

제초제 저항성 형질전환 감자의 농업적 특성, 영양 성분 및 해충 반응성 평가

안순영^{1,2} · 조광수^{1*} · 서효원³ · 이정윤⁴ · 배신철⁵ · 조지홍¹ · 박영은¹ · 김주일¹ · 김현준¹ · 조현묵¹

¹농촌진흥청 국립식량과학원 고령지농업연구센터, ²영남대학교 원예학과, ³농촌진흥청 연구관리과,

⁴농촌진흥청 농업유전자원센터, ⁵농촌진흥청 국립농업과학원 농업생명자원부

Evaluation of Agronomic Characteristics, Nutritional Contents, and Insect Response of the Transgenic Potato Resistant to Glufosinate Ammonium

Soon-Young Ahn^{1,2}, Kwang-Soo Cho^{1*}, Hyeo-Won Seo³, Jeong-Yoon Yi⁴, Shin-Cheol Bae⁵, Ji-Hong Cho¹, Young-Eun Park¹, Ju-Il Kim¹, Hyun-Jun Kim¹, and Hyun-Mook Cho¹

¹Highland Agriculture Research Center, National Institute of Crop Science, Rural Development Administration, Pyeongchang 232-955, Korea

²Department of Horticultural Science, Yeungnam University, Gyeongsan 712-749, Korea

³Research Coordination Division, Rural Development Administration, Suwon 441-857, Korea

⁴Natioanl Agrodiversity Center, Rural Development Administration, Suwon 441-857, Korea

⁵Department of Agricultural Biotechnology, National Academy of Agricultural Science, Rural Development Administration, Suwon 441-857, Korea

Abstract. The agronomic characteristics, nutritional contents, and insect response of the potato clones transformed with a glufosinate ammonium resistance gene were evaluated. Among the 4 transgenic potato clones, the Bar 3 clone was selected as a promising one for commercialization. The Bar 3 clone showed similar tuber yield capacity but higher herbicide resistance as compared with the non-transgenic potato cv. Dejima. The herbicide resistance of the Bar 3 clone was more than 5 times higher when tested with the herbicide concentration recommended by the producer. The major agronomic characteristics of the Bar 3 clone were not different from those of the non-transgenic Dejima. The annual variation in yields and agronomic characteristics showed similar tendency for 2 years from the third to fourth generation after transformation. The tubers of the Bar 3 clone also showed low occurrence in common scab and physiological disorders such as cracking and secondary growth. But the reasons for such results are yet to be studied. Also, it was considered that the Bar 3 clone have a potential of reducing not only common scab occurrence but also soil erosion during potato cultivation in field. The nutritional contents (mineral compound, vitamin C and amino acid) and response to *Spodoptera exigua* of the transgenic potato clones were not significantly different.

Additional key words: biosafety, LMO, substantial equivalence, yield

서 언

세계 4대 식량작물에 포함되는 감자는 재배 품종의 대부분이 4배체(2n = 4x, n = 12)이며, 재배에 영양변식 기관인 괴경을 이용하므로 교잡을 통한 육종이 어렵고 우량 품종의 육성효율이 매우 낮은 작물이다(Davies, 1996; Ross, 1986). 담배, 토마토와 더불어 형질전환 기술이 적용된 최초의 작

물들 중 하나인 감자(An et al., 1986)는 형질전환이 비교적 용이하고, 영양변식 작물로서 형질전환 이후 별도의 육종과정이 필요하지 않으므로 형질전환 기술을 활용한 육종 대상으로서 매우 유리한 작물로 잘 알려져 있다(Ghislain et al., 1997). 최근까지 여러 나라에서 개발된 다양한 형질의 형질전환 감자들의 실용화와 안전성 평가 사례가 늘어나고 있으며, Bt 유전자를 이용한 Colorado potato beetle 등과 같은

*Corresponding author: kscholove@korea.kr

※ Received 12 August 2010; Accepted 22 April 2011. 본 연구는 2009년도 농촌진흥청(국립식량과학원) 박사후 연수과정 지원사업에 의해 수행되었습니다.

