가열온도에 따른 고구마 칩의 품질 특성, 항산화 활성 및 아크릴아마이드 함량

황은선 · 이희경

한경대학교 웰니스산업융합학부 식품영양학전공

Quality Characteristic, Antioxidant Activity and Acrylamide Content of Sweet Potato Chips according to the Baking Temperature

Eun-Sun Hwang and Hee Kyung Lee

School of Wellness Industry Convergence, Major in Food and Nutrition, Hankyong National University

ABSTRACT We determined the quality characteristics, antioxidant activity, and acrylamide content of sweet potato chips prepared by unheated raw sweet potato slices as a control group and heating sweet potato slices up to three target temperatures of 140, 160, and 180°C. The moisture content of the sweet potato chips was the highest at 65.20% in the control group and decreased from 32.30% to 7.21% as the baking temperature increased. The sugar content was higher in the baked sweet potato chips than in the raw sweet potato slices and was observed to be the highest at 140°C. The sugar content decreased as the temperature increased from 160 to 180°C. As the baking temperature increased, the brightness of the sweet potato chips decreased, and the browning index increased. The total polyphenol and total flavonoid content were high in the raw sweet potato slices but increased further as the baking temperature increased. The antioxidant activity showed a tendency to increase as the baking temperature increased. As the baking temperature increased, the production of acrylamide also increased. A very small amount of acrylamide was detected in unheated raw sweet potato slices. However, as the baking temperature increased from 140~180°C, the amount of acrylamide production increased to 4.27 to 107.10 times that of the raw sweet potato slices. Therefore, an appropriate heating temperature setting is necessary, taking into consideration the content of bioactive compounds and acrylamide, and antioxidant activity, acrylamide when manufacturing sweet potato chips.

Key words: sweet potato, baking temperature, antioxidant activity, browning, acrylamide

서 론

고구마(*Ipomoea batatas* L.)는 열대 및 아열대 지방에서 재배되는 메꽃과의 여러해살이풀로 다른 작물에 비해 척박한 땅에서도 재배가 쉽고, 단위면적당 수확량이 많아 주요한 식량자원으로 이용되어 왔다(Han, 2004; Takenaka 등, 2006; Woo 등, 2013). 고구마에는 β -카로틴을 비롯한 비타민, 무기질, 식이섬유 등 우리 몸에 유용한 성분이 풍부하여 건강식품으로 인식되고 있으며(Takenaka 등, 2006; Kim 등, 2017), 항산화 활성, 항균작용, 항돌연변이 효과, 항고혈압작용, 간 보호 기능 등이 보고되고 있다(Huang 등, 2004; Asadi 등, 2017; Teow 등, 2007; Amagloh 등, 2021). 고구마는 삶거나 구워 먹는 것 이외에도 유동식, 말랭이, 스낵, 칩 등의 형태로 섭취할 수 있도록 다양한 제품들이

개발되고 있다(Caetano 등, 2018). 특히, 고구마 칩은 고구마를 얇게 슬라이스한 후 건조기나 오븐에 구워 수분을 제거하여 저장성이 우수하고 고소한 맛과 적절한 영양소를 공급받을 수 있어 남녀노소의 간식으로 널리 애용되고 있다(Jang 등, 2013; No 등, 2018). 고구마는 탄수화물이 풍부하여 고온에서 굽게 되면 표면이 갈색으로 변하는 마이야르 반응이 일어나며(Mustafa 등, 2008), 다양한 물리·화학적 변화를 일으키고 아크릴아마이드가 생성될 우려가 있다.

탄수화물 함량이 높고 단백질 함량이 적은 고구마, 감자, 빵이나 쿠키 등을 고온에서 가열하는 과정 중에 환원성 당류의 carbonyl group과 아미노산과 단백질 중에 존재하는 amine group 사이의 마이야르(Maillard) 반응과 캐러멜화 반응에 의해 식품의 색이 갈색으로 변하면서 아크릴아마이드(acrylamide)가 생성되는 것으로 보고되고 있다(Acar 등,

Received 26 August 2021; Revised 19 September 2021; Accepted 23 September 2021

Corresponding author: Eun-Sun Hwang, School of Wellness Industry Convergence, Major in Food and Nutrition, Hankyong National University, 327 Chungang-ro, Gyeonggi-do, 17579 Korea, E-mail: ehwang@hknu.ac.kr

Author information: Eun-Sun Hwang (Professor), Hee Kyung Lee (Student)

Copyright © 2021 by The Korean Society of Food Science and Nutrition. All rights Reserved.

This is Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

2012; Constantinou와 Koutsidis, 2016). 아크릴아마이드는 암을 유발하는 물질로 분류되고 있어 식품의 조리나 가공 중에 만들어지는 양을 모니터링하면서 그 생성량을 최소화할 필요가 있다(Lineback 등, 2012). 한편, 갈변 반응은 식품의 먹음직스러운 색과 향미를 부여하고, 몇몇 연구에서는 갈변 반응으로 생성된 물질들이 산화 반응을 억제하는 등 긍정적인 영향을 주는 것으로 알려져 있다(Kwon과 Youn, 2014).

본 연구에서는 다양한 온도에서 고구마 칩을 제조한 후 고구마 칩의 이화학적 품질 특성, 항산화 물질의 함량, 항산화 활성 및 가열에 의한 아크릴아마이드 형성 정도를 측정하여 고구마 칩 제조를 위한 바람직한 온도 범위 설정을 위한 기초자료로 활용하고자 하였다.

재료 및 방법

실험재료 및 시약

본 연구에 사용한 고구마는 전라남도 해남에서 2020년 가을에 수확한 것을 직접 구매하여 사용하였다. Gallic acid, catechin, Folin-Ciocalteu's phenol reagent, 1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl(DPPH), acrylamide 표준물질 및 내부표준물질인 $^{13}\text{C}_3$ -labeled acrylamide는 Sigma-Aldrich Chemical Co.(St. Louis, MO, USA)에서 구입하였고, 2,2'-azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid) diammonium salt(ABTS)는 Flunk(Hekdelberg, Germany)에서 구입하였다. 그 외 시약들은 Sigma-Aldrich Chemical Co.와 Jencei Chemical Co., Ltd.(Tokyo, Japan)에서 구입하여 실험에 사용하였다. 아크릴아마이드 분석을 위한 용매는 HPLC grade(J&T Baker, Phillipsburg, NJ, USA)를 사용하였고, Oasis HLB SPE 카트리지(C_{18} , 200 mg, 6 mL)는 Waters Corp.(Milford, MA, USA)에서, Bond Elut-AccuCAT SPE 카트리지(C_8 , 200 mg, 3 mL)는 Agilent Technologies(Memphis, TN, USA)에서 구입하였다. 그 외 시약들은 분석용 등급을 사용하였다.

