

다시마의 건조 과정 중에 발생하는 후코잔틴(fucoxanthin)과 총항산화능의 변화

백수현¹ · 이혜주¹ · 이채현¹ · 남택정² · 이상길^{1,*}

¹부경대학교 식품영양학과, ²부경대학교 수산과학연구소 미래수산식품연구소

Change of fucoxanthin and total antioxidant capacities of *Saccharina japonica* during the drying process

Su Hyeon Baek¹, Hye Ju Lee¹, Chae Hyeon Lee¹, Taek-Jeong Nam², and Sang Gil Lee^{1,*}

¹Department of Food Science and Nutrition, Pukyong National University

²The Future Fishers Food Research Center, Institute of Fisheries Sciences, Pukyong National University

Abstract Kelp (*Saccharina japonica*) contains various bioactive compounds, including vitamins, minerals (especially iodine and potassium), alginic acid, fucoxanthin, and various antioxidants. Kelp is mainly used as a dried product. The purpose of this study was to investigate the stabilities of antioxidant capacities and fucoxanthin of kelp by different conventional drying conditions including hot air drying at 70°C and natural drying methods. Fucoxanthin, total phenolic contents, and total antioxidant capacity by ABTS, DPPH, and FRAP assays were significantly decreased after 5 to 10 h of hot air drying at 70°C. The assay values were also significantly decreased by 50% after 2 days of drying due to ultraviolet exposure. The findings demonstrate that heat and ultraviolet exposure during drying of kelp could affect the degradation of bioactive compounds, especially fucoxanthin and polyphenols. Optimal conditions should be considered during kelp drying and storage.

Keywords: *Saccharina japonica*, dried kelp, fucoxanthin, total antioxidant capacity, total phenolic contents

서 론

다시마(*Saccharina japonica*, kelp)는 다시마목 다시마과에 속하는 갈조류로서 미네랄 및 비타민이 풍부하며, 특히 알긴산, 후코이단 및 카로티노이드의 일종인 후코잔틴(fucoxanthin)이 풍부한 해조류이다(An과 Koo, 2017). 다시마는 우리나라, 중국, 일본 등에서 식자재로 다양하게 소비되고 있으며, 일반적으로 건조 다시마의 형태로 식품에서 육수의 감칠맛을 내기 위하여 사용되고 있다. 많은 연구에 의해 다시마는 항산화, 항염증, 항당뇨, 항암 및 항이상지질 효과 등을 보이는 것으로 나타났다(Cho와 Bang, 2004; Heo 등, 2010). 특히, 이러한 효과는 미역 및 다시마 등의 갈조류에 존재하는 카로티노이드(carotenoid)의 일종인 후코잔틴의 생리활성효과도 연관되어 있음이 다양한 연구를 통하여 밝혀졌다(Maeda 등, 2008; Ravi 등, 2018; Sachindra 등, 2007).

카로티노이드는 산소와의 결합이 용이하여 강력한 항산화 능력을 갖추고 있는 것으로 알려져 있으며, 항염증, 항비만, 그리고 항당뇨 등 다양한 생리활성을 보이는 것으로 알려졌다(Sandmann, 2019). 특히, 갈조류의 후코잔틴은 항산화, 항염증, 항비만 등의

다양한 생리활성을 가지고 있다(Foo 등, 2017; Gammone와 D'Orazio, 2015; Liu 등, 2011). 그러나, 후코잔틴은 지용성의 공액 이중결합 구조로 되어있어 열, 빛 및 화학약품에서 안정성이 떨어지는 것으로 알려져 있다(Zhang 등, 2015). 후코잔틴은 지용성으로 일반적으로 아세톤이나 DMSO를 이용하여 추출하나, 최근 에탄올을 이용하여도 높은 추출수율을 보이는 것으로 알려졌다(Kim 등, 2012; Shin 등, 2013).

일반적으로 다시마의 건조는 수확 후, 자연 일광 건조의 형태로 일차적인 건조를 거친 후, 기계를 이용하여 열풍 건조 공정을 거쳐 건조 다시마를 제작한다. 하지만, 다시마의 후코잔틴은 열에 약하며, 또한 자외선에 노출되면 파괴되어 안정성이 떨어지는 특성을 가지고 있어서, 다시마를 건조하는 과정에서 다량의 후코잔틴이 파괴될 가능성이 있다(Shin 등, 2013). 또한 시중에 유통되는 건조 다시마의 포장 재질이 건조 다시마의 자외선 노출을 방어하지 못하는 이유로 유통, 저장 및 판매 과정에서 다시마의 후코잔틴이 파괴될 가능성이 있다(Shin 등, 2013). 특히 최근 본 연구팀은 시중에 판매되는 건조 다시마의 후코잔틴이 원물 다시마와 비교하여 현저히 적거나 또는 검출되지 않는 것으로 확인하였다(data not shown).

여러 연구가 후코잔틴의 안정성에 대하여 연구하였으며, 후코잔틴의 열에 의한 파괴에 대한 연구 결과를 발표하였으나, 자외선에 의한 분해에 관한 연구는 많이 이루어지지 않았다. 특히, 다시마에 함유된 후코잔틴의 열에 의한 안정성은 연구가 이루어졌으나, 일광 건조 중 노출되는 자외선에 의해 파괴되는 후코잔틴의 변화량에 대한 연구는 부족한 실정이다. 건조 다시마 제조 공정에서 일광 건조가 매우 중요한 건조 과정이므로 본 연구에서

*Corresponding author: Sang Gil Lee, Department of Food Science and Nutrition, Pukyong National University, Busan 48513, Republic of Korea

Tel: 82-051-629-5851

Fax: 82-051629-5842

E-mail: sglee1125@pknu.ac.kr

Received November 19, 2019; revised December 1, 2019;

accepted December 2, 2019

는 열풍 건조와 일광 건조 조건에서 다시마의 후코잔틴 변화를 기존의 검출 시간이 긴 high pressure liquid chromatography (HPLC) 방법을 보완하여 ultra pressure liquid chromatography (UPLC)를 이용하여 분석하였다. 또한, 후코잔틴은 다시마의 중요한 항산화 물질로서 후코잔틴의 변화량과 함께 건조 조건 및 시간에 따른 총 폴리페놀 함량과 총 항산화 능력의 변화를 측정하여 건조 다시마의 건조 조건에 따른 다시마의 생리활성물질 변화를 관찰하였다.

