

## $\delta^{13}\text{C}$ 분석에 의한 남해 연안 내만역 어류 영양원으로써 저서생산의 중요성 평가

강창근\* · 최은정<sup>1</sup> · 김영상 · 박현재

부산대학교 생명과학과

<sup>1</sup>한국해양연구원 극지연구소

## $\delta^{13}\text{C}$ Evidence for the Importance of Local Benthic Producers to Fish Nutrition in the Inner Bay Systems in the Southern Coast of Korea

CHANG-KEUN KANG\*, EUN JUNG CHOY<sup>1</sup>, YOUNG-SANG KIM AND HYUN JE PARK

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

<sup>1</sup>Division of Polar Biology & Ocean Sciences, Korea Polar Research Institute, Incheon 406-840, Korea

남해 연안의 3개 내만역을 대상으로 전체 어류군집이 이용하는 유기물의 기원을 조사하기 위하여 잘피와 부착조류, 저서미세조류, 해조류, 습지식물, 부유입자유기물(식물플랑크톤), 습지식물(갈대) 그리고 육상기원 유기물 등 다양한 유래의 유기물에 대한 탄소안정동위원소 비( $\delta^{13}\text{C}$ ) 값과 어류 체조직의  $\delta^{13}\text{C}$  값을 비교 분석하였다. 연구해역에서 채집된 총 31종의 어류들이 가지는  $\delta^{13}\text{C}$  값은  $-16.2\sim-8.3\%$ 의 범위를 나타내어 잘피( $-8.3\pm 1.9\%$ ), 부착조류( $-12.4\pm 0.6\%$ ), 저서미세조류( $-15.4\pm 1.6\%$ ) 그리고 해조류( $-16.0\pm 1.8\%$ )가 가지는  $\delta^{13}\text{C}$  값에 상당하는 범위를 나타내었다. 또한 연구수역의 어류군집이 가지는  $\delta^{13}\text{C}$  값( $-12.9\pm 1.5\%$ )은 남해 외양역에서 채집된 어류( $-17.3\pm 0.8\%$ )와 낙동강 수계에서 채집된 어류군집( $-23.2\pm 1.6\%$ )이 가지는 값에 비하여 뚜렷히 높은 값을 보였다. 따라서 본 조사에서 얻어진  $\delta^{13}\text{C}$  분석 결과들은 조사가 수행된 3개 내만역 어류군집은 만 자체의 자생기원 저서생산에서 유래한 탄소원에 주로 의존하고 있다는 것을 시사하였다.

Stable carbon isotope analysis was used to investigate the autotrophic carbon sources supporting fisheries in three coastal bay systems of the southern coast of Korea. Carbon isotope ratios ( $\delta^{13}\text{C}$ ) of 31 fish species were analysed and compared with those of a range of potential primary food sources [e.g., seagrass (*Zostera marina*), seagrass epiphytes, benthic microalgae, macroalgae, marine particulate organic matter (marine POM), marsh plant (*Phragmites australis*) and terrestrial POM].  $\delta^{13}\text{C}$  values (range,  $-16.2\sim-8.3\%$ ) of fishes from the coastal embayment systems were overlapped with those of seagrass ( $-8.3\pm 1.9\%$ ), seagrass epiphytes ( $-12.4\pm 0.6\%$ ), benthic microalgae ( $-15.4\pm 1.6\%$ ) and macroalgae ( $-16.0\pm 1.8\%$ ). In addition, fishes ( $-12.9\pm 1.5\%$ ) from the study area had distinctly higher  $\delta^{13}\text{C}$  values compared to those collected in offshore sites ( $-17.3\pm 0.8\%$ ) of the southern sea of Korea and Nakdong River ( $-23.2\pm 1.6\%$ ). This result indicates that carbon supporting fish communities of these coastal bay systems is mainly derived from the local benthic producers.

**Keywords:**  $\delta^{13}\text{C}$ , Fish, Carbon Source, Food Web, Coastal Ecosystem

### 서 론

연안역은 시공간적으로 큰 환경 변이를 나타내지만 지구상에서 가장 높은 생산성을 보이는 생태계 중의 하나이다(Day *et al.*, 1981; McLusky and Elliott, 2004). 연안역에서는 잘 발달된 해조장, 잘피장, 갯벌 그리고 염습지와 같은 다양한 생태계의 존재들이 다양한 동물의 피난처나 보육장 기능을 하는데 더하여 이들 생태계 구성요소들의 높은 생산에 의한 자생기원 유기물(autochthonous

organic matter)의 영양 기여는 연안 수생생태계의 생물다양성을 유지하는데 결정적인 역할을 한다(Currin *et al.*, 1995; Riera *et al.*, 1999; Kang *et al.*, 2001, 2003). 이와 함께 육상이나 하천 그리고 외양으로부터 연안역으로 공급되는 외래기원 유기물(allochthonous organic matter)의 존재에 따른 복잡한 먹이망(food web)의 형성은 이곳을 높은 생물생산과 중 다양성을 유지하도록 하는 근간이 된다(McLusky, 1989). 그러나 이러한 연안생태계들은 어획, 항만, 준설 그리고 매립과 함께 산업폐수 혹은 도시하수의 유입과 같은 오염 등에 따라 보존을 위협하는 다양한 인류활동에 노출되어 있다. 따라서 이 연안생태계들의 구조와 기능을 이

\*Corresponding author: ckkang@pusan.ac.kr

해하는데 있어서 연안역에 서식하는 동물들의 영양(탄소)원에 대한 정보는 이 생태계들의 보존과 지속적인 관리를 위한 가장 기본적인 과정이라 할 수 있다(Pasquaud *et al.*, 2007).

