

미역 (*Undaria pinnatifida*)의 생장에 따른 영양염과 CO₂ 흡수율 변화

심정희*·황재란·이재성·김종현¹·김성수²

국립수산과학원 어장환경과, ¹국립수산과학원 양식관리과, ²해양환경관리공단 기후수질팀

Variations in Nutrients and CO₂ Uptake with Growth of *Undaria pinnatifida* from the South Coast of Korea

JeongHee Shim*, Jae Ran Hwang, Jae Seong Lee,
Jong-Hyun Kim¹ and Sung-Soo Kim²

Marine Environment Research Division, National Fisheries Research and
Development Institute, Busan 619-705, Korea

¹Aquaculture Management Division, National Fisheries Research and
Development Institute, Busan 619-705, Korea

²Climate & Marine Environment Team, Korea Marine Environment
Management Corporation, Seoul 135-870, Korea

To investigate the contribution of macroalgae to biogeochemical nutrients and carbon cycles, we measured the uptake rates of nutrients and CO₂ by *Undaria pinnatifida* using an incubation method in an acrylic chamber. From January to March 2010, *U. pinnatifida* was sampled at Ilkwang, a well-known area of macroalgae culture in Korea. The initial and final concentrations of nutrients, dissolved oxygen, total alkalinity, and pH of the chamber water were measured, and production/uptake rates were calculated using concentration changes, chamber volume, and incubation time. The production rate of dissolved oxygen by *U. pinnatifida* (n = 32) was about $5.4 \pm 4.0 \mu\text{mol g}_{\text{fw}}^{-1} \text{h}^{-1}$. The uptake rate of total dissolved inorganic carbon (TDIC), calculated by total alkalinity and pH, was $7.9 \pm 6.5 \mu\text{mol g}_{\text{fw}}^{-1} \text{h}^{-1}$. Nutrients uptake averaged $141.7 \pm 119.2 \text{ nmol N g}_{\text{fw}}^{-1} \text{h}^{-1}$ and $15.0 \pm 9.1 \text{ nmol P g}_{\text{fw}}^{-1} \text{h}^{-1}$. A positive linear correlation ($r^2 = 9.6$) existed between the production rate of dissolved oxygen and the uptake rate of total dissolved inorganic carbon, suggesting that these two factors serve as good indicators of *U. pinnatifida* photosynthesis. The relationships between fresh weight and uptake rates of nutrients and CO₂ suggested that younger specimens (<~50 g fresh weight) are much more efficient at nutrients and CO₂ uptake than are specimens >50 g. The amount of carbon uptake by the total biomass of *U. pinnatifida* in Korea during the year of 2008 was about 0.001-0.002% of global ocean carbon uptake. Thus, more research should be focused on macroalgae-based biogeochemical cycles to evaluate the roles and contributions of macroalgae to the global carbon cycle.

Key words: Macroalgae, *Undaria pinnatifida*, Uutrients, Carbon dioxide (CO₂), Uptake rate

서 론

미역 (*Undaria pinnatifida*)은 갈조식물문 다시마목 미역과에 속하며, 일본과 우리나라 연안의 조하대에 분포하고 이형세대교번으로 번식하는 단년생으로, 주된 수확 시기는 겨울부터 초여름에 이른다. 우리나라 해조류 생산 중 최대량을 차지하는 미역은 2008년 기준 약 38만 톤이 생산되었으며, 이는 해조류 총생산의 41.4%를 차지한다 (NFRDI, 2009). 한편, 우리나라의 해조류 생산은 세계 생산량의 약 5%를 차지하며 중국, 인도네시아, 필리핀에 이어 4위를 차지하고 있다. 최근 들어 세계적으로 해조류 생산량이 증가하고 있는데, 우리나라도 이와 마찬가지로 2008년 생산량이 2000년 대비 약 150% 증가하였다. 이 같은 해조류 생산량 증가의 원인으로는 식량 및 사료로 이용, 생리활성물질 추출 등의 용도와 함께 바이오

연료 (biofuel)의 재료, 즉 바이오매스로 생산하고자 하는 연구와 산업 활동이 급속도로 진행되고 있기 때문인 것으로 생각된다. 해조류를 이용한 바이오연료 생산 산업은 해결해야 할 몇 가지 사안이 있지만, 기존의 옥수수, 밀 등의 식량을 재료로 하는 바이오연료에 비해 많은 장점을 가지고 있기 때문에 미국, 일본 등을 비롯한 선진국에서 엄청난 연구비를 투입하고 있는 실정이다 (Shin, 2010).

해조류의 광합성과 생장에 필수 성분으로는 탄소와 영양염류 (질소, 인, 규산) 그리고 미량원소 등이 있다 (DeBoer 1981). 해양에 존재하는 탄소계 성분 (HCO₃⁻, CO₃²⁻, CO₂)은 평균 2000 μmol/kg 이상 풍부하여 해조류 생장의 제한요소로 작용하지 않는다. 그러나 해조류에 의한 이산화탄소흡수는 전지구 탄소순환 차원에서 해양의 이산화탄소 흡수력을 정밀 산정할 때 재평가되어야 할 부분으로서 그 의미를 가진다. 그동안 해조류에 의한 이산화탄소흡수는 직접 측정하기가 쉽지 않아, 용

*Corresponding author: jshim@nfrdi.go.kr

존산소 발생율로 부터 간접 계산하는 방법으로 수행되어 왔다. 그러나 이 방법은 해조류의 종류별로 또는 환경특성에 따라 용존산소 발생 대 이산화탄소흡수 동화율이 다르므로, 직접 측정을 통해 정확한 흡수율을 산정할 필요가 있다. 한편, 질산염을 비롯한 영양염은 해양환경에서 해역에 따라, 시기에 따라 결핍될 수 있는 성분이며, 이에 의한 해조류의 생장 및 흡수 특성에 대한 연구결과는 다수 보고되었다 (Ozaki et al., 2001; Kim et al., 2007; Rees 2007). 특히, 어패류 양식장, 정화조 같은 부영양화된 환경에서 질소와 인을 제거하는 biofilter 로 해조류를 이용하는 차원에서도 많은 연구가 이루어지고 있다 (Ahn et al., 1998; Martínez-Aragón, et al., 2002; Neori et al., 2003). 그러나, 국내에서 생산되는 해조류에 의한 영양염 흡수율을 파악한 결과는 많지 않으며 (Choi et al., 1994, Jun et al., 1996), 특히 탄소 흡수율에 관한 연구는 거의 없다.