재료 및 방법

재료 및 시약

다시마는 부산광역시 기장군 기장읍에서 생산하여 수확 직후 제공받아 햇볕에 노출 되지 않은 상태로 사용하기 전까지 -20°C에서 냉동보관 하였다. Ciocalteu's phenol 시약, 갈산(gallic acid), 2,2'-azobis(2-amidinopropane) HCl (AAPH), 1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl (DPPH), 아스코르브산(ascorbic acid), 후코잔틴 표준 물질은 Sigma-Aldrich (St. Louis, MO, USA)에서 구입하였다. 2,2'-azino-bis(3-ethylbenzthiazoline-6-sulfonic acid)diammonium salt (ABTS), TPTZ (2,4,6-tri[2-pyridyl]-s-triazine) Iron(III)chloride (FeCl₃), 황산 제일철(FeSO₄)은 Roche (Roche, Basel, Switzerland)에서 구입하였다. 후코잔틴 분석을 위해 사용한 용매는 HPLC 등급을 사용하였다.

다시마 건조

냉동 상태의 다시마를 잘라 70°C에서 1, 5, 10, 20, 50, 100, 150 및 200시간 동안 리콧 LD-528 전기 식품 열풍 건조기 (L'EQUIP, Hwaseong, Gyeonggi)를 이용하여 열풍 건조하였다. 또한, 다시마의 일광 건조 상태에서의 후코잔틴 및 총 항산화 능력의 변화를 알아보기 위하여 자연 상태에서 1, 2, 3, 4 및 5일 동안 건조하였다. 평균기온, 최고기온, 최저기온, 평균 구름의 양, 일조량 등의 일광 건조 조건은 Table 1과 같다.

다시마로부터 후코잔틴 및 폴리페놀 추출

건조 다시마 10 g을 80% 에탄올 500 mL을 이용하여 후코잔틴 및 폴리페놀을 추출하였다. 추출 수율을 높이기 위하여 균질기 (Daihan Scientific, Wonju, Gangwon)를 이용하여 12,000 rpm에서 1분 30초 동안 균질화를 하였으며, Whatman #1 여과지(Whatman, Maidstone, United Kingdom)를 이용하여 추출물을 여과하였다. 위와 같은 방식으로 여과지에 걸러진 건조 다시마를 2회 반복하여 추출하여 추출물을 획득한 후 감압농축법을 이용하여 에탄올을 제거한 후, 50% 에탄올 상태로 100 mL로 최종 부피를 보정하여 -20°C에 보관하면서 실험에 사용하였다.

후코잔틴 함량 분석

건조 다시마의 후코잔틴의 함량은 Waters UPLC Acquity-PDA 장치를 이용하여 분석하였다. 사용한 칼럼은 UPLC용 Acquity

UPLC C18 1.7 M×2.1×50 mm column (Waters, Milford, MA, USA)를 이용하며, 이동상은 0.1% 개미산(formic acid)이 추가된 증류수(A)와 0.1% 개미산이 추가된 acetonitrile을 사용하여 90% A/10% B 0분, 90% A/10% B 1분, 90% A/10% B 1분, 70% A/30% B 2분, 50% A/50% B 4분, 30% A/70% B 6분, 10% A/90% B 7분, 0% A/100% B 9분, 90% A/10% B 12분, 90% A/10% B 14분의 조건을 이용하며, 4 µL의 시료를 주입하여 0.4 mL/min의 유속으로 분석을 하였다. 후코잔틴은 450 nm 파장에서 검출하였으며, 후코잔틴 표준 물질을 이용하여 표준 곡선을 제작하여 건조 다시마의 후코잔틴 함량(mg/g)을 측정하였다. 각각의 건조 다시마의 수분함량을 상압건조법을 이용하여 측정된 후 건조 다시마의 수분함량을 이용하여 측정된 후코잔틴 함량을 보정하였으며 건조 환경에 따른 감소는 %로 환산하여 비교하였다.

총 폴리페놀(polyphenol) 함량 분석

건조 다시마의 총 폴리페놀함량은 Folin-Ciocalteu's 시약을 사용한 비색 분석법을 이용하여 측정하였다. 10 µL의 적절하게 희석 된 건조 다시마 추출물을 96 well microplate에서 130 µL의 증류수와 혼합 한 후, 10 µL의 Folin-Ciocalteu's를 추가하였다. 시료 혼합액을 상온에서 6분 반응 시킨 후, 100 µL의 7% Na₂CO₃ 용액을 첨가 하였다. 혼합물의 흡광도는 상온에서 90분 반응 후 마이크로 플레이트 리더를 사용하여 750 nm 파장에서 측정되었다. 추출다시마의 총 폴리페놀 함량은 각 조건의 건조 다시마의 수분함량을 측정하여 mg gallic acid equivalent (GAE)/g 건조 중량 (dry weight, dw)으로 보정하였다. 각 추출물은 3회 분석 하여 평균±표준편차로 기술하였으며 건조 환경에 따른 감소는 %로 환산하여 비교하였다.

