

Comparison of the Genetic Safety of Transgenic Rice in a Large-scale Field Study

Hyun-Suk Lee¹, Gi-Hwan Yi² and Kyung-Min Kim^{1*}¹Division of Plant Biosciences, School of Plant Biosciences, Kyungpook National University, Daegu 702-701, Korea²Department of Farm Management, College of Agriculture & Life Science, Kyungpook National University, Gunwi-gun, Kyungpook 716-821, Korea

Received April 17, 2012 / Revised September 13, 2012 / Accepted September 17, 2012

The importance of genetic stability and bio-safety in the environment has recently been recognized for many (genetically modified) GM plants. This study evaluated the GM safety of transgenic rice and its environmental variance. Data on agronomic characters and principal component were collected for vitamin A-enriched GM rice and four check cultivars in a large GM field trial during 2009-2011. The cultivation environment was a large GM field and a greenhouse. In this experiment, there was no significant difference between the agronomic characters of the GM rice and those of a donor plant, 'Nagdong'. In terms of grain characteristics, the appearance and physicochemical characteristics of the GM rice and those of the donor plant were similar. However, the grain of the GM rice developed a white core and a white belly when planted in the greenhouse. The type and distribution of dominant weed species were not different in the GM rice and the 'Nagdong'. In addition, gene flow was not detected in the dominant weed species based on PCR analysis.

Key words : GM rice, vitamin A, genetic stability, agronomic character

서 론

세계 각국은 100년 전부터 식량작물의 유전자원 확보를 위한 '총성없는 종자전쟁'과 함께 기술력을 바탕으로 고부가가치 농산물을 생산시키기 위하여 주력하고 있다. 이 기술력은 생명공학 기술과 더불어 실용화되어 급성장한 것이 GM (Genetically Modified) 작물이다. GMO의 재배면적은 1996년 처음 실용화 된 지 매년 2자리 수 이상의 증가율을 보며 15년 만에 경작면적이 87배나 급증했으며, 누적 경작 면적은 12억 5000만 헥타르에 이르는 것으로 1540만명이 경작되고 있는 시점이며 생명공학작물 기술이 가장 빠르게 채택된 작물 기술로 현대농업에서 가장 빠른 속도로 도입되고 있다[9]. 유전자 변형(GM, genetically modified) 작물의 상업적 재배는 1996년 미국에서 시작되었고, 상업적 재배에 앞서 반드시 수행되어야 하는 위해성심사는 1992년 미국에서 시작되었다[8]. 위해성평가(risk assessment)의 목적은 LMO (Living Modified Organisms) 작물의 잠재적인 위험성을 감지하고 생물다양성을 지속적으로 보존하고 유전자원의 혜택을 공유 부가적으로 인간의 건강을 보호하기 위해서이다[21]. GM 작물의 위해성 평가 초기에는 캐나다와 미국을 중심으로 자국 내 재배에 대하여 시작되었고, 이후 몇몇 개도국에서 재배가 시도되면서 그 국가의 환경을 고려한 위해성심사가 수행되었다. 현재 우

리나라와 일본은 GM 작물이 재배되고 있지는 않지만 식용·사료용 가공용(LMO-FFP)으로 수입하는 경우에는 위해성심사가 수행되고 있다[8]. GM작물은 우리나라의 제2 녹색혁명과 복지농업이 가능재배환경에 유력한 기술적 대안이지만 고부가 작물의 개발과 그에 따른 과학적 안정성 확보 및 적극적인 소비와 관련된 문제를 지혜롭게 풀어야만, 21세기 세계 식량전쟁에서 생존할 수 있는 블루오션으로 성장할 수 있다. GM 작물의 상업화 실행에 앞서 새로 개발되는 GM 작물을 품종화하여 안정성 확보 및 보다 적극적인 국내 소비 유도과 함께 종자 수출을 하기 위해서는 위해성 심사에 대한 개발 및 가이드라인을 설정해 보다 체계적인 운영이 필요한 실정이다. 글로벌 GM작물 실용화 확산 추세에 대응하여 국내 GM작물을 실용화하고 촉진할 기반조성에 앞서 GM작물의 안전성 검증을 환경위해성평가를 위한 규정에 준하여[12,14], 각 실험실이나 온실에서 시험 연구한 한정된 예비안전성 검사의 한계를 벗어나 대규모 GM 포장실험으로 보다 현장에 접근한 안전성 평가 체계를 확립하여야 한다[11,13,15]. 우리나라는 유전자 변형작물의 환경위해성평가 가이드라인 개발 내용으로 제1세대 GM 작물의 대표적 형질인 제초제저항성과 해충저항성에 대한 가이드라인은 있지만, 주곡작물인 벼에 대한 안전관리 관련 규범인 세부적인 지침서 제안이 시급하다.

따라서 본 연구는 영양강화성GM 작물인 '비타민 A 강화 벼'를 실험재료로 대규모 GM 포장의 농업적 특성이 입증된 이 등[15]의 안전성 평가체계를 기반으로 2009~2010년 동안 유전적 안전성, 환경적응성 변이 및 유전자 전이를 조사하여

*Corresponding author

Tel : +82-53-950-5710, Fax : +82-53-958-6880
E-mail : kkm@knu.ac.kr

농업생태계 안전성을 비교 분석하였다. 영양강화성 GM 작물인 '비타민 A 강화 벼'의 육종 기술을 기반으로 확립한 항목을 GM작물의 품종 실용화에 대비해 누적된 자료를 분석하여 유전적으로 안전하고 지속적인 GM벼 생산을 위한 지침서의 기본자료로 제공하고자 수행하였다.

