약배양 이용 조생 거대배아 찰벼 계통 육성

박현수* · 신운철 · 정종민 · 백만기 · 남정권 · 조영찬 · 김보경

농촌진흥청 국립식량과학원

Development of Early Maturing Glutinous Rice Lines with Giant Embryo using Anther Culture

Hyun-Su Park*, Woon-Chul Shin, Jong-Min Jeong, Man-Kee Baek, Jeong-Kwon Nam, Young-Chan Cho,
and Bo-Kyeong Kim

National Institute of Crop Science, RDA, Wanju 565-851, Korea

Abstract : Early maturing glutinous rice lines with giant embryo were developed using anther culture. Deuraechan, mid-late maturing high-yielding *japonica* rice variety with resistance against rice stipe virus (RSV), bacterial blight (BB), and lodging, and Chenghyangna *ge*, early maturing glutinous rice germplasm with giant embryo were used the parents. F₂ seeds from the cross between Deuraechan and Chenghyangna *ge* with glutinous endosperm and giant embryo were selected and propagated to F₂ population. In F₂ population, anther culture was conducted using the panicles from the early maturing plants. All doubled haploid (DH) lines showed early maturing, glutinous endosperm, and giant embryo phenotype. Through marker-assisted selections to *Stvb-i* and *Xa3*, 17 DH lines carrying both resistance genes were selected. Among 17 DH lines, six lines with more embryo size and better agronomic traits were selected and analyzed their characteristics. These lines were early maturing glutinous rice with giant embryo and showed enhanced yield, resistance against RSV and BB, and lodging, compared to previously developed giant embryo rice varieties. But they were vulnerable to preharvest sprouting which is important trait in early maturing rice. According to the texture and rapid viscosity analysis, DH lines were considered to have appropriate properties of cooked brown rice. They showed less hardness, gumminess, chewiness, and setback. Developed DH lines could be useful materials for diversification of cropping system and enhancing the brown rice consumption but the breeding efforts to improve the vulnerability against preharvest sprouting is required to apply for practical variety.

Keywords : Rice, Giant embryo, Glutinous, Early maturing, Anther culture

서 언

쌀은 도정 정도에 따라 현미와 백미로 구별되는데, 현미는 벼의 왕겨(hull)만을 제거한 것으로 일반적으로 과피(pericarp), 종피(seed coat) 및 호분층(aleurone layer)으로 구성된 미강(bran)이 전체의 약 5-6%, 배아(embryo)가 2-3%, 배유(endosperm)가 92%의 비율로 구성되어 있다(Zhou et al. 2002). 벼의 배아에는 단백질, 지방, 미네랄, 비타민과 혈압을 조절하는 감마 아미노뷰티릭산(GABA) 등 건강에 유익한 물질이 많이

들어 있다(Watanabe et al. 2002, Zhang et al. 2005). 배아의 크기가 일반배아에 비해 2배 이상 큰 거대배아는 높은 영양 성분을 함유하고 있어 쌀 소비 다양화를 위해 유용한 형질 특성이 다(Seo et al. 2011). 배아의 크기를 증대시킴으로써 쌀의 영양·기능적 가치를 증가시키기 위한 육종적 노력들이 수행되어 왔다. 일본에서 자포니카 품종 김마제에 화학적 돌연변이원인 N-methyl-N-nitrosourea (MNU)를 처리하여 유기한 거대배아 형 돌연변이를 1981년에 처음 보고하였으며, Haiminori, Haigokoro, Yukinomegumi 등 거대배아 품종을 개발하였다(Ishii et al. 2013, Kuroki et al. 2015, Maeda et al. 2001, Satoh & Omura 1981). 우리나라에서는 일품벼, 화청벼에 MNU를 처리하여 거대배아 돌연변이를 유기하였고, 2005년에 최초의

*Corresponding author (E-mail: mayoe@korea.kr, Tel: +82-63-23 8-5216, Fax: +82-63-238-5205)

(Received on August 13, 2016. Accepted on September 12, 2016.)

거대배아 품종인 큰눈이 육성되었다(Hong et al. 2012, Kim et al. 1991). 또 화청벼와 상주찰벼의 F₁ 약배양 후대에서 거대배 변이체인 YR23517Acp79 (*ge¹*)을 선발하였고 조생흑찰 품종과 교배하여 눈큰흑찰(2012년)과 눈큰흑찰 1호(2014년)를 개발하는 등 거대배아 품종 개발이 수행되고 있다(Park et al. 2010, Park et al. 2015a). 현미는 단백질, 지방, 식이섬유, 비타민 등 영양 성분이 풍부하며, 항산화 및 항당뇨 활성 기능과 함께 고혈압, 당뇨 등 성인병 예방에도 효과가 있는 것으로 알려져 현미 소비에 대한 관심이 높아진 상태이다(Kim & Baek 2012, Yoon et al. 2014). 하지만 일반적으로 현미는 백미와 다르게 외피가 두껍고 질기며, 지질 등 구성성분으로 인한 수분의 침투가 어렵고 호화가 제한되어 취반 후 현미밥의 경도가 높고 거칠며 식미가 떨어지는 단점을 가지고 있다(Kim & Jeon 1996, Park & Woo 1991). 이러한 문제점을 해결하기 위해서 현미를 발아시킨 발아 현미의 이용이나 현미의 과피층 일부를 제거하는 등 현미밥의 식감을 개선하려는 연구들이 수행되고 있다(Kim et al. 2012, Oh et al. 2012). 특수미 중에서 가공용으로 가장 많이 이용되고 있는 것은 찰벼이다(Song et al. 2013). 평야지에서의 찰벼 생산은 수량성 및 안정성이 높은 중만생종 위주로 재배되어 생산되어 왔으나, 최근 평야지에서 수확철 노력 분산, 추석전 햅쌀 출하, 이모작 등 작부체계의 다양화 등으로 조생종 찰벼 품종 개발에 대한 요구도가 증가하고 있는 추세이다(Park et al. 2012). 국립식량과학원에서 개발된 자포니카 조생종 찰벼는 일반 찰벼인 진부찰벼(1990년 개발), 상주찰벼(1997년), 청백찰(2010년), 진설찰(2012년), 윤일찰(2014년) 및 윤백찰(2015년), 흑미 찰벼인 조생흑찰(2004년), 적미 찰벼인 적진주찰(2010년), 거대배아 흑미 찰벼인 눈큰흑찰(2012년)과 눈큰흑찰 1호(2014년) 등 10품종으로 모두 벼줄무늬잎마름병에 대해서 이병성이고, 최근에 육성된 윤일찰과 윤백찰만이 벼흰잎마름병 균계 K1, K2, K3에 저항성일 정도로 내병성이 취약한 실정으로 이에 대한 개선이 필요하다(Park et al. 2014b). 본 연구는 작부체계 다양화를 위해 내병성 및 내도복 등 재배 안정성이 개선된 조생종으로 현미의 영양성분 증대 및 소비 다양화를 위해 거대배아 찰벼인 특수미 계통을 약배양을 통해 조기에 개발하고 이들의 형질 특성을 분석하여 육종사업에 반영하고자 수행하였다.

재료 및 방법

시험재료 및 재배방법

내병성이면서 도복에 강한 특성을 갖고 있는 자포니카 초다수

중만생 품종 드래찬과 조생 거대배아 찰벼 유전자원인 청향나 *ge(IT260480)*를 교배 모부본으로 이용하였다. 약배양을 이용하여 개발된 조생 거대배아 찰벼 43 계통과 모부본, 비교품종인 큰눈과 눈큰흑찰을 국립식량과학원 익산 벼 시험포장에 2014년 4월 30일 파종하여 5월 30일에 재식거리 30 x 15 cm로 주당 1본씩 조당 30주를 이양하여 계통 선발시험을 수행하였다. 이중 선발된 6개 약배양 계통을 모부본, 비교품종과 함께 2015년 4월 30일 파종하여 5월 30일에 재식거리 30 x 15 cm로 주당 3본씩 구당 180주를 3반복으로 이양하여 생산력 검정시험을 수행하였다. 시비량은 N-P₂O₅-K₂O를 90-45-57 kg/ha으로 질소는 기비 : 분얼비 : 수비를 50 : 20 : 30 비율로 분시하였고, 인산은 전량 기비로, 칼륨은 기비 : 수비를 70 : 30 비율로 분시하였다. 기타 재배관리는 농촌진흥청 표준 재배법에 준하여 실시하였다.

