

## 영흥도 조간대 갯벌 저서미세조류의 생태적 중요성; 안정동위원소 분석 활용

강수진 · 최보형 · 한용진 · 신경훈\*

한양대학교 해양융합학과

**Ecological Importance of Benthic Microalgae in the Intertidal Mud Flat of Yeongheung Island; Application of Stable Isotope Analysis (SIA).** Kang, Sujin (0000-0003-1390-1484), Bohyung Choi (0000-0001-6998-400X), Yongjin Han (0000-0002-7669-1827) and Kyung-Hoon Shin\* (0000-0002-3169-4274) (Department of Marine Sciences and Convergent Technology, Hanyang University)

**Abstract** In order to reconstruct a benthic foodweb structure and assess the role of benthic microalgae as a diet source for benthos, we analyzed the carbon and nitrogen stable isotopes of diverse benthos (bivalves, crustaceans, gastropods and fishes) and potential diets (particulate organic matter, sedimentary organic matter, benthic microalgae, seagrass, and macroalgae) in the intertidal mudflat surrounding Yeongheung Island. The  $\delta^{13}\text{C}$  values of the diets indicated wide ranges ( $-26.5\text{‰}$  to  $-8.4\text{‰}$ ) while benthos showed a small range of  $\delta^{13}\text{C}$  values ( $-12.1\text{‰}$  to  $-17.8\text{‰}$ ), although they were in the same range. Except for green algae among the macroalgae as well as sedimentary organic matter,  $\delta^{15}\text{N}$  values of the diet candidates ( $5.7 \pm 1.0\text{‰}$ ) were lighter in comparison to those of the benthos ( $11.8 \pm 1.9\text{‰}$ ). Based on the  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{15}\text{N}$  data, the benthos were classified into 3 groups, indicating a different diet and trophic position. But benthic microalgae is the most important diet source for all three benthos groups based on their stable isotope ratios, suggesting benthic microalgae should be a main diet to the intertidal ecosystem. Hence this study highlights that the biomass of benthic microalgae as biological resource should be evaluated for the management of the intertidal ecosystem of Yeongheung Island.

**Key words:** stable isotope analysis (SIA), Yeongheung Island, benthic microalgae, mud flat

### 서 론

조간대 갯벌은 육지와 해양이 접하는 해안습지로 수산물의 중요한 생산지일 뿐만 아니라, 정화작용, 홍수조절, 야생생물의 보존, 산란과 생육장소로서 그 가치가 매우 큰 것으로 알려져 있어 생태학적으로 중요한 환경으로 알려

져 있다(Je *et al.*, 1998). 특히, 일반적인 해양 생태계에서는 기초생산자인 식물플랑크톤으로부터 에너지 흐름이 시작 되는 것에 비하여, 조간대 갯벌과 같이 해수의 유동이 큰 서식 환경에서는 부유성 식물플랑크톤 외에 저서미세조류, 부착 미세조류, 그리고 대형조류와 해초 등과 같은 다양한 형태의 기초생산자가 존재하기 때문에 더욱 복잡한 먹이망 구조를 형성할 수 있다(Kang *et al.*, 2009). 특히 최근에는 다양한 연구에서 조간대 환경에서 저서동물에 대한 먹이원으로써 저서 미세조류의 중요성에 대하여 논의 되고 있다(Kang *et al.*, 2003; Yokoyama *et al.*, 2003).

Manuscript received 17 March 2016, revised 7 June 2016,  
revision accepted 9 June 2016

\* Corresponding author: Tel: +82-31-400-5536, Fax: +82-31-416-6173,  
E-mail: shinkh@hanyang.ac.kr

© The Korean Society of Limnology. All rights reserved.

This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provide the original work is properly cited.

해양 생태계에서 먹이망 구조를 파악하고 생물의 먹이원을 추적하기 위한 연구방법은 위 내용물 분석법(Hyslope, 1980)이 전통적으로 활용되어 왔다. 그러나 위 내용물 분석법은 소비자가 먹은 먹이의 크기가 작거나, 소화가 진행되어 형체가 남아 있지 않을 경우 그 내용물을 분석하기가 어렵고, 소비자의 체내에 실제 동화되는 유기물의 정보를 알 수 없다는 단점이 있다(Jones and Waldron, 2003). 최근의 연구에서는 탄소, 질소 안정동위원소비 분석을 활용한 먹이망 구조 연구가 실시되고 있다(Peterson and Fry, 1987; Grall *et al.*, 2006; Yokoyama *et al.*, 2009). 안정동위원소는 그 분별작용을 통해 각 생물지구화학적 과정과 물질 기원에 대한 정보를 알 수 있으며(Peterson and Fry, 1987), 탄소안정동위원소의 경우 먹이원과 섭식자 간에 안정동위원소 분별작용이 작기 때문에 이를 통해 소비자의 먹이기원을 파악할 수 있으며, 질소안정동위원소의 경우 먹이원과 섭식자 간에 일정한 값(평균 3.4‰)의 안정동위원소 분별계수가 나타나기 때문에, 소비자의 영양단계를 파악하는 데 활용되고 있다(Deniro *et al.*, 1981; Peterson and Fry, 1987; Peterson, 1999).

우리나라의 남서해안은 갯벌이 매우 잘 발달되어 있으며, 특히 단일국가 면적을 고려하였을 때 세계에서 가장 큰 면적의 갯벌을 보유하고 있다(Koh, 2001). 국내 서해안 중 경기만에 위치한 영흥도 주변 해역은 조차가 매우 커 조간대 갯벌이 잘 발달되어 있고, 바지락 생산량이 아주 높아 상업적으로 중요한 해역이지만, 최근 주변 연안의 간척사업과 화력발전소 운용 등에 의하여 조류 및 저질 변동에 의해 생태계의 변화가 초래되고 있다. 그럼에도 불구하고 현재까지 영흥도 주변 해역의 갯벌 저서 생태 구조에 대한 연구는 미비한 실정이다(Kim *et al.*, 2013).