부산시 기장군 일광해역에서 생산되는 미역을 대상으로 영양염과 탄소 흡수율을 자연조건과 유사한 환경에서 측정하고자 한다. 이를 통해, 바이오매스 생산을 위한 해역 환경평가 및 적지 선정 등에 기초자료로 활용할 수 있을 것이며 동시에 기후변화와 관련된 전 지구 탄소순환에 해조류가 기여하는 바를 추정하는 데도 활용할 수 있을 것으로 생각된다.

재료 및 방법

배양 환경과 시료 정보

해조류에 의한 영양염과 탄소 흡수율 측정을 위해 실내 배양용 챔버를 주문 제작하였다. 챔버는 아크릴소재의 둥근관이 두 층 (two-layer)으로 구성되어 있으며, 해조류를 배양하는 내부 공간(높이 30 cm × 직경 15 cm)과 온도조절용 순환수가 흐르는 외부 공간이 있다 (Fig. 1). 이때 내부층의 배양용액은 정량펌프 (Masterflex I/P series)를 이용하여 1~2 liter min⁻¹ 속도로 순환되게 하였으며, 외부층의 순환수는 항온순환수조 (JeioTech RW 2025-G)와 연결하여 ±0.5℃ 오차 이내로 수온이 유지되게 하였으며 3~4 liter min⁻¹ 속도로 순환되게 하였다. 내부층 아래에는 해조류의 뿌리 등을 거치할 수 있게 바닥에서 약 4 cm 위에 거치대를 장착하였으며, 뚜껑에는 각종 센서를 장착할 수 있는 센서 연결부가 설치되어 있다.

실험의 대상 종인 미역은 부산시 기장군 일광해역에서 1월부터 3월동안 채집하였다 (Table 1). 채집한 시료는 신속히 실험실로 옮긴 후, 해수를 채우고 기포발생기를 설치하여 순환이 원활한 커다란 통에 충분히 잠기게 넣고 순치시켰다. 실험에 사용된 미역은 바다에 이식한지 76~153일 경과한 개체로서, 길이는 29~152 cm, 폭은 4~55 cm, 무게는 5~107 g 범위였다. 미역은 채집시기인 1~3월 사이에도 중량과 표면적이 지속적으로 증가하여, 바다에 이식 후 경과일과 각각 양의 선형관계를 나타내었다 (Fig. 2). 특히, 미역의 표면적보다는 중량이 더 높은 상관관계를 나타내는 것으로 보아, 그 시기에는 길이와 폭의 성장과 더불어 엽체의 두께 또는 밀도가 더 많이 증가하는 것으로 생각된다.

해조 시료는 채집 후 해수에서 2~3일 적응케 한 후, 배양할

엽체를 선택하여, 모눈판위에 올려 사진을 찍어 길이, 폭, 표면적 등을 측정하였으며, 표면의 물기를 충분히 닦은 후 무게를 측정하였다. 배양은 한 번에 2개의 챔버를 사용하여 반복 실험의 효과를 얻었으며, 인공해수 (APHA et al., 2005)와 인공광 (~5000 lux (100 μmol m⁻² s⁻¹), Photo/Radiometer, DeltaOHM HD2102.2) 조건에서 약 6시간 동안 배양하였다.

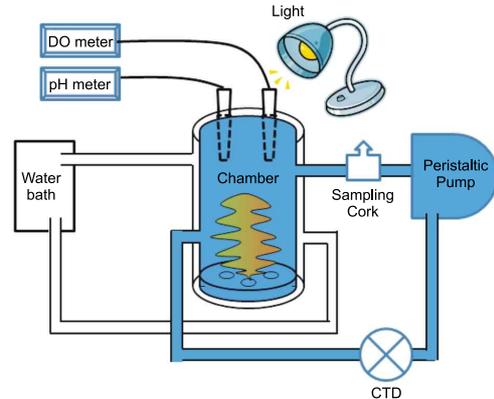


Fig. 1. Schematic diagram for chamber incubation experiment. Two-layered chamber was consisted with inner incubated water and outer circulated water. The incubated water was monitored continuously using DO and pH electrodes, as well as a mini CTD system.

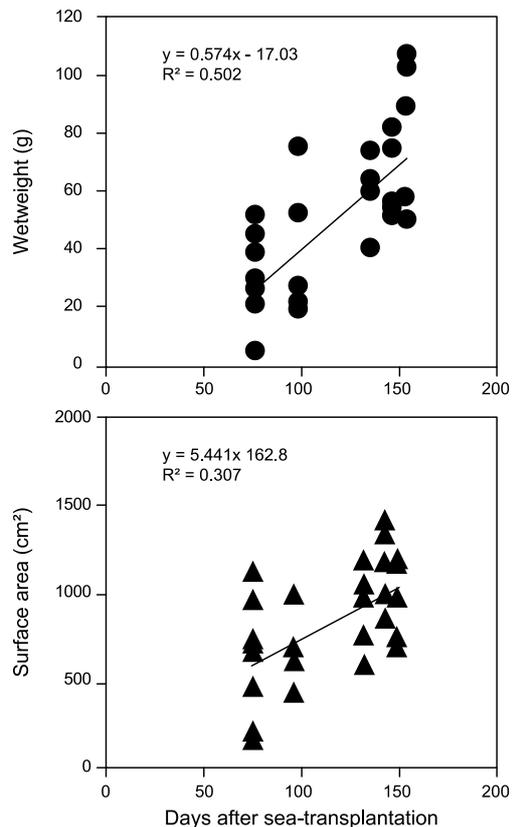


Fig. 2. Relationships between days after sea-transplantation and fresh wet weight (a), and surface area (b), respectively.