농업형질 조사

계통 선발시험에 공시된 재료의 출수기를 조사하고 성숙기에 평균이 되는 5개체에 대해서 간장, 수장, 수수를 측정하였다. 선발 계통들에서 계통 당 20주를 수확하여 정조종을 측정하고 일부를 제형하여 현미에 대한 입형 특성을 조사하였다. 현미의 길이, 너비, 두께를 캘리퍼스 (caliper CD-15CP, Mitutoyo Corp., Japan)를 이용하여 10립에 대해서 조사하고 너비에 대한 길이의 비율로 현미 장폭비를 계산하였다. 현미 10립에 무게를 5반복으로 측정하고 현미에서 배를 제거하고 배유만 존재한 상태의 무게를 측정하여 배아 무게 및 현미 무게에 대한 배아 무게의 비율을 산출하였다. 생산력 검정시험에 공시된 재료의 출수기를 조사하고 성숙기에 시험구별로 10개체에 대해서 간장, 수장, 수수를 측정하였다. 출수 후 45일에 3주를 예취하여 등숙률 및 수당립수를 측정하고, 수량은 100주를 예취하여 정조수량을 측정한 다음 이 중 1 kg에 대해서 수량조사현미기(LST, Gwangyang, Korea)로 제형하여 정현비율을 측정하고, 100주 정조수량에 정현비율을 곱하여 현미수량을 구하였다. 제현된 현미를 가지고 현미 천립중을 측정하였고, 현미밥의 물성 및 현미가루의 호화점도 분석에 이용하였다.

내병성 검정

벼줄무늬잎마름병 및 흰잎마름병 저항성 유전자 *Shv-i*와 *Xa3*의 도입여부를 확인하기 위해서 대상 유전자와 밀접하게 연관된 분자표지인 Indel7과 9643.T4를 이용하였다. 저항성 유전자 검정은 Park et al. (2015b)에 준하여 수행하였다. 분자표지를

이용한 저항성 유전자 검정과 함께 내병성에 대한 생물검정을 수행하였다. 계통 선발시험에 공시된 재료에 대해서 벼흰잎마름 병원균 HB1013 (K1 균계)를 최고분얼기에 엽선단 3 cm 부위를 2 개체씩 가위 절엽접종하였다. 생산력 검정시험 공시 계통에 대해서 벼흰잎마름병 대표균계인 K1 (HB1013), K2 (HB1014), K3 (HB1015)를 균계별로 3주씩 접종하였다. 접종 후 3주 후에 각각의 개체에서 가장 긴 병반을 가진 3개 엽의 병반장을 측정하여 평균 병반장 길이가 5 cm 이하는 이하는 저항성(R; resistant), 5-10 cm는 중도저항성(MR; moderately resistant), 10 cm 이상은 이병성(S; susceptible)으로 질적저항성을 구분하였다. 벼줄무늬잎마름병 검정은 망실을 이용한 대량 검정법으로 바이러스 보독충의 방사 및 계대 사육으로 보독충이 충분히 유지된 망실에서 계통당 1.5g을 조파하였으며, 파종 후 30일경 이병성 대비품종 잎품벼가 병징을 나타낼 때 저항성과 감수성으로 판정하였다 (Kwak et al. 2007).

재해 저항성 검정

생산력 검정시험에 공시된 재료에 대해서 도복 저항성과 수발아 검정을 수행하였다. 도복 저항성을 검정하기 위해서 출수 후 20일에 평균적인 개체 3개체를 채집하여 주간의 3절간의 길이와 좌절중을 측정하였다. 3절간장은 눈 표면에서 3번째에 위치한 마디의 길이를 측정하였고, 좌절중은 간기부에서 10 cm 절간 중앙부에 인장강도 시험기(DTG-5, Digitech Co., Ltd., Osaka, Japan)를 이용하여 하중을 걸어 부러질 때의 무게를 측정하였다. 수발아 검정을 위해 출수 후 40일에 주간의 이삭을 채취하여 치상 트레이에 종이 타월을 2겹으로 깔은 다음 증류수로 충분히 흡수시킨 후 이삭을 치상하고 다시 종이 타월로 덮은 후에 랩으로 감싸서 수분의 증발을 막았다. 항온습습기(DS-14M, Dasol Scientific Co., Ltd., Hwaseong, Korea)에 포화습도 100%, 25°C 조건에서 7일간 정치하였다가 꺼내어 발아율을 측정하였다.

현미밥의 물성 측정

현미밥의 물성 측정을 위하여 스테인리스 컵(직경 40 mm, 높이 70 mm)에 현미 15g을 측정하여 20ml의 물을 넣고 10분간 상온에서 수침하여 불린 후 전기밥솥(SR-3010, Cuckoo Electronics Co., Ltd., Seoul, Korea)에 일정량의 물을 넣고 20분 동안 취사하였다. 취사 후 밥솥에서 10분간 정치 후 꺼내어 완성된 밥은 상온에 10분간 식힌 후에 Texture analyzer (TA-XT2, Stable Micro System Ltd., Haslemere, UK) 를 이용

하여 측정하였다. 직경 20 mm probe를 이용하여 pre-test 3.0 mm/sec, test speed 1.0 mm/sec, post-test speed 1.0 mm/sec, trigger force 10.0 g의 조건에서 각 시료의 경도(hardness), 탄력성(springiness), 응집성(cohesiveness), 검성(gumminess), 씹힘성(chewiness)을 측정하였다.

현미가루의 호화점도 측정

신속점도측정기(Model Rapid Visco Analyzer, Newport Scientific Ltd., Warriewood, Australia)를 이용하여 현미가루의 호화점도 특성을 측정하였다. 용기에 시료 3 g과 25 mL의 증류수를 넣어 분산시키고 온도를 50-95°C까지 상승 및 유지시킨 후 다시 50°C까지 냉각, 유지하면서 점도를 측정하였다. 호화점도 특성은 호화개시온도(pasting temperature), 최고점도(peak viscosity), 최저점도(trough viscosity), 최종점도(final viscosity)를 구하고, 이것을 이용하여 강하점도(break down; 최고점도-최저점도)와 치반점도(setback; 최종점도-최고점도)를 계산하였다. 점도단위는 RVU (rapid viscosity unit)로 표시하였다.

통계분석

통계분석은 SAS 프로그램(Version 9.2, SAS Institute Inc., Cary, NC, USA)과 R (Version 3.0.1)을 이용하였다. 농업형질에 대한 평균을 기술 통계법으로 구하였고, 평균간 비교는 PROC ANOVA로 분산분석 후 유의성이 있을 경우 5% 유의수준에서 Duncan's Multiple Range test(DMRT)로 분석하였다. PROC CORR로 상관분석을 실시하여 입형 관련 형질들의 관련성을 알아보고, F₂ 종자의 배아와 배유형에 대한 분리비는 R의 χ^2 -test를 통해 적합도 검정을 수행하였다.

결 과

약배양 계통 육성

드래찬을 모본으로 청향나 ge를 부분으로 단교잡하여 육성된 F₁ 식물체 20개체를 성숙기에 수확하여 각 식물체별로 F₂ 종자를 제형 후 현미 500개에 대해서 배아 형태를 일반배아와 거대배아로 구분하였고 배유의 전분형태를 메벼와 찰벼로 육안 구분하였다(Fig. 1). 메벼와 찰벼의 분리비는 3:1로 나타났고 일반배아와 거대배아는 3:1의 분리비보다 거대배아형이 적게 나왔다(Table 1). 조사한 F₂ 현미 종자 중에서 거대배아면서 찰벼인 종자를 선별하여 F₂ 식물체를 육성하였고 F₂ 집단에서 출수기가 조생인

Table 1. Segregation ratio of embryo type and endosperm starch in F₂ seeds.

