자포니카 장립종 장원형 벼 계통 개발 및 특성분석

박현수* · 백만기 · 남정권 · 신운철 · 이건미 · 박슬기 · 이창민 · 김춘송 · 조영찬

농촌진흥청 국립식량과학원

Development and Characterization of *japonica* Rice Line with Long and Spindle-shaped Grain

Hyun-Su Park*, Man-Kee Baek, Jeong-Kwon Nam, Woon-Cheol Shin, Gun-Mi Lee, Seul-Gi Park, Chang-Min Lee, Choon-Song Kim, and Young-Chan Cho

National Institute of Crop Science, RDA, Wanju, 55365, Korea

Abstract To enhance rice yield and diversify grain quality of Korean *japonica* rice, we developed *japonica* rice line with long and spindle-shaped grain. Korean *japonica* rice cultivars have narrow genetic background of grain size and shape. Most of cultivars show medium-short and semi-round grain. To diversify the genetic background for grain, we developed Jeonju625, *japonica* rice line with long and spindle-shaped grain, derived from a cross between DSG79, the breeding material with extra-long and spindle-shaped grain, and Boramchan, *japonica* super high-yielding cultivar with medium-short and semi-round grain. Jeonju625 had *GW2gs3qSW5+qGL3* allele type for grain-related genes, which conferred extra-long and spindle-shaped grain. The grain length and ratio of length to width of brown rice of Jeonju625 was 7.06 mm and 2.72, respectively. Jeonju625 was improved the deteriorated traits of DGS79, very late heading, long culm, long awn, droopy flag leaves, and susceptibility to lodging, by strong selection pressure focused on field breeding. The milled rice yield of Jeonju625 was 559 kg/10a, which was similar level of Boramchan (552 kg/10a) and 29% enhanced yield compared to DSG79. Jeonju625 had suitable characteristics for cooked rice. Jeonju625 showed lower protein contents and better glossiness and palatability of cooked rice than Boramchan and Hanareum2. Elite *japonica* rice line, Jeonju625, with extra-long and spindle-shaped grain showed good characteristics for rice yield and grain quality. Jeonju625 could be utilized practical cultivar and breeding material for enhancing rice yield and diversifying grain quality.

Keywords Rice, *japonica*, grain, yield, quality

Received on March 13, 2018. Accepted on April 6, 2018.

* Corresponding Author (E-mail: mayoe@korea.kr, Tel: +82-63-238-5214, Fax: +82-63-238-5205)

서 언

벼 낱알의 크기와 형태는 수량과 품질에 중요한 역할을 하는 형질로 인종, 문화, 성별 및 연령에 따라 선호하는 특성이 다르며 사회 요구와 시대 흐름에 따라 육종의 목표 형질 값과 그 중요성이 변화하게 된다(Park et al. 2017). 우리나라, 일본, 중국 동북지역의 사람들은 대부분 쌀이 짧고 둥근 형태를 선호하는 반면, 동남아시아, 중국 남부, 아메리카, 유럽 지역의 사람들은 길고 얇은 형태의 쌀을 선호한다(Calingacion et al. 2014). 재배벼는 주로 인디카와 자포니카의 생태형으로 구분되는데 인디카 벼는 낱알의 길이가 길고 너비가 얇은 장립종의 세장형 입형 특성을 나타내는 것이 많으며 자포니카 벼는 낱알의 길이가 짧고 형태가 둥근 단립종의 단원형 입형 특성을 가지는 것이 많다(Juliano 1979).

특히 우리나라 사람들은 예로부터 밥이 차지며 끈기가 있는 것을 좋아하는데(Choi 2002) 자포니카 쌀이 밥을 지었을 때 찰성이 있고 끈기가 있는 반면 인디카 쌀은 밥의 찰기가 상대적으로 떨어지고 푸석푸석한 느낌을 가지는 경우가 많다(Choi 2010, Kang et al. 2006). 이러한 생태형에 따른 입형과 식미의 차이는 우리나라에서 자포니카 위주의 벼 품종 개발 및 쌀 산업 구조의 발달을 가져왔다.

입형을 구분하는 국제적인 기준은 정해져 있지 않고 각기 다른 기준을 사용하고 있다. 국제미작연구소에서(International Rice Research Institute; IRRI)는 현미 길이를 기준으로 7.5 mm 이상 초장립종(extra long), 6.6-7.5 mm는 장립종(long), 5.5-6.5 mm는 중립종(medium), 5.5 mm 미만은 단립종(short)으로 구분하며, 현미 장폭비를 기준으로 3.0 이상을 세장형

(slender), 2.1-3.0을 중원형(medium), 1.1-2.0을 단원형(blod), 1.1 이하를 원형(round)으로 구분한다(IRRI 2014). 유엔식량농업기구(Food and Agriculture Organization of the United Nations; FAO)에서는 장폭비, 낱알 길이, 장폭비와 낱알 길이 동시 고려 등 세 가지 유형으로 장립종(long grain), 중립종(medium grain), 단립종(short grain)을 분류한다. 장폭비를 기준으로 장립종은 3.1(현미 기준)과 3.0(백미) 이상, 중립종은 2.1-3.0(현미)와 2.0-2.9(백미), 단립종은 2.0(현미)과 1.9(백미) 이하로 구분하고, 낱알 길이를 기준으로 6.6 mm 이상은 장립종, 6.2-6.6 mm은 중립종, 6.2 mm이하의 단립종으로 구분한다. 장폭비와 낱알 길이를 동시에 고려해서는 낱알 길이 6.0 mm 이상이고 장폭비 2.0-3.0이거나 3.0 이상을 장립종, 낱알 길이 5.2-6.0 mm이고 장폭비 3.0 이하의 중립종, 낱알 길이 5.2 mm 이하이거나 장폭비 2 이하의 단립종으로 구분한다(CODEX 1995). 우리나라에서는 현미 길이를 기준으로 5.00 mm 이하 단립종(S, short), 5.01-5.50 mm 중단립종(MS, medium-short), 5.51-6.00 mm 중립종(M, medium), 6.01-7.00 mm 장립종(L, long), 7.01 mm 이상 초장립종(EL, extra long)으로 구분(RDA 2012) 하며, 국제식물신품종보호동맹(International Union for the Protection of New Varieties of Plants; UPOV) 기준을 따라 현미의 형태를 장폭비 1.5 이하 원형(round), 1.50-1.99 단원형(semi-round), 2.00-2.49 중원형(half spindle-shaped), 2.50-2.99 장원형(spindle-shaped), 3.00 이상 세장형(long spindle-shaped)으로 구분한다(KSVS 2005).

우리나라 자포니카 벼 품종들은 대부분 중단립종 단원형의 매우 협소한 입형 특성을 가지고 있다(Park et al. 2017). 협소한 유전적 배경으로 인하여 새롭게 개발되는 육성 계통이나 품종들의 입형은 중단립종 단원형 위주로 고착화되었다. 자포니카 벼의 정제되어 있는 수량성 장벽과 기후변화에 따른 품질저하 극복을 위한 기반연구와 더불어 새로운 품질에 대한 소비자의 요구 충족과 쌀 산업 발전을 위한 사회적 변화를 견인하기 위해서는 우리나라 자포니카 벼 품종의 입형 특성을 다양화해야 한다(Park et al. 2017). 이러한 목적을 위해서 Park et al.(2017)은 자포니카 벼의 밥맛 및 이화학적 특성을 유지하면서 교잡시 불친화성이 없도록 자포니카이면서 대립형 입형 특성을 가지고 있는 국외 유전자원 Jizi1560과 Jizi1581을 탐색하고 우리나라 자포니카 초다수 품종인 드래찬과 보람찬과의 인공교배하여 약배양을 통해 변이집단을 작성하였다. 변이집단에서 입형이 다양하고 농업형질이 양호한 계통을 선발하였으며 입형 관련 유전자형과 농업형질 특성을 분석하여 ‘입형 다양화 육종소재’를 개발하였

다. 현재 우리나라에서 생산하는 수출용 쌀은 국내 소비 밥쌀용과 같은 자포니카 중단립종 단원형 쌀이다. 하지만 Park et al.(2017)은 중국 내 최고급쌀로 인정받고 있는 자포니카 쌀인 우창쌀의 입형이 우리나라 품종과 다른 장립종의 장원형 입형을 가지고 있음(Ko et al. 2017)을 감안할 때 기존의 우리나라 중단립종 단원형 입형 특성에서 탈피하여 중립종 및 장립종의 장원형 입형 특성을 가진 쌀도 대중국 수출용 쌀로 그 경쟁 가능성이 있다고 하였다. 또한 개발된 입형 다양화 육종소재 중 입형 *GW2gs3qSW5* 유전자형 자원의 경우 장립종이면서 장원형 입형 특성을 나타내 자포니카 장립종 장원형 벼 개발을 위한 목표 조합으로 판단되었고 이를 육종사업에 반영하겠다고 하였다.

본 연구는 우리나라 자포니카 벼의 수량성 향상 및 품질 다변화와 더불어 수출 쌀 경쟁력 강화를 위해 아직까지 개발되지 않은 장립종이면서 장원형 입형 특성을 가지는 벼 품종을 개발하고자 입형 다양화 육종소재 중 초장립종이면서 장원형 입형 특성을 가지고 있는 자원을 실질적인 육종사업에 교배모본으로 활용하여 우량계통을 개발하고 그 과정에서 분석된 결과를 자포니카 벼 입형 다양화 육종사업에 반영하고자 수행하였다.

