

이면교배에 의한 흑자색미 안토시아닌 함량의 유전분석

권순욱* · 한상준* · 김홍열** · 류수노*[†]

*한국방송통신대학교 농학과, **국립식량과학원

Diallel Analysis for Cyanidin-3-glucoside Content in Pigmented Rice

Soon Wook Kwon*, Sang Jun Han*, Hong Yeol Kim**, and Su Noh Ryu*[†]

*Dept. of Agronomy, Korea Nat'l Open Univ., Seoul 110-791, Korea

**National Institute of Crop Science, Suwon 441-857, Korea

ABSTRACT A complete diallel cross was performed to determine the inheritance of 1,000 grain weight of brown rice and cyanidin-3-glucoside (C3G) content and combining ability of five pigmented rice that showed different level of C3G content. Parents and F₁ of 20 crosses were evaluated for 1,000 grain weight of brown rice and C3G content which extracted from pigmented rice grain with 0.1% trifluoroacetic acid (TFA) in 95% EtOH. For 1,000 grain weight of brown rice and C3G content, both additive and dominant gene effects were detected and the dominance was partial and there were more dominant alleles than recessive ones. Genetic parameters pointed out that there are significant additive and dominant effects and the additive effect is bigger than the dominant one for both grain weight and C3G content. The frequency of negative alleles were higher than positive alleles. Narrow sense heritability estimates were 0.66 for grain weight of 1,000 brown rice and 0.70 for C3G contents. General combining ability (GCA) effects and specific combining ability (SCA) effects were highly significant and GCA effects were drastically higher than SCA ones. It indicates that the inheritance of the C3G contents is controlled mainly by additive genetic factor.

Keywords : pigmented rice, anthocyanin, cyanidin-3-glucoside, diallel analysis, combining ability

지속적인 벼 재배면적 감소 및 1인당 쌀 소비량의 감소와 더불어 쌀의 소비성향이 고급화, 다양화됨에 따라 소비자들의 유색미, 향미 등 특수 용도 쌀 품종의 요구도가 높아지고

있다. 따라서 최근의 벼 육종은 수량증대, 품질향상 및 재배 안정성 증대 뿐만 아니라, 특수 용도 적성 품종육성 또한 중요한 목표로 자리매김 되었다. 특히, 흑자색미에 함유된 안토시아닌은 항산화 효과가 우수한 것으로 보고되어, 안토시아닌 고함유 흑자색미 육성은 쌀 소비 증대와 농가소득 증대에 크게 기여할 것으로 기대된다. 이러한 안토시아닌 색소는 80% 정도의 cyanidin-3-glucoside(C3G)와 peonidin-3-glucoside(P3G) 5%, malvidin, pelargonidin 및 selphinidin 등을 함유하는 것으로 보고된 바 있다(Ryu *et al.*, 1998; 2006).

이들 흑자색미의 안토시아닌 색소를 형성하는데 관여하는 것으로는 색소원인 Chromogen을 형성하는 C유전자와 이 색소원을 자색으로 발현시키는 A유전자의 보축작용으로 합성되고 조절유전자 P^l에 의해 지배되며, A유전자 없이 C와 P^l 유전자만 존재할 경우 적갈색미가 되는 것으로 알려졌다(Kinoshita, 1984; Reddy *et al.*, 1995). Jung *et al.* (2000b)은 흑진주/IR70078-AC3(백미) 조합에서 F₂ 종피색이 흑자색 : 적갈색 : 백색 = 9 : 3 : 4로 분리됨을 보고하였고, Park *et al.*(2000)은 흑진주와 상해향혈나 후대에서 얻어진 수원425호에 C, A, P^l 유전자가 존재함을 확인한 바 있다.

Park *et al.*(2000)은 흑진주 교배조합에서 잡종세대의 C3G 함량변이를 검토하여 조합에 따라 색소형질 유전자들의 활성화와 상호작용이 다를 가능성을 지적하였고, Kim *et al.*(2000)은 흑자색미 3개 품종간 교배조합에 따라 C3G함량변이가 다르며, 특히 상해향혈나/흑진주 조합 F₂에서 흑진주 보다 높은 개체들을 보고하였으며, Ryu *et al.*(2006)은 흑진주/수원425호 후대에서 C3G함량이 흑진주에 비해 5배 가량 높은 C3GH계통을 육성 보고하였다.