No. of plants	Embryo type		Expected ratio	χ^2	<i>p</i> -value	Endosperm starch		Expected ratio	χ^2	<i>p</i> -value
	Normal	Large				Nonglutinous	Glutinous			
1	400	100	3:1	6.67	0.010	385	115	3:1	1.07	0.302
2	387	113	3:1	1.54	0.215	358	142	3:1	3.08	0.079
3	393	107	3:1	3.46	0.063	362	138	3:1	1.80	0.179
4	386	114	3:1	1.29	0.256	390	110	3:1	2.40	0.121
5	392	108	3:1	3.08	0.079	371	129	3:1	0.17	0.680
6	390	110	3:1	2.40	0.121	364	136	3:1	1.29	0.256
7	398	102	3:1	5.64	0.018	387	113	3:1	1.54	0.215
8	394	106	3:1	3.85	0.050	385	115	3:1	1.07	0.302
9	396	104	3:1	4.70	0.030	367	133	3:1	0.68	0.409
10	407	93	3:1	10.92	0.001	366	134	3:1	0.86	0.353
11	429	71	3:1	31.10	0.000	385	115	3:1	1.07	0.302
12	410	90	3:1	13.07	0.000	363	137	3:1	1.54	0.215
13	401	99	3:1	7.21	0.007	358	142	3:1	3.08	0.079
14	407	93	3:1	10.92	0.001	377	123	3:1	0.04	0.836
15	398	102	3:1	5.64	0.018	365	135	3:1	1.07	0.302
16	400	100	3:1	6.67	0.010	383	117	3:1	0.68	0.409
17	419	81	3:1	20.65	0.000	401	99	3:1	7.21	0.007
18	417	83	3:1	18.82	0.000	385	115	3:1	1.07	0.302
19	394	106	3:1	3.85	0.050	395	105	3:1	4.27	0.039
20	408	92	3:1	11.62	0.001	402	98	3:1	7.78	0.005
Total	8,026	1,974	3:1	147.56	0.000	7,549	2,451	3:1	1.28	0.258

Fig. 1. Grain appearance of non-glutinous rice with normal embryo (A) and giant embryo (B) and glutinous rice with normal embryo (C) and giant embryo (D) in F₂ segregation population derived from the cross between Deuraechan and Cheonghyangna *ge*.

개체의 이삭 40여개를 채취하여 약배양을 수행하였다(Table 2). 약배양을 통해 육성된 고정계통 43계통을 모부본인 드래찬, 청향나 *ge*와 비교품종인 큰눈, 눈큰흑찰과 함께 공시하여 계통 선발시험을 수행하였다.

조생 거대배아 찰벼 계통 선발

드래찬과 큰눈은 파종후 출수까지 걸리는 기간(HDAS; heading days after seeding)이 110일, 108일로 중만생종, 눈큰흑찰은 99 HDAS 로 준조생종, 청향나 *ge*는 82 HDAS 로 조생종에 속하였다. 드래찬은 일반배아 메벼, 큰눈은 거대배아 메벼, 청향나 *ge*와 눈큰흑찰은 거대배아 찰벼이고, 눈큰흑찰은 종피가 흑색인 흑미이다(Table 3). 약배양 유래 43계통은 출수까지 80-92 HDAS 인 조생종으로 모두 거대배아 찰벼 형태를 나타냈다. 내병성 계통을 선발하기 위해서 벼흰잎마름병 K1 균계를 접종하여 생물검정을 수행하였고, 벼줄무늬잎마름병 및 흰잎마름병 저항성 유전자 *Snb-i*, *Xa3*를 탐지하는 분자표지를 이용하여 저항성 유전자 도입 여부를 확인하였다(Fig. 2). 드래찬은 *Snb-i*와 *Xa3*를 가지고 있었고 청향나 *ge*, 큰눈, 눈큰흑찰은 저항성 유전자가 확인되지 않았다. 약배양 계통은 *Snb-i*를 보유한 계통이 30계통, *Xa3*를 보유한 계통이 23 계통이었고 둘 다 가지고 있는 계통은 17계통이었다. 드래찬과 약배양 계통 중 *Xa3*를 보유한 계통들은 K1 균계에 저항성 반응을 나타냈다. 내병성을

Table 2. Anther culture ability and doubled haploid lines derived from the cross of Deuraechan/Cheonghyangna *ge*

Cross (gen.)	Anther cultured (no.)	Calli induced (no. and %)	Plant regeneration (no. and %) ^z	Green plants (no. and %) ^y	Albino (no. and %) ^x	Doubled haploid lines (no.) ^w
Deuraechan/ Cheonghyangna <i>ge</i> (F ₂)	7,500	3,696(49.3)	272(7.4)	128(47.1)	144(52.9)	43

^zPercent of plant regeneration is the number of plants regenerated over number of calli plated^yPercent of green plants is the number of green plants regenerated over total plants regenerated^xPercent of albino is the number of albino plants regenerated over total plants regenerated^wDoubled haploid lines are harvested plants having fertile grain**Table 3.** Characteristics of the parents, large embryo varieties, and selected DH lines.

Var./line	Heading (HDAS) ^z	Embryo type	Endosperm starch	Pericarp color	Reaction to bacterial blight (K1 race)	Resistance genes
Deuraechan	110	normal	nonglutinous	white	R ^y	<i>Xa3+Stvb-i</i>
Cheonghyangna <i>ge</i>	82	large	glutinous	white	S	<i>unknown</i>
Geunnun	108	large	nonglutinous	white	S	<i>unknown</i>
Nunkeunheugchal	99	large	glutinous	black	S	<i>unknown</i>
Selected AC lines (n=17)	84 (80-92)	large	glutinous	white	R	<i>Xa3+Stvb-i</i>

^zHeading days after seeding^yR and S mean resistant and susceptible to bacterial blight respectively **Fig. 2.** PCR analysis to confirm the resistance genes using the gene specific DNA markers. *Stvb-i* and *Xa3* were confirmed by PCR product amplified with primers, Indel7(A) and 9643.T4 (cleaved by *Taq* I). The white stars represent the lines carrying the resistance gene. M: DNA size marker, 1: Deuraechan, 2: Cheonghyangna *ge*, 3: Geunnun, 4: Nunkeunheugchal, 5: HR30194(F2)-AC2, 6: AC3, 7: AC5, 8: AC6, 9: AC7, 10: AC10, 11: AC15, 12: AC16, 13: AC17, 14: AC18, 15: AC19, 16: AC22, 17: AC26, 18: AC28, 19: AC34, 20: AC37, 21: AC38.

나타낸 17개 약배양 계통을 선발하여 입형 특성을 분석하였다 (Table 4). 현미 장폭비가 2.13로 중원형인 눈큰흑찰을 제외하고 드래찬, 청향나 *ge*, 큰눈 및 선발 약배양 계통은 현미 장폭비가 1.61-1.84 범위로 단원립이었다. 현미 천립중은 일반배아 메벼인 드래찬이 25.9 g으로 가장 무거웠고 거대배아 메벼 큰눈(18.6 g), 거대배아 찰벼인 청향나 *ge*(17.8 g), 눈큰흑찰(17.6 g), 약배양 계통(13.8-18.5 g, 평균16.3 g) 순이었다. 현미 종실중 대배아의 무게 비율은 드래찬 2.9%, 큰눈 6.4%, 눈큰흑찰 7.1%,

청향나 *ge* 8.9%로 청향나 *ge*가 가장 높았으며, 선발된 거대배아 찰벼 계통은 평균 7.6%(5.4-10.8%)로 일반배아 메벼인 드래찬에 비해 2배 이상 높은 비율을 나타냈다. 선발된 거대배아 찰벼 계통의 입형 관련 형질들의 관련성을 보면 통계적으로 유의한 수준에서 현미 장폭비는 길이와는 정의 상관을 나타냈으며, 현미 종실중에 대한 배아의 무게 비율은 배아 무게와 정의 상관을 나타냈다. 배아가 크면서 내도복성을 나타내는 등

Table 4. Grain-related traits of brown rice of parents, large embryo varieties, and selected DH lines.

Var./line	Grain length (mm)	Grain width (mm)	Grain thickness (mm)	Ratio of length to width	1000 grain weight (g)	Embryo weight of 1000 grain (g)	Ratio of embryo weight to grain weight (%)
Deuraechan	5.42	3.22	2.19	1.68	25.9	0.7	2.9
Cheonghyangna <i>ge</i>	5.17	2.98	2.05	1.74	17.8	1.6	8.9
Geunnun	4.86	2.93	2.04	1.66	18.6	1.2	6.4
Nunkeunheugchal	5.69	2.68	1.81	2.13	17.6	1.3	7.1
Selected AC lines (n=17)	4.95 (4.51-5.18)	2.87 (2.74-3.04)	1.94 (1.81-2.06)	1.73 (1.61-1.84)	16.3 (13.8-18.5)	1.3 (1.0-1.6)	7.6 (5.4-10.8)

Table 5. Relationship between grain-related traits of selected large embryo glutinous rice lines.

