수확시기에 따른 노랑찰옥수수의 총카로티노이드 함량 및 항산화 활성 변화

이진석* · 손범영 · 김정태 · 배환희 · 김상곤 · 백성범

농촌진흥청 국립식량과학원 중부작물부

Change of Total Carotenoid Contents and Antioxidant Activities of Yellow Waxy Corns (*Zea mays* L.) Depending on Harvest Time

Jin-Seok Lee*, Beom-Young Son, Jung-Tae Kim, Hwan-Hee Bae, Sang-Gon Kim, and Seong-Bum Baek

Central Area Crop Breeding Division, National Institute of Crop Science, RDA, Suwon 16429, Korea

Abstract : This study was conducted to compare changes of total carotenoid contents and antioxidant activities in yellow waxy corns (*Zea mays* L.) depending on harvest time. The total carotenoid contents of yellow waxy inbred lines and hybrids increased from 19 days and then the highest content of total carotenoid contents was observed at 25 to 27 days after pollination. Thereafter, there was little change in total carotenoid contents. According to analysis total content of carotenoids on 23 days after pollination, which was the period of harvesting waxy corn, KY2 was the highest as 15.4 $\mu\text{g/g}$ in inbred lines and KY2/KY39 was the highest as 11.2 $\mu\text{g/g}$ in hybrids, respectively. The total carotenoid contents of each hybrid were higher than mean that of their parent lines except for some hybrids. The total carotenoid contents of KY27/KY37 were significantly higher than those of their parental lines. Antioxidant activity of yellow waxy corn showed a tendency to increase after decrease depending on delaying harvesting time. Antioxidant activities of hybrids were higher than that of inbred lines. As a result of correlation analysis between total carotenoid contents and antioxidant activity, correlation coefficient of inbred lines and hybrids was as low as -0.12 and -0.13, respectively. When the harvest time was delayed, the lightness of yellow waxy corn decreased but the redness and yellowness increased. As a result of correlation analysis between Hunter's Lab value and total carotenoid contents, correlation coefficient of lightness, redness and yellowness were -0.22, 0.67, 0.53, respectively.

Keywords : Yellow, Waxy, Corn, Carotenoid, Harvest time

서 언

옥수수는 세계 3대 식량작물로 벼와 밀보다 단위면적당 생산량이 높으며 세계적으로 10억톤 이상 생산되어 사료용, 가공용, 간식용 등으로 이용되고 있다(FAOSTAT 2014). 우리나라의 옥수수는 대부분 찰옥수수이며 간식용으로 이용하고 있다. 찰옥수수는 호숙기에 풋상태로 수확하여 이용하기 때문에 재배기간이 짧고 타 작물과 작부체계 운영이 쉬우며 단위면적당 소득이 높아 재배면적이 꾸준히 증가하고 있다(Lee et al. 2011).

우리나라 찰옥수수 육종은 1970년대 재래종을 수집하여 계통육성을 시작하였고 수량성이 낮은 재래종을 대체하고자 하였다(Park et al. 1992). 2000년대에 들어서는 소비자의 기호에 맞춰

찰옥수수 품질 향상으로 육종목표가 전환되었으며 2000년대 후반 건강 기능성에 대한 사회적 관심이 증가하고 참살이 문화가 확산됨에 따라 찰옥수수의 기능성 향상에 노력하였다(NICS 2012).

소비자의 식생활 문화가 건강기능성 중심으로 변화함에 따라 항암, 항산화 등 기능성이 뛰어난 컬러푸드에 대한 관심이 증가하고 있다(Lee et al. 2012). 옥수수에 색을 나타내는 기능성 물질로는 대표적으로 안토시아닌과 카로티노이드가 있으며 이들은 항산화 물질로 잘 알려져 있다(Kim et al. 1996).

안토시아닌은 식물계에서 가장 큰 수용성 색소 그룹으로 오렌지색부터 청자색까지 다양한 색을 나타낸다(Pietta 2000, Tanaka et al. 2008). 옥수수의 안토시아닌은 주로 cyanidin-3-glucoside, pelargonidin-3-glucoside, cyanidin-3-(6" malonylglucoside), cyanidin-3-(3",6"-dimalonylglucoside) 등으로 구성되어 있으며 cyanidin-3-glucoside가 항산화 활성이 높은 것으로 알려져

*Corresponding Author (E-mail: z9813139@korea.kr, Tel: +82-31-695-4043, Fax: +82-31-695-4029)

(Received on September 18, 2017. Accepted on October 30, 2017.)

있다(Kim et al. 1999, Moreno et al. 2005).

카로티노이드는 황색에서 적색까지의 색을 나타내는 지용성 색소물질로 옥수수에는 주로 lutein, zeaxanthin, α -carotene, β -carotene 등으로 존재한다(Kandianis 2009, Tanaka et al. 2008). 카로티노이드는 비타민A 합성의 전구물질로 이용되고 면역력 향상에 도움을 주며 자체적으로 항산화 기능을 가지고 있다(Cazzonelli 2011, Eldahshan & Singab 2013).

국내에서는 미흑찰(Park et al. 2007), 얼룩찰1호(Lee et al. 2011), 흑진주찰(Jung et al. 2009) 등 안토시아닌을 함유한 다양한 찰옥수수 품종들이 개발되어 보급되고 있지만 카로티노이드를 함유한 찰옥수수 품종개발은 시작단계에 있으며 아직까지 상용화되어 있는 품종은 찾아보기 힘들다.