해충에 저항성인 감자(Boiteau, 2005; Jorge and Larry, 2001; Tang et al., 2001)와 바이러스 저항성 감자(Huisman et al., 1992; Lawson et al., 1990; Missiou et al., 2004) 등은 이미 실용화가 이루어진 바 있다. 제초제 저항성은 현재까지 개발되어 상용화된 가장 대표적인 특성 중 하나이며, 실용화되어 재배되고 있는 GM(genetically modified) 작물의 약 62%를 차지하고 있다(James, 2009). 그 중에서도 특히 제초제 glufosinate ammonium(상품명 Basta™)에 저항성인 작물은 제초제 저항성 유전자 *bar*의 클로닝(Thompson et al., 1987) 이후 여러 작물에 성공적으로 도입되었으며, *bar* 유전자는 현재 상용화된 제초제 저항성 작물 중에서 가장 많이 도입된 유전자로 알려져 있다. PAT(phosphinothricin acetyltransferase) 유전자가 도입된 작물에서 나타나는 제초제 저항성은 발현된 PAT 유전자가 제초제 성분인 glufosinate ammonium을 무독성 대사물질인 N-acetyl-L-glufosinate로 전환시킴으로써 나타난다(Dröge et al., 1992; Dröge-Laser et al., 1994). Glufosinate ammonium이 주성분인 제초제의 경우 비 선택성 제초효과와 완효성으로 장기간 제초효과가 지속되며, 토양 잔류독성이 다른 제초제에 비해 매우 적은 특성을 가지고 있어(Bayer et al., 1972; Leason et al., 1982) 환경에 대한 부하가 상대적으로 작은 것으로 알려져 있다. 우리나라에서도 여러 작물에 PAT 유전자를 도입하여 제초제 저항성 작물의 개발이 시도되어 왔으며(Choi et al., 2003), 감자의 경우도 동일한 기능의 제초제 저항성 유전자를 도입한 사례들이 보고(Choi et al., 1996, 1999; Eliseu, 1994; Han et al., 1997)되어 있으나, 실용화가 이루어진 예는 아직 확인되지 않고 있다. 형질전환 작물을 실용화하기 위해서는 식품학적 안전성과 환경유해성 여부가 평가되어야 하며, 아울러 농업적 특성을 포함한 다양한 작물학적 특성이 형질전환되지 않은 작물과 실질적인 동등성을 가지는지에 대한 평가가 수반되어야 한다. 본 연구는 glufosinate ammonium 저항성 유전자를 국내 장려품종 감자인 ‘대지’에 도입하여 선발한 제초제 저항성 감자계통들 중에서 농업적 형질이 우수하고 실용화 가능성이 큰 계통을 선발하여 형질전환 감자와 비형질전환 감자의 실질적 동등성을 확인하기 위해 농업적 특성, 영양 성분 및 해충에 대한 반응 양상 등을 평가하였다.

재료 및 방법

공시재료의 육성경위 및 농업적 특성 조사

본 연구에 사용된 형질전환 감자는 농촌진흥청 농업생명자원부(구, 농업생명공학연구원)에서 개발되어 2002년 고령지 농업연구센터에 이관되었으며, 제초제 glufosinate ammonium

에 대해 저항성을 유도하는 *bar*유전자가 도입된 형질전환 계통들이다. *bar*유전자는 *Streptomyces hygroscopicus*에서 분리한 PAT 유전자로 운반체 pCAMBIA3300을 이용하여 ‘대지’ 감자(*Solanum tuberosum* cv. Dejima)에 도입하였다. 기내 식물체로 분양된 유전자 전환 감자들은 기내에서 선발된 계통별(Bar 1, 2, 3 및 4)로 온실에서 순화 및 재배하여 최초 씨감자를 확보하였고, GMO 격리 재배 온실에서 T₂세대까지 괴경을 증식하고 PCR을 통하여 유전적 안정성을 확인한 후, T₃세대부터 고령지농업연구센터의 GMO 격리포장에서 괴경을 유지, 증식하였다. 제초제 저항성은 Basta™ 액제(유효성분으로 18% glufosinate ammonium, 바이엘크롭사이언스)를 농도별로 처리하여 확인하고, 대비품종인 ‘대지’에 비해 수량성이 높은 것을 선발(Bar 3)하여 이를 재료로 사용하였다. 씨감자는 파종하기 전에 모든 개체에 대하여 감자잎말림바이러스(PLRV), 감자 바이러스 Y(PVY)와 감자 바이러스 X(PVX)가 감염되지 않았음을 ELISA를 통해 확인하였다.

제초제 저항성 형질전환 감자의 작물학적 특성 및 생육특성 검정은 생태적, 물리적 격리가 이루어진 고령지농업연구센터의 GMO 안전성 평가 포장에서 수행하였으며, 화분비산 방지 및 바이러스 매개충의 방제를 위해 망실 내부에서 재배하였다. 재배 방법은 감자표준재배법으로 재배하면서, 품종성능 검정기준과 UPOV 품종조사기준에 준하여 실시하였다. 식물체의 특성은 화아분화기에 10주를 대상으로 조사하였으며 괴경의 특성은 수확 직후 10개의 괴경을 조사하였다. 대비품종으로는 형질전환에 사용한 품종과 같은 ‘대지’를 사용하였으며, 씨감자 생산단계의 기본종급 씨감자를 이용하였다. 생육초기 잡초방제 여부의 유용성을 평가하기 위해 0.3%의 제초제 Basta™를 엽면 살포하였으며, 감자 더듬이 증상의 발생 정도는 농촌진흥청에서 발간된 ‘농사시험 연구조사기준(1995)’으로 조사하여 대조구 감자와 발생 정도를 비교하였다.

감자 영양성분 분석

감자의 영양성분 분석은 기본적으로 무기성분 함량과 감자가 양질의 수용성 비타민 및 단백질 공급원인 것을 고려하여 비타민 C와 총 17종의 아미노산 함량을 조사하였다. 무기성분 함량을 분석하기 위하여 감자 건물시료 0.5g을 Microwave(ETHOS TC, Milestone, Italy)를 이용하여 분해 후, 분해액을 여과지(No. 6)로 여과하여 100mL로 정량하고, 이 여과액은 ICP(Inductively Coupled Plasma, Optima 2100 DV, PerkinElmer, USA)를 이용하여 4종(K, Ca, Mg, Na)의 양이온을 분석하였다. 비타민 C 함량은 Yang et al.(1991)의

