

다영양입체양식을 위한 다시마(*Saccharina japonica*)의 생물여과효과

박미선 · 민병화 · 김영대 · 유현일^{1*}

국립수산과학원 동해수산연구소, ¹국립수산과학원 해조류바이오연구센터

Biofiltration Efficiency of *Saccharina japonica* for Integrated Multi-Trophic Aquaculture (IMTA)

Mi Seon Park, Byung Hwa Min, Young Dae Kim and Hyun Il Yoo^{1*}

East Sea Fisheries Research Institute, National Fisheries Research & Development Institute, Gangneung 210-860, Korea

¹Seaweed Research Center, National Fisheries Research & Development Institute, Mokpo 530-831, Korea

To determine whether the seaweed *Saccharina japonica* can effectively utilize dissolved nutrients from *Sebastes schlegeli* fish cultures, a laboratory experiment was conducted in a static system for 7 days at ESFRI, NFRDI in Korea. The experiment included an *S. schlegeli* monoculture system and an *S. schlegeli*-*S. japonica* IMTA system. *Saccharina schlegeli* density (415±24 g; mean±SE) remained the same in all treatments, whereas seaweed density varied across treatments of 0, 0.5, 1, 2, and 3 kg (control and T1-T4, respectively). During the experiment, nutrient (NH₄⁺ and PO₄³⁻) concentrations were measured at 24-h intervals. NH₄⁺ concentration of the control group increased from 0.117±0.021 mg/L at the start of experiment to 5.836±0.904 mg/L at the end of experiment. NH₄⁺ concentrations of each treatment were 3.004±0.040, 2.086±0.133, 1.642±0.121 and 0.775±0.007 mg/L in T1, T2, T3, and T4, respectively, at the end of experiment. The concentration of PO₄³⁻ exhibited a similar trend to NH₄⁺ concentration. NH₄⁺ and PO₄³⁻ concentrations significantly decreased with increased *S. japonica* thallus density each day ($P < 0.05$). The nutrient removal efficiency (NRE) and nutrient uptake rate (NUR) showed different relationships with changes in thallus density; NRE increased but NUR decreased as thallus density increased. Based on measured concentrations of NH₄⁺ and *S. japonica* weight, regression analysis defined the relationship between as an exponential function, $Y = 3.8165e^{-0.505X}$ ($R^2 = 0.9552$). Our results demonstrated that *S. japonica* can function as an efficient component in IMTA with environmental and potentially economic benefits for fish hatcheries.

Key words: Integrated multi trophic aquaculture (IMTA), *Saccharina japonica*, Biofiltering efficiency

서론

한정된 수역에서 집약적으로 이루어지는 어류양식의 경우, 과잉 공급된 사료와 배설물이 주변 양식장 바닥에 가라 앉고 무기화되는 과정에서 산소결핍, 유기영양염에 의한 부영양화와 수질악화로 인한 생산성 및 양식어류의 건강도 저하와 질병 등의 문제를 유발하는 것으로 알려져 있다(Wu, 1995; Troell et al., 1999; Cao et al., 2007). 실제로 어류 양식장 바닥 및 인근에서는 용존산소가 저하하고, 부유성 유기물, 무기영양염과 중금속이 증가하며 심지어 화합물질까지 검출되기 때문에(Buschmann et al., 2008a; De Casabianca et al., 1997;

Mendiguchia et al., 2006; Mente et al., 2006; Sanderson et al., 2008), 이들은 양식장 주변 생물군집에 부정적인 영향을 미칠 수 있다(Holmer et al., 2008). 따라서 양식에 의한 환경오염을 줄이기 위하여 친환경적인 지속 가능한 연안양식기술의 필요성이 증가되고 있으며(Wurts, 2000; Neori et al., 2004), 그 대안으로 한 영양단계의 부산물을 먹이원으로 이용하는 다른 영양단계의 생물을 함께 양식함으로써 환경부담을 줄일 수 있는 다영양입체양식(Integrated multi trophic aquaculture; IMTA)이 대두되고 있다(Goldman et al., 1974; Ryther et al., 1975; Lander et al., 2004).

IMTA는 단일종 양식을 생태적이고, 지속 가능한 양식으로

Article history;

