

## 한국의 해조류 바이오매스자원 현황

이신엽, 안재우, 황형진, 이선복\*

## Seaweed Biomass Resources in Korea

Shin Youb Lee, Jae-Woo Ahn, Hyeong Jin Hwang, and Sun Bok Lee\*

접수: 2011년 6월 23일 / 게재승인: 2011년 7월 19일

© 2011 The Korean Society for Biotechnology and Bioengineering

**Abstract:** There is a growing worldwide interest in the potential of marine biomass as an environmentally friendly and economically sustainable resource. Due to the great lack of comprehensive information about domestic seaweed resources, this study aimed to analyze the existing literature on the production and types of domestic seaweed species. Based on this data the possibilities of industrial use of domestic seaweed for the production of biofuels and bioplastics had been assessed. Our review took into account the seaweed species on domestic coasts as well as the species currently in great production via seaweed farming. Due to their wide distribution, their status as farmed crops, and the likelihood of securing their reliable supply, *Codium fragile*, *Hizikia fuciformis*, and *Gelidium amansii* were deemed to be the most appropriate candidates for domestic industrial use. The industrial potential of seaweed biomass was also explored by comparing the predicted amount of biomass necessary to replace current gasoline and plastics use with currently available farming space. The results of our study imply that once a steady and adequate supply of the proper kinds of seaweed can be secured through seaweed farming, there is a great potential for the development of new seaweed-based biofuels and bioplastics industries in Korea.

**Keywords:** seaweed, biomass, biofuels, bioplastics, marine resources

포항공과대학교 화학공학과  
Department of Chemical Engineering, Pohang University of Science and Technology, San 31, Hyoja-Dong, Pohang 790-784, Korea  
Tel: +82-54-279-2268, Fax: +82-54-279-2699  
e-mail: sblee@postech.ac.kr

### 1. 서론

#### 1.1. 지속가능한 발전을 위한 새로운 자원의 필요성

현재 대부분의 에너지 및 화학산업에 있어서 필수적으로 사용되는 석유자원은 그 양이 유한한 자원으로 고갈에 대한 위험성이 크다. 더불어 기후협약 등의 환경오염 규제강화에 따른 친환경 자원의 중요성이 강조되고 있는 실정이다. 이러한 맥락에서 석유자원을 대체할 수 있는 새로운 자원의 발굴 및 활용 기술의 개발이 전 세계적으로 매우 중요한 문제로 부각되고 있다. 이러한 대체가능하면서도 지속적으로 사용할 수 있는 자원으로 생물체 유래의 바이오매스 (biomass), 특히 해양바이오매스가 새롭게 각광을 받고 있다. 2009년에 본 연구팀에서 발표한 총설에서는 이러한 해조류 바이오매스가 해양바이오연료산업과 해조신소재산업, 해조다당류산업 등에 활용될 수 있음을 소개하였다 [1]. 이번 총설에서는 국내 해조류 바이오매스 자원의 현황을 분석하고 이를 토대로 산업 자원으로서의 해조류의 가능성을 검토하고자 한다.

바이오매스의 산업적 활용에 대한 연구는 전 세계적으로 활발히 이뤄지고 있으며 이를 위하여 많은 노력과 정책적인 지원을 하고 있다 [2]. 미국에서는 바이오매스의 화학산업 원료로서의 가능성을 주목하고 국가적인 차원에서 이를 지원하는 법을 제정하고 있다. 2007년 에너지 독립 및 보안법 (EISA: The Energy Independence and Security Act)에서는 재생연료 기준 (Renewable Fuel Standard)을 맞추기 위하여 대체연료 공급을 대폭 증가할 것을 명시하였는데 그 중 바이오연료가 차지하는 양이 2022년까지 최소 1,360억 리터 (360억 갤런)에 달할 것으로 추정된다 [3]. 그러나 이와 같은 대규모의 바이오연료 및 바이오매스 유래 화학제품 생산을 위해서는 원료가 되는 바이오매스의 대량 확보가 매우 중요한 문제가 되고 있기 때문에 육상 바이오매스 자원에서 해양 바이오매스 자원에 이르기까지 산업용 원료로 사용 가

능한 바이오매스의 생산과 활용에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다.

## 1.2. 차세대 화학산업 원료로서 재조명 받는 해조류 바이오매스

현재까지 바이오매스를 산업적으로 활용하는 연구는 크게 3세대로 분류할 수 있는데 있는데, 그 중 해조류는 전분계(제 1세대 바이오매스), 목질계(제 2세대 바이오매스)를 잇는 제 3세대 바이오매스로서 주목받고 있다. 해조류는 기존의 바이오매스 자원에 비해 여러 가지 장점을 가지고 있는데 전분계 원료가 가지던 식량자원과의 경합 문제가 없으며 리그닌(lignin) 및 셀룰로오스(cellulose) 성분이 적기 때문에 목질계 원료에 비해 전처리 및 당화 공정이 용이하다고 할 수 있다 [4]. 그 뿐만 아니라 대부분의 해조류는 육상식물에 비해 성장이 빠르고 단위 면적당 생산량이 높으며 대규모 생산 시 수분 공급 문제에서 자유롭다는 장점을 가지고 있기 때문에 차세대 바이오매스로서 유리한 조건을 두루 지니고 있다고 할 수 있다. 이와 같은 장점에도 불구하고 현재까지 해조류를 화학산업 원료로 사용한 예가 많지 않으며 관련 인프라 및 활용 기술 또한 초기단계에 머물러 있는 실정이다.

최근 해조류 바이오매스는 육상계 바이오매스의 한계를 극복할 수 있는 차세대 바이오매스로서 새롭게 조명받기 시작하였는데 2010년 미국 에너지성(Department of Energy) 산하의 PNNL(Pacific Northwest National Laboratory)에서는 해조류 자원의 산업적 활용 가능성에 대해 주목하고 바이오매스의 생산 및 활용에 관하여 심층적으로 분석한 보고서가 발표되기도 하였다 [5]. 해당 PNNL 보고서에서는 바이오연료로서의 활용에 초점을 맞추어 해조류의 생태, 생산 규모 및 필요 면적, 해조류 바이오매스의 생산 과정과 시장 공급망, 경제성 평가 등 다방면의 검토를 종합적으로 서술하고 있다. 국내의 경우도 최근 해조류의 바이오산업화를 위한 전략 및 정책방향에 대한 적극적인 검토가 발표되었으며, 그 내용은 해조류를 바이오연료 및 펄프산업에 활용하기 위한 기술, 경제, 정책적 검토가 주를 이루고 있다 [6]. 이와 같이 해조류는 차세대 바이오매스 원료로서 재조명 받기 시작하였으나 산업적 활용을 위하여 막대한 양이 요구되는 해조류의 생산에 대한 연구는 아직까지 많이 이루어지지 못하고 있는 실정이다.

국내의 경우 또한 해조류 개별 종의 생태 및 분포에 대한 연구가 주로 이루어지고 있는 반면, 현재까지 산업 원료로서 활용하기 위해 해조류의 분포 특성 및 생산 규모를 종합적으로 검토한 자료는 부족한 상태이다. 따라서 국내 해조류 자원의 계절별, 지역별 분포 자료를 종합하고 이를 바탕으로 국내 실정에 적합한 산업용 해조류 생산 및 활용 가능성을 검토하는 연구가 매우 중요하다고 판단된다. 본 글에서는 국내에서 일반해면 채취 및 인공 양식생산에 적절한 종을 살펴보고자 해조류의 특성 소개 및 우리나라의 해조류 양식 및 서식 현황을 검토하여 우리나라에서 적절한 종을 제시하고 해조류 바이오매스의 활용성에 대한 논의를 하고자 한다.

