

방사선 돌연변이 방사무늬김(*Pyropia yezoensis*)의 성분 분석과 항산화 활성

최종일*

전남대학교 생물공학과

Amino Acid Composition and Antioxidative Activities of Mutant *Pyropia yezoensis*

Jong-il Choi*

Department of Biotechnology and Bioengineering, Chonnam National University, Gwangju 61186, Korea

Recently, several mutant laver *Pyropia yezoensis* strains were developed. In this study, control laver *Pyropia yezoensis* and its mutant Py500G were compared for their amino acid contents and antioxidative activities. There was no significant difference of total amino acid contents between wild-type and mutant Py500G, but mutant had higher free amino acid contents than wild-type. Also, total phenolic content was higher in mutant Py500G. Phycoerythrin and phycocyanin contents were higher in wild-type. But, antioxidative activities were shown to be higher in mutant Py500G. These results will be useful for the development of new cultivar of *Pyropia*.

Keywords: *Pyropia yezoensis*, Mutant, Amino acid, Antioxidant

서 론

김(*Pyropia*)은 식물분류학상 홍조식물문의 원시홍조강, 김목, 김과에 속하는 해조류로 우리나라에서는 연간 약 15,000만 속이 생산되고 있다. 김은 미역, 다시마와 함께 대표적인 양식 생산되는 해조류이며, 우리나라 외에도 일본, 중국 등 일부 아시아 국가에서 양식되고 있다(Hwang and Park, 2020). 우리나라에서 김 양식은 1600년대부터 시작되었고(Hwang and Park, 2020), 우리나라와 일본에 양식되고 있는 김의 대부분은 방사무늬김(*Pyropia yezoensis*)으로 알려져 있다(Lee et al., 2019). 김은 영양학적으로 열량은 매우 낮으면서 비타민 A와 C, B1, B2, E와 칼륨과 칼슘, 마그네슘, 인 등의 무기질, 식이섬유가 풍부하고, 비소화성의 점질성 다당류를 다량 함유하고 있으며, 필수 아미노산과 불포화지방산이 많이 함유되어 있다(Kim et al., 2014; Jung et al., 2016). 김의 일반성분으로 탄수화물은 약 45%, 단백질은 약 40%, 지질성분은 약 1-3% 차지하고 있는 것으로 알려져 있다(Hwang et al., 2013). 수용성 다당류 중 포피란(porphyrin)은 혈청과 간의 콜레스테롤 함량을 낮추는 작용

이 보고되어 있다(He et al., 2019; Liu et al., 2019). 이러한 다양한 영양소의 공급원으로 김은 국내 뿐만 아니라 세계적으로 관심이 고조되어 2019년 기준으로 26,951톤, 약 579,220천불의 수출액을 이루고 있다.

하지만, 현재 양식장에서 양식되고 있는 방사무늬김의 경우 대부분 일본 품종이 많이 사용되고 있다. 2012년부터 해조류 분야에서도 식물신품종제도(international union for the protection of new varieties of plants, UPOV)가 시행이 되어, 이에 대비하여 다양한 국산 김 품종의 개발이 이루어졌다(Hwang et al., 2019; Hwang and Park, 2020). 김 품종의 개발을 위한 방법으로는 선별, 교잡, 그리고 돌연변이 육종 등이 사용되고 있다. 이 중에서 돌연변이 육종법은 김 엽체나 사상체에 물리적 또는 화학적 돌연변이원을 처리한 후, 생존한 개체들 중에서 우수한 특성을 갖는 돌연변이 종을 선별하는 방법이다. 최근 방사무늬김에 ethyl methanesulfonate (EMS), 또는 감마선을 처리하여 우수한 성장 특성을 지닌 돌연변이 방사무늬김이 보고되었다(Lee and Choi, 2018; Park and Choi, 2020; Tran and Choi, 2020). 이 외에도 다양한 신 품종 김 종자들이 개발되어

