

방사무늬김 (*Porphyra yezoensis* Ueda)의 영양염과 이산화탄소 흡수율 정밀 평가를 통한 양식해역의 질소와 탄소 요구량 산정

심정희* · 황재란¹ · 이상용² · 권정노

국립수산과학원 어장환경과,
¹부산대학교 해양학과, ²국립수산과학원 해조류바이오연구센터

Variations in Nutrients & CO₂ Uptake Rates of *Porphyra yezoensis* Ueda and a Simple Evaluation of *in situ* N & C Demand Rates at Aquaculture Farms in South Korea

JeongHee Shim*, Jae Ran Hwang¹, Sang Yong Lee² and Jung-no Kwon

Marine Environment Research Division, NFRDI, Busan 619-705, Korea

¹Marine Sciences Department, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

²Seaweed Research Center, NFRDI, Mokpo 530-420, Korea

Abstract - In order to understand the contribution of seaweed aquaculture to nutrients and carbon cycles in coastal environments, we measured the nutrients & carbon uptake rates of *Porphyra yezoensis* Ueda sampled at Nakdong-River Estuary using a chamber incubation method from November 2011 to April 2012. It was observed that the production rate of dissolved oxygen by *P. yezoensis* (n=30~40) was about $68.8 \pm 46.0 \mu\text{mol g}_{\text{FW}}^{-1} \text{h}^{-1}$ and uptake rate of nitrate, phosphate and dissolved inorganic carbon (DIC) was found to be $2.5 \pm 1.8 \mu\text{mol g}_{\text{FW}}^{-1} \text{h}^{-1}$, $0.18 \pm 0.11 \mu\text{mol g}_{\text{FW}}^{-1} \text{h}^{-1}$ and $87.1 \pm 57.3 \mu\text{mol g}_{\text{FW}}^{-1} \text{h}^{-1}$, respectively. There was a positive linear correlation existed between the production rate of dissolved oxygen and the consumption rates of nitrate, phosphate and DIC, respectively, suggesting that these factors may serve as good indicators of *P. yezoensis* photosynthesis. Further, there was a negative logarithmic relationship between fresh weight of thallus and uptake rates of nutrients and CO₂, which suggested that younger specimens (0.1~0.3 g) were much more efficient at nutrients and CO₂ uptake than old specimens. It means that the early culturing stage than harvesting season might have more possibilities to be developed chlorosis by high rates of nitrogen uptake. However, N & C demanding rates of Busan and Jeollabuk-do, calculated by monthly mass production and culturing area, were much higher than those of Jeollanam-do, the highest harvesting area in Korea. Chlorosis events at Jeollabuk-do recently might have developed by the reason that heavily culture in narrow area and insufficient nutrients in maximum yield season (Dec.~Jan.) due mostly to shortage of land discharge and weak water circulation. The annual DIC uptake by *P. yezoensis* in Nakdong-River Estuary was estimated about $5.6 \times 10^3 \text{ CO}_2 \text{ ton}$, which was about 0.03% of annual carbon dioxide emission of Busan City. Taken together, we suggest more research would be helpful to gain deep insight to evaluate the roles of seaweed aquacul-

*Corresponding author: JeongHee Shim, Tel. 051-720-2543,
Fax. 051-720-2515, E-mail. jshim@korea.kr

ture to the coastal nutrients cycles and global carbon cycle.

Key words : laver, *Porphyra yezoensis* (*Pyropia yezoensis*), nutrients, carbon dioxide (CO₂), chlorosis

서 론

우리나라 양식 김의 연간 생산량과 생산금액은 1990년대 초 10만 톤과 1,000억 원 규모에서 2010년대 초에는 30만 톤과 2,500억 원 규모로 성장하였다. 그 결과 김은 해조류 총생산량의 25~40%, 총생산금액의 60~80%를 차지하는 명실공히 양식산업의 대표 품종이라 할 수 있다. 양식 김을 생산하는 어장은 영양염류가 풍부한 서해와 남해에 주로 분포한다. 인천광역시부터 전라남도 완도까지 서해안 전체에 김 어장이 분포하고 있으며, 남해안에는 부산(경상남도 포함)의 낙동강하구에 분포한다. 2003년부터 2013년까지 10년간 평균 생산량을 보면, 전라남도의 김 생산이 우리나라 전체의 약 71%를 차지하며, 전라북도가 약 11% 그리고 경기도와 부산이 각각 약 7%를 차지하고 있다.

김을 비롯한 해조류의 광합성과 성장에는 무기탄소와 영양염류(질소, 인, 규산) 그리고 미량원소 등이 필요하다(DeBoer 1981; Lobban and Harrison 1994). 해양에 존재하는 무기탄소계 성분(HCO₃⁻, CO₃⁻², CO₂)의 평균 농도는 2000 μmol kg⁻¹ 이상으로 풍부하여 해조류 생장의 제한요소로 작용하지 않는다. 오히려 해조류에 의한 이산화탄소흡수는 대기의 이산화탄소를 흡수하는 해양의 생물펌프(biological pump) 효율을 높이므로, 해양의 이산화탄소 흡수율 산정 시 해조류에 의한 기여를 추가할 필요가 있다. 한편 해조류의 이산화탄소 흡수율은 기본적으로 종별, 성장단계별, 생리특성 등에 따라 다름에도 불구하고(Shim *et al.* 2010; Hwang *et al.* 2011) 기존에는 광합성에 의한 용존산소 발생과 영양염 흡수율 등으로 간접 추정하여 직접 측정에 의한 흡수율 결과가 거의 없는 실정이다. 이에 비해, 질산염을 비롯한 영양염은 해역 환경특성과 시기에 따라 결핍될 수 있는 성분이므로, 직접 배양을 통한 흡수 특성과 성장 등에 관한 연구결과가 보고되고 있다(Ozaki *et al.* 2001; Kim *et al.* 2007; Rees 2007). 그러나 일부 연구에서는 자연환경에서 거의 관측되지 않는 농도에서 배양한 결과를 흡수율로 산정한 경우도 있으므로, 현장에 적용하기 위해서는 최대한 자연환경과 유사한 조건에서 측정할 필요성이 있다. 특히 김의 경우 질산염이 부족하면, 엽체가 노란빛을 띠는

황백화 현상이 발생한다. 최근 들어 우리나라에도 황백화 현상에 의한 대규모 피해사례가 보고되어, 이에 대한 원인규명과 대책이 필요하다. 2010/11년 시기에 서해중부부터 서해남부에 이르는 해역의 약 15,000 ha에서 김 황백화 현상이 발생하여 약 278억원의 피해가 발생하였으며, 2011/12년, 2012/13년에도 지역에 따라 황백화가 발생되고 피해가 보고되었다(NFRDI 2012). 일본에서도 2000년대부터 이 같은 질산염부족에 의한 김 황백화 사례가 보고된 바 있으며(Matsuoka *et al.* 2005; Hori *et al.* 2008; Tada *et al.* 2010), 그 원인으로 육상에서의 공급부족, 식물플랑크톤과의 영양염 경쟁, 수층 혼합 약화, 과밀 양식 등을 제시하고 있다.

