

탄소 및 질소안정동위원소 조성에 의한 남해안 진동만 양식 미더덕의 먹이원 평가

문창호 · 박현제^{1,*} · 윤성규² ·곽정현¹

부경대학교 해양학과

¹광주과학기술원 환경공학부

²대구대학교 과학교육학부

Food Sources of the Ascidian *Styela clava* Cultured in Suspension in Jindong Bay of Korea as Determined by C and N Stable Isotopes

CHANGHO MOON, HYUN JE PARK^{1,*}, SUNG GYU YUN² AND JUNG HYUN KWAK¹

Department of Oceanography, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea

¹School of Environmental Science and Engineering, Gwangju Institute of Science and Technology, Gwangju 500-712, Korea

²Division of Science Education, Daegu University, Gyeongsan 712-714, Korea

2008년 4월에서 2009년 1월 사이에 진동만 미더덕의 섭식 생태를 설명하기 위하여 20 µm 이상(coarse particulate organic matter, CPOM) 그리고 0.7 µm 이상 20 µm 이하(fine POM)의 크기가 나누어진 각각의 부유입자유기물과 미더덕에 대한 δ¹³C 과 δ¹⁵N 값의 월별 변동을 비교 분석하였다. CPOM과 FPOM의 δ¹³C 및 δ¹⁵N을 월별로 비교한 결과 전체적으로 CPOM(평균 -18.5±1.2‰, 9.3±0.7‰)이 FPOM(평균 -20.5±1.5‰, 8.4±0.5‰)에 비해 유의하게 높은 값을 나타내었다. 미더덕의 δ¹³C과 δ¹⁵N 값은 각각 평균 -18.9(±1.7)‰과 11.6(±0.7)‰로 나타났는데, 이와 같은 비값들은 CPOM 보다는 FPOM의 월별 변동과 비슷한 경향을 보여 이들이 CPOM에 비하여 상대적으로 FPOM에 더 높은 영양 의존도를 가진다는 것을 강하게 시사해 주었다. 그러나 미더덕의 먹이원으로서 CPOM과 FPOM의 상대적인 중요성은 시기에 따른 각 요소의 가용성(availability)에 크게 의존하는 것으로 나타났는데, 이와 같은 결과는 부유입자물질의 크기에 관계없이 미더덕에 의한 비선택적 먹이 섭식을 잘 반영하는 듯 하였다. 본 연구 결과는 미더덕의 지속적인 양식생산을 유지하기 위해 가용 먹이원으로서 식물플랑크톤과 함께 미소 부유입자유기물의 유용성을 고려해야함을 잘 나타내 주었다.

To examine the trophic ecology of the ascidian *Styela clava* in an aquaculture system of Korea, stable carbon and nitrogen isotopes were analyzed monthly in *S. clava*, coarse (>20 µm, CPOM) and fine particulate organic matters (0.7<<20 µm, FPOM). CPOM (means: -18.5±1.2‰, 9.3±0.7‰) were significantly higher δ¹³C and δ¹⁵N values than those (-20.5±1.5‰, 8.4±0.5‰) of FPOM. *S. clava* had mean δ¹³C and δ¹⁵N values of -18.9(±1.7)‰ and 11.6(±0.7)‰, respectively. *S. clava* were more similar to seasonal variations in δ¹³C and δ¹⁵N values of FPOM than those of CPOM, suggesting that they rely largely on the FPOM as a dietary source. In addition, our results displayed that the relative importance between CPOM and FPOM as dietary source for the ascidians can be changed according to the availability of each component in ambient environment, probably reflecting their feeding plasticity due to non-selective feeding irrespective of particle size. Finally, our results suggest that dynamics of pico- and nano-size plankton (i.e., FPOM) as an available nutritional source to *S. clava* should be effectively assessed to maintain and manage their sustainable aquaculture production.

Key words: *Styela clava*, Feeding strategy, Food sources, Stable isotopes, Aquaculture

서 론

해조류(海鞘類, ascidian)인 미더덕(*Styela clava*)은 대표적인 부착성 부유물 섭식자(suspension feeder)로서 북동 태평양에서부터 유럽 그리고 남반구의 뉴질랜드에 걸쳐 전 세계적으로 분포하고 있다(Davis and Davis, 2008; Kang *et al.*, 2011). 미더덕은 다른 부유물 섭식자인 굴이나 담치류 같은 양식생물들과 공간 및 먹이 경쟁을 일으키는 해적생물로 잘 알려져 있다(Thompson and Macnair, 2004; Bourque *et al.*, 2007). 그러나 우리나라에서는 특유의 향과 맛으로 인해 수요증가와 함께 1990년대 후반부터 남해의 진동만을 중심으로 양식산업으로 발전하였다. 양식생물로서 미더덕의 연간생산량은 2001년에는 약 15,000톤까지 증가하였으나, 대량폐사와 종패의 부족 등으로 인해 이후 꾸준히 감소하여 2012년에는 약 2,500톤까지 감소하게 되었다(MIFAFF, 2012; Kang *et al.*, 2011). 진동만 미더덕 생산량 감소는 빈산소 수괴의 출현과 강우에 의한 저염분 현상이 영향을 끼친 것으로 보고되었으나, 생태학적 원인에 대해서는 명확하게 밝혀진 바가 없다(MIFAFF, 2011; Park *et al.*, 2012).