*Corresponding author: Tel: +82. 62. 530. 1846 Fax: +82. 62. 530. 1949

E-mail address: choiji01@jnu.ac.kr



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

<https://doi.org/10.5657/KFAS.2020.0524>

Korean J Fish Aquat Sci 53(4), 524-529, August 2020

Received 8 June 2020; Revised 29 June 2020; Accepted 31 July 2020

저자 직위: 최종일(교수)

(Lee and Choi, 2019), 2019년 10월 한국해양수산개발원 수산 관측 자료(KMIFOC, 2019) 기준으로 방사무늬김의 경우 기존 품종 종자 생산량은 약 102만 상자, 그리고 선발·교잡·돌연변이 육종에 의해 개발된 신품종 종자는 약 220만 상자인 것으로 나타났다. 신품종은 기존품종에 대비 높은 성장 속도를 가지고 있어 양식어민들이 많은 관심을 가지고 있다. 이러한 신품종 김 종자의 개발과 유전학적 특성에 관해 여러 문헌들이 보고되어 있으나 아직까지 돌연변이 김의 일반성분 분석에 관한 결과는 한정되어 있다.

이에, 이 연구에서는 방사선 돌연변이 육종으로 개발된 신품종 방사무늬김의 아미노산 함량이나 항산화 생리활성을 돌연변이화 이전의 대조품종 방사무늬김과 비교하여 앞으로의 김 품종 개량을 위한 기초자료로 제공하고자 한다.

재료 및 방법

시료 채취 및 전처리

실험에 사용된 품종은 방사무늬김 대조품종 해남학가리와 이로부터 유래된 돌연변이 육종품종 Py500G이다. 양식기간과 양식지역은 2015년 1월 국립수산물과학원 해조류연구센터 시험양식장(Muan, Korea)에서 진행되었다. 시료는 양식장에서 채집하여 실험실로 운반한 후 증류수로 수세한 후 60°C에서 건조하여 건조가 진행됨에 따라 더 이상 중량의 변화가 없을 때까지 건조하여 건조시료로 준비하였다.

생리활성을 측정하기 위한 추출물은 분쇄 후 시료의 에탄올 추출물을 얻기 위하여 건조시료 1 g에 95% 에탄올을 10 mL을 가하여 실온에서 24시간 교반 추출을 총 3회 반복하여 얻어진 상층액 모두를 합하여 농축원심분리기로 원심 분리하였다. 분리된 추출물은 10 mg/mL 농도의 에탄올로 녹인 후 실험에 사용하였다(Lee et al., 2012).

성분별 분석

총 아미노산 함량 측정은 건조 김시료 1 g을 시험관에 넣고 6 N HCl 3 mL을 가한 다음 시험관을 밀봉한 후 120°C heating block에 24시간 동안 가수분해하였다. 24시간 후 50°C에서 40 psi의 감압농축기(WB2000, Heidolph, Schwabach, Germany)로 산을 제거, 0.2 M sodium citrate buffer (pH 2.2) 10 mL로 정용하고, 이 중 1 mL를 취하여 Whatman membrane filter (0.2 µm, GE Healthcare, Chicago, IL, USA)로 여과하여 아미노산 분석기(S433-H, SYKAM, Eresing, Germany)로 100 µL의 시료를 처리하여 정량 분석하였다(Lee et al., 2012).

유리 아미노산 함량 측정은 건조 김시료 1 g을 증류수 40 mL을 가하여 121°C에서 15분간 끓인 후 남은 용액을 증류수를 이용하여 총 50 mL로 맞춘 다음, 감압증류로 건조시킨 후 5% trichloroacetic acid (Sigma-Aldrich, St. Louis, MO, USA) 1 mL에 용해하고 10,000 rpm에서 10분간 원심분리를 한 후 0.2 µm

membrane filter (GE Healthcare)로 여과하여 아미노산 분석기(S433-H, SYKAM, Eresing, Germany)로 분석하였다(Lee et al., 2012).