재료 및 방법

시험재료 및 재배방법

자포니카 장원형 벼를 개발하기 위하여 초장립종 장원형 입형 특성을 가지고 있는 입형 다양화 벼 육종소재 ‘DGS79’ (Park et al. 2017)를 모본으로 하고 자포니카 초다수 품종으로 중단립종 단원형 입형 특성을 가지고 있는 ‘보람찬’(Ha et al. 2012)을 부본으로 하여 2013년에 단교잡 조합을 작성하였다. F₁ 이후 하계 포장과 동계 온실에서 집단육종법과 계통육종법을 병행 수행하여 고정계통을 육성하였다. 선발된 계통들을 대상으로 자포니카 중만생 표준품종인 ‘남평’(Shin et al. 1998), 통일형 초다수 비교품종인 ‘한아름2호’(Cho et al. 2012), 모부본인 DGS79와 보람찬, DGS79의 교배모본으로 대립형 입형 특성을 가지고 있는 유전자원 ‘Jizi1581’ (Qi et al. 2012)를 비교품종으로 하여 예비선발시험 및 생산력검정시험을 수행하였다. 농촌진흥청 국립식량과학원 벼 시험포장에서 F₆ 세대 고정 선발계통에 대해서 완전임의배치법 3반복으로 2016년 4월 30일 파종하여 5월 30일에 재식거리 30 × 15 cm로 주당 1본씩 조당 28주를 이양하여 예비선발시험을 수행하였다. 예비선발시험에서 선발된 장원형 F₇세대 계통에 대해서 완전임의배치법 3반복으로 2017년에 4월 30일 파종하여 5월 30일에 재식거리 30 × 15

cm로 주당 3본씩 구당 168주를 이양하여 보비재배와 다비재배 두 개의 시비기준을 적용하여 생산력검정시험을 수행하였다. 시비량은 보비재배는 N-P₂O₅-K₂O를 90-45-57 kg/ha, 다비재배는 N-P₂O₅-K₂O를 180-90-110 kg/ha로 기준하였다. 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.

입형 및 수량 관련 형질조사

예비선택시험과 생산력검정시험에 공시된 재료의 출수기를 조사하고 성숙기에 평균이 되는 개체에 대해서 예비선택시험은 5개체, 생산력검정시험은 10개체 대해서 간장, 수장, 수수를 측정하였다. 성숙기에 3주를 예취하여 등숙률 및 수당립수를 조사하였고 예비선택시험은 20주, 생산력검정시험은 100주를 예취하여 정조중을 측정하였다. 생산력검정시험에서는 수확한 정조 1.5 kg을 수량조사현미기(LST, Gwangyang, Korea)로 제영하여 정현비율을 측정하고, 100주 정조수량에 정현비율을 곱하여 현미수량을 구한 다음 10a당 수량으로 환산하였다. 입형 관련 형질을 조사하기 위해서 공시재료를 수확한 후 충실히 등숙된 현미를 정선하여 현미의 길이, 너비, 두께를 캘리퍼스(caliper CD-15CP, Mitutoyo Corp., Japan)를 이용하여 예비선택시험은 5립씩, 생산력검정시험은 10립씩 조사하고 너비에 대한 길이의 비율로 장폭비를 계산하였다. 입형 구분은 우리나라 기준을 따라 현미 길이 5.00 mm 이하는 단립종(S; short), 5.01-5.55 mm는 중단립종(MS; medium-short), 5.51-6.00 mm는 중립종(M; medium), 6.01-7.00 mm 장립종(L; long), 7.01 mm 이상 초장립종(EL; extra long)으로 구분(RDA 2012)하였다. 현미의 형태를 장폭비 1.5 이하를 원형(round), 1.50-1.99를 단원형(semi-round), 2.00-2.49를 중원형(half spindle-shaped), 2.50-2.99를 장원형(spindle-shaped), 3.00 이상을 세장형(long spindle-shaped)으로 구분(KSVS 2005)하였다. 현미 천립중은 예비선택시험에서는 현미 100립, 생산력검정시험은 현미 500립에 대한 무게를 3반복으로 측정하여 평균한 값을 이용하였다.

내병성 및 형태학적 특성조사

생산력검정시험에 공시된 재료에 대해서 벼흰잎마름병 대표 균계인 K1 (HB1013), K2 (HB1014), K3 (HB1015) 및 K3a (HB1009) 균계를 최고분얼기에 균계별로 3주씩 엽선단 3 cm 부위를 가위 절엽접종(Kauffman et al. 1973) 하였다. 접종 후 3주후에 각각의 개체에서 가장 긴 병반을 가진 3개 엽의 병반장을

측정하여 평균 병반장 길이가 5 cm 이하는 저항성, 10 cm 이상은 이병성으로 질적 저항성을 구분하였다. 도열병 저항성은 전북 완주, 계화, 운봉 및 경북 상주에서 잎도열병 발못자리 검정을 전염원 품종으로 호평을 이용하여 실시하여 파종 후 30일 이후 최고 발병시기에 질적 저항성을 0-9로 평가 후 평균 값을 이용하였다. 벼줄무늬잎마름병 저항성 검정은 저항성 유전자 *Snb-i*를 확인할 수 있는 분자표지 Indel7 (Kwon et al. 2012)을 이용한 분자표지 검정을 통하여 저항성 유무를 판단하였다. 까락, 지엽 각도, 탈립성 및 도복에 대한 형태학적 특성조사는 농업과학기술 연구조사분석기준(RDA 2012)에 준하여 실시하였다.

이삭관련 형질 조사

생산력검정시험에서 최종 선발된 계통과 비교품종들의 이삭 관련 형질 특성을 분석하기 위해 각 시험구에서 평균이 되는 1개체의 전체 이삭을 3반복으로 채취하여 이삭관련 형질을 조사하였다. 이삭길이, 이삭목 두께, 이삭 추출도, 한 이삭에서 분지한 전체 지경의 수(총지경수), 한 이삭에 착생한 전체 종실의 수(총립수; 수당립수), 1차 지경수, 1차 지경에 착생한 전체 종실의 수(1차 지경 착생립수), 1차 지경에 착생한 종실의 평균립수(1차 지경 평균립수), 2차 지경수, 2차 지경에 착생한 전체 종실의 수(2차 지경 착생립수), 2차 지경에 착생한 종실의 평균립수(2차 지경 평균립수), 이삭 내 1차 지경수에 대한 2차 지경수 비율(1차 지경당 2차 지경수), 이삭 내 1차 지경 착생립에 대한 2차 지경 착생립의 비율(1차 지경 착생립수당 2차 지경 착생립수)을 조사하였고, 1차 및 2차 지경 착생립의 입실률과 전체 착생립의 입실률을 조사하였다.

입형 관련 유전자 분석

예비선택시험 및 생산력검정시험 공시재료에 대해서 입형 관련 유전자형 분석을 수행하였다. Genomic DNA 추출은 BioSprint 96 (Qiagen Co., Düren, Germany)을 이용하였다. 샘플을 TissueLyser II (Qiagen Co., Düren, Germany)로 마쇄한 후 BioSprint 96 DNA Plant Kit (Qiagen Co., Düren, Germany)를 이용하여 DNA를 추출하였다. 입형 관련 유전자로 입형에 대한 기여도가 크고 특성이 자세히 밝혀진 주동유전자 *GW2*(Song et al. 2007), *GS3*(Fan et al. 2006), *qSW5*(Shomura et al. 2008)을 대상으로 하였고 생산력검정시험에서는 세 개의 주동유전자와 함께 낱알 길이에 관여하는 양적형질 유전자좌인 *qGL3*(Zhang et al. 2012)를 추가하였다. 분자표지는 기존의 연구결과에서 개발돼 적용되었던 *GW2*-Hpa I (*GW2* 대상), *GS3*-Pst I (*GS3*),

N1212del (*qSW5*), XJ24 (*qGL3*)를 이용하였다(Park et al. 2017, Yan et al. 2009, Yan et al. 2011, Zhang et al. 2012). PCR은 10 ng의 DNA와 AccuPower® PCR PreMix (Bioneer Co., Daejeon, Korea)를 이용하여 My-Genie 96 Thermal block (Bioneer Co., Daejeon, Korea)에서 수행하였다. PCR 반응은 GW2-Hpa I, GS3-Pst I, qGL3는 94°C에서 4분간 초기변성 후 94°C 45초, 55°C 45초, 72°C 1분간 35회 반복하고 72°C에서 5분간 반응하였다. N1212del는 94°C에서 5분간 초기변성 후 94°C 45초, 65°C 45초, 72°C 2분간 30회 반복하고 72°C에서 10분간 반응하였다. GW2와 GS3의 증폭된 PCR 산물은 제한효소 Hpa I, Pst I를 처리하고, qSW5와 qGL3 제한효소 처리 없이 전기영동하였다. SYBR safe DNA gel stain (Invitron)으로 염색된 2% agarose gel을 이용하여 전기영동을 수행하였고, UV transilluminator (MiniBIS Pro, DNR Bio-Imaging Systems Ltd., Jerusalem, Israel)를 활용하여 유전자형을 판정하였다.

쌀 외관 품위 및 식미 특성

생산력검정시험에 공시된 재료의 현미를 시험용 정미기(VP-32T, Yamamoto Co., Ltd., Yamagata, Japan)를 이용하여 도정 후 RN300 (Kett Co., Ltd., Tokyo, Japan)을 이용하여 백미에 대한 외관품위를 조사하였다. 백미의 단백질 및 아밀로스 함량은 Infratec 1241 Grain Analyzer (Foss Tecator, Hoganas, Sweden)을 이용하였고, 취반미의 윤기치는 식미검정기인 MA-90B (Toyo Co., Tokyo, Japan)을 이용하여 측정하였다. 식미 관능검사는 전기밥솥(CR-0313V, Cuckoo Electronics Co. Ltd., Yangsan, Korea)에 밥을 취반하여 ‘신동진’의 취반미를 기준으로 하여 보람찬, 한아름2호, LG30-c(전주625호)에 대해 1차 검정에서 13명, 2차 검정에서 11명의 패널이 밥 모양(색깔 및 윤기), 냄새, 찰기, 질감, 밥맛 및 종합평가 등 6항목을 평가하였다. 평가는 기준밥인 신동진과 비교하여 비슷하면 보통(0), 기준보다 나쁜 쪽으로 3단계(-1, -2, -3), 좋은 쪽으로 3단계(+1, +2, +3)의 수준으로 평가하고 2회 검정의 밥맛 평균값을 식미치로 이용하였다.

