

## 유전형과 재배환경의 상호작용에 따른 감자 수량성과 글리코알카로이드 함량 변화

김수정<sup>1\*</sup> · 손황배<sup>1\*</sup> · 이유영<sup>2</sup> · 박민우<sup>3</sup> · 장동철<sup>1</sup> · 권오근<sup>4</sup> · 박영은<sup>1</sup> · 홍수영<sup>1</sup> · 서종택<sup>1</sup> · 남정환<sup>1</sup> · 정진철<sup>5</sup> · 구본철<sup>1</sup> · 김윤희<sup>1,†</sup>

### Genotype x Environment Interaction and Stability Analysis for Potato Performance and Glycoalkaloid Content in Korea

Su Jeong Kim<sup>1\*</sup>, Hwang Bae Sohn<sup>1\*</sup>, Yu Young Lee<sup>2</sup>, Min Woo Park<sup>3</sup>, Dong Chil Chang<sup>1</sup>, Oh Keun Kwon<sup>4</sup>, Young Eun Park<sup>1</sup>, Su Young Hong<sup>1</sup>, Jong Taek Suh<sup>1</sup>, Jung Hwan Nam<sup>1</sup>, Jin Cheol Jeong<sup>5</sup>, Bon Cheol Koo<sup>1</sup>, and Yul Ho Kim<sup>1,†</sup>

**ABSTRACT** The potato tuber is known as a rich source of essential nutrients, used throughout the world. Although potato-breeding programs share some priorities, the major objective is to increase the genetic potential for yield through breeding or to eliminate hazards that reduce yield. Glycoalkaloids, which are considered a serious hazard to human health, accumulate naturally in potatoes during growth, harvesting, transportation, and storage. Here, we used the AMMI (additive main effects and multiplicative interaction) and GGE (Genotype main effect and genotype by environment interaction) biplot model, to evaluate tuber yield stability and glycoalkaloid content in six potato cultivars across three locations during 2012/2013. The environment on tuber yield had the greatest effect and accounted for 33.0% of the total sum squares; genotypes accounted for 3.8% and G×E interaction accounted for 11.1% which is the next highest contribution. Conversely, the genotype on glycoalkaloid had the greatest effect and accounted for 82.4% of the total sum squares, whereas environment and G×E effects on this trait accounted for only 0.4% and 3.7%, respectively. Furthermore, potato genotype ‘Superior’, which covers most of the cultivated area, exhibited high yield performance with stability. ‘Goun’, which showed lower glycoalkaloid content, was the most suitable and desirable genotype. Results showed that, while tuber yield was more affected by the environment, glycoalkaloid content was more dependent on genotype. Further, the use of the AMMI and GGE biplot model generated more interactive visuals, facilitated the identification of superior genotypes, and suggested decisions on a variety of recommendations for specific environments.

**Keywords** : AMMI, GGE, glycoalkaloid, interaction, potato, yield

**감자**(*Solanum tuberosum* L.)는 옥수수, 쌀, 밀과 함께 세계 4대 식량작물 중 하나로 전세계적으로 150여개국에서 재배되며(1.9천만 ha), 연간 3.8억톤이 생산되는 중요작물이다(FAOSTAT, 2017; Kim *et al.*, 2017). 우리나라에서는

봄재배(3-6월), 여름재배(4-9월), 가을재배(8-11월), 겨울시 설재배(12월-다음해 4월)로 연간 59만톤을 생산하고 있다(RDA, 2016).

감자는 비타민 C를 비롯한 B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub>, 니아신 등이 풍부하여

<sup>1</sup>농촌진흥청 국립식량과학원 고령지농업연구소 (Highland Agriculture Research Institute, National Institute of Crop Science, Rural Development Administration, Pyeongchang 25342, Korea)

<sup>2</sup>농촌진흥청 국립식량과학원 수확후이용과 (Crop Postharvest Technology Research Division, Department of Research Central Area Crop Science, National Institute of Crop Science, Rural Development Administration, Suwon 16429, Korea)

<sup>3</sup>농업회사법인 현대종묘(주) (Hyundai Seed Co. Ltd, Yeosu 12660, Korea)

<sup>4</sup>농촌진흥청 연구정책국 연구운영과 (Research Administration Division, Research Policy Bureau, Rural Development Administration, Jeonju 54875, Korea)

<sup>5</sup>농촌진흥청 국립식량과학원 골든시드프로젝트(GSP) 사업단 (Golden Seed Project, National Institute of Crop Science, Rural Development Administration, Wanju 55365, Korea)

\*These authors contributed equally to this work

†Corresponding author: Yul Ho Kim; (Phone) +82-33-330-1840; (E-mail) kimyuh77@korea.kr

<Received 21 August, 2017; Revised 15 November, 2017; Accepted 27 November, 2017>

영양학적 가치가 높을 뿐만 아니라, 칼륨이나 식이섬유가 많아 건강 기능성 측면에서도 우수하다(Choi *et al.* 2008; RDA, 2014). 그러나, 감자는 사람에게 독성이 있는 글리코알칼로이드(Potato glycoalkaloid, PGA) 성분을 함유하고 있어 하루 섭취량을 20 mg/100gFW 이하로 권장하고 있다(FAO/WHO, 1999, Machado *et al.*, 2007).

감자는 온도, 강수량, 일조시수 등의 환경적인 요인과 품종 등 유전적 요인에 따라 수량과 PGA 함량에서 다양한 변이를 보인다(Morris & Petermann, 1985; Grunenfelder *et al.*, 2006; Kim *et al.*, 2016). 따라서, 안정적인 수량성을 확보하면서 PGA 함량이 낮은 감자를 생산하기 위해서는 감자 수량성과 PGA 함량에 대한 환경, 유전적 효과 및 상호작용 구명을 통해 최적의 품종과 재배환경을 선정하는 것이 중요하다.

작물의 농업적 특성은 재배환경, 품종, 그리고 투입된 기술의 상호작용으로 나타난 최종 결과라 할 수 있다. 이러한 이유로 각각의 요인이 어떻게 얼마만큼 농업적 특성에 영향을 미쳤는지를 정확하게 분석하는 것이 매우 중요하다(Nam *et al.*, 2004). 환경변화에 따라 작물의 농업적 형질이 달라지는 양상을 유전형(Genotype)과 환경(Environment)의 상호작용(Genotype × Environment Interaction, G×E)이라고 한다(Nabavi *et al.*, 2006; Yan & Hunt, 1998). G×E는 환경변화에 대한 유전형의 다양한 표현형 반응으로 정의되며(Vargas *et al.*, 2001), 환경 요인(재배지역과 연차간 변이)에 대한 유전형의 변이 또는 적응성을 평가할 수 있다(Tolessa *et al.*, 2013).

G×E를 표현하는 통계 분석방법인 ‘상가적인 주 효과와 다양한 상호작용(Additive Main Effects and Multiplicative Interaction, AMMI)’ 모델은 다양한 환경조건에서 효과적으로 사용 가능하다(Zobel *et al.*, 1988; Yan *et al.*, 2000; Ezatollah *et al.*, 2013; Park, 2017). Gauch에 의해 1988년 처음 소개된 AMMI 모델은 수량성 등 양적 형질 평가에 주로 사용된다(Gauch, 1992). 품종과 재배환경의 상호작용 효과를 대부분 설명할 수 있고, 구성요소의 상가적인 효과를 주성분 분석(Principal component analysis, PCA)을 통해 명확하게 구분해 낼 수 있다는 장점이 있다(Zobel *et al.*, 1988; Reza *et al.*, 2007). 또한, 환경 및 연차간의 수량 변동이 심한 경우에도 품종의 적응성 평가를 통해 최적의 품종 선발에 사용할 수 있다(Yan & Rajcan, 2002; Pourdad & Moghaddam, 2013; Fehr, 1987). 유전형 주요 효과와 유전자와 환경 상호작용(Genotype main effect and genotype by environment interaction, GGE) 분석은 상호작용을 행렬도(biplot)로 쉽게 표현할 수 있어 다양한 환경조건에서 안

정적인 유전형을 선발하는데 효과적이다(Yan & Rajcan, 2002; Pourdad & Moghaddam, 2013; Ezatollah *et al.*, 2013). 게다가 GGE biplot 분석은 수량의 안정성을 평가할 수 있고, 메가 환경(mega-environment)에서 적합한 품종을 선발할 수 있다(Shim *et al.*, 2015).