따라서, 수확시기에 따른 노랑찰옥수수의 카로티노이드 함량 및 항산화활성의 변화를 구명하여 노랑찰옥수수 품종육성에 기초자료를 제공하고 카로티노이드 함량이 높은 유전자원 탐색에 활용하고자 본 연구를 수행하였다.

재료 및 방법

공시재료

노랑찰옥수수 13 자식계통과 18 교잡계를 농촌진흥청 국립식량과학원 시험포장에 파종하여 개화기에 인공교배한 후 수확하여 분석에 이용하였다. 노랑찰옥수수 시험구는 재식밀도 60×25 cm (6,600본/10a)로 시험구 크기는 4m, 3열로 하였고 2립씩 파종하여 3~5엽기에 1주만 남도록 솎아 주었으며 재배관리는 농촌진흥청 식용옥수수 표준재배법에 준하여 실시하였다. 균일한 분석시료를 얻기 위하여 옥수수가 출사되기 전 이삭에 교배비닐을 씌워 다른 옥수수의 꽃가루 혼입을 방지하였고 각각의 시료별로 40주를 인공교배한 후 교배일을 표시하였다. 인공교배 후 19일부터 27일까지 2일 간격으로 각각 3개 이삭을 수확하였고 완숙되는 45일째 3개의 이삭을 수확하였으며 수확한 시료는 -74°C 초저온냉장고에 저장하여 보관 후 분석에 이용하였다.

총카로티노이드 함량 분석

Al-Farsi et al. (2005) 방법을 응용하여 측정하였다. 시료는 동결건조하여 분쇄한 후 100 mesh 체로 걸러 분석에 이용하였다. 총카로티노이드 함량분석은 2 g의 시료에 아세톤 : 에탄올 1:1 (v/v)을 이용하여 암조건에서 추출하였다. 추출액은 10분간 4°C , 12,000 rpm에서 원심분리 하였으며 상등액은 Whatman No.42를 이용하여 분리한 후 Spectrophotometer (U-2900,

HITACHI)를 사용하여 470 nm에서 측정하였다. 총카로티노이드 함량은 다음의 계산식을 이용하여 계산하였다.

$$\text{총카로티노이드함량}(mg/g) = \frac{A_{470} \times V \times 10^6}{A^{1\%} \times 100G}$$

A_{470} 은 470 nm에서 흡광도, V는 추출물의 총부피, $A^{1\%}$ 는 카로티노이드 1% 혼합물에 대한 흡광계수, G는 시료 중량(g)을 나타낸다.

항산화 활성(Diphenyl picryl hydrazyl, DPPH) 검정

분쇄한 시료 2 g에 80% 메탄올 50 mL 첨가하여 25°C shaking water bath에서 24시간 교반하여 추출하였고 Whatman No.42로 여과하였다. 추출한 시료 여과액을 96 well plate에 100 μ l씩 분주하고 0.4 mM DPPH용액을 동량 첨가하여 실온에서 10분간 반응시킨 후 Spectrophotometer (U-2900, HITACHI)로 517 nm에서 흡광도를 측정하였다. DPPH 활성산소 소거능은 다음의 식을 이용하여 계산하였고 DPPH의 흡광도가 50% 감소할 때 나타나는 시료의 농도로 표시하였다.

$$\text{DPPH활성산소 소거능}(\%) = \frac{A_c - A_s}{A_c} \times 100$$

A_c 는 시료 대신 메탄올을 첨가하여 흡광도를 측정한 것이고 A_s 는 시료를 첨가하여 반응한 반응액의 흡광도를 나타낸다.

Hunter's Lab 값 측정

노랑찰옥수수 색차 측정은 인공교배 후 각 시기별로 수확한 종실을 이용하여 수행하였으며 수확한 종자를 탈립 후 실험용체를 이용하여 이물질을 제거하였다. 이물질을 제거한 찰옥수수 종자를 색차계 셀에 옥수수 종실의 상단부가 아래로 향하게 정렬하여 넣은 후 색차계(Model CM-3500D, Minolta, Tokyo, Japan)를 이용하여 명도 값 L (lightness), 적색도 값 a (redness), 황색도 값 b (yellowness) 등 Hunter's Lab 값을 측정하였다.

통계분석

통계분석은 SAS 9.2 (SAS Institute Inc, USA)와 Microsoft Excel 2010 (Microsoft, USA)을 이용하여 수행하였다. 조사값들간의 평균비교는 SAS 9.2를 이용하여 Duncan의 다중 범위 검정(Duncan's multiple range test, DMRT)으로 5%유의 수준

Fig. 1. Mean total carotenoid contents in yellow waxy corn inbred lines and hybrids depending on harvest time.

Table 1. Total carotenoid contents of 13 yellow waxy corn inbred lines depending on harvest time.