쌀가루의 호화점도 특성

신속점도측정기 RVA4500 (Perten Instruments, Australia)를 이용하여 쌀가루의 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 호화제시온도(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 9.4, Enterprise Guide 7.1, SAS Institute Inc., Cary, NC, USA)을 이용하였다. 예비선택시험에서 공시재료의 입형 형질들간의 상관분석은 PROC CORR로 하였고 군집분석(PROC CLUSTER; Ward의 최소분산법)을 통해 공시재료의 그룹을 분류하였으며 주성분 분석(PROC PCA)를 수행하여 공시재료의 분포를 확인하였다. 예비선택시험과 생산력검정시험에서의 그룹 및 공시재료간 입형, 수량 및 품질 관련 형질에 대한 평균을 기술 통계법으로 구하였고, 평균간 비교는 PRCO ANOVA로 분산분석 후 유의성이 있을 경우 5% 유의수준에서 Duncan's Multiple Range Test (DMRT)로 분석하였다.

결 과

자포니카 장원형 벼 계통 육성

자포니카 장원형 벼를 개발하기 위해서 입형 다양화 벼 육종소재 중 GW2gs3qSW5 유전자형으로 장원형 입형 특성을 가지고 있는 DGS79와 자포니카 초다수 품종으로 GW2GS3qsw5 유전자형의 단원형 입형 특성을 가지고 있는 보람찬을 인공교배하였다. 이후 집단육종법과 계통육종법을 병행 적용하여 농업형질이 양호하고 입형이 장립종인 계통을 선발하여 예비선택시험과 생산력검정시험에 공시하였다(Fig. 1). 예비선택시험에는 남평, 한아름2호, DGS79, 보람찬, Jizi1581을 비교품종으로 하여 선발된 35계통을 공시하였고, 이중 입형이 장립종이고 농업형질이 양호한 22개 계통을 선발하여 형질 특성을 분석하였다. 5개 비교품종과 22개 계통들의 현미 길이, 너비, 두께, 장폭비 및 천립중을 조사하고 상관관계를 분석하였다(Table 1). 현미 길이는 너비와 두께와는 상관관계가 없었으나 장폭비($r=0.742$)와 천립중($r=0.636$)에 높은 정의 상관관계를 나타냈고, 너비와 두께 상호간에는 높은 정의상관($r=0.841$)을 나타냈으나 장폭비와는 각각 상관관계수 -0.684, -0.457로 부의 상관을 나타냈다. 천립중은 두께($r=0.733$), 너비(0.671), 길이(0.636) 순으로 정의 상관을 나타냈으며 장폭비와는 상관관계가 없었다. 낱알의 외부적 형태를 나타내는 현미 길이, 너비, 두께, 장폭비의 형질 값을 이용하여 군집분석과

Fig. 1. Schematic diagram of breeding for long grain *japonica* rice.

Fig. 2. Classification of rice varieties and lines at observational yield trial by clustered analysis (A) and principal component analysis (B).

주성분분석을 수행하여 공시 재료를 분류하였다(Fig. 2). 군집의 수는 군집이 현재와 같이 묶였을 때 전체적인 설명 정도를 나타내는 R^2 값이 4개일 때 0.785, 5개일 때 0.859, 6개일 때 0.913으로 군집이 5개일 때 전체의 85.9%를 설명할 수 있어 설명 정도가 높으며 군집이 5개에서 6개로 될 경우 설명할 수 있는 정도의 차이(5.4%)에 비해 4개에서 5개로 될 경우(7.4%)가 크게 증가하

Table 1. Correlation coefficient among grain-related traits at observation yield trials.

Trait	GW	GT	RLW	TGW
GL ^z	-0.023 ^{nsy}	0.137 ^{ns}	0.742 ^{**}	0.636 ^{**}
GW		0.841 ^{**}	-0.684 ^{**}	0.671 ^{**}
GT			-0.457 [*]	0.733 ^{**}
RLW				0.015 ^{ns}

^zGL: grain length, GW: grain width, GT: grain thickness, RLW: ratio of length to width, TGW: 1,000-grain weight

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

기 때문에 그룹을 A-E까지 5개의 그룹으로 나누었다(data not shown). 그룹 A에는 자포니카 단원형 품종인 남평과 보람찬이 속하였고, 그룹 B에는 통일형 한아름2호와 LG14, LG18 계통이 포함되었고, 그룹 C에는 LG35 등 7계통이 포함되었다. 장원형 입형 특성 도입을 위해 교배모본으로 활용된 DGS79는 LG30 등 12개 육성계통과 함께 그룹 D에 속하였고 대립형 유전자원인 Jizi1581은 단독으로 그룹 E를 형성하였다. 이들 그룹의 입형 및 농업형질을 비교 분석하였다(Table 2). 입형 특성으로 그룹 A는 중단립종 단원형(현미 길이 5.02 mm, 장폭비 1.67), 그룹 B는 중립종 중원형(5.85 mm, 2.19), 그룹 C는 장립종 중원형(6.40 mm, 2.13), 그룹 D는 장립종 장원형(6.71 mm, 2.56), 그룹 E는 초장립종 중원형(7.82 mm, 2.29)의 형태를 나타냈다. 출수기는 그룹 E가 빠르고 나머지는 비슷하였으며, 간장은 그룹 A가 76 cm로 단간이고 나머지 그룹은 90 cm가 넘었다. 수장은 그룹 C가 길고 D가 중간 A, B, E가 비슷하였고 수수는 그룹 A가 많고 E가 적었다. 등숙률은 그룹 B가 가장 높고 E가 가장 낮았으며 수당립수와 수량에서는 통계적 유의성이 없었다. 예비

Table 2. Grain and yield-related traits of groups by clustered analysis at observation yield trial.

Group	no.	GL ^z (mm)	GW (mm)	GT (mm)	RLW	TGW	HD (DAS)	CL (cm)	PL (cm)	PN	NS	RRG (%)	Yield (g)
A	2	5.00d ^y	2.99b	2.05bc	1.67c	22.4c	105a	76b	21b	12a	119a	75.0ab	617a
B	3	5.85c	2.67c	1.89d	2.19b	22.6c	104a	91a	23b	11ab	138a	90.4a	732a
C	7	6.40b	3.02b	2.07b	2.13b	28.4b	105a	97a	27a	10b	162a	62.4bc	750a
D	13	6.71b	2.62c	1.95cd	2.56a	25.3bc	106a	91a	25ab	11ab	151a	56.6bc	623a
E	1	7.82a	3.42a	2.28a	2.29b	34.3a	92b	96a	23b	7c	112a	38.1c	550a
P-value	26	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.086	0.006	0.004	0.002	0.153	0.003	0.182

^zGL: grain length, GW: grain width, GT: grain thickness, RLW: ratio of length to width, TGW: 1,000-grain weight, HD: heading date, DAS: days after seeding, CL: culm length, PL: panicle length, PN: number of panicles per hill, NS: number of spikelets per panicle, RRG: ratio of ripened grain

^yMeans with same letters in a column are not significant at $p<0.05$ (ANOVA followed by DMRT)

Table 3. The influence of *GW2*, *GS3*, and *qSW5* on the phenotypic variation of grain-related traits.

Group	Genotype	no.	GL ^z (mm)	GW (mm)	GT (mm)	RLW	TGW (g)	Var./lines
A	<i>GW2GS3qsw5</i>	2	5.02d ^y	2.99b	2.05bc	1.67c	22.4c	Nampyeong, Boramchan
B	<i>GW2GS3qsw5</i>	1	5.95c	2.72c	1.85d	2.18b	22.6c	Hanareum2
	<i>GW2GS3qSW5</i>	2	5.79c	2.65c	1.91cd	2.19b	22.6c	LG14, LG18
C	<i>GW2gs3qsw5</i>	6	6.41bc	3.06b	2.08b	2.10b	28.8b	LG7, LG10, LG11, LG15, LG34, LG35
	<i>GW2GS3qSW5</i>	1	6.30bc	2.76c	1.99bcd	2.28b	25.7bc	LG16
D	<i>GW2gs3qSW5</i>	13	6.71b	2.62c	1.95bcd	2.56a	25.3bc	DGS79, LG2, LG6, LG9, LG13, LG19, LG23, LG24, LG25, LG26, LG28, LG30, LG31
E	<i>gw2gs3qSW5</i>	1	7.82a	3.42a	2.28a	2.29b	34.3a	Jizi1581

^zGL: grain length, GW: grain width, GT: grain thickness, RLW: ratio of length to width, TGW: 1,000-grain weight

^yMeans with same letters in a column are not significant at $p<0.05$ (ANOVA followed by DMRT)

