



식품에 이용되는 미세조류와 이를 이용한 식품 연구개발 동향 및 전망

곽호석^{†,1,*} · 김지수^{†,2} · 이자현¹ · 성동은¹
¹동양미래대학교 식품공학과, ²차의과학대학교 바이오공학과

Trends and Prospects of Microalgae used for Food

Ho Seok Kwak^{†,1,*}, Ji Soo Kim^{†,2}, Ja Hyun Lee¹, Dong Eun Sung¹

¹Department of Food Science and Engineering, Dongyang Mirae University

²Department of Biotechnology, CHA University

Abstract

Microalgae are unicellular microorganisms inhabiting various ecosystems of the world, including marine and freshwater systems and extreme environments. Only a few species have been actively used as food. Microalgae are attracting attention as a means of biological CO₂ reduction because they play an important role in absorbing atmospheric CO₂ through their rapid growth by photosynthesis in water. Besides, microalgae are considered to be an eco-friendly energy source because they can rapidly produce biomass containing a large quantum of lipids that can be converted into biodiesel. Several microalgae, such as *Chlorella* spp., *Spirulina* spp. and *Haematococcus* spp. have already been commercialized as functional health supplements because they contain diverse nutrients including proteins, vitamins, minerals, and functional substances such as docosahexaenoic acid (DHA), β-glucan, phycocyanin, astaxanthin, etc. Moreover, they have the potential to be used as food materials that can address the protein-energy malnutrition (PEM) which may occur in the future due to population growth. They can be added to various foods in the form of powder or liquid extract for enhancing the quality characteristics of the foods. In this review, we analyzed several microalgae which can be used as food additives and summarized their characteristics and functions that suggest the possibility of a role for microalgae as future food.

Key Words : *Chlorella*, *spirulina*, microalgae, future food, food quality characteristics

1. 서론

지난 수세기를 거치면서 인류는 1-4차 산업혁명을 통해 급격한 기술의 발전을 이룩하여 과거에 비해 생활이 매우 편리해졌지만, 동시에 인구의 폭발적인 증가로 인한 환경오염, 에너지 고갈 및 식량 부족 등의 다양한 문제들이 발생하고 있다. 특히, 식량 문제의 경우, 전 세계의 9명 중 1명의 비율로 굶주림 현상을 겪고 있으며, 적절한 단백질과 에너지를 공급받지 못하는 영양불량 상태인 PEM (Protein-Energy Malnutrition) 상황에 처한 것으로 보고되고 있다(Torres-Tiji et al. 2020). 심지어 2050년경에는 전 세계의 인구가 약 97억명에 도달할 것으로 예상되며, 이로 인해 단백질 공급 부족 현상은 더욱 더 악화될 것으로 전망된다. 따라서 이처럼 지속적으로 인구가 증가하게 될 경우, 전 인류에게 부족한 단백질과 에너지를 공급할 수 있는 고단백질, 고칼로리 식품

의 개발이 요구된다.

미세조류(Microalgae)는 광합성을 하는 단세포 미생물로 대기 중 이산화탄소를 체내 쉽게 고정하여 단백질, 지질, 탄수화물, 비타민, 무기질 등 기본 영양 성분을 함유한 완전식품 중 하나이며, 엽록소, 오메가-3 (Omega-3), 베타 글루칸(β-glucan), 아스타잔틴(Astaxanthin) 등의 고부가가치의 기능성 물질을 추가 생산할 수 있어 고단백질의 식품재료로서 영양불량의 대안이자 인류 건강을 향상시킬 수 있는 기능성 식품 원료 물질로 점차 각광받고 있다(Kim et al. 2014). 예를 들어, *Chlorella* spp.의 시장 규모는 2016년 기준 1억 3,800만 달러 정도였으며, 2021년에는 1억 6,400만 달러에 도달할 것으로 전망되고 있어 식품으로의 활용 가능성을 보여준다(Koyande et al. 2019). 현재까지 미세조류는 전 세계적으로 약 4만 종의 다양한 종류가 보고되고 있으며, 육상식물이 자라기 어려운 척박한 환경에서도 자랄 수 있고, 높은 수확량

[†]These authors contributed equally to this work.

*Corresponding author: Ho Seok Kwak, Department of Food Science and Engineering, Dongyang Mirae University, 445 Gyeongin-ro, Guro-gu, Seoul, Republic of Korea Tel: +82-2-2610-1759 Fax: +82-2-2610-1988 E-mail: hskwak@dongyang.ac.kr

을 달성할 수 있는 장점을 가지고 있다(Fuentes-Grünewald et al. 2012). 또한 미세조류 배양 시, 경작지가 따로 요구되지 않아 국토 면적이 작은 국내에서도 충분히 활용 가능하며, 산업 폐수와 같이 버려지는 용수의 활용이 가능하고, 성장속도가 빨라 평균 2-5일 이내 바이오매스를 두 배까지 증가시킬 수 있다(Kim et al. 2016c; Vaz et al. 2016; Cho et al. 2017; Madeira et al. 2017). 최근에는 야생형 균주의 유전학적 개량을 통하여 미세조류의 광합성 효율을 증가시키거나, 배양 공정의 최적화 등의 공정 개선을 통해 바이오매스 수확량을 더욱 가속화하는 연구들도 보고되고 있어 미세조류 산업이 더욱 확대될 수 있는 가능성이 있다(Kim et al. 2016a; Kwak et al. 2016; Pham et al. 2017).

미세조류를 포함한 조류(Algae)는 약 수 천년 전부터 이미 다양한 문화권에서 식재료로 널리 사용되어 왔으며, 가장 오래된 기록을 살펴보면, 약 14,000년전 칠레의 기록된 문서에서 찾아볼 수 있다(Dillehay et al. 2008). 또한, 지난 수 세기 동안, 역사 속에서도 미세조류를 다양한 식품의 소재로 활용된 기록들이 남아있다(Aaronson 1986; Turner 2003; Miroslav & Zorica 2008; Wells et al. 2016). 미세조류 중에서도 특히 *Spirulina* spp., *Chlorella* spp., *Haematococcus* spp., *Dunaliella* spp., *Isochrysis* spp. 등은 1960년대 일찍부터 건강기능보조식품으로 개발되어 상업화가 진행되어왔다. 최근에는 미세조류의 높은 단백질 함량과 항산화, 혈당 강하, 간 기능개선 등 기능성이 부각(Shibata et al. 2003; An et al. 2006; Cherng & Shih 2006; Kang et al. 2006; Choi et al. 2010)되면서 두부(Kim et al. 2003), 발효유(Sung et al. 2005), 치즈(Heo et al. 2006), 쌀엿강정(Shim et al. 2010), 케이크(Kim & Chung 2010)나 유과(Cho & Kim 2016) 등 다양한 식품에 활용되어 식품의 품질 특성을 향상시키는 연구결과들이 보고되고 있다. 이러한 연구의 결과와 더불어, 미국 식품의약국(FDA)에서는 *Spirulina* spp., *Chlorella* spp., *Synechococcus* spp. 등 미세조류에 대하여 인체에 해가 되지 않는 화학물질 또는 소재에 지정하는 GRAS (Generally Recognized As Safe)로 지정함으로써, 미세조류가 안전한 식품 소재임을 인정하였으며, 이와 유사하게 유럽연합(EU)의 유럽식품안전국(EFSA)에서도 미세조류가 인체에 유해한 영향이 없는 안전식품인 'Novel food'로 지정하여 미세조류가 안전한 기능성 식품 소재임을 인정하였다(Niccolai et al. 2019). 예를 들어, 덴마크인들과 에스키모인들의 경우, 미세조류를 포함한 수산식품을 주식으로 섭취하고 있으며, 고혈압, 심근경색, 당뇨병 등 성인병도 낮게 나타나는 특징을 보였다(Ryu & Jeon 2018). 이어 캐나다, 중국, 일본, 인도 등에서도 *Chlorella* spp., *Spirulina* spp., *Haematococcus* spp. 등의 미세조류를 안전한 식품 소재로 인정하고 있다(Torres-Tiji et al. 2020). 이에 본 연구에서는 식품에 활용되고 있는 미세조류 관련 문헌들을 조사하고, 미세조류의 특징과 기능성을 1차적으로 정리하였다. 그리고, 실

제 미세조류가 활용된 식품 연구결과들을 중심으로 식품에 따라 미세조류 첨가의 장단점을 분석하였다. 이를 통해 식품 소재로써 안전하고, 단백질 및 기능성 물질을 다량 함유한 미세조류가 인류를 위한 미래 식품으로서 얼마만큼의 가능성이 있는지 1990년대부터 2020년 현재까지 국내외 식품에 활용된 미세조류 연구 결과들을 중심으로 살펴보고자 한다.