김의 총 폴리페놀 함량은 Folin-Ciocalteu (Gao et al., 2000) 방법을 사용하여 분석하였다. 시료 0.1 mL에 Folin-Ciocalteu's reagent (Sigma-Aldrich, St. Louis, MO, USA) 0.2 mL을 첨가하고 23°C에서 1분간 유지시켰다. 그 후 5% Sodium carbonate 3 mL을 가하여 23°C에서 2시간 방치 후 분광광도계(UV 1600 PC, Shimadzu, Kyoto, Japan)를 이용하여 765 nm에서 흡광도를 측정하였다. 표준곡선은 gallic acid (Sigma-Aldrich, St. Louis, MO, USA)를 이용하여 검량곡선을 작성한 후 함량 계산에 활용하였다.

피코에리트린(phycoerythrin, PE) 및 피코시아닌(phycoerythrin, PC)은 Lee and Choi (2019)에 기술된 방법에 따라 정량적으로 분석되었다. 약 100 mg의 냉동된 김 시료를 모르타르 및 유봉을 사용하여 액체 질소 중에서 균질화시켰다. 균질물은 0.8 M의 0.1 M phosphate buffer (pH 6.8)에 첨가하고 4°C에서 12시간 동안 배양 하였다. 배양 후, 시료를 4°C에서 10분 동안 15,000 g에서 원심분리 하였다. 상등액을 수집하고 0.2 mL phosphate buffer에 첨가 한 후 vortexing 하였다. Hitachi U-2000 (Hitachi, Tokyo, Japan) 이중 빔 분광 광도계를 사용하여 564, 618 및 730 nm에서 흡광도 값을 기록 하였다. 클로로필 (Chlorophyll, Chl) 함량을 결정하기 위해, 김 시료를 원심 분리 후 암실에서 4°C에서 2시간 동안 1.8 mL의 98% 아세톤에서 추출 하였다. 5,000 g에서 10분 동안 원심분리 한 후, 상등액 중의 Chl 함량을 Jeffrey and Humphrey (1975)의 공식을 사용하여 분광광도계(UV 1600 PC, Shimadzu, Tokyo, Japan)로 측정 하였다.

생리활성 분석

김 추출물의 항산화 활성을 비교하기 위해 1,1-diphenyl-2-picrylhydrazine (DPPH) radical 소거능은 Lee et al. (2012)의 방법에 따라 측정하였다. 시료 1 mL에 0.2 mM DPPH (Sigma-Aldrich, St. Louis, MO, USA) 1 mL을 넣고 교반한 후 30분 동안 실온에서 정치한 다음 반응용액을 분광광도계를 이용하여 517 nm에서 흡광도를 측정하였다. 전자공여능은 다음과 같은 계산식에 의해 환산되었다.

DPPH radical scavenging activity (%)=

$$[1-(\text{공시료균}-\text{반응균})/\text{공시료균}] \times 100$$

김 에탄올 추출물의 ferric-reducing antioxidant potential (FRAP) 측정 방법은 다음과 같다(Lee et al., 2012). FRAP reagent는 25 mL acetate buffer (300 mM, pH 3.6)를 37°C에서 가온한 후, 40 mM HCl에 용해한 10 mM 2, 4, 6-tris (2-pyridyl)-s-triazine (TPTZ, Sigma-Aldrich, St. Louis, MO, USA) 5 mL과 20 mM ferric sulfate (FeSO₄) 2.5 mL을 가하여 제조하였

다. 제조된 0.9 mL FRAP reagent에 추출물 0.03 mL와 증류수 0.09 mL를 넣은 후 37°C에서 10분간 반응시킨 후 593 nm에서 분광광도계를 이용하여 흡광도를 측정하였다. 공시료는 시료 대신 70% 에탄올을 넣어 측정하였다. 계산은 0.125, 0.25, 0.5, 1, 2.5 및 5 mM의 농도로 반복하여 작성한 FeSO_4 의 검량식에 대입하여 환산하였다.