본 연구에서는 탄소 및 질소 안정동위원소비를 이용하여 국내 서해안 경기만에 위치한 영흥도 주변 갯벌에서 저서 생태계 먹이망 구조 및 저서생물들의 생태적 지위를 파악하고 갯벌의 저서 기초생산자의 생태적 중요성에 대하여 확인해보고자 하였다. 따라서 본 연구는 국내 서해안 갯벌 생태계 에너지 흐름을 이해하기 위한 기초 자료를 제공할 수 있을 것으로 사료된다.

## 재료 및 방법

### 1. 연구 정점

조간대 갯벌 저서 생태계 먹이망 구조 파악을 위하여 저서동물 및 먹이원에 대한 시료 채집이 시행된 영흥도는 인

천에서 남서쪽으로 21 km 정도 떨어진 곳에 위치한 섬으로 위도 37°13'~17'N, 경도 126°25'~30'E에 위치한다. 우리 나라에서 최대 조차가 나타나는 곳 중 한 곳이다. 연구 정점(YH)의 경우 간조시에도 물이 빠지지 않는 수로에 잘피(*Z. marina*)가 서식하고 있으며, 주변에 바지락 어장이 형성되어 있다.

시료는 2012년 7월 23일 영흥도 영흥면에 위치한 조간대 갯벌(YH)에서 채집되었다.

### 2. 시료의 채집 및 전처리

저서동물의 먹이원으로 입자성 유기물(Particulate organic matter, POM), 저서미세조류(Benthic micro algae, BMA), 퇴적물 내 유기물(Sedimentary Organic Matter, SOM), 해조류 및 잘피(*Z. marina*)를 채집하였다. POM은 450°C에서 4시간 동안 미리 태운 GF/F 여과지를 이용해 표층 해수를 여과한 후 시료의 전처리 전까지 여과지를 Deep freezer에서 -80°C로 냉동보관 하였다. BMA는 Riera *et al.* (1996)의 방법을 활용하여 시료를 채집하였다. 표층 2 mm의 퇴적물을 긁어내어 아이스박스에 넣어 실험실로 옮겨와 쟁반에 1 cm 두께로 펼쳐놓은 후 100 µm mesh를 덮고, 태워둔 실리카 파우더(100 µm~210 µm)를 4~5 mm 두께로 뿌려 놓은 후 필터링한 해수를 뿌려주며 4시간 가량 빛을 비추어 BMA가 실리카 파우더 위로 올라올 수 있도록 유도하였다. 이후 실리카 파우더의 표층 2 mm를 긁어 모아 100 µm mesh를 이용하여 실리카 파우더와 BMA를 분리한 후 3차 증류수로 씻어내어 -80°C에 보관하였다. SOM은 아크릴코어를 이용하여 채집한 후 표층 1 cm를 절개하여 유리병에 옮겨 담아 -20°C로 냉동시켰다. 해조류와 잘피(*Z. marina*)는 증류수로 표면을 세척한 후 -20°C로 냉동시켰다. 부착조류(attached algae)는 잘피(*Z. marina*)의 표면을 고무칼로 긁어내어 채집한 후 냉동보관 하였다. 저서동물은 채집 후 GF/F 여과지로 여과한 해수에 2~3일간 청장과정을 거친 후 분석에 사용하였다. 치어는 청장 후 바로 -20°C로 냉동시켰으며 복족류와 이매패류는 청장 후 패각을 제거하여 -20°C로 냉동시켰고, 갑각류는 근육조직만을 분리시켜 -20°C로 냉동시켰다.

탄소 및 질소 안정동위원소비 분석을 위한 모든 시료는 동결건조기를 이용하여 건조하였으며, 저서동물과 SOM, 해조류, 잘피(*Z. marina*)는 분쇄기(FRITSCH-planetary mono mill, Pulverisette 6, Germany)를 이용하여 균질화를 실시하였다. 무기탄소 제거를 위한 생물시료는 1 M 염산용액을 이용하여 무기탄소를 제거하였으며, 여과지 시료는 12 M 염산을 이용한 산증기법을 이용하여 무기탄소를 제



Fig. 1. Study site.

거하였다.

또한 체내의 지질 성분은 다른 성분에 비하여 가벼운 탄소 안정동위원소비를 가지고 있으며, 생물종에 따라 큰 함량 변화를 보이는 것으로 알려져 있기 때문에 (Focken and Becker, 1998) 저서동물의 경우 무기탄소 제거 외에 지질 제거 과정을 거친 후 동위원소 분석을 실시하였다. 저서동물의 지질 제거는 클로로포름과 메탄올을 2:1로 혼합한 용액을 이용하여 지질을 추출하여 제거하였다.

무기탄소 제거 및 지질 제거는 질소 안정동위원소비에 영향을 주는 것으로 알려져 있기 때문에 (Soreide *et al.*, 2006), 질소 안정동위원소 분석을 위한 시료는 전처리를 실시하지 않고 분석에 사용하였다.

### 3. 안정동위원소 분석

준비된 시료는 틴 캡슐에 시료를 봉한 후 원소 분석기와 연결된 동위원소질량분석기 (EA-IRMS, EuroEA-Isoprime IRMS, GV instrument, UK)를 이용하여 탄소 및 질소 안정동위원소의 비를 측정하였다. 각 시료의 탄소 및 질소 안정동위원소비는 다음과 같은 식(식 1)을 이용하여 계산하였으며, 그 비의 값 변위를 천분율로 나타내어  $\delta$ 기호로 표시하였다.

$$\delta^{13}\text{C} \text{ or } \delta^{15}\text{N} = [(R_{\text{sample}}/R_{\text{standard}}) - 1] \times 1000(\text{‰}),$$

$$(R = {}^{13}\text{C}/{}^{12}\text{C}, {}^{15}\text{N}/{}^{14}\text{N}) \quad (1)$$

VPDB와 대기의 질소가스를 각각 탄소 및 질소 안정동위원소 계산을 위한 표준물질로써 사용하였으며, 시료의 분석 동안 2차 표준물질로써 UREA ( $\delta^{13}\text{C} = -41 \pm 0.2\text{‰}$ ,  $\delta^{15}\text{N} = -2 \pm 0.3\text{‰}$ )를 사용하였다.