II. 연구 내용 및 방법

1. 연구방법 및 범위

본 연구는 미래 식품 소재로써 미세조류가 충분한 활용 가치가 있는지 분석하기 위해 진행되었으며, Web of Science, ScienceDirect, Scopus, DBpia, NDSL 등 다양한 연구 문헌들을 제공하는 DB 사이트를 통해 1990년부터 2020년까지의 국내외 문헌들을 수집하고 분석하였다. 수집된 문헌은 총 100편으로 국내 문헌 43편과 국외 문헌 58편을 조사하였으며, 그 중 식품으로 활용된 연구 51편을 중심으로 결과를 정리하였다. 그 외 주제와 관련된 국내 문헌 7편과 국외 문헌 5편이 활용되었다. 특히, 식품 소재로 활발히 연구가 진행 중인 *Chlorella* spp., *Spirulina* spp., *Haematococcus* spp., *Dunaliella* spp., *Isochrysis* spp. 등의 미세조류들을 중심으로 연구가 진행된 식품 분야와 기능성 및 개선된 식품 품질 특성을 분석하여 <Table 1>에 정리하였다. 또한, 미세조류가 활용된 식품의 연구결과들은 핵심적인 정보 전달을 위하여, 빵, 쿠키, 떡, 음료 등 다양한 식품 분야를 주제별로 분류하여 정리하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 식품 연구 개발에 활용되는 미세조류

1) *Chlorella*

Chlorella spp.는 녹조식물문에 속하는 대표적인 미세조류로 2-10 μm 의 세포 크기를 가지며, 전체적으로 구형을 나타낸다. 또한, 높은 단백질 함량(40-55%)을 나타내는 것이 특징이며, 전통적인 식품으로 사용되는 (84%), 옥수수(85%)나 콩(30%)보다 훨씬 낮은 탄수화물 함량(10-19%)을 가진다(Koyande et al. 2019). 1960년대부터 건강보조식품으로 상업화에 성공한 미세조류로 국내외에서 가장 널리 알려진 중이며 광합성을 통해 빠른 증식이 가능하며, 대량 생산에도 유리하다. 또한, 체내 다량의 펠수아미노산, 식이 섬유, 비타민, 핵산, 미네랄, 헤미셀룰로오스(Hemicellulose) 등 다양하고 균형 잡힌 영양성분을 함유하고 있어 미래형 식품 소재로 가장 활용도가 높은 미세조류이다(Han et al. 2002). 특히, *Chlorella*는 동물 또는 미생물의 성장을 촉진시킬 수 있는 CGF (Chlorella growth factor)를 함유(Kim et al. 2002)하고 있어, 콩나물과 같이 식물 배양에 활용하면 생육을 촉진할 수 있고, 다량의 불포화지방산과 단백질로 인해 면역 증

<Table 1> Microalgae using for diverse food material

Microalgae	Feature	Functional Material	Food applications
<i>Chlorella</i> sp. • <i>C. ellipsoidea</i> • <i>C. protothecoides</i> • <i>C. pyrenoidosa</i> • <i>C. sorokiniana</i> • <i>C. vulgaris</i>	· A single cell, spherical shape (2-10 μm in diameter) · High protein contents (40-55%) · High calories (115 cal/oz) · Containing a lot of nutritional ingredients · Having CGF that promotes cell growth · A large amount of USFA (3 g/oz)	CGF, β-glucan, β-carotene	Bread (Park 2003), Cake (Park et al. 2002; Chung & Choi 2005; Kim & Chung 2010), Cheese (Heo et al. 2006), Cookies (Gouveia et al. 2008a; Batista et al. 2017), Drinks (Kim 2004), Feed (Kim et al. 2015a), <i>Hangwa</i> (Cho & Kim 2015; Cho & Kim 2016), Noodles (Park & Cho 2004; Fradueque et al. 2010; Kumoro et al. 2016), <i>Tofu</i> (Kim et al. 2003; Kim et al. 2016), Yoghurt (Cho et al. 2004a; Cho et al. 2004b; Sung et al. 2005)
<i>Spirulina</i> sp. • <i>S. maxima</i> • <i>S. platensis</i>	· A single cell, spiral shape (500 μm in length) · High protein contents (50-65%) · High digestibility (Prokaryotic cell) · Rich in omega-6 fatty acids & antioxidants · Low calories (81 cal/oz) & fats (2 gr/oz)	GLA, Phycocyanin, Polyphenols, β-carotene	Cookies (Batista et al. 2017; Sahin-Cebeci 2020), <i>Garaeduk</i> (Kim et al. 2009a; Kim et al. 2009b), <i>Hangwa</i> (Son et al. 2008; Kim et al. 2010; Shim et al. 2010), Mook (Oh et al. 2012), Noodles (Lee et al. 2008; Lee et al. 2009; Fradueque et al. 2010; Kumoro et al. 2016), Salad dressing (Cho et al. 2005)
<i>Haematococcus</i> sp. • <i>H. pluvialis</i>	· A single cell, spherical shape (20-50 μm in diameter) · Rich in 3S, 3S' form of astaxanthin (3-5.9%) · Rich in various nutrients	Astaxanthin	Cookies (Hossain et al. 2017)
<i>Dunaliella</i> sp. • <i>D. salina</i> • <i>D. bardawil</i>	· A single cell, cup shape (15-25 μm in diameter) · Inhabits in high salinity condition (2M NaCl) · Rich in β-carotene	β-carotene	Cookies (Sahin-Cebeci 2020), Noodles (El-Baz et al. 2017), Etc. (Joo et al. 2016, Lers et al. 2001)
<i>Isochrysis</i> sp. • <i>I. galbana</i>	· A single cell, ovoid shape (4-6 μm in diameter) · Rich in omega-3	EPA, DHA	Cookies (Gouveia et al. 2008a; Gouveia et al. 2008b), Etc. (Borowitzka 1997; Yang & Hur 2012)

진, 간 기능 개선, 혈압 강하, 콜레스테롤 감소 및 중금속 해독 작용 등 다양한 기능성을 나타내는 것으로 보고된다(Cho et al. 2004a; Cho et al. 2004b; Kim et al. 2015a). 또한 *Chlorella* 내 함유된 베타 글루칸은 면역 증진, 혈액 지질 감소, 혈당과 혈중 콜레스테롤 감소와 더불어 대식세포를 활성화시키며, 면역세포인 T세포와 B세포의 면역기능을 향상시켜 체내 형성되는 암세포의 증식과 재발을 억제하는 등의 기능성이 있어 미래 건강식품 개발을 식품 소재로써 가장 먼저 연구가 진행되었다(Han et al. 2002; Spolaore et al. 2006; Kim et al. 2015b). *Chlorella* 중에서도 특히, *C. vulgaris*가 가장 널리 활용되는 종이며, 고대 극동지역에서는 의학 소재로 활용되기도 하였고, 다양한 동아시아 지역의 전통 음식 재료로 사용되어 왔다(Gouveia et al. 2008a). 오늘날에는 주로 *Chlorella* 분말과 더불어 추출물의 형태로 많이 활용되는데, *Chlorella* 추출물이란 *Chlorella* 분말을 열수 추출할 것으로 *Chlorella* 내 불용성 물질을 제거함으로써, 식품 첨가물로 사용해도 섭취 시, 기존 분말이 가질 수 있는 이질감이 없고, *Chlorella* 특유의 이취를 제거 효과도 있어 다양한 식품에 쉽게 활용될 수 있다(Han et al. 2002).