Received 8 March 2012; Revised 19 June 2012; Accepted 3 August 2012

*Corresponding author: Tel: +82. 61. 280. 4750 Fax: +82. 61. 285. 1949

E-mail address: hiyoo@nfrdi.go.kr

Kor J Fish Aquat Sci 45(4) 351-357, August 2012

<http://dx.doi.org/10.5657/KFAS.2012.0351>

pISSN:0374-8111

© The Korean Society of Fishereis and Aquatic Science. All rights reserved

전환시키는데 매우 중요하다(Buschmann et al., 2008; Chopin et al., 2008; Costa-Pierce, 2010; Naylor et al., 2000). IMTA에서 해조류는 어류로부터 배출된 암모니아, 인산과 이산화탄소를 동화시켜 잠재적으로 가치 있는 바이오매스로 전환시킨다(Goldman et al., 1974; Ryther et al., 1975). 이러한 과정을 통해, 어류 양식장의 폐수는 재사용되거나 환경 부하를 감소시켜 배출된다. 따라서, IMTA에서 해조류는 오염원을 감소시키는 중요한 기능을 한다. IMTA의 바이오필터로서 해조류 사용의 장점은 30년 전에 조명되기 시작하였으며(Ryther et al., 1975), 근래에 들어 널리 인정되고 있다(Neori et al., 2007; Hayashi et al., 2008). IMTA를 위한 해조류 선택은 용존무기영양염 제거효과, 어류 배설물에 의한 부영양화 환경에서의 성장 가능성 및 높은 생산량과 경제적 가치 등을 고려하여야 한다. IMTA에서 해조류는 높은 영양염을 지속적으로 활용하여 자연해조장보다 높은 생산성을 나타낸다. 어류와 해조류의 IMTA양식에서 *Gracilaria* spp. (Neori et al., 2000; Buschmann et al., 2001; Abreu et al., 2009), *Ulva* spp. (Bolton et al., 2009)와 켈프(Buschmann et al., 2010; Chopin et al., 2008)의 생산량 증가 및 높은 수익성이 보고된 바 있다.

해조류는 영양염 흡수율과 형태적 특징에 의해 2가지 Type으로 구분되는 것으로 알려져 있다(Wallentinus, 1984). Type 1은 생활사가 짧으면서 표면적대 부피의 비가 높은 종으로 기회종의 특징을 보이며 Type 2는 상대적으로 긴 생활사를 가진 다년생으로 표면적대 부피의 비가 낮은 종이다. 지금까지 이루어진 해조류의 영양염 흡수관련 연구는 대부분이 기회종인 *Ulva* spp. (Buschmann et al., 2001; Martínez-Aragón et al., 2002; Abreu et al., 2009)와 *Gracilaria* spp. (Martínez-Aragón et al., 2002; Bolton et al., 2009; Mao et al., 2009; Abreu et al., 2011; Skriptsova and Miroshnikova, 2011) 등을 이용한 것으로 이들은 영양염 제거에 뛰어난 효과를 보이는 반면 켈프류(kelp species)에 비해 양식 경제성이 떨어진다(FAO, 2010).

따라서 본 연구에서는 높은 생산량과 경제성이 있는 다시마(*Saccharina japonica*)를 대상으로 어류에서 배출되는 영양염을 효과적으로 제거 및 흡수하는지의 여부를 구명하고, IMTA 대상종으로서의 가능성을 고찰하고자 하였다.

재료 및 방법

2011년 1월 강원도 양양군에 위치한 다시마(*Saccharina japonica*) 양식장에 전남 진도군에서 생산된 다시마 종묘를 구입하여 이식하고 4월에 엽장이 1-1.5 m까지 성장한 개체를 동해수산연구소 내 실험실로 운반하였다. 운반된 다시마는 여과해수로 수회 세척하여 조체에 부착된 퇴적물(sediments)과 착생식물(epiphytes) 및 동물을 제거한 후 기저부로부터 50 cm의 길이로 잘라 1 ton 수조에서 3일 동안 유수식으로 수용하였다. 이때 조도는 $40 \mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$, 광주기는 12L:12D, 수온은 10-12°C였으며 다시마는 건강한 상태를 유지하였다.

다시마의 영양염 제공은 어류의 배설물을 이용하였으며, 이를 위하여 실험 전까지 조피볼락(*Sebastes schlegeli*) 25마리($415 \pm 24 \text{ g}$)를 1ton FRP 유수식 원형수조에 7일간 수용하였다. 이 기간 동안 사료는 만복으로 공급하였으며, 수온은 10-12°C, 광주기는 자연상태로 유지하였다.

다시마의 영양염 제거 효과조사

다시마의 영양염 제거 능력을 평가하기 위한 실험은 220 L FRP 원형 수조 5개를 대조구(control, C)와 해조류 처리구(treatment, T1, T2, T3, T4)로 설정하였다(Fig. 1). 모든 실험 수조에 200 L의 여과해수를 넣은 후, C는 실험 종료시까지 조

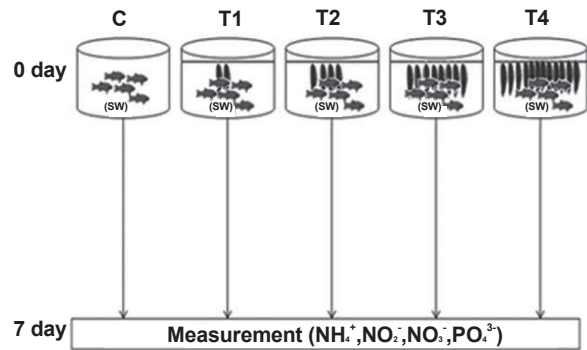


Fig. 1. Schematic showing the experimental design for this experiment.

피볼락 5마리만을 수용하였고, 나머지 T1-T4는 조피볼락을 5마리씩 수용한 다음, 다시마를 각각 0.5, 1, 2, 3 kg을 첨가하여 7일간 유지하였다. 실험기간동안 수온은 10-12°C, 조도는 $40 \mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$, 광주기는 12L:12D였으며, 충분한 에어레이션을 해주었다. 각 실험은 2반복으로 실시하였다.

채수 및 영양염 분석

본 연구에서 실험기간동안 24 h 간격으로 매일 12:00 h에 50 mL의 해수를 샘플링하여 분석전까지 -80°C에 보관하였다. 실험종료 후 동결 보관된 해수를 30°C로 세팅된 항온수조에 넣어 완전히 녹인 후 Strickland and Parsons (1972)의 방법을 기반으로 영양염(NH₄⁺ 및 PO₄³⁻) 농도를 2회 반복 측정하였다. 모든 수질분석은 표준비색분석법(standard colorimetric analysis method)을 활용한 자동비색기(Smartchem 200, Westco Scientific Instruments, Inc., USA)를 이용하여 분석하였으며, 흡광도 분석에 이용된 빛의 파장은 각각 630 및 880 nm였다.

