

## 안정동위원소를 이용한 서해연안 실뱀장어의 먹이 습성

김정배\* · 이원찬 · 김대중 · 성기백 · 최희구 · 최우정 · 황학빈 · 홍석진 · 김형철  
박성은 · 심정희 · 강창근<sup>1</sup>  
국립수산과학원  
<sup>1</sup>포항공과대학교 해양대학원

## Food Habits of the Glass eel *Anguilla japonica* in the West Coast Estuaries of Korean Peninsula Determined by Using C and N Stable Isotopes

JEONG BAE KIM\*, WON-CHAN LEE, DAE-JUNG KIM, KI BAIK SEONG, HEE-GU CHOI,  
WOO-JEUNG CHOI, HAK BIN HWANG, SOKJIN HONG, HYUNG CHUL KIM, SUNG-EUN PARK,  
JEONG HEE SHIM AND CHANG-KEUN KANG<sup>1</sup>

National Fisheries Research and Development Institute, Busan, 619-705, Korea

<sup>1</sup>Ocean Science & Technology Institute, Pohang University of Sciences and Technology, Pohang 790-784, Korea

실뱀장어는 산란장인 마리아나해구에서 산란 및 부화과정을 거쳐, 뱀장어 자어인 랩토세팔루스 단계에서 복적도 해류와 쿠로시오 해류를 따라 회유하면서 변태과정을 거치게 된다. 변태된 실뱀장어는 동중국해를 지나 우리나라 연안으로 올라오는데 실뱀장어의 먹이원에 대해서는 알려진 바가 없었다. 실뱀장어 먹이원은 안정동위원소 비값을 측정하여 수서 생태계에 존재하는 먹이망에 의한 단계별 증가율을 해석함으로써 가능하다. 2012년 4월에 채집된 자연산 실뱀장어의 탄소 및 질소 안정동위원소를 측정하여 먹이원을 밝히기 위하여 실뱀장어  $\delta^{13}\text{C}$ 과  $\delta^{15}\text{N}$ 를 분석하고 서해안 및 동중국해 북부해역의 가용 가능한 입자유기물질에 대한 값들을 분석, 비교하였다. 우리나라 서해안에서 채집된 실뱀장어의  $\delta^{13}\text{C}$ 값은  $-20.7 \pm 0.1\text{‰}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$ 값은  $5.0 \pm 0.2\text{‰}$ 로 나타났다. 실뱀장어의 가용 먹이원으로 추정되는 입자유기물질 중 서해안의  $\delta^{13}\text{C}$ 값은  $-24.0 \pm 0.3\text{‰}$ 이고,  $\delta^{15}\text{N}$ 값은  $2.8 \pm 0.4\text{‰}$ 이었고, 동중국해 북부해역의  $\delta^{13}\text{C}$ 값은  $-24.5 \pm 0.5\text{‰}$ 이고,  $\delta^{15}\text{N}$ 값은  $0.8 \pm 0.3\text{‰}$ 이었다. 일반적으로 알려진 영양단계에 따른 동위원소 분별 비값 증가율을 고려할 때, 본 연구에서 나타난 서해안과 동중국해의 POM과 서해안에서 채집된 실뱀장어의  $\delta^{13}\text{C}$ 과  $\delta^{15}\text{N}$ 값의 차이는 서해안과 동중국해의 입자유기물질이 자연산 실뱀장어의 먹이원으로써 이용되지 않았다는 것을 알 수 있었다. 따라서, 우리나라 연안에서 채집되는 실뱀장어는 뱀장어 자어인 랩토세팔루스에서 변태과정을 거친 이후에는 먹이를 섭이하지 않고 회유하는 것으로 나타났다.