2) *Spirulina*

Spirulina spp.는 단일 나선형 세포로 약 500 μm의 길이를

가지며, *Chlorella* spp. 보다 더 높은 단백질 함량(50-65%)을 갖는 미세조류이다. 멕시코와 아프리카 등 주로 알칼리성 호수에서 증식하는 미세조류로 30억년 전부터 지구상에 존재해온 오래된 미생물 중 하나이기 때문에 고대에서부터 식품으로 활용된 다양한 기록들이 전해지고 있다(Fradueque et al. 2010). *Spirulina*는 세포 구조적으로도 *Chlorella*와 달리 원핵세포(Prokaryotic cell) 형태를 갖추고 있기 때문에 단순하고 얇은 세포벽을 가져 섭취 시, 체내에서 더욱 높은 소화율을 나타낸다(Kose et al. 2017). 이와 더불어 *Spirulina* 역시 체내 높은 단백질 함량과 다양한 영양분을 함유하고 있기 때문에 우주비행사가 섭취하고 있는 식품의 재료로 활용된다. *Spirulina*의 경우, 주목받는 가장 큰 이유는 세포막에 존재하는 남색소 피코시아닌(Phycocyanin)을 함유하고 있기 때문이며, 피코시아닌은 섭취 시, 체내 지방의 소화를 돕고, 강력한 항산화 기능을 가지고 있다(Ciferri 1983). 따라서 식품에 *Spirulina*를 첨가하면 항산화 기능을 가진 기능성 식품 개발이 가능하다. 이러한 피코시아닌은 청색의 착색제로도 활용되어 일본과 중국을 포함한 세계 각 국에서 껌, 사탕, 유제품, 젤리, 아이스크림 및 탄산음료 등의 식품과 립스틱, 아이 라이너, 아이섀도우 등의 화장품 색소로도 활용된다(Gouveia et al. 2008a). 또 *Spirulina* 체내에는 8가지 필수 아미노산과 더불어 70-80%의 유리지방산을 함유하고 있으

며, 특히 필수지방산으로 분류되는 오메가-6 지방산의 일종인 감마 리놀렌산(γ -linolenic acid)이 풍부한 것이 특징이다. *Spirulina*는 식물성 기름에 함유되어 있는 감마 리놀렌산이 특히 다량 함유되어 있어, 식품으로 섭취할 경우, 혈중 콜레스테롤 저하, 고혈압 예방, 피부 염증 방지 등 다양한 효능을 나타낼 수 있다(Mahajan & Kamat 1995). 현재 가장 널리 사용되는 종은 *S. platensis*로 세계보건기구(WHO), 국제연합식량농업기구(FAO), 국제연합공업개발기구(UNIDO), 유니세프(UNICEF) 등 다양한 국제기구들로부터 식품으로서의 안정성을 인정받아 세계 100여개의 국가에서 건강보조식품, 천연화장품, 착색제 및 기타 여러 형태로 활용되고 있다(Ötles & Pire 2001; Shimamatsu 2004; Lee et al. 2008; Lee et al. 2009).

3) *Haematococcus*

Haematococcus spp.는 녹조식물문에 속하는 미세조류 중 하나로, 난형 또는 구형(지름 20-50 μm)을 나타내며, 2개의 편모를 가지고 있어 운동성을 가진다. 또한, 환경 조건에 따라 아스타잔틴을 함유한 Cyst를 형성하는 것이 특징이다. *Haematococcus* spp.는 북극, 설원, 바다, 호수 등에 서식하며 새우, 게 등의 갑각류와 연어에 함유된 강력한 천연 항산화제인 아스타잔틴을 현재까지 알려진 생물 중 가장 많이 생산하는 것(건조 중량 대비 약 3-5%)으로 알려진 미세조류이다. 또한, *Haematococcus*가 생산하는 아스타잔틴은 3S, 3'S 구조 형태로 다른 입체 이성질체인 3R, 3'R 구조 또는 3R, 3S구조보다 항산화 능력이 더 우수한 것으로 보고된다(Harker et al. 1996; Dragos et al. 2010; Yang et al. 2013; Al-Bulishi et al. 2015). 이는 *Haematococcus*를 식품에 첨가하여 섭취할 경우, 체내 발생되는 활성산소를 감소시켜 노화를 포함한 다양한 산화적 자극으로부터 건강을 유지하는데 도움을 줄 수 있다는 것을 의미한다(Liu & Osawa 2007; Ranga et al. 2010; Pérez-López et al. 2014). 특히, 가장 널리 사용되는 종은 *H. pluvialis*이며, *Haematococcus*는 아스타잔틴 이외에도 세포 내 다양한 종류의 다당류, 단백질, 고급불포화지방산, 무기질, 비타민 등의 영양분이 풍부하여 식품의 영양 개선에 도움을 줄 수 있다(Hossain et al. 2017). 그러나, *Haematococcus*는 *Chlorella*, *Spirulina*에 비해 세포의 상당히 증식속도가 느리며, 아스타잔틴을 함유한 세포의 경우 두꺼운 세포벽을 가지고 있어 소화율이 떨어지는 단점을 가진다(Wang et al. 2004). 따라서 *Haematococcus*의 경우, 아스타잔틴을 정제한 건강보조식품의 형태로만 사용되어 왔으나, 최근에는 *Haematococcus* 분말 또는 추출물의 형태로 식품에 활용하려는 연구들이 보고되고 있다(Hossain et al. 2017).

4) *Dunaliella*

Dunaliella spp.는 컵모양을 가지며 지름 15-25 μm 의 단일

세포로 염도가 높은 해수에서 증식하는 내염성 미세조류로 체내 다량의 베타 카로틴(β -carotene)을 축적하는 것으로 알려져 있다. 가장 널리 활용되는 종은 *D. salina*로, 생산되는 베타 카로틴은 주로 당근을 포함하여 식물에 함유되어 있는 카로티노이드계 색소이며 인체 내에서 비타민 A의 일종인 레티놀(Retinol)로 일부 전환이 되기 때문에 시각을 담당하는 눈 관련 건강을 유지하는데 도움을 줄 수 있다(Ben-Amotz et al. 1995; Tang 2010). 이러한 특성으로 인해 *Dunaliella*는 주로 베타 카로틴, 레티놀 생산에 활용되어 왔으며(Lers et al. 1991; Ben-Amotz 1995), 최근에는 베타 카로틴이 햇빛에 의한 피부노화를 억제할 수 있음이 밝혀지면서 화장품 또는 의약품에도 활용되고 있다(Joo et al. 2016). 그러나 *Dunaliella*의 경우, *Chlorella*, *Spirulina*, *Haematococcus*와 달리 다당질 형태의 세포벽이 없는 대신 얇은 세포막으로 둘러싸인 구조를 가지고 있어 세포의 형태가 쉽게 변하는 특성으로 체내 다량의 영양분을 함유할 수 있으며, 체내에서 소화가 잘되기 때문에 식품 소재로도 큰 가능성을 가지고 있다(Borowitzka et al. 1990; Weiss et al. 1991). 이 뿐만 아니라, *Dunaliella*는 내염성 균주로 고염도 조건에서 증식이 가능하기 때문에 Open pond 형태의 배양을 통해 오염 없이 쉽게 대량의 *Dunaliella* 분말 및 추출물을 확보할 수 있다.

5) *Isochrysis*

Isochrysis spp.는 작편모조류에 속하는 해양 미세조류 중 하나로, 지름 4-6 μm 크기의 단일 타원형 세포이며, 오메가-3로 알려진 EPA (Eicosapentaenoic acid), DHA (Docosahexaenoic acid)의 생산력이 우수한 것으로 알려진 해양 미세조류이다(Liu & Lin 2001). 특히, 사람과 같은 고등동물의 경우, 체내에서 EPA, DHA 등이 자체적으로 합성되지 않기 때문에, *Isochrysis galbana* 분말 또는 추출물을 식품에 첨가하여 활용하면 건강 유지에 도움을 줄 수 있는 기능성 식품 개발이 가능하다(Crawford 2000; Ghys et al. 2002; Wroble et al. 2002). 특히 DHA의 경우, 유아 영양에 필수적인 뇌 발달, 망막 발달 및 모유 생산에 있어 중요한 물질임이 이미 밝혀졌다(Pulz & Gross 2004; Arteburn et al. 2007).

2. 미세조류를 활용한 식품과 기능성

1) 면(Noodle).

