

찰벼의 찰기에 대한 유전적 효과와 환경의 상호작용

윤미라^{1,†} · 이정희¹ · 조준현¹ · 양창인¹ · 이점식¹ · 광지은¹ · 안억근¹ · 김미정¹ · 김선림¹

Genotype-by-Environment Interaction for Stickiness of Rice Cakes Using Glutinous Rice Cultivars in Different Environments

Mi-Ra Yoon^{1,†}, Jeong-Heui Lee¹, Jun-Hyun Cho¹, Chang-Ihn Yang¹, Jeom-Sig Lee¹, Jieun Kwak¹, Eok-Keun Ahn¹, Mi-Jung Kim¹, and Sun-Lim Kim¹

ABSTRACT The purpose of this study was to provide basic data on the genetic and environmental effects of stickiness in glutinous rice varieties. In our study, we analyzed the genotype-by-environment ($G \times E$) interactions of the stickiness using six glutinous rice varieties under six environmental conditions. AMMI (Additive Main Effects and Multiplicative Interaction) analysis results showed that genotype (variety, G), environment (cultivation region, E) and $G \times E$ interaction were highly significant ($P < 0.001$). Among all the variations of stickiness for glutinous rice varieties, the environmental effect was 24.5%, the genetic effect was 37.1%, and the $G \times E$ interaction effect was 28.9%. From the AMMI analysis, the IPCA1 scores of Aranghangchal (G6, IPCA1: 3.85) and Hwaseonchal (G4, IPCA1: -5.24) was lower than other varieties. On the other hand, the Sangjuchal (G1, IPCA1: -61.23) and Boseogchal (G2, IPCA1: 41.21) were highly affected by environmental effects. In this study, there were large differences in stickiness according to region of cultivation. In the future, it is considered that a precise study should be carried out on the environmental factors that may increase the stickiness of glutinous rice varieties.

Keywords : genotype-by-environment ($G \times E$) interaction, glutinous rice, stickiness, rice cake

쌀은 아밀로스와 아밀로펙틴으로 구성된 전분 조성 비율에 따라 메벼와 찰벼로 구분된다. 찰쌀은 외관상 유백색으로 불투명하게 보이며, 주로 아밀로펙틴으로 구성된 전분으로 멥쌀에 비해 덜 굳어지고 부드러움이나 탄력성을 오래 유지하는 특성을 가지고 있다(Choi, 2002). 이러한 찰진 성질을 지닌 찰쌀은 오래 전부터 떡이나 술, 한과 등 쌀 가공용 원료로 많이 쓰이고 있다(Choi, 2002; Yoon *et al.*, 2015).

그 동안 찰벼의 품질에 대한 선행 연구는 품종별 도정특성과 찰쌀 고유의 유백색 발현을 위한 건조 시 수분함량 구명, 수분함량에 따른 취반특성 등 찰벼의 수확 후 관리 연구가 주로 수행되어 왔다(Chun *et al.*, 2016; Jeong *et al.*, 2008). 또한 찰쌀을 이용하여 가공제품 개발을 위한 기초연구로 찰쌀 전분의 호화 및 물성 특성 등이 보고되었다(Chung *et al.*, 2006; Yoon *et al.*, 2015). 반면 동일한 찰벼 품종이라도 지역에 따른 찰기 관련 품질특성 차이 등에 대한 연구

는 미흡한 실정이다(Yang *et al.*, 2001). 그 동안 찰벼의 지역별 장려품종 선정은 쌀 수량, 출수기, 병해충, 재배 안정성을 고려하여 추진하고 있다. 밥쌀용 벼 품종의 지역에 따른 식미 차이를 고려하여 적합한 품종을 선정 하듯이 지역별 적합한 찰벼 품종을 선정하기 위해서는 수량성과 재배 안정성 뿐만 아니라 찰벼의 주요 이용 목적인 찰기에 대한 지역적 특성에 대한 평가가 이루어져야 할 것이다.

AMMI (Additive Main Effects and Multiplicative Interaction) 분석모델은 분산분석과 주성분 분석이 결합된 모델로 환경과 유전자의 상호작용 분석을 위한 유용한 방법이다(Balestre *et al.*, 2009; Romagosa & Fox, 1993). AMMI 분석모델은 각각의 환경에서 개별 유전자의 효과뿐만 아니라 다양한 환경에서 유전자와 환경의 상호작용 효과를 설명해 준다. 따라서 AMMI 분석모델을 이용하여 지역에 적합한 품종 선발이나, 대상 유전자의 환경에 대한 안정성을 평가하는데 다양한 작

¹농촌진흥청 국립식량과학원 (National Institute Crop Science, Rural Development Administration, Korea)

[†]Corresponding author: Mi-Ra Yoon; (Phone) +82-31-695-0606; (E-mail) mryoon12@korea.kr

<Received 26 August, 2017; Revised 10 September, 2017; Accepted 14 September, 2017>

물에서 널리 이용되고 있다(Abakemal *et al.*, 2016; Gauch & Zobe, 1996; Rozgard & Farshadfar, 2014; Yang *et al.*, 2001).

본 연구의 목적은 찰벼의 찰기에 대한 품종의 유전적 효과와 환경적 변이에 대한 기초자료를 제공하기 위해 수행하였다. 이를 위해 6개 환경 조건에서 6개 찰벼 품종을 이용하여 찰벼의 찰기에 대한 유전자와 환경의 상호작용(Genotype-by-Environment, G×E) 분석을 하였다.