선발시험에 공시된 재료에 대해서 입형 관련 주동 유전자인 *GW2*, *GS3*, *qSW5*의 유전자형과 유전자형에 따른 입형 형질값을 비교 분석하였다(Table 3). *GW2*, *GS3*, *qSW5* 각각은 야생형 대립유전자와 기능상실 돌연변이형 대립유전자 두 개의 대립유전자형이 탐지되었으며, 중단립종 단원형인 그룹 A는 *qSW5*이 돌연변이형이 *GW2GS3qsw5* 유전자형을 나타냈고 장립종 장원형인 그룹 D는 *GS3*가 돌연변이형인 *GW2gs3qsw5* 유전자형이었으며 초장립종 중원형의 그룹 E는 *GW2*와 *GS3*가 돌연변이형인 *gw2gs3qSW5* 유전자형을 나타냈다. 중립종 중원형인 그룹 B에 속한 한아름2호는 *GW2GS3qsw5* 유전자형을 나타냈고 나머지 2계통은 *GW2GS3qSW5*을 나타냈으며, 장립종 중원형인 그룹 C 중 6계통은 *GW2gs3qsw5*, 나머지 1계통은 *GW2GS3qSW5* 유전자형을 나타냈다. 각 그룹을 대표하면서 농업형질이 양호한 계통인 LG14(그룹 B), LG35(그룹 C), LG30(그룹 D)을 선발하였다. 장립종 장원형이면서 농업형질이 양호한 LG30의 경우 예비선발시험시험과 병행으로 70개의 자매계통(sister lines)을 계통 전개하였고 이중 형질 특성이 우수한 두 계통 LG30-b와

LG30-c를 추가로 선발하여 예비선발시험 공시 계통인 LG30-a와 함께 세 계통을 최종 선발하였다. 비교품종 5품종과 선발 5계통을 생산력검정시험에 공시하여 입형 등 농업형질 특성을 정밀분석을 수행하였다.

선발계통의 농업형질 특성

입형 특성이 중단립종 단원형인 남평과 보람찬과 같은 *GW2GS3qsw5* 유전자형을 보였지만 중립종 중원형을 나타낸 한아름2호의 입형 특성을 구명하기 위해서 낱알 길이와 관련이 있는 양적형질유전자좌인 *qGL3*를 추가로 적용하여 유전자형을 분석하였다(Fig. 3). 한아름2호는 남평과 보람찬과 다르게 *qGL3*가 기능상실 돌연변이형 대립유전자 *qgl3*를 가지고 있는 것으로 나타났다. *qgl3* 대립유전자를 가지고 있는 한아름2호는 남평과 보람찬에 비해 현미 길이가 길어지고 너비는 줄어들어 중립종 중원형 입형 특성을 나타냈다. 한아름2호를 제외한 나머지 공시 재료는 모두 *qGL3*의 야생형 대립유전자 *qGL3*를 가지고 있었다. 공시재료의 입형 구분은 현미길이를 기준으로 Jizi1581 (7.58

Table 4. Grain-related traits of varieties and selected long grain lines at yield trial.

Variety/line	Cross	Genotype	GL ^z (mm)	GW (mm)	GT (mm)	RLW	TGW (g)
Nambyeong (NP)	Iri390/Milyang95	<i>GW2GS3qsw5+qGL3</i>	5.08g ^y	2.99c	2.08b	1.70f	22.1g
Hanareum2 (HAR2)	Milyang181/Milyang154	<i>GW2GS3qsw5+qgl3</i>	5.88f	2.73e	1.91d	2.16e	23.2f
Boramchan (BRC)	HR21124-B-59/Gyehwa24	<i>GW2GS3qsw5+qGL3</i>	5.14g	3.12b	2.17a	1.65f	24.2e
Jizi1581 (JZ1581)	- (IT251541)	<i>gw2gs3qSW5+qGL3</i>	7.58a	3.28a	2.15a	2.31c	35.8a
HR30198-AC33-1 (DGS79)	Boramchan/Jizi1581	<i>GW2gs3qSW5+qGL3</i>	7.35b	2.70ef	1.94d	2.73a	28.5b
HR30971-B-B-14-1-1 (LG14)	HR30198-AC33/Boramchan	<i>GW2GS3qSW5+qGL3</i>	6.00f	2.72e	1.92d	2.20de	23.1f
HR30971-B-B-30-1-1 (LG30-a)	HR30198-AC33/Boramchan	<i>GW2gs3qSW5+qGL3</i>	7.04c	2.66efg	2.00c	2.65ab	27.5cd
HR30971-B-B-30-11-1 (LG30-b)	HR30198-AC33/Boramchan	<i>GW2gs3qSW5+qGL3</i>	6.88d	2.62fg	2.01c	2.63b	27.1d
HR30971-B-B-30-53-1 (LG30-c)	HR30198-AC33/Boramchan	<i>GW2gs3qSW5+qGL3</i>	7.06c	2.59g	2.02c	2.72a	27.5cd
HR30971-B-B-35-1-1 (LG35)	HR30198-AC33/Boramchan	<i>GW2gs3qsw5+qGL3</i>	6.46e	2.86d	2.14ab	2.26cd	28.1bc
Mean			6.45	2.83	2.04	2.30	26.7
C.V. (%)			13.3	8.1	4.9	16.5	14.2

^zGL: grain length, GW: grain width, GT: grain thickness, RLW: ratio of length to width, TGW: 1,000-grain weight

^yMeans with same letters in a column are not significant at $p < 0.05$ (ANOVA followed by DMRT)

mm), DGS79 (7.35 mm), LG30-c (7.06 mm), LG30-a (7.04 mm)가 초장립종, LG30-b (6.88 mm), LG35 (6.46 mm)가 장립종, LG14 (6.00 mm), 한아름2호(5.88 mm)이 중립종, 보람찬 (5.14 mm) 및 남평(5.08 mm)가 중단립종으로 구분되었으며, 현미의 형태에 따라 DGS79 (현미장폭비 2.73), LG30-c (2.72), LG30-a (2.65), LG30-b (2.63)이 장원형, Jizi1581 (2.31), LG35 (2.30), LG14 (2.20), 한아름2호(2.16)은 중원형, 남평(1.70)과

Fig. 3. PCR analysis to confirm the allele types of varieties and selected long grain lines at yield trial using gene specific DNA markers. *GW2*, *GS3*, *qSW5*, and *qGL3* were confirmed by PCR products amplified with primer, *GW2-Hpa I* (cleaved by *Hpa I*, A), *GS3-Pst I* (*Pst I*, B), *N1212del* (C), and *qGL3* (D). M: DNA size marker, 1: NP, 2: HAR2, 3: BRC, 4: JZ1581, 5: DGS79, 6: LG14, 7: LG30-a, 8: LG30-b, 9: LG30-c, 10: LG35.

보람찬(1.65)은 단원형으로 분류되었다(Table 4). 공시재료의 출수기, 수수, 등숙률 등 수량구성 형질을 조사하였다(Table 5). Jizi1581은 파종 후 88일에 출수하여 조생종에 속하였으며 선발 계통은 파종 후 111-114일에 출수하여 남평(107 DAS)과 보람찬 (109 DAS) 보다 4-7일 정도 늦은 중만생종이며 DGS79는 127 DAS로 출수가 매우 늦었다. 간장은 LG14 (100 cm), DGS79 (97 cm), Jizi1581 (97 cm), LG35 (95 cm)가 95 cm가 넘어 키가 컸으며 이후 LG30 자매계통(a-c)가 85-88 cm, 남평 81 cm, 한아름2호 78 cm, 보람찬 74 cm 순이었다. 이삭길이는 한아름2호와 LG14가 24 cm로 길었고 LG30 자매계통(22-23 cm), Jizi1581 및 DGS79 (22 cm), LG35 (21 cm), 남평과 보람찬 (20 cm)순이었다. 수수는 보람찬이 16개로 가장 많았고 남평(15 개), LG35 (15개), 한아름2호 (14개), LG14 (13개), LG30 자매계통(12개), DGS79 (11개), Jizi1581 (10개) 순이었다. 수당립수는 LG14가 133개로 가장 많았고 한아름2호(108개), LG30 자매계통(101-114개), DGS79 (93개), LG35 (92개), 남평 및 보람찬(90 개), Jizi1581 (85개) 순이었다. 등숙률은 한아름2호가 91.9%로 가장 높았고 남평(88.2%), 보람찬(86.2%), LG14 (85.1%), LG35 (84.8%). LG30 자매계통(81.8-84.1%), DGS79 (65.8%), Jizi1581 (35.4%) 순이었다. 정현비율은 LG35가 84.4% 로 가장 높았고 LG30 자매계통(83.1-83.4%), DGS79 (83.3%), 보람찬 (82.6%), LG14 (82.4%), 남평 및 한아름2호(81.8%), Jizi1581 (76.1%) 순이었다. 백미 수량성은 한아름2호가 711 kg/10a로

Table 5. Yield-related traits of varieties and selected long grain lines at yield trial.

Variety/line	HD ^z (DAS)	CL (cm)	PL (cm)	PN	NS	RRG (%)	BRR (%)	BRY (kg/10a)	MRY (kg/10a)	Index of MRY (%)
NP ^y	107f [*]	81d	20e	15b	90de	88.2ab	81.8d	535e	492e	100
HAR2	101g	78d	24a	14c	108bc	91.9a	81.8d	773a	711a	145
BRC	109e	74e	20e	16a	90de	86.2bc	82.6cd	595d	552d	112
JZ1581	88h	97b	22cd	10f	85e	35.4e	76.1e	425g	386g	78
DGS79	127a	97ab	22cd	11e	93cde	65.8d	83.3bc	472f	435f	88
LG14	111d	100a	24a	13d	133a	85.1bc	82.4cd	646bc	594bc	121
LG30-a	114b	88c	23ab	12de	114b	81.8c	83.4b	624cd	574cd	117
LG30-b	113c	86c	22bc	12d	105bcd	83.6bc	83.1bc	610cd	561cd	114
LG30-c	113c	85c	22cd	12de	101bcd	84.1bc	83.4b	607cd	559cd	114
LG35	111d	95b	21de	15bc	92cde	84.8bc	84.4a	668b	615b	125
Mean	109	88	22	13	101	78.7	82.3	595	548	
C.V. (%)	9.2	9.7	6.4	14.4	15.4	20.7	2.8	16.5	16.5	

^zHD: heading date, DAS: days after seeding, CL: culm length, PL: panicle length, PN: number of panicles per hill, NS: number of spikelets per panicle, RRG: ratio of ripened grain, BRR: brown/rough rice ratio, BRY: brown rice yield, MRY: milled rice yield

^yThe name of abbreviations for variety/line are listed in table 4

^{*}Means with same letters in a column are not significant at $p < 0.05$ (ANOVA followed by DMRT)

Table 6. Morphological characteristics and resistance reaction to disease.