[†]Corresponding author: (Phone) +82-2-3668-4631
(E-mail) ryusn@knou.ac.kr <Received November 28, 2008>

본 연구에서는 흑자색미 5개 품종 및 계통을 완전 이면교배하여 얻어진 F₁의 농업형질과 안토시아닌 함량에 대한 교배모본의 조합능력을 검토하여 보고한다.

재료 및 방법

본 실험에 사용한 흑자색미는 흑진주, 수원425호, 상해향혈나, 용금1호, C3GHi 5개 품종 및 계통을 교배친으로 하여 완전이면교배한 20개 조합의 F₁과 모본을 2007년 농촌진흥청 국립식량과학원 시험포장에서 4월 25일에 파종하여 30 cm × 15 cm, 1주 1본식으로 5월 25일 이앙하였고, 시비 및 기타 재배관리는 국립식량과학원 표준재배법을 따랐다. 시험재료에 대한 출수기, 간장, 수장, 주당수수, 수당립수, 현미 천립중과 F₂종자의 종피를 분석하여 F₁의 C3G 색소함량에 대해 3반복으로 조사하였다.

종피에 함유된 안토시아닌 색소 중 C3G의 함량분석은 Ryu *et al.*(1998)의 방법을 따랐다. 종자를 제현하여 곱게 마쇄하여 분말 2 g에 0.1% trifluoroacetic acid(TFA)/95% EtOH 용매 20 mL를 가한 후 진탕 추출하였다. 추출액은 50 mL로 적정하여 0.45 µm PVDF syringe filter로 여과하여 HPLC(Waters 501 pump, millipore gradient controller, Waters 480 UV-Vis detector)를 이용하여 정량하였다. HPLC 분석은 ODS-5(4.6 mm × 250 mm, Nomura Chemical Co., Japan) column을 사용하였고, 530 nm 파장으로 검량하였다. 이동상으로 0.1% TFA in water, liner gradient, 0.1% in Acetonitrile을 사용하였고, 유속은 1.0 mL/min이었다.

이면교배 분석 및 유전모수 추정은 Hayman(1958)의 방법으로 하였으며, 조합능력 검정은 Griffing(1965)의 방법을 이용하여 수행하였다.

결과 및 고찰

교배모본과 F₁의 주요 농업특성 및 C3G함량

교배모본으로 이용된 흑진주, 수원425호 상해향혈나, 용금1호 및 C3GHi 계통의 주요 농업특성과 C3G함량은 Table 1에서 보는 바와 같다. 흑진주와 용금1호는 극조생종으로 출수기가 각각 7월 25일, 7월 24일이었으며, C3GHi 계통은 조생으로 8월 5일에 출수하였고, 수원425호, 상해향혈나는 중생 또는 중만생으로 8월 14일, 8월 17일경에 출수하였다. 간장은 상해향혈나와 C3GHi가 62-63 cm, 흑진주와 용금1호는 75-78 cm, 수원425호는 83.7 cm 정도였고, 수장은 5개 교배모본 모두 21.0 cm로 긴 편이었다. 주당수수는 수원

425호와 C3GHi는 8.0개 정도이고, 상해향혈나는 11.3개였다. 반면 수당 평균 영화수는 상해향혈나 83.4개, 수원425호와 C3GHi는 139개로 나타났다. 상해향혈나의 현미 천립중은 30.4 g으로 5개 교배모본 중 가장 높았으며, 용금1호, 수원425호, C3GHi, 흑진주 순으로 각각 27.2 g, 23.8 g, 17.8 g, 16.6 g이었고, 이들 품종 및 계통간 고도로 유의한 차가 인정되었다.

현미 100 g당 C3G함량은 C3GHi가 1,043.5 mg을 함유하여 211.5 mg인 흑진주에 비해 5배 가량 높았다. 용금1호, 수원425호, 상해향혈나는 각각 165.7 mg, 157.3 mg, 142 mg을 함유하는 것으로 조사되었고, 분산분석 결과 계통 및 품종간 고도로 유의한 차가 인정되었다. 이는 Park *et al.*(1998)이 보고한 결과에 비해 현미 100 g 당 절대량은 다소 감소하였으나, 동일한 경향을 얻었다. 이러한 연차간 변이는 흑자색미의 안토시아닌 함량이 광, 온도, 시비, 토양수분, 무기성분 등 여러 가지 요인들의 영향을 크게 받기 때문이다(Mazza & Miniati, 1993).