### 4. 영양단계(Trophic Position, TP)

영흥도 갯벌 내 저서동물의 생태적 지위(Trophic position)는 각 생물의  $\delta^{15}\text{N}$ 을 활용하여 산출하였으며, 계산식은 Post *et al.* (2000)을 인용하였다(식 2).

$$\text{TP} = [(\delta^{15}\text{N}_{\text{org}} - \delta^{15}\text{N}_{\text{base}})/f] + \lambda \quad (2)$$

여기서  $\delta^{15}\text{N}_{\text{org}}$ 는 대상 생물의 질소 안정동위원소비이며,  $\delta^{15}\text{N}_{\text{base}}$ 는 연구해역의 기초생산자 혹은 일차소비자의 질소 안정동위원소비이다. 본 연구에서는 저서동물 중  $\delta^{15}\text{N}$ 값이 가장 낮고, 1차 섭식자로 알려져 있는 바지락(*R. philippinarum*)을 사용하였다.  $f$ 는 저서동물의 영양단계별 안정동위원소 분별 계수로써, 본 연구에서는 해양 생물의 평균 값으로 알려진 3.4‰ (Minagawa and Wada, 1984)을 사용하였으며,  $\lambda$ 는 base로 사용된 생물의 영양단계로 본 연구에서는 일차 섭식자의 의미를 지닌 2를 사용하였다. 각 생물들은 영양단계에 따라 2를 초식성, 2 이상 3 미만을 잡식성, 3 이상을 육식성으로 구분하였다 (Persson, 1999, Dickman *et al.*, 2008).

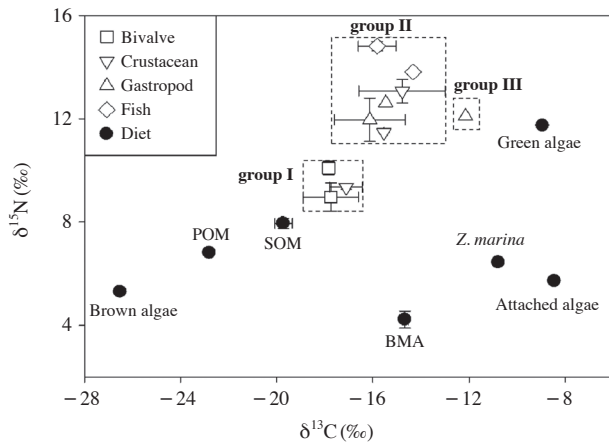
### 5. Iso source mixing model

각 저서동물에 대한 먹이원의 기여도는 IsoSource mixing model (Phillips and Gregg, 2003)을 사용하여 산출하였다. 먹이원의 기여도를 평가하기 위해 요구되는 저서동물의 탄소와 질소 안정동위원소 분별계수는 각각 0.8‰ (Deniro and Epstein, 1986)와 3.4‰ (Minagawa and Wada, 1984)를 사용하였다. 본 연구에서는 각 저서동물의 먹이원을 기초생산자 단위에서 파악하기 위하여 각 저서동물의 영양단계를 고려한 안정동위원소 분별계수를 사용하였다.

## 결과 및 고찰

### 1. 먹이원의 안정동위원소비

영흥도 갯벌생태계 먹이원의  $\delta^{13}\text{C}$ 값은  $-26.5\text{‰}$ 에서  $-8.4\text{‰}$ 의 범위를 나타내었다(Fig. 2, Table 1). 연구해역 내에서 채집된 해수 내 POM과 BMA의  $\delta^{13}\text{C}$ 값의 차이는 약  $8\text{‰}$ 로, 부유성 식물플랑크톤과 BMA의 구분이 잘 되는 것으로 확인되었으며, 이들의  $\delta^{13}\text{C}$ 값은 기존에 보고된 국내 남서해안의 POM 및 BMA의 값과 유사하였다(Choy *et*



**Fig. 2.** Average  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{15}\text{N}$  values of diet sources and consumers estimated in this study. Closed circle indicate diet source and open marks indicate consumers. Error bar shows SD of each sample.

*al.*, 2008; Han *et al.*, 2015). 잘피 (*Z. marina*)와 부착조류의  $\delta^{13}\text{C}$ 값은 각각  $-10.8\text{‰}$ ,  $-8.4\text{‰}$ 로 무거운 값을 가지고 있는 것으로 나타났으며, 이는 기존의 연구 보고들과 유사한 값으로 확인되었다(Peterson and Fry, 1987; Connolly *et al.*, 2005). BMA, 잘피 (*Z. marina*), 부착조류 등의 저서기초 생산자가 부유성 식물플랑크톤에 비해 무거운  $\delta^{13}\text{C}$ 를 보이는 이유는 물의 점성에 의한 경계층(diffusive boundary layer) 때문에 DIC의 확산이 제한되기 때문으로 알려져 있다(Keeley and Sandquist, 1992; France, 1995). SOM의  $\delta^{13}\text{C}$ 는  $-19.72\text{‰}$ 로 POM과 유사한 것으로 나타났다. SOM은 다양한 유기물의 복합체로 알려져 있으며, 조간대 해역에서는 특히 POM과 BMA 기원 유기물의 영향이 큰 것으로 알려져 있다(Vizzini and Mazzola, 2006; Lebreton *et al.*, 2012). 본 연구정점의 SOM의 탄소 안정동위원소비가 POM과 유사하여, SOM을 구성하는 유기물 중 POM의 기여도가 가장 큰 것으로 생각된다. 해조류의 경우, 녹조류가 무거운  $\delta^{13}\text{C}$ 값을 나타낸 반면, 갈조류는 가장 가벼운  $\delta^{13}\text{C}$ 값을 나타내었다. 해조류는 환경에 따라 넓은 탄소 안정동위원소비의 범위를 보이는 것으로 알려져 있으며, 이는 해조류가 사용하는 DIC의 차이, 광합성 속도 등에 의한 것으로 알려져 있다(Hanson *et al.*, 2010). 본 연구에서 갈조류는 가벼운  $\delta^{13}\text{C}$ 값을 보이는데, 이는 갈조류의 경우 저서동물의 직접적인 먹이원으로써의 기여도가 적음을 시사한다.