## 2. 본론

### 2.1. 해조류의 일반적인 생태와 구성성분

#### 2.1.1. 해조류의 특성

해조류(seaweed)는 거대조류(macroalgae)로서 바다에 생육하는 다세포 원생생물을 지칭하며 육안으로 관찰할 수 있는 크기를 가진다는 점에서 단세포의 미세조류(microalgae)와 구별된다. 뿌리, 줄기, 잎으로 명확하게 분화하지 않는 엽상체(thallus)를 지닌다는 점에서 해초(sea grass)와도 구별되는 특징을 지닌다. 또한, 해조류 내의 구분은 광합성색소에 따라 녹조류(green seaweed), 갈조류(brown seaweed), 홍조류(red seaweed)로 나뉘지며 각각이 지니는 서식환경 및 구성 성분에서도 차이가 나타난다. 형태학적으로는 해조류는 뿌리, 줄기, 잎의 구분이 없고, 대부분 잎 또는 띠 형태의 부드러운 엽상체 구조를 이루고 있다. 수중생물인 이들은 내부 조직에 있어서도 물이나 영양을 체내로 이동시키는 물관이나 체관을 필요로 하지 않으며 몸체의 표면에서 직접 해수 중의 수분 및 양분을 흡수한다. 뿌리의 형태를 지닌 부착기는 해조류의 위치적인 고정 역할만 할 뿐 수분 및 양분을 흡수하는 역할을 하지는 않는다. 해조류는 물의 흐름에 따라 흔들리기 때문에 육상식물과 달리 몸의 지탱에 필요한 기계조직이 필요하지 않다. 육상 식물에 비하여 부드러운 조직을 가지는 해조류의 구조적인 특징은 전처리 공정을 용이하게 한다는 점에서 산업용 바이오매스로서 활용에 유리한 요인이라 할 수 있다.

해조류는 영양체의 생활기간에 따라 일년생과 다년생 해조류로 나누어 질 수 있다. 일년생 해조류는 단세포체로 시작하여 세포분열에 의해 다세포체 또는 영양체가 1년에 한 번씩 주기적으로 나타나는 조류로서 대표적인 종으로는 김, 미역 등이 있다. 반면, 다년생 해조류는 다세포 조직으로 된 영양체가 1년 이상 생육하는 조류로서 포자를 방출한 뒤 상부가 고사하고 다음해에 남은 부착기에서 새로운 엽상부가 생성되는 형태로 다년간 성장하는 방식을 취한다. 대표적인 다년생 해조류 종으로는 다시마, 가시파래 등이 있다. 일반적인 해조류의 사계는 육상식물과 달리 가을에 번성하기 시작하여 겨울과 봄에 가장 무성하며 여름에는 쇠퇴한다. 우리나라와 같은 온대지방의 경우 종에 따라 차이는 있으나 대체적으로 3~5월에 해조류가 가장 번성하고 여름에는 쇠퇴하는 것이 일반적인 경향이다. 해조류의 서식 환경은 종에 빛의 파장, 수온, 염분, pH 등 환경적 요인을 달리하며 이러한 다양한 환경조건이 복합적으로 작용하여 해조류의 수직 및 수평적 분포가 달라진다. 일반적으로 녹조류의 경우는 조간대(mid-littoral zone) 상부, 갈조류는 조간대 중하부, 홍조류는 조하대(subtidal zone)에 주로 서식하는 것으로 알려져 있다 [7].

#### 2.1.2. 해조류의 주요 구성성분

해양 바이오매스인 해조류의 구성성분은 육상계 바이오매스와 그 구성성분을 달리한다. 일반적으로 해조류는 높은 탄수화물 함량을 가지는데 건조중량 기준으로 40~60%의 높은 함량을 보인다. 회분(ash) 함량의 경우 종에 따라 편차가 심하지만 대부분 건조중량 기준 20% 정도의 비교적

높은 회분 함량을 보이고 있다. 단백질은 또한 해조류에서 비교적 높은 함량을 보이며 건조중량 기준으로 약 20%를 보이는 것이 일반적이다 [8] (Table 1).

**Table 1.** Chemical composition of seaweed [8]  
(unit: % dry weight)

Species		Carbohydrate	Protein	Lipid	Ash
Green seaweed	<i>Capsosiphon fulvescens</i>	48.1	24.4	0.6	26.9
	<i>Caulerpa lentillifera</i>	45.5	11.7	1.2	41.6
	<i>Codium fragile</i>	58.7	15.3	0.9	25.1
	<i>Codium tenue</i>	51.4	5.4	1.0	40.9
	<i>Enteromorpha intestinalis</i>	55.8	26.3	0.9	17.0
	<i>Enteromorpha prolifera</i>	53.3	22.9	0.8	22.9
	<i>Monostroma nitidum</i>	63.0	20.4	1.3	15.4
	<i>Ulva lactuca</i>	50.4	26.8	0.6	22.2
	<i>Ulva pertusa</i>	52.3	25.1	0.1	22.5
	AVERAGE		53.2 ± 1.8	19.8 ± 2.5	0.8 ± 0.1
Red seaweed	<i>Callophyllis adnata</i>	43.5	26.0	0.3	30.2
	<i>Carpopeltis cornea</i>	60.7	23.4	0.4	15.6
	<i>Chondrus crispus</i>	65.9	8.1	0.9	25.2
	<i>Chondrus pinnulatus</i>	64.4	22.5	0.2	12.9
	<i>Euclima Cottonii</i>	60.7	17.4	0.8	21.1
	<i>Gelidium amansii</i>	66.0	20.5	0.2	13.3
	<i>Gigartina tenella</i>	42.2	27.4	0.9	29.5
	<i>Gloiopeltis tenax</i>	62.1	18.1	0.6	19.2
	<i>Gracilaria confervoides</i>	75.8	7.5	0.1	15.6
	<i>Grateloupia turuturu</i>	56.9	20.3	2.9	19.4
	<i>Hypnea charoides</i>	57.3	18.4	1.5	22.8
	<i>Hypnea japonica</i>	57.5	19.0	1.4	22.1
	<i>Lomentaria hakodatensis</i>	40.4	29.0	0.7	29.9
	<i>Plocamium ovicornis</i>	51.1	30.0	0.3	18.6
	<i>Porphyra laciniata</i>	34.1	38.8	1.9	25.2
	<i>Porphyra sp.</i>	45.5	43.6	1.9	9.0
AVERAGE		55.2 ± 2.8	23.1 ± 2.4	0.9 ± 0.2	20.6 ± 1.6
Brown seaweed	<i>Ecklonia stolonifera</i>	65.0	15.3	1.5	18.1
	<i>Eisenia bicyclis</i>	72.7	8.2	0.2	18.8
	<i>Heterochordaria abietina</i>	71.9	11.3	1.3	15.6
	<i>Hijikia fusiforme</i>	47.5	9.8	1.2	41.5
	<i>Laminaria sp.</i>	51.5	8.4	1.3	38.8
	<i>Sargassum polycystum</i>	46.6	6.0	0.3	47.1
	<i>Sargassum vulgare</i>	61.6	13.6	4.9	19.4
	<i>Undaria pinnatifida</i>	43.2	23.8	3.5	29.5
AVERAGE		57.5 ± 4.2	12.1 ± 2.0	1.8 ± 0.6	28.6 ± 4.4
TOTAL SEAWEED AVERAGE		55.2 ± 1.7	19.5 ± 1.6	1.1 ± 0.2	24.0 ± 1.6

육상식물과 차별되는 해조류의 이러한 높은 탄수화물 함량

은 미생물 발효를 이용한 화학제품 생산의 공정 수율을 높일 수 있는 긍정적인 요인이 될 수 있다. 해조류의 탄수화물 저장 형태는 매우 다양하게 발견되는데 대표적인 형태로 한천 (agar), 카라기난 (carrageenan), 알긴산 (alginic acid), 푸코이단 (fucooidan), 라미나란 (laminaran), 울반 (ulvan) 등을 들 수 있으며, 이들을 구성하는 단당류의 경우도 매우 다양하게 존재한다. 이들 중 D-glucose, D-galactose 등 기존의 미생물 발효 공정에 쉽게 사용이 가능한 발효성 당 (fermentable sugar)도 존재하지만, 3,6-anhydro-L-galactose와 같은 비발효성 당 (non-fermentable sugar)도 상당량 존재하기 때문에 이들을 산업적으로 활용하기 위한 연구가 필요한 실정이다. 한편, 높은 함량의 회분과 함께 이러한 비발효성 당 성분들 뿐만 아니라 비교적 높은 함량의 단백질을 산업적으로 이용할 수 있다면 해조류 바이오매스의 활용 범위가 더욱 넓어질 수 있을 것으로 기대된다.