고구마 칩 제조

고구마를 수세하여 이물질을 제거하고 slicer를 사용하여 1.3 mm 두께로 절단하였다. 고구마 칩은 일반적으로 가정에서 쉽게 사용할 수 있는 오븐에 건조하여 제조하였다. 여러 차례의 예비실험을 통해 적절한 열처리 조건을 선정하였다. 가열하지 않은 생고구마 슬라이스를 대조군으로 하였다. 슬라이스한 고구마는 오븐에 굽는 온도를 3가지(140, 160 및 180°C)로 세분화하여 오븐용 철판에 3 cm 간격을 두고 배치하였다. 제빵용 오븐의 윗불과 아랫불의 온도를 동일하게 설정하여 140, 160 및 180°C로 나누어 미리 예열시킨 후에 준비한 고구마 슬라이스를 각 온도에서 5분 동안 구운 다음 철판을 꺼내어 위와 아래를 뒤집은 후 다시 동일 온도에서 5분을 구워냈다(Fig. 1). 완성된 고구마 칩은 1시간 냉

Fig. 1. Sweet potato chips made with different baking temperature.

각시킨 후 분석 항목별로 분리하여 지퍼백에 담아 보관하면서 분석용 시료로 사용하였다. 아크릴아마이드, 총 폴리페놀, 총 플라보노이드 함량 및 항산화 활성 측정을 위해 완성된 고구마 칩을 동결건조(FDU-1200, EYELA, Tokyo, Japan)한 후에 분말화하여 사용하였다.

일반성분 함량 측정

고구마 칩의 일반성분 함량은 AOAC(1995)의 방법에 따라 분석하였다. 수분은 드라이오븐(EYELA)을 이용하여 상압가열건조법으로 105°C에서 정량하였고, 조회분은 회화로(Jeil, Seoul, Korea)에서 600°C로 회화시켜 측정하였다. 조단백질은 단백질 분석기(Kjeltec 2400 AUT, Foss Tecator, Eden Prairie, MN, USA)를 이용하여 semimicro-Kjeldahl법으로 측정하였고, 조지방은 Soxhlet 추출기(Soxttec System HT 1043, Foss Tecator)를 사용하여 diethyl ether로 추출한 후에 정량하였다.

당도 및 pH 측정

고구마 칩을 믹서(KHC-1000, Kitchenart, Seoul, Korea)에 넣고 균일한 크기로 분쇄한 후에 분말 시료 5 g에 95% 증류수 10 mL를 첨가하여 vortex mixer로 혼합한 후에 40°C에서 10분 동안 초음파 추출을 하였다. 추출물은 초고속 원심분리기(Mega 17R, Hanil Co., Incheon, Korea)로 16,700 rpm에서 30분간 분리하여 상등액을 얻었다. 당도는 상등액을 취하여 당도계(PR-201a, Atago Co., Tokyo, Japan)로 측정하였다. pH는 상등액을 취하여 pH meter(420 Benchtop, Orion Research, Beverly, MA, USA)로 측정하였다.

색도 및 갈색화 지표 측정

색차계(Chrome Meter CR-300, Minolta, Tokyo, Japan)를 이용하여 제조한 고구마 칩의 명도(L^* , lightness), 적색도(a^* , redness), 황색도(b^* , yellowness)를 측정하였다. 표준색 보정을 위한 백색 표준판의 L^* , a^* , b^* 값은 각각 97.10, +0.24, +1.75였다.

측정한 색도 값을 이용하여 고구마 칩의 갈색화 지표(Browning Index; BI)를 계산하였다(Sung과 Chen, 2017).

$$BI = 100[X - 0.31]/0.17$$

where, $X = (a^*_{\text{sample}} + 1.75 L^*_{\text{sample}}) / (5.645 L^*_{\text{sample}} + a^*_{\text{sample}} - 3.012b^*_{\text{sample}})$

총 폴리페놀 및 총 플라보노이드 함량 분석

분쇄된 고구마 칩 5 g에 95% 에탄올 20 mL를 넣고 vortex mixer로 15초 동안 균질하게 혼합한 후 9,000 rpm에서 10분간 원심분리하여 상등액을 취하여 고구마 칩 추출액으로 하였다. 적절한 농도로 희석한 시료 추출액 500 μ L에 2 N Folin 시약 500 μ L를 첨가하여 3분간 실온에서 정치한 후 2% sodium carbonate 1.5 mL를 넣어 2시간 동안 암소에서 반응시켰다. 반응이 끝난 혼합액의 흡광도를 microplate reader(Infinite M200 Pro, Tecan Group Ltd., San Jose, CA, USA)로 760 nm에서 측정하였다. 시료에 함유된 총 폴리페놀 함량은 gallic acid를 표준물질로 하여 시료와 동일한 방법으로 분석하여 얻은 표준곡선으로부터 총 폴리페놀 함량을 산출하고, 시료 g당 함유된 gallic acid equivalent(GAE)로 표시하였다.

총 플라보노이드 함량은 시료 추출액 1 mL와 2% aluminium chloride methanolic solution 1 mL를 혼합하여 실온에서 15분 동안 반응시킨 후에 430 nm에서 흡광도를 측정하였다. 시료에 함유된 총 플라보노이드 함량은 quercetin을 표준물질로 하여 시료와 동일한 방법으로 분석하여 얻은 표준곡선으로부터 총 플라보노이드 함량을 산출하고, 시료 g당 함유된 quercetin equivalent(QE)로 표시하였다.

항산화 활성 측정

가열온도를 달리하여 제조한 고구마 칩의 항산화 활성을 DPPH 라디칼 소거 활성(Cheung 등, 2003), ABTS 라디칼 소거 활성(Re 등, 1999) 및 환원력(Oyaizu, 1986)으로 측정하였다. 분말로 만든 고구마 칩 5 g에 95% 에탄올 20 mL를 넣어 vortex mixer로 균질하게 혼합한 후 9,000 rpm에서 10분간 원심분리하여 상등액을 취하여 고구마 칩 추출액으로 하였다.