총 항산화 능력 분석

다양한 조건에서의 건조 다시마의 총 항산화 능력의 변화는 ABTS 및 DPPH 라디칼 소거 능력 및 ferric reducing antioxidant power (FRAP) 분석법을 이용하여 다음과 같이 측정하였다.

건조 다시마의 ABTS 라디칼 소거능 측정

ABTS 라디칼 소거능에 의한 건조 다시마의 총 항산화 능력을 측정하였다. AAPH 1.0 mM을 2.5 mM ABTS와 100 mL PBS를 이용하여 혼합하였다. 혼합물을 80°C에서 40분 동안 수조에서 가열하여 ABTS 라디칼을 생성시켰다. ABTS 라디칼이 발생한 후, 라디칼 용액을 0.45 µM PVDF syringe filter를 사용하여 여과하였다. 적당히 희석시킨 건조 다시마 추출물 5 µL를 준비된 ABTS 라디칼 용액 245 µL에 첨가하였다. 혼합물을 37°C에서 10분 동안 반응 시킨 후 734 nm에서 샘플 대신 PBS와 반응 시킨 기준 시료와의 흡광도 차이를 측정하였다. 건조 다시마의 총 항산화 능력은 수분함량으로 보정하였으며, mg vitamin C equivalent (VCE)/g 건조 중량으로 표현하였으며 건조 환경에 따른 감소는 %로 환산하여 비교하였다.

Table 1. Weather condition during natural drying of *Saccharina japonica*

Drying day	Average temperature (°C)	Highest temperature (°C)	Lowest temperature (°C)	Average cloud cover	Solar radiation quantity (MJ/m ²)
1	28.1	31.3	25.6	0.9	13.55
2	29.4	33.0	26.7	1.3	15.74
3	28.9	32.7	26.3	3.8	21.04
4	28.8	32.2	26.4	2.0	17.53
5	28.8	32.8	26.1	4.5	20.66

건조 다시마의 DPPH 라디칼 소거능 측정

DPPH 라디칼 소거 활성에 의한 건조 다시마의 총 항산화 능력을 측정하였다. 100 μ M의 DPPH (2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl)를 80% 메탄올에 녹여 이용하여 DPPH 라디칼을 제조하였다. 적당히 희석시킨 건조 다시마 추출물 5 μ L를 준비된 DPPH 라디칼 용액 295 μ L와 혼합하였다. 샘플 추출물과 라디칼 용액 사이의 샘플 및 라디칼 용액 혼합물의 감소된 흡광도는 30분 동안 반응 후 510 nm에서 측정되었다. 샘플 대신 50% 메탄올을 기준 시료로 사용하였다. DPPH 라디칼 소거능에 의한 건조 다시마의 총 항산화 능력은 건조 다시마 샘플의 수분함량으로 보정하였으며, mg vitamin C equivalent (VCE)/g 건조 중량으로 표현하였으며 건조 환경에 따른 감소는 %로 환산하여 비교하였다.

Ferric reducing antioxidant power (FRAP assay) 활성

건조 다시마 샘플의 FRAP법에 의한 총 항산화 능력은 Benzie 및 Strain의 방법을 일부 변형하여 사용하였다(Benzie와 Strain, 1996). FRAP 소거활성법은 산화제로 작용하는 ferric tripyridyltriazine (Fe^{3+} -TPTZ)이 낮은 pH에서 항산화제와 반응하여 ferrous tripyridyl-triazine (Fe^{2+} -TPTZ)로 환원되면서 발생하는 청색 과정의 환원력을 계산하는 방법이다. FRAP 시약은 아세트산 완충액 (300 mM, pH 3.6)과 10 mM TPTZ (2,4,6-tri[2-pyridyl]-s-triazine), 20 mM $FeCl_3$ 용액과 증류수를 10:1:1:1.2의 비율로 혼합하여 제

조하였다. FRAP 시약은 사용할 때까지 37°C로 유지하였다. 희석된 건조 다시마 추출물 10 μ L를 250 μ L를 FRAP 시약과 혼합하고 37°C에서 4분 동안 반응한 후 593 nm에서 흡광도를 측정하였다. 황산제일철($FeSO_4$)을 표준 물질로 사용하여 표준 곡선을 제조 하였으며, 건조 다시마의 환원력은 건조 다시마의 수분함량을 이용하여 보정 후, mM $FeSO_4$ equivalent/g 건조 중량으로 나타내었으며, 건조 환경에 따른 감소는 %로 환산하여 비교하였다.

통계처리

모든 분석은 3회 반복하여 평균 \pm 표준편차로 표시하였으며, 통계분석은 Graphpad 7.0 (GraphPad Software, San Diego, USA)을 이용하였다. 결과 간의 차이는 ANOVA를 이용하여 실시하였고, 후코잔틴 함량, 총 폴리페놀 함량 및 총 항산화 능력 간의 연관성은 Pearson correlation을 이용하여 분석하였다. 결과들 간의 유의차는 $p < 0.05$ 의 유의수준에서 Tukey 사후검정을 이용하여 분석하였다.

