

도입 초당옥수수 교잡종의 지역 적응성 및 농업 형질의 유전력 평가

이신영¹ · 강종원¹ · 왕승현² · 박태춘¹ · 정종욱^{3,†} · 소윤섭^{4,†}

Evaluation of Regional Adaptability in Introduced Super Sweet Corn Hybrids and Heritability of Agronomic Traits

Shin-Young Lee¹, Jong-won Kang¹, Seung-hyun Wang², Tai-choon Park¹, Jong-Wook Chung^{3,†}, and Yoon-Sup So^{4,†}

ABSTRACT This study evaluated newly introduced, commercial super sweet corn hybrids (*Zea mays* L.) for their potential as breeding materials. Agronomic traits were measured and variance components were obtained using a linear mixed model to estimate the heritability. The trials were carried out in 2018 at two locations (Haenam and Oksan in South Korea). All traits had low heritability, except for mid tasseling and silking days. These traits with low heritability mostly had low genetic variance component estimate. In case of ear height ratio, significant genotype by location appeared to be responsible for low genetic variance, which in turn led to low heritability. Low heritability estimates from the trials with commercial hybrids were perhaps because those hybrids were highly improved for commercial success. Hence, this does not necessarily point to them having poor potential as breeding materials. To overcome low heritability, significant genotype by environment interaction, and achieve high selection efficiency, intermating among hybrids is recommended to create new recombinants before inbred line development.

Keywords : adaptability, agronomic trait, breeding, heritability, super sweet corn

사료용 옥수수와 달리 꽃이삭으로 이용되는 초당옥수수는 품질과 이삭모양에서 높은 시장요구도를 만족하여야 한다 (Rangarajan *et al.*, 2002). 품종의 육성은 작물을 재배하는 농민과 생산물을 구매하는 소비자의 요구를 만족시켜야 한다. 여러 농업 형질 중에서 개화기, 초장, 착수고, 병해충 저항성, 재배 저항성 등은 효과적인 재배를 위해서 중요한 특성인 반면 이삭모양, 이삭크기, 식미특성은 시장성을 결정하는 중요한 요인이다(Tracy, 2001). 초당옥수수 소비자는 약 20~23 cm 길이의 이삭을 선호하고, 16~18열의 나선형이 아닌 일직선으로 알곡이 끝까지 뻗어있고, 알곡이 비교적 작고 깊으면서도 당도가 높고 향이 나는 이삭을 선호한

다(Tracy, 2001). 이러한 특성들은 품종, 그리고 품종과 지역의 상호작용효과에 의해 영향을 받는데 초당옥수수의 개발 환경은 최종 재배지의 그것과 다소 다를 수 있기 때문에 적응성 시험을 통해 품종의 재배안정성을 평가하는 것은 육종가에게 뿐만 아니라 재배 농가에게도 매우 중요하다 (Busey, 1983).

육종재료의 선택은 우수품종 개발에 있어 가장 중요한 요소 중 하나인데 여러 선택지 중 시판 중인 상업용 품종은 우수한 유전자들을 한 품종에 집적해 높은 가장 좋은 재료라 할 수 있다. 하지만 Kleinhenz (2003)은 지역적응성 시험을 통한 품종의 평가에서 공시한 모든 품종에서 몇몇 주요 농

¹충북대학교 대학원 농학과 대학원생 (Graduate Student, Department of Agronomy, Chungbuk National University, Cheongju 28644, South Korea)

²강원도농업기술원 옥수수연구소 농업연구사 (Junior Scientist, Maize Research Institute, Gangwon-do Agricultural Research and Extension Services, Hongcheon 25160, South Korea)

³충북대학교 특용식물학과 교수 (Associate Professor, Department of Industrial Plant Science & Technology, Chungbuk National University, Cheongju 28644, South Korea)

⁴충북대학교 식물자원학과 교수 (Associate Professor, Department of Crop Science, Chungbuk National University, Cheongju 28644, South Korea)

†Corresponding author: Jong-Wook Chung; (Phone) +82-43-261-2524; (E-mail) jwchung73@cbnu.ac.kr
Yoon-Sup So; (Phone) +82-43-261-2517; (E-mail) yoonsupso@cbnu.ac.kr

<Received 19 February, 2021; Revised 9 May, 2021; Accepted 10 May, 2021>

업 형질이 기대에 미치지 못하여 하나의 품종이 모든 목표 형질을 만족하지는 못한다고 하였다. 따라서 신규자원을 수집 평가하고 자원 내의 유전 가능한 변이 수준을 추정하는 것은 그 자원으로부터 품종 개발 가능성을 예측하고 육종 과정에서 선발 방법을 선택하기 위해 중요한 과정이다.

