

동위원소 분석에 의한 동해와 남해 연안의 상이한 해조류 군락에 서식하는 저서무척추동물 먹이원 평가

강창근* · 최은정 · 송행섭 · 박현제 · 서인수¹ · 조규태² · 이근섭
부산대학교 생명과학부, ¹해양생태연구소, ²국립수산과학원 동해수산연구소

Isotopic Determination of Food Sources of Benthic Invertebrates in Two Different Macroalgal Habitats in the Korean Coasts

CHANG-KEUN KANG*, EUN JUNG CHOY, HAENG SEOP SONG, HYUN JE PARK, IN-SOO SOE¹,
QTAE JO² AND KUN-SEOP LEE

Division of Biological Sciences, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

¹*Marine Eco-Technology Institute, Busan 608-830, Korea*

²*East Sea Fisheries Research Institute, NFRDI, Kangwon 210-861, Korea*

암반 해안의 해조 군락에 서식하는 저서무척추동물들에 의해서 이용되는 유기물의 기원을 밝히기 위하여 저서동물과 그들의 잠재 먹이원에 대한 탄소와 질소 안정동위원소 비($\delta^{13}\text{C}$ 및 $\delta^{15}\text{N}$)값 조성을 분석하였다. 조사는 부영양화된 반폐쇄성 내만인 남해안의 광양만 연안 암반 조간대와 상대적으로 빈영양의 외양에 노출된 환경 특성을 가지는 동해안의 대진(삼척)연안의 암반 조간대를 대상으로 2005년 5월부터 6월 사이에 실시되었다. 암반에서 노출되어 서식하는 부유물 섭식자들은 다른 섭식 양식을 가지는 동물군에 비해 상대적으로 낮은 $\delta^{13}\text{C}$ 값을 가져 이들이 식물 플랑크톤에서 유래하는 유기물을 주로 이용하여 표영먹이망과 강한 영양연결을 가지는 것으로 나타났다. 반면, 암반 틈 속에서 서식하는 일부 부유물 섭식자를 포함한 초식동물과 퇴적물 섭식자 및 육식성 포식자들은 상대적으로 높은 $\delta^{13}\text{C}$ 값을 가져 해조류에서 유래한 유기물을 주로 이용하여 저서먹이망을 형성하였다. 따라서 부유물 섭식자를 제외하고 해조 군락을 서식처로 하는 대부분의 동물들이 해조류에서 유래한 유기물을 이용하는 저서먹이망으로 강한 영양연결을 가져 연안 암반 생태계에서 생물생산과 생물 다양성의 유지에 대한 해조류의 중요성을 잘 나타내었다. 또한 광양만과 같은 부영양화된 연안에서 상대적으로 빈영양인 동해 연안 조간대의 저서동물과 해조류에 비하여 높은 $\delta^{15}\text{N}$ 값 분포는 육상으로부터 유입되는 영양염이 암반 조간대의 해조류 생산에 이용되고 이어서 이 특정 연안 생태계의 먹이망으로 편입되는 경로를 가지는 것을 시사하였다.

Stable carbon and nitrogen isotopes were analyzed in suspended particulate organic matter, macroalgae and macrobenthic invertebrates in order to determine the importance of primary organic matter sources in supporting food webs of rocky subtidal and intertidal macroalgal beds in the Korean coasts. Investigations were conducted at the intertidal sites within Gwangyang bay, a semi-enclosed and eutrophicated bay, and the subtidal sites of the east coast, a relatively oligotrophic and open environment, in May and June 2005. Water-column suspension feeders showed more negative $\delta^{13}\text{C}$ values than those of the other feeding guilds, indicating trophic linkage with phytoplankton and thereby association with pelagic food chains. In contrast, animals of the other feeding guilds, including interface suspension feeders, herbivores, deposit feeders, omnivores and predators, displayed relatively less negative $\delta^{13}\text{C}$ values than those of the water-column suspension feeders and similar with that of macroalgae, indicating exclusive use of macroalgae-derived organic matter and association with benthic food chains. Most the macrobenthic species were considered to form strong trophic links with benthic food chains. In addition, the distribution of higher $\delta^{15}\text{N}$ values in macrobenthic consumers and macroalgae at the intertidal sites of Gwangyang Bay than those at the subtidal sites of the east coast suggests that anthropogenic nutrients may enhance the macroalgal production at the intertidal sites and in turn be incorporated into the particular littoral food web in Gwangyang Bay. These results confirm the dominant role of macroalgae in supporting rocky subtidal and intertidal food webs in the Korean coasts.

Keywords: Stable carbon and nitrogen isotope ratio, Macroalgal bed, Macrobenthic invertebrates, Trophic link, Anthropogenic nutrients

*Corresponding author: ckkang@pusan.ac.kr

서론

연안역 해조 군락은 연안의 다양한 생물군을 위한 서식처, 보육장 및 섭식처를 제공하여 높은 생물생산과 종다양성을 나타내는 곳이다(Duggins *et al.*, 1989; Terawaki *et al.*, 2001; Jenkins and Hawkins, 2003). 이와 같이 해조군락의 생태학적 측면과 더불어 많은 해조류들은 상업적으로도 대단한 중요성을 가진다(Cha *et al.*, 1988; Lee *et al.*, 1998; Park and Rho, 2002). 실제로 암반 조건이나 조하대에 형성되는 해조 군락에서는 복족류, 패류 그리고 소형 갑각류 등 많은 무척추동물과 소형 어류와 같은 척추동물이 나타나는데, 대형 갈조류와 같은 해조류들이 높은 생장을 통해 생물의 서식처를 넓혀준다(Dunton and Schell, 1987; Fredriksen, 2003; Yatsuya and Nakahara, 2004). 연안역의 주요 기초생산자인 해조류는 소형저서동물의 먹이로 이용되거나, 이들 초식자들을 통하여 상위 영양단계를 구성하는 동물들에게 전달되는 과정을 거치면서 해양생태계 내에서의 에너지 흐름과 물질순환에 중요한 역할을 하는 것으로 알려져 있다(John *et al.*, 1992; Jennings *et al.*, 1997). 최근 한반도 연안에서 도시화 및 산업화의 가속화는 연안 환경의 변화를 수반하고 있는데, 이와 같은 연안에서 고착생활을 하는 해조 식생을 연구하는 것은 연안환경의 변화를 이해하는데 있어서 필수적인 연구 주제로 인식되고 있을 뿐만 아니라, 이들 해조류 및 해조군락이 연안역을 서식처로 하는 저서동물이나 어류와 같은 고차의 생물생산에 어떤 역할을 하는지에 대한 정보는 해조 식생변화의 생태학적 중요성을 이해하기 위한 기본 요소이다.

해양생태계 내에서의 에너지 흐름과 화학적 순환은 생물 상호간의 섭식 관계를 나타내는 영양구조(trophic structure)를 통하여 이루어진다. 식물플랑크톤에 의해 생산되는 유기물이 먹이망의 영양기저(trophic base)를 형성하는 외양과 달리 연안역에서는 해조류의 높은 생산 외에도 잘피 등의 해초류(seagrasses), 저서미세조류(benthic microalgae) 및 염습지 식물(salt marsh plants)에 의해 생산되는 유기물이나 육상으로부터 유입되는 유기물 등 다양한 기원의 유기물 유입 경로들이 존재한다(McLusky, 1989). 따라서 이들 연안의 주요 생산자 군락의 기능이나 중요성에 대한 이해는 연안역에서 주요 생물 서식처를 구성하는 이들 단위 생태계가 "이곳을 서식처로하여 살아가는 동물군들에 대하여 먹이를 공급해서 산란과 보육 기능을 가지는지?" 그렇지 않으면 "먹이의 공급 기능은 다른 생태계와 연결되어 서식 생물들에게 휴식이나 은신처만을 단순히 제공하는지?"에 대한 정보가 필수적으로 요구된다 할 수 있다. 이에 대한 정보는 이들 생산자 군락을 이루는 식물군에서 유래하는 유기물과 주로 식물플랑크톤으로 구성되어 이들의 서식처 군락으로 유입되는 유기물의 상대적인 중요성을 통하여 평가할 수 있을 것이다. 이와 같은 관점에서 연안 생태계의 영양기저와 관련하여, 이전의 많은 연구들에 의하면 해역의 영양상태(부영양 혹은 빈영양)나 서식지 형태(조간대 혹은 조하대)에 따라 자생 유기물과 단위 생태계내로 유입되는 유기물의 상대적인 중요성이 달라진다(McLusky, 1989; Kwak and Zedler, 1997; Page, 1997; Bode *et al.*, 2006).