양식생물의 지속적인 어업생산 기반을 위해서는 양식장의 먹이 환경과 양식생물의 생리·생태학적 특성에 대한 정보는 필수적이다. Bourque *et al.*(2007)는 폐류양식의 생산성 향상을 위해 먹이 경쟁자이자 해적생물로서 미더덕의 생식주기와 초기생활사에 관한 연구를 수행하였다. Jiang *et al.*(2008a, b)은 생리실험을 통해 온도도와 염분 변화에 따른 미더덕의 산소소모량을 계산하였고, 온도 변화에 따른 미더덕의 에너지 역학 변동을 연구하여 16–20°C에서 미더덕이 가장 잘 성장하는 것을 밝혔다. 국내에서는 진동만 미더덕을 대상으로 효율적인 생산성 향상을 위해 양식 기간 동안에 이들의 에너지 역학과 체내의 생화학 조성의 계절 변동을 파악하는 연구가 진행되어 수온이 낮은 가을과 겨울의 기간이 생산성을 높이는 가장 적합한 양식 시기인 것을 밝혔다(Kang *et al.*, 2011). 그러나 미더덕이 생태계에 미치는 영향과 양식생물로서의 중요성에도 불구하고 미더덕의 먹이원과 먹이섭식 양식에 대한 연구는 거의 이루어진바가 없다.

생태계의 구조와 기능을 이해하는데 있어서 그 생태계에 서식하는 동물들의 영양기저(trophic base)에 대한 정보는 이 생태계의 보존과 지속적인 관리를 위한 가장 기본적인 과정이라 할 수 있다(Pasquaud *et al.*, 2007). 그러나 연안생태계는 다양한 유기물 공급원이 존재하기 때문에 동물생산에 대한 주요 생산자들의 상대적인 기여를 평가하는 것은 쉽지 않다. 그러나 최근 해양생태계에서 동물군들이 이용하는 영양원과 먹이망 연구에 있어 추적자로서 탄소 및 질소안정동위원소 비($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$)값을 사용하는 방법이 효과적으로 이용된다는 것이 입증되어 왔다(Fry and Sherr, 1984; Michener and Schell, 1994; Kang *et al.*, 2003; Kang *et al.*, 2009). 안정동위원소 비값을 이용한 방법은 동물 생체를 구성하는 원자들(atoms)이 그들이 이용한 먹이의 원자들에 유래한다는 것에 근거하는데, 이 값은 채집 전에 동물들에 의하여 일정기간 동안 이용되어 생체에 동화된 먹이의 총체적인 생체 기록을 나타내어 탄소 및 질소안정동위원소 조성 분석을 통하여 소비자가 이용하는 유기물 기원을 추적하는데 있어서 유용하게 이용될 수 있다(Fry and Sherr, 1984; Peterson and Fry, 1987; Post, 2002).

본 연구는 미더덕 양식장이 밀집되어 있는 진동만의 양식 미더덕을 대상으로 안정동위원소를 이용하여 미더덕의 주요 영양원과 섭식생태를 평가하기 위하여 수행되었다. 이를 위하여 미더덕 양식기 동안 매달 잠재 먹이원으로서 20 μm 를 기준으로 크기에 따라 분리(size-fraction)한 부유입자유기물(suspended particulate organic matter, POM)과 미더덕의 $\delta^{13}\text{C}$ 과 $\delta^{15}\text{N}$ 분석하고 이들 값을 비교함으로써 양식 미더덕에 대한 영양기저와 먹이섭식생태를 밝히고자 하였다.

재료 및 방법

연구해역

본 연구를 위한 현장조사 및 시료 채집은 2008년 4월에서 2009년 1월 사이에 남해 동부에 위치한 진동만 미더덕 양식장(35°8'N, 128°3'E)을 대상으로 실시하였다(Fig. 1). 진동만은 부유물섭식을 하는 굴과 담치 등으로 대표되는 이매패류와 미더덕 같은 피낭동물을 양식하는 곳으로 잘 알려져 있다. 진동만의 양식어업면적은 274건이고, 이중에서 81건이 미더덕 양식어업이 차지하고 있다(Park *et al.*, 2012). 군사지역을 제외한 진동만 해역의 총 면적은 약 4600 ha이고, 이중에서 약 300 ha는 미더덕 양식장으로서 이용되고 있다(Park *et al.*, 2012). 여름에 빈번한 적조발생과 빈산소 현상의 발생으로 만 내 양식생물 생산이 급감하고 있다고 보고된 바 있다(Kim *et al.*, 2001; Kim and Kim, 2003). 진동만 전체 평균 수심은 약 8.8 m이고 조차는 반일주조(semidiurnal)로 대조(spring tide)시 조차는 2.0 m이다.