Glass eels (*Anguilla japonica*) are caught in the west coast of Korea on their migratory route from the breeding grounds in the Mariana Trench along the North Equatorial Current and the Kuroshio Current. To identify the food source of natural glass eels, we analyzed the stable C and N isotopes of glass eels caught in April 2012 and investigated possible food sources in the survey area. In particular, with respect to the stable C and N isotopes of particulate organic matter, we extended the surveying area to the northern parts of East China Sea as well as the west coast of Korea. The stable C and N isotope ratios of the glass eels caught in the west coast were found to be  $-20.7 \pm 0.1\text{‰}$  and  $5.0 \pm 0.2\text{‰}$ , respectively. The stable C and N isotope ratios of the particulate organic matter in the west coast of Korea, in which the glass eels are assumed to eat the particulate organic matter as food source, were estimated to be  $-24.0 \pm 0.3\text{‰}$  and  $2.8 \pm 0.4\text{‰}$ , respectively. Similar data were obtained from the northern part of the East China Sea,  $-24.5 \pm 0.5\text{‰}$  and  $0.8 \pm 0.3\text{‰}$ . The stable isotope ratios showed values differing from the stepwise increasing rates up the food web in natural aquatic ecosystem, showing that particulate organic matter in the west coast of Korea and East China Sea was not served as the glass eels food source. This result sug-

gested that the glass eels caught in the west coast might not assimilate nutrition from the marine environment during long migration.

**Key words:** Glass eel, *Anguilla japonica*, Food web, Stable isotopes, Trophic level

## 서 론

태평양 마리아나 열도의 Suruga 해산 부근은 극동산 뱀장어 (*Anguilla japonica*)의 산란장으로 알려졌다(Tsakamoto, 2006). 이 산란장으로부터 뱀장어는 북적도 해류와 쿠로시오 해류를 따라 이동하면서 뱀장어 자어인 뱃뺨뱀장어(leptocephalus)에서 실뱀장어(glass eel)로 변태하여 동북아시아의 대만, 중국, 일본, 한국으로 이동한다. 뱀장어는 동북아시아의 중요한 수산자원이지만 대부분 양식에 의존하여 생산하고 있고, 양식에 필요한 종묘는 전적으로 하구역에서 자연산 실뱀장어를 채집하여 이용하고 있다. 하지만 최근에는 전 세계적으로 실뱀장어 자원의 감소로 뱀장어 양식을 위한 종묘의 확보에 어려움을 겪고 있고 국내에서도 실뱀장어 채집량 감소로 뱀장어 자어 가격의 급등과 함께 수급 불안정으로 이어지고 있다. 실뱀장어의 자원량 급감과 CITES(국제 야생동식물 멸종 위기종 거래에 관한 조약)에 의한 타 종 수입제한 등으로 뱀장어 양식산업은 앞으로 더 큰 어려움에 직면할 것으로 예상된다. 이와 같은 문제를 극복하기 위하여 일본, 중국, 대만, 한국 및 유럽 연합국에서는 산란장 및 인공종묘생산을 위한 성 성숙유도, 부화 자어 생산 등의 연구를 활성화하고 있으며, 나아가 일본은 난의 수정에서부터 성어까지 전 과정을 인공적으로 조절하는 완전양식에 많은 투자와 연구를 수행하고 있다(Tanaka *et al.*, 2003; Okamura *et al.*, 2007; Abe *et al.*, 2010; NFRDI, 2012a). 우리나라에서 뱀장어 인공종묘 생산을 위한 연구는 난의 수정, 부화한 자어의 먹이원인 액상 사료에 의한 성장, 성장한 뱀장어 자어(leptocephalus)에서 실뱀장어로의 변태 기술을 확보한 상태이나, 실뱀장어로의 변태를 위한 뱀장어 자어 시기가 200일 이상의 오랜 시간이 소요되고 인공 실뱀장어의 대량 생산기술도 완전하게 확립하지 못한 상태에 놓여있다(NFRDI, 2012a). 뱃뺨뱀장어 형태의 자어 시기를 갖는 어류는 자어기에 날카로운 이빨이 있음에도 불구하고, 먹이 활동과 이들의 먹이원은 잘 알려져 있지 않았다(Mochioka, 2003). 최근의 연구 결과들에 의하면 안정동위원소 분석에 의한 입자유기물질(POM) 및 동물플랑크톤의 배설물(peccal pellet), 장 내부에서 확인된 무척추동물의 한천질 껍데기(gelatinous house) 등으로 인하여 뱀장어목 어류의 자어시기 먹이원이 알려지기 시작하였다(Otkake *et al.*, 1993, Mochioka and Iwamizu, 1996, Miller *et al.*, 2011). 최근에는 뱀장어 자어의 먹이원인 POM은 해양의 기초생산과 연계되어있고, 뱀장어 자어는 POM 순환과 해양의 전지구적 탄소 수송에서 잘 알려지지 않았던 역할을 하는 것으로 보고되고 있다(Miller *et al.*, 2012). 실뱀장어의 위 내용물을 분석하여 먹이원을 확인하고 영양성분을 분석할 수도 있지만 연안으로 새롭게 가입하는 북미산 실뱀장어(*Anguilla Anguilla*)의 내장에서는 먹이 활동의 흔적을 찾아보기는 매우 힘들며 15%정도만 육역의 성질을 지니고 있었다(Bardonnet and Riera, 2005). 또한, 실뱀장어가 회유하는 성질이 먹이습성과 관계가 있는데 굶주리거나 먹이를 먹는 것처럼 보이기도 한다(Bureau du Colombier *et al.*, 2008).