재료 및 방법

형질전환체의 작물학적 특성

본 연구에 사용된 시험재료는 2009~2011년 하계에 경북대학교 GM실습격리포장에서 총 사용면적 4,700 m²에서 각 시험구별 포장전개는 4 구획으로 분리하여 모품종인 '낙동'을 모본으로 한 비타민 A 강화벼(GM 벼)를 각각 대칭형으로 2반복 배치하고 '일품', '백진주', '주남'을 변외구에 배치하였다. GM 벼 12 kg, '낙동' 12 kg, '일품' 외 2 품종 포함한 종자를 칩지, 최아, 파종하여 모내기는 6월 1일에 기계이앙하였다. 재식밀도는 20×12 cm, 포기당 3~4본으로 시비량은 N-P₂O₅-K₂O=9.0-4.5-5.7 kg·10a⁻¹로 재배하였고 기타 재배방법은 농촌진흥청 벼 표준재배법에 준하였다. 출수 후 50일 후에 작물학적인 특성조사로 간장, 수장, 수수를 조사하였으며, 수량은 1반복에 30주씩 3반복으로 산출하여 시험재료로 이용하였다.

형질전환체의 미립특성

GM 필드의 GM 벼 및 모품종인 '낙동' 외 3 품종의 조사 항목은 이앙 후 140일에 각 시험구별로 수확하고 자연 건조시켜 정조의 수분함량이 12~15% 일 때 미립조사 본 시험에 사용하였다. 미립특성을 조사하기 위하여 현미와 백미 길이, 폭, 두께는 각 계통당 50립씩 5반복으로 Vernier Caliper (MITUTOYO, CD-15CP)로 측정하였고, 장폭비는 현미의 길이와 폭의 비로 산출하였다. 현미와 백미의 천립중은 전자저울(ARD 120)을 이용하여 100립씩 3반복 조사한 후 그 평균치를 환산하였다.

재배환경별 미립의 화학적 특성

재배 환경에 대한 미립의 화학적 특성을 조사하고자 GM 벼와 '낙동'을 포장과 온실로 구분하여 아밀로스, 단백질 및 지질 함량을 근적외분광분석(NIRS, Foss 6500)으로 2반복 분석하여 평균치를 구하였다.

재배환경별 미립특성의 차이

재배 환경에 대한 미립의 특성을 조사하고자 GM 벼와 '낙동'을 포장과 GM 온실에서 본 시험구의 미립특성과 동일한 방법으로 조사하였다.

대규모 GM 포장에서 우점잡초종의 분포

대규모 GM 포장에서 우점잡초종 및 우점정도, 건물중을 조사하고자 2009년에서 2010년까지 시기별로 이앙 후 및 최고 분얼기, 수잉기, 등숙기 생육시기로 3반복 조사하였으며, 건물중은 출수기 30일이 경과 후 1 m²당 3 반복으로 조사하였다.

우점 잡초종의 유전자 이동성

형질전환체의 유전자가 잡초 전이성 여부를 조사하기 위하여 GM 벼 및 '낙동' 시험구의 우점 잡초 중 물달개비 외 9종의 우점잡초 종의 DNA는 Tai와 Tanksley방법[22]으로 추출하여 PCR 분석에 이용하였다. 형질전환 유무확인에는 삽입 유전자 구조를 바탕으로(Fig. 1) *Psy* 5'-ATTACTCCGGCGC GCCTTAGA-3'(forward), 5'-TCGGATAGACCTGCTGTTGC-3' (reverse), *CrtI* 5'-GTAACGCGGGCCGAAACAAACC-3' (forward), 5'-CTTCGCGCCGCACCTCAACTG-3' (reverse)의 PCR primer를 사용하여 각각 예상된 단편의 크기는 419 bp, 543 bp 계통으로 primer를 제작하였다. 기본적인 PCR 반응은 한 시료 당 총 20 µl로 10 pmol의 forward와 reverse primer 1 µl, dNTP 1 µl, 10×buffer 2 µl, eTaq 0.2 µl (Solgent Co.)에 20 ng Template DNA 를 첨가하여 수행 하였다. PCR 반응 조건은 94°C에서 2분간 pre-denaturation 과정을 수행하고, 94°C에서 1분간 변성화한 다음, 각각 *Psy* primer 57°C, *CrtI* primer 65°C에서 1분 annealing, 72°C에서 2분 extension을 한 주기로 35 cycle를 실시한 후, 72°C에서 7분간 final extension 하였다. 증폭된 PCR 산물은 QIAxcel (QIAGEN)기로 존재유무를 확인 하였다.