먹이원의  $\delta^{15}\text{N}$ 값은  $4.2\text{‰}$ ~ $11.7\text{‰}$ 의 범위로 나타났으며, 녹조류와 SOM의 질소 안정동위원소비가 각각  $11.7\text{‰}$ ,

**Table 1.** The average  $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$  value and trophic position (TP) of the benthos and diet sources examined in this study.

Sample	Class	Spices	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)		$\delta^{15}\text{N}$ (‰)		TP	Group	
			Avg.	Std.	Avg.	Std.			
Consumer	Bivalve	<i>Ruditapes philippinarum</i>	-17.7	1.1	9.0	0.5	2.0	I	
		<i>Crassostrea gigas</i>	-17.8	0.0	10.1	0.3	2.3	I	
	Crustacean	<i>Charybdis japonica</i> (<4 cm)	-17.1	0.7	9.3	0.1	2.1	I	
		<i>Charybdis japonica</i> (>4 cm)	-14.8	1.8	13.1	0.4	3.2	II	
			<i>Caridea</i> sp.	-15.5	0.0	11.5	0.0	2.7	II
	Gastropod	<i>Rapana venosa venosa</i>	-16.1	1.5	12.0	0.8	2.9	II	
		<i>Omphalius rusticus rusticus</i>	-12.1	-	12.1	-	2.9	III	
			<i>Thais clavigera</i>	-15.5	-	12.6	-	3.1	II
	Fish	<i>Muraenesox cinereus</i>	-14.3	-	13.8	-	3.4	II	
<i>Synechogobius hasta</i>		-15.8	0.8	14.8	0.2	3.7	II		
Diet	Macroalgae	Green algae	-8.9	-	11.7	-			
		Brown algae	-26.5	-	5.3	-			
	Seagrass	<i>Zostera marina</i>	-10.8	-	6.4	-			
	Attached algae		-8.4	-	5.7	-			
	Benthic micro algae (BMA)		-14.7	0.1	4.2	0.3			
	Particulate organic matter (POM)		-22.8	-	6.8	-			
	Sedimentary organic matter (SOM)		-19.7	0.4	8.0	0.2			



8.0‰로 다소 높은 것으로 확인되었다. 이들을 제외한 다른 먹이원의  $\delta^{15}\text{N}$ 값의 범위는 2.6‰ 내로 큰 차이를 보이지 않았으나, 저서동물에 비하여 낮은 값을 나타내었으며, 먹이원에 비해 섭식자의 질소 안정동위원소비는 체내 대사 작용 과정에서 안정동위원소 분별 작용을 겪게 되어 상대적으로 무거운 값을 나타내게 된다(Minagawa and Wada, 1984). SOM은 다양한 유기물의 집합체로서, 특히 본 연구 정점이 바지락 양식장임을 고려하면, 동물성 유기물의 영향에 의해 무거운  $\delta^{15}\text{N}$ 값을 보이는 것으로 사료된다.

## 2. 저서동물의 안정동위원소비

YH 정점 내에서 채집된 저서동물의  $\delta^{13}\text{C}$ 값은  $-12.1\%$ 에서  $-17.8\%$ 의 범위를 나타내었으며 모든 저서동물의  $\delta^{13}\text{C}$ 값의 범위는 먹이원의  $\delta^{13}\text{C}$ 값의 범위 내에 포함되는 것을 확인하였다(Table 1). 이는 기존의 연구 결과들과 유사한 경향으로(Ouisse *et al.*, 2012; Ha *et al.*, 2013; Vafeiadou, *et al.*, 2013), 저서동물의 탄소원이 본 연구에서 채집된 기초생산자에서 비롯된 결과로 해석된다.

저서동물의  $\delta^{15}\text{N}$ 값은 9‰에서 14.8‰의 범위로 녹조류를 제외한 다른 기초생산자에 비해 무거운 값을 나타내었다(Table 1). 생물의  $\delta^{15}\text{N}$ 값은 생태적 지위에 따라 무거운 값을 보이는 것으로 알려져 있으며, 생물에 따른  $\delta^{15}\text{N}$ 값의 차이는 채집된 생물의 생태적 지위의 차이를 의미한다(Peterson and Fry, 1987). 녹조류의 경우, 저서동물과 유사한  $\delta^{15}\text{N}$ 값을 나타냈으며, 이를 통하여 녹조류가 저서동물에 대한 먹이원으로써의 기여도가 낮음을 유추할 수 있다. 해조류 군락에서 저서동물에 대한 먹이원으로써 해조류는 중요한 역할을 수행하는 것으로 알려져 있다(Kang *et al.*, 2008). 그러나 본 연구에서 시료 채집이 수행된 갯벌은 해

조류의 생물량이 적어 먹이원으로써의 기여도가 낮은 것으로 사료된다.