본 연구에서는 우리나라 양식 김의 대표 종인 방사무늬김(*Porphyra yezoensis*)을 대상으로 영양염과 이산화탄소 흡수율을 직접 측정하고 이를 바탕으로 김 어장에 필요한 질산염과 이산화탄소의 양을 해역 별로 산정하고자 한다. 본 연구 결과는 김 양식활동이 연안의 물질순환에 기여하는 정도를 평가하고, 황백화 관련 정책 수립과 수산업분야 온실가스배출/흡수 산정에 기초자료로 활용할 수 있을 것이다.

재료 및 방법

1. 방사무늬김 시료 채집

방사무늬김(*P. yezoensis* Ueda)은 성장이 빠르고 생존력이 강한 특징으로 양식 품종으로 널리 확대되고 있는 추세이다(Yoo 2003). 방사무늬김의 영양염과 이산화탄소 흡수율 및 광합성 특성을 측정하기 위해, 낙동강하구에 위치한 부산시 강서구 명지어촌계 양식장에서 2011년 11월부터 2012년 4월까지 총 7회에 걸쳐 시료를 채집하였다(Table 1). 양식현장에서 채집한 방사무늬김은 실험실로 옮겨, 이물질과 부착생물을 제거하고 해조류의 기초적 형태 특성인 엽장, 엽폭, 생중량 등을 측정하고 배양을 위해 수조에서 순응시켰다. 배양실험은 김의 현장에서의 생리상태를 반영하기 위해 채집 후 1~3일 내에 실시하였으며, 7회 채집한 시료 중 약 30~40개체(1회 채집 시료에 대해 평균 4~8개체)에 대해 실시하였다.

Table 1. Experimental conditions and morphological characteristics of *Porphyra yezoensis*

	Parameter	Range
Environmental conditions and chemical properties	Media	filtered seawater+N, P added
	Duration	~ 6 h
	Irradiance ($\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	85 ~ 100 (average)/120 ~ 150 (top)
	Salinity (psu)	33.6 ~ 34.3
	Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	14.0 ~ 20.0
	Nitrate ($\mu\text{mol L}^{-1}$)	17 ~ 25
	Phosphate ($\mu\text{mol L}^{-1}$)	1.2 ~ 2.0
Sampling and morphological characteristics of <i>P. yezoensis</i> incubated	Sampling site	Nakdong-River Estuary, Busan, Korea
	Sampling date	14 th Nov., 6 th Dec. 2011, 27 th Jan., 8 th Feb., 8 th and 22 nd Mar. and 9 th Apr. 2012
	Total Length (cm)	6.2 ~ 26.5
	Total Width (cm)	0.3 ~ 11.0
	Weight/surface area (mg FW cm^{-2})	1.4 ~ 11.1

2. 배양 환경

방사무늬김의 엽체 배양에는 아크릴로 만든 둥근 관이 두 층(two-layer)으로 구성된 챔버(chamber)를 사용하였다(Fig. 1). 배양 챔버는 해조류를 배양하는 내부 공간(높이 8 cm × 직경 9 cm, 부피 약 0.5 liter)과 온도 조절용 순환수가 흐르는 외부 공간이 있으며, 뚜껑에는 용존산소와 pH센서를 장착할 수 있는 센서 연결부가 설치되어 있다(Shim *et al.* 2010). 김 엽체의 배양은 평균 85 ~ 100 $\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 의 조도에서 6시간 진행하였으며, 한번에 2개 또는 4개의 배양용기를 사용하여 반복구를 두었다. 배양해수는 실험실로 공급되는 해수를 GF/F로 여과한 후 멸균(120 $^{\circ}\text{C}$, 1시간)하였으며, 질산염과 인산염은 배양 조건(Table 1)에 비해 부족할 경우 인위적으로 첨가하여 두 성분이 제한요인으로 작용하지 않게 하였으며, 나머지 성분(규산염 등)은 실험실로 공급되는 해수의 농도를 그대로 유지하였다(평균 농도; Nitrate 20.7 \pm 1.6 μM , Nitrite 0.1 \pm 0.0 μM , Ammonium 0.9 \pm 0.4 μM , Phosphate 1.3 \pm 0.5 μM , Silicate 12.6 \pm 2.2 μM).

3. 측정 및 분석

배양 해수의 염분과 수온은 CTD (Ocean Seven 304 CTD, IDRONAUT S.r.l., Italy)를 사용하여 연속 측정하였다. 용존산소와 pH는 배양용기 뚜껑에 각각의 센서를 장착하여 실시간 변화를 연속 관측하였다. 용존산소는 Unisense사(Denmark)의 OX25 마이크로 센서로 상대포화도를 측정하였으며, pH는 Orion사(미국)의 유리전극(Ross Ultra Electrode 8102BNUWP)을 버퍼용액으로 교정 후 사용하였다. 배양용기 내 광량은 배양 실험 시작과 종료 시 배양용기 위와 아래에서 광도계(Photo/Radiometer, Delta OHM HD2102.2, Italy)로 측정하였다.

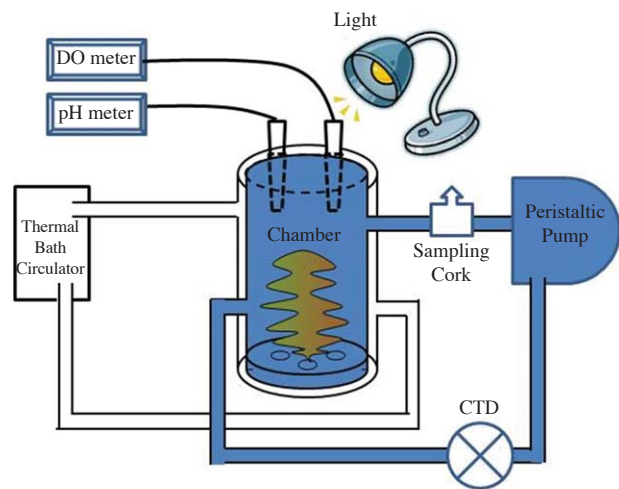


Fig. 1. Schematic diagram of an acrylic chamber system for macroalgae culture. Two-layer chamber was consisted with inner incubated water and outer circulated water. The incubated water was monitored continuously using DO and pH electrodes, as well as a mini CTD system (modified from Shim *et al.* 2010).