결과 및 고찰

형질전환체의 작물학적 특성

2009~2011년 동안 대규모 GM필드에서 육성된 형질전환체 계통의 안정화된 유전 특성을 규명하기 위하여 GM 벼 및 '낙동', 표준품종과 같이 후대 작물학적 주요 형질을 조사하였다(Table 1). GM 벼와 '낙동'의 출수일수는 3년 평균이 113일

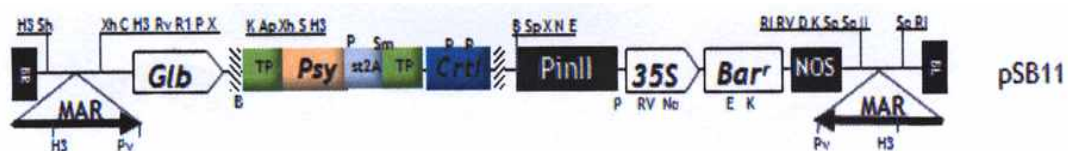


Fig. 1. Schematic representation of the T-DNA structures of GM rice of vitamin A-enriched rice.

Table 1. Comparison of agronomic traits of GM Rice and 4 varieties from 2009 to 2011

Materials	Year	HD	DH (day)	CL (cm)	PL (cm)	P (No.)	Y (kg10 ⁻¹)
GM rice	2009	8/19	7	80.1±10.3 ^a	18.4±1.4 ^a	19.4±4.5 ^a	560.9
	2010	8/18	7	107.0±2.9 ^a	19.6±1.0 ^a	15.9±4.3 ^{ab}	626.0
	2011	8/13	6	81.4±4.2 ^a	17.8±1.6 ^a	15.0±2.5 ^a	529.4
	Mean	8/10	7	89.5±5.8	18.6±1.3	16.8±3.8	572.1
Nagdong	2009	8/22	5	81.1±4.4 ^a	16.7±1.1 ^a	20.3±4.4 ^a	641.5
	2010	8/21	6	110.8±3.6 ^a	15.5±1.0 ^b	18.3±3.6 ^a	684.3
	2011	8/15	5	83.0±3.5 ^a	19.3±2.2 ^a	15.2±2.8 ^a	713.7
	Mean	8/19	5	91.6±3.8	17.2±1.4	17.9±3.6	679.8
Junam	2009	8/21	5	68.0±3.7 ^a	18.5±1.1 ^a	13.4±2.2 ^{ab}	-
	2010	8/22	5	114.9±6.2 ^a	18.6±1.5 ^a	17.6±3.3 ^a	591.6
	2011	8/15	6	73.2±5.8 ^a	18.6±1.7 ^a	17.6±3.2 ^a	786.0
	Mean	8/19	5	85.4±5.2	18.6±1.4	16.2±2.9	688.8
Baekjinju	2009	8/23	3	59.5±4.2 ^a	20.5±1.2 ^a	10.3±2.6 ^b	-
	2010	8/22	5	110.5±1.4 ^a	22.3±1.5 ^a	18.1±6.4 ^{ab}	614.8
	2011	8/14	5	84.0±2.9 ^a	17.7±1.3 ^a	15.2±1.8 ^a	693.1
	Mean	8/20	4	84.7±2.8	20.2±1.3	14.5±3.6	654.0
Ilpum	2009	8/11	7	72.1±2.7 ^a	19.7±1.1 ^a	16.8±3.3 ^b	-
	2010	8/01	6	97.6±1.8 ^b	19.2±1.3 ^a	9.5±3.6 ^b	547.8
	2011	8/13	6	70.4±2.6 ^{ab}	20.4±1.4 ^a	15.6±2.9 ^a	831.7
	Mean	8/12	6	80.0±2.4	19.8±1.3	14.0±3.3	689.8

^aMean±SD, HD: heading date, DH: days from heading initiation to full heading CL: Culm length, PL: Panicle length, P: No. of panicles/hill, Y: Yield, Means followed by a common letter are not significantly different at the 1% or 5% level by DMRT.

로 모품종인 낙동에 비하여 평균적으로 2~3일 조기출수 되었다. 포장에서 출수되는 균일도를 가지고 유전적 고정도 등을 간접 판단하는 수전기간이 14일 때 년차간 공시된 '비타민A강화벼'는 3년 평균 7일, 모품종인 낙동 평균 5일 대비, 후대 안정적으로 유전되는 것을 알 수 있었다. GM 작물 '비타민A강화벼'와 같이 출수기에서 Park 등[19]과 Park 등[20]은 형질전환체와 모품종인 '낙동'과도 유사한 경향이였다. 하지만 Bashir 등[1]은 모품종보다 10~22일 까지 늦은 출수 경향을 보고한 것으로 GM작물간 출수기 변이의 차이가 있었다. 생육조사에서 반복간 평균 간장을 조사한 결과, 3년 평균 89.8 cm로 모품종인 낙동 대비 6.5 cm차이로 나타났지만 유의성은 없었다. 수장은 18.6 cm로서 모품종인 '낙동' 대비 1.4 cm 차이로 주당 수수는 16.8개로 모품종인 '낙동' 대비 1개 차이로 유사한 경향이였다. 수량특성으로 GM 벼는 3 년간 평균 572.1 kg/10a로 나타나 '낙동' 대비 84.2% (679.8 kg/10a)를 보였으며, '주남' 대비 83% (688.8 kg/10a) 및 '백진주' 대비 87.5% (654.0 kg/10a), '일품' 대비 83% (689.8 kg/10a) 비해서 감소되어 연차간 편차를 보이면서 '낙동'과 표준품종에 비해 수량은 감소되었다. 벼는 형질전환 과정을 통해서 발생하는 유전적 구조 변화로 작물학적 변이가 유발되는데[2], 형질전환 벼의 작물학적 형질은 소수주동유전자에 지배되는 질적 형질보다 폴리진과 환경에 영향을 받는 양적 형질의 차이가 크다고 하였다[9]. GM 필드에서 GM 벼도 작물학적인 생육 특성 중 수량은 환경과 관련하여 연간 변이를 보였다. 그러나 이 등[15]의 안전성

평가 체제를 바탕으로 3년간 GM 대규모 포장에서의 GM 작물 '비타민A강화벼'는 작물학적인 특성에서 모품종인 '낙동'과 유사한 경향도 보였다.

