국내 일대잡종 수수 품종개발을 위한 잡종강세 및 조합능력 검정

최명은^{1*} · 광도연¹ · 고지연² · 송석보¹ · 한상익¹ · 추지호¹

¹농촌진흥청 국립식량과학원, ²농촌진흥청 연구정책국

Heterosis and Combining Ability of F₁ Hybrid Grain Sorghum in Korea (*Sorghum bicolor* L.)

MyeongEun Choe^{1*}, Kwak Do-Yeon¹, Ko Jee-Yeon², Song Seok-Bo¹, Sang-Ik Han¹, and Jiho Chu¹

¹Department of Southern Area Crop Science, NICS, RDA, Miryang, 50424, Republic of Korea

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

Abstract A few inbred grain-sorghum varieties, developed and grown in Korea, have low productivity. Several hybrid cultivars have been demonstrated to be more productive and resistant to unfavorable environmental conditions than pure line varieties. However, very limited studies have been conducted on hybrid sorghum in Korea. Information on combining ability of Korean landraces based on parental materials is of great importance for increasing the productivity of sorghum through hybrid breeding programs. This study was conducted to determine the combining abilities of Korean sorghum landraces and cultivars. Two cytoplasmic male-sterile lines (A.Arg-1 and A03017) were crossed with 13 male-fertile lines to generate 26 experimental grain-sorghum hybrids. The hybrids were evaluated at two locations (Daegu and Miryang) in Korea in 2018. They were planted in three replications and standard agronomic practices were followed at both sites. There were significant ($p=0.001$) variations among genotypes for yield and secondary traits. For each trait, general combining ability (GCA) and specific combining ability (SCA) effects were estimated using the line-tester method. A positive heterosis for grain yield was observed in several hybrids. The A03017 × Sodamchal hybrids exhibited considerable heterosis of up to 54.1%. The lines 18AYT-S04 and Sodamchal displayed positive significant GCA effects for grain yield, and A03017 × Sodamchal crosses showed the highest positive SCA effects. The crosses, A.Arg-1 × 18OYT-S17, A.Arg-1 × Sodamchal and A.Arg-1 × 18OYT-S01 had high grain yields with waxy endosperms, and could be recommended for grain-sorghum breeding programs in Korea.

Keywords *sorghum bicolor* L., hybrid, combining ability, heterosis

Received on September 9, 2019. Revised on September 29, 2019. Accepted on October 2, 2019.

* Corresponding Author (Email: cme0807@korea.kr, Tel: +82-55-350-1244, Fax: +82-55-352-3059)

서 언

수수(*sorghum bicolor* L.)는 쌀, 밀, 옥수수, 보리와 함께 세계 5대 곡식으로 재배 적응성이 높아 반건조지역, 아열대 지역, 열대지역, 온대기후 등에서 폭넓게 재배되고 있다. 아시아와 아프리카에서는 수수 종실을 식량으로 소비하고 있으며 유럽과 미국에서는 식물체 전체를 사료용이나 산업용으로 이용하고 있다(Dykes et al. 2005).

우리나라는 오래전부터 수수를 이용하여 수수부꾸미, 떡, 전통술의 원료로 사용하였으며 근래는 주로 혼반용으로 소비하고 있다. 우리나라는 찰기가 있는 밥이나 떡을 선호하므로 배유 특성이 찰성인 품종 및 재래종이 주로 재배되지만 국외에서는 수량 및 농업 형질이 우수한 배유 특성이 메성인 품종을 주로

육성 및 재배해 왔다(Rooney et al. 2005). 기존의 연구에서 배유 특성이 찰성일 경우 소화성이 뛰어나 사료가치가 향상되며, 사료용이나 산업용으로 가공성이 더 유리하다는 결과가 있지만 (Brethour & Duitsman 1965, Sherrod et al. 1969, McCollough et al. 1972, Akay & Jackson 2001) 대부분의 육종 프로그램은 메수수 육성에 중점을 두어 찰성 자원에 대한 연구가 부족한 실정이다(Jones & Sieglinger 1952, Rooney et al. 2005).

일대잡종품종 재배를 통해 수수의 수량성을 30-40% 향상시킬 수 있으며(Mindaye et al. 2016) F₁의 유전형질이 교배친의 우량 형질을 상호보완적으로 나타날 경우 환경 스트레스에 대한 적응성이 높아지기도 한다(Kenga et al. 2004). 국내에서는 수수 일대잡종품종이 육성된 바 없으며 관련 연구도 이루어지지 않아 계통의 선발과 분석이 부재한 상황이다(Kim et al. 2017).

일대잡종품종 육성을 위해서는 우수한 유전자원 선별과 꾸준한 집단 양성이 필요하다. 일반조합능력 및 특수조합능력평가를 통해 육종의 효율성을 향상시킬 수 있다. 일반조합능력(GCA, general combining ability)은 우수한 유전형질 획득을 목적으로 하며, 특수조합능력(SCA, specific combining ability)은 일대잡종조합의 능력을 평가하기 위한 방법이다(Kenga et al. 2004). GCA는 상가적 유전효과(addictive gene effects)를 나타내고 특수조합능력은 비상가적유전(non-addictive gene effects) 형질을 나타내므로 조합 능력 검정을 통해 특정 형질의 유전적 영향을 추론할 수 있다(Falconer 1989).