자원의 평가로부터 관측한 전체분산(V_P)은 환경분산(V_E)과 유전분산(V_G)으로 나눌 수 있고 유전분산은 다시 유전자의 상가적 효과에 의한 분산(V_A), 우성효과에 의한 분산(V_D), 그리고 상호작용 효과에 의한 분산(V_I)으로 나눌 수 있다(Falconer & Mackay, 2005). 이러한 분산을 분산구성요소(variance components)라 하며 유전 가능한 변이 수준의 추정에는 분산구성요소의 추정으로부터 시작한다. 유전 가능한 변이 수준을 유전력(heritability)이라 하며 광의의 유전력(broad-sense heritability, H^2)과 협의의 유전력(narrow-sense heritability, h^2)으로 구분할 수 있다. 광의의 유전력은 관측한 전체분산에서 유전분산이 차지하는 비율이며 이 유전분산 중 상가적 효과에 의한 분산만의 비율을 협의의 유전력이라 한다. 이로 인해 협의의 유전력은 광의의 유전력보다 육종가에게 더 중요한 의미를 가진다. 하지만 추정을 위해 유전분산의 구성요소인 상가적 분산, 우성분산, 상위성 분산을 각각 추정하여야 하는데 이를 위해서는 특별한 교배조합을 생성하고 평가해야 하는 복잡한 교배조합 설계가 수반되어야 한다(Falconer & Mackay, 2005).

본 실험에서는 지역 적응성 시험을 통한 도입 초당옥수수 자원의 농업 형질을 조사하고 혼합 선형 모형을 이용하여 조사 형질의 분산 구성요소를 추정하고 이를 통해 형질들의 유전력을 추정함으로써 신규 자원이 가진 육종재료로서의 가치를 평가하고, 이를 이용한 초당 옥수수 품종 육종 과정에서 선택할 수 있는 육종 및 선발 방법을 도모하고자 하였다.

재료 및 방법

본 시험에는 총 18개의 상업용 초당 옥수수 1대 교잡종을 이용하였다. 이들 중 16개는 미국에서 시판되는 품종이며 1개는 미국에서 수입되어 국내에서 판매되는 품종이었고 나머지 1개는 원산지는 미국이지만 일본에서 판매되는 품종이었다.

시험 품종을 2018년 4월 20일에 전남 해남(36° 39' 26.0" N 127° 22' 25.2" E), 2018년 4월 21일에 충북 옥산(34° 34' 07.3" N 126° 39' 38.4" E)에 파종하였다. 시험구의 크기는 2 m 3줄, 재식밀도는 줄간 70 cm, 주간 25 cm였으며 난피법 3반복으로 설계하였다. 주수확보를 위해 2립 파종 후 초장 약 30 cm 정도 크기에서 1주로 솎아 주었다. 비배관리,

잡초방제 및 병해충 관리는 농촌진흥청 표준재배법에 준하였다(RDA, 2011). 조사 형질은 개화 관련 3개 형질, 초형 관련 4개 형질, 이삭관련 6개 형질, 식미관련 2개였다.

출용기(mid-tasseling days)는 파종 후 시험구 50% 개체에서 수꽃의 화분 비산이 시작되는 일수를 조사하였고 출사기(mid-silking days)는 파종 후 시험구 50% 개체에서 옥수수 암꽃(silk)이 1~2 cm 가량 출현한 일수이며 암수꽃 개화기차이(nicking)는 출사기에서 출용기를 뺀 값으로 양수는 출사기가 출용기보다 늦었다는 의미이며 음수는 출사기가 출용기보다 빨랐다는 의미이다. 옥수수는 일반적으로 암꽃보다 수꽃이 몇 일 먼저 피는데 화분비산 기간에 비해 암꽃의 생존기간이 길기 때문에 출용기가 출사기보다 빠르면 수분 가능 일수가 줄어든다(Tracy, 2001). 따라서 현대 옥수수 품종 개발에서 출사기가 출용기에 비해 같거나 빠르면 화분 비산기간 동안 수정이 가능해서 재배시 수정 확률을 최대화 할 수 있어 암수꽃 개화기차이는 중요한 형질이다. 품종간의 개화기 차이가 있기 때문에 2일 간격으로 각 시험구의 출용기와 출사기를 조사하였다.

간장(plant height)은 토양 표면으로부터 옥수수 수꽃의 가장 아래에 위치한 가지까지의 길이(cm)를 측정하는 것이며 착수고(ear height)는 토양 표면으로부터 최상위 이삭이 달린 마디까지의 길이(cm)를 측정하였다. 모두 시험구 내에서 가장 평균적인 개체를 육안 선별하여 측정하였다. 착수고율(ear/plant ratio)은 착수고를 간장으로 나누어 백분율로 표시하였다. 착수고는 전체 높이에서 최상위 이삭의 상대적 높이를 의미하며 이는 최상위 이삭의 절대적 위치를 의미하는 착수고와 함께 근도복과 관련되어 중요한 육종 형질 중 하나이다(So *et al.*, 2013). 분열수는 옥수수 출용 이후 시험구 중앙열의 모든 옥수수 개체의 분열수를 조사한 후 열내 옥수수 개체수로 나누어 조사하였다.