DPPH 라디칼 소거 활성은 고구마 칩 추출액 100 μ L와 0.2 mM DPPH 용액 100 μ L를 혼합하여 37°C에서 30분간 반응시킨 후 515 nm에서 흡광도를 측정하였다. 고구마 칩 시료의 DPPH 라디칼 소거 활성은 시료 추출물을 첨가하지 않은 대조군과 비교하여 계산하였다.

ABTS 라디칼 소거 활성 측정을 위해 7.0 mM ABTS 용액과 2.45 mM 과황산칼륨(potassium persulfate)을 혼합하여 암소에서 24시간 동안 반응시키면서 ABTS 양이온을 형성시켰다. 흡광도 값이 735 nm에서 1.70 ± 0.03 이 되도록 에탄올로 희석하여 사용하였다. 흡광도를 맞춘 ABTS 용액 100 μ L와 고구마 칩 추출액 100 μ L를 혼합하여 37°C에서 30분간 반응시킨 후 732 nm에서 흡광도를 측정하였다. 고구마 칩 시료의 ABTS 라디칼 소거 활성은 시료 추출물을

첨가하지 않은 대조군과 비교하여 계산하였다.

환원력은 고구마 칩 추출액 0.5 mL에 인산 완충액(20 mM, pH 6.6) 0.5 mL 및 1%의 potassium ferricyanide 0.5 mL를 순서대로 첨가한 후 50°C로 맞춰진 항온수조에서 20분간 반응시켰다. 반응액에 10% trichloroacetic acid 용액을 1 mL 넣어 혼합한 후에 13,500 $\times$ g에서 15분간 원심분리하여 상등액을 얻었다. 상등액 1 mL에 증류수 및 ferric chloride를 각각 1 mL씩 가하여 혼합한 후 720 nm에서 측정하여 얻은 흡광도 값을 환원력으로 나타냈다.

아크릴아마이드 함량 분석

고구마 칩 제조과정 중에 생성된 아크릴아마이드를 FDA 분석법(2003)으로 측정하였다. 고구마 칩 100 g을 믹서기에 넣고 분쇄한 다음, 이 중 1 g을 취하여 내부 표준용액 1 mL와 증류수 9 mL를 첨가한 후 잘 혼합하여 shaking incubator(BF-60SIR-1, BioFree, Seoul, Korea)에서 300 rpm으로 25분 동안 추출하였다. 추출액은 9,000 rpm으로 30분 동안 원심분리(Mega17R, Hanil, Seoul, Korea)하였다. 원심분리하여 얻어진 상등액 5 mL를 취하여 새로운 튜브에 옮기고 7,000 rpm으로 10분간 다시 원심분리하여 A액을 얻었다. 메탄올 3.5 mL와 증류수 3.5 mL로 활성화한 Oasis HLB SPE 카트리지에 위의 전처리 과정을 통해 얻은 A액 1.5 mL를 넣어 통과시킨 후 물 0.5 mL를 첨가하여 나온 용액은 흘려버리고, 증류수 1.5 mL를 넣어 용출시킨 용액을 새로운 튜브에 모았다(B액). 메탄올 2.5 mL와 증류수 2.5 mL로 활성화한 Bond Elut-AccuCAT SPE 카트리지에 B 용액 1.5 mL를 넣은 후 처음 0.5 mL를 흘려버리고, 이후 얻어진 용액 1 mL를 새로운 튜브에 모아 아크릴아마이드 함량을 분석하였다. 아크릴아마이드는 액체크로마토그래피/질량분석기(LC-MS/MS-2020, Shimadzu, Kyoto, Japan)와 Nexera XR(Shimadzu)로 분석하였다. 이동상은 0.1% acetic acid와 0.5% formic acid가 포함된 수용액으로 하였고, MS/MS 이온화 모드는 HESI⁺, 이온 모니터링은 acrylamide는 72 m/z > 55 m/z를 ¹³C₃-acrylamides는 75 m/z > 58 m/z로 확인하였다.

통계분석

모든 실험은 3회 이상 반복하여 측정하고 결과는 평균(mean) $\pm$ 표준편차(standard deviation)로 나타내었다. 실험 결과는 R-Studio(Version 3.5.1, Boston, MA, USA)를 이용하여 통계처리 하였고, ANOVA test로 유의성을 확인한 후 Duncan's multiple range test를 이용하여 분석($P < 0.05$)하였다.

결과 및 고찰

일반성분 측정

가열온도를 달리하여 제조한 고구마 칩의 일반성분 분석

Table 1. Proximate composition of sweet potato chips made with different baking temperature (%)

Measurement	Baking temperature (°C)			
	Non-baked	140	160	180
Moisture	65.20±0.03 ^a	32.30±0.23 ^b	17.57±0.07 ^c	7.21±0.19 ^d
Ash	0.96±0.02 ^d	1.77±0.01 ^c	2.14±0.00 ^b	2.40±0.00 ^a
Crude protein	0.12±0.00 ^d	0.24±0.01 ^c	0.33±0.00 ^b	0.35±0.01 ^a
Crude fat	0.25±0.01 ^b	0.22±0.03 ^b	0.27±0.00 ^b	0.50±0.02 ^a

Data were the mean±SD of triplicate experiment.

Means with the different superscripts (a-d) within the same row are significantly different at $P<0.05$.

결과는 Table 1과 같다. 가열처리 하지 않은 생고구마 슬라이스의 수분함량은 65.20%로 가장 높았고, 오븐에서 굽는 온도가 140~180°C로 높아짐에 따라 수분은 32.30%에서 7.21%로 급격히 감소하였다. 고구마 칩의 굽는 온도가 높아질수록 고구마가 고온에 노출되어 수분 증발이 급격히 높아져 제조한 칩의 수분량이 감소한 것으로 사료된다. 고구마 칩의 조지방 함량은 신선한 고구마에서는 0.96%로 가장 낮았고, 고구마 칩 제조 온도가 높아짐에 따라 1.77%에서 2.40%까지 증가하였다. 조단백질 함량도 고구마 칩 제조 온도가 높아짐에 따라 0.12%에서 0.35%까지 증가하였다. 조지방의 경우는 생고구마 슬라이스와 140~160°C에서 구운 시료에서는 통계적인 유의성이 나타나지 않았으나, 180°C에서 구운 시료에서는 0.50%로 증가하였다. 이는 고온에 노출된 고구마 칩의 수분함량이 감소하여 수분을 제외한 조지방, 조단백 및 조지방의 상대적인 비율이 증가한 것으로 사료된다.