이러한 영양구조를 연구하는 전통적인 방법은 소비자의 위 내용물 분석하는 것이었다. 그러나 이러한 방법은 많은 시료들을 분석해야 하고 많은 시간과 노력이 요구될 뿐만 아니라 먹이생물로

서의 다양한 생물종을 대상으로 연구를 수행해야 하며, 소화해 진행된 먹이, 먹이생물의 크기가 작은 경우나 형태적인 특징이 잘 나타나지 않는 생물의 경우 동정이 어렵고, 이미 소화되고 난 후의 파편이나 일부만 섭취된 생물들을 대상으로 할 수도 있다는 연구방법상의 단점을 가지고 있다(Michener and Schell, 1994). 또한 소화관 내용물 분석 방법으로 고차소비자로 갈수록 소비자가 이용하는 유기물의 기원을 추적하기는 어렵다. 이와 같은 단점들을 보완하고 소비자가 이용하는 유기물 기원을 추적하기 위해 탄소와 질소 안정동위원소 비값($\delta^{13}\text{C}$ 와 $\delta^{15}\text{N}$)을 이용하는 방법이 효과적으로 이용될 수 있다(Fry and Sherr, 1984; Peterson and Fry, 1987; Michener and Schell, 1994). 이 방법은 소비자가 먹이를 섭취하게 되면 대사과정을 거치면서 기원물질이 가지는 원래의 특성은 사라지는 반면 생산자의 탄소와 질소의 안정동위원소 조성이 소비자의 안정동위원소 조성에 반영된다는 특성에 근거하여 그 동물이 실제로 이용하는 먹이의 기여도를 평가할 수 있다. 또한 체지방 중 안정동위원소 조성은 상당 기간 동안 그들의 섭식활동을 반영한 결과이기 때문에 이들이 서식하고 있는 먹이환경을 해석할 수도 있다. 또한 안정동위원소 비 값을 분석할 경우 먹이와 소비자(pre-y-predator) 사이에 각 영양 단계를 따라 탄소는 1‰ 이내, 질소는 3~4‰ 정도가 높아지는 동위원소 분별효과(isotopic fractionation effect)가 나타난다(DeNiro and Epstein, 1978, 1981; Minagawa and Wada, 1984; Vander Zanden and Rasmussen, 2001). 따라서 안정동위원소 조성 분석을 통하여 소비자가 이용하는 유기물 기원의 추적이 가능하며 소비자의 영양단계를 연구하는데 있어 유용하게 이용될 수 있다.

그동안 한반도 연안에서 수행된 먹이망과 관련한 연구들은 대부분 군집단위의 연구이거나, 소화관 내용물을 통한 연구들(Huh and Kwak, 1998; 1999; Cha & Park, 2001), 이 연구들은 주로 특정 종의 섭식상태 및 먹이를 연구한 결과들을 훌륭하게 제시하여 주었지만 먹이망의 영양기저에 대한 정보를 제공하지는 못하는 단점을 보였다. 그러나 최근의 몇몇 연구들에서 소비자 동물군과 그들의 잠재먹이원에 대한 안정동위원소 분석을 통하여 무초본의 연성 조간대 갯벌 생태계 먹이망의 영양기저로써 저서미세조류의 중요성을 밝힌바 있다(Kang *et al.*, 2001, 2003, 2007a).

본 연구에서는 부영양화된 반폐쇄성 내만인 남해안의 광양만 연안 암반 조간대와 상대적으로 빈영양의 외양에 노출된 환경 특성을 가지는 동해안의 대진(삼척)연안의 암반 조간대 해조 군락을 대상으로 이곳에 서식하는 저서동물들에 의해서 이용되는 유기물의 기원을 밝히기 위하여 저서동물과 그들의 잠재 먹이원에 대한 탄소와 질소 안정동위원소 분석을 실시하였다. 또한 이들의 섭식양식(feeding habitats)에 따른 안정동위원소 비값의 차이를 비교하여 저서동물들이 실제로 이용하는 먹이원으로써 해조류 기원 유기물과 수주(water column)를 통하여 이들 군락으로 유입되는 유기물(주로 식물플랑크톤으로 구성)의 상대적인 중요성을 평가하여 동식물 사이의 영양관계를 밝혔다.

재료 및 방법

연구지역의 개관

본 연구는 한국의 남해안에 위치한 광양만의 암반 조간대와 동

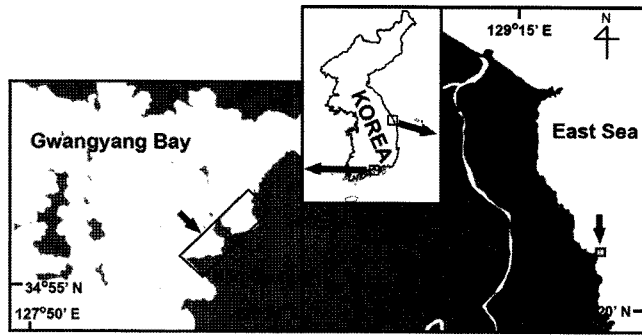


Fig. 1. Map showing the sampling stations at the east and south coasts of Korea.

해안에 위치한 삼척시 대진 연안의 암반 조하대를 대상으로 하였다(Fig. 1). 남해안의 중앙부에 위치한 광양만은 면적 230 km²의 반폐쇄성 내만으로 외해인 남해와는 폭 4 km의 여수해협과 연결되어 있고, 만의 북동부에는 하동군과 남해도 사이를 지나는 노량해협이 있어 진주만과 연결된다. 광양만의 수심은 중앙 수로를 제외하면 대체적으로 5 m 정도이고, 북동부의 남해도 해안의 암반 조하대에 해조류 군락이 잘 발달되어 있다. 조석은 1일 2회의 간만조를 가지는 반일주조로 대조기의 평균조차는 3 m 정도를 나타내어, 연성의 모래질이나 썩질 조하대에서는 해조류 군락이 나타나지 않는다. 광양만은 섬진강으로부터 연간 5.8~8.7×10⁸ tons의 담수가 유입되고 주변의 대단위 공업 시설과 대도시로부터 다량의 생활하수와 오폐수가 유입되어 한반도에서도 대표적인 부영양 해역에 해당한다(Lee *et al.*, 2007). 부영양화가 배출되고 있다. 대조 해역인 삼척시 근덕면 동막리의 대진 연안은 직접 외해와 접해 있고 파도의 영향을 많이 받고 있으나 잘 발달된 암반으로부터 보호되어 있으며, 암반이 위치하는 수심은 대체적으로 10 m이고, 조석은 매우 적어서 조차는 0.3~0.5 m 내외에 불과하며, 일조부등은 매우 현저하여 1일 1회의 만조와 간조 밖에 일어나지 않을 때도 있다. 대진 연안은 비교적 투명도가 높아 암반 조하대에는 해조류 군락이 잘 발달되어 있으며, 주변의 오염원과 유입되는 담수의 영향이 없는 곳이다. 해조류는 남방종과 북방종의 한계선 경계에 위치하여 남방종과 북방종이 혼재하여 나타나는 곳으로 알려져 있다.

시료 채집 및 분석 준비

본 연구를 위한 현장조사 및 생물시료 채집은 2005년 5월부터 6월 사이에 광양만 동북부 해안의 조간대 5개 정점과 동해안 대진 연안의 암반 조하대 3개 정점을 대상으로 실시하였다. 각 조사 정점별로 잠재먹이원(부유입자 유기물과 해조류) 및 저서무척추동물 채집하였다.

잠재 먹이원으로써 해조군락으로 유입되는 수주(water column) 내의 부유입자 유기물(suspended particulate organic matter, POM)은 수심 약 1 m 정도의 아표층수 20 L를 채수하여 200 μm의 망목으로 동물플랑크톤이나 크기가 큰 입자물질을 제거한 후 450 °C에서 4시간 동안 미리 태워서 준비한 GF/F 여과지(직경 47 mm, 공극 0.7 μm)를 이용하여 여과하고 10% HCl 2~3방울을 가해 CaCO₃을 제거하고 다시 증류수로 세척한 후 동결건조하여 데시케이터에 보관하였다.