결과 및 고찰

건조 조건에 의한 후코잔틴 함량 변화 분석

10 g 건조 다시마의 후코잔틴 함량을 UPLC를 이용하여 측정 한 결과는 2.75 ± 0.18 (mg/g)으로 나타났다. 열풍 건조에 의한 후

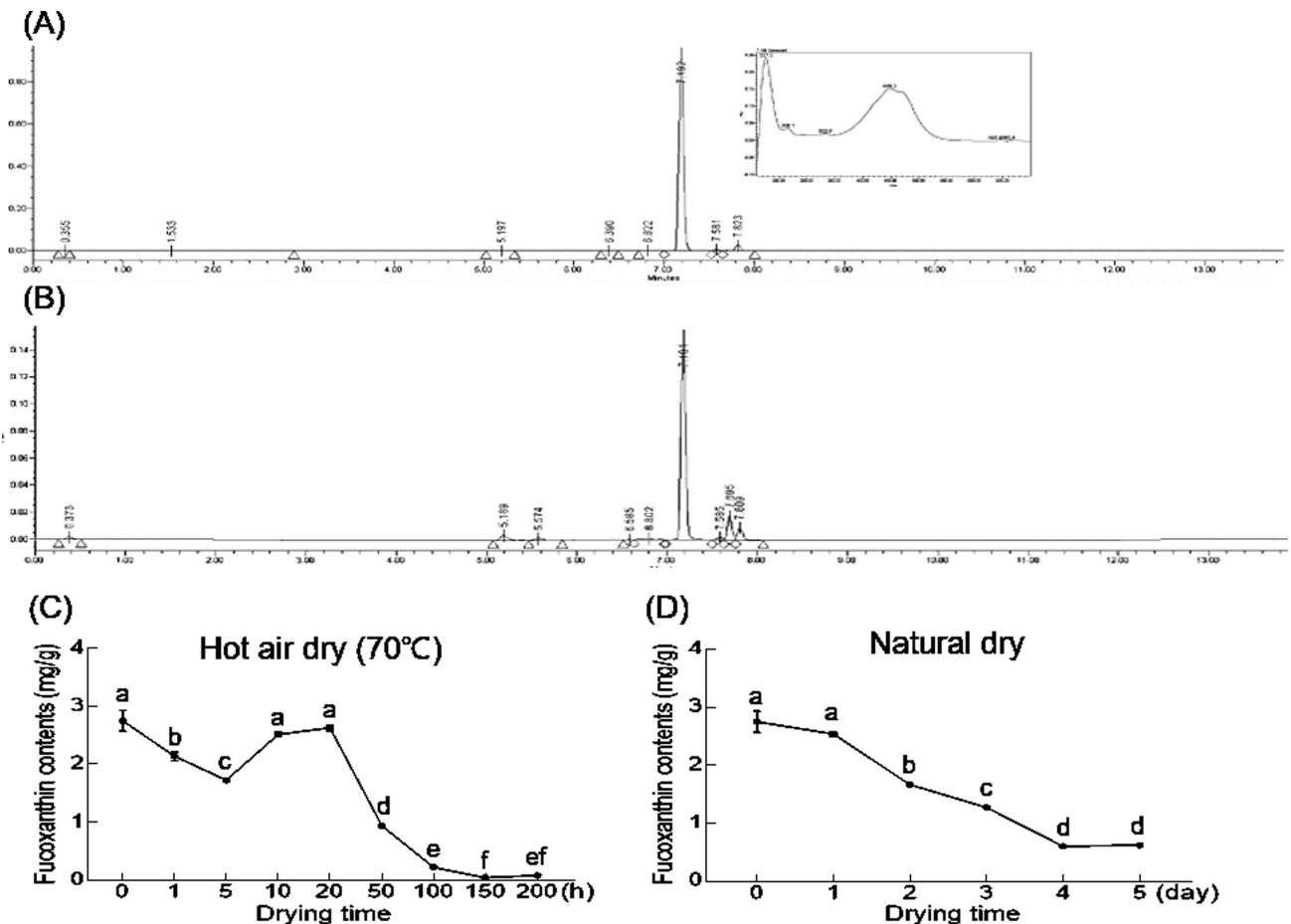


Fig. 1. Analysis of fucoxanthin and change of fucoxanthin during drying process of *Saccharina japonica*. Chromatogram of fucoxanthin standard and spectrum (A), Detection of fucoxanthin from a fresh *Saccharina japonica* 80% ethanol extract at 7.18 min (B), Change of fucoxanthin in *Saccharina japonica* during drying process by hot air drying (C), and natural drying (D). Different letters indicate a significant difference ($p < 0.05$) based on ANOVA with Tukey's post hoc analysis.

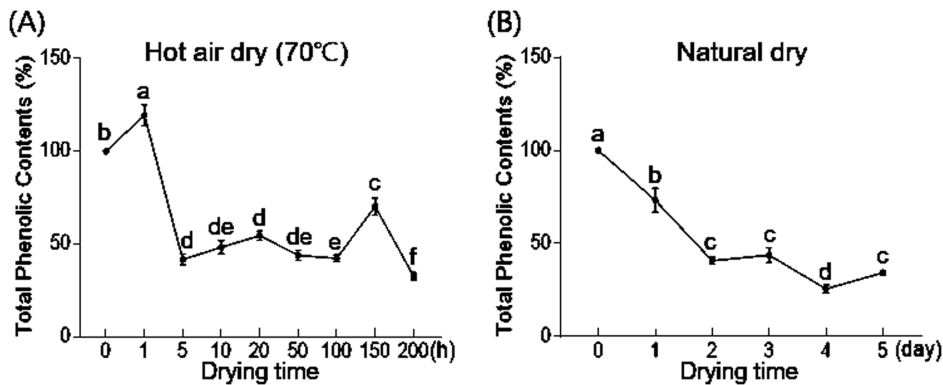


Fig. 2. Change of total phenolic contents during drying process of *Saccharina japonica*. Change of total phenolic contents during drying process of *Saccharina japonica* by hot air drying (A), and natural drying (B). Different letters indicate a significant difference ($p < 0.05$) based on ANOVA with Tukey's post hoc analysis.