해조류 구성성분의 또 다른 특징은 건조되지 않은 해조류의 경우 80~90%의 높은 수분함량을 지닌다는 점이다. 높은 수분함량의 문제는 바이오매스의 운반 문제와 밀접한 연관이 있기 때문에 산업용 해조류의 수확 및 가공, 활용에서 고려해야 할 요인이라 할 수 있다.

## 2.2. 해조류 생산 현황

### 2.2.1. 세계의 해조류 양식 생산 현황

현재 세계 해조류 생산은 주로 양식에 의해 이루어지고 있는데 대부분의 수요는 아시아 지역을 중심으로 이루어져 있으며 전체의 83~90%를 차지하고 있다. 따라서 해조류 양식 생산 또한 중국 및 아시아 국가들이 세계 해조류 양식 생산량의 72%를 하고 있다. 2000년 이후, 양식에 의한 생산량 증가 추이를 보면 매년 500,000~1,000,000 톤 정도 증가하여, 2006년 약 1,500만 톤에 달하는 것으로 알려져 있다 [9] (Table 2).

세계 해조류 양식 생산은 주로 사용되는 속을 보면, *Laminaria* 와 *Undaria*, *Porphyra*, *Euclima*, *Gracilaria* 중심으로 생산되어지고 있으며, 이들의 생산량은 세계 해조류 양식 생산량에서 76%를 차지한다. 국가별로는 중국은 *Euclima*속을 제외한 네 가지 속의 해조류를 대해 최대생산국이며 필리핀이 *Euclima*속 전체의 91%를 생산한다는 보고가 있다 [5]. 우리나라는 세계 4위의 해조류 생산국으로 생산량 및 생산기술에 있어서는 선진국 수준이라 할 수 있으며 지난 2000년 이후 그 생산량이 꾸준히 증가하였다. 2006년 기준으로 우리나라

**Table 2.** World production of seaweed

(unit: dry ton)

Nation	Year	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
China		7,863,540	8,159,450	8,809,090	9,801,830	10,714,610	10,855,295	10,867,410
Philippines		707,039	785,795	894,857	988,889	1,204,808	1,338,597	1,468,905
Indonesia		205,227	212,473	223,080	231,900	410,570	910,636	910,636
Korea		374,463	373,538	497,557	452,054	547,108	621,154	765,595
Japan		528,881	511,448	557,951	477,705	484,389	507,742	490,062
others		503,192	585,212	593,319	574,104	569,085	556,548	573,004
World Total		10,182,342	10,627,916	11,575,854	12,526,482	13,930,570	14,789,972	15,075,612

FAO, Yearbook of Fishery Statistics Summary Tables, 2006 [9].

Table 3. Seaweed production in Korea

(unit: dry ton)

	1996	1998	2000	2002	2004	2006	2008
<b>Cultivated</b>							
<i>Undaria pinnatifida</i>	305,813	239,742	212,429	242,135	261,574	322,371	381,076
<i>Laminaria japonica</i>	35,640	7,931	14,160	24,873	22,510	201,919	285,221
<i>Porphyra tenera</i>	166,199	191,578	130,488	209,995	228,554	217,559	224,242
<i>Hizikia fusiformis</i>	23,054	24,993	11,654	11,016	22,814	21,125	17,701
<i>Enteromorpha</i> sp.	8,272	5,298	5,288	9,291	1,154	682	8,003
<i>Codium fragile</i>	8	-	164	72	142	165	1,186
Other species	4	227	273	171	-	173	3595
Subtotal of cultivated seaweed	538,990	469,769	374,456	497,557	536,748	764,913	921,024
<b>Wild stock harvest</b>							
<i>Undaria pinnatifida</i>	6,642	784	1,717	1,089	719	3,569	3,114
<i>Hizikia fusiformis</i>	8,086	3,856	6,062	5,081	5,284	2,933	2,721
<i>Codium fragile</i>	381	280	220	558	616	2,875	1,400
<i>Pachymeniopsis</i> sp.	120	15	15	2	48	473	1,170
<i>Gelidium amansii</i>	3,551	3,136	2,872	2,150	1,791	3,012	1,093
<i>Enteromorpha</i> sp.	373	61	64	412	71	164	295
<i>Gelidium</i> sp.	57	116	66	117	11	328	63
<i>Laminaria japonica</i>	1,795	500	350	88	-	12	2
<i>Porphyra tenera</i>	189	635	1	29	3	2	1
<i>Corallina</i> sp.	68	19	29	-	-	1	-
Other species	1,594	3,191	1,627	901	517	374	4,007
Subtotal of wild stock harvest	22,910	12,594	13,023	10,427	9,060	13,754	13,866
<b>Total</b>	<b>561,900</b>	<b>482,363</b>	<b>387,479</b>	<b>507,984</b>	<b>545,808</b>	<b>778,667</b>	<b>934,890</b>

Data from Korean Fishery Information Service [10].

라의 해조류 생산량은 77만 톤에 달하였으며, 생산량은 전 세계 양식 생산량의 약 23%에 해당하는 수치이다.

### 2.2.2. 한국 해조류 양식 현황

2008년 현재 해조류 생산량은 93만 톤이며 이는 전체 어업 생산량 330만 톤의 27.8%, 양식 생산량 138만 톤의 67.6%에 해당하는 것으로 어업 내에서 상당한 규모를 차지하고 있음을 알 수 있다. 해조류의 생산 추이를 보면, 1990년 44만 톤으로부터 점차적으로 그 생산량이 증가하여 2008년에는 2배 이상인 93만 톤에 달하고 있다 [10] (Table 3). 또한, 일반해면의 생산은 지속적으로 감소한 반면, 천해양식은 증가하여 최근에는 해조류 생산의 대부분이 양식으로 이루어지고 있음을 알 수 있다.

국내 해조류의 양식은 90% 이상이 미역류 (*Undaria*), 다시마류 (*Laminaria*) 등의 갈조류와 김류 (*Porphyra*), 가시리류 (*Gelidium*) 등의 홍조류로 이루어지고 있으며 대부분 식용 재배이다. 전체 양식면적 중에서 김 양식면적이 전체의 71.2%를 점하고 있고 미역과 다시마가 각각 6.7%, 10.4%를 차지하여 상위 3종이 전체 양식면적의 88.3%로 대부분을 차지하고 있다. 반면, 녹조류의 경우는 파래류 (*Enteromorpha*)가 일부 이루어지고 있는 수준이며 그 양이 상대적으로 적다. 이는 기존 해조류의 식용 사용이 대부분 갈조류와 홍조류에 집중되어 있기 때문인데 녹조류 바이오매스를 산업적으로 활용하게 된다면 새로운 수요로 인하여 그 생산량이 증가하게 될 것으로 예상된다.

### 2.2.3. 대한민국의 해조류 양식 가능 면적

해조류 양식은 크게 세 군데의 영역에서 양식이 가능하며,

이 기준에 따라 원근해 양식 (large off shore farm), 근해양식 (near-shore farm), 지상양식 (land-based farm)으로 나눌 수 있다. 현재 우리나라는 양식생산기술 한계와 양식어업의 영세성 등으로 근해 중심 양식이 이루어지고 있다. 최근의 한 분석자료에 따르면 [11] 현재의 기술로 해조류 양식생산이 가능한 잠재적 바다의 면적은 126,961 ha로 평가된다. 2008년 기준으로 79,504 ha에서 해조류 양식생산이 이루어 지므로 현재의 기술 수준에서 해조류 양식생산에 이용할 수 있는 바다의 면적은 약 47,500 ha이다 [12]. 그러나 현재의 해조류 양식생산기술이 자동화, 대형화 등이 가능해지면 근해 양식생산뿐만 아니라, 원근해 및 원양 양식을 통한 해조류의 생산이 가능해져 우리나라의 배타적 경제 수역에서도 해조류 양식생산이 가능해질 것으로 전망된다. 우리나라의 경우, 삼면이 바다로 넓은 해안선을 가지는데 해안선에서 12해리 거리까지의 바다인 영해의 크기가 710만 ha 이고, 200해리 거리까지의 바다로 모든 자원에 대해 독점적 권리를 가져 경제적 개발이 가능한 배타적 경제수역은 2,252만 ha에 이르고 있다. 따라서 배타적 경제수역의 일부를 해조류 생산 가능 지역으로 개발한다면 화학산업 원료로 요구되는 바이오매스 양을 충분히 생산할 수 있을 것이다.

