벼흰잎마름병 저항성 유전자 집적 고품질 중만생 벼 ‘신진백’

박현수^{1*} · 김기영² · 백만기¹ · 조영찬¹ · 김보경¹ · 남정권¹ · 신운철¹ · 김우재¹ · 고종철¹ · 김정주¹ · 정종민¹ · 정지웅¹ · 이건미¹ · 박슬기¹ · 이창민¹ · 김춘송¹ · 서정필¹ · 이점호¹

¹농촌진흥청 국립식량과학원, ²농촌진흥청

Bacterial Blight Resistance Genes Pyramided in Mid-Late Maturing Rice Cultivar ‘Sinjinbaek’ with High Grain Quality

Hyun-Su Park^{1*}, Ki-Young Kim², Man-Kee Baek¹, Young-Chan Cho¹, Bo-Kyeong Kim¹, Jeong-Kwon Nam¹, Woon-Chul Shin¹, Woo-Jae Kim¹, Jong-Cheol Ko¹, Jeong-Ju Kim¹, Jong-Min Jeong¹, Ji-Ung Jeung¹, Keon-Mi Lee¹, Seul-Gi Park¹, Chang-Min Lee¹, Choon-Song Kim¹, Jung-Pil Suh¹, and Jeom-Ho Lee¹

¹National Institute of Crop Science, RDA, Wanju 55365, Republic of Korea

²Research Policy Bureau, RDA, Jeonju 54875, Republic of Korea

Abstract ‘Sinjinbaek’ is a bacterial blight (BB)-resistant, mid-late maturing rice cultivar with high grain quality. To diversify the resistance genes and enhance the resistance of Korean rice cultivars against BB, ‘Sinjinbaek’ was developed from a cross between ‘Iksan493’ (cultivar name ‘Jinbaek’) and the F₁ cross between ‘Hopum’ and ‘HR24670-9-2-1’ (‘HR24670’). ‘Jinbaek’ is a BB-resistant cultivar with two BB resistance genes, *Xa3* and *xa5*. ‘Hopum’ is a high grain quality cultivar with the *Xa3* resistance gene. ‘HR24670’ is a near-isogenic line that carries the *Xa21* gene, a resistance gene inherited from a wild rice species *O. longistaminata*, in the genetic background of *japonica* elite rice line ‘Suweon345’. ‘Sinjinbaek’ was selected through the pedigree method, yield trials, and local adaptability tests. Using bioassay for BB races and DNA markers for resistance genes, three resistance genes, *Xa3*, *xa5*, and *Xa21*, were pyramided in the ‘Sinjinbaek’ cultivar. ‘Sinjinbaek’ exhibited high-level and broad-spectrum resistance against BB, including the K3a race, the most virulent race in Korea. ‘Sinjinbaek’ is a mid-late maturing rice cultivar tolerant to lodging. It has multiple disease resistance against BB, rice blast, and stripe virus. The yield of ‘Sinjinbaek’ was similar to that of ‘Nampyeong’. ‘Sinjinbaek’ showed excellent grain appearance, good taste of cooked rice, and enhanced milling performance, and we concluded that it could contribute to improving the quality of BB-resistant cultivars. ‘Sinjinbaek’ was successfully introgressed with the *Xa21* gene without the linkage drag negatively affecting its agronomic characteristics. ‘Sinjinbaek’ improved the resistance of Korean rice cultivars against BB by introgression of a new resistance gene, *Xa21*, as well as by pyramiding three resistance genes, *Xa3*, *xa5*, and *Xa21*. ‘Sinjinbaek’ would be suitable for the cultivation in BB-prone areas since it has been used in breeding programs for enhancing plants’ resistance to BB (Registration No. 7273).

Keywords Sinjinbaek, Rice, Bacterial blight, Resistance gene, *Xa21*, Pyramiding

Received on July 22, 2019. Revised on August 6, 2019. Accepted on August 16, 2019.

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

서 언

벼흰잎마름병은 *Xanthomonas oryzae* pv. *oryzae*에 의한 세균성 병으로 벼를 재배하는 대부분의 국가에서 발생하여 많은 피해를 주는 병이다(Mew 1987). 벼흰잎마름병균은 일반적으로 벼 잎의 끝과 가장자리에 있는 수공 및 상처를 통해서 침입하며, 병원균이 도관을 통해 증식하고 잎을 따라 수직으로 이동하여 식물체 전체로 퍼진다(Mew et al. 1993). 처음에는 잎가장자리가

황색으로 변하나 시간이 경과하면서 전 엽신으로 번지고 하얗게 말라 죽는다(Nino-Liu et al. 2006). 벼흰잎마름병의 피해는 벼 생육단계별 이병시기에 따라 피해정도가 다른데, 병 발생 시 광합성이 저해되고 등숙률이 떨어지며 천립중이 감소하여 수량이 감소하게 되고 미발육립의 증가, 청미 및 동할미의 발생이 많아져 품질이 떨어지게 된다(Noh et al. 2007, Shin et al. 1992). 벼흰잎마름병 방제용으로 몇 가지 화학약제가 개발되어 사용되고 있으나 방제효과가 낮아 저항성 품종 재배가 가장 경제적이고

효율적인 방제 수단으로 알려져 있다(Khush et al. 1989, Shin et al. 2011).

우리나라에서 벼흰잎마름병에 대응하기 위한 저항성 육종사업은 주로 농촌진흥청 국립식량과학원에서 이루어졌다. 1975년부터 2015년까지 국립식량과학원에서 개발된 자포니카 벼 품종은 330개로 이들 중 벼흰잎마름병 대표균계인 K1, K2, K3, K3a에 이병성인 품종은 178품종(53.9%), K1에 저항성은 35품종(10.6%), K1과 K2에 저항성은 1품종(0.3%), K1, K2, K3에 저항성은 109품종(33.0%), K1, K2, K3, K3a 모두에 저항성인 품종은 7품종(2.1%)이 개발되었다(Park 2016). 시대별로 보면 1970년에는 저항성 품종이 없었고, 1982년에 최초의 저항성 품종인 ‘섬진’이 개발되어 1980년대에 K1에 저항성인 7개 품종이 개발되었다. 1991년에 K1, K2, K3에 저항성인 ‘화영’, ‘안중’이 개발된 이후에 특히 ‘화영’을 저항성원으로 하여 지금까지 많은 저항성 품종이 개발되었다(Shin et al. 2011). 1990년대 이후 벼흰잎마름병 발병 시 급속히 이병화되는 통일형 품종에서 자포니카 품종으로 재배 품종의 생태형 전환, ‘신동진’, ‘주남’, ‘동진1호’ 등 K1, K2, K3 균계에 저항성인 우량 자포니카 품종들이 개발되어 재배됨에 따라 우리나라 벼흰잎마름병 발생은 지속적으로 감소하여 2000년에 2,145 ha로 전체 벼 재배면적의 0.2%의 미미한 수준을 나타냈다(Park 2016, Shin et al. 2005). 2001년 저항성 품종이었던 ‘화영’의 이병엽에서 K3보다 병원성이 강한 새로운 균계인 K3a가 확인된 이후 기존의 단일 저항성 유전자를 보유하고 있는 저항성 품종들의 저항성이 붕괴되었고, 2006년에는 전체 벼 재배면적의 3.6%인 34,764 ha에서 벼흰잎마름병이 발생하여 큰 피해를 초래하였다(Noh et al. 2003, Park 2016). 병원성이 강한 새로운 균계 K3a에 의한 피해가 확대되는 시점에서 방글라데시 *Aus* 생태형 ‘DV85’로부터 K3a에 저항성인 *xa5* 저항성 유전자를 자포니카 배경으로 도입한 근동질 계통이 육성되었고 실질적인 품종으로 이어져 2006년에 최초의 저항성 품종 ‘강백’이 개발되었다(Kim et al. 2008). 이를 통해 변이균인 K3a에 대응할 방안을 마련하였다(Shin et al. 2011). 이후 ‘진백’(2008년 개발), ‘신백’(2010년), ‘해품’(2013년), ‘안백’, ‘만백’, ‘새신’(2014년 개발) 등 기존의 주요 저항성 유전자인 *Xa3*과 새로 도입된 *xa5*를 결합함으로써 K3a 균계에 저항성을 확보한 품종들이 개발되었다(Park 2016).