Table 1. Information for incubation experiments and *Undaria pinnatifida* samples

Date	Chamber ID	Sample #	Days after sea-trans plantation	Wet weight (g)	Surface Area (cm ²)	Length (cm)	Width (cm)
2010-1-12	C1	1	76	45.8	1087	84	24
	C2	1	76	26.6	644	62	39
2010-1-13	C1	1	76	30.5	712	88	33
	C2	1	76	21.4	450	61	26
2010-1-14	C1	2	76	5.6	202	20-37	3-5
	C2	2	76	5.3	162	26-32	4-6
2010-1-20	C1	1	76	52.0	924	70	48
	C2	1	76	39.3	690	71	33
2010-2-3	C1	1	98	75.7	1826	85	55
	C2	1	98	53.2	965	77	42
2010-2-4	C1	1	98	28.0	660	63.5	33
	C2	1	98	22.6	416	64.5	26
2010-2-9	C1	1	98	28.1	592	66	30
	C2	1	98	19.7	430	66	30
2010-3-12	C1	1	135	64.4	1147	104	48
	C2	1	135	60.3	938	86	42
2010-3-15	C1	1	135	41.5	731	106	31
	C2	1	135	41.0	570	92	37
2010-3-16	C1	1	135	74.3	1007	94	49
	C2	1	135	63.1	723	84	39
2010-3-23	C1	1	146	51.7	822	119	35
	C2	1	146	52.5	1292	117	31
2010-3-24	C1	1	146	57.0	956	136	28
	C2	1	146	55.1	1132	87	53
2010-3-26	C1	1	146	75.3	1363	123	55
	C2	1	146	82.2	1292	152	49
2010-3-30	C1	1	153	89.6	943	103	43
	C2	1	153	107.4	1130	118	47
2010-3-31	C1	1	153	50.8	669	89	46
	C2	1	153	58.7	721	81	45
2010-4-1	C1	1	153	58.0	670	85	44
	C2	1	153	103.1	1152	97	54

환경인자 측정 및 분석

배양매질의 염분과 수온은 CTD (Ocean Seven 304 CTD Probe, IDRONAUT S.r.l.)로 실시간 연속 측정하였다. 용존산소는 정밀 마이크로센서를 장착하여 상대포화도를 실시간 연속 측정하였으며 (Unisense, OX25), pH도 유리전극 (Orion Ross Ultra Electrode 8102BNUWP)으로 실시간 연속 측정하였다. 한편, 배양시작 전과 후의 배양용액에서 용존산소와 영양염 (질산염, 아질산염, 암모니아, 인산염 그리고 규산염)을 분석하였으며 총용존무기탄소 (Total Dissolved Inorganic Carbon)는 총알칼리도와 pH로부터 계산하였다 (Lewis and Wallace, 1998). 용존산소는 정밀적정기 (Metrohm, Dosimat 876 system)를 사용하여 Winkler 적정법으로 분석하였으며 (Parsons et al., 1984), 이 값은 센서에서 측정된 상대포화도 값과 비교하여 사용하였다. 총알칼리도는 정밀적정기 (Metrohm, Dosimat 876 system)를 사용하여 개방형용기법으로 분석하였으며 (KORDI, 2010), 이때 표준물질로 미국 스크립스연구소의 A. Dickson박사 실험실에서 제작한 CRM Batch

#99을 사용하였다. 영양염은 자동분석기로 분석하였으며 (Alliance, Integal futura system), 표준물질로 Osil 사의 제품을 사용하였다.

결과 및 고찰

챔버 내 환경인자 변화

해조류 배양 챔버에 장착된 각종 센서들에 의해, 배양수의 수온과 염분, 용존산소 (상대포화도, %), pH를 실시간 연속 측정 하였으며, 그 한 예를 Fig. 3에 나타내었다. 배양수의 수온은 챔버 바깥층의 순환수로 일정한 온도가 유지되게 하여, 배양 시기에 따라 약 18.0~20.0°C 범위의 수온을 설정하고 배양시 간동안 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 이내로 지속되게 하였다 (Fig. 3(a)). 인공해수의 염분은 33.0~35.0 psu 범위로 제작하여 배양시간동안 아주 일정하게 (± 0.005 psu 이내) 유지되었다 (Fig. 3(a)). 한편 수온과 염분은 배양 챔버 중 하나의 챔버에서만 측정하였으나, 동일한 배양 해수를 사용하고 배양실 내에서 10 cm 간격으로 나란히 배치하였으므로, 두 챔버 사이의 수온과 염분 차이는 거의 없을 것으로 생각된다.

용존산소의 상대포화도를 측정하는 센서를 두 챔버에 각각 설치하여 그 변화를 컴퓨터 화면으로 실시간 모니터링한 결과, 배양시간이 경과함에 따라 용존산소 상대포화도는 점차 증가하였으며 두 챔버에서 증가하는 양상도 매우 유사하게 나타났다 (Fig. 3(b)). 챔버 1의 경우, 배양 초기에 약 180%에서 점진적으로 증가하여, 배양 종료 시에는 150% 증가하여 약 330%에 이르렀다. 챔버 2에서도 배양 종료시의 용존산소의 상대포화도는 초기보다 약 140%증가한 것으로 나타났다. 그러나 챔버 1과 2의 초기 상대포화도가 약 70% 차이 나는데, 이는 두 센서의 교정 바탕값이 달라서 나타난 것으로 상대적인 차이를 파악하는 데는 큰 지장이 없었다. 이처럼, 미역을 챔버 배양함에 따라 배양수의 용존산소 상대포화도가 높아지는 것은 미역의 광합성활동으로 생성된 산소로 인해 포화도가 높아진 결과이다. 배양수의 pH도 또한 미역의 광합성활동을 지시하는 인자로서 용존산소와 유사한 형태로 증가하는 것을 볼 수 있었다 (Fig. 3(c)). 배양수의 pH는 초기 약 7.5에서 종료 시 약 8.9 까지 증가하였으며, 그 경향이 챔버 1과 챔버 2에서 아주 유사하게 나타났다. 이와 같이, 용존산소 포화도와 pH가 동시에 증가하는 것은 미역의 광합성활동에 의한 결과임을 강력하게 지시한다.