20개 조합 F₁의 현미천립중은 교배모본으로 흑진주와 상해향혈나 품종이 사용된 조합에서 초월분리를 보였고, 그 외 조합에서는 두 모본의 범위 안에 분포하였다. 특히 흑진주와 C3GHi 조합은 정역교배 모두 교배모본(16.6 g, 17.8 g)보다 높아진 18.9 g, 19.2 g으로 조사되었고, 상해향혈나와 용금1호의 정역교배 조합에서는 교배모본(30.4 g, 27.2 g)보다 크게 감소된 22.7 g, 22.9 g으로 조사되었다. 조합별 현미천립중은 수원425호/상해향혈나 조합에서 25.1 g으로 가장 높았고, C3GHi/상해향혈나 조합에서 18.1 g으로 가장 낮게 나타났다. C3G함량은 C3GHi 계통이 모본으로 사용된 조합을 제외한 대부분의 조합에서 초월분리가 관찰되었는데, 수원425호/상해향혈나 조합은 모본의 범위를 크게 벗어난 54.7 mg으로 나타났고, 상해향혈나/용금1호 조합은 또한 모본보다 감소된 방향으로 초월분리하였다. 20개 조합 중에서 수원425호/상해향혈나 조합의 가장 낮은 값을 보였고, C3GHi/용금1호 조합에서 가장 높은 C3G함량을 보였다(Table 1).

20개 조합의 F₁에서 출수기, 간장, 수장, 주당수수, 수당 이삭수, 현미천립중 및 C3G함량의 상관관계는 Table 2에서 보는 바와 같다. 출수기는 간장, 수장, 수당 영화수와 고도로 유의한 정의 상관을 보였고, 현미 천립중과도 유의한 정의 상관을 보였다. 이는 극조생 품종인 흑진주가 단간이며 현미 천립중이 16.6 g이나 중만생종인 상해향혈나의 현미 천립중이 30.4 g인 교배모본의 특성에 따른 것으로 판단된

Table 1. Mean value of major agronomic characters and cyanidin-3-glucoside content of parents and F₁s.

Variety	Days to heading (day)	Culm length (cm)	Panicle length (cm)	Panicle No./hill	Spikelet No./Panicle	Brown rice 1,000 grain weight (g)	C3G content (mg/100 g)
Heugjinju (1)	92	75.5	20.7	9.0	117.6	16.6	214.7
Suwon425 (2)	112	83.7	21.3	8.3	138.8	23.8	157.9
Sanghae hyanghyulla (3)	115	63.0	21.3	11.3	83.4	30.4	142.0
Yonggueml (4)	91	78.3	21.0	9.3	109.8	27.2	165.7
C3GHi (5)	105	62.3	21.3	8.0	138.9	17.8	1043.6
Anova	**	**	-	**	**	**	**
1×2	124	93.7	24.3	10.0	148.6	21.9	308.6
1×3	132	90.0	25.0	11.3	165.5	22.8	253.3
1×4	90	65.7	20.7	6.7	109.4	19.2	372.2
1×5	93	74.0	19.7	7.0	125.5	18.9	438.0
2×1	124	95.7	25.0	7.0	158.1	24.1	224.9
2×3	113	73.0	21.7	8.0	112.6	25.1	54.7
2×4	124	94.3	22.7	8.0	132.8	22.3	308.0
2×5	129	89.7	25.7	8.7	192.5	22.8	294.0
3×1	132	87.0	23.7	10.0	136.1	23.0	175.6
3×2	113	72.7	22.3	8.3	125.9	24.6	140.6
3×4	131	85.7	23.7	8.3	142.3	22.7	115.2
3×5	134	74.0	26.3	11.7	184.9	23.1	361.8
4×1	91	69.7	20.3	8.3	84.8	18.3	310.7
4×2	124	90.0	24.0	7.3	138.5	23.0	172.8
4×3	132	82.7	23.3	9.0	163.4	22.9	127.0
4×5	93	73.0	20.3	8.7	113.1	18.9	313.4
5×1	94	71.0	21.5	10.0	128.5	19.2	255.3
5×2	128	84.0	25.0	7.0	200.8	23.2	357.7
5×3	93	71.0	21.0	8.0	108.3	18.1	294.9
5×4	131	74.0	22.7	9.0	164.5	22.5	512.9

Table 2. Correlation coefficients among six agronomic characters and cyanidin-3-glucoside content for F₁s.

