감자 24품종의 농업적 형질의 유전형과 재배환경의 상호작용 효과

김수정^{1†} · 손황배^{1**} · 박민우² · 장동철¹ · 홍수영¹ · 권오근³ · 정진철⁴ · 구본철¹ · 김윤희^{1*}

¹농촌진흥청 국립식량과학원 고령지농업연구소, ²농업회사법인 현대종묘(주), ³농촌진흥청 연구정책국 연구운영과

⁴농촌진흥청 국립식량과학원 골든시드프로젝트 사업단

Interpretation of Genotype × Environment Interaction in Agronomic Traits in 24 Potato Cultivars Using AMMI and GGE Biplot Analysis

Su Jeong Kim^{1†}, Whang Bae Sohn^{1†}, Min Woo Park², Dong Chil Chang¹, Su Young Hong¹, Oh Keun Kwon³, Jin Cheol Cheong⁴, Bon Cheol Koo¹ and Yul Ho Kim^{1*}

¹Highland Agriculture Research Institute, National Institute of Crop Science, Rural Development Administration, Pyeongchang, 25342, Korea

²Hyundai Seed Co. Ltd, Yeosu, 12660, Korea

³Research Administration Division, Research Policy Bureau, Rural Development Administration, Jeonju, 54875, Korea

⁴Golden Seed Project, National Institute of Crop Science, Rural Development Administration, Wanju, 55365, Korea

Abstract The 24 potato cultivars grown in three regions with different cultivation environments were investigated genotype and environment interaction (GEI) using the Additive Main Effects and Multiplicative Interaction (AMMI), and Genotype main effect and genotype by environment interaction (GGE) biplot model analysis. Potato yield was highly related to environment and GEI factors but the number of tubers and dry matter content were related to the genotype factor. Potato yield was the highest in 'Seohong' in Gangneung, 'Dejima' in Jinbu area, and 'Saebong' in Daegwallyeong area. As a result of analysis of GEI effect between genotypes and environment, 'Seohong' in yield, 'Daejima' in tuber, and 'Goun' in dry matter content were superior and were stable. The 'Seohong', which has the highest yield and stability, showed promising results and can substitute the 'Superior' variety. The 'Goun' was selected as a chip potato processing grade to replace 'Dejima', which currently is the major processing grade. Therefore, as a result of analysis of AMMI and GGE biplot models of agricultural traits of potatoes showed that the cultivation environment has greatest influence on the yield. Therefore, proper site selection for the desired cultivar is necessary for best results. Though it is also important to select the best genotype with a high dry matter content.

Keywords Dry matter, AMMI, GGE, Tuber, Yield

Received on November 8, 2017. Accepted on January 15, 2018.

* Corresponding Author (E-mail: kimyuh77@korea.kr, Tel: +82-33-330-1840, Fax: +82-33-330-1519)

† These authors contributed equally to this work.

서 언

감자(*Solanum tuberosum* L.)는 전세계적으로 1.9천만 ha에서 재배되고 있는 중요한 식량작물로 연간 3.8억톤이 생산된다(FAOSTAT 2017). 우리나라에서는 주로 식용 및 가공용으로 연간 59만톤을 생산하고 있다(RDA 2016).

감자 품종은 용도에 따라 식용, 칩 가공용, 프렌치프라이 가공용 및 전분용으로 구분된다. 식용으로는 '수미' 품종이 전체 면적의 60% 이상을 차지하고 있다. 칩 가공용으로는 건물함량이 높고 환원당 함량이 낮아 감자칩으로 제조하였을 때 칩의 색이 밝은 가공적성 품종으로 '대서'가 대표 품종이며, '고운'이 신품

종으로 보급되고 있다(RDA 2016). 또한, 소비패턴의 변화에 따라 기능성이 강화된 보라색 감자, 병저항성 친환경 재배 감자 등 다양한 용도의 감자 품종이 활발히 개발되고 있다.

현재 국립종자원에 등록된 품종은 49품종이며, 이 중 농촌진흥청에서 개발한 품종은 17종이 있다(KSVS 2017). 각 국가별 주요 재배 품종으로는 우리나라의 경우 '수미(Superior)', 미국은 가공용 품종인 '러셋버뱅크(Russet Burbank)', 중동아시아 및 북아프리카에서는 고온에 강한 '데지레(Désirée)' 품종이 50% 이상 재배되고 있다(van Dam 2002).

작물 품종은 서로 다른 환경에서 농업 형질이 현저한 차이를 나타낼 수 있다. 환경변화에 따른 작물 특성(performance)의

변화 양상을 유전형(Genotype)과 환경(Environment)의 상호작용($G \times E$ interaction, GEI)이라고 하며(Vargas et al. 2001), GEI 분석을 통해 다양한 농업 환경에 적합한 품종을 선발 또는 추천할 수 있다(Nabavi et al. 2006). 또한, 품종개발단계에서 육성계통의 지역별 적응성 양상에 관한 정확한 정보를 제공함으로써 적응 지역 결정에 도움을 줄 수 있다(Van Oosterom et al. 1993, Yan 2001).

이처럼 GEI 효과에 대한 관심이 고조되면서 작물의 농업 형질에 대한 안정성 및 적응성을 정확하게 평가하기 위한 다양한 통계분석 방법이 개발되었다(Basford 1982). 그 중에서 ‘상가적인 주효과와 다양한 상호작용(Additive Main Effects and Multiplicative Interaction, AMMI)’ 모델과 ‘유전자형 주요 효과와 환경에 의한 유전자형(Genotype main effect and genotype by environment interaction, GGE) 행렬도 분석(biplot)’이 가장 많이 사용되고 있다(Gauch 1992).

AMMI 모델의 경우 수량성 등 양적 형질의 지역적응성 평가에 많이 사용되고 있으며, 상가적 요인뿐만 아니라 상승적 요인까지 해석이 가능하고 자유도가 작아서 GEI의 영향을 보다 정확하게 설명할 수 있다는 장점이 있다(Gauch 1988, Piepho 1997). 또한, 환경의 변화에 유전형의 반응이 충분하지 않은 경우에도 효과적인 분석이 가능하여(Yan & Hunt 1998, Zobel et al. 1988), 상가적인 주요 효과를 주성분 분석을 통해서 쉽게 분석할 수 있다.

GGE biplot은 다양한 환경에서 나타난 농업적 형질의 변화 정도를 분석하여 적합한 품종을 선발하는 방법이며, 유전형과 환경평가 상호작용을 시각적으로 표현할 수 있어 작물육종가들이 쉽게 사용할 수 있다(Pourdad & Moghaddam 2013, Shim et al. 2015, Yan & Rajcan 2002). 또한, GGE biplot 분석은 유전형의 발현(genotype performance)과 안정성(stability)을 가지는 유전형을 동시에 나타낼 수 있다(Yan & Rajcan 2002, Park 2017).