한편, 미역을 챔버에 넣고 배양을 시작할 때와 끝날 때 각각 채수한 해수에서 영양염과 용존산소를 분석하여 그 변화를 파악하였으며, 총용존무기탄소는 총알칼리도와 pH 측정값으로부터 계산하여 그 변화를 살펴보았다. 영양염 중 질산염은 약 6시간의 배양시간동안 평균 $7.9 \mu\text{mol L}^{-1}$ 이 감소하였으며, 미역의 채집시기와 중량에 따라 $0.9\sim 24.1 \mu\text{mol L}^{-1}$ 의 범위를 보였다. 배양수의 인산염은 평균 $0.87 \mu\text{mol L}^{-1}$ 감소하였으며 그 변화 범위는 $0.16\sim 1.86 \mu\text{mol L}^{-1}$ 이었다. 이는 미역에 의해 질산염과 인산염이 흡수되어 이용됨을 의미한다. 한편, 결과에 제시하지는 않았지만 규산염의 경우는 배양 전후에 농도 변화

가 거의 없었으며, 이는 미역이 규산염을 거의 이용하지 않음을 의미한다. 배양수의 총용존무기탄소(TDIC)농도는 배양시간동안 평균 $279.3 \mu\text{mol kg}^{-1}$ 감소하였으며 그 변화 범위는 $38.3 \sim 467.0 \mu\text{mol kg}^{-1}$ 이었으며, 이때 해수의 $f\text{CO}_2$ 농도 변화는 $522 \sim 1933 \mu\text{atm}$ 범위를 보였다. 이처럼 배양 해수 중 총용존무기탄소를 비롯한 $f\text{CO}_2$ 농도의 감소는 미역의 광합성활동에 이산화탄소가 활발히 사용되었음을 의미하며, 이러한 연구를 바탕으로 대기 이산화탄소 감소에 해조류의 역할이 고려되어 활용되어야 할 것으로 생각된다. 한편, 배양 해수 중 용존산소의 농도 증가는 $1.4 \sim 11.8 \text{ mg O}_2 \text{ L}^{-1}$ 의 범위를 나타내었으며 평균적으로 $6.8 \text{ mg O}_2 \text{ L}^{-1}$ 증가하였다. 이는 앞서 설명한 용존산소 상대포화도의 증가 양상과 잘 일치하였다.

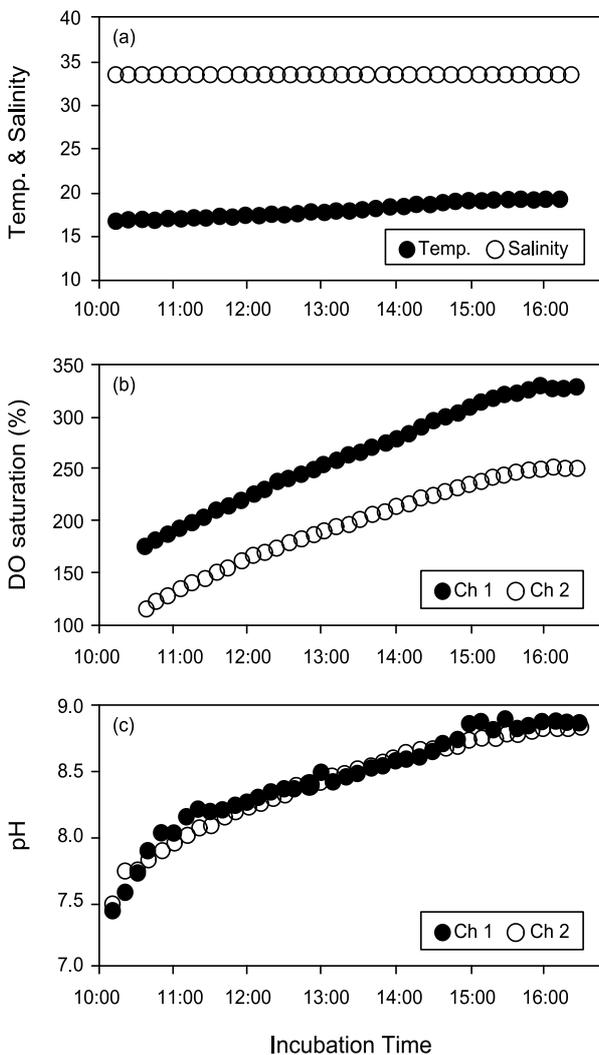


Fig. 3. An example for changes of environmental factors in chamber water measured by real-time monitoring sensors. Changes of temperature (closed circle) and salinity (open circle) with incubation time (a), relative saturation % of dissolved oxygen (b) and pH (c) in chamber 1 (closed circle) and chamber 2 (open circle).

Table 2. Uptake/production rates of nutrients, total dissolved inorganic carbon and dissolved oxygen by *Undaria pinnatifida* cultured at the Ilkwang in Busan, Korea

	(unit)	Average	Min. value	Max. value
Nitrate+rite	($\text{nmol g}^{-1} \text{ h}^{-1}$)	141.7±119.2	14.6	435.5
	($\text{nmol cm}^{-2} \text{ h}^{-1}$)	8.3±6.9	0.8	29.1
Phosphate	($\text{nmol g}^{-1} \text{ h}^{-1}$)	15.0±9.1	3.5	42.9
	($\text{nmol cm}^{-2} \text{ h}^{-1}$)	0.9±0.4	0.2	2.3
TDIC	($\mu\text{mol g}^{-1} \text{ h}^{-1}$)	7.9±6.5	0.4	30.1
	($\text{nmol cm}^{-2} \text{ h}^{-1}$)	363.1±210.4	32.9	911.0
DO	($\mu\text{mol g}^{-1} \text{ h}^{-1}$)	5.4±4.0	0.5	19.4
	($\text{nmol cm}^{-2} \text{ h}^{-1}$)	263.1±160.6	28.6	738.2