형질전환체의 미립특성

3년 간의 대규모 GM필드에서 육성된 형질전환체 계통인 GM 벼 및 '낙동', 표준품종과 같이 미립이 안정화된 유전적인 후대 특성을 위하여 주요 미립형질을 조사하였다(Table 2).

GM 벼 와 '낙동'벼의 재배된 2년간의 미립 평균특성에서 '낙동'의 현미길이 5.0±0.2 mm인데 비해 GM 벼는 평균 5.3±0.2 mm, 현미폭은 2.9 mm, 현미두께는 2.0±0.1 mm로 '낙동'과 유사하였다. 천립중은 연차간 차이는 나지만 2년간 평균 무게는 GM 벼의 천립중은 22.9 g인데 비해 모품종인 '낙동'의 천립중은 22.0 g으로 모품종인 '낙동'과 유사한 미립 표현형으로 계통 간에 차이가 나타나지 않는 것으로 후대에 안정적인 미립특성이 고정되었다.

재배환경과 연관된 시험구 재배장소에 대한 미립 변이를 비교하기 위하여 GM 대규모 필드와 온실에서 GM 벼와 모품종인 '낙동' 현미와 백미의 미립 특성 차이를 보았다(Table 3). GM 벼는 모품종인 '낙동'과 같이 미립분류에서 자포니카 특성인 중간 미립길어로 bold형의 장폭비로 분류되었다[10]. 또한 정 등[11]은 형질전환벼와 모품종과의 미립특성이 모품종과 동일한 양상으로 보고하였다.

시험구별 재배장소 변이로 GM 벼와 모품종인 '낙동'의 천

Table 2. Grain properties of brown rice in GM rice and 4 varieties from 2010 to 2011

Materials	Year	Brown rice (mm)			Length /Width	1000 (g)
		Length	Width	Thickness		
GM rice	2	5.43±0.2 ^a	2.89±0.17 ^a	2.06±0.09 ^a	1.90	23.0 ^a
	3	5.12±0.16 ^a	2.91±0.13 ^a	1.99±0.07 ^a	1.76	22.7 ^a
Nagdong	2	4.96±0.26 ^a	2.84±0.19 ^a	2.05±0.09 ^a	1.75	21.8 ^a
	3	5.00±0.13 ^a	2.95±0.08 ^a	2.03±0.05 ^a	1.70	22.2 ^a
Junam	2	5.83±0.25 ^a	3.02±0.09 ^a	2.18±0.08 ^a	1.90	24.9 ^a
	3	4.86±0.22 ^{ab}	2.93±0.16 ^a	2.05±0.11 ^a	1.66	22.2 ^a
Baekjinju	2	5.27±0.15 ^a	2.89±0.17 ^a	1.95±0.07 ^{ab}	1.80	25.3 ^b
	3	4.85±0.16 ^{ab}	2.95±0.08 ^a	2.09±0.07 ^a	1.48	22.2 ^a
Ilpum	2	5.91±0.16 ^{ab}	3.05±0.11 ^b	2.08±0.13 ^a	1.90	25.9 ^b
	3	4.67±0.24 ^b	3.00±0.09 ^b	2.04±0.09 ^a	1.56	23.8 ^{ab}

^aMean±SD, Means followed by a common letter are not significantly different at the 1% or 5% level by DMRT.

Table 3. Grain properties of GM rice and a donor plant, 'Nagdong' in trial location

Materials	Brown rice					Trial location
	Length (mm)	Width (mm)	Thickness (mm)	Length/Width	1000 (g)	
GM rice	5.1± 0.2 ^a	2.9±0.1 ^a	2.0±0.1 ^a	1.76	22.7 ^a	GM field
	5.0±0.17 ^a	2.8±0.3 ^a	1.9±0.1 ^a	1.81	21.1 ^a	In greenhouse
	5.3±0.10 ^{ab}	3.0±0.1 ^a	2.1±0.1 ^a	1.78	25.1 ^{ab}	Out greenhouse
Nagdong	5.0±0.1 ^a	2.9±0.1 ^a	2.0±0.1 ^a	1.7	22.2 ^a	GM field
	4.8±0.79 ^a	2.8±0.4 ^a	2.0±0.1 ^a	1.70	20.0 ^a	In greenhouse
	5.0±1.03 ^a	2.2±0.4 ^a	2.1±0.1 ^a	1.79	23.8 ^{ab}	Out greenhouse

^amean±SD, Means followed by a common letter are not significantly different at the 1% or 5% level by DMRT.

