

## 해양생명공학 분야 내 해조류 발효 연구동향

최은경<sup>1</sup>, 최소윤<sup>1</sup>, Lingxiu Wang<sup>2</sup>, Xiaoyong Liu<sup>2</sup>, 김정하<sup>3</sup>, 최익영<sup>4\*</sup>, 박현<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>고려대학교 생명공학과

<sup>2</sup>Shandong Haizhibao Ocean Science and Technology Co., Ltd.

<sup>3</sup>성균관대학교 생명과학과

<sup>4</sup>강원대학교 스마트팜농산업학과

## Algae Fermentation Research Trend in Marine Biotechnology

Eunkyung Choi<sup>1</sup>, Soyun Choi<sup>1</sup>, Lingxiu Wang<sup>2</sup>, Xiaoyong Liu<sup>2</sup>, Jeong Ha Kim<sup>3</sup>, Ik-Young Choi<sup>4\*</sup>, Hyun Park<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Division of Biotechnology, College of Life Sciences and Biotechnology, Korea University, Seoul 02841, Korea

<sup>2</sup>Shandong Haizhibao Ocean Science and Technology Co., Ltd., Rongcheng 264300, China

<sup>3</sup>Department of Biological Sciences, Sungkyunkwan University, Suwon 16419, Korea

<sup>4</sup>Department of Smart farm and Agricultural Industry, College of Agriculture and Life Sciences, Kangwon National University, 24341, Korea

### Corresponding Author

Ik-Young Choi

E-mail : choii@kangwon.ac.kr

Hyun Park

E-mail : hpark@korea.ac.kr

해조류에는 항산화, 항염증에 효과적인 다양한 생리 활성 화합물이 풍부하게 함유되어 있으며, 장에 유익한 섬유질이 다량 포함되어 있다. 이러한 특징들로 인하여 해조류는 기능성 식품 제조뿐만 아니라, 약리학, 의학적 응용 분야 등 다양한 산업 분야에서 중요한 자원으로 인식되고 있으며, 특히 해조류 발효 기술은 이러한 산업들에 다양한 방법으로 활용될 수 있다. 해조류는 새로운 생리 활성 화합물의 중요한 공급원으로 인정받고 있지만, 육상 식물 바이오매스에 비해 발전이 부족한 상태이다. 해조류를 산업적으로 사용하기 위해 이용되는 해조류 화합물 추출 기술에는 세포벽 처리의 어려움으로 인해 수율이 낮거나 비용 효율성이 떨어지는 등의 문제가 있으나, 최근에는 유산균과 효모종의 미생물을 이용하여 새로운 해조류 발효 제품을 만들어내는 기술이 발전하고 있다. 이러한 해조류 발효 제품은 기능성 식품 및 건강기능식품 시장에서 중요한 역할을 할 수 있으며, 소비자들에게 더 매력적인 제품을 제공할 수 있다. 해조류 발효는 해양 자원의 부가가치를 높이는 중요한 방법 중 하나로, 이를 통해 폴리페놀 함량, 항산화 활성, 생리활성 화합물의 생체 이용률을 증가시키고, 해조류의 감칠맛을 개선하여 소비자들의 만족도를 높일 수 있다. 또한, 해조류 발효는 대량의 양식 바이오매스를 보존할 수 있는 지속 가능한 가공 방법이며, 독성 화학 물질을 생략하여 자연스러운 추출 방법을 제공할 수 있다. 해조류 발효 기술은 아직 많은 연구가 필요하지만, 해조류 산업의 확대와 함께 미래에 매우 중요한 역할을 할 것으로 전망된다.

**키워드:** 해조류, 발효, 유산균

**Received** 2024. 11. 08.

**Revised** 2024. 11. 29.

**Accepted** 2024. 11. 30.

Marine algae are rich in a variety of bioactive compounds with antioxidant and anti-inflammatory properties and contain large amounts of dietary fiber, which has a positive effect on the gut. These properties make algae an important resource for a variety of industries, including functional food production and pharmacological and medical applications, and algae fermentation

technology in particular can be used in a variety of ways in these industries. Although algae are recognized as an important source of novel bioactive compounds, they are underdeveloped compared to terrestrial plant biomass. Current technologies for extracting compounds from algae for industrial use suffer from low yields and poor cost efficiency due to difficulties in handling the cell walls, but recent progress has been made in the production of novel algal fermentation products using microorganisms from lactic acid bacteria and yeast species. These algae-fermented products can play an important role in the functional food and nutraceutical markets, making them more attractive to consumers. Algae fermentation is one of the most important ways to increase the added value of marine resources. It can increase the polyphenol content, antioxidant activity and bioavailability of bioactive compounds and improve the umami flavor of algae to increase consumer satisfaction. In addition, algae fermentation is a sustainable processing method that can preserve large amounts of aquaculture biomass and is a natural extraction method due to the absence of toxic chemicals. Although algae fermentation technology still requires a lot of research, it is expected to play an important role in the future as the algae industry expands.

**Keywords:** Algae, Fermentation, Lactobacillus

## 서론

발효는 인류의 진화과정에서 매우 중요한 역할을 해왔다. 발효기술은 상하기 쉬운 식품을 보존하는 최초의 수단이고, 소화율을 높이는 약의 원천 중 하나이며, 생체 이용률을 높이는 중요한 촉진제이자, 음식의 맛을 더 좋게 만드는 중요한 기술이 되었다(McGovern et al., 2017). 발효식품의 예로는 치즈, 요구르트, 빵 반죽, 김치, 된장, 간장, 피쉬소스, 포도주, 맥주, 콤포차 등이 있으며, 이는 전 세계 모든 문화권에서 요리 유산의 일부로 자리잡고 있다. 발효식품은 동서양을 막론하고 전 세계에서 다양한 발효 기술과 제품들이 독자적으로 개발되었다. 발효는 식량의 보존도를 향상시키기 위해 주로 사용이 되었기에, 역사적으로 발효를 이용하지 않고 부족 국가 수준을 넘어서는 문명은 없었으며, 현대에 이르러 발효기술은 의약품 제조를 비롯한 다양한 분야로 확대되었다(McGovern et al., 2004, Hussain et al., 2016, McGovern et al., 2017). 대표적인 예로 *Pseudomonas denitrificans*의 호기성 대사를 통해 비타민 B12를 생산하여 악성 빈혈을 저렴하고 효과적으로 치료할 수 있게 되는 등 발효기술은 새로운 화합물을 합성하고, 이미 존재하는 치료제를 개선하는데 핵심적인 기술이 되었다 Uchida & Miyoshi, 2013). 의약품 제조뿐만 아니라 발효를 이용하여 만들어진 식품을 섭취하는 것은 전통적인 건강 증진 방법이며, 장수를 누리게 하는

방법 중 하나인 것으로 여겨져 왔다. 규칙적인 발효식품 섭취는 면역체계에 도움을 줄 뿐만 아니라, 위장건강, 당뇨병, 고혈압, 심혈관 질환 같은 질병의 진행을 늦추거나 완화시키는데 도움을 주는 것으로 알려져 있다(Heeba et al., 2021; Petrova et al., 2021; Dimidi et al., 2019; Sanders, 2008; Olivares et al., 2006). 이러한 여러가지 이유로 오늘날 발효는 미생물 작용을 통해 유익한 화합물을 생산하고 영양소의 생체 접근성을 개선하는 기술로서 인정받고 있다.

최근 많은 연구자들이 해조류가 건강에 어떠한 영향을 주는지에 대하여 집중적으로 연구하고 있다. 해조류에는 폴리페놀, 플라보노이드, 알칼로이드, 탄닌, 불포화 지방산 등 여러가지 다양한 생리 활성 화합물이 풍부하게 함유되어 있으며, 항산화 및 항염증에 효과적인 것으로 알려져 있다(Pal et al., 2014; Panzella and Napolitano, 2017). 이러한 해조류의 생리활성 성분은 우리의 건강을 개선하는데 도움을 줄 뿐만 아니라, 지속 가능한 식량 공급원으로서 환경 친화적인 라이프 스타일을 유지하는데도 도움이 될 수 있다. 해조류에는 비타민, 섬유질 및 단백질이 포함되어 있어 영양가가 높을 뿐만 아니라, 해조류의 다당류는 장에 유익하지만 섬유질과 달리 칼로리가 없는 특징을 가지고 있다(Ale and Meyer, 2013; Pereira, 2018). 이러한 특성으로 인해, 해조류는 기능성 식품 제조에 이용될 뿐만 아니라 약리학 및 의학적 응용 분야에도 사용되고 있다. 대표적인 물질로

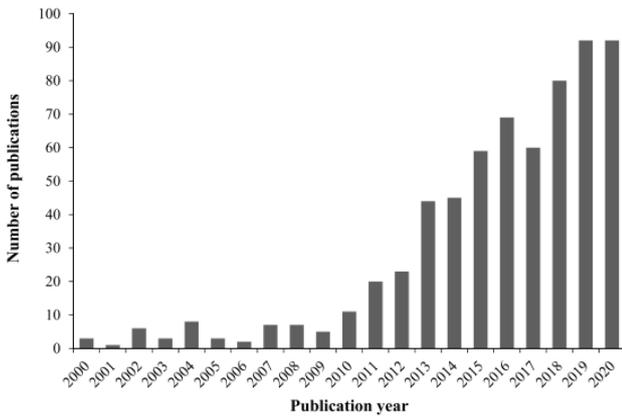


Fig. 1. Number of publications on algae fermentation (Reboleira et al., 2021).