영양염과 탄소 흡수율 비교

미역을 배양하는 동안 변한 영양염과 총용존무기탄소, 용존산소농도를 배양시간과 미역의 습중량으로 나누어, 단위시간당 단위중량당의 흡수율/생성율로 전환하여 서로 비교하였다. 부산시 기장군 일광지역에서 양식되는 미역 중 바다 이식 후 76~153일이 경과하여 개체의 습중량이 약 20~110 g에 속하는 미역의 질산염에 대한 평균 흡수율은 $141.7 \pm 119.2 \text{ nmol g}^{-1} \text{ h}^{-1}$ 이었다 (Table 2). 질산염 최대 흡수율과 최소 흡수율은 각각 $435.5 \text{ nmol g}^{-1} \text{ h}^{-1}$ 와 $14.6 \text{ nmol g}^{-1} \text{ h}^{-1}$ 였으며, 이는 개체에 따라 질산염 흡수율이 최대 30배 가량 차이남을 의미한다. 미역의 인산염에 대한 평균 흡수율은 $15.0 \pm 9.1 \text{ nmol g}^{-1} \text{ h}^{-1}$ 이었으며, 개체에 따라 최대 약 12배 차이를 보여 질산염 흡수율에 비해서는 변이가 낮게 나타났다. 또한 총용존무기탄소에 대한 미역의 평균 흡수율은 $7.9 \pm 6.5 \mu\text{mol g}^{-1} \text{ h}^{-1}$ 를 나타내었고, 개체에 따라 최대 약 14배 차이를 보였다. 한편, 미역의 용존산소 발생율의 평균은 $5.4 \mu\text{mol g}^{-1} \text{ h}^{-1}$ 이었으며, 개체에 따른 차이는 약 14배가 났다. 따라서 질산염을 제외한 인산염과 총용존무기탄소 그리고 용존산소의 흡수/발생율에 있어 미역 개체 간의 최대 변이는 12~14배의 범위로 유사하게 나타났다. 이는 미역이 주변 환경으로부터 탄소를 비롯한 영양염을 흡수할 때 이들 성분 간의 비가 비교적 일정하게 유지됨을 의미한다. 질산염의 경우, 질소성분의 다양한 존재형태와 이로 인한 복잡한 순환 등으로 인해 다른 성분보다 다소 높은 변이를 보인 것으로 생각된다.

미역의 광합성활동에 이용되는 영양염과 탄소에 대한 흡수율을 그 결과 생성되는 용존산소 발생율과 상관관계를 각각 살펴보았다 (Fig. 4). 질산염과 인산염 그리고 총용존무기탄소 흡수율은 용존산소 생성율과 각각 음의 선형상관관계를 나타내었다. 특히, 용존산소와 총용존무기탄소의 생성과 소모 사이에는 매우 높은 상관관계를 보여 ($r^2=0.96$) 광합성에서 주요한 두 분자의 이론적인 화학량론 (stoichiometry)을 잘 설명하고 있으며, 이는 두 성분이 각 상대성분에 대해 간접적인 지표가 될 수 있음을 시사한다. 한편, 탄소에 비해 다소 낮지만 질산염과 인산염도 용존산소와 의미 있는 수준의 상관관계를 나타내었다. 질산염과 인산염은 식물성장의 필수성분으로서 탄소와 달리 해양에서 제한요인으로 작용을 하지만 이론적으

로 Redfield 비와 유사한 범주에서 흡수된다고 알려진다 (DeBoer 1981). 실험에서 얻은 흡수율을 바탕으로 미역에 의해 흡수된 탄소와 영양염의 성분비 (미역의 단위 중량당 흡수를 기준으로 하였을 때)를 살펴보면 평균 C:N:P:O=106:2.0:0.2:73를 나타내어, Redfield 비에 비해 탄소가 높은 비율로 흡수되었다. 실험에 사용된 인공해수에 녹아있는 영양염 농도가 충분함에도 불구하고 질소와 인의 흡수가 이론적인 Redfield 비에 비해 낮게 나타났다. 실제 해양에서도 해조류에 의한 영양염 흡수는 해수에 녹아있는 영양염의 농도, 해조류 생체에 축적된 농도 즉, 생체가 필요로 하는 농도 정도 등에 의해 수 배에서 수 십배 이상 차이가 난다. 특히 외양이나 연안에서도 계절에 따라 낮은 영양염 환경에 해조류가 노출되어도 비교적 양호한 상태를 유지하는데, 이는 높은 농도로부터 비교적 빠르게 흡수하여 체내에 축적할 수 있는 능력 때문이며 따라서 필요로 하는 모든 영양소 성분에 지속적으로 노출될 필요가 없음을 의미한다 (Kim, 1996). 미역이 채집된 부산시 기장군 주변 해역의 11월~2월 용존무기질소는 ~10 μmol L⁻¹, 용존무기인은 ~0.5 μmol L⁻¹의 범위로 영양염이 결핍된 환경이 아니었으며, 우리나라 동·서·남해안 연안 표층의 평균 농도 범위에 속한다 (MLTM and NFRDI, 2010). 그런 의미에서 실험에 사용된 미역은 체내에 질산염과 인산염이 결핍되지 않은 상태였던 것으로 생각된다.

미역의 영양염과 탄소 흡수율을 다른 해조류의 결과와 비교해 보았다 (Table 3). 미역의 질산염 흡수율은 일반적으로 보이는 해조류의 평균 범위에 포함되는 것으로 나타났으나, 생물 여과재로 이용되는 일부 녹조류에 비해서는 낮은 흡수율을 나타내었다 (Choi et al., 1994; Martínez-Aragón, et al., 2002; Ale et al., 2010). 인산염의 경우, 미역은 다른 종에 비해 낮은

Table 3. Nutrients and carbon uptake rates of *Undaria pinnatifida* compared with data from other macroalgae