당도 및 pH 측정

오븐에서 굽는 온도를 달리하여 제조한 고구마 칩 용출액의 당도와 pH 측정 결과는 Table 2와 같다. 가열처리 하지 않은 생고구마 슬라이스의 당도는 0.80°Brix로 가장 낮았고, 140°C에서 구운 시료에서는 4.33°Brix로 가장 높았고, 160°C에서 구운 칩의 경우 4.17°Brix로 다소 감소하였고, 180°C에서 구운 칩에서는 3.03°Brix로 감소하였다. 생고구마 슬라이스보다 구운 고구마 칩의 당도가 높게 나타났는데, 이는 굽는 과정에서 수분이 증발하여 당도가 증가했기 때문으로 사료된다. 고구마를 오븐에서 굽는 동안 고구마 속의 수분이 증발하고 140°C까지는 당 성분이 농축되어 당도가 높게 나타났다가 온도가 160~180°C까지 증가함에 따라 농축된 당 성분이 분해되어 당도가 감소한 것으로 사료된다. 선행연구에서도 열처리 초기에는 다당류 또는 이당류가 단당류로 분해되어 신선한 식품에 비해 당도가 증가하다가 가

열온도가 일정 수준 이상으로 높아지면 환원당의 분해가 일어나 당도는 오히려 감소하는 것으로 보고되고 있다(Sung과 Chen, 2017). 온풍에 의한 고구마(Shin과 Lee, 2011)의 건조 및 감말랭이(Kim 등, 2009)의 제조에서도 수분함량이 낮을수록 가용성 고형분 함량이 증가하는 것으로 보고하여 본 연구 결과와 유사함을 확인하였다.

생고구마 슬라이스 용출액의 pH는 6.29로 약산성을 나타내었고 140°C에서 구운 고구마 칩의 pH는 6.45였으며, 굽는 온도가 160°C에서 180°C로 증가함에 따라 pH는 6.40에서 6.32로 감소하는 경향을 나타냈다. 마이야르 반응을 거치면서 고구마에 포함된 환원당과 라이신과 같은 ε-아미노 그룹이 결합하여 아마도리 재배열을 거치며, 본 실험에서 측정된 고구마 추출액처럼 산성 pH 조건에서 오탄당은 furfural, 육탄당은 hydroxymethylfurfural을 형성한다(Mustafa 등, 2008; Lund와 Ray, 2017). 이들 물질들은 반응성이 매우 강하여 고리화(cyclisation), 탈수(dehydration), 재배열(rearrangements), 이성질화(isomerisations) 등을 거치면서 축합반응을 통해 최종적으로는 질소를 함유한 멜라노이딘(melanoidin)으로 알려진 착색물질을 생성하는 것으로 알려져 있다(Lund와 Ray, 2017).

색도 측정

굽는 온도를 달리하여 제조한 고구마 칩의 색도를 측정된 결과는 Table 3과 같다. 명도(L*)는 열처리하지 않은 생고구마 슬라이스에서 52.54로 가장 높게 나타났으며, 고구마 칩의 굽는 온도가 140~180°C로 증가함에 따라 명도 값은 48.87에서 44.96으로 감소하였다. 적색도(a*)는 생고구마 슬라이스에서 -0.44로 가장 낮았고, 굽는 온도가 140°C에서 180°C로 증가함에 따라 -1.00에서 5.67로 증가하였다. 황색도(b*)는 생고구마 슬라이스에서 11.05로 가장 낮은 값을 보였고, 굽는 온도가 140°C에서 180°C로 높아짐에 따라 17.08에서 14.43으로 감소하였다. 고구마 칩의 색도를 이용

Table 2. Sugar contents and pH of sweet potato chips with different cooking temperature

Measurement	Temperature (°C)			
	Non-baked	140	160	180
Sugar contents (°Brix)	0.80±0.00 ^d	4.33±0.06 ^a	4.17±0.12 ^b	3.03±0.06 ^c
pH	6.29±0.01 ^d	6.45±0.00 ^a	6.40±0.01 ^b	6.32±0.00 ^c

Data were the mean±SD of triplicate experiment.

Means with the different superscripts (a-d) within the same row are significantly different at $P<0.05$.

Table 3. Changes in hunter's color value of sweet potato chips made with different baking temperature

Measurement	Temperature (°C)			
	Non-baked	140	160	180
L*	52.54±0.16 ^a	48.87±0.09 ^b	45.97±0.01 ^c	44.96±0.08 ^d
a*	-0.44±0.00 ^c	-1.00±0.00 ^d	2.62±0.02 ^b	5.67±0.05 ^a
b*	11.05±0.10 ^d	17.08±0.04 ^a	15.70±0.00 ^b	14.43±0.11 ^c
BI ¹⁾	22.42±0.17 ^d	40.17±0.05 ^c	45.12±0.03 ^b	47.34±0.31 ^a

Data were the mean±SD of triplicate experiment.

Means with the different superscripts (a-d) within the same row are significantly different at $P<0.05$.

¹⁾Browning index.

하여 측정된 갈색화 지표의 경우, 가열하지 않은 생고구마 슬라이스에서는 22.42로 가장 낮은 값을 나타냈고, 굽는 온도가 140°C에서 180°C로 높아짐에 따라 40.17에서 47.34로 증가하였다.

가열온도가 높아질수록 마이야르 반응이 더 신속하게 일어나 식품 표면의 갈색화가 촉진되고, 갈색 색소 함량이 높아짐에 따라 명도와 황색도는 감소하고 적색도는 증가한다(Lund와 Ray, 2017). 밤고구마와 호박고구마를 온풍에 건조시킨 실험(Shin과 Lee, 2011)에서도 온도가 증가함에 따라 명도 값은 감소하고 적색도 값이 증가하는 것으로 나타나 본 연구와 유사한 경향성을 보였다. 본 실험에서도 고구마 칩 제조를 위한 굽는 온도가 높아짐에 따라 갈변 진행이 가속화되고 마이야르 반응과 비효소적 갈변 반응도 심화하여 갈색화 지표가 증가한 것으로 사료된다.