생물여과효과(Biofiltering efficiency)

본 연구에서 해조류의 영양염제거효율(nutrient removal ef-

iciency; NRE) 및 영양염흡수율(nutrient uptake rate, NUR)은 조피볼락만을 수용한 실험구와 조피볼락과 해조류를 수용한 실험구의 영양염 농도를 바탕으로 다음과 같은 계산식에 의해 산출되었다(Zhou et al., 2006).

$$NRE (\%) = 100 - (100 \times C_t / C_0)$$

$$NUR (mg/L g^{-1} dry wt h^{-1}) = [(C_0 - C_t) \times V] / (B \times \Delta t)$$

여기서, C_0 는 어류만을 수용한 실험구의 영양염 농도(mg/L), C_t 는 t시간 경과 후 어류와 해조류를 수용한 실험구의 영양염 농도(mg/L), B는 해조류 생물량(g dry wt), Δt 는 경과시간을 나타낸다.

통계분석

해조류 수용량에 따른 NH_4^+ 와 PO_4^{3-} 농도에 대한 분석은 Levene의 등분산검정(test of homogeneity of variances)을 실시하여 데이터의 동질성이 확인되면 one-way Anova test를 실시하여 유의차를 검정하였고, 유의차가 발견되면 Tukey's HSD test 방법으로 사후검정 하였다. 해조류 수용량과 시간경과에 따른 NH_4^+ 와 PO_4^{3-} 농도에 대한 분석은 two-way Anova test를 실시하였고 해조류 수용량과 시간의 경과에 따른 NRE 및 NUR에 대한 분석은 one-way Anova test를 실시하였다. 통계분석을 위해 사용된 통계프로그램은 STATISTICA version 7.0이었다.

결 과

영양염 제거를 위한 다시마 적정량 조사

NH_4^+ 농도는 실험개시시 0.117 ± 0.021 mg/L이었으며, 조피볼락만을 수용한 C는 수용 7일 후 5.836 ± 0.904 mg/L까지 지속적으로 농도가 증가하였다(Table 1). 해조류 생물량(0.5-3 kg)을 달리하여 수용한 T1-T4는 실험 종료시 각각 3.004 ± 0.040 mg/L, 2.086 ± 0.133 mg/L, 1.642 ± 0.121 mg/L

및 0.775 ± 0.007 mg/L로 해조류 수용량이 증가함에 따라 NH_4^+ 의 유의적인 감소가 확인되었다($P < 0.05$, Fig. 2a). PO_4^{3-} 농도는 C에서 실험 개시시 0.005 ± 0.000 mg/L에서 종료시 0.440 ± 0.045 mg/L까지 지속적으로 증가하였다(Table 1). 실험 종료시 각 그룹별 PO_4^{3-} 농도는 T1에서 0.086 ± 0.000 mg/L, T2에서 0.031 ± 0.001 mg/L, T3에서 0.016 ± 0.001 mg/L, T4에서 0.013 ± 0.000 mg/L를 나타내 NH_4^+ 와 마찬가지로 해조류 수용량이 증가할수록 PO_4^{3-} 농도가 감소하였으며($P < 0.05$, Fig. 2b), 해조류를 수용한 모든 실험구(T1-T4)는 수용 5일까지 PO_4^{3-} 농도가 지속적인 증가하다가 6일부터 감소하였다($P < 0.05$, Table 1).