연안생태계의 영양기저(trophic base)와 먹이망을 통한 유기물 혹은 에너지의 흐름에 대한 정보는 다양한 유기물의 상대적 중요성과 함께 각각의 생물군의 그 생태계 내에서의 역할을 평가할 수 있다. 그러나 연안생태계의 동물생산에 대한 주요 생산자들의 상대적인 기여를 평가하는 것은 쉽지 않다. 특히 어류의 영양관계의 실질적인 연구는 소화관 내용물에 대한 조사가 이용되고 있으나(Hyslop, 1980; Corts, 1997), 이 방법은 어류들이 섭취한 먹이의 종류와 양에 대한 순간적인 정보만을 제공할 수 있을 뿐만 아니라 어류들에 의해서 이용되는 기원 유기물에 대한 정보를 얻기는 어려울 수 있다(Michener and Schell, 1994; Vander Zanden and Rasmussen, 1999 참조). 소화관 내용물 분석이 가지는 이와 같은 단점을 보완하기 위하여 최근 수서 먹이망 연구에 있어 탄소안정동위원소 비( $\delta^{13}\text{C}$ )값을 사용하는 방법이 효과적으로 이용되어 왔다(Fry and Sherr, 1984; Michener and Schell, 1994). 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 종합적인 기록을 나타내어 탄소안정동위원소 조성 분석을 통하여 소비자가 이용하는 유기물 기원을 추적하는데 있어서 유용하게 이용될 수 있다(DeNiro and Epstein, 1978; Fry and Sherr, 1984; Post, 2002).

일반적으로 식물은 그들의 광합성 방식(e.g.  $\text{C}_3$ - versus  $\text{C}_4$ -plants)에 따라  $\delta^{13}\text{C}$  값에 차이를 나타내는데, 수생환경에서는 물의 교란(water turbulence)과 그에 따른  $\text{CO}_2$  확산 역학에 의해 수중의  $\text{CO}_2$ 에 비하여 식물체 내에서  $^{13}\text{C}$ 가 더욱 축적되는 경향을 보이며, 주로 물의 교란 정도에 따라 저서조류(benthic algae)들은 수중 부유 입자물질(POM)로 측정되는 식물플랑크톤에 비하여 약 7% 정도 높은 비값을 가진다(France, 1995a). 이와 함께 동물에 의한 먹이의 동화과정에 탄소의 분별효과(fractionation effect)는 1% 이내로 아주 낮아 저서조류와 식물플랑크톤 사이의  $\delta^{13}\text{C}$  값 차이는 동물들의  $\delta^{13}\text{C}$  값 차이에 그대로 반영되어 나타날 수 있다(McConnaughey and McRoy, 1979; Peterson and Fry, 1987; France, 1995b; Deegan and Garritt, 1997; Riera *et al.*, 1999). 실제로 하천, 호수, 염습지 및 해양 생태계에 이르는 다양한 생태계에서 먹이망 연구를 위한 동위원소 분석기법 응용 결과들로부터 이 방법이 소비자들이 이용하는 탄소원(carbon source)을 추적하는데 유용한 도구가 된다는 것이 입증되어 왔다(Currin *et al.*, 1995; Michener and Schell, 1994; Vander Zanden and Rasmussen, 1999; Finlay, 2001). 또한 어류의  $\delta^{13}\text{C}$  값 조성은 하구에서 연안역과 외양역에 이르는 전체 어류 군집을 대상으로 한 먹이망 연구에도 점차 그 적용이 확대되고 있다(Kwak and Zedler, 1997; Jennings *et al.*, 1997; Davenport and Bax, 2002).

남해 연안 내만역은 넓은 잘피장(*Zostera marina* bed), 갯벌(tidal flat) 그리고 해조장(macroalgal bed) 생태계에서의 높은 저서 기초생산, 섬진강을 통한 다량의 육수 유입 및 높은 표영 기초생산(식물플랑크톤 생산력)을 나타내어 다양한 어류에 대한 중요한 보육장이 될 것으로 기대된다(Huh and Kwak, 1998, 1999; Cha and

Park, 2001; Kang *et al.*, 2001). 그러나 이 해역은 최근 매립, 수로준설 그리고 교량건설 등의 높은 개발압력에 노출되어 있다. 따라서 본 연구는 이와 같은 내만역 어류 먹이망의 구조와 기능을 평가하는데 있어서 동위원소 분석의 적용가능성을 평가하기 위하여 수행되었다. 따라서 본 연구의 일차적인 목적은 다양한 기원 유기물과 어류의  $\delta^{13}\text{C}$  분석을 통하여 남해 연안 내만역 어류 생산에 대한 연안 저서 기초생산자의 중요성을 밝히는 것이며, 이로부터 연안의 어류군집 유지관리를 위하여 다양한 연안생태계 보전의 필요성을 제시하는 것이다.