해조류의 정량 채집은 0.4 × 0.4 m 방형구를 이용하여 조간대에서는 직접 손으로 채집하였고, 조하대에서는 SCUBA diving을 통하여 방형구 내의 모든 생물을 채집하였다. 각 정점 당 조간대와 조하대에서 각각 3과 2회의 반복 채집하여 총 15개와 6개의 시료를 채집하였다. 채집한 해조류 시료는 얼음으로 채운 아이스박스에 넣어 실험실로 운반하여, 엽 표면에 붙은 이물질을 제거하고 증류수로 세척한 후 가능한 중 수준까지 동정하였고, 자연 건조한 후 각 종별 건조 중량을 측정하고 1 m² 당 생물량으로 환산하였다. 이렇게 건조된 해조류는 안정동위원소 분석을 위하여 미세한 분말로 준비하였다.

저서무척추동물은 해조류 채집과 함께 직접 채집하거나 SCUBA diving을 통하여 채집하였다. 요각류, 단각류 및 등각류 시료는 해조류의 염상부와 부착기를 망목 0.1 mm의 체에 체질해서 포집하였고, 연체동물, 절지동물, 갯지렁이류 등의 대형저서생물 손으로 직접 채집하였다. 채집한 동물들은 여과한 현장 해수에 하룻밤 정도 담귀 소화관 내용물을 완전히 배설하도록 하여 소화관에 남아 있는 먹이를 제거하였고, 각각의 시료는 가능한 중 단위까지 분류 한 후 폐각, 갑각 및 기타 이물질 등을 제거하고 조심스럽게 근육부위를 절개 혹은 절단하여 10% HCl에 잠시 동안 처리하여 CaCO₃을 제거하고 다시 증류수로 세척한 후 동결건조하고, 막자 사발로 갈아서 미세한 분말로 준비하였다. 낮은 탄소 안정동위원소 비값을 가지는 지질 성분은 생물 중에 따라 큰 함량변화를 보이므로(Focken and Becker, 1998), 대부분의 저서동물들의 분말시료는 다시 methanol, chloroform 및 water(2:1:0.8) 혼합액을 이용하여 지방성분을 제거한 후(Blight and Dyer, 1959), 증류수로 세척하고 다시 동결건조 하였다.

안정동위원소 분석

건조 분말 시료 10~20 mg을 tin capsule에 넣고 밀봉하여, 자동 원소분석기(Automated elemental analyzer, Eurovector 3000 Series)에 주입하여 고온(1,030 °C)에서 연소시켰는데, 동위원소 분석을 위한 유도기체로는 헬륨(He)을 이용하였다. 연소 후 발생하는 CO₂와 N₂ 가스에 대하여 안정동위원소질량분석기를 장착한 continuous flow-through inlet system(isotope ratio mass spectrometer(CF-IRMS, Micromass Isoprime)을 이용하여 탄소와 질소안정동위원소 비를 분석 하였다. 잠재먹이원과 소비자 동물군이 가지는 안정동위원소 비 값은 다음과 같은 식에 의해 국제 표준물질(Intertional 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 혹은 ¹⁵N이며, R은 ¹³C/¹²C 혹은 ¹⁵N/¹⁴N비를 나타낸다. 이때 사용한 표준물질은 탄소의 경우 PDB(PeeDee Belmnite)와 질소의 경우 air N₂ 등 국제표준 기준을 사용하였다. 실제 분석에서는 국제표준물질에 대해 알려진 비값을 가지는 IAEA CH-6(sucrose, δ¹³C = -10.4 ± 0.2‰)와 IAEA-N1(ammonium sulfate, δ¹⁵N = +0.4 ± 0.2‰)을 표준물질로하여 분석하였으며, peptone과 urea를 이용한 20회 이상의 반복실험에서 얻어진 값들에 대한 표준편차는 δ¹³C 가 0.2‰ 그리고 δ¹⁵N가 0.3‰ 이하를 나타내었다. 두 해조군락 사이의 생물량과 동위원소 비값 등의 비교를 위한 자료들은 SPSS software(Chicago, USA)를 이용하여 먼저 normality와 homogeneity를 검정하고, t-test를 통하여 비교 검정하였다.

결 과

해조류 군집조성

본 조사기간 동해의 대진 연안 암반 조하대에서는 총 20종, 광양만의 남해도 해안 조간대에서는 총 13종의 해조류가 채집되었다(Table 1). 동일한 실제 반복 채집회수를 갖지 않아 직접비교는 어려우나, 채집된 종 풍도는 채집회수가 적은 동해 조하대에서 다소 높게 나타났다. 동해 조하대 정점에서 6개 방형구 채집에서 얻은 평균 생물량은 406.66(±126.22) g DW m⁻²으로 남해 조간대 정점에서 총 15개 방형구로 반복 채집된 생물량의 평균값인 501.36(±325.94) g DW/m²보다 다소 낮은 생물량을 나타내었다. 이들 해조류 가운데 두 조사 정점에서 우점 해조류는 서로 상이하게 나타났다. 동해 조하대 정점에서는 갈조류 *Undaria pinnatifida*와 *Sargassum horneri*, 홍조류 *Prionitis cornea* 3종이 80% 이상을 차지한 반면 남해 조간대 정점에서는 녹조류 *Ulva pertusa*와 갈조류 *Sargassum thunbergii* 2종이 전체 생물량의 약 90%를 차지하여 우점했다.

잡재 먹이원의 동위원소 조성

동해 조하대 정점에서 채집한 해조류 가운데 *Desmarestia viridis*, *Acrosorium yendoi* 그리고 *Plocamium telfairiae* 3종은 다른 해조류들과는 달리 탄소안정동위원소 비값($\delta^{13}C$)이 -33.9(±0.8)~-28.8(±3.9)%₀ 범위로 현저히 낮은 값을 보였다. 이는 대부분의 소비자 동물군들이 가지는 값과는 아주 먼 값에 해당되며, 이 결과로부터 이 종들에서 유래되는 유기물들이 동물을 위한 기초영양원으로서 기여가 극히 미미한 것으로 간주하고 본 연구에서는 먼저 이들의 효과를 논의에서 제거하였다. 이들 3종을 제외한 해조류의 $\delta^{13}C$ 값은 동해 조하대에서 -20.6(±1.3)~-12.3(±3.9)%₀의 범위로 평균 -16.6(±2.4)%₀을 보여 -18.5(±1.5)~-12.8%₀ 범위를 가지는 남해 조간대에서의 평균 -16.0(±1.8)%₀과 유사한 값을 나타내었다(*t*-test, *F*₂₈=0.895, *P*=0.408). 이와는 대조적으로 두 조사정점에서 채집한 해조류의 질소안정동위원소 비값($\delta^{15}N$)의 분포는 동해 조하대에서 2.5(±1.1)~4.5%₀ 범위로 평균 3.7(±0.6)%₀을 나타내어, 6.0~8.7%₀ 범위의 남해 조간대의 평균 7.6(±0.9)%₀에 비하여 약 4% 정도 낮은 값을 보였다(*t*-test, *F*₂₈=2.342 *P*<0.001).