Trait	GW	GT	RLW	TGW	EW	REG
GL ^z	0.151 ^{nsy}	-0.340 ^{ns}	0.715 ^{**}	0.299 ^{ns}	-0.008 ^{ns}	-0.192 ^{ns}
GW		0.559 [*]	-0.583 [*]	0.880 ^{**}	0.300 ^{ns}	-0.122 ^{ns}
GT			-0.679 ^{**}	0.398 ^{ns}	0.431 ^{ns}	0.232 ^{ns}
RLW				-0.375 ^{ns}	-0.224 ^{ns}	-0.077 ^{ns}
TGW					0.078 ^{ns}	-0.383 ^{ns}
EW						0.886 ^{**}

^zGL: grain length of brown rice, GW: grain width, GT: grain thickness, RLW: ratio of length to width, TGW: 1000 grain weight, EW: embryo weight of 1000 grain, REG: ratio of embryo weight to grain weight

^yns, *, and ** mean no significant, significant at $p < 0.05$, and $p < 0.01$, respectively

Table 6. Yield-related traits of varieties and DH lines at yield trial.

Var./line	Heading date (HDAS) ^z	Culm length (cm)	Panicle length (cm)	No. of panicles per hill	No. of spikelets per panicle	Ratio of ripened grain (%)	1,000 grain weight of brown rice (g)	Brown/rough rice ratio (%)	Brown rice yield (kg/10a)
Deuraechan	108aA ^y	70bB	26aA	9cB	131aA	93.1aA	25.6aA	80.0aA	519aA
Cheonghyangna <i>ge</i>	85gC	67bcBC	17eD	14aA	65cB	45.2efC	17.4dD	74.8cbBC	342gE
Geunnun	107bA	78aA	24bB	12abAB	128aA	61.8bB	19.6bB	75.4bB	460bB
Nunkeunheugchal	96cB	63cdC	20dC	12abAB	71cB	12.2hD	18.5cC	73.5cdD	387fD
HR30194(F2)-AC2	87f	69bc	21cd	11b	131a	42.0g	16.9e	73.8cd	426de
HR30194(F2)-AC7	84h	60d	20d	12ab	105b	43.3fg	17.7d	72.5d	420e
HR30194(F2)-AC15	84gh	60d	21cd	9c	121ab	45.3ef	17.7d	72.8d	430cde
HR30194(F2)-AC16	87f	64cd	22c	11b	110b	50.5d	17.2de	73.7cd	442c
HR30194(F2)-AC17	88e	69bc	22c	10bc	112b	47.7e	17.5	73.8cd	430cde
HR30194(F2)-AC37	94d	62cd	21cd	12ab	104b	54.5c	15.7f	75.4b	439cd
Mean of AC	87C	63C	21C	11AB	114A	47.2C	17.1D	73.7CD	431.2C

^zHeading days after seeding

^yMeans with same letters in a column are not significantly different at $p < 0.05$ (ANOVA followed by DMRT). Small and capital letters indicate statistic difference between DH lines and mean of lines respectively

농업형질이 양호한 약배양 계통 HR30194(F2)-AC2(이하 AC2), AC7, AC15, AC16, AC17, AC37 등 6 계통을 우량계통으로 선발하여 생산력 검정시험을 수행하여 형질 특성을 분석하였다.

선발 약배양 계통의 농업형질 특성

약배양 계통 AC2, AC7, AC15, AC16, AC17, AC37은 파종 후 출수기까지 걸리는 기간이 평균 87 HDAS 로 조생종에 속하며 평균 간장이 63 cm로 모부분인 드래찬과 청향나 *ge*에 비해 단간이었다(Table 6). 평균 수장은 21 cm로 드래찬(26 cm)보다

Table 7. Characteristics of grain-related traits of varieties and DH lines at yield trial.

Var./line	Embryo type	Endosperm starch	Brown rice						
			Length (mm)	Width (mm)	Thickness (mm)	Ratio of length to width	1000 grain weight (g)	embryo weight of 1000 grain (g)	Ratio of embryo weight to grain weight (%)
Deuraechan	normal	nonglutinous	5.12bB ^z	3.09aA	2.11aA	1.65bB	25.2aA	0.8bB	3.2bB
Cheonghyangna <i>ge</i>	large	glutinous	4.80cdC	2.88deB	2.02bcA	1.67bB	16.6deC	1.3abA	7.6aA
Geunnun	large	nonglutinous	4.83cdC	3.02abA	2.07abA	1.60bB	18.9bB	1.4aA	7.3aA
Nunkeunheugchal	large	glutinous	5.66aA	2.61fC	1.83eB	2.17aA	17.9bcB	1.2abAB	6.7aAB
HR30194(F2)-AC2	large	glutinous	4.67d	2.91cde	1.93d	1.60b	16.2de	1.2ab	7.7a
HR30194(F2)-AC7	large	glutinous	4.93c	2.94bcd	1.91d	1.67b	16.3de	1.3ab	8.0a
HR30194(F2)-AC15	large	glutinous	4.94c	2.96bcd	1.95cd	1.67b	16.9cde	1.3ab	7.4a
HR30194(F2)-AC16	large	glutinous	4.71d	2.95bcd	1.94cd	1.64b	16.5de	1.3ab	8.0a
HR30194(F2)-AC17	large	glutinous	4.72d	2.97bc	1.98cd	1.59b	17.0cd	1.3ab	7.8a
HR30194(F2)-AC37	large	glutinous	4.71d	2.85e	1.78e	1.66b	15.6e	1.2ab	7.4a
Mean of AC	large	glutinous	4.78C	2.93B	1.91B	1.63B	16.4C	1.3A	7.7A

^zMeans with same letters in a column are not significantly different at $p < 0.05$ (ANOVA followed by DMRT). Small and capital letters indicate statistic difference between DH lines and mean of lines respectively

Table 8. Characteristics of resistance reaction to disease, preharvest sprouting, and lodging.

Var./line	Reaction to				3rd internode length (cm)	Breaking strength (g)	Preharvest sprouting (%)
	Bacterial blight (race)			Rice stripe virus			
	K1	K2	K3				
Deuraechan	R ^z	R	R	R	7.5dC	1294aA	22.2abcA ^y
Cheonghyangna <i>ge</i>	S	S	S	S	12.0abA	604eC	2.3cC
Geunnun	S	S	S	S	10.0abcB	967cdB	9.1bcB
Nunkeunheugchal	S	S	S	S	11.2abA	688eC	2.4cC
HR30194(F2)-AC2	R	R	R	R	10.2abc	855d	24.0ab
HR30194(F2)-AC7	R	R	R	R	12.2a	1224ab	7.1bc
HR30194(F2)-AC15	R	R	R	R	9.9bc	1191ab	10.6bc
HR30194(F2)-AC16	R	R	R	R	11.0ab	847d	18.7abc
HR30194(F2)-AC17	R	R	R	R	8.6cd	869d	31.7a
HR30194(F2)-AC37	R	R	R	R	11.2ab	1073bc	31.0a
Mean of AC	R	R	R	R	10.7B	1010B	20.5A

^zR and S mean resistant and susceptible to disease respectively

^yMeans with same letters in a column are not significantly different at $p < 0.05$ (ANOVA followed by DMRT). Small and capital letters indicate statistic difference between DH lines and mean of lines respectively

짧고 청향나 *ge*(17 cm)보다 길었으며, 평균 수수는 11개로 드래찬(9개)보다 많았고 청향나 *ge*(14개)보다는 적었다. 평균 수당립수는 114개로 드래찬(131개)보다는 적었으나 청향나 *ge*의 65개보다 크게 증가하였다. 등숙률은 일반배아 메벼인 드래찬이 93.1%로 가장 높았고 이후 거대배아 메벼인 큰눈(61.8%), 거대배아 찰벼인 약배양 계통(42.0-54.5%, 평균 47.2%)과 청향나 *ge*(45.2%), 거대배아 흑찰인 눈큰흑찰(12.2%) 순이었다. 현미 천립중은 드래찬(25.6 g)이 가장 무거웠고 이후 큰눈(19.6 g), 눈큰흑찰(18.5 g), 청향나 *ge*(17.4 g) 및 약배양 계통(15.7-17.7

g; 평균 17.1 g) 순이었다. 정현비율은 드래찬(80.0%), 큰눈(75.4%), 청향나 *ge*(74.8%), 약배양 계통(72.5-75.4%, 평균 73.7%), 눈큰흑찰(73.5%) 순이었다. 현미 수량은 드래찬이 519 kg/10a로 가장 많았고 큰눈(460 kg/10a), 약배양 계통(426-442 kg/10a, 평균 431.2 kg/10a), 눈큰흑찰(387 kg/10a), 청향나 *ge*(342 kg/10a) 순이었다. 약배양 계통은 평균 현미 장폭비가 1.63인 단위립으로 평균 현미 천립중이 청향나 *ge*(16.6 g)와 비슷한 16.4 g이었다(Table 7). 현미 종실중에 대한 배아의 무게 비율은 7.7%로 일반배아 메벼인 드래찬(3.2%)에 비해 두 배

Table 9. Texture characteristics of cooked brown rice.