## 재료 및 방법

### 연구해역

본 연구를 위한 현장조사 및 어류 채집은 2005년 4월에 남해 앵강만과 동대만 그리고 광양만 등 3개 내만역에 대하여 어류 채집이 용이한 만내의 잘 발달된 잘피장과 만 입구 혹은 중앙 수로 정점들을 대상으로 실시하였다(Fig. 1). 앵강만은 남해도 남쪽에 위치하고 있으며 광양만과 여수해만을 연결하는 수로를 접하고 있다. 퇴적물은 사질로 구성되어 있고 거머리말(*Zostera marina*)로 구성된 해초장(seagrass bed)이 만 전체에 걸쳐서 중간대 하부로부터 수심 약 2.0 m 사이에 소규모의 초지를 이루며 군락을 형성하고 있다(Lee *et al.*, 2005). 동대만은 남해도 북쪽 창선도에 위치하며, 남북 방향으로 길고 동서 방향으로 좁은 내만으로 퇴적물은 사질로 구성되어 있다. 이 만에서는 중간대 하부에서부터 조하대의 수심 약 5.0 m에 이르는 수심에 걸쳐 *Z. marina* bed 가 약 2 km<sup>2</sup>의 면적으로 광범위하게 분포하며 만 내측에는 넓은 사질조간대가 잘 발달되어 있다(Kang *et al.*, 2006). 남해안의 중앙부에 위치한 광양만은 면적 230 km<sup>2</sup>의 반폐쇄성 내만으로 광양만의 수심은 중앙 수로를 제외하면 대체적으로 5 m 정도이다. 조사가 수행된 잘피장은 저조시 수심 약 1 m에서 3 m 사이에 분포하였는데, 섬진강을 통하여 주로 유입되는 육수의 양은 연간 5.8~8.7×10<sup>8</sup> tons에 이르며 강의 중하류 연변에는 넓은 갈대(*Phragmites australis*)밭과 함께 하류에는 높은 저서미세조류 생체량(약 15  $\mu\text{m}$  Chl *a*·mg<sup>-1</sup> dry sediment)을 가지는 넓은 모래갯벌(sand flats)이 잘 발달되어 다양한 기원의 유기물을 공급하는 역할을 하고 있다(Kang *et al.*, 2001). 한편 각 내만역 연안과 섬주변의 암반 조간대와 조하대에서 비교적 높은 해조류 밀도를 나타내고 있다.

### 시료 채집 및 분석 준비

잠재 먹이원으로서 수주(water column)내의 부유입자유기물(suspended particulate organic matter, POM) 시료는 van Dorn 채수기를 이용하여 수심 약 1 m 정도의 아표층수 20 L를 채수하여 200  $\mu\text{m}$ 의 망목으로 동물플랑크톤이나 크기가 큰 입자물질을 제거한 후 450 °C에서 4시간 동안 미리 태워서 준비한 GF/F 여과지(직경 47 mm)를 이용하여 여과하였다. POM을 포집한 여과지에 10% HCl 2~3 방울을 가해  $\text{CaCO}_3$ 을 제거하고 다시 증류수로 세척한 후 동결건조하여 분석시까지 데시케이터에 보관하였다. 잘피는 각 조사지점에서 엽조(shoot)와 근경(rhizome)을 절단하여, 엽조는 방형구를 이용하여 채집하였고, 근경은 코어채집기를 이용하

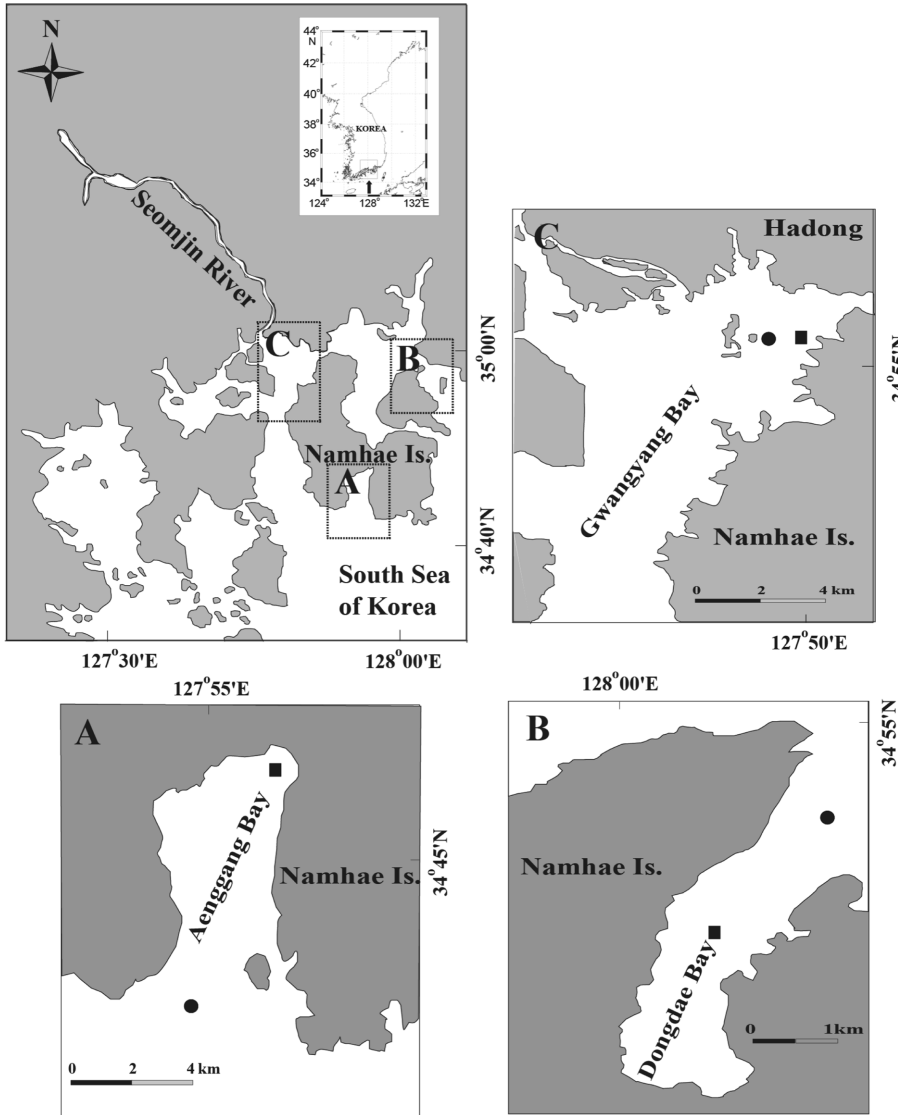


Fig. 1. Map showing the sampling stations in Aenggang Bay (A), Dongdae Bay (B) and Gwangyang Bay (C). ■: *Zostera marina* bed, ●: mouth of the bay or bay channel.