Variety /line	Awn	Shattering	Flag leaf	Lodging	Bacterial blight				Blast	Rice stripe virus
					K1	K2	K3	K3a		
NP ²	absent	moderately difficult	erect	tolerance	S ³	S	S	S	4.0	R
HAR2	absent	intermediate	erect	tolerance	R	R	R	R	2.3	R
BRC	absent	difficult	erect	tolerance	R	R	R	S	3.0	R
JZ1581	short and partly awned	difficult	intermediate	moderately tolerance	S	S	S	S	4.5	S
DGS79	long and partly awned	difficult	horizontal	intermediate	R	R	R	S	4.0	S
LG14	short and partly awned	difficult	intermediate	intermediate	R	R	R	S	3.3	S
LG30-a	very short and partly awned	difficult	erect	tolerance	R	R	R	S	5.5	S
LG30-b	very short and partly awned	difficult	erect	tolerance	R	R	R	S	5.5	S
LG30-c	very short and partly awned	difficult	erect	tolerance	R	R	R	S	5.0	S
LG35	short and partly awned	difficult	horizontal	intermediate	R	R	R	S	6.0	S

²The name of abbreviations for variety/line are listed in table 4³R and S mean resistant and susceptible, respectively

가장 많았고 LG35 (615 kg/10a), LG14 (594 kg/10a), LG30 자매계통(559-574 kg/10a), 보람찬(552 kg/10a), 남평(492 kg/10a), DGS79 (435 kg/10a), Jizi1581 (386 kg/10a) 순이었다. 선발 계통중 LG30 자매계통은 낱알에 짧은 까락이 거의 없고 탈립이 잘되지 않으며 지엽이 직립으로 도복에 강한 특성을 나타내 농업적으로 우수한 특성을 나타냈으나 LG14와 LG35는 낱알에 짧은 까락이 부분적으로 존재하는 경우가 있으며 키가 커서 도복에 다소 약한 특성을 나타냈다(Table 6). 내병성 관련하여 선발 계통은 벼흰잎마름병에 대해서는 K1, K2, K3에 저항성이며 도열병에는 중간 정도의 저항성을 나타낸 반면 벼줄무늬잎마름병 저항성 유전자는 가지고 있지 않아 이병성인 것으로 판단되었다. 입형 특성이 초장립종 장원형이면서 도복에 강하고 초형이 우수한 LG30-c를 최종적으로 선발하여 ‘전주625호’라 명명하고 이삭관련 형질 및 품질에 대한 추가 분석을 수행하였다.

장립종 장원형 계통의 이삭 관련 형질 특성

전주625호와 모부분 및 비교품종에 대한 이삭관련 형질 특성을 분석하였다(Table 7). 전주625호는 이삭길이, 이삭목두께, 총지경수, 수당립수는 모부분인 보람찬과 DGS79의 사이의 형질 값을 가지고 있었으며 이삭 추출은 모부분에 비해 다소 양호하였다. 전주625호는 1차지경 관련 형질인 1차 지경수, 1차 지경 착생립수 및 평균립수는 모부분과 비교품종에 비해 많은 특성을 나타냈으며, 2차지경 관련 형질인 2차 지경수, 2차 지경 착생립수는 Jizi1581을 제외하고는 적었으며 2차 지경 평균립수는 가장 적은 특성을 나타내 1차 지경당 2차 지경수 및 1차 지경 착생립수

당 2차 지경 착생립수가 공시재료 중에서 가장 적었다. 임실률을 살펴보면 총 임실률과 1차 및 2차 지경 착생립의 임실률 모두 공시재료 중에서 가장 높은 특성을 나타냈다.

장립종 장원형 계통의 품질 특성

전주625호와 모부분 및 비교품종에 대한 품질 관련 형질 특성을 분석하였다(Table 8). 백미 외관품위에서 전주625호는 정선평이 86.9%로 보람찬(91.1%)과 DGS79 (89.3%)에 비해 낮은 수치를 나타냈다. 분상질립이 1.8%로 보람찬(3.2%)에 비해서는 적었으나 DGS79 (0.9%)에 비해 많았고 피해립(1.7%)과 쉼미(6.7%)는 보람찬(1.1, 4.3%)과 DGS79 (1.2, 4.7%)에 비해 많았으며 착색립은 DGS79 (4.0%)에 비해 적었으나 보람찬(0.4%)에 비해서는 많았다. 전주625호의 단백질 함량은 공시재료 중에 가장 낮은 5.3%를 나타냈으며 아밀로스 함량은 19.9%로 보람찬(18.4%)에 비해 높았으나 DGS79 (20.4%)에 비해 낮았다. 밥의 윤기치는 DGS79 (87.3)에 이어 두 번째로 높은 80.4로 보람찬(75.8)보다 높았으며 식미 관능검정 결과 밥맛이 0.35로 보람찬(-0.08)보다 높은 값을 나타냈다. 전주 625호의 쌀가루 전분의 호화점도 특성을 분석하였다(Table 9). 호화개시온도가 68.8℃로 공시재료 중 가장 낮았고 최고점도는 203.5 RVU로 통일형 품종인 한아름(257.6 RVU)보다 낮았으며 자포니카 품종인 보람찬(207.3 RVU)과 남평(197.7 RVU)과 비슷하였다. 최저점도와 최종점도가 147.3, 234.4 RVU로 공시재료 중에 가장 높았으며, 강하점도가 56.2 RVU로 가장 낮았고 치반점도가 30.9 RVU로 높은 경향이였다.

Table 7. Panicle-related traits of varieties and Jeonju625.

Variety/line	PL ^z (cm)	TNN (mm)	PE (cm)	NR	NS	NPr	NSPr	MNSPr
NP ^y	19d ^x	1.36d	3.9a	27a	100a	9ab	52bc	5.6a
HAR2	22ab	1.63a	2.6ab	29a	111a	10a	50bc	5.0c
BRC	19cd	1.34d	2.2b	26a	93ab	9b	48c	5.4b
JZ1581	21bc	1.47c	3.9a	20b	75b	8c	41d	5.4b
DGS79	23a	1.54b	2.4ab	30a	110a	10a	54ab	5.4b
Jeonju625 (LG30-c)	20c	1.51bc	2.6ab	27a	101a	10a	58a	5.7a
Mean	21	1.48	2.9	26	98	9	51	5.4
C.V. (%)	9.7	12.8	34.5	15.4	15.3	11.1	11.8	3.7
Variety/line	NSr	NSSr	MNSSr	Sr/Pr	SSr/SPr	SF (%)	SFPr (%)	SFSr (%)
NP	17ab	48abc	2.7b	1.8ab	0.9bc	82.3d	92.3bc	71.2c
HAR2	19a	60a	3.1a	1.9a	1.2a	73.8e	86.5d	63.1d
BRC	17ab	46abc	2.7b	1.9a	0.9bc	86.3cd	91.5c	80.7b
JZ1581	12b	34c	2.7b	1.6b	0.8bc	91.5ab	95.7ab	86.4ab
DGS79	20a	56ab	2.7b	1.9a	1.0ab	88.9bc	92.3bc	85.6ab
Jeonju625 (LG30-c)	16ab	43bc	2.5c	1.6b	0.7c	94.2a	96.4a	91.0a
Mean	17	48	2.7	1.8	0.9	86.1	92.5	79.7
C.V. (%)	17.6	22.9	7.4	11.1	22.2	8.4	4.0	13.0

^zPL: panicle length, TNN: thickness of neck node, PE: panicle exertion, NR: number of rachis-branches per panicle, NS: number of spikelets per panicle, NPr: number of primary rachis-branch (PRB)es per panicle, NSPr: number of spikelets on PRBs per panicle, MNSPr: mean number of spikelets on a PRB, NSr: number of secondary rachis-branch (SRB)es per panicle, NSSr: number of spikelets on SRBs per panicle, MNSSr: mean number of spikelets on a SRB, Sr/Pr: ratio of SRBs to PRBs, SSr/SPr: ration of spikelets on SRBs to spikelets on PRBs, SF: spikelet fertility, SFPr: spikelet fertility on PRBs, SFSr: spikelet fertility on SRBs

^yThe name of abbreviations for variety/line are listed in table 4

^xMeans with same letters in a column are not significant at $p < 0.05$ (ANOVA followed by DMRT)

Table 8. Quality-related traits of milled rice of varieties and Jeonju625.