본 연구에서 채집된 저서동물은  $\delta^{13}\text{C}$ 값과  $\delta^{15}\text{N}$ 값에 따라 3그룹으로 그룹화되는 것을 확인할 수 있었다(Fig. 2). 이매패류(Bivalve)인 바지락(*Ruditapes philippinarum*)과 굴(*Crassostrea gigas*), 그리고 갑각류 중 크기가 4 cm 이하인 민꽃게(*Charybdis japonica*)의  $\delta^{13}\text{C}$ 값과  $\delta^{15}\text{N}$ 값은 다른 저서동물에 비해 가벼운  $\delta^{13}\text{C}$ 값을 나타내었으며(group I), 크기가 4 cm 이상인 민꽃게(*Charybdis japonica*), 복족류(gastropod)인 대수리(*Thais clavigera*)와 피빨고둥(*Rapana venosa venosa*), 갯장어(*Muraenesox cinereus*)와 풀망둑(*Synechogobius hasta*) 치어는  $-14.8\%$ 에서  $-16.1\%$ 의 범위로 이매패류에 비하여 무거운  $\delta^{13}\text{C}$ 값을 나타내었으며,  $\delta^{15}\text{N}$ 값 또한 11.5‰에서 14.8‰로 무거운 것으로 나타났다(group II). 또한 복족류의 한 종인 보말고둥(*Omphalius rusticus rusticus*)의  $\delta^{15}\text{N}$ 값은 다른 복족류와 유사하나, 가장 무거운  $\delta^{13}\text{C}$ 값(12.1‰)을 보였다(group III). 탄소 및 질소 안정동위원소비를 통한 저서동물의 그룹화는 각 그룹 내 저서동물의 먹이원 및 생태적 지위가 유사함을 나타낸다. 특히 잡식성 혹은 육식성으로 알려진 민꽃게(Yokoyama *et al.*, 2009)의  $\delta^{13}\text{C}$  및  $\delta^{15}\text{N}$ 가 크기에 따라 차이가 있는 것으로 확인되었다(Fig. 3). 게류의 먹이원의 변화는 탈피의 빈번도가 높은 비성숙 시기에 칼슘이 풍부한 먹이를 섭식하는 습성에 의한 것으로 알려져 있다(Mantelatto *et al.*, 2001). 또한 민꽃게는 강한 악력을 이용해 복족류나 이매패류의 패각을 부수어 섭식하는 것으로 보고되어 있다(Kwon *et al.*, 2001; Seo and Hong, 2009). 크기나 악력이 다른 섭식자를 부술만큼 발달하지 못한 작은 크기의 민꽃게는 성체와 다른 크기의 먹이로 대체하는 것으로 사료된다.

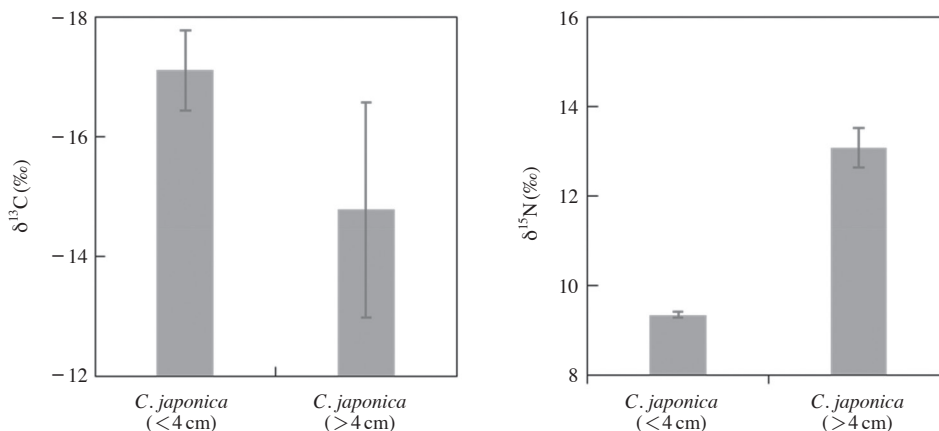


Fig. 3. Variations in the  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{15}\text{N}$  values of the crab (*Charybdis japonica*) with their body size.

### 3. 생태적 지위(Trophic position, TP)

본 연구에서 저서동물의 생태적 지위(TP)를 산출한 결과(Table 1), group I에 포함된 생물은 2~2.3으로 초식성(Herbivorous) 섭식을 하는 것으로 나타났으며, 특히 새우류인 *Caridea* sp.를 제외하면, group II와 group III에 속한 생물은 2.9에서 3.7의 TP를 나타내어 육식성(carnivorous) 생물에 가까운 것으로 나타났으며, *Caridea* sp.의 TP는 2.7로 잡식성(omnivorous)에 가까운 것으로 확인되었다. 본 연구에서 생태적 지위가 가장 높은 어류(갯장어, 풀망둑)는 생체의 크기(성장 시기)에 따라 먹이원이 다를 수 있다. 특히 풀망둑은 성장에 따라 어류의 섭식율이 증가하는 것으로 알려져 있다(Park *et al.*, 2015). 비록 본 연구에서 채집된 풀망둑의 크기는 10 cm 이하의 치어로서, 각 개체의 동위원소비의 변화가 크지 않았지만, 다양한 성장 시기별 어류의 질소 안정동위원소 분석을 통하여 생태적 지위의 변화를 확인할 수 있을 것으로 사료된다.

$\delta^{15}\text{N}$ 값을 이용하여 TP를 산출하기 위해서는 각 생물에 대한 정확한 안정동위원소 분별계수가 중요하지만, 본 연구에서는 다양한 생물의 TP를 산출하기 위하여 질소 안정동위원소 분별계수의 평균값으로 알려진 3.4‰(Minagawa and Wada, 1984)을 사용하였기 때문에 생물에 따른 질소 안정동위원소 분별계수의 다양성을 고려하지 못했다. 그럼에도 불구하고 본 연구에서 산출한 TP는 기존에 알려진 생물들의 섭식형태와 유사하며, 따라서 이를 통하여 영흥도 저서 생태계의 에너지 흐름을 유추할 수 있을 것으로 사료된다.