이러한 장점이 있는 AMMI 모델과 GGE biplot은 벼(Yang *et al.*, 2001), 콩(Sneller *et al.*, 1997), 참깨(Shim *et al.*, 2015), 옥수수(Rincon *et al.*, 1997), 토마토(Roselló *et al.*, 2010; Park, 2017) 등 많은 작물에서 그 유용성이 증명되었으나, 현재까지 감자 품종을 대상으로 재배환경에 따른 유전형의 수량 및 PGA 함량 변이에 대한 평가 사례는 전무한 실정이다. 따라서, 본 연구는 용도가 다른 감자 주요 6품종을 대상으로 해발 고도별 재배환경에 따른 수량성과 PGA 함량을 조사하고, AMMI 모델과 GGE biplot을 적용하여 유전형과 재배환경간의 상호작용을 분석함으로써 농업환경에 따른 최적의 품종을 제시하고자 수행하였다.







## 재료 및 방법

### 실험재료 및 환경조건

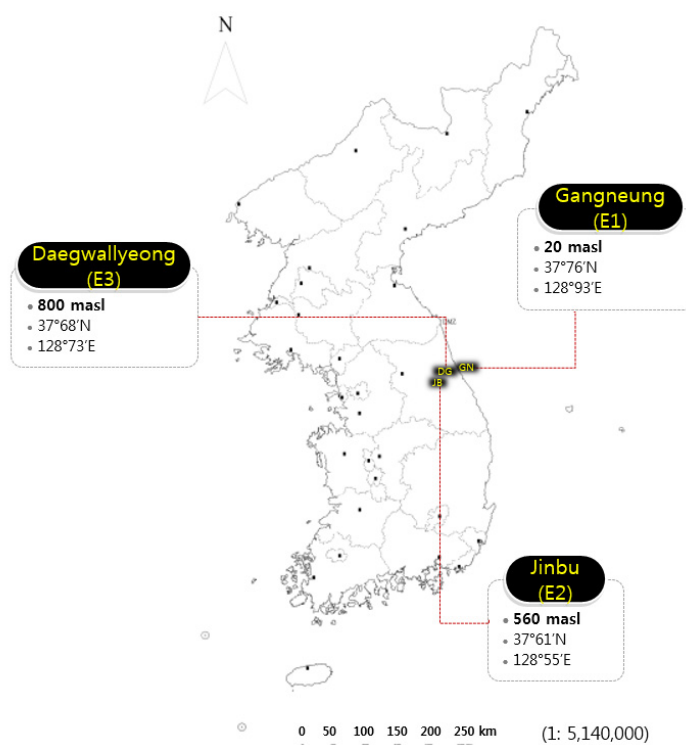
실험재료로 우리나라 주요 감자 품종인 수미(Superior, SP), 대서(Atlantic, AT), 하령(Haryeong, HR), 고운(Goun, GU), 홍영(Hongyoung, HY), 자영(Jayoung, JY) 등 총 6품종을 사용하였다(Table 1). 재배시험은 해발고도가 다른 강릉(E1, 강원도 강릉시 두산동, 북위 37°76', 동경 128°93', 20 m), 진부(E2, 강원도 평창군 진부면, 북위 37°61', 동경 128°55', 560 m), 대관령(E3, 강원도 평창군 대관령면, 북위 37°68', 동경 128°73', 해발고도 800 m)에서 2012년부터 2013년까지 2년간 수행하였다(Fig. 1). 감자는 표준재배법에 준하여 수행되었고(RDA, 2016), 10a를 기준으로 퇴비를 1톤, 비료(N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O)를 10-8.8-13 kg 살포하였다. 잡초방지를 위해 흑색 플라스틱필름 멀칭을 하였고, 재식거리는 80 × 25 cm로 하였다. 강릉(E1)은 봄재배로 3월 21일에 파종하여 7월 11일에 수확하였고, 진부(E2)는 여름재배로 4월 15일 파종하여 8월 5일 수확하였으며, 대관령(E3)은 여름재배로 5월 14일에 파종하여 9월 3일에 수확하여 수량을 조사하고, 10a당 kg으로 환산하여 총수량으로 표기하였다.

감자 재배기간을 중심으로 2012년부터 2013년까지 기상청의 자료를 수집하였으며(NCDSS, 2016), 기상관측은 종관 기상관측장비(Automated Synoptic Observing System, ASOS)와 자동기상관측장비(Automatic weather system, AWS)를 활용하였다(Table 2). 재배기간 중 평균온도는 대관령(E3)이

**Table 1.** Characteristics of the six potato genotypes evaluated in this study.

Genotype (Abb.)	Pedigree	Maturity	Preferential use	Tuber shape <sup>2</sup>
Superior (SP)	B96-56 × M59-44	Early	Table food, Potato chip	
Atlantic (AT)	B5141-6 × Wauseon	Medium	Potato chip	
Haryoung (HR)	Atlantic × Superior	Early-medium	Table food	
Goun (GU)	Lemhi Russet × Chuback	Early-medium	Potato chip	
Hongyoung (HY)	Atlantic × AG34314	Medium	Table food, Potato chip	
Jayoung (JY)	Atlantic × AG34314	Late	Table food, Potato chip	

<sup>2</sup>Kim, 2016.



**Fig. 1.** Test environments for potato cultivation in Korea. Environments are indicated within black dots by abbreviation in yellow.

**Table 2.** Meteorological data from the three environments where potato was cultivated in 2012 and 2013.

Region (masl) <sup>z</sup>	Year	Maximum temp. (°C)	Minimum temp. (°C)	Average temp. (°C)	Accumulated precipitation (mm)	Accumulated precipitation (days)	Planting period <sup>x</sup>	Harvesting period <sup>y</sup>
E1 (20 m)	2012	20.7	12.2	16.3	345.2	30.0	Mar. 21.	Jul. 11.
	2013	20.9	11.7	16.2	260.3	47.0		
	M <sup>y</sup>	20.8	11.9	16.3	302.8	38.5		
E2 (560 m)	2012	24.1	12.6	18.1	445.0	27.0	Apr. 15.	Aug. 5.
	2013	23.6	12.7	17.6	832.5	48.0		
	M	23.9	12.7	17.9	638.8	37.5		
E3 (800 m)	2012	22.6	13.6	17.7	856.8	46.0	May 14.	Sep. 3.
	2013	23.2	14.2	18.4	661.1	59.0		
	M	22.9	13.9	18.0	759.0	52.5		

All data values obtained from nearest Korea Meteorological Administration of Database. (website: <http://www.kma.go.kr>).

<sup>z</sup>Region (masl) represented abbreviation of region and altitude in meters above sea level (Fig. 1. Reference).

<sup>y</sup>Mean represented 2012-2013 climate average for cultivation period, including temperature and precipitation.

<sup>x</sup>Planting period represented 2012-2013 after last frost date.

<sup>y</sup>Harvesting period represented 2012-2013 before first frost date.

18°C로 가장 높았으며, 최고온도는 진부(E2)가 높았다. 또한 강수량과 강우일수는 강릉(E1)이 다른 2지역보다 적었다.

### PGA 함량 분석

감자 PGA 분석은 Friedman (2006)과 Kim 등(2016)의 방법을 일부 수정하여 수행하였다. 건전한 감자 괴경을 선별한 후 껍질을 포함하여 동결건조기(EYELA FDU-2100, EYELA, Eyela corp., Tokyo, Japan)에서 5일 동안 건조한 다음 분쇄하였다. 동결건조된 분말 1 g을 코닝튜브에 넣고, 5% 아세트산(acetic acid) 20 mL를 첨가하여, 실온에서 2 시간 동안 교반기(300 rpm)로 혼합한 후 여과지(Whatman no. 42, Whatman International, Maidston, UK)로 여과하였다. 유리 시험관에 여과액 3 mL을 담고, 수산화암모늄용액(ammonium hydroxide solution) 1 mL를 첨가하였다. 추출액과 수산화암모늄 용액을 잘 혼합하여 예열해 둔 70°C 항온수조에서 50분 동안 반응시킨 다음 냉장고(4°C)에서 하루 밤 정치시켰다. 다음날 원심분리기(Centrifuge 5417R, Eppendorf of North America, Westbury, NY, U.S.A.)를 이용하여 원심분리(10,000 rpm, 10 min, 4°C)하여 상등액을 버린 후 펠렛(pellet)에 100% 메탄올(methanol) 1 mL을 첨가한 후 원심분리기를 이용하여 동일조건에서 원심분리하여 상등액을 취하였다. 최종 추출물은 시린지 필터(0.45 µm PVDF syringe filter, PALL, USA and Canada)로 여과하여 HPLC (Waters 2695 Separations Module, Waters Co., Milford, MA, USA)를 이용하여 분석하였다. 검출기(UV 2996 Photodiode Array Detector, Waters Co., Milford, MA, USA)의 파장은 208 nm로 하였다. 분석에 사용된 컬럼

(Inertsil NH<sub>2</sub> 4.0×250 mm, particle size 5 µm, GL Science, Tokyo, Japan) 온도는 20°C로 설정하였다. 이동상(mobile phase)으로 acetonitrile과 20 mM KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>을 80:20(v/v)으로 혼합하여 사용하였고, 유속은 0.7 mL/min, 주입부피는 20 µL였다. 표준물질로 솔라닌(α-solanine, Sigma-Aldrich, ST. Louis, Mo, USA)과 차코닌(α-chaconine, Extrasynthese, Genay Cedex, France)을 각각 메탄올(100%)에 용해하여 검량선 작성에 활용하였고, 총 PGA 함량은 두 표준물질을 합산하였다.