출사기로부터 21-22일 경 꽃이삭 수확시기에 시험구 모든 개체의 최상위 이삭을 수확 후 포엽 제거 전 전체 이삭무게를 측정(a)하고 포엽을 제거한 후 다시 전체 이삭무게(b)를 측정 후 (b)를 수확 개체수로 나누어 이삭개당무게(ear weight)를 구하고 (b)를 (a)로 나눈 백분율로 순이삭무게비(husking rate)를 측정하였다. 이삭열수(number of rows)는 이삭둘레를 따라 맺힌 옥수수알곡의 수를 의미하고 이삭둘레(ear length)는 이삭폭(ear width), 이삭둘레(ear circumference)는 모두 각 시험구의 대표 이삭 5개를 골라 측정 후 평균으로 계산하였다.

이삭의 당도(sweetness)와 부드러운 정도(tenderness)는 이삭길이, 폭, 둘레를 측정한 대표 이삭 5개를 3~5명이 1~5의 범위에서 관능 검사한 후 그 평균을 계산하였다. 1은 가

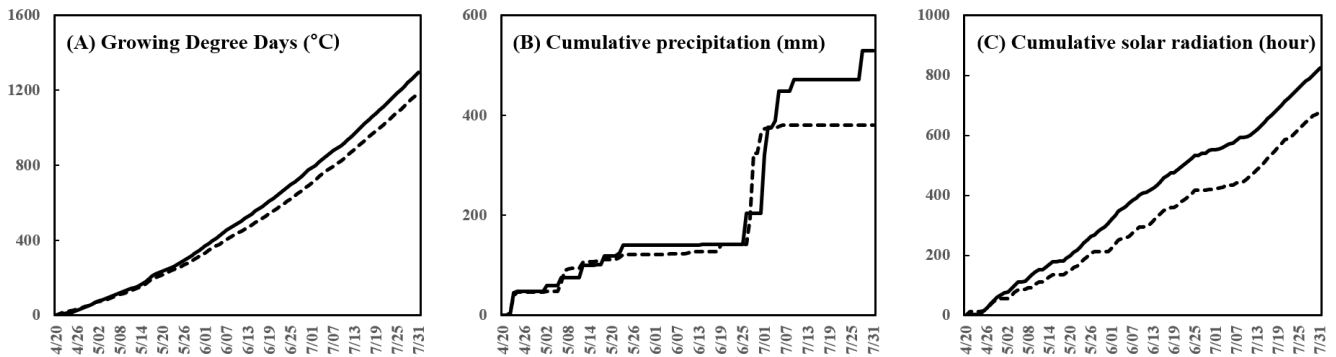


Fig. 1. Weather information at the field trial sites: Oksan (solid) and Haenam (dotted).

장 당도 또는 부드러운 정도가 우수한 품종이었으며 5는 당도 및 부드러운 정도가 좋지 않은 품종이었다.

각 지역에서 측정한 조사 형질 자료는 다음의 혼합선형 모형을 이용하여 합동 분산분석을 실시하였다.

$$Y_{ijk} = \mu + L_i + R(L)_{ij} + G_k + I_{ik} + \varepsilon_{ijk}$$

Y_{ijk} 는 i 번째 지역($i=1\sim 2$), j 번째 집구($j=1\sim 3$), k 번째 품종($k=1\sim 18$)의 관측치를 의미하며 μ 는 전체평균, L_i 는 i 번째 지역 주효과, $R(L)_{ij}$ 는 i 번째 지역에 지분된(nested) j 번째 집구 효과, G_k 는 k 번째 품종 주효과, I_{ik} 는 i 번째 지역과 k 번째 품종의 상호작용효과(genotype by environment interaction effect), 그리고 ε_{ijk} 는 i 번째 지역, j 번째 집구, k 번째 품종이 심긴 시험구의 실험 오차를 의미한다. 본 실험에서는 지역의 주효과와 집구 효과는 고정 효과(fixed effect), 품종의 주효과, 상호작용효과, 실험 오차는 각각 $N(0, \sigma_G^2)$, $N(0, \sigma_I^2)$, $N(0, \sigma_E^2)$ 와 같은 정규분포를 따르는 임의 효과(random effect)로 가정하였다.