통계처리

실험 결과 값등의 통계처리는 SPSS version 17.0 (Chicago, IL, USA) 프로그램을 사용하였으며, student *t*-test법으로 대조 품종과 돌연변이 품종간의 차이를 분석하였다.

결과 및 고찰

아미노산 함량

대조품종과 방사선 돌연변이 육종품종과의 총아미노산 함량을 비교 분석하였다(Table 1). 12개의 각기 다른 아미노산이 검출되었으며, 건조 김 시료 1 g당 전체 아미노산 총량은 대조품종에서는 233.8 mg/g, 방사선 돌연변이 육종 품종에서는 211.4 mg/g의 값을 보였으며, 두 품종간 유의한 차이($P<0.05$)는 보이지 않았다. 대조구와 돌연변이 모두에서 aspartic acid, glutamic acid, glycine, alanine 아미노산 함량이 다른 아미노산들 보다 상대적으로 높은 것으로 나타났다. Cystine, tyrosine, proline 아미노산은 1 mg/g 이하의 낮은 함량으로 검출되지 않은 것으로 판단된다. Jung et al. (2016)이 한국, 일본, 중국에서 채취한 김시료의 아미노산 함량 비교에서도 cysteine의 함량은 확인이 되지 않았으며, tyrosine과 proline의 함량은 다른 아미노산에 비하여 낮은 것이 보고되었다. 전체 아미노산 함량은 157-265 mg/g의 값으로 본 실험에서 얻어진 전체 아미노산 함량과 유사

Table 1. Comparison of amount of total amino acids between control *Pyropia yezoensis* and mutant *Pyropia yezoensis* (Py500G)

Amino acid	wild-type	Py500G
Aspartic acid	30.2	27.2
Threonine	18.4	19
Serine	16.8	15.4
Glutamic acid	29.6	30.8
Glycine	22.6	19.8
Alanine	32.4	30
Valine	15.4	13.4
Methionine	6.4	5.2
Isoleucine	8	6.6
Leucine	21.4	17.4
Phenylalanine	14.6	11.2
Lysine	18	15.4
Total	233.8	211.4

한 값을 보였다.

대조품종과 돌연변이 육종품종과의 유리아미노산 함량을 비교 분석하였다(Table 2). 유리아미노산의 총 함량은 전체 아미노산보다 낮은 값을 보였으며, 방사선 돌연변이 육종 품종에서 대조품종보다 유의한($P<0.05$) 증가를 보였다. 돌연변이 품종에서는 약 25.5 mg/g, 대조품종에서는 15.2 mg/g의 총 유리아미노산 함량을 각각 나타내었다. 특히, taurine, glutamic acid, alanine 등은 다른 아미노산들 보다 함량이 높았으며, 또한 대조품종에 비하여 돌연변이 품종에서 높은 함량을 갖는 것으로 확인이 되었다. 유리아미노산은 기호성에 영향을 미치는 중요한 요소로서 식품의 풍미를 예측하는 하나의 중요한 요소가 될 수 있다고 보고되어 있고(Kim et al., 2014), glutamic acid, alanine, glycine 등은 식품의 향기와 맛을 부여한다고 알려져 있다(Kim et al., 2014). glutamic acid는 단맛과 감칠맛에 관여하며, taurine은 인체내에서 혈중 콜레스테롤 저하, 간기능 강화, 혈압강하 등 다양한 생리활성의 보고가 있다(Kawasaki et al., 2017). 따라서 이 연구결과로부터 돌연변이 육종 품종이 대조품종보다 우수한 풍미를 갖을 수 있다고 사료된다. Kim et al. (2014)은 시판되고 있는 김들의 주요 영양 성분을 분석하였으며, 유리 아미노산의 함량이 건조김들에서 약 28.7-45.4 mg/g의 값을 갖는 것을 확인하였다. Kim et al. (2014)의 결과와 이 연구결과를 비교하면 낮은 값을 보이지만, 이는 시료의 준비과정 및 분석 방법의 차이에 기인할 수 있을 것이다.