안정동위원소는 자연에 존재하는 물질의 동위원소 분포와 존재량을 분석하고 이를 이용하여 자연계에서 일어나는 여러 가지 생물학적 현상을 해석하는 도구로 이용되는데, 안정동위원소비를 이용하여 물질의 기원을 규명하고, 동위원소의 분별을 이용하여 물질의 생성환경을 해석하는데 유용하다(Fry, 2008). 안정동위원소를 이용한 뱀장어의 연구현황을 보면 하구에서의 유럽산 실뱀장어의 먹이습이(Bardonnet and Riera, 2005), 뱀장어의 산란회유에 따른 성어의 먹이습이(Chow *et al.*, 2010), 뱀장어 자어 및 먹이 분석(Miller *et al.*, 2012; Miyazaki *et al.*, 2011) 등으로 주로 먹이원 연구에 이용되었다. 탄소와 질소는 생물체의 필수 구성원소로 각각의 안정동위원소 자연 존재비를 이용하여 생태계의 구조와 기능을 연구하는데 유용한 원소이다. 따라서 실뱀장어의 안정동위원소인 탄소와 질소의 비를 측정하고, 가용 가능한 먹이원과 비교를 통하여 실제 먹이원을 추정할 수 있다. 본 연구는 실뱀장어의 탄소 및 질소 안정동위원소를 분석하여 우리나라 연근해에서 채집한 실뱀장어의 먹이원을 분석하고, 난에서 부화한 뱀장어 자어와 변태 후 실뱀장어의 먹이원을 밝히는 것을 목적으로 수행되었다.

## 재료 및 방법

### 실뱀장어의 채집

금강 하구는 양면업이 활성화 되어 있어 안정적으로 선박을 이용하여 실뱀장어를 채집하고 있고, 영산강 하구 및 한강 하구에서는 관행적으로 실뱀장어를 채집하거나, 선박 및 바지선을 이용하여 일시적으로 실뱀장어를 채집하고 있어 해역적으로 실뱀장어 채집 방법의 차이를 보였다. 실뱀장어는 11월부터 이듬해 6월까지 남해안의 낙동강 하구에서 서해안의 한강 하구에 걸쳐 채집되고 있는데 본 연구에서는 2012년 4월에 채집한 실뱀장어를 이용하였다. 실뱀장어의 채집은 선박 또는 동력원이 설치되어 있는 바지선들을 하구역 주변에 닻을 놓아 고정시킨 후, 이들 선박 또는 바지선 후미의 좌현 및 우현에 각각 10 m 내외의 그물을 대나무 등으로 고정하여 접어두었다가 밀물 때 표층에서 저층 아래로 그물을 펼쳐 입구를 개방하면 연안으로 들어오는 실뱀장어들은 개방된 그물로 들어가게 되며, 최종적으로는 여러 갈래로 갈라져 있는 자루 그물에서 채집되게 된다. 채집된 실뱀장어는 해역적으로 금강, 영산강 및 한강 하구에서 채집된 개체로 구분하였고, 화학분석용은 시료가 건조되는 것을 방지하기 위하여 지퍼백에 현장해수와 실뱀장어를 넣고 드라이 아이스로 채워진 쿨러에서 얼려 실험실로 운반하였다. 양식을 위한 실뱀장어는 현장해수에 공기를 공급하면서 진해내수면연구소로 운반하였고, 운반된 실뱀장어의 사육조건은 0.4 m<sup>3</sup>의 원형 PVC 수조(초기온도: 17.5 °C)에서 순치를 위하여 먹이를 공급하지 않은 채 5일 동안 수온을 2 °C씩 올려 27 °C로 상승시킨 이후 1일 2회(09:00시, 17:00) 2개월 간 어체중의 8-10%를 먹이로 급여 하였다. 채집된 실뱀장어와 진해내수면연구소에서 사육한 양식산 뱀장어(2개월 성장한 어린 뱀장어)는 전장(total