재료 및 방법

실험재료

찰벼 6개 품종은 조생종인 상주찰과 중생종인 보석찰, 한강찰 1호, 화선찰, 설향찰 및 중만생종인 아랑향찰을 공시하였다. 주로 중생종 품종 위주로 공시한 이유는 재배지역인 철원은 조생종, 수원은 중생종, 밀양은 중만생종이 재배적용지역으로 알려져 있다. 따라서 이들 3개 지역에서 공시 품종들이 정상적인 생육을 고려한 것이었다.

재배방법

재배지역은 철원, 수원 및 밀양에서 2014년 및 2015년 동안 수행하였으며, 시험기간 동안의 기상조건은 Table 1과 같다. 지역별 파종 및 이앙은 철원에서 4월 20일 파종하여 30일 묘를, 수원 4월 25일 파종하여 30일 묘를 밀양은 5월 30일에 파종하여 30일 묘를 이앙하였다. 그 외 지역별 벼 재배는 농촌진흥청 표준재배법에 따라 수행하였다(RDA, 2012). 시험구 배치는 3개 재배지역(철원, 수원, 밀양) 및 2년(2014년 및 2015년) 간 모두 난괴법 3반복으로 배치하였다.

찰벼의 화학적 특성 및 찰떡의 찰기 측정

왕겨를 제거한 현미 시료를 시험용 도정기(MC-90A, Toyo,

Japan)를 이용하여 12분미로 도정 한 후, 분쇄기(Cyclotec TM 1093, FOSS Co., Denmark)로 분쇄하고 100 메쉬 체에 통과시킨 쌀가루를 분석용으로 사용하였다. 조단백질은 Micro Kjeldahl법, 아밀로스 함량은 비색정량법에 따라 시료 100 mg에 95% 에탄올과 1N sodium hydroxide를 가한 후 호화시킨 전분 호화액에 1N acetic acid와 0.2% I₂-KI 용액을 첨가하여 요오드 정색반응 후 620 nm 파장에서의 흡광도를 측정하였다(NICS RDA 2003).

품종별 찰떡 제조를 위한 찰쌀가루는 기류식제분기(ACM185, Hankook Crusher Co., Korea)로 분쇄하였다. 건식제분 찰쌀가루 150 g에 0.7배의 물을 첨가하여 반죽하고, 25분간 쪄 후 20°C에서 2일 저장함에 따른 경도 변화를 Texture analyzer (TA-XT2, Stable Micro System, Haslemere, UK)을 이용하여 측정하였다(Yoon *et al.*, 2015). 측정을 위한 조건으로 원통형 probe의 직경은 10 cm을 사용하였고, 70%의 deformation rate와 1.0 mm/sec의 test speed로 하였다.

통계분석

환경(E), 품종(G) 간 차이 및 G×E 상호작용 분산분석은 Two-way ANOVA 분석을, 동일 환경에서 품종 간 분산분석은 One-way ANOVA 분석을 실시하였다. 분산분석 및 Duncan 다중검정은 SPSS (v13.0) 이용하여 일반선형 모델로 분석 하였다.

AMMI 분석은 PTools (v1.4)을 이용하여 상호작용 주 성분 분석(Interaction Principal Component Axis: ICPA) 및 이에 근거한 biplot을 분석하였다(IRRI, 2017). AMMI 분석 모델은 Zobel *et al.* (1988)에 따라 다음과 같다.

$$Y_{ij} = \mu + g_i + e_j + \sum_{n=1}^N \lambda_n \gamma_{in} \delta_{jn} + \rho_{ij}$$

Table 1. Geographic and climatic information of six tested environments.

Environment code	Location	Year	Geographic- position			Rainfall (mm)*	Temperature (°C)*		
			Latitude	Longitude	Altitude		Min.	Max.	Aver.
E1	Cheolweon	2014	38°15'(N)	127°15'(E)	192 m	521.9	16.0	27.0	21.2
E2	"	2015	"	"	"	746.7	15.5	27.5	21.2
E3	Suweon	2014	37°16'(N)	126°59'(E)	37 m	779.4	18.4	27.9	22.6
E4	"	2015	"	"	"	366.5	18.4	28.6	23.0
E5	Milyang	2014	35°30'(N)	128°45'(E)	12 m	855.2	17.8	29.0	22.8
E6	"	2015	"	"	"	568.5	17.8	28.6	22.7

* Rainfall: The sum value for May to September in 2014 and 2015, respectively.

* Temperature: mean value for May to September in 2014 and 2015, respectively.