이러한 결과로부터 돌연변이 품종은 대조품종과 비교하여 총 아미노산 함량에서는 유의한 차이를 보이지는 않았지만, 풍미에 영향을 미치는 유리아미노산 함량에서 glutamic acid와 alanine 등이 대조품종에 비하여 유의하게($P<0.05$) 높은 것으로 확인이 되었다. 또한, 생리활성에 관여하는 taurine 함량 역시 돌연변이 품종이 대조구보다 높은 것으로 확인이 되었다.

이러한 생리활성을 나타내는 또 다른 영양성분인 폴리페놀 함량 측정 결과는 Fig. 1과 같다. 대조품종의 폴리페놀 함량은 약 2.95 ppm, 돌연변이 품종의 함량은 약 4.27 ppm으로 유의한 차이($P<0.05$)를 보였다. Lee et al. (2012)이 보고한 국내산 마른 김에서의 폴리페놀 함량은 약 2.45-3.51 ppm 값을 갖는 것으로

Table 2. Comparison of amount of free amino acids between control *Pyropia yezoensis* and mutant *Pyropia yezoensis* (Py500G)

Amino acid	wild-type	Py500G
phosphoserine	0.5	0.7
Taurine	5.2	9.1
Aspartic acid	0.7	1.3
Glutamic acid	5.4	7.9
Glycine	0.3	0.5
Alanine	3	5.6
Valine	0.1	0.4
Total	15.2	25.5

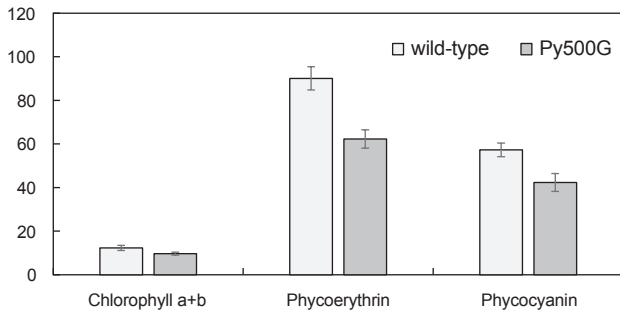


Fig. 1. Comparison of chlorophyll, phycoerythrin, and phycocyanin contents between control and mutant Py500G.

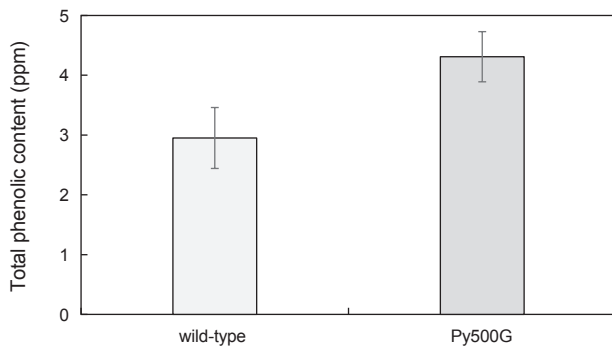


Fig. 2. Comparison of total phenolic content between control and mutant Py500G.

확인되었으며, 이 연구에서도 유사한 함량이 확인되었다. 폴리페놀은 대표적인 항산화 물질로 활성산소를 억제해서 몸속 염증을 예방하고 체내 DNA와 세포를 보호하는 기능성 물질로 알려져 있다(Gómez-Guzmán et al., 2018). 따라서 이 돌연변이 품종은 대조품종보다 더 높은 생리활성 효과를 가질 수 있을 것으로 기대된다.