Variety/line	Head rice (%)	Chalky rice (%)	Damaged rice (%)	Broken rice (%)	Colored rice (%)	Protein content (%)	Amylose content (%)	Glossiness (TOYO value)	Palatability
NP ^z	95.1a ^y	1.5cd	0.9bc	2.3c	0.3b	6.6b	17.7d	73.7c	-
HAR2	78.0d	12.2b	0.7c	7.9a	0.8ab	6.8b	17.8cd	76.6bc	-0.72
BRC	91.1b	3.2c	1.1bc	4.3bc	0.4b	5.9c	18.4c	75.8bc	-0.08
JZ1581	71.1e	21.1a	0.3d	3.3c	4.2a	8.0a	19.3b	59.5d	-
DGS79	89.3bc	0.9d	1.2b	4.7bc	4.0a	5.5cd	20.4a	87.3a	-
JJ625 (Jeonju625)	86.9c	1.8cd	1.7a	6.7ab	2.8ab	5.3d	19.9ab	80.4b	0.35

^zThe name of abbreviations for variety/line are listed in table 4

^yMeans with same letters in a column are not significant at $p < 0.05$ (ANOVA followed by DMRT)

Table 9. Pasting properties of milled rice flour of varieties and Jeonju625

Variety/line	Pasting temperature (°C)	Peak viscosity (RVU)	Trough viscosity (RVU)	Final viscosity (RVU)	Break down (RVU)	Setback (RVU)
NP ^z	72.4b ^y	197.7d	113.7c	199.3e	84.0b	1.6c
HAR2	72.4b	257.6a	130.9b	217.9cd	126.7a	-39.7d
BRC	70.7c	207.3c	133.0b	225.0b	74.3c	17.7b
JZ1581	76.0a	220.0b	141.9a	221.9bc	78.1c	1.9c
DGS79	69.3d	178.7e	111.4c	212.6d	67.4d	33.9a
JJ625 (Jeonju625)	68.8e	203.5c	147.3a	234.4a	56.2e	30.9a

^zThe name of abbreviations for variety/line are listed in table 4

^yMeans with same letters in a column are not significant at $p < 0.05$ (ANOVA followed by DMRT)

고 찰

자포니카 장립종 장원형 계통 육성

자포니카 장원형 계통을 육성하기 위해서 입형 다양화 육종소재 중 초장립종이면서 장원형 입형 특성을 가지고 있는 DGS79를 교배모본으로 이용하였다. DGS79는 입형 관련 주동유전자 *GW2*, *GS3*, *qSW5* 중 *GS3*만 기능상실 돌연변이형인 *GW2gs3qSW5* 유전자형으로 현미 길이 7.52 mm의 초장립종이며 장폭비 2.78의 장원형으로 자포니카 장원형 계통 육성을 위한 교배모본으로 활용가치가 있다 하였다(Park et al. 2017). 하지만 DGS79는 늦은 출수기, 긴 까락, 처진 지엽 등 열악형질을 수반하고 있어 이를 교배모본으로 활용하여 실질적인 재배품종을 개발하기 위해서는 열악형질을 제거하는 육종사업이 수행되어야 한다. 본 연구에서도 DGS79는 초장립종의 장원형 입형 특성을 나타내 (Table 4, Fig. 4A) 자포니카 장립종 장원형 계통 개발을 위한 육종소재로서는 활용가치가 높았으나, 등숙이 정상적으로 이루어지지 않을 정도로 늦은 출수기, 장간(Table 5), 긴 까락(Fig. 4B), 처진 지엽, 도복에 약한 특성(Table 6) 등 열악형질을 수반하고 있었다. 보람찬과 DGS79의 단교잡 F₂ 분리집단에서는 형질 특성이 열악한 개체들이 대부분이었다. 집단 내 210개 개체 중 입형에 대해서만 선발압을 가하여 66개 개체를 이삭 선발하였고 이를 혼합하여 집단육종법으로 F₃ 세대를 진전하였으며 F₄ 세대에서 540개 개체로 이루어진 집단을 전개하였다(Fig. 1). F₄ 분리세대에서도 대부분의 개체들이 늦은 출수기, 장간, 긴 까락, 처진 지엽, 도복 등 열악형질을 수반하는 경우가 많았다. 하지만 이 중 유독 1개체(이후 LG30으로 명명)가 장립종 장원형의 목표 입형 특성을 갖추고 있으면서 출수기가 남평에 비해 7일 가량 늦지만 DGS79보다 2주 가량 빨라 등숙에 문제가

없으며 간장이 적당하고 질은 녹색의 넓고 긴 잎을 가지고 있으면서 직립형태의 수광태세가 좋은 초형으로 강한 내도복성을 갖춘 다수성의 농업형질 특성을 나타냈다. 집단 내 열악형질이 많이 발현되어 우량 개체 선발에 어려움이 있었으나 LG30과 같이 육종목표에 부합되는 개체를 선발할 수 있었던 것은 입형에 대한 선발압과 함께 출수기 및 초형 등 농업형질에 대한 표현형 선발에 기반을 둔 포장육종에 중점을 둔 육종사업을 수행하여 재조합과정 중 양호한 형질특성이 조합된 개체를 발견할 수 있었기 때문으로 생각한다. 좀 더 형질 특성을 가다듬기 위해 F₅ 세대 계통선발과 F₆ 세대 예비선발시험을 통해 LG30 유래 자매계통 중 형질 특성이 가장 우수한 3 계통을 선발하여 생산력 검정시험을 수행하였다. 이들 자매 계통은 고세대 이후 분리된 계통으로 형질 특성이 유사하였으나 이 중 간장이 작고 수당립수는 다소 적으나 등숙률이 높고 형질특성이 안정적인 LG30-c를 선발하여 전주625호라 명명하였다.

입형 관련 유전자형과 입형 특성

예비선발시험에서 입형에 대한 표현형 분석을 통해 공시재료를 분류(Table 2 and Fig. 2)하였고, 입형 관련 주동유전자 *GW2*, *GS3*, *qSW5*에 대한 유전자형 검정을 실시한 결과(Table 3) *GS3*만 기능상실 돌연변이형인 *GW2gs3qSW5* 유전자형을 가진 그룹 D의 13개 계통은 평균 현미 길이가 6.71 mm, 현미 장폭비 2.56으로 장립종 장원형 입형 특성을 나타내, *GW2gs3qSW5* 유전자형이 자포니카 장립종 장원형 계통 육성을 위한 목표 조합으로 활용될 수 있을 것(Park et al. 2017)이라는 견해를 입증하였다. 중단립종 단원형에 속하는 그룹 A의 남평과 보람찬은 *GW2GS3qsw5*의 유전자형을 나타내 우리나라 자포니카 단원형 품종들은 대부분 *GW2GS3qsw5*의 유전자형을 가질 것(Park et al. 2017)이라는

Fig. 4. Grain shape (A) of brown rice and panicle shape (B) of Jeonju625. NP: Nampyeong, HAR2: Hanareum2, BRC: Boramchan, JZ1581: Jizi1581, JJ625: Jeonju625. White and black bar indicate 5 mm and 10 cm, respectively.

의견과 일치하였다. 그룹 B에 속하는 한아름2호는 중단립종 단원형의 남평, 보람찬과 같은 *GW2GS3qsw5* 유전자형을 가지고 있었으나 중립종 중원형 입형 특성을 나타내 주동유전자 이외에 다른 입형 관련 유전자가 관여하는 것으로 생각되었다. 벼 낱알의 크기와 형태는 양적형질로서 지금까지 약 400여개가 넘는 많은 양적형질유전자좌(quantitative trait loci; 이하 QTL)가 12개 염색체 전반에 걸쳐서 탐색(Huang et al. 2013)될 만큼 여러 유전자가 관여하여 조절되기 때문에 주동유전자 이외에 다른 유전자나 QTL의 영향을 함께 검토하여야 한다. 한아름2호의 입형 특성을 분석하기 위해서 추가로 입형 관련 유전자 및 QTL에 대해서 유전자형을 분석한 결과(data not shown), 한아름2호는 낱알 길이에 관여하는 *qGL3*(Zhang et al. 2012)의 기능상실 돌연변이형인 *qgl3* 대립유전자를 가지고 있는 것으로 확인되었다(Fig. 3). *qGL3*는 낱알 길이에 관여하는 주동 QTL로 OsPPKL1 추정 단백질을 부호화하며, 낱알 길이에 부의 조절 작용을 하여 발생 빈도가 드문 기능상실 돌연변이형인 *qgl3* 대립유전자형을 가질 경우 장립종의 입형 특성을 나타내게 된다. 한아름2호의 중립종 중원형 입형 특성은 *qgl3*의 작용에 기인한 것으로 생각된다. 그룹 B의 다른 두 계통은 입형 관련 주동 유전자가 모두 기능이 있는 *GW2GS3qSW5* 유전자형을 가지고 있었고 한아름2호와 같이 중립종 중원형 입형 특성을 나타내, 입형 다양화 육종 소재 중 주동유전자가 모두 기능을 가지고 있는 자원이 경우 중립종 중원형 입형 특성을 나타냈다는 결과와 일치하였다. 그룹 C도 두 개의 유전자형이 탐지되었는데 이 중 장립종 중원형 입형 특성을 나타내는 *GW2gs3qsw5* 유전자형이 6계통으로 대부분을 차지하였고, 그룹 B와 같은 *GW2GS3qSW5*의 유전자형도 1계통 존재하였다. 그룹 B와 C에서 같은 유전자형 *GW2GS3qSW5*을 가지는 계통들이 현미장폭비, 너비, 두께는 비슷하였으나 길이에서 그룹 C는 장립종이었으나 그룹 B는 중립종으로 달랐는데 이는 이들 계통의 입형 특성에 다른 유전자나 QTL이 작용하였거나 같은 유전자 내 단백질 도메인간의 작용에 의한 것으로 생각된다. 낱알 길이에 관여하는 GS3 단백질은 OSR, TM, TNFR/NGFR, VWFC 도메인이 존재하는데 N 말단에 존재하는 OSR이 낱알 길이 조절에 필수적으로 작용하며, C 말단에 존재하는 TNFR/NGFR과 VWFC가 OSR의 기능에 억제적인 효과를 나타내 이들 도메인이 기능을 상실하면 낱알 길이가 짧아진다고 하였다(Mao et al. 2010). 이는 본 논문에서 이용된 GS3 탐지 마커가 개발된 영역(Fan et al. 2006, Fan et al. 2009, Yan et al. 2009)인 OSR 도메인 이외에 C 말단에 존재하는 도메인의 서열 차이에 의해서도 낱알 길이가 변경될 수 있음을 시사하며

이에 대한 검토가 필요하다고 생각된다.