면은 쌀과 밀 등의 곡류를 전분을 주성분으로 하여 반죽을 길게 뽑아낸 형태로, 아시아에서는 주로 국수, 냉면 등에 활용되고, 서양에서는 파스타(Pasta)와 같은 형태로 사용되는 대표적인 식품 소재이다. 국내의 경우, 점차 간소화되는 식습관과 가공식품의 발달로 인해, 국수 또는 냉면의 형태로 수요량이 꾸준히 증가하며 종류도 매우 다양화되고 있는 추세이다. 따라서 국수 또는 냉면에 사용되는 면 반죽에 미세조류를 첨가함으로써 기존보다 더 건강한 국수 또는 기능성 냉면 등의 개발이 가능하다. Park & Cho (2004)는 밀가루

반죽에 *Chlorella* 분말을 넣어 국수를 제조한 결과, *Chlorella*의 첨가 농도가 증가할수록 제조된 국수의 무게와 부피가 증가하는 것을 확인하였으며, 이는 조리과정 중 수분 흡수율이 증가한 결과임을 확인하였다. 또, 이러한 결과로 *Chlorella* 분말이 첨가된 국수가 대조군에 비해 훨씬 더 부드러운 질감을 나타내고, 경도도 감소함을 보고하였다. 반면, Lee et al. (2008)은 밀가루 반죽에 *Spirulina* 분말을 첨가하여 생면을 제조한 결과, 수분 흡수량은 대조군에 비해 오히려 감소하는 결과를 확인하였으며, 이는 *Spirulina* 분말이 밀가루 반죽 내 글루텐 단백질의 결합력을 증가시키면서 반죽의 경도가 증가하고, 수분의 흡수를 저해한 것으로 보고하였다. 이처럼 *Spirulina*와 *Chlorella*의 첨가 결과의 차이는 원핵세포와 진핵세포인 두 미세조류의 세포 구조 차이에 기인한 것으로 보고된다. 하지만 *Spirulina* 분말을 사용한 경우, DPPH (α, α -diphenyl- β -picrylhydrazyl) assay 결과를 통해 제조된 생면으로부터 항산화 효능이 입증되었고, 이는 *Spirulina* 분말에 함유된 피코시아닌에 의한 것이다(Lee et al. 2009). 따라서 식품의 품질 개선 동시에 기능성 향상을 위하여 식품의 특성에 맞는 적절한 미세조류의 선정이 필요하고, 첨가하는 분말의 적정 수준을 구하는 연구들이 요구된다.

해의 문헌들의 경우에는 파스타면을 제조할 때, 미세조류를 첨가하고 이에 변화된 파스타의 품질 특성과 선호도를 중심으로 보고되고 있다. Fradique et al. (2010)에 따르면 *Spirulina maxima*를 첨가한 파스타면은 대조군에 비해 탄수화물의 비중이 낮아지고, 단백질과 회분의 비중이 증가하는 결과를 확인하였으며, 이는 *Spirulina* 분말에 함유된 다량의 단백질과 무기질에 기인한 결과이다. 파스타의 경우, 회분 함량이 증가할수록 파스타의 질감이 질기고 품질이 저하되는 경향이 있는데, *S. maxima*를 첨가한 파스타면의 경우, 조리과정 중에 *Spirulina* 분말에 함유된 무기질 성분들이 이온영동(Ion migration) 현상에 의해 면수로 빠져나가 완성된 파스타는 대조군과 회분 함량의 차이가 거의 없는 것이 확인되었다. 또한, 대조군이 약 1,716-1,750 kJ의 열량을 나타내는데 비해 *Spirulina maxima*분말을 넣은 파스타는 약 1,420 kJ로 열량이 낮고, 단백질 함량은 높은 특징을 확인하였다. 이는 첨가된 *Spirulina* 분말에 의해 조리과정 중 이온영동 현상이 촉진되면서 파스타면에 함유된 아밀로스(Amylose) 구조의 탄수화물들이 면수로 다량 빠져나가 제거되었기 때문인 것으로 보고된다. 미세조류 분말의 첨가는 파스타면의 질감 개선 효과를 줄 수도 있는데, Kumoro et al. (2016)에 따르면 *Chlorella vulgaris*나 *Spirulina platensis*를 첨가한 면이 더욱 견고해지는 것을 확인하였다. 이는 첨가된 미세조류 분말에 함유된 고등 단백질의 영향으로 반죽 내 이황화물 결합(Disulfide bond)이 추가 형성되면서 글루텐 단백질과 전분 사이의 형성되는 망사구조가 더욱 더 조밀해지는 현상과 더불어 미세조류 분말의 첨가로 인해 수분을 흡수하는 특성을 지닌 밀가루의 비율이 감소했기 때문인 것으로 판단

된다. 미세조류 분말이 첨가된 파스타는 사람들의 선호도에도 영향을 주었으며, 관능평가 결과 *Chlorella vulgaris*가 함유된 오렌지 파스타가 가장 인기가 높은 것으로 나타났고, *Spirulina*가 첨가된 파스타도 대조군에 비해 더 높은 선호도를 보였다. 일부 미세조류 특유의 향을 감지하기도 하였으나, 파스타의 색, 질감에서 높은 평가를 받았다(Fradique et al. 2010). *Dunaliella salina*가 첨가된 파스타 역시 품질성과 영양가가 향상되고 있음이 나타났으며 전반적으로 단백질과 미네랄의 비율이 높아졌다(El-Baz et al. 2017).

2) 빵(Bread)과 쿠키(Cookie)

빵은 밀가루를 주성분으로 만든 반죽에 효모에 의한 발효 과정을 거쳐 제조되는 식품으로 전 세계적으로 가장 인기 있는 주식이자 간식이다. 이로 인해 국내외 다양한 연구진들이 빵 제조 시 미세조류 분말을 첨가하는 연구들을 진행하였으며, 결과적으로 빵의 영양학적인 개선과 더불어 색, 부피, 질감, 선호도 등 다방면에서 빵의 품질이 향상되는 결과들이 보고되었다(Gouveia et al. 2008a; Kim & Chung 2010; Batista et al. 2017; Hossain et al. 2017). 우선, *Chlorella* 분말을 첨가하자, 발효과정에서 대조군에 비해 빵 반죽의 부피가 더 빠르게 증가하였고, 이로 인해 빵을 굽는 조리과정에서의 수분 손실을 감소시켰으므로, 더욱 더 촉촉하고 부드러운 질감의 빵을 제조할 수 있었고, 패널리스트들을 대상으로 한 관능평가에서도 더 높은 기호도 평가를 받을 수 있었다(Park 2003; Chung & Choi 2005). 이러한 현상은 *Chlorella* 분말에 함유된 CGF가 반죽 내 효모의 생육을 촉진시켜 발효 속도가 증가했기 때문이다. 이러한 특성은 *Chlorella* 대신 *Spirulina* 분말을 첨가한 경우에도 비슷한 결과가 나타나는데, 이는 *Spirulina* 분말에 함유된 다양한 영양분들이 효모의 생육을 촉진시켜 반죽의 부피를 증가시켰기 때문이다(Chung & Choi 2005). 또, *Spirulina*를 첨가한 경우에는 필수아미노산인 트레오닌, 메티오닌, 이소류신, 류신의 증가와 함께 항산화 물질이 함유되어 있어 제조된 빵의 노화(Retrogradation) 진행 속도가 감소하는 결과가 확인되었다(Jung et al. 1999; Figueira et al. 2011).

쿠키는 모든 연령층에게 인기있는 대표 간식으로 달콤한 맛과 더불어 에너지를 보충해주는 기능을 갖고 있지만, 과도한 당과 지방 함량 등으로 건강에는 좋지 않다는 평가를 받는 식품이다. 이러한 부정적인 인식을 개선시키기 위해 쿠키를 제조할 때, 당이나 지방 함량을 단백질, 불포화지방 등으로 대체할 수 있는 가능성을 갖는 미세조류 분말을 첨가하는 것이 하나의 대안이 될 수 있다. Batista et al. (2017)의 연구 결과에 따르면 *Chlorella* 분말을 2% 첨가한 경우, 대조군에 비해 탄수화물의 비중이 감소하면서 동시에 단백질 함량이 약 20% 증가하고, 더욱 더 바삭한 쿠키가 제조됨을 확인할 수 있다. 이는 *Chlorella vulgaris*가 함유한 풍부한 단백질과 다당류가 반죽 구조의 결합력을 증가시키기 때문인

것으로 보고되며, 결과적으로 관능평가에서도 대조군 보다 더 높은 선호도가 나타남을 확인하였다. 이러한 결과는 *Spirulina plantensis* 분말을 첨가해도 동일하게 나타났으며, 추가로 진행된 소화율 테스트(*In vitro digestibility*)에서도 대조군 대비 약 87-95% 정도 소화율을 나타내 큰 차이가 없음이 확인되었다. 한편, *Dunaliella salina* 분말을 첨가한 쿠키는 전체적으로 점성이 있으나 적절한 농도로 첨가되었을 때 기능성과 맛이 우수한 것으로 나타났다(Sahin-Cebeci 2020). *Isochrysis galbana* 또는 *Haematococcus pluvialis* 분말을 첨가한 경우에는 쿠키의 품질은 큰 변화없이 유지되면서 오메가-3, 아스타잔틴과 같은 기능성 물질의 첨가로 인해 항산화 기능이 생성되고 저장 중에도 상대적으로 높은 상태의 안정성을 유지하는 결과들도 보고되었다(Gouveia et al. 2008b; Yang & Hur 2012; Hossain et al. 2017).