- Y_{ij} : 유전자(g) i 번째와 환경(e)의 j 번째의 찧벼의 찧기
- μ : 전체평균
- g_i : 유전자(품종)의 i 번째의 주 효과
- e_j : 환경(지역)의 j 번째의 주 효과
- λ_n : n 번째 상호 작용 주성분 분석(IPCA)의 고유 값
- γ_{in} : n 번째 IPCA의 i 번째 유전자형에 대한 고유 값
- δ_{jn} : n 번째 IPCA의 j 번째 환경에 대한 고유 값
- ρ_{ij} : $G \times E$ 의 잔차

결과 및 고찰

재배지역 및 연도별 기상현황

6개 환경조건(Environment code, E1~E6)의 지역별(철원, 수원, 밀양) 지리적 특성 및 시험연도(2014년 및 2015년)의 기상현황은 Table 1와 같다. 중북부지역인 E1 (철원 2014년) 및 E2 (철원 2015년)은 6개 환경조건 중에서 최저, 최고 및 평균온도가 가장 낮았다. 중부지역인 E3 (수원 2014년) 및 E4 (수원 2015년)의 최고기온과 평균기온은 E3보다 E4가 높았다. 반면 남부지역인 E5 (밀양 2014년) 및 E6 (밀양 2015년)의 최고기온과 평균기온은 오히려 E6보다 E5이 높았다. 3개 지역의 2년간 기상자료 자료를 분석한 결과 철원은(E1 및 E2)는 연차 간 비슷한 기상조건이었다. 반면 중부지역인 수원 2015년(E4)의 최저 및 평균기온은 남부지역인 밀양 2014년(E5) 및 2015년(E6) 보다 오히려 더 높았다. 이러한 기상조건이 찧벼 품종별 찧기에 어떤 영향을 주었는지에 대한 유전자와 환경의 상호작용($G \times E$) 효과 분석의 필요성을 알 수 있었다.

재배환경 조건별 찧벼의 수량성 및 화학적 특성

찰벼 품종별(Genotype code, G1~G6) 철원, 수원, 밀양의 3개 지역에서 2년간 재배한 결과, 출수기 및 쌀 수량을 조

사한 결과는 Table 2와 같다. 조생종 상주찰벼(G1)의 출수기 평균은 7월 27일~8월 2일로 철원에서 가장 빨랐다. 중생종인 보석찰(G2)과 한강찰1호(G3), 화선찰(G4), 설향찰벼(G5)의 출수일은 각각 8월 7~16일, 8월 13~14일, 8월 9~11일, 8월 7~10일 이었다. 전체 중생종 품종(G2~G5)의 2년간 평균 출수일이 각 지역별 1~9일 정도 차이를 보였는데, 그 중에서 보석찰(G2)의 경우 수원에서 8월 16일로 가장 늦었고, 중만생종인 아랑향찰(G6) 또한 남부지역인 밀양에 비해 수원에서 오히려 늦었다. 이 같은 출수기 차이는 각 지역별 찧벼 생육기간 동안의 연차 간 온도 차이에 기인된 결과로 Table 1과 같다. 2015년도의 수원(E4)은 밀양(E6)에 비해 평균 온도가 0.3°C 높았다.

3개 재배지역에서 재배된 찧벼 품종들의 쌀 수량은 Table 2와 같다. 6개 품종의 3개 지역에서 2년간 재배한 평균 쌀 수량은 철원 504 kg/10a, 수원 503 kg/10a, 밀양 501 kg/10a로 비슷하였다. 반면 동일지역에서 품종 간에는 다른 경향을 보였다. 지역별 쌀 수량이 500 kg/10a 이상이었던 품종은 철원에서는 상주찰(G1), 보석찰(G2) 및 설향찰(G5), 수원에서는 한강찰 1호(G3), 설향찰(G5), 아랑향찰(G6), 밀양에서는 한강찰 1호(G3) 및 아랑향찰(G6) 이었다. 3지역 평균 쌀 수량은 통일형 찧벼인 한강찰 1호가 가장 높았다.

찰벼 품종별(Genotype code, G1~G6) 3개 지역에서 2년간 재배된 시료의 아밀로스 및 단백질 함량은 Table 3과 같다. 지역별 평균 아밀로스 함량은 4.9~5.5%, 단백질 함량은 5.4~7.2%이었다. 품종별 및 재배 지역 간에 이들 함량들의 다양한 변이를 보였다. 특히, 수원에서 재배된 찧벼 품종들의 평균 아밀로스 함량이 5.5%로 철원과 밀양에 비해 약 0.5% 높은 경향을 보였다. 지역별 단백질 함량은 철원은 4.8~6.4%로 가장 낮았고, 수원에서는 5.9~7.5%, 밀양은 6.5~8.4%로 밀양에서 가장 높은 경향이었다. 품종 간 비교에서 아밀로스 함량은 설향찰(G5)과 아랑향찰(G6)이 다른 품종

Table 2. Heading data and milled yield of the six cultivars at three locations in 2014 and 2015.

Genotype code	Cultivar	Maturing group	Heading data			Milled yield (kg/10a)		
			Cheolweon	Suweon	Milyang	Cheolweon	Suweon	Milyang
G1	Sangjuchal	Early	7.27±0.03	8.02±0.05	8.02±0.05	530±33.9	428±00.0	424±25.5
G2	Boseogchal	Medium	8.07±0.09	8.16±0.01	8.14±0.04	531±50.2	480±15.6	480±0.70
G3	Hangangchal 1	Medium	8.14±0.01	8.13±0.05	8.13±0.02	488±65.1	593±52.3	625±26.9
G4	Hwaseonchal	Medium	8.09±0.03	8.11±0.05	8.11±0.02	467±81.3	477±29.7	485±5.70
G5	Seolhyangchal	Medium	8.07±0.03	8.10±0.04	8.08±0.02	508±82.7	514±26.2	480±24.0
G6	Aranghangchal	Medium-late	8.13±0.02	8.18±0.03	8.15±0.03	499±18.4	524±17.0	514±4.20
Average	-	-	8.07	8.11	8.10	504	503	501