는 홍조류에서 추출한 한천(agar)과 카라기난(carrageenan), 갈조류에서 추출한 알긴산(alginate)이 있으며, 특히, 한천은 사탕, 냉동식품, 과일주스 등과 같은 식품에도 이용되지만, 생물학적 배양 배지에도 이용되고 있다(Pereira, 2018; Torres et al., 2019; Plaza et al., 2009; Pal et al., 2014). 건강기능성 식품으로서 잠재력을 가지고 있는 녹조류(Chlorophyta)는 항산화, 항돌연변이, 항응고, 항균 및 항암 작용을 나타내는 다양한 생리활성 물질을 함유하고 있으며, 갈조류에 있는 후코이단(fucoidans)은 합성 항산화제보다 강한 항산화 활성이 있다고 보고되었다(Cho et al., 2011; Choi et al., 2007) 그리고, 이러한 가능성을 더욱 발전시키기 위하여 해조류 발효의 가능성에 대한 관심이 증가하고 있으며, 이 주제에 대한 논문의 수도 꾸준히 증가하고 있다(Fig. 1).

발효는 미생물이 에너지를 얻기 위해 유기화합물을 분해하여 유기산류, 알코올류, 이산화탄소 등을 생성하는 과정이다. 주변에서 볼 수 있는 발효는 효모가 포도당을 분해해서 알코올을 생성(예: 맥주, 포도주)하는 알코올 발효와 유산균이 포도당을 분해해 젖산을 생성해서 음식의 풍미를 변화(예: 김치, 치즈, 요구르트)시키는 젖산 발효가 있다(Johnson et al., 2016; Katz et al., 2012; Terefe et al., 2016). 해조류 발효에는 추출 방법을 개선하여 생리활성 화합물의 추출 수율을 높이는 방법, 미생물 대사를 이용해 화합물의 생리활성을 향상시키는 방법, 유용한 미생물의 이차 대사산물을 생산하는 방법 등이 이용되고 있으며, 현재까지 주로 유산균 발효가 가장 일반적으로 이용되고 있는 방법으로 알려져 있다(Chye et al., 2018; Reboleira et al., 2021).

해조류를 이용한 상업적으로 유용한 발효의 첫번째 단계는 해조류 다당류의 가수분해가 발생하여 당이 풍부하게 생성되는데, 이 때 가장 풍부한 다당류는 해조류의 종류에 따라 다르다. 갈조류에는 라미나린, 일지네이트, 후코이단, 홍조류에는 한천,

카라기난, 녹조류에는 전분과 올반이 존재한다. 이러한 당분은 가수분해된 다당류와 함께 해당 작용을 통해 피루베이트로 전환된 다음 알코올 발효를 통해 에탄올과 CO<sub>2</sub>로 전환되거나, 젖산 발효를 통해 젖산으로 전환된다(Chades et al., 2018; Tajima et al., 2018; Marquez et al., 2015). 이러한 화합물을 이용한 식품 개발은 아직 초기단계이지만, 동물사료 분야에서는 이미 해조류 사일리지가 해양 및 육상 가축에 적합한 사료로서 고려되고 있으며, 덴마크 회사 Fermentation Experts에서는 이미 돼지 및 가금류용 사료로 상용화 되고 있는 등 식품 분야보다 더욱 발전된 기술을 사용하고 있다고 알려져 있다(Strauss, 2023).

본 논문에서는 다양한 기능성 식품을 비롯하여 약리 및 의학 분야에서도 주목받기 시작하는 해조류 발효에 대한 전반적인 연구 동향에 대해 살펴보고자 한다.

## 발효 기질로서의 해조류

해류, 온도, 광도 변화 같은 급격한 환경 변화는 해조류 성분 구성에 많은 영향을 미치며, 갈조류의 경우 다당류, 아미노산, 회분 함량 등에 상당한 차이를 보이는 것으로 보고되었다(Jung et al., 2013). 또한, 발효 억제 효과를 줄 수 있는 해조류의 생리활성 화합물 중 하나인 페놀 화합물은 환경 변화에 따라 달라진다고 보고되었다(Michalak, 2018). 이러한 해조류의 생리활성 화합물은 젖산 생산에 특화된 유산균의 기질로 활용될 수 있으며(Bulzomi et al., 2012; Shobharani et al., 2013), 홍조류 폐기물에서 비료를 생산하기 위해 유산균(Lactic Acid Bacteria)와 효모 균주가 사용되거나, 양식산업에서 대체 사료 개발을 위해 *Undaria pinnatifida* (Phaeophyceae)의 발효를 이용하고 있다는 보고가 있다(Martelli et al., 2020). 따라서, 해조류가 발효의 기질로서 활용될 수 있다는 것을 해조류 종류별, 해조류 성분별로 살펴보고자 한다.

## 1. 해조류 종류별 발효 기질로서의 잠재력

### 1.1. 녹조류(Green Seaweeds)

발효 기질로서 해조류의 잠재력을 평가하기 위해 다양한 연구가 진행되었다. 그 중 하나의 연구결과를 살펴보면, *Ulva sp.* (갈파래, Chlorophyta) 엽상체를 cellulase와 함께 17개월 동안 배양한 결과 발효 산물이 발견되었으며, 발효된 *Ulva*의 균주를 조사했을 때 여러가지 유산균 및 효모 균주가 있는 것을 확인하였다. 추후에 소량의 cellulase (1% w/v)를 첨가하면 해조류의 다당류 분해에 도움이 되며, 5%까지 소금을 첨가하는 것도 발효에

도움이 된다는 연구 결과가 있다(Uchida and Miyoshi, 2013).

### 1.2. 홍조류(Red Seaweeds)

가장 많이 재배되는 홍조류 중 하나는 *Kappaphycus alvarezzi* (엘크혼 바다이끼)이다(Cai et al., 2021). 연구에 따르면, *K. alvarezzi* 는 장내미생물 생장에 도움을 주는 물질로 잘 알려진 prebiotic 성분인 inulin (fermentable fiber)과 유사하게 작용하여 bifidobacterium의 생장을 증가시키고, 전반적인 short chain fatty acids 생산을 증가시키는 등 bifidobacteria의 생장에 도움을 주는 물질인 bifidogenic factor로서 잠재력이 있는 것으로 보고되었다(Bajury et al., 2017). 그리고, 식용 홍조류 중 하나인 *Palmaria palmata* (털스)는 단백질 함량이 높은 것으로 잘 알려져 있음에도 불구하고, cellulose 성분의 일종인 자일란(xylan)이 풍부하여 단단한 세포벽을 이루기 때문에 단백질의 소화율이 좋지 않은 것으로 보고되었다(Fleurence, 1999; Hesseltine and Wang, 1967; Lordan et al., 2011) 이러한 문제를 해결해 보고자, *Trichoderma pseudokoningii* 균주를 이용하여 털스를 발효시켰을 때, 6시간 후 65.5%의 casein 소화율을 보였다. 따라서, 발효는 홍조류의 단백질 가용성을 높이는 효율적인 방법이 될 수 있는 것으로 생각된다(Marrion et al., 2003).

### 1.3. 갈조류(Brown Seaweeds)

연구자들은 6월에 채취한 신선한 다시마를 유산균 중 하나인 *Lactobacillus plantarum*으로 발효한 결과, 짠맛과 바다 특유의 향, 다시마 특유의 미끈거림은 줄이고, 부드러움은 증가시킨 제품을 얻을 수 있었으며, 발효 과정을 통하여 해조류 단백질 함량에는 영향을 미치지 않았지만, 두 가지 독성 금속(Cd 및 Hg)의 수준과 나트륨 함량을 낮추어 제품의 미네랄 성분을 개선하는 효과를 보이기도 했다(Bulzomi et al., 2012). 또 다른 연구진은 *Monascus sp.*으로 발효시킨 해조류 추출물이 발효를 시키지 않은 대조군보다 페놀, 플라보노이드, 항당뇨 및 항산화 효과가 더 높다고 보고했으며, 또한, 발효 추출물은 DNA를 보호하고, 장 상피세포인 CACO-2에 유해한 영향을 미치지 않았으며, 산화 스트레스, 고혈당증, 고지혈증 환자를 치료하는 데 활용할 수 있다고 보고하였다(Ścieszka and Klewicka, 2019).

## 2. 해조류 성분별 발효 기질로서의 잠재력

### 2.1. 다당류(Polysaccharides)

천연식품으로서, 그리고 발효 기질로서 해조류가 가지고 있는 가장 큰 특징은 해조류마다 독특한 다당류(예: Carrageenan, Xylan, Fucoidan, Laminarin, Cellulose, Starch, Ulvan 등)

를 가지고 있다는 것이다. 여러 해조류에서 발효를 통해 얻어진 물질들은 식품 및 제약 산업에서 점성을 증가시키는 증점제와 hydrocolloids로 많이 사용되고 있으며, 다당류 종류에 따라 알코올과 바이오가스 생산에 이용되기도 한다(Holdt & Kraan, 2011) (Table 1).