Var./line	Hardness (g)	Springiness	Cohesiveness	Gumminess	Chewiness
Deuraechan	3275.3bB	0.738cB	0.162bB	530.9bcB	393.3bcBC
Cheonghyangna <i>ge</i>	2554.3efD	0.819abA	0.163bB	416.3dC	341.4cC
Geunnun	2938.3cC	0.758bcAB	0.196abA	577.5bB	434.9bB
Nunkeunheugchal	5518.7aA	0.786abcAB	0.179abAB	989.3aA	776.0aA
HR30194(F2)-AC2	2251.7g	0.867a	0.199a	450.9cd	391.6bc
HR30194(F2)-AC7	2669de	0.855a	0.173ab	462.4cd	394.3bc
HR30194(F2)-AC15	2412fg	0.842a	0.183ab	441.0cd	371.1bc
HR30194(F2)-AC16	2420.3fg	0.837ab	0.176ab	425.2cd	355.2bc
HR30194(F2)-AC17	2774.7cd	0.761bc	0.166ab	459.6cd	349.6c
HR30194(F2)-AC37	2383.7fg	0.853a	0.179ab	423.4cd	360.8bc
Mean of AC	2485.2D	0.836A	0.179AB	443.7C	370.4BC

^zMeans with same letters in a column are not significantly different at $p < 0.05$ (ANOVA followed by DMRT). Small and capital letters indicate statistic difference between DH lines and mean of lines respectively

Table 10. Pasting characteristics of brown rice flours.

Var./line	Pasting temp. (°C)	Peak viscosity (RVU)	Trough viscosity (RVU)	Final viscosity (RVU)	Break down (RVU)	Setback (RVU)
Deuraechan	69.2abcdA	190.2aA	105.8aA	202.8aA	84.4aA	12.6aA
Cheonghyangna <i>ge</i>	70.1abcA	113.7bB	61.0bB	77.1bB	52.7bB	-36.6bB
Geunnun	68.8cdA	188.5aA	97.4aA	189.8aA	91.1aA	1.3aA
Nunkeunheugchal	69.0bcdA	69.2cC	28.1cC	37.1cC	41.0cdC	-32.1bB
HR30194(F2)-AC2	70.1abc	55.0c	17.4c	24.0c	37.6d	-31.0b
HR30194(F2)-AC7	70.4a	62.6c	21.1c	28.5c	41.5cd	-34.1b
HR30194(F2)-AC15	70.3ab	53.4c	17.7c	24.4c	35.7d	-29.0b
HR30194(F2)-AC16	69.8abc	49.4c	16.3c	22.5c	33.2d	-27.0b
HR30194(F2)-AC17	69.3abcd	50.1c	16.4c	22.9c	33.7d	-27.2b
HR30194(F2)-AC37	68.4d	101.4b	51.3b	64.4b	50.1bc	-37.0b
Mean of AC	69.7A	62.0C	23.4C	31.1C	38.6C	-30.9B

^zMeans with same letters in a column are not significantly different at $p < 0.05$ (ANOVA followed by DMRT). Small and capital letters indicate statistic difference between DH lines and mean of lines respectively

이상으로 눈큰흑찰(6.7%)보다 높았으며 큰눈(7.3%)과 청향나 *ge*(7.6%)와 비슷한 수준으로 거대배아 형태를 나타냈다.

내병성 및 내재해성 특성

조생 거대배아 찰벼 약배양 계통의 벼흰잎마름병 및 줄무늬잎마름병에 대한 내병성과 도복저항성 및 수발아에 대한 내재해성 특성은 Table 8과 같다. 벼흰잎마름병 및 줄무늬잎마름병에 대한 생물검정 결과 청향나 *ge*와 큰눈, 눈큰흑찰은 벼흰잎마름병 균계 K1, K2, K3 및 벼줄무늬잎마름병에 이병성인 반면 약배양 계통과 드래찬은 저항성 반응을 나타냈다. 도복저항성과 관련하여 드래찬이 3절간장이 가장 짧았고 좌절중이 컸으며, 약배양 계통

은 큰눈과 비슷한 수준으로 청향나 *ge*, 눈큰흑찰에 비해 3절간장이 짧고 좌절중이 컸다. 수발아는 드래찬(22.2%)이 가장 많이 발생하였고, 약배양 계통(7.1-31.7%, 평균 20.5%), 큰눈(9.1%), 눈큰흑찰(2.4%), 청향나 *ge*(2.3%) 순이었다.

현미밥의 물성 및 현미가루의 호화점도 특성

조생 거대배아 찰벼 약배양 계통의 현미밥의 취반 후 정도, 탄력성, 응집성, 감성 및 씹힘성에 대한 분석 결과는 Table 9와 같다. 정도는 흑미 거대배아 찰벼 품종인 눈큰흑찰이 5518.7 g으로 가장 단단하였으며, 일반배아 메벼인 드래찬(3275.3 g), 거대배아 메벼 큰눈(2983.3 g), 거대배아 찰벼인 청향나

ge(2554.3 g), 약배양 계통(2251.7-2774.7 g, 평균 2485.2 g)순으로 거대배아 찰벼가 가장 낮은 경도를 나타냈다. 검성 및 씹힘성은 경도가 낮은 청향나 *ge*와 약배양 계통이 흑미 거대배아 찰벼인 눈큰흑찰, 일반배아 메벼 드래찬, 거대배아 메벼 큰눈에 비해 낮은 값을 나타냈다. 현미가루의 호화점도 특성을 살펴보면 호화개시온도는 차이가 없는 경향이었고, 최고점도는 메벼인 드래찬(190.2 RVU)과 큰눈(188.5 RVU)이 찰벼인 청향나 *ge*(113.7 RVU), 눈큰흑찰(69.2 RVU) 및 약배양 계통(49.4-101.4 RVU, 평균 62.0 RVU)에 비해 높았다(Table 10). 약배양 계통들은 최저점도와 최종점도가 낮은 값을 나타냈으며, 강하점도와 치반점도도 낮은 값을 나타냈다.

고 찰

본 논문의 육종 목표는 작부체계 다양화와 현미밥 소비에 대한 관심이 증대하고 있는 시대상을 반영하여 재배안정성을 갖춘 조생종이면서 영양·기능 성분을 강화하기 위해 거대배아 형질을 도입하고, 현미밥의 경도가 높고 거칠어 식미가 떨어지는 단점을 보완하기 위해 찰성 배유를 가지는 거대배아 찰벼인 특수미를 개발하는 것이다.

영양성분 및 기능성 물질이 많은 것으로 알려진 거대배아형은 화학적 돌연변이원인 MNU를 처리하여 유기되었으며, trisomic 분석 및 염색체 지도 작성을 통해서 7번염색체의 위치하는 것으로 밝혀졌다(Koh et al. 1996, Satoh & Iwata 1990). 유전자에 대한 분자 클로닝을 통해서 거대배아에 관련된 유전자는 사이토 크롬 P450을 암호화하며 배유와 배아의 크기 조절 및 경정분열 조직(shoot apical meristem; SAM)의 유지를 위해 필수적인 역할을 한다(Yang et al. 2013). 거대배아 돌연변이는 하나의 열성 유전자 또는 두 쌍의 열성 중복 유전자에 의해 조절되는 것으로 보고되었다(Koh et al. 1993, Qian et al. 1996, Satoh & Omura 1981). 거대배아 돌연변이인 *ge*¹도 일반 배아형 품종과의 F₂ 분리집단에서 분리비 3 (일반배아) : 1 (거대배아)을 나타내 거대배아형은 하나의 열성유전자에 의해 조절되는 것으로 나타났다(Park et al. 2009). 본 논문의 드래찬/청향나 *ge*의 F₂ 종자의 분리비는 2, 3, 4, 5 식물체를 제외한 16개 식물체에서 3 : 1의 분리비보다 거대배아형이 적게 나왔으며, 전체로 볼 때 하나의 열성유전자에 의해 조절되는 3 : 1의 분리비보다 거대배아형이 적게 나왔다(Table 1). 이러한 결과는 거대배아형에 대한 육안 평가시 일반배아보다 다소 큰 거대배아형을 일반배아형으로 분류하여 거대배아형을 상대적으로 적게 분류한 실험상의 오류

이거나, 거대배아형에 대한 대립유전자는 *ge-1*에서 *ge-5*(Hong et al. 1995), *ge-6*에서 *ge-10*(Nagasawa et al. 2013), *ge*^s, *ge*^m(Koh et al. 1996), *II-ge*, *XS-ge1*(Zhang et al. 2005), *ge*¹(Park et al. 2009) 등 여러 개가 보고되었으며 배아의 크기는 여러 유전자에 의해 조절되는 양적형질이라는 연구결과(Dong et al. 2003)를 볼 때 청향나 *ge*의 거대배아형이 하나의 열성 유전자 이외의 다른 유전자의 영향을 받을 수 있는 것에 기인한 것으로 생각된다. 배유의 메성과 찰성의 분리비는 기존에 알려진 3 (메성) : 1(찰성)의 분리비를 나타내 찰성은 하나의 열성유전자에 조절된다(Chao 1928)는 결과와 일치하였다.