대조품종과 돌연변이 품종의 색소함량(Fig. 2)은 클로로필의 경우 두 품종에서 유의한 차이를 보이지 않았다. 하지만 피코에리트린 및 피코시아닌 함량은 대조품종이 돌연변이 품종보다 유의하게 높았다($P < 0.05$). 피코에리트린과 피코시아닌은 광합성을 담당하는 주요 엽록소 색소의 부속물로 광 수확 피코빌리 단백질의 색소-단백질 복합체로 알려져 있다(Bryant, 1982). 피코에리트린은 적색, 피코시아닌은 청색 단백질 복합체로 다른 엽록소 색소와 함께 김 엽체의 색상에 관련이 있는 것으로 알려져 있다(Kim et al., 2018). 최근 보고된 방사선 조사에 의하여 얻어진 돌연변이 *Pyropia tenera*의 경우에는 엽체는 성장이 진행됨에 따라 더 높은 클로로필 a와 피코시아닌 함량이 확인되었다(Lee and Choi, 2019). 따라서 이 연구에서 사용된 대조품종과 돌연변이 품종의 경우에도 엽체 성장에 따라 색소 함량의 측정이 필요할 것으로 사료된다.

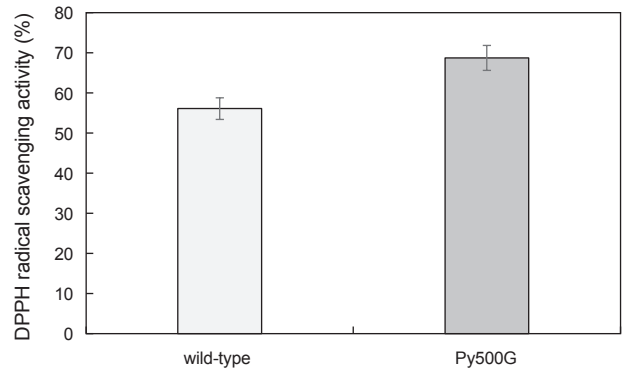


Fig. 3. Comparison of DPPH radical scavenging activity between control and mutant Py500G. DPPH, 1,1-diphenyl-2-picrylhydrazine.

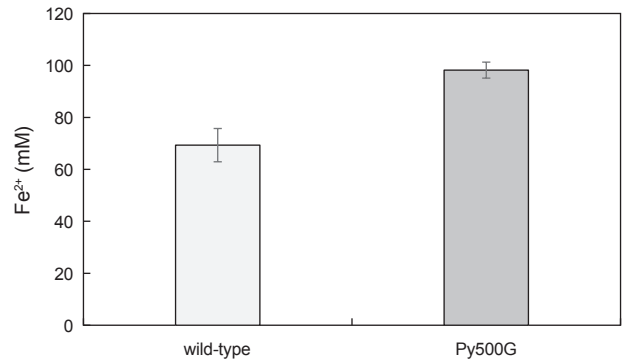


Fig. 4. Comparison of antioxidant activity by FRAP between control and mutant Py500G. FRAP, ferric-reducing antioxidant potential.

김 추출물의 항산화 활성

최근 우리나라에서 시판되고 있는 마른 김 추출물의 항산화 활성에 대한 결과가 보고되었다(Lee et al., 2012). 마른 김의 양식 산지와 항산화 활성 측정 방법에 따라 김 추출물에서의 항산화 활성 측정 값이 달라졌다. DPPH radical scavenging activity의 경우 대조품종에서는 56.1%, 돌연변이 육종 품종에서는 68.7%로 유의한 차이가($P < 0.05$) 확인되었으며(Fig. 3), FRAP 법에서도 환원력을 측정된 결과 대조품종에서는 69.3 mM, 돌연변이 육종 품종에서는 98.2 mM의 환원력이 측정되어서(Fig. 4) 항산화 활성이 대조품종에 비하여 돌연변이 육종 품종이 높은 것으로 나타났다. 이 연구에서 사용된 돌연변이 육종 품종은 방사선 조사된 사상체로부터 유래한 엽체 중 성장이 우수한 김 엽체를 선별하여 얻은 품종으로서, 방사선 조사 과정에서 높은 산화적 스트레스에 대한 저항성을 가지고 있기 때문에 항산화 활성이 높은 것으로 판단된다(Park and Choi, 2018). 방사선 조사를 이용한 돌연변이화를 통하여 얻어진 다른 김 품