조피볼락만을 수용한 실험구의 영양염 농도를 기준으로 해조류 수용에 따른 NRE를 산출해 보면, NH_4^+ 의 경우 T1에서

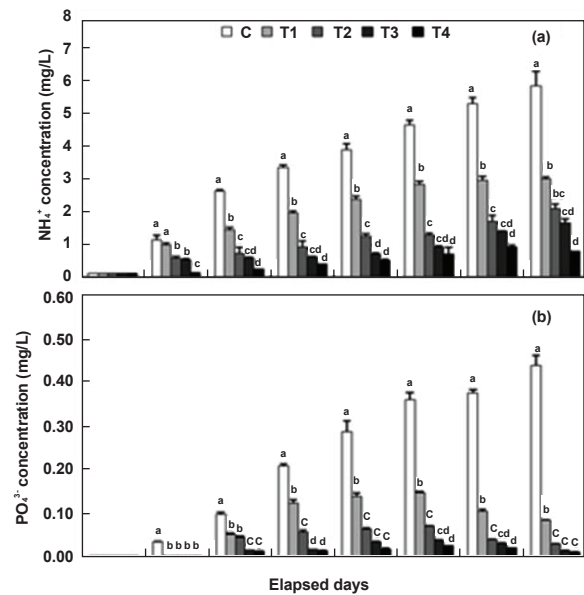


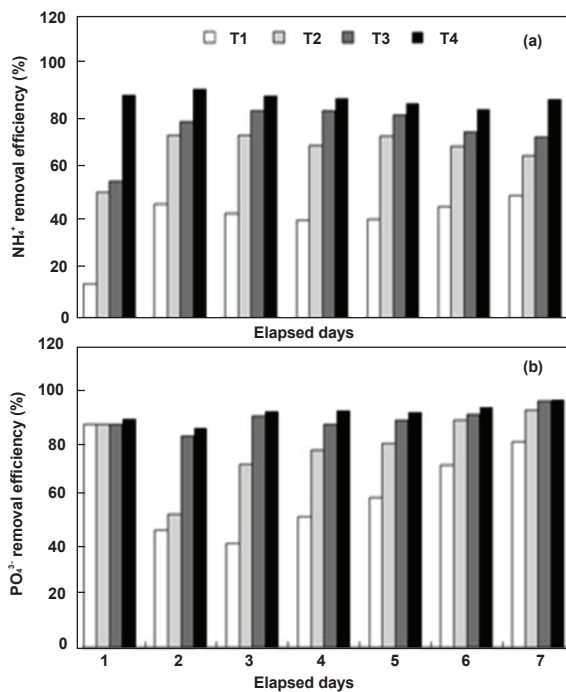
Fig. 2. Daily changes of NH_4^+ (a) and PO_4^{3-} (b) concentrations. Each value represents the mean \pm S.E (n=4). Different letters indicate a significantly different between groups within the same time ($P < 0.05$).

Table 1. Results of two-way ANOVA of the NH_4^+ and PO_4^{3-} concentrations

Factor	df	MS	F	P	MS	F	P
					NH_4^+	PO_4^{3-}	
Groups	4	42.92	751.99	< 0.01	0.25	1,529.86	< 0.01
Elapsed days	7	15.39	269.73	< 0.01	0.05	312.86	< 0.01
Groups×Elapsed days	28	1.94	34.04	< 0.01	0.02	118.35	< 0.01
Error	120	0.06			0.00		
Tukey test ($P=0.05$)							
Groups		C<T1<T2<T3<T4			C<T1<T2<T3=T4		
Elapsed days		0<1<2<3<4<5<6=7			0=1<2<3<4=6=7<5		

Table 2. Results of one-way ANOVA of the nutrients (NH_4^+ and PO_4^{3-}) removal efficiency and nutrients uptake rates

Factor	df	NH_4^+			PO_4^{3-}		
		MS	F	P	MS	F	P
NRE							
Groups	3	2930.8	78.33	< 0.01	1,275.4	16.40	< 0.01
Elapsed days	6	189.6	5.07	< 0.01	309.3	3.98	< 0.01
Error	18	37.4			77.8		
Tukey test ($P=0.05$)							
Groups		T1<T2= T3<T4			T1<T2≤T3≤T4		
Elapsed days		1<2=3=4=5=6=7			1 ≤3=4=5=6≤2=7		
NUR							
Groups	3	0.00	29.40	< 0.01	0.00	51.19	< 0.01
Elapsed days	6	0.00	4.67	< 0.01	0.00	5.19	< 0.01
Error	18	0.00			0.00		
Tukey test ($P = 0.05$)							
Groups		T1=T2<T3=T4			T1<T2<T3=T4		
Elapsed days		1=6=7≤3=4=5≤2			2≤1≤3=4=5=6≤7		

Fig. 3. Nutrients removal efficiency of *Saccarina japonica* in this experiment.

13.6-48.5%의 범위로 실험기간 평균 38.7%를 보였고 T2는 66.8%를, T3는 74.6%를, 그리고 T4는 87.0%로 해조류 수용량 증가와 함께 NRE도 증가하였다($P<0.05$, Table 2). PO_4^{3-} 의 NRE는 모든 실험구(T1-T4)에서 각각 62.3%, 78.7%,

89.4% 및 92.1%로 NH_4^+ 와 마찬가지로 해조류 생물량 증가와 함께 NRE도 증가하였다($P<0.05$, Fig. 3b). PO_4^{3-} 의 NRE는 0.5 kg을 수용한 T1에서 수용 3일 후 최소값을 보인 후 지속적인 증가를 보였고, T2는 수용 2일 후 지속적인 증가를 보인 반면 T3과 T4는 NRE의 증감은 확인되었으나 T1과 T2에 비해 변화가 크지 않은 것으로 나타났다(Fig. 3b).

조피볼락만을 수용한 실험구와 조피볼락과 해조류를 수용한 실험구의 영양염(NH_4^+ , PO_4^{3-}) 농도를 바탕으로 NUR ($\text{mg/L g}^{-1} \text{dry wt h}^{-1}$)을 산출한 결과는 Fig. 4와 같다. 해조류 수용량에 따른 NH_4^+ NUR을 보면, 실험기간 동안 T1 (0.5 kg)은 평균 $0.083 \text{ mg/L g}^{-1} \text{dry wt h}^{-1}$, T2 (1 kg)는 $0.073 \text{ mg/L g}^{-1} \text{dry wt h}^{-1}$, T3 (2 kg)는 $0.047 \text{ mg/L g}^{-1} \text{dry wt h}^{-1}$, T4 (3 kg)는 $0.032 \text{ mg/L g}^{-1} \text{dry wt h}^{-1}$ 으로 다시마 수용량이 증가할수록 NH_4^+ NUR은 감소하였다($P<0.05$, Table 2). 또한 시간의 경과에 따른 NH_4^+ NUR은 T3을 제외한 모든 실험구에서 수용 2일 후 가장 높은 값을 보인 후 감소하였으며, T3은 수용 4일 후 가장 높은 값을 보인 후 감소하였다(Fig. 4a, Table 2). PO_4^{3-} NUR은 모든 실험구에서 평균 $0.002\text{-}0.008 \text{ mg/L g}^{-1} \text{dry wt h}^{-1}$ 으로 0.5 kg의 해조류를 수용한 T1에서 최대였고 3 kg의 해조류를 수용한 T4에서 최소로 나타나 NH_4^+ 와 마찬가지로 해조류 생물량이 증가할수록 PO_4^{3-} NUR이 감소하는 것으로 확인되었다($P<0.05$, Table 2). 그룹별로 보면, T1의 경우 해조류 수용 2일 후 $0.005 \text{ mg/L g}^{-1} \text{dry wt h}^{-1}$ 로 최소값을 보인 후 지속적으로 증가하여 실험 종료 시 $0.011 \text{ mg/L g}^{-1} \text{dry wt h}^{-1}$ 로 최고값을 보였다. T2도 해조류 수용 2일 후 가장 낮은 값(0.003)을 보인 뒤 종료시 가장 높은 값(0.006)을 보였으나 T3과 T4는 해조류 수용 5일 후 각각 $0.003 \text{ mg/L g}^{-1} \text{dry wt h}^{-1}$, 0.002 mg/L