우리나라의 벼흰잎마름병 K3a 균계 발생에 따른 피해사례와 같이 저항성원이 다양하지 못한 품종들이 대면적 장기간 재배될 경우 병원균의 분포 변화나 새로운 병원균의 발생 등으로 저항성이 붕괴되어 큰 피해가 발생 할 수 있다. 이를 방지하기 위해서는

새로운 저항성원의 발굴 및 우리나라 자포니카 품종으로의 도입과 함께 저항성 유전자들을 결합함으로써 벼흰잎마름병에 대한 저항성이 향상된 품종을 개발해야 한다(Shin et al. 2011). 농촌진흥청 국립식량과학원 벼 육종팀은 벼흰잎마름병에 대한 저항성원을 다양화하고 저항성 유전자가 집적된 고품질 벼 품종 개발을 위한 육종사업을 수행하였다. 이를 통해 기존에 우리나라에 도입되지 않은 새로운 벼흰잎마름병 저항성 유전자를 포함하여 세계의 저항성 유전자가 집적된 고품질 중만생 벼 품종 ‘신진백’을 개발하였다. 이에 ‘신진백’에 대한 육성 경위와 주요 특성을 보고자하고자 한다.

재료 및 방법

시험재료 및 재배방법

교배모본으로 ‘익산493호’(품종명 ‘진백’)를 모본으로 하고 ‘호품’과 ‘HR24670-9-2-1’를 교배한 F₁을 부분으로 이용하였다. 육종사업을 통해 선발된 고정 계통에 대해서 2013-2014년에 남부평야지 중만생종 표준품종 ‘남평’과 함께 생산력 검정시험을 수행하였다. 공시 재료를 국립식량과학원 벼 포장에 4월 30일 파종하여 5월 30일에 재식거리 30 × 15 cm로 주당 3본씩 구당 180주를 3반복으로 보통기 재배 이양하였다. 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. 지역적응성 검정시험은 보통기 보비 재배시험을 호남평야지(식량원 익산, 전북도원 익산, 예산, 논산, 나주) 5개소에서 2014-2016년 3년 동안 ‘남평’을 표준품종으로 하여 수행되었다. 재배방법에 따른 시험지별 파종 및 이양시기, 재식밀도와 주당묘수, 시비량 및 질소 분시방법 등과 농업형질 및 수량구성요소, 생리장해 및 병해충 저항성, 도정특성 조사는 농촌진흥청 신품종개발공동연구사업 과제수행계획서의 조사기준과 농업과학기술 연구조사분석기준에 준하여 실시하였다(RDA 2012, 2014, 2015, 2016).

주요 농업형질 및 수량 관련 형질 조사

지역적응성 검정시험에 공시된 재료의 출수기를 조사하고, 성숙기에 평균이 되는 20개체에 대해서 간장, 수장, 수수를 측정하였다. 성숙기에 3주를 예취하여 등숙률 및 수당립수를 조사하였고 100주를 3반복 예취하여 정조중을 측정하였다. 수확한 정조 1.5 kg을 수량조사현미기로 제형하여 정현비율을 측정하고,

100주 정조수량에 정현비율을 곱하여 현미수량을 구한 다음 1 ha당 수량으로 환산하였다. 현미수량에 일반적 현백률인 0.92를 곱하여 백미수량을 구하였고, 제현된 현미를 이용하여 천립중을 측정하였다.

생리장애 저항성 검증

내냉성 검증은 국립식량과학원 춘천출장소 내냉성 검증 시험 포장에서 실시하였다. 이앙 후 20일부터 등숙기까지 수온 17℃, 수심 5 cm로 냉수처리 후 적고, 출수지연일, 임실률 등을 조사하였다. 출수지연일은 냉수를 처리하지 않은 대조구 대비 냉수 처리구 간의 출수지연일수로 구하였고, 임실률은 성숙기에 냉수 처리구의 주간 3이삭을 채취하여 측정하였다. 저온발아율은 100립 3반복으로 13℃ 항온기에서 15일간 치상하여 발아율을 조사하여 측정하였다. 내냉성 유묘검정은 3엽기부터 수온 13℃로 10일간 처리하여 1: 엽색 농록, 3: 엽 선단부 담록, 5: 1/3 엽색 황변, 7: 2/3 엽색 갈변, 9: 고사 등 1-9의 질적등급으로 구분하였다. 수발아 검정은 출수 후 40일에 주간의 3 이삭을 채취하여 25℃ 포화습도에서 7일간 치상 후 발아율을 조사하여 측정하였다. 도복저항성 검증은 출수 후 20일에 평균적인 3개체를 골라 실시하였다. 좌절중은 간기부에서 10 cm 절간 중앙부에 하중을 걸어 부러질 때의 무게로 인장강도 시험기(DTG-5, Digitech Co. Ltd., Osaka, Japan)를 이용하여 측정하였다. 도복의 전체적 정도를 나타내는 도복지수는 [모멘트(g · cm)/좌절중(g)] × 100의 공식을 이용하여 구하였으며, 모멘트는 주간 간장과 수장을 더한 값을 총생체중으로 곱한 값이다. 포장 도복은 출수 후 30일에 달관조사 하였는데 그 기준은 1: 이삭줄기 경사 15% 이하(무도복), 3: 16-30%, 5: 31-45%, 7: 이삭의 일부가 지면에 닿음, 9: 완전히 땅에 깔린 상태로 구분하였다.

벼흰잎마름병 저항성 유전자 확인

Genomic DNA 추출은 BioSprint 96 (Qiagen Co., Düren, Germany)을 이용하였다. 샘플을 TissueLyser II (Qiagen Co., Düren, Germany)를 이용하여 마쇄한 후 BioSprint 96 DNA Plant Kit (Qiagen Co., Düren, Germany)를 이용하여 DNA를 추출하였다. 벼흰잎마름병 저항성 유전자 *Xa3*, *xa5*, *Xa21*를 확인하기 위해 대상 유전자와 밀접하게 연관된 DNA 분자표지인 9643.T4, 10603.T10Dw, U1/I1을 이용하였다(Park et al. 2013). 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

9643.T4는 94℃에서 5분간 초기변성 후 94℃ 40초, 63℃ 40초, 72℃ 1분간 총 40회 반복하고, 72℃에서 5분간 반응하였다. 10603.T10Dw과 U1/I1은 95℃에서 4분간 초기변성 후 95℃ 30초, 65℃ 또는 56℃(U1/I1) 30초, 72℃ 1분간 총 35회 반복하고, 72℃에서 10분간 반응하였다. 증폭된 PCR 산물 4 μL를 9643.T4는 *Taq α* 1와 65℃에서 3시간, 10603.T10Dw는 *Rsa* 1와 37℃에서 3시간 제한효소 처리하였다. U1/I1에 의한 증폭 산물은 제한효소 처리 없이 전기영동에 이용하였다. 2% agarose gel에서 전기영동을 실시하여 EtBr로 염색한 후 UV transilluminator (MiniBIS Pro, DNR Bio-Imaging Systems Ltd., Jerusalem, Israel)를 이용하여 유전자형을 판정하였다.

벼흰잎마름병 저항성 검증

계통육성 과정 중 병원성인 강한 HB1009 (K3a 군계) 군주를 이용하여 저항성 검정을 수행하였고, 생산력 검정시험과 지역적응성 검정시험에서는 우리나라 벼흰잎마름병 대표군계에 대한 저항성 반응을 HB1013 (K1 군계), HB1014 (K2), HB1015 (K3), HB1009 (K3a) 군주를 이용하여 검정하였다. 검정 계통에 대해서 최고분얼기에 군주 별로 3주씩 엽선단 3 cm 부위를 가위 절엽접종하였다(Kauffman et al. 1973). 접종 후 3주 후에 각각의 개체에서 가장 긴 병반을 가진 3개 엽의 병반장을 측정하여 평균 병반장 길이가 5 cm 이하는 저항성(R; resistant), 5-10 cm는 중도저항성(MR; moderately resistant), 10 cm 이상은 이병성(S; susceptible)으로 질적저항성을 구분하였다. 벼흰잎마름병에 대한 광범위 저항성 검정을 위해서 국내 수집 벼흰잎마름병 군주 중 *Xa3* 유전자를 침해하는 것으로 알려진 HB2024, HB2038, HB3034, HB3055, HB3079, HB4024, HB4030, HB4040, HB4044, HB4079, HB6142, HB6151, HB6159와 *Xa3* 유전자를 침해하지 못하나 *Xa21* 유전자를 침해하는 HB2010, HB3011, HB4027 군주 등 총 16개 군주를 이용하여 저항성 반응을 조사하였다(Park et al. 2013). 플라스틱 상자(78 x 45 x 18 cm)에 ‘신진백’(익산575호)과 교배모본에 활용된 ‘진백’, ‘호품’, ‘HR24670-9-2-1-2-5-2’, 표준품종인 ‘남평’과 K3a에 저항성 품종인 ‘강백’, ‘해품’, ‘안백’, ‘만백’을 주당 3본씩 16주 이양하여 한 개체 당 한 군주씩 엽선단 약 3 cm 부위를 가위 절엽접종하여 접종 3주 후에 가장 긴 병반을 가진 3개 엽의 병반장을 측정하여 평균한 값을 이용하였다.