전주625호의 농업형질 특성

전주625호는 현미 길이 7.06 mm의 초장립종에 장폭비 2.72로 자포니카 장립종 장원형 개발이라는 육종목표를 달성(Fig. 4A)하였으며 재배적용 가능한 출수기, 직립 내도복의 다수성 초형, 자포니카 초다수 품종인 보람찬과 비슷한 수준의 수량성을 확보하는 등 교배모본으로 사용된 입형 다양화 육종소재 DGS79의 열악형질을 상당히 개선하여 양호한 농업형질 특성을 갖추고 있다(Table 5 and 6). 육성과정 중 DGS79의 긴 까락을 제거를 위해 선발압을 가하여 소기의 성과를 거두었으나 환경이 좋지 않을 경우 소수 외영 선단에 짧은 까락이 일부 발생하는 것을 확인하였다. 까락의 존재는 재배벼에서 좋지 않은 형질 특성으로 간주(Luo et al. 2013)되며, 까락을 조절하는 유전자는 4번 염색체에 *An1*, 5번 염색체에 *An2*, *An7(t)*, *An8(t)*, 3번 염색체에 *An3*과 *An5(t)*, 8번 염색체에 *An4*와 *An6(t)*이 존재한다(Kurakazu et al. 2001). 염색체 3번에 존재하는 까락 관련 유전자 *An5(t)*는 낱알 길이에 관여하는 유전자 *lk3(t)*와 밀접하게 연관(Kubo et al. 2001)되어 있고, *lk3(t)*는 본 논문에서 활용된 *gs3*와 같은 유전자좌에 위치함(Takano-Kai et al. 2009)을 고려할 때 *gs3*는 까락의 발생과 관련이 있을 것으로 추정되며 이에 대한 검토가 필요할 것으로 생각된다. 내병성과 관련하여 전주625호는 우리나라 벼흰잎마름병 대표균계 K1, K2, K3에는 저항성이나 병원성이 강한 K3a 균계에는 이병성을 나타냈고, 벼줄무늬잎마름병에는 약한 특성을 나타냈다(Table 6). 기후변화에 따라 병원성인 강한 벼흰잎마름병 K3a균계가 증가하고 있는 추세(Kang et al. 2015)이며 벼줄무늬잎마름병이 전국적으로 발병하고 있는 실정(Lee et al. 2008)을 감안할 때 화학농약 절감 및 친환경 안전 쌀 생산을 위해서는 전주625호의 내병성 강화가 필요할 것으로 생각된다. 전주625호의 이삭은 통일형 품종인 한아름2호와 자포니카 품종인 남평과 보람찬 및 비교 품종들에 비해서 1차 지경 평균립수가 많고 2차 지경 평균립수는 적으며 1차지경당 2차지경 수 및 착생립수가 적어, 등숙률과 미질 향상을 위해서는 1차 지경의 착생립수를 증대하고 2차 지경 착생립수를 줄이는 것이 등숙률과 미질 향상에 바람직하다(Kim 2003)는 의견에 부합되었으며 총 임실률과 1차 및 2차 지경 착생립의 임실률이 모두 높은 특성을 특성을 나타냈다(Table 7). 하지만 실질적인 등숙률에 있어서는 전주625호는 남평, 보람찬, 한아름2호에 비해 낮은 특성(Table 5)을 나타냈는데, 임실률은 높지만 등숙률이 낮은 것을 고려할 때 초장립종에 천립종이 무거운 전주625호의 sink를

source가 제대로 채우지 못하여 등숙률이 떨어지는 문제점이 발생하는 것이 아닌지에 대한 검토가 필요할 것으로 생각된다.

전주625호의 품질 특성

전주625호의 외관품질은 자포니카 품종인 남평과 보람찬에 비해서 떨어지나 통일형 한아름2호에 비해서는 양호한 특성을 나타냈다(Table 8). 분상질립은 보람찬과 한아름2호보다도 적고 남평과 비슷한 수준으로 양호하였으나 피해립, 착색립 및 쉼미가 많았다. 피해립은 오염립, 병해립, 충해립, 발아립, 생리장해립 등이 낱알 길이의 1/4 이상 부착된 것을 말하며 등숙 불량으로 인하여 행태를 제대로 갖추지 못한 생리장해립도 여기에 속하는데(MAFRA 2013) 전주625호의 피해립 비율은 높은 것은 등숙 불량에 의한 생리장해립의 증가에 기인한 것으로 생각되었다. 착색립은 열손립과 같은 의미로 열 등에 의하여 변색 또는 손상된 낱알로 미립표면적 1/4 이상이 주황색으로 착색된 것을 말하는데(MAFRA 2013) JZ1581, DGS79와 전주625호 모두 착색립의 비율은 높은 것으로 볼 때 유전적으로 색택이 불량한지에 대한 검토가 필요할 것으로 생각된다. 또한 쉼미의 비율이 높은 것이 장립종 장원형 입형 특성에 기인하여 중단립종 단원형 입형에 비해 도정시 쌀이 잘 부러지는 지에 대해서 검토가 필요할 것으로 생각된다. 쌀가루의 호화점도 특성(Table 9)에서 전주625호는 호화개시온도가 가장 낮았는데, 밥맛이 자포니카 일반벼에 비해 좋지 않은 것으로 알려진 통일형벼가 일반벼보다 높은 경향(Kang et al. 2009)이었고 식미가 양호한 품종들은 호화개시온도가 낮다(Yoon et al. 2007, Yoon et al. 2009)는 점에서 좋은 특성으로 생각되었다. 전주625호는 최고점도는 통일형인 한아름2호에 비해 낮고 자포니카 품종인 남평과 보람찬과 비슷하였으나 최저점도와 최종점도가 한아름2호, 남평, 보람찬보다 높은 특성을 나타내 강하점도가 낮고 치반점도가 높은 특성을 나타냈다. 일반적으로 우리나라에서 식미가 양호한 품종들은 호화온도가 낮고 최고점도와 강하점도는 높으며, 최종점도와 치반점도는 낮다(Choi 2002, Jeong et al. 2013)것으로 볼 때는 전주625호는 호화개시온도를 제외하고는 식미면에서 좋지 않은 호화특성을 나타냈다. 하지만 이러한 일반적인 기준은 생태형이 다른 통일형과의 비교에서는 확인하기 어렵고(Kang et al. 2009, Sim et al. 2015), 같은 자포니카 품종 내에서도 식미가 양호한 것으로 알려진 ‘일품벼’가 식미가 나쁜 ‘팔공벼’와 ‘도봉벼’에 비해 최고점도와 강하점도는 낮으며 최종점도와 치반점도는 높았다(Yoon et al. 2009)는 반대의 결과도 있어서 전주625호의 호화점도 특성과 식미와의 관계에 대해서는 좀 더 면밀한 분석이 필요할

것으로 생각되었다. 전주625호는 단백질 함량이 공시재료 중에 가장 낮았고 밥의 윤기치가 높은 편이었으며 식미 관능검정에서 보람찬보다 높은 특성을 나타내(Table 8) 밥쌀용 쌀로서 그 활용 가치가 높을 것으로 판단되었다.

적 요

우리나라 자포니카 벼의 수량성 향상 및 품질 다변화를 위해서 자포니카 장립종 장원형 벼를 개발하였다. 우리나라 자포니카 벼는 중단립종 단원형의 협소한 입형 특성을 가지고 있다. 이를 다양화하기 위해 입형 다양화 육종소재 중 초장립종 장원형인 ‘DSG79’를 자포니카 초다수성 품종으로 중단립종 단원형인 ‘보람찬’과 인공교배하여 계통 육종법과 집단육종법을 병행수행하여 장립종 장원형 입형 특성의 우량계통 ‘전주625호’를 개발하였다. 전주625호는 입형 관련 $GW2gs3qSW5+qGL3$ 유전자형을 가지고 있었으며 현미 길이 7.06 mm의 초장립종에 장폭비 2.72의 장원형 입형 특성을 나타냈다. DGS79가 매우 늦은 출수기, 장간, 긴 까락, 처진 지엽, 도복에 약한 특성 등 열악형질을 수반하고 있었으나, 전주625호는 포장육종에 중점을 둔 강한 선발압으로 이를 개선하였다. 전주625호의 백미 수량성은 559 kg/10a로 자포니카 초다수 품종인 보람찬(552 kg/10a)과 비슷한 수준을 나타냈으며 DGS79 (435 kg/10a)에 비해서는 29%로 향상되었다. 전주625호는 보람찬과 ‘한아름2호’에 비해 1차 지경 관련 형질이 2차 지경 관련 형질에 비해 많은 특성을 나타냈으며, 등숙률은 낮았다. 전주625호는 정상립률이 86.9%로 보람찬(91.1%)보다 낮았으나 한아름2호(78.0%)보다 높았다. 전주625호의 호화점도 특성은 자포니카인 보람찬과 통일형인 한아름2호에 비해 최고점도는 낮고 최저점도와 최종점도는 높아 강하점도가 낮고 치반점도가 높은 특성을 나타냈다. 전주625호는 보람찬과 한아름2호에 비해 단백질 함량은 낮고 밥의 윤기치는 높았으며 식미 관능검정에서 높은 특성을 나타내 밥쌀용 쌀로서 그 활용가치가 높을 것으로 판단되었다. 개발된 전주625호는 농업 형질과 품질이 양호한 자포니카 장립종 장원형 벼로 실질적인 재배품종과 육종사업의 교배모본으로 활용되어 우리나라 자포니카 품종의 입형 특성 다양화에 기여할 것으로 기대된다.