시료 채집 및 분석 준비

잠재 먹이원으로서 수주(water column)내의 부유입자유기물 시료는 van Dorn 채수기를 이용하여 수심 약 1 m 정도의 아표층수 60 L 이상을 채수하여 200 μm 의 망목으로 동물플랑크톤이나 크기가 큰 입자물질을 제거한 후, 다시 20 μm 망목에 여과시켜 20 μm 이상의 micro-phytoplankton으로 주로 구성된 coarse POM(CPOM)을 포집하였다. 이후 20 μm 망목에 여과 된 해수를 450°C에서 4시간 동안 미리 태워서 준비한 GF/F 필터지(공극 0.7 μm)를 이용하여 다시 여과하여 pico와 nano-plankton으로 구성된 fine POM(FPOM)을 포집하였다. 망목과 필터지에 포집된 각각의 POM은 탄소안정동

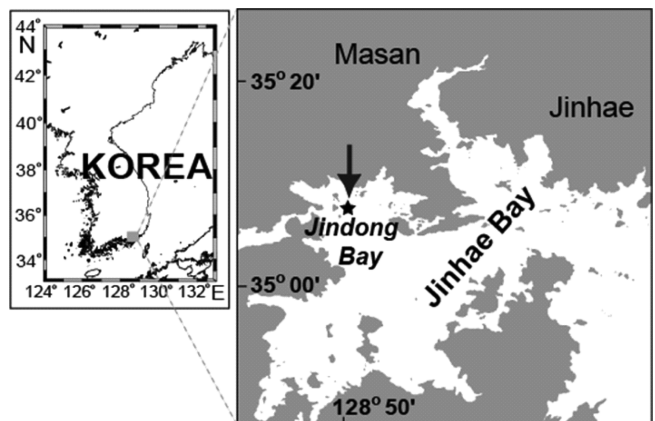


Fig. 1. Map showing the sampling station (★) in Jindong Bay, Korea.

위원소 분석을 위해 1N HCl 2~3 방울을 가해 무기탄소(inorganic carbonate)를 제거하고 다시 증류수로 세척한 후 동결건조하여 분석시까지 데시케이터에 보관하였다.

안정동위원소 분석을 위한 표본은 조사 정점에서 수심 1~5 m 사이에서 수하양식 중인 미더덕을 현장에서 직접 무작위로 5개체 이상을 채집하였다. 채집된 시료는 냉장 보관하여 실험실로 운반하였고, 운반된 시료는 안정동위원소 분석을 위하여 육질부위를 절개하여 냉동 보관하였다. 냉동된 시료는 -70 °C 이하에서 동결 건조하고 분말화한 뒤 분석 시까지 데시케이터에 보관하였다.

안정동위원소 분석

잠재 먹이원의 경우 필터지에 포집된 FPOM 시료는 tin disk에 밀봉하고 분말 건조된 CPOM 시료는 균질화한(homogenized) 후 5~10 mg을 tin capsule에 밀봉하였고, 동물체인 미더덕 시료는 균질화한 후 1~2 mg을 tin capsule에 넣고 밀봉하였다. 밀봉된 시료들은 원소분석기(Automated elemental analyzer, Eurovector 3000 Series)에 주입하여 고온(1,030 °C)에서 연소시켰는데, 이때 안정동위원소 분석을 위한 유도기체로는 헬륨(He)을 이용하였다. 연소 후 발생하는 CO₂ 가스에 대하여 안정동위원소질량분석기를 장착한 continuous flow-through inlet system(Isotope Ratio Mass Spectrometer, Isoprime CF-IRMS, Micromass, UK)을 이용하여 탄소 및 질소안정동위원소 비를 분석 하였다. 잠재 먹이원과 미더덕이 가지는 안정동위원소 비 값은 다음과 같은 식에 의해 국제 표준물질(International standard material)에 대한 시료의 그 비 값 변위를 천분율(‰)로 나타내어 δ 기호로 표현하였다: $\delta X(\%) = [(R_{\text{sample}}/R_{\text{standard}}) - 1] \times 10^3$, 여기서 X는 ¹³C 또는 ¹⁵N, R은 ¹³C/¹²C 또는 ¹⁵N/¹⁴N 비를 나타낸다. 사용한 탄소안정동위원소 표준물질은 PDB(PeeDee Belemnite)로, 질소안정동위원소 표준물질은 air N₂로 국제표준 기준을 사용하였다. 실제 분석결과를 보정하기 위해서 국제적으로 공인된 IAEA CH-6(sucrose, $\delta^{13}\text{C} = -10.4 \pm 0.2\%$) 그리고 IAEA-N1(ammonium sulfate, $\delta^{15}\text{N} = +0.4 \pm 0.2\%$)을 reference material로 이용하였다. 분석의 정밀성을 위해 urea를 이용한 20회 이상의 반복 실험에서 얻어진 값들에 대한 표준편차는 $\delta^{13}\text{C}$ 은 0.1‰ 그리고 $\delta^{15}\text{N}$ 은 0.2‰ 이하를 나타내었다. 모든 안정동위원소 분석 자료는

SPSS software(Chicago, USA)를 이용하여 정규성(normality)과 분산의 동질성(homogeneity) 검정을 실시하였다. 부유입자유기물의 크기(CPOM과 FPOM)에 따른 $\delta^{13}\text{C}$ 과 $\delta^{15}\text{N}$ 값 각각의 차이를 알아보기 위해 paired *t*-test를 통하여 비교 검정하였다. CPOM과 FPOM 그리고 미더덕의 $\delta^{13}\text{C}$ 과 $\delta^{15}\text{N}$ 값 각각의 월별 변동 정도를 알아보기 위해 변동계수(coefficient variation, CV = 표준편차/평균값)를 이용하였다.