방법을 수정하여 분석하였다. 수확한 감자 생체 5g에 5%의 HPO_3 를 20mL 첨가하여 마쇄하고, 여과지를 이용하여 여과한 후 침출액은 냉장고에 보관하면서 실험에 사용하였다. 샘플 용액 1mL에 각각 0.2% indophenol(100 μ L), 1% thiourea (1mL), 2% 2, 4-dinitrophenyl hydrazine(1mL)을 첨가하여 섞고 항온수조(50 $^{\circ}$ C)에서 30분간 방치한 후, 85% H_2SO_4 를 2.5mL 첨가하고 분광광도계(US/8453E, Agilent Technologies, USA)를 이용하여 OD 540nm에서 흡광도를 측정하였다. 17종의 아미노산 분석은 농촌진흥청에서 발행한 ‘농업과학기술 연구조사분석기준(2004)’에 따라 수행하였다. 동결건조시킨 감자를 분말로 만들어 0.5g을 시험관에 넣고 6N HCl을 40mL 넣은 후, 건조기(110 $^{\circ}$ C)에서 24시간 산가수분해시켰다. 회전진공농축기로 시료를 농축한 후, 다시 3차 증류수로 2-3회 녹여가면서 농축하고 마지막에 0.02N HCl로 녹여 여과지(No. 5)로 여과하여 50mL로 용량을 맞춘 다음, 다시 0.45 μ m syringe filter로 여과하여 시료를 준비하고 아미노산 분석기(JP/L-8900, HITACHI, Japan)로 분석하였다.

파밤나방 생물검정

제초제 저항성 형질전환 감자와 비형질전환 감자의 실질적 동등성에 관한 자료를 얻기 위해 감자의 영양적인 성분 외에 해충에 대한 반응성을 확인하고자 기주범위가 광범위하며 최근 노지 감자에 있어 큰 피해를 주고 있는 파밤나방 (*Spodoptera exigua*)에 대한 생물검정을 실시하였다. 파밤나방 유충은 동부하이텍 중앙연구소에서 분양 받았다. 파밤나방에 대한 생물검정 실험은 페트리디쉬 위에 습도 유지를 위한 여과지를 깔고 증류수로 적신 후, 그 위에 형질전환 감자 잎을 올리고 1-2령 유충을 접종하였다. 사육조건은 25 \pm 2 $^{\circ}$ C, 16시간 명조건, 60-70% 상대습도로 하였으며, 먹이인 감자 잎은 매일 바꿔주었다. 형질전환 감자와 비형질전환 감자에 대한 파밤나방의 반응은 용화율과 우화율을 조사하여 발육 기준으로 삼았으며, 처리별로 각 15마리의 유충을 3반복으로 사육하였다. 기주 간 발육 정도의 통계학적 분석

은 SAS 프로그램(SAS 9.1, SAS Institute Inc., USA)을 이용하여 던컨의 다중범위검정으로 분석하였다.

결과 및 고찰

제초제 glufosinate ammonium에 대한 저항성

T_3 세대까지 증식된 제초제 저항성 4계통(Bar 1, 2, 3, 4)의 제초제 저항성 정도를 조사하기 위하여 적정처리 농도로 제시된 제초제 농도 0.3%(3mL \cdot L $^{-1}$)를 기준으로 약 0-20mL \cdot L $^{-1}$ 농도까지 처리하여 피해 정도를 조사하였다(Table 1). Bar 1의 경우, 유전자 도입은 확인되었으나 제초제에 대한 저항성을 보이지 않았으며, 이는 도입된 유전자의 침묵(gene silencing)에 의한 것으로 추측되었다. 나머지 계통들은 모두 비슷한 수준의 저항성을 보였으며, 적정 처리농도의 5배 처리에서도 줄기와 잎이 피해를 입지 않았고, 7배에 해당하는 2% 농도 처리에 있어서도 Bar 2, 3, 및 4는 소엽의 일부에서만 약한 피해증상을 나타내었다. 이것은 고농도의 제초제에 의한 피해보다는 과도하게 함유된 계면활성제에 의한 효과로 생각되었다. 기준량에 비해 높은 농도의 제초제 처리에도 피해를 입지 않는 특성은 실제 포장 재배 과정에서 흔히 있을 수 있는 고농도의 약제 살포에 의한 피해를 막을 수 있을 뿐만 아니라 제초제에 의한 방제가 어려운 잡초 발생지역에서도 감자의 생력재배가 가능할 것으로 판단되었다.

제초제 저항성 감자의 농업형질 특성 평가

제초제 저항성 감자의 작물학적 특성은 UPOV(1986)에 제시된 특성 평가기준에 따라 조사하였으며, 식물체의 생육 특성과 잎의 전개특성을 중점적으로 평가하였다(Table 2). 모든 형질전환 계통들이 비형질전환 감자인 ‘대지’ 품종과 비교하여 볼 때, 생육특성과 작물학적 표현형질에서 큰 차이를 나타내지 않았으나 Bar 2 계통의 경우, 지상부 생육이 느리고 수관형성이 다른 계통과 대조구에 비해 성긴 특성을 나타내었다. 이러한 특성은 수확 후 감자의 수량성이 낮게 나

Table 1. Comparison of responses to different concentrations of glufosinate ammonium of the transgenic clones (Bar 1, 2, 3, and 4) and the non-transgenic cv. Dejima in potatoes.