### 4. 먹이원 기여도 평가

각 저서동물에 대한 기여도를 평가하기 위한 먹이원의 후보군으로써 POM, BMA, 잘피(*Z. marina*)와 녹조류를 선정하였으며, Isosource mixing model을 통해 기여도를 파악하였다(Fig. 4). 갈조류의 경우  $\delta^{13}\text{C}$ 가 매우 가벼워 먹이원으로써의 기여도가 없을 것으로 예상되어 먹이원의 후보군에서 제외하였으며, SOM은 해당 먹이원 후보군이 모두 포함되어 있기 때문에 제외하였다. 먹이 기여도 평가 결과 YH 정점 내 저서동물의 먹이원으로써 POM과 BMA의 기여도가 큰 것으로 확인되었다. 1차 섭식자로 이루어진 group I은 POM과 BMA의 기여도가 각각 평균 49.1%, 47.6%로 유사한 것으로 나타났으며, 이는 기존의 연구에 비하여 BMA가 이매패류의 먹이원으로써의 기여도가 높은 결과이다(Kang *et al.*, 2003; Riera *et al.*, 2004; Dubois *et al.*, 2007). 특히 본 연구해역에서 상업적 가치가 큰 바지락에 대한 BMA의 먹이원으로써의 기여도는 다

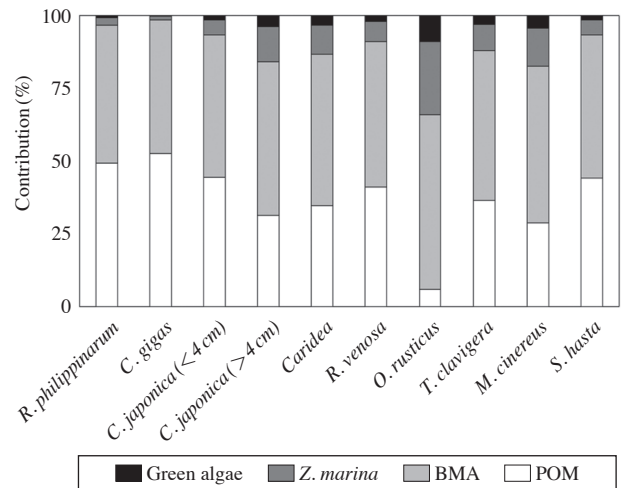


Fig. 4. Mean diet contributions to each benthos estimated by Iso-source mixing model.

Table 2. The average contribution of BMA to the manila clam (*Ruditapes philippinarum*) via Isosource mixing model.

Site	Average contribution of BMA (%)	Reference
Ariake Sound	33.4	Yokoyama <i>et al.</i> , 2005
Jinju Bay	41.2~65.2	Kang <i>et al.</i> , 2007
Arcachon Bay	12 ± 6	Dang <i>et al.</i> , 2009
Hichirippu Lagoon	20 ± 15	Komorita <i>et al.</i> , 2014
Obitsu River estuary	18~43	Kon <i>et al.</i> , 2012
Yeongheung Island	43~52	This study

른 해역에 서식하는 바지락에 비하여 높은 것으로 나타났다(Table 2). 조간대 해역에서 BMA는 조류에 의한 재부유를 통하여 이매패류의 먹이원으로 사용되는 것으로 알려져 있다(Miller *et al.*, 1996). 영흥도는 간조차가 매우 크기 때문에 강한 조류에 의해 BMA의 재부유가 강해 BMA가 이매패류의 먹이원으로써의 기여도가 높은 것으로 여겨진다. Group II와 group III의 저서동물에 대한 먹이원의 기여도는 BMA가 평균 51.5%로 POM(36.5%)에 비하여 높은 것으로 확인되었다. Group II의 저서동물의 TP가 3에 가까워, 이들에 대한 기초생산자의 먹이 기여도는 1차 섭식자를 통해 전달된 것으로 사료된다. BMA는 이매패류와 같은 여과섭식자(filter feeder)의 먹이원뿐만 아니라 퇴적층 선충류나 저서성 요각류와 같은 중형 저서동물의 주 먹이원인 것으로 알려져 있다(Lebreton *et al.*, 2012). 또한 중형 저서동물은 저서 기초생산자로부터 상위 영양단계로 에너지 흐름의 연결자(linker)로써 중요한 역할을 수행하는 것으로 알려져 있다(Ha *et al.*, 2014). 본 연구에서도 생태적

지위가 높은 저서생물에 대한 BMA의 높은 기여도는 저서 meiofauna로부터 기인한 것으로 판단된다.

탄소 및 질소 안정동위원소비를 통해 영흥도의 갯벌 저서 생태 먹이망 구조를 살펴본 결과 BMA가 다양한 저서동물의 먹이원으로써 해수 내 기초생산과 더불어 매우 중요한 것으로 확인되었으며, 특히 저서 기초생산자인 BMA의 저서생태계 먹이원으로써의 기여도는 기존에 연구된 다른 조간대에 비해 더 높은 것으로 나타났다. 또한 영흥도에서 수산생물로서 매우 중요한 바지락에게도 중요한 먹이원인 것으로 확인되었다. 본 연구결과는 추후 환경 변화에 의한 영흥도의 갯벌 생태계의 변화를 감지하기 위한 자료로써 활용도가 높을 것으로 예상된다.