### AMMI와 GGE biplot을 이용한 통계분석

모든 실험은 3반복으로 수행하였으며, 실험치는 평균값(Mean)과 표준편차(Standard Deviation, SD)로 표시하였다. 조사된 수량과 분석된 PGA 함량을 평가하기 위해 ‘R’ 분석(R studio i386 3.3.2.)을 하였으며, AMMI와 GGE biplot 분석을 위해 ‘agricolae’와 ‘gge’ 라이브러리(library)를 호출하여 수량 및 PGA 성분의 G×E 상호작용을 시각적으로 표현하였다. AMMI 모델은 다음과 같이 표현할 수 있다 (Yan & Rajcan, 2002; Park *et al.*, 2016).

$$\frac{a_{ij} \times \beta_j}{\delta_j} = \sum_{n=1}^2 \lambda_n \xi_{in} \times \eta_{jn} + \epsilon_{ij} = \sum_{n=1}^2 \xi_{in}^{\ddagger} \times \eta_{jn}^{\ddagger} + \epsilon_{ij}$$

여기서  $\alpha_{ij}$ 는 수량 또는 PGA 함량과 같은 형질(trait) j에 대한 유전형(genotype) i의 평균값,  $\beta_j$ 는 형질 j에 대한 모든 유전형들의 평균값,  $\delta_j$ 는 유전형 평균값들 간 형질 j의 표준편차,  $\lambda_n$ 은 주성분에 대한 특이치(PCn),  $\xi_{in}$ 은 유전형

i에 대한 PCn 점수(score),  $\eta_{jm}$ 은 형질 j에 대한 PCn점수(score),  $\epsilon_{ij}$ 는 형질 j에서 유전형 i와 관련된 잔차(residual effect)이다. 유전형  $\xi_{im}$ 과 형질  $\eta_{jm}$ 에 대한 특이벡터(singular vector)에 속하는 특이치(singular value)  $\lambda_n$ 은 유전형과 형질 점수 사이에서 형질을 중심으로 스케일링 하여 만들었다. 농업형질에 대한 유전형(Genotype by Trait) bi plot은 각각의 유전형과 형질에 대한 주성분 분석(Principal Component Analysis, PCA) 값인 PCA1과 PCA2의 점수로 생성되었다 (Yan & Rajcan, 2002; Park *et al.*, 2016).

### 결과 및 고찰

#### 감자 품종의 환경에 따른 수량성

감자 6품종을 대상으로 해발고도별 재배환경이 다른 3지역에서 2년간 괴경 수량성을 평가한 결과는 다음과 같다 (Table 3). 감자 품종 중 수미(SP)와 하령(HR)의 수량성은 각각 3,348 kg/10a, 3,340 kg/10a로 많았으나, 홍영(HY)과 자영(JY)의 경우 각각 2,910 kg/10a, 3,011 kg/10a로 적었다. 재배환경별 품종의 수량성 평가 결과, 강릉(E1)에서 대서(AT), 진부(E2)에서 고운(GU), 대관령(E3)에서 하령(HR) 품종이 각각 3,761, 4,236, 3,227 kg/10a로 가장 높았다. 환경과 G×E 상호작용의 효과가 낮을 경우 SD와 CV값이 작아진다고 하였는데(Shim *et al.*, 2015), 본 연구에서는 품종 중 자영(JY)의 표준편차(Standard Deviation, SD)와 변이계수(coefficient variation, CV)가 431과 0.14로 가장 작아 재배환경에 따라 수량의 영향이 적었다.

재배환경별 수량성은 진부(E2) 지역에서 3,765 kg/10a로 가장 많았으나, 대관령(E3) 지역에서 2,491 kg/10a로 가장 적었다. 강릉(E1) 지역의 SD와 CV값은 각각 357, 0.11로 작아 환경과 G×E 상호작용의 효과가 다른 2지역에 비해 낮았다.

#### 괴경 수량성에 대한 유전형(G)과 환경(E)의 상호작용

해발고도별 재배환경이 품종의 수량성에 미치는 영향을 구명하기 위해 분산분석과 AMMI 모델 분석을 수행하였다 (Table 4). 괴경 수량에 대한 분산분석 결과, 환경과 G×E 상호작용에는 고도의 유의차( $p<0.01$ )를 보였다. 이처럼 재배환경에 따른 수량에서 현저한 차이가 인정되어 AMMI 분석을 통해 G×E 상호작용 효과를 구명하였다.

AMMI 분석요소 중 재배환경의 제곱합(Sum of Squares, SS)이 33.0%로 수량성에 가장 큰 영향을 미쳤으며, 그 다음으로 G×E와 유전형이 각각 11.1%, 3.8%를 차지하였다. 환경에 대한 제곱합이 크다는 것은 재배환경이 수량에 미치는 영향이 크며, G×E 상호작용의 효과가 명확히 존재함을 의미한다(Fufa, 2013; Shim *et al.*, 2015). 우리나라 참깨 유전자원 10종을 8지역에서 적응성을 평가하였을 때 환경 효과가 60.5%를 차지하였고(Shim *et al.*, 2015), 에티오피아에서 완두 14종을 대상으로 8지역의 적응성을 평가한 연구에서도 환경 효과가 74.29%로 대부분을 차지하였다(Tolessa *et al.*, 2013). 또한, 에티오피아 3지역을 대상으로 감자 수량성에 미치는 환경요인을 평가하였을 때, 재배환경 효과가 51.9%로 가장 큰 것으로 나타나 본 연구와 유사하였다.

**Table 3.** Total tuber yield (kg·10a<sup>-1</sup>) of six potato genotypes across three environments during (2012-2013) main cropping season.

Genotype <sup>z</sup>	Environment <sup>y</sup>			Mean±S.D. <sup>v</sup>	C.V.
	E1	E2	E3		
SP	3,755	3,957	2,330	3,348±748	0.22
AT	<u>3,761</u> <sup>x</sup>	4,181	2,064	3,335±775	0.23
HR	3,266	3,526	<u>3,227</u>	3,340±738	0.22
GU	3,536	<u>4,236</u>	2,230	3,334±646	0.19
HY	2,928	3,272	2,530	2,910±711	0.24
JY	3,051	3,420	2,563	3,011±431	0.14
Mean	3,383	3,765	2,491	-	-
S.D.	357	412	406	-	-
C.V.	0.11	0.11	0.16	-	-

<sup>z</sup>SP, Superior; AT, Atlantic; HR, Haryoung; GU, Goun; HY, Hongyoung; JY, Jayoung.

<sup>y</sup>E1, Gangneung; E2, Jinbu; E3, Daegwallyeong.

<sup>x</sup>Values underlined are the highest yields in each test environment.

<sup>v</sup>Average data for the three environments considered (E1, E2, and E3) ± standard deviation.

**Table 4.** AMMI analysis of variance for total tuber yield (kg·10a<sup>-1</sup>) of six potato genotypes grown in three environments in 2012-2013.

Source of variation	df	SS	MS	F-value <sup>z</sup>	Explained (%) <sup>y</sup>
Genotype (G)	5	3,531,905	706,381	1.935 <sup>NS</sup>	3.8
Environment (E)	2	30,808,167	15,404,083	10.894 <sup>**</sup>	33.0
G x E	10	10,328,137	1,032,814	2.829 <sup>**</sup>	11.1
Rep(E)	15	21,210,115	1,414,008	3.873 <sup>***</sup>	7.1
Residuals	72	27,380,615	365,075		
Total	107	93,258,939			
AMMI PC1	6	9,966,207	1,661,035	4.550	96.5
AMMI PC2	4	361,930	90,482	0.250	3.5
Total		10,328,137			

Abbreviations: *df*, degree of freedom; SS, sum of squares; MS, mean sum of squares.

<sup>z</sup>Values for the variables in each factor: <sup>NS</sup>Non-significant, \*Significant at  $p < 0.05$ , \*\*Significant at  $p < 0.01$ , or \*\*\*Significant at  $p < 0.001$ .

<sup>y</sup>Values within brackets indicate the portion of the E, G and GXE SS with respect to total yield variation.

**Table 5.** Mean tuber yield, scores for AMMI and rank of six potato genotypes tested for 2 years in three environments in Korea.