3) 떡(Korean rice cake)과 한과(Hangwa)

떡과 한과는 쌀을 주성분으로 제조된 전통식품이며 오늘날 서구화된 식생활로 인해 사용 빈도가 감소하였으나, 쌀 소비 촉진 운동으로 떡과 한과류를 포함한 쌀 가공 식품 개발이 시도 중에 있다(Kim et al. 2009a; Kim et al. 2009b). 이러한 추세에 맞춰 전통음식의 기능성을 더하기 위해 타피오카(Tapioca)나 saltwort 등을 첨가한 기능성 떡과 한과를 제조하는 연구들이 진행되었다(Hyun et al. 2005; Kim et al. 2005; Jang & Park 2006). 이처럼 전통식품의 품질 개선을 위해 미세조류를 첨가하는 국내 문헌들이 보고되고 있는데, *Spirulina* 분말을 첨가한 떡의 경우, 대조군과 비해 떡의 탄력성과 응집성에는 변화가 없으나, 떡의 경도가 증가하는 결과가 확인되었다(Kim et al. 2009a; Kim et al. 2009b). 이는 대체로 분말형태로 첨가되는 입자 특유의 영향으로 떡 반죽 내 수분 흡수율이 감소하기 때문으로 보고된다(Hyun et al. 2005; Kim et al. 2005; Yoo et al. 2005; Jang & Park 2006). 분말첨가물을 사용하는 떡 제조 시 물 첨가량을 늘리는 것만으로도 쫄깃한 떡의 제조가 가능할 것으로 보고되었는데, *Spirulina* 첨가로 인한 영양학적 개선과 기능적 개선된 떡의 제조가 가능함을 확인하였다(Kim et al. 2009a; Kim et al. 2009b). *Chlorella*를 첨가한 떡의 경우엔 반죽 내 수분 보존력이 우수하여 *Spirulina*와는 달리 조리 후에도 떡의 쫄깃함을 유지할 수 있는 것이 확인되었으나, 첨가량이 적정 수준이상으로 증가하면 *Chlorella* 특유의 향미가 강해져 관능평가의 선호도가 낮아지는 결과가 나타났다(Park et al. 2002). 따라서 떡의 품질 및 기능성과 선호도를 모두 충족시킬 수 있는 적정 첨가량을 구하는 것이 중요하다.

한과는 곡류를 기반으로 제조된 전통 과자로 최근 전통식품에 대한 관심의 증가와 관광업의 활성화로 인해 점차 소비시장도 증가하고 있는 추세이다(Park et al. 2000). 이에 한과의 기능성을 더하기 위한 연구들이 활발히 진행 중이며, 미세조류 분말을 첨가한 연구 결과들이 보고되고 있다. 일반

적으로 과자의 품질은 반죽 점도의 영향을 받는데, *Chlorella* 나 *Spirulina*를 포함한 미세조류 분말을 첨가하게 될 경우 pH가 감소하고, 분말에 함유된 무기질 중 칼슘의 농도가 증가하면서 점도가 낮아지고, 이는 곧 제조된 한과의 경도를 증가시키는 것으로 보고되었다(Son et al. 2008; Kim et al. 2010; Shim et al. 2010; Cho & Kim 2015; Cho & Kim 2016). 또한 경도의 증가는 바삭한 질감으로 나타나기 때문에 관능검사에서도 *Chlorella* 분말이 2% 첨가된 유과가 가장 높은 기호도의 점수를 기록하였다(Cho & Kim 2015; Cho & Kim 2016). 유사하게 *Spirulina* 분말이 첨가된 경우에도, 대조군에 비해 완성된 한과의 경도가 증가하는 것으로 나타났으며, 동시에 한과 내부의 수분함량이 같이 증가하는 결과가 나타났다. 이는 겉이 바삭하고 안은 촉촉한 한과의 제조가 가능함을 보여주었으며, *Spirulina* 분말이 약 2% 정도 첨가되었을 때 가장 높은 선호도를 나타내는 것이 확인되었다(Son et al. 2008; Shim et al. 2010). 이처럼 미세조류 분말을 첨가함으로써 과자의 품질 특성을 개선시킬 수 있으며, 동시에 단백질, 불포화지방, 무기질, 비타민 및 기능성 물질 함유한 전통식품의 개발이 가능하다.

4) 음료(Beverage)

음료는 물에서부터 차(Tea), 음료수, 유제품 음료(우유, 요구르트), 술 등 다양한 형태가 있으며, 미세조류를 첨가하여 영양학적 가치를 개선시키고자 하는 연구 결과들이 보고되고 있다. 이때, 음료의 색의 선명도, 균질성 등 음료의 품질을 유지하기 위해 미세조류 분말의 형태보다는 액체 추출물의 형태로 활용되는 특징을 보인다. 예를 들어, 매실 농축액 0.4%와 *Chlorella* 추출물을 5%를 첨가하여 제조된 매실 음료는 대조군을 포함한 실험군들과 비교하여 색, 맛, 향, 기호도면에서 가장 높은 점수를 받아 영양, 기능 및 선호도 면에서 품질이 개선된 결과를 나타냈다(Kim 2004). 마찬가지로, *Spirulina* 또는 *Chlorella* 추출물을 유제품 음료에 첨가하면 요구르트 내 유산 구균인 *Streptococcus Thermophilus*와 유산 간균인 *Lactobacillus bulgaricus*의 증식을 촉진하는 효과가 있어, 대조군에 비해 단시간에 요구르트의 산도를 1.1%로 증가시키는 결과가 나타났으며, 이는 고품질의 호상 요구르트 제조를 위한 최적 산도 조건과도 일치하기 때문에 고품질의 요구르트 제조 및 품질 개선에 도움이 되는 것으로 밝혀졌다(Cho et al. 2004a; Cho et al. 2004b).

5) 기타

미세조류는 위에서 언급된 사례들 이외에도 식품 첨가제로써 다양한 식품의 품질을 개선하는데 활용될 수 있다. 예를 들어, 양갱, 도토리묵, 두부 등에 *Spirulina* 또는 *Chlorella*와 같이 미세조류 분말을 첨가하게 되면, 분말 내 다량의 단백질과 다당류 등의 성분들이 식품의 밀도를 높이고, 구조의 결합력을 증가시켜 탄력성, 씹힘성, 쫄깃함 등의

조직감 개선 효과를 줄 수 있다(Oh et al. 2012; Kim et al. 2016b). 또한, 미세조류는 산화가 쉽고, 장기간 보관이 어려운 식품에도 활용할 수 있다. 예를 들어, 샐러드에 곁들이는 드레싱(Dressing)은 식용유, 식초 등을 주성분으로 제조되어 쉽게 산화될 수 있는데, *Spirulina* 추출물을 첨가하면 폴리페놀(Polyphenol), 피코시아닌 등의 항산화 성분들로 인해 지질 산패가 억제되고 저장기간이 증가하는 결과가 보고되었다(Cho et al. 2005).

마지막으로 채소 재배 또는 동물 사육을 위한 사료로 활용 가능하다. 예를 들어, *Chlorella* 추출물을 활용하여 콩나물을 재배한 결과, *Chlorella* 추출물이 함유한 CGF로 인해 콩나물의 생육이 촉진되고, 더불어 항산화 효능이 나타나는 것이 확인되었으며, 콩에 없던 비타민C가 합성되면서 단백질과 전분의 소화흡수율도 증가하는 효과가 보고되었다(Kim et al. 2015a). 현재 육지 및 수생 동물 사육을 위한 사료로 다양한 종류의 미세조류(*Chlorella*, *Tetraselmis*, *Spirulina*, *Nannochloropsis*, *Nitzschia*, *Navicula*, *Chaetoceros*, *Scenedesmus*, *Haematococcus*, *Cryptocodinium*)가 활용되고 있으며, 미세조류 사료의 경우, 동물의 성장 및 체중 조절, 번식력 향상과 질병에 대한 저항성을 높이는 효과가 있는 것으로 밝혀졌다(Certik & Shimizu 1999). 또, 닭, 오리 등의 가금류의 경우에는 달걀 생산량 증가하였으며, 흰자와 노른자의 색의 선명도가 향상되는 등 품질 개선 결과가 확인되었다(Ginzberg et al. 2000). 미세조류는 어류 양식업에도 활용되는데 *Chlorella*, *Tetraselmis*, *Isochrysis*, *Pavlova*, *Phaeodactylum*, *Chaetoceros*, *Nannochloropsis*, *Skeletonema*, *Thalassiosira* 등이 주로 사용되며 필수 영양소가 다량 함유되어 있어, 물고기의 성장을 촉진시키고, 질병에 대한 저항성을 높이는 효과가 입증되었다(Naas et al. 1992; Borowitzka 1997; Yamaguchi 1997; Muller-Feuga 2000; Fábregas et al. 2001; Apt & Behrens 2002).