### 2.2. 펩타이드(Peptides)

단백질은 해조류에 존재하는 영양소 중 계절적 변동성이 가장 큰 영양소이며, 겨울철에 더 높은 비율을 보인다. 대부분의 해조류 단백질은 필수 아미노산을 함유하고 있기 때문에 식품 산업에서 오랫동안 관심을 가지고 있다. 갈조류는 leucine, valine, threonine, alanine, glycine, lysine을 다량 함유하고 있으며, histidine, cysteine, methionine, tyrosine, tryptophan도 소량 함유하고 있기 때문에 매우 훌륭한 단백질 공급원이다(Holdt & Kraan, 2011). 또한, glutamic acids와 aspartic acids가 갈조류에 고농도로 존재한다. 홍조류에도 거의 모든 필수 아미노산이 함유되어 있으며, 이러한 아미노산의 대부분은 갈조류와 홍조류에서 free form으로 발견되고 감칠맛을 내는 주요 원인으로 여겨지고 있다(Munda, 1977; Mæhre et al., 2014; Mouritsen et al., 2019). 감칠맛을 내는 화합물은 식품 산업에서 매우 중요한 요소이며, 미생물 또는 효소 분해를 통한 단백질 가수분해물은 풍미 강화제로서 사용이 되고 있다(Nasri, 2017). 따라서, 해조류 발효를 통해 단백질 가수분해 과정과 그 산물로서 생리활성 및 풍미 증진 펩타이드가 풍부하게 생산되는 것에 대한 연구가 활발히 이루어져야 할 것이다.

### 2.3. 페놀(Phenols)

페놀은 식물과 해조류에서 발견되는 유기화합물의 일종으로, 식물이 성장하면서 자연적으로 발생하거나 혹은 환경 스트레스에 반응하여 생기는 이차 대사산물이다(Naczka & Shahidi, 2006; Philippus et al., 2018). 생리학적으로 페놀계 유기화합물은 항산화, 항균, 항당뇨, 항염증, 항암 등 다양한 생리활성을 가지고 있는 것으로 연구되고 있다(Bulzomi et al., 2012; Plouguerné et al., 2006). 이 화합물이 가지고 있는 항균활성 때문에 식물 혹은 해조류가 발효에 적합하지 않은 것으로 생각될 수 있으나, 다양한 전처리 과정과 적절한 발효 배양을 이용하여 새로운 천연 생리활성 화합물의 공급원인 해조류를 활용할 수 있다는 연구들이 진행되고 있다(Chye et al., 2018; Maneein et al., 2018).

**Table 1.** List of publications related to the fermentation of brown, red, and green algae (data up to April 2021). Studies using genetically modified strains are marked with “Eng.”

Seaweed type	Fermenting cultures	Sugar	Polysaccharide	Target compound/modification	Reference
Rhodophyta	Spontaneous fermentation	D-galactose	Agar	Hydrogen	Jung & Shin (2011)
	Spontaneous fermentation	D-galactose	Carrageenan	Hydrogen	Jung et al. (2011)
	<i>Saccharomyces cerevisiae</i>			Ethanol	Meinita et al. (2012)
	Eng. <i>S. cerevisiae</i>	Xylose	Xylan	Xylan breakdown; ethanol	Katahira et al. (2004)
	Lactic acid bacteria	D-galactose		Lactic acid, acetic acid	Hwang et al. (2011)
	Eng. <i>Corynebacterium glutamicum</i>	D-glucuronic acid		L-lysine, L-ornithine and lycopene	Hadiati et al. (2014)
Phaeophyceae	Spontaneous fermentation		Alginate	Hydrogen	Jung et al. (2011)
	Eng. <i>Sphingomonas sp. A1</i>			Ethanol	Takeda et al. (2011)
	Endophyte fungal isolates			MW reduction	Hifney et al. (2018)
	<i>Clostridium beijerinckii</i>	Glucose, D-mannitol, mannuronic acid, guluronic acid		Butanol, acetone, ethanol, butyrate	Hou et al. (2017)
	<i>Aspergillus</i> , <i>Penicillium</i> , and <i>Mucor</i> fungal strains		Fucoidan	Fucan-degrading enzymes	Rodríguez-Jasso et al. (2010)
	Endophyte fungal isolates			MW reduction	Hifney et al. (2018)
	Spontaneous fermentation		Laminarin	Hydrogen	Jung et al. (2011)
	<i>Pichia angophorae</i>	D-mannitol		Ethanol	Horn et al. (2000)
	<i>Escherichia coli</i>	L-fucose		Induction of propanediol oxidoreductase expression	Boronat and Aguilar (1981)
	Lactic acid bacteria	D-mannitol, D-glucuronic acid, L-fucose		Lactic acid, acetic acid	Hwang et al. (2011)
<i>Thermoanaerobacter pseudoethanolicus</i>	D-mannitol		Ethanol	Chades et al. (2018)	
Chlorophyta	<i>S. cerevisiae</i>	Glucose	Celulose	Ethanol	Yanagisawa et al. (2011)
	<i>S. cerevisiae</i>		Starch	Ethanol	Yanagisawa et al. (2011)
	Eng. <i>S. cerevisiae</i>	Xylose		Ethanol	Parachin et al. (2011)
	<i>E. coli</i>	L-rhamnose	Ulvan	Induction of propanediol oxidoreductase expression	Boronat and Aguilar (1981)
	Lactic acid bacteria			Lactic acid, acetic acid	Hwang et al. (2011)
	<i>C. beijerinckii</i>			Acetic acid, butyric acid, isopropanol, butanol, ethanol, 1,2-propanediol	Diallo et al. (2018)

## 해조류 발효에 이용되는 미생물

### 1. 박테리아를 이용한 해조류 발효

발효는 포도당, 다당류, 설탕과 같은 탄소 분자가 젖산, 아세트산 및 기타 유기산과 같은 적은 분자량을 가지는 물질로 전환되는 과정이며, 이러한 분자 산화/환원 과정은 특정 미생물에 의해 진행된다. 발효 관련하여 상업적으로 알려진 미생물에는 *Lactobacillus*, *Streptococcus*, *Leuconostoc*, *Lactococcus*, *Pediococcus* 속을 포함하는 그람 양성 박테리아 그룹이다 (Yadav et al., 2011; Rezac et al., 2018). 이 중에서 가장 많이 연구된 발효 균주는 유산균(*Lactobacillus*, LAB)이다. 유산균은 혐기성 발효를 하는 미생물이며, 주요 최종 산물은 젖산이다(Fig. 2).

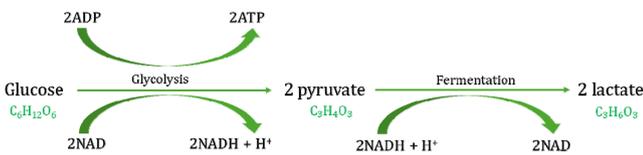


Fig. 2. Lactic acid fermentation schematics.

유산균 발효를 통해 생성된 산성 환경 및 저산소 환경은 유해 박테리아 및 곰팡이의 성장을 방지하기 때문에 식품 방부제로 활용되고 있다. 그리고, 다양한 유기산, 플라보노이드, 유리 아미노산들로 인해 독특한 질감과 풍미가 생기는데, 이를 이용하여, 초콜릿과 과자를 만드는데 이용되기도 한다(Krishna et al., 2018; Wee et al., 2006; Pederson and Albury, 1969; Pérez-Díaz et al., 2017; Gupta and Abu-Ghannam, 2012). 또한, 발효식품을 섭취하면 심혈관 질환과 제2형 당뇨병의 발병을 줄일 수 있고, 염증성 장 질환 증상을 완화할 있다는 연구도 보고되었다(Chen et al., 2014; Eussen et al., 2016; Soedamah-Muthu et al., 2013; Tapsell et al., 2015; Lorea Baroja et al., 2007).

해조류의 유산균 발효능은 종마다 다르며, 주로 해조류가 가지고 있는 다당류의 구성에 따라 달라진다. 하지만, 발효 전에 해조류에 열이나 당화 효소 등 적절한 전처리를 하면 발효를 더 쉽게 유도할 수 있다는 연구 결과들이 있으며(Gupta et al., 2011, 2012), 최근 Yue 등은 *Saccharina japonica*를 2단계 발효를 통해 생리활성이 강화된 기능성 식품을 개발할 수 있다는 가능성을 시사하였다(Yue et al., 2022).