본 연구에서는 국내 수수 육성 계통의 잡종강세 및 조합 능력 검정을 통해 수수 일대잡종품종 육성에 활용할 우량 계통을 선별하고, 수수 일대잡종 품종 육성 가능성 타진 및 효과적인 육종 전략을 세우고자 시험을 수행하였다.

재료 및 방법

시험재료

본 시험에서는 화분친 13계통을 두 개의 불임친(cytoplasmic male sterile lines)과 검정교배한 일대잡종조합 26계통과 그 교배친 15품종 및 계통을 대상으로 실험을 수행하였다. 13개의 화분친은 국내 수집 자원을 순계 분리하거나 국내 육성 품종을 교배친으로 활용해 육성한 우량 계통이며, 웅성불임친은 미국에서 육성

된 불임친 중 배유 특성이 찰성인 계통 A.Arg-1와 배유 특성이 메성인 계통 A03017을 사용하였다(Table 1).

재배 및 생육 특성

교배친 15품종 및 계통과 일대잡종 조합 26계통의 작물학적특성과 수량성 비교 시험을 국립식량과학원 남부작물부(밀양)와 대구시험지(대구, 하빈면)의 시험포장에서 실시하였다. 밀양에서는 2018년 6월 7일, 대구에서는 동년 6월 12일에 재식 밀도 60×20 cm, 1주 1본으로 파종하였다. 시험구는 길이 4 m, 폭 1.2 m, 난괴법(Randomized complete block design, RCBD) 3반 복으로 배치하였다.

시비량은 각 처리구 ha당 질소, 인산,加里 각각 100, 70, 80 kg/ha에 해당하는 양을 동일하게 전량 기비로 시용하였다. 파종 후 흑색 부직포로 피복하였고 기타 재배 관리는 수수 표준재배법에 준하였다.

시험 지역인 밀양, 대구의 작물 재배기간 중 평균온도는 27.8°C, 대구 28.2°C로 모두 7월이 가장 높았다. 계통 및 조합별 생육 특성을 비교하기 위해 개화기, 간장(height), 이삭 길이(head length), 이삭목 길이(exertion)을 조사하였다. 개화기는 시험구 50%에 해당하는 수수 이삭이 50% 개화한 시점을 조사하였다. 간장은 지면에서 지엽까지의 길이, 이삭 길이는 이삭의 첫 번째 화서 마디에서 이삭 끝까지 길이, 이삭목 길이는 지엽에서 이삭의 첫 번째 화서 마디까지의 길이로 측정하였다(Ringo et al. 2015). 수량 조사는

Table 1. Pedigree and endosperm type of parental sorghum line used to generate 26 F₁ hybrids.

No	Line	Fertility status ^z	Pedigree	Role in crosses	Endosperm type
1	Miryang12	CMF	Yeongwol landrace-2B-1-G(1)-1-1	male	waxy
2	Miryang14	CMF	(Jungmo4001/Kkomadansusu)-2B-1-4-1-1-1	male	waxy
3	18OYT-S01	CMF	(K201212/ Danyang landrace)-2B-1-5-1	male	normal
4	18OYT-S02	CMF	(K201212/ Danyang landrace)-2B-1-8-2	male	normal
5	18OYT-S03	CMF	(K201213/ Yeongwol landrace)-2B-4-1-2	male	waxy
6	18OYT-S04	CMF	(K201214/ Danyang landrace)-2B-1-G(2)-2-1	male	waxy
7	18AYT-S04	CMF	(BTx630/Miryang 11)-2B-G(169)-1-1	male	waxy
8	18AYT-S05	CMF	(RTx2907/Sodamchal)-2B-G(1)-1-1	male	waxy
9	18AYT-S07	CMF	[SA3006-1 (DAY-5812*5674)/Tx3338]-2B-G(1)-1-1	male	normal
10	18OYT-S17	CMF	(Tx2907/90EON343)-2B-G(1)-1-1	male	waxy
11	Nampungchal	CMF	Namhae-1-1-3	male	waxy
12	Sodamchal	CMF	(Hwanggeumchal/Jungmo4001)-2B-3-1-12-8-3	male	waxy
13	Donganme	CMF	IT201458-1-2	male	normal
14	A03017	CMS	unkown	female	normal
15	A.Arg-1	CMS	[(MR807//BTx624)bulk F1]-5-5-1-2-bk-bk-1-bk	female	waxy

^zCMF=cytoplasmic male fertile, CMS=cytoplasmic male sterile.

성숙기에 각 시험구 별로 이삭을 예취한 다음 10a당 kg 수량을 조사하였다.