도열병, 바이러스병, 멸구류 저항성 검증

잎도열병 저항성 검증은 국립식량과학원, 도농업기술원 등 전국 12개 지역에서 질소다비 조건의 밭못자리 상태에서 6월

하순에서 7월 상순에 늦게 파종하여 잎도열병을 유발시키는 밭못자리 검정법을 이용하여 수행되었다. 검정포 시비량은 성분량으로 $N-P_2O_5-K_2O$ 를 240-80-120 kg/ha로 주었고, 발병을 촉진시키기 위한 이병성 품종(spreader)으로 ‘호평’을 이용하였다. 파종 후 30일 이후에 발병 최성기를 중심으로 조사하며 잎도열병 저항성 검정 기준은 0: 무 발병, 1: 바늘머리 크기의 갈색 병반, 2: 다소 큰 갈색 병반, 3: 직경 1-2 mm의 원형회색병반, 4: 직경 1-2 mm의 전형적 병반으로 엽면적의 2% 이하 발병, 5: 전형적인 병반이 엽면적의 3-10%, 6: 11-25%, 7: 26-50%, 8: 51-75%, 9: 76% 이상 등 0-9 단계로 발병으로 구분하였다. 도열병 포장저항성 검정은 식량원 익산, 밀양, 이천, 진주 포장에서 질소과비조건에서 이양재배하여 이삭도열병 발병정도를 검정하였다. 검정포 시비량은 성분량으로 $N-P_2O_5-K_2O$ 를 240-45-57 kg/ha로 주었고, 발병을 촉진하기 위해서 이병성 품종 ‘호평’을 검정 계통 주위에 재식하였다. 출수 후 30-35일 경에 이삭 표본을 채취하여 건전 이삭과 이병 이삭의 비율로 이삭도열병 발병정도를 측정하였다. 벼줄무늬잎마름병 검정은 망실을 이용한 대량 검정법으로 바이러스 보독충 방사 및 계대 사육으로 보독충이 충분히 유지된 망실에 검정 계통을 파종 후 이병성 품종인 ‘추청’이 병징을 나타낼 때 저항성과 감수성으로 판정하였다(Kwak et al. 2007). 오갈병 및 검은줄오갈병은 실내유묘검정을 통해서 보독충을 접종하여 바이러스병 저항성 여부를 이병성 품종 ‘추청’을 비교하여 검정하였다. 벼멸구 및 애멸구 저항성 검정은 파종 후 본엽 2-3엽기에 벼멸구와 애멸구를 접종하여 감수성 대비 품종인 ‘일품’과 ‘추청’이 고사한 후에 검정 계통을 저항성과 감수성으로 판정하였다.

품질 및 도정 특성 검정

현미 20립에 대해서 길이, 너비를 캘리퍼스(Caliper CD-15CP, Mitutoyo Corp., Japan)를 이용하여 조사하고 너비에 대한 길이의 비율로 현미 장폭비를 계산하였다. 투명도는 백미 20립을 달관조사하여 1: 쌀이 유리알 같이 맑은 것, 5: 중간, 9: 쌀이 불투명한 것으로 구분하였다. 심복백은 백미 20립에 대해서 달관 조사를 통하여 0: 심백 및 복백 무, 1: 쌀알 면적의 5% 이하, 3: 6-10%, 5: 11-20%, 7: 21-40%, 9: 41% 이상으로 구분하였다. 알칼리불포도는 백미 6립을 3반복으로 15 mL 용량의 사각 플라스크에 넣고 1.4% KOH 용액 10 mL씩 분주한 후 30°C 항온기에서 23시간 정치 후(Cheo & Heu 1975), 퍼짐도(spreading)와 투명도(clearing)에 따라 1: 부풀지 않고 그대로 있음, 2: 모양 변화 없이 약간 부풀어 있음, 3: 금이 나게 부풀어 있고, 극히

미미한 퍼짐도 보임, 4: 부푼 쌀 너비 정도의 퍼짐도 보이거나 투명화 현상 없음, 5: 심하게 갈라져 꽤 넓은 퍼짐도 보이고 투명화 현상 시작함, 6: 완전히 퍼지고 외곽은 거의 투명화됨, 7: 형태를 알 수 없게 퍼져서 투명화됨 등 7단계로 구분하였다. 단백질 함량은 AOAC (2000)방법에 의하여 Micro Kjeldahl법으로 자동 단백질 분석기(Kjeltec 2400 AUT, Foss Tecator, Mulgrave, Australia)로 측정하였다. 아밀로스 함량은 Juliano (1985)의 비색정량법에 따라 시료 100 mg에 95% 에탄올과 1 N sodium hydroxide를 가한 후 호화시킨 전분 호화액에 1 N acetic acid와 2% I_2-KI 용액을 첨가하여 요오드 정색반응 후 분광광도계를 이용하여 620 nm의 파장에서 흡광도를 측정하였다. 밥맛 검정은 전기밥솥에 밥을 취반하여 ‘추청’의 취반미를 기준으로 하여 국립식량과학원 본원, 중부작물부 및 남부작물부 패널리 밥 모양(색깔 및 윤기), 냄새, 찰기, 질감, 밥맛 및 종합평가 등 6항목을 평가하였다. 평가는 기준밥인 ‘추청’과 비교하여 비슷하면 보통(0), 기준보다 나쁜 쪽으로 3단계(-1, -2, -3), 좋은 쪽으로 3단계(+1, +2, +3)의 수준으로 평가하고 밥맛 평균값을 식미치로 이용하였다. 도정특성 검정은 정선된 정조 1 kg을 로울러식 시험용 제현기를 이용하여 현미를 제조한 후 정조에 대한 현미의 중량비율로 정현비율을 구하였으며, 현백율은 현미 500 g을 시험용 정미기에 5-6회 반복 도정한 후 얻어진 백미를 1.7 mm 체로 쳐서 쉐미를 분리하고 남은 백미중량을 현미의 중량에 대한 백분율로 나타냈고 도정률은 정현비율에 현백율을 곱한 다음 100으로 나눈 수치로 표시하였다(Lee et al. 2009). 백미 완전미율은 도정 후 얻어진 백미를 50 g씩 3반복으로 취하여 숙련된 사람이 육안으로 완전미를 분리하였고 완전미의 무게를 재어 원료 쌀의 중량에 대한 백분율로 표시하였다. 완전미 도정수율은 도정률에 백미 완전미율을 곱한 다음 100으로 나눈 수치로 표시하였다.

통계 분석

통계분석은 SAS 프로그램(Version 9.2, SAS Institute Inc., Cary, NC, USA)을 이용하였다. 농업형질에 대한 평균을 기술 통계법으로 구하였고, PROC *t*-test를 이용하여 표준품종과 형질값을 비교하였다

결과 및 고찰

육성 경위

‘신진백’은 벼흰잎마름병에 대한 저항성이 향상된 고품질 벼 품종을 개발하고자 육성되었다. 2007/2008년 동계에 벼흰잎마

름병 저항성 유전자 *Xa3*와 *xa5*를 가지고 있는 ‘익산493호’(품종명 ‘진백’) (Kim et al. 2009)를 모본으로 하고, 최고품질 품종이면서 *Xa3*를 보유하고 있는 ‘호품’(Ko et al. 2008)에 ‘HR24670-9-2-1’ (이하 HR24670)을 교배한 F₁을 부분으로 하여 삼원교배하였다 (Figs. 1, 2). ‘HR24670’은 자포니카 중생 우량계통 ‘수원345호’ 유전배경에 야생벼 *O. longistaminata* 유래 저항성 유전자 *Xa21*이 도입된 근동질 계통이다(Kim et al. 2011). 인공교배는 벼흰잎마름병 저항성 유전자 *Xa3*, *xa5*, *Xa21*를 결합시키는 것을 목표로 작성되었으며, 2008년부터 2012년까지 집단육종법과 계통육종법을 수행하면서 벼흰잎마름병균에 대한 생물검정과 분자표지를 활용하여 저항성 유전자의 도입여부를 확인하였다. 벼흰잎마름병 저항성 검정과 더불어 초형 등 주요 농업형질, 도열병 등

병저항성과 외관품위 및 밥맛 등 미질에 대한 조사·분석을 통하여 우량 고정계통을 선발하였다. 2013-2014년 생산력 검정시험을 실시하여 벼흰잎마름병 저항성 유전자 *Xa3*, *xa5*, *Xa21*세 개가 집적되어 우리나라 벼흰잎마름병균에 대해 광범위 고도저항성을 나타내는 ‘HR27814-B-B-47-1-1’ (이하 HR27814)을 선발하였다. ‘HR27814’는 도열병과 벼줄무늬잎마름병에도 강한 복합 내병성이며 쌀의 외관품위와 밥맛이 양호한 단간 내도복 중만생종으로 ‘익산575호’로 계통명을 부여하였다(Fig. 2). ‘익산575호’는 2014-2016년 3년간의 지역적응성 검정시험을 통해 벼흰잎마름병에 대한 저항성이 향상된 단간 내도복 중만생 계통으로 복합내병성을 갖추고 있으며 밥맛이 양호하고 도정 특성이 우수한 점이 인정되어 농촌진흥청 직무육성 신품종 선정심의위원회

Fig. 1. Genealogical diagram of ‘Sinjinbaek’

Fig. 2. Pedigree diagram of ‘Sinjinbaek’.