유전력 추정을 위한 분산구성요소는 합동분산분석을 통해 얻을 수 있는 각 임의 효과의 평균 자승합(Mean Square, MS)과 그 기대 평균 자승합(Expected Mean Square, EMS)의 등식으로 추정할 수 있다. 실험 오차, 상호작용효과, 품종 주효과의 평균 자승합을 각각 M_E , M_I , M_G 라고 할 때 그 기대 평균 자승합은 각각 $M_E = \sigma_E^2$, $M_I = \sigma_E^2 + r\sigma_I^2$, $M_G = \sigma_E^2 + r\sigma_I^2 + rl\sigma_G^2$ 이다. 이 등식을 이용하여 상호작용효과 모분산($\sigma_I^2 = (M_I - M_E)/r$)과 품종 주효과 모분산($\sigma_G^2 = (M_G - M_I)/rl$)을 추정할 수 있으며 이를 통해 다음의 공식으로 광의의 유전력을 추정하였다(Falconer & Mackay, 2005).

$$H^2 = \frac{\sigma_G^2}{\sigma_G^2 + \sigma_I^2 + \sigma_E^2}$$

합동분산분석과 분산구성요소의 추정은 SAS 9.4 (SAS Institute Inc., Cary, NC) 프로그램의 GLM procedure (Proc GLM)와 RANDOM statement를 이용하여 임의 효과를 지정하였으며 형질 간의 상관분석은 품종의 전체 지역 평균을 이용하여 CORR procedure (Proc CORR)를 통해 수행하였다.

결과 및 고찰

기상 특성

신규 도입 상업용 초당옥수수 교잡종의 지역적응성 평가 지역인 전남 해남(파종일: 2018년 4월 20일)과 충북 옥산(파종일: 2018년 4월 21일)의 시험 기간 중 기상 특성은 다음과 같았다(Fig. 1). 유효적산온도는 충북 옥산이 파종 후 최초 5일간은 전남 해남에 비해 다소 낮았으나 그 이후 수확시기까지 계속해서 높게 나타났는데 실제 하루 늦게 파종한 충북 옥산의 출용은 6월 15일에 시작하여 6월 21일에 끝난 반면 전남 해남의 출용은 하루 늦은 6월 16일에 시작하여 6월 21일에 끝났다.

누적 강우량은 충북 옥산이 약 100 mm 정도 높았는데 두 지역 모두 5월 25일경부터 한 달 동안 강우가 거의 없어 봄 가뭄을 겪었으며 출사 직후 6월 말부터 1주일간 집중호우가 있었다. 누적 일조량은 충북 옥산이 전남 해남에 비해 시험기간 전반에서 높게 나타났다.

해남에 비해 북부지역인 옥산에서 파종일이 늦었음에도 출용이 빨랐던 것은 유효적산온도가 계속해서 높았기 때문일 것이다. 따라서 남부지역에서는 옥수수의 적정 파종시기 재배시 중부지역에 비해 조기출하 가능성은 낮으며 초당옥수수 조기 출하를 위해서는 3월 중순에서 4월 중순까지 평균 온도가 상대적으로 높은 시기를 적극 활용하여야 할 것으로 사료된다.

Table 1. Combined analysis of variance for flowering and plant stature traits from regional evaluation trials.

Source of Variation	df	Mean Square (p-value)						
		Flowering traits			Plant stature traits			
		Mid tasseling days	Mid silking days	Nicking	Plant height	Ear height	Ear/Plant ratio	No. of tillers
Location	1	149.34 (0.0003)	14.08 (0.0223)	71.7 (<0.0001)	16282.79 (0.0041)	267.59 (0.0766)	2146.69 (0.0039)	0.09 (0.5339)
Rep (Location)	4	1.1	1.07	0.09	463.81	47.54	59.64	0.2
Hybrid	17	12.24 (<0.0001)	19.49 (<0.0001)	2.01 (<0.0001)	426.62 (0.0003)	254.65 (<0.0001)	82.61 (0.012)	1.25 (<0.0001)
Hybrid*Location	17	0.99 (0.0528)	4.34 (<0.0001)	2.04 (<0.0001)	149.39 (0.3525)	175.93 (0.0048)	102.54 (0.0018)	0.32 (0.2192)
Error	68	0.56	0.87	0.52	133.11	71.81	37.7	0.25

Table 2. Combined analysis of variance for ear and palatability traits from regional evaluation trials.