통계분석

개화기, 간장, 수량 조사 결과를 바탕으로 잡종강세와 조합능력 검정 분석을 수행하였다. 잡종강세 분석에서는 교배 조합의 우수 교배친 대비 잡종강세(H_{bp} : Better parent heterosis)와 배유 특성별 가장 우수한 교배친 대비 잡종강세(H_{st} : Standard heterosis)를 아래식을 이용하여 계산하였다(Alam et al. 2004).

$$H_{bp} = (X_x - X_{bp}) / X_{bp} \times 100$$

$$H_{st} = (X_x - X_{st}) / X_{st} \times 100$$

X_x = 공시된 일대잡종조합 평균값,

X_{bp} = B-line, R-line 중 높은 값,

X_{st} = 공시 계통 중 수량이 가장 높은 교배친의 평균값

(매성 계통은 Donganme, 찰성은 18AYT-S05)

조합 능력 검정에서는 일대잡종 조합에 영향을 미치는 대부분의 차이를 독립적으로 평가한 일반조합능력 검정(GCA, General combining ability)와 상호작용을 평가한 특수조합능력(SCA, Specific combining ability)을 분석하였다(Kearsey & Pooni 1996).

$$GCA_A = A^* - Y^{**}$$

$$SCA_{A*B} = AB - (A^* + B^*)/2$$

A^* , B^* = line A 와 B 각각의 평균 값,

Y^{**} = 전체 평균, AB = line A와 B 일대잡종평균

수집된 데이터는 SAS 프로그램(V. 9.2, Cary, NC, USA)의 PROC ANOVA procedure를 이용하여 분산분석을 하였고, Duncan의 다중 범위 검정(Duncan's multiple range test, DMRT)을 통해 평균값을 $p \leq 0.05$ 유의수준에서 비교하였다.

결과 및 고찰

분산분석

두 가지 환경에서 수수 계통 및 일대잡종 조합의 수량성 등 5가지 형질을 대상으로 분산분석(F statistics)을 수행하였다 (Table 2). 환경(L; Location)과 교배친(F; GCA_{female} , M; GCA_{male})의 수량성, 개화기, 간장, 이삭 길이, 이삭목 길이 모두에서 유의한 차이($p \leq 0.05$)를 보였다. $L \times F$ 의 상호작용에서 수량성, 간장, 이삭 길이를 제외한 개화기와 이삭목 길이가 유의한 차이를 가졌으며, $L \times M$, $L \times F \times M$ 의 상호작용에서는 수량성, 개화기, 간장, 이삭 길이, 이삭목 길이 모두 유의한 차이($p \leq 0.001$)를 가졌다. 교배친의 일반조합능력 검정과 특수조합능력 검정에서 수량을 포함한 농업적 형질에서 유의한 차이를 나타냈다. 일반조합능력의 유의성은 상가적 유전이 이 형질들에 영향을 미치는 것을 의미하며 교배친을 통해 획득 가능한 형질임을 의미하며 특수조합능력의 유의성은 비상가적 유전의 영향이 형질에 영향을 미치는 것을 의미한다. 환경과 조합능력간에 유의한 차이를 가지는 형질들은 환경에 따라 특성 발현의 차이가 있을 수 있으므로 복수의 환경에서 검정되어야 한다는 점을 시사했다. 또한 계통의 특성이 유의한 차이를 가지는 것으로 보아 검정을 수행하기에 충분한 자원이 시험에 활용되었음을 알 수 있다.

Table 2. Mean square for yield and agronomic traits of sorghum hybrid across two locations in Korea.

Sources of variation	df ^z	Day to flowering	Height (cm)	Panicle length (cm)	Exertion (cm)	Grain yield (kg 10a ⁻¹)
GCA_{female} (F)	1	183.1***	5368.0***	25.1***	21.0*	8780***
GCA_{male} (M)	12	239.7***	3928.3***	74.7***	117.9***	32455***
Location (L)	1	1458.5***	144.8***	9.4*	28.1*	6671*
$L \times F$	1	15.4***	2.1	5.6	35.3***	2333
$L \times M$	12	40.7***	500.6***	27.4***	76.7***	6424***
$L \times F \times M$	12	30.4***	135.2***	15.0***	72.8***	2856***
SCA (F $\times$ M)	12	81.5***	336.8***	23.3***	74.4***	23741***
Rep[loc]	4	1.1*	54.3*	9.2***	8.8*	1012
Error	100	0.3	12.0	1.6	2.7	662

^zdf=degrees of freedom

*, **, *** indicates that means were statistically different at $p < 0.05$, $p < 0.01$ and $p < 0.001$, respectively.

농업적 형질 및 잡종강세

일대잡종 조합 26계통과 그 교배친 15계통의 두 지역(밀양, 대구) 수량 및 농업적 형질 조사 결과를 나타내었다(Tables 3, 4). 개화기가 가장 빠른 일대잡종 조합은 A.Arg-1 × 18OYT-S01 (57.2 일)이었고 가장 늦은 계통은 A03017 × 18OYT-S04 (80.0 일)이었다. 교배친 개화기는 평균 67.9일이며 일대잡종 조합 개화기는 평균 63.7일로 교배친 대비 일대잡종조합의 개화기가 빠른 경향을 보였다. 일반적으로 일대잡종 조합이 자식 계통보다 개화기가 빠른 생육특성을 가지고 있었으나 Miryang14, 18AYT-S07, Nampungchal, 18OYT-S04와 같은 일부 계통은 일대잡종 조합의 개화기가 지연되기도 하였다(Knoll & Anderson 2016). 자식 계통의 간장은 남풍찰이 142.4 cm로 가장 컸고 18OYT-S17이 75.6 cm로 가장 작았다. 일대잡종 조합의 간장을 조사한 결과 A.Arg-1 × 남풍찰이 157.2 cm로 가장 컸고 A03017 × 18AYT-S05가 71.2 cm로 가장 작았다. 수수의 간장은 4개의 유전자좌(Dw_1 , Dw_2 , Dw_3 , Dw_4)에 의해 결정되며 간장이 150 cm이하인 3-dwarf type이 종실 수수 생산 및 기계수확에 적절하며(Sleper DA &

Poehlman JM 2006), 일대잡종 조합 중 Arg-1 × Nampungchal을 제외한 모든 계통들이 150 cm 이하의 간장을 가져 기계수확 조건에 부합하였다.