IV. 요약 및 결론

Chlorella spp., *Spirulina* spp., *Haematococcus* spp., *Dunaliella* spp., *Isochrysis* spp. 등의 미세조류는 체내 단백질 함량이 최대 50%에 가까운 정도로 고단백질 공급원으로 활용될 수 있으며, 필수지방산, 비타민, 무기질과 더불어 피코시아닌, 아스타잔틴, 폴리페놀 등 다양한 기능성 성분들이 다량 함유되어 있어 식품에 첨가되어 활용될 경우, 완전한 영양 공급과 더불어 기능성 식품으로 품질 개선 효과를 줄 수 있기 때문에 PEM 현상을 해결할 수 있는 미래 건강 식품 소재로 볼 수 있다. 또한, 본 연구에서 살펴본 다양한 사례들을 통해 미세조류의 첨가는 기존 식품의 품질 특성을 개선시키고, 소비자의 기호도를 더욱 높일 수 있는 가능성이 충분히 있으며, 분말 또는 추출물 형태로 활용할 수 있어 활용 가능성은 무한하다고 볼 수 있다. 특히, 국내 전통식품들

에 적극 활용함으로써 기능성을 갖춘 전통식품들을 개발하고, 국내를 넘어 세계 시장으로 확대를 위한 방안이 될 수 있을 것으로 기대한다. 미세조류는 경제적인 측면에서도 미래 식품 소재로서 적합하다. 미세조류 특성 상, 경작지가 필수적으로 요구되지 않으며, 버려지는 폐수를 활용할 수 있고, 태양광 에너지를 이용하여 배양이 가능하여 공정 비용이 낮다는 장점이 있기 때문이다. 물론 아직까지는 상업화를 위해 우량 미세조류의 개발, 효율적인 공정의 개발 등의 풀어야 할 기술적 문제들이 남아 있지만 미래 인류의 건강한 식품 개발 및 공급을 위해서 미세조류에 대한 연구가 더욱 활발히 진행되어야 한다.

저자 정보

곽호석(동양미래대학교 식품공학과, 조교수, 0000-0002-6683-1953)

김지수(차의과학대학교 바이오공학과, 학사과정, 0000-0002-1034-0143)

이자현(동양미래대학교 식품공학과, 조교수, 0000-0001-7950-9800)

성동은(동양미래대학교 식품공학과, 조교수, 0000-0003-0819-6979)

감사의 글

본 연구는 2018년 동양미래대학교 교내 학술연구지원사업의 지원을 받아 수행되었습니다.

Conflict of Interest

No potential conflict of interest relevant to this article was reported.

References

- Aaronson S. 1986. A role for algae as human food in antiquity. *Food and Foodways*, 1(3):311-315
- Al-Bulishi MSM, Changhu X, Tang QJ. 2015. Health aspects of astaxanthin: a review. *Canad. J. Clin. Nutr.*, 3(2):71-78
- An HJ, Seo SW, Sim KS, Kim JS, Kim EH, Lee MO, Park HS, Han JG, Lee EH, Um JY, Hong SH, Kim HM. 2006. Antifatigue effect of *Chlorella vulgaris* in mice. *Korean J. Food & Nutr.*, 19(2):169-175
- Apt KE, Behrens PW. 2002. Commercial developments in microalgal biotechnology. *J. Phycol.*, 35(2):215-226
- Arteburn LA, Oken HA, Hoffman JP, Bailey-Hall E, Cheng G, Rom D, Hamersley J, McCarthy D. 2007. Bioequivalence of docosahexaenoic acid from different algal oils in capsules and in DHA-fortified food. *Lipids*. 42(11):1011-1024
- Batista AP, Niccolai A, Fradinho P, Fragoso S, Bursic I, Rodolfi L, Biondi N, Tredici MR, Sousa I, Raymund A.

2017. Microalgae biomass as an alternative ingredient in cookies: sensory, physical and chemical properties, antioxidant activity and *in vitro* digestibility. *Algal Res.*, 26:161-171
- Ben-Amotz A. 1995. New mode of *Dunaliella* biotechnology: two-phase growth of β -carotene production. *J. Appl. Physiol.*, 7(1):65-68
- Borowitzka MA. 1997. Microalgae for aquaculture: opportunities and constraints. *J. Appl. Physiol.* 9:393-401
- Borowitzka MA, Borowitzka LJ, Kessly K. 1990. Effects of salinity increase on carotenoid accumulation in the green alga *Dunaliella salina*. *J. Appl. Phycol.*, 2(2):119-129
- Certik M, Shimizu S. 1999. Biosynthesis and regulation of microbial polyunsaturated fatty acid production. *J. Biosci. Bioeng.* 87(1):1-14
- Cherng JY, Shih MS. 2006. Improving glycogenesis in streptozocin(STZ) diabetic mice after administration of green algae *Chlorella*. *Life Sci.*, 78(11):1181-1186
- Cho DH, Choi JW, Kang Z, Kim BH, Oh HM, Kim HS, Ramanan R. 2017. Microalgal diversity fosters stable biomass productivity in open ponds treating wastewater. *Sci. Rep.*, 7(1):1-11
- Cho EJ, Nam ES, Park SI. 2004a. Effect of *Chlorella* extract on quality characteristics of *Yoghurt*. *Korean J. Food & Nutr.*, 17(1):1-7
- Cho EJ, Nam ES, Park SI. 2004b. Keeping quality and sensory property of drinkable *Yoghurt* added with *Chlorella* extract. *Korean J. Food & Nutr.*, 17(2):128-137
- Cho H, Yang YH, Lee KJ, Cho YS, Chun HK, Song KB, Kim MR. 2005. Quality characteristics of low fat salad dressing with *Spirulina* during storage. *Korean J. Food Preserv.*, 12(4):329-335
- Cho HS, Kim KH. 2015. Quality characteristics of *Maekjagwas* with *Chlorella* powder. *J. Korean Soc. Food Cult.*, 30(5):667-673
- Cho HS, Kim KH. 2016. Effects of *Chlorella* powder on quality characteristics of *Yukwa*. *J. Korean Soc. Food Cult.*, 31(2):178-187
- Choi YJ, Jo WS, Kim HJ, Nam BH, Kang EY, Oh SJ, Lee GA, Jeong MH. 2010. Anti-inflammatory effect of *Chlorella ellipsoidea* extracted from seawater by organic solvents. *Korean J. Fish. Aquat. Sci.*, 43(1):39-45
- Chung NY, Choi SN. 2005. Quality characteristics of pound cake with *Chlorella* powder. *Korean J. Food Cookery Sci.*, 21(5): 669-676
- Ciferri O. 1983. *Spirulina*, the edible microorganism. *Microbiol. Rev.*, 47(4):551-578
- Crawford, M. 2000. Placental delivery of arachidonic acid and docosahexaenoic acids: implication of the lipid nutrition of preterm infants. *Am. J. Clin. Nutr.*, 71(1):275-284
- Dillehay TD, Ramírez C, Pino M, Collins MB, Rossen J, Pino-Navarro JD. 2008. Monte Verde: seaweed, food, medicine, and the peopling of South America. *Science*, 320(5877): 784-786
- Dragos N, Bercea V, Bica A, Druga B, Nicoara A, Coman C. 2010. Astaxanthin production from a new strain of *Haematococcus pluvialis* grown in batch culture. *Ann. Rom. Soc. Cell Biol.*, 15(2):353-361
- El-Baz FK, Abdo SM, Hussein AMS. 2017. Microalgae *Dunaliella salina* for use as food supplement to improve pasta quality. *Int. J. Pharm. Sci. Rev. Res.*, 46(2):45-51
- Fábregas J, Otero A, Dominguez A, Patino M. 2001. Growth rate of the microalga *Tetraselmis suecica* changes the biochemical composition of *Artemia* species. *Mar. Biotechnol.*, 3(3):256-263
- Figueira FS, Crizel TM, Silva CR, Salas-Mellado MM. 2011. Pão sem gluten enriquecido com a microalga *Spirulina platensis*. *Brazilian J. Food Technol.*, 14(4):308-316
- Fradique M, Batista AP, Nunes MC, Gouveia L, Bandarra NM, Raymundo A. 2010. Incorporation of *Chlorella vulgaris* and *Spirulina maxima* biomass in pasta products. Part 1: Preparation and evaluation. *J. Sci. Food Agric.*, 90(10):1656-1664
- Fuentes-Grünewald C, Garcés E, Alacid E, Smpedro N, Rossi S, Camp J. 2012. Improvement of lipid production in the marine strains *Alexandrium minutum* and *Heterosigma akashiwo* by utilizing abiotic parameters. *J. Ind. Microbiol. Biotechnol.*, 39(1):207-216
- Ghys A, Bakkere E, Hornstra G, Hout M. 2002. Red blood cell and plasma phospholipid arachidonic and docosahexaenoic acid levels at birth and cognitive development at 4 years of age. *Early Hum. Dev.*, 69:83-90
- Ginzberg A, Cohen M, Sod-Moriah UA, Shany S, Rosenshtrauch A, Arad S. 2000. Chickens fed with biomass of the red microalga *Porphyridium sp.* have reduced blood cholesterol level and modified fatty acid composition in egg yolk. *J. Appl. Phycol.*, 12:325-330
- Gouveia L, Batista AP, Sousa I, Raymundo A, Bandarra NM. 2008a. Microalgae in novel food products. *Nova Science Publishers, Inc.*, pp1-37
- Gouveia L, Coutinho C, Mendonca M, Batista AP, Sousa I, Bandarra NM, Raymundo A. 2008b. Functional biscuits with PUFA- ω 3 from *Isochrysis galbana*. *J. Sci. Food Agric.*, 88:891-896
- Han JG, Kang KK, Kim JK, Kim SH. 2002. Current state and view of *Chlorella* extract. *Korean J. Food Sci. Technol.*, 35(2):64-69
- Harker M, Tsavalos AJ, Young AJ. 1996. Factors responsible for astaxanthin formation in the chlorophyte *Haematococcus pluvialis*. *Bioresour. Technol.*, 55(3):207-214
- Heo JY, Shin HJ, Oh DH, Cho SK, Yang CJ, Kong IK, Lee SS, Choi KS, Choi SH, Kim SC, Choi HY, Bae I. 2006. Quality properties of appenzeller cheese added with *Chlorella*. *Korean J. Food Sci. Ani. Resour.*, 26(4):525-531
- Hossain AKMM, Brennan MA, Mason SL, Guo X, Zeng XA, Brennan CS. 2017. The effect of astaxanthin-rich microalgae "*Haematococcus pluvialis*" and wholemeal flours incorporation in improving the physical and functional properties of cookies. *Foods*, 6(8):57
- Hyun YH, Hwang YK, Lee YS. 2005. Quality characteristics