	Culm length	Panicle length	Panicles per plant	Spikelets per panicle	1,000grain weight of brown rice	C3G content
Days to heading	0.62**	0.87**	0.29	0.73**	0.48*	-0.14
Culm length		0.66**	-0.04	0.54*	0.22	-0.35
Panicle length			0.28	0.83**	0.35	-0.11
Panicles per plant				0.06	0.32	-0.16
Spikelets per panicle					0.09	0.24
1,000 grain weight of brown rice						-0.49*

* and ** indicate significance at 0.05 and 0.01 levels, respectively.

다. 현미 100 g의 C3G함량은 현미 천립중과 유의한 부의 상관관을 보였는데, 이는 Jung *et al.*(2000)이 흑진주/IR70078-AC3(흰색) 조합의 후대를 검토하여 C3G함량은 현미의 두께 및 천립중과 고도로 유의한 부의 상관관을 보여, 수량간에 고도로 유의한 부의 상관관을 관찰한 것과 일치하였다.

Wr-Vr의 분산분석과 회귀분석

이면교배에 의한 유전분석시 비대립 유전자간의 상호작용이 없어야 하는데, 현미 천립중과 C3G함량의 Wr, Vr의 분산분석 결과 두 형질 모두 Wr-Vr의 유의성이 인정되지 않았고, Wr+Vr의 유의성이 인정되어 유전자간 비대립 유전자 효과는 없고, 유전자의 상가적 효과와 우성효과가 존재하는 것으로 나타나 상가적-우성모델에 적합하였다 (Table 3).

현미 천립중의 분산과 공분산의 회귀분석 결과 $Wr = 2.58 + 1.07Vr$ 의 회귀직선을 얻었고, 회귀계수(1.07)의 1에 대한 유의성 검정결과 유의성이 없으므로 상가적-우성모델에 적합하였다. 또한 y절편이 정의 값을 가지고, 0에 대한 유의성

이 인정되므로 현미 천립중의 유전양식은 부분우성으로 나타났고, 현미 천립중이 가장 높은 상해향혈나는 원점으로부터 먼 열성 쪽에 분포하였다(Fig. 1-a).

C3G함량의 분산을 분석한 결과 $Wr = 17664.1 + 1.07Vr$ 의 회귀직선을 얻었고, 회귀계수(1.07)의 1에 대한 유의성이 인정되지 않으므로 상가적-우성모델에 적합하였다. 또한 회귀직선이 원점 위를 지나고, 0에 대한 유의성이 인정되므로 유전자가 부분우성으로 작용하였고, C3G함량이 월등이 높은 C3GHi 계통이 열성 쪽에 분포하였다(Fig. 1-b).

유전모수 분석

환경 분산을 이용하여 각각의 유전분산을 추정한 결과, 현미 천립중은 교배모본의 유전자간 상가적 분산(D)이 우성적 분산(H₁)에 비해 높게 나타나, 유전자가 상가적 효과가 우성적 효과보다 크게 나타났으며, 평균 우성정도((H₁/D)^{1/2})가 0.80의 부분우성을 보였다. H₂/4H₁은 0.16으로 정의 대립유전자 보다 부의 대립유전자 비율이 높게 나타났고, F값이 정의 값을 보여 우성유전자의 빈도가 높은 것으로 나타났으

Table 3. Analysis of variance for Wr + Vr and Wr-Vr in 1,000 grain weight of brown rice and cyanidin-3-glucoside content of 100 g brown rice.