에서 신품종으로 선정되었다. 기존의 벼흰잎마름병 저항성 품종인 ‘진백’보다 벼흰잎마름병 저항성이 향상되었으며 ‘진백’의 낮은 수량성, 도열병과 벼줄무늬잎마름병에 대한 이병성 등 단점을 보완하였다는 의미에서 ‘신진백’으로 품종명을 명명하였다.

출수기 및 주요 농업적 특성

‘신진백’은 호남평야지역에서의 출수기(heading date)가 평균 8월 19일로 표준품종인 ‘남평’보다 4일 정도 느린 중만생종이다(Table 1). 고온등숙을 회피하고 쌀 품질을 향상시키기 위해 기존의 중만생종보다 출수가 늦은 벼 품종 개발이 제안되었고(Kim et al. 2007), 이러한 관점에서 ‘영호진미’(2009년 개발), ‘미품’(2010년), ‘만백’(2014년)과 같은 벼 품종들이 개발되었다(Park et al. 2017). ‘신진백’도 출수기를 기존의 중만생종 품종보다 다소 늦춤으로써 등숙기 고온에 의한 품질 저하를 회피하고자 하였다. 잎은 ‘남평’과 비슷한 녹색이며 직립성으로 초형이 양호하다(Fig. 3A). 간장(culm length)이 70 cm로 통계적으로 유의한 수준에서 ‘남평’보다 6 cm 작은 단간으로 수장(panicle length)과 주당수수(no. of panicles per hill)는 남평과 같은 20 cm, 13개였으며, 수당립수(no of spikelets per panicle)는 104개로 ‘남

평’(98개)보다 많았다(Table 1). 등숙비율(ratio of ripened grain)은 93.0%로 ‘남평’(92.4%)보다 높았으나 통계적 유의성은 없었고, 현미천립중(1,000-grain weight of brown rice)은 22.7 g으로 ‘남평’(21.5 g)보다 무거웠다(Table 1).

생리장애 및 도복 저항성

‘신진백’은 생육 중후기에 위조현상(occurrence of wilting)이 없으며, 성숙기 하엽노화(leaf senescence at maturing)가 늦은 편이었다(Table 2). 내냉성 검정 결과 ‘남평’에 비해 출수지연일수(heading delay)가 5일 길고 임실률(grain fertility)이 비슷한 수준이었으나, 저온 발아율(low temperature germination)은 82.3%로 ‘남평’(41.7%)에 비해 유의한 수준으로 높았다(Table 2). 도복 저항성과 관련하여 줄기의 기부에 하중을 걸어 부러질 때의 무게를 측정하는 좌절중(breaking strength)이 1,477 g으로 ‘남평’(1,689 g) 보다 낮았으나 간장이 작고 도복의 전체적 정도를 나타내는 도복지수(index of lodging)가 83로 ‘남평’(92)보다 낮아 도복에 안정적인 특성을 나타내는 것으로 판단되었다(Table 2). 수발아율(viviparous germination)은 34.3%로 ‘남평’(8.3%) 보다 높은 수준을 나타내 수발아에 다소 취약한 특성

Fig. 3. Plant type at maturing stage (A) and grain shape of rough, brown, and milled rice (B).

Table 1. Major agronomic traits and yield components.

Cultivar	Heading date (DAS ^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)
Sinjinbaek	111 ^{**y}	70 ^{**}	20 ^{ns}	13 ^{ns}	104 [*]	93.0 ^{ns}	22.7 [*]
Nampyeong	107	76	20	13	98	92.4	21.5

^zDAS: days after seeding

^yns, *, and ** mean no significant, significant at $p < 0.05$, and 0.01 by t -test, respectively

을 나타냈다(Table 2).

벼흰잎마름병 저항성

벼흰잎마름병 저항성 유전자를 표지하는 분자마커로 검정한 결과 ‘신진백’은 저항성 유전자 *Xa3*, *xa5*, *Xa21* 세 개가 집적되어 있는 것으로 확인되었다(Fig. 4A). ‘신진백’은 벼흰잎마름병 대표균계인 K1, K2, K3, K3a에 모두 매우 강한 저항성 반응을 나타내 두 개의 저항성 유전자 *Xa3+xa5*를 가지고 있는 ‘진백’에 비해 향상된 저항성 반응을 나타냈으며(Table 3, Fig. 5A), 국내

수집 16개 균주에 대해서 HB6142 균주(병반장 1.5 cm)를 제외한 15개 균주의 병반장이 1 cm 이내로 평균 병반장 0.7 cm의 매우 강한 저항성 반응을 나타냈다(Table 4). 지금까지 농촌진흥청 국립식량과학원에서 개발된 K3a 균계 저항성 자포니카 벼 품종은 ‘강백’(2006년 개발), ‘진백’(2008년), ‘신백’(2010년), ‘해품’(2013년), ‘안백’, ‘만백’, ‘새신’(2014년)과 ‘신진백’(2016년) 등 8개 품종이다. 최초의 저항성 품종인 ‘강백’은 *xa5* 저항성 유전자 하나만 가지고 있고 이후 개발된 ‘진백’, ‘신백’, ‘해품’, ‘안백’, ‘만백’, ‘새신’ 등 6품종은 *Xa3*와 *xa5* 두 개의 저항성

Table 2. Response to physiological and abiotic stresses.

Cultivar	Occurrence of wilting	Leaf senescence at maturing	Cold tolerance ^z				Low tem. germination ^y (%)	Lodging		Viviparous germination ^x (%)
			Seedling stage (1-9)	Heading delay (day)	Grain fertility (%)	Phenotypic acceptability (1-9)		Breaking strength (g)	Index	
Sinjinbaek	Tolerance	Late	4 ^{ns,w}	14 ^{ns}	27 ^{ns}	7 ^{ns}	82.3 ^{**}	1,477 [*]	83 ^{ns}	34.3 [*]
Nampyeong	Tolerance	Late	4	9	32	6	41.7	1,689	92	8.3

^zCold tolerance was evaluated at cold water (17°C) irrigation nursery in Chuncheon substation, NICS

^yGermination rate for 15 days at 13°C

^xGermination rate for 7 days at 25°C

^wns, * and ** mean no significant and significant at $p < 0.05$, $p < 0.01$ by *t*-test, respectively

Fig. 4. Pyramiding effects of bacterial blight resistance genes. Confirmation of the incorporation of resistance genes (A). *Xa3*, *xa5*, and *Xa21* were confirmed by PCR products amplified with primer, 9643.T4 (cleaved by *Taq* α I), 10603.T10Dw (*Rsa* I), and U1/I1, respectively. M: DNA size marker 1: ‘Nampyeong’ (NP), 2: ‘Jinbaek’ (JB), 3: ‘Hopum’ (HP), 4: HR24670-9-2-1-2-5-2 (HR24670), 5: ‘Sinjinbaek’ (SJB), 6: ‘Gangbaek’, 7: ‘Shinbaeg’, 8: ‘Haepum’, 9: ‘Anbaek’, 10: ‘Manbaek’, 11: ‘Saeshin’. Average lesion length (B) and radial graph of resistance reaction (C) of cultivars against 16 Korean *Xanthomonas oryzae* pv. *oryzae* isolates.

Table 3. Resistance reaction to bacterial blight.