코잔틴 함량의 변화는 Fig. 1과 같다. 후코잔틴 표준 물질은 7.19 min에 검출 되었으며(Fig. 1A), 건조 다시마 원물에서는 7.18 min에 검출되었었다(Fig. 1B). 이를 바탕으로 후코잔틴의 용출 시간과 UV 스펙트럼을 비교하여 건조 다시마의 후코잔틴을 정성하였다. 다시마 원물의 수분함량 보정 후 후코잔틴의 함량은 $2.75 \pm 0.18 \text{ mg/g}$ 이었으며, 70°C 열풍 건조에 의한 후코잔틴의 함량은 20시간까지는 $2.62 \pm 0.04 \text{ mg/g}$ 으로 비교적 안정적이었으나(Fig. 1C), 50시간 경과 후 $0.94 \pm 0.18 \text{ mg/g}$ 으로 34%까지 후코잔틴이 감소한 것을 확인하였다. 특히, 100시간 및 150시간 후에는 $0.22 \pm 0.01 \text{ mg/g}$ 및 $0.08 \pm 0.00 \text{ mg/g}$ 으로 대부분의 후코잔틴이 파괴된 것을 확인하였다. 일반적으로 다시마 건조 공정은 20시간이내의 열풍 건조를 통하여 이루어지므로 열풍 건조의 경우 후코잔틴의 양은 안정한 것으로 사료된다. 하지만 일광 건조의 경우 1일 건조하였을 때 후코잔틴의 양은 크게 줄어들지 않았으나 이틀째 건조하였을 때 그 양이 $1.67 \pm 0.02 \text{ mg/g}$ 로 유의적으로 줄어들었으며, 4일 간 일광 건조하였을 때 후코잔틴의 함량은 $0.60 \pm 0.00 \text{ mg/g}$ 으로 25% 이하까지 파괴된 것을 확인하였다. 그러므로, 일반적으로 다시마를 가공할 때 가공 단가를 위해 일광 건조를 통하여 수분함량을 줄이는 작업이 이루어지며, 이때 많은 양의 후코잔틴이 파괴될 것이라고 예상할 수 있다. 특히, 이러한 결과는 일광 건조가 고온의 조건이 아님에도 불구하고 자외선에 의한 후코잔틴의 파괴가 쉽게 일어 날 수 있음을 보여주는 결과이다. 실제로 다른 카로티노이드의 일종인 베타카로틴의 경우 자외선과 형광 빛(fluorescent light)에 노출되었을 때, 8시간의 자외선에 노출되었을 때 약 50%의 베타-카로틴이 손실되는 것을 확인하였으며, 형광 빛의 경우 24시간 노출 후 50%의 손실을 확인하였다(Pesek와 Warthesen, 1990; Scita, 1992). 또한, butylated hydroxytoluene (BHT)이나 알파-토코페롤 등의 항산화 물질을 첨가하였을 때, 카로티노이드의 손실을 늦출 수 있음을 확인하였다(Tsuchihashi 등, 1995; George등, 2005). 또다른 연구에서도 미역에서 추출한 후코잔틴의 경우 70°C에서 1일 저장 동안 30%가 감소하여 열에 약함을 보여주었다. 또한, 빛 안정성을 확인하기 위해 60 W 전구를 1 m의 거리에서 조사한 경우 1일 지난 후 60%의 후코잔틴 감소를 확인하였으며, 빛이 열보다 약 2배의 후코잔틴 감소 효과를 가지는 것을 확인하였다(Shin 등 2013). 이는 본 연구와 유사한 결과를 보여주는 것으로, 본 연구에서 건조 다시마의 후코잔틴이 더 안정한 이유는, 순수한 후코잔틴에 비하여 다시마에 포함된 후코잔틴이 다른 항산화 물질에 의해 조금 더 안정성이 유지가 되는 것으로 사료된다.

건조 조건에 의한 총 페놀 함량 변화 측정

건조 다시마 원물의 총 페놀 함량은 $14.57 \pm 1.29 \text{ mg GAE/g dw}$ 였으며, 70°C에서 5시간 열풍 건조 후 총 페놀 함량은 50%까지 줄어든 것을 확인하였으며, 200시간 동안 열풍 건조 될 때까지 그 양이 일정함을 확인하였다(Fig. 2A). 이 결과를 통해 70°C의 열에서 다시마의 특정 폴리페놀 물질의 파괴가 발생하며, 나머지는 상대적으로 열에 안정한 폴리페놀이 남아있는 것으로 예상할 수 있다. 하지만 총 페놀 함량을 측정하는 Folin-Ciocalteu's 방법이 시약의 산화 환원의 측정을 통한 발색을 측정하는 방법이므로, 폴리페놀 외에 다른 물질들에 의한 간섭이 발생할 가능성도 있을 것으로 여겨진다. 실제로 비타민 C 같은 환원에 의한 간섭 물질에 의해 총 페놀 함량이 높게 측정이 될 수도 있으며, 다시마의 후코이단 또한 항산화 능력을 가지며 강력한 환원 능력을 가지고 있어 Folin-Ciocalteu's 방법에 간섭을 줄 수 있을 것으로 여겨진다(George 등, 2005). 또한 후코이단은 80°C 이상에서도 안정하다는 연구결과가 있으므로 다시마의 건조 과정 중 후코잔틴이 줄어들며 후코이단 등 보다 안정한 물질들이 폴리페놀 및 항산화 분석 결과에 영향을 줄 것으로 여겨진다. 자연 건조에서의 총 폴리페놀 함량의 감소는 1일 건조 후 약 75%의 폴리페놀이 남아있었으나, 2일 건조 후 50% 이하로 줄어든 것을 확인하였다(Fig. 2B). 그 후, 5일 동안 50%의 폴리페놀이 유지가 된 것을 확인 하였다. 이를 통해서 다시마에 남아있는 50%의 폴리페놀은 열과 자외선에 안정한 물질임을 유추할 수 있다.