### 2. 곰팡이를 이용한 해조류 발효

수천 년 동안 아시아 지역에서 식품을 보존하고 가공하기 위해 발효 기법이 이용되어 왔으며, 된장, 간장, 미림, 청주 등을 발효하는 데 이용되는 균주 중 하나는 사상성 곰팡이인 *Aspergillus flavus var. oryzae*이다(Shih and Umansky, 2020; Machida et al., 2008). 쌀, 보리 알갱이 등 전분이 많은 기질에서 고품재배 방법으로 *A. flavus var. oryzae* 균을 키워 발효된 결과물을 누룩이라고 한다. 누룩은 단맛과 감칠맛을 포함하여 다양한 향미 화합물을 포함하고 있는데, 이는 아밀라아제, 셀룰라아제, 프로테아제, 리파아제 등 다양한 가수분해 효소를 생산하기 때문이다. 이러한 점 때문에, *A. flavus var. oryzae*는 식품 산업에서 사용되는 주요 곰팡이 종 중 하나에 포함된다(Gomi, 2014). 최근에는 육류, 치즈, 피클 같은 채소 절임 등에도 유용하게 이용되고 있다(Johnson, 2016; Redzepe and Zilber, 2018). 또한, 다양한 가수분해 효소를 가지고 있기 때문에, 해조류의 복잡한 세포벽 구조를 분해하는데 효율적일 수 있으며, 갈조류 *S. japonica* 추출물을 *A. flavus var. oryzae*와 발효시킨 연구에서는 총 페놀 화합물, 플라보이드, GABA ( $\gamma$ -aminobutyric acid) 같은 생리활성 물질과 항산화 활성이 증가한다고 보고되었다(Bae and Kim, 2010; Rafiquzzaman, Kim, et al., 2015; Rafiquzzaman, Kong, et al., 2015). 또한, 홍조류 *Kappaphycus*를 이용한 연구 결과에서도 총 아미노산이 증가되었다고 보고되었다(Norakma et al., 2021).

### 3. 박테리아와 효모의 공배양(symbiotic culture)을 이용한 해조류 발효

박테리아와 효모를 함께 발효시킨 예로 콤부차를 들 수 있다. 콤부차는 차(茶)를 기본으로 약간의 탄산이 들어간 발효 음료이며, 항산화 및 프로바이오틱스 특성을 가지는 것으로 알려져 있다(Martínez Leal et al., 2018; V i na et al., 2013). 최근 건강 증진 제품에 대한 관심의 증가로 콤부차 음료 시장이 매년 성장할 것으로 예상되고 있다(Alterman, 2021). 전통적인 발효 과정에서는 콤부차를 달게 달인 차에 활성 콤부차를 다시 넣고 살아있는 SCOBY (Symbiotic culture of bacteria and yeast)를 첨가한다.

전통적인 콤부차와 해조류 콤부차의 총 페놀 함량을 비교한 결과, 해조류 콤부차에서 대조군에 비해 훨씬 높은 페놀 함량 수치를 나타냈다. 이는 페놀이 풍부한 갈조류를 이용하여, 해조류에 포함된 생리 활성 화합물이 풍부한 프로바이오틱 음료를 생산할 수 있음을 시사하고 있다. 또한, 두 번째 발효 단계에서 꽃, 생강, 과일 등 다양한 향을 첨가할 수 있으며, 발효 후 최종산

물인 해초 고형물은 다른 식품이나 사료에 추가로 사용될 수 있다(Jayabalan et al., 2014; Villarreal-Soto et al., 2018).

## 해조류 발효의 활용

### 1. 건강기능성 식품 및 사료

건강 기능성 식품에 있어서 균형 잡힌 영양성분과 소화가 잘 되는 것은 매우 중요한 요소이다. 해조류를 발효 식품 제조에 이용하면, 발효식품의 건강상의 이점과 해조류의 유익한 생리활성 물질 두 가지 장점이 결합되어 영양가 높은 제품을 생산할 수 있다(Ścieszka et al., 2019) 유당 불내증과 비건 채식의 확산으로 유제품이 함유되지 않은 제품에 대한 수요가 증가하고 있으며, 지속 가능한 영양 공급원에 대한 관심이 높아지면서 해조류와 유산균 발효를 통한 프로바이오틱스, 유당이 없는 제품 개발 등에 대한 관심 또한 증가하고 있다. 그 예로 *Gracilaria sp.*와 *Gelidium sp.* (Rhodophyta, 홍조식물)에서 항산화 활성과 GABA ( $\gamma$ -aminobutyric acid) 함량을 높인 Agarophyte 발효 추출물이 기능성 음료로 개발되었다(Dewi et al., 2020; Hayisama-ae et al., 2014; Prachyakij et al., 2008). 우유에 다양한 녹조류, 홍조류, 갈조류 등의 추출물을 첨가 후 유산균을 이용하여 발효시킨 유제품도 개발되었다(Del Olmo et al., 2019).

유제품과 더불어, 해조류 발효를 이용한 응용 분야는 간장과 같은 소스류 개발 분야이다. 단백질이 풍부한 *Pyropia* (Rhodophyta, 홍조식물)와 같은 해조류를 이용한 글루텐 프리 대체품이 제시되기도 했으며(Uchida et al., 2017, 2019), Brochu (2018)는 항산화물질과 페놀 성분이 풍부한 *A. esculenta*와 *S. latissima*를 이용하여 서양식 김치의 한 종류인 sauerkraut를 만들었다.

건강기능성 식품 외에 가축의 사료 개발 분야에서도 해조류 발효 분야가 연구되고 있다. 요오드와 같은 미네랄을 사육동물에게 공급하기 위해 해조류가 분말 형태로 사료에 첨가되어 이용되고 있으며, 해조류 발효제품은 아직 이용되고 있지 않으나, *U. pinnatifida*를 이용하여 만든 발효 제품을 닭의 사료에 보충한 결과, 육류의 수분유지, 성장촉진, 지질대사 활성 등의 유의미한 효과가 있었다는 연구 결과가 보고되었다. 따라서, 축산 사료로서 해조류 발효 제품에 대한 연구가 더 진행되어야 한다.

Marine silage (MS, 해양 사일리지) 또한 주목해야 할 분야이다. *Ecklonia sp.* (Phaeophyta, 갈조류)를 발효하여 만든 MS를 iridovirus에 감염된 참돔에 10% w/w로 첨가한 사료를 먹였을 때, MS가 함유된 사료를 먹인 참돔의 생존률이 대조군보다 높은 것으로 나타났다(Fig. 3).

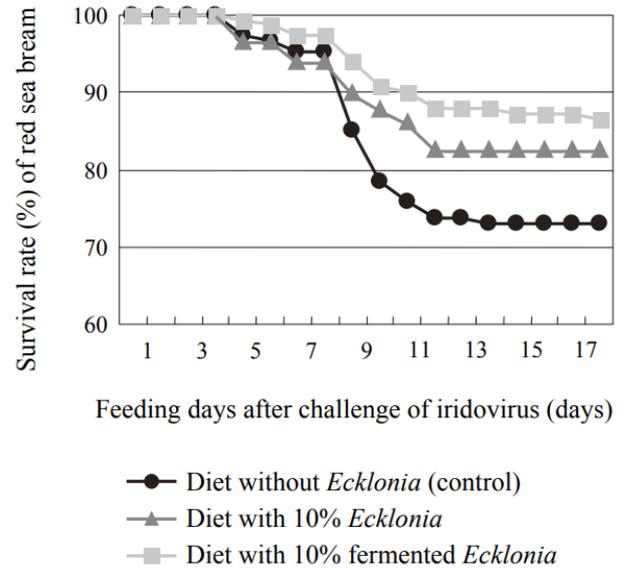


Fig. 3. Results of the red sea bream feeding experiment. Iridovirus-infected sea bream were fed a control diet, a diet containing 10% w/w algae, and a diet containing 10% w/w fermented algae (Uchida and Miyoshi, 2013).

천연 항고혈압 기능성 식품을 생산하기 위해 해조류 발효를 이용한 실험이 진행되었는데, 고혈압 쥐를 대상으로 *Sargassum horneri* (Phaeophyceae, 갈조류)를 유산균과 발효 후 투여한 결과, ACE (angiotensin-converting-enzyme) 억제 활성이 발효하지 않은 경우 3.6%였으나, 발효 처리한 경우 63.3%로 크게 향상되었음이 확인되었다(Liu et al., 2015; Tamura et al., 2022).

### 2. 생리활성 화합물 생산 및 추출 수율 향상

생리활성 화합물을 생산하기 위한 해조류 발효는 20년이 넘는 연구기간에도 불구하고 아직 실용화 전단계에 머물러 있지만, 해조류의 발효를 이용하여 생리활성 화합물을 증가시키는 연구는 진행되고 있다. 갈조류 *Eisenia bicyclis*를 *Cyberlindnera jadini*와 함께 발효시킨 결과 DPPH 라디칼 감소 억제 및 페놀 함량이 증가되었다는 보고가 있으며(Eom et al., 2011), 해조류 농축액을 다양한 유산균 및 여러가지 균주(*Weissella sp. SH-1*, *Lactobacillus sp. SH-1*, *Leuconostoc sp. SH-1*, and *Streptococcus sp. SH-1*)와 발효시킨 결과, 모든 시료에서 항산화 능력이 증가한 것으로 보고되었다(Lee et al. 2015). 또한, 사상균류인 *Monascus purpureus*와 *M. kaoliang*으로 발효한 *S. japonica* (다시마)와 *Undaria pinnatifida* (미역)에서 페놀 함량의 증가, 항산화 및 항당뇨 활성이 보고되었다(Suraiya et al., 2018) (Table 2).