따라서, AMMI 및 GGE 모델은 다양한 농업 환경에서 유전형과 환경과의 상호작용을 해석함으로써 다양한 환경평가에서 안정적인 유전형을 선발하는데 효과적으로 사용될 수 있다(Pourdad & Moghaddam 2013).

본 연구에서는 AMMI 및 GGE의 biplot 통계 모델을 적용하여 해발고도가 다른 환경조건에서 감자 24품종의 농업 형질에 대한 GEI 효과를 구명하였다. 이와 같은 결과는 재배환경에 안정적인 품종 선발과 개발에 효과적으로 활용될 것으로 기대된다.

재료 및 방법

실험재료 및 환경조건

실험재료로 우리나라 주요 감자 품종인 남작(G01, Irish Cobbler, IC), 수미(G02, Superior, SP), 조풍(G03, Jopung, JP), 남서(G04, Namsuh, NS), 자심(G05, Jasim, JM), 자서(G06, Jasuh, JS), 조원(G07, Jowon, JW), 신남작(G08, Sinnamjag, SN), 하령(G09, Haryeong, HR), 서홍(G10, Seohong, SH), 홍영(G11, Hongyoung, HY), 자영(G12, Jayoung, JY), 대지(G13, Dejima, DJ), 추백(G14, Chuback, CB), 추동(G15, Chudong, CD), 추강(G16, Chugang, CG), 추영(G17, Chuyoung, CY), 방울(G18, Bangul, BU), 세풍(G19, Shepody, SD), 대서(G20, Atlantic, AT), 가원(G21, Gawon, GW), 가황(G22, Gahwang, GH), 고운(G23, Goun, GU), 새봉(G24, Saebong, SB) 총 24품종을 사용하였다(Table 1). 재배시험은 해발고도별로 강릉(E1, 강원도 강릉시 두산동, 북위 37°76′, 동경 128°93′, 해발고도 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) 등 3개소에서 2012년에서 2013년까지 2년간 수행하였다(Fig. 1). 감자는 표준재배법에 준하여 수행하였으며(RDA 2016), 잡초방지를 위해 흑색멀칭을 하였고, 재식거리는 80 × 25 cm로 하였다. 재배기간은 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 수확하였다. 조사항목은 농업형질 중에서 식물체당 괴경수와 괴경중을 조사하였다. 수량성은 10a당 kg으로 환산하여 총수량으로 표기하였다(RDA 2014). 가공적성을 평가를 위한 건물률은 건전한 감자 괴경을 선별한 후 건조기 105°C에서 2시간 건조한 다음 무게를 측정하여 환산하였다. 감자 재배기간 동안의 기상자료는 2012년부터 2013년까지 기상청의 자료를 활용하였다(NCDSS 2016). 재배기간 중 최고온도는 20.8-23.2°C, 평균온도는 16.3-18.3°C, 최저온도는 11.9-14.2°C였다. 강수량은 60.6-152.1 mm였고, 일조시수합은 123.5-165.6 hr, 한달 평균 강우일수는 7.7-9.6일이었다(Table 2).

AMMI와 GGE biplot을 이용한 통계분석

모든 실험은 3반복으로 수행하였으며, 실험치는 평균값과 표준편차로 표시하였다. 조사된 수량성과 건물률 평가하기 위해 R analysis (R studio i386 3.3.2.)을 사용하였으며, AMMI와

GGE biplot 분석을 위해 ‘agricolae’와 ‘gge’ 라이브러리(library)를 호출하여 수량, 괴경수 및 건물물 데이터의 GEI를 시각적으로 표현하였으며 다음과 같이 계산하였다(Yan & Rajcan 2002, Park et al. 2016).

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

이 식에서 α_{ij} 는 수량 등 농업 형질(trait) j 에 대한 유전형(genotype) i 의 평균값, β_j 는 형질 j 에 대한 모든 유전형들의

Table 1. Description of the potato genotypes evaluated in this study.

Genotype	Cultivar	Released year	Utilization	Cropping system ^z	Total yield ^y (kg/10a)	Breeding nation	Cross combination	Maturity
G01	Irish Cobbler	1960	Table potato	Single	3,761	USA	bud-mutant of Early Rose	Early
G02	Superior	1978	Table potato, Potato chip	Single	3,191	USA	B96-56 × M59-44	Early
G03	Jopung	1988	Table potato	Single	3,510	Korea	Resy × Superior	Early
G04	Namsuh	1995	Table potato	Single	4,714	Korea	(Sroeken × Superior) × Wheeler	Medium
G05	Jasim	1999	Table potato	Single	2,733	Korea	Daekwan48 × B6603-6	Late
G06	Jasuh	2000	Table potato	Single	3,770	Korea	Daekwan49 × B6603-6	Early
G07	Jowon	2000	Table potato	Single	3,703	Korea	AG54071 × Katahdin	Early
G08	Sinnamjag	2001	Table potato	Single	4,444	Korea	Irish Cobbler × Katahdin	Early
G09	Haryeong	2005	Table potato	Single	3,899	Korea	Atlantic × Superior	Early-medium
G10	Seohong	2006	Table potato	Single	4,052	Korea	Jasim × 93K61-5	Early-medium
G11	Hongyoung	2007	Table potato, Potato chip	Single	3,112	Korea	Atlantic × AG34314	Medium-late
G12	Jayoung	2007	Table potato, Potato chip	Single	3,096	Korea	Atlantic × AG34314	Late
G13	Dejima	1978	Table potato	Double	S 2,956 A 2,359	Japan	Hokaido31 × Unzen	Medium-late
G14	Chubaek	1999	Table potato	Double	S 3,529 A 2,340	Korea	H83011-3 × Superior	Early
G15	Chudong	2001	Table potato	Double	S 3,243 A 2,181	Korea	H83520 × Superior	Medium
G16	Chugang	2002	Table potato	Double	S 3,462 A 2,746	Korea	H83005-2 × Superior	Medium
G17	Chuyoung	2004	Table potato	Double	S 2,952 A 2,057	Korea	Atlantic × (Russet Burbank × <i>Solanum phureja</i>)	Medium
G18	Bangul	2010	Table potato	Double	S 4,040 A 3,053	Korea	Dejima × Superior	Early
G19	Shepody	1988	French fry	Single	3,684	Canada	F58050 × Wauseon	Medium
G20	Atlantic	1995	Potato chip	Single	2,934	USA	B5141-6 × Wauseon	Medium
G21	Gawon	1999	Potato chip	Single	3,173	Korea	Namsuh × Konahubuki	Early
G22	Gahwang	2002	Potato chip	Single	3,438	Korea	Atlantic × AG54701	Early
G23	Goun	2006	Potato chip	Double	S 3,322 A 2,622	Korea	Lemhi Russet × Chubaek	Early-medium
G24	Saebong	2010	Potato chip	Double	S 3,200 A 2,710	Korea	Daegwan2-8 × DH09-231	Early

^zSingle, Single cultivation; Double, Double cultivation.