어 채집하였다. 부착조류는 반복 채집된 잘피를 실험실로 옮긴 뒤, 슬라이드 글라스를 이용하여 잘피 잎 표면을 긁어내어 부착조류를 분리하였다. 준비된 잘피와 부착조류는 동결 건조하여 미세한 분말로 준비하였다.

어류의 채집은 개선된 저인망(modified otter trawl)을 이용하여 평균 2 knot로 15분간 예인하여 인망하였고, 수심이 낮은 잘피밭에서는 갯후리 그물(약 5.5 m length의 beach seine net)을 이용하여 채집하였다. 채집된 시료는 냉장 보관하여 실험실로 운반하였고, 운반된 시료는 한국어류대도감(Kim *et al.*, 2005)과 유용어류도감(Kim *et al.*, 2004)을 이용하여 가능한 중 수준까지 분류하여 동정하고 동위원소 분석을 위하여 근육부위를 절개하여 분석시까지 냉동 보관하였다. 일반적으로 지질 성분은 낮은  $\delta^{13}C$ 값을 가져 생물종에 따라 큰 함량변화를 보이므로(Focken and Becker, 1998). 어류 근육시료는 동결건조 후 methanol과 chloroform 및 water (2:1:0.8) 혼합액을 이용하여 지방성분을 제거하고(Blight and Dyer, 1959), 재건조하여 분말화한 뒤 분석 시까지 데시케이터에 보관하였다.

### 안정동위원소 분석

건조 분말 시료는 잠재먹이원은 10~20 mg을 동물체는 1~2 mg을 tin capsule에 넣고 밀봉하여, 자동원소분석기(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 CO<sub>2</sub> 가스에 대하여 안정동위원소질량분석기를 장착한 continuous flow-through inlet system(Isotope Ratio Mass Spectrometer, Isoprime급 CF-IRMS, Micromass, UK)을 이용하여 탄소안정동위원소 비를 분석 하였다. 잠재 기원유기물과 어류 근육조직이 가지는 안정동위원소 비 값은 다음과 같은 식에 의해 국제 표준물질(International standard material)에 대한 시료의 그 비 값 변위를 천분율(‰)로 나타내어  $\delta$  기호로 표현하였다.

$$\delta X(\text{‰}) = [(R_{\text{sample}} / R_{\text{standard}}) - 1] \times 10^3$$

여기서 X는 <sup>13</sup>C, R은 <sup>13</sup>C/<sup>12</sup>C 비를 나타낸다. 사용한 표준물질은 PDB(PeeDee Belemnite)로 국제표준 기준을 사용하였다. 실제 분석에서는 국제표준물질에 대해 알려진 비값을 가지는 IAEA CH-6

(sucrose, δ<sup>13</sup>C = -10.4±0.2‰)을 표준물질로하여 분석하였으며, urea를 이용한 20회 이상의 반복실험에서 얻어진 값들에 대한 표준편차는 0.1‰ 이하를 나타내었다. 자료의 통계처리를 위하여 SPSS software(Chicago, USA)를 이용하여 먼저 전체 어류군집의 δ<sup>13</sup>C 값에 대해서 normality와 homogeneity 검정을 실시하고 만(bay)사이에 그리고 잘피장과 만입구(혹은 수로) 조하대 정점간 사이의 δ<sup>13</sup>C 값 차이를 각각 one-way ANOVA와 student t-test를 통하여 검증하였다.

### 결과 및 고찰

기초생산자를 비롯한 연구해역의 주요 잠재 기원유기물들은 각 각이 구별될 수 있는 뚜렷이 다른 δ<sup>13</sup>C 값을 나타내었다(Table 1). 거머리말(*Z. marina*)의 δ<sup>13</sup>C 값은 평균 -8.3(±1.9, 1SD)‰로 잠재 기원유기물 중 가장 높은 값을 가졌는데, 본 조사에서 얻은 거머리말의 δ<sup>13</sup>C 값은 한반도 주변해역에서 이전에 보고된 값들의 범위에 해당하였다(Kang *et al.*, 2001; Kharlamenko *et al.*, 2001). 한편 거머리말 엽체 부착조류(epiphytes)의 δ<sup>13</sup>C 값은 평균 -12.4(±0.6)‰로 갯벌 표면에서 주로 규조류로 구성되는 저서미세조류(benthic microalgae)의 평균값 -14.5(±1.6)‰과 유사한 값을 보였는데 이들의 δ<sup>13</sup>C 값은 잠재 기원유기물 중 거머리말 다음으로 높은 값에 해당하였다(Kang *et al.*, 2001). 또한 이들 사이의 δ<sup>13</sup>C 값의 유사성은 거머리말 엽체의 부착조류 역시 저서미세조류와 유사하게 주로 규조류로 구성되어 있다는 점에 의해 추론될 수 있다(Jung, 2003). 이와는 대조적으로 외만역의 정점에서 채취한 수중 부유입자유기물(marine POM)은 평균 -21.1(±1.1)‰의 δ<sup>13</sup>C 값을 나타내었는데, 이 값은 해양 식물플랑크톤이 가지는 전형적인 범위에 해당하여 식물플랑크톤이 만으로 유입되는 부유입자유기물의 주요 구성 요소라는 것을 시사하였다(Goering *et al.*, 1990; Tan *et al.*, 1991). 만입구와 만내의 수로에서 채취한 부유입자유기물의 δ<sup>13</sup>C 값은 동대만의 -17.8(±1.4)‰에서 광양만의 -20.6(±0.8)‰ 사이의 값을 보여 말갈피 엽체와 부착조류 그리고 저서조류 등 저서생산자들이 가지는 값에 비하여 낮은 값을 나타내었지만, 외양으로부터 유입되는 입자유기물의 δ<sup>13</sup>C에 비하여 다소 높은 값이었다. 이와 같은 만내 부유입자유기물의 δ<sup>13</sup>C 값 분포는 다양한 기원의 유기물의 혼합체로 구성되었다는 것을 시사해 준다.