방사무늬김을 배양함에 따른 해수 성분변화를 파악하기 위해, 배양 시작과 종료 시 배양수를 채수하여 용존산소, 영양염, 총알칼리도(Total alkalinity)를 측정하여 그 차이를 계산하였다. 용존산소는 정밀측정기(Dosimat 876 system, Metrohm, Switzerland)를 사용하여 Winkler 법으로 분석하였으며(Parsons *et al.* 1984), 영양염은 자동분석기(QuAAtro system with 4 channel, BranLuebbe, Germany)로 분석하고 OSIL (Ocean Scientific International Ltd.)사와 Wako사(일본)의 표준물질로 검정하였다. 총알칼리도는 개방형 용기법을 적용하여 정밀 측정하였으며, 미국 스크립스 해양연구소(Scripps Institute of Oceanography)의 A. Dickson 박사 실험실에서 제작한 표준물질(CRM

Batch #99과 #113)로 검정하였다 (Dickson *et al.* 2007; KORDI 2010). 용존무기탄소 (Dissolved inorganic carbon, DIC)는 총알칼리도와 pH로부터 계산하였다 (<http://cdiac.ornl.gov/ftp/co2sys>, Lewis and Wallance 1998).

4. 질소와 탄소 요구량 산정

김 양식 해역 별로 질소와 탄소 요구량은 현존량, 흡수율 등을 이용해 다음의 식으로 계산하였다.

원소 요구량 ($\text{mol ha}^{-1} \text{d}^{-1}$) = 현존량 (kg ha^{-1}) \times 원소 흡수율 ($\text{mol kg}_{\text{FW}}^{-1} \text{h}^{-1}$) $\times 12 (\text{h d}^{-1})$

이때, 현존량은 각 지지체에서 생산되는 월별 김 생산량과 면허면적으로 계산하였으며, 원소 흡수율은 김 업체 배양실험에서 얻은 평균값을 사용하였다. 그리고 하루에 광합성이 가능한 시간을 약 12시간이라고 가정하였다.

결과 및 고찰

1. 배양해수 내 환경인자 변화

배양수의 수온은 시기에 따라 약 14.0~20.0°C 범위로 설정하고 배양시간 동안 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 이내로 지속되게 하였으며, 인공해수의 염분은 33.6~34.3 psu 범위로 일정하게 (± 0.005 psu 이내) 유지시켰다. 2011/12년과 2012/13년 11월~5월의 김 양식시기에 낙동강하구에서 조사한 수온과 염분은 각각 8.1~21.9°C (평균 13.2°C)와 21.2~33.9 (평균 29.9) 범위로 배양수의 수온과 염분 범위와 거의 일치한 것을 알 수 있었다. 2011년 1~3월 동안 완도와 진도해역 김 양식장의 수온과 염분은 각각 3.0~11.3°C와 32.7~34.7 범위로 (Kim *et al.* 2012) 낙동강하구에 비

해 수온은 다소 낮고 염분은 다소 높은 경향이었으나, 본 연구는 2년에 걸쳐 봄까지 포함된 결과여서 분포 범위가 넓게 나타난 것으로 판단되었다.

챔버에 장착된 센서로 연속측정한 용존산소와 pH는 여러 번 배양에서의 결과를 각각 하나의 그래프로 나타내었다 (Fig. 2). 배양시간이 경과함에 따라 용존산소 상대포화도는 배양기간 지속적으로 증가하는 경향이였다. 실험 시작 시 배양수의 포화도는 약 100%에서 출발하여 시간에 따라 점차 상승하여 배양 종료 시 (약 6시간 후) 140~260% 범위를 보였으며, 평균 약 200%에 도달하였다. 이와 같이 배양수의 용존산소 상대포화도가 높아지는 것은 김의 광합성활동으로 생성된 산소 증가에 의한 결과이며, 각 배양챔버별로 포화도 차이가 나타난 것은 배양에 이용된 김 시료의 생중량과 개체별 광합성율 차이에 인한 것이다. 김의 광합성활동으로 인한 이산화탄소와 영양염류 등의 감소는 pH도 변화하게 하는데, Fig. 2와 같이 배양수의 pH가 시간에 따라 점차적으로 상승한 것을 알 수 있다. 배양수의 pH는 초기 약 8.0~8.2에서 종료 시 8.2~9.0까지 증가하였으며, 평균 약 8.4에 도달하였다. 용존산소 포화도와 마찬가지로 챔버 내 김의 생중량과 광합성율의 차이 등으로 pH의 변화에도 차이가 있었던 것으로 생각된다. 이처럼 배양 챔버 내의 용존산소 포화도와 pH가 동시에 증가하는 것은 김의 광합성활동에 의한 것임을 유추할 수 있다.

한편, 김 배양을 시작할 때와 끝날 때 각각 채수한 해수에서 용존산소와 영양염을 분석하여 그 변화를 정량적으로 파악하였으며, 용존무기탄소의 변화도 총알칼리도와 pH로부터 계산하여 파악하였다. 김 배양 전 후의 해수에서 적정법으로 측정한 용존산소는 실시간 모니터링 결과와 마찬가지로 실험 후 증가하였으며, 실험 전 후의 농도 차이는 평균 $4.9 \pm 2.3 \text{ mg O}_2 \text{ L}^{-1}$ 를 나타내었다.