Cultivar	Resistance gene	Race				Resistance at field nursery
		K1	K2	K3	K3a	
Sinjinbaek	<i>Xa3+xa5+Xa21</i>	HR ^z	HR	HR	HR	HR
Nampyeong	<i>unknown</i>	S	S	S	S	S
Jinbaek	<i>Xa3+xa5</i>	R	R	R	R	R

^zHR: highly resistant, R: resistant, S: susceptible

Table 4. Resistance reaction of cultivars against 16 Korean *Xanthomonas oryzae* pv. *oryzae* isolates.

Isolate	Nampyeong	Hopum	Gangbaek	HR24670-9-2-1-2-5-2	Jinbaek	Haepum	Anbaek	Manbaek	Sinjinbaek
	<i>unknown</i>	<i>Xa3</i>	<i>xa5</i>	<i>Xa21</i>	<i>Xa3+xa5</i>	<i>Xa3+xa5</i>	<i>Xa3+xa5</i>	<i>Xa3+xa5</i>	<i>Xa3+xa5+Xa21</i>
HB2010	14.6 ^z (S) ^y	6.3 (MR)	5.3 (MR)	10.7 (S)	0.4 (HR)	1.4 (R)	1.3 (R)	0.8 (HR)	0.9 (HR)
HB2024	15.5 (S)	18.2 (S)	7.2 (MR)	1.2 (R)	3.7 (R)	4.1 (R)	6.0 (MR)	5.2 (MR)	0.5 (HR)
HB2038	18.8 (S)	17.2 (S)	7.5 (MR)	1.5 (R)	2.5 (R)	5.7 (MR)	5.0 (MR)	3.1 (R)	0.5 (HR)
HB3011	12.2 (S)	4.3 (R)	4.5 (R)	12.8 (S)	0.8 (HR)	1.4 (R)	0.8 (HR)	0.7 (HR)	0.9 (HR)
HB3034	18.2 (S)	19.7 (S)	4.5 (R)	0.6 (HR)	2.3 (R)	4.0 (R)	3.5 (R)	2.9 (R)	0.5 (HR)
HB3055	19.9 (S)	15.7 (S)	5.2 (MR)	2.0 (R)	3.0 (R)	5.9 (MR)	4.1 (R)	5.0 (MR)	0.5 (HR)
HB3079	19.2 (S)	16.2 (S)	6.5 (RM)	0.8 (HR)	3.1 (R)	4.4 (R)	3.4 (R)	3.0 (R)	0.8 (HR)
HB4024	13.7 (S)	11.2 (S)	6.2 (MR)	1.0 (R)	3.2 (R)	5.8 (MR)	3.4 (R)	3.8 (R)	0.7 (HR)
HB4027	18.0 (S)	2.4 (R)	5.5 (MR)	13.8 (S)	0.5 (HR)	1.7 (R)	1.2 (R)	0.7 (HR)	0.9 (HR)
HB4030	15.3 (S)	13.4 (S)	5.8 (MR)	1.0 (R)	3.0 (R)	7.3 (MR)	2.4 (R)	3.5 (R)	0.7 (HR)
HB4040	15.5 (S)	13.7 (S)	4.4 (R)	1.5 (R)	4.3 (R)	4.0 (R)	3.8 (R)	3.3 (R)	0.8 (HR)
HB4044	14.8 (S)	12.5 (S)	5.3 (MR)	1.2 (R)	4.9 (R)	3.3 (R)	1.8 (R)	4.0 (R)	0.5 (HR)
HB4079	18.7 (S)	14.3 (S)	5.6 (MR)	1.0 (R)	3.1 (R)	4.2 (R)	2.2 (R)	2.7 (R)	0.5 (HR)
HB6142	11.2 (S)	13.0 (S)	5.9 (MR)	1.0 (R)	3.0 (R)	3.4 (R)	3.2 (R)	4.6 (R)	1.5 (R)
HB6151	13.2 (S)	10.2 (S)	4.2 (R)	0.8 (HR)	2.7 (R)	4.2 (R)	2.7 (R)	3.7 (R)	0.9 (HR)
HB6159	16.8 (S)	15.1 (S)	8.0 (MR)	1.2 (R)	3.5 (R)	4.3 (R)	2.8 (R)	5.2 (MR)	0.7 (HR)
Total	16.0±2.65	12.7±4.88	5.7±1.13	3.3±4.60	2.8±1.26	4.1±1.64	3±1.39	3.3±1.49	0.7±0.27
C.V.(%)	16.6	38.4	19.7	141.3	45.6	40.4	46.7	45.6	36.1

^zAverage lesion length was measured using 3 leaves mostly inoculated

^yHR: Highly resistant (< 1 cm lesion length), R: resistant (1-5 cm), MR: moderately resistant (5-10 cm), S: susceptible (> 10 cm)

유전자를 가지고 있으며, 이번에 개발된 ‘신진백’은 *Xa3*, *xa5*에 추가로 *Xa21*를 도입하여 세 개의 저항성 유전자가 집적되어 있는 것으로 확인되었다(Fig. 4A). 한 개의 품종이 두 개 이상의 저항성 유전자를 갖는 경우 하나의 저항성 유전자를 갖는 경우에 비해 병원균의 번이에 의한 저항성 붕괴의 확률이 낮다(Mundt 1990). 또한 병원균의 균계에 상호보완적인 저항성 범위를 가지는 유전자들을 집적시킴으로써 여러 균계에 대한 광범위 저항성을 확보할 수 있으며 저항성 붕괴를 지연시킬 수 있다(Yoshimura et al. 1995). Park et al. (2013)은 우리나라 벼흰잎마름병균에 대한 인디카와 자포니카 벼의 단일 저항성 유전자 반응과 이들의

집적효과를 분석함으로써 유전자 집적에 따른 저항성 향상과 보완 효과를 구명하였으며, 벼흰잎마름병 저항성 육종사업에서 주력으로 활용되고 있는 *Xa3+xa5*와 더불어 *Xa3+Xa21*, *xa5+Xa21*, *Xa3+xa5+Xa21* 조합을 새롭게 유망 조합으로 추가 제시하였다. ‘신진백’은 제시된 유망 조합 중 저항성 반응이 가장 강했던 *Xa3+xa5+Xa21* 조합을 보유하고 있으며, 교배모본인 호품(*Xa3* 저항성 유전자 보유), HR24670 (*Xa21*), 진백(*Xa3+xa5*)과 비교해서 저항성 유전자 집적에 따른 저항성 향상 효과와 여러 균계에 대한 광범위 저항성을 발현했다(Fig. 4B, C).

Fig. 5. Resistance reaction of ‘Sinjinbaek’, ‘Jinbaek’, and ‘Nampyeong’ against bacterial blight races K1 (HB1013 isolate), K2 (HB1014), K3 (HB1015), and K3a (HB1009) (A). White bar indicate 10 cm. Resistance reaction of ‘Sinjinbaek’, ‘Jinbaek’, ‘Hopum’, and ‘Hopyeong’ against rice leaf blast (B).

K3a 균계 저항성 품종 육성계보 분석

우리나라 벼흰잎마름병 저항성 육종사업 초기에는 K1 균계에 저항성을 나타내는 *Xa1*을 목표 저항성 유전자로하여 최초의 저항성 품종 ‘섬진벼’(1982년 개발)가 개발되었고, 이후 육종사업에서는 K1, K2, K3 균계에 저항성인 *Xa3* 저항성 유전자 도입에 노력하여 ‘화영’, ‘안중’(1991년 개발)을 시작으로 *Xa3*를 보유한 많은 저항성 품종들이 개발되어 병 발생에 따른 피해를 방지하였다(Shin et al. 2011). 하지만 2000년대 이후 ‘화영’을 이용하여 개발된 ‘신동진’, ‘주남’, ‘동진1호’ 등 *Xa3* 저항성 유전자를 보유하고 있는 우량 품종들의 대면적 재배가 장기화됨에 따라 *Xa3*를 침해하는 새로운 변이균인 K3a가 발생하였고 남부지역을 중심으로 전파되어 병 피해가 확산되었다(Kang et al. 2015, Noh et al. 2003, Oh et al. 2010, Shin et al. 2011) 이러한 시점에서 방글라데시 *Aus* 품종 ‘DV85’로부터 K3a 균계에 저항성인 *xa5* 저항성 유전자를 자포니카 중생 우량계통 ‘수원345호’ 배경으로 도입한 근동질 계통이 육성되었고 실질적인 품종으로 이어져 ‘강백’(2006년 개발)이 개발되었다(Kim et al. 2008). 육성계보를 통해 K3a 균계 저항성 품종들의 저항성 유전