건조 조건에 의한 총 항산화 능력 변화 측정

건조 조건에 따른 건조 다시마의 총 항산화 능력은 ABTS, DPPH 그리고 FRAP 분석법을 통하여 측정하였다. ABTS 분석의 결과는 총 페놀의 변화와 매우 유사한 경향을 보였다. 70°C에서 5시간 건조 결과, 약 50%의 총 항산화 능력이 줄어든 것을 확인할 수 있었다(Fig. 3A). 그 후, 200시간의 열풍 건조기간 중에 총 항산화 능력은 50% 정도의 수준을 유지함을 확인하였다. DPPH 분석법의 결과는 5시간까지 유의적으로 증가하는 경향을 보였으나, 그 후 10시간 열풍 건조 시 50% 이하로 줄어 든 것을 확인하였으며, 200시간 동안 유사한 정도의 총 항산화 능력을 보여주었다(Fig. 3C). 비록 1시간 및 5시간 동안의 총 항산화 능력이 증가하였으나, 전반적인 경향은 ABTS 및 총 페놀 함량과 비슷한 경향을 보여주었다. FRAP 분석법에 의한 총 항산화 능력의 경우에도 5시간 열풍 건조 시 총 항산화 능력이 50% 수준으로 줄어든 것을 확인하였으며 200시간까지 유사한 정도의 항산화 능

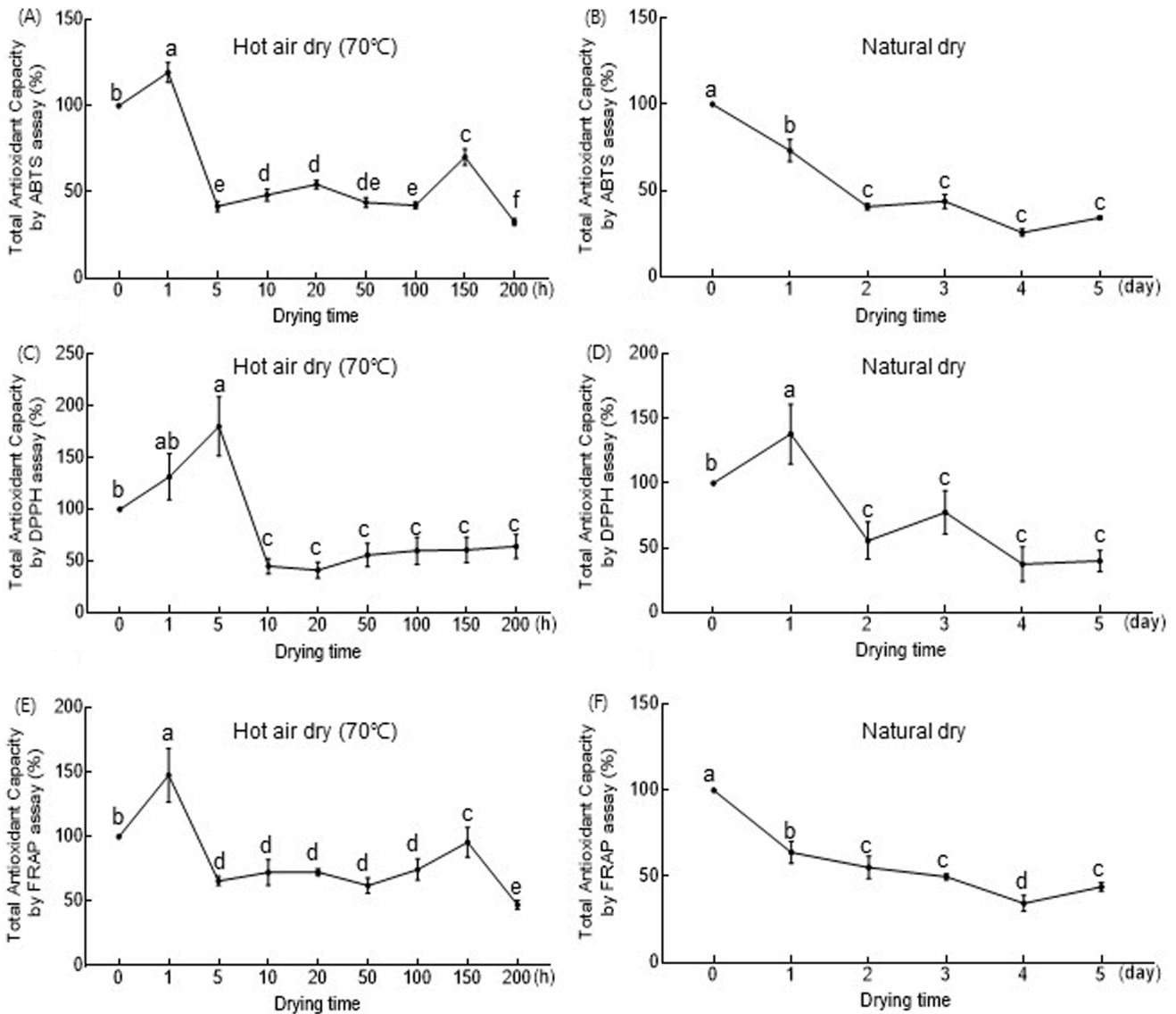


Fig. 3. Change of total antioxidant capacities during drying process of *Saccharina japonica*. Change of total antioxidant capacity (TAC) during drying process of *Saccharina japonica* by hot air drying and natural drying; change of ABTS radical scavenging capacity by hot air drying (A), change of ABTS radical scavenging capacity by natural drying (B), change of DPPH radical scavenging capacity by hot air drying (C), change of DPPH radical scavenging capacity by natural drying (D), change of ferric reducing antioxidant power (FRAP) by hot air drying (E), change of FRAP by natural drying (F). Different letters indicate a significant difference ($p < 0.05$) based on ANOVA with Tukey's post hoc analysis.