Species	N	P	C	Reference
	(nmol cm ⁻² h ⁻¹)			
<i>Ulva intestinalis</i>	2.2			Taylor et al. (1998); Rees (2007)
<i>Kjellmaniella crassifolia</i>	40-90	2.5-9.0		Ozaki et al. (2001)
<i>Laminaria japonica</i>	14-110	0.8-9.0		Ozaki et al. (2001)
<i>Laminaria solidungula</i>	3			Korb and Gerard (2000)
<i>Maxrocystis pyrifera</i>	9.7			Haines and Wheeler (1978)
Macroalgae	10			Rees (2007)
<i>Undaria pinnatifida</i>	~ 8.3	~ 0.9	363	This Study
	(μmol g _w ⁻¹ h ⁻¹ (In dry weight))			
<i>Ulva pertusa</i>	1.5			Choi et al. (1994)
<i>Ulva lactuca</i>	(2.1-9.2)			Ale et al. (2010)
<i>Ulva rotundata</i>		(2.8)		Martínez-Aragón et al. (2002)
<i>Gracilaria vermiculophylla</i>	(4.1)			Tyler and McGlathery (2006)
<i>Laminaria digitata</i>			9-20	Klenell et al. (2004)
<i>Undaria pinnatifida</i>	0.14 (1.2)	0.015 (0.13)	7.9	This Study

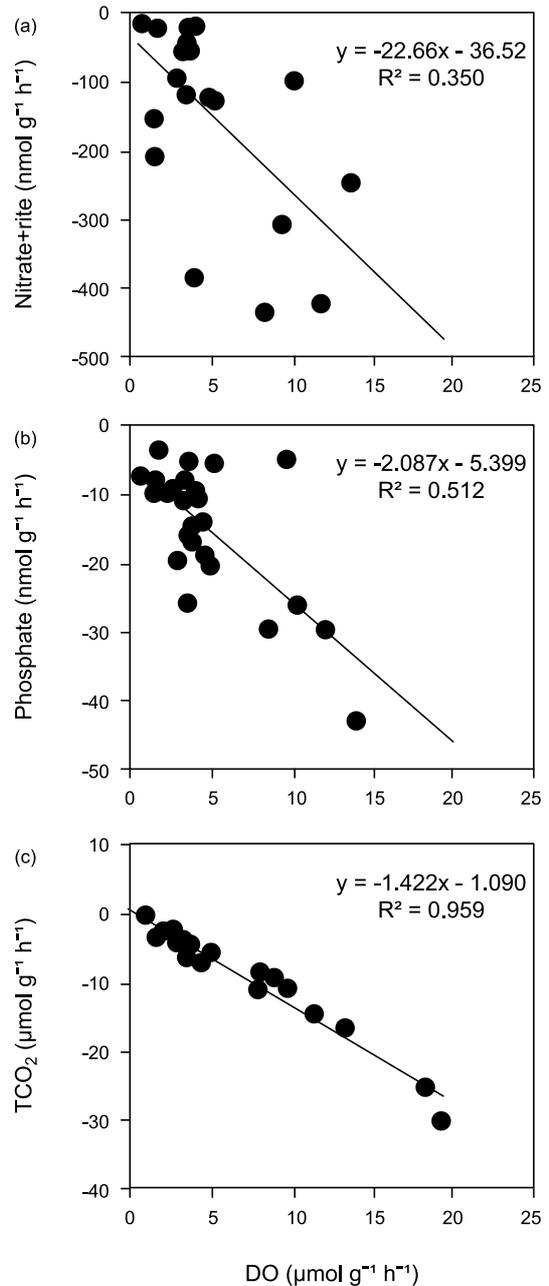


Fig. 4. Relationship between production rate of dissolved oxygen and uptake rate of nitrate+nitrite (a), phosphate (b), and total dissolved inorganic carbon (c) of *Undaria pinnatifida*.

흡수율을 나타내었으며, 특히 녹조류에 비해서는 10배 이상 낮게 나타났다. 한편, 미역과 같은 갈조류에 속하는 *Kjellmaniella crassifolia* 와 *Laminaria japonica* 는 미역에 비해 질산염과 인산염의 흡수율이 3-5배 높게 나타났다 (Ozaki et al., 2001). 이러한 차이는 미역과 *Kjellmaniella crassifolia* 와 *Laminaria japonica* 의 생리 특성 때문에 발생하였을 수도 있지만, 시료 상태의 차이로 인해 발생하였을 가능성도 있다. 배양

시료를 준비함에 있어, 미역의 경우 단위 엽체 전체를 배양에 이용한 반면, *Kjellmaniella crassifolia* 와 *Laminaria japonica* 는 엽체 중 일부를 잘라서 (직경 약 2 cm) 배양하였다. 이 과정에서 엽체의 부위별 흡수율의 차이, 절단면을 통한 유기성분의 방출 등이 흡수율에 일부 영향을 끼쳤을 것으로 생각된다. 또한 엽체 전체를 배양하는 방법이 실제 해양 상황에 가까우므로, 보다 더 현장 값을 대변한다고 할 수 있다. 그러나 추후 미역에 대해서도 일부만 배양하여 서로 비교 검토할 필요가 있을 것이다. 탄소의 경우, 다른 해조류에 의한 연구결과가 많지 않았다. Klenell et al. (2004)에 의하면 *Laminaria japonica* 종은 총용존무기탄소의 최대흡수율이 pH 7.0~8.5 범위에서 $9\sim 20 \mu\text{mol g}^{-1} \text{h}^{-1}$ 로 나타났다. 이 값은 미역의 탄소 흡수율 ($1.4\sim 14.4 \mu\text{mol g}^{-1} \text{h}^{-1}$)에 비하여 다소 높았다. 따라서 우리나라 남해안 일광해역에서 서식하는 미역의 영양염과 탄소 흡수율은 구멍 갈파래를 비롯한 녹조류보다는 전반적으로 낮은 값을 보였으나, 그 외 다른 조류와는 비슷한 범위의 흡수율을 나타내었다.