수수의 이삭이 잎집에 쌓인 경우 곰팡이와 해충 피해를 받기 쉬우므로 충분한 이삭 추출이 필요하다(Ringo et al. 2015). 일대잡종 조합의 이삭목 길이 평균은 9.5 cm, 교배친의 평균 이삭목 길이는 5.6 cm로 일대잡종 조합의 이삭목 길이가 더 긴 경향을 가졌다. 18AYT-S05의 수량은 472.4 kg/10a, 이삭목 길이가 0.5 cm인데 교배친으로 활용한 일대잡종 조합 A.Arg-1 × 18AYT-S05의 수량은 551.8 kg/10a 이삭목 길이는 9.7 cm이며 A03017 × 18AYT-S05의 수량은 509.4 kg/10a, 이삭목 길이는 8.9 cm로 수량성 증대뿐 아니라 이삭목 길이 증가로 병해충 및 기계화 수확 시 종실의 오염을 피할 수 있다. 기존 연구결과 이삭 추출은 우량 자원과의 교배로 획득 가능한 형질로 일반조합능력검정을 통해 양의 값을 가진 계통을 교배친으로 활용할 경우 우수한 이삭 추출을 기대할 수 있으며 12~15 cm 정도가 재배에 용이한데 Arg-1 × Sodamchal 등 7개 계통이 12 cm 이상의 이삭목 길이를 가졌다(Moncada 2007).

Table 3. Yield and agronomic traits of sorghum parents across two sites.

Line	Days to flowering	Height (cm)	Head length (cm)	Exertion (cm)	Yield (kg/10a)
parents with waxy endosperm					
18OYT-S03	71.5	76.3	28.7	7.5	467.2
Miryang14	66.8	93.3	29.2	4.8	385.5
18AYT-S04	65.3	102.6	28.8	11.3	452.8
18AYT-S05	69.3	89.9	31.4	0.5	472.4
18OYT-S04	68.2	97.7	30.7	7.6	384.7
Miryang12	72.3	113.2	24.7	3.2	437.0
18OYT-S17	65.2	75.6	29.9	1.8	332.3
Nampungchal	68.7	142.4	28.6	4.9	465.7
Sodamchal	67.8	99.3	22.3	6.0	361.5
B.Arg-1	65.7	97.0	25.2	11.3	404.3
Mean value	68.1	98.7	28.6	5.9	422.4
parents with normal endosperm					
18OYT-S01	61.0	119.9	27.2	3.5	226.3
18OYT-S02	70.8	101.3	26.8	5.3	439.3
18AYT-S07	69.8	85.7	26.3	6.8	430.4
Donganme	67.7	117.2	24.0	1.8	508.2
B03017	67.7	91.5	31.1	7.0	411.0
Mean value	67.4	103.1	27.1	4.9	403.0
Mean value of all parents	67.9	100.2	27.6	5.6	411.9
p value	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
SD	4.7	21.7	3.9	4.5	85.1

Table 4. Yield and agronomic traits of sorghum hybrid across two sites.

Line	Days to flowering	Height (cm)	Head length (cm)	Exertion (cm)	Yield (kg/10a)	H_{st} (%)
Hybrid with waxy endosperm						
Arg-1 × 18OYT-S01	57.2	89.7	29.5	10.3	543.0	15.0
Arg-1 × 18OYT-S02	60.2	111.2	29.7	13.5	486.0	2.9
Arg-1 × 18OYT-S03	59.2	94.9	31.3	11.5	473.8	0.3
Arg-1 × Miryang14	67.8	121.6	32.3	16.4	525.2	11.2
Arg-1 × 18AYT-S04	60.0	107.3	33.3	5.1	573.3	21.4
Arg-1 × 18AYT-S05	60.7	103.2	31.2	9.7	551.8	16.8
Arg-1 × 18AYT-S07	70.0	109.6	29.6	9.8	479.6	1.5
Arg-1 × 18OYT-S04	63.0	101.4	31.3	11.2	475.9	0.7
Arg-1 × Miryang12	63.5	110.7	34.0	7.6	563.9	19.4
Arg-1 × 18OYT-S17	59.0	89.4	31.5	5.0	568.0	20.3
Arg-1 × Nampungchal	69.2	157.2	28.2	6.3	508.1	7.6
Arg-1 × Donganme	63.0	110.2	24.5	5.9	520.3	10.2
Arg-1 × Sodamchal	61.2	112.6	27.9	15.7	555.9	17.7
Mean value	62.6	109.1	30.3	9.8	525.0	
Hybrid with normal endosperm						
A03017 × 18OYT-S01	59.8	71.9	26.4	11.6	394.2	-22.4
A03017 × 18OYT-S02	62.7	99.4	29.3	6.9	615.6	21.1
A03017 × 18OYT-S03	63.7	103.1	34.8	15.4	564.5	11.1
A03017 × Miryang14	70.0	118.9	35.2	15.9	442.1	-13.0
A03017 × 18AYT-S04	62.0	97.2	36.9	9.3	630.4	24.0
A03017 × 18AYT-S05	57.5	71.2	32.5	8.9	509.4	0.2
A03017 × 18AYT-S07	67.5	99.6	30.3	12.9	537.0	5.7
A03017 × 18OYT-S04	80.0	87.0	31.2	1.8	364.0	-28.4
A03017 × Miryang12	68.5	93.8	28.3	2.9	580.1	14.1
A03017 × 18OYT-S17	60.3	77.1	32.1	8.0	547.9	7.8
A03017 × Nampungchal	67.7	145.0	28.7	9.3	620.2	22.0
A03017 × Donganme	64.2	113.6	27.6	8.8	581.4	14.4
A03017 × Sodamchal	58.2	88.6	31.5	6.7	633.2	24.6
Mean value	64.8	97.4	31.1	9.1	540.0	
Mean value of all hybrids	63.7	103.3	30.7	9.5	532.5	
<i>p</i> value	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	
SD	6.4	20.7	3.5	5.4	75.1	