립중이 GM 필드와 GM 온실에서 각각 0.4 g, 0.3 g 차이로 유사하였다. GM 온실 실외와 실내에서 '비타민 A 강화벼'와 모품종인 '낙동'의 천립중은 각 4 g, 3.8 g 차이로 온실 실외와 실내에서 시험구별 미립특성의 차이로 나타났다.

재배환경별 미립의 화학적 특성

대규모 GM 포장과 온실에서 재배된 GM 벼와 모품종인 '낙동' 미질에 영향을 미치는 현미의 화학적인 특성을 분석하였다. GM 포장에서 GM 벼의 아밀로스과 단백질 함량은 각각 18.4%와 7.1%로 모품종인 '낙동'의 24.4%와 6.5%에 비해 아밀로스 함량은 6.0% 낮았고, 단백질 함량은 0.6% 높았다. 온실에서는 아밀로스과 단백질 함량이 16.8%과 6.3%으로 모품종인 '낙동'의 19.2%와 6.1%으로 필드와 같은 양상

으로 나타났다. 시험구별 재배장소의 미질함량은 GM 필드에서 GM 벼의 아밀로스과 단백질은 18.4%와 7.1%로 온실의 16.8%와 6.3%으로 각 1.6%, 0.4%로 GM 필드에서 재배된 GM 벼가 다소 차이가 나타났다(Table 4). 벼의 이화학적인 생육특성은 품종에 기인하여 기상 또는 토양조건에 따라 큰 변이를 나타내며[3,7], 벼의 형질전환 과정을 통해서 발생하는 유전적 구조변화로 작물학적 변이가 유발된다고 하였다[2]. 형질전환 벼의 작물학적 형질은 소수주동유전자에 지배되는 질적 형질보다는 폴리진과 환경에 영향을 받는 양적 형질의 차이가 크다고[11] 하였으나, 미질함량 변이는 형질전환벼의 GM 벼는 화학적인 특성 중에 아밀로스 함량 등에서 모품종인 '낙동'과 유사한 경향이였다[1,15].

Table 4. Mean values of chemical content of GM rice and 'Nagdong' in trial location

Materials	Trial location	Amylose (%)	Protein (%)	Lipid (%)	Starch (%)
GM rice	Field	18.4±0.1 ^a	7.1±0.01 ^a	2.0±0.02 ^a	82.6±0.0 ^a
	Greenhouse	16.8±0.06 ^a	6.3±0.05 ^a	2.0±0.0 ^a	74.1±0.11 ^a
Nagdong	Field	24.4±0.27 ^a	6.5±0.04 ^a	1.9±0.01 ^a	77.5±0.11 ^a
	Greenhouse	19.2±0.06 ^a	6.1±0.02 ^a	2.2±0.01 ^a	71.7±0.01 ^a

^amean±SD.

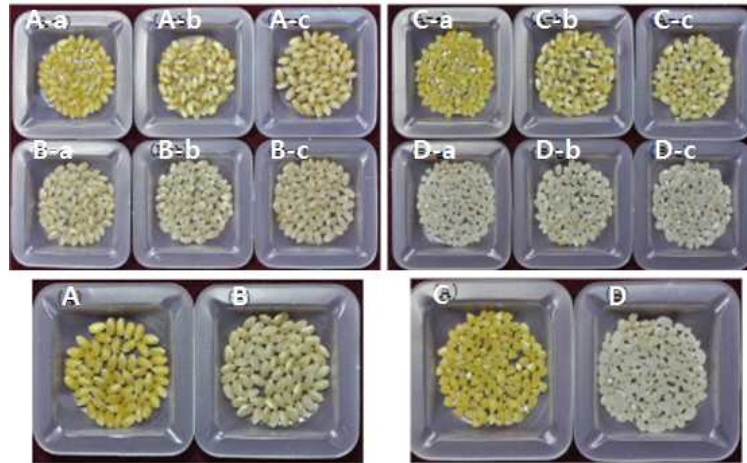


Fig. 2. Comparison of grain appearance of GM crop and 'Nagdong' in large-GM field and GM greenhouse. Brown rice; A: GM rice, B: 'Nagdong', A-a: GM field, A-b: inside greenhouse, A-c: outside greenhouse, B-a: GM field, B-b: inside greenhouse, B-c: outside greenhouse. Milled rice; C: GM rice, D: 'Nagdong', C-a: GM field, C-b: inside greenhouse, C-c: outside greenhouse, D-a: GM field, D-b: inside greenhouse, D-c: outside greenhouse.

재배환경별 미립특성의 차이

모품종인 '낙동'에 비타민A (베타카로틴)의 전구체 유전자를 삽입한 GM 벼는 2009~2011년 동안 베타카로틴의 노란색 종피색으로 발현되어 모품종인 낙동과 함께 미립색의 특성 차이를 달관조사 할 수 있었다(Fig. 2). GM 벼의 종피색을 달관 조사한 결과 '낙동' 현미색에 비해 불투명한 노란색이며, 호분층을 제거한 백미에서는 GM 벼의 노란색으로 발현되어 색소유전자가 과종피와 호분층에 집적된 자색미와 달리 배유 전체에 균일하게 집적되었으며, 세대진전이 되어도 같은 양상을 보였다.