총 폴리페놀 및 총 플라보노이드 함량

굽는 온도를 달리하여 제조한 고구마 칩의 총 폴리페놀 및 총 플라보노이드 함량을 측정한 결과는 Table 4와 같다. 총 폴리페놀 함량은 열처리한 고구마 칩에 비해 생고구마 슬라이스에서 179.50 µg으로 가장 높았고, 140°C에서 구운 시료에서는 94.66 µg으로 가장 낮았다. 가열온도가 160~180°C로 높아짐에 따라 총 폴리페놀 함량도 116.31~177.11 µg으로 증가하는 경향을 보였고, 180°C에서 가열한 시료는 대조구인 생고구마 슬라이스와 비슷한 수준으로 총 폴리페놀 함량이 증가하였다. 총 플라보노이드 함량은 생고구마 슬라이스에서 139.15 µg으로 가장 높았고, 140°C에서 구운 시료에서는 58.10 µg으로 가장 낮았다. 가열온도가 160~180°C로 높아짐에 따라 총 플라보노이드 함량도 73.83~83.45 µg으로 다소 증가하는 경향을 보였으나, 생고구마 슬라이스보다 40.03% 낮은 총 플라보노이드 함량을 나타냈다.

플라보노이드는 헤테로고리로 연결된 두 개의 방향족 고리를 포함하는 폴리페놀에 속하는 물질들(Crozier 등, 2010)로, 박테리아, 곰팡이, 바이러스나 곤충으로부터 식물체를 보호하는 역할을 한다(Cory 등, 2018). 감자와 고구마에 함유된 총 폴리페놀 및 플라보노이드 함량은 당근, 양파, 토마토 등 다른 식품류에 비해 높은 편이다(Chun 등, 2005). 고구마에는 caffeoylquinic acid isomer, caffeic acid, chlorogenic acid, *p*-coumaric, caffeic, ferulic acid 등의 폴리페놀 물질이 함유되어 있으며, 중심부보다 바깥쪽에 페놀 물질 함량이 많은 것으로 알려져 있다(Im 등, 2021). 폴리페놀 함량은 고구마의 품종, 조리 및 저장 방법, 온도, 시간 등에 따라 달라진다(Takenaka 등, 2006). Lee 등(2012)의 연구에서 연자미는 조리하지 않은 시료에서 총 폴리페놀 함량이 73.6 mg으로 가장 높았고, 찌거나 굽게 되면 총 폴리페놀이 각각 44.29% 및 47.55% 감소하는 것을 확인하여 가열조리에 의해 폴리페놀 화합물이 손실됨을 보고하였다.

일반적으로 폴리페놀 화합물들은 열에 의해 잘 파괴되지는 않으나, 일부 작물에서는 조리 과정 중에 손실이 일어난다(Arfaoui, 2021). 이는 신선한 고구마에는 폴리페놀과 폴리페놀 산화효소(polyphenoloxidase, PPO)가 세포 내의 다른 기관에 존재하다가 열처리에 의해 세포와 세포 소기관이 손상되면서 폴리페놀과 PPO가 결합하여 폴리페놀의 일부가 이성질체로 변하면서 신선한 고구마에 비해 가열한 고구마의 총 폴리페놀 함량이 감소하기 때문이다(Arfaoui, 2021). 식품 중의 페놀 물질들은 세포벽과 단단히 결합하여 있는 상태로 존재하고, 다양한 열처리, 살균, 발효, 동결 등의 가공과정에 의해 결합형의 페놀 물질들이 분리되어 나온다(Dewanto 등, 2002; Ravichandran 등, 2002). 가열처리 는 세포 내에 분리되어 있던 페놀 물질들과 PPO의 결합을 도와 페놀산들의 분해를 촉진한다(Padda와 Picha, 2008).

Table 4. Total polyphenol and total flavonoid contents of sweet potato chips made with different baking temperature

Measurement	Temperature (°C)			
	Non-baked	140	160	180
Total polyphenol (µg GAE ¹⁾ /g)	179.50±0.45 ^a	94.66±1.70 ^c	116.31±4.00 ^b	177.11±2.24 ^a
Total flavonoid (µg QE ²⁾ /g)	139.15±2.87 ^a	58.10±0.09 ^d	73.83±0.60 ^c	83.45±0.56 ^b

Data were the mean±SD of triplicate experiment.

Values with the different superscripts (a-d) within the same row are significantly different at $P<0.05$.

¹⁾GAE: gallic acid equivalent.

²⁾QE: quercetin equivalent.

선행연구(Sultana 등, 2008)에 따르면 총 폴리페놀 함량은 배, 시금치 등을 전자레인지로 가열한 경우에서 높게 나타났다. 또한, 당근을 끓이거나, 튀기거나 전자레인지로 조리한 경우에 더 높은 것을 확인하였다. 이러한 연구를 통해 가열 조리는 폴리페놀 함량을 증가시켜 유용하며 조리에 의해 페놀 물질들이 쉽게 추출되어 생체이용률을 높일 수 있음을 알 수 있다. 총 폴리페놀은 식품 가공 후에 증가하는 것으로 사료되며, 이는 가공을 통해 식품 조직이 부드러워지고 세포벽의 연화 및 파괴가 일어나서 페놀 물질들의 유출이 용이해지기 때문으로 사료된다(Bernhardt와 Schlich, 2005).

본 연구에서도 신선한 고구마의 폴리페놀 함량이 가장 높았고, 140°C에서 구운 경우 폴리페놀 물질이 감소하였다. 그러나 굽는 온도가 160°C 및 180°C로 증가함에 따라 폴리페놀을 둘러싸고 있는 세포벽의 연화 및 파괴가 일어나 폴리페놀 화합물들의 용출이 증가하면서 총 폴리페놀 및 총 플라보노이드 함량도 높아진 것으로 사료된다.