length), 습중량(wet weight) 및 건중량(dry weight)을 각각 0.1 mm, 0.1 mg까지 측정하였고, 화학분석은 뱀장어의 근육부분을 사용하여 수행하였다.

### 실뱀장어 및 먹이원 분석

실뱀장어의 먹이원으로 추정되는 입자유기물질(POM) 및 식물플랑크톤은 금강 및 영산강 하구에서 2012년 4월에 채집하였고, 엽상 자어, 실뱀장어 및 뱀장어 성어의 이동 경유지로 판단되는 동중국해 북부해역의 국립수산과학원 해양조사 정선 315 및 317 선에서 2012년 8월에 입자유기물질을 채집하였다(Fig. 1). 현장의 수온, 염분, 용존산소(DO), pH는 수질측정기(YSI, 6920)를 이용하여 측정하였으며, 투명도는 직경 30 cm 투명도 판을 이용하여 측정하였다. 입자유기탄소와 입자유기질소는 250-500 mL의 해수를 여과지(직경 25 mm GF/F)에 여과하였고, 60 °C 건조기에서 48시간 동안 건조하였다. 식물플랑크톤은 각 조사 정점에서 20 µm 망목의 식물플랑크톤 네트를 이용하여 연직으로 인망 하였다.

동중국해 북부해역의 입자유기물질의 안정동위원소 분석을 위한 시료는 국립수산과학원 시험연구선 탐구3호(369 G/T)에서 총 3개 정점(127°06'25"E; 32°00'05"N; 127°01'08"E; 31°00'05"N; 125°14'45"E; 31°00'05"N)의 표층 및 50 m 층에서 20 L의 해수를 채수 하였다. 채수한 시료는 선상에서 냉장 보관하여 실험실로 운반한 후 원심분리를 하여 부유물질을 농축하였다. 실뱀장어, 식물플랑크톤, 사료 및 양식산 어린 뱀장어의 탄소 및 질소 함량과 탄소( $\delta^{13}C$ ) 및 질소( $\delta^{15}N$ ) 안정동위원소 분석을 위한 시료는 동결 건조시킨 다음