노란색 종피 표현형질과 재배환경의 연관성을 조사하고자, GM 벼와 모품종인 '낙동'을 시험구별 재배장소로 종피색의 유전형질 분리를 달관조사하였다. 대규모의 GM 필드에서 GM 벼는 현미와 백미의 종피색이 각각 균일한 노란색 종피로 온실보다 균일하게 발현되었다. GM온실의 미립은 심복백으로 노란색 종피색과 함께 현미의 투명도가 낮아졌으며 외관품질도 떨어졌다. 이는 GM 벼의 유전자는 물질대사변형기술을 이용하여 영양성분이 강화된 특성으로 종피색이 고정된 것은 등숙기 때 전분 저장의 단계와 경로에서 다른 유전자 작용에 관여하는 상위성으로 작용하여 재배환경과 연관된 형질로 나타났다. GM 벼의 유전자는 물질대사의 단계와 경로마다 대사를 촉진하는 효소가 다르며, 각 효소는 비대립유전자의 지배를 받는 유전자인지, 이에 관여하는 효소와 다른 유전자의 작용에 관여하는 상위성인지 유전자 상호작용에 대한 연구가 더 필요하다. Matin 과 Kang [18]과 Furukawa 등[6]은 종피색 돌연변이 벼의 형질 조사에서 동일한 종피색의 형질을 가진 후대가 유전되었으며, 농업적인 특성은 일반적인 벼의 농업형질보다 초형 및 임성율, 수량성 등이 감소되었다고 한 바, GM

작물인 GM 벼와 유사한 경향이였다.

대규모 GM 포장에서 우점잡초종의 분포

GM작물은 재배 후 종자와 같이 잡초종자도 토양에 남아 포장내에 유지되어 발생하는 잡초현황을 조사하고자 2009~2011년 동안 대규모 GM 포장에서 우점 잡초종을 조사하였다. Lee 등[11]과 같이3년 연구기간 동안에도 시험구별 우점 잡초종은 물달개비(*Monochoria vaginalis* L.), 올방개(*Eleocharis kuroguwai* L.), 좁개구리밥(*Lemna aquinoctialis* Welw.), 물피(*Echinochloa crus-galli* L.), 여뀌(*Persicaria hydropiper* L.), 한련초(*Eclipta prostrata* L.), 발뚱이풀(*Lindernia procumbens* L.), 바

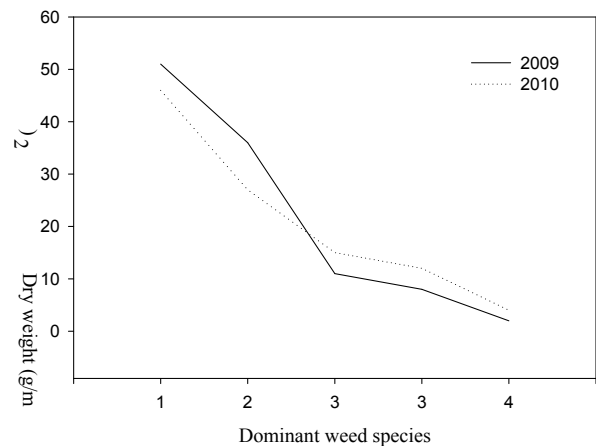


Fig. 3. Frequency of dominant weed species in GM rice and 'Nagdong' from 2009 to 2010 in large-GM rice field. 1: *Monochoria vaginalis*, 2: *Eleocharis kuroguwai*, 3: *Echinochloa crus-galli*, 4: *Lindernia procumbens*, 5: *Cyperus difformis*.

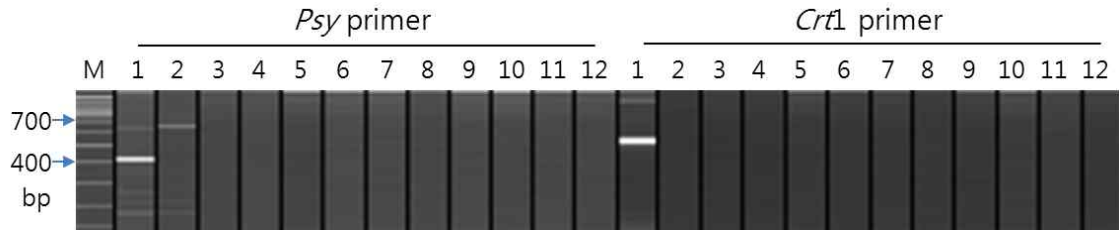


Fig. 4. The detection of gene flow to weed species in the GM rice and 'Nagdong'. M: QX DNA size marker 100 bp-3 kb (Qiagen, USA), 1: Vitamin A enforced GM rice, 2: 'Nagdong', 3: *Monochoria vaginalis*, 4: *Eleocharis kuroguwai*, 5: *Echinochloa crus-galli*, 6: *Lindernia procumbens*, 7: *Cyperus difformis*, 8: *Persicaria hydropiper*, 9: *Eclipta procumbens*, 10: *Echinochloa oryzicola*, 11: *Fimbristylis miliacea*, 12: *Aeschynomene indica*.

람하늘지기(*Fimbristylis miliacea* L.), 자귀풀(*Aeschynomene indica* L.), 알방동사니(*Cyperus difformis* L.) 등의 10여 종으로 분포하였다.