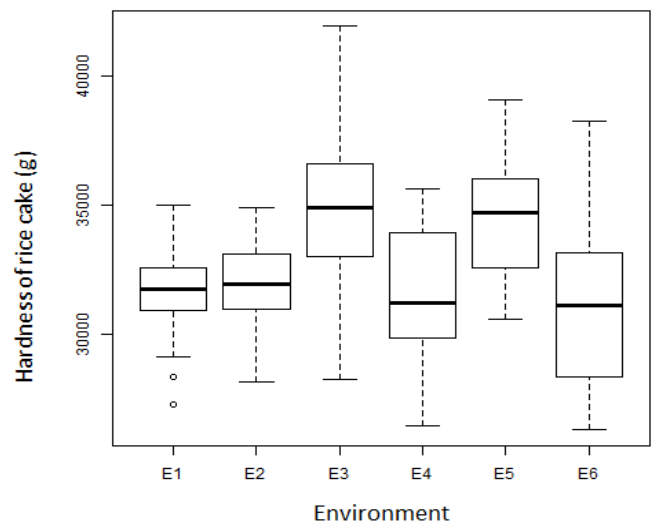
Table 3. Amylose and protein content of the six cultivars at three locations in 2014 and 2015.

Genotype code	Cultivar	Amylose (%)			Protein (%)		
		Cheolweon	Suweon	Milyang	Cheolweon	Suweon	Milyang
G1	Sangjuchal	5.0±0.21	5.6±0.00	5.2±0.14	6.4±0.14	7.5±0.71	8.4±0.49
G2	Boseogchal	5.0±0.28	5.5±0.14	5.0±0.14	5.1±0.07	6.3±0.35	7.1±0.57
G3	Hangangchal 1	5.1±0.28	5.9±0.78	5.3±0.35	5.8±0.07	7.0±0.71	7.4±0.07
G4	Hwaseonchal	5.1±0.35	5.5±0.07	5.0±0.21	5.3±0.28	6.6±0.71	7.3±0.42
G5	Seolhyangchal	4.7±0.21	5.3±0.28	4.9±0.07	4.9±0.21	6.2±0.71	6.8±0.49
G6	Aranghangchal	4.5±0.07	5.5±0.49	4.8±0.35	4.8±0.14	5.9±0.35	6.5±0.49
Average		4.9	5.5	5.0	5.4	6.6	7.2

보다 낮은 경향을 보였고, 반면 단백질 함량은 조생종인 상주찰(G1)과 통일형 중생종인 한강찰 1호(G3)가 높은 경향을 보였다. 일반적으로 밥쌀용 쌀의 아밀로스 함량과 단백질 함량은 등숙에 적합한 온도범위에서는 아밀로스 함량이 높아지면 단백질 함량은 낮아지는 부의 상관관계가 있다. 반면 등숙 기간에 과도한 고온 또는 저온조건에서는 심복백 쌀의 증가 등으로 아밀로스 함량의 감소보다는 현미 천립중 감소 등에 따른 단백질 함량이 더 큰 비율로 높아져 쌀 품질이 떨어지는 것으로 알려져 있다(Choi *et al.*, 2011; Kim *et al.*, 2009, Lee *et al.*, 1996; Lee *et al.*, 2013). 재배 지역에 따른 아밀로스 함량은 일반메벼 보다는 저 아밀로스 품종이나, 고아밀로스 품종들이 등숙기간의 온도 차이에 따라 함량의 차이가 더 큰 것으로 알려져 있다(Choi, 2002; Zhong *et al.*, 2005).

재배환경 조건별 찰벼의 찰기 특성

재배환경 차이에 따른 찰벼의 찰기 변화는 Fig. 1과 같다. 찰벼의 찰기는 찰떡을 제조 후 48시간 경과 후에 Texture analyzer (TA-XT2, Stable Micro System, Haslemere, UK)로 경도(g)를 측정하여 평가하였다. 찰떡의 경도가 높은 것은 빨리 굳어져 찰기가 적은 것을 의미하고, 경도가 낮은 것은 찰기가 오랫동안 지속되어 찰기가 높은 것을 의미한다. 6개 환경조건 간 비교에서, 찰떡의 경도는 E3 (수원 2014년) 및 E5 (밀양 2014년) 환경조건이 다른 환경보다 유의하게 높았다. 따라서 이들 환경조건은 다른 환경조건보다 찰떡의 찰기가 적었다. E1 (철원 2014년) 및 E2 (철원 2015년)은 6종 찰벼의 경도 범위가 다른 환경조건보다 낮았다. 동일한 6종 품종을 이용하여 환경조건 간 비교에서 특이한 점은 E3 (수원 2014년)의 경도는 동일한 지역인 E4 (수원 2015년)보다 오히려 E5 (밀양 2014년)와 비슷한 경향을 보였다. 이러한 차이는 Table 1에서 설명한 바와 같이

**Fig. 1.** Box-plot of hardness of rice cakes in different environments.

연차 간 기상조건의 영향에 의해 기인된 결과로 추론하였다.