## 2.3 국내 해조류 서식 현황

### 2.3.1 국내 서식 해조류 서식 현황 분석의 필요성

현재까지 이루어진 해조류 생산은 주로 식용을 목적으로 한 양식이 주류를 이루었기 때문에 식품용으로 적합한 해조류 생산에 초점이 맞추어져 있었다. 그래서 병충해에 강한 종, 식품용으로 수요가 높거나 식품으로의 가치가 높은 종들을 선택하여 생산하는 식용 해조류로서 질을 향상시키기 위한

노력들이 이루어졌다. 그 결과 현재의 해조류 생산량은 산업용 원료를 공급할 수 있는 정도의 생산량이 아닐 뿐만 아니라 산업화를 위한 조건인 안정적이고 지속적인 공급에도 부합되지 않았다. 식용 해조류 생산과 달리 산업용 원료로서 해조류를 생산하는 경우, 산업용 원료 수급을 지탱할 수 있을 정도의 대량 생산 능력과 지속적이고 안정적인 해조류 생산이 뒷받침되어야 산업적으로 적용 시 경제성이 있을 것으로 판단되어진다. 이에 산업화에 적합한 종을 재선별하고 이를 대량 생산하기 위한 연구가 중요할 것을 판단된다. 산업용 해조류 종의 선별에 있어서 고려해야 할 요소를 다음과 같은 측면에서 생각할 수 있다.

첫째, 기존의 식품 중심으로 생산되는 종을 이용할 수 있어야 한다. 각 해조류 종마다 양식 생산 및 일반해면 채취 시 생산방법과 수율 등이 다양해지므로 새로운 종을 선택하여 생산을 한다는 것은 새로운 기술개발 및 작업자의 숙련도 등을 고려해야하므로 경제적 부담으로 작용할 수 있다. 기존의 식품으로 양식했던 종들을 이용할 경우는 생산성 향상을 위한 양식기술 개발 등이 매우 용이한 이점이 있다.

둘째, 우리나라의 지역 (동, 서, 남해안)적인 제약 없이 해조류 생산 기술이 표준화 될 수 있어야 한다. 지역적인 영향 없이 양식 생산된다면, 개별 종의 선택이나 재배 기술 등의 변화가 없어 재배기술의 표준화를 통해 생산성 향상을 가져올 수 있을 것이다.

마지막으로 해조류 생산이 계절적 영향을 받지 않아야 한다. 생산하는 해조류가 계절적 영향을 받는다면 해조류 바이오매스의 안정적인 공급이 불가능하여 산업적 원료 등으로 사용하기에 비경제적일 뿐만 아니라, 다른 육상계 바이오매스나 화석연료기반 원료에 경쟁력이 없을 것이다.

이러한 요소들을 토대로 보면, 지금까지 우리나라 해조류 자원의 현황에 대한 고찰이 필요하다. 본 논문에서 여러 국내 논문의 자료를 규합하여 각 해조류별 성분 함량을 제시한 Table 1과 동, 서, 남해안에 서식하는 해조류의 계절별 출현 유무를 나타낸 Table 4를 바탕으로 우리나라에서 산업용으로 활용 가능성 있는 해조류 종을 제시하였다. 또한, 국내에 서식하는 해조류 현황 분석은 국내 서식 종에 대한 데이터 구축 뿐만 아니라 미래 생물종의 자원화와 해조류의 생태학적 연구 및 접근에도 많은 도움이 될 것이다.

### 2.3.2. 국내 해조류의 지역별, 계절별 분포

국내 해조류에 대한 데이터 구축을 위해 해조류 관련 논문들을 바탕으로 국내에 서식하는 해조류의 지역 (동, 서, 남해안), 계절별 분포를 분석하여 Table 4에 출현빈도가 높은 해조류 종을 정리하였다 [13-25]. 국내에서 발견되는 해조류는 총 395종이며 계절적으로는 여름에, 지역적으로는 남해안에서 가장 많은 종이 관찰되어진다.

지역적인 해조류 서식 분포를 보면, 동해안에 출현한 해조류는 총 201종으로 녹조 25종 (12.4%), 갈조 44종 (21.9%), 홍조류 132종 (65.7%)이며, 홍조류의 비율이 가장 높다. 서해안에서 출현한 해조류는 총 183종으로 녹조 25종 (13.7%), 갈조 41종 (22.4%), 홍조류 117종 (63.9%)이며, 홍조류의 비율이 가장 높다. 남해안에서 출현한 해조류는 총 251종으

로 녹조 32종 (12.7%), 갈조 64종 (25.5%), 홍조류 155종 (61.8%)이며, 홍조류의 비율이 가장 높다.

해조류의 계절적 분포를 살펴보면, 봄에 출현하는 해조류는 총 219종으로 이 중 녹조 28종 (12.8%), 갈조 56종 (25.6%), 홍조류 135종 (61.6%)이고, 여름에는 총 270종으로 이 중 녹조 38종 (14.1%), 갈조 56종 (20.7%), 홍조류 176종 (65.2%)이다. 가을에는 총 181종으로 이 중 녹조 26종 (14.4%), 갈조 30종 (16.6%), 홍조류 125종 (69.1%)이며, 겨울에는 총 211종으로 이 중 녹조 29종 (13.7%), 갈조 45종 (21.3%), 홍조류 137종 (64.9%)이다.

위와 같은 분석을 바탕으로 지역적, 계절적 영향 없이 우리나라 근해에 나타나는 11종의 해조류를 일차적으로 선별하였다. 이들은 녹조류인 청각 (*Codium fragile*), 잎파래 (*Enteromorpha linza*), 구멍갈파래 (*Ulva pertusa*) 이상 3종, 갈조류인 툯 (*Hizikia fuciformis*), 모자반 (*Sargassum confusum*), 지층이 (*Sargassum thunbergii*) 이상 3종이다. 홍조류의 경우는 출현하는 종의 수가 다양하여 비단풀 (*Acrosorium polyneurum*), 누운분홍잎 (*Acrosorium yendoii*), 우뭇가사리 (*Gelidium amansii*), 보라색우뭇 (*Symphocladia latiuscula*) 이상 4종을 선별하였다. 이들 11종 중 현재 일반해면 채취 및 양식생산이 가능한 청각, 툯, 우뭇가사리 이상 3종이 산업적 활용을 위한 양식 및 일반해면 어업을 통한 생산에 적당 하리라고 판단되어진다. 이들은 해조류 생산에 지역, 계절적 영향이 적어 원료로서 안정적인 공급가능하고 표준화된 생산 기술이 확립되어 있어 해조류 산업화의 원료로서 이점이 있을 것으로 판단된다. 또한, 기존의 양식, 일반해면 어업으로 생산해오던 종이므로 현재의 생산기술을 기본으로 기술개발이 쉬워 생산량 향상이 용이할 것이다. 청각, 툯, 우뭇가사리의 산업적 이용 가능성을 분석하고, 이들의 생산이 미치는 환경적 요인들을 고려하여 생산체계를 개선해 나간다면, 해조류 기반 바이오 산업 발달을 가속화 시킬 수 있을 것이다.