**Table 2.** List of publication showing enhanced bioactivity upon fermentation of seaweed substrate (data up to April 2021)

Culture/enzyme	Substrate	Featured fermentation products	Measured bioactivity	Reference
Several commercial mixtures of hydrolytic enzymes	Seven species of brown seaweed	N/A	Antioxidant (DPPH, superoxide anion, hydroxyl radical, hydrogen peroxide scavenging and oxidative DNA damage inhibition)	Heo et al. (2005)
Spontaneous fermentation	<i>Lomentaria catenata</i>	Anticoagulant sulphated proteoglycan	Anticoagulant (activated partial thromboplastin time, prothrombin time, thrombin time)	Pushpamali et al. (2008)
<i>A. oryzae</i>	<i>L. japonica</i>	$\gamma$ -aminobutyric acid	Antioxidant (DPPH, phenolic content), likely unrelated to the identified compounds	Bae and Kim (2010)
<i>L. brevis</i>	Commercial "sea tangle" ( <i>L. japonica</i> )	$\gamma$ -aminobutyric acid	Antioxidant (DPPH, superoxide scavenging, xanthine oxidase inhibition).	Lee et al. (2010)
<i>L. brevis</i>	<i>Hizikia fusiforme</i> aqueous extracts	N/A	Antioxidant (DPPH, hydroxyl radical, superoxide scavenging, alkyl radical)	Song et al. (2011)
<i>Candida utilis</i> ( <i>C. jadinii</i> )	<i>E. bicyclis</i> aqueous extracts	N/A	Antioxidant (DPPH, phenolic content)	Eom et al. (2011)
<i>L. brevis</i>	<i>L. japonica</i>	N/A	Hepatoprotective (glutathione content level and gamma-glutamyl transpeptidase activity on ethanol-induced toxicity in HepG2 cells)	Kang et al. (2011)
<i>L. brevis</i>	<i>L. japonica</i>	N/A	In-vivo hepatoprotective (protection against ethanol-induced hepatotoxicity in Sprague-Dawley rats)	Cha et al. (2011)
Proteolytic enzymes (trypsin and alcalase)	<i>P. columbina</i>	Low molecular weight bioactive peptides	Antioxidant (DPPH, TEAC, ORAC, copper-chelating activity); Immunomodulatory (cytokine determination and lactate dehydrogenase assay); Antihypertensive (angiotensinconverting enzyme inhibitory activity)	Cian et al. (2012)
<i>C. utilis</i> ( <i>C. jadinii</i> )	<i>E. bicyclis</i>	eckol, dieckol, dioxinodihydroeckol, and phlorofuocofuroeckol-A	Antimicrobial (MIC in methicillinresistantStaphylococcus aureus)	Eom et al. (2013)
<i>Weissella</i> sp.;	<i>Sargassum siliquanstrum</i>	N/A	Antioxidant (DPPH, phenolic content) Antihypertensive (angiotensinconverting enzyme inhibitory activity)	Lee et al. (2015)
<i>Lactobacillus</i> sp.	<i>S. thunbergii</i>	N/A	Anti-obesity (brain derived neurotrophic factor-related muscle growth and lipolysis in middle aged women)	Choi et al. (2016)
<i>L. plantarum</i>	<i>E. bicyclis</i> ; <i>Sargassum fusiforme</i> ; <i>Pyropia</i> sp.;	N/A	Anti-inflammatory (assorted inflammatory responses in LPS-induced RAW 264.7 macrophage cells)	Mun et al. (2017)
	<i>Gloiopeltis furcata</i> ;		Antioxidant (Phenolic content, DPPH, Fe-reducing power, Superoxide anion radical scavenging)	Takei et al. (2017)
	<i>Chondrus ocellatus</i> ;			
	<i>Chondrus elatus</i> ;			

Culture/enzyme	Substrate	Featured fermentation products	Measured bioactivity	Reference
	<i>Gelidiaster</i> sp.; <i>Monostroma nitidum</i> ; <i>Ulva</i> sp.			
<i>L. brevis</i>	<i>L. japonica</i>	N/A	Anti-ageing (assortment of neuropsychological tests and antioxidant enzyme activities)	Reid et al. (2018b)
<i>L. brevis</i>	<i>L. japonica</i>	$\gamma$ -aminobutyric acid	Anti-dementia (cognitive impairment tests in model mice with ethanol-induced dementia)	Reid et al. (2018a)
<i>M. purpureus</i> ; <i>M. kaoliang</i>	<i>S. japonica</i> ; <i>U. pinnatifida</i>	Increased reducing sugar, protein and essential fatty acid content; Increased phenolic compound concentration	Antioxidant (phenolic content, ABTS radical scavenging activity, oxidative DNA damage inhibition); Antidiabetic (intestinal $\alpha$ -glucosidase inhibition, pancreatic lipase inhibition, pancreatic $\alpha$ -amylase inhibition)	Suraiya et al. (2018)
Six endophyte fungal isolates	<i>Cystoseira trinodis</i>	Low molecular weight fucoidan and alginate residues	Antioxidant (TAC, DPPH, FRAP, hydroxyl radical scavenging activity)	Hifney et al. (2018)
<i>C. jadinii</i>	<i>Ulva</i> sp. <i>hydrolysate</i>	N/A	Antioxidant (phenolic content, DPPH)	Dhandayuthapani and Sultana (2019)
<i>Monascus</i> spp.	<i>S. japonica</i>	Authors claim high lovastatin content in fermented extracts from previous studies	Anti-adipogenesis (inhibition of adipogenic gene expression and inhibition of lipid accumulation)	Suraiya, Choi et al. (2019)
<i>M. purpureus</i> ; <i>M. kaoliang</i>	<i>S. japonica</i>	Fermented extracts rich in bioactive esters, alcohols, ketones, alkanes, fatty acids, and phenolic compounds, but no specific association between bioactivities and identified compounds was made	Immunomodulatory (enhanced cytokine gene expression of THP-1 cells); Antioxidant (phenolic content)	Suraiya, Jang et al. (2019)
<i>Paradendryphiella salina</i>	<i>Macrocystis pyrifera</i> ; Industrial waste composed of unspecified brown seaweed	Analysis of amino acid profiles reveals increased concentrations of antioxidant peptides, including histidine and tyrosine, but otherwise there are no other bioactive compounds identified	Antioxidant (phenolic content, DPPH)	Salgado et al. (2021)
<i>A. oryzae</i>	<i>Kappaphycus</i> spp.	Complete characterization of phenolic content, with significant increases to caffeic acid, gallic acid, quinic acid and ferulic acid; Complete characterization of amino acid content, with increases to histidine, glutamic acid, tyrosine likely contributing to increased antioxidant potential	Antioxidant (total phenolic content and complete phenolic compound profile)	Norakma et al. (2021)

생리활성 화합물 생산과 더불어 천연물 추출에 발효를 이용하려는 연구들이 시도되고 있다. 미생물에 의한 발효를 통해 세포벽이나 세포막 같은 세포 구조를 변화시키면서 동시에 화합물 변형을 일으킬 수 있기 때문에, 추출물 생산을 위한 독성 유기용매 사용을 줄이는 환경 친화적이고 지속 가능한 방법 중 하나도 대두되고 있다. 그 예로, Pushpamali (2008) 등이 *L. catenata*에서 발효를 이용하여 항응고 proteoglycan을 분리 정제하였다. 해조류는 폐놀 화합물이 풍부한 생물 자원이다. Khosravi와 Razavi (2020)는  $\alpha$ -amylase, xylanase,  $\beta$ -glycosidase 등을 포함하는 세포벽 분해 효소의 복합물이 발효를 통해 생성되기 때문에 발효가 농업 폐기물에서 폴리페놀을 회수하는 데 유망한 추출 기술 중 하나로 제안하였다.

## 결론

해조류는 다양한 산업 분야에서 중요한 자원으로 인식되고 있으며, 이에 따라 해조류 발효 기술의 발전이 더욱 중요해지고 있다. 해조류는 새로운 생리 활성 화합물의 중요한 공급원으로 인정받고 있지만, 아직 육상 식물 바이오매스에 비해 개발이 부족한 상태이다. 그러나 건강기능성식품, 사료, 제약, 화장품, 에너지 산업에서의 역할이 증가함에 따라 해조류로부터 가치를 창출하는 새로운 공정의 중요성이 높아지고 있다.

현재까지 해조류 화합물 추출에 사용되는 기술은 세포벽 처리의 어려움으로 인해 수율이 낮거나 비용 효율성이 낮거나 독성 유기 용매에 의존하는 등의 문제가 있다. 그러나 최근 연구를 통해 해조류로부터 생리활성 펩타이드, 다당류, 가공 폐놀 화합물, 효소 및 유기산과 같은 새로운 화합물을 생성할 수 있는 잠재력이 입증되었다. 이러한 해조류 발효 제품은 기능성 식품 및 건강기능식품 시장에서 중요한 위치를 차지할 수 있으며, 해조류의 감칠맛을 향상시켜 소비자들에게 더 매력적인 제품을 제공할 수 있다.

해조류 발효는 영양 성분과 건강에 유익한 효과를 개선하여 해양 자원인 해조류의 부가가치를 높이는 중요한 방법이다. 이를 통해 폴리페놀 함량, 항산화 활성, 생리활성 화합물의 생체 이용률을 증가시키고, 해조류의 감칠맛을 개선하여 소비자들의 만족도를 높일 수 있다. 또한, 해조류 발효는 대량의 양식 바이오매스를 보존할 수 있는 지속 가능한 가공 방법이며, 독성 화학 물질을 생략하여 환경 친화적이면서도 비용 효율적인 추출 방법을 제공할 수 있다.

이러한 해조류 발효 기술은 대부분의 연구가 아직 진행 중이며, 더 많은 연구와 개발이 필요하지만, 해조류 산업의 확대와

함께 미래에 매우 중요한 역할을 할 것으로 예상된다.