조기에 조생 거대배아 찰벼 계통 육성이라는 육종목표를 달성하기 위해서 약배양 육종법을 적용하였다. F₂ 종자에서 거대배아 찰벼인 종자를 선별하여 육성된 F₂ 집단에서 조생 개체의 이삭을 채취하여 약배양을 수행하였다. 7,500 개의 약을 채취하여 약배양을 수행하였고 이 중 49.3%인 3,696개가 캘러스로 생성되었다. 생성된 캘러스의 7.4%인 272개가 식물체로 재분화되었고, 백색체 144개를 제외한 128개가 녹색체였으나 최종적으로 임성을 나타낸 이배체 계통은 43개로 다소 낮은 약배양 효율을 나타냈다(Table 2). 이는 다른 자포니카형 F₁ 조합인 HR26234-15-1-/SR30071-3-7-23-6-2-1의 캘러스 형성률 35.8%와 드래찬/보람찬의 33.3% 약배양에 비해 49.3%로 캘러스 형성률은 높았으나, 식물체 재분화율이 7.4%로 21.0%와 12.8%에 비해 낮았고, 생성된 128개의 녹색체에서 임성을 나타낸 이배체 계통이 43개로 상대적으로 적었기 때문으로 생각된다(Park et al. 2014a, Park et al. 2015b). 약배양 유래 43계통은 모두 거대배아 찰벼형으로 이는 일반적으로 거대배아와 찰벼의 표현형은 모두 열성유전자에 의해 조절되기 때문에 거대배아 찰벼로 선별된 F₂ 종자로 작성된 F₂ 분리집단에서 이들 형질들의 분리가 일어나지 않았기 때문으로 생각된다. 또한 약배양 유래 계통들은 모두 조생종에 속하였는데, 조생종 육성이라는 육종목표를 효율적으로 달성하기 위해서 F₂ 분리집단의 개체에서 출수가 빠른 조생 개체들만을 선발하여 이들의 이삭으로 약배양을 수행하였기 때문으로 생각된다.

내병성을 증진하기 위해서 벼줄무늬잎마름병 및 흰잎마름병 저항성 유전자 *Stvb-i* 및 *Xa3*를 탐지하는 분자표지를 이용하여 저항성 유전자가 도입된 17개 계통을 선발하였다(Fig. 2). 이들 17개 선발 약배양 계통들은 현미 종실중에 대한 배아의 무게 비율이 평균 7.6%로 드래찬(2.9%)에 비해 2배 이상 높은 비율로 거대배아형을 나타냈다(Table 4). 입형 관련 형질들의 관련성 중에 현미 종실중에 대한 배아의 무게 비율은 배아의 무게와는

높은 정의상관관계를 나타냈으나 다른 형질들과는 상관관계가 나타나지 않아 배아의 크기는 현미의 길이, 너비, 두께 등의 형태적 특성보다는 거대배아형에 관여하는 유전자의 발현 정도의 의한 것으로 생각되었다. Nagasawa et al.(2013)은 거대배아형에 관여하는 유전자인 *GIANT EMBRYO (GE)*는 *CYP78A13*을 부호화하며, *GE*의 과발현은 배아의 크기를 작게하고 배유를 크게하며, *GE*의 기능상실 돌연변이는 거대배아형을 나타내는 등 거대배아 관여 유전자의 발현 정도가 배아의 크기에 영향을 미친다 하였다.

배아가 크면서 내도복성을 나타내는 등 농업형질이 양호한 약배양 계통 6계통을 선발하여 수량성 및 농업형질 특성을 분석하였다. 일반배아 메벼인 드래찬의 등숙률이 93.1%인데 반하여 거대배아 메벼인 큰눈(61.8%), 거대배아 찰벼인 선발 약배양 계통(47.2%), 청향나 *ge*(45.2%), 거대배아 흑찰인 눈큰흑찰(12.2%)로 거대배아형의 등숙률이 현저히 낮은 것으로 나타났다. Park et al.(2015a)은 눈큰흑찰의 등숙률이(9.0%)이 매우 낮은 것은 등숙은 충실하나 왕겨와 현미 사이의 공극 발생으로 인한 것이라 하였고, 찰벼는 메벼에 비해 배유의 공극이 많아 등숙률 측정을 위한 비중선시 떠오르는 종자가 메벼에 비해 상대적으로 많아 거대배아 찰벼 약배양 계통의 등숙률이 낮은 것으로 생각된다. 선발된 약배양 계통의 현미 수량성은 426-442 kg/10a로 중만생종 메벼 일반형인 드래찬(519 kg/10a), 거대배아형 큰눈(460 kg/10a)보다는 낮으나 눈큰흑찰(387 kg/10a)과 모본인 청향나 *ge*(342 kg/10a) 보다 향상된 수량성을 나타냈다. 선발된 약배양 계통은 기존의 거대배아 품종인 큰눈, 눈큰흑찰에 비해 벼줄무늬잎마름병 및 흰잎마름병에 대해 향상된 내병성을 확보하였으며, 모본인 드래찬의 강한 도복 저항성에 영향을 받아 3절간장이 줄어들고 좌절중이 커지는 등 도복에 대한 안정성이 강화되었다. 드래찬은 자포니카 내도복성 품종인 주남을 모본으로 하였고 신동진과 온대 자포니카 품종으로 *sd-1*을 가지고 있으면서 도복에 매우 강하여 NPT 계통의 도복 저항성 강화를 위해 이용된 Shennong 89-336(Khush & Aquino 1994)을 이용한 후대 계통간의 F₁을 부분으로 작성된 품종으로 도복에 강한 특성을 나타낸다(Park et al. 2015b). 하지만 드래찬은 수발아에 대해서 약한 특성을 나타낸다(Ha et al. 2009). 본 연구에서도 드래찬이 수발아율 22.2%로 가장 많이 발생하였고, 약배양 계통도 평균 20.5%로 수발아에 취약한 특성을 나타냈으며 인위적인 수발아 검정 이외에 수확된 종자의 품질 조사 결과 자연적으로 발생한 수발아의 피해를 일부 확인할 수 있었다. 수확전 종실이 모식물체에 붙어 있는 상태에서 발아를 하는 수발아는 발생시

수량감소는 물론 품질을 저하를 가져와 경제적 가치를 크게 떨어뜨린다(Kim et al. 2008). 수발아는 종자의 휴면성과 관련된 형질 특성으로 등숙기의 지속적인 강우에 의한 휴면물질이 용탈되고 대기중의 포화수분이 높은 상태로 고온 조건이 유지될 경우 발아에 적합한 환경조건의 조성으로 수발아가 발생하며, 태풍이나 집중호우로 인하여 침관수 또는 도복이 되었을 때 장기간 적절한 대응이 되지 않을 경우에 발생하는 것으로 구분할 수 있다고 하였다(Park & Kim 2009). 우리나라에서 조생종의 등숙기는 중만생종 등 다른 생태형에 비해 고온과 강우의 발생이 많아 조생종에서 수발아 발생에 따른 피해가 많은 상황이다. 육성된 약배양 계통의 경우 조생종으로 수발아에 더 취약한 환경조건에 처할 가능성이 높으며, 거대배아 찰벼 형질은 특수미로 외관 품위 등 품질 특성이 상대적으로 더 중요하다. 육성된 약배양 계통은 도복에 안정성을 확보하여 도복에 의한 수발아 발생을 방지할 수 있는 방안은 마련하였으나, 유전적으로 수발아에 취약한 특성을 나타내서 기후변화로 등숙기 고온 및 강우가 빈번해지는 상황을 감안한다면 실용적인 품종으로서 활용하기 위해서는 수발아에 대한 개선이 반드시 필요할 것으로 생각된다.

