 베타카로틴의 생합성과 대사를 조절하여 베타카로틴을 축적하는 고구마를 제조하고 있다 (미발표 결과). 한편 꽃양배추에서 분리한 orange 유전자의 alternative splicing variant가 카로티노이드 함량을 축적시키는데 관여하는 것이 보고되었다 (Lu et al. 2006). 저자들은 베타카로틴 고함유 고구마에서 Iborange 유전자를 분리하여 베타카로틴 고함유 고구마를 제조하고 있다. Mano 등 (2007)은 자색고구마에서 안토시아닌 생합성 전자조절인자인 IbMYB1 유전자를 분리하여 형질전환 배양세포에서 안토시아닌을 축적하는 것을 보고하였다. 저자들도 자색고구마에서 IbMYB1 유전자를 분리하여

형질전환 담배와 애기장대에서 안토시아닌을 생산하는 것을 확인하였다 (Kim et al. in preparation).

고구마 유전체 및 단백질체 연구

고구마는 세계 7대 작물임에도 불구하고 유전체 연구가 매우 미흡한 실정이다. 고구마의 유전체 길이가 사람과 비슷한 3,000 Mb으로 추정되며 현재 약 22,371 ESTs가 NCBI에 등록되어 있는 정도이다. 감자는 236,000 ESTs가 등록되어 있다. 고구마 단백질체 연구에 관한 보고는 없으며, 최근 Lee 등 (2008)이 고구마 저장뿌리의 단백질체에 대한 보고가 있다. 이와 같이 고구마 유전체와 단백질체 해석이 부족한 이유는 고구마의 염색체가 6배체 ($2n=6x=90$)이며 유전체 사이즈가 큰 이유도 있지만, 고구마가 최근까지 못하는 사람들의 구황작물로서 선진국의 연구자에게 큰 주목을 받지 못한 것이 큰 이유로 생각된다. 최근 고구마가 친환경 산업용 소재로 급부상하고 있어 고구마 유전체 및 단백질체에 대한 연구가 크게 증가할 것으로 기대된다 (Ma and Liu, 2005).

Intragenic vector 개발

유전자변형생물 (GMO)에 대한 인체위해성과 환경위해성에 대한 논란이 계속되고 있다. 우리나라와 고위도 지역에서 고구마는 꽃이 거의 피지 않아 유전자변형 고구마에서 산업소재를 생산할 경우는 인체와 환경의 피해를 최소화할 수 있는 장점이 있다. GM식물로서 안전성을 확보하고 기능성 식품과 가축사료 용도로 고구마가 이용되기 위해서 저자들은 고구마 형질전환용 intragenic vector를 뉴질랜드 연구팀과 협력하여 개발하고 있다. Intragenic vector는 형질전환기술을 이용하여 GM식물을 제조하더라도 외래유전자가 도입되지 않도록 제작된 벡터이다 (Conner et al. 2007). 고구마에 분리한 색소성분 유전자는 intragenic vector의 선별표지로 이용이 기대된다.

적 요

향후 예상되는 세계 식량대란에 대비하기 위하여 생명공학기술을 이용한 '조건 불리지역에 적합한 친환경 산업용 고구마 개발'에 대한 전략을 기술하였다. 저자들은 조건 불리지역에 잘 자라면서 바이오에탄올, 기능성 가축사료, 항산화물질 등 각종 산업소재를 한 품종에서 모두 생산하는 고구마 개발을 목표로 하고 있다. 특히 환경위해성과 인체위해성을 극복할 수 있는 intragenic vector를 이용하여 국내외 조건 불리지역에서 고부가가치 산업

소재를 생산하는 고구마를 개발하면 21세기 인류가 당면한 환경문제, 식량문제, 에너지문제, 보건문제 해결에 크게 할 것으로 기대된다. 이를 위해서는 국내외 연구자들과 협력하여 해당지역의 적합한 유전자원을 선별하여 첨단 생명공학기술을 이용하여 산업용 고구마를 개발할 필요가 있다.

사 사

본 연구는 농촌진흥청 바이오그린21사업 (20070301034015), 한국생명공학연구원 주요사업, 한중공동연구프로그램의 지원으로 수행되었다.