Potato clones	Applied concentration of 18% glufosinate ammonium (mL \cdot L $^{-1}$)						
	0	3	6	9	12	15	20
Bar 1	0 ²	3	4	4	4	4	4
Bar 2	0	0	0	0	0	0	1
Bar 3	0	0	0	0	0	0	1
Bar 4	0	0	0	0	0	0	1
Dejima	0	4	4	4	4	4	4

²0 (highly resistant) - 4 (highly susceptible).

타난 것과 관련이 있을 것으로 판단되었다. 실용화가 유망한 계통을 선발하기 위한 특성검정(T4세대)을 통해 품종화가 가능할 것으로 판단되는 Bar 3계통을 선발하였다(Table 3). 유망계통의 선발은 1차적으로 괴경 생산량과 수확 후 괴경 특성을 대비품종 ‘대지’와 비교하여 수행하였다. Bar 1 계통은 제초제에 감수성을 보여 도태시켰으며, Bar 2와 Bar 4 계통의 경우, 제초제 저항성은 나타내었으나 수량성이 낮아 도태시켰다. Bar 3 계통은 수량성과 괴경특성이 대비품

종인 ‘대지’에 비해 우수하거나 비슷하여 유망계통으로 선발하였다. Matthews et al.(2005)는 형질전환 감자의 독성 물질의 생산 유무를 조사한 결과 특정 농업형질 및 독성 물질은 환경에 민감하게 반응하여 나타나며 본 시험에서 공시된 4가지 형질전환 계통은 조직배양 과정 중의 체세포변이이거나 도입된 유전자의 positional 효과일 것으로 판단된다. 최종 선발된 Bar 3 계통은 2004년도에 약 0.1ha의 격리망실에서 재배하면서 제초제에 대한 특성을 평가하였다(Fig. 1).

Table 2. Botanical characteristics of the glufosinate ammonium resistant transgenic potato clones (Bar 1, 2, 3, and 4) and the non-transgenic potato cv. Dejima evaluated according to the UPOV guideline (1986).

Potato clones	Plant						Leaflet	
	Growth habit	Plant type	Height	Thickness of main stem	Maturity	Anthocyanin	Width	
Bar 1	3 ^z	3 ^y	5 ^x	3 ^x	7 ^w	1 ^v	3 ^u	
Bar 2	3	3	3	3	7	1	3	
Bar 3	3	3	5	3	7	1	3	
Bar 4	3	3	5	3	7	1	3	
Dejima	3	3	5	3	7	1	3	

^z3 = erect.
^y3 = closed.
^x5 = medium.
^w7 = late.
^v1 = absent.
^u3 = narrow.

Table 3. Comparison of the major agronomic characteristics of the glufosinate ammonium resistant transgenic potato clones and the non-transgenic potato cv. Dejima.

Potato clones	Tuber shape ^z	Skin color ^y	Depth of eye ^x	Secondary growth ^w	Cracking ^w	Yield g/plant
Bar 1	2	1	5	1	2	419 ± 55 b ^v
Bar 2	1	1	3	0	0	211 ± 31 c
Bar 3	2	1	5	1	1	527 ± 70 a
Bar 4	2	1	5	2	2	288 ± 34 c
Dejima	2	1	5	1	2	461 ± 35 ab

^z1 = round, 2 = short-oval.
^y1 = yellow.
^x3 = shallow.
5 = medium.
^w0 = none.
9 = severe.

^vMean separation within columns by Duncan's multiple range test, *P* = 0.05.

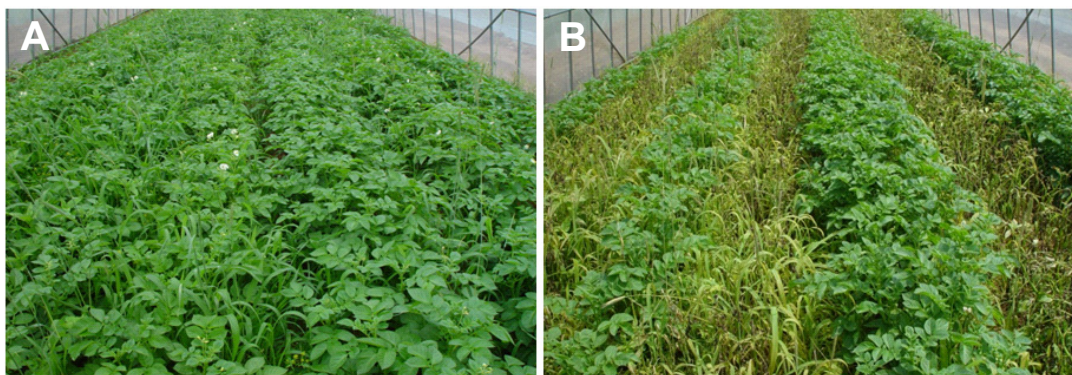


Fig. 1. A cultivation view of the herbicide resistance transgenic potato clone Bar 3 in 2004. A: Before sprayed. B: 7 days after sprayed with 6 mL·L⁻¹ of 18% glufosinate ammonium.

Table 4. Major agronomic characteristics of the selected Bar 3 potato clone and the non-transgenic potato cv. Dejima.