Inbred	Total carotenoid contents at days after pollination (µg/g)					
	19 days	21 days	23 days	25 days	27 days	45 days
KY2	11.5±0.0a ^z	11.4±0.3b	15.4±0.2a	14.4±0.1a	15.9±0.5a	9.4±0.4b
KY3	4.5±0.8e	5.3±1.1ef	4.8±0.5fg	4.9±0.0hi	5.2±0.1hi	5.8±0.9c
KY13	7.8±0.4c	8.2±0.7d	7.6±0.3d	8.1±0.6e	8.4±0.2de	12.2±1.4a
KY17	6.2±0.4d	8.2±0.7d	6.9±1.2de	6.5±0.3fg	6.6±0.7fg	8.1±0.7b
KY27	3.2±0.7fg	4.4±0.1f	4.4±0.7g	3.7±0.0j	4.8±0.1i	3.3±0.0d
KY30	11.0±0.1a	14.1±0.7a	9.8±0.5c	13.3±0.8b	13.8±0.7b	13.4±0.5a
KY34	1.6±0.7h	0.6±0.2g	1.3±0.4i	1.9±0.8k	1.6±0.9j	1.2±0.6e
KY36	2.8±0.4g	4.8±0.4ef	5.3±0.0fg	7.4±0.5ef	6.1±0.4gh	5.4±0.4c
KY37	4.2±0.7ef	5.9±0.7e	5.8±0.2ef	7.0±0.4f	7.4±0.3ef	6.7±0.1c
KY39	4.6±0.0e	4.6±0.0f	4.3±0.0g	5.6±0.4gh	4.4±0.7i	3.1±0.5d
KY41	8.9±0.3b	9.7±0.2c	11.2±0.7b	11.0±0.2c	8.7±0.7cd	12.1±0.6a
KY43	7.0±0.6cd	7.5±0.0d	5.8±0.1ef	9.5±0.1d	9.9±0.3c	8.9±0.7b
KY45	4.2±0.3ef	4.2±0.3f	2.7±0.7h	4.3±0.4ij	5.1±0.7hi	5.3±0.4c

^zMeans in the same column followed by the same letter are not significantly ($p<0.05$) different by Duncan's multiple range test.

에서 비교하였고 조사값들의 표준오차는 Excel 함수 STDEV.S를 이용하여 구하였으며 상관분석은 CORREL 함수를 이용하여 구하였다.

결과 및 고찰

수확시기에 따른 노랑찰옥수수의 총카로티노이드 함량 변화

수확시기에 따른 노랑찰옥수수의 총카로티노이드 함량 변화를 분석하기 위하여 노랑찰옥수수의 자식계통과 교잡계를 인공 교배 후 19일, 21일, 23일, 25일, 27일, 45일에 수확하여 총카로

티노이드 함량을 분석하였다.

수확시기에 따른 총카로티노이드 함량은 자식계통과 교잡계에서 평균적으로 인공교배 후 19일부터 증가하다가 25~27일경 가장 높은 함량을 나타내었고 이후에는 총카로티노이드 함량에 큰 변화가 없었으며 각각의 자식계통 및 교잡계의 총카로티노이드 함량의 변화양상은 유사하였다(Fig. 1). 이것은 단옥수수는 출사 후 25일, 일반옥수수는 출사 후 28일에 총카로티노이드 함량이 가장 높고, 찰옥수수의 경우 미성숙 종자에서 가장 높은 카로티노이드 함량을 나타내며, 이러한 특성들은 품종간 차이가 있다는 기존의 연구보고와 유사한 결과였다(Hu & Xu 2011,

Table 2. Total carotenoid contents of 18 yellow waxy corn hybrids depending on harvest time.