## 적 요

영흥도 인근 갯벌의 저서 먹이망 구조를 파악하고, BMA가 저서동물에 대한 먹이원으로써의 중요성을 파악하기 위하여 저서동물(이매패류, 갑각류, 복족류, 어류)과 먹이원의 탄소 및 질소 안정동위원소비를 분석하였다. 먹이원의 후보인 POM, BMA, 잘피(*Z. marina*)와 해조류의 탄소 안정동위원소비는  $-26.5\%$ 에서  $-8.4\%$ 로 넓은 범위를 보였으며, 저서동물의 탄소 안정동위원소비는  $-17.8\%$ 에서  $-12.1\%$ 로 먹이원의 탄소 안정동위원소 범위 내에 존재하였다. 해조류 중 녹조류와 SOM을 제외한 먹이원의 질소 안정동위원소비( $5.7 \pm 1.0\%$ )는 저서동물( $11.8 \pm 1.9\%$ )에 비하여 가벼운 것으로 나타나, 기존의 연구와 유사한 경향을 보였다. 탄소와 질소 안정동위원소비 분석을 통하여 저서동물은 세 그룹으로 나누어질 수 있음을 확인하였으며, 이는 각 그룹 내 저서동물의 먹이원 및 생태적 지위가 유사함을 의미한다. 또한 각 그룹에 대한 BMA의 먹이 기여도가 매우 큰 것으로 파악되었으며 이와 같은 연구 결과를 통해서 영흥도 조간대 갯벌 생태계에 있어 BMA가 가장 기초적인 생물자원이라는 것을 확인할 수 있었다.

## 사 사

본 논문은 해양수산부 한국해양과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(통합형 수산물 감식 정보센터 구축을 위한 실용기술 개발).

## REFERENCES

- Choy, E.J., S. An and C.-K. Kang. 2008. Pathways of organic matter through food webs of diverse habitats in the regulated Nakdong River estuary (Korea). *Estuarine Coastal and Shelf Science* **78**: 215-226.
- Dang, C., P.G. Sauriau, N. Savoye, N. Caill-Milly, P. Martinez, C. Millaret, J. Haure and X. de Montaudouin. 2009. Determination of diet in Manila clams by spatial analysis of stable isotopes. *Marine Ecology Progress Series* **387**: 167-177.
- Deniro, M.J. and S. Epstein. 1981. Influence of diet on the distribution of nitrogen isotopes in animals. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **45**: 341-351.
- Dickman, E.M., J.M. Newell, M.J. Gonzalez and M.J. Vanni. 2008. Light, nutrients, and food-chain length constrain planktonic energy transfer efficiency across multiple trophic levels. *PNAS* **105**(47): 18408-18412.
- Dubois, S., F. Orvain, J. Marin-Léal, M. Ropert and S. Lefebvre. 2007. Small-scale spatial variability of food partitioning between cultivated oysters and associated suspension-feeding species, as revealed by stable isotopes. *Marine Ecology Progress Series* **336**: 151-160.
- Focken, U. and K. Becker. 1998. Metabolic fractionation of stable carbon isotopes: implications of different proximate compositions for studies of the aquatic food webs using  $\delta^{13}\text{C}$  data. *Oecologia* **115**: 337-343.
- France, R.L. 1995. Carbon-13 enrichment in benthic compared to planktonic algae: foodweb implications. *Marine Ecology Progress Series* **124**: 307-312.
- Grall, J., F. Le Loc'h, B. Guyonnet and P. Riera. 2006. Community structure and food web based on stable isotopes ( $\delta^{15}\text{N}$  and  $\delta^{13}\text{C}$ ) analysis of a North Eastern Atlantic maerl bed. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* **338**: 1-15.
- Ha, S.Y., W.-K. Min, D.-S. Kim and K.-H. Shin. 2014. Trophic importance of meiofauna to polychaetes in a seagrass (*Zostera marina*) bed as traced by stable isotopes. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom* **94**(1): 121-127.
- Han, E., H.J. Park, L. Bergamino, K.-S. Choi, E.J. Choy, O.H. Yu, T.W. Lee, H.-S. Park, W.J. Shim and C.-K. Kang. 2015. Stable isotope analysis of a newly established macrofaunal food web 1.5 years after the Hebei Spirit oil spill. *Marine Pollution Bulletin* **90**: 167-180.
- Hanson, C.E., G.A. Hyndes and S.F. Wang. 2010. Differentiation of benthic marine primary producers using stable isotopes and fatty acids: Implications to food web studies. *Aquatic Botany* **93**: 114-122.
- Hyslop, E.J. 1980. Stomach contents analysis—a review of methods and their application. *Journal of Fish Biology* **17**: 411-429.