## 2.4 해조류 바이오매스의 활용

### 2.4.1 해조류 유래 바이오연료

해조류 바이오매스의 바이오연료 생산에의 활용 가능성을 검토하기 위하여 우리나라 연간 가솔린 소비량 5%를 바이오에탄올 대체 시에 필요한 해조류 및 옥수수 (corn), 옥수수대 (corn stover)의 생산량과 양식면적을 Table 6과 같이 예측, 비교해 보았다. 바이오에탄올 생산 시 Fig. 1과 같이 가수분해 과정과 발효공정 등을 거침을 전제로 하였다. 2008년 기준으로 우리나라의 해조류 생산량과 양식면적은 약 93만 톤과 79,504 ha 이다 [10,12]. 이러한 기준을 바탕으로 1 ha당 우리나라의 평균 해조류 생산량을 추론하면 11.8톤이 생산됨을 알 수 있다 (Table 5). 또한 여러 논문과 통계청 자료를 참조하여 2010년 국내 단위면적당 옥수수와 옥수수대 생산량을 4.8 ton/ha로 계산되었다 [26,27]. 한국생산기술원의 보고서와 미국 NREL (National Renewable Energy Laboratory)의 2005년과 2011년에 보고한 자료에 따라 해조류바이오매스와 옥수수, 옥수수대의 각각의 에탄올 전환율을 0.185, 0.312, 0.236으로 전제하였다. 이러한 계산과 전제를 통해 우리나라 연간 가솔린 소비량의 5% 대체 시 필요한 바이오매스 양과

**Table 4.** A list of seaweed species observed in Korea <sup>a,b,c</sup>

Species	Season Coast	Spring			Summer			Fall			Winter		
		E	W	S	E	W	S	E	W	S	E	W	S
<b>Green seaweed</b>													
<i>Bryopsis maxima</i>			+			+			+				+
<i>Bryopsis plumosa</i>		+		+			+			+			+
<i>Codium adhaerens</i>		+		+	+		+	+	+			+	+
<i>Codium fragile</i>		+		+	+	+		+	+	+		+	+
<i>Enteromorpha compressa</i>		+	+	+	+		+	+	+				+
<i>Enteromorpha linza</i>		+	+	+	+	+		+	+	+		+	+
<i>Enteromorpha prolifera</i>		+		+	+		+		+	+		+	+
<i>Ulva conglobata</i>		+		+			+		+	+			+
<i>Ulva intestinalis</i>				+			+			+			+
<i>Ulva pertusa</i>		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
<i>Urospora penicilliformis</i>				+	+		+			+		+	+
<b>Brown seaweed</b>													
<i>Ecklonia cava</i>		+		+	+			+		+		+	+
<i>Hizikia fuciformis</i>			+	+	+	+	+	+	+	+		+	+
<i>Ishige sinicola</i>			+	+		+	+		+			+	+
<i>Laminaria japonica</i>			+				+		+			+	+
<i>Laminaria religiosa</i>		+			+			+				+	
<i>Sargassum confusum</i>			+	+	+	+			+	+		+	+
<i>Sargassum siliquastrum</i>			+	+	+	+		+	+			+	+
<i>Sargassum thunbergii</i>		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
<i>Sargassum yezoense</i>		+			+		+	+	+	+	+	+	+
<b>Red seaweed</b>													
<i>Acrosorium polyneurum</i>		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
<i>Acrosorium yendoi</i>		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
<i>Ahnfeltiopsis flabelliformis</i>		+	+	+		+	+	+	+	+	+	+	+
<i>Amphiroa anceps</i>		+			+			+		+		+	
<i>Amphiroa zonata</i>		+			+			+	+			+	
<i>Amphiroa ephedraea</i>				+			+			+			+
<i>Callophyllis adhaerens</i>				+			+			+			+
<i>Carpopeltis affinis</i>		+	+	+	+	+	+	+	+	+			+
<i>Carpopeltis cornea</i>		+	+	+	+		+	+	+		+		
<i>Carpopeltis crispata</i>		+			+		+	+	+		+		
<i>Ceramium japonicum</i>			+	+		+			+			+	
<i>Champia parvula</i>			+	+			+			+	+	+	+
<i>Chondracanthus intermedius</i>				+			+			+			+
<i>Chondracanthus tenellus</i>		+		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
<i>Chondria crassicaulis</i>			+	+			+	+	+	+			+
<i>Chondrus ocellatus</i>				+			+			+			+
<i>Chondrus ocellatus</i>		+			+			+	+		+	+	+
<i>Corallina pilulifera</i>		+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+
<i>Gelidium amansii</i>		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
<i>Gelidium divaricatum</i>		+	+				+	+	+	+		+	
<i>Gelidium elegans</i>				+			+			+			+
<i>Gelidium vagum</i>				+	+	+			+	+			+
<i>Gigartina tenella</i>		+		+	+	+	+	+	+	+		+	+
<i>Gracilaria asiatica</i>		+			+			+			+		
<i>Gracilaria vermiculophylla</i>			+	+		+			+			+	
<i>Grateloupia acuminata</i>		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
<i>Grateloupia elliptica</i>		+	+		+	+	+	+	+	+	+	+	+
<i>Grateloupia lanceolata</i>		+		+	+		+		+		+		+
<i>Grateloupia turuturu</i>				+		+		+	+	+	+	+	+
<i>Gymnogongrus flabelliformis</i>			+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
<i>Heterosiphonia japonica</i>		+		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
<i>Hildenbrandia rubra</i>		+		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
<i>Laurencia intricata</i>		+		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
<i>Laurencia venusta</i>				+		+	+	+	+	+	+	+	+
<i>Lithophyllum okamurae</i>		+		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
<i>Lomentaria catenata</i>				+		+	+	+	+	+	+	+	+
<i>Neorhodomela aculeata</i>			+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
<i>Pachymeniopsis lanceolata</i>		+		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
<i>Pneophyllum zostericola</i>		+	+		+	+	+	+	+	+	+	+	+
<i>Prionitis cornea</i>		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
<i>Schizymenia dubyi</i>		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
<i>Symphyocladia latiuscula</i>		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+

<sup>a</sup> collected from references [13-25]. <sup>b</sup> E: East Sea, W: West Sea, S: South Sea. <sup>c</sup> + occupied.

그에 따른 필요면적을 추정, 비교하였다 [28-30].

우리나라의 2007년 연간 가솔린 소비량은 992,900만 리

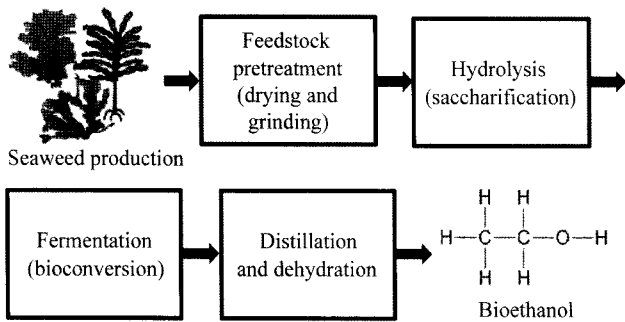
터에 해당한다 [31]. 따라서 연간 가솔린 소비량의 5%인

49,650만 리터 (약 39만 톤)의 에탄올을 생산하기 위해서는

**Table 5.** Trends of seaweed production, area of seaweed farming, and seaweed production per ha

Year	Seaweed production [10] (dry ton)	Area of seaweed farming [12,38] (ha)	Seaweed productivity (dry ton/ha)	Fold-increase in seaweed productivity
2002	507,984	69,209	7.3	1.00
2004	545,808	69,348	7.9	1.08
2006	778,667	74,757	10.4	1.42
2008	934,890	79,504	11.8	1.62

약 2,118천 톤의 해조류바이오매스 혹은 약 1,256천 톤의 옥수수 바이오매스, 약 1,660천 톤의 옥수수대 바이오매스가 필요하다. 해조류의 경우 상대적으로 낮은 에탄올 전환율에 의해 가장 많은 바이오매스가 요구된다.



**Fig. 1.** Production process of seaweed bioethanol.

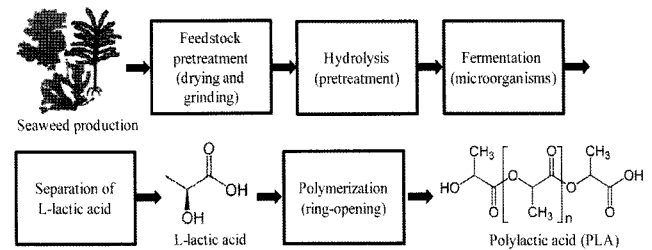
필요 바이오매스의 양을 필요면적으로 환산하면 옥수수는 261,600 ha가 옥수수대의 경우는 345,800 ha의 생산면적이 요구된다. 2010년 기준 우리나라 옥수수 생산 면적 15,528 ha 이므로 옥수수대 생산을 위한 경작지를 현재보다 20배 이상 더 개발해야 한다. 이와 같은 개발을 위해서는 다른 곡물 생산과의 경쟁이 불가피해 우리나라 국토에서 감당할 수 없는 면적으로 판단되어진다. 하지만, 해조류의 경우 옥수수대 옥수수의 연간 생산량 4.8 ton/ha의 두 배 이상인 연간 11.8 ton/ha의 해조류 생산이 가능하여 세 가지 바이오매스 중 가장 작은 필요생산면적인 179,500 ha의 해양 면적이 필요하다고 추정되어진다. 이는 제주도 면적 (184,850 ha) 정도의 크기로 우리나라의 배타적 경제 수역 (EEZ)이 22,521,400 ha임을 감안하면 전체 EEZ의 약 0.79% 면적이 필요할 것으로 계산된다.