생장에 따른 흡수율 변화와 의미

미역에 의해 흡수된 탄소와 영양염은 호흡, 광합성 등에

이용되어 생존 및 성장과 직접적인 관련을 가진다고 할 수 있다. 실험에 이용된 미역은 바다에 이식한 지 2개월~5개월 사이의 엽체로, 이 시기에는 길이와 폭의 증가로 인한 표면적도 증가하지만 엽체의 두께와 밀도 증가로 인한 중량 증가가 더 두드러졌다 (Fig. 2). 따라서 이 시기의 미역의 성장에 대한 간접 지표로 무게를 기준으로 하여 영양염과 탄소의 흡수율 변화를 살펴보았다 (Fig. 5). 미역의 무게가 증가할수록 영양염과 탄소의 흡수량이 비례하여 증가하였으며, 용존산소의 발생량도 비례하여 더 많이 증가하였다. 그러나 각각의 흡수/발생량의 증가정도가 로그함수식에 근접하는 꼴로 나타났으며 이는 일정 중량이상에서는 이들 흡수/발생량이 더 이상 증가하지 않음을 의미한다. 이 같은 현상은 질산염, 인산염 그리고 탄소에서 모두 발생하였으며, 중량 약 50 g 에서 일정하게 나타났다. 이는 단일 엽체 중량이 50 g 이하의 어린 엽체에서 영양염과 탄소 제거가 효율적임을 의미한다. 이러한 정보는 미역을 이용하여 바이오매스 생산 시, 경제적이고 생산적인 수확시기를 결정하는데 이용할 수 있을 것이며, 나아가 영양염 소요량을 미리 고려하여 대량 생산 후보지를 선정하거나, 영양염 순환 변화를 예측할 수도 있을 것이다.

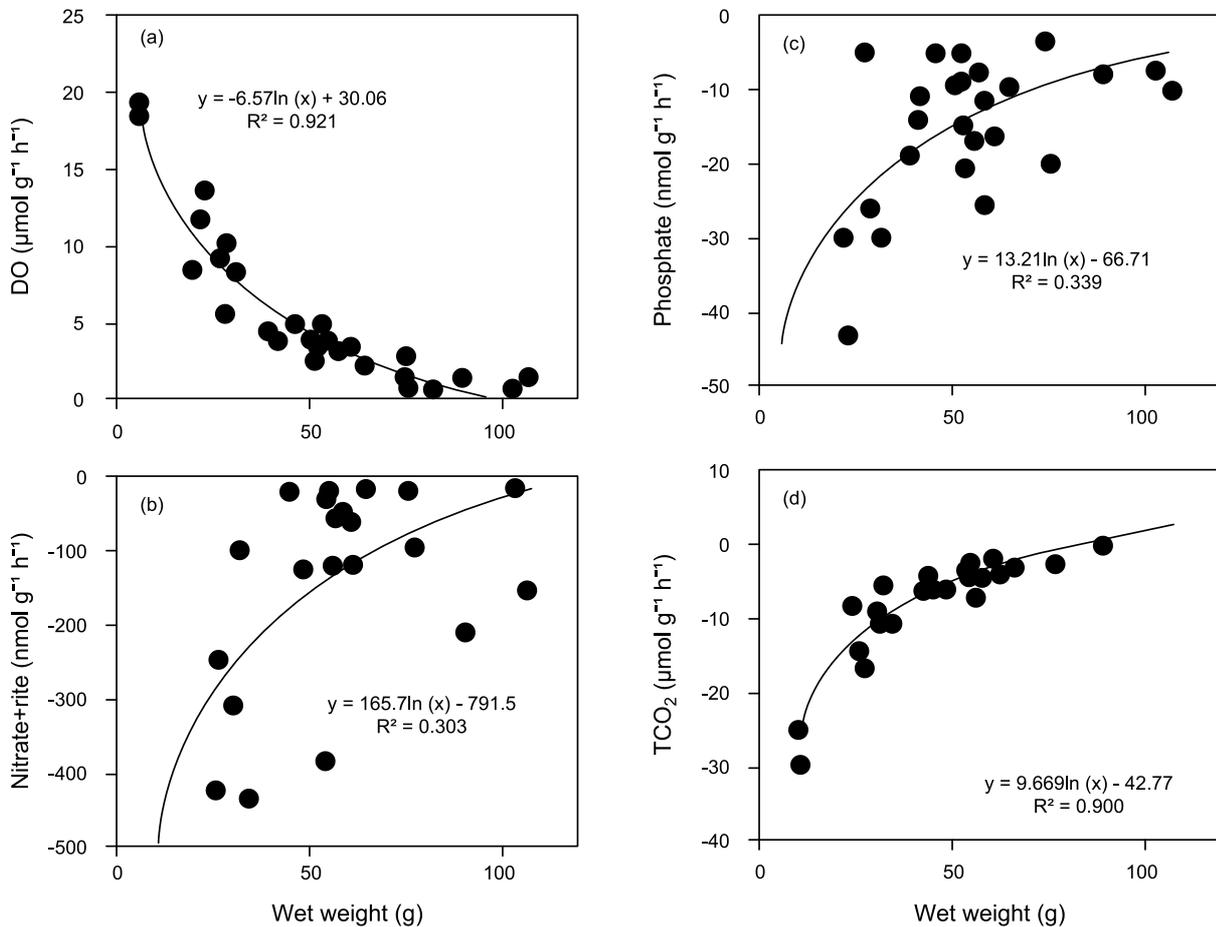


Fig. 5. Production rate of dissolved oxygen (a), uptake rate of nitrate+nitrite (b), phosphate (c) and total dissolved inorganic carbon (d) against fresh weight of *Undaria pinnatifida*.