Source of Variation	df	Mean Square (p-value)							
		Ear traits					Palatability traits		
		Ear weight	Husking rate	No. of rows	Ear length	Ear width	Ear circumference	Sweetness	Tenderness
Location	1	119467.26 (0.0018)	19.08 (0.4376)	3.7 (0.2912)	77.01 (0.0156)	0.02 (0.7149)	397.13 (0.0005)	18.41 (<0.0001)	50.13 (<0.0001)
Rep (Location)	4	2179.37	25.72	2.51	4.72	0.12	3.91	0.07	0.06
Hybrid	17	2732.39 (0.0064)	51.93 (0.5717)	3.57 (0.2098)	2.35 (0.0073)	0.16 (0.0011)	6.99 (0.001)	1.2 (<0.0001)	0.87 (<0.0001)
Hybrid*Location	17	687.24 (<0.0001)	33.86 (0.128)	3.57 (0.2113)	1.7 (0.0661)	0.08 (0.1239)	4.46 (0.0393)	1.36 (<0.0001)	0.96 (<0.0001)
Error	68	556.89	35.03	2.72	1.01	0.05	2.41	0.27	0.12

합동 분산분석

개화기 및 초형 관련 형질의 2개 지역 합동 분산분석을 실시한 결과는 다음과 같았다(Table 1). 수꽃의 개화기는 품종과 지역 상호작용효과의 유의성이 인정되지 않았다($p=0.0528$). 이에 반해 암꽃의 개화기와 암수꽃 개화기차이는 유의한 상호작용효과가 나타났다. 수꽃의 개화기간은 전남 해남에서 6월 16일부터 6일간 지속되었고 충북 옥산에서는 6월 15일부터 7일간 지속되어 두 지역 모두 마지막 시험구의 개화는 6월 21일에 끝났다. 암꽃의 개화기는 두 지역 모두 6월 17일에 시작되었는데 전남 해남은 6월 22일에 끝난 반면 충북 옥산에서는 6월 24일에 끝났다. 모든 지역에서 비닐 멀칭 재배를 하였고 5월 20일경부터 한 달 동안 비가 오지 않았으며 전남 해남은 논토양이었고 충북 옥산은 사질토였다. 해남은 가뭄 피해를 받지 않은 반면 옥산은 6월 20일 경부터 잎이 말리는 등 수분스트레스가 나

타나기 시작했는데 이로 인해 개화기가 늦은 품종들이 가뭄피해로 암꽃의 개화기가 늦어졌으며 이것이 유의한 상호작용효과로 나타난 것이라 생각된다.

초형관련 형질에서 유의한 상호작용효과는 착수고($p=0.0048$)와 착수고율($p=0.0018$)에서 나타났으며 초장($p=0.3525$)과 분얼수($p=0.2192$)에서는 나타나지 않았다. 초장은 지역 간에 유의한 차이($p=0.0041$)가 있었으며 전남 해남에서 충북 옥산보다 초장이 큰 것으로 조사되었다. 분얼수는 품종간 차이($p<0.0001$)가 있었으나 지역간 차이는 인정되지 않았다($p=0.5339$).

이삭 및 식미관련 형질의 2개 지역 합동 분산분석을 실시한 결과는 다음과 같았다(Table 2). 이삭관련 형질 중 유의미한 상호작용효과는 이삭개당 무게($p<0.0001$)과 이삭둘레($p=0.0393$)이었다. 순이삭무게비(husking rate)과 열수는 상호작용효과, 품종의 주효과, 지역의 주효과 모두 유의성

Table 3. Significant correlation coefficient among agronomic traits studied.

	Mid tasseling days	Mid silking days	Nick-ing	Plant height	Ear height	Ear Plant ratio	No of tillers	Ear weight	Huskin g rate	No of rows	Ear length	Ear width	Ear circum-ference	Sweet-ness	Tender-ness
Mid tasseling days															
Mid silking days	0.963***														
Nicking	0.525*	0.734***													
Plant height															
Ear height	0.599**	0.562*		0.779***											
Ear/Plant ratio	0.641**	0.626**		0.477*	0.918***										
No. of tillers			0.497*												
Ear weight	-0.469*	-0.488*													
Husking rate															
No. of rows								0.514*							
Ear length															
Ear width	-0.492*							0.572*							
Ear circumference								0.536*				0.948***			
Sweetness															
Tenderness								0.542*						0.823***	

*, **, *** indicate p<0.05, p<0.01 and p<0.001, respectively.

이 인정되지 않았으며 평균이 약 70%로 수확 무게에서 포엽이 약 30%를 차지하는 것으로 나타났으며 모든 도입자원의 이삭열수는 평균 16열 이었다.

식미 관련 형질인 당도와 부드러운 정도는 모두 상호작용효과가 인정되어 재배지역과 품종에 따라 서로 다른 식미를 가지는 것으로 조사되었다.

형질 간의 상관 관계

Table 3은 측정 형질 간의 상관분석 결과 중 유의성이 인정된 상관계수만을 나타내었다. 암꽃($r=-0.469^*$)과 수꽃($r=-0.488^*$)의 개화기가 이삭무게와 부의 상관 관계가 있는 것으로 나타났다. 옥수수 품종을 극조생, 조생, 중생, 만생종으로 구분하면 일반적으로 만생종일수록 이삭의 무게가 무거워져 정의 상관 관계를 가지게 된다. 하지만 공시 품종의 경우 개화기 차이가 약 5일 정도로 모두 중생종 정도라 개화기와 이삭무게의 유의미한 부의 상관은 품종 육종의 관점에서는 무의미상관(nonsense correlation)이라 할 수 있을 것이다.