^yS, Spring crop; A, Autumn crop.

Table 2. Meteorological data of three environments of potato cultivation during 2012 and 2013 cropping season.

Environment ^z	Factor	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Mean ^z
E1(20 m)	Maximum temp. (°C)	12.2 ^y	16.2	21.8	23.9	30.0	-	-	20.8
	Minimum temp. (°C)	2.6	6.1	12.3	16.8	21.8	-	-	11.9
	Average temp. (°C)	7.5	11.1	16.9	19.9	26.1	-	-	16.3
	Accumulated precipitation (mm)	47.8	82.0	77.1	28.7	67.3	-	-	60.6
	Sum of sunshine (hr)	151.9	231.2	245.7	155.3	43.8	-	-	165.6
	Accumulated precipitation days	5.5	9.0	8.5	11.0	4.5	-	-	7.7
E2(560 m)	Maximum temp. (°C)	-	16.6	22.1	25.4	27.0	28.2	-	23.9
	Minimum temp. (°C)	-	3.0	7.7	13.7	19.0	20.0	-	12.7
	Average temp. (°C)	-	9.3	14.5	18.7	22.6	24.2	-	17.9
	Accumulated precipitation (mm)	-	57.0	76.3	89.3	416.3	40.0	-	135.8
	Sum of sunshine (hr)	-	-	-	-	-	-	-	-
	Accumulated precipitation	-	4.0	7.5	9.0	15.5	3.0	-	7.8
E3(800 m)	Maximum temp. (°C)	-	-	20.2	21.7	25.2	25.8	23.1	23.2
	Minimum temp. (°C)	-	-	8.0	12.6	18.3	18.0	14.1	14.2
	Average temp. (°C)	-	-	14.2	16.8	21.4	21.5	17.6	18.3
	Accumulated precipitation (mm)	-	-	143.3	94.3	330.6	188.6	4.0	152.1
	Sum of sunshine (hr)	-	-	56.9	179.6	180.4	187.2	13.2	123.5
	Accumulated precipitation	-	-	4.0	13.0	16.0	14.0	1.0	9.6

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

^zEnvironment (masl) represented abbreviation of region and meter above the sea level.

^yMean represented 2012-2013 climate average for cultivation period(E1, Mar. 21.-Jul. 11.; E2, Apr. 15.-Aug. 5.; E3, May 14.-Sep. 3.) including temperature and precipitation.

평균값, δ_j 는 유전형 평균값 사이의 형질 j 의 표준편차, λ_n 은 주성분의 특이치(PCn), ξ_m 은 유전형 i 에 대한 PCn 점수, η_{jn} 은 형질 j 에 대한 PCn 성적, ε_{ij} 는 형질 j 에서 유전형 i 와 연관된 잔차(residual effect)이다. 유전형 ξ_m 과 형질 η_{jn} 에 대한 특이벡터(singular vector)에 속하는 특이치(singular value) λ_n 은 유전형과 형질 점수 사이에서 농업형질을 중심으로 스케일링 하여 만들었다. GT(Genotype by Trait) biplot은 각각의 유전형과 형질에 대한 주성분(Principal Component, PC) PC1과 PC2의 점수로 생성하였다(Yan & Rajcan 2002, Park et al. 2016).

각 유전형의 안정성 값인ASV(AMMI stability value)는 상호작용 주성분1(Interaction Principal Analysis 1, IPCA1)과 IPCA2 점수에 기초하여 계산하였다(Purchase 1997).

GGE biplot 분석은 유전형의 발현과 안정성을 가지는 유전형을 동시에 표현할 수 있으며, SVD(singular value decomposition) 형식으로 데이터를 분석함으로써, 각 유전형 값들이 유전형의 점수를 나타낸다(Yan & Rajcan 2002).

GGE biplot의 폴리곤 뷰(polygon view, which-won-where view)는 폴리곤면을 통과하는 수직선을 통해 biplot을 섹터로

구분할 수 있으며, 폴리곤은 biplot의 가장자리에 위치한 유전형들이 연결되어 그려진다. 환경이 포함된 섹터에서 유전형이 다른 섹터보다 유전형 발현이 높게 나타나면, GEI가 있음을 의미한다(Dia et al. 2016). 즉, 특정 환경에 적응한 유전형은 꼭지점에 위치한 유전형으로 표시된다.

결과 및 고찰

감자 품종의 재배 환경에 따른 농업적 형질 평가

감자 24품종을 대상으로 해발고도별 재배환경이 다른 3지역에서 2년간 농업적 특성을 평가한 결과는 다음과 같다(Table 3, Figs. 1-3). 재배환경별 10a당 수량성은 강릉(E1)에서 4,165 kg으로 서흥(G10), 진부(E2)에서 4,588 kg으로 대지(G13), 대관령(E3)에서 3,734 kg으로 새봉(G24)이 가장 많은 수량성을 보였다(Table 3). 식물체당 괴경수는 강릉(E1)에서 새봉(G24)이 12.6 개, 진부(E2)와 대관령(E3)에서 홍영(G11)이 각각 12.2개와 11.0 개로 가장 많은 괴경수를 보였다. 건물물은 강릉(E1), 진부(E2) 및 대관령(E3) 3지역 모두에서 고운(G23)이 각각 23.1%, 21.6%,

Table 3. Agronomic traits of the 24 potato genotypes across three environments during (2012-2013) main cropping season.