Genotype <sup>z</sup>	Yield <sup>y</sup>		AMMI model <sup>x</sup>			
	kg/10a	rYSI	IPCA1	IPCA2	ASV	rASV
SP	3347.556	1	-9.660592	-10.3475414	51.73928	2
AT	3335.389	3	-18.708195	-2.5187211	98.20363	5
HR	3339.667	2	20.927442	-0.8188480	109.81989	6
GU	3333.778	4	-13.567052	11.3374427	72.09025	4
HY	2909.889	6	11.684995	0.8382961	61.32279	3
JY	3011.444	5	9.323402	1.5093717	48.94787	1

<sup>z</sup>SP, Superior; AT, Atlantic; HR, Haryoung; GU, Goun; HY, Hongyoung; JY, Jayoung.

<sup>y</sup>Yield, Total tuber production (kg/10a); rYSI, rank of yield stability index.

<sup>x</sup>AMMI model, Additive Main Effects and Multiplicative Interaction model, IPCA1, Interaction principal axes 1; IPCA2, Interaction principal axes 2; ASV, AMMI stability value; rASV, rank of AMMI stability value.

이러한 환경변이에는 재배지역의 온도, 강수량 등 다양한 요인이 관여한다고 하였다(Fufa, 2013).

G×E의 제곱합 크기도 유전형에 비해 2.92배 큰 것으로 분석되어 환경이 유전형 반응에 상당히 큰 영향을 미쳤음을 알 수 있었다. Tolessa *et al.* (2013)도 G×E 효과가 유전형보다 4배 높았는데, 재배환경의 변화에 따라 유전형의 반응양상이 매우 달라질 수 있다고 하였다. 또한, 환경에 따른 수량 변이가 심한 것은 특정한 환경조건에서 최고 또는 최저의 수량성을 나타냄으로 수량이 환경에 영향을 받는다고 하였다(Yan & Rajcan, 2002). 본 연구에서도, 고운(GU) 품종은 진부(E2)에서 4,236 kg/10a으로 높은 수량성을 보였으나, 대관령(E3)에서는 2,230 kg/10a으로 낮은 수량성을 나타내어 재배환경에 따라 큰 차이를 보였다.

각 유전형의 안정성 값 ASV (AMMI stability value)는 상호작용 주성분1(Interaction Principal Axis 1, IPCA1) 및

IPCA2 점수에 기초하여 계산되었다(Purchase 1997). ASV는 IPCA2 점수에 대한 IPCA1 점수의 2차원적 산점도를 바탕으로 좌표점에서 원점까지의 거리를 나타낸다. 네거티브(negative) 또는 포지티브(positive) 점수에 상관없이 IPCA 점수가 클수록 특정 환경에 대한 유전형의 변이가 심하고, IPCA 점수가 작을수록 모든 환경에서 유전형 변이가 적어 안정적이다.

감자 수량성에 대한 안정성은 유전형이 다양한 환경에 안정성을 순차적으로 나타내었다(Table 5). 따라서 유전형을 비교한 결과, 수량 순위(rYSI)는 수미(SP)가 가장 높았고, 다음으로 하령(HR), 대서(AT) 순위였다. 홍영(HY)은 rYSI가 가장 작아 수량이 가장 적었다는 것을 알 수 있었다.

농업형질 안정성 순위(rank of AMMI Stability value, rASV)는 자영(JY)이 가장 높았고, 다음으로 수미(SP), 홍영(HY) 순이었다. 하령(HR)은 rASV가 가장 낮았다. rASV가 높으

**Table 6.** Potato glycoalkaloid content (mg·100 g<sup>-1</sup>) in six potato genotypes across three environments during (2012-2013) main cropping season.

Genotypes <sup>z</sup>	Environment <sup>y</sup>									Mean±S.D. <sup>v</sup>		
	E1			E2			E3			CHA	SOL	PGA
	CHA	SOL	PGA	CHA	SOL	PGA	CHA	SOL	PGA			
SP	0.62	0.12	0.66	1.03	0.17	1.12	1.59	0.39	1.88	1.08±0.60	0.23±0.11	1.22±0.70
AT	0.37	0.12	0.43	0.69	0.12	0.76	0.63	0.13	0.70	0.56±0.23	0.13±0.01	0.63±0.25
HR	<u>4.47<sup>x</sup></u>	<u>2.33</u>	<u>6.53</u>	<u>3.88</u>	<u>1.83</u>	<u>5.39</u>	<u>3.43</u>	<u>1.81</u>	<u>5.31</u>	3.93±0.62	1.99±0.90	5.74±1.00
GU	0.57	0.15	0.67	0.65	0.14	0.73	0.87	0.22	1.03	0.70±0.24	0.17±0.08	0.81±0.28
HY	1.81	0.16	1.90	0.88	0.12	0.95	1.56	0.12	1.62	1.42±0.49	0.14±0.02	1.49±0.51
JY	2.17	0.90	3.01	2.05	0.58	2.57	1.70	0.47	2.10	1.97±0.80	0.65±0.27	2.56±0.97
Mean	1.67	0.63	2.20	1.53	0.50	1.92	1.63	0.52	2.11			
S.D.	1.55	0.88	2.34	1.26	0.68	1.84	0.98	0.65	1.65			
C.V	0.93	1.40	1.06	0.82	1.37	0.96	0.60	1.23	0.78			

<sup>z</sup>SP, Superior; AT, Atlantic; HR, Haryoung; GU, Goun; HY, Hongyoung; JY, Jayoung.

<sup>y</sup>E1, Gangnueng; E2, Jinbu; E3, Daegwallyeong; CHA, α-Chaconine; SOL, α-Solanine; PGA, potato glycoalkaloid.

<sup>x</sup>Values underlined represent the highest glycoalkaloid content in each test environment.

<sup>v</sup>Average data for three environments (E1, E2, and E3) ± standard deviation.

면 환경 전반에 걸쳐 광범위한 적응을 보여주어 안정적인 유전형을 의미한다. 반대로, rASV가 낮으면 환경과의 강력한 상호작용을 보여주어 재배환경에 따라 수량 변이가 심하여 매우 불안정한 유전형이다.

따라서, 수미(SP)는 rYSI가 1위로 수량이 가장 많으면서, rASV가 2위로 안정적인 유전형이었다. 하령(HR)은 rYSI가 2위로 수량이 비교적 많았지만, rASV가 6위로 가장 불안정한 유전형으로 나타났다. 자영(JY)은 rYSI가 5위로 수량이 적었지만, rASV가 1위로 가장 안정적인 유전형을 지닌 것으로 조사되었다.

### 감자 품종의 환경에 따른 PGA 함량 변이

감자 6품종을 대상으로 해발고도별 재배환경이 다른 3지역에서 PGA 함량을 분석한 결과, 하령(HR)이 평균 α-chaconine, α-solanine 및 PGA 함량에서 각각 3.93, 1.99, 5.74 mg/100g으로 가장 높았고, 표준편차도 커서 환경변화에 따라 함량 변이가 컸다(Table 6). 대서(AT)는 α-chaconine, α-solanine 및 PGA 함량이 각각 0.56, 0.13, 0.63 mg/100g으로 가장 낮았으며, 표준편차도 가장 작아 환경변화에 대해 함량 변이가 크지 않았다. 품종내에서 표준편차값이 높은 것은 1년차와 2년차의 함량 차이에서 기인한 것으로 판단되었다. Kim *et al.* (2014)은 하령(HR)과 자영(JY)에서 PGA 함량이 높았는데, 본 연구에서도 같은 결과를 나타내었다. 또한, PGA의 성분 중 α-chaconine이 α-solanine 함량보다 2-7배 더

높았으며(Friedman, 2006; Bejarano *et al.*, 2000; Friedman & McDonald, 1997), 본 연구에서도 같은 경향이였다.

PGA 함량은 품종 고유의 유전적 요인과 빛, 온도, 상처, 등 다양한 환경요인에 의해 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다(Grunenfelder 2005). 본 연구에서도 재배환경에 따른 PGA 함량은 품종 및 재배환경에 따라 차이를 보였는데, 강릉(E1) 지역에서 평균 α-chaconine, α-solanine 및 PGA 함량이 각각 1.67, 0.63, 2.20 mg/100 g으로 가장 높았고, 진부(E2)에서 각각 1.53, 0.50, 1.92 mg/100 g으로 가장 낮았다. 본 연구에서 PGA 함량은 재배환경별로 차이가 있었지만, 모든 처리구에서 FDA 권장기준인 20 mg/100 g 이하로 나타나 안전성에는 큰 문제가 없었다.

Sanford *et al.* (1995)와 Kim *et al.* (2014)은 PGA 함량의 품종간 차이는 품종 고유의 유전적 차이에서 유래되었을 가능성이 높다고 하였다. 본 연구에서도 PGA 함량이 높은 품종인 하령(HR)과 낮은 품종인 대서(AT)가 PGA 함량 변이가 크지 않아 환경적 요인보다 유전적 요인이 더 큰것으로 판단되었다.