동일한 재배환경에서 품종별 찰떡의 경도를 분석한 결과는 Table 4와 같다. 6개 환경에서 평균 찰떡의 경도는 아랑향찰(G6)와 상주찰(G1)이 낮아 찰기가 높았고, 반면 보석찰(G2) 및 설향찰(G5)은 경도가 높아 찰기가 낮았던 품종이었다. 연차 간 비교에서 철원(E1, E2)지역은 찰떡의 경도가 비슷하였다. 반면 수원(E3, E4)과 밀양(E5, E6)은 연차 간 차이가 컸다. 두 지역 모두 2014년(E3 및 E5)이 2015년(E4 및 E6) 보다 찰떡의 경도가 높았다. 지역 간 평균 찰기 비교에서 2014년 수원(E3)은 2014년 밀양(E5)와 비슷하였고, 2015년 수원(E4)은 2015년 밀양(E6)과 비슷하였다. 지역별 찰기가 높았던 품종으로, 철원(E1, E2)은 아랑향찰(G6) 및 화선찰(G4), 수원(E3, E4)은 아랑향찰(G6), 상주찰(G1), 밀양(E5, E6)은 아랑향찰(G6), 한강찰 1호(G3) 이었다. 3개

지역 모두에서 아랑향찰(G6)은 찰떡의 경도가 낮아 찰기가 높았던 품종이었다.

찰기에 대한 환경과 유전자 상호작용 분석

AMMI 분석모델에 의한 6가지 환경조건에서 6종 찰벼 품종을 이용하여 찰떡의 찰기에 대한 분산분석 결과는 Table 5와 같다. 환경(재배지역 및 연차, E) 효과, 유전자(품종, G) 효과, 유전자와 환경 상호 작용(G×E) 효과 모두에서 고도의 유의성이 있었다(P < 0.01). 찰기에 대한 전체 변이 100% 중에서 환경 효과(E)는 24.5%, 품종 효과(G)는 37.1%, 상호작용 효과는 28.9%이었다. 전체 상호작용 효과 중에서 제 1주성분(IPCA1)의 상호작용 효과는 57.4%를 설명하였다. 6가지 환경조건에서 6종 찰벼 품종을 이용하여 실험한 결과, 품종 효과(G)는 37.1%로 가장 높았으나, 환경 효과(E) 및

상호작용 효과(G×E)의 합이 53.4% 임을 고려할 때 찰기는 동일한 품종이라도 환경조건에 크게 따라 달라질 수 있다는 것으로 알 수 있었다. 이러한 결과는 동일한 밥쌀용 품종이라도 재배지역에 따라 식미의 차이에 기여하는 요인과 비슷할 것으로 고찰 된다(Choi, 2002; Choi *et al.*, 211; Lee *et al.*, 1996; Lee *et al.*, 2013). 따라서 향후 찰벼의 재배지역에 따른 찰기를 높일 수 있는 환경조건에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료되었다.

AMMI 분석모델에 의한 6가지 환경조건에서 6종 찰벼 품종을 이용하여 찰떡의 찰기에 대한 biplot 분석결과는 Fig. 2와 같다. AMMI 모델에 의한 biplot 분석의 장점은 환경과 유전자의 상호작용 효과를 개별 유전자와 각각의 환경을 그래픽으로 일목요연하게 표시해 주기 때문에 쉽게 이해할 수 있는 장점이 있다(Kempton, 1984). 그 중에서 AMMI 1

Table 4. Hardness of rice cakes of different genotypes in different environments.

G-code	Cultivar	Hardness of rice cake (g)						Mean
		*E1	E2	E3	E4	E5	E6	
G1	Sangjuchal	31,948 ^{ab1)}	32,605 ^{ab}	33,912 ^c	27,150 ^d	35,326 ^b	26,792 ^f	31,289 ^c
G2	Boseogchal	33,115 ^a	32,305 ^b	39,129 ^a	34,049 ^a	38,133 ^a	37,158 ^a	35,649 ^a
G3	Hangangchal 1	32,669 ^{ab}	33,765 ^{1a}	33,037 ^c	31,753 ^b	31,842 ^c	30,579 ^d	32,293 ^d
G4	Hwaseonchal	31,277 ^b	32,343 ^b	35,832 ^b	30,291 ^c	35,502 ^b	31,754 ^c	32,834 ^c
G5	Seolhyangchal	32,014 ^{ab}	30,921 ^c	36,496 ^b	34,881 ^a	34,329 ^b	33,197 ^b	33,640 ^b
G6	Aranghangchal	28,662 ^c	29,693 ^c	29,838 ^d	30,306 ^c	32,417 ^c	28,944 ^c	29,977 ^f
	Mean	31614 ^{B2)}	31939 ^B	34707 ^A	31393 ^B	34591 ^A	31404 ^B	

*E-code: Environment code (E1: Cheolweon 2014, E2: Cheolweon 2015, E3: Suweon 2014, E4: Suweon 2015, E5: Milyang 2014, E6: Milyang 2015).

¹⁾Different lower case letters within the column indicate significant difference at p<0.05.

²⁾Different capital letters indicate significant differences in different environments at p<0.05.

Table 5. Combined ANOVA and AMMI analysis of variance for hardness of six genotypes in six environments.