연구해역에서 기존에 측정된 해조류(macroalgae)의 δ<sup>13</sup>C 값은 평균 -16.0(±1.8)‰로 보고되어 부유입자유기물에 비하여 여전히 높은 δ<sup>13</sup>C 값을 가진다는 것을 알 수 있다(Kang *et al.*, 2007). 결국 본 연구와 기존의 저서조류 δ<sup>13</sup>C 분석에서 얻어진 결과들은 연

구해역에서의 표영생산자와 저서생산자 사이에 δ<sup>13</sup>C 값의 평균 약 5% 이상에서 약 13%에 이르는 뚜렷한 차이를 잘 나타내어 준다. 본 연구에서 나타난 표영과 저서생산자 사이의 δ<sup>13</sup>C 값 차이는 세계의 다른 연안 해역에서도 잘 관찰되어 왔는데, France(2005a)은 이와 같은 차이가 빛, 온도, 광합성 기구, 기초생산율 그리고 종조성 등 다양한 요인에 의해 설명될 수 있지만, 물의 점성(viscosity)에 기인한 수생식물 주변의 경계면 형성과 이에 따른 CO<sub>2</sub> 혹은 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 확산율의 제한이 결정적인 요인이라는 것을 제시하였다. 그는 또한 이전에 발표된 광대한 자료들을 바탕으로 해양의 연안역에서 저서조류가 식물플랑크톤에 비하여 약 5% 높은 δ<sup>13</sup>C 값을 가진다는 것을 정리하여 본 연구 결과와 잘 일치한다는 것을 보였다. 한편 섭진강을 통하여 연구해역으로 유입되는 육상기원 유기물(terrestrial POM)은 -26.0(±0.8)‰ 그리고 해안 습지를 형성하는 갈대(*P. australis*)는 -27.8(±0.5)‰의 평균 δ<sup>13</sup>C 값을 가져 해양의 생산자들에 비하여 대단히 낮은 δ<sup>13</sup>C 값을 가지는 것으로 보고되어 왔다(Kang *et al.*, 2001, 2003).

조사가 수행된 3개 내만 해역의 전체 어류군집에 대해서 측정된 δ<sup>13</sup>C 값의 범위는 양강만(범위: -15.5 ~ -11.4‰, 평균: -13.4‰, n=19), 동대만(범위: -15.2 ~ -11.5‰, 평균: -12.8‰, n=9) 그리고 광양만(범위: -16.2 ~ -8.3‰, 평균: -12.7‰, n=29) 사이에 뚜렷한 차이가 나타나지 않았다(One-way ANOVA, F<sub>2,54</sub>=1.683, p=0.196)(Table 2; Fig. 2). 이와 같이 좁은 범위와 만간의 유사한 δ<sup>13</sup>C 값 분포는 조사가 수행된 3개 내만역에서 서식하는 어류 군집들은 유사한 기원의 유기물을 이용한다는 것을 잘 시사해 준다. 반면 만내 잘피장(범위: -16.2 ~ -8.3‰, 평균: -12.4‰, n=28)과 만입구(혹은 수로) 조하대 정점(범위: -15.5 ~ -10.4‰, 평균: -13.5‰, n=29)들에서 채집된 어류들의 δ<sup>13</sup>C 값 사이에는 유의한 차이(t<sub>55</sub>=2.920, p=0.005)를 나타내어 잘피 서식지에서 채집된 어류들이 만입구나 인근 수로 조하대에서 채집된 어류들에 비하여 높은 값을 가지는 것으로 나타났다. 그러나 잘피장에서 채집된 어류군집들의 상대적으로 높은 δ<sup>13</sup>C 값은 만 입구나 인근 수로 조하대의 어류군집에 비하여 잘피 엽체나 부착조류 기원 유기물의 기여가 잘피장 내에서 더욱 높다는 것을 나타내는 듯하지만, 1.1%에 불과한 두 서식처간 적은 평균 차이는 두 서식처 모두에서 어류들이 이용하는 먹이기원 유기물에 대한 높은 δ<sup>13</sup>C 값을 가지는 저서생산자의 기여가 높다는 것을 가리킨다.

한편 본 조사가 수행된 연안 내만역에서 채집된 전체 어류군집이 가지는 δ<sup>13</sup>C 값(범위: -16.2 ~ -8.3‰, 평균: -12.9‰, n=57)은 남해 외양의 배타적경제수역(EEZ)에서 채집한 어류군집에서 측정된 δ<sup>13</sup>C 값의 범위(범위: -19.3 ~ -15.7‰, 평균: -17.3‰, n=26; 강 등, 미발표 자료)와는 거의 중첩되지 않고 연안역 어류들에서 외양의 어류들에 비하여 상대적으로 높은 δ<sup>13</sup>C 값(평균차 4.4‰)을 가지는 것으로 나타났다(Fig. 2). 또한 본 보에서 자료를 제시하지는 않았지만 하천 식생이나 육상기원 쇄설물에 유래한 유기물을 이용하는 어류들(낙동강 중하류에 위치한 물금 취수장 주변에서 채집된 어류 군집 δ<sup>13</sup>C 범위: -27.5 ~ -20.5‰, 평균: -23.2‰, n=19, 강 등, 미발표 자료)에 비하여 연안역에서 채집된 어류 군집에서 더욱 높은 δ<sup>13</sup>C 값(평균차 10.3‰)을 보였다. 본 조사에서 나타난 수서환경 별 어류들이 가지는 δ<sup>13</sup>C 값은 Table 1에서 가리키는 바와 같이 그들이 서식하는 환경에서 우점하는 식물군의 δ<sup>13</sup>C