Genotypes ^z	Environment ^y									Mean±S.D. ^w			CV ^v		
	E1			E2			E3			TY	NT	DM	TY	NT	DM
	TY	NT	DM	TY	NT	DM	TY	NT	DM						
G01	3,141	9.4	20.2	2,698	9.2	18.3	1,866	6.4	17.8	2,568±367	8.3±1.2	18.8±1.1	0.224	0.242	0.080
G02	3,755	8.6	20.9	3,957	8.6	17.8	2,330	7.4	18.3	3,348±748	8.2±1.4	19.0±1.7	0.186	0.306	0.115
G03	3,899	7.9	17.2	2,905	6.9	15.3	3,008	7.5	16.1	3,270±718	7.5±1.1	16.2±1.0	0.200	0.263	0.082
G04	2,625	9.1	17.7	3,065	7.9	16.1	2,352	8.8	17.5	2,681±630	8.6±1.4	17.1±0.9	0.171	0.275	0.069
G05	3,600	8.2	20.9	4,165	8.4	18.9	2,289	4.0	17.7	3,351±443	6.9±1.1	19.2±1.6	0.324	0.267	0.114
G06	3,242	6.9	18.2	3,391	6.1	17.3	1,823	4.2	17.6	2,819±539	5.7±0.8	17.7±1.5	0.232	0.317	0.092
G07	3,701	7.7	18.6	3,717	6.9	15.3	2,783	5.5	17.9	3,400±795	6.7±1.7	17.3±1.3	0.304	0.243	0.109
G08	3,015	9.1	19.0	3,065	9.1	16.5	1,744	8.9	15.0	2,608±623	9.0±2.2	16.8±1.1	0.244	0.321	0.118
G09	3,266	8.1	22.1	3,526	8.1	20.2	3,227	7.2	20.7	3,340±738	7.8±1.4	21.0±1.3	0.192	0.243	0.070
G10	4,165^x	9.4	19.3	4,037	7.5	16.7	2,792	5.7	16.9	3,665±822	7.6±1.6	17.6±1.4	0.298	0.285	0.102
G11	2,928	12.4	17.9	3,272	12.2	15.3	2,840	11.0	17.2	3,013±544	11.9±1.5	16.8±1.1	0.127	0.191	0.095
G12	3,051	11.3	22.6	3,420	11.6	20.6	2,563	6.4	20.8	3,011±431	9.7±0.8	21.4±1.0	0.252	0.197	0.068
G13	4,038	12.0	20.6	4,588	10.9	18.5	2,675	7.8	19.4	3,767±639	10.3±1.7	19.5±1.2	0.235	0.283	0.076
G14	4,641	10.5	17.2	3,592	7.6	16.0	1,720	6.2	15.1	3,318±829	8.1±1.4	16.1±1.2	0.289	0.447	0.092
G15	3,625	12.1	19.2	3,379	10.1	15.8	2,827	9.0	17.0	3,277±743	10.4±1.3	17.3±1.3	0.179	0.250	0.111
G16	4,072	8.4	20.6	4,090	9.9	20.0	2,963	6.4	19.7	3,709±679	8.2±1.5	20.1±1.0	0.244	0.302	0.051
G17	3,326	10.1	21.0	3,988	9.9	16.7	2,076	6.2	17.4	3,130±602	8.7±1.3	18.4±1.6	0.245	0.320	0.131
G18	2,506	9.9	22.0	2,468	8.3	20.0	1,797	8.5	18.1	2,257±695	8.9±2.2	20.1±1.9	0.264	0.329	0.120
G19	2,920	7.4	21.5	3,193	5.5	19.8	1,713	4.8	21.0	2,609±482	5.9±1.5	20.8±1.2	0.338	0.299	0.066
G20	3,761	9.6	22.2	4,181	7.3	20.3	2,064	5.9	20.4	3,335±775	7.6±1.2	21.0±1.3	0.249	0.375	0.072
G21	3,199	9.2	21.9	3,917	8.1	18.5	2,688	7.6	19.5	3,268±403	8.3±1.6	19.9±1.4	0.202	0.197	0.100
G22	2,999	9.7	22.3	3,037	8.3	18.8	1,878	5.6	20.5	2,638±514	7.9±1.6	20.5±0.8	0.295	0.283	0.082
G23	3,536	10.1	23.1	4,236	9.3	21.6	2,230	5.8	22.6	3,334±646	8.4±1.4	22.4±1.1	0.275	0.315	0.060
G24	4,122	12.6	21.4	4,498	9.7	20.9	3,734	8.5	20.9	4,118±733	10.2±1.6	21.1±0.8	0.229	0.192	0.037
Mean	3464	9.6	20.3	3,599	8.6	18.1	2,416	6.9	18.5				-	-	-
S.D.	533	1.6	1.8	572	1.6	2.0	547	1.7	2.0				-	-	-
C.V	0.15	0.17	0.09	0.16	0.19	0.11	0.23	0.25	0.11				-	-	-

^zG01, Irish Cobbler; G02, Superior; G03, Jopung; G04, Namsuh; G05, Jasim; G06, Jasuh; G07, Jowon; G08, Sinnamjag; G09, Haryeong; G10, Seohong; G11, Hongyoung; G12, Jayoung; G13, Dejima; G14, Chubae; G15, Chudong; G16, Chugang; G17, Chuyoung; G18, Bangul; G19, Shepody; G20, Atlantic; G21, Gawon; G22, Gahwang; G23, Goun; G24, Saebong.

^yE1, Gangneung; E2, Jinbu; E3, Daegwallyeong; TY, Tuber yield(kg/10a); NT, Number of tuber (ea/plant); DM, Dry matter of tuber (%).

^xUnderlined values are the highest yield at each test environment.

^wAverage data for three environment (E1, E2, and E3) ± standard deviation.

^vC.V. Coefficient of variation.

Fig. 1. Tuber yield ($\text{kg} \cdot 10\text{a}^{-1}$) in the 24 potato genotypes across three environments during (2012-2013) main cropping season. G01, Irish Cobbler; G02, Superior; G03, Jopung; G04, Namsuh; G05, Jasim; G06, Jasuh; G07, Jowon; G08, Sinnamjag; G09, Haryeong; G10, Seohong; G11, Hongyoung; G12, Jayoung; G13, Dejima; G14, Chubae; G15, Chudong; G16, Chugang; G17, Chuyoung; G18, Bangul; G19, Shepody; G20, Atlantic; G21, Gawon; G22, Gahwang; G23, Goun; G24, Saebong. Single, Single cultivation; Doble, Doble cultivation.

22.6%가장 높았다.

감자 품종의 3지역 평균 괴경 수량은 새봉(G24)이 4,118 kg/10a로 가장 많았으며, 방울(G18)이 2,257 kg/10a로 가장 적었다(Table 3, Fig. 1). 3지역 평균 괴경수는 홍영 (G11)이 식물체당 11.9개로 가장 많았으며, 자서(G06)가 5.7개로 가장 적었다 (Table 3, Fig. 2). 3지역 평균 건물률은 고운(G23)이 22.4%로 가장 높았으며, 추백(G14)이 16.1%로 가장 낮았다.

3개 재배지역 중 강릉(E1)이 수량, 괴경수 및 건물률에서 표준

편차(Standard Deviation, SD)와 변이계수(coefficient variation, CV)가 다른 2지역인 진부(E2), 대관령(E3)에 비해 작았다. Shim et al.(2015)은 재배환경과 GEI 효과가 미비할 경우 SD와 CV 값이 작아진다고 하였다. 본 연구에서는 수량성에서 남서(G014, 괴경수에서 홍영(G11), 건물률에서 새봉(G24)의 CV가 각각 0.171, 0.191, 0.037로 가장 낮아 재배환경에 따른 농업적 형질의 영향이 크지 않은 것은 것으로 나타났다.