결과 및 고찰

입자유기물의 안정동위원소 조성

2008년 4월에서 2009년 1월 사이의 진동만 입자유기물의 탄소 및 질소안정동위원소 비값의 월변동을 Table 1에 나타내었다. 크기에 따라 구분된 CPOM과 FPOM의 안정동위원소 비값을 월별로 비교한 결과, $\delta^{13}\text{C}$ 및 $\delta^{15}\text{N}$ 값 모두 유의한 차이를 보였다(paired *t*-test, *p*=0.001). CPOM과 FPOM의 $\delta^{13}\text{C}$ 값은 각각 $-20.5(\pm 0.7) \sim -16.9(\pm 0.3)\%$ 그리고 $-23.4(\pm 0.1) \sim -18.9(\pm 0.3)\%$ 의 범위를 나타내어 전체적으로 CPOM이 FPOM에 비해 유의하게 높은 값을 보였다(Fig. 2). CPOM의 $\delta^{15}\text{N}$ 값은 $8.2(\pm 0.2) \sim 10.1(\pm 0.7)\%$ 의 범위를 나타내어 $7.1(\pm 0.3) \sim 9.5(\pm 0.5)\%$ 범위를 가지는 FPOM 보다 높은 값을 보였다. 부유입자유기물의 크기에 따른 동위원소 비값의 차이는 다수의 해양생태계 입자물질 연구에서 보고되어 왔다(Gearing *et al.*, 1984; Rau *et al.*, 1990; Rolff, 2000; Sato *et al.*, 2006). 그리고 한반도 남해의 통영연안에서도 CPOM과 FPOM의 $\delta^{13}\text{C}$ 및 $\delta^{15}\text{N}$ 값을 월별로 측정된 결과 두 값 모두 CPOM이 FPOM 보다 약 2~3‰ 정도 높게 나타나 본 연구의 결과와 잘 일치하였다(Kang *et al.*, 2009). 이와 같은 차이는 CPOM과 FPOM을 구성하는 플랑크톤의 종조성 차이에 의해 설명될 수 있는데, 규조류(diatom)로 주로 구성된 CPOM이 nano-plankton으로 이루어진 FPOM에 비해 $\delta^{13}\text{C}$ 값이 대개 높다는 것은 이전의 연구들에서 보고되었다(Rolff, 2000; Sato *et al.*, 2006; Kang *et al.*, 2009). Rau *et al.*(1990)는 CPOM에 비해 FPOM이 낮은 $\delta^{13}\text{C}$ 값을 보이는 것은 pico-size의 박테리아 또는 prymnesiophytes가 기여할 수 있다는 것을 제시하였다. $\delta^{15}\text{N}$ 값 또한 상대적으로 작은 크기의 입자물질이 낮은 $\delta^{15}\text{N}$ 값을 가지는 것으로

Table 1. Monthly mean $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ values (± 1 SD, ‰) of suspended particulate organic matters (POM) and *Styela clava* in the sampling site from April 2008 to January 2009. CPOM, coarse POM, 20 to 200 μm ; FPOM, fine POM, < 20 μm

	CPOM			FPOM			<i>Styela clava</i>		
	$\delta^{13}\text{C}$	$\delta^{15}\text{N}$	n	$\delta^{13}\text{C}$	$\delta^{15}\text{N}$	n	$\delta^{13}\text{C}$	$\delta^{15}\text{N}$	n
2008									
April	-20.5 (0.6)	8.8 (0.4)	2	-21.4 (0.6)	7.1 (0.3)	2	-20.7 (0.2)	11.0 (0.5)	4
May	-18.2 (0.7)	8.2 (0.2)	3	-20.9 (0.6)	7.7 (0.6)	3	-20.0 (0.5)	11.3 (0.1)	4
June	-18.9 (0.2)	9.1 (0.3)	4	-19.6 (0.7)	7.6 (0.3)	4	-18.7 (0.3)	11.9 (0.4)	4
July	-19.2 (0.4)	9.8 (0.3)	4	-20.1 (0.2)	9.5 (0.5)	4	-18.8 (0.6)	12.9 (0.7)	3
August	-17.6 (0.5)	9.6 (0.8)	3	-18.9 (0.3)	9.2 (0.6)	3	-18.5 (0.7)	12.0 (0.1)	3
September	-17.4 (0.4)	8.9 (0.6)	3	-19.0 (0.3)	8.4 (0.8)	3	-16.4 (0.3)	12.3 (0.1)	4
October	-16.9 (0.3)	10.1 (0.7)	4	-19.0 (0.5)	9.2 (0.7)	4	-15.8 (0.3)	11.8 (0.4)	4
November	-17.0 (0.6)	10.4 (0.5)	4	-20.5 (0.2)	8.9 (0.5)	4	-19.1 (0.2)	11.0 (0.2)	4
December	-18.1 (0.4)	9.7 (0.5)	3	-22.2 (0.3)	7.8 (0.6)	3	-20.6 (0.3)	10.5 (0.1)	4
2009									
January	-20.1 (0.6)	8.6 (0.2)	4	-23.4 (0.1)	8.3 (0.4)	4	-20.6 (0.2)	11.0 (0.1)	4