## 사사

본 연구의 일부는 산동성의 외국인 인재 프로그램을 지원받아 이루어진 연구입니다.

## 참고문헌

Ale MT, Meyer AS. 2013. Fucoidans from brown seaweeds: An update on structures, extraction techniques and use of enzymes as tools for structural elucidation. *Rsc Advances* 3(22): 8131-8141.

Bae HN, Kim YM. 2010. Improvement of the functional qualities of sea tangle extract through fermentation by *Aspergillus oryzae*. *Fisheries and Aquatic Sciences* 13(1): 12-17.

Bajury DM, Rawi MH, Sazali IH, Abdullah A, Sarbini SR. 2017. Prebiotic evaluation of red seaweed (*Kappaphycus alvarezii*) using in vitro colon model. *International Journal of Food Sciences and Nutrition* 68(7): 821-828.

Blikra MJ, Altintzoglou T, Løvvdal T, Rognså G, Skipnes D, Skåra T, Sivertsvik M, Fernández EN. 2021. Seaweed products for the future: Using current tools to develop a sustainable food industry. *Trends in Food Science & Technology* 118: 765-776.

Brochu SM. 2018. Development and shelf life evaluation of a novel fermented seaweed sauerkraut utilizing commercially important maine seaweeds. *The University of Maine*.

Bruhn A, Brynning G, Johansen A, Lindegaard MS, Sveigaard HH, Aarup B, Fonager L, Andersen LL, Rasmussen MB, Larsen MM. 2019. Fermentation of sugar kelp (*Saccharina latissima*)—effects on sensory properties, and content of minerals and metals. *Journal of Applied Phycology* 31: 3175-3187.

Bulzomi P, Galluzzo P, Bolli A, Leone S, Acconcia F, Marino M. 2012. The pro-apoptotic effect of quercetin in cancer cell lines requires ER $\beta$ -dependent signals. *Journal of Cellular Physiology* 227(5): 1891-1898.

Cai J, Lovatelli A, Aguilar-Manjarrez J, Cornish L, Dabbadie L, Desrochers A, Diffey S, Garrido Gamarro E, Geehan J, Hurtado A. 2021. Seaweeds and microalgae: An overview for unlocking their potential in global aquaculture development. *FAO Fisheries and Aquaculture*

- Circular 1229.
- Chades T, Scully SM, Ingvadottir EM, Orlygsson J. 2018. Fermentation of mannitol extracts from brown macroalgae by Thermophilic Clostridia. *Frontiers in Microbiology* 9: 1931.
- Chen M, Sun Q, Giovannucci E, Mozaffarian D, Manson JE, Willett WC, Hu FB. 2014. Dairy consumption and risk of type 2 diabetes: 3 cohorts of US adults and an updated meta-analysis. *BMC Medicine* 12: 1-14.
- Cho M, Lee HS, Kang IJ, Won MH, You S. 2011. Antioxidant properties of extract and fractions from *Enteromorpha prolifera*, a type of green seaweed. *Food Chemistry* 127(3): 999-1006.
- Choi DS, Athukorala Y, Jeon YJ, Senevirathne M, Cho KR, Kim SH. 2007. Antioxidant activity of sulfated polysaccharides isolated from *Sargassum fulvellum*. *Preventive Nutrition and Food Science* 12(2): 65-73.
- Choi WC, Reid SN, Ryu JK, Kim Y, Jo YH, Jeon BH. 2016. Effects of  $\gamma$ -aminobutyric acid-enriched fermented sea tangle (*Laminaria japonica*) on brain derived neurotrophic factor-related muscle growth and lipolysis in middle aged women. *Algae* 31(2): 175-187.
- Chye FY, Ooi PW, Ng SY, Sulaiman MR. 2018. Fermentation-derived bioactive components from seaweeds: Functional properties and potential applications. *Journal of Aquatic Food Product Technology* 27(2): 144-164.
- Coetzee K. 2016. Market growth continues. *The Dairy Mail* 23(6): 12-14.
- del Olmo A, Picon A, Nuñez M. 2019. Probiotic dynamics during the fermentation of milk supplemented with seaweed extracts: The effect of milk constituents. *LWT* 107: 249-255.
- Dewi E, Septiningrum S, Rianingsih L, Riyadi P. 2020. Optimization of carbon source and concentration for *Lactobacillus acidophilus* growth, phenolic production and antioxidant activity in fermented seaweed extract. *International Journal of Emerging Technologies in Learning (ijET)* 11: 495-500.
- Diallo M, Simons AD, van der Wal H, Collas F, Houweling-Tan B, Kengen SW, López-Contreras AM. 2019. L-Rhamnose metabolism in *Clostridium beijerinckii* strain DSM 6423. *Applied and Environmental Microbiology* 85(5): e02656-02618.
- Dimidi E, Cox SR, Rossi M, Whelan K. 2019. Fermented foods: Definitions and characteristics, impact on the gut microbiota and effects on gastrointestinal health and disease. *Nutrients* 11(8): 1806.
- Eom SH, Kang YM, Park JH, Yu DU, Jeong ET, Lee MS, Kim YM. 2011. Enhancement of polyphenol content and antioxidant activity of brown alga *Eisenia bicyclis* extract by microbial fermentation. *Fisheries and Aquatic Sciences* 14(3): 192-197.
- Eussen SJ, van Dongen MC, Wijckmans N, den Biggelaar L, Elferink SJO, Singh-Povel CM, Schram MT, Sep SJ, van der Kallen CJ, Koster A. 2016. Consumption of dairy foods in relation to impaired glucose metabolism and type 2 diabetes mellitus: The Maastricht Study. *British Journal of Nutrition* 115(8): 1453-1461.
- Falkenberg M, Nakano E, Zambotti-Villela L, Zатели GA, Philippus AC, Imamura KB, Velasquez AMA, Freitas RP, de Freitas Tallarico L, Colepicolo P. 2019. Bioactive compounds against neglected diseases isolated from macroalgae: A review. *Journal of Applied Phycology* 31: 797-823.
- Fleurence J. 1999. The enzymatic degradation of algal cell walls: A useful approach for improving protein accessibility? *Journal of Applied Phycology* 11(3): 313-314.
- Gomi K. 2014. *Aspergillus: Aspergillus oryzae*. In *Encyclopedia of Food Microbiology: Second Edition* (pp. 92-96): Elsevier Inc.
- Gupta S, Abu-Ghannam N, Rajauria G. 2012. Effect of heating and probiotic fermentation on the phytochemical content and antioxidant potential of edible Irish brown seaweeds. *Botanica Marina* 55(5): 527-537.
- Gupta S, Abu-Ghannam N, Scannell AG. 2011. Growth and kinetics of *Lactobacillus plantarum* in the fermentation of edible Irish brown seaweeds. *Food and Bioprocesses* 89(4): 346-355.
- Gupta S, Abu-Ghannam N. 2012. Probiotic fermentation of plant based products: possibilities and opportunities. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 52(2): 183-199.
- Hadiati A, Krahn I, Lindner SN, Wendisch VF. 2014. Engineering of *Corynebacterium glutamicum* for growth and production of L-ornithine, L-lysine, and lycopene from hexuronic acids. *Bioresources and Bioprocessing* 1: 1-10.
- Hayisama-Ae W, Kantachote D, Bhongsuwan D, Nokkaew U, Chaiyasut C. 2014. A potential synbiotic beverage from fermented red seaweed (*Gracilaria fisheri*) using *Lactobacillus plantarum* DW12. *International Food Research Journal* 21(5): 1789.
- Heeba S, Nisha P. 2021. Fermented foods in aging and longevity. *Nutrition, Food and Diet in Ageing and Longevity* 179-192.