Table 1. Mean $\delta^{13}C$ and $\delta^{15}N$ values (±1 SD), and biomasses of macroalgal species collected from the subtidal rocky bed of East Sea and the intertidal of Gwangyang Bay during this study. †mean values for almost all the macroalgal species except for *Desmarestia viridis*, *Acrosorium yendoi* and *Plocamium telfairiae*. ‡mean values for total macroalgal biomass of 6 and 15 replicate samples at the former and the latter sites

	Subtidal (East Sea)			Intertidal (Gwangyang Bay)			Subtidal site g DW/m ²	Intertidal site g DW/m ²
	$\delta^{13}C$ (‰)	$\delta^{15}N$ (‰)	n	$\delta^{13}C$ (‰)	$\delta^{15}N$ (‰)	n		
Chlorophyta								
<i>Codium arabicum</i>	-12.3 (3.9)	3.8 (1.5)	3				0.56 (0.25)	
<i>Ulva conglobata</i>	-16.7	3.7	1	-14.7	6.0		0.06 (0.06)	1.68 (6.51)
<i>Ulva japonica</i>				-17.0	8.6			2.92 (11.32)
<i>Ulva pertusa</i>	-19.7	3.5	1	-14.0 (2.5)	7.6 (0.5)	11	0.08 (0.05)	247.03 (245.71)
Phaeophyta								
<i>Colpomenia sinuosa</i>	-12.6 (2.4)	4.1 (0.8)	3				6.13 (2.81)	
<i>Desmarestia viridis</i>	-28.8 (1.9)	3.9 (0.4)	4				6.44 (5.50)	
<i>Saccharina japonica</i>	-19.0 (1.1)	2.5 (1.1)	2				1.13 (0.19)	
<i>Myagropsis myagroides</i>	-15.4 (0.8)	2.5 (0.8)	2				0.27 (0.38)	
<i>Sargassum horneri</i>	-20.6 (1.3)	4.1 (0.4)	2				59.00 (16.00)	
<i>Sargassum thunbergii</i>				-18.6 (1.2)	6.3 (0.3)	7		209.53 (221.91)
<i>Spatoglossum pacificum</i>	-13.4	4.5	1				2.75 (3.13)	
<i>Undaria pinnatifida</i>	-18.9 (0.6)	3.8 (0.9)	2	-15.9	7.1		266.38 (96.38)	8.04 (31.15)
Rhodophyta								
<i>Acrosorium yendoi</i>	-31.4 (3.8)	2.7 (0.3)	2				2.88 (0.94)	
<i>Carpopeltis affinis</i>				-14.2	8.7			0.88 (3.41)
<i>Chondraacanthus teedii</i>				-16.2 (0.9)	8.0 (0.7)	5		0.34 (1.16)
<i>Chondracanthus tenellus</i>	-17.4	4.1	1				1.93 (0.39)	
<i>Chondrus ocellatus</i>				-16.7	8.5			0.26 (0.95)
<i>Chondrus yendoi</i>				-14.3	8.0			1.92 (7.17)
<i>Condrus ocellatus</i>	-15.4 (1.3)	4.4 (0.7)	6				7.75 (4.94)	
<i>Gelidium amansii</i>	-15.6	4.5	1	-16.9	8.2		1.44 (0.75)	0.53 (2.04)
<i>Glateloupia elliptica</i>	-15.7 (0.4)	3.8 (0.4)	2	-17.9 (2.0)	7.7 (0.5)	2	0.05 (0.06)	6.56 (22.51)
<i>Gloiosiphonia capillaris</i>	-17.4	3.3	1				0.06 (0.05)	
<i>Lomentaria catenata</i>	-18.3	3.9	1	-18.5 (1.5)	7.0 (0.1)	3	12.25 (7.31)	18.95 (53.49)
<i>Plocamium telfairiae</i>	-33.9 (0.8)	2.6 (0.6)	3				10.94 (5.31)	
<i>Prionitis cornea</i>	-16.2 (2.7)	3.6 (0.4)	2	-12.8	7.4		26.50 (5.69)	2.70 (7.34)
<i>Prionitis divaricata</i>	-18.3	3.9	1				0.09 (0.09)	
mean	-16.6 (2.4)	3.7 (0.6) [†]		-16.0 (1.8)	7.6 (0.9)		406.66 (126.22) [‡]	501.36 (325.94) [‡]

Table 2. Mean $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ values (± 1 SD) of suspended particulate organic matter (POM) at the East Sea and the Gwangyang Bay coasts. data from Kang *et al.* (2007)

	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)	$\delta^{15}\text{N}$ (‰)	n
Coast of East Sea	-22.1 (1.3)	4.3 (0.7)	20
Coast of Gwangyang Bay	-20.7 (1.1)	5.0 (1.1)	6

해조 군락으로 유입되는 부유입자유기물은 주변에서 유입되는 다양한 기원의 유기물들이 혼합된 형태를 나타낸다. 따라서 본 연구에서는 해조 군락 자체에서 생산되는 유기물과 외부로부터 유입되는 유기물의 상대적 중요성을 평가하기 위하여 부유입자유기물의 안정동위원소 비값을 측정하여 동물군의 비값과 관계를 살

펴보았다(Table 2). 동해 조하대 인근에서 측정된 부유입자유기물의 $\delta^{13}\text{C}$ 및 $\delta^{15}\text{N}$ 값은 각각 평균 $-22.1(\pm 1.3)\%$ 과 $4.3(\pm 0.7)\%$ 로 평양만 조하대로 유입되는 부유입자유기물의 평균 $-20.7(\pm 0.6)\%$ 과 $5.0(\pm 0.6)\%$ 에 비해 다소 높은 $\delta^{13}\text{C}$ 값을 기록(*t*-test, $F_{14}=0.061$, $P=0.018$)한 반면, $\delta^{15}\text{N}$ 값은 두 정점에서 유사한 값을 나타내었다(*t*-test, $F_{14}=3.844$, $P=0.278$). 한편, 이들 부유입자유기물이 가지는 안정동위원소 비값은 동해 조하대의 경우에는 $\delta^{15}\text{N}$ 값이 해조류와 유사하였지만 $\delta^{13}\text{C}$ 값에서 평균값 사이에 약 5.5%의 차이를 나타내었고, 남해 조간대에서는 $\delta^{13}\text{C}$ 와 $\delta^{15}\text{N}$ 평균값이 모두 해조류에 비하여 각각 약 4.7%과 2.6% 정도 낮아 부유입자물질과 해조류 두 기원물질의 소비자 동물군들과의 관계를 논의하기에 충분히 큰 차이를 기록하였다.

Table 3. Mean $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ values (± 1 SD) of benthic invertebrates collected at the subtidal rocky bed of East Sea. H, herbivore; S, suspension feeder; D, deposit feeder/detritivore; O, omnivore; P, predator; Sc, scavenger

Species	Common name	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)	$\delta^{15}\text{N}$ (‰)	n	feeding guild	Species index
Porifera						
<i>Aplysia kurodai</i>	Korean common sea hare	-17.8 (1.3)	6.9 (0.5)	2	H	1
<i>Demospongia</i> sp.	Sponge	-22.0 (1.5)	8.0 (0.8)	2	S	2
Cnidaria						
<i>Acnophleura japonica</i>	Rock anemone	-18.0	8.6		O	3
Annelida						
<i>Lysidice collaris</i>	Eunicidae worm	-16.9	9.4	1	P	4
<i>Sabellastarte japonica</i>	Feather worm	-19.1	7.4	1	S	5
Mollusca						
Polyplacophora						
<i>Lepidozonia albrechtii</i>	Albrecht's chiton	-16.9	7.3	1	O	6
Gastropoda						
<i>Cantharidus jessoensis</i>	Hokkaido jewel top	-19.1	8.0	1	H	7
<i>Mitrella bicincta</i>	Variogated dove shell	-19.2 (4.9)	9.7 (1.7)	2	Sc/P	8
<i>Acmaea pallida</i>	Snowy limpet	-15.1 (0.7)	8.4 (0.2)	2	H	9
<i>Searlesia modesta</i>	Modest buccinum	-17.8 (1.8)	8.1 (0.6)	2	P	10
<i>Homalopoma nocturnum</i>	Nocturnal top shell	-14.6	9.0	1	H	11
<i>Cellana toreuma</i>	Common intertidal limpet	-16.1	6.8	1	H	12
Bivalvia						
<i>Arca boucardi</i>	Kobelt's ark shell	-19.6	5.8	1	S	13
Artropoda						
<i>Pagurus</i> sp.	Hermit crab	-18.2 (0.4)	7.6 (0.1)	2	D	14
Amphipods (mixed)	Gammaridian amphipod	-19.0 (1.2)	7.3 (0.5)	2	D	15
<i>Caprella</i> sp.	Skeleton shrimp	-18.2	6.3	1	D	16
<i>Hyastenus elongatus</i>	Longhorn decoration crab	-17.4	7.2	1	H	17
Echinodermata						
Stelloridea						
<i>Asterina pectinifera</i>	Bat seastar	-18.4 (0.2)	8.2 (1.0)	2	O	18
<i>Asterias amurensis</i>	North Pacific seastar	-18.6 (1.1)	9.6 (0.9)	2	P	19
Echinodea						
<i>Strongylocentrotus nudus</i>	Globular sea urchin	-18.4 (0.4)	8.7 (0.5)	3	H	20
<i>Hemicentrotus pulcherrimus</i>	Korean common sea urchin	-17.9 (0.7)	9.4 (0.3)	3	H	21
Holothuroidea						
<i>Stichopus japonicus</i>	Japanese sea cucumber	-17.8 (0.4)	9.1 (1.6)	2	D	22
Cordata						
<i>Halocynthia roretzi</i>		-22.7	5.8	1	S	23
<i>Styela clava</i>		-23.2 (0.5)	7.0 (0.9)	2	S	24