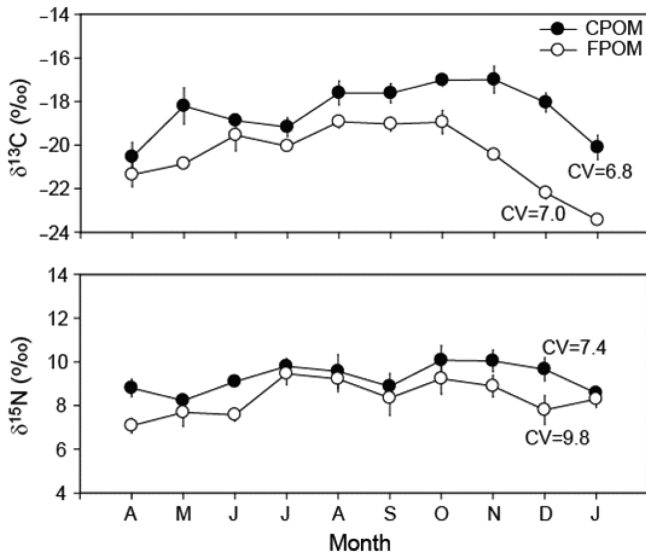


Fig. 2. Monthly mean $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ values (± 1 SD) of suspended particulate organic matters (POM) in the sampling site from April 2008 to January 2009. CPOM, coarse POM, 20 to 200 μm ; FPOM, fine POM, < 20 μm ; CV, coefficient of variation.

보고되었다(Rau *et al.*, 1990; Sato *et al.*, 2006). Minagawa and Wada(1986)는 동중국해에서 추출한 cyanobacteria가 현장에서 95 μm 망목으로 채집한 POM에 비하여 $\delta^{15}\text{N}$ 값이 2~4‰ 정도 낮다는 것을 관측하였다.

월별 CPOM과 FPOM의 안정동위원소 비 값을 분석한 결과 CPOM(CV=6.8 for $\delta^{13}\text{C}$, CV=7.0 for $\delta^{15}\text{N}$)에 비하여 FPOM(CV=7.4 for $\delta^{13}\text{C}$, CV=9.8 for $\delta^{15}\text{N}$)의 변동폭이 상대적으로 높았다(Fig. 2). 흔히 식물플랑크톤과 같은 일차생산자들은 복잡한 연안 환경에서 안정동위원소 비값이 변동할 수 있다(Sato *et al.*, 2006; Kang *et al.*, 2003). 남해 통영 연안에서 측정된 CPOM과 FPOM의 월별 안정동위원소분석 결과에서는 $\delta^{15}\text{N}$ 값은 본 연구의 결과와 비슷한 경향을 보였으나, $\delta^{13}\text{C}$ 값은 반대로 FPOM에 비하여 CPOM의 월별 변동폭이 크게 나타났다(Kang *et al.*, 2009). 이와 같은 $\delta^{13}\text{C}$ 와 $\delta^{15}\text{N}$ 변동의 해석간의 차이와 월별 변동은 온도, $p\text{CO}_2$ 와 영양염 농도, 식물플랑크톤 생물량 및 엽록소 농도, 식물플랑크톤의 종조성 그리고 기초생산 등 환경요인들과 식물플랑크톤의 특성에 따른 다양한 요인에 의해 영향을 받는 것으로 보고되었다(Cifuentes *et al.*, 1988; France, 1995; Fry, 1996).

본 연구에서 보고된 CPOM($-18.4 \pm 1.2\text{‰}$)과 FPOM($-20.5 \pm 1.5\text{‰}$)이 보이는 $\delta^{13}\text{C}$ 값은 해양 식물플랑크톤이 가지는 전형적인 범위에 해당하며, 한반도 연안이나 동중국해에서 조사된 값들과도 매우 유사하였다(Fry and Sherr, 1984; Tan *et al.*, 1991; Kang *et al.*, 2003, 2009). 조사기간 중 총 부유입자유기물(SPM)과 유기입자물질(POM) 농도와 엽록소 *a*(chlorophyll *a*)의 월별 변화는 뚜렷한 계절적인 변동을 보이지 않았는데(Fig. 3, Kang *et al.*, 2011), 이와 관련하여 여름의 장마시기에도 SPM과 POM 농도가 높지 않은 것은 진동만으로 강물이나 하천에 의한 육상기원 유기물 유입의 영향이 높지 않다는 것을 시사해준다. 조사기간 중 부유입자유기물의 유기탄소/질소(POC/PN) 비는 8.0~9.3의 범위를 보였는데(Kang *et al.*, 2011), 이와 같은 범위는 해양 식물플랑크톤의 전형적인 값에

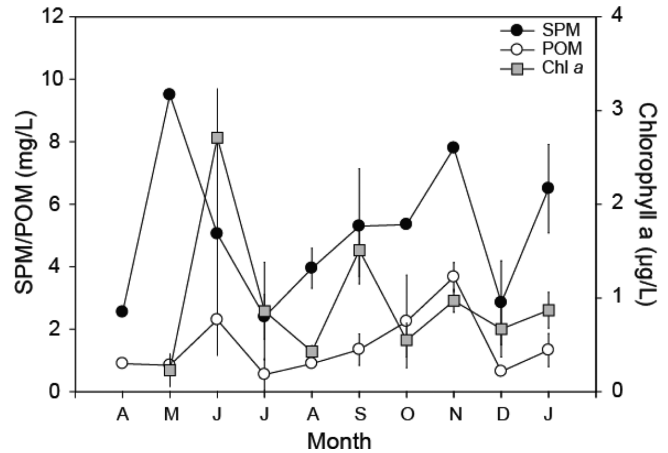


Fig. 3. Monthly variations of suspended particulate matter (SPM), suspended particulate organic matter (POM), and chlorophyll *a* (chl *a*) in the water column at the sampling site from April 2008 to January 2009 (data source: Kang *et al.*, 2011).