해조류 바이오매스는 육상계 바이오매스인 옥수수와 옥수수대에 비해 두 배 이상의 월등히 뛰어난 생산성을 가질 뿐만 아니라, Table 5에서 알 수 있듯이 2002년 이후 지속적으로 단위면적당 생산량이 증가하여 가까운 미래에 더 많은 생산성이 기대되어진다. 또한, 우리나라는 해조류 생산을 위한 개발 가능한 바다가 매우 넓다는 점과 육상계 바이오매스 생산을 위한 경지개발이 힘들 점을 감안한다면, 해조류바이오매스는 우리나라에서 바이오에탄올 생산 시 기존의 육상계 바이오매스인 옥수수와 옥수수대에 비교될 수 없는 뛰어난 차세대 바이오매스라고 생각된다. 적극적인 투자를 통한 최고의 해조류 생산 기술과 세계 일류의 해조류에탄올 전환기술 및 기반시설을 개발, 구축한다면 에너지의 97%를 수입에 의존하는 우리나라에 경제적, 환경적으로 엄청난 이익을 제공하여 21세기 화두인 저탄소 녹색성장에 큰 기여할 수 있을 것

으로 판단된다.

**2.4.2 해조류 유래 바이오플라스틱**

바이오매스는 바이오플라스틱 생산 원료로도 활용이 가능하다. 대표적인 바이오 플라스틱으로 PLA (polylactic acid)를 들 수 있는데 이미 산업적으로 생산 및 판매를 하고 있다. 따라서 PLA 생산 공정을 기반으로 해조류 유래 바이오플라스틱 생산 및 그 면적을 추정하였다. PLA와 같은 기존의 바이오플라스틱은 육상계 식물 중에서도 옥수수와 같은 전분계 바이오매스를 주원료로 하여 생산된다. 그러나 비식용 자원인 해조류의 높은 탄수화물 함량을 활용한다면 Fig. 2와 같이 해조류 유래 바이오플라스틱의 생산이 가능할 것으로 판단된다 [32] (Table 1).



**Fig. 2.** Production process of seaweed-based PLA.

바이오플라스틱 생산을 위해 요구되는 해조류 및 옥수수, 옥수수대 바이오매스 생산량 및 생산 면적 또한 아래의 Table 6과 같이 계산되었다. 2010년 통계청의 품목별 광공업 생산, 출하, 재고, 내수, 수출량 자료에 의하면 2010년 우리나라 플라스틱 내수량은 약 663만 톤에 달한다 [33]. 2010년 기준 국내 플라스틱시장의 5% 점유를 위해서는 약 33만 톤의 바이오플라스틱이 생산되어야 한다. 해조류바이오매스를 이용하여 이를 생산하기 위해서는 건조중량 기준의 해조류로부터 29%의 바이오플라스틱으로의 전환이 가능하다는 전제로, 114만 톤의 해조류가 필요하리라고 추정된다 [32]. 2008년 기준으로 해조류 바이오매스 생산이 11.8 ton/ha에 달하므로, 약 96,820 ha의 해조류 생산 면적이 요구된다. 이는 제주도 면적 절반 정도의 면적으로, EEZ 면적의 약 0.42%를 차지한다.

바이오에탄올과 같이 다른 바이오매스유래 바이오플라스틱 생산 시 필요 바이오매스 양과 필요면적을 비교, 분석해보았다 [26,27]. 옥수수 바이오매스로부터 바이오플라스틱으로의 전환율이 0.87로 해조류의 전환율 0.29에 비해 높아 옥수수에 비해 월등히 높은 생산능력을 가졌음에도 옥수수 생산 필요 면적이 해조류 필요면적보다 낮았다 [34,35]. 옥수

**Table 6.** Comparison of the required area for the production of bioethanol and bioplastics from seaweed, corn and corn stover

	production capacity	biomass	conversion yield (kg/kg)	required biomass (10 <sup>3</sup> ton)	biomass productivity (ton/ha)	required area (10 <sup>3</sup> ha)
Bioethanol	391,700 ton (496,500 kL)	seaweed	0.185 [28]	2,118	11.8 [Table 5]	179.5
		corn	0.312 [29]	1,256	4.8 [26]	261.6
		corn stover	0.236 [30]	1,660	4.8 [27]	345.8
Bioplastics	331,300 ton	seaweed	0.290 [32]	1,142	11.8 [Table 5]	96.8
		corn	0.870 [34,35]	380.8	4.8 [26]	79.3
		corn stover	0.460 [36]	720.2	4.8 [27]	150.0

수대 바이오매스의 경우, 바이오플라스틱으로의 전환율이 0.46으로 비교적 우수하지만 해조류바이오매스의 절반에 미치지 못하는 생산량 때문에 해조류바이오매스 생산 필요 면적보다 약 1.5배 정도인 150,000 ha가 필요할 것으로 추정된다 [36]. 앞서 언급하였듯이 경작 가능한 경지가 부족한 우리나라에서는 옥수수대 바이오매스를 사용하기 위한 경지 개발이 매우 큰 부담으로 작용할 것으로 판단되어진다. 하지만, 적극적인 투자를 통한 해조류바이오매스로부터 바이오플라스틱으로의 최첨단 전환기술이 개발된다면, 해조류바이오매스는 바이오플라스틱 생산에서도 매우 우수하고 매력적인 바이오매스로 판단된다 (Table 6).

위의 예상을 통하여 알 수 있듯이 해조류 유래 바이오플라스틱의 대량 생산을 위한 국내 해양 면적은 충분한 것으로 판단된다. 그러나 현실적인 측면에서 산업용 해조류의 대량 생산을 위해서는 해조류 생산 기술 개발, 수확 및 운반, 공정 인프라 구축 등 해결되어야 할 부분이 남아있다. 국내 적합한 산업용 해조류 종의 선별과 대량 생산 기술, 그리고 이를 효과적으로 바이오플라스틱으로 전환하는 초일류 기술이 함께 어우러져 경제성 있는 바이오플라스틱의 생산이 가능하다면, 해조류 바이오플라스틱 산업은 한국의 녹색성장의 중요한 한 축을 담당할 수 있을 것으로 기대된다.

#### 2.4.3 해결해야 할 문제들

위의 분석을 통하여 국토가 좁은 우리나라 현실을 감안할 때 해조류 유래 바이오연료나 바이오플라스틱의 대량 생산을 위한 국내 해양 면적은 충분하여 해양바이오매스 자원을 이용하는 것이 하나의 방안이 될 수 있음을 알 수 있다. 그러나 해조류로 대표되는 해양바이오매스의 산업적 이용을 위해서는 해결해야 할 문제들이 아직 많다. 가장 대표적인 예로, 해조류 구성 당 성분의 특이성을 들 수 있다 [8,32]. 육상계 바이오매스의 대부분이 D-glucose, D-xylose, L-arabinose를 주요 구성 성분으로 하는 것과는 달리, 해조류의 경우는 L-rhamnose, L-fucose, L-galactose, 3,6-anhydro-L-galactose, 3,6-anhydro-D-galactose, D-glucuronic acid, D-mannuronic acid, L-guluronic acid 등 육상계 바이오매스에서는 거의 발견되지 않는 당들이 주요 구성 당으로 되고 있으며 종에 따라 그 구성 비율이 매우 다양하다 (Table 7 참조). 이러한 당들은 효모나 *Lactobacillus* 등 기존의 미생물이 사용하지 못하는 비발효성 당이거나 그 사용 효율이 매우 낮은 당들이다. 따라서 이들을 효율적으로 활용할 수 있는 새로운 대사 경로의 발견과 관련 유전자를 미생물 발효공정에 도입하는 기술의

개발이 이루어져야 한다. 이러한 기술이 완성된다면 해조류의 구성 당의 대부분을 효율적으로 사용하여 바이오에탄올이나 바이오플라스틱과 같은 화학제품을 생산할 수 있기 때문에 생산수율이 현재 수준보다 크게 향상 될 것으로 기대된다. 본 연구팀에서는 해조류의 비발효성당의 활용에 대해 수년간 연구하여 왔으며 조만간 그동안의 연구성과를 발표할 예정이다.