저서무척추동물의 안정동위원소 조성

동해 조하대에서 채집한 대형 저서무척추동물의 목록과 이들의 안정동위원소 비값 조성을 Table 3에 정리하였다. 22종의 저서동물의 $\delta^{13}\text{C}$ 값은 $-23.2(\pm 0.5) \sim -14.6\%$ 범위로 부유입자물질과 해조류가 분포하는 범위전체에 걸쳐 넓게 분포하였다. 이들의 $\delta^{15}\text{N}$ 값은 $6.3\sim 9.7(\pm 1.7)\%$ 범위로 잠재먹이원이 가지는 값보다 높은 값을 나타내어, 한 영양단계 당 3~4% 증가하는 동위원소 분별효과를 잘 나타내었다. 한편 남해 조하대에서 채집한 23종의 저서동물의 $\delta^{13}\text{C}$ 값은 $-19.2(\pm 0.6) \sim -13.7(\pm 0.1)\%$ 의 범위로 잠재먹이원의 범위보다 다소 넓은 분포범위를 나타내었으며, $\delta^{15}\text{N}$ 값의 범위는 $9.0(\pm 0.6) \sim 14.2(\pm 0.9)\%$ 로 먹이원의 값들보다 더 높은 값의 분포를 나타내었다(Table 4).

흥미로운 결과는 두 조사정점에서 동시에 출현하는 종들이 많지 않아 동일 종간의 직접 비교는 어렵지만, 남해 조간대에서 채집된 저서동물들이 동해 조하대의 동물들에 비하여 $\delta^{13}\text{C}$ 과 $\delta^{15}\text{N}$ 값 모두 전체적으로 상당히 높은 값들을 보인다는 점이다(Table 2와 3; Fig. 2). 각 정점에서 두 정점 모두 부유물 여과섭식자(suspension feeders)들의 $\delta^{13}\text{C}$ 값이 채집된 동물군들 중에서 가장

낮아 다른 섭식양식(feeding habitats)을 가지는 동물군들과 뚜렷이 구분되는 경향을 나타내었다. $\delta^{15}\text{N}$ 값은 대체로 육식성 포식자(predators)들에서 다른 동물군에 비해 높게 나타나 영양단계에 따른 동위원소 분별효과가 잘 반영되어 나타났다.

고찰

본 연구기간에 두 조사정점 인근의 부유입자물질의 $\delta^{13}\text{C}$ 값은 해양 식물플랑크톤이 가지는 전형적인 값을 나타내는데(Goering et al., 1990), 한반도 연안이나 동중국해에서 식물플랑크톤에 대해 보고된 값들과도 유사한 값을 보였다(Tan et al., 1991; Kang et al., 2001, 2003). 이와 같은 결과는 두 조사정점 인근의 부유입자물질에 대한 식물플랑크톤의 높은 기여를 잘 시사해 준다. 연구 초기의 예상과는 다르게 평양만에서 높은 생물량과 함께 조하대 먹이망에까지도 유용성이 높은 것으로 알려진 저서미세조류(benthic diatoms $-14.1\pm 1.3\%$)와 말잘피(*Zostera marina* $-11.5\pm 1.3\%$)의 기여가 본 연구에서 그다지 높게 나타나지 않은 점이 특이했다(Kang et al., 2003). 두 조사정점에서 채집된 부유입자물질 사이의 유사

Table 4. Mean $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ values (± 1 SD) of benthic invertebrates collected at the intertidal rocky bed of Gwangyang Bay. H, herbivore; S, suspension feeder; D, deposit feeder/detritivore; O, omnivore; P, predator; Sc, scavenger

Species	Common name	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)	$\delta^{15}\text{N}$ (‰)	n	feeding guild	Species index
Cnidaria						
<i>Acnthopleura</i> sp.	Rock anemone	-14.3	13.6		O	1
Annelida						
<i>Glycera chirori</i>	Blood worm	-14.3 (1.2)	14.2 (0.9)	3	P	2
Mollusca						
Polyplacophora						
<i>Acanthochitona defilippi</i>	Defilipp's needle chiton	-14.3 (1.8)	10.5 (0.4)	4	H	3
Gastropoda						
<i>Barbatia virescens</i>	Blood clam	-15.4 (1.7)	10.3 (0.2)	3	S	4
<i>Chlorostoma argyrostoma sublaevis</i>	Northern top shell	-14.4	10.1	1	H	5
<i>Chlorostoma turbinata</i>	Silver-mouthed monodont	-15.0 (2.0)	11.0 (0.6)	3	H	6
<i>Crepidula onyx</i>	Smoothed slippery shell	-17.5 (1.1)	9.1 (1.1)	3	S	7
<i>Lunella coronata coreensis</i>	Turban shell	-14.7 (0.2)	10.7 (1.2)	3	H	8
<i>Monodonta australis</i>	Southern monodont	-14.2 (0.4)	10.5 (0.6)	2	H	9
<i>Rapana venosa</i>	Purple whelk	-14.3 (0.3)	13.5 (1.3)	2	P	10
<i>Thais clavigera</i>	Korean common dogwhelk	-16.0	12.1	1	P	11
<i>Thais luteostoma</i>	Granulated dogwhelk	-15.0 (1.2)	13.1 (0.8)	5	P	12
<i>Batillaria cumingii</i>	Cuming's false cerith	-13.7 (0.1)	11.2 (0.2)	3	D	13
<i>Homalopoma sangarensense</i>	Pea turban	-15.0 (0.4)	10.1 (0.7)	2	H	14
Bivalvia						
<i>Crassostrea gigas</i>	Giant Pacific oyster	-19.2 (0.6)	9.8 (1.4)	4	S	15
<i>Mytilus edulis</i>	Blue mussel	-18.3 (0.7)	9.0 (0.6)	2	S	16
<i>Ruditapes philippinarum</i>	Manila clam	-18.0 (0.4)	9.0 (0.2)	2	S	17
Arthropoda						
<i>Pagurus</i> sp.	Hermit Crab	-15.2 (0.3)	10.8 (0.6)	3	O	18
<i>Portunus trituberculatus</i>	Swimming crab	-14.0	12.2	1	P	19
<i>Hemigrapsus penicillatus</i>	Japanese shore crab	-15.0	10.9	1	O	20
<i>Hemigrapsus sanguineus</i>	Red-banded shore crab	-16.1 (0.7)	12.8 (0.7)	3	P	21
<i>Balanus</i> sp.	Barnacle	-17.8 (0.5)	10.3 (0.2)	3	S	22
<i>Gaetice depressus</i>	Flat shore crab	-14.6	11.0	1	O	23

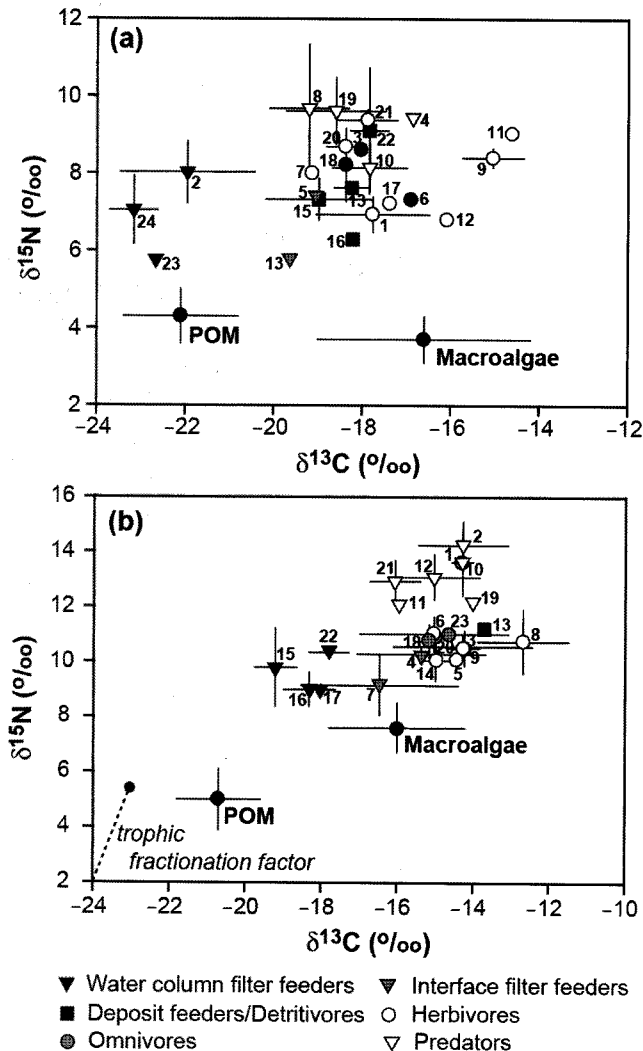


Fig. 2. Dual isotope plots of mean $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ values (± 1 SD) for macroalgae, suspended particulate organic matter (POM) and consumers collected at the subtidal rocky bed of East Sea (a) and at the intertidal rocky bed of Gwangyang Bay (b). Species index on the figures is represented in the Tables 3 and 4.