**Table 1.** Mean δ<sup>13</sup>C values (±1 SD) of potential organic matter sources in the southern coastal embayment systems in Korea

	δ <sup>13</sup> C (‰)	n
Terrestrial POM	-26.0 (0.8)	6
<i>Phragmites australis</i>	-27.8 (0.5)	4
Marine POM	-21.1 (1.1)	10
Macroalgae	-16.0 (1.8)	36
Benthic microalgae	-14.5 (1.6)	8
Epiphytes of <i>Zostera marina</i>	-12.4 (0.6)	8
<i>Zostera marina</i>	-8.3 (1.9)	6

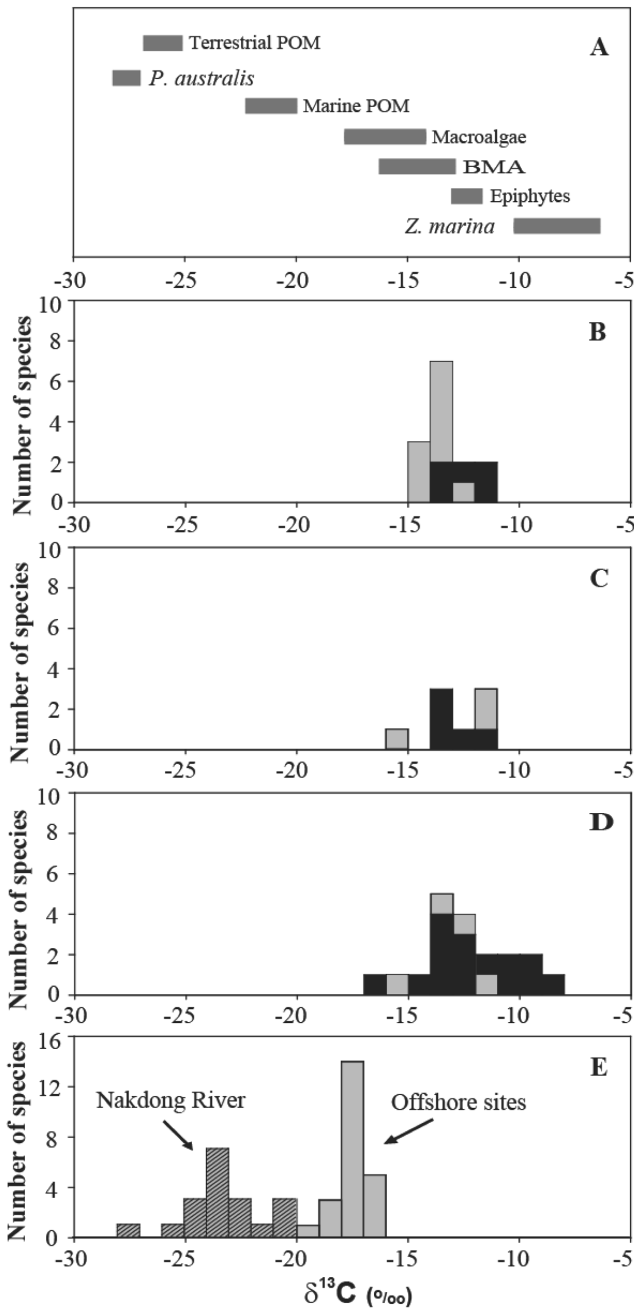
**Table 2.** Mean  $\delta^{13}\text{C}$  values ( $\pm 1$  SD) of fishes collected at the *Z. marina* bed and the mouth of the bay (or the bay channel) of Aenggang, Dongdae and Gwangyang Bay, respectively

	Aenggang Bay		Dongdae Bay		Gwangyang Bay	
	<i>Z. marina</i> bed	Mouth of the bay	<i>Z. marina</i> bed	Mouth of the bay	<i>Z. marina</i> bed	Bay channel
<i>Acanthogobius flavimanus</i>			-13.3			
<i>Agrammus agrammus</i>					-8.3	
<i>Amblychaeturichthys hexanema</i>		-14.0				
<i>Apogon lineatus</i>		-14.6				
<i>Argyrosomus argentatus</i>		-13.6 (0.3)				
<i>Chaeturichthys hexanema</i>					-12.6	-12.4
<i>Conger myriaster</i>		-13.1	-11.8		-10.4	-12.9
Cynoglossidae unid.		-13.4				
<i>Cynoglossus abbreviatus</i>					-13.9	-13.3
<i>Ditrema temmincki</i>	-12.3			-11.5	-9.9	
<i>Hexagrammos otakii</i>	-12.4				-10.5	-12.7
<i>Hypodytes rubripinnis</i>		-13.2				
<i>Johnius grypotus</i>					-13.5	-13.1 (0.1)
<i>Lateolabrax</i> sp.			-12.7			
<i>Leiognathus nuchalis</i>		-13.1	-13.4 (0.1)		-13.0	-12.8
<i>Liparis tanakai</i>					-13.5	-13.6
<i>Mugilcephalus</i>					-9.7	
<i>Pampus argenteus</i>		-14.9 (0.1)				
<i>Pholis nebulosa</i>	-11.4 (0.1)	-14.8 (1.0)	-13.5	-11.8 (0.2)	-12.4	-13.4
<i>Platycephalus indicus</i>		-13.9				
<i>Pleuronectes yokohamae</i>		-12.6				
<i>Pleuronichthys</i> sp.						-15.2
<i>Pseudaesopia japonica</i>						-11.9
<i>Pseudoblennius cottoides</i>	-13.3			-11.8	-11.1 (0.2)	
<i>Sebastes inermis</i>				-15.2	-14.6 (0.6)	
<i>Sebastes schlegeli</i>						-15.2
<i>Sillago sihama</i>					-12.6	
<i>Syngnathus schlegeli</i>	-13.9				-13.3	
<i>Takifugu niphobles</i>	-11.8				-11.8	
<i>Thryssa kammalensis</i>		-14.5				
<i>Zoarces gilli</i>					-16.2	-13.6