Treatment		Yield (kg·10a ⁻¹) ^z	Marketable tuber rate (%) ^y	Scab occurrence (0-4) ^x	Scab severance (0-4) ^x
Bar 3	T ^w	5,066 ± 855 a	83	<1	1
	NT	4,933 ± 858 a	72	<1	1
	C	5,155 ± 804 a	83	2	2
Dejima	T	1,330 ± 440 b	34	-	-
	NT	4,738 ± 804 a	68	>1	1
	C	5,003 ± 783 a	81	2	3

^zMean separation with columns by Duncan's Multiple range test, *P* = 0.05.

^yWeight of tubers over 80 g.

^x0 = none, 4 = severe.

^wT: Basta treated, NT: Basta non-treated, C: conventional agricultural practices.

생육 중기인 파종 후 50일째 추천 살포농도의 제초제를 살포하였으며, 감자표준 재배법으로 재배한 Bar 3계통의 수량성 등을 비형질전환 감자인 '대지'와 비교하였다. 그 결과 생육 중기에 제초제를 살포하여도 형질전환 여부에 상관없이 관행적으로 재배된 감자와 같이 수량성에 거의 영향을 미치지 않는 것으로 조사되었다(Table 4). 생육 중기까지 제초하지 않은 조건에서 수확된 감자 더듬이병 발생 정도(scab severance)는 유전자 전환 여부에 상관없이 생육 중기까지는 제초하지 않은 처리구에서 발생이 현저히 감소하는 것을 확인하였다. 이는 더듬이병의 발생을 조장하는 유기물의 영향이 인접한 잡초에 의해 줄었을 가능성이거나 감자 포장의 토양 미생물상이 잡초의 생육으로 보다 안정화되어 병원성 방선균의 밀도가 생태적으로 조절되었기 때문 등의 다양한 요인에 의한 것이라 판단할 수 있다. 실제 제초하지 않은 상태로 재배된 비형질전환 감자에서 더듬이병의 발생 정도가 훨씬 적게 나타난 결과는 형질전환 여부와 상관없이 잡초의 생육이 더듬이병 발생을 줄일 가능성이 있음을 의미하지만 이러한 요인들과 더듬이병 발생과의 관련성을 증명하기 위해서는 후속 연구가 필요할 것으로 생각된다.

감자 영양성분 분석

형질전환 감자와 비형질전환 감자의 영양 성분 특성을 비교하기 위해 괴경의 전체질소, 인산 및 양이온(K, Ca, Mg, Na)과 비타민 C, 그리고 17종류의 아미노산(아스파라긴산, 트레오닌, 세린, 글루타민, 글라이신, 알라닌, 시스테인, 발린, 메티오닌, 이소류신, 류신, 티로신, 페닐알라닌, 라이신, 히스티딘, 아르기닌, 프롤린) 함량을 측정하였다. 비타민 C 함량은 형질전환 감자와 비형질전환 감자에서 각각 괴경 100g 당 23.4mg과 23.6mg으로 차이를 나타내지 않았으며, 17종류의 아미노산 함량 또한 형질전환 감자인 Bar 3와 대조 품종인 '대지'간에 큰 차이가 나지 않는 것으로 나타났다

(Fig. 2). 조사된 양이온의 성분 중 칼슘 함량은 형질전환 계통(Bar 3)이 대조 품종보다 다소 높게 조사되었다. 또한 형질전환 감자의 비중을 통한 전분함량의 조사 결과 대지 품종이 약 10.9%를, 형질전환 계통이 9.8%로 약간 낮게 나타났다(Table 5). 이러한 결과는 제초제 저항성 형질전환 감자의 계통선발에 의한 효과로 판단되나 재배지역, 시기 및 질소 시비 수준에 따른 영양성분의 변화 관찰이 필요할 것으로 판단된다. 감자의 주요 2차 대사산물로는 비타민 C 및 glycoalkaloid 계열의 화합물 등이 있다. 본 시험에서는 글라이코알카로이드 계열의 화합물에 대한 조사가 이루어 지지 않았으나 An et al.(2002)은 다양한 형질전환 감자의 solanine과 chaconine의 분석결과 비형질전환체와 차이가 없는 것으로 보고하였다. 그러나 금후 본 시험에서 선발된 형질전환 계통에 대한 생육단계, 식물체 부위 및 저장기간별 영양성분의 변화에

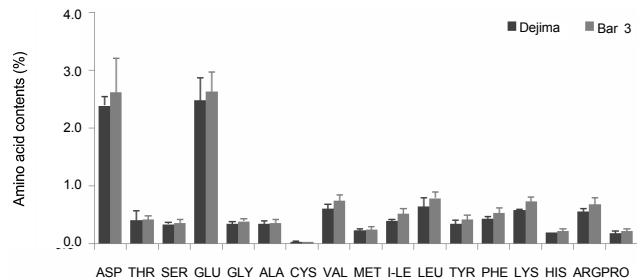


Fig. 2. Amino acid contents of the non-GM (Dejima) and GM (Bar 3) potato tubers. Vertical bars indicate the standard errors of the mean values.

Table 5. The nutrients and starch content of transgenic and non-transgenic potato tubers.