자 도입 흐름을 분석하였다(Fig. 6). 두번째 K3a 균계 저항성 품종인 ‘진백’(2008년 개발)은 ‘신동진’과 ‘주남’으로부터 *Xa3*, ‘강백’으로부터 *xa5*가 도입되어 두 개의 저항성 유전자 *Xa3+xa5*가 집적된 최초의 K3a 균계 저항성 품종이다(Kim et al. 2009). 이후 육성된 ‘해품’(2013년 개발), ‘안백’(2014년), ‘신진백’(2016년)은 ‘진백’을 통해 *xa5* 저항성 유전자가 도입되었다. ‘신백’(2010년 개발)은 국제미작연구소에서 개발된 인디카 벼흰잎마름병 단인자 저항성 근동질 계통 ‘IRBB5’를 수여친으로 하여 자포니카 ‘수원345호’ 배경으로 *xa5* 저항성 유전자를 도입한 근동질 계통 ‘HR23966-22-1-2’로부터 *xa5*가 도입되었고, ‘새신’(2014년 개발)은 ‘신백’을 통해 *xa5*가 도입되었다(Kim et al. 2011, Lee et al. 2013). ‘만백’(2014년 개발)은 인디카 벼흰잎마름병 저항성 유전자 집적 근동질 계통 ‘IRBB57’을 수여친으로 하여 저항성 유전자에 대한 분자표지 선별과 유전배경 분석을 통해 자포니카 중만생 품종 ‘만금’ 배경으로 저항성 유전자 *Xa4+xa5+Xa21*이 집적된 ‘SR30075-2-1-21-2-2-1’로부터 *xa5*가 도입되었다(Park et al. 2017, Suh et al. 2013). ‘신진백’은 ‘호품’과 ‘진백’으로부터 *Xa3*, ‘진백’을 통해 *xa5* 저항성 유전자가 도입되었고, 인디카

Fig. 6. Genealogical relationship of Korean *japonica* rice cultivars carrying resistance against bacterial blight race, K3a. Grey, yellow, and red boxes indicate the susceptible to K1, K2, K3, and K3a races, resistant to K1, K2, and K3 races, and resistant to K1, K2, K3, and K3a races, respectively. Italic letters indicate the confirmed resistance genes.

벼흰잎마름병 단인자 저항성 근동질 계통 ‘IRBB21’를 수여친으로 하여 자포니카 ‘수원345호’ 배경으로 *Xa21* 저항성 유전자를 도입한 근동질 계통 ‘HR24670’으로부터 *Xa21*이 도입되었다. 야생벼 *O. logistaminata*에서 유래한 *Xa21*은 세계 각국의 벼흰잎마름병균에 광범위 고도 저항성 반응을 나타내 벼흰잎마름병 저항성 육종사업에 적극 활용되고 있는 저항성 유전자이다(Khan et al. 2014, Khush et al. 1990, Xia et al. 2012). 하지만 *Xa21* 저항성 유전자는 우리나라 벼흰잎마름병균 K1 균계에 이병성을 보여 우리나라에서는 저항성원으로 효과적이지 못할 것이라 하였으며(Lee et al. 1999), 생태형이 다른 유전자원으로부터 저항성 유전자 도입 시 발생하는 열악형질 수반(linkage drag) 문제로 인하여 우리나라 벼흰잎마름병 저항성 육종사업에서 실질적으로 활용되지 못하였다. 이에 반해 Park et al. (2013)은 *Xa21* 저항성 유전자는 우리나라에서 K1 균계를 제외한 다른 균계에 매우 강한 저항성 반응을 나타내며 다른 저항성 유전자와 집적 시 균계 특이적 이병성을 보완할 수 있고 광범위 고도 저항성을 나타내 육종적 가치가 있으며, 근동질 계통 개발 등

열악형질 제거를 통해 육종사업에 실질적으로 활용할 수 있을 것이라 하였다. 기후변화, 동일 저항성원으로 하는 품종의 장기간 재배 등으로 우점균의 분포 변화나 새로운 변이균의 발생에 따른 저항성 붕괴를 사전에 대비하기 위해 새로운 저항성원인 *Xa21* 저항성 유전자를 우리나라 자포니카 벼에 도입하기 위한 육종사업이 수행되었다(Shin et al. 2011). *Xa21* 도입에 따른 열악형질 수반 문제 극복을 위한 육종적 노력을 경주하여 자포니카형 유전배경에 *Xa21*을 도입한 근동질 계통 ‘HR24670’을 개발하였다(Kim et al. 2011). 또한 ‘HR24670’을 교배모본으로 이용하여 *Xa21*과 *Xa3*, *xa5* 등 다른 저항성 유전자가 결합된 우량계통을 개발하였고 이들의 저항성 증진효과를 구명하였다(Park et al. 2013). 개발된 우량 계통 중 세 개의 저항성 유전자 *Xa3+xa5+Xa21*이 집적된 ‘HR24670-B-47-1’이 실질적인 품종으로 이어져 ‘신진백’이 개발되었다.

‘신진백’은 벼흰잎마름병 저항성 유전자 *Xa3+xa5+Xa21* 세 개가 집적된 우리나라 최초의 품종으로 병원성이 강한 K3a 균계와 새로운 변이균 발생에 대비한 저항성원으로서 다양한 벼

육종사업에 널리 활용되고 있다. 특히 아직까지 우리나라 재배품종에 도입되지 못했던 *Xa21* 저항성 유전자를 열악형질 수반 없이 실용적인 품종으로 도입함으로써 우리나라 벼흰잎마름병 저항성 육종사업의 외연을 확대했다는 점에 그 가치가 크다 하겠다.

도열병, 바이러스 병 및 해충 저항성

신진백은 도열병 저항성 검정 결과 도열병 포장저항성 검정에서는 익산(1.3%)과 진주(0.6%)에서 목도열병이 다소 발견되었으나, 잎도열병 발못자리 검정을 실시한 12개소에서 저항성 7개소, 중도저항성 5개소로 평균 저항성 정도 2.6의 강한 잎도열병 저항성 반응을 나타내 도열병에 강한 특성을 나타냈다(Table 5, Fig. 5B). 기존의 벼흰잎마름병 K3a 균계 저항성 품종들의 잎도열병 평균 저항성 정도가 ‘강백’ 4.0 (‘남평’ 4.5), ‘진백’ 7.2 (‘남평’ 4.9), ‘신백’ 6.8 (‘남평’ 5.2), ‘해품’ 5.0 (‘남평’ 3.6), ‘안백’ 5.0 (‘남평’ 3.5), ‘만백’ 5.6 (‘남평’ 3.5), ‘새신’ 4.8 (‘남평’ 3.6)인 점(품종정보; <http://www.nongsaro.go.kr>)을 고려할 때 ‘신진백’은 이들 품종들보다 도열병에 대한 저항성이 향상된 것으로 판단

된다. 또한 ‘신진백’은 바이러스병인 줄무늬잎마름병에도 강해(Table 6), 우리나라 자포니카 벼 주요 3대 병인 도열병, 벼흰잎마름병, 줄무늬잎마름병에 모두 저항성인 복합내병성 품종으로 화학농약 사용 절감이 가능하고 친환경재배에 적합한 품종으로 생각된다. 하지만 기타 바이러스병 및 해충에 대한 저항성은 없어 이에 대한 적기방제를 하여야 한다(Table 6).

품질 및 도정특성

‘신진백’의 입형은 현미장폭비가 1.77인 단원형으로 쌀이 맑고 외관 품질(심복백 0/0)이 좋았다(Table 7, Fig. 3B). 아밀로스 함량은 19.7%로 ‘남평’(18.9%)보다 높았으나 통계적 유의성은 없고 단백질함량은 5.8%로 ‘남평’(5.9%)과 비슷하였다(Table 7). 식미관능검정에서 0.25 (남평 0.01)로 밥맛이 양호하였는데 이는 2016년 벼 지역적응성 검정시험 식미관능검정에서 밥쌀용 공시계통 16개 중 4번째에 해당하는 성적이며(data not shown), K3a 균계 저항성 품종의 육성 당시 성적인 ‘강백’ -0.03 (남평 0.03), ‘진백’ 0.10 (남평 -0.06), ‘신백’ -0.16 (남평 0.09), ‘해품’ 0.32 (남평 0.02), ‘새신’ 0.04 (남평 -0.10), ‘안백’ 0.02 (남평 -0.05), ‘만백’

Table 5. Resistance reaction to blast disease.

Cultivar	Reaction to leaf blast at blast nursery (0-9)				Reaction to panicle blast at field test			
	No. of tested sites (12)				Rate of infected panicles (%)			
	R	M	S	Mean	Jeonju	Milyang	Icheon	Jinju
Sinjinbaek	7	5	0	2.6	1.3	0.0	0.0	0.6
Nampyeong	3	9	0	4.4	3.7	0.0	2.0	2.5

²R: resistant, M: moderately resistant, S: susceptible

Table 6. Reaction to virus disease and insect pests.