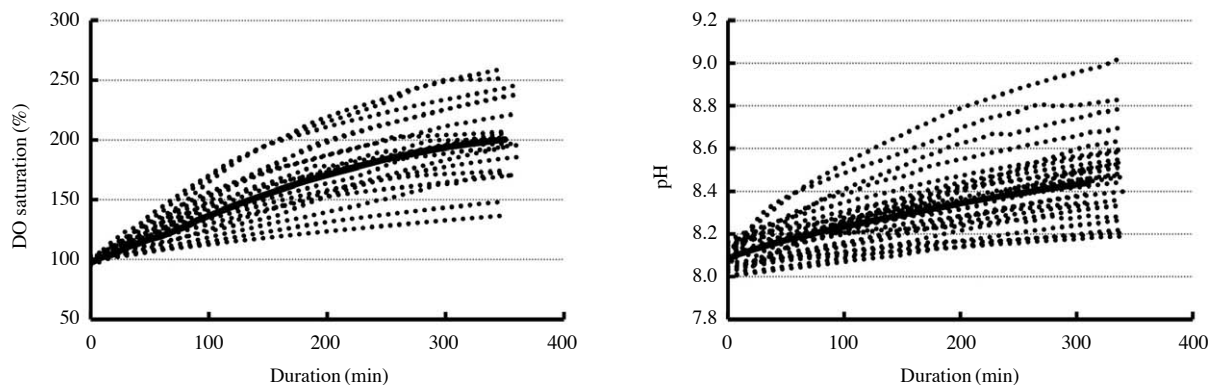


Fig. 2. Results of real-time monitoring on saturation of dissolved oxygen and pH during incubation experiment of *Porphyra yezoensis*. Solid line is an average of total experiments and dotted lines are results of each experiment.

영양염 중 질산염은 약 6시간의 배양시간 동안 평균 6.1 $\mu\text{mol L}^{-1}$ 이 감소하였으며, 김의 채집시기와 중량에 따라 0.8~20.1 $\mu\text{mol L}^{-1}$ 의 감소 범위를 보였다. 배양수의 인산염은 평균 0.46 $\mu\text{mol L}^{-1}$ 감소하였으며 그 변화 범위는 0.10~0.82 $\mu\text{mol L}^{-1}$ 이었다. 한편, 결과에 제시하지는 않았지만 규산염의 경우는 배양 전·후에 농도 변화가 거의 없었으며, 이는 배양하는 동안 김은 질산염과 인산염은 활발히 이용하지만 규산염은 거의 이용하지 않음을 의미한다. 배양수의 용존무기탄소(DIC)농도는 배양시간 동안 평균 219.8 $\mu\text{mol kg}^{-1}$ 감소하였으며 그 변화 범위는 11.8~582.8 $\mu\text{mol kg}^{-1}$ 이었으며, 이때 해수의 이산화탄소분압($f\text{CO}_2$) 변화는 10~838 μatm 범위를 보였다. 이처럼 배양 해수 중 용존무기탄소를 비롯한 $f\text{CO}_2$ 농도의 감소는 김의 광합성활동에 이산화탄소가 활발히 사용되었음을 의미하며, 이러한 연구를 바탕으로 대기 이산화탄소 감소에 해조류의 역할이 고려되어야 할 것으로 생각된다. 이와 같이 김의 활발한 광합성에 의해 배양수의 용존산소와 pH는 증가하고, 영양염류 및 무기탄소가 감소하는 것을 파악할 수 있었다.

2. 영양염과 탄소 흡수 특성

방사무늬김을 배양하는 동안 변화한 용존산소와 영양염, 무기탄소에 대해 생중량(fresh weight) 당 생산/흡수율을 계산하였다. 부산시 강서구 낙동강하구에서 11~4월에 생산되는 방사무늬김의 용존산소 평균 생산율은 $68.8 \pm 46.0 \mu\text{mol g}_{\text{FW}}^{-1} \text{h}^{-1}$ 였으며, 무기탄소, 질산염 그리고 인산염의 평균 소모(흡수)율은 각각 $87.1 \pm 57.3 \mu\text{mol g}_{\text{FW}}^{-1} \text{h}^{-1}$, $2.5 \pm 1.8 \mu\text{mol g}_{\text{FW}}^{-1} \text{h}^{-1}$, $0.18 \pm 0.11 \mu\text{mol g}_{\text{FW}}^{-1} \text{h}^{-1}$ 로 나타났다(Table 2). 김 개체에 따라 용존산소 생산율과 무기탄소 소모율의 최소/최대비는 30~36배였으며, 질산염과 인산염도 각각 36배와 20배 차이를 보였다.

식물이 광합성을 할 때 필요한 탄소와 영양염은 일반적으로 Redfield 비(C:N:P=106:16:1)와 유사한 비율로 흡수된다고 알려졌지만(DeBoer 1981), 이는 미세조류의 경우이고 Lobban and Harrison(1994)에 의하면 해조류는 Redfield비에 비해 탄소가 좀 더 높은 비율로 흡수

되어 그 비는 C:N:P=550:30:1라 하였다. 방사무늬김의 경우 탄소와 영양염 흡수비율은 약 C:N:P:O₂=106:3.0:0.2:83.7(492:14:1:388)로 나타났다. 이는 Redfield비(C:N:P=106:16:1)에 비해 탄소는 높은 비율로 흡수되고 질소와 인은 약 5배 낮게 흡수된 반면, Lobban and Harrison(1994)이 제시한 해조류의 흡수비율과는 탄소는 매우 유사하나 질소가 다소 낮은 것을 알 수 있었다. 실제 해양에서도 해조류에 의한 영양염 흡수는 생체가 필요로 하는 농도와 해수 중 영양염 농도가 달라 수배에서 수십 배 이상 차이가 난다. 특히 외양이나 연안에서도 계절에 따라 낮은 영양염 환경에 해조류가 노출되어도 비교적 양호한 상태를 유지하는데, 이는 영양염이 높을 때 체내로 빠르게 축적하였다가 이후에(영양염이 낮을 때) 사용하는 능력이 있기 때문이다(Thomas and Harrison 1985; Harrison *et al.* 1986; Pedersen and Borum 1996; Young *et al.* 2009). 김이 채집된 낙동강하구의 2011/12년과 2012/13년의 11~5월에 조사한 결과에 의하면, 용존무기질소와 무기인의 농도는 각각 8.9~78.6 $\mu\text{mol L}^{-1}$ (평균 30.7 $\mu\text{mol L}^{-1}$), 0.1~1.4 $\mu\text{mol L}^{-1}$ (평균 0.5 $\mu\text{mol L}^{-1}$)로 비교적 풍부하게 유지되었다(Kwon *et al.* 2013). 특히 질소성분은 황백화를 유발하는 5 $\mu\text{mol L}^{-1}$ (0.07 mg L⁻¹) 이하로 낮아진 경우가 거의 없었으며, 염분이 낮을(<~28 psu)때 아주 높은 농도(>~35 $\mu\text{mol L}^{-1}$)를 나타내어, 강우와 하구댐 방류 등으로 질소가 풍부하게 공급되는 것으로 파악되었다. 그 결과 낙동강 하구해역에서는 김 황백화에 의한 피해가 거의 없었던 것으로 생각된다. 본 연구에서 방사무늬김의 질산염과 인산염 흡수율이 비교적 낮게 나타난 것은 실험에 사용된 낙동강하구에서 채집된 김의 경우 체내에 영양염이 풍부하게 저장되어 나타난 결과인 것으로 생각되며, 이에 대해 추후 영양염이 결핍된 김(예를 들어 황백화가 발생한 김 엽체)을 대상으로 실험을 통해 검증할 필요가 있을 것으로 생각된다.