Fig. 2. Number of tuber (ea/plant) in the 24 potato genotypes across three environments during (2012-2013) main cropping season. G01, Irish Cobbler; G02, Superior; G03, Jopung; G04, Namsuh; G05, Jasim; G06, Jasuh; G07, Jowon; G08, Sinnamjag; G09, Haryeong; G10, Seohong; G11, Hongyoung; G12, Jayoung; G13, Dejima; G14, Chubaek; G15, Chudong; G16, Chugang; G17, Chuyoung; G18, Bangul; G19, Shepody; G20, Atlantic; G21, Gawon; G22 Gahwang; G23, Goun; G24 Saebong. Single, Single cultivation; Doble, Doble cultivation.

Fig. 3. Tuber dry matter (%) in the 24 potato genotypes across three environments during (2012-2013) main cropping season. G01, Irish Cobbler; G02, Superior; G03, Jopung; G04, Namsuh; G05, Jasim; G06, Jasuh; G07, Jowon; G08, Sinnamjag; G09, Haryeong; G10, Seohong; G11, Hongyoung; G12, Jayoung; G13, Dejima; G14, Chubaek; G15, Chudong; G16, Chugang; G17, Chuyoung; G18, Bangul; G19, Shepody; G20, Atlantic; G21, Gawon; G22 Gahwang; G23, Goun; G24 Saebong. Single, Single cultivation; Doble, Doble cultivation.

농업적 형질에 대한 AMMI 모델 분석

해발고도별 재배환경에 따른 품종의 농업적 형질에 대한 GEI 효과를 구명하기 위해 분산분석과 AMMI 모델 분석을 수행하였다(Table 4-6). 괴경 수량성, 식물체당 괴경수 및 건물물은 재배 환경, 유전형 및 GEI에 고도의 유의성을 나타내었다($p<0.001$). 수량성 변이는 재배환경이 전체 제곱합(Sum of Squares, SS)의 29.0%를 차지하여 가장 큰 영향을 미쳤으며, 그 다음으로 유전형과 GEI가 각각 19.2%, 10.4%를 차지하는 것으로 분석되었다(Table 4). 식물체당 괴경수의 경우 유전형이 SS의 33.6%를 차지하여 가장 큰 영향을 미치는 것으로 분석되었으며, 환경 요인은 19.7%, GEI는 10.1%인 것으로 나타났다(Table 5). 건물물은 유전형이 51.5%, 환경 요인은 14.7%, GEI는 5.8%로 유전형이 강한 영향을 미친 것으로 분석되었다(Table 6).

기존 연구에서 수량성의 경우 환경요인이 51.9%, 유전형이 13.7%, GEI 효과가 31.4%으로 수량에서 환경요인이 가장 큰 영향을 미쳤다고 보고하였는데(Fufa 2013), 본 연구와 매우 유사

한 경향이였다. 이러한 환경변이는 재배지역의 기후조건에 따라 달라질 수 있다고 하였다(Fufa 2013). 또한, 기존연구에서 AMMI 분석에서 환경에 대한 제곱합이 클 경우에는 GEI 효과가 있으며, 특정한 환경조건에서 최고 또는 최저의 수량성을 보일 수 있다고 하였다(Fufa 2013, Tolessa et al. 2013, Yan & Rajcan 2002). 본 연구에서도, 추백(G14)의 경우 강릉(E1)에서 수량성이 4,641 kg/10a로 높았으나, 대관령(E3)에서는 1,720 kg/10a로 낮아 GEI 효과가 큰 품종인 것으로 나타났다. 수량성과는 달리 괴경수와 건물물 경우에는 유전형이 GEI 효과보다 각각 3.3배, 8.9배 더 큰 영향을 미쳤는데, 이는 유전형이 강하게 작용하고 재배환경의 영향이 약했음을 의미한다.

감자 수량성에 대한 AMMI 주성분 분석을 수행하였을 때, 감자의 수량성에 영향을 미치는 유전형과 환경에 대한 상호작용의 정도는 주성분 1(PC1)이 64.5%, 주성분 2(PC2)가 35.8%이었다. 괴경수는 주성분 1(PC1)이 70.3%, 주성분 2(PC2)가 29.7%의 결과 값을 보였으며, 건물물은 주성분 1(PC1)이 68.4%, 주성분 2(PC2)가 31.6%인 것으로 분석되었다.

Table 4. AMMI analysis of variance for tuber yield ($\text{kg} \cdot 10\text{a}^{-1}$) of 24 potato genotypes grown at three environments.

Source of variation	df	SS	MS	F- value ^z	Efficiency (%) ^y
Genotype (G)	23	78,691,572	3,421,373	8.58***	19.2
Environment (E)	2	119,042,979	59,521,489	24.88***	29.0
Rep (E)	15	35,872,759	2,391,517	5.99***	8.7
G x E	46	42,463,834	923,127	2.31***	10.4
Residuals	336	134,036,553			
Total		410,107,697			
AMMI PC1	24	23,367,158	973,632	2.44	64.2
AMMI PC2	22	13,625,427	619,338	1.55	35.8
Total					

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

^zValues for the variables in each factor: ⁿnon-significant or ***Significant at $p<0.001$.

^yValues in brackets indicate part of the E, G and G×E SS to the total yield variation.

Table 5. AMMI analysis of variance for tuber number (ea/plant) of 24 potato genotypes grown at three environments.

Source of variation	df	SS	MS	F- value ^z	Efficiency (%) ^y
Genotype (G)	23	782	34	16.65***	33.6
Environment (E)	2	459	229	17.32***	19.7
Rep (E)	15	199	13	6.47***	8.5
G x E	46	236	5	2.51***	10.1
Residuals	319	652			
Total		2,327			
AMMI PC1	24	77	3	1.57	70.3
AMMI PC2	22	32	1	0.72	29.7

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

^zValues for the variables in each factor: ⁿnon-significant, *Significant at $p<0.05$ or ***Significant at $p<0.001$.

^yValues in brackets indicate part of the E, G and G×E SS to the total yield variation.

재배환경에 따른 농업형질의 특성인 수량성, 괴경수 및 건물율을 감자 24품종간 비교 검토하여 그 결과를 Table 7에 나타내었다. 수량성이 가장 높은(rank of tuber yield, rTY) 품종은 새봉

(G24), 대지(G13), 서흥(G10) 순이었으나, 남작(G01)과 방울(G18)의 경우 안정성이 낮았다. 괴경수에서는 홍영(G11), 대지(G13), 자영(G12)이 괴경수가 많았으나, 자서(G06)는 괴경수가

Table 6. AMMI analysis of variance for dry matter (%) of 24 potato genotypes grown at three environments.