인용문헌

- Ahn YO, Kim SH, Lee HS, Lee JS, Ma D, Kwak SS (2009a) Contents of low molecular weight antioxidants in the leaves of different sweetpotato cultivars at harvest. *J Plant Biotechnol* 36(3): (in press)
- Ahn YO, Yang KS, Lim SH, Kwak SS, Lee HS (2009b) Current status on metabolic engineering of starch in sweetpotato. *J Plant Biotechnol* 36(3): (in press)
- Bovell-Benjamin AC (2007) Sweet potato: a review of its past, present, and future role in human nutrition. *Adv Food Nur Res* 52:1-59
- ICALS (2009) Report on R&D investment in the field of food, agriculture, forestry and fisheries. Science and Technology Committee for Food, Agriculture, Forestry and Fisheries. August 18, 2009. Ministry for Food, Agriculture, Forestry and Fisheries (in Korean)
- Brown LR (1995) Who will feed China ? W.W. Norton & Company
- Conner AJ, Barrell PJ, Baldwin SJ, Lokerse AS, Cooper P, Erasmuson AK, Nap JP, Jacobs JME (2007) Intragenic vectors for gene transfer without foreign DNA. *Euphytica* 154:341-353
- Hattori T, Nakamura K (1988) Genes encoding for the major tuberous root protein of sweet potato: identification of putative regulatory sequence in the 5' upstream region. *Plant Mol Biol* 11:417-426
- Kim CY, Ahn YO, Kim SH, Kim YH, Lee HS, Kwak SS. Expression of sweetpotato IbMYB1 transcription factor gene induced anthocyanin accumulation in tobacco leaves (in preparation).
- Kim JC, Lee SH, Cheong YH, Yoo CH, Lee SI, Chum HJ, Yun DJ, Hon JC, Lee SY, Lim CO, Cho MJ (2001) A novel cold-inducible zinc finger protein from soybean, SCOF-1, enhances cold tolerance in transgenic plants. *Plant J* 25:247-259
- Kim KY, Kwon SY, Lee HS, Hur YK, Bang JW, Kwak SS (2003) A novel oxidative stress-inducible peroxidase promoter from

- sweetpotato: molecular cloning and characterization in transgenic tobacco plants and cultured cells. *Plant Mol Biol* 51: 831-838
- Kim SH, Song WK, Kim KY, Kim YH, Kwon SY, Lee HS, Lee IC, Kwak SS (2009a) Characterization of full-length enriched expressed sequence tags of dehydration-treated white fibrous roots of sweetpotato. *BMB Rep* 42:271-276
- Kim YH, Lim S, Yang KS, Kim CY, Kwon SY, Lee HS, Wang X, Zhou Z, Ma D, Yun DJ, Kwak SS (2009b) Transgenic sweetpotato plants overexpressing nucleoside diphosphate kinase 2 showed increased antioxidant enzyme activities and enhanced tolerance to multiple environmental stresses. *Mol Breeding* 24:233-244
- Kim YH, Park SC, Yang KS, Zhou Z, Ma D, Jeong JC, Lee HS, Kwak SS (2009c) Selection of oxidative stress-tolerant sweetpotato cultivars for cultivation on marginal lands. *J Plant Biotechnol* 36(3): (in press)
- Lee JJ, An JY, Lee HS, Lee JS, Kwak SS (2008) Proteomic analysis in three sweetpotato cultivars with different fresh color of storage roots. Proceedings of 3rd China-Japan-Korea Workshop on Sweetpotato. October 12~15, 2008, Beijing, China. pp 34-36.
- Loebenstein G, Thottappilly G (2009) *The Sweetpotato*. Springer. pp 1-522
- Lim S, Kim YH, Kim SH, Kwon SY, Lee HS, Kim JG, Cho CY, Paek KY, Kwak SS (2007) Enhanced tolerance of transgenic sweetpotato plants expressing both superoxide dismutase and ascorbate peroxidase in chloroplasts against methyl viologen-mediated oxidative stress. *Mol Breeding* 19:227-239
- Liu Q (2008) Sustainable Sweetpotato Production Technology for Food, Energy, Health and Environment. Proceedings of 3rd China-Japan-Korea Workshop on Sweetpotato. October 12~15, 2008, Beijing, China. China Agricultural University Press. pp 1-439
- Lu S, Eck JV, Zhou X, Lopez AB, O'Halloran DM, Cosman KM, Conlin BJ, Paolillo DJ, Garvin GJ, Kochian LV, Kupper H, Earle ED, Cao J, Li L (2006) The cauliflower *Or* gene encodes a DnaJ cysteine-rich domain-containing protein that mediates high levels of β -carotene accumulation. *Plant Cell* 18:3594-3605
- Ma D, Liu Q (2005) Sweetpotato Breeding and Industrialization in China. China Agricultural University Press. pp 1-305 (in Chinese)
- Mano H, Ogasawara F, Sato K, Higo H, Minobe Y (2007) Isolation of a regulatory gene of anthocyanin biosynthesis in tuberous roots of purple-fleshed sweetpotato. *Plant Physiol* 143:1252-1268
- Mok IG, Zha D, Kwak SS (2009) Genetic resources of sweetpotato for industrial use. *J Plant Biotechnol* 36(3): (in press)
- Otani M, Hamada T, Katayama K, Kitahara K, Kim SH, Takahata Y, Suganuma T, Shimada T (2007) Inhibition of the gene expression for granule-bound starch synthase I by RNA interference in sweetpotato plants. *Plant Cell Rep* 26:1801-1807
- Song KB, Joo HK, Rhee SK (1993) Nucleotide sequence of levansucrase gene (*levU*) of *Zyomonas mobilis* ZMI (ATCC 10988). *Biochim Biophys Acta* 1173:320-324
- Yang KS, Lim S, Kwon SY, Kwak SS, Kim HS, Lee HS (2005) Transgenic sweetpotato (*Ipomoea batatas*) expressing spike gene of porcine epidemic diarrhea virus. *Korean J Plant Biotechnol* 32:263-268