Cultivar	Virus diseases			Resistance to insects	
	Stripe	Dwarf	Black streaked dwarf	BPH ²	SBPH
Sinjinbaek	R ^y	S	S	S	S
Nampyeong	R	M	S	S	S

²BPH: brown planthopper, SBPH: small brown planthopper

^yR: resistant, M: moderately resistant, S: susceptible

Table 7. Characteristics related to grain shape and grain quality.

Cultivar	Brown rice			Trans-lucency (1-9)	White core (0-9)	White belly (0-9)	Alkali digestive value (1-7)	Protein content (%)	Amylose content (%)	Palatability of cooked rice (-3-+3)
	Length (mm)	Width (mm)	L/W ratio							
Sinjinbaek	5.03 ^{ns,z}	2.82 ^{ns}	1.77 ^{ns}	1 ^{ns}	0 ^{ns}	0 ^{ns}	6.7 ^{ns}	5.8 ^{ns}	19.7 ^{ns}	0.25
Nampyeong	4.97	2.82	1.71	1	0	0	6.4	5.9	18.9	0.01

^zns means no significant by *t*-test

Table 8. Characteristics related to milling quality.

Cultivar	Milling recovery ratio (%)				Head rice milling recovery ratio (%)
	Brown/rough	Milled/brown	Milled/rough	Head rice	
Sinjinbaek	83.0	91.1	75.5	97.2	73.4
Nampyeong	80.9	90.7	73.3	94.8	69.5

Table 9. Yield summary of local adaptability test.

Culture season	Region	No. of tested sites	Milled rice (MT/ha)		Index
			Sinjinbaek (A)	Nampyeong (B)	A/B
Ordinary planting	Honam plain	5	5.55 ^{ns,z}	5.41	102 ^{ns}

^zns means no significant by *t*-test

0.22 (남평 -0.05)의 성적(품종정보; <http://www.nongsaro.go.kr>)과 비교해 볼 때 밥맛이 양호한 것으로 판단되었다. ‘신진백’의 벼 흰잎마름병 저항성 유전자 집적이 쌀의 외관 및 밥맛에 미치는 영향을 살펴보면 *Xa3*과 *xa5* 저항성 유전자의 도입은 쌀의 외관 및 밥맛 등 품질에 부정적인 영향을 미치지 않는다 하였고(Park et al. 2017, Shin et al. 2006), *Xa3*, *xa5*와 함께 아직까지 실용 품종에 도입되지 않았던 *Xa21*을 모두 가지고 있는 ‘신진백’의 쌀 외관 품위 및 밥맛이 양호한 점으로 미루어 볼때 *Xa21*의 도입 또한 쌀의 외관 및 밥맛 등 품질에 부정적인 영향을 미치지 않는 것으로 판단되었다. 이는 저항성 유전자 도입을 위해 저항성 유전자를 보유하고 있는 원연관계의 유전자원을 직접 수여친으로 활용한 것이 아니라 46회의 여교배 과정을 거치는 등 장기간의 육종과정을 통해 열악형질이 제거된 자포니카형 근동질계통을 교배모본으로 활용하였으며(Kim et al. 2011, Shin et al. 1998, Shin et al. 2000), 저항성 유전자 도입 뿐만 아니라 품질에도 선발압을 강하게 걸었기 때문으로 생각된다. ‘신진백’의 도정특성은 제현율이 83.0%로 ‘남평’(80.9%)보다 높았고, 현백률이 91.1%, 도정률이 75.5%로 ‘남평’(90.7, 73.3%)보다 높았으며, 백미완전미율 또한 97.2%로 ‘남평’(94.8%)보다 높아 완전미 도정수율이 73.4%로 ‘남평’(69.5%)에 비해 우수하였다(Table 8). 도정률과 백미완전미율은 2016년 벼 지역적응성 검정시험의 밥쌀용 공시계통 16개 중 2번째로 높은 성적이었으며, 완전미 도정수율은 가장 높은 값이었다(data not shown).

수량성

‘신진백’의 백미 수량은 2014-2016년 3년간 실시한 지역적응성 검정시험 보통기 보비 재배시험에서 평균 쌀수량이 5.55

MT/ha로 ‘남평’보다 2% 높았으나 통계적으로는 유의하지 않았다(Table 9).

적응지역 및 재배상 유의점

‘신진백’의 적응지역은 우리나라 충청남도, 전라북도, 전라남도의 평야지역이다. 파종 전 주의사항으로 키다리병 방제를 위하여 철저한 종자소독을 하여야 한다. 재배기간 중 질소질 비료를 과용할 경우 미질 및 등숙 저하, 속색 불량과 병해충 발생이 우려되므로 적정 균형시비 하여야 한다. 병해충 관리에 있어서 ‘신진백’은 벼 흰잎마름병, 도열병, 줄무늬잎마름병에 강한 복합내병성 품종이나 멸구류 등 해충에 대한 저항성이 없기 때문에 적기에 기본방제를 실시하여야 한다. 냉해에 다소 약하므로 온도가 낮은 산간지 재배 및 냉수용출답 재배는 지양하여야 한다. 수확기 강우에 의해 수발아 피해가 우려되므로 적기 수확하여야 한다.

적 요

‘신진백’은 농촌진흥청 국립식량과학원에서 벼 흰잎마름병에 대한 저항성원을 다양화하고 저항성 유전자 집적을 통해 저항성이 향상된 고품질 중만생 벼 품종을 개발하고자 육성되었다. 벼 흰잎마름병 저항성 유전자 *Xa3*와 *xa5*를 가지고 있는 ‘익산493호’(품종명 ‘진백’)를 모본으로 하고 최고품질 품종이면서 *Xa3*를 보유하고 있는 ‘호품’과 야생벼 *O. longistaminata*에서 유래한 저항성 유전자 *Xa21*을 자포니카 우량계통 ‘수원345호’ 유전배경으로 도입한 근동질 계통 ‘HR24670-9-2-1’간 F₁을 부분으로 삼원교배하여 육성되었다. 계통육성과정 중 벼 흰잎마름병에 대한 저항성 생물검정과 분자표지를 활용한 저항성 유전자 도입여

부 확인을 통해 저항성 유전자가 집적된 계통을 선발하여 생산력 검정시험과 지역적응성 검정시험을 거쳐 개발되었다. ‘신진백’은 보통기 보비재배에서 평균 출수기 8월 19일로 ‘남평’에 비해 4일 늦은 중만생종으로 간장이 70 cm로 ‘남평’보다 6 cm 작은 단간 내도복 품종이다. ‘신진백’은 우리나라 최초로 *Xa21* 저항성 유전자가 도입되었으며, 세 개의 저항성 유전자 *Xa3*, *xa5*, *Xa21*이 집적된 실용적인 재배품종으로 병원성이 강한 K3a 균계를 포함하여 우리나라 벼흰잎마름병균에 광범위 고도 저항성을 반응을 나타냈다. 또한 도열병과 줄무늬잎마름병에도 강한 복합 내병성으로 친환경 재배 적성을 갖추고 있다. ‘신진백’은 ‘남평’과 비슷한 수량성을 나타냈다. ‘신진백’은 쌀의 외관품위가 좋고 밥맛이 양호하며 도정 특성이 우수하여 벼흰잎마름병 저항성 품종의 품질 향상에 기여하였다. ‘신진백’은 새로운 벼흰잎마름병 저항성 유전자 *Xa21*를 열악형질 수반없이 재배품종으로 도입하였으며 세 개의 저항성 유전자를 집적함으로써 벼흰잎마름병균에 광범위 고도 저항성을 확보한 복합 내병성 품종으로 벼흰잎마름병 발병상습지 재배에 적합하며 벼흰잎마름병 저항성 향상을 위한 육종사업에 활용되고 있다(품종보호권 등록번호: 제 7273호; 2018. 6. 25.).

사 사

본 논문은 농촌진흥청 작물시험연구사업(세부과제명: 벼흰잎마름병 저항성 육종소재 개발, 세부과제번호: PJ01248401)의 지원으로 수행된 결과의 일부입니다. 품종을 육성함에 있어 협력하여 주신 농촌진흥청 국립식량과학원, 연구정책국, 농촌지원국 및 각도 농업기술원 관계관계 깊은 감사를 드립니다.