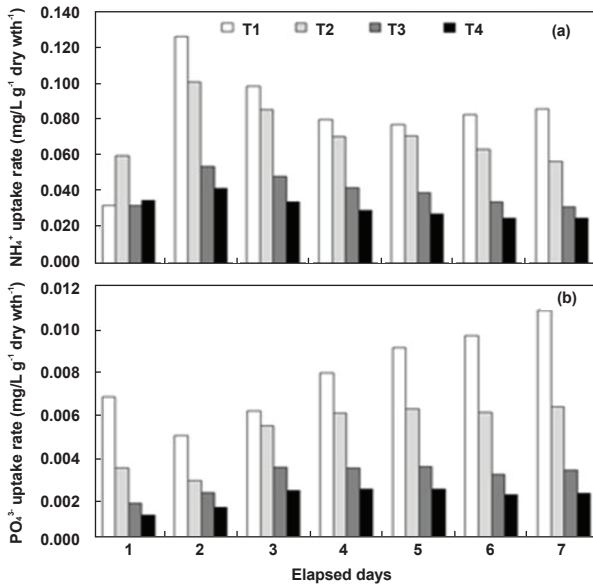


Fig. 4. Nutrients uptake rates of *Saccharina japonica* in this experiment.

g⁻¹ dry wt h⁻¹ 로 가장 높은 값을 보인 뒤 감소하였다(Fig. 4b).

고찰

어류 양식장으로부터 배출되는 질소화합물을 비롯한 영양염은 주로 양식 생물의 사료, 배설물 또는 대사과정에서 발생되며, 해양환경의 부영양화 등 환경 오염을 유발시키기도 한다 (Wu, 1995; Troell et al., 1999; Cao et al., 2007). 특히 NH₄는 어류에 있어 매우 높은 독성을 갖는 것으로 알려져 있다 (Mayadi, 2003). 따라서 양식장으로부터 배출되는 영양염을 감소시키는 것은 환경개선은 물론 양식생산량을 높일 수 있을 것으로 여겨진다. 영양염 제거 방법 중 해조류(*Porphyra yezoensis*, *Gracilaria verrucosa*, *Ulva rotundata*, *Enteromorpha intestinalis* 및 *Gracilaria gracilis*)를 이용한 다수의 연구가 수행되었다(Wu et al., 1984; Hernández et al., 2002; Troell et al., 2003).

본 연구에서는 시험어로부터 배출되는 영양염(NH₄⁺, PO₄³⁻)을 다시마가 효과적으로 제거하는 것으로 확인되었으며, 또한 영양염 농도는 다시마의 생물량이 많아질수록 유의하게 감소하는 것으로 나타났다. 그러나, 다시마가 IMTA를 위한 바이오필터 중으로서의 조건을 단순히 생물량으로 접근하는 것은 적합하지 않으므로 먼저 이종의 영양염 제거효율(NRE)을 고려해 볼 필요가 있다. 본 연구에서는 다시마(0.5-3.0 kg)의 NH₄⁺ 및 PO₄³⁻ NRE는 각각 38.7-87.0(평균: 66.8)%, 62.3-92.1(73.5)%로 NH₄⁺ 보다 PO₄³⁻를 더 효과적으로 제거하는 것으로 확인되었다. 그러나 Skriptsova and Miroshnikova (2011)의 연구에서 *Undaria pinnatifida*의 NH₄⁺ 및 PO₄³⁻ NRE는 각각 73.7%, 56.8% 그리고 *Gracilaria vermiculo-*