값을 잘 반영하는 듯하였다. 즉 하천생태계에서 어류군집이 가지는 아주 낮은  $\delta^{13}\text{C}$  값 분포는 유사하게 낮은  $\delta^{13}\text{C}$  값을 보이는 하천식생이나 육상기원 유기체설물을 영양기저로 하는 반면 외양의 어류군집은 표영 식물플랑크톤 생산에 의존하며, 이와는 대조적으로 상대적으로 높은  $\delta^{13}\text{C}$  값을 가지는 연안역의 어류들은 그들의 영양기저로써 그들과 유사하게 높은  $\delta^{13}\text{C}$  값을 보이는 연안의 저서생산자를 영양기저로 하고 있다는 것을 잘 나타내어 준다.

실제 표영생산자와 저서생산자에 각각 영양기저를 두고 있는 표영먹이망과 저서먹이망을 구성하는 동물(특히 어류종)들 사이에  $\delta^{13}\text{C}$  값의 차이가 잘 입증되어 왔다(Deegan and Garritt, 1997; Jennings *et al.*, 1997; Davenport and Bax, 2002; Loc'h and Hily, 2005). 특히 본 조사에서 나타난 바와 유사하게 최근의 많은 연안생태계 먹이망에 대한 안정동위원소 연구 결과들은 연안의 높은  $\delta^{13}\text{C}$  값을 가지는 동물들의 기초 영양원으로써 저서조류나 부착조류와 같은 저서생산자의 중요성을 잘 나타내어 준다(Currin *et al.*, 1995; Deegan and Garritt, 1997; Riera *et al.*, 1999). 이들의 연구

에서는 실제로 하구의 염습지 식물이나 하천을 통하여 유입되는 육상기원 유기물의 영양기능은 국지적으로 하구 상류부에서 극히 제한된 형태로 나타난다는 것을 보인다. 본 조사가 수행된 연안 내만역에서도 낮은  $\delta^{13}\text{C}$  값을 보이는 갈대와 같은 습지생산자나 육상기원 유기물의 기여는 하천에 서식하는 어류에 대해서는 그 중요성이 높은 반면 연안역의 어류 먹이망에 대해서는 거의 나타나지 않았다. 또한 식물플랑크톤 생산과 그에 연관된 생물군에 의한 유기물에 거의 의존할 것으로 기대되는 외양역 어류에 비하여 본 조사해역에서 채집된 어류들이 가지는 높은  $\delta^{13}\text{C}$  값은 연안역 어류 생산에 저서생산자의 영양학적 중요성을 잘 나타내어 준다. 한반도 연안생태계 먹이망의 영양기저로써 암반생태계의 해조류나 갯벌생태계의 저서미세조류 생산의 중요성은 동해 연안과 광양만, 여자만, 득량만 그리고 낙동강 하구의 저서동물이나 어류에 대한 조사에서 이미 보고된 바 있다(Kang *et al.*, 2001, 2003, 2007, 2008; Choy *et al.*, 2008). 따라서 본조사 결과와 함께 이전의 연구 결과들로부터 연안생태계 먹이망의 탄소원으로써 대형 해조류,



**Fig. 2.** Plots of  $\delta^{13}\text{C}$  values of organic matter sources in the study areas (A), and frequency distributions of  $\delta^{13}\text{C}$  for fish (Black bar segment: *Z. marina* bed) in Aenggang Bay (B), Dongdae Bay (C), Gwangyang Bay (D), and Nakdong River and offshore sites of the southern sea of Korea (E, Kang *et al.*, unpubl. data). BMA represents benthic microalgae and *P. australis* indicates marsh plant *Phragmites australis*.

잘피 업체와 부착조류 그리고 저서미세조류와 같은 다양한 저서 생산자에 의한 자생기원 유기물의 중요성과 함께 연안생태계 먹이망의 탄소흐름은 외양의 표영생태계를 작동하는 플랑크톤기저 탄소 흐름(planktonic carbon flow)과는 구별될 수 있음을 시사해 준다.

본 조사결과로부터 다양한 생태계 내에서의 탄소 흐름을 이해

하는데 유용한 도구로 이용되고 있는 안정동위원소 분석 기법은 한반도의 다양한 수서환경에서 어류 먹이망의 영양기지를 해석하는데 널리 이용할 수 있을 것으로 기대된다. 실제로 본 조사에서 나타난 결과는 특히 매립, 수로준설 그리고 교량건설 등 높은 개발압력으로 훼손되어가는 연안역에서 지속적인 어류생산을 유지하기 위해 기존에 잘 알려져 있는 어류의 피난처로써 뿐만 아니라 영양(탄소) 공급처로써 다양한 연안생태계의 보전 필요성을 추론해 볼 수 있다. 나아가 어류의 성장에 따른 먹이 전환이나 외양-연안-하천을 회유(migration)하는 어류의 회유연구 그리고 특정 어류종의 생태계 내에서의 기능(영양단계) 평가를 위한 연구 등에 응용 범위를 확대하여 어류생태에 대한 이해 폭을 더욱 넓힐 수 있을 것이다.