유전력 추정

Table 4는 추정 분산구성요소와 유전력을 형질별로 정리하고 합동분산분석 결과에서 품종과 지역의 상호작용효과가 인정된 형질을 표시한 것이다. 개화관련 형질의 유전력 추정 결과 수꽃과 암꽃 개화기의 유전력은 각각 72.9%, 55%로 다소 높았다. 이와 대조적으로 암수꽃개화 차이에 대한 유전력은 음수로 추정되었는데 유전력은 분산값의 비율이기 때문에 음수를 가질 수가 없다. 하지만 기대평균자승합은 분산구성요소의 합으로 구성되기 때문에 음의 분산구성요소 추정치를 가질 수 있으며 이에 대해 고찰에서 다루기로 한다.

합동분산분석 결과 추정된 음의 값 유전력 추정치를 이해하기 위하여 각 지역별 분산분석을 통한 분산구성요소 및 유전력 추정을 실시하였다. 그 결과 암수꽃 개화차이는 해남에서 유전분산이 -0.01로 사실상 0에 가까웠는데 이는 18개 교잡종의 개화기 차이가 대부분 하루이하로 나타나 변이가 없었기 때문이었다.

초형관련 형질의 유전력은 초장과 착수고, 분얼수는 25%,

Table 4. Variance components and heritability estimates of agronomic traits from regional evaluation trials.

	Haenam			Oksan			Combined				Significance of Hybrid*Location interaction
	σ_E^2	σ_G^2	H^2	σ_E^2	σ_G^2	H^2	σ_E^2	σ_I^2	σ_G^2	H^2	
Flowering traits											
Mid tasseling days	0.52	1.34	72.0%	0.61	2.69	81.5%	0.56	0.14	1.88	72.9%	
Mid silking days	0.59	1.16	66.3%	1.14	6.21	84.5%	0.87	1.16	2.53	55.5%	***
Nicking	0.31	-0.01	-3.3%	0.74	1.01	57.7%	0.52	0.51	-0.01	-1.0%	***
Plant stature traits											
Plant height	112.77	62.56	35.7%	153.46	40.7	21.0%	133.11	5.43	46.21	25.0%	
Ear height	69.97	22.32	24.2%	73.66	73.33	49.9%	71.81	34.71	13.12	11.0%	***
Ear/Plant ratio	24.97	10.69	30.0%	50.42	25.89	33.9%	37.7	21.61	-3.32	-5.9%	***
No. of tillers	0.19	0.34	64.2%	0.3	0.03	9.1%	0.25	0.02	0.16	37.2%	
Ear traits											
Ear weight	494.1	369.1	42.8%	619.68	399.52	39.2%	556.89	43.45	340.86	36.2%	
Husking rate	29.77	1.24	4.0%	40.28	4.01	9.1%	35.03	-0.39	3.01	8.0%	
No. of rows	2.25	0.18	7.4%	3.18	0.39	10.9%	2.72	0.28	0	0.0%	
Ear length	0.45	0.38	45.8%	1.57	0.29	15.6%	1.01	0.23	0.11	8.1%	
Ear width	0.04	0.01	20.0%	0.07	0.03	30.0%	0.05	0.01	0.01	14.3%	
Ear circumference	0.25	0.24	49.0%	4.58	1.96	30.0%	2.41	0.68	0.42	12.0%	***
Palatability traits											
Sweetness	0	0.41	100.0%	0.54	0.27	33.3%	0.27	0.36	-0.03	-5.0%	***
Tenderness	0	0.46	100.0%	0.25	0.07	21.9%	0.12	0.28	-0.02	-5.3%	***

σ_E^2 : Environment variance, σ_G^2 : Genetic variance, σ_I^2 : Interaction variance, H^2 : Broad-sense heritability

11%, 37.2%로 낮게 나타났으며 반면 착수고율은 음의 추정값을 가졌는데 이는 각 지역별 유전력은 해남 30%, 충북 33.9%로 추정되어 합동분산분석에서의 결과와는 매우 달랐다. 이 형질의 합동분산분석결과에서 품종과 지역간 상호작용효과의 유의성이 인정되었는데 이로 인해 각 지역에서의 유전분산이 합동분산분석에서는 상호작용분산에 반영되면서 유전분산(-3.32)로 추정되면서 유전력 또한 음수로 추정된 것으로 사료된다.