Treatment	Cation (mg·kg ⁻¹) ^z				Starch (%)
	K	Ca	Mg	Na	
Bar 3	22238 a	345 a	1308 a	76 a	9.8 a
Dejima	22080 a	287 b	1288 a	75 a	10.9 b

^zMean letters within a column indicate significant differences (*P* = 0.05).

대한 추가 실험이 필요할 것으로 판단된다.

파밤나방에 대한 생물검정

파밤나방의 평균 용화율(pupation rate)은 형질전환 감자 Bar 3에서 평균 87%, 비형질전환 감자는 72.2% 였다(Fig. 3). 유충 기간은 10일에서 23일 정도이며, 형질전환 감자가 평균 13.9일, 비형질전환 감자는 16.5일로 나타났다. 형질전환 감자와 비형질전환 감자의 평균 우화율(emergence rate)은 각각 85.2%와 88.8%로서 용화율과 마찬가지로 큰 차이를 나타내지 않았다(Fig. 3). 용기간은 7-10일로, 형질전환 감자는 평균 8.6일, 비형질전환 감자는 8.3일 이었다. 보통 파밤나방의 용기간은 5-14일 정도이나 본 실험에서 용기간이 7-10일 정도로 짧게 나타난 것은 유충과 번데기 생존 조사 시 스트레스를 받았기 때문으로 생각되며, 형질전환 감자와 비형질전환 감자의 파밤나방에 대한 발육검정 결과는

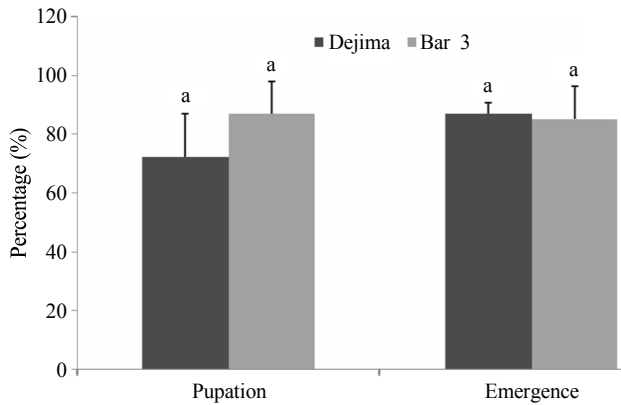


Fig. 3. Pupation and emergence rate of *Spodoptera exigua* fed non-GM (Dejima) and GM (Bar 3) potatoes under laboratory conditions. Mean letters within a column indicate significant differences ($P = 0.05$). Vertical bars indicate the standard errors of the mean value.

통계적 차이가 없는 것으로 나타났다.

제초제 저항성 감자의 유용성

Glufosinate ammonium은 비선택성 제초제로 대부분의 잡초방제에 사용이 가능하며, 토양 잔류독성이 매우 낮다. 감자의 주요 재배지인 대관령 지역에 많이 발생하는 감자밭 잡초들에 적정 처리농도를 기준으로 농도별로 glufosinate ammonium을 처리하여 방제효과를 확인한 결과, 일년생과 다년생의 구분 없이 대부분의 잡초들이 저농도의 처리로도 방제가 가능하였다(Table 6). 애기수염(*Rumex acetocella*)은 지하부 발달이 왕성한 다년생의 방제가 어려운 잡초로 0.3% glufosinate ammonium의 처리로는 방제가 곤란하였으나, 2배 농도인 0.6%의 처리로 지상부가 고사되어 이후 재배기간 중에는 감자의 생육에 영향을 주지 않는 것으로 확인되었다. 감자재배에서 비선택성 제초효과와 토양 잔류독성이 낮은 제초제를 사용하는 것은 기존 제초제들을 사용하는 경우보다 친환경적인 감자재배가 가능할 것으로 판단된다. 즉, 생육 중에도 제초제의 처리가 가능하므로 감자 파종 후 잡초와 감자에 의한 포장 피복율이 일정 수준에 이를 때까지 제초하지 않아도 되므로 이 기간 동안 강우에 의한 토양 유실을 현저히 줄일 수 있을 것으로 생각된다. 파종 복토 후 바로 살포 해야 하는 기존 제초제들에 비해 토양유실을 줄일 수 있을 뿐만 아니라 토양 잔류독성이 낮은 제초제의 사용으로 수질오염 등을 낮출 수 있을 것으로 판단되었다. 선발된 Bar 3제초제 저항성 감자에 도입된 PAT 유전자의 경우 다양한 연구를 통해 이미 식품학적 안전성이 입증되었고, 동일한 기능의 유전자가 도입된 많은 종류의 작물이 실용화되어 재배되고 있다. 또한 Yoon et al.(2005)은 이 유전자가 감자에 도입된 경우, 알레르기 유발물질 형성이

Table 6. Control effect of glufosinate ammonium on several dominant weed species in the field trial (2003-2004).

Weed species	Applied concentration of 18% glufosinate ammonium (mL·L ⁻¹)			
	1	3	6	9
<i>Rumex acetocella</i>	- ^z	+	+++	++++
<i>Stachys japonica</i>	-	+++	+++	++++
<i>Rorippa islandica</i>	+	+++	+++	++++
<i>Amaranthus mangostanus</i>	+	+++	+++	++++
<i>Bidens frondosa</i>	+	+++	+++	++++
<i>Chenopodium centrorubrum</i>	-	+++	+++	++++
<i>Erigeron annuus</i>	+	+++	+++	++++
<i>Commelina communis</i>	+	+++	+++	++++
<i>Portulaca oleracea</i>	-	+++	+++	++++
<i>Solanum nigrum</i>	+	+++	+++	++++

^z:-; Non-controlled, +; affected but regenerated, +++; controlled.