주요 우점 잡초종은 각 년차별 및 시험구별 반복간 차이가 나지 않았으며(Fig. 3), 주로 물달개비(*Monochoria vaginalis* L.)와 올방개(*Eleocharis kuroguwai* L.)가 점령되어 지속적으로 GM작물과 경합하는 양상으로 우점잡초종의 빈도분포 차이를 보였다[15]. 관행재배에서 벼 재배 시 잡초발생은 물달개비, 올방개, 여뀌바늘, 피, 벼풀 등이 주로 우점되었으며[4,16], 임등[17] 보고한 지역별 일반 농경지에서 우점잡초종이 물달개비, 올방개, 벼풀, 피, 여뀌바늘 등으로 본 실험의GM 필드 우점잡초종 결과와 유사하였다. 또한 친환경 농법에서는 재배 년차 간 우점종의 변화가 나타난 것은 채택하고 있는 농법에 따른 경운과 같은 기계적 방법, 물관리 등 잡초관리 상태와 기상, 토양 조건 등 환경 요인 등의 지속적 변화에 기인한 것으로[4], 재배적 방법의 차이로 우점 잡초 발생 양상의 변화가 되는 것이지 GM 작물의 종자와 같이 토양의 포장 내에 잡초의 영향은 미비하다고 판단되었다.

우점잡초종의 유전자 이동성

형질전환체의 유전자가 농생태계 내의 잡초로 유전자 이동성을 검정하기 위하여 '비타민A 강화벼' 포장 내에 10여 종 우점잡초 중심으로 유전자 삽입여부를 분석하였다. T-DNA 벡터 중 *Psy* 프라이머, *CrtI* 프라이머로 PCR 분석한 결과 GM 벼에는 발현되었지만 우점잡초종에는 각각의 프라이머가 발현되지 않았다(Fig. 4).

GM 작물이 환경 내 세대진전으로 장기간 생존할 경우 GM 작물 특성이 자연생태계에서 살아남을 수 있는 확률이 희박한 예로 Crawley 등[5]은 유채, 감자, 옥수수, 사탕수수의 4종류 작물을 12지역에서 10년 동안 재배하여 새로운 잡초 출현, 월동성 및 생존력 등의 여부에서 GM 작물이 짧은 재배기간의 환경에서는 더 잘 적응하는 것 같았으나 세대가 진전되는 장기간 생존하는 경우는 발견되지 않았고, 주변의 야생 다년생 식물과의 생존 경쟁력도 매우 약해서 4년 후에는 완전히 사라져 버렸다고 보고하였다. 자연생태계에는 일반적인 생물군락

이 분포하고 있기 때문에, GM 작물뿐만 아니라 일반적으로 육종된 작물도 일반 생태계에서의 경합력이 낮아 살아남을 수 없다고 하였다[13]. 하지만 GM 작물의 유전자 이동은 작물의 수분특성, 근연종 잡초 및 감수성 잡초로의 저항성 유전자의 이동에 대한 보다 체계적이고 장기적인 연구가 사료된다.

GM 작물의 농업생태계 안전성은 보다 장기간 다양한 시험재배 조건에서의 연구검토가 필요하지만, 이 등[13,15]의 연간 실험 자료를 바탕으로 3년간 실험에서 작물학적인 특성 및 미립 특성, 우점잡초종의 유전자 이동성에 대한 차이를 분석할 수 없는 결과 앞으로 GM 작물의 상업화를 앞두고 안전성 검증 체계에 대한 자료로 제공하고자 수행하였다.

감사의 글

본 논문은 농촌진흥청 차세대 바이오그린21사업(GM실용화사업단: PJ0080822011)의 지원에 의해 이루어진 것임.

References

1. Bashir, K., Husnain, T., Fatima, T., Latif, Z., Mhdi, S. A. and Riazuddin, S. 2004. Field evaluation and risk assessment of transgenic indica basmati rice. *Mol. Breed* **13**, 301-312.
2. Bennet, J. 1993. In Setlow J. K. Genetic engineering: Genes for crop improvement. pp. 165-189, 15th eds., *Plenum Press, New York*
3. Cheong, J. I., Lee, S. Y. and Kim, J. H. 1996. Comparison of rice yield and grain quality characteristics between mature and reclaimed paddy fields in Honam plain area. *Kor. J. Crop Sci.* **40**, 382-390.
4. Cho, K. M., Lee, S. B., Kim, S., An, X. H. and Chun, J. C. 2011. Weed occurrence and rice yield as affected by environment friendly farming methods. *Kor. J. Weed Sci.* **31**, 279-288.
5. Crawley, M. J., Brown, S. L., Hails, R. S., Kohn, D. D. and Rees, M. 2001. Biotechnology: Transgenic crops in natural habitats. *Nature* **409**, 682-683.
6. Furnkawa, T., Maekawa, M., Oki, T., Suda, I., Iida, S. and Shimada, H. 2007. The Rc and Rd genes are involved in