Hybrid	Total carotenoid content at days after pollination ($\mu\text{g/g}$)					
	19 days	21 days	23 days	25 days	27 days	45 days
KY2/KY39	6.6 $\pm$ 0.4b ^z	8.1 $\pm$ 0.8d	11.2 $\pm$ 0.3a	10.6 $\pm$ 0.1b	9.5 $\pm$ 0.7bc	6.8 $\pm$ 0.1fgh
KY3/KY13	6.6 $\pm$ 0.0b	6.7 $\pm$ 0.5efg	5.3 $\pm$ 0.2fg	6.1 $\pm$ 0.7fg	6.8 $\pm$ 1.0fg	6.2 $\pm$ 0.1h
KY3/KY30	11.3 $\pm$ 0.1a	10.9 $\pm$ 0.7a	8.1 $\pm$ 0.4bc	11.9 $\pm$ 0.2b	10.7 $\pm$ 0.7b	9.8 $\pm$ 0.5c
KY3/KY39	3.6 $\pm$ 0.3e	4.2 $\pm$ 0.7i	5.7 $\pm$ 0.8f	7.2 $\pm$ 1.2def	5.5 $\pm$ 0.6h	6.7 $\pm$ 0.3fgh
KY13/KY17	4.1 $\pm$ 0.7de	5.9 $\pm$ 0.5fgh	7.3 $\pm$ 0.7bcde	6.5 $\pm$ 0.0ef	9.4 $\pm$ 0.2cd	8.6 $\pm$ 0.1de
KY13/KY30	7.0 $\pm$ 0.5b	8.7 $\pm$ 1.0cd	9.9 $\pm$ 0.8a	10.7 $\pm$ 1.3b	10.0 $\pm$ 0.9bc	10.5 $\pm$ 0.4bc
KY17/KY30	11.4 $\pm$ 0.7a	8.6 $\pm$ 0.1cd	10.9 $\pm$ 0.5a	15.7 $\pm$ 0.0a	16.4 $\pm$ 0.9a	15.7 $\pm$ 0.1a
KY17/KY39	5.0 $\pm$ 0.3cd	6.9 $\pm$ 0.2ef	6.4 $\pm$ 0.5def	7.9 $\pm$ 0.3cde	7.4 $\pm$ 0.2ef	6.2 $\pm$ 0.6h
KY27/KY30	5.9 $\pm$ 0.6bc	10.6 $\pm$ 0.3ab	8.5 $\pm$ 0.9b	8.4 $\pm$ 0.5cd	8.3 $\pm$ 0.9de	6.4 $\pm$ 0.5gh
KY27/KY36	5.2 $\pm$ 0.7cd	5.6 $\pm$ 0.7gh	7.9 $\pm$ 0.5bcd	7.1 $\pm$ 0.4def	7.4 $\pm$ 0.2ef	5.7 $\pm$ 0.1h
KY27/KY37	5.1 $\pm$ 0.5cd	7.8 $\pm$ 0.2de	6.5 $\pm$ 0.3def	5.9 $\pm$ 0.4fg	3.1 $\pm$ 0.2i	5.8 $\pm$ 0.2h
KY30/KY39	4.7 $\pm$ 0.6d	7.7 $\pm$ 0.2de	7.8 $\pm$ 0.2bcd	8.3 $\pm$ 0.9cd	10.5 $\pm$ 0.5bc	11.3 $\pm$ 0.0b
KY34/KY27	2.5 $\pm$ 0.0f	2.8 $\pm$ 0.2j	4.1 $\pm$ 0.7g	3.7 $\pm$ 0.1h	4.1 $\pm$ 0.2i	3.6 $\pm$ 0.1i
KY34/KY36	5.0 $\pm$ 0.4cd	5.6 $\pm$ 0.5gh	5.6 $\pm$ 0.9fg	9.0 $\pm$ 1.3c	6.0 $\pm$ 0.1gh	7.6 $\pm$ 1.2efg
KY34/KY37	5.9 $\pm$ 0.2bc	5.0 $\pm$ 0.2hi	5.9 $\pm$ 1.1ef	6.3 $\pm$ 0.4ef	7.7 $\pm$ 0.2ef	7.8 $\pm$ 1.2ef
KY34/KY43	4.5 $\pm$ 0.6de	3.9 $\pm$ 0.8ij	6.8 $\pm$ 1.1cdef	7.2 $\pm$ 1.1def	7.9 $\pm$ 0.2ef	9.6 $\pm$ 0.2cd
KY34/KY45	6.7 $\pm$ 0.5b	6.7 $\pm$ 0.5efg	4.1 $\pm$ 0.3g	4.6 $\pm$ 0.2gh	5.8 $\pm$ 0.1gh	4.2 $\pm$ 0.1i
KY41/KY45	11.9 $\pm$ 0.2a	9.7 $\pm$ 0.5bc	6.7 $\pm$ 0.4cdef	8.6 $\pm$ 0.8cd	9.7 $\pm$ 0.2bc	11.6 $\pm$ 1.0b

^zMeans in the same column followed by the same letter are not significantly ($p < 0.05$) different by Duncan's multiple range test.

Song et al. 2016). 또한, 출사 후 등숙기간이 증가함에 따라 총카로티노이드 함량은 처음에는 감소하다가 증가한 후 성숙단계에서 다시 감소한다는 기존의 연구결과와는 차이가 있었다(Xu et al. 2010). 수확시기에 따른 노랑찰옥수수 13 자식계통의 총카로티노이드 함량을 분석한 결과, KY17 등 2 계통은 인공교배 후 21일경에, KY34 등 3 계통은 인공교배 후 25일경에, KY2 등 4 계통은 인공교배 후 27일경에, KY3 등 4 계통은 인공교배 후 45일에 가장 높은 함량을 나타내었다(Table 1). 인공교배 후 45일에 총카로티노이드 함량이 높게 나타난 것은 미성숙한 종자보다 성숙한 종자에서 총카로티노이드 함량이 높다는 기존의 보고와 유사한 결과였으며, 계통에 따라 카로티노이드가 축적되는 양상에 차이가 있는 것으로 생각되었다(Khampas et al. 2013). 찰옥수수를 수확하여 이용하는 시기인 인공교배 후 23일에는 KY2가 15.4 $\mu\text{g/g}$ 으로 가장 높은 총카로티노이드 함량을 나타내었으며 그 다음으로 KY41, KY30 순으로 높은 함량을 나타내었다(Table 1).