이삭관련 형질 또한 대부분 유전력이 낮게 추정되었으며 이삭열수의 경우 유전력이 0으로 나타났다. 이삭열수는 상호작용효과가 유의하지 않음에도 불구하고 유전력이 0으로 나타났는데 이는 각 지역별 유전분산이 환경분산에 비해 극히 낮은 값을 보임에 기인하는 것으로 볼 수 있다. 공시 품종 모두 16~18열의 열수를 가지는 품종으로 유전적 변이가 거의 없기 때문이라 사료된다.

식미 관련 형질의 경우 모든 유전력이 음수로 추정되었는데 이것은 해남에서의 환경분산 추정값이 0이었기 때문

이며 이는 해남 시험 식미 평가시 수확이삭을 반복별로 구분하여야 하는데 품종별로 모든 반복의 이삭을 합쳐서 수행하였기 때문이다. 이러한 이유로 합동분산분석에서의 분산구성요소 및 유전력 추정값의 정확성이 낮을 것으로 사료된다. 다만 옥산에서 추정한 유전력은 당도 33%, 부드러움 정도 21.9%로 높지 않게 나타났다.

유전력 추정은 분산분석을 통해 계산된 평균자승합을 그 기대치에 대입하여 분산구성요소의 추정으로부터 계산한다. 비록 모든 분산구성요소들은 자승된 값이기 때문에 음수를 가질 수는 없지만 기대 평균자승합은 분산구성요소의 합으로 구성되기 때문에 계산과정에서 음수를 가질 수 있다. 예를 들어 $M_I = \sigma_E^2 + r\sigma_I^2 = M_E + r\sigma_I^2$ 에서 $M_I < M_E$ 가 될 경우 상호작용분산요소 σ_I^2 는 음수가 된다. 이와 유사한 이유로 $M_G < M_I$ 인 경우 음수가 된다. 즉 $M_G < M_I < M_E$ 의 경우 음의 유전력 추정값이 나올 수 있는데 실험오차의 평균자승합(M_E)가 큰 경우는 실험의 오차가 크다는 것이며 이는 시험구 재배 관리의 문제점에서 발생할 가능성이 크

Table 5. Comparison of heritability estimates of the current experiment with those obtained by Abe & Adelegan (2019).

	No. of rows	Plant height	Ear height	Mid tasseling days	Mid silking days	Nicking
Abe & Adelegan (2019)	77.60%	47.87%	65.90%	85.14%	67.41%	22.24%
Current experiment	0.00%	25.00%	11.00%	72.90%	55.50%	-1.00%

다 할 수 있다. 반면 상호작용의 평균자승합(M_1)이 큰 경우는 품종의 재배지역 적응성이 서로 다른 경우에서 기인한다. 이 경우 보유한 육종 재료의 재배 안정성이 낮거나 또는 품종의 목표재배환경이 지나치게 넓게 설정되었기 때문인데 본 실험의 경우 국내 재배를 목적으로 평가를 하였기 때문에 후자의 경우보다 육종재료의 안정성이 낮은 경우로 보아야 할 것이다. 따라서 유전력이 매우 낮거나 음수를 보인 경우 그 형질의 보완을 위하여 새로운 육종 재료의 확보가 필수적이라 할 수 있다.

Han & Adolphs (2020)는 표본크기가 충분히 크지 않을 경우 실제 매우 작은 유전력을 가진 형질의 추정치가 음의 값을 가질 수 있다고 하였다. 본 실험에서 유전력이 0 이하 값으로 추정된 형질은 모두 유전분산요인의 추정치가 0 이하의 값이었다. 암수 개화기차이는 상업용 품종 특성으로 육종을 통해 암수개화기의 차이가 거의 나지 않게 개량되었기 때문에 유전분산이 거의 없게 나타난 것으로 사료된다. 이삭열수 또한 모든 공시재료의 열수가 비슷하기 때문이며 착수고율, 당도, 부드러움 등은 그 이유가 분명치 않다.

Abe & Adelegan (2019)는 열대 초당옥수수 집단에서 주요 농업형질에 대한 광의의 유전력을 추정하였는데 이를 본 실험의 결과와 비교해 보면 수꽃과 암꽃 개화기는 비슷하였으나 이삭열수, 초장, 착수고, 암수 개화차이는 본 실험의 결과와 매우 달랐다(Table 5). 형질의 유전력 추정이 서로 다른 이유는 실험의 재료가 서로 다른 것으로 유전력의 추정과 해석은 일반화시키기 보다 유전력 추정을 위해 공시한 재료에 국한 시켜야 한다고 하였다(Holland *et al.*, 2003). 공시 재료의 차이는 결국 재료의 유전변이 차이로 나타나기 때문에 특정 형질의 개량을 위한 신규 자원 도입시 반드시 고려하여야 할 것이다.