	1,000-grain weight of brown rice				C3G content of 100 g brown rice			
	Wr + Vr		Wr - Vr		Wr + Vr		Wr - Vr	
	MS	F	MS	F	MS	F	MS	F
Block	49.487	ns	5.490	ns	638,414,003	ns	27,363,839	ns
Array	337.333	28.15**	1.067	ns	20,731,099,426	34.12**	97,698,433	ns
Error	11.984		1.516		607,590,543		43,850,337	

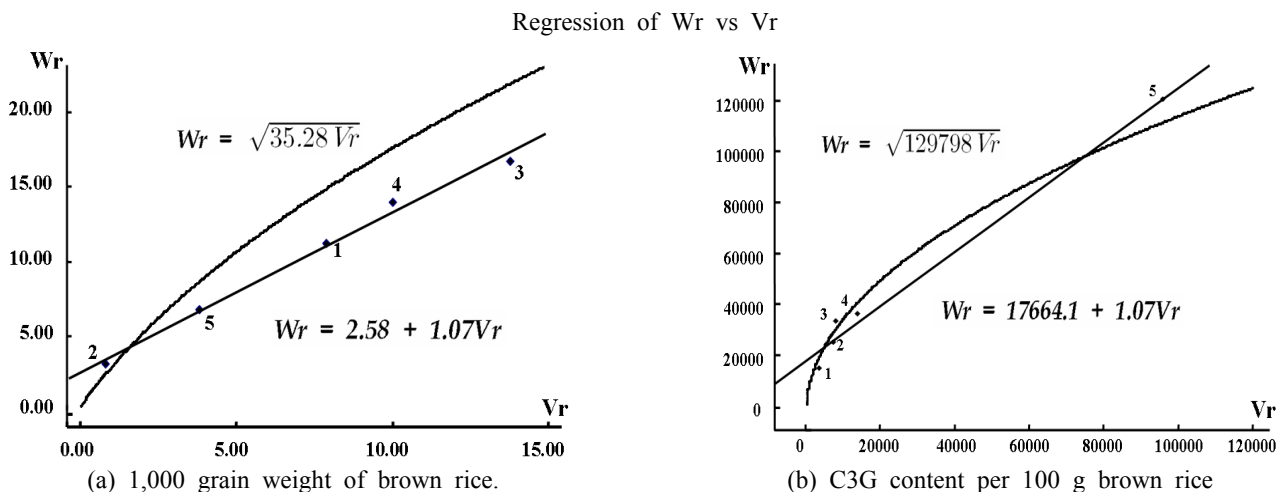


Fig. 1. Covariance and variance (Wr-Vr) regression graph for 1,000 grain weight of brown rice and cyanidin-3-glucoside content per 100 g brown rice. 1. Heugjinju 2. Suwon425 3. Sanghaehyanghyulla 4. Yongguem1 5. C3GHi.

며, 후대에서 현미 천립중이 감소하는 방향으로 작용하였다 (Table 4).

C3G함량은 유전자간 상가적 분산(D)이 우성적 분산(H_1)에 비해 높게 나타나, 유전자의 상가적 효과가 우성적 효과보다 크게 나타났으며, 평균 우성정도($(H_1/D)^{1/2}$)가 0.69의 부분우성을 보였다. $H_2/4H_1$ 은 0.16으로 정의 대립유전자 보다 부의 대립유전자 비율이 높게 나타났으며, 교배모본은 열성유전자에 비해 우성유전자를 3.8배정도 많이 가지고 있었다. F값은 정의 값을 보여 우성유전자의 관여도가 높음을 보여주는데, Fig. 1-b에서도 친품종이 원점에 가까이 많이 분포하였다.

현미 천립중과 C3G함량의 상가적 효과에 의한 협의의 유전력은 각각 0.66, 0.70이었고, 우성적 유전효과를 포함한 광의의 유전력은 0.98로 높게 나타났다.

일반조합능력 및 특정조합능력

일반조합능력은 교배모본이 여러 가지 조합에서의 평균값으로 상가적 유전효과에 의해 주로 나타나고, 특정조합능력은 특정 교배조합의 평균능력에 대한 편차로써 유전자간

우성효과 또는 상호작용에 의해 나타난다. 현미 천립중과 C3G함량에 대한 교배모본의 조합능력은 유전자간 상가적 효과와 우성효과 모두 고도로 유의하게 나타났고, 모성효과를 포함한 정역효과도 일부 인정되었다. 특히, 일반조합능력이 특정조합능력에 비해 월등히 큰 것으로 보아 교배모본이 가지는 유전자형의 상가적 효과가 우성효과에 비해 높게 나타났다(Table 5). 이는 Park *et al.*(2000)이 교배조합에 따라 색소형질 유전자들의 활성과 상호작용이 다를 가능성을 지적한 보고와 Kim *et al.*(2000)이 흑자색미 교배조합에 따라 C3G함량변이가 있다는 보고를 입증하는 것으로 차후 다양한 유전자원을 평가하고, 이들이 보유한 유전자형의 상가적 효과를 통해 보다 높은 C3G함량의 계통을 육성할 수 있을 것으로 평가된다.