- of *Sulgidduk* with tapioca flour. Korean J. Food & Nutr., 18(2):103-108
- Jang MS, Park JE. 2006. Optimization of ingredient mixing ratio for preparation of *Sulgidduk* with saltwort (*Salicornia herbacea* L.). J. Korean Soc. Food Sci. Nutr., 35(5):641-648
- Joo JH, Seok JH, Hong IK, Kim NY, Choi EM. 2016. Inhibitory effects of *Dunaliella salina* extracts on thermally-induced skin aging. J. Korean Soc. Cosmet. Sci., 42(1):57-64
- Jung HS, Noh KH, Go MK, Song YS. 1999. Effect of leek (*Allium tuberosum*) powder on physicochemical and sensory characteristics of breads. J. Korean Soc. Food Sci. Nutr., 28(1):113-117
- Kang MS, Chae HJ, Sim SJ. 2006. *Chlorella* as a functional biomaterial. Korean J. Biotechnol. Bioeng., 19(1):1-11
- Kim BW, Yoon SJ, Jang MS. 2005. Effect of addition *Baekbokryung* (white *Poria cocos* wolf) powder on the quality characteristics of *Sulgidduk*. Korean J. Food Cookery Sci., 21: 895-907
- Kim HJ, Shim EK, Kim HR, Kim MR. 2010. Antioxidant activities of *Riceyeotgangjung* with added *Spirulina* powder. J. Korean Soc. Food Cult., 25(6):795-800
- Kim JS. 2004. Preparation of *Chlorella* drinks and its quality characteristics. J. Korean Soc. Food Sci. Nutr., 17(4):382-387.
- Kim JYH, Kwak HS, Sung YJ, Choi HI, Hong ME, Lim HS, Lee JH, Lee SY, Sim SJ. 2016a. Microfluidic high-throughput selection of microalgal strains with superior photosynthetic productivity using competitive phototaxis. Sci. Rep., 6:21155
- Kim KB, Lee JJ, Heo JA, Cho DH, Kim HS, Kim KN, Kim SY, Ahn KJ, An IS, An S, Bae S. 2014. The extract of *Chlorella vulgaris* exerts protective effects against ultraviolet B radiation-induced damages in human dermal fibroblasts. Kor. J. Aesthet. Cosmetol., 12(4):479-486
- Kim KJ, Chung HC. 2010. Quality characteristics of yellow layer cake containing different amounts of *Chlorella* powder. Korean J. Food Cookery Sci., 26(6):860-865
- Kim MJ, Shim CK, Kim YK, Hong SJ, Park JH, Han EJ, Ji HJ, Lee SB, Kim SC. 2015a. Effect of *Chlorella sp.* on improving antioxidant activities and growth promotion in organic soybean sprout cultivation. Korean J. Org. Agric., 23(4):939-950
- Kim MJ, Shim CK, Kim YK, Hong SJ, Park JH, Han EJ, Kim SC. 2016b. Effect of fresh *Chlorella* powder on improving qualities and storage condition of organic soybean *Tofu*. Korean J. Food Preserv., 23(6):832-838
- Kim MY, Jeong YK, Son CW, Jhon ES, Kim MR. 2009a. Quality characteristics and antioxidative activities of *Spirulina* added Korean rice cake (*Garaeduk*) during storage. Korean J. Food Preserv., 16(1):8-16
- Kim MY, Kim JM, Lee YJ, Heo OS, Kim MR. 2009b. Optimization of *Spirulina* added Korean rice cake (*Garaeduk*) using response surface methodology. J. East Asian Soc. Diet. Life, 19(1):38-44
- Kim SC, Kim HS, Cho YU, Ryu JS, Cho SJ. 2015b. Development of strain-specific SCAR marker for selection of *Pleurotus eryngii* strains with higher β -glucan. J. Mushrooms, 13(1):79-83
- Kim SS, Park MK, Oh NS, Kim DC, Han MS, In MJ. 2003. Studies on quality characteristics and shelf-life of *Chlorella* soybean curd (*Tofu*). J. Korean Soc. Agric. Chem. Biotechnol., 46(1):12-15
- Kim YH, Hwang YK, Kim YY, Ko SM, Hwang JM, Lee YW. 2002. Effect of *Chlorella* growth factor on the proliferation of human skin keratinocyte. J. Biomed. Lab. Sci., 8(4):229-234
- Kim ZH, Park H, Lee CG. 2016c. Seasonal assessment of biomass and fatty acid productivity by *Tetraselmis sp.* in the ocean using semi-permeable membrane photobioreactors. J. Microbiol. Biotechnol., 26(6):1098-1102
- Kose A, Ozen MO, Elibol M, Oncel SS. 2017. Investigation of *in vitro* digestibility of dietary microalga *Chlorella vulgaris* and cyanobacterium *Spirulina platensis* as a nutritional supplement. 3 Biotech., 7(3):170
- Koyande AK, Chew KW, Rambabu K, Tao Y, Chu D., Show P. 2019. Microalgae: A potential alternative to health supplementation for humans. Food Sci. Hum. Well., 8(1):16-24
- Kumoro AC, Johnny D, Alflovita D. 2016. Incorporation of microalgae and seaweed in instant wheat noodles manufacturing: nutrition and culinary properties study. Int. Food Res. J., 23(2):715-722
- Kwak HS, Kim JYH, Woo HM, Jin ES, Min BK, Sim SJ. 2016. Synergistic effect of multiple stress conditions for improving microalgal lipid production. Algal Res., 19:215-224
- Lee YJ, Son CW, Kim HJ, Lee JH, Kim MR. 2009. Quality characteristics of raw and cooked *Spirulina* added noodles during storage. Korean J. Food Preserv., 16(1):23-32
- Lee YJ, Yeon BR, Kim MH, Kim MR. 2008. Quality characteristics and antioxidant activity of raw and cooked noodles amended with *Spirulina*. J. East Asian Soc. Diet. Life, 18(6): 1081-1088
- Lers A, Levy H, Zamir A. 1991. Co-regulation of a gene homologous to early light-induced genes in higher plants and beta-carotene biosynthesis in the alga *Dunaliella bardawil*. J. Biol. Chem., 266(21):13698-13705
- Liu CP, Lin LP. 2001. Ultrastructural study and lipid formation of *Isochrysis sp.* CCMP1324. Bot. Bull. Acad. Sin., 42:207-214
- Liu X., Osawa T. 2007. *Cis* astaxanthin and especially 9-*cis* astaxanthin exhibits a higher antioxidant activity *in vitro* compared to the all-*trans* isomer. Biochem. Biophys. Res. Commun., 357(1):187-193
- Madeira MS, Cardoso C, Lopes PA, Coelho D, Afonso C, Bandarra NM, Prates JAM. 2017. Microalgae as feed ingredients for livestock production and meat quality: a review. Livest. Sci., 205:111-121
- Mahajan G, Kamat M. 1995. γ -Linolenic acid production from *Spirulina platensis*. Appl. Microbiol. Biotechnol., 43(3):466-469