김에 의한 영양염 흡수율은 Redfield비에 비해 상대적으로 낮았지만, 용존산소와 탄소성분과의 상관성은 비교적 높게 나타났다(Fig. 3). 김의 용존산소 생산율과 질산염, 인산염, 용존무기탄소(DIC) 흡수율은 각각 양의 선형

Table 2. Uptake/production rates of nitrate+nitrite, phosphate, total dissolved inorganic carbon and dissolved oxygen by *Porphyra yezoensis* from Nakdong-River Estuary, Busan, Korea

	Average	Min. value	Max. value
DO ($\mu\text{mol g}_{\text{FW}}^{-1} \text{h}^{-1}$)	68.8 ± 46.0	5.4	196.2
Nitrate+Nitrite ($\mu\text{mol g}_{\text{FW}}^{-1} \text{h}^{-1}$)	2.5 ± 1.8	0.3	10.8
Phosphate ($\mu\text{mol g}_{\text{FW}}^{-1} \text{h}^{-1}$)	0.18 ± 0.11	0.04	0.76
DIC ($\mu\text{mol g}_{\text{FW}}^{-1} \text{h}^{-1}$)	87.1 ± 57.3	13.3	420.4

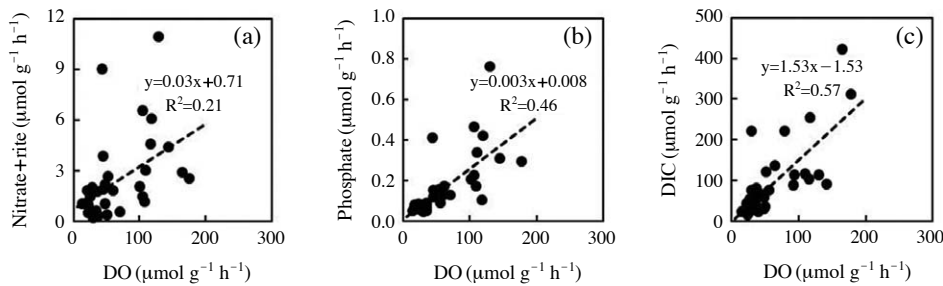


Fig. 3. Correlations between production rates of dissolved oxygen and uptake rates of nitrate+nitrite (a), phosphate (b) and dissolved inorganic carbon (c) by *Porphyra yezoensis*.

Table 3. Nitrate, phosphate and carbon uptake rates of *Porphyra yezoensis* compared with data from other macroalgae

Species	Nitrate+Nitrite	Phosphate	Carbon	Reference
	(μmol g _{FW} ⁻¹ h ⁻¹)			
<i>Ulva pertusa</i>	0.64			Jun and Chung (1996)
<i>Laminaria digitata</i>			9~20	Tyler & McGlathery (2006)
<i>Undaria pinnatifida</i>	0.14	0.02	7.90	Shim <i>et al.</i> (2010)
<i>Saccharina japonica</i>	0.23	0.02	8.90	Hwang <i>et al.</i> (2011)
<i>Porphyra linearis</i>	0.9~2.1 ^{*a}			Kim <i>et al.</i> (2007)
<i>Porphyra yezoensis</i>	2.47	0.18	87.13	This study
	(nmol cm ⁻² h ⁻¹)			
<i>Saccharina japonica</i>	40~90	2.5~9.0		Ozaki <i>et al.</i> (2001)
<i>Kjellmaniella crassifolia</i>	14~110	0.8~9.0		Ozaki <i>et al.</i> (2001)
<i>Undaria pinnatifida</i>	~8.3	~0.9	~363	Shim <i>et al.</i> (2010)
<i>Saccharina japonica</i>	19.4	1.5	600	Hwang <i>et al.</i> (2011)
<i>Porphyra yezoensis</i>	11.5	0.8	380	This study

*a: based on dry weight (μmol g_{DW}⁻¹ h⁻¹)

관계를 나타내었으며 이는 김의 성장 및 생산에 필수 요소인 질산염, 인산염, 무기탄소가 많이 소모될수록 결과 물질인 용존산소가 더 많이 발생한다는 것을 의미한다. 특히 용존산소 생산율과 무기탄소 흡수율은 높은 상관관계 ($r^2=0.57$)에 있었으며 이는 두 성분이 상대성분에 대해 간접적인 지표가 될 수 있음을 보여준다. 또한 질산염과 인산염 흡수율도 용존산소 생산율과 비교적 의미있는 상관관계 ($r^2=0.21\sim0.46$)를 나타내어 김의 광합성 및 성장과 밀접한 관련이 있음을 파악할 수 있었다. Lin *et al.* (2008)은 Alaskan *Porphyra* 사상체를 대상으로 한 실험에서 광합성율과 용존산소 발생율이 매우 관련성이 높으며, 용존산소 발생율은 $83\sim240\ \mu\text{mol g}_{\text{DW}}^{-1}\ \text{h}^{-1}$ 범위라 하였다. Alaskan *Porphyra*의 엽체가 아닌 사상체를 대상으로 하였지만, 방사무늬김의 건중량당 평균 산소발생율 $330\ \mu\text{mol g}_{\text{DW}}^{-1}\ \text{h}^{-1}$ 에 비하면 다소 낮은 것을 알 수 있었다.