*phylla*는 각각 73.7%, 34.4%로 본 연구결과와 달리 NH₄⁺의 제거율이 높게 나타났는데, 이러한 차이는 영양염 종류에 대한 해조류의 종특이적 선택 때문으로 보여진다. 또한 *Gracilaria lemaneiformis*는 비단가리비(*Chlamys farreri*)로부터 배출된 NH₄⁺를 최대 83.7% 제거하여 본 연구와 유사한 NRE를 나타냈다(Mao et al., 2009). 반면, Kang et al. (2011)은 본 연구와 동일종인 다시마의 NH₄⁺ 및 PO₄³⁻ NRE가 각각 46.0%, 20.2%로 보고하였는데, 이때 해조류의 수용량은 10.0 g FW L⁻¹로 본 연구의 T3(2 kg 다시마)와 동일하였다. 본 연구의 T3에서는 NH₄⁺의 54.3-82.1(74.6)%, PO₄³⁻의 82.9-96.5 (78.4)%를 제거하여 Kang et al. (2011)의 결과에 비해 약 2-4배 높은 NRE를 보였는데, 이는 수온, 조도, 유속, 영양염 농도 등의 실험조건이 달랐기 때문으로 보여지며, 실제로 *G. vermiculophylla*에서 PO₄³⁻ NRE는 외부환경(지수식: 34.4%, 우수식: 81.6%)에 따라 차이를 보였다(Skriptsova and Miroshnikova, 2011). 이러한 결과를 볼 때, 해조류의 NRE는 해조류의 종, 크기, 밀도 등의 생물학적 요인과 수온, 조도, 염분, 영양염 농도 등의 물리·화학적 요인에 의해 영향을 받는 것으로 판단된다.

해조류의 영양염 흡수율(NUR)은 IMTA에서 바이오필터 대 상종으로서 가능성을 구명하기 위해 평가해야 할 중요 인자로서 NRE와 마찬가지로 물리·화학적 및 생물학적 요인에 의해 달라질 수 있다(Skriptsova and Miroshnikova, 2011). 본 연구에서 다시마의 NH₄⁺ 및 PO₄³⁻ NUR은 각각 0.032-0.083, 0.002-0.008 mg/L g⁻¹ dry wt h⁻¹로 3 kg의 다시마를 수용한 조건에서 최소값을 보인 반면, 0.5 kg을 수용한 조건에서 최대값을 나타냈다. Mao et al. (2009)의 연구에서도 NUR은 해조류의 생물량이 증가할수록 감소한 것으로 보고하여 본 연구와 동일한 패턴을 보였다. NUR은 특히 해수유동의 영향을 많이 받아, 일반적으로 해수유동이 증가하면 엽체표면의 영양염 흐름이 증가하여 NUR이 증가하는 것으로 알려져 있다(Buschmann et al., 2001; Hernández et al., 2002). 따라서 본 연구에서 해조류 생물량이 증가할수록 NUR이 낮게 나타난 이유는 동일한 수조에서 해조류의 양을 달리 하였기 때문에 많은 양의 해조류를 수용할 경우 에어레이션에 의한 해수와 엽체표면의 접촉기회가 낮아짐으로 인한 것으로 판단된다. 또한, 적은 해조류를 수용하였을 경우 흡수할 영양염의 농도가 상대적으로 높고, 해조류 생물량이 증가할수록 많은 해조류에 영양염이 고루 흡수됨으로 인하여 해조류 생물량이 증가할수록 NUR이 낮아질 가능성도 있다고 여겨진다. 따라서 다시마의 우수식 사육시스템 또는 실제 양식현장에서 NH₄⁺와 PO₄³⁻의 NUR은 본 연구보다 높을 것으로 사료된다.

일반적으로 해조류를 이용한 영양염제거 연구에서는 해조류의 흡수에 의해 배출된 영양염은 감소하지만, 지속적으로 배출됨으로 인해 시간이 경과할수록 영양염의 농도는 증가한다 (Mao et al., 2009). 본 연구에서도 NH₄⁺와 PO₄³⁻의 농도변화를 보면, NH₄⁺의 경우 해조류 수용 이후 농도의 증가량은 감소하였으나 해조류 수용여부와 상관없이 지속적인 농도의 증

가가 나타나 동일한 패턴을 보였다. 반면, PO_4^{3-} 는 해조류 수용 5일 후까지 농도가 증가하다가 이후 감소하여 차이를 보였다. 이러한 차이는 PO_4^{3-} 의 경우 시간의 경과와 함께 NUR이 지속적으로 증가하며(Mao et al., 2009), 본 연구에서 다시마의 NRE가 수용 6-7일 후 평균 86.5-91.8%로 매우 높게 나타남으로 인한 것으로 사료된다.

NH_4^+ 와 PO_4^{3-} 을 초기 공급된 해수수준(각각 0.117, 0.005 mg/L)으로 낮추기 위해 필요한 해조류 수용량을 알아보기 위해 배양 7일 후의 NH_4^+ 와 PO_4^{3-} 농도를 바탕으로 회귀분석을 실시한 결과, NH_4^+ 는 지수함수($y=3.8165e^{-0.0505x}$)로, PO_4^{3-} 는 거듭제곱함수($y=0.0359x^{-1.08}$)로 정의되었다(Fig. 5). 두 함수 모두 R^2 값이 0.95 이상으로 신뢰도가 매우 높았으며, 해수의 수질을 초기 공급된 해수수준으로 낮추기 위해서는 NH_4^+ 는 6.91 kg의 해조류가, PO_4^{3-} 는 6.62 kg의 해조류가 필요한 것으로 확인되었다.