비형질전환 감자와 차이를 보이지 않는다는 연구 결과를 통해 안전성을 입증하였으므로 환경위해성의 평가 이후에는 실용화에 이를 수 있을 것으로 판단된다.

이상의 결과로 볼 때, 형질전환 후 T₄세대까지 포장 재배를 통해 선발 유지된 Bar 3 계통의 제초제 저항성 감자는 수량성과 주요 작물학적인 특성, 영양학적 특성 및 충에 대한 반응이 비형질전환 감자인 ‘대지’와 비교하였을 때 차이를 발견할 수 없었으므로 두 작물의 실질적 동등성을 확인할 수 있었다. 또한 특정 성분(glufosinate ammonium)의 제초제에 저항성이라는 뚜렷한 구별성과 제초제 저항성이라는 우수성을 가지므로 품종화의 요건을 충족하는 것으로 판단된다. 형질전환 작물을 실용화하기 위해서는 식품학적 안전성과 농업적 특성을 포함한 다양한 작물학적 특성이 비형질전환 작물과 실질적인 동등성을 가지는 지에 대한 평가와 도입 유전자의 분자생물학적 특성 등과 같은 환경위해성 여부가 평가되어야 한다. 본 실험에서는 제초제 저항성 형질전환 감자와 비형질전환 감자의 농업적, 영양학적인 평가에서 실질적 동등성을 확인할 수 있었으며, 현재 도입 유전자의 위치 및 주변염기서열, 도입 유전자의 복제수, 도입 유전자의 세대 간 안정적 유전 및 발현 등과 같은 분자생물학적 분석이 진행되고 있다. 본 연구를 통해 개발된 제초제 저항성 감자는 국내 2기작 재배용으로 가장 많이 재배되는 감자인 ‘대지’ 품종을 활용했다는 점에서 안전성 평가 이후의 실용화에 보다 유리할 것으로 판단된다. 안전성 평가 이외의 형질전환 작물의 품종화 과정은 전통적인 육종에서 새 품종의 판단과 유사한 절차로 진행되므로 이후 유용형질의 비교 등은 육종 전문가의 평가와 판단이 필요할 것으로 생각된다.

초 록

제초제 저항성 유전자를 국내 장려품종 감자인 ‘대지’에 도입하여 제초제 저항성 감자계통들을 개발하였으며, 그 중에서 농업적 형질이 우수하며 실용화 가능성이 큰 계통을 선발하기 위하여 3년간 포장 검정을 실시하였다. 제초제 저항성 감자 4계통 중에서 가장 상업화에 적합한 Bar 3 계통을 선발하였으며, Bar 3 계통은 비형질전환 감자인 ‘대지’와 비교하여 수량성과 주요 작물학적인 특성, 영양학적 특성 및 충에 대한 반응에서 차이를 발견할 수 없었고 두 감자 계통과 품종의 실질적 동등성을 확인할 수 있었다. Bar 3 계통은 5배의 고농도 제초제 처리에서도 피해를 나타내지 않았으며, 형질전환 후 세대가 진행되는 동안의 수량과 식물학적인 특성은 비슷한 경향을 나타내었다. Bar 3 계통은 더랭이병과 실금이나 2차 생장과 같은 생리적 장애 발생물

이 낮았으며, 그 이유는 명확하게 구명되지 않았으나, Bar 3 계통과 같은 제초제 저항성 감자를 사용할 경우 감자 재배 지역에서의 더랭이병 발생과 토양 유실 문제를 줄일 수 있을 것으로 판단되었다. 비형질전환 감자와 형질전환 Bar 3 계통의 영양학적 특성(무기성분, 비타민 C와 아미노산 함량)과 해충(파밤나방)에 대한 반응을 분석비교한 결과, 두 감자 계통과 품종의 차이를 발견할 수 없었다.