한 $\delta^{15}\text{N}$ 값은 역시 조사정점으로 유입되는 입자유기물질이 식물 플랑크톤의 기여가 높다는 것을 시사했는데, 실제로 본 연구에서 나타난 $\delta^{15}\text{N}$ 값은 광양만의 외해 연안에 위치한 해역에서 보고된 주로 식물플랑크톤으로 구성되는 부유입자물질의 $\delta^{15}\text{N}$ 값($5.7 \pm 1.3\text{‰}$)과 잘 일치하였다(Kang *et al.*, 2007b).

해조류에서 중간, 종내 그리고 개체내의 엽체 부위에 따른 넓은 범위의 안정동위원소 비값 분포는 잘 알려져 있다(Kerby and Raven, 1985; Currin *et al.*, 1995). 본 연구에서 나타난 중간 $\delta^{13}\text{C}$ 값의 큰 변이는 이 사실을 잘 확인해 준다(Table 3과 4). 해조류의 안정동위원소 비값 분포에서 흥미로운 변이는 동해 조하대와 남해 조간대 정점 해조류의 $\delta^{15}\text{N}$ 평균값에서 정점 간에 약 4%의 차이를 보인다는 것이었다. 온도와 빛 등 다양한 생육 조건이 이 변이에 영향을 미칠 수 있을 것으로 예상되었다. 그러나 동해 연안의 사면 경사에 따른 최상부 조간대부터 해조류가 나타나는 하부 조하대 사이에서 수심별로 채집한 해조류에서 이와 같은 동위원소 분별

이 크지 않았다는 점(강 등, 미발표 자료)과 두 조사정점이 그다지 큰 위도차를 가지지 않으며, 본 조사가 유사한 온도 분포를 보이는 동일한 시기에 수행되었다는 점을 고려할 때, 이전의 많은 연구들에서 밝힌 바와 같이 영양조건이 이와 같은 지역간 변이를 설명할 수 있는 중요한 요인일 것으로 보인다. 해조류 등 해양의 기초생산자가 해양자체에서 순환하는 영양염(internal nutrients)을 이용할 경우에 비하여 부영양화된 연안 특히 하구역에서 육상으로부터 유입된 영양염(external or new nutrients)을 이용하는 기초생산자들에서 ^{15}N 의 높은 축적과 함께 높은 $\delta^{15}\text{N}$ 값을 가지게 되어, 해양 식물들의 $\delta^{15}\text{N}$ 값은 해역의 부영양화의 지표로 이용되기도 한다(McClelland and Valiela, 1998; Cole *et al.*, 2004; Mutchler *et al.*, 2004, Bode *et al.*, 2006). 광양만에서 질소계 영양염의 주 유입원은 육수 유입과 산업폐수로 구성되어 있으며 이 해역은 대표적인 부영양 해역으로 알려져 있다(Lee *et al.*, 2001; Lee *et al.*, 2007). 결국, 남해 조간대 해조류에서 나타난 상대적으로 높은 $\delta^{15}\text{N}$ 값 분포는 이와 같은 육상기원 영양염의 높은 가용성에 따라 해조류들에 의한 ^{15}N 의 높은 이용과 축적에 기인하는 것을 잘 시사해 준다.

본 연구에서 두 조사 정점에서 저서동물의 $\delta^{13}\text{C}$ 값 분포는 잠 채먹이원으로 고려된 해조류와 부유입자물질이 나타내는 범위에 필적할 만큼 넓은 범위를 가져 이들 해조 군락에 서식하는 저서동물들이 두 기원 유기물을 모두 이용하고 있다는 것을 잘 나타내어 주었다. 무엇보다도 이와 같은 넓은 범위의 $\delta^{13}\text{C}$ 값은 소비자 동물군들의 섭식 양식(feeding habitats)에 기인하는 것으로 나타났다(Fig. 2). 본 연구에서는 암반 기질표면에서 수주(water column)로 뺏어 나와 서식하는 형태를 가지는 부유물섭식자를 water column suspension feeder라고 명명하였는데(c.f. Grall *et al.*, 2006), 동해 조하대에서 sponge *Demosporgia* sp.와 2종의 Cordata *Halocynthia roretzi* 및 *Styela clava* 등 3종과 남해 조간대에서는 oyster *Crassostrea gigas* mussel *Mytilus edulis*, clam *Ruditapes philippinarum* 그리고 barnacle *Balanus* sp. 등 4종이 이 그룹에 속하였으며 이들은 두 조사 정점에서 모두 다른 동물군들에 비하여 대단히 낮은 $\delta^{13}\text{C}$ 값을 보였다. 이 값들은 부유입자유기물의 $\delta^{13}\text{C}$ 값과 유사하여 이들이 수중의 부유입자유기물을 직접 여과하여 섭취한다는 것을 잘 나타내어 주었다. 반면 동해 조하대의 polychaete worm *Sabellastarte japonica*와 ark shell *Arca boucardi* 2종과 남해 조간대의 blood clam *Barbatia virescens*와 smoothed slippery shell *Crepidula onyx* 등 2종은 같은 부유물 섭식자로서의 섭식 양식을 가지지만 그들의 $\delta^{13}\text{C}$ 값은 water column suspension feeder들이 가지는 값보다 상당히 높아 해조류의 값에 유사한 값을 보였다. 이 동물들은 암반 표면과 수주의 계면에서 물을 여과하여 먹이를 섭취하는 그들의 섭식양식(여기서는 interface suspension feeder라 표현)과 상당히 관련이 있을 것으로 보인다. 결국 암반과 수주의 계면에서는 수중의 부유입자물질과 함께 해조류에 기원을 둔 유기체설물(detritus)이 존재하며 이것들이 저서동물들에게 이용되고 있다는 것을 나타낸다. 이와 같이 서식 형태에 따라 부유물 섭식자들 사이에 이용하는 먹이자원이 다소 상이하다는 것은 다른 생태계에서도 입증되었다(Duggins *et al.*, 1989; Grall *et al.*, 2006).