et al., 2011), 이와 같은 범위는 해양 식물플랑크톤의 전형적인 값에 해당하였다(Kang *et al.*, 2009). 반면에 유기탄소/엽록소(POC/chl *a*) 비는 148~1705의 범위를 나타냈는데(Kang *et al.*, 2011), 이 값이 200 이상으로 높을 경우 부유입자유기물의 구성성분이 살아있는 식물플랑크톤 보다는 유기체설물(detritus)의 존재가 크다는 것을 시사해준다(Cifuentes *et al.*, 1988). 이러한 결과들은 진동만내 부유입자유기물이 다양한 기원의 유기물의 혼합체 보다는 식물플랑크톤의 유기체설물(phytodetritus)이 주요 구성 요소라는 것을 잘 나타낸다(Kang *et al.*, 2009).

미더덕의 안정동위원소 조성

조사기간 중 미더덕의 $\delta^{13}\text{C}$ 과 $\delta^{15}\text{N}$ 값은 각각 $-20.5(\pm 0.2) \sim -15.8(\pm 0.3)\text{‰}$ 그리고 $10.5(\pm 0.1) \sim 12.9(\pm 0.7)\text{‰}$ 의 범위를 보였고, 전체 평균은 $-18.9(\pm 1.7)\text{‰}$ 과 $11.6(\pm 0.7)\text{‰}$ 로 나타났다(Table 1). $\delta^{13}\text{C}$ 값(CV=9.0)에 비하여 $\delta^{15}\text{N}$ 값(CV=6.3)의 월별 변동이 크지는 않았다(Fig. 4). 일반적으로 안정동위원소 비 값을 분석할 경우 먹이와 소비자동물(prey-predator) 사이에 각 영양 단계를 따라 탄소는 1‰ 이내, 질소는 2~4‰ 정도가 높아지는 동위원소 분별효과(fractionation effect)가 나타난다(Fry and Sherr, 1984; Vander Zanden and Rasmussen, 2001; Post, 2002). 동위원소 분별효과를 고려해볼 때, 미더덕의 $\delta^{13}\text{C}$ 과 $\delta^{15}\text{N}$ 값은 CPOM 보다는 FPOM의 월별 변동과 비슷한 경향을 보였다. 특히, 미더덕과 FPOM의 $\delta^{13}\text{C}$ 값은 서로 매우 높은 양의 상관관계를 보여(Pearson's correlation; $r = 0.824$, $p < 0.01$), 미더덕이 FPOM을 먹이원으로서 활발히 이용하고 있음을 뒷받침해주었다. 그러나 9월과 10월에 미더덕의 $\delta^{13}\text{C}$ 값은 다른 시기와는 다르게 $-16.4(\pm 0.3)\text{‰}$ 과 $-15.8(\pm 0.3)\text{‰}$ 로 전체 평균 -18.9‰ 보다 2% 이상 높았고, FPOM에 비해서는 약 3% 정도 높았다. 반면에 CPOM에 비해서는 1.0~1.5% 정도 높은 것으로 나타났다. 동위원소 분별효과를 고려해볼 때, 이 시기에는 미더덕의 먹이원으로 FPOM 보다는 CPOM의 기여가 더 크다는 것을 반영한다. 결국, 이러한 안정동위원소 분석결과는 미더덕이 부유입자유기물의 크기와 상관없이 CPOM과 FPOM 모두를 섭식할 수 있

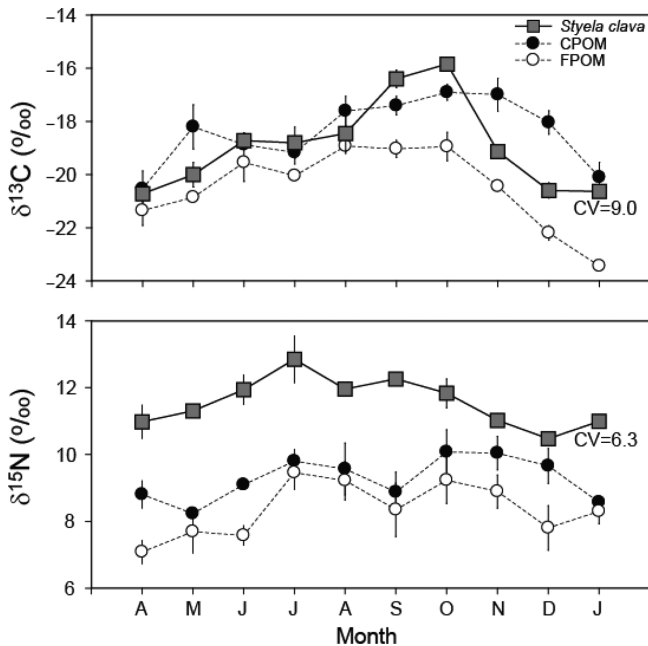


Fig. 4. Monthly mean $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ values (± 1 SD) of *Styela clava* and suspended particulate organic matters (POM) at the sampling site from April 2008 to January 2009. CPOM, coarse POM, 20 to 200 μm ; FPOM, fine POM, < 20 μm ; CV, coefficient of variation.

는 것을 의미한다. 또한 미더덕은 CPOM에 비하여 상대적으로 FPOM을 영양기저로서 더 이용하고 있지만, 특정시기에 따라서 이들의 상대적 중요성은 달라질 수 있음을 시사해준다.