### PGA 함량에 대한 유전형(G)과 환경(E)의 상호작용

해발고도별 재배환경에 따른 품종의 PGA 함량 변이를 알아보기 위해 분산분석과 AMMI 모델 분석을 수행하였다(Table 7). α-solanine은 유전형의 요소만 강하였고( $p < 0.001$ ), α-chaconine도 유전형의 요소가 매우 강하게 작용하였으며

**Table 7.** AMMI analysis of variance for potato glycoalkaloid ( $\text{mg}\cdot 100\text{ g}^{-1}$ ) in six potato genotypes grown at three environments.

Source of variation	df	$\alpha$ -Solanine		$\alpha$ -Chaconine		PGA	
		F-value <sup>z</sup>	Explained (%) <sup>y</sup>	F-value	Explained (%)	F-value	Explained (%)
Genotype (G)	5	63.94 <sup>***</sup>	75.2	77.37 <sup>***</sup>	77.4	100.50 <sup>***</sup>	82.4
Environment (E)	2	0.99 <sup>NS</sup>	0.6	0.78 <sup>NS</sup>	0.2	2.26 <sup>NS</sup>	0.4
G x E	10	1.02 <sup>NS</sup>	2.4	2.71 <sup>**</sup>	5.4	2.24 <sup>*</sup>	3.7
Rep (E)	15	1.21 <sup>NS</sup>	4.3	0.66 <sup>NS</sup>	2.0	0.50 <sup>NS</sup>	1.2
Residuals	72						
AMMI PC1	6	1.62	95.4	3.40	75.2	3.14	84.1
AMMI PC2I	4	0.12	4.6	1.68	24.8	0.89	15.9

Abbreviations; df: degree of freedom.

<sup>z</sup>Values for the variables in each factor: <sup>NS</sup>Non-significant, <sup>\*</sup>Significant at  $p < 0.05$ , <sup>\*\*</sup>Significant at  $p < 0.01$ , or <sup>\*\*\*</sup>Significant at  $p < 0.001$ .

<sup>y</sup>Values within brackets indicate the portion of the E, G and GXE SS with respect to the total yield variation.

( $p < 0.001$ ), G×E 상호작용도 유의성이 강하게 작용하였다 ( $p < 0.01$ ). PGA 함량은 유전형의 요소가 강하게 작용하였고( $p < 0.001$ ), G×E 요인은 상호작용( $p < 0.05$ )이 약하게 작용하였다.

$\alpha$ -solanine 함량 변이는 75.2%로 유전형이 가장 큰 영향이 있었으며, 그 다음으로 G×E 상호작용은 2.4%로 나타났고, 환경 요인은 0.6%에 불과하였다.  $\alpha$ -chaconine 함량 변이는 77.4%로 유전형이 가장 큰 영향을 미쳤으며, 그 다음으로 G×E 상호작용은 5.4%로 나타났고, 환경 요인은 0.2%에 불과하였다. PGA 함량 변이도 82.4%를 차지하여 유전형의 영향이 가장 강력함을 알 수 있었으며, G×E 상호작용은 3.7%, 환경 요인은 0.4%에 불과해 영향이 미비함을 알 수 있었다. G×E 상호작용 영향은 유전형에 비해  $\alpha$ -solanine,  $\alpha$ -chaconine 및 PGA가 각각 31.3배, 14.3배 및 22.3배 더 작았으며, 이는 환경에 따른 유전형 반응이 미비하였다. AMMI 분석 결과, 모든 구성 요소에서 유전형이 크게 작용하여, 감자 품종에 따라 PGA 함량의 차이가 있음을 알 수 있었다.

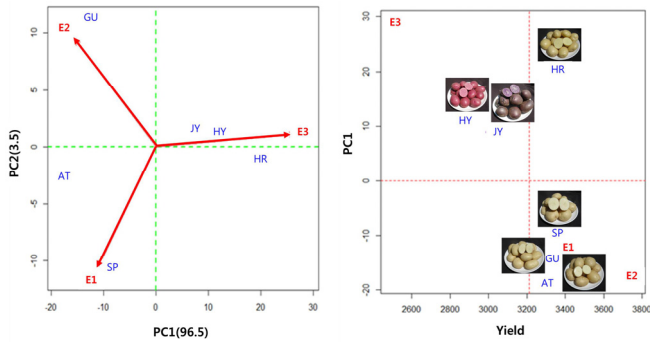
감자는 온도, 강수량, 일조시수 등의 환경적인 요인과 품종에 따라 수량과 PGA 함량이 차이를 나타낸다고 보고하였는데(Bejarano *et al.*, 2000; Grunenfelder *et al.*, 2006; Kim *et al.*, 2016), 본 연구에서 감자의 PGA 함량은 환경적인 요인보다 유전적인 요인이 강하게 영향을 미치는 것으로 확인되었다. 따라서 PGA 함량이 낮은 감자를 생산하기 위해서는 PGA 함량이 낮은 품종의 개발이 필요하며, 교배모·부분의 선정 등 육성 초기단계에서부터 체계적인 전략 수립이 필요하다고 판단되었다.

### 괴경 수량성의 AMMI와 GGE 모델을 이용한 G×E 상호작용 biplot 분석

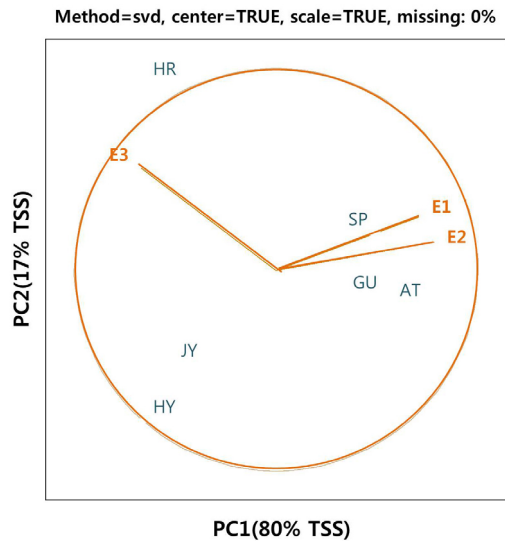
농업적 형질 평가하는데 AMMI 분석을 통해 변이에 대한 교차 유효성 검사에 적합하며, 수량성의 유전형과 환경과의 상호작용을 biplot으로 시각화하였다(Zobel *et al.*, 1988; Gauch & Zobel, 1996; Tolessa *et al.*, 2013). AMMI biplot은 제 1 주성분 상호작용(PC 1)과 제 2 주성분(PC 2) G×E 상호작용에 대해 시각적으로 나타내는 것으로 수량은 재배 환경 요인에 강한 영향을 보였으며, G×E 상호작용에서도 영향을 나타내었다(Fig. 2). 괴경 수량은 강릉(E1) 지역의 수미(SP), 진부(E2) 지역의 고운(GU), 대관령(E3) 지역은 하령(HR) 품종에서 높은 것으로 나타났다. 또한, 분석결과 자영(JY)이 수량이 낮으면서 다양한 환경조건에서 미비한 G×E 상호작용을 보여 주었다. 수미(SP)는 수량이 높으면서 비록 강릉(E1)과 상호작용 효과가 강력했으나, 재배환경 전반에 걸쳐 비교적 안정적인 적응성을 나타내었다. 나머지 품종은 상호작용이 강하여 환경에 따라 수량변이가 심하였으며, 이 중에서 가장 불안정한 유전형은 하령(HR)인 것으로 구명되었다.

유전형 중심에 근거하여 분할된 특이치를 이용하여 구성된 GGE biplot은 재배환경과 유전형 사이의 관계를 설명할 수 있으며, 이것은 G+GE (Genotype + Genotype and Environment)가 전체의 97%를 차지하여 유전형과 재배환경 두 요인이 수량에 영향을 주었다(Fig. 3). 재배환경을 나타내는 두 벡터 간의 각도가 좁을수록 연관성이 강하며, 재배환경 벡터와 인접한 위치에 있는 품종은 G×E 상호작용이 있다(Kroonenburg, 1995; Yan & Tinker, 2006). 즉, 강릉(E1)과 진부(E2) 지역은 연관성이 강하며, 수미(SP), 고운(GU), 대서(AT) 품종의 수량성 증대에 영향을 주었다. 그러나, 대관령(E3)은 다른





**Fig. 2.** AMMI biplot showing the mean (main effect) vs. stability (PC1) view of both genotypes and environments on potato tuber yield. Abbreviations of genotypes and environments are as given in Table 1 and Fig. 1.