수확시기에 따른 노랑찰옥수수 교잡계의 총카로티노이드 함량은 평균적으로 Fig. 1과 같이 자식계통보다 높은 함량을 나타

내었다. 수확시기에 따른 노랑찰옥수수 18 교잡계의 총카로티노이드 함량을 분석한 결과, KY34/KY45 등 2 교잡계는 인공교배 후 19일에, KY27/KY30 등 2 교잡계는 인공교배 후 21일에, KY2/KY39 등 3 교잡계는 인공교배 후 23일에, KY3/KY30 등 6 교잡계는 인공교배 후 25일에, KY3/KY13 등 2 교잡계는 인공교배 후 27일에, KY30/KY39 등 3 교잡계는 인공교배 후 45일에 총카로티노이드 함량이 가장 높았다(Table 2). 노랑찰옥수수 수확시기인 인공교배 후 23일에는 KY2/KY39가 총카로티노이드 함량이 11.2 $\mu\text{g/g}$ 으로 가장 높은 함량을 나타내었으며 KY13/KY30, KY17/KY30 등 2 교잡계와 총카로티노이드 함량에 유의한 차이는 없었다(Table 2). 인공교배 후 23일에 노랑찰옥수수 교잡계와 그들의 부모계통간 총카로티노이드 함량을 비교분석한 결과, 교잡계의 총카로티노이드 함량은 KY3/KY13, KY41/KY45 등 2 교잡계를 제외한 대부분의 교잡계에서 부모계통의 평균 총카로티노이드 함량보다 높은 함량을 나타내었고 KY27/KY36의 경우 교잡계의 총카로티노이드 함량이 그의 부모계통보다 유의하게 높았으며 부모계통의 총카로티노이드 함량이 높으면 그의 교잡계 역시 총카로티노이드 함량이 높은

Fig. 2. Comparison of total carotenoid contents between yellow waxy hybrids and their parent lines at 23 days after pollination.

Fig. 3. Mean antioxidant activities in yellow waxy corn inbred lines and hybrids depending on harvest time.

경향을 나타내었다(Fig. 2). 옥수수에서 카로티노이드 합성에 관여하는 유전자는 *yl*, *y9* 등이 있고 그 외에도 다양한 QTL이 존재하기 때문에 카로티노이드 관련 유전자들의 구성에 따라 노랑찰옥수수 부모계통과 교잡계의 총카로티노이드 함량에 차이가 있는 것으로 생각되었다(Wurtzel et al. 2012).

수확시기에 따른 노랑찰옥수수의 항산화 활성 변화

수확시기에 따른 노랑찰옥수수의 항산화 활성의 변화 양상을 구명하기 위하여 수확시기별 항산화 활성을 분석하였다. 노랑찰옥수수의 항산화 활성은 자식계통과 교잡계에서 모두 평균적으로 수확시기가 늦어질수록 감소하다가 다시 증가하는 경향을

나타내어 총카로티노이드 함량의 변화와는 차이가 있었고 자식계통은 인공교배 후 45일에, 교잡계는 인공교배 후 19일에 가장 높은 항산화 활성을 나타내었으며 평균적으로 교잡계의 항산화 활성이 자식계통보다 높은 경향을 나타내었다(Fig. 3). 노랑색 단옥수수류의 활성산소 소거능은 미성숙한 종자보다 성숙한 종자에서 높다고 보고되고 있지만 자식계통과 교잡계간에 활성산소 소거능이 가장 높은 시기에는 차이가 있었으며 이것은 각각의 옥수수 간에 유전적 배경이 다르고 페놀화합물 등 다른 항산화 물질들의 발현양상의 차이에 기인한 것으로 생각되었다(Hu & Xu 2011; Khampas et al. 2013). 수확시기에 따른 노랑찰옥수수 자식계통의 항산화 활성을 분석한 결과, KY2 등 2 계통은

Table 3. Antioxidant activities of 13 yellow waxy corn inbred lines depending on harvest time.

Inbred	Antioxidant activity at days after pollination (%)					
	19 days	21 days	23 days	25 days	27 days	45 days
KY2	42.5±2.7b ^z	38.5±1.7c	36.1±3.4bc	34.1±3.4bcd	32.2±1.5b	24.9±1.1h
KY3	19.7±1.9f	17.7±1.5j	26.1±2.5f	19.7±2.7f	20.0±0.7e	20.1±2.2i
KY13	17.2±2.2fg	22.5±0.8i	18.0±1.7h	11.0±0.8g	10.7±1.3f	23.7±1.2h
KY17	30.4±1.4d	31.7±1.4g	26.6±2.4f	26.4±0.2e	29.2±1.6c	37.0±3.4cd
KY27	43.3±1.6b	41.0±1.7b	38.4±0.7ab	37.6±1.0ab	32.8±0.8b	43.8±2.7b
KY30	23.6±0.3e	25.1±1.2h	15.2±1.2h	19.0±1.1f	25.2±1.3d	43.8±2.3b
KY34	16.5±1.4g	35.4±1.1de	40.4±0.2a	36.3±5.9abc	33.3±0.6b	34.7±0.4de
KY36	19.6±2.2f	19.2±2.4j	22.8±2.1g	21.6±1.0f	20.7±0.5e	30.9±0.4fg
KY37	28.9±0.9d	34.4±0.3ef	30.2±1.6e	31.3±0.8d	37.6±0.6a	29.2±1.5g
KY39	36.1±0.4c	36.6±1.5cde	32.4±1.1de	34.2±1.9bcd	29.6±1.3c	38.5±1.2c
KY41	37.0±0.3c	32.8±1.0fg	34.8±0.4cd	32.8±0.9cd	31.8±1.0b	35.1±0.5de
KY43	34.6±1.6c	37.2±0.4cd	17.4±0.5h	32.0±0.3d	32.6±0.5b	33.2±1.2ef
KY45	49.0±1.1a	43.7±1.7a	38.5±2.2ab	39.9±2.3a	38.6±1.4a	55.1±2.1a

^zMeans in the same column followed by the same letter are not significantly ($p<0.05$) different by Duncan's multiple range test.

Table 4. Antioxidant activities of 18 yellow waxy corn hybrids depending on harvest time.