수량성 조사 결과 배유 특성이 찰성인 교배친은 332.3~472.4 kg/10a의 수량을 가졌으며 18AYT-S05의 수량이 472.4 kg/10a로 가장 높았고, 메성을 가진 교배친의 수량은 226.3~508.2 kg/10a로 동안메가 508.2 kg/10a로 가장 높았다. 13개의 교배친 중 배유 특성별 수량성이 가장 우수한 표준품종 대비(찰성 계통: 18AYT-S05, 메성 품종: 동안메) 잡종강세(H_{st})를 비교한 결과 배유 특성이 찰성 불임친 일대잡종 조합은 0.3~21.4%, 메성을

가진 불임친 계통은 -28.4~24.6%의 잡종강세를 보였다. 일대잡종 조합의 교배친 대비 잡종강세(H_{bp})는 -11.4~54.1%를 가졌고, 26조합 중 24조합이 양의 잡종강세를 가졌다(Fig. 1). 배유 특성이 메성인 일대잡종 조합 A03017 × 소담찰의 수량은 633.2 kg/10a로 54.1%의 가장 높은 잡종강세(H_{bp})를 보였으며, 배유 특성이 찰성인 A.Arg-1 × 18OYT-S17은 수량 568.0 kg/10a로 배유 특성이 찰성 불임친(A.Arg-1) 조합 중 40.5%로 가장 높은 잡종강세

Fig. 1. Sorghum hybrids showing positive better-parent heterosis for grain yield across two locations.

(H_{bp})를 보였다. 단, 절대 수량 비교에서 배유 특성이 착성인 대비 품종 18AYT-S05는 472.4 kg/10a이고 메성 대비 품종 동안메는 508.2 kg/10a으로 수량성 차이가 있다. 본 실험 결과를 통해 A.Arg-1 x 18OYT-S17 조합과 같이 배유 특성이 착성이지만 개화기가 59.0일로 교배친 대비(B.Arg-1 65.7일, 18OYT-S17 65.2일) 약 6일로 단축되고 수량이 568.0 kg/10a로 표준품종 대비 20.3% 향상된 일대잡종 수수 품종 육성 가능성을 확인할 수 있다.

종실 수수 잡종강세 선행연구에서 23.9~39.6% (Blum et al. 1990), 13~88% (Haussmann et al. 2000), 81.9% (Ringo et al. 2015)의 잡종강세를 나타냈다. 본 연구의 잡종강세는 최대 54.1%로 수수 일대잡종 연구가 시작 단계임을 고려했을 때 지속적인 자원 선발을 통해 잡종강세 향상 가능성을 기대할 수 있다. 착성 수수는 메성 수수 대비 수량성이 9.2~10.9% 정도 낮고, 착성 일대잡종 조합이 메성 일대잡종 조합의 수량성에 미치지 못하지만 (Jones & Sieglinger 1952, Tovar et al. 1977, Rooney et al. 2005) 최근 지속적인 착성 계통 육성과 교배조합 선발을 통해 수량성을 높인 연구 결과가 있다(Miller et al. 1992, Miller et al. 1996). 본 연구에서도 메성 수수 자식 계통의 최고 수량 508.2 kg/10a과 대비하여 착성 수수 자식 계통 최고 수량은 472.4 kg/10a으로 7.6% 차이를 나타냈으며, 메성 수수 일대잡종 조합의 최고 수량 633.2 kg/10a과 대비하여 착성 수수 일대잡종 조합의 최고 수량은 573.3 kg/10a으로 10.0% 차이를 가졌다. 착성을 가진 계통이 메성을 가진 계통보다 수량이 낮은 원인은 알려져 있지 않지만 가설로는 (1) 유전학적으로 waxy locus와 수량간에 유전적으로 연관되어 있거나, (2) 착성 그 자체의 다면발현 효과(pleiotrophic