**Table 7.** Sugar compositions of land plants and seaweeds<sup>a</sup>

Carbohydrate	Land plant		Seaweed		
	Corn grain	Corn stover	<i>Ulva pertusa</i> (green)	<i>Laminaria</i> sp. (brown)	<i>Gelidium amansii</i> (red)
D-glucose	95.0	57.6	18.4	33.3	0.8
D-xylose	-	38.0	11.6	-	1.0
L-arabinose	-	4.5	-	-	-
D-mannose	-	2.5	-	-	0.7
D-galactose	-	2.9	-	-	52.1
D-mannitol	-	-	-	20.0	-
D-glucuronic acid	-	-	30.5	-	-
L-rhamnose	-	-	39.4	-	0.6
L-fucose	-	-	-	8.3	1.7
3,6-anhydrogalactose	-	-	-	-	42.9
alginic acid <sup>b</sup>	-	-	-	38.3	-

<sup>a</sup> Data from [32] (unit: wt % of total carbohydrate).

<sup>b</sup> sum of D-mannuronic acid and L-guluronic acid.

아울러 해조류 바이오매스의 대량생산 문제도 해결되어야 할 문제이다. 현재 해조류 생산은 근해 (near-shore) 중심으로 이루어지고 있는데 이러한 근해양식의 경우에는 문제점들이 비교적 잘 알려져 있으며 해결방안도 많이 제시되어 있다 [38,39]. 예를 들면, 과도하게 밀집된 공간에서의 해조류 대량생산은 병충해에 의한 피해를 급속화 할 수 있으므로 이러한 피해를 최소화할 수 있도록 생산지를 분산화 하는 시도가 필요하다. 이러한 생산지 분산화는 지역적인 영양분 고갈 문제와 그에 따른 주변 생태계 파괴를 경감시켜주는 효과도 있다. 그러나 이러한 근해양식법은 제한된 면적으로 인하여 화학산업 원료를 위한 대량생산에는 적용하는 데에는 한계가 있다. 따라서 해조류 생산 면적의 확장을 위해서는 외해 (off-shore)에서의 해조류 생산기술 개발이 요구되는 실정이다. 외해생산에 대해서는 거의 연구되지 않아 이제부터 검토해 나가야 하는 단계에 있다. 외해생산을 위해서는 해결해야 하는 많은 문제가 예상되고 있다. 먼저, 태풍과 파도, 강한 해류 등의 물리적 충격에도 해조류가 잘 고정되도록 하여야 하기 때문에 많은 엔지니어링 기술이 필요할 것으로 예상된다. 또



한 해조류 생산 과정에서 요구되는 영양분의 효과적인 공급 방법의 개발도 필요하다고 판단된다. 이러한 외해생산에 대해서는 2007년 일본에서 타당성이 검토된 적이 있으나 [40] 그 이후의 소식은 전해지지 않고 있다. 앞으로 해조류 비발효성 당의 활용기술 등 새로운 첨단 기술이 개발되어 해조류가 본격적으로 산업적으로 사용되게 되면 외해에서의 해조류 생산기술도 본격적으로 개발되기 시작할 것으로 예상된다.

### 3. 결론

우리나라는 2006년 기준 세계 4위의 해조류 생산국임에도 이에 걸맞은 해조류 자원에 대한 분석과 연구가 없었다. 앞으로 도래할 생명자원의 무기화에 대한 대비와 해조류 바이오매스의 활용위해, 이 글에서는 여러 논문들의 자료에 대해 분석 및 데이터 구축을 통해 우리나라 해조류 자원 현황을 고찰하였다.

가까운 미래에 식량자원이 무기화 되리라고 예상되어지는 가운데 우리나라는 70%의 산지로 구성되어 경작이 가능한 지상면적이 부족하다. 하지만, 우리나라는 삼면이 바다로 서남해안은 리아스식 해안과 낮은 수심 등으로 해조류 생산이 매우 유리하고 해조류 생산량 세계 4위의 기술력 등이 축적되어 해조류 바이오매스 생산기술개발 시 매우 유리한 이점이 있다. 이러한 우리나라의 상황을 파악컨대, 전분계 바이오매스와 달걀 식량자원과 경쟁이 없는 해조류 바이오매스는 우리나라에 매우 매력적인 자원이다.

따라서, 현재의 기술력과 생산량을 기준으로 바이오에탄올과 바이오플라스틱 생산 시 필요한 해조류 양과 생산면적을 우리나라 해조류 자원 현황을 기반으로 계산해보았다. 바이오 에탄올의 경우 전환율이 0.185, 바이오 플라스틱은 0.29로 각각 1 L와 1 kg 생산 시 4.3 kg과 3.4 kg의 해조류 바이오매스가 필요하리라고 판단된다. Table 6에서 알 수 있듯이 옥수수 대에 비해 뛰어난 생산성에도 낮은 전환율과 부족한 기반시설 등에 의해 경쟁력이 부족하여 당당의 산업화는 어려울 수 있다. 하지만, 전분계 바이오매스 활용을 위해 경작지 개발이 힘든 우리나라 경우, 해조류 생산기술과 전환기술의 선진화 및 개발이 충분히 이루어지고 배타적 경제수역을 개발한다면 화석 화학원료의 일부 대체가 가능할 것이다. 화석 자원 빈국인 우리나라에 이는 엄청난 이익 일뿐만 아니라 상당히 매력적인 자원이라고 할 수 있다. 우리에게 는 첨단기술의 해조류 생산 기술을 개발할 잠재력과 해조류 생산에 유리한 바다환경 등을 가지고 있으므로 해조류 바이오매스 활용기술을 투자 개발 한다면, 우리나라는 해조류기반 바이오매스분야에서 세계를 선도할 수 있을 것으로 기대된다.

### 감사

본 연구는 국토해양부의 해양과학기술연구개발사업 (해양생명공학)과 해양한국발전프로그램 (경북씨그랜트)의 지원에 의해 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