- Je, J.-G., J.-H. Lee and C.-H. Koh. 1998. Tidal Flat Studies: Present and Future. *Ocean and Polar Research* **20**(2): 57-61.
- Jones, J.I. and S. Waldron. 2003. Combined stable isotope and gut contents analysis of food webs in plant-dominated, shallow lakes. *Freshwater Biology* **48**: 1396-1407.
- Kang, C.-K., E.J. Choy, Y. Son, J.-Y. Lee, J.K. Kim, Y. Kim and K.-S. Lee. 2008. Food web structure of a restored macroalgal bed in the eastern Korean peninsula determined by C and N stable isotope analyses. *Marine Biology* **153**: 1181-1198.
- Kang, C.-K., E.J. Choy, Y.-S. Kim and H.J. Park. 2009. Study of food web structure and trophic level in the sea ponds of an optimized. 『The Sea』 *Journal of the Korean Society of Oceanography* **14**(1): 56-62.
- 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. *Marine Ecology Progress Series* **259**: 79-92.
- Kang, C.-K., Y.S. Kang, E.J. Choy, D.S. Kim, B.T. Shim and P.Y. Lee. 2007. Condition, reproductive activity, and biochemical composition of the Manila clam, *Tapes philippinarum* in natural and newly created sandy habitats of the southern coast of Korea. *Journal of Shellfish Research* **26**(2): 401-412.
- Keeley, J.E. and D.R. Sandquist. 1992. Carbon: freshwater plants. *Plant Cell Environ* **15**: 1021-1035.
- Kim, S.-Y., H.-C. Kim, W.-C. Lee, D.-W. Hwang, S.-J. Hong, J.-B. Kim, Y.-S. Cho and C.-S. Kim. 2013. Environmental Characteristics of Seawater and Sediment in Mariculture Management Area in Ongjin-gun, Korea. *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety* **19**(6): 570-581.
- Koh, C.-H. 2001. The Korean tidal flat: Environment, Biology and Human. Seoul National University Press. Seoul.
- Komorita, T., R. Kajihara, H. Tsutsumi, S. Shibamura, T. Yamada and S. Montani. 2014. Food Sources for *Ruditapes philippinarum* in a Coastal Lagoon Determined by Mass Balance and Stable Isotope Approaches. *PLoS ONE* **9**(1): e86732.
- Kon, K., Y. Hoshino, K. Kanou, D. Okazaki, S. Nakayama and H. Kohno. 2012. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* **96**: 236-244.
- Kwon, O.K., D.-K. Min, J. Lee, J.-S. Lee, J.-G. Je and B.L. Choe. 2001. Korean mollusks with color illustration. Hanguel. Busan.
- Lebreton, B., P. Richard, R. Galois, G. Radenac, A. Brahmia, G. Colli, M. Grouazel, C. Andre, G. Guillou and G.F. Blanchard. 2012. Food sources used by sediment meiofauna in an intertidal *Zostera noltii* seagrass bed: a seasonal stable isotope study. *Marine Biology* **159**: 1537-1550.
- Manelatto, F.L.M. and R.A. Christofolletti. 2001. Natural feeding activity of the crab *Callinectes ornatus* (Portunidae) in Ubatuba Bay (São Paulo, Brazil): influence of season, sex, size and molt stage. *Marine Biology* **138**(3): 585-594.
- Miller, D.C., R.J. Geider and H.L. Macintyre. 1996. Microphytobenthos: The Ecological Role of the "Secret Garden" of Unvegetated, Shallow-Water Marine Habitats. II. Role in Sediment Stability and Shallow-Water Food Webs. *Estuaries* **19**(2A): 202-212.
- Minagawa, M. and E. Wada. 1984. Stepwise enrichment of  $^{15}\text{N}$  along food chains: Further evidence and the relation between  $\delta^{15}\text{N}$  and animal age. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **48**: 1135-1140.
- Ouisse, V., P. Riera, A. Migne, C. Leroux and D. Davoult. 2012. Food web analysis in intertidal *Zostera marina* and *Zostera noltii* communities in winter and summer. *Marine Biology* **159**: 165-175.
- Park, H.P., J.M. Jeong, H.J. Kim, S.J. Ye and G.W. Baeck. 2015. Feeding Habits of Javelin Goby *Synechogobius hasta* on Tide Flat in Sangnae-ri Suncheon, Korea. *Korean Journal of Fish Aquatic Sciences* **48**(6): 982-987.
- Persson, L. 1999. Trophic cascades: abiding heterogeneity and the trophic level concept at the end of the road. *Oikos* **85**: 385-397.
- Peterson, B.J. 1999. Stable isotopes as tracers of organic matter input and transfer in benthic food webs: A review. *Acta Oecologica* **20**(4): 479-487.
- Peterson, B.J. and B. Fry. 1987. Stable isotopes in ecosystem studies. *Annual Review of Ecology and Systematics* **18**: 293-320.
- Phillips, L.D. and J.W. Gregg. 2003. Source partitioning using stable isotope: coping with too many sources. *Oecologia* **136**: 261-269.
- Post, D.M., M.L. Pace and N.G. Hairston Jr. 2000. Ecosystem size determines food-chain length in lakes. *Nature* **405**: 1047-1049.
- Riera, P. and P. Richard. 1996. Isotopic Determination of Food Sources of *Crassostrea gigas* Along a Trophic Gradient in the Estuarine Bay of Marennes-Oleron. *Estuarine Coastal and Shelf Science* **42**: 347-360.
- Riera, P., L. Stal and J. Nieuwenhuize. 2004. Utilization of food sources by invertebrates in a man-made intertidal ecosystem (Westerschelde, the Netherlands): a  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{15}\text{N}$  study. *Journal of the Marine Biological Association of the UK* **84**: 323-326.
- Seo, I.-S. and J.-S. Hong. 2009. Food Habits of the Asian Paddle Crab, *Charybdis japonica* (A. Milne-Edwards) on the Jangbong Tidal Flat, Incheon, Korea. *Korean Journal of Environmental Biology* **27**(3): 297-305.
- Soreide, J.E., T. Tonias, H. Haakon, A.H. Keith and J. Ingar. 2006. Sanok oreoatation effects on stable C and N isotope values: a comparison of methods in Arctic marine food web studies. *Marine Ecology Progress* **328**: 17-28.



- Vafeiadou, A.-M., P. Materatski, H. Adao, M. De Troch and T. Moens. 2013. Food sources of macrobenthos in an estuarine seagrass habitat (*Zostera noltii*) as revealed by dual stable isotope signatures. *Marine Biology* **160**: 2517-2523.
- Vizzini, S. and A. Mazzola. 2006. Sources and transfer of organic matter in food webs of a Mediterranean coastal environment: Evidence for spatial variability. *Estuarine Coastal and Shelf Science* **66**: 459-467.
- Yokoyama, H. and Y. Ishihi. 2003. Feeding of the bivalve *Theora lubrica* on benthic microalgae: isotopic evidence. *Marine Ecology Progress Series* **255**: 303-309.
- Yokoyama, H., A. Tamaki, K. Shimoda, K. Koyama and Y. Ishihi. 2005. Variability of diet-tissue isotopic fractionation in estuarine macrobenthos. *Marine Ecology Progress Series* **296**: 115e128.
- Yokoyama, H., T. Skami and Y. Ishihi. 2009. Food sources of benthic animals on intertidal and subtidal bottoms in inner Ariaka sound, southern Japan, determined by stable isotopes. *Estuarine Coastal and Shelf Science* **82**: 243-253.