- Miroslav G, Zorica S. 2008. Microalgae and cyanobacteria: food for thought. *J. Phycol.*, 44(2):260-268
- Muller-Feuga A. 2000. The role of microalgae in aquaculture: situation and trends. *J. Appl. Phycol.*, 12:527-534
- Naas KE, Naess T, Harboe T. 1992. Enhanced first feeding of halibut larvae (*Hippoglossus hippoglossus* L) in green water. *Aquac.*, 105(2):143-156
- Niccolai A, Zittelli GC, Rodolfi L, Biondi N, Tredici MR. 2019. Microalgae of interest as food source: Biochemical composition and digestibility. *Algal Res.*, 42:101617
- Oh HL, Yang KH, Park SY, Yoon JH, Shim EK, Lee KJ, Kim MR. 2012. Quality characteristics and antioxidative activities of acorn starch *Mook* added *Spirulina* and soy protein. *J. Korean Soc. Food Sci. Nutr.*, 41(11):1515-1520
- Ötles S, Pire R. 2001. Fatty acid composition of *Chlorella* and *Spirulina* microalgae species. *J. AOAC Int.*, 84(6):1708-1714
- Park MK, Lee JM, Park CH, In MJ. 2002. Quality characteristics of *Sulgidduk* containing *Chlorella* powder. *J. Korean Soc. Food Sci. Nutr.*, 31(2): 225-229
- Park SI. 2003. Effect of *Chlorella* growth factor on quality of bread. *J. Korean Soc. Food Cult.*, 18(4):356-364
- Park SI, Cho EJ. 2004. Quality characteristics of noodle added with *Chlorella* extract. *Korean J. Food & Nutr.*, 17(2):120-127
- Park YJ, Chun HS, Kim SS, Lee JM, Kim KH. 2000. Effect of nitrogen gas packing and γ -oryzanol treatment on the shelf of *Yukwa* (Korean traditional snack). *Korean J. Food Sci. Technol.*, 32(2):317-322
- Pérez-López P, González-García S, Jeřyáns C, Agathos SN, McHugh E, Walsh D, Murray P, Moane S, Feijoo G, Moreira MT. 2014. Life-cycle assessment of the production of the red antioxidant carotenoid astaxanthin by microalgae: from lab to pilot scale. *J. Clea. Prod.*, 64:332-344
- Pham HM, Kwak HS, Hong ME, Lee JW, Chang WS, Sim SJ. 2017. Development of an X-shape airlift photobioreactor for increasing algal biomass and biodiesel production. *Biore-sour. Technol.*, 239:211-218
- Pulz O, Gross W. 2004. Valuable products from biotechnology of microalgae. *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 65(6):635-648
- Ranga RA, Harshvardhan RA, Aradhya SM. 2010. Antibacterial properties of *Spirulina platensis*, *Haematococcus pluvialis*, *Botryococcus braunii* microalgal extracts. *Curr. Trends Biotechnol. Pharm.*, 4(3):809-819
- Ryu BM, Jeon YJ. 2018. Development of functional food products with natural materials derived from marine resources. *Food Sci. Ind.*, 51(2):157-164
- Sahin-Cebeci OI. 2020. Functional and sensorial properties of cookies enriched with *Spirulina* and *Dunaliella* biomass. *J. Food Sci. Technol.*, 57(10):3639-3656
- Shibata S, Natori Y, Nishihara T, Tomisaka K, Matsumoto K, Sansawa H, Nguyen VC. 2003. Antioxidant and anti-cataract effects of *Chlorella* on rats with streptozotocin-induced diabetes. *J. Nutr. Sci. Vitaminol.*, 49(5):334-339
- Shim EK, Kim HJ, Kim HR, Kim MR. 2010. Quality characteristics of *Riceyeotgangjung* with added *Spirulina* powder. *J. East Asian Soc. Diet. Life.*, 20(6):888-895
- Shimamatsu H. 2004. Mass production of *Spirulina*, an edible microalga. *Hydrobiologia.*, 512:39-44
- Son CW, Kim HJ, Lee YJ, Kim MR. 2008. Quality characteristics and antioxidant activity of *Black Sesame Dasik* added *Spirulina*. *J. Korean Soc. Diet. Cult.*, 23(6):755-760
- Spolaore P, Joannis-Cassan, C, Duran E, Isambert A. 2006. Commercial applications of Microalgae. *J. Biosci. Bioeng.*, 101(2):87-96
- Sung YM, Cho JR, Oh NS, Kim DC, In MJ. 2005. Preparation and quality characteristics of curd *Yogurt* added with *Chlorella*. *J. Korean Soc. Appl. Biol. Chem.*, 48(1):60-64
- Tang G. 2010. Bioconversion of dietary provitamin A carotenoids to vitamin A in humans. *Am. J. Clin. Nutr.*, 91(5):1468S-1473S
- Torres-Tiji Y, Fields FJ, Mayfield SP. 2020. Microalgae as a future food source. *Biotechnol. Adv.*, 41:107536
- Turner NJ. 2003. The ethnobotany of edible seaweed (*Porphyra abbottae* and related species; Rhodophyta: *Bangiales*) and its use by first nations on the Pacific coast of Canada. *Can. J. Bot.*, 81(4):283-293
- Vaz BS, Moreira JB, de Moraes MG, Costa JAV. 2016. Microalgae as a new source of bioactive compounds in food supplements. *Curr. Opin. Food Sci.*, 7(1):73-77
- Wang SB, Hu Q, Sommerfeld M, Chen F. 2004. Cell wall proteomics of the green alga *Haematococcus pluvialis* (Chlorophyceae). *Proteomics*, 4(3):692-708
- Weiss M, Bental M, Pick U. 1991. Hydrolysis of polyphosphates and permeability change in response to osmotic shocks in cells of the halotolerant alga *Dunaliella*. *Plant Physiol.*, 97(3):1241-1248
- Wells ML, Potin P, Craigie JS, Raven JA, Merchant SS, Helliwell KE, Smith AG, Camire ME, Brawley SH. 2016. Algae as nutritional and functional food sources: revisiting our understanding. *J. Appl. Phycol.*, 29(2):949-982
- Wroble M, Mash C, Williams L, McCall RB. 2002. Should long chain polyunsaturated fatty acids be added to infant formula to promote development?. *J. Appl. Dev. Psychol.*, 23(1):99-112
- Yamaguchi K. 1997. Recent advances in microalgal bioscience in Japan, with special reference to utilization of biomass and metabolites: a review. *J. Appl. Phycol.*, 8:487-502
- Yang SJ, Hur SB. 2012. Selection of *Isochrysis* and *Pavlova* species for mass culture in high temperature season. *J. Korean Fish. Aquat. Sci.*, 45(4):343-350
- Yang Y, Kim B, Lee JY. 2013. Astaxanthin structure, metabolism, and health benefits. *J. Hum. Nutr. Food Sci.* 1:1003
- Yoo KM, Kim SH, Chang JH, Hwang IK. 2005. Quality characteristics of *Sulgidduk* containing different levels of dandelion (*Taraxacum officinale*) leaves and roots powder. *Korean J. Food Cookery Sci.*, 21(1):110-116