### References

1. Lee, S. B., S. J. Cho, S. Y. Lee, K. H. Peak, J. A. Kim, and J. H. Chang (2009) The marine bio/chemical industry: present and prospect. *KSBB J.* 24: 495-507.
2. OECD (2008) *Biofuel Support Policies: An Economic Assessment*. pp. 30-33. Paris, France.
3. United States Government Energy (2007) *Independence and Security Act of 2007*. pp. 110-140. USA.
4. Goh, C. S. and K. T. Lee (2010) A visionary and conceptual macroalgae-based third-generation bioethanol (TGB) biorefinery in Sabah, Malaysia as an underlay for renewable and sustainable development. *Renew. Sust. Energ. Rev.* 14: 842-848.
5. Roesijadi, G., S. B. Jones, L. J. Snowden-Swan, and Y. Zhu (2010) *Macroalgae as a Biomass Feedstock: A Preliminary Analysis*, PNNL 19944. Pacific Northwest National Laboratory, Washington, USA.
6. Korea Maritime Institute (2010) *Strategies to Industrialize the Algae Bio-business and Policy Direction*, Korea.
7. Lee, J. S. (2008) *Chemistry and Utilization of Algae*. pp. 16-45. Hyoil, Seoul, Korea.
8. Chang, J. H. (2011) *Studies on the Acid Hydrolysis of Ulva pertusa*. Master's Thesis. Pohang University of Science and Technology, Pohang, Gyungbuk, Korea.
9. Food and Agriculture Organization of the United Nations (2006) *Yearbook of Fishery Statistics Summary Tables*. [ftp://ftp.fao.org/fi/stat/summary/summ\\_06/a-5.pdf](ftp://ftp.fao.org/fi/stat/summary/summ_06/a-5.pdf).
10. Korean Fishery Information Service. <http://www.fips.go.kr>.(2010).
11. Korean Fisheries Agency (1988) *Survey Report of Coastal Fisheries*. pp. 19-22. Korea.
12. Ministry for Food, Agriculture, Forestry and Fisheries [http://www.mifaff.go.kr/list.jsp?id=27374&pageNo=1&NOW\\_YE AR=2010&group\\_id=2&menu\\_id=52&link\\_menu\\_id=&division=B&board\\_kind=C&board\\_skin\\_id=C1&parent\\_code=34&link\\_url=&depth=2&code=left&link\\_target\\_yn=N&menu\\_name](http://www.mifaff.go.kr/list.jsp?id=27374&pageNo=1&NOW_YE AR=2010&group_id=2&menu_id=52&link_menu_id=&division=B&board_kind=C&board_skin_id=C1&parent_code=34&link_url=&depth=2&code=left&link_target_yn=N&menu_name).(2011).
13. Kim, Y. H., J. K. Ahn, J. I. Lee, and H. M. Eum (2004) Effects of heated effluents on the intertidal macroalgal community near Uljin, the east coast of Korea. *Korean J. Phycol.* 19: 257-270.
14. Kim, M. S., M. R. Kim, M. H. Chung, J. H. Kim, and I. K. Chung (2008) Species composition and biomass of intertidal seaweeds in Chuja island. *Korean J. Phycol.* 23: 301-310.
15. Baek, J. M., M. S. Hwang, J. W. Lee, W. J. Lee, and J. I. Kim (2007) The macroalgal community of Bagryoungdo island in Korea. *Korean J. Phycol.* 22: 117-123
16. Choi, C. G., S. N. Kwak, and C. H. Sohn (2006) Community structure of subtidal marine algae at Uljin on the east coast of Korea. *Korean J. Phycol.* 21: 463-470.
17. Kang, P. J., Y. S. Kim, and K. W. Nam (2008) Flora and community structure of benthic marine algae in Ilkwang bay, Korea. *Korean J. Phycol.* 23: 317-326.
18. Hwang, E. K., C. S. Park, C. H. Sohn, and N. P. Koh (1996) Analysis of functional form groups in macroalgal community of Yonggwang vicinity, western coast of Korea. *J. Korean Fish. Soc.* 29: 97-106.
19. Lee, W. J., M. S. Hwang, J. M. Baek, J. W. Lee, and J. I. Kim (2007) Primary survey on algal community of Gyounggi bay for restoration. *Korean J. Phycol.* 22: 201-207.
20. Cho, T. O. and S. M. Boo (1996) Seasonal changes of marine plants in Oeyondo island on the Yellow Sea. *Korean J. Phycol.* 11: 285-293.

21. Lee, K. H., H. I. Yoo, and H. G. Choi (2007) Seasonal community structure and vertical distribution of medicinal seaweeds at Kkotji in Taean Peninsula, Korea. *Korean J. Phycol.* 22: 209-219.
22. Lee, J. W., B. G. Oh, and H. B. Lee (2000) Marine benthic algal community at Padori, west coast of Korea. *Korean J. Phycol.* 15: 111-117.
23. Lee, S. Y., J. W. Lee, and H. B. Lee (1997) Marine benthic algal flora of Yongil bay and its adjacent areas, the eastern coast of Korea. *Korean J. Phycol.* 112: 303-311.
24. Park, S. H., Y. P. Lee, Y. H. Kim, and I. K. Lee (1994) Qualitative and quantitative analyses of intertidal benthic algal community in Cheju island I. species composition and distributional patterns. *Korean J. Phycol.* 9: 193-203.
25. Lee, I. K., D. S. Choi, Y. S. Oh, G. H. Kim, J. W. Lee, K. Y. Kim, and J. S. Yoo (1990) Marine algal flora and community structure of Chongsando island on the South Sea of Korea. *Korean J. Phycol.* 6: 131-143.
26. KOSIS. [http://kosis.kr/gen\\_etl/start.jsp?orgId=101&tblId=DT\\_1ET0024&conn\\_path=I2&path](http://kosis.kr/gen_etl/start.jsp?orgId=101&tblId=DT_1ET0024&conn_path=I2&path).(2010).
27. Kim, S. and B. E. Dale (2004) Global potential bioethanol production from wasted crops and crop residues. *Biomass Bioenerg.* 26: 361-375.
28. Kim, K. S., J. H. Kim, M. K. Shin, K. M. Cho, S. Y. Kim, J. K. Sim, S. B. Kim, Y. J. Kim, M. H. Lee, S. B. Lee, and H. J. Ryu (2007) *Feasibility Study on the Utilization of Algae for the Bio-Energy Production*, 2007-N-BI17-P-01. Ministry of Commerce, Industry and Energy, Korea.
29. Wallace, R., K. Ibsen, A. McAloon, and W. Yee (2005) *Feasibility Study for Co-Locating and Integrating Ethanol Production Plants from Corn Starch and Lignocellulosic Feedstocks*, NREL/TP-510-37092. National Renewable Energy Laboratory, Washington, USA.
30. Humbird, D., R. Davis, L. Tao, C. Kinchin, D. Hsu, A. Aden, P. Schoen, J. Lukas, B. Olthof, M. Worley, D. Sexton, and D. Dudgeon (2011) *Process Design and Economics for Biochemical Conversion of Lignocellulosic Biomass to Ethanol Dilute Acid Pretreatment and Enzymatic Hydrolysis of Corn Stover*, NREL/TP-5100-47764. National Renewable Energy Laboratory, Washington, USA.
31. Index mundi, Republic Of Motor Gasoline Consumption by Year. <http://www.indexmundi.com/energy.aspx?country=kr&product=gasoline&graph=consumption>.(2007).
32. Hwang, H. J., S. Y. Lee, S. M. Kim, and S. B. Lee (2011) Fermentation of seaweed sugars by *Lactobacillus* species and its potential as a biomass feedstock. *Biotechnol. Bioprocess Eng.* accepted.
33. KOSIS. [http://kosis.kr/gen\\_etl/start.jsp?orgId=101&tblId=DT\\_1F05012&conn\\_path=I2&path](http://kosis.kr/gen_etl/start.jsp?orgId=101&tblId=DT_1F05012&conn_path=I2&path).(2010).
34. Nagarjun, P. A., R. S. Rao, S. Rajesham, and L. V. Rao (2005) Optimization of lactic acid production in SSF by *Lactobacillus amylovorus* NRRL B-4542 Using Taguchi Methodology. *J. Microbiol.* 43: 38-43.
35. McAloon, A., F. Taylor, W. Yee, K. Ibsen, and R. Wooley (2000) *Determining the Cost of Producing Ethanol from Corn Starch and Lignocellulosic Feedstocks*, NREL/TP-580-28893. National Renewable Energy Laboratory, Washington, USA.
36. Cui, F., Y. Li, and C. Wan (2011) Lactic acid production from corn stover using mixed cultures of *Lactobacillus rhamnosus* and *Lactobacillus brevis*. *Bioresour. Technol.* 102: 1831-1836.
37. Kraan, S. (2010) Mass-cultivation of carbohydrate rich macroalgae, a possible solution for sustainable biofuel production. *Mitig. Adapt. Strateg. Glob. Change*, in press, DOI 10.1007/s11027-010-9275-5.
38. KOSIS. [http://kosis.kr/gen\\_etl/start.jsp?orgId=114&tblId=TX\\_12321\\_A000&conn\\_path=I2&path](http://kosis.kr/gen_etl/start.jsp?orgId=114&tblId=TX_12321_A000&conn_path=I2&path).(2011).
39. Titlyanov Kraan, S. and T. V. Titlyanova (2010) Seaweed cultivation: methods and problems. *Russ. J. Mar. Biol.* 36: 227-242.
40. Aizawa, M., K. Asaoka, M. Atsumi, and T. Sakou (2007) Seaweed bioethanol production in Japan - The Ocean Sunrise Project. *Proceedings of Oceans 2007*, pp. 1-5. DOI 10.1109/OCEANS.2007.4449162.