항산화 활성 측정

가열온도를 달리하여 제조한 고구마 칩의 DPPH 및 ABTS 라디칼 소거 활성과 환원력을 측정한 결과는 Table 5와 같다. 고구마 칩 추출물이 DPPH 라디칼을 소거하는 활성은 가열하여 제조한 고구마 칩보다 열처리하지 않은 생고구마 슬라이스에서 72.00%로 가장 높았다. 가열온도가 높아짐에 따라 DPPH 라디칼 소거 활성도 증가하는 경향을 보여, 140°C에서 가열한 시료에서는 32.21%, 160°C에서는 48.05%, 180°C에서 가열한 시료에서는 67.58%로 증가하였다. 이는 고구마 칩의 가열온도가 160°C 및 180°C로 증가함에 따라 DPPH 라디칼 소거 활성이 140°C에서 가열한 시료보다 각각 1.49배 및 2.10배 증가한 수치였다.

고구마 칩 추출물의 ABTS 라디칼 소거 활성은 DPPH 라디칼 소거 활성과 유사한 경향을 보였다. 즉, 가열하지 않은 생고구마 슬라이스에서는 51.13%의 ABTS 라디칼 소거 활성을 보였고, 가열온도가 140°C에서 180°C까지 높아짐에 따라 ABTS 라디칼 소거 활성은 20.41%에서 39.07%까지 증가하였다. 이는 고구마 칩의 가열온도가 160°C 및 180°C로 증가한 시료의 ABTS 라디칼 소거 활성이 140°C에서 가열한 시료보다 각각 1.51배 및 1.91배 증가한 수치였다.

고구마 칩 추출물의 환원력도 720 nm에서 측정한 흡광도가 생고구마 슬라이스에서 0.5451로 가열처리한 시료보다 높게 나타났다. 오븐에서 굽는 온도를 달리하여 제조한 고구

마 칩의 경우는 굽는 온도에 비례하여 환원력도 증가하였다. 즉, 140°C에서 구운 고구마 칩에서는 0.1775의 흡광도를 나타냈고, 160°C 및 180°C에서 굽는 온도가 높아짐에 따라 환원력을 나타내는 흡광도 값도 0.2548에서 0.3530까지 증가하였다.

선행연구(Lee 등, 2012)에서도 찌거나 구운 고구마보다 생고구마 슬라이스에서 항산화 활성이 높게 나타났다. 생고구마의 DPPH와 ABTS 라디칼 소거 활성은 각각 84.9%와 73.1%였는데, 찌거나 굽는 조리에 의한 DPPH와 ABTS 라디칼 소거 활성은 각각 44.2~50.5% 및 31.3~49.6%까지 감소하였다(Lee 등, 2012). 식품의 항산화 활성은 식품 중에 함유된 폴리페놀 및 플라보노이드 성분의 가용화와 밀접한 관련이 있고, 가용화 온도는 개별 물질 및 식품의 종류에 따라 다른 것으로 알려져 있다(Lee 등, 2012). 예를 들어 옥수수(Dewanto 등, 2002)에 함유된 ferulic acid는 180°C 이상에서, 검정콩(Kim 등, 2011)에 함유된 chlorogenic acid는 250°C 이상에서, 여주(Choi 등, 2012)에 함유된 gallic acid, caffeic acid, *p*-coumaric acid의 경우는 200~250°C에서 가용화되는 것으로 보고하였다. Im 등(2021)의 연구에서도 고구마의 총 폴리페놀 및 총 플라보노이드 함량이 높을수록 DPPH 및 ABTS 라디칼 소거 활성이 증가한다고 보고하여 본 연구와 유사한 결과를 나타냈다. Cho와 Joo(2012)의 연구에서도 160~200°C까지 온도를 달리하여 볶은 자색고구마의 총 폴리페놀, 총 플라보노이드, 페놀산 및 갈변 물질의 함량을 측정한 결과 가열온도에 비례해 현저히 증가하였으며, DPPH 및 ABTS 라디칼 소거 활성 및 환원력으로 측정한 항산화 활성은 볶음 온도에 비례하여 증가함을 확인하였고, 200°C에서 볶은 시료는 160°C에서 볶은 시료에 비해 13.37% 더 높은 DPPH 라디칼 소거 활성을 보였으며, 볶은 자색고구마를 천연 항산화제로 사용 가능성에 대한 기대를 제시하였다.

아크릴아마이드 함량 분석

가열온도를 달리하여 제조한 고구마 칩의 아크릴아마이드 분석 결과는 Fig. 2와 같다. 가열하지 않은 생고구마 슬라이스에서는 시료 1 g당 0.48 ng으로 매우 낮은 아크릴아마이드가 검출되었다. 고구마 칩을 140°C 및 160°C에서 구운 경우 아크릴아마이드는 각각 2.05 및 2.34 ng으로 증가하였고, 이는 대조군의 아크릴아마이드 함량보다 각각 4.27 및 4.88배까지 증가한 수치였다. 고구마 칩의 가열온도가 180

Table 5. Antioxidant activities of sweet potato chips made with different baking temperature

Measurement	Temperature (°C)			
	Non-baked	140	160	180
DPPH radical scavenging (%)	72.00±0.95 ^a	32.21±0.33 ^d	48.05±0.49 ^e	67.59±0.29 ^b
ABTS radical scavenging (%)	51.13±0.31 ^a	20.41±0.74 ^d	30.77±0.82 ^e	39.07±0.08 ^b
Reducing power	0.55±0.00 ^a	0.18±0.00 ^d	0.25±0.00 ^e	0.35±0.00 ^b

Data were the mean±SD of triplicate experiment.

Values with the different superscripts (a-d) within the same row are significantly different at $P<0.05$.

Fig. 2. Acrylamide contents of sweet potato chips made with different baking temperature. Means with the different letters (a-c) above bars are significantly different at $P < 0.05$.

°C로 높아지면 아크릴아마이드 함량이 대조군 시료의 약 107.10배인 51.41 ng까지 증가하였다. 조리나 가공 중에 형성되는 아크릴아마이드 함량은 갈변과 상관관계가 있다 (Quayson과 Ayernor, 2007). 본 연구에서도 가열하지 않아 갈색화 지표가 22.42로 가장 낮은 생고구마 슬라이스의 아크릴아마이드 함량이 가장 낮게 나타났다. 반면 갈색화 지표가 가장 높았던 180°C에서 구운 시료의 아크릴아마이드 함량은 51.41 ng으로 가장 높게 나타났다.