REFERENCES

1. AOAC. 2000. Official methods for analysis. 17th ed. Association of official analytical chemists. Washington DC. USA.
2. Cheo ZR, Heu MH. 1975. Optimum conditions for alkali digestivity test in rice. Korean J Crop Sci 19: 7.
3. Juliano BO. 1985. Polysaccharide, proteins, and lipids of rice. In rice chemistry and technology. The American association of cereal chemists. St. Paul MN. USA. pp. 59-120.
4. 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 Agri & Life Sci 46: 1-8.
5. 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.
6. Khan MA, Naeem M, Iqbal M. 2014. Breeding approaches for bacterial blight resistance in rice (*Oryza sativa* L.), current status and future directions. Eur J Plant Pathol 139: 27-37.
7. Khush G, Mackill D, Sidhu G. 1989. Breeding rice for resistance to bacterial blight. International Rice Research Institute. Manila. Philippines. pp. 207-217.
8. Khush GS, Bacalangco E, Ogawa T. 1990. A new gene for resistance to bacterial blight from *O. longistaminata*. Rice Genet Newsl 7: 121-122.
9. Kim CS, Lee JS, Ko JY, Yun ES, Yeo US, Lee JH, Kwak DY, Shin MS, Oh BG. 2007. Evaluation of optimum rice heading period under recent climatic change in Yeongnam area. Korean J Agric For Meteorol 9: 17-28.
10. Kim KY, Shin MS, Kim WJ, Ko JC, Baek MG, Ha KY, Kim BK, Ko JK, Nam JK, Noh GI, Park HS, Noh TH, Cheong JI, Kim YD, Mo YJ, Kim CK. 2008. A new medium-maturing, “Gangbaek” with resistance to bacterial blight. Korean J Breed Sci 40: 443-446.
11. Kim KY, Shin MS, Kim BK, Ko JK, Noh TH, Ha KY, Ko JC, Kim WJ, Nam JK, Baek MG, Noh GI, Park HS, Baek SH, Shin WC, Mo YJ, Choung JI, Kim YD, Kang HJ, Kim JG, Hwang HG, Kim JK. 2009. A mid-late maturing rice cultivar with high-quality and bacterial blight resistance ‘Jinbaek’. Korean J Breed Sci 41: 314-318.
12. Kim KY, Shin MS, Kim WJ, Park HS, Ko JC, Nam JK, Shin WC, Mo YJ, Jeung JU, Kim BK, Ko JK. 2011. Development of near-isogenic lines (NILs) conferring *Xa4*, *xa5* and *Xa21* genes resistant to bacterial blight (*Xanthomonas oryzae* pv. *oryzae*) in *japonica* rice genetic background. Korean J Breed Sci 43: 383-390.
13. Ko JC, Kim BK, Nam JK, Baek MG, Ha KY, Kim KY, Son JY, Lee JK, Choung JI, Ko JK, Shin MS, Kim YD, Mo YJ, Kim KH, Kim JK. 2008. A medium-late maturing new rice cultivar with high grain quality, multi-disease resistance, adaptability to direct seeding and transplanting cultivation, “Hopum”. Korean J Breed Sci 40: 533-536.
14. 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.

15. Lee CK, Kim JT, Choi YH, Lee JE, Seo JH, Kim MJ, Jeong EG, Kim CK. 2009. Optimum sieve-slit width for effective removal of immature kernels based on virietal chracteristics of rice to improve milling efficiency. Korean J Crop Sci 54: 357-365.
16. Lee JH, Shin MS, Lee JY, Jung KH, Kim SY, Park NB, Yeo US, Kim CS, Oh SH, Cho JH, Song YC, Kim SM, Yi GH, Kwak DY, Kang HW, Nam MH. 2013. A new rice cultivar 'Shinbaek' resistant to K3a race of bacterial blight. Korean J Breed Sci 45: 38-43.
17. Lee SW, Choi SH, Han SS, Lee DG, Lee BY. 1999. Distribution of *Xanthomonas oryzae* pv. *oryzae* strains virulent to *Xa21* in Korea. Phytopathol 89: 928-933.
18. Mew T. 1987. Current status and future prospects of research on bacterial blight of rice. Ann Rev Phytopathol 25: 359-382.
19. Mew T, Alvarez A, Leach J, Swings J. 1993. Focus on bacterial blight of rice. Plant Dis 77: 5-12.
20. Mundt C. 1990. Probability of mutation to multiple virulence and durability of resistance gene pyramids. Phytopathol 80: 221-223.
21. Nino-Liu DO, Ronald PC, Bogdanove AJ. 2006. *Xanthomonas oryzae* pathovars: Model pathogens of a model crop. Mol Plant Pathol 7: 303-324.
22. Noh TH, Lee DK, Kang MH, Shin MS, Shim HK, Na SY. 2003. Identification of new race of *Xanthomonas oryzae* pv. *oryzae* (*Xoo*) in Korea. Phytopathol 93(s): 66.
23. Noh TH, Lee DK, Park JC, Shim HK, Choi MY, Kang MH. 2007. Effect of bacterial leaf blight occurrence on rice yield and grain quality in different rice groth stage. Res Plant Dis 13: 20-23.
24. Oh CS, Roh EJ, Lee SD, La DS, Heu SG. 2010. Genetic diversity and pathotypes of *Xanthomonas oryzae* pv. *oryzae* isolated in Korea. Res Plant Dis 16: 224-231.
25. Park HS, Shin MS, Kim KY, Noh TH, Baek SH, Lee JH, Ha KY, Baek MK, Kim WJ, Park JH, Yoo JS, Cho YC, Kim BK. 2013. Reaction of single resistance genes and their pyramiding effects in *indica* and *japonica* rice against *Xanthomonas oryzae* pv. *oryzae* in Korea. Korean J Breed Sci 45: 119-129.
26. Park HS. 2016. Pyramiding of effective resistance genes for the disease resistant improvement to bacterial blight in *japonica* rice. Ph D Thesis, Chunam Nat Univ. Daejeon. Korea. pp. 12-20.
27. Park HS, Baek MK, Kim BK, Kim KY, Shin WC, Ko JK, Nam JK, Kim WJ, Cho YC, Ko JC, Kim JJ, Kim HS. 2017. Bacterial blight resistant mid-late maturing rice 'Manbaek' with high grain quality. Korean J Breed Sci 49: 235-244.
28. Rural Development Administration (RDA). 2012. Standard of analysis and survey for agricultural research. pp. 315-338.
29. Rural Development Administration (RDA). 2014. Project plan for collaborative research program to devleop new variety summer crop. pp. 3-48.
30. Rural Development Administration (RDA). 2015. Project plan for collaborative research program to devleop new variety summer crop. pp. 2-47.
31. Rural Development Administration (RDA). 2016. Project plan for collaborative research program to devleop new variety summer crop. pp. 1-46.
32. Shin HT, Shin MS, Cho SH. 1998. Breeding of near-isogenic lines for resistance to bacterial blight in rice. Korean J Breed Sci 30: 185-191.
33. Shin MS, Shin HT, Jun BT, Choi BS. 1992. Effects of inoculation of compatible and incompatible bacterial blight races on grain yield and quality of two rice cultivars. Korean J Breed Sci 24: 264-267.
34. Shin MS, Noh TH, Lee JK, Shin HT, Lee YM. 2000. Breeding of *japonica* near-isogenic lines for resistance to bacterial blight in rice. Korean J Breed Sci 32: 291-295.
35. Shin MS, Kim KY, Ko JC. 2005. Utilization of bacterial blight resistance genes. Korean J Breed Sci 37: 18-39.
36. Shin MS, Choi YH, Kim KY, Shin SH, Ko JK, Lee JK. 2006. Effects of recurrent parents and introduced *Xa1*, *Xa2* and *Xa3* genes on rice grain quality. Korean J Breed Sci 38: 161-166.
37. Shin MS, Kim KY, Park HS, Ko JK. 2011. Breeding for resistance to bacterial blight in rice. Korean J Breed Sci 43: 251-261.
38. Suh JP, Jeung JU, Noh TH, Cho YC, Park SH, Park HS, Shin MS, Kim CK, Jena KK. 2013. Development of breeding lines with three pyramided resistance genes that confer broad-spectrum bacterial blight resistance and their molecular analysis in rice. Rice 6: 1-11.
39. Xia C, Chen H, Zhu X. 2012. Identification, mapping, isolation of the genes resisting to bacterial blight and application in rice. Mol Plant Breed 3: 121-131.
40. Yoshimura S, Yoshimura A, Iwata N, McCouch SR, Abenes ML, Baraoidan MR, Mew TW, Nelson RJ. 1995. Tagging and combining bacterial blight resistance genes in rice using RAPD and RFLP markers. Mol Breed 1: 375-387.