추가 주요어 : 생물학적 안전성, 유전자 변형작물, 실질적 동등성, 수량

인용문헌

- An, E.B., I.E. Geoghegan, D.W. Griffiths, and J.W. McNicole. 2002. The effect of genetic transformations for pest resistance on foliar solanine-based on glycoalkaloids of potato (*Solanum tuberosum*). *Ann. Appl. Biol.* 140:143-149.
- An, G., B.D. Waston, and C.C. Chiang. 1986. Transformation of tobacco, tomato, potato, and *Arabidopsis thaliana* using a binary Ti vector system. *Plant Physiol.* 81:301-305.
- Bayer, E., K.H. Gugel, K. Haegele, H. Hagenmaier, S. Jessipow, W.A. Koenig, and H. Zaehner. 1972. Phosphinothricin and phosphinothricyl-alanyl-alanine. *Helv. Chim. Acta* 55:224-239.
- Boiteau, G. 2005. Recruitment of adult Colorado potato beetles in *Bt*-transgenic potato fields. *Amer. J. Potato Res.* 82:379-387.
- Choi, K.H., J.H. Jeon, H.S. Kim, Y.H. Joung, and H. Joung. 1999. Stability of transgenic potato plants and their progenies expressing herbicide resistant gene. *J. Kor. Soc. Hort. Sci.* 40:31-34.
- Choi, K.H., J.H. Jeon, H.S. Kim, Y.H. Joung, S.J. Cho, Y.P. Lim, and H. Joung. 1996. Development of herbicide resistant transgenic potato. *Kor. J. Plant Tiss. Cult.* 23:161-165.
- Choi, Y.E., J.H. Jeong, J.K. In, and D.C. Yang. 2003. Production of herbicide-resistant transgenic *Panax ginseng* through the introduction of the phosphinothricin acetyl transferase gene and successful soil transfer. *Plant Cell Rep.* 21:563-567.
- Davies, H.V. 1996. Recent developments in our knowledge of potato transgenic biology. *Potato Res.* 39:411-427.
- Dröge-Laser, W., U. Siemeling, A. Pühler, and I. Bröer. 1994. The metabolites of the herbicide L-phosphinothricin (glufosinate) - Identification, stability and mobility in transgenic, herbicide-resistant, and untransformed plants. *Plant Physiol.* 105:159-166.
- Dröge, W., I. Bröer, and A. Pühler. 1992. Transgenic plants containing the phosphinothricin-N-acetyltransferase gene metabolize the herbicide L-phosphinothricin (glufosinate) differently from untransformed plants. *Planta* 187:142-151.
- Eliseu, S., L.F.A. Figueiredo, and D.C. Monte-neshich. 1994. Transformation of potato (*S. tuberosum* cv Mantiqueira) using *Agrobacterium tumefaciens* and evaluation of herbicide resistance. *Plant Cell Rep.* 13:666-670.
- Ghislain, M., M. Querci, M. Bonierbale, R. Golmirzaie, and R. Nels. 1997. Biotechnology and the potato. In *Applications for the Developing World*. CIP, Peru.

- Han, S.S., J.H. Jeong, K.S. Bang, and D.C. Yang. 1997. Selection of herbicide resistant potatoes transformed with phosphinothricin acetyltransferase gene. *Kor. J. Weed Sci.* 17:373-382.
- Huisman, M.J., E. Jongedijk, D.P.L. Willink, F.V.D. Wilk, and B.J.C. Cornelissen. 1992. Molecular breeding for virus resistant potato plants. *Eur. J. Plant Pathol.* 98:29-36.
- International Union for the Protection of New Variety of Plants (UPOV). 1986. Guide for the conduct of tests for distinctness, homogeneity and stability. Potato (*Solanum tuberosum* L.) 23(5):5-25.
- James, C. 2009. Global status of commercialized Biotech/GM crops. ISAAA Brief No. 41. ISAAA:Ithaca, NY.
- Jorge, J.C. and D.G. Larry. 2001. Midseason pest status of the cotton aphid (Homoptera: Aphididae) in California cotton: Is nitrogen a key factor? *Environ. Entomol.* 30:501-510.
- Lawson, C., L. Kaniweski, R. Haley, C. Rozman, P. Newell, and N.E. Sanders. 1990. Commercial potato cultivar resistance to potato virus X and potato virus Y in transgenic Russet Burbank. *Bio/Technology* 8:127-134.
- Leason, M., D. Cunliffe, D. Parkin, P.J. Lea, and B.J. Mifflin. 1982. Inhibition of pea leaf glutamine synthetase by methionine sulfoximine, phosphinothricin and other glutamate analogues. *Phytochem.* 21:855-857.
- Matthews, D., H. Jones, P. Gans, S. Coates, and L.M. Smith. 2005. Toxic secondary metabolite production in genetically modified potatoes in response to stress. *J. Agri. Food Chem.* 53:7766-7776.
- Missiou, A., K. Kalantidis, A. Boutla, S. Tzortzakaki, M. Tabler, and M. Tsagris. 2004. Generation of transgenic potato plants highly resistant to potato virus Y (PVY) through RNA silencing. *Mol. Breed.* 14:185-192.
- Ross, H. 1986. Potato breeding problems and perspectives. *Adv. Plant Breed.* 13:1-132.
- Tang, J.D., H.L. Collins, T.D. Metz, E.D. Earle, J.Z. Zhao, R.T. Roush, and A.M. Shelton. 2001. Greenhouse tests on resistance management of Bt transgenic plants using refuge strategies. *J. Econ. Entomol.* 94:240-247.
- Thompson, C.J., N.R. Mowa, R. Tizard, R. Crameri, J.E. Davies, M. Lauwereys, and J. Botterman. 1987. Characterization of the herbicide-resistance gene bar from *Streptomyces hygroscopicus*. *EMBO J.* 6:2519-2523.
- Yang, Y.J., K.W. Park, and J.C. Jung. 1991. The influence of pre- and post-harvest factors on the shelf life and quality of leaf lettuce. *Kor. J. Food Sci. Technol.* 23:133-140.
- Yoon, S.H., H.M. Kim, Y.M. Ye, Y.M. Kang, C.H. Suh, D.H. Nahm, S.H. Kim, and H.S. Park. 2005. IgE sensitization to the potato allergen in adult allergy patients and identification of IgE binding components: comparison between the wild and genetically modified potato. *Kor. J. Intl. Med.* 69: 651-659.