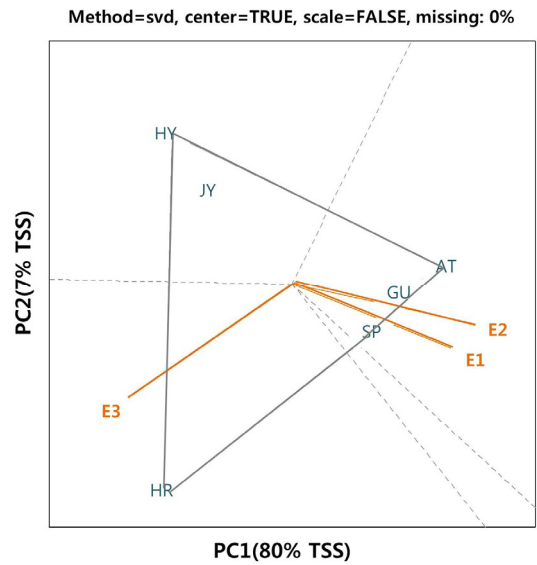


**Fig. 3.** Vector view of GGE biplot of environment-focused scaling of average tuber yield for 6 potato genotypes across three environments.

E1, Gangneung; E2, Jinbu; E3, Daegwallyeong; SP, Superior; AT, Atlantic; HR, Haryoung; GU, Goun; HY, Hongyoung; JY, Jayoung.

두 재배환경과 이루는 각이 매우 크므로, 유사하지 않은 독립적 환경이며, 하령(HR) 또한 다른 5품종과는 달리 독립적인 유전형이었다.

옥수수 유전형과 일부 재배지역 간의 밀접한 상관관계를 분석하여 유사지역의 시험규모를 줄일 수 있어 연구 효율을 높일 수 있다고 보고하였는데(Choukan, 2010), 강릉(E1)과 진부(E2) 지역이 유사지역으로 분류되어 시험평가 시 두 지역 중 한 지역만을 시험해도 비슷한 나머지 지역의 품종 특성을 추정할 수 있는 것으로 판단되었다.



**Fig. 4.** Polygon view of the GGE biplot of potato tuber yield for 6 genotypes over three environments.

E1, Gangneung; E2, Jinbu; E3, Daegwallyeong; SP, Superior; AT, Atlantic; HR, Haryoung; GU, Goun; HY, Hongyoung; JY, Jayoung.

메가환경(mega-environment)에서 유전형의 생산성을 평가하여 안정적인 품종을 선발하기 위해 GGE biplot의 적지적품종 선정(Which-Won-Where) 옵션을 이용하여 폴리곤뷰(polygon view)으로 나타내었다(Fig. 4). 폴리곤뷰의 다각형은 biplot 원점에서 상대적으로 멀리 떨어진 유전형들을 선으로 이어 그리므로 모든 유전형들이 다각형 내에 포함된다(Gauch & Zobel, 1997; Yan, 2001). 선분1은 대서(AT)와 홍영(HY)을 연결하였고, 선분 2는 홍영(HY)과 하령(HR)로 연장되었고, 직각을 이루었다. 선분 3은 하령(HR)과 수미(SP)로 연결되었고, 선분 4는 수미(SP)와 대서(AT)로 연결되었다. 각 부문 내의 환경 그룹에서 최고 정점의 유전형을 있는 폴리곤은 메가 환경을 나타내는데(Yan & Rajcan, 2002), 총 4개의 섹터(sector)로 나눌 수 있었다. 이 중 3개의 섹터에서 메가환경의 특성을 나타내는 유전형이 분포하였다. 첫 번째 섹터는 수미(SP), 대서(AT), 고운(GU)이 하나의 메가환경을 나타내었고, 두 번째 섹터는 홍영(HY)과 자영(JY)을 또 다른 메가환경으로 분류할 수 있었으며, 마지막 섹터는 하령(HR)이 독립적인 메가환경으로 구분할 수 있었다. 각각의 메가환경의 꼭지점에 위치한 유전형들은 각각의 환경에서 최고의 수량을 나타내었는데, 수미(SP), 대서(AT), 고운(GU)은 강릉(E1)과 진부(E2)의 재배 환경에서 수량성이 높았으며, 하령(HR)은 대관령(E3)의 재

배환경에서 최고의 수량성을 나타내었다.

**PGA 함량의 AMMI와 GGE 모델을 이용한 G×E 상호작용 biplot 분석**

AMMI biplot은 제 1 주성분 상호작용(PC 1)과 제 2 주성분(PC2) G×E 상호작용에 대해 시각적으로 나타내는 것으로 α-solanine, α-chaconine과 PGA 함량은 G×E 상호작용 효과가 있었다(Fig. 5). α-solanine은 G×E 상호작용이 가장 낮았고, α-chaconine과 PGA 함량은 상호작용 효과가

높았다. 재배환경과 유전형과의 관계를 살펴보면, 강릉(E1)에서 하령(HR), 진부(E2)에서 대서(AT), 대관령(E3)에서 수미(SP)가 상호작용 효과가 높았다. 또한, 품종별로 비교한 결과, 고운(GU)이 다양한 환경조건에서 G×E 상호작용 효과가 미비하였고, 재배환경 전반에 걸쳐 PGA 함량이 낮아 안정적인 품종이었다. 그러나, 하령(HR)은 α-solanine, α-chaconine 및 PGA 함량이 환경에 따라 변이가 심해, 시험에 사용한 품종 중에서 가장 불안정한 유전형이었다.

GGE biplot의 폴리곤은 α-solanine, α-chaconine 및 PGA에 대한 유전형 및 유전형 환경 변화의 100, 99, 100% (Fig. 6)을 설명할 수 있다. 따라서, α-solanine, α-chaconine 및 PGA의 한 섹터에서 재배환경이 모두 포함되어 환경적인 영향보다 유전형의 영향이 컸으며, 유전형 주요 효과와 유전형의 상호 작용 효과도 작용하였다.

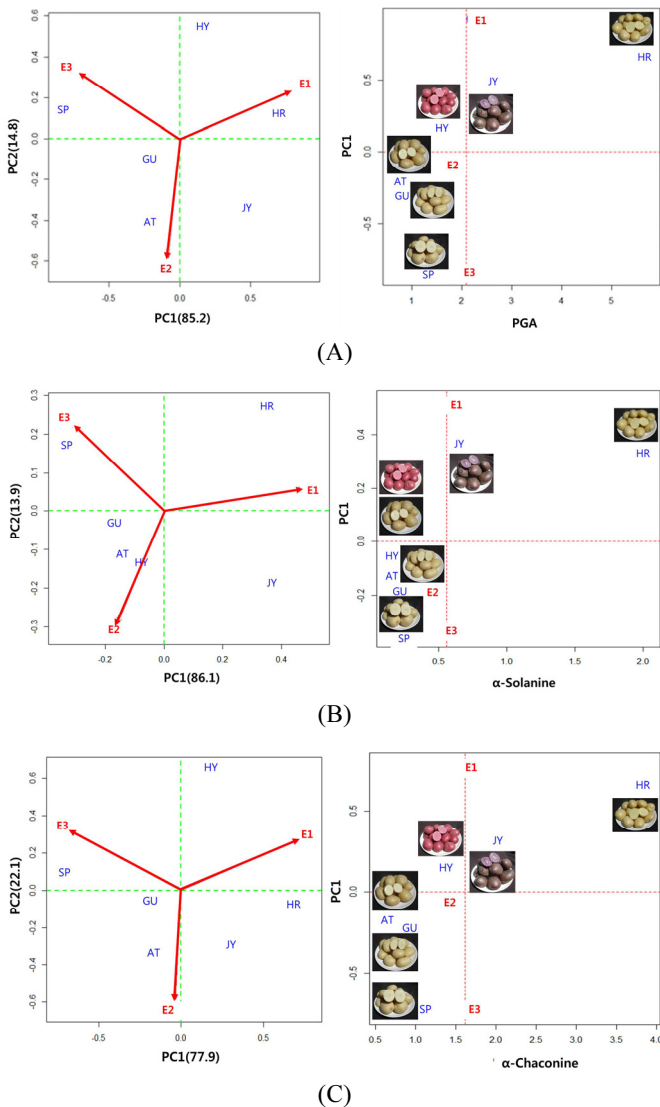
중심점에서 멀리 떨어져 있는 환경은 유전형들의 발현에 미치는 영향이 크지만, 중심점 근처의 시험재배 환경에서는 유전형들의 발현에 미치는 영향이 미비하거나 낮은 것을 의미하는데(Yan *et al.*, 2007), α-solanine, α-chaconine 및 PGA의 유전형 발현은 하령(HR)이 모든 환경(E1, E2, E3)에서 높았고, 고운(GU)이 낮았다(Fig. 6 right).