- proanthocyanidin synthesis in rice pericarp. *Plant J.* **49**, 91-102.
7. Kim, D. K., Noh, T. H., Lee, J. K., Yang, B. G. and Lee, S. Y. 1996. Comparison of yield performance and grain properties of north Korea rices between alpine and lowland area in southern part of Korea. *Kor. J. Crop Sci.* **41**, 578-585.
 8. Korea Agricultural Biosafety Information Center, Lee K.P. <http://kabic.naas.go.kr> KABIC.
 9. James, C. 2009. Global status of commercialized biotech/GM crops in 2007. *ISAAA Briefs.* 41.
 10. Jennings, P. R., Coffman, W. R. and Kauffman, H. E. 1979. Rice improvement, Grain quality. pp. 102, 6th eds., *International Rice Research Institute*
 11. Jeong, E. G., Ku, Y. C., Yi, G. H., Park, H. M. and Nam, M. H. 2005. The change of weed occurrence with cultivation of genetically modified rice for glufosinate-ammonium resistance. *Kor. J. Weed Sci.* **25**, 127-133.
 12. Lee, B. K. and Suh, S. C. 2011. A study on the trends and biosafety assessment of genetically modified crops. *Kor. J. Environ. Law* **33**, 3-25.
 13. Lee, H. S., Yi, G. H., Park, J. S., Seo, S. C., Sohn, J. K. and Kim, K. M. 2011. Analysis of the weediness potential in vitamin A enforced rice. *Kor. J. Weed Sci.* **31**, 119-125.
 14. Lee, S. W. and Park, S. C. 2011. Research development and related to industry trends: Plant. *Biosafety White Paper* **3**, 243-278.
 15. Lee, H. S., Yi, G. H. and Kim, K. M. 2010. Characteristics of agronomy to vitamin A strengthening rice at large scale GMO field. *Kor. J. Breed Sci.* **42**, 56-60.
 16. Lee, S. G., Im, I. B., Kim, D. S. and Pyon, J. Y. 2006. Competition effects of *Echinochloa crus-galli* and *Monochoria vaginalis* on rice growth and yield. *Kor. J. Weed Sci.* **26**, 262-269.
 17. Im, I. B., Kan, J., Kim, G. S., Na, S. Y. and Kyoung, E. S. 2003. Weed emergent frequency according to rice cultivation pattern in the rice paddy fields. *Kor. J. Weed Sci.* **23**, 112-122.
 18. Matin, M. N. and Kang, S. G. 2010. Morphological characteristics of the rice (*Oryza sativa* L.) with red pigmentation. *J. Life Sci.* **20**, 22-26.
 19. Park, J. E., Lee, I. Y., Kweon, S. J., Ghimire, S. R. and Shin, D. H. 2008. Comparison of pollen characteristics of Nakdongbyeo and leaf folder (*Cnaphalocrocis medinalis*) resistant rice of its transgenic line. *Kor. J. Weed Sci.* **28**, 420-426.
 20. Park, K. W., Kim, C. G., Kim, D. I., Yi, H. B., Lee, B. K. and Kim, H. M. 2007. Competitive ability and possibility of increased weediness of transgenic rice tolerant to abiotic stresses. *Kor. J. Weed Sci.* **27**, 359-365.
 21. Sendashonga, C., Hill, R. and Petrini, A. 2005. The cartagena protocol on biosafety: interaction between the convention on biological diversity and the world organisation for animal health. *Rev. Sci. Tech. Off. Int. Epiz.* **24**, 19-30.
 22. Tai, Q. and Tanksley, C. 1990. A rapid and inexpensive method for isolation of total DNA from dehydrated plant. *Plant Mol. Biol. Report* **8**, 297-303.

초록 : 대규모 GM포장에서 형질전환벼의 유전적 안전성 비교

이현숙¹ · 이기환² · 김경민^{1*}

(¹경북대학교 식물생명과학전공, ²경북대학교 농산업학과)

이 연구는 GM 벼와 모품종인 '낙동' 및 일반품종을 대조구로 작물학적인 생육특성 및 재배환경에 대한 미립의 특성, 시험구 잡초를 대상으로 우점잡초종의 빈도와 유전자 전이 정도를 2009년에서 2011년까지 조사하였다. 작물학적인 생육특성에서 GM 벼와 모품종인 '낙동'은 간장, 수장, 수수의 초형은 년차간 차이가 났지만 유의성은 없었다. 미립 특성에서 GM 벼와 모품종인 '낙동'은 미립의 길이, 폭, 두께 및 천립중은 차이를 보이지 않았다. 미립의 화학적인 특성분석에서 모품종인 낙동에 비해 GM 벼가 저아밀로스이며, 재배환경에서 두 시험구의 미립이 GM 필드보다 온실의 미립이 저아밀로스 양상을 보였다. GM 시험구내 미립의 배유 종피색 달관조사에서 GM 벼의 카로티노이드 색상이 노란 종피색은 세대가 진전되어도 안정적으로 고정되었지만, GM 온실에서 재배된 GM 벼 미립은 심복백 비율이 높아져 미립의 투명도 차이가 있었다. 농생태계에서 잡초 특성은 GM 시험구내 GM 벼와 모품종인 '낙동'은 각 년차별 우점 잡초종과 빈도는 또한 유사한 경향이였다. GM 시험구내 GM 벼와 모품종인 '낙동'의 우점 잡초군은 전 생육시기별, 년차별로 지속적으로 GM 벼와 경합하는 양상이었다. GM 필드의 우점 잡초종의 유전자 전이 정도를 PCR 분석한 결과 우점 잡초종에 증폭이 되지 않아 유전자 전이 발생 양상은 나타나지 않았다.