홍조류에 속하는 방사무늬김의 영양염과 탄소흡수율을 여러 해조류와 비교하였다(Table 3). 생중량(fresh weight,

FW)을 기준으로 방사무늬김의 영양염과 탄소흡수율은 녹조류나 갈조류(미역(*Undaria pinnatifida*), 다시마(*Saccharina japonica*) 등)에 비해 4~10배 높은 흡수율을 보였으며, 특히 같은 홍조류인 긴잎돌김(*P. linearis*) 보다는 높았다. 이는 갈조류에 비해 방사무늬김의 엽체 두께가 얇고, 조직성분에 엽록소비율이 높아, 적은 중량으로도 높은 광합성효율을 보이기 때문이다. 그리고 단위면적당 영양염과 탄소의 흡수율을 비교하면, 방사무늬김은 다시마보다는 낮으나 미역과 유사한 범위를 보였다. 미역 생체의 단위면적당 중량이 약 $52\ \text{mg cm}^{-2}$ 인 반면 김은 이의 1/10인 약 $5.4\ \text{mg cm}^{-2}$ 인 것을 고려하면 단위 면적당 영양염류의 흡수율도 매우 높은 것을 알 수 있으며, 이는 김 엽체를 구성하는 세포 특성에 의한 것으로 생각된다. 한편 Kim *et al.* (2007)이 제시한 홍조류 긴잎돌김의 질소 흡수율은 암모니아농도 $25\ \mu\text{mol L}^{-1}$ 와 수온 $10\sim20^\circ\text{C}$ 조건에서 약 1~2주 배양하여, 배양 전후의 생체 중 질소성분차이로 측정된 것이다. 따라서 배양수의 영양염 농도 차이를 측정된 본 연구와 방법적으로 다소 다르지

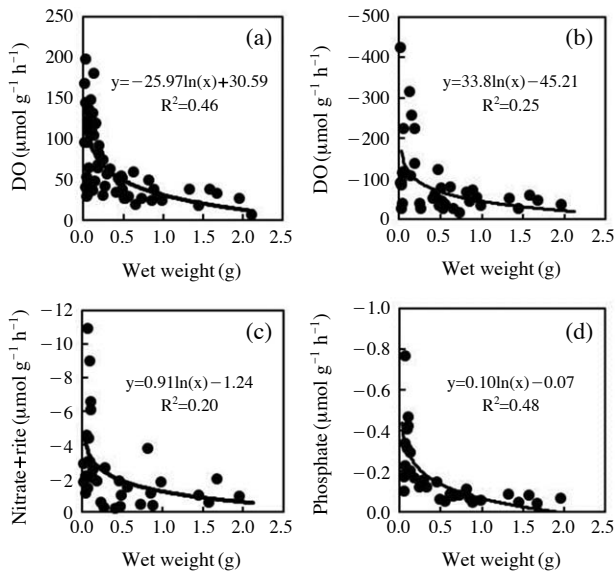


Fig. 4. Relationships between total fresh weight of *Porphyra yezoensis* and production/uptake rates of dissolved oxygen (a), dissolved inorganic carbon (b), nitrate+nitrite (c) and phosphate (d).

만 그 의미는 비슷하다고 할 수 있다. 두 종류의 김에 대한 질소 흡수율을 비교하기 위해 방사무늬김의 건조 무게로 질산염 흡수율을 계산하면 약 $12.0 \mu\text{mol g}_{\text{DW}}^{-1} \text{h}^{-1}$ 으로, 긴잎돌김보다 약 6배 높았다. 따라서 방사무늬김은 해조류 중에서 단위 질량당 영양염과 탄소 흡수율이 아주 높은 것으로 파악되며, 이는 방사무늬김을 식품으로 섭취하였을 때 양질의 영양분을 제공받을 수 있는 근거가 될 것이다.

방사무늬김의 성장을 간접 지시하는 중량에 따른 영양염과 탄소흡수율 변화를 살펴보았다 (Fig. 4). 김의 생중량이 증가할수록 용존산소 생산율, 질산염과 인산염, 용존무기탄소 흡수율은 각각 로그 함수적으로 감소하였다. 김 개체의 중량이 약 0.2~0.3 g 이하일 경우 산소발생율이 $100 \mu\text{mol g}_{\text{FW}}^{-1} \text{h}^{-1}$ 이상으로 아주 높게 나타났으나, 그 이상의 중량에서는 $50 \mu\text{mol g}_{\text{FW}}^{-1} \text{h}^{-1}$ 이하로 낮았다. 영양염과 무기탄소 흡수율에서도 이와 비슷한 경향을 보였다. 채집한 김의 생중량은 표면적 ($r^2=0.94$), 폭 ($r^2=0.71$), 밀도 ($r^2=0.68$)와 높은 상관성을 보인 반면, 길이와는 상관성이 거의 없었다. 따라서 김의 어린엽체가 성장하여 폭과 밀도가 증가할수록 광합성효율이 상대적으로 낮아지는 것을 알 수 있었다. 이 같은 경향은 미역, 다시마와 같은 갈조류에서도 비슷하게 관찰되는 현상으로 (Shim *et al.* 2010; Hwang *et al.* 2011), 어린엽체의 생산/흡수율이 성체에 비해 효율적임을 의미하며, 이는 엽

체를 구성하는 조직 중 비광합성 조직 (non-photosynthetic tissues) 비율이 증가하거나 장기간 외부 환경 노출로 인해 퇴화된 조직이 증가한 결과로 해석된다. 따라서 김 양식해역의 영양염요구량은 다 자란 성체를 수확하는 시기보다 채묘밭을 막 설치하여 어린엽체가 성장하는 양식초기에 더욱 높을 것으로 추정된다.