현미 천립중은 교배모본의 일반조합능력 효과는 상해향혈나가 가장 높고, 흑진주와 C3GHi가 낮게 나타났으며, 특정조합능력은 흑진주/수원425호, 수원425호/C3GHi조합이 높은 반면, 상해향혈나/용금1호, 상해향혈나/C3GHi, 흑진주/용금1호의 조합에서 가장 낮게 나타났다(Table 6). C3G 함량에 대한 교배모본의 일반조합능력 효과는 C3GHi가 월등

Table 4. Genetic parameters for 1,000 grain weight and cyanidin-3-glucoside content.

Genetic parameter	1,000 grain weight of brown rice	C3G content
D : component of variation due to additive effect	35.14±6.5	152,225±427
H_1 : component of variation due to dominance effect	22.44±14.0	72,039±794
H_2 : $(H_1(1-(\mu-v)^2))$	14.28±10.1	44,654±567
F : mean of covariant of additive and dominance effects	28.90±14.7	121,107±952
$(H_1/D)^{1/2}$: mean degree of dominance	0.80	0.69
$H_2/4H_1$: proportion of genes with positive and negative effect in parents	0.16	0.16
kD/kR : proportion of dominant and recessive genes in the parents	3.12	3.78
hN : heritability in narrow sense	0.66	0.70
hB : heritability in broad sense	0.98	0.98

μ : proportion of positive genes in the parents; v : proportion of negative genes in the parents.

Table 5. Analysis of variance in GCA and SCA for 1,000-grain weight and cyanidin-3-glucoside content.

	1,000-grain weight of brown rice		C3G content	
	MS	F	MS	F
GCA	108.39	246.20**	442,056	134.64**
SCA	21.86	49.66**	70,264	21.44**
Reciprocal	6.68	15.18**	18,649	5.68**
Error	0.44		3283	

Table 6. GCA and SCA effect of 5×5 diallel analysis for 1,000 grain weight of brown rice.

Variety	GCA	SCA				
		Heugjinju	Suwon425	Sanghae hyanghyulla	Yongguem1	C3GHi
Heugjinju	-2.03	-1.44	1.60	0.62	-1.65	0.87
Suwon425	1.36		-1.03	-0.80	-1.16	1.39
Sanghae hyanghyulla	2.21			3.86	-1.84	-1.84
Yongguem1	0.33				4.50	0.15
C3GHi	-1.86					-0.58

Table 7. GCA and SCA effect of 5×5 diallel analysis for cyanidin-3-glucoside content.

Variety	GCA	SCA				
		Heugjinju	Suwon425	Sanghae hyanghyulla	Yongguem1	C3GHi
Heugjinju	-7.81	-54.32	56.87	41.54	92.92	-137.01
Suwon425	-66.89		7.12	-16.15	50.95	-98.78
Sanghae hyanghyulna	-103.92			65.22	-31.37	-59.25
Yongguem1	-28.27				-62.43	-50.07
C3GHi	206.90					345.11

이 높은 반면, 흑진주, 수원425호, 상해향혈나, 용금1호는 모두 감소하는 방향으로 나타났다. 특정조합능력에서는 흑진주/용금1호 조합이 가장 높았고 흑진주/C3GHi의 조합에서 가장 낮았다(Table 7).

이상에서 5개 흑자색미 계통 및 품종의 이면교배 분석 결과 현미천립중과 C3G함량 변이의 유전양식은 유전자의 상가적 효과와 우성효과가 부분 우성으로 작용하였고, 우성적 효과 보다 상가적 효과가 높은 것으로 나타나 교배를 통한 C3G 고함유 품종 육성이 가능하며, 일반조합능력이 우수한 C3GHi를 모본으로 사용하는 것이 효과적일 것으로 판단된다. 현미 천립중은 C3G함량과 유의한 부의 상관을 보여 단위면적당 C3G함량만을 높이기 위해서는 현미 천립중이 가볍고 호분층이 뚜꺼운 소립종을 육종재료로 활용하여야 효과적일 것으로 판단된다.