거대배아 현미는 GABA를 포함하여 건강에 유익한 성분이 일반 현미에 비해 많이 들어있어(Choi et al. 2006, Seo et al. 2011) 육성된 거대배아 찰벼 약배양 계통도 영양·기능 성분이 증대되었을 것으로 판단된다. 현미밥의 텍스처 분석 결과 거대배아 찰벼 약배양 계통이 어금니 사이로 밥을 압축하여 변형시키는데 필요한 힘인 경도가 평균 2485.2g으로 낮고 식품을 삼킬 수 있는 상태까지 씹는데 필요한 힘인 검성 및 씹힘성이 낮아 현미밥의 식감 개선에 효과적인 것으로 생각되었다. 반면 같은 거대배아 찰벼인 눈큰흑찰의 현미밥 경도(5518.7 g)가 가장 높았는데, 흑미 찰벼와 일반 찰벼와의 수분흡수에서 흑미 찰벼가 일반 찰벼에 비해 2배 정도 더 느리게 수분을 흡수하고 경도도 단단하다는 연구결과(Oh et al. 2002)를 볼 때 흑미 종피의 물리적 수분흡수 억제로 인하여 경도가 높은 것으로 생각되었다. 현미가루의 호화점도 특성을 보면 찰벼인 청향나 *ge*, 눈큰흑찰, 약배양 계통이 메벼인 드래찬과 큰눈에 비해서 최고점도, 최저점도, 최종점도, 강하점도, 치반점도 모두 낮은 값을 나타냈다(Table 10). 이는 찰쌀이 멍쌀에 비해 찰현미가 일반 현미에 비해 치반점도 등 호화점도 특성이 낮다고 한 결과와 일치하였다(Lee & Kim 2011, Song et al. 2008). 치반점도는 전분의 노화정도 또는 냉각과정에서 겔화로 인해 구조가 형성되는 정도를 반영하는데 일반적으로 수치가 높을수록 노화가 급격히 진행된다(Cho et al. 2012, Jeong et al. 2013)고 하여 육성된 거대배아

찰벼 계통의 현미밥의 노화가 서서히 진행될 수 있음을 예측할 수 있다.

평야지의 작부체계 다양화와 현미밥 소비에 대한 관심이 증가하고 있는 시대상에 맞는 벼 품종을 조기에 개발하기 위해서 약배양을 이용하여 조생종이면서 거대배아 찰벼인 계통을 육성하였다. 이들 계통은 기존의 거대배아 품종에 비해 향상된 수량성과 내병성 및 도복 저항성으로 재배 안정성을 확보하였다. 또한 거대배아를 가지고 있어 영양적 기능적 성분이 강화되었을 것으로 여겨지며 찰벼 형질을 가지고 있어 현미밥의 식감 개선에 있어서 소기의 육종목표를 달성하였다. 하지만 조생종으로서 수발아에 대한 취약점을 보여 실질적인 재배 품종으로서 활용되기 위해서는 수발아에 대한 육종적 개선 노력이 필요할 것으로 생각된다.

적 요

약배양을 이용하여 조생종이면서 거대배아 찰벼인 계통을 육성하였다. 벼줄무늬잎마름병, 흰잎마름병에 내병성이고 내도복성을 가지고 있는 자포니카 초다수 중만생 품종인 드래찬과 조생종이면서 거대배아 찰벼 유전자원인 청향나 *ge*를 교배모본으로 이용하였다. 드래찬과 청향나 *ge*의 단교잡 유래 F₂ 중자 중 거대배아이면서 찰벼인 종자를 선별하여 F₂ 집단을 작성하였고, 조생 개체의 이삭을 채취하여 약배양을 수행하였다. 약배양을 통해 육성된 고정계통들은 모두 조생종이면서 거대배아 찰벼 형질 특성을 나타냈다. 벼줄무늬잎마름병 저항성 유전자 *Stvb-i*와 흰잎마름병 저항성 유전자 *Xa3*에 대한 분자표지 선발을 통해 두 유전자를 모두 가지고 있는 약배양 17 계통을 선발하였다. 17 계통 중에서 배아가 크고 농업형질이 양호한 6 계통을 선발하여 이들의 특성을 분석하였다. 이들 계통은 조생 거대배아 찰벼 계통으로 기존의 개발된 거대배아 품종에 비해 향상된 수량성, 내병성 및 도복 저항성을 나타내었으나 조생종에 있어서 중요한 형질인 수발아에 취약한 단점을 보였다. 현미밥의 물성과 현미가루의 호화점도 특성을 분석한 결과 개발된 약배양 계통은 경도가 낮고 검성 및 씹힘성이 낮아 현미밥의 식감 개선에 효과적이며 치반점도가 낮아 노화가 서서히 진행되어 현미밥에 적당할 것으로 생각되었다. 개발된 조생 거대배아 찰벼 계통은 작부체계 다양화 및 현미밥 소비 증대를 위해 유용한 자원으로 활용될 수 있으나 실용적인 품종으로 재배되기 위해서는 수발아에 취약한 단점을 보완하는 육종적 노력이 선행되어야 할 것으로 생각된다.

사 사

본 논문은 농촌진흥청 연구사업(과제번호: PJ01020201)의 지원에 의해 이루어진 것임.

REFERENCES

1. Chao LF. 1928. The disturbing effect of the glutinous gene in rice on a Mendelian ratio. *Genetics*. 13: 191-225.
2. Cho YS, Lee KH, Ha HJ, Choi YH, Kim EM, Park SY. 2012. Effect of steaming and dehydration condition on physicochemical characteristics of Korean traditional parboiled rice (Olbyeossal). *J. Appl. Biol. Chem.* 55: 185-189.
3. Choi ID, Kim DS, Son JR, Yang CI, Chun JY, Kim KJ. 2006. Physico-chemical properties of giant embryo brown rice (Keunnunbyeol). *J. Appl. Biol. Chem.* 49: 95-100.
4. Dong Y, Tsuzuki E, Kamiunten H, Terao H, Lin D. 2003. Mapping of QTL for embryo size in rice. *Crop Sci.* 43: 1068-1071.
5. Ha KY, Kim BK, Ko JK, Shin MS, Kim KY, Ko JC, Baek MK, Kang HJ, Nam JK, Kim WJ. 2009. A medium-late, high yielding and good quality rice variety, 'Deureachan'. *Korean J. Breed. Sci.* 41: 645-648.
6. Hong HC, Kim YG, Choi YH, Yang SJ, Lee KS, Lee JH, Jung OY, Yang CI, Cho YC, Choi IS, Baek MK, Kim MK, Yea JD, Hwang HG, Roh JH, Kim SL, Choi HC, Lee YT, Lee SH. 2012. A medium-maturing, giant-embryo, and germination brown rice cultivar 'Keunnun'. *Korean J. Breed. Sci.* 44: 160-164.
7. Hong SK, Aoki T, Kitano H, Satoh H, Nagato Y. 1995. Phenotypic diversity of 188 rice embryo mutants. *Dev. Gent.* 16: 298-310.
8. Ishii T, Ideta O, Matsushita K, Sunohara Y, Maeda H, Iida S. 2013. 'Haigokoro', a new rice cultivar with high-emergence rate, low-amylose content and giant embryo. *Reserach Bull. NARO West. Reg. Agric. Res. Cent.* 12: 25-41.
9. Jeong JM, Jeung JU, Lee SB, Kim MK, Kim BK, Sohn JK. 2013. Physicochemical properties of rice endosperm with different amylose contents. *Korean J. Crop Sci.* 58: 274-282.
10. Khush G, Aquino R. 1994. Breeding tropical japonicas for hybrid rice production. *Hybrid rice technology: New*