Source	df	SS	% of G-E SS	MS	F	% of G X E interaction SS
Total	178	1547319137	100.0			
Treatment	35	1398990452	90.4			
Environment (E)	5	378424759	24.5	75684952	73.8**	
Genotype (G)	5	573854599	37.1	114770920	111.9**	
E × G	25	446711094	28.9	17868444	17.4**	
IPC1	9	254768758	16.5	28307640	30.09**	57.4
IPC2	7	136653627	8.8	19521947	20.75**	30.8
Residuals	9	52707231	3.4	12967792		
Error	143	146677155	9.5	1025714		

**Significant at P < 0.01

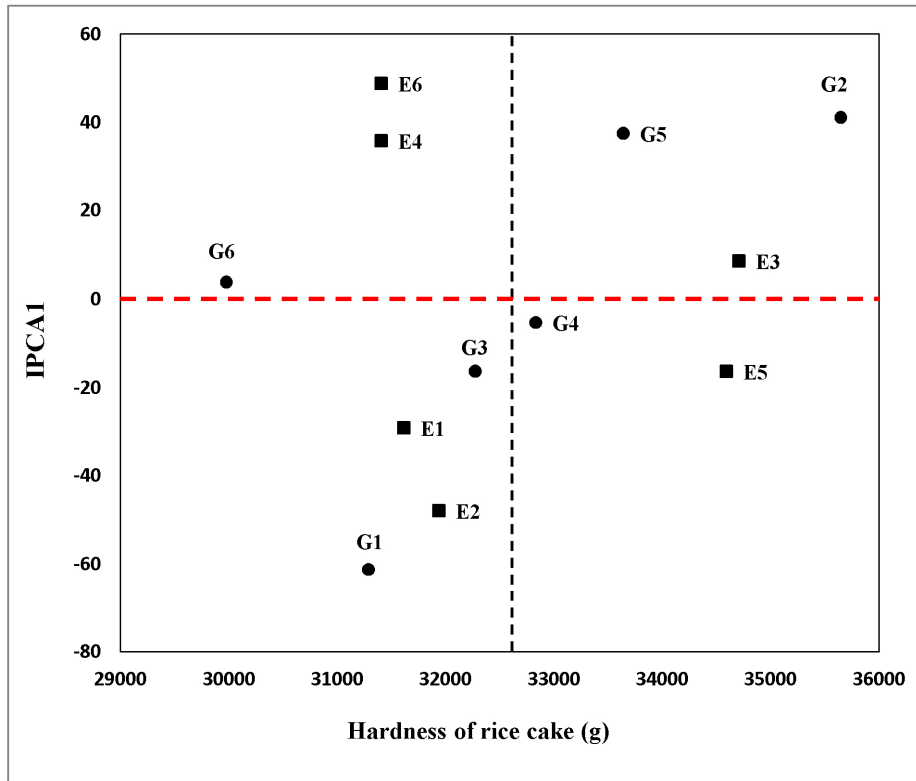


Fig. 2. AMMI biplot of the first interaction principal component axis (IPCA-1) versus the mean hardness of the rice cakes using six genotypes in the six environments.

*E-code: Environment code (E1: Cheolweon 2014, E2: Cheolweon 2015, E3: Suweon 2014, E4: Suweon 2015, E5: Milyang 2014, E6: Milyang 2015). The name of the code shows the genotype in Table 1 and environment in Table 2.

biplot 분석은 유전자와 환경의 상호작용효과 2개를 Y축에 동시에 나타내고, 대상 형질(본 연구에서는 찰떡의 경도)의 절대값을 X축에 표현해 주기 때문에 환경에 적합한 품종을 선발하는데 장점이 있다. AMMI 1 biplot에서 IPCA1 값이 0에 가까울수록 G×E 상호작용 효과가 낮아, 유전자(품종)의 안정성이 높다고 알려져 있다(Misra *et al.*, 2009). Fig. 2에서 환경조건인 E3 (수원, 2014년, IPCA1: 8.60) 및 E5 (밀양, 2014년, IPCA: -16.26)는 다른 환경조건보다 G×E 상호작용 효과가 낮았다. 따라서 E3와 E5 환경조건은 찰기에 대한 환경의 영향이 적었다. 유전자 효과에서 아랑향찰(G6, IPCA1: 3.85) 및 화선찰(G4, IPCA: -5.24)는 다른 품종보다 IPCA1 값이 낮아 환경에 대한 상호작용 효과는 낮았고, 유전자 효과가 높은 품종임을 알 수 있었다. 반면, 상주찰(G1, IPCA1: -61.23)은 IPCA1 값이 가장 높았고, 다음 순위는 보석찰(G2, IPCA1: 41.21)이었다. 이들 품종들은 환경에 의한 영향을 크게 받는 품종이었다. 따라서 이들 품종들은 환경 특이적 특성을 나타낸다고 할 수 있다.

이상의 결과 찰떡을 제조한 후에 찰기가 오래 유지되는

것이 찰떡에 적합한 찰벼 품종이다. 본 연구에서 6가지 환경조건과 6종 찰벼 품종을 시험한 결과, 환경에 의한 영향이 적고 유전적으로 안정성이 가장 높은 즉, 다양한 환경조건에서 찰기가 오래 유지되는 품종은 아랑향찰(G6, IPCA1: 3.85, 경도: 29,977 g)이었다. 반면 상주찰(G1, IPCA1: -61.23, 경도: 31,289 g)은 IPCA1 값이 가장 높아 환경에 의한 영향을 가장 많이 받는 것으로 나타났다.