력을 보여주었다(Fig. 3E). 특히, FRAP 분석이 라디칼 소거능에 의한 항산화 능력과 유사한 경향을 보여줌으로써 다양한 방식에서 건조 다시마의 항산화 능력이 총 폴리페놀 함량과 연관이 있음을 확인할 수 있었다(Chakraborty 등, 2015).

일광 건조에 의한 총 항산화 능력의 경우에도 총 페놀 함량의 감소와 유사한 경향을 나타냈으며, 2일 건조 이후에 50%의 총 항산화 능력이 감소함을 ABTS 분석을 통하여 확인하였다(Fig. 3B). 특히, 일광 건조의 경우 평균 기온이 28-29°C 임을 고려하였을 때 자외선에 의한 총 항산화 능력의 감소가 매우 크게 작용함을 확인할 수 있었다. DPPH 라디칼 소거능에 의한 일광 건조 다시마의 총 항산화 능력 저하를 확인한 결과 또한 2일 건조 후 항산화 능력이 50% 가까이 줄어든 것을 확인할 수 있었다(Fig. 3D). 이는 ABTS 분석법과 유사한 경향을 보임으로써 항산화 물질이 2일 동안 자외선에 의해 파괴됨을 보여주는 결과이다. FRAP

분석법의 경우에는 1일 건조 후 유의적인 총 항산화 능력이 저하되는 것을 확인하였으며, 그 이후 비슷한 정도의 항산화 능력을 유지하는 것으로 확인하였다(Fig. 3F). 이를 통하여 자외선에 의해 건조 다시마의 항산화 능력이 현저히 감소하는 것을 확인하였으며, 이는 건조 과정뿐만 아니라, 유통 및 저장, 판매 과정에서 일광에 노출됨으로써 건조 다시마의 항산화 능력이 줄어들 가능성이 있음을 보여주는 결과이다.

Pearson correlation

건조 다시마의 후코잔틴 함량과 총 페놀 함량, 총 항산화 효과들 간의 연관성을 보기 위하여, Pearson correlation을 이용하여 분석하였다. 건조 다시마의 후코잔틴의 함량은 총 폴리페놀함량과 유의적으로 양의 상관관계($r=0.521$)를 보이는 것으로 확인되었다(Table 2). 후코잔틴을 포함한 카로티노이드와 플로로탄닌류

Table 2. Correlation between fucoxanthin content, TPC, and three TAC values^{1),3)}

	Fucoxanthin content	TPC	TAC (ABTS radical)	TAC (DPPH radical)	FRAP
Fucoxanthin content	1	0.521 (<i>p</i> <0.05)	0.406 (<i>p</i> =0.06)	0.304 (<i>p</i> =0.169)	0.194 (<i>p</i> =0.388)
TPC		1	0.957 (<i>p</i> <0.01)	0.886 (<i>p</i> <0.01)	0.856 (<i>p</i> <0.01)
TAC (ABTS radical)			1	0.972 (<i>p</i> <0.01)	0.861 (<i>p</i> <0.01)
TAC (DPPH radical)				1	0.815 (<i>p</i> <0.01)
FRAP ²⁾					1

¹⁾TPC and TAC stand for total phenolic content and total antioxidant capacity.

²⁾FRAP stands for ferric reducing antioxidant power.

³⁾Correlation was analyzed by Pearson correlation with *p*<0.05 for a significant difference.

의 폴리페놀들은 갑조류들이 스트레스에 대응하기 위하여 만들어내는 이차대사산물로 이는 다시마가 후코잔틴을 더욱 많이 포함할수록 더 많은 폴리페놀도 함유하고 있음을 보여주는 결과이다(Shen 등, 2017; Maeda 등, 2018). 항산화 능력과의 관계로는 ABTS 라디칼 소거 능력과 양의 상관관계를 보이며 *p*=0.06을 보였다. 하지만, DPPH와 FRAP과는 유의미한 상관관계를 보이지 않았다. 이는 후코잔틴 외에도 다양한 항산화 물질들이 다시마에 존재하기 때문으로 여겨진다.

총 페놀 함량과 항산화 능력과의 상관관계는 세가지 총 항산화 측정 방법과 모두 크게 양의 상관관계를 유의적으로 보이는 것을 확인하였으며, 이를 통해 다양한 항산화 능력의 측정방법이 해조류의 항산화 능력을 측정하는데 사용될 수 있음을 확인하였다(Chakraborty 등, 2015). 또한 후코잔틴과 폴리페놀의 함량이 총 항산화 능력들 간의 상관관계 또한 유의적으로 양의 상관관계를 보임으로써, 폴리페놀이 건조 다시마의 총 항산화 능력에 중요한 역할을 함을 보여주었다(Chakraborty 등, 2015; Foo 등, 2017).

요 약

열풍 건조와 일광 건조는 건조 다시마를 제조하는데 매우 일반적으로 사용하는 방식이다. 본 연구에서는 건조 다시마의 주요한 생리활성물질인 후코잔틴이 열풍 건조에 의해 노출되는 열과 일광 건조에 의해 노출되는 자외선에 의해 받는 영향에 관하여 연구하였다. 본 연구를 통하여 후코잔틴이 건조 다시마의 폴리페놀 조성에 중요한 비중을 차지하며, 총 항산화 능력에도 기여하고 있음을 확인하였다. 또한 열풍 건조에서 발생하는 열과 일광 건조에 의해 건조 다시마에 노출되는 자외선에 의해 후코잔틴 및 총 폴리페놀 함량 및 총 항산화 능력이 감소되는 것을 확인하였다. 그러므로 본 연구를 통해 건조 다시마의 가공, 유통 및 저장 그리고 포장재의 선택 등이 건조 다시마의 생리활성물질의 잔존 및 총 항산화 능력에 중요한 요소임을 확인하였다.