한편 인류의 화석연료 사용으로 말미암은 대기 이산화탄소의 증가는 수온상승과 해양산성화와 같은 해양환경의 변화를 초래하고 있으며, 나아가 해양환경에 의존하는 해조류의 성장 및 이산화탄소 흡수효율에도 영향을 끼칠 것으로 생각된다. 이런 측면에서 미역의 탄소 흡수율을 바탕으로 우리나라에서 생산되는 미역에 의해 흡수되는 총 탄소량을 추정하기 위해 몇 가지 가정을 하였다; 1) 미역의 총생산량은 2008년 38만톤을 기준으로 함, 2) 탄소의 순흡수는 하루 중 12시간만 고려함, 3) 미역의 평균 성장 기간을 150일이라 하고, 그 기간 평균 현존량은 최종 생산량의 약 30~50%로 계상함. 이때 세 번째 가정은 Lee and Sohn (1993)이 측정한 생장에 따른 중량 증가에 근거하여 산정하였다. 그 결과 우리나라에서 생산되는 미역에 의해 제거되는 연간 탄소량은 전 지구 해양의 탄소 흡수율 (1.7-1.9 Gt C yr⁻¹, Takahashi et al., 2009)의 약 0.001~0.002%에 해당하는 1.9~3.2×10⁴ C ton이었다. 국내에서 생산되는 미역 단일 품종에 의한 기여라고 생각하였을 경우 상당한 수치라 할 수 있다. 따라서 전 지구 탄소순환의 관점에서 해양의 이산화탄소 제거 능력을 제고할 때, 연안의 생산력 중 특히 한반도연안을 비롯한 태평양연안에서 활발한 해조류양식에 의한 역할을 간과해서는 안 될 것으로 생각되며, 이를 위해 이 같은 연구가 다른 품종에 대해서도 지속적으로 연계되어야 할 것으로 생각된다.

사 사

이 연구는 국립수산물품질관리원(RP-2010-ME-049)의 지원으로 일부 수행되었습니다. 미역 채집에 도움을 주신 부산시 기장군 일광면 문동리 칠성농수산 김치현사장님께 감사드립니다.

참고문헌

- Ahn O, Petrell RJ and Harrison PJ. 1998. Ammonium and nitrate uptake by *Laminaria saccharina* and *Nereocystis luetkeana* originating from a salmon sea cage farm. *Applied Phycology* 10, 333-340.
- Ale MT, Mikkelsen JD and Meyer AS. 2010. Differential growth response of *Ulva lactuca* to ammonium and nitrate assimilation. *J Appl Phycol* DOI 10.1007/s10811-010-9546-2.
- APHA, AWWA, WEF. 2005. Preparing organisms for toxicity tests. In: *Standard Methods for the examination of water & wastewater*. Eaton AD, Clesceri LS, Rice EW and Greenberg AE, eds. Port City Press, Baltimore, Maryland, U.S.A., 8-14
- Choi C-G, Kim H-G and Jun B-O. 1994. On the nitrate uptake in *Ulva pertusa* Kjellman. *Korean J Phycol* 9, 247-253.
- DeBaer JA 1981. Nutrients. In *The Biology of Seaweeds*, CS Lobban and MJ Wynne (eds). Blackwell, Oxford, England, 356-391
- Haines KC and Wheeler PA. 1978. Ammonium and nitrate uptake by the marine macrophyte *Hypnea musciformis* (Rhodophyta) and *Macrocystis pyrifera* (Phaeophyta). *J Phycol* 14, 319-324.
- Jun B-O, Lee S-W and Kwon YM. 1996. On Ammonium uptake in *Ulva pertusa* Kjellam. *Algae* 11, 317-323.
- Klenell M, Snoeijs P and Pedersen M. 2004. Active carbon uptake in *Laminaria digitata* and *L. saccharina* (Phaeophyta) is driven by a proton pump in the plasma membrane. *Hydrobiologia* 514, 41-53.
- Kim JK, Kraemer GP, Neefus CH, Chung IK and Yarish C. 2007. Effect 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.
- Kim YH. 1996. The biology of marine plants. Hyungseol Press, Seoul, Korea, 93-127.
- Korb RE and Gerard VA. 2000. Nitrogen assimilation characteristics of polar seaweeds from differing nutrient environments. *Marine Ecology Progress Series* 198, 83-92.
- KORDI. 2010. Guide to best practices for Ocean CO₂ measurements. Bumsin Press, Ansan, Korea, 73-90.
- Lee KY and Sohn CH. 1993. Morphological characteristics and growth of two forms of sea mustard, *Undaria pinnatifida* f. *distans* and *U. pinnatifida* f. *typica*. *Aquaculture* 6, 71-87.
- Lewis E and Wallace DWR. 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>.
- Martínez-Aragón JF, Hernández I, Pérez-Lloréns JL, Vázquez R and Vergara JJ. 2002. Biofiltering efficiency in removal of dissolved nutrients by three species of estuarine macroalgae cultivated with sea bass (*Dicentrarchus labrax*) waste waters 1. Phosphate. *Applied phycology* 14, 365-374.
- MLTM and NFRDI. 2010. Annual monitoring report of Korean marine environment 2009. 14, 53-306.
- NFRDI. 2009. A report on development of technics for biomass and mass production of macroalgae. 573-580.
- Neori A, Msuya FE, Shauli L, Schuenhoff A, Kopel F and Shpigel M. 2003. A novel three-stage seaweed (*Ulva lactuca*) biofilter design for integrated mariculture. *Applied Phycology* 15, 543-553.

- Ozaki A, Mizuta H and Yamamoto H. 2001. Physiological differences between the nutrient uptakes of *Kjellmaniella crassifolia* and *Laminaria japonica* (Phaeophyceae). *Fisheries Science* 67, 415-419.
- Parsons TR, Maita Y and Lalli CM. 1984. A manual of chemical and biological methods for seawater analysis. Pergamon Press. Oxford, England, 173.
- 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.
- Shin YT. 2010. Problems for using macroalgae biomass. *Marine Industry Trend KMI e-journal* 12, 1-5.
- Takahashi et al. 2009. Climatological mean and decadal change in surface ocean pCO₂, and net sea - air CO₂ flux over the global oceans. *Deep Sea Research II* 56, 554-577.
- Taylor RB, Peek JTA and Rees TAV. 1998. Scaling of ammonium uptake by seaweeds to surface area:volume ratio:geographical variation and the role of uptake by passive diffusion. *Marine Ecology Progress Series* 169, 143-148.
- Tyler AC and McGlathery KJ. 2006. Uptake and release of nitrogen by the macroalgae *Gracilaria vermiculophylla* (Rhodophyta). *J Phycol* 42, 515-525.

2010년 10월 28일 접수
 2010년 11월 25일 수정
 2010년 12월 3일 수리