이상으로 GGE와 AMMI biplot은 유전형의 발현이나 안정성 분석하는 데 보다 정확하고 쉬운 해석이 가능하였는데, 그 이유로는 각 유전형들의 발현 양상을 시각화하여 중심축에서 있는 유전형들이 안정성이 높다는 것을 확인할 수 있었다. 따라서, 보다 정확한 유전형의 선발이 가능하였고, 이는 각 재배환경에서 각각의 유전형들과 상호작용의 효과로 발현 정도를 보여줄 수 있기 때문이다(Yan *et al.*, 2007; Park, 2017).

따라서, 감자의 수량과 PGA 함량의 AMMI 상관관계를 biplot을 이용하여 분석한 결과, 수량은 재배환경이 큰 영향을 미치므로 품종별 최적지 선정이 바람직하고, PGA 함량은 유전적 요인이 크므로 PGA 함량이 적은 품종을 선발하여 재배하는 것이 필요하다고 판단되었다.

**적 요**

감자 6품종인 수미(SP), 대서(AT), 하령(HR), 고운(GU), 흥영(HY), 자영(JY)을 대상으로, 해발고도별로 재배환경이 다른 강릉(E1), 진부(E2), 대관령(E3) 지역에서 2012년과 2013년 재배하여 괴경 수량성과 글리코알카로이드(PGA) 함량을 평가하였다. 품종이 가지고 있는 유전적 특성은 품종 고유의 유전형(G)과 재배환경(E)과의 상호작용(G×E)을 거쳐 발현되므로 본 연구에서는 AMMI 모델과 GGE biplot



**Fig. 5.** AMMI biplot showing the mean (main effect) vs. stability (PC1) view of both, genotypes and environments on potato α-solanine (A), α-chaconine (B), PGA (C). Abbreviations of genotypes and environments are as given in Table 1 and Fig. 1.

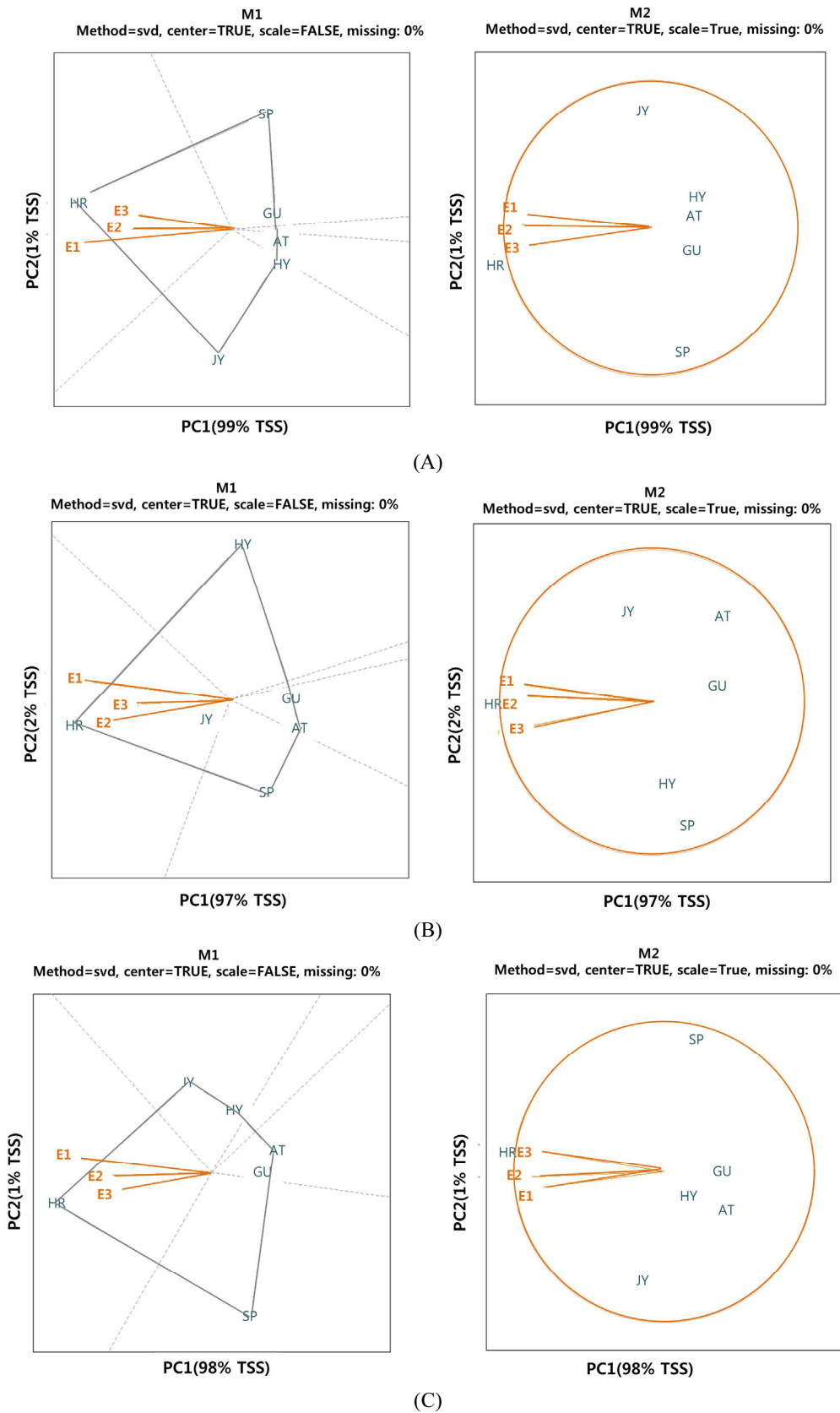


Fig. 6. Polygon (which-won-where) view (left) and vector view (right) of GGE (genotype main effects plus genotype x environment interaction effect) biplot of  $\alpha$ -solanine (A),  $\alpha$ -chaconine (B), PGA (C) in six potato genotypes across three environments.

분석을 통해 지역별 수량성과 PGA 함량 변화 양상을 검토하였다.

1. 감자 수량은 재배환경과 상호작용이 차지하는 비율이 높고, PGA 함량은 유전형(품종)의 효과가 차지하는 비율이 높은 것으로 나타났다.
2. 지역별로 높은 수량을 나타내는데 적합한 품종으로 강릉에서 ‘수미’, 진부에서 ‘고운’, 대관령 에서 ‘하령’이 있으며, 수량이 높으면서 생산 안정성을 보인 품종은 수미였다.
3. 지역별로 높은 PGA 함량을 보이는 품종으로 강릉에서 ‘하령’, 진부에서 ‘대서’, 대관령에서 ‘수미’이었으며, PGA 함량이 낮으면서 재배환경에 영향을 덜 받는 안정성이 뛰어난 품종은 ‘고운’이었다.
4. 감자 품종의 양적 농업 형질인 수량은 재배환경에 따라 차이를 보였으며, PGA 함량은 품종 고유의 형질 차이에 의해 다르게 나타났다.
5. 감자의 수량성을 확보하기 위해서는 재배 적지의 선정이 중요하고, PGA 함량을 낮추기 위해서는 저함유 품종 개발이 선행되어야 한다고 판단되었다.

## 사 사

본 논문은 농촌진흥청 국립식량과학원 연구사업(과제번호: PJ01024002)의 지원을 받아 수행되었습니다.