감사의 글

이 논문은 2019년 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구입니다(미래수산인력양성사업).

References

An S-R, Koo J-G. Properties of porphyran and hemicellulose

extracted with different extract solutions and enzymatic pretreatments from Porphyra. *J. Fish Mar. Sci. Educ.* 2: 108-117 (2017)

Benzie IF, Strain JJ. The Ferric reducing ability of plasma (FRAP) as a measure of "antioxidant power": The FRAP assay. *Analytical Biochemistry*. 239: 70-76 (1996)

Chakraborty K, Joseph D, Praveen NK. Antioxidant activities and phenolic contents of three red seaweeds (Division: Rhodophyta) harvested from the gulf of Mannar of Peninsular India. *J. Food Sci. Technol.* 52: 1924-1935 (2015)

Cho Y-J, Bang M-A. Hypoglycemic and antioxidative effects of dietary sea-tangle extracts supplementation in streptozotocin-induced diabetic rats. *Korean J. Food & Nutr.* 37: 5-14 (2004)

Foo SC, Yusoff FM, Ismail M, Basri M, Yau SK, Khong NMH, Chan KW, Ebrahimi M. Antioxidant capacities of fucoxanthin-producing algae as influenced by their carotenoid and phenolic contents. *J. Biotechnol.* 241: 175-183 (2017)

Gammone MA, D'Orazio N. Anti-obesity activity of the marine carotenoid fucoxanthin. *Mar. Drugs*. 13: 2196-2214 (2015)

Georgea S, Brat P, Alter, Amiot MJ. Rapid Determination of polyphenols and vitamin C in plant-derived products. *J. Agric. Food Chem.* 53: 13701373 (2005)

Heo S-J, Yoon W-J, Kim K-N, Ahn G-N, Kang S-M, Kang D-H, Affana A, Oh C, Jung W-K, Jeon Y-J. Evaluation of anti-inflammatory effect of fucoxanthin isolated from brown algae in lipopolysaccharide-stimulated RAW 264.7 macrophages. *Food. Chem. Toxicol.* 48: 2045-2051 (2010)

Kim SM, Jung Y-J, Kwon O-N, Cha KH, Um B-H, Chung D, Pan C-H. A Potential commercial source of fucoxanthin extracted from the microalga *Phaeodactylum tricornutum*. *Appl. Biochem. Biotechnol.* 166: 1843-1855 (2012)

Liu C-L, Liang A-L, Miao-LinHu. Protective effects of fucoxanthin against ferric nitrilotriacetate-induced oxidative stress in murine hepatic BNL CL2 cells. *Toxicol. In Vitro.* 25: 1314-1319 (2011)

Maeda H, Fukuda S, Izumi H, Saga N. Anti-Oxidant and fucoxanthin contents of brown alga *ishimozuku* (*Sphaerotrichia divaricata*) from the West Coast of Aomori, Japan. *Mar. Drugs*. 16: 1-10 (2018)

Maeda H, Tsukui T, Sashima T, Hosokawa M, Miyashita K. Seaweed carotenoid, fucoxanthin, as a multi-functional nutrient. *Asia Pac J. Clin. Nutr.* 17: 196-199 (2008)

Pesek CA, Warthesen JJ. Kinetic Model for Photoisomerization and concomitant photodegradation of β -carotenes. *J. Agri. Food Chem.* 38: 1313-1315 (1990)

Ravi H, Kurrey N, Manabe Y, Sugawara T, Baskaran V. Polymeric chitosan-glycolipid nanocarriers for an effective delivery of marine carotenoid fucoxanthin for induction of apoptosis in human colon cancer cells (Caco-2 cells). *Mater. Sci. Eng. C. Mater. Biol. Appl.* 91: 785-795 (2018)

Sachindra NM, Sato E, Maeda H, Hosokawa M, Niwano Y, Kohno M, Miyashita K. Radical scavenging and singlet oxygen quenching activity of marine carotenoid fucoxanthin and its metabolites. *J. Agric. Food Chem.* 55: 8516-8522 (2007)

- Sandmann G. Antioxidant protection from UV- and light-stress related to carotenoid structures. *Antioxidants*. 8: 1-13 (2019)
- Scita G. Stability of β -carotene under different laboratory conditions. *Methods Enzymol.* 213: 175-185 (1992)
- Shen J, Jiang CQ, Yan YF, Liu BR, Zu CL. Effect of increased UV-B radiation on carotenoid accumulation and total antioxidant capacity in tobacco (*Nicotiana tabacum* L.) leaves. *Genet. Mol. Res.* 16 (2017)
- Shin SC, Ahn MW, Lee JS, Kim YS, Park KP. Extraction of Fucoxanthin from *Undaria pinnatifida* and stability of fucoxanthin. *Korean Chem. Eng. Res.* 51: 42-46 (2013)
- Tsuchihashi H, Kigoshi M, Iwatsuki M, Niki E. Action of β -Carotene as an antioxidant against lipid peroxidation. *Arch. Biochem. Biophys.* 323: 137-147 (1995)
- Zhang H, Tang Y, Zhang Y, Zhang S, Qu J, Wang X, Kong R, Han C, Liu Z. Fucoxanthin: a promising medicinal and nutritional ingredient. *Evid. Based Complement Alternat. Med.* 2015: 1-10 (2015)