Source of variation	df	SS	MS	F- value ^z	Efficiency (%) ^y
Genotype (G)	23	1,344	58	38.98***	51.5
Environment (E)	2	383	191	24.38***	14.7
Rep (E)	15	118	8	5.23***	4.5
G x E	46	151	3	2.18***	5.8
Residuals	333	616			
Total		2,610			
AMMI PC1	24	88	4	2.44	68.4
AMMI PC2	22	41	2	1.23	31.6

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

^zValues for the variables in each factor: ^{ns}non-significant or ***Significant at $p < 0.001$.

^yValues in brackets indicate part of the E, G and G×E SS to the total yield variation.

Table 7. Tuber yield, number, and dry matter for AMMI and rank of 24 potato genotypes tested for two years per location at three environments in Korea.

Genotype ^z	Tuber yield ^y			Tuber number ^x			Tuber dry matter ^w		
	kg/10a	rTY	rASV_TY	ea/plant	rNT	rASV_NT	%	rDM	rASV_DM
G01	2,515	23	11	8.56	8	7	18.80	15	9
G02	3,348	6	9	8.22	13	19	19.67	11	1
G03	2,298	16	22	6.71	21	2	16.21	23	8
G04	2,681	19	21	7.56	16	6	17.09	20	21
G05	3,478	5	10	7.55	19	16	19.18	13	19
G06	2,818	17	7	5.67	24	1	17.53	18	12
G07	3,304	11	2	6.53	22	3	17.89	16	11
G08	2,636	22	1	8.37	11	12	16.83	21	23
G09	3,340	7	23	7.35	20	11	20.98	4	4
G10	3,365	3	6	7.72	17	10	17.65	17	6
G11	2,696	18	5	11.55	1	9	16.77	22	20
G12	3,011	15	16	10.68	3	17	21.36	2	3
G13	3,767	2	13	10.73	2	4	19.65	12	7
G14	3,317	10	24	8.28	12	23	16.09	24	10
G15	3,277	12	17	10.39	4	14	17.22	19	13
G16	3,587	4	8	8.39	10	24	20.05	9	14
G17	3,130	14	14	9.21	6	8	14.84	14	22
G18	2,257	24	15	8.92	7	21	20.05	8	24
G19	2,652	20	4	5.71	23	13	20.79	6	16
G20	3,335	8	20	7.70	18	18	20.90	5	2
G21	3,154	13	12	7.92	14	5	19.93	10	15
G22	2,638	21	3	7.88	15	15	20.54	7	17
G23	3,333	9	18	8.42	9	20	22.06	1	5
G24	4,118	1	19	10.25	5	22	21.07	3	18

^zG01, Irish Cobbler; G02, Superior; G03, Jopung; G04, Namsuh; G05, Jasim; G06, Jasuh; G07, Jowon; G08, Sinnamjag; G09, Haryeong; G10, Seohong; G11, Hongyoung; G12, Jayoung; G13, Dejima; G14, Chubaek; G15, Chudong; G16, Chugang; G17, Chuyoung; G18, Bangul; G19, Shepody; G20, Atlantic; G21, Gawon; G22, Gahwang; G23, Goun; G24, Saebong.

^yrTY, rank of tuber yield (kg/10a); rASV_TY, rank of stability index in tuber yield.

^xrNT, rank of tuber number (ea/plant); rASV_NT, rank of stability index in tuber number.

^wrDM, rank of tuber dry matter (%); rASV_DM, rank of stability index in tuber dry matter.

적었다. 건물물의 경우 고운(G23), 자영(G12), 새봉(G24)이 건물물이 높았으나 추백(G14)이 건물물이 낮았다.

재배환경에 따른 농업형질의 안정성(AMMI stability value, ASV)을 검토하고 그 결과를 Table 7에 나타내었다. ASV는 IPCA2 점수에 대한 IPCA1 점수의 2차원적 산점도를 바탕으로 좌표점에서 원점까지의 거리를 나타내며, 네거티브 또는 포지티브 점수에 상관없이 IPCA 점수가 클수록 특정 환경에 대한 유전형의 변이가 심하고, IPCA 점수가 작을수록 모든 환경에서 유전형 변이가 적음을 의미한다. rASV (rank of AMMI stability value) 높으면 광범위한 환경에 적응성을 가진 유전형으로 평가할 수 있으나, rASV 낮을 경우 재배환경에 따라 농업적 형질의 변이가 심한 유전형으로 분류할 수 있다고 하였다(Fufa 2013).

수량성에서 안정성이 높은 품종은 신남작(G08), 조원(G07), 가황(G22) 순이었으나, 하령(HR)과 추백의 경우 안정성이 낮았다. 괴경수에서는 홍영(G11), 대지(G13), 조원(G07)이 안정성이 높았으나, 자서(G06)는 안정성이 낮았다. 건물물의 경우 수미(G02), 대서(G20), 자영(G12)이 안정성이 높은 것으로 나타났다.

우리나라에서 식용으로 90% 이상 재배 되고 있는 수미(G02)의 경우 수량성에서 rTY가 6위로 높고 안정성에서도 rASV_TY가 9위로 우수하였다(MFAFF 2013). 본 연구에서는 서홍(G10)이 수량이 많으면서(rTY, 3위), 안정성에서도 rASV_TY가 6위로 우수하여 수미(G02)를 대체할 식용 품종으로 가능성이 매우 높은 것으로 판단되었다.

또한, 우리나라에서 가공용으로 대부분 이용되는 대서(G20)의 경우 건물물이 높고(rDM, 2위), 안정성에서도 rASV_DM가 3위로 우수하여 가공용으로 오랫동안 이용되고 있다. 본 연구에서는 고운(G23)이 건물물이 가장 높으면서(rDM 1위), rASV_DM가 5위로 안정성도 높아 앞으로 대서(G20)를 대체할 가공용 품종으로 기대되었다.

농업적 형질의 AMMI biplot 분석

AMMI biplot은 농업적 형질에 대한 제 1 주성분(PCA 1)은 X축으로 제 2 주성분(PCA 2)은 Y축으로 GEI 효과를 시각적으로 보여준다(Fig. 4).

수량성은 강릉(E1)에서는 추백(G14), 진부(E2)는 고운(G23), 대관령(E3)은 하령(G09)이 높은 GEI 효과를 보이는 것으로 나타났다(Fig. 4A). 수량성 정도에 따라 적응성을 평가하였을 때, 수량이 낮은 그룹(2,100이상 2,700미만)에서는 신남작(G08), 홍영(G11), 세풍(G19), 가황(G22)이, 수량성이 중간인 그룹(2,700이상 3,500미만)은 조원(G07), 자심(G05)이, 수량성이 높

은 그룹(3,500이상 4,300미만)은 서홍(G10)이 재배환경에 걸쳐 안정적인 적응성을 보이는 것으로 나타났다.