effects), (3) 착수수 육성이 메수수에 비해 비교적 최근이라 우량 계통이 육성되지 않은 이유를 가정할 수 있다(Aydin 2005). 두 번째 가설인 다면발현 효과에 의한 수량감소의 경우 극복이 어렵지만 첫 번째, 세 번째 가설과 같이 유전적 연관이나 우량 계통의 부재는 우수한 자원 육성과 조합선발을 통해 수량 증대가 가능하다. 메성 수수 일대잡종 조합의 평균 수량은 540.0 kg/10a로 착성 수수 일대잡종 조합의 평균 수량 525.0 kg/10a 대비 그 차이가 2.8%로 비슷한 수준이었다. 국외 메성 일대잡종 조합 수수와 수량성을 비교했을 때 450~650 kg/10a (Rooney et al. 2005), 5.7~6.3 Mg/ha (Rooney et al. 2011)로 본 시험 계통의 수량성은 최대 633.2 kg/10a로 우수한 편이며 착성 배유 특성에 따른 일대교잡종의 수량 감소가 17%였던 기존의 논문 결과 (Rooney et al. 2005)에 비해 본 연구에서 착성 계통의 수량성이 높은 편이다. 본문의 가설에 비추어 볼 때 국내 수수 육성연구는 착성을 중심으로 연구되어 조합 능력이 우수한 우량 계통을 확보하고 있음을 짐작할 수 있다. 특히 국내 기계화 재배에 적합한 소담찰(361.5 kg/10a)을 착성 불임친(A.Arg-1)과 교배했을 때 수량이 555.9 kg/10a, 잡종강세(H_{bp})가 37.5%을 나타내므로 일대잡종 조합 재배를 통한 수량 향상의 의미가 크며 추가 향상이 가능할 것으로 보인다(Fig. 1).

조합능력검정

교배친 중 A03017, 18AYT-S04, Sodamchal, Miryang12가 높은 양의 일반조합능력 값을 가졌다(Table 5). 일반조합능력의 절대값이 크다는 것은 교배를 통해 미치는 효과가 큰 것을 의미하므로 우수계통 선발에 이용 가능하다. 개화기 일반조합능력 검정

Table 5. Estimates of general combining ability effects of parent lines for different traits across two sites.

Parental line	Days to flowering	Height (cm)	Panicle length (cm)	Exertion (cm)	Grain yield (kg/10a)
Female parents					
A03017	1.1 ^{**z}	-5.5 ^{***}	0.4 [*]	-0.4	7.5 [*]
Arg-1	-1.1 ^{**}	5.5 ^{***}	-0.4 [*]	0.4	-7.5 [*]
Male parents					
Miryang12	2.3 ^{***}	-0.6 ^{ns}	0.4	-4.2 ^{***}	39.5 ^{***}
18OYT-S01	-5.2 ^{***}	-25.2 ^{***}	-2.8 ^{***}	1.5 [*]	-63.9 ^{***}
18OYT-S02	-2.3 ^{***}	0.8 ^{ns}	-1.3 ^{***}	0.7	18.3 [*]
18OYT-S03	-2.3 ^{***}	-1.9 ^{ns}	2.4 ^{***}	4.0 ^{***}	-13.4 ^{ns}
18OYT-S04	7.8 ^{***}	-8.6 ^{***}	0.5 ^{***}	-3.0 ^{***}	-112.6 [*]
Nampungchal	4.7 ^{***}	45.5 ^{***}	-2.3 ^{***}	-1.6 ^{***}	31.6 ^{***}
Sodamchal	-4.0 ^{***}	-3.7 [*]	-1.0 [*]	1.7 [*]	62.0 ^{***}
Donganme	-0.1 ^{***}	3.9 ^{***}	-4.7 ^{***}	-2.1 ^{***}	18.4 [*]
Miryang14	5.2 ^{***}	20.0 ^{***}	3.0 ^{***}	6.7 ^{***}	-48.8
18AYT-S04	-2.7 ^{ns}	3.3 ^{***}	4.4 ^{***}	-2.3	69.4 ^{***}
18AYT-S05	-4.6 ^{***}	-15.0 ^{***}	1.1 [*]	-0.2	-1.9 ^{ns}
18AYT-S07	5.1 ^{***}	0.5 ^{ns}	-0.8 [*]	1.9 ^{***}	-24.2 [*]
18OYT-S17	-4.0 ^{***}	-19.0 ^{***}	1.1 [*]	-3.0 ^{***}	25.5 ^{***}

^z, *, ** and *** indicates that means were statistically different at $p < 0.05$, $p < 0.01$ and $p < 0.001$, respectively.