Hybrid	Antioxidant activity at days after pollination ($\mu\text{g/g}$)					
	19 days	21 days	23 days	25 days	27 days	45 days
KY2/KY39	61.4±0.7c ^z	55.1±1.0b	62.5±1.3a	57.0±1.8a	53.1±1.3b	43.6±0.9ab
KY3/KY13	84.3±0.3a	80.1±0.9a	56.0±1.4b	48.4±1.4c	49.7±1.7c	37.3±2.2c
KY3/KY30	41.3±0.2g	37.9±1.5ef	27.9±1.7ij	40.2±2.0e	29.7±1.3gh	31.5±0.8de
KY3/KY39	41.1±0.9g	40.4±1.9de	44.7±0.9de	38.2±0.6ef	38.0±1.0d	33.2±0.9d
KY13/KY17	37.7±0.3h	42.4±0.9d	47.8±0.7cd	50.3±1.4bc	57.2±0.3a	45.3±3.2ab
KY13/KY30	32.9±0.2jk	30.6±0.2g	40.4±1.4fg	29.8±1.1g	26.9±0.8ij	38.1±1.9c
KY17/KY30	49.0±1.2ef	31.3±2.2g	55.6±2.6b	23.4±0.4h	27.8±0.1hij	28.9±0.7efg
KY17/KY39	34.8±1.1ij	37.3±1.6f	33.8±0.1h	44.0±1.0d	39.8±1.3d	44.9±0.8ab
KY27/KY30	79.4±0.4b	38.3±0.1ef	37.4±1.7g	31.8±1.3g	32.6±1.4ef	45.2±1.0ab
KY27/KY36	40.8±1.6g	36.2±1.0f	29.6±3.9i	37.1±2.8f	28.9±1.4hi	45.0±0.8ab
KY27/KY37	37.1±1.9hi	41.9±2.6d	51.4±0.8c	35.7±1.5f	38.4±1.6d	42.6±2.3b
KY30/KY39	13.6±1.1n	25.7±2.0h	24.3±4.1jk	16.3±2.6i	14.7±2.4i	25.6±2.5gh
KY34/KY27	31.9±1.9k	20.7±1.0i	29.7±4.5i	24.3±3.0h	32.8±1.2e	37.9±1.1c
KY34/KY36	46.6±2.5f	49.0±2.0c	42.3±1.3ef	44.5±1.2d	27.2±1.5hij	29.5±2.7ef
KY34/KY37	51.9±2.4d	53.5±2.2b	63.1±1.6a	53.0±1.8b	32.2±1.7efg	22.4±1.6h
KY34/KY43	51.0±3.1de	32.2±2.2g	37.7±1.9g	30.0±1.6g	21.4±2.9k	27.6±2.9fg
KY34/KY45	26.1±2.0l	23.7±1.6h	22.5±2.0k	18.5±2.2i	30.0±1.9fgh	46.4±1.6a
KY41/KY45	20.7±1.5m	16.2±0.2j	13.5±1.2l	11.5±0.6j	25.8±0.9j	28.9±3.0efg

^zMeans in the same column followed by the same letter are not significantly ($p<0.05$) different by Duncan's multiple range test.

인공교배 후 19일에, KY43은 인공교배 후 21일에, KY3 등 2 계통은 인공교배 후 23일에, KY37은 인공교배 후 27일에, KY13 등 7 계통은 인공교배 후 45일에 항산화 활성이 가장 높았다(Table 3). 특히, 총카로티노이드 함량이 상대적으로 적었던 KY45가 수확시기 전체적으로 유의하게 높은 활성을 나타내었고 인공교배 후 23일에는 KY34가 40.4%로 가장 높은 활성을 나타내었으며 상대적으로 총카로티노이드 함량이 많았던 KY30

이 15.2%로 가장 낮은 항산화 활성을 나타내었다(Table 3). 수확시기에 따른 노랑찰옥수수 교잡계의 항산화 활성을 분석한 결과, KY3/KY13 등 4 교잡계는 인공교배 후 19일에, KY30/KY39 등 2 교잡계는 인공교배 후 21일에, KY2/KY39 등 6 교잡계는 인공교배 후 23일에, KY13/KY17은 인공교배 후 27일에, KY17/KY39 등 4 교잡계는 인공교배 후 45일에 가장 높은 항산화 활성을 나타내었다(Table 4). 공시 교잡계

Fig. 4. Comparison of antioxidant activities between yellow waxy hybrids and their parent lines at 23 days after pollination.

중에서 인공교배 후 23일에는 KY34/KY37이 63.1%로 가장 높은 항산화 활성을 나타내었으며 KY2/KY39와 항산화 활성에 유의한 차이는 없었다(Table 4). 노랑찰옥수수 교잡계의 항산화 활성은 그들의 부모 계통의 항산화 활성에 따라 차이가 있었고 인공교배 후 23일의 항산화 활성은 KY27/KY36, KY30/KY39, KY34/KY27, KY34/KY43, KY34/KY45, KY41/KY45 등 6 교잡계를 제외한 12 교잡계가 부모계통보다 높거나 부모계통 중 어느 한 계통과 유사하였으며 총카로티노이드 함량이 상대적으로 적었던 KY3/KY13이 항산화 활성이 상대적으로 높은 수준을 나타내었다(Fig. 4).