괴경수는 강릉(E1)에서는 새봉(G24), 대관령(E3)은 방울(G18)이 GEI 효과가 높은 것으로 나타났다(Fig. 4B). 괴경수 정도에 따른 적응성 평가에서 괴경수가 적은 그룹(4이상 7미만)에서는 자서(G06), 조원(G07), 조풍(G03)이, 괴경수가 중간 그룹(7이상 10미만)은 가원(G21), 고운(G23)이, 괴경수가 많은 그룹(10이상 13미만)에서는 대지(G13)가 재배환경에 안정적인 적응성을 보였다.

건물물은 강릉(E1)에서는 서홍(G10), 진부(E2)는 추백(G14)이 GEI 효과가 있는 것으로 나타났으나 그 효과는 앞에서 언급한 다른 두 농업적 형질에 비해 크지 않았다(Fig. 4B). 가공용 감자의 경우 건물물이 중요한 요소인데 건물물이 낮은 그룹(15.5이상 18미만)에서는 추동(G15), 서홍(G10)이, 건물물이 중간 그룹(18이상 20.5미만)은 수미(G02), 가원(G21), 추강(G16)이, 건물물이 높은 그룹(20.5이상 23미만)에서는 대지(G20), 자영(G12), 고운(G23)이 안정적인 적응성을 가지는 품종인 것으로 분석되었다.

이상의 결과로, 수량성에서는 서홍(G10), 괴경수에서 대지(G13), 건물물에서 고운(G23)이 농업적 형질이 우수하면서, 안정적인 적응성을 가지는 품종인 것으로 분석되었다.

농업적 형질의 GGE biplot 모델 분석

GGE biplot(Genotype + Genotype and Environment)은 재배 환경과 유전형 사이의 관계를 유전형 중심으로 설명하는 모델이며, 주성분 1(PC 1)과 주성분 2(PC 2)로 감자 품종별 재배환경에 대한 GEI 효과를 나타낸다. 수량성, 괴경수, 건물물을 대상으로 GGE biplot 분석을 수행하였을 때, PC 1과 PC 2 합이 각각 전체의 89, 93, 96%를 차지하여 유전형과 재배환경이 농업적 형질에 영향을 미친 것으로 나타났다(Fig. 5).

재배환경을 가리키는 두 벡터 간의 각도가 좁을수록 재배환경 간 연관성이 강하고, 재배환경 벡터와 인접한 위치에 있는 품종은 GEI 효과가 크다고 하였다(Kroonenburg 1995, Yan & Tinker 2006; Yan et al. 2007). 본 연구에서도 수량성과 괴경수의 경우 강릉(E1)과 진부(E2) 두 지역을 나타내는 벡터의 각도가 좁아 연관성이 강한 것으로 분석되었으나, 대관령(E3)은 다른 두 재배 환경과 이루는 각이 매우 커서 독립적 환경인 것으로 나타났다. 그러나, 건물물은 수량성, 괴경수와 달리 3지역을 나타내는 벡터의 각도가 좁은 것으로 나타나 재배환경에 큰 영향을 받지 않음을 알 수 있었다. 또한, GGE biplot 분석을 통해 지역적응성 평가시 여러 지역 중 유사 지역 중 한 지역만 품종특성 평가에 큰 문제가 없어 품종개발에 필요한 재배시험의 규모를 줄일 수 있다고

Fig. 4. AMMI biplot showing the mean (main effect) vs. stability (PC1) view of both genotypes and environments on tuber yield (A), tuber number (B), and tuber dry matter (C) in 24 potato genotypes. Abbreviations of genotypes and environments are as given in Table 1 and 2.

Fig. 5. Vector view of GGE (genotype main effects plus genotype x environment interaction effect) biplot of on potato tuber yield (A), tuber number (B), and tuber dry matter (C) in 24 potato genotypes across three environments.

하였다(Choukan 2011). 본 연구에서도 수량성에서 강릉(E1)과 진부(E2) 지역이 유사성이 높은 것으로 분류되었다.

GGE biplot은 다양한 환경내에서 유전형의 발현 정도와 안정성을 동시에 표현함으로써 유전형간 비교가 용이하고 중심점에

서 멀리 떨어져 있는 유전형은 농업형질의 발현에 미치는 특정 환경의 영향이 크다는 것을 의미한다(Yan et al. 2007, Yan et al. 2000). 본 연구에서는 수량성에서 새봉(G24), 괴경에서 홍영(G11), 건물률에서 신남작(08)의 유전형은 특정 환경에서

Fig. 6. Polygon (which-won-where) view of GGE (genotype main effects plus genotype x environment interaction effect) biplot of on potato tuber yield (A), tuber number (B), and tuber dry matter (C) in 24 potato genotypes across three environments.

발현이 높았다(Fig. 5).

또한, GGE biplot 분석은 메가환경에서 안정적인 품종을 선발할 수 있는데 다각형 모양의 폴리곤 뷰(polygon view, which-won-where view)는 적지적품종 선정에 유용하게 활용될 수

있다(Gauch & Zobel 1997). 괴경수와 건물물의 경우 폴리곤뷰가 한 섹터의 환경을 가지고 있어 환경적인 영향보다 유전형이 큰 영향을 미치는 것으로 확인되었다(Fig. 6).

폴리곤뷰는 biplot 의 가장 자리에 위치한 유전형들을 서로

선(segment)으로 연결하여 표시함으로 유전형이 다각형 내에 포함된다. 각각의 유전형을 잇는 선은 다각형의 측면 또는 그 연장 부분에 수직으로 형성되어 biplot을 여러 부분으로 나눌 수 있다(Dia et al. 2016). 수량성의 경우 총 5개의 섹터(sector)로 구분되었으며, 각 섹터에서 메가환경의 특성을 나타내는 유전형이 분포하였다. 첫 번째 섹터는 방울(G18)이 하나의 메가환경을 나타내고, 두 번째 섹터는 하령(G09), 세 번째 섹터는 새봉(G24), 네 번째 섹터는 대지(G13), 마지막 섹터는 추백(G14)이 독립적인 메가환경으로 구분되었다. 각각의 메가환경의 꼭지점에 위치한 유전형들은 각각의 환경에서 최고의 성능을 보이므로 대지(G13)는 강릉(E1), 새봉(G24)는 대관령(E3)에서 최고의 수량성을 나타내었다.

이상의 결과, AMMI와 GGE biplot는 유전형의 발현이나 안정성 분석에 효과적으로 활용 가능하였다.

이러한 결과를 바탕으로 감자의 수량성은 재배환경이 큰 영향을 미치므로 품종별 최적지 선정을 통해 재배하는 것이 바람직하고, 건물물은 유전적 요인이 크므로 가공용 품종육성을 위해서는 건물물이 높은 품종을 교배하기 위한 양친으로 활용하여 육성하는 것이 필요하다고 판단되었다.