종의 경우에도 얻어진 돌연변이 품종이 기존의 대조 품종보다 항산화 활성이 높은 것으로 보고되었다(Lee and Choi, 2018, 2019). 이러한 항산화 활성은 항산화제 효소 뿐만 아니라 폴리페놀과 같은 항산화 물질 함유량에 의해서도 결정된다(Lee et al., 2018). Fig. 1에서 보여지듯이 돌연변이 육종품종에서 대조 품종에 비하여 높은 폴리페놀 함량을 보이는 것 또한 높은 항산화 활성의 원인으로 판단된다. 최근 이 연구에서 사용된 대조품종과 돌연변이 품종의 전사체 분석 결과에서 nitrogen uptake, photosynthesis 관련 일부 유전자들과 함께 대사 조절 유전자의 발현이 돌연변이 품종에서 높게 발현된 것이 확인되었으며, 이러한 유전자 발현의 증가에 따른 항산화 활성 영향에 관한 연구가 진행되고 있다(Tran and Choi, 2020).

이 연구에서는 방사선 돌연변이 육종 방법에 의하여 얻어진 육종품종과 대조품종의 성분분석과 항산화 활성을 비교 하였다. 실험결과 유리아미노산의 함량은 돌연변이 육종품종이 유의한 차이($P < 0.05$)로 높은 값을 보였으며, 또한 김 추출물의 항산화 활성 또한 육종품종에서 높게 나타났다. 이러한 결과로부터 기존의 선발이나 교잡에 의한 김 종자 개량뿐만 아니라 돌연변이 육종 방법을 이용하여서도 다양한 김 품종을 개발할 수 있을 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 GSP 수산종자사업단(213008-05-4-SB910)과 전남대학교 연구지원사업에 의해 수행되었습니다.