에서 음성불임 계통 간 비교에서 A03017이 양의 값을 가지며 Arg-1이 음의 값을 가지는 것으로 보아 Arg-1을 이용하여 일대잡종품종을 육종할 경우 개화기가 빨라지는 경향을 가지며, 교배친 중에서는 18OYT-S01이 -5.2와 18AYT-S05가 -4.6으로 낮은 값을 가졌다. 그 예로 Arg-1 × 18OYT-S01의 개화기는 57.2일로 가장 빠른 개화기를 가졌다. 간장을 대상으로 한 일반 조합능력 검정에서 음성 불임친 중 A03017이 -5.5를 가졌으며 교배친 중에서는 Nampungchal이 45.5로 가장 높은 값을 가졌다. 수량성을 대상으로 한 일반 조합능력 검정에서 음성불임친 Arg-1은 음의 값을 가지는데 개화기가 이른 것과 이삭길이가 짧은 것은 수량감소와 연관된 형질임을 알 수 있다(Knoll & Anderson 2016). 특히 우수한 착성 일대 교잡종 수수 육성을 위해서는 일반조합능력이 우수한 음성불임친 육성이 필요하다. 계통별 일반조합능력 결과를 분석한 결과 18AYT-S04이 수량성에 대하여 69.4로 가장 높은 일반조합능력을 가졌고 개화기에 관하여 음의 조합 능력을 가지므로 수량이 높고 개화기가 빠른 수수를 생산하기에 적합한 교배친이다(Fig. 2A). 소담찰은 수량과 이삭 목 길이 조합 능력에 대하여 양의 값을 가지며, 개화기와 간장에 대해서는 음의 값을 가지므로 농업적 특성이 훌륭한 일대잡종품종 육성에 활용될 수 있다.

특수조합능력 수량성 검정에서 A03017 × 소담찰 조합과

A03017 × 18AYT-S04 조합이 각각 100.7과 97.9로 우수한 값을 가졌다(Fig. 2B). 배유 특성이 메성인 일대잡종 조합 중 A03017 × 소담찰의 수량이 633.2 kg/10a로 가장 높았으며, 배유 특성이 찰성인 일대잡종 조합 중에서는 A.Arg-1 × 18AYT-S04의 수량이 573.3 kg/10a로 가장 높았다. 기존 보고에 따르면 상가적 유전 효과가 수수의 수량에 지대한 영향을 미친다는 연구 결과가 있으나(Beil & Atkins 1967, Haussmann et al. 1999), 반드시 그 관계가 상통하는 것은 아니므로 수량성, 이삭 길이, 분지수, 개화기에 상가적 유전 효과와 비상가적 유전 효과가 함께 영향을 미친다는 연구결과도 있다(Liang & Walter 1968, Kenga et al. 2004). 두 조합의 교배친으로 활용된 소담찰과 18AYT-S04 일반조합능력검정에서 각각 62.0, 69.4로 높은 값을 가졌는데 교배친의 일반조합능력 결과와 특수조합능력 결과가 일치하는 것으로 보아 국내 육성계통들의 일대잡종 조합은 상가적 유전 효과가 크게 관여하는 것으로 보인다. 일대잡종품종을 통한 수량성 증대를 위해서는 수량성이 우수한 자원 선발을 통해 유전자를 집적해 가는 방향으로 진행되어야 하며 일반조합능력검정이 우수한 교배친을 이용할 경우 수량성이 우수한 일대잡종 조합을 선발할 가능성이 크다는 것을 의미한다. 포장 면적과 인력이 제한적인 국내 수수 육종 시스템을 극복할 수 있는 단초로 일반조합능력 검정을 통해 계통 선발을 선행할 경우 작은 규모로도

Fig. 2. Estimated of (A) general combining ability and (B) specific combining ability effects of hybrids for grain yield across two sites.

효과적인 일대잡종 수수 육종이 가능할 것으로 기대된다.

적 요

본 연구에서는 국내 재배 적합 일대잡종품종 수수 육성을 위해 두 개의 음성불입 계통(A.Arg-1, A03017)과 13개의 국내 육성 회복친 계통을 교배한 26조합을 대상으로 잡종강세와 조합 능력 검정을 수행하였다. 일대잡종 계통 26조합과 그 교배친 15계통의 수량 및 농업적 형질 조사 결과 교배친(67.9일) 대비 일대잡종 조합(63.7일)의 개화기가 빠른 경향을 보였고, 일대잡종 조합의 이삭목 길이 평균은 9.5 cm, 교배친의 평균 이삭목 길이는 5.6 cm로 일대잡종 조합의 이삭목 길이가 더 긴 경향을 가졌다. 표준품종 대비 잡종강세(H_{st})를 배유 특성별 최고값을 비교한 결과 찰성을 가진 일대잡종 조합은 21.4%, 메성을 가진 일대잡종 조합은 24.6%로 국내 육성계통을 이용하여 배유 특성이 찰성인 일대잡종품종 육성 가능성을 시사하였다. 일대잡종 품종 육성을 통해 생육시기를 단축하고, 이삭목 길이는 길어진 수량 높은 수수 재배의 경제성을 높일 수 있다. 특히 특수조합능력 및 일반조합능력에서 우수한 특성을 가진 소담찰과 18AYT-S04은 일대잡종품종 교배친으로 활용 가치가 높으며, 본 연구 결과 국내 자원을 활용한 일대잡종조합은 상가적 유전효과가 크게 관여하므로 일반조합능력을 활용한 계통 선발을 통해 육종을 효율화 할 수 있을 것으로 기대된다.

사 사

본 논문은 농촌진흥청 시험연구사업(세부과제명: 기계화 및 작부체계 적합 잡곡 품종 육성, 세부과제번호: PJ011365012019)의 지원에 의해 이루어진 것임.