미더덕이 영양기저로서 크기가 작은 FPOM을 더 이용하는 것은 부유물여과방식(suspension-feeding)으로 먹이를 섭식하는 생체기작과 밀접한 관련이 있다. 부유물섭식자로서 대표적인 양식패류인 굴이나 담치의 경우에는 아가미의 섬모(ciliary)를 이용하는 여과방식을 통해 부유입자유기물을 섭식하며, 이러한 방식은 pico-와 nano-plankton 같은 작은 크기의 입자들보다는 더 큰 크기의 micro-plankton을 선택적으로 여과할 수 있는 것으로 나타났다(Courties et al., 1994; Riisgård and Larsen, 2000). Kang et al.(2009)은 양식굴과 먹이원의 안정동위원소 월별분석을 통해 굴과 CPOM의 $\delta^{13}\text{C}$ 값이 매우 비슷한 계절적 변동을 보이고 있음을 보고하고, 굴이 규조류(diatom)와 같은 micro-plankton을 선택적으로 여과하여 섭식하는 것을 근거로 제시하였다. 반대로, 이러한 이매패류들과는 다르게 미더덕과 같은 해초류(ascidian)들은 매우 촘촘한 mucus net을 만들어 부유입자유기물을 여과해서 먹이를 섭식하는 것으로 알려져 있으며, 2~3 μm 의 작은 크기의 부유입자유기물까지도 효율적으로 섭식할 수 있는 것으로 보고되었다(Bone et al., 2003; Petersen, 2007). 다른 해초류인 우렁쟁이(*Halocynthia roretzi*) 또한 mucus net에 의해 micro-plankton으로 구성된 CPOM 뿐만 아니라 pico-와 nano-plankton으로 이루어진 FPOM을 효율적으로 여과하여 이용하는 것으로 보고되었다(Kang et al., 2009). 결국, 미더덕은 우렁쟁이처럼 규조류와 같이 크기가 크고 먹이질(food quality)이 좋은 식물플랑크톤을 선택적으로 섭식하지 못하고 먹이 가용성에(food availability)에 따라 주변의 부유입자유기물을 크기에 관계없이 비선택적으로 여과섭식하는 것으로 생각된다(Petersen,

2007). 따라서 본 조사 결과와 함께 이전의 연구 결과들로부터 미더덕을 포함하는 해초류의 영양원으로써 pico-와 nano- 그리고 micro-plankton에 이르는 다양한 크기의 식물플랑크톤들과 입자유기물의 중요성을 고려하고, 나아가서 양식장 생산성을 평가할 때 굴, 담치와 같은 이매패류 및 미더덕과 멧게 같은 해초류 등의 양식생물들 각각의 먹이섭식 방식을 파악하여 먹이영양환경을 평가하는 연구방법이 필요함을 시사해 준다.

결론적으로 생태계 내 먹이망을 통한 에너지(물질) 흐름을 밝히는데 유용한 도구로 이용되고 있는 안정동위원소 분석 기법은 특정 연안환경에서 서식하고 있는 소비자 동물 개체군의 영양원을 해석하는데 효과적으로 이용될 것으로 기대된다. 실제로 본 조사의 결과는 특히 미더덕의 지속적인 양식생산을 유지하기 위해 먹이 환경을 연구함에 있어서 식물플랑크톤의 변동과 함께 가용 먹이 원으로서 크기가 작은 부유입자유기물질을 고려해야함을 잘 나타내 주었다. 또한 부유입자물질 중에서 특정 성분에 대한 선택성이 없다는 것은 미더덕 개체군 섭식생리와 관련하여 앞으로 이들의 생리생태 연구에서 고려해야할 중요한 생태적 관점을 제시해 주어 개체군 생태에 대한 이해의 폭을 넓힐 수 있을 것으로 기대된다.

사 사

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2013년: C-D-2013-0595)에 의하여 연구되었습니다.

참고문헌(References)

- Bone, Q., C. Carré and P. Chang, 2003. Tunicate feeding filter. *J. Mar. Biol. Assoc. U.K.*, **83**: 907–919.
- Bourque, D., J. Davidson, N.G. MacNair, G. Arsenault, A.R. LeBlanc, T. Landry and G. Miron, 2007. Reproduction and early life history of the invasive ascidian *Styela clava* Herdman in Prince Edward Island, Canada. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, **342**: 78–84.
- Cifuentes, L.A., J.H. Sharp and M.L. Fogel, 1988. Stable carbon and nitrogen isotope biogeochemistry in the Delaware estuary. *Limnol. Oceanogr.*, **33**: 1102–1115.
- Courties, C., A. Vaquer, M. Troussellier, J. Lautier and others, 1994. Smallest eukaryotic organism. *Nature*, **370**: 255
- Davis, M.H. and M.E. Davis, 2008. First record of *Styela clava* (Tunicate, Ascidiacea) in the Mediterranean region. *Aqua. Invasions*, **3**, 125–132.
- Fry, B. and E.B. Sherr, 1984. $\delta^{13}\text{C}$ measurements as indicators of carbon flow in marine and freshwater ecosystems. *Contrib. Mar. Sci.*, **27**: 13–47.
- Fry, B., 1996. $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ fractionation by marine diatoms. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **134**: 283–294.
- Gearing, J.N., P.J. Gearing, D.T. Rundick, A.G. Requejo and M.J. Hutchins, 1984. Isotopic variability of organic carbon in a phytoplankton-based temperate estuary. *Geochim. Cosmochim. Acta.*, **48**: 1089–1098.
- Goering J., V. Alexander and N. haubenstock, 1990. Seasonal variability of stable carbon and nitrogen isotope ratios of organisms in a North Pacific bay. *Estuar. Coast. Shelf. Sci.*, **30**: 239–260.
- Jiang, A.L., J.L. Guo, W.G. Cai and C.H. Wang, 2008a. Oxygen cos-