References

- Bryant DA. 1982. Phycoerythrocyanin and phycoerythrin: Properties and occurrence in cyanobacteria. *J Gen Microbiol* 128, 835-844.
- Gao X, Bjork L, Trajkovski V and Uggla M. 2000. Evaluation of antioxidant activities of rosehip ethanol extracts in different test system. *J Sci Food Agric* 80, 2021-2027. [https://doi.org/10.1002/1097-0010\(200011\)80:14<2021::AID-JSFA745>3.0.CO;2-2](https://doi.org/10.1002/1097-0010(200011)80:14<2021::AID-JSFA745>3.0.CO;2-2).
- Gómez-Guzmán M, Rodríguez-Nogales A, Algieri F and Gálvez J. 2018. Potential role of seaweed polyphenols in cardiovascular-associated disorders. *Mar Drugs* 16, 250. <https://doi.org/10.3390/md16080250>.
- He D, Wu S, Cheng Y, Wang H, Liu J, Zhang X, Choi J, Wu M and Tong H. 2019. Antitumor bioactivity of porphyrin extracted from *Pyropia yezoensis* Chonsoo2 on human cancer cell lines. *J Sci Food Agr* 99, 6722-6730. <https://doi.org/10.1002/jsfa.9954>.
- Hwang EK and Park CS. 2020. Seaweed cultivation and utilization of Korea. *Algae* 35, 107-121. <https://doi.org/10.4490/algae.2020.35.5.15>.
- Hwang EK, Yotsukura N, Pang SJ, Su L and Shan TF. 2019. Seaweed breeding programs and progress in eastern Asian countries. *Phycologia* 58, 484-495. <https://doi.org/10.1080/00318884.2019.1639436>.
- Hwang ES, Ki KN and Chung HY. 2013. Proximate composition, amino acid, mineral, and heavy metal content of dried laver. *Prev Nutr Food Sci* 18, 139-144. <https://doi.org/10.3746/pnf.2013.18.2.139>.
- Jeffrey SW and Humphrey GF. 1975. New spectrophotometric equations for determining chlorophylls a, b, c1 and c2 in higher plants, algae and natural phytoplankton. *Biochem Physiol Pflanz* 167, 191-194. [https://doi.org/10.1016/S0015-3796\(17\)30778-3](https://doi.org/10.1016/S0015-3796(17)30778-3).
- Jung SM, Kang SG, Lee HJ, Son JS, Jeon JH and Shin HY. 2016. Proximate composition and mineral content, amino acid of laver based on culture Areas. *Korean J Environ Ecol* 30, 98-103. <https://doi.org/10.13047/KJEE.2016.30.1.098>.
- Kawasaki A, Ono A, Mizuta S, Kamiya M, Takenaga T and Murakami S. 2017. The taurine content of Japanese seaweed. *Adv Exp Med Biol* 975, 1105-1112. https://doi.org/10.1007/978-94-024-1079-2_88.
- Kim EY, Choi YH and Nam TJ. 2018. Identification and antioxidant activity of synthetic peptides from phycobiliproteins of *Pyropia yezoensis*. *Int J Mol Med* 42, 789-798.
- Kim KW, Hwang JH, Oh MJ, Kim MY, Choi MR and Park WM. 2014. Studies on the major nutritional components of commercial dried lavers *Porphyra yezoensis* cultivated in Korea. *Korean J Food Preserv* 21, 702-709. <https://doi.org/10.11002/kjfp.2014.21.5.702>.
- KMIFOC (Korea Maritime Institute Fisheries Outlook Center). 2019. Fisheries outlook of laver seeds. Retrieved from <http://www.foc.re.kr/on> Aug 21, 2019.
- Lee HJ and Choi J. 2018. Isolation and characterization of a high-growth-rate strain in *Pyropia yezoensis* induced by ethyl methane sulfonate. *J Appl Phycol* 30, 2513-2522. <https://doi.org/10.1007/s10811-018-1426-1>.
- Lee HJ and Choi J. 2019. Enhancing temperature tolerance of *Pyropia tenera* (Bangiales) by inducing mutation. *Phycologia* 58, 496-503. <https://doi.org/10.1080/00318884.2019.1623547>.
- Lee HJ and Yang HY and Choi J. 2018. Study of functional verification to abiotic stress through antioxidant gene transformation of *Pyropia yezoensis* (Bangiales, Rhodophyta) APX and MnSOD in *Chlamydomonas*. *Korean J Microbiol Biotechnol* 28, 1217-1224. <https://doi.org/10.4014/jmb.1802.02024>.
- Lee HJ, Choi J and Choi SJ. 2012. Physiological activities and amino acid compositions of Korean dried laver *Porphyra* products. *Korean J Fish Aquat Sci* 45, 409-413. <https://doi.org/10.5657/KFAS.2012.0409>.
- Lee HJ, Park EJ and Choi J. 2019. Isolation, morphological characteristics and proteomic profile analysis of thermo-tolerant *Pyropia yezoensis* mutant in response to high-temper-

- ature stress. *Ocean Sci J* 54, 65-78. <https://doi.org/10.1007/s12601-018-0060-9>.
- Liu Z, Gao T, Yang Y, Meng F, Zhan F, Jiang Q and Sun X. 2019. Anti-Cancer activity of porphyran and carrageenan from red seaweeds. *Molecules* 24, 4286. <https://doi.org/10.3390/molecules24234286>.
- Park EJ and Choi J. 2018. Resistance and proteomic response of microalgae to ionizing irradiation. *Biotechnol Biopr Eng* 23, 704-709.
- Park S and Choi J. 2020. *De novo* transcriptome analysis of high growth rate *Pyropia yezoensis* (Bangiales, Rhodophyta) mutant with high utilization of nitrogen. *Acta Bot Croat* 78, in press. <https://doi.org/10.37427/botcro-2020-026>.
- Tran KN and Choi J. 2020. Comparative transcriptome analysis of high-growth and wild-type strains of *Pyropia yezoensis*. *Acta Bot Croat* 78, in press. <https://doi.org/10.37427/botcro-2020-020>.