## 인용문헌(REFERENCES)

- Bejarano, L., E. Migolet, E. Devaux, E. Carrasco, and Y. Larondelle. 2000. Glycoalkaloids in potato tubers: the effect of variety and drought stress on the  $\alpha$ -solanine and  $\alpha$ -chaconine contents of potatoes. *J. Sci. Food Agri.* 80 : 2096-2100.
- Choi, H. D., H. C. Lee, S. S. Kim, Y.S. Kim, H. T. Lim, and G. H. Ryu. 2008. Nutrient components and physicochemical properties of new domestic potato cultivars. *Korean J. Food Sci. Technol.* 40 : 382-388.
- Dia, M, T. C. Wehner, R. Hassell, D. S. Price, G. E. Boyhan, S. Olson, S. King, A. R. Davis, and G. E. Tolla. 2016. Genotype  $\times$  environment interaction and stability analysis for watermelon fruit yield in the United States. *Crop Science* 56 : 1645-1661.
- Ezatolla, F., R. Mahnaz., M. J. Mohammad, and Z. Hassan. 2013. GGE Biplot analysis of genotypes  $\times$  environment interaction in chick pea genotypes. *Eur. J. Exp. Biol.* 3 : 417-423.
- Fehr, W. R. 1987. *Principals of cultivar development. Vol. 1 Theory and technique.* Macmillan Publishing Company, New York. U.S.A.
- FAO/WHO (Food and Agriculture Organization and World Health Organization of the United Nations). 1999. Summary of evaluations performed by the joint FAO/WHO expert committee on food additives (JECFA). ILSI Press, Washington.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations Statistics (FAOSTAT). 2017. [http://www. faostat.org/](http://www.faostat.org/)
- Friedman, M. 2006. Potato glycoalkaloids and metabolites: Role in the plant and in the diet. *J. Agri. Food Chem.* 54 : 8655-8681.
- Friedman, M. and G. McDonald. 1997. Potato glycoalkaloids: Chemistry, analysis, safety and plant physiology. *Crit. Rev. Plant Sci.* 16 : 55-132.
- Fufa, M. 2013. AMMI analysis of tuber yield of potato genotypes grown in bale, southeastern Ethiopia. *Adv. Crop Sci. Tech.* 1 : 120. Doi:10.4172/2329-8863.1000120
- Gauch, H. G. 1988. Model selection and validation for yield trials with interaction. *Biometrics* 44 : 705-715.
- Gauch, H. G. 1992. *Statistical analysis of regional yield trials: AMMI analysis of factorial designs,* Elsevier, Amsterdam, The Netherlands
- Gauch, H. G. and R. W. Zobel. 1997. Identifying mega-environments and targeting genotypes. *Crop Sci.* 37 : 311-326.
- Grunenfelder, L. 2005. *Physiological studies of light-induced greening in fresh market potatoes.* MS thesis, Washington State University, Pullman, USA.
- Grunenfelder, L. A., L. O. Knowles, L. K. Hiller, and N. R. Knowles. 2006. Glycoalkaloid development during greening of fresh market potatoes (*Solanum tuberosum* L.). *J. Agric. Food Chem.* 54 : 5847-5854.
- Kim, S. J. 2016. *A Gift from God: Cooking with potatoes.* Rural Development Administration, Gangneung, Korea. p. 69.
- Kim, S. J., H. B. Sohn, S. Y. Hong, J. H. Nam, D. C. Chang, J. T. Suh, and Y. H. Kim. 2017. Determination of greening and shelf life of potato based on washing and storage temperature conditions. *Korean J. Crop Sci.* 62 : 66-72.
- Kim, S. J., H. B. Sohn, M. Mekapogu, O.K. Kwon, S. Y. Hong, J. H. Nam, Y. I. Jin, D. C. Chang, J. T. Suh, J. C. Jeong, and Y. H. Kim. 2016. Quality characteristics influenced by different packaging materials in washed potatoes through an integrated washing system. *Korean J. Food Sci. Technol.* 48 : 247-255.
- Kim, Y. H., G. H. Kim, H. R. Ji, Y. Y. Lee, H. M. Park, O. K. Kwon, S. J. Kim, W. B. Sohn, Y. I. Jin, S. Y. Hong, J. H. Nam, K. B. Kweon, J. T. Suh, and J. C. Jeong. 2014. Glycoalkaloids content influenced by tuber parts and storage period in major potato cultivars of Korea. *Korean J. Breed. Sci.* 46 : 209-217.
- Kroonenberg, P. M. 1995. *Introduction to biplots for GE tables.*

- Res. Rep. 51. Dep. of Mathematics, Univ. of Queensland, Brisbane, Australia.
- Machado, R. M. D., M. C. F. Toledo, and L. C. Garcia. 2007. Effect of light and temperature on the formation of glycoalkaloids in potato tubers. *Food Control* 18 : 503-508.
- Morris, S. C. and J. B. Petermann. 1985. Genetic and environmental effects of levels of glycoalkaloids in cultivars of potato (*Solanum tuberosum* L.). *Food Chem.* 18 : 271-282.
- Nam E. Y., G. Y. Lee, and S. G. Yoon. 2004. Study on statistical analysis techniques for genotype and environment interaction analysis. Rural Development Administration report. Rural Development Administration. pp. 262-276.
- National Climate Data Service System (NCDSS). 2016. <http://sts.kma.go.kr>. (in Korean)
- Navabi, A., R. C. Yang, J. Helm, and D. M. Spawer. 2006. Can spring wheat growing mega-environments in the northern great plain be dissected for representative locations or niche-adapted genotypes? *Crop Sci.* 46 : 1107-1116.
- Park, M. W. 2017. Study on effect of genotype and environment interaction on tomato fruit characteristics. Gyeongsang National Univ. Ph. D. thesis.
- Park, M. W., Y. S. Chung, and S. H. Lee. 2016. Quality changes in tomato fruits caused by genotype and environment interactions. *Horti. Sci. Technol.* 35 : 361-372.
- Piepho, H. P. 1997. Analyzing genotype-environment data by mixed models with multiplicative effects. *Biometrics* 53 : 761-766.
- Pourdad, S. S. and M. J. Moghaddam. 2013. Study on seed yield stability of sunflower inbred lines through GGE biplot. *Hella* 58 : 19-28.
- Purchase, J. L. 1997. Parametric analysis to described G × E interaction and yield stability in winter yield. Ph.D. Thesis. Department of Agronomy, Faculty of Agriculture, University of Orange Free State, Bloemfontein, South Africa. pp. 4-83.
- Roselló, S., A. M. Adalid, J. Cebolla-Cornejo, and F. Nuez. 2010. Evaluation of the genotype, environment and their interaction on carotenoid and ascorbic acid accumulation in tomato germplasm. *J. Sci. Food Agric.* 91 : 1014-1021.
- Reza, M., M. Armon, A. Shabani, and A. Daryaei. 2007. Identification of stability and adaptability in advanced durum genotypes using AMMI analysis. *Asian J. Plant Sci.* 6 : 1261-1268.
- Rincon, F., B. Johnson, J. Crossa, and S. Taba. 1997. Identifying subsets of maize accessions by three-mode principal component analysis. *Crop Sci.* 37 : 1936-1943.
- Rural Development Administration (RDA). 2016. Standard farming text -The potato. Rural Development Administration, Suwon, Korea. pp. 16-290.
- Rural Development Administration (RDA). 2014. The Potato: Guidance of agricultural technology-31. Rural Development Administration, Suwon, Korea. pp. 24-120.
- Sanford, L. L., K. L. Deahl, S. L. Sinden, and R. S. Kobayashi. 1995. Glycoalkaloid content in tubers of hybrid and backcross populations from a *Solanum tuberosum* (×) *chacoense* cross. *Am. Potato J.* 72 : 261-271.
- Shim, K.B., S. H. Shin, J. Y. Shon, S. G. Kang, W. H. Yang, and S. G. Heu. 2015. Interpretation of genotype × environment interaction of sesame yield using GGE biplot analysis. *Korean J. Crop Sci.* 6 : 349-354.
- Sneller, C. H., L. Kilgore-Norquest, and D. Dombek. 1997. Repeatability of yield stability statistics in soybean. *Crop Sci.* 37 : 383-390.
- Tolessa, T. T., G. Keneni, T. Sefera, M. Jarso, and Y. Bekele. 2013. Genotype × environment interaction and performance stability for grain yield in field pea (*Pisum sativum* L.) genotypes. *Int. J. Plant Breed.* pp. 117-123
- Vargas, M., J. Crossa, F. van Eeuwijk, K. D. Sayre, and M. Reynolds. 2001. Interpreting treatment × environment interaction in agronomy trials. *Agron. J.* 93 : 949-960.
- Yan, W. 2001. GGE biplot : a window application for graphical analysis of multi-environmental data and other types of two-way data. *Agron. J.* 93 : 1111-1118.
- Yan, W. and L. A. Hunt. 1998. Genotype by environment interaction and crop yield. *Plant Breed. Rev.* 16 : 135-178.
- Yan, W. and L. A. Hunt, Q. Sheng, and Z. Szlavniec. 2000. Cultivar evaluation and mega-environment investigation based on GGE biplot. *Crop Sci.* 40 : 597-605.
- Yan, W. and I. Rajcan. 2002. Biplot analysis of test sites and trait relations of soybean in Ontario. *Crop Sci.* 42:11-20.
- Yan, W. and N. A. Tinker. 2006. Biplot analysis of multi-environment trial data: principles and application. *Candian J. Plant Sci.* 86 : 623-645.
- Yan, W., M. S. Kang, B. M. S. Woods, and P. L. Cornelius. 2007. GGE Biplot vs. AMMI analysis of genotype-by-environment data. *Crop Sci.* 47 : 641-653.
- Yang, C. I., S. J. Yang, Y. P. Jeoung, H. C. Choi, and Y. B. Shin. 2001. Genotype × environment interaction of rice yield in multi-location trials. *Korean J. Crop Sci.* 46 : 453-458.
- Zobel, R. W., M. J. Wright, and H. G. Gauch. 1988. Statistical analysis of a yield trial. *Agron. J.* 80 : 388-393.