- umption of the ascidian *Styela clava* in relation to body mass, temperature and salinity. *Aquacul. Res.*, **39**: 1562–1568.
- Jiang, A.L., J. Lin and C.H. Wang, 2008b. Physiological energetics of the ascidian *Styela clava* in relation to body size and temperature. *Comp. Biochem. Physiol. A*, **149**: 129–136.
- Kang, C.K., E.J. Choy, W.C. Lee, N.J. Kim, H.J. Park and K.S. Choi, 2011. Physiological energetics and gross biochemical composition of the ascidian *Styela clava* cultured in suspension in a temperate bay of Korea. *Aquaculture*, **319**: 168–177.
- Kang, C.K., E.J. Choy, Y.B. Hur and J.I. Myeong, 2009. Isotopic evidence of particle size-dependent food partitioning in cocultured sea squirt *Halocynthia roretzi* and Pacific oyster *Crassostrea gigas*. *Aquat. Biol.*, **6**: 289–302.
- Kang, C.K., J.B. Kim, K.S. Lee, J.B. Kim, P.Y. Lee and J.S. Hong, 2003. Trophic importance of benthic microalgae to macrozoobenthos in coastal bay systems in Korea: dual stable C and N isotope analyses. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **259**: 79–92.
- Kim, D.S., K.D. Cho and C.K. Park, 2001. The oceanic environmental property in the Jindong Bay of the red-tide appearance area. *J. Environ. Sci.* **10**: 159–166.
- Kim, D.S. and S.U. Kim, 2003. Mechanism of oxygen-deficient water formation in Jindong Bay. *J. Korean Soc. Oceanogr.*, **8**: 177–186.
- Michener, R.H. and D.M. Schell, 1994. Stable isotope ratios as tracers in marine aquatic food webs. In: Lajtha K, Michener RH (eds) *Stable Isotopes in Ecology and Environmental Science*. Blackwell Scientific Publications, Oxford, pp. 138–157.
- MIFAFF, 2012. Ministry for Food, Agriculture, Forestry and Fisheries. Fisheries information service. <http://www.fips.go.kr>.
- Minagawa, M. and E. Wada, 1986. Nitrogen isotope ratios of red tide organisms in the East China Sea: a characterization of biological nitrogen fixation. *Mar. Chem.* **19**: 245–259.
- Park, J., Y. Cho, W.C. Lee, S. Hong, H.C. Kim, J.B. Kim and J. Park, 2012. Characteristics of carbon circulation for ascidian farm in Jindong Bay in summer and winter. *J. Korean Wetlands Soc.*, **14**: 211–221.
- Pasquaud, S., J. Lobry and P. Elie, 2007. Facing the necessity of describing estuarine ecosystems: a review of food web ecology study techniques. *Hydrobiologia*, **588**: 159–172.
- Peterson, B.J. and B. Fry, 1987. Stable isotopes in ecosystem studies. *Annual Rev. Ecol. Evol. Systym.*, **18**: 293–320.
- Peterson, J.K., 2007. Ascidian suspension feeding. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, **342**: 127–137.
- Post, D.M., 2002. Using stable isotopes to estimate trophic position: models, methods, and assumptions. *Ecology*, **83**: 703–718.
- Rau, G.H., J.L. Teyssie, F. Rassoulzadegan and S.W. Fowler, 1990. $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ and $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ variations among size-fractionated marine particles: implications for their origin and trophic relationships. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **59**: 33–38.
- Riisgård, H.U. and P.S. Larsen, 2000. Comparative ecophysiology of active zoobenthic filter feeding, essence of current knowledge. *J. Sea. Res.*, **44**: 169–193.
- Rolff, C., 2000. Seasonal variation in $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ of size-fractionated plankton at a coastal station in the northern Baltic proper. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **203**: 47–65.
- Sato, T., T. Miyajima, H. Ogawa, Y. Umezawa and I. Koike, 2006. Temporal variability of stable carbon and nitrogen isotopic composition of size-fractionated particulate organic matter in the hypertrophic Sumida River estuary of Tokyo Bay, Japan. *Estuar. Coast. Shelf. Sci.*, **68**: 245–258.
- Thompson, B. and N. MacNair, 2004. An overview of the clubbed tunicate (*Styela clava*) in Prince Edward Island. *PEI Department of Agriculture, Fisheries, aquaculture and Forestry Technical Report*. **234**, p. 29.
- Vander Zanden, M.J. and J.B. Rasmussen, 2001. Variation in ^{15}N and ^{13}C trophic fractionation: implications for aquatic food web studies. *Limnol. Oceanogr.*, **46**: 2061–2066.

2014년 8월 18일 원고접수

2014년 9월 1일 수정본 접수

2014년 9월 1일 수정본 채택

담당편집위원: 강창근