그 동안 쌀 수량성, 재배 안정성 등을 고려한 중북부지역인 철원은 조생종 품종을, 중부지역인 수원, 중생종 품종을, 남부지역인 밀양은 중만생종 품종을 적합한 품종으로 선정하여 장려품종으로 선정하여왔다. 본 연구에서는 찰벼의 찰떡 제조 후에 저장기간에 따른 찰기에 대한 품종의 유전적 효과와 환경의 상호작용 분석에 근거한 지역에 적합한 품종 선정 결과, 철원에는 조생종인 상주찰 품종이 적합한 반면, 수원과 밀양에서는 적응성이 가장 낮아 기존의 수량성 등에 근거한 지역 장려품종 선정과 동일한 결과였다. 반면 수원은 중만생종인 아랑향찰 품종보다는 화선찰 및 한강찰 1호 품종이, 밀양은 중만생종인 아랑향찰 품종이 중

생종보다 더 적합할 것으로 예상되었다. 그러나 2015년 수원(E4)과 밀양(E6)에서 중만생종인 아랑향찰 품종이, 2014년 수원(E3) 및 밀양(E5)에서는 중생종인 한강찰 1호와 중생종인 화선찰 품종이 더 적합한 품종으로 나타났다. 이러한 결과는 기존의 수량 등에 근거한 장려품종 선정 결과와는 차이가 있었다. 이러한 차이는 표 1의 환경조건(E1~E6)에 대한 기상조건 중에서 강수량, 평균기온 및 최고기온이 지역 간(수원과 밀양) 차이보다는 오히려 연차 간(2014년과 2015년) 차이가 더 컸다. 2015년 수원의 기상조건은 2014년 수원보다는 2015년 밀양의 기상조건과 더 비슷하게 찰벼의 찰기에 영향을 주었고, 또한 2014년 수원의 기상조건은 2015년 기상조건 보다는 2014년 밀양의 기상조건과 더 비슷하게 찰기에 영향을 준 것에 기인된 결과로 고찰되었다.

이상의 본 시험의 결과 찰벼 품종을 이용한 찰떡의 찰기는 밥쌀용 품종이 지역에 따라 밥맛의 차이와 같이 찰기 또한 지역에 따라 달라짐을 보여주는 결과이다. 따라서 찰벼의 품종 육성 단계에서 지역별 찰쌀 수량, 병해충 등 재배 안정성 뿐만 아니라 찰벼의 이용 목적인 찰기에 대한 안정성도 검토가 필요할 것이다. 더불어 밥쌀용 품종의 식미를 높이기 위한 적합한 환경조건에 대한 선행 연구를 참고하여 찰벼의 찰기를 높일 수 있는 환경조건에 대한 연구도 수행되어야 할 것이다.

적 요

본 연구의 목적은 찰벼의 찰기에 대한 유전적 효과와 환경적 변이에 대한 기초자료를 제공하기 위해 수행하였다. 이를 위해 6개 환경 조건에서 6종 찰벼 품종을 이용하여 찰기에 대한 유전자와 환경의 (Genotype-by-Environment, G×E) 상호작용 분석을 하였다.

AMMI 분석모델에 의한 환경(재배지역, E), 유전자(품종, G), 유전자와 환경 상호 작용(G×E) 효과 모두에서 고도의 유의성이 있었다($P < 0.001$). 찰기에 대한 전체 변이중에서 환경효과는 24.5%, 유전적 효과는 37.1%, 상호작용 효과는 28.9%이었다. 유전자와 환경의 상호작용 분석에서 아랑향찰(G6, IPCA1: 3.85) 및 화선찰(G4, IPCA: -5.24)는 다른 품종보다 IPCA1 값이 낮아 환경에 대한 상호작용 효과가 낮았고, 유전자 효과가 높은 품종들이었다. 반면, 상주찰(G1, IPCA1: -61.23) 및 보석찰(G2, IPCA1: 41.21)은 IPCA1 값이 높아 환경의 효과에 의해 영향을 크게 받는 품종이었다. 따라서 이들 품종들은 환경 특이적 특성을 나타낸다고 할 수 있다.

이상의 본 시험의 결과 찰벼 품종을 이용한 찰떡의 찰기

는 지역에 따라 달라짐을 보여주는 결과이다. 따라서 찰벼의 품종 육성 단계에서 지역별 찰쌀 수량, 병해충 등 재배 안정성 뿐만 아니라 찰벼의 이용목적인 찰기에 대한 안정성도 검토가 필요할 것이다. 더불어 밥쌀용 품종의 식미를 높이기 위한 적합한 환경조건에 대한 선행 연구를 참고하여 찰벼의 찰기를 높일 수 있는 환경조건에 대한 연구가 수행되어야 할 것으로 사료된다.