- Heo SJ, Park EJ, Lee KW, Jeon YJ. 2005. Antioxidant activities of enzymatic extracts from brown seaweeds. *Bioresource Technology* 96(14): 1613-1623.
- Hesseltine C, Wang HL. 1967. Traditional fermented foods. *Biotechnology and Bioengineering* 9(3): 275-288.
- Hifney AF, Fawzy MA, Abdel-Gawad KM, Gomaa M. 2018. Upgrading the antioxidant properties of fucoidan and alginate from *Cystoseira trinodis* by fungal fermentation or enzymatic pretreatment of the seaweed biomass. *Food Chemistry* 269: 387-395.
- Holdt SL, Kraan S. 2011. Bioactive compounds in seaweed: Functional food applications and legislation. *Journal of Applied Phycology* 23: 543-597.
- Horn S, Aasen I, Østgaard K. 2000. Ethanol production from seaweed extract. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology* 25(5): 249-254.
- Hou X, From N, Angelidaki I, Huijgen WJ, Bjerre AB. 2017. Butanol fermentation of the brown seaweed *Laminaria digitata* by *Clostridium beijerinckii* DSM-6422. *Bioresource Technology* 238: 16-21.
- Hussain A, Bose S, Wang JH, Yadav MK, Mahajan GB, Kim H. 2016. Fermentation, a feasible strategy for enhancing bioactivity of herbal medicines. *Food Research International* 81: 1-16.
- Huynh N, Camp JV, Smagghe G, Raes K. 2014. Improved release and metabolism of flavonoids by steered fermentation processes: a review. *International Journal of Molecular Sciences* 15(11): 19369-19388.
- Hwang HJ, Lee SY, Kim SM, Lee SB. 2011. Fermentation of seaweed sugars by *Lactobacillus* species and the potential of seaweed as a biomass feedstock. *Biotechnology and Bioprocess Engineering* 16: 1231-1239.
- Jayabalan R, Malbaša RV, Lončar ES, Vitas JS, Sathishkumar M. 2014. A review on kombucha tea—microbiology, composition, fermentation, beneficial effects, toxicity, and tea fungus. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety* 13(4): 538-550.
- Johnson AJ. 2016. Artisanal food microbiology. *Nature Microbiology* 1(4): 1-3.
- Jung KA, Lim SR, Kim Y, Park JM. 2013. Potentials of macroalgae as feedstocks for biorefinery. *Bioresource Technology* 135: 182-190.
- Jung KW, Kim DH, Shin HS. 2011. Fermentative hydrogen production from *Laminaria japonica* and optimization of thermal pretreatment conditions. *Bioresource Technology* 102(3): 2745-2750.
- Kang YM, Qian ZJ, Lee BJ, Kim YM. 2011. Protective effect of GABA-enriched fermented sea tangle against ethanol-induced cytotoxicity in HepG2 cells. *Biotechnology and Bioprocess Engineering* 16: 966-970.
- Katahira S, Fujita Y, Mizuike A, Fukuda H, Kondo A. 2004. Construction of a xylan-fermenting yeast strain through codisplay of xylanolytic enzymes on the surface of xylose-utilizing *Saccharomyces cerevisiae* cells. *Applied and Environmental Microbiology* 70(9): 5407-5414.
- Katz SE. 2012. *The art of fermentation: An in-depth exploration of essential concepts and processes from around the world.* Chelsea Green Publishing.
- Khosravi A, Razavi SH. 2020. The role of bioconversion processes to enhance bioaccessibility of polyphenols in rice. *Food Bioscience* 35: 100605.
- Krishna BS, Nikhilesh GSS, Tarun B, Saibaba N, Gopinadh R. 2018. Industrial production of lactic acid and its applications. *Int J Biotechnol Res* 1(1): 42-54.
- Leal J, Suárez L, Jayabalan R, Oros J, Escalante-Aburto A. 2018. A review on health benefits of kombucha nutritional compounds and metabolites. *CYTA-Journal of Food* 16 (1): 390-399.
- Lee BJ, Kim JS, Kang YM, Lim JH, Kim YM, Lee MS, Jeong MH, Ahn CB, Je JY. 2010. Antioxidant activity and  $\gamma$ -aminobutyric acid (GABA) content in sea tangle fermented by *Lactobacillus brevis* BJ20 isolated from traditional fermented foods. *Food Chemistry* 122(1): 271-276.
- Lee SJ, Lee DG, Park SH, Kim M, Kong CS, Kim YY, Lee S-H. 2015. Comparison of biological activities in *Sargassum siliquanstrum* fermented by isolated lactic acid bacteria. *Biotechnology and Bioprocess Engineering* 20: 341-348.
- Liu YY, Zeng SY, Leu YL, Tsai TY. 2015. Antihypertensive effect of a combination of uracil and glycerol derived from *Lactobacillus plantarum* strain TWK10-fermented soy milk. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 63(33): 7333-7342.
- Lordan S, Ross RP, Stanton C. 2011. Marine bioactives as functional food ingredients: Potential to reduce the incidence of chronic diseases. *Marine Drugs* 9(6): 1056-1100.
- Lorea Baroja M, Kirjavainen P, Hekmat S, Reid G. 2007. Anti-inflammatory effects of probiotic yogurt in inflammatory bowel disease patients. *Clinical & Experimental Immunology* 149(3): 470-479.
- Machida M, Yamada O, Gomi K. 2008. Genomics of

- Aspergillus oryzae: Learning from the history of Koji mold and exploration of its future. *DNA Research* 15(4): 173-183.
- Mæhre HK, Malde MK, Eilertsen KE, Elvevoll EO. 2014. Characterization of protein, lipid and mineral contents in common Norwegian seaweeds and evaluation of their potential as food and feed. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 94(15): 3281-3290.
- Maneein S, Milledge JJ, Nielsen BV, Harvey PJ. 2018. A review of seaweed pre-treatment methods for enhanced biofuel production by anaerobic digestion or fermentation. *Fermentation* 4(4): 100.
- Marquez GPB, Santiañez WJE, Trono Jr GC, de la Rama SRB, Takeuchi H, Hasegawa T. 2015. Seaweeds: A sustainable fuel source. In *Seaweed Sustainability* (pp. 421-458), Elsevier.
- Marrion O, Schwertz A, Fleurence J, Guéant JL, Guillaume C. 2003. Improvement of the digestibility of the proteins of the red alga *Palmaria palmata* by physical processes and fermentation. *Food/Nahrung* 47(5): 339-344.
- Martelli F, Favari C, Mena P, Guazzetti S, Ricci A, Del Rio D, Lazzi C, Neviani E, Bernini V. 2020. Antimicrobial and fermentation potential of *Himanthalia elongata* in food applications. *Microorganisms* 8(2): 248.
- McGovern P, Jalabadze M, Batiuk S, Callahan MP, Smith KE, Hall GR, Kvavadze E, Maghradze D, Rusishvili N, Bouby L. 2017. Early neolithic wine of Georgia in the South Caucasus. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 114(48): E10309-E10318.
- McGovern PE, Zhang J, Tang J, Zhang Z, Hall GR, Moreau RA, Nuñez A, Butrym ED, Richards MP, Wang CS. 2004. Fermented beverages of pre-and proto-historic China. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 101(51): 17593-17598.
- Meinita MDN, Kang JY, Jeong GT, Koo HM, Park SM, Hong YK. 2012. Bioethanol production from the acid hydrolysate of the carrageenophyte *Kappaphycus alvarezii* (cottonii). *Journal of Applied Phycology* 24: 857-862.
- Michalak I. 2018. Experimental processing of seaweeds for biofuels. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment* 7(3): e288.
- Mouritsen OG, Duelund L, Petersen MA, Hartmann AL, Frøst MB. 2019. Umami taste, free amino acid composition, and volatile compounds of brown seaweeds. *Journal of Applied Phycology* 31: 1213-1232.
- Mun OJ, Kwon MS, Karadeniz F, Kim M, Lee SH, Kim YY, Seo Y, Jang MS, Nam KH, Kong CS. 2017. Fermentation of *Sargassum thunbergii* by Kimchi-Derived *Lactobacillus* sp. SH-1 Attenuates LPS-Stimulated Inflammatory Response Via Downregulation of JNK. *Journal of Food Biochemistry* 41(2): e12306.
- Munda IM. 1977. Differences in amino acid composition of estuarine and marine fucoids. *Aquatic Botany* 3: 273-280.
- Murali D, Dhandayuthapani K. 2019. Optimization of fermentation of *Ulva* sp. hydrolysate by novel yeast *Cyberlindnera jadinii* MMS7 for enhancement of polyphenol content and antioxidant activity. *Journal of Drug Delivery and Therapeutics* 9(4-s): 1-7.
- Nacz M, Shahidi F. 2006. Phenolics in cereals, fruits and vegetables: Occurrence, extraction and analysis. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis* 41(5): 1523-1542.
- Nasri M. 2017. Protein hydrolysates and biopeptides: Production, biological activities, and applications in foods and health benefits. A review. *Advances in Food and Nutrition Research* 81: 109-159.
- Norakma M, Zaibunnisa A, Razarinah WW. 2022. The changes of phenolics profiles, amino acids and volatile compounds of fermented seaweed extracts obtained through microbial fermentation. *Materials Today: Proceedings* 48: 815-821.
- Olivares M, Díaz-Ropero MP, Gómez N, Sierra S, Lara-Villoslada F, Martín R, Rodríguez JM, Xaus J. 2006. Dietary deprivation of fermented foods causes a fall in innate immune response. Lactic acid bacteria can counteract the immunological effect of this deprivation. *Journal of Dairy Research* 73(4): 492-498.
- Pal A, Kamthania MC, Kumar A. 2014. Bioactive compounds and properties of seaweeds: A review. *Open Access Library Journal* 1(4): 1-17.
- Panzella L, Napolitano A. 2017. Natural phenol polymers: Recent advances in food and health applications. *Antioxidants* 6(2): 30.
- Parachin NS, Bergdahl B, van Niel EW, Gorwa-Grauslund MF. 2011. Kinetic modelling reveals current limitations in the production of ethanol from xylose by recombinant *Saccharomyces cerevisiae*. *Metabolic Engineering* 13(5): 508-517.
- Pederson CS, Albury MN. 1969. Bulletin: number 824: the sauerkraut fermentation.
- Pereira L. 2018. Therapeutic and nutritional uses of algae. CRC Press.
- Pérez-Díaz IM, Hayes J, Medina E, Anekella K, Daughtry