REFERENCES

1. Akay V, Jackson Jr JA. 2001. Effects of Nutri Dense and waxy corn hybrids on the rumen fermentation, digestibility and lactational performance of dairy cows. J Diry Sci 84: 1698-1706.
2. Alam MF, Khan MR, Nuruzzaman M, Parvez S, Swaraz AM, Alam I, Ahsan N. 2004. Genetic basis of heterosis and inbreeding depression in rice (*Oryza sativa* L.). J Zhejiang Univ Sci A 5: 406-411.
3. Aydin S. 2005. The relationship between grain yield and waxy endosperm in *Sorghum bicolor* (Linn.) Moench. PhD Thesis. Texas A&M University.
4. Beil GM, Atkins RE. 1967. Estimates of general and specific combining ability in F₁ hybrids for grain yield and its components in grain sorghum, *sorghum vulgare* Pers. Crop Sci 7: 225-228.
5. Blum A, Ramaiah S, Kanemasu ET, Paulsen GM. 1990. The physiology of heterosis in sorghum with respect to environmental stress. Ann Bot 65: 149-158.
6. Brethour JR, Duitsman WW. 1965. Utilization of feterita-type and waxy endosperm sorghum grains in all-concentrate

- rations fed to yearling steers. Kans Agr Exp Sta Bull 34: 482.
7. Dykes L, Rooney LW, Waniska RD, Rooney WL. 2005. Phenolic compounds and antioxidant activity of sorghum grains of varying genotypes. J Agric Food Chem 53: 6813-6818.
  8. Falconer DS. 1989. Inbreeding and crossbreeding. pp 247-263. In: Mackay TFC (Ed.). Introduction to quantitative genetics. Longman Scientific & Technical. New York, USA
  9. Haussmann BIG, Obilana AB, Ayiecho PO, Blum A, Schipprack W, Geiger H, 2000. Yield and yield stability of four population types of grain sorghum in semi-arid areas of Kenya. Crop Sci 40: 319-329.
  10. Haussmann BIG, Obilana AB, Ayiecho PO, Blum A, Schipprack W, Geiger HH. 1999. Quantitative-genetic parameters of sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] grown in semi-arid areas of Kenya. Euphytica 105: 109-118.
  11. Jones MD, Sieglinger JB. 1952. Effect of the waxy gene on grain yields of sorghum. Oklahoma Agr Exp Sta Tech 44: 15.
  12. Kearsey MJ, Pooni HS. 1996. Half-sib mating designs. pp 84-85. (Eds.) The Genetical Analysis of Quantitative Traits. Chapman and Hall London, United Kingdom.
  13. Kenga R, Alabi SO, Gupta SC. 2004. Combining ability studies in tropical sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench). Field Crops Res 88: 251-260.
  14. Kim JI, Kim SK, Jung TW, Kwak DY, Kim KY, Ko JY, Woo KS, Song SB, Oh IS, Choe ME. 2017. Semi-dwarf grain sorghum (*Sorghum bicolor* L, Moench) variety 'sodamchal' with waxy endosperm. Korean J Breed Sci 49: 41-46.
  15. Knoll JE, Anderson WF. 2016. Yield components in hybrid versus inbred sweet sorghum. Crop Sci 56: 2638-2646.
  16. Liang GH, Walter TL. 1968. Heritability estimates and gene effects for agronomic traits in grain sorghum, sorghum vulgate pers. Crop Sci 8: 77-81.
  17. Moncada RAF. 2007. Genetic diversity and combining ability among sorghum conversion lines. PhD Thesis. Texas A&M University.
  18. McCollough RL, Drake CL, Roth GM. 1972. Feedlot performance of eight hybrid sorghum grains and three hybrid corns. Kansas Agric Exp Stat 557: 21-26.
  19. Miller FR, Prihoda KL, Rooney LW, Rosenow DT, Waniska RD. 1996. Registration of a food quality sorghum restorer parent Tx2907. Crop Sci 36: 479.
  20. Miller FR, Domanski C, Giorda LM. 1992. Registration of A/BTxARG-1 sorghum. Crop Sci 32: 1517.
  21. Mindaye TT, Mace ES, Godwin ID, Jordan DR. 2016. Heterosis in locally adapted sorghum genotypes and potential of hybrids for increased productivity in contrasting environments in Ethiopia. Crop J 4: 479-489.
  22. Ringo J, Onkware A, Mgonja M, Deshpande S, Rathore A, Mneney E, Gudu S. 2015. Heterosis for yield and its components in sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) hybrids in dry lands and sub-humid environments of East Africa. Aust J Crop Sci 9: 9-13
  23. Rooney WL, Odvody GN, Schaefer K, Collins SD. 2011. Registration of Tx2929 through Tx2934 sorghum germplasm. J Plant Regist 5: 123-127.
  24. Rooney WL, Aydin S, Kuhlman LC. 2005. Assessing the relationship between endosperm type and grain yield potential in sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench). Field Crops Res 91: 199-205.
  25. Sherrod LB, Albin RC, Furr RD. 1969. Net energy of regular and waxy sorghum grains for finishing steers. J Animal Sci 29: 997-1000.
  26. Sleper DA, Poehlman JM. 2006. Breeding sorghum and millet, pp. 508-541. (Eds.) Breeding field crops, Springer Science & Business Media. New York, USA
  27. Tovar D, Liang GH, Cunningham BA. 1977. Effect of the waxy gene on hydrolysis of sorghum starch. Crop Sci 17: 683-686.