사 사

본 연구는 농촌진흥청 기관과유사업(과제번호: PJ01013202)의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

인용문헌(REFERENCES)

- Abakemal, D., H. Shimelis, and J. Derera. 2016. Genotype-by-environment interaction and yield stability of quality protein maize hybrids developed from tropical high land adapted inbred lines. *Euphytica* 209 : 7570-769.
- Balestre, M., R. Pinho, J. Soouza, and R. Oliverira. 2009. Genotypic stability and adaptability in tropical maize based on AMMI and GGE biplot analysis. *Genet. Mol. Res.* 8 : 1311-1322.
- Choi, H. C. 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.
- Choi, K. J., T. S. Park, C. K. Lee, J. T. Kim, J. H. Kim, K. Y. Ha, W. H. Yang, C. K. Lee, K. S. Kwak, H. K. Park, J. K. Nam, J. I. Kim, G. J. Han, Y. S. Cho, Y. H. Park, S. W. Han, J. R. Kim, S. Y. Lee, H. G. Choi, S. H. Cho, H. G. Park, D. J. Ahn, W. K. Joung, S. I. Han, S. Y. Kim, K. C. Jang, S. H. Oh, W. D. Seo, J. E. Ra, J. Y. Kim, and H. W. Kang. 2011. Effect of temperature during grain filling stage on grain quality and taste of cooked rice in mid-late maturing rice varieties. *Korean J. Crop Sci.* 56 : 404-412.
- Chun, A., J. H. Lee, J. S. Lee, M. R. Yoon, J. Kwak, M. J. Kim, and C. K. Lee. 2016. Variation on appearance and cooking characteristics of milled waxy rice with different moisture contents. *J. Korean Soc. Int. Agric.* 28 : 479-484.
- Chung, H. J., H. S. Lim, and S. T. Lim. 2006. Effect of partial gelatinization and retrogradation on the enzymatic digestion of waxy rice starch. *J. Cereal Sci.* 43 : 353-359.
- Gauch, H. G. and R. W. Zobel. 1996. AMMI analyses of yield trials. In: Kang MS, Gauch HG (eds) *Genotype by environment interaction*. CRC Press. Boca Raton. pp. 85-122.
- International Rice Research Institute. PBTtools. 2017. <http://bbi.irri.org/products>.
- Jeong, E. G., C. K. Lee, Y. H. Choi, J. T. Kim, S. Kim, and

- J. R. Son. 2008. Identification of chalkiness development of milled waxy rice grains with harvest times and the moisture contents. *Korean J. Crop Sci.* 53 : 58-63.
- Kempton. R. A. 1984. The use of the biplots in interpreting variety by environment interactions. *J. Agric. Sci.* 103 : 123-135.
- Kim, D. S., J. Song, J. I. Lee, A. Chun, E. G. Jeong, J. T. Kim, O. S. Hur, S. L. Kim, and S. J. Suh. 2009. Rice quality characterization according to damaged low temperature in rice plant. *Korean J. Crop Sci.* 54 : 452-457.
- Lee, J. I., J. K. Kim, J. C. Shin, E. H. Kim, M. H. Lee, and Y. J. Oh. 1996. Effects of ripening temperature on quality appearance and chemical quality characteristics of rice grain. *J. Agric. Sci.* 38 : 1-9.
- Lee, J. S., J. H. Lee, M. R. Yoon, J. Kwak, Y. J. Mo, A. Chun, and C. K. Kim. 2013. Palatability and physicochemical properties in 2001 yield increased by 10% than normal level in 2000. *Korean J. Crop Sci.* 58 : 292-300.
- Misra, R. C., S. Das, and M. C. Patnaik. 2009. AMMI model analysis of stability and adaptability of late duration finger millet (*Eleusine coracana*) genotypes. *World Appl. Sci. J.* 6 : 1650-1654.
- National Institute of Crop Science. 2003. Evaluate the quality and taste of rice. Rural Development Administration.
- Romagosa, I. and P. N. Fox. 1993. Genotype \times environment interaction and adaptation. In : Hayward, M. D., Bosemark, N. O., Romagosa, I. (Eds.), *Plant Breeding : Principles and Prospects*. Chapman & Hall. London. pp. 373-390.
- Rozgard, F. and E. Farshadfar. 2014. Locating QTLs controlling genotypic stability in Rye using AMMI model and AMMI based stability statistics. *J. Biodivers & Environ. Sci.* 4 : 85-93.
- Rural Development Administration. 2012. Standard for research, survey and analysis of agricultural science technology. Suwon, Korea.
- Yang, C. I., S. J. Yang, Y. P. Jeoung, H. C. Choi, and Y. B. Shin. 2001. Genotype \times Environment interaction of rice Yield in Multi-location Trials. *Korean J. Crop Sci.* 46 : 453-458.
- Yoon, M. R., J. S. Lee, J. Kwak, J. H. Lee, J. B. Chun, C. I. Yang, J. H. Cho, M. J. Kim, C. K. Lee, B. K. Kim, and W. H. Kim. 2015. Starch and pasting characteristics in relation to stickiness of rice cake using glutinous rice cultivars. *Korean J. Breed. Sci.* 47 : 199-208.
- Zhong, L. J., F. M. Cheng, X. Wen, Z. X. Sun, and G. P. Zhang. 2005. The deterioration of eating and cooking quality caused by high temperature during grain filling in early-season *indica* rice cultivars. *J. Agronomy & Crop Sci.* 191 : 218-225.
- Zobel, R. W., J. W. Madison, and H. G. Gauch. 1988. Statistical analysis of a yield trial. *Agron. J.* 80 : 388-393.