식품의약품안전처에서 감자튀김과 과자류의 아크릴아마이드 함량을 1,000 ppb 이하로 권고하고 있으며(MFDS, 2020), 본 실험에서 나온 아크릴아마이드 검출량은 권고치 이하로 나타났다. 선행연구(No 등, 2018)에서 10가지 품종의 고구마를 슬라이스하여 160°C로 가열한 공기프라이어 2분 동안 튀겨 칩을 제조하고 아크릴아마이드 함량을 측정 한 결과, 품종에 따라 불검출~1,070 ppb의 아크릴아마이드를 확인하였다. 아크릴아마이드는 가열온도와 시간에 비례하여 그 생성량이 증가하는 것으로 알려져 있으며(Kim 등, 2009; Dessev 등, 2020), 아크릴아마이드의 유해성 평가는 고구마 칩의 섭취량, 섭취빈도, 개인의 건강상태 및 식습관 등을 고려한 종합적인 검토가 필요하다.

요 약

본 연구에서는 가열하지 않은 생고구마 슬라이스를 대조군으로 하고, 고구마 슬라이스를 오븐에서 3개의 온도(140, 160 및 180°C)에서 10분간 가열하여 제조한 고구마 칩의 품질 특성, 항산화 활성 및 아크릴아마이드 함량을 측정하였다. 고구마 칩의 수분함량은 대조군에서 65.20%로 가장 높았고, 굵는 온도가 시간이 140~180°C까지 높아짐에 따라 32.30%에서 7.21%로 감소하였다. 조희분, 조단백질 및 조지방도 굵는 온도에 비례하여 증가하는 경향을 보였다. 당도의 경우 생고구마 슬라이스보다 구운 고구마 칩에서 높게 나타났고, 특히 140°C에서 가장 높았고, 160~180°C로 온

도가 높아짐에 따라 당도는 감소하였다. 생고구마 슬라이스의 pH는 6.29로 약산성을 나타냈고 140°C에서 구운 고구마 칩의 pH는 6.45였으며, 굵는 온도가 160°C에서 180°C로 증가함에 따라 pH는 6.40에서 6.32로 감소하였다. 굵는 온도가 증가함에 따라 고구마 칩의 명도(L*)는 감소하였고, 갈색화 지표는 증가하였다. 총 폴리페놀과 총 플라보노이드 함량은 생고구마 슬라이스에서 높았으나, 굵는 온도가 높아짐에 따라 증가하여 180°C에서 제조한 고구마 칩의 총 폴리페놀 함량은 생고구마 슬라이스와 유사한 수치를 나타냈다. 항산화 활성도 구운 고구마 칩에 비해 대조군에서 가장 높았으나, 굵는 온도가 높아짐에 따라 항산화 활성이 증가하는 경향을 나타냈다. 굵는 온도가 높아짐에 따라 아크릴아마이드 생성도 증가하였다. 가열하지 않은 생고구마 슬라이스에서는 시료 1 g당 0.48 ng으로 매우 소량의 아크릴아마이드가 검출되었으나, 고구마 칩의 제조 온도가 140~180°C로 높아짐에 따라 아크릴아마이드 생성량도 생고구마 슬라이스보다 4.27~107.10배까지 증가하였다. 이상의 결과로 볼 때 140~180°C에서 가열한 고구마보다 생고구마의 총 폴리페놀, 총 플라보노이드 및 항산화 활성이 높았으며, 가열온도에 비례하여 아크릴아마이드 생성이 가속화되는 것을 확인하였다. 따라서 고구마 칩 제조 시 항산화 물질의 함량, 항산화 활성 및 아크릴아마이드 생성 등을 고려하여 적절한 가열온도 설정이 필요할 것으로 사료된다.

REFERENCES

- Acar OC, Pollio M, Monaco RD, Fogliano V, Gokmen V. Effect of calcium on acrylamide level and sensory properties of cookies. *Food Bioproc Tech.* 2012. 5:519-526.
- Amagloh FC, Yada B, Tumuhimbise GA, Amagloh FK, Kaaya AN. The potential of sweetpotato as a functional food in sub-Saharan Africa and its implications for health: A review. *Molecules.* 2021. 26:2971. <https://doi.org/10.3390/molecules26102971>
- AOAC. Official methods of analysis of AOAC international. 16th ed. Association of Official Analytical Chemists, Washington, DC, USA. 1995. Ch 3, p 1-26.
- Arfaoui L. Dietary plant polyphenols: effects of food processing on their content and bioavailability. *Molecules.* 2021. 26:2959. <https://doi.org/10.3390/molecules26102959>
- Asadi K, Ferguson LR, Philpott M, Karunasinghe N. Cancer-preventive properties of an anthocyanin-enriched sweet potato in the APC^{MIN} mouse model. *J Cancer Prev.* 2017. 22:135-146.
- Bernhardt S, Schlich E. Impact of different cooking methods on food quality: retention of lipophilic vitamins in fresh and frozen vegetables. *J Food Eng.* 2005. 17:327-333.
- Caetano PK, Mariano-Nasser FAC, Mendonca VZ, Furlaneto KA, Daiuto ER, Vieites RL. Physicochemical and sensory characteristics of sweet potato chips undergoing different cooking methods. *Food Sci Technol Campinas.* 2018. 38:434-440.
- Cheung LM, Cheung PC, Ooi VE. Antioxidant activity and total phenolics of edible mushroom extracts. *Food Chem.* 2003. 81:249-255.
- Cho KM, Joo OS. Enhances antioxidant effect of purple sweet potato by roasting. *Korean J Food Preserv.* 2012. 19:735-743.
- Choi JS, Kim HY, Seo WT, Lee JH, Cho KM. Roasting enhan-