해조류의 6개 기능형 중 일반적으로 기회종이라 알려진 엽상형과 사상형이 빠른 성장을 보이고 영양염 흡수율이 높은 반면 다년생의 느린 성장을 보이는 다육질형, 유절산호말형, 각상형 및 성긴분지형 해조류의 흡수율은 낮은 것으로 알려져 있다(Littler and Littler, 1984; Wallentinus, 1984). 본 연구에서 사용된 다시마는 다육질형이지만 해조류 중 세계적으로 가장 많이 양식되는 종으로 경제성이 매우 높은 종이다(FAO, 2010). 본 연구 결과 다시마는 다육질형임에도 불구하고 다른 엽상형이나 사상형 해조류와 유사한 영양염 제거 효율을 나타냈으며, 영양염 제거에 있어 PO_4^{3-} 는 NH_4^+ 보다 적은 양의 해조류로 가능하였다. 결론적으로 IMTA의 야외 양성에 있어 각 생물의 수용비율 산정은 NH_4^+ 농도를 기준으로 이루어져야 할 것으로 판단되며 조피볼락과 다시마의 최소 생물량 비율은 1 : 3.25 (2125 g : 6910 g)로 확인되었다. 또한 연중 지속적인 IMTA

수행을 위해서는 다양한 해조류와 어류를 이용한 생물여과 실험이 이루어져야 할 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 국립수산물과학원(어항을 활용한 어촌관광형 다영양 입체양식(IMTA) 기술 개발, RP-2012-AQ-069)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- Abreu MH, Varela DA, Henriquez L, Villarroel A, Yarish C, Sousa-Pinto I and Buschmann AH. 2009. Traditional vs. integrated multi-trophic aquaculture of *Gracilaria chilensis* Bird CJ, McLachlan J and Oliveira EC. productivity and physiological performance. *Aquacult* 293, 211-220.
- Abreu MH, Pereira R, Yarish C, Buschmann AH and Sousa-Pinto I. 2011. IMTA with *Gracilaria vermiculophylla*: productivity and nutrient removal performance of the seaweed in a land-based pilot scale system. *Aquacult* 312, 77-87.
- Bolton JJ, Robertson-Andersson DV, Shuuluka D and Kandjengo L. 2009. Growing *Ulva* (Chlorophyta) in integrated systems as a commercial crop for abalone feed in South Africa: a SWOT analysis. *J Appl Phycol* 21, 575-583.
- Buschmann AH, Hernández-González MC, Aranda C, Chopin T, Neori A, Halling C and Troell M. 2008. Mariculture waste management. In: Jørgensen SE and Fath BD (Eds.), *Ecological Engineering : Encyclopedia of Ecology* 5 vols. Elsevier, Oxford, U.K., 2211-2217.
- Buschmann AH, Hernández-González MC, Flores R, Gutiérrez A, Varela D and Huovinen P. 2010. Massive kelp production in Chile: future prospects, challenges and limitations. XXth International Seaweed Symposium book of abstracts, Ensenada, Mexico, 51.
- Buschmann AH, Troell M and Kautsky N. 2001. Integrated algal farming: a review. *Cah Biol Mar* 42, 83-90.
- Cao L, Wang W, Yang Y, Yang V, Yuan Z, Xiong S and Diana J. 2007. Environmental Impact of Aquaculture and Countermeasures to Aquaculture Pollution in China. *Env Sci Pollut Res* 14, 452-462.
- Chopin T, Robinson SMC, Troell M, Neori A, Buschmann AH and Fang J. 2008. Multitrophic integration for sustainable marine aquaculture. In: Jørgensen SE and Fath BD (Eds.), *Ecological Engineering. : Encyclopedia of Ecology* 5 vols. Elsevier, Oxford, U.K., 2463-2475.
- Costa-Pierce B. 2010. Sustainable ecological aquaculture systems: the need for a new social contract for aquaculture development. *Mar Tech Soc J* 44, 88-112.
- De Casabianca ML, Laugier T and Marinho-Soriano E. 1997. Seasonal changes of nutrients in water and sediment in a Mediterranean lagoon with shellfish farming activity (Thau Lagoon, France). *ICES J Mar Sci* 54, 905-916.
- FAO. 2010. *FAO State of the World Fisheries and Aquaculture*

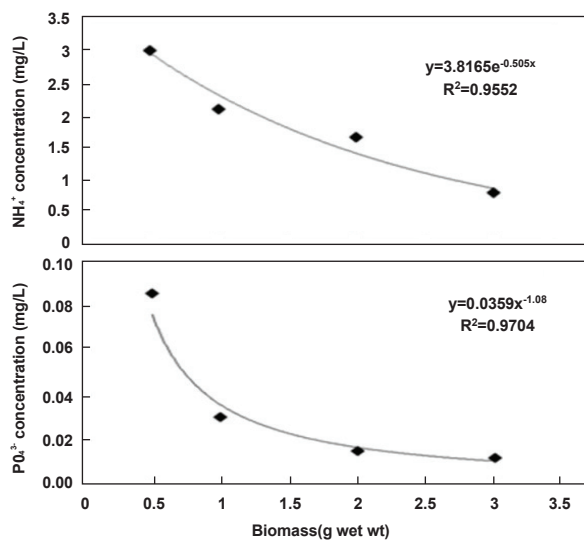


Fig. 5. Nonlinear regression models of NH_4^+ (a) and PO_4^{3-} (b) concentration for estimating seaweed biomass.