3. 김 양식장의 질소와 탄소 요구량 산정

낙동강하구에서 채집된 방사무늬김의 영양염과 탄소흡수율을 바탕으로 우리나라 김 양식어장이 위치한 광역시도별로 월별 질소요구량과 탄소흡수량을 산정하였다 (질소는 상대적으로 부족하기 때문에 필요하다라는 의미에서 요구량이라 하였으며, 탄소는 풍부하여 해수에서 바로 흡수된다는 의미에서 흡수량이라 하였다). 이를 위해 각 광역시도의 월별 생산량은 2003년 11월부터 2013년 4월까지의 10년 평균을 계산하였으며, 김 양식면적은 2007년도 면허면적을 적용하였다 (통계청 <http://www.kostat.go.kr>). 또한 다음과 같은 가정을 하였다; 1) 김 생산 방식과 품종은 부류식의 방사무늬김으로 함, 2) 광역시도별 생산되는 김은 각 지자체의 면허된 양식장에서 크게 생산됨, 3) 김 채취는 보름에 한번씩하며, 따라서 김의 평균 현존량은 월 생산량의 25%로 함, 4) 하루 중 광합성을 하는 시간은 12시간임. 연간 김 생산량이 가장 높은 전라남도도는 3월에 생산량이 가장 높았으며, 나머지 광합성을 하는 시간은 대부분이 12월에 생산량이 가장 높았다 (Table 4). 면허면적당 생산량은 부산 (경상남도 포함)이 다른 광역시도에 비해 평균 2~4배 높았다. 그리고 전라북도도 전라남도에 비해 단위면적당 생산량이 4월을 제외하고 2배 이상 높았으며, 특히 11월과 12월에는 5~7배 높았다. 따라서 전라남도의 김 생산량은 다른 시도에 비해 월등히 높지만, 양식면적 또한 넓기 때문에 단위 면적당 생산량은 상대적으로 낮게 나타났다. 이를 바탕으로 질소요구량을 산정한 결과, 부산의 경우 12월에 단위 헥타 (ha) 당 하루에 32.7 mol 이 필요하여 조사기간 중 가장 높았으며, 전라남도의 11월에는 $1.1 \text{ mol d}^{-1} \text{ ha}^{-1}$ 로 가장 낮았다. 전라북도의 경우에도 12월이 $17.9 \text{ mol d}^{-1} \text{ ha}^{-1}$ 로 가장 높았으며, 11월~4월 평균 $11.8 \text{ mol d}^{-1} \text{ ha}^{-1}$ 이었다. 전라남도도는 3월이 가장 높은 $8.4 \text{ mol d}^{-1} \text{ ha}^{-1}$ 였으며 평균 $4.9 \text{ mol d}^{-1} \text{ ha}^{-1}$ 였다. 이처럼 전라남도의 김 생산량이 전라북도와 부산에 비해 6~15배 많은 데도 불구하고, 단위 면적당 질소요구량은 전라북도와 부산이 훨씬 더 높았다. 부산의 경우 질소요구량이 가장 높은 데도 불구하고, 김 황백화 현상이 발생하지 않는 것은 앞서 언급한

Table 4. Comparison of monthly mass production, culturing area, and N and C demand values for culturing *P. yezoensis* at each province in South Korea

	Month	Jeolla-namdo	Jeolla-bukdo	Chungcheong-namdo	Gyeonggido	Busan
Mass production for each month (ton)	11	6,611	3,048	2,867	546	2,109
	12	20,852	6,720	4,600	1,578	3,862
	1	32,296	5,624	3,872	1,794	3,490
	2	40,168	5,358	4,063	1,714	2,556
	3	51,685	4,601	3,395	1,586	2,953
Area for aquaculture (ha)	4	28,072	1,291	790	1,394	1,188
		46,074	2,817	4,536	1,107	887
	11	143.5	1,082.1	632.1	493.2	2,377.6
	12	452.6	2,385.6	1,014.0	1,425.2	4,353.8
	1	701.0	1,996.6	853.5	1,620.5	3,934.2
Mass production per area for each month (kg ha ⁻¹)	2	871.8	1,902.0	895.7	1,548.1	2,881.7
	3	1,121.8	1,633.3	748.5	1,433.1	3,328.9
	4	609.3	458.4	174.1	1,259.4	1,339.8
	11	1.1/90.4	8.1/681.7	4.7/398.2	3.7/310.7	17.8/1,497.9
	12	3.4/285.1	17.9/1,502.9	7.6/638.8	10.7/897.9	32.7/2,742.9
N demand (mol ha ⁻¹ d ⁻¹)/ CO ₂ uptake (atm ha ⁻¹ d ⁻¹)	1	5.3/441.6	15.0/1,257.9	6.4/537.7	12.2/1,020.9	29.5/2,478.5
	2	6.5/549.2	14.3/1,198.3	6.7/564.3	11.6/975.3	21.6/1,815.5
	3	8.4/706.7	12.2/1,029.0	5.6/471.5	10.7/902.8	25.0/2,097.2
	4	4.6/383.8	3.4/288.8	1.3/109.7	9.4/793.4	10.0/844.1

데로 육상담수에서 공급되는 풍부한 질소로 인해 김 양식에 필요한 요구량이 충족되는 것으로 생각된다. 반면, 두 번째로 질소요구량이 높은 전라북도도 좁은 면적에서 많은 양의 김이 생산되는 점과 최대 수확기인 12월~1월은 3~4월에 비해 영양염의 공급이 육상과 저층에서 원활하지 않은 점이 황백화가 빈발하는 원인인 것으로 생각된다. 한편 부산의 낙동강하구에 위치한 김 양식장은 평균 약 1900 atm d⁻¹ ha⁻¹ 규모로 이산화탄소를 소모하는 것으로 나타났으며 다른 광역시도에 비해 단위면적 당 가장 높은 효율이다. 김 양성시기 전체에 대해 이산화탄소 질량으로 계산하면, 약 5600 ton CO₂를 흡수하는 것으로 이는 2007년 부산광역시의 이산화탄소 배출량(19×10⁶ ton CO₂)의 약 0.03%에 해당하는 양이다. 이상에서 방사무늬김의 영양염과 탄소흡수율을 바탕으로 양식현장에서 요구되는 질소량과 탄소흡수량을 간단하게 평가하였으나, 이를 현장에 적용하기 위해서는 각 광역시도별로 김 양식현황과 해양환경에 대한 정밀조사가 필요할 것으로 생각된다.

적 요

부산시 강서구 낙동강 하구에서 채집한 방사무늬김 (*Porphyra yezoensis* Ueda)의 용존산소 생산율은 68.8±46.0 μmol g_{FW}⁻¹ h⁻¹, 질산염과 인산염 흡수율은 각각 2.5

±1.8 μmol g_{FW}⁻¹ h⁻¹, 0.18±0.11 μmol g_{FW}⁻¹ h⁻¹ 그리고 용존무기탄소 흡수율은 87.1±57.3 μmol g_{FW}⁻¹ h⁻¹이었다. 용존산소 생산율과 질산염, 인산염, 용존무기탄소 흡수율은 각각 음의 선형관계를 보여, 광합성활동에 의한 결과물임을 파악할 수 있었다. 김의 생중량에 따른 이들 성분의 생산/흡수율은 로그함수적으로 감소하여, 성체(>~0.3 g)보다는 어린 엽체의 광합성효율이 매우 높은 것으로 나타났으며, 이는 질소부족으로 인한 황백화가 양식초기에도 발생할 수 있음을 제시하였다. 우리나라 시도 단위로 월별 생산되는 김 생산량과 양식면적을 바탕으로 질소요구량과 탄소흡수율을 산정한 결과, 생산량이 가장 높은 전라남도보다 부산(경상남도 포함)과 전라북도의 단위면적당 질소요구량이 높았다. 최근 김 황백화가 빈발하는 전라북도는 좁은 면적에서의 과밀 생산과 최대수확기가 육상과 저층으로부터 영양염 공급이 부족한 12~1월인 점 등이 황백화의 원인인 것으로 추정된다.