- developments and future prospects. Int. Rice Res. Inst., Manila, Philippines pp. 33-36.
11. Kim HW, Oh SK, Kim DJ, Yoon MR, Lee JH, Choi IS, Kim YG, Cha KN. 2012. Changes in contents of nutritional components and eating quality of brown rice by pericarp milling. Korean J. Crop Sci. 57: 35-40.
 12. Kim JY, Baek SH. 2012. Hydration and cooking properties of brown rice scratched with a knife. Korean J. Food Sci. Technol. 44: 722-727.
 13. Kim JS, Ahn SN, Kang HK, Cho YH, Gwag JG, Lee SY. 2008. Estimation of physico-chemical characteristics of domestic aroma rice and foreign aroma rice. Korean J. Crop Sci. 53: 203-216.
 14. Kim KA, Jeon ER. 1996. Physicochemical properties and hydration of rice on various polishing degrees. Korean J. Food Sci. Technol. 28: 959-964.
 15. Kim KH, Heu MH, Park SZ, Koh HJ. 1991. New mutants for rice grain quality. Korean J. Crop Sci. 36: 197-203.
 16. Koh HJ, Park SZ, Won YJ, Heu MH. 1993. Nutritional and agronomic characteristics of super-giant embryo mutant in rice. Korean J. Crop Sci. 38: 537-554.
 17. Koh HJ, Heu M, McCouch SR. 1996. Molecular mapping of the *ge^s* gene controlling the super-giant embryo character in rice (*Oryza sativa* L.). Theor. Appl. Genet. 93: 257-261.
 18. Kuroki M, Shimizu H, Ando I, Yokogami N, Matsuba S, Araki H. 2015. Breeding of 'Yukinomegumi', a rice cultivar with giant embryo. Res. Bull. NARO Hokkaido Agri. Res. Cent. 204: 1-18.
 19. Kwak DY, Yeo US, Lee JH, Oh BG, Shin MS, Ku YC. 2007. Mass screening method for rice virus resistance using screen house. Korean J. Crop. Sci. 52: 129-133.
 20. Lee YT, Kim YU. 2011. Physicochemical properties of brown rice flours differing in amylose content prepared by different milling methods. J. Korean Soc. Food Sci. Nutr. 40: 1797-1801.
 21. Maeda H, Nemoto H, Iida S, Ishii T, Nakagawa N, Hoshino T, Sakai M, Okamoto M, Shinoda H, Yoshida T. 2001. A New Rice Variety with Giant Embryos, 'Haiminori'. Breed. Sci. 51: 211-213.
 22. Nagasawa N, Hibara KI, Heppard EP, Vander Velden KA, Luck S, Beatty M, Nagato Y, Sakai H. 2013. *GIANT EMBRYO* encodes CYP78A13, required for proper size balance between embryo and endosperm in rice. The Plant J. 75: 592-605.
 23. Oh GS, Kim K, Park JH, Kim SK, Na HS. 2002. Physical properties on waxy black rice and waxy rice. Korean J. Food Sci. Technol. 34: 339-342.
 24. Oh SK, Lee JH, Yoon MR, Kim DJ, Lee DH, Choi IS, Lee JS, Kim IH, Lee JS. 2012. Physicochemical properties of germinated brown rice. J Korean Soc. Food Sci. Nutr. 41: 963-969.
 25. Park DS, Hwang UH, Park SK, Lee JH, Han SI, Cho JH, Lee JY, Oh SH, Jang KC, Seo WD, Shin DJ, Kim SY, Song YC, Yeo US, Park NB, Nam MH, Lee JK. 2015a. A waxy black giant embryo early maturing rice variety 'Nunkeunheugchal'. Korean J. Breed. Sci. 47: 68-74.
 26. Park DS, Park SK, Lee BC, Song SY, Jun NS, Manigbas NL, Cho JH, Nam MH, Jeon JS, Han CD. 2009. Molecular characterization and physico-chemical analysis of a new giant embryo mutant allele (*ge t*) in rice (*Oryza sativa* L.). Genes & Genomics. 31: 277-282.
 27. Park DS, Park SK, Yi GH, Hwang UH, Kim SM, Han SI, Seo WD, Lee JH, Cho JH, Song YC, Yeo US, Jang KC, Kwon TM, Nam MH, Park ST, Kang HW. 2010. Agronomic and chemical properties of a new black waxy giant embryo mutant, Milyang 263, in rice (*Oryza sativa* L.). Korean J. Breed. Sci. 42: 463-469.
 28. Park HS, Baek SH, Kim WJ, Jeung JU, Lee JH, Ha KY, Park JH, Nam JK, Baek MG, Yoo JS, Baek CH, Noh TH, Kim KY, Cho YC, Kim BK, Lee JH. 2014a. Development of multi-resistant lines to brown planthopper, bacterial blight, and rice stripe virus using anther culture in rice. Korean J. Breed. Sci. 46: 78-89.
 29. Park HS, Ha KY, Kim KY, Kim WJ, Nam JK, Baek MK, Kim JJ, Jeong JM, Cho YC, Lee JH, Kim BK. 2015b. Development of high-yielding rice lines and analysis of panicle and yield-related traits using doubled haploid lines derived from the cross between Deuraechan and Boramchan, high-yielding japonica rice cultivars in Korea. Korean J. Breed. Sci. 47: 384-402.
 30. Park HS, Kim KY, Kim WJ, Ko JC, Nam JK, Jeung JU, Kim BK, Lee JH. 2014b. Development of breeding lines for early maturing glutinous japonica rice carrying bacterial blight resistance genes, *Xa2*, *Xa3*, *xa5*, and *Xa21*. Korean J. Breed. Sci. 46: 195-202.
 31. Park HS, Kim KY, Shin MS, Noh TH, Jeung JU, Kim YG, Suh JP, Ha KY, Baek MG, Baek SH, Kang HJ, Ko JC, Kim BK. 2012. Variation of yield and grain quality by the inoculation of K1 and K3a races of bacterial blight

- in early maturing *japonica* rice varieties. Korean J. Breed. Sci. 44: 516-525.
32. Park HW, Woo KJ. 1991. The hydration properties and the cooking qualities of various brown rices. Korean J. Soc. Food Sci. 7: 25-40.
 33. Park JS, Kim HD. 2009. Viviparous germination characteristics of rice varieties adaptable to central region of Korea. Korean J. Crop Sci. 54: 241-248.
 34. Qian Q, Xiong Z, Min S, Zhu L. 1996. The RFLP of tagging of giant embryo gene. Chinese J. Rice Sci. 10: 65-70.
 35. Satoh H, Omura T. 1981. New endosperm mutations induced by chemical mutagens in rice *Oryza sativa* L. Japan J. Breed. 31: 316-326.
 36. Satoh H, Iwata N. 1990. Linkage analysis in rice. On three mutant loci for endosperm properties, *ge* (giant embryo), *du-4* (dull endosperm-4) and *flo-1* (floury endosperm-1). Japan J. Breed. 40(S.2): 268-269.
 37. Seo WD, Kim JY, Park DS, Han SI, Jang KC, Choi KJ, Kim SY, Oh SH, Ra JE, Yi GH. 2011. Comparative analysis of physicochemicals and antioxidative properties of new giant embryo mutant, YR23517Acp79, in rice (*Oryza sativa* L.). J. Korean Soc. Appl. Biol. Chem. 54: 700-709.
 38. Song J, Kim JH, Kim DS, Lee CK, Youn JT, Kim SL, Suh SJ. 2008. Physicochemical properties of starches in *japonica* rices of different amylose content. Korean J. Crop Sci. 53: 285-291.
 39. Song YC, Cho JH, Lee JH, Kwak DY, Park NB, Yeo US, Kim CS, Jeon MG, Lee JY, Lee GH, Ha WG, Lee JS, Jung KH, Cho YH, Kang HW. 2013. A glutinous rice variety with multiple disease resistance 'Baegokchal'. Korean J. Breed. Sci. 45: 31-37.
 40. Watanabe M, Maemura K, Kanbara K, Tamayama T, Hayasaki H. 2002. GABA and GABA receptors in the central nervous system and other organs. Int. Rev. Cytol. 213: 1-47.
 41. Yang W, Gao M, Yin X, Liu J, Xu Y, Zeng L, Li Q, Zhang S, Wang J, Zhang X. 2013. Control of rice embryo development, shoot apical meristem maintenance, and grain yield by a novel cytochrome P450. Mol. Plant. 6: 1945-1960.
 42. Yoon MR, Lee JS, Lee JH, Kwak JE, Chun AR, Won YJ, Kim BK. 2014. Comparison of textural properties in various types of brown rice. Korean J. Food Nutr. 27: 294-301.
 43. Zhang L, Hu P, Tang S, Zhao H, Wu D. 2005. Comparative studies on major nutritional components of rice with a giant embryo and a normal embryo. J. Food Biochem. 29: 653-661.
 44. Zhou Z, Robards K, Helliwell S, Blanchard C. 2002. Composition and functional properties of rice. Int. J. Food. Sci. Techno. 37: 849-868.