사 사

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

REFERENCES

1. Calingacion M, Laborte A, Nelson A, Resurreccion A, Concepcion JC, Daygon VD, Mumm R, Reinke R, Dipti S, Bassinello PZ. 2014. Diversity of global rice markets and the science required for consumer-targeted rice breeding. PLoS ONE 9: e85106.
2. Cho JH, Lee JY, Lee JH, Yeo US, Park NB, Kim SY, Song YC, Jung KH, Oh SH, Shin MS. 2012. 'Hanareum2': Mid-maturing, multiple disease resistance, and high yielding Tongil type rice cultivar. Korean J Breed Sci 44: 205-209.
3. Choi HC. 2002. Current status and perspectives in varietal improvement of rice cultivars for high-quality and value-added products. Korean J Crop Sci 47: 15-32.
4. Choi ID. 2010. Physicochemical properties of rice cultivars with different amylose contents. J Korean Soc Food Sci Nutr 39: 1313-1319.
5. Codex Stan 198-1995. 1995. Standard for rice. pp. 1-6.
6. Fan C, Xing Y, Mao H, Lu T, Han B, Xu C, Li X, Zhang Q. 2006. GS3, a major QTL for grain length and weight and minor QTL for grain width and thickness in rice, encodes a putative transmembrane protein. Theor Appl Genet 112: 1164-1171.
7. Fan C, Yu S, Wang C, Xing Y. 2009. A causal C-A mutation in the second exon of GS3 highly associated with rice grain length and validated as a functional marker. Theor Appl Genet 118: 465-472.
8. Ha KY, Ko JK, Nam JK, Ko JC, Kim KY, Kang HJ, Shin MS, Baek MK, Kim BK, Kim WJ, Shin WC, Park HS. 2012. A new medium-late japonica rice cultivar, Boramchan with super high yield. Korean J Breed Sci 44: 346-350.
9. Huang R, Jiang L, Zheng J, Wang T, Wang H, Huang Y, Hong Z. 2013. Genetic bases of rice grain shape: so many genes, so little known. Trends Plant Sci 18: 218-226.
10. International Rice Research Institute (IRRI). 2014. Standard evaluation system for rice (SES) 5th edition. Los Banos. Philippines. pp. 1-47.
11. 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.
12. Juliano BO. 1979. The chemical basis of rice grain quality In: Proceedings of the workshop on chemical aspects of rice grain quality. International Rice Research Institute. Los Banos. Philippines. pp. 69-90.
13. Kang HJ, Hwang IK, Kim KS, Choi HC. 2006. Comparison of the physicochemical properties and ultrastructure of *japonica* and *indica* rice grains. J Agri Food Chem 54: 4833-4838.
14. Kang MH, Noh TH, Lee BC, Kim SM, Kim HM. 2015. Race distribution of rice bacterial leaf blight from 2012 to 2014 and disease severity by rice bacterial leaf blight strains and combinations to IRBB series for resistant analysis. J Agr Life Sci 46: 1-8.
15. Kang MY, Rico CW, Lee SC. 2009. Comparative analysis of the physicochemical properties of rice endosperm from different non-glutinous rice varieties. J Korean Soc Appl Bio Chem 52: 582-589.
16. Kauffman HE, Reddy APK, Hsieh SPY, Merca SD. 1973. An improved technique for evaluating resistance of rice varieties to *Xanthomonas oryzae*. Plant Dis Rep 57: 537-541.
17. Kim BK. 2003. Analysis of primary and secondary rachis branches characters for promotion of ripened grain ratio and their inheritance in *japonica* rice (*Oryza sativa* L.). Ph. D. Thesis. Chungnam Nat. Univ.
18. Ko JK, Lee KW, Kim KJ, Baek MK, Shin WC, Chun JB, Kim WJ, Jeong JU, Kang KH, Kim HS, Kim BK. 2017. Quality differences in high grade of medium-short grain milled rice between the exported Korean rice and Chinese circulating rice in China. J Korean Soc Int Agric 29: 129-133.
19. Korea Seed and Variety Service (KSVS). 2005. The guidelines of characteristics for application and registration on new varieties in rice. Anyang. Korea. pp. 8, 14.
20. Kubo T, Takano-kai N, Yoshimura A. 2001. RFLP mapping of genes for long kernel and awn on chromosome 3 in rice. Rice Genet Newsl 18: 26-28.
21. Kurakazu T, Sobrizal, Yoshimura A. 2001. RFLP mapping of genes for awn on chromosomes 4 and 5 in rice using *Oryza meridionalis* introgression lines. Rice Genet Newsl 18: 28-30.
22. Kwon TM, Lee JH, Park SK, Hwang UH, Cho JH, Kwak DY, Youn YN, Yeo US, Song YC, Nam JS. 2012. Fine mapping and identification of candidate rice genes associated with *qSTV11 SG*, a major QTL for rice stripe disease resistance. Theor Appl Genet 125: 1033-1046.
23. Lee BC, Yoon YN, Hong SJ, Hong YK, Kwak DY, Lee JH, Yeo US, Kang HW, Hwang HG. 2008. Analysis on the occurrence of rice stripe virus. Res Plant Dis 14: 210-213.
24. Luo J, Liu H, Zhou T, Gu B, Huang X, Shangguan Y,

- Zhu J, Li Y, Zhao Y, Wang Y. 2013. *An-1* encodes a basic helix-loop-helix protein that regulates awn development, grain size, and grain number in rice. *Plant Cell* 25: 3360-3376.
25. Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs (MAFRA). 2013. Enforcement rule of grain management act. Degree of rice quality and protein contents.
26. Mao H, Sun S, Yao J, Wang C, Yu S, Xu C, Li X, Zhang Q. 2010. Linking differential domain functions of the GS3 protein to natural variation of grain size in rice. *Proc Natl Acad Sci USA* 107: 19579-19584.
27. Park HS, Baek MK, Nam JK, Shin WC, Jeong JM, Lee GM, Park SG, Kim CS, Cho YC, Kim BK. 2017. Development and characterization of breeding materials with diverse grain size and shape in *japonica* rice. *Korean J Breed Sci* 49: 369-389.
28. Qi P, Lin YS, Song XJ, Shen JB, Huang W, Shan JX, Zhu MZ, Jiang L, Gao JP, Lin HX. 2012. The novel quantitative trait locus *GL3. 1* controls rice grain size and yield by regulating Cyclin-T1; 3. *Cell Res* 22: 1666-1680.
29. Rural Development Administration (RDA). 2012. Standard of analysis and survey for agricultural research. Suwon. Korea. pp. 335.
30. Shin MS, Ko JK, Kim BK, Lee KS, Lee JK, Ha KY, Yang BK, Shin HT, Lee SY, Cho SY, Noh TH, Kim YD, Joung JI, Oh YH. 1998. A new high yielding and good quality rice cultivar adaptable to double cropping and late planing, "Nampyeongbyeon". *Korean J Breed Sci* 30: 384.
31. Shomura A, Izawa T, Ebana K, Ebitani T, Kanegae H, Konishi S, Yano M. 2008. Deletion in a gene associated with grain size increased yields during rice domestication. *Nature Genet* 40: 1023-1028.
32. Sim EY, Chung SK, Cho JH, Woo KS, Park HY, Kim HJ, Oh SH, Kim WH. 2015. Physicochemical properties of high-amylose rice varieties. *Food Eng Prog* 19: 392-398.
33. Song XJ, Huang W, Shi M, Zhu MZ, Lin HX. 2007. A QTL for rice grain width and weight encodes a previously unknown RING-type E3 ubiquitin ligase. *Nature Genet* 39: 623-630.
34. Takano-Kai N, Jiang H, Kubo T, Sweeney M, Matsumoto T, Kanamori H, Padhukasahasram B, Bustamante C, Yoshimura A, Doi K. 2009. Evolutionary history of *GS3*, a gene conferring grain length in rice. *Genetics* 182: 1323-1334.
35. Yan CJ, Yan S, Yang YC, Zeng XH, Fang YW, Zeng SY, Tian CY, Sun YW, Tang SZ, Gu MH. 2009. Development of gene-tagged markers for quantitative trait loci underlying rice yield components. *Euphytica* 169: 215-226.
36. Yan S, Zou G, Li S, Wang H, Liu H, Zhai G, Guo P, Song HM, Yan CJ, Tao YZ. 2011. Seed size is determined by the combinations of the genes controlling different seed characteristics in rice. *Theor Appl Genet* 123: 1173-1181.
37. Yoon MR, Kim CE, Koh HJ, Kang MY. 2007. Physicochemical properties of rice kernels affected by palatability. *Korean J Crop Sci* 52: 45-50.
38. Yoon MR, Koh HJ, Kang MY. 2009. Pasting and amylose component characteristics of seven rice cultivars. *J Korean Soc Appl Biol Chem* 52: 63-69.
39. Zhang X, Wang J, Huang J, Lan H, Wang C, Yin C, Wu Y, Tang H, Qian Q, Li J. 2012. Rare allele of *OsPPKL1* associated with grain length causes extra-large grain and a significant yield increase in rice. *Proc Natl Acad Sci* 109: 21534-21539.