적 요

Cyanidin-3-glucoside(C3G) 고함유 흑자색미 계통을 육성하기 위해 흑진주, 수원425호, 상해향혈나, 용금1호, C3GHi 품종 및 계통들 간에 완전이면교배에서 얻은 20개 조합 F₁의 현미 천립중과 C3G함량에 대한 diallel analysis 및 조합능력 분석 결과는 다음과 같다.

1. 교배모본의 현미 천립중은 16.6 g(흑진주) - 30.4 g(상해향혈나)이고, 현미 100 g당 C3G 함량은 C3GHi가 흑진주의 5배 정도 높은 1043.5 mg으로 나타났다.

2. 완전이면교배 결과 현미 천립중과 C3G 함량은 비대립 유전자 효과는 나타나지 않았고, 유전자의 상가적 및 우성적 유전효과만 인정되었다.

3. 현미 천립중과 C3G 함량의 유전 양식은 두 형질 모두 상가적 및 우성효과에 의한 부분우성을 보였으며, 평균 우성정도는 각각 0.80 및 0.69였고, 교배모본에서 정의대립 유전자 비율이 높았으며, 우성친의 빈도가 높고, 후대에서는 감소하는 방향으로 작용하였다.

4. 두형질의 상가적 유전효과에 의한 협의의 유전력은 각각 0.66, 0.70이고, 광의의 유전력은 각각 0.98, 0.98로 높게 나타났다.

5. 현미 천립중에 대한 일반조합능력 효과는 상해향혈나가 가장 높았고, 흑진주가 가장 낮았으며, 흑진주/수원425호, 수원425호/C3GHi 조합의 특정조합능력 효과가 가장 높았다.

6. C3G함량에 대한 일반조합능력 효과는 C3GHi가 가장 높았고, 상해향혈나가 가장 낮았으며, 흑진주/C3GHi 조합에서 특정조합능력 효과가 가장 낮게 나타났다.

인용문헌

- Griffing, B. 1965. Concept of general and specific combining in relation to diallel crossing system. *Aust. J. Bioe. Sci.* 9 : 463-493.
- Hayman, B. I. 1958. The analysis of variance of diallel table. *Biometrics* 10 : 235-244.
- Jung, K. H., J. H. Lee, H. Y. Kim, S. J. Yang, H. C. Choi, H. J. Koh, and H. P. Moon. 2000a. Effect of blackish purple seed coat on grain quality and yield characters in Rice (*Oryza sativa* L.) *Korean J. Breed.* 32(s1) : 40-41.
- Jung, K. H., H. J. Koh, J. H. Lee, S. J. Yang, H. P. Moon, and H. C. Choi. 2000b. Visual selection of blackish-purple rices in segregating population. *Korean J. Breed.* 32(2) : 127-131.
- Kim, H. Y., S. Z. Park, S. J. Han, and S. N. Ryu. 2000. Variation of cyanidin-3-glucoside content in F₂ population of pigmented rice. *Korean J. Breed.* 32(4) : 333-337.
- Kinoshita, T. 1984. Gene analysis and linkage map. In *Biology of Rice*. JSSP/Elsevier, Tokyo : 187-274.
- Mazza, G. and E. Miniati. 1993. Anthocyanins in Fruits, Vegetables, and Grains. CRC Press. pp. 1-23.
- Park, S. Z., H. Y. Kim, S. J. Han, and S. N. Ryu. 2000. Cyanidin-3-glucoside content in F₁, F₂ and F₃ grains of pigmented rice Heugjinjubyeo crosses. *Korean J. Breed.* 32(3) : 285-290.
- Reddy, V. S., S. Dash, and A. R. Reddy. 1995. Anthocyanin pathway in rice (*Oryza sativa* L.): identification of a mutant showing dominant inhibition of anthocyanins in leaf and accumulation of proanthocyanidins in pericarp. *TAG 91* : 301-312.
- Ryu, S. N., S. Z. Park, and C. T. Ho. 1998. High performance liquid chromatographic determination of anthocyanin pigments in some varieties of black rice. *Journal of Food and Drug analysis* 6(4) : 729-736.
- Ryu, S. N., S. J. Han, S. Z. Park, and H. R. Kim. 2006. Antioxidant activity of blackish purple rice. *Korean J. Crop Sci.* 51(2) : 173-178.