노랑찰옥수수의 총카로티노이드 함량에 대한 항산화 활성에 미치는 영향을 구명하기 위하여 상관분석을 실시하였다. 자식계통과 교잡계의 총카로티노이드 함량과 항산화 활성의 상관분석 결과, 자식계통과 교잡계는 상관계수(r)가 각각 $-0.12(p>0.05)$, $-0.13(p>0.05)$ 으로 낮은 부의 상관을 나타내었으며 총카로티노이드 함량과 항산화 활성간에는 상관이 낮은 것으로 생각되었다. Ku et al. (2014)은 ABTS 활성산소 소거능 분석과 FRAP(ferric reducing antioxidant power) 분석을 통해 총카로티노이드와 항산화 활성의 상관관계를 분석한 결과, 항산화 활성과 총카로티노이드 함량간의 상관관계가 없었지만 이것은 카로티노이드와 같은 비극성 화합물에 대한 용매 추출 방법이 적합하지 않았기 때문이라고 하였다. Hexane을 용매로 이용하여 총카로티노이드를 추출하면 총카로티노이드 함량에 따라 항산화 활성이 직선적으로 증가한다고 보고되고 있으나 본 연구에서 카로티노이드

추출에 사용한 아세톤 1: 에탄올 1 (v/v)은 카로티노이드의 항산화 활성을 검정하기에는 부적합한 추출 용매로 생각되었으며 효과적인 카로티노이드의 항산화 활성 측정을 위해서는 Hexane 등 다른 용매를 이용하여 추출하는 것이 좋을 것으로 생각되었다(Kljak & Grbeša 2015).

수확시기에 따른 노랑찰옥수수의 Hunter's Lab 값의 변화

총카로티노이드 함량과 색차 간의 상관관계를 분석하기 위하여 수확시기별 노랑찰옥수수 종실의 Hunter's Lab 값을 분석하고 총카로티노이드 함량과의 상관을 분석하였다. 노랑찰옥수수의 자식계통과 교잡계의 명도는 수확시기가 늦어질수록 지속적으로 감소하는 경향을 나타내었고 적색도는 증가하였으며 황색도는 증가하다가 낮아지는 경향을 나타내었다(Fig. 5). Hunter's Lab 값과 총카로티노이드 함량의 상관분석 결과, Hunter's Lab 값과 총카로티노이드 함량에는 유의한 상관이 있었고 명도는 상관계수가 $-0.22(p<0.05)$ 로 부의 상관관계, 적색도와 황색도는 각각 $0.67(p<0.05)$, $0.53(p<0.05)$ 으로 정의 상관관계였으며 상대적으로 적색도와 황색도가 명도보다 높은 상관을 나타내었다(Fig. 6). Hunter's Lab 값과 총카로티노이드 함량의 상관분석 결과, 명도는 결정계수(R^2)가 0.05로 이를 이용하여 총카로티노이드 함량을 설명하기는 힘들 것으로 생각되었다. 적색도와 황색도는 값이 증가함에 따라 총카로티노이드 함량이 증가하였고 각각의 결정계수가 0.46, 0.28로, 적색도와 황색도를 이용하여 총카로티노이드 함량이 높은 자식계통 및 교잡계 선발이 가능할

Fig. 5. Mean Hunter's Lab value of yellow waxy corn inbred lines and hybrids depending on harvest time. a) Lightness; b) Redness; c) Yellowness.

Fig. 6. Correlation between Hunter's Lab and total carotenoid contents in yellow waxy corns. a) Lightness; b) Redness; c) Yellowness.

것으로 생각되었다(Fig. 6). 옥수수 종실의 색차를 이용한 선발 방법은 비파괴적인 분석방법으로 유전자원의 소실을 막을 수 있으며 전문적인 지식이 없더라도 쉽게 이용이 가능하므로 총카로티노이드 함량이 높은 자원 탐색 및 계통 선발에도 유용하게 이용할 수 있을 것으로 생각되었다.

적 요

본 연구는 노랑찰옥수수 수확시기에 따라 종실의 총카로티노이드 함량과 항산화 활성의 변화 양상을 구명하고 노랑찰옥수수 품종 육성에 활용할 수 있는 기초자료를 제공하고자 수행하였으며 그 결과는 다음과 같다.

노랑찰옥수수 자식계통과 교잡계의 총카로티노이드 함량은

평균적으로 인공교배 후 19일부터 증가하다가 25~27일경 가장 높은 함량을 나타내었고 이후에는 총카로티노이드 함량에 큰 변화가 없었으며 교잡계가 자식계통보다 평균적으로 높은 함량을 나타내었다. 찰옥수수를 수확하여 이용하는 시기인 인공교배 후 23일의 총카로티노이드 함량은 자식계통의 경우 KY2가 15.4 $\mu\text{g/g}$ 으로 가장 높은 함량을 나타내었고 교잡계의 경우 KY2/KY39가 11.2 $\mu\text{g/g}$ 으로 가장 높은 함량을 나타내었다. 교잡계와 부모계통의 총카로티노이드 함량을 비교분석한 결과, 교잡계의 총카로티노이드 함량은 일부 교잡계를 제외하고는 부모계통의 평균 보다 높은 함량을 나타내었고 KY27/KY36의 경우 교잡계의 총카로티노이드 함량이 부모계통보다 유의하게 높았다.