전체적으로 낮은 유전력과 일부 유의한 상호작용 효과를 극복하고 육종 효율을 제고하기 위하여 도입 교잡종으로부터 직접적인 자식계통의 육성을 시작하기 보다는 자원 간의 intermating을 통해 유전자간 새로운 재조합을 유도한 후 자식계통 개발을 시작하는 것이 바람직할 것으로 보인다.

적 요

본 실험은 지역 적응성 시험을 통한 도입 초당옥수수 자

원의 농업 형질을 조사하고 혼합 선형 모형을 이용하여 조사 형질의 분산 구성요소를 추정하고 이를 통해 형질들의 유전력을 추정함으로써 신규 자원이 가진 육종재료로서의 가치를 평가하고, 이를 이용한 초당 옥수수 품종 육종 과정에서 선택할 수 있는 육종 및 선발 방법을 도모하고자 하였다.

1. 출용기와 출사기를 제외한 모든 형질의 유전력은 낮게 추정되었는데 이러한 형질은 분산구성요소 중 유전분산이 낮게 추정되었다. 착수고율의 경우 품종과 지역 간의 유의한 상호작용효과로 인해 낮은 유전분산이 추정된 것으로 보인다.
2. 측정 형질의 낮은 유전력 추정치는 시험 재료가 모두 최신 상업용 품종이기 때문일 것으로 사료된다. 따라서 육종재료로서의 낮은 잠재력을 의미하는 것은 아니다.
3. 낮은 유전분산과 유의미한 상호작용 효과를 극복하고 선발 효율을 극대화 하기 위하여 교잡종의 직접적인 자가 수정을 통한 자식 계통 개발을 진행하기 보다 intermating을 통한 유전자 재조합을 먼저 유기하는 것이 바람직할 것으로 보인다.

사 사

본 논문은 골든시드프로젝트(세부과제번호: 213009-05-3-SB620)의 지원으로 수행되었습니다.

인용문헌(REFERENCES)

- Abe, A. and C. A. Adelegan. 2019. Genetic variability, heritability and genetic advance in shrunken-2 super-sweet corn (*Zea mays* L. *saccharata*) populations. *Journal of Plant Breeding and Crop Science*, 11(4) : 100-105.
- Busey, P. 1983. Management of crop breeding, In: *Crop Breeding*, p. 31-54. Ed. Wood, D. R. *Crop Sci. Soc. Amer.*, Madison, WI., USA.
- Falconer, D. S. and T. F. C. Mackay. 2005. *Introduction to Quantitative Genetics*. 4th Ed. Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, USA.
- Han, Y. and R. Adolphs. 2020. Estimating the heritability of psychological measures in the human connectome project

- dataset. Plos One. doi: 10.1371/journal.pone.0235860
- Hanson, W. and H. Robinson. 1963. Statistical Genetics and Plant Breeding. National Academy of Sciences - National Research Council, Washington, DC. USA.
- Holland, J. B., W. E. Nyquist, and C. T. Cervantes-Martínez. 2003. Estimating and interpreting heritability for plant breeding: An update. Plant Breed. Rev. 2003 : 9-112.
- Kleinhenz, M. D. 2003. Sweet corn variety trials in Ohio: Recent top performers and suggestions for future evaluation. Hort-Technology 13 : 711-718.
- Knight R. L. 1948. Dictionary of Genetics, Chronica Botánica Co., Waltham, MA, USA.
- Lourenco, D. A. L., B. O. Fragomeni, H. L. Bradford, I. R. Menezes, J. B. S. Ferraz, I. Aguilar, S. Tsuruta, and I. Misztal. 2017. Implications of SNP weighting on single-step genomic predictions for different reference population sizes. J. Anim. Breed. Genet. 134 : 463-471.
- Oldenbroek, K. and L. van der Waaij. 2015. Textbook animal breeding : animal breeding and genetics for BSc students. Centre for Genetic Resources and Animal Breeding and Genomics Group, Wageningen University and Research Centre. <https://edepot.wur.nl/365431>.
- Rangarajan, A., B. Ingall, M. Orfanedes, and D. Wolfe. 2002. In-row spacing and cultivar affects ear yield and quality of early-planted sweet corn. Hort-Technology 12(3) : 410-415.
- RDA. 2011. Manual for maize production. Rural Development Administration.
- Smith, A., B. Cullis, and A. Gilmour. 2001. The analysis of crop variety evaluation data in Australia. Aust. N. Z. J. Stat. 43 : 129-145.
- So, Y. S., V. O. Adetimirin, and S. K. Kim. 2013. Observational study on the recovery from root lodging at flowering time and yield reduction in maize (*Zea mays* L.). Plant Breed. Biotech. 1(2) : 171-177.
- Tracy, W. F. 2001. Sweet corn. In: Specialty corns, 2nd Ed. p. 155-196. Ed. Hallauer, A. R. CRC Press, NY, USA.