적 요

우리나라 주요 감자 품종 24품종을 대상으로, 해발고도별 재배환경이 다른 3개 지역에서 2년 동안 수량성, 괴경수, 건물물 등 농업 형질을 조사하고, 유전형(G)과 재배환경(E)과의 상호작용($G \times E$ interaction, GEI) 효과를 구명하기 위해 AMMI와 GGE biplot 모델 분석을 수행하였다. 감자 수량성은 환경과 상호작용이 차지하는 비율이 높고, 괴경수와 건물물은 유전형 효과가 차지하는 비율이 높았다. 재배환경별 수량성은 강릉 지역에서 ‘서홍’, 진부 지역에서 ‘대지’, 대관령 지역에서 ‘새봉’이 높았다. 유전형과 환경과의 GEI 효과를 분석한 결과로서, 수량성에서 ‘서홍’, 괴경수에서 ‘대지’, 건물물에서 ‘고운’이 안정성이 높았다. 우리나라에서 ‘수미’ 대체 품종으로 수량성과 안정성이 높은 ‘서홍’이 유망하였고, 가공용 주요 품종인 ‘대서’를 대체할 품종으로 ‘고운’이 선발되었다. 따라서, 감자의 농업적 형질의 AMMI와 GGE biplot 모델 분석 결과, 수량성은 재배환경이 큰 영향을 미치므로 품종별 재배적지 추천이 필요하고, 건물물은 유전적 요인이 커 가공용 품종육성을 위해서는 건물물이 높은 계통을 선발하는 것이 바람직한 것으로 판단되었다.

사 사

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

REFERENCES

1. Basford KE. 1982. The use of multidimensional scaling in analyzing multi-attribute genotype response across environments. *Aust J Agric Res* 33: 473-480.
2. Choukan R. 2011. Genotype, environment and genotype $\times$ environment interaction effects on the performance of maize (*Zea mays* L.) inbred lines. *Crop Breed J* 1: 97-103. DOI: <http://dx.doi.org/10.22092/cbj.2011.100349>
3. Dia M, Wehner TC, Hassell R, Price DS, Boyhan GE, Olson S, King S, Davis AR, Tolla GE. 2016. Genotype $\times$ environment interaction and stability analysis for watermelon fruit yield in the United States. *Crop Sci* 56: 1645-1661.
4. Food and Agriculture Organization of the United Nations Statistics (FAOSTAT). 2017. <http://www.faostat.org/>
5. 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
6. Gauch HG. 1988. Model selection and validation for yield trials with interaction. *Biometrics* 44: 705-715.
7. Gauch HG. 1992. Statistical analysis of regional yield trials: AMMI analysis of factorial designs, Elsevier, Amsterdam, The Netherlands
8. Gauch HG, Zobel RW. 1997. Identifying mega-environments and targeting genotypes. *Crop Sci* 37: 311-326.
9. Korea Seed & variety Service (KSVS). 2017. <http://www.seed.go.kr/protection/>
10. Kroonenberg PM. 1995. Introduction to biplots for GE tables. Res. Rep. 51. Dep. of Mathematics, Univ. of Queensland, Brisbane, Australia.
11. Ministry for Food, Agriculture, Forestry and Fisheries (MFAFF). 2013. Production and supply plan of major crop seeds in summer for 2013. Ministry of Agriculture, Forestry, and Fisheries. pp. 57.
12. National Climate Data Service System (NCDSS). 2016. <http://sts.kma.go.kr>. (in Korean)
13. Navabi A, Yang RC, Helm CJ, Spawer DM. 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.
14. Park MW. 2017. Study on effect of genotype and environment interaction on tomato fruit characteristics. Ph.D. thesis. Gyeongsang National Univ.
 15. Park MW, Chung YS, Lee SH. 2016. Quality changes in tomato fruits caused by genotype and environment interactions. Horti Sci Technol 35: 361-372.
 16. Piepho HP. 1997. Analyzing genotype-environment data by mixed models with multiplicative effects. Biometrics 53: 761-766.
 17. Pourdad SS, Moghaddam MJ. 2013. Study on seed yield stability of sunflower inbred lines through GGE biplot. Hella 58: 19-28.
 18. Purchase JL. 1997. Parametric analysis to described G x 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.
 19. Rural Development Administration (RDA). 2014. The Potato: Guidance of agricultural technology-31. Rural Development Administration, Suwon, Korea. pp. 24-120.
 20. Rural Development Administration (RDA). 2016. Standard farming text -The potato. Rural Development Administration, Suwon, Korea. pp. 16-290.
 21. Shim KB, Shin SH, Shon JY, Kang SG, Yang WH, Heu SG. 2015. Interpretation of genotype $\times$ environment interaction of sesame yield using GGE biplot analysis. Korean J Crop Sci 6: 349-354.
 22. Tolessa TT, Keneni G, Sefera T, Jarso M, Bekele Y. 2013. Genotype $\times$ environment interaction and performance stability for grain yield in field pea (*Pisum sativum* L.) genotypes. Int J Plant Breed 7: 117-123.
 23. van Dam J. 2002. Genetic characterisation of agronomic and morphological traits and the development of DNA markers associated with total glycoalkaloid content in the tubers of tetraploid potato (*Solanum tuberosum* L.). Ph. D Thesis. Wageningen University.
 24. van Oosterom EJ, Kleijn D, Ceccarelli S, Nachit MM. 1993. Genotype-by-Environment Interactions of Barley in the Mediterranean Region. Crop Sci 33: 669-674. doi:10.2135/cropsci1993.0011183X003300040004x
 25. Vargas M, Crossa J, van Eeuwijk F, Sayre KD, Reynolds MP. 2001. Interpreting treatment $\times$ environment interaction in agronomy trials. Agron J 93: 949-960.
 26. 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.
 27. Yan W, Hunt LA. 1998. Genotype by environment interaction and crop yield. Plant Breed Rev 16: 135-178.
 28. Yan W, Hunt LA, Sheng Q, Szlavnie Z. 2000. Cultivar evaluation and mega-environment investigation based on GGE biplot. Grop Sci 40: 597-605.
 29. Yan W, Rajcan I. 2002. Biplot analysis of test sites and trait relations of soybean in Ontario. Crop Sci 42: 11-20.
 30. Yan W, Tinker NA. 2006. Biplot analysis of multi-environment trial data: principles and application. Canadian J Plant Sci 86: 623-645.
 31. Yan W, Kang MS, Ma B, Woods S, Cornelius PL. 2007. GGE Biplot vs. AMMI Analysis of Genotype-by-Environment Data. Crop Sci 47: 641-653.
 32. Zobel RW, Wright MJ, Gauch HG. 1988. Statistical analysis of a yield trial. Agron J 80: 388-393.