사 사

이 연구는 국립수산물연구원(RP-2014-ME-054)의 지원으로 수행되었습니다. 낙동강 하구에서 김 채집에 도움을 주신 부산시 강서구 명지어촌계 오성태님께 감사드립니다.

REFERENCES

- DeBoer JA. 1981. Nutrients, In: The Biology of seaweeds, edited by Lobban CS and MJ Wynne, Blackwell, Oxford, England, pp.356-391.
- Dickson AG, CL Sabine and JR Christian. 2007. Guide to best practices for ocean CO₂ measurements. PICES Special Publication 3, 191pp.
- Harrison PJ, LD Druhl, KE Lloyd and PA Thompson. 1986. Nitrogen uptake kinetics in three year-classes of *Laminaria groenlandica* (Laminariales, Phaeophyta). Mar. Biol. 93: 29-35.
- Hori Y, S Mochizuki and N Shimamoto. 2008. Relationship between the discoloration of cultivated *Porphyra thalii* and long-term changes of the environmental factors in the northern part of Harima-Nada, eastern Seto Inland Sea, Japan. Bull. Jpn. Soc. Fish. Oceanogr. 72:107-112. (in Japanese with English abstract)
- Hwang JR, J Shim, JB Kim, SY Kim and YH Lee. 2011. Variations in nutrients & CO₂ uptake rates and photosynthetic characteristics of *Saccharina japonica* from the south coast of Korea. The Sea J. Korean Soc. Oceanogr. 16:196-205. (in Korean with English abstract)
- Jun BO and IK Chung. 1996. Increase of in vivo nitrate reductase activity in *Ulva pertusa* Kjellman during early expose. Algae 11:243-246.
- Kim JB, WC Lee, S Hong, J Shim, JI Park, J Park and EG Lee. 2012. Relationship between environmental characteristics and pigment composition and concentrations of *Porphyra yezoensis* Ueda in the southwestern coast of the Korean Peninsula. Korean J. Environ. Biol. 30:200-209.
- Kim JK, GP Kraemer, CD Neefus, IK Chung and C Yarish. 2007. Effects of temperature and ammonium on growth, pigment production and nitrogen uptake by four species of *Porphyra* (Bangiales, Rhodophyta) native to the New England coast. J. Appl. Phycol. 19:431-440.
- KORDI. 2010. Guide to best practices for Ocean CO₂ measurements. Bumsin Press, Ansan, Korea, 73-90.
- Kwon JN, J Shim, SY Lee and JD Cho. 2013. Effects of meteorological and oceanographic properties on variability of laver production at Nakdong River Estuary, south coast of Korea. Kor. J. Fish Aquat. Sci. 46:868-877.
- Lewis E and DWR Wallace. 1998. Program developed for CO₂ system calculations, ORNL/CDIAC-105. Carbon dioxide information analysis center, Oak Ridge National Laboratory, US Department of Energy, Oak Ridge, TN, <http://cdiac.esd.ornl.gov/oceans/co2rprt.html>.
- Lin R, SC Lindstrom and MS Stekoll. 2008. Photosynthesis and respiration of the conchocelis stage of Alaskan *Porphyra* (Bangiales, Rhodophyta) species in response to environmental variables. J. Phycol. 44:573-583.
- Lobban CS and PJ Harrison. 1994. Seaweed ecology and physiology. Cambridge University Press, Cambridge. pp.163-209.
- Matsuoka S, S Yoshimatsu, A Ono, K Ichimi, M Fujiwara, K Honda and K Tada. 2005. Discoloration of Nori (*Porphyra*) and characteristics of water quality in Eastern Bisan Seto. Bull. Coast. Oceanogr. 43:77-84. (in Japanese with English abstract)
- NFRDI. 2012. Summary of the 2012 Projects (Part. 4. User-oriented researches). pp. 460-468.
- Ozaki A, H Mizuta and H Yamamoto. 2001. Physiological differences between the nutrient uptakes of *Kjellmaniella crassifolia* and *Laminaria japonica* (Phaeophyceae). Fisher. Sci. 67:415-419.
- Parsons TR, Y Maita and CM Lalli. 1984. A manual of chemical and biological methods for seawater analysis. Pergamon Press, Oxford, England, 173pp.
- Pedersen MF and J Borum. 1996. Nutrient control of algal growth in estuarine waters. Nutrient limitation and the importance of nitrogen requirements and nitrogen storage among phytoplankton and species of macroalgae. Mar. Ecol. Progr. Ser. 142:261-272.
- Rees TAV. 2007. Metabolic and ecological constraints imposed by similar rates of ammonium and nitrate uptake per unit surface area at low substrate concentrations in marine phytoplankton and macroalgae. J. Phycol. 43:197-207.
- Shim J, JR Hwang, JS Lee, JH Kim and SS Kim. 2010. Variations in nutrients and CO₂ uptake with growth of *Undaria pinnatifida* from the south coast of Korea. Kor. J. Fish Aquat. Sci. 43:679-686. (in Korean with English abstract)
- Tada K, M Fujiwara and T Honjo. 2010. Water quality and nori (*Porphyra*) culture in the Seto Inland Sea. BUNSEKI KAGAKU 59:945-955. (in Japanese with English abstract)
- Thomas TE and PJ Harrison. 1985. Effect of nitrogen supply on nitrogen uptake, accumulation and assimilation in *Porphyra perforata* (Rhodophyta). Mar. Biol. 85:269-278.
- Tyler AC and KJ McGlathery. 2006. Uptake and release of nitrogen by the macroalgae *Gracilaria vermiculophylla* (Rhodophyta). J. Phycol. 42:515-525.
- Yoo SG. 2003. Introduction to aquaculture. Gudeok Press, pp. 309-331.
- Young EB, JA Berges and MJ Dring. 2009. Physiological responses of intertidal marine brown algae to nitrogen deprivation and resupply of nitrate and ammonium. Physiol. Plant. 135:400-411.

Received: 15 October 2014

Revised: 7 November 2014

Revision accepted: 10 November 2014