한편 초식동물(herbivores)과 퇴적물 섭식자(deposit feeders)로 구성되는 그룹은 해조류와 동일한 $\delta^{13}\text{C}$ 값을 나타내었다. 이와 같은

결과는 이 그룹의 동물들이 해조류를 직접 이용하거나 해조류에서 유래한 유기체설물(detritus)를 주로 이용하고 있다는 것을 시사해 주었다. 이들의 $\delta^{15}\text{N}$ 값 역시 해조류보다 약 3~4% 높아 조사정점들이 위치한 생태계에서 이들이 해조류에서 유래한 유기물을 이용하는 1차 소비자로서의 역할을 하고 있다는 것을 잘 나타내어 주었다. 이상의 결과에서 나타난 바와 같이 연안의 암반 조간대나 조하대에서 해조류의 높은 생산이 초식동물이나 퇴적물 섭식자들의 생산에 중요한 역할을 한다는 것은 이전의 여러 연구들에서도 잘 입증되어져 왔다(Rosenthal *et al.*, 1974; Dunton and Schell, 1987; Duggins *et al.*, 1989; Fredriksen, 2003; Bode *et al.*, 2006). 또한, 최근 Yoo *et al.*(2007)은 12종의 조식동물에 의한 해조류에 대한 실제 섭식율을 동해안을 대상으로 실험적으로 연구하여 이들에 의한 높은 섭식압을 추정하였다. 육식성 포식자(predators)와 잡식성(omnivores)을 가지는 동물들의 $\delta^{13}\text{C}$ 값 역시 해조류의 값과 일치하는 값을 가지며, 이들의 $\delta^{15}\text{N}$ 값은 영양단계에 따른 동위원소 분별효과를 잘 나타내어 1차 소비자 그룹에 속하는 동물들보다 대체로 높은 값들을 보유하는 점으로 보아 이들이 해조류에서 유래한 유기물을 주로 이용하며, 이 과정에 초식동물이나 퇴적물 섭식자들을 영양매개자(trophic mediator)로 하고 있다는 것을 시사해 주었다. 그러나 이와 같은 영양단계 증가에 따른 동위원소 분별효과는 실제 동해 조하대 동물들에 있어서는 남해 조간대 동물들에서 나타나는 것보다 뚜렷하지 않았다. 이는 아마도 동해 조하대 서식하는 많은 포식자들이 잡식성의 섭식 특성 가진다는 것을 시사해 주었다(Jennings *et al.*, 1997; Bode *et al.*, 2006).

정점간에 있어서 남해 조간대의 동물들이 가지는 $\delta^{13}\text{C}$ 값들이 동해 조하대의 동물들이 보여주는 값들보다 전체적으로 상당히 높은 값들을 가지는 것으로 나타났다. 두 조사정점에서 채집된 저서동물 군집이 상이하여 개개 동물종에 대하여 직접 비교는 어렵지만 먹이망 전체적으로 나타난 이와 같은 변이는 특정 해조류의 가용성 즉, 우점 해조류의 생체량과 관련될 수 있을 것으로 추론된다. 동해 조하대 정점에서 생물량의 약 65%를 차지하는 극우점 해조류인 *Undaria pinnatifida*가 -18.9(±0.6)%을 나타낸 반면, 남해 조간대 정점에서 약 50%의 생체량을 차지하는 *Ulva pertusa*는 -14.0(±2.5)%의 $\delta^{13}\text{C}$ 값을 나타내어, 이와 같은 우점 해조류의 $\delta^{13}\text{C}$ 값 차이가 두 정점의 동물들 사이의 $\delta^{13}\text{C}$ 값 차이의 일부를 설명할 수 있을 것 같다. 유사하게 동해 조하대의 부유입자물질이 가지는 $\delta^{13}\text{C}$ 값(-22.1±1.1%)보다 다소 높은 남해 조간대로 유입되는 부유입자물질의 값(-20.7±1.1%) 또한 동물들의 값에 반영될 수 있을 가능성을 고려할 때, 먹이원의 정점간 동위원소 비값 차이가 동물 생체의 동위원소 비값의 정점간 차이에 반영된다는 것을 알 수 있다. 동물들의 $\delta^{13}\text{C}$ 값에서 정점간 차이는 $\delta^{15}\text{N}$ 값에서도 유사하게 나타났는데, 동물에서 나타난 정점간 $\delta^{15}\text{N}$ 값의 차이는 해조류의 $\delta^{15}\text{N}$ 값에서의 정점간 차이와 함께 다음 단락에서 토의한다.

앞의 토의에서 언급한 바와 같이 ^{15}N 이 풍부한 육상기원의 영양염은 부영양화된 해역에서 식물플랑크톤, 해조류, 갈피 및 부착 미세조류를 포함하는 전체 기초생산자들의 $\delta^{15}\text{N}$ 값을 증가시키는 것으로 알려져 있다. 기초생산자의 $\delta^{15}\text{N}$ 값 증가는 이들을 먹이원으로 이용하는 소비자 동물군에 반영되어 나타날 수 있다(Kwak and Zedler, 1997; McClelland *et al.*, 1997; Page, 1997; Riera *et al.*, 2000; Mutchler *et al.*, 2004). 본 연구에서도 광양만의 남해

조간대에 서식하는 동물들이 가지는 $\delta^{15}\text{N}$ 값은 동해 조하대의 동물들에 비해 뚜렷이 높은 값들을 가졌다. 특히 해조류를 주요 먹이원으로 이용하는 것으로 밝혀진 초식동물과 퇴적물 섭식자의 $\delta^{15}\text{N}$ 값은 동해 조하대에서 6.3~9.4% 범위인데 반해 남해 조간대에서는 10.1~11.2%의 범위를 나타내었다. 이와 같은 정점간의 $\delta^{15}\text{N}$ 값 차이는 육식성 포식자에서도 잘 나타났다(Fig. 2). 유사한 정점간 차이는 부유물 섭식자에서도 나타나 동해 조하대 동물들이 부유입자물질에 더욱 근접하는 값을 가지는 반면에 남해 조간대의 부유물 섭식자 동물들은 해조류에 더욱 가까운 값들을 가져 이들이 이용하는 유기물 가운데 해조류 유래의 유기체설물(detritus)이 상당한 기여를 한다는 것을 나타내었다. 결과적으로 본 연구에서 나타난 남해 조간대에 서식하는 동물체내의 $\delta^{15}\text{N}$ 값은 광양만에서 부영양화를 유발하는 육상기원의 영양염이 해조류의 높은 생산에 이용되고, 여기서 생산된 유기물이 소비자 동물군으로 연결되는 경로를 통하여 육상 영양염이 연안의 먹이망 속으로 편입된다는 것을 나타내어 준다(McClelland *et al.*, 1997; McClelland and Valiela, 1998; Bode *et al.*, 2006).

요약 및 결론

암반 조하대와 조간대에서 채집한 저서무척추동물과 잠재먹이원으로서 해조류와 해조 군락으로 유입되는 부유입자유기물에 대한 안정동위원소 분석으로부터 특정 연안의 해조 군락에서 먹이망을 통한 물질의 주요 흐름을 이해할 수 있는 실마리를 제공할 수 있었다. 먼저, 부유물 섭식자들(주로 water column suspension feeders)은 다른 섭식 양식을 가지는 동물군에 비해 상대적으로 낮은 $\delta^{13}\text{C}$ 값을 가져 이들이 표영먹이망(pelagic food chains)과 강한 영양연결을 가지는 반면, 일부 부유물 섭식자(주로 interface suspension feeder)를 포함한 초식동물과 퇴적물 섭식자 및 육식성 포식자들은 상대적으로 높은 $\delta^{13}\text{C}$ 값으로 저서먹이망(benthic food chains)을 형성하였다. 따라서 부유물 섭식자를 제외하고 해조 군락을 서식처로 하는 대부분의 동물들이 해조류에서 유래한 유기물을 이용하는 저서먹이망으로 강한 영양연결을 가져 연안 암반 생태계에서 생물생산과 생물 다양성의 유지에 대한 해조류의 중요성을 잘 나타내었다. 또한 광양만과 같은 부영양화된 연안에서의 저서동물과 잠재먹이원의 $\delta^{15}\text{N}$ 값 분포는 육상으로부터 유입되는 영양염이 암반 조간대의 해조류 생산에 이용되고 이어서 이 특정 연안 생태계의 먹이망으로 편입되는 경로를 가지는 것으로 나타났다. 본 연구 결과는 연안의 암반 생태계 먹이망을 지속하는데 있어서 해조류의 중요한 역할을 잘 나타내어 주었다.

사 사

이 논문은 2004년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음(KRF-2004-042-C00137)을 밝히며 이에 감사드립니다.

참고문헌

Bligh, E.G. and W.F. Dyer, 1959. A rapid method of total lipid extraction and purification. *Can. J. Biochem. Physiol.*, **37**: 911-917.