수확시기에 따른 노랑찰옥수수의 항산화 활성은 자식계통과 교잡계에서 모두 평균적으로 수확시기가 늦어질수록 감소하다가 다시 증가하는 경향을 나타내었고 교잡계가 자식계통보다 높은 경향을 나타내었다. 총카로티노이드 함량과 항산화 활성의 상관분석결과, 자식계통과 교잡계의 상관계수가 각각 -0.12, -0.13으로 낮았다.

수확시기가 늦어질수록 노랑찰옥수수의 명도는 감소하였고 적색도와 황색도는 증가하였으며 총카로티노이드 함량과 상관분석결과, 상관계수가 명도는 -0.22, 적색도는 0.67, 황색도는 0.53으로 적색도와 황색도가 명도보다 높았다.

사 사

본 논문은 농촌진흥청 공동연구사업의 과제번호: PJ01249702 (식용옥수수 우량 계통육성시험)에 의해 이루어진 것임.

REFERENCES

- Al-farsi M, Alsalvar C, Morris A, Baron M, Shahidi F. 2005. Comparison of antioxidant activity, anthocyanins, carotenoid, and phenolics of three native fresh and sun-dried date (*Phoenix dactylifera* L.) varieties grown in oman. J Agric Food Chem 53: 7592-7599.
- Cazzonelli CI. 2011. Carotenoids in nature: insights from plants and beyond. Functional Plant Biology 38: 833-847.
- Eldahshan OA., Singab ANB. 2013. Carotenoids J Pharmacogn Phytochem 2: 225-234.
- Hu Q. P., Xu J. G. 2011. Profiles of carotenoids, anthocyanins, phenolics, and antioxidant activity of selected color waxy corn grains during maturation. J Agric Food Chem 59: 2026-2033.
- Jung T. W., Song S. Y., Son B. Y., Kim J. T., Baek S. B., Kim C. K., Kim S. L., Kim S. J., Kim S. K., Park K. J., Shin H. M., Huh C. S. 2009. A black waxy hybrid corn, "Heukjinjuchal" with good eating quality. Kor J Breed Sci 41: 599-602.
- Kandianis C. 2009. Genetic dissection of carotenoid concentration and compositional traits in maize grain. Doctor of Philosophy, Illinois University at Urbana-Champaign, Crop Sciences.
- Khampas S, Lertrat K, Lomthaisong K, Simla S, Suriarn B. 2013. Variability in phytochemicals and antioxidant activity in corn at immaturity and physiological maturity stages. Intl Food Res J 20: 3149-3157.
- Kim SL, Choi BH, Park SU, Moon HG. 1996. Functional ingredients of maize and their variation. Kor J Crop Sci 41(Special issue): 46-68.
- Kim SL, Kim EH, Son YK, Song JC, Hwang JJ, Hur HS. 1999. Identification of anthocyanin pigments in black waxy corn kernels. Kor J Breed Sci 31: 408-415.
- Kljak K, Grbeša D. 2015. Carotenoid content and antioxidant activity of hexane extracts from selected Croatian corn hybrids. Food Chem 167: 402-408.
- Ku KM, Kim HS, Kim SK, Kang YH. 2014. Correlation analysis between antioxidant activity and phytochemicals in Korean colored corns using principal component analysis. J Agri Sci 6: 1-9.
- Lee JS, Jung TW, Song SY, Son BY, Kim JT, Kim SK, Kim SL, Baek SB, Seo JH, Lee JE, Kim SJ, Kwon YU, Kim WH, Park KJ, Shin HM, Huh CS, Kang DS. 2011. A bicolor waxy corn hybrid with high eating quality, 'Eolrukchal 1'. Kor J Breed Sci 43: 554-558.
- Moreno YS, Sánchez GS, Hernández DR, Lobato NR. 2005. Characterization of anthocyanin extracts from maize kernels. J Chromatogr Sci 43: 483-487.
- National Institute of Crop Science. 2012. 50 years history of crop science in Korea. pp. 163-177.
- Park KJ, Ryu SH, Min HK, Seo JS, Park JY, Goh BD, Jang JS, Kim NS. 2007. A new black waxy corn hybrid Cultivar, "Miheugchal" with good eating quality and high yield. Kor J Breed Sci 39: 106-107.
- Park SU, Park KY, Cha SW, Son YH, Park RK, Song SH, Hong JK, Kim UH. 1992. A new early maturing and high quality single cross waxy corn hybrid "Chalok 1".

- Research Reports of the Rural Development Administration, Upland & Industrial Crops 34: 61-64.
17. Pietta PG. 2000. Flavonoids as antioxidants. J Nat Prod 63: 1035-1042.
18. Song J, Li D, Liu N, Liu C, He M, Zhang Y. 2016. Carotenoid composition and changes in sweet and field corn (*Zea mays*) during kernel development. Cereal Chem 93: 409-413.
19. Tanaka Y, Sasaki N, Ohmiya A. 2008. Biosynthesis of plant pigments: anthocyanins, betalains and carotenoids. Plant J 54: 733-749.
20. Wurtzel ET, Cuttriss A, Vallabhaneni R. 2012. Maize provitamin A carotenoids, current resources, and future metabolic engineering challenges. Front Plant Sci 29: 1-12.
21. Xu JG, Hu QP, Wang XD, Luo JY, Liu Y, Tian CR. 2010. Changes in the main nutrients, phytochemicals, and antioxidant activity in yellow corn grain during maturation. Agric Food Chem 58: 5751-5756.