- K, Dieck S, Levi M, Price R, Butz N, Lu Z. 2017. Reassessment of the succession of lactic acid bacteria in commercial cucumber fermentations and physiological and genomic features associated with their dominance. *Food Microbiology* 63: 217-227.
- Petrova P, Ivanov I, Tsigoriyna L, Valcheva N, Vasileva E, Parvanova-Mancheva T, Arsov A, Petrov K. 2021. Traditional Bulgarian dairy products: Ethnic foods with health benefits. *Microorganisms* 9(3): 480.
- Plaza M, Herrero M, Cifuentes A, Ibanez E. 2009. Innovative natural functional ingredients from microalgae. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 57(16): 7159-7170.
- Plouguerné E, Le Lann K, Connan S, Jechoux G, Deslandes E, Stiger-Pouvreau V. 2006. Spatial and seasonal variation in density, reproductive status, length and phenolic content of the invasive brown macroalga *Sargassum muticum* (Yendo) Fensholt along the coast of Western Brittany (France). *Aquatic Botany* 85(4): 337-344.
- Prachyakij P, Charernjiratrakul W, Kantachote D. 2008. Improvement in the quality of a fermented seaweed beverage using an antiyeast starter of *Lactobacillus plantarum* DW3 and partial sterilization. *World Journal of Microbiology and Biotechnology* 24: 1713-1720.
- Pushpamali WA, Nikapitiya C, De Zoysa M, Whang I, Kim SJ, Lee J. 2008. Isolation and purification of an anticoagulant from fermented red seaweed *Lomentaria catenata*. *Carbohydrate Polymers* 73(2): 274-279.
- Rafiquzzaman S, Kim EY, Lee JM, Mohibbullah M, Alam MB, Moon IS, Kim JM, Kong IS. 2015. Anti-Alzheimers and anti-inflammatory activities of a glycoprotein purified from the edible brown alga *Undaria pinnatifida*. *Food Research International* 77: 118-124.
- Rafiquzzaman S, Kong IS, Kim JM. 2015. Enhancement of antioxidant activity, total phenolic and flavonoid content of *Saccharina japonica* by submerged fermentation with *Aspergillus oryzae*. *KSBB Journal* 30(1): 27-32.
- Reboleira J, Silva S, Chatzifragkou A, Niranjana K, Lemos MF. 2021. Seaweed fermentation within the fields of food and natural products. *Trends in Food Science & Technology* 116: 1056-1073.
- Redzepe R, Zilber D. 2018. *The Noma guide to fermentation: Including koji, kombuchas, shoyus, misos, vinegars, garums, lacto-ferments, and black fruits and vegetables*. Artisan Books.
- Reid SN, Ryu JK, Kim Y, Jeon BH. 2018a. The effects of fermented *Laminaria japonica* on short-term working memory and physical fitness in the elderly. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine* 2018(1): 8109621.
- Reid SN, Ryu JK, Kim Y, Jeon BH. 2018b. GABA-enriched fermented *Laminaria japonica* improves cognitive impairment and neuroplasticity in scopolamine- and ethanol-induced dementia model mice. *Nutrition Research and Practice* 12(3): 199-207.
- Rezac S, Kok CR, Heermann M, Hutkins R. 2018. Fermented foods as a dietary source of live organisms. *Frontiers in Microbiology* 9: 1785.
- Rodríguez-Jasso RM, Mussatto SI, Pastrana L, Aguilar CN, Teixeira JA. 2010. Fucoidan-degrading fungal strains: Screening, morphometric evaluation, and influence of medium composition. *Applied Biochemistry and Biotechnology* 162: 2177-2188.
- Salgado CL, Muñoz R, Blanco A, Lienqueo ME. 2021. Valorization and upgrading of the nutritional value of seaweed and seaweed waste using the marine fungi *Paradendryphiella salina* to produce mycoprotein. *Algal Research* 53: 102135.
- Sanders ME. 2008. Use of probiotics and yogurts in maintenance of health. *Journal of Clinical Gastroenterology* 42: S71-S74.
- Ścieszka S, Klewicka E. 2019. Algae in food: A general review. *Critical reviews in Food Science and Nutrition* 59(21): 3538-3547.
- Shobharani P, Halami P, Sachindra N. 2013. Potential of marine lactic acid bacteria to ferment *Sargassum* sp. for enhanced anticoagulant and antioxidant properties. *Journal of Applied Microbiology* 114(1): 96-107.
- Soedamah-Muthu SS, Masset G, Verberne L, Geleijnse JM, Brunner EJ. 2013. Consumption of dairy products and associations with incident diabetes, CHD and mortality in the Whitehall II study. *British Journal of Nutrition* 109(4): 718-726.
- Song HS, Eom SH, Kang YM, Choi JD, Kim YM. 2011. Enhancement of the antioxidant and anti-inflammatory activity of *Hizikia fusiforme* water extract by lactic acid bacteria fermentation. *Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 44(2): 111-117.
- Strauss S. 2023. Seaweed fermentation. *Functional Ingredients from Algae for Foods and Nutraceuticals* 711-741.
- Suraiya S, Jang WJ, Cho HJ, Choi YB, Park HD, Kim JM,

- Kong IS. 2019. Immunomodulatory effects of *Monascus* spp.-fermented *Saccharina japonica* extracts on the cytokine gene expression of THP-1 cells. *Applied Biochemistry and Biotechnology* 188: 498-513.
- Suraiya S, Kim JH, Tak JY, Siddique MP, Young CJ, Kim JK, Kong IS. 2018. Influences of fermentation parameters on lovastatin production by *Monascus purpureus* using *Saccharina japonica* as solid fermented substrate. *LWT* 92: 1-9.
- Suraiya S, Siddique MP, Lee JM, Kim EY, Kim JM, Kong IS. 2018. Enhancement and characterization of natural pigments produced by *Monascus* spp. using *Saccharina japonica* as fermentation substrate. *Journal of Applied Phycology* 30: 729-742.
- Tajima T, Tomita K, Miyahara H, Watanabe K, Aki T, Okamura Y, Matsumura Y, Nakashimada Y, Kato J. 2018. Efficient conversion of mannitol derived from brown seaweed to fructose for fermentation with a thraustochytrid. *Journal of Bioscience and Bioengineering* 125(2): 180-184.
- Takeda H, Yoneyama F, Kawai S, Hashimoto W, Murata K. 2011. Bioethanol production from marine biomass alginate by metabolically engineered bacteria. *Energy & Environmental Science* 4(7): 2575-2581.
- Takei M, Kuda T, Eda M, Shikano A, Takahashi H, Kimura B. 2017. Antioxidant and fermentation properties of aqueous solutions of dried algal products from the Boso Peninsula, Japan. *Food Bioscience* 19: 85-91.
- Tamura M, Shimizu S, Nagai H, Yoshinari O, Hamada-Sato N. 2022. Enhancement of the Antihypertensive Effect of Fermented *Sargassum horneri* with *Lactiplantibacillus pentosus* SN001. *Fermentation* 8(7): 330.
- Tapsell LC. 2015. Fermented dairy food and CVD risk. *British Journal of Nutrition* 113(S2): S131-S135.
- Terefe NS. 2016. Emerging trends and opportunities in food fermentation.
- Torres MD, Flórez-Fernández N, Domínguez H. 2019. Integral utilization of red seaweed for bioactive production. *Marine Drugs* 17(6): 314.
- Uchida M, Hideshima N, Araki T. 2019. Development of koji by culturing *Aspergillus oryzae* on nori (*Pyropia yezoensis*). *Journal of Bioscience and Bioengineering* 127(2): 183-189.
- Uchida M, Kurushima H, Ishihara K, Murata Y, Touhata K, Ishida N, Niwa K, Araki T. 2017. Characterization of fermented seaweed sauce prepared from nori (*Pyropia yezoensis*). *Journal of Bioscience and Bioengineering* 123(3): 327-332.
- Uchida M, Miyoshi T. 2013. Algal fermentation-The seed for a new fermentation industry of foods and related products. *Japan Agricultural Research Quarterly: JARQ* 47(1): 53-63.
- Umansky J, Shih R. 2020. *Koji Alchemy: Rediscovering the magic of mold-based fermentation (Soy Sauce, Miso, Sake, Mirin, Amazake, Charcuterie)*. Chelsea Green Publishing.
- Villarreal-Soto SA, Beaufort S, Bouajila J, Souchard JP, Taillandier P. 2018. Understanding kombucha tea fermentation: A review. *Journal of Food Science* 83(3): 580-588.
- Vina I, Semjonovs P, Linde R, Deniņa I. 2014. Current evidence on physiological activity and expected health effects of kombucha fermented beverage. *Journal of Medicinal Food* 17(2): 179-188.
- Wang T, He F, Chen G. 2014. Improving bioaccessibility and bioavailability of phenolic compounds in cereal grains through processing technologies: A concise review. *Journal of Functional Foods* 7: 101-111.
- Wee YJ, Kim JN, Ryu HW. 2006. Biotechnological production of lactic acid and its recent applications. *Food Technology and Biotechnology* 44(2): 163-172.
- Yadav H, Jain S, Rastamanesh R, Bomba A, Catanzaro R, Marotta F. 2011. Fermentation technology in the development of functional foods for human health: where we should head. *Ferment Technol* 1: 1-2.
- Yue Q, Wang Z, Yu F, Tang X, Su L, Zhang S, Sun X, Li K, Zhao C, Zhao L. 2022. Changes in metabolite profiles and antioxidant and hypoglycemic activities of *Laminaria japonica* after fermentation. *LWT* 158: 113122.