- Bode, A., M.T. Alvarez-Ossorio and M. Varela, 2006. Phytoplankton and macrophyte contributions to littoral food webs in the Galician upwelling estimated from stable isotopes. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **318**: 89–102.
- Cha, S.S. and K.J. Park, 2001. Food organisms and feeding selectivity of postlarvae of slimy (*Leiognathus nuchalis*) in Kwangyang Bay, Korean. *J. Korean Fish. Soc.*, **34**: 666–671.
- Cha, Y.J., E.H. Lee and D.C. Park, 1988. Studies on the processing and utilization of seaweeds. *Bull. Korean Fish. Soc.*, **21**: 42–49.
- Cole, M.L., I. Valiela, K.D. Kroeger, G.L. Tomasky and 5 others, 2004. Assessment of $\delta^{15}\text{N}$ isotopic method to indicate anthropogenic eutrophication in aquatic ecosystems. *J. Environ. Qual.*, **33**: 124–132.
- Currin, C.A., S.Y. Newell and H.W. Paerl, 1995. The role of standing dead *Spartina alterniflora* and benthic microalgae in salt marsh food webs: considerations based on multiple stable isotope analysis. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **121**: 99–116.
- DeNiro, N.J. and S. Epstein, 1978. Influence of diet on the distribution of carbon isotopes in animals. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **42**: 495–506.
- DeNiro, N.J. and S. Epstein, 1981. Influence of diet on the distribution of nitrogen isotopes in animals. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **45**: 341–351.
- Duggins, D.O., C.A. Simenstad and J.A. Estes, 1989. Magnification of secondary production by kelp detritus in coastal marine ecosystems. *Science*, **245**: 170–173.
- Dunton, K.H. and D.M. Schell, 1987. Dependence of consumers on macroalgal (*Laminaria solidungula*) carbon in an arctic kelp community: $\delta^{13}\text{C}$ evidence. *Mar. Biol.*, **93**: 615–625.
- 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.
- Fredriksen, S., 2003. Food web studies in a Norwegian kelp forest based on stable isotope ($\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$) analysis. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **260**: 71–81.
- 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.
- Goering, J., V. Alexander and N. Haubensstock, 1990. Seasonal variability of stable carbon and nitrogen isotope ratios of organisms in a North Pacific bay. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, **30**: 239–260.
- Grall, J., F. Le Loc'h, B. Guyonnet and P. Riera, 2006. Community structure and food web based on stable isotopes ($\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$) analysis of a North Eastern Atlantic maerl bed. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, **338**: 1–15.
- Huh S.H. and S.N. Kwak, 1999. Feeding habits of *Acanthogobius flavimanus* in the eelgrass (*Zostera marina*) bed in Kwangyang Bay. *J. Korean Fish. Soc.*, **32**: 10–17.
- Huh S.H. and S.N. Kwak, 1998. Feeding habits of *Conger myriaster* in the eelgrass (*Zostera marina*) bed in Kwangyang Bay. *J. Korean Fish. Soc.*, **31**: 665–672.
- Jenkins, S.R. and S.J. Hawkins, 2003. Barnacle larval supply to sheltered rocky shores: a limiting factor?. *Hydrobiologia*, **503**: 143–151.
- Jennings, S., O. Renones, B. Morales-Nin, N.V.C. Polunin, J. Moranta and J. Coll, 1997. Spatial variation in the ^{15}N and ^{13}C stable isotope composition of plants, invertebrates and fishes on Mediterranean reefs: implications for the study of trophic pathways. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **146**: 109–116.
- John, D.M., S.J. Hawkins and J.H. Price, 1992. Plant-animal interactions in the marine benthos. Clarendon Press, Oxford, 565pp.
- Kang, C.K., E.J. Choy, S.K. Paik, H.J. Park, K.S. Lee and S. An, 2007a. Contributions of primary organic matter sources to macroinvertebrate production in an intertidal salt marsh (*Scirpus triquetra*) ecosystem. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **334**: 131–143.
- 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.
- Kang, C.K., Y.S. Kang, E.J. Choy, D.S. Kim, B.T. Shim and P.Y. Lee, 2007b. Condition, reproductive activity, and gross biochemical composition of the Manila clam, *Tapes philippinarum* in natural and newly created sandy habitats of the southern coast of Korea. *J. Shellfish Res.*, **26**: 401–412.
- Kang, C.-K., J.B. Kim, J.B. Kim, P.-Y. Lee and J.-S. Hong, 2001. The importance of intertidal benthic autotrophs to the Kwangyang Bay (Korea) food webs: $\delta^{13}\text{C}$ analysis. *J. Korean Soc. Oceanogr.*, **36**: 109–123.
- Kerby, N.W. and J.A. Raven, 1985. Transport and fixation of inorganic carbon by marine algae. *Adv. Bot. Res.*, **11**: 77–123.
- Kwak, T.J. and J.B. Zedler, 1997. Food web analysis of southern California coastal wetlands using multiple stable isotopes. *Oecologia*, **110**: 262–277.
- Lee, K.W., C.H. Shon and S.C. Chung, 1998. Marine algal flora and grazing effect of sea urchins in the coastal waters of Cheju Island. *J. of Aquaculture*, **11**: 401–419.
- Lee, Y.S., C.K. Kang, Y.K. Choi and S.Y. Lee, 2007. Origin and spatial distribution of organic matter at Gwangyang Bay in the fall. *J. Korean Soc. Oceanogr.*, **12**: 1–8.
- Lee, Y.S., J.S. Lee, R.H. Jung, S.S. Kim, W.J. Go, K.Y. Kim and J.S. Park, 2001. Limiting nutrient of phytoplankton growth in Gwangyang Bay. *J. Korean Soc. Oceanogr.*, **6**: 201–210.
- McClelland, J.W. and I. Valiela, 1998. Changes in food web structure under the influence of increased anthropogenic nitrogen inputs to estuaries. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **168**: 259–271.
- McClelland, J.W., I. Valiela and R.H. Michener, 1997. Nitrogen-stable isotope signatures in estuarine food webs: a record of increasing urbanization in coastal watersheds. *Limnol. Oceanogr.*, **42**: 930–937.
- McLusky, D.S., 1989. The Estuarine ecosystem, 2nd ed. Chapman and Hall, New York, 215pp.
- 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.
- Minagawa, M. and E. Wada, 1984. Stepwise enrichment of ^{15}N along food chains: further evidence and the relation between $\delta^{15}\text{N}$ and animal age. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **48**: 1135–1140.
- Mutchler, T., M.J. Sullivan and B. Fry, 2004. Potential of ^{15}N isotope

- enrichment to resolve ambiguities in coastal trophic relationships. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **266**: 27–33.
- Page, H.M., 1997. Importance of vascular plant and algal production to macro-invertebrate consumers in a southern California salt marsh. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, **45**: 823–834.
- Park, J.H. and S. Rho, 2002. Study of the fish fauna associated with drifting seaseed in northeastern coastal waters of Cheju, Korea. *Korean J. Ichthyol.*, **14**: 36–44.
- Peterson, B.J. and B. Fry, 1987. Stable isotopes in ecosystem studies. *Annual Rev. Ecol. Evol. Systym.*, **18**: 293–320.
- Riera, P., L.J. Stal and J. Nieuwenhuize, 2000. Heavy $\delta^{15}\text{N}$ in intertidal benthic algae and invertebrates in the Scheldt Estuary (The Netherlands): effect of riverine nitrogen inputs. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, **51**: 365–372.
- Rosenthal, R.J., W.D. Clarke and P.K. Dayton, 1974. Ecology and natural history of a stand of giant kelp, *Macrocystis pyrifera*, off Del Mar, California. *Fish. Bull.*, **72**: 670–684.
- Tan, F.C., D.L. Cai and J.M. Edmond, 1991. Carbon isotope geochemistry of the Changjiang Estuary. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, **32**: 395–403.
- Terawaki, T., H. Hasegawa, S. Arai and M. Ohno, 2001. Management-free techniques for restoration of *Eisenia* and *Ecklonia* beds along the central Pacific coast of Japan. *J. Appl. Phycol.*, **13**: 13–17.
- 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.
- Yatsuya, K. and H. Nakahara, 2004. Diet and stable isotope ratios of gut content and gonad of the sea urchin *Anthocidaris crassispina* (*A. Agassiz*) in two different adjacent habitats, the *Sargassum* area and *Corallina* area. *Fish. Sci.*, **70**: 285–292.
- Yoo, J.W., H.J. Lee, H.J. Kim, C.G. Lee, C.S. Kim, J.S. Hong, J.P. Hong and D.S. Kim, 2007. Interaction between invertebrate grazers and seaweeds in the east coast of Korea. *J. Korean Soc. Oceanogr.*, **12**: 125–132.

2007년 11월 20일 원고접수

2007년 11월 23일 수정본 채택

담당편집위원: 강동진