2010. Fisheries and Aquaculture Department, Rome. Italy
- Goldman JC, Tenore RK, Ryther HJ and Corwin N. 1974. Inorganic nitrogen removal in a combined tertiary treatment-marine aquaculture system. I. Removal efficiencies. *Water Res* 8, 45-54.
- Hayashi L, Yokoya NS, Ostini S, Pereira RT, Braga ES and Oliveira EC. 2008 Nutrients removed by *Kappaphycus alvarezii* (Rhodophyta, Solieriaceae) in integrated cultivation with fishes in recirculating water. *Aquacult* 277, 185-191.
- Hernández I, Martínez-Aragón JF, Tovar A, Pérez-Lloréns JL 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 2. Ammonium. *J Appl Phycol* 14, 375-384.
- Holmer M, Hansen PK, Karakassis I, Borg JA and Schembri PJ. 2008. Monitoring of environmental impacts of marine aquaculture. In: Holmer, M., Black, K., Duarte, C.M., Marbà, N., Karakassis, I. (Eds.), *Aquaculture in the Ecosystem*. Springer, USA, 47-85.
- Kang YH, Park SR and Chung IK. 2011. Biofiltration efficiency and biochemical composition of three seaweed species cultivated in a fish-seaweed integrated culture. *Algae* 26, 97-108.
- Lander T, Barrington K, Robinson S, MacDonald B and Martin J. 2004. Dynamics of the blue mussel as an extractive organism in an integrated multi-trophic aquaculture system. *Bull Aquacult Assoc Can* 104, 19-28.
- Littler MM and Littler DS. 1984. Relationships between macroalgal functional form groups and substrate stability in a subtropical rocky intertidal system. *J Exp Mar Biol Ecol* 74, 13-34.
- Martínez-Aragón JE, 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. *J Appl Phycol* 14, 365-374.
- Mao Y, Yang H, Zhou Y, Ye N and Fang J. 2009. Potential of the seaweed *Gracilaria lemaneiformis* for integrated multi-trophic aquaculture with scallop *Chlamys farreri* in north China. *J Appl Phycol* 21, 649-656.
- Mayadi L. 2003. Nitrogen Budget in Sea Bass (*Lates calcarifer Bloch*) Culture With Different Level Protein Diets. Master Thesis, Kasetsart University, Bangkok, Thailand.
- Mendiguchía C, Moreno C, Manuel-Vez MP and García-Vargas M. 2006. Preliminary investigation on the enrichment of heavy metals in marine sediments originated from intensive aquaculture effluents. *Aquacult* 254, 317-325.
- Mente E, Pierce PJ, Santos MB and Neofitou C. 2006. Effect of feed and feeding in the culture of salmonids on the marine aquatic environment: a synthesis for European aquaculture. *Aquacul Internat* 14, 499-522.
- Naylor R, Goldburg R, Primavera J, Kautsky N, Beveridge M, Clay J, Folke C, Lubchenco J, Mooney H and Troell M. 2000. Effect of aquaculture on world fish supplies. *Nature* 405, 1017-1024.
- Neori A, Chopin T, Troell M, Buschmann AH, Kraemer GP, Halling C, Shpigel M and Yarish V. 2004. Integrated aquaculture: rationale, evolution and state of the art emphasizing seaweed biofiltration in modern mariculture. *Aquacult* 231, 361-391.
- Neori A, Shpigel M and Ben-Ezra D. 2000. A sustainable integrated system for culture of fish, seaweed and abalone. *Aquacult* 186, 279-291.
- Neori A, Troell M, Chopin T, Yarish C, Critchley A and Buschmann A. 2007. The need for a balanced ecosystem approach to Blue Revolution Aquaculture. *Environment* 49, 38-42.
- Ryther JH, Goldman JC, Gifford CE, Huguenin JE, Wing AS, Clarner JP, Williams LD and Lapointe BE. 1975. Physical models of integrated waste recycling-marine polyculture systems. *Aquacult* 5, 163-177.
- Sanderson JC, Cromey CJ, Dring MJ and Kelly MS. 2008. Distribution of nutrients for seaweed cultivation around salmon cages at farm sites in north-west Scotland. *Aquacult* 278, 60-68.
- Skriptsova AV and Miroshnikova NV. 2011. Laboratory experiment to determine the potential of two macroalgae from the Russian Far-East as biofilters for integrated multi-trophic aquaculture (IMTA). *Bioresour Technol* 102, 3149-3154.
- Strickland JDH and Parsons TR. 1972. *A Practical Handbook of Sea Water Analysis*. Fisheries Research Board of Canada, Ottawa, Canada, 1-311.
- Troell M, Halling C and Neori A. 2003. Integrated mariculture: Asking the right questions. *Aquacult* 226, 69-90.
- Troell M, Rönnbäck P, Halling C, Kautsky N and Buschmann A. 1999. Ecological engineering in aquaculture: use of seaweeds for removing nutrients from intensive mariculture. *J Appl Phycol* 11, 89-97.
- Wallentinus I. 1984. Comparisons of nutrient uptake rates for Baltic macroalgae with different thallus morphologies. *Mar Biol* 80, 215-225.
- Wu R. 1995. The environmental impact of marine fish culture: Towards a sustainable future. *Mar Poll Bull* 31, 159-166.
- Wu CY, Zhang YX, Li RZ, Penc ZS, Zhang YF, Liu QC, Zhang JP and Fang X. 1984. Utilization of ammonium-nitrogen by *Porphyra yezoensis* and *Gracilaria verrucosa*. *Hydrobiologia* 116/117, 475-477.
- Wurts WA. 2000. Sustainable aquaculture in the twenty-first century. *Rev Fish Sci* 8, 141-150.
- Zhou Y, Yang H, Hu H, Liu Y, Mao Y, Zhou H, Xu X and Zhang F. 2006. Bioremediation potential of the macroalga *Gracilaria lemaneiformis* (Rhodophyta) integrated into fed fish culture in coastal waters of north China. *Aquacult* 252, 264-276.