- ces antioxidant effect of bitter melon (*Momordica charantia* L.) increasing in flavan-3-ol and phenolic acid contents. Food Sci Biotechnol. 2012. 21:19-26.
- Chun OK, Kim DO, Smith N, Schroeder D, Han JT, Lee CY. Daily consumption of phenolics and total antioxidant capacity from fruit and vegetables in the American diet. J Sci Food Agric. 2005. 85:1715-1724.
- Constantinou C, Koutsidis G. Investigations on the effect of antioxidant type and concentration and model system matrix on acrylamide formation in model Maillard reaction systems. Food Chem. 2016. 197:769-775.
- Cory H, Passarelli S, Szeto J, Tamez M, Mattei J. The role of polyphenols in human health and food systems: A mini-review. Front Nutr. 2018. 5:87. doi: 10.3390/food.2018.00087.
- Crozier A, Del Rio D, Clifford MN. Bioavailability of dietary flavonoids and phenolic compounds. Mol Aspects Med. 2010. 31:446-467.
- Dessev T, Lalanne V, Keramat J, Jury V, Prost C, Le-Bail A. Influence of baking condition on bread characteristics and acrylamide concentration. J Food Sci Nutr Res. 2020. 3:291-310.
- Dewanto V, Wu X, Liu RH. Processed sweet corn has higher antioxidant activity. J Agric Food Chem. 2002. 50:4959-4964.
- FDA. Food & Drug Administration. Detection and quantitation of acrylamide in foods. 2003 [cited 2020 Feb 12]. Available from: <https://www.fda.gov/food/chemicals/detection-and-quantitation-acrylamide-foods>
- Han JS. Preparation of mixed beverages for breakfast made primarily with the hydrolysate of sweet potato and its quality characteristics. Korean J Food Cook Sci. 2004. 20:271-278.
- Huang DJ, Lin CD, Chen HJ, Lin YH. Antioxidant and antiproliferative activities of sweet potato (*Ipomoea batatas* (L.) Lam 'Tainong 57') constituents. Bot Bull Acad Sin. 2004. 45:179-186.
- Im YR, Kim I, Lee J. Phenolic composition and antioxidant activity of purple sweet potato (*Ipomoea batatas* (L.) Lam.): varietal comparisons and physical distribution. Antioxidants. 2021. 10:462. <https://doi.org/10.3390/antiox10030462>
- Jang GY, Li M, Lee SH, Woo KS, Sin HM, Kim HS, et al. Optimization of processing conditions and selection of optimum species for sweet potato chips. Korean J Food Nutr. 2013. 26:565-572.
- Kim HG, Kim GW, Oh H, Yoo SY, Kim YO, Oh MS. Influence of roasting on the antioxidant activity of small black soybean (*Glycine max* L. Merrill). LWT—Food Sci Technol. 2011. 44:992-998.
- Kim JM, Choi JH, Choi YS, Han DJ, Kim HY, Lee MA, et al. Effects of frying time and temperature on formation of acrylamide and sensory evaluation in french fries. Korean J Food Sci Technol. 2009. 41:471-475.
- Kim S, Seo D, Park J, Kim SN, Choi Y, Nam J, et al. Food composition of raw, boiled, and roasted sweet potatoes. Korean J Community Living Sci. 2017. 28:59-68.
- Kim Y, Lee S, Kim M, Kim G, Chung HS, Park HJ, et al. Physicochemical and organoleptic qualities of sliced-dried persimmons as affected by drying methods. Korean J Food Sci Technol. 2009. 41:64-68.
- Kwon YR, Youn KS. Physicochemical of burdock (*Arctium lappa* L.) tea depending on streaming and roasting treatment. Korean J Food Preserv. 2014. 21:646-651.
- Lee YM, Bae JH, Kim JB, Kim SY, Chung MN, Park MY, et al. Changes in the physiological activities of four sweet potato varieties by cooking condition. Korean J Nutr. 2012. 45:12-19.
- Lineback DR, Coughlin JR, Stadler RH. Acrylamide in foods: a review of the science and future considerations. Ann Rev Food Sci Technol. 2012. 3:15-35.
- Lund MN, Ray CA. Control of Maillard reactions in foods: strategies and chemical mechanisms. J Agric Food Chem. 2017. 65:4537-4552.
- Ministry of Food and Drug Safety (MFDS). Food information. 2020 [cited 2021 Aug 16]. Available from: https://www.mfds.go.kr/brd/m_511/view.do?seq=33021&srchFr=&srchTo=&srchWord=&srchTp=&itm_seq_1=0&itm_seq_2=0&multi_itm_seq=0&company_cd=&company_nm=&page=1
- Mustafa A, Anderson R, HellEnas KE, Aman P, Kamal-Eldin A. Moisture enhances acrylamide reduction during storage in model studies of rye crispbread. J Agric Food Chem. 2008. 56:11234-11237.
- No J, Lee CE, Huang M, Lee J, Nam S, Shin M. Acrylamide content and quality characteristics of sweet potato chips using different cultivars. Korean J Food Sci Technol. 2018. 50:308-315.
- Oyaizu M. Studies on products of browning reaction — antioxidant activities of products of browning reaction prepared from glucosamine—. Jap J Nutr. 1986. 44:307-315.
- Quayson ET, Ayernor GS. Non-enzymatic browning and estimated acrylamide in roots, tubers and plantain products. Food Chem. 2007. 105:1525-1529.
- Ravichandran K, Ahmed AR, Knorr D, Smetanska I. The effect of different processing methods on phenolic acid content and antioxidant activity of red beet. Food Res Int. 2002. 48:16-20.
- Re R, Pellegrini N, Proteggente A, Pannala A, Yang M, Rice-Evans C. Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay. Free Radic Biol Med. 1999. 26:1231-1237.
- Shin MY, Lee WY. Physical properties and preference of a steamed sweet potato slab after mild hot air drying. Korean J Food Cook Sci. 2011. 27:73-81.
- Sultana B, Anwar F, Iqbal S. Effect of different cooking methods on the antioxidant activity of some vegetables from Pakistan. Int J Food Sci Technol. 2008. 43:560-567.
- Sung WC, Chen CY. Influence of cookies formulation on the formation of acrylamide. J Food Nutr Res. 2017. 5:370-378.
- Takenaka M, Nanayama K, Isobe S, Murata M. Changes in caffeic acid derivatives in sweet potato (*Ipomoea batatas* L.) during cooking and processing. Biosci Biotechnol Biochem. 2006. 70:172-177.
- Teow CC, Truong V, McFeeters RF, Thompson RL, Pecota KV, Yencho GC. Antioxidant activities, phenolic and β -carotene contents of sweet potato genotypes with varying flesh colors. Food Chem. 2007. 103:829-838.
- Woo KS, Ko JY, Kim HY, Lee YH, Jeong HS. Changes in quality characteristics and chemical components of sweet potatoes cultivated using different methods. Korean J Food Sci Technol. 2013. 45:305-311.