## 사 사

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었습니다.

## 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.

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.

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). *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, **78**: 215-226.

Corts, E., 1997. A critical review of methods of studying fish feeding based on analysis of stomach contents: application to elasmobranch fishes. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, **54**: 726-738.

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.

Davenport, S.R. and N.J. Bax, 2002. A trophic study of a marine ecosystem off southeastern Australia using stable isotopes of carbon and nitrogen. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, **59**: 514-530.

Day, J.H., S.J.M. Blaber and J.H. Wallace, 1981. Estuarine fishes. In: Day, J.H.(Ed.), *Estuarine ecology with particular reference to southern Africa*. Balkena, Cape Town, pp. 197-221.

Deegan, L.A. and R.H. Garritt, 1997. Evidence for spatial variability in estuarine food webs. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **147**: 31-47.

DeNiro, N.J. and S. Epstein, 1978. Influence of diet on the distribution of carbon isotopes in animals. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **42**: 495-506.

Finlay, J.C., 2001. Stable-carbon-isotope ratios of river biota: implications for energy flow in lotic food webs. *Ecology*, **82**: 1052-1064.

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., 1995a. Carbon-13 enrichment in benthic compared to planktonic algae: food web implications. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **124**: 307–312.
- France, R.L., 1995b. Differentiation between littoral and pelagic food webs in lakes using stable carbon isotopes. *Limnol. Oceanogr.*, **40**: 1310–1313.
- 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 a north Pacific Bay. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, **30**: 239–260.
- 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.
- Hyslop, E.J., 1980. Stomach contents analysis - a review of methods and their application. *J. Fish Biol.*, **17**: 400–429.
- Jennings, S., O. Renones, B. Morales-Nin, N.V.C. Polunin., J. Moranta and J. Coll, 1997. Spatial variation in the  $^{15}\text{N}$  and  $^{13}\text{C}$  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.
- Jung, M.H., 2003. Ecological and taxonomical characteristics of epiphytic diatom on seagrasses in Korea. Ph D. Thesis, Hanyang Univ.
- 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.
- 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, D., S. Cho, H. La, J.M. Kim, J. Na and J.G. Myoung, 2006. Estimating spatial and vertical distribution of seagrass habitats using hydroacoustic system. *Ocean & Polar Res.*, **28**: 225–236.
- Kang, C.K., E.J. Choy, H.S. Song, H.J. Park, I.S. Soe, Q. J and K.S. Lee, 2007. Isotopic determination of food sources of benthic invertebrates in two different macroalgal habitats in the Korean coasts. *J. Korean Soc. Oceanogr.*, **12**: 380–389.
- 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 Lorean peninsula determined by C and N stable isotope analyses. *Mar. Biol.*, **153**: 1181–1198.
- Kharlamenko, V.I., S.I. Kiyashko, A.B. Imbs and D.I. Vyshkvartzev, 2001. Identification of food sources of invertebrates from the seagrass *Zostera marina* community using carbon and sulfur isotope ratio and fatty acid analyses. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **220**: 103–117.
- Kim, I.S., Y. Choi, C.L. Lee, Y.J. Lee, B.J. Kim and J.H. Kim, 2005. Illustrated book of Korean fishes. Kyohak Publishing.
- Kim, Y.S., K.H. Han, C.B. Kang and J.B. Kim, 2004. Commercial fishes of the coastal & offshore waters in Korea. National Fisheries Research & Development Institute.
- 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, S.Y., S.M. Lee and C.I. Choi, 2005. Phenology and reproductive effort of two *Zostera marina* L. populations on the southern coast of Korea. *Ocean & Polar Res.*, **28**: 67–74.
- Loc'h, F.L. and C. Hily, 2005. Stable carbon and nitrogen isotope analysis of *Nephrops norvegicus* / *Merluccius merluccius* fishing grounds in the Bay of Biscay (Northeast Atlantic). *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, **62**: 123–132.
- McConnaughey, T and C.P. McRoy, 1979.  $^{13}\text{C}$  label identifies eelgrass (*Zostera marina*) carbon in an Alaskca estuarine food web. *Mar. Biol.*, **53**: 263–269.
- McLusky, D.S., 1989. The Estuarine ecosystem, 2nd ed. Chapman and Hall, New York, 215pp.
- McLusky, D.S. and M. Elliott, 2004. The estuarine ecosystem. Ecology, threats and management, third ed. Oxford University Press, 214 pp.
- 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.
- 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. Syst.*, **18**: 293–320.
- Post, D.M., 2002. Using stable isotopes to estimate trophic position: models, methods, and assumptions. *Ecology*, **83**: 703–718.
- Riera, P., L.J. Stal, J. Nieuwenhuize, P. Richard, G. Blanchard and F. Gentil, 1999. Determination of food sources for benthic invertebrates in a salt marsh (Aiguillon Bay, France) by carbon and nitrogen stable isotopes: importance of locally produced sources. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **187**: 301–307.
- Tan, F.C., D.L. Cai and J.M. Edmond, 1991. Carbon isotope geochemistry of the Changjing Estuary. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, **32**: 395–403.
- Vander Zanden, M.J. and J.B. Rasmussen, 1999. Primary consumer  $\delta^{15}\text{N}$  and  $\delta^{13}\text{C}$  and the trophic position of aquatic consumers. *Ecology*, **80**: 1395–1404.

2009년 2월 10일 원고접수

2009년 2월 17일 수정본 채택

담당편집위원: 강동진