분쇄기(Ball mill, pulverisette 23, Fritsch, Germany)로 미세하게 분쇄하였다. 분쇄된 시료중 실뱀장어, 사료 및 어린 뱀장어는 클로로포름과 메탄올 1:1용액(v/v)을 이용하여 지방을 제거하였고(Folch et al., 1957), 1N HCl을 첨가하여 증류수로 깨끗이 세척한 후 60 °C 건조기에서 48시간 건조하였다. 시료 중 POM은 여과지를 그대로 사용하였고, 건 시료들은 0.5-1 mg의 시료를 CHN분석기(Flash EA 1112, Thermo Finnigan, Italia)를 이용하여 탄소와 질소를 분석한 후 계산 하였다. 안정동위원소 조성은 CNS 원소분석기와 연결된 안정동위원소 질량분석기(Isotope Ratio-Mass spectrometer, Micromass IsoPrime, UK)를 이용하여 탄소 및 질소 안정동위원소를 분석 하였다. 탄소 안정동위원소의 경우 무기 탄소를 제거하기 위하여 산세척을 하였으나, 질소 안정동위원소의 경우 산 세척이 분석 값에 영향을 미칠 수 있으므로 산세척을 하지 않은 시료(Bunn et al., 1995)를 사용 하였다. 식물플랑크톤 넷트로 시료 채취시 망목 크기 20 µm의 네트에는 식물플랑크톤이 대부분 포함될 수 있지만 그외 유기체질물과 원생동물, 박테리아가 포함될 수 있어 식물플랑크톤 안정동위원소 비라고 가정하여 사용하였다. 시료들이 가지는 안정동위원소 비값은 아래 식으로 계산되었으며, 표준물질에 대한 각 시료의 비값을 천분율로 나타내었다.

$$\delta X(\%) = [R_{\text{sample}}/R_{\text{standard}} - 1] \times 1000,$$

X:  $^{13}C$  또는  $^{15}N$ , R: 시료 및 표준물질의  $^{13}C/^{12}C$ 과  $^{15}N/^{14}N$  비  
표준물질(standard)로는 탄소의 경우는 PDB(Pee Dee Belemnite), 질소의 경우는 대기 중 질소(atmospheric  $N_2$ )의 국제표준 기준을 사용하였다. 실제 분석에서 20개의 EMA-P2 polymer (Elemental Microanalysis, UK)를 이용하여 측정한 탄소와 질소의 안정동위원소를 분석한 결과 표준오차(SE)는 각각  $\pm 0.2\%$ 과  $\pm 0.3\%$ 로 높은 정밀도와 재현성을 나타내었다. 통계적 유의성은 normality와 homogeneity of variance를 검정한 후 one-way ANOVA를 이용하여 평균값 사이의 차이를 검정하였고( $P < 0.05$ ), 두 해역간의 비교는 t-test로 검정하였다. 통계분석은 SPSS 10.1을 이용하였으며, 측정값은 평균(mean)과 표준오차(SE)로 나타내었다.

## 결 과

본 연구에서 실뱀장어가 채집되는 해역인 영산강 하구는 수심이 5.2-21.4 m의 해역이며, 표층 해수에서 수온은  $10.63 \pm 0.32$  °C, 염분은  $26.06 \pm 3.88$ , 용존 산소는  $11.38 \pm 0.85$  mgL<sup>-1</sup> 그리고 pH는  $8.14 \pm 0.02$ 이었고, 저층 해수에서 수온은  $9.34 \pm 0.88$  °C, 염분은  $30.43 \pm 0.18$ , 용존 산소는  $10.07 \pm 0.22$  mgL<sup>-1</sup> 그리고 pH는  $8.05 \pm 0.13$ 을 나타내었다. 금강 하구의 채집해역은 하구둑을 경계로 수심이 3.0-8.0 m 되는 해역에서 조사가 이루어 졌으며, 표층 해수에서 수온은  $12.19 \pm 0.14$  °C, 염분은  $7.16 \pm 2.36$ , 용존 산소는  $11.57 \pm 0.59$  mgL<sup>-1</sup> 그리고 pH는  $8.28 \pm 0.17$ 이었고, 저층 해수에서 수온은  $10.59 \pm 0.30$  °C, 염분은  $15.41 \pm 2.86$ , 용존 산소는  $9.84 \pm 0.20$  mgL<sup>-1</sup> 그리고 pH는  $7.99 \pm 0.10$ 로써 표·저층간 수온 및 염분 값에 유의한 차이를 보였다(t-test,  $p < 0.001$ ). 투명도는 금강하구의 경우 0.8 m로 탁도가 심하였고, 영산강 하구의 경우 평균 1.8(1.3-2.5)m로 뚜렷한 지역간의 차이를 보였다(t-test,  $p < 0.001$ ). 현장조사 결과에서와 마찬가지로 금강 하구의 경우 실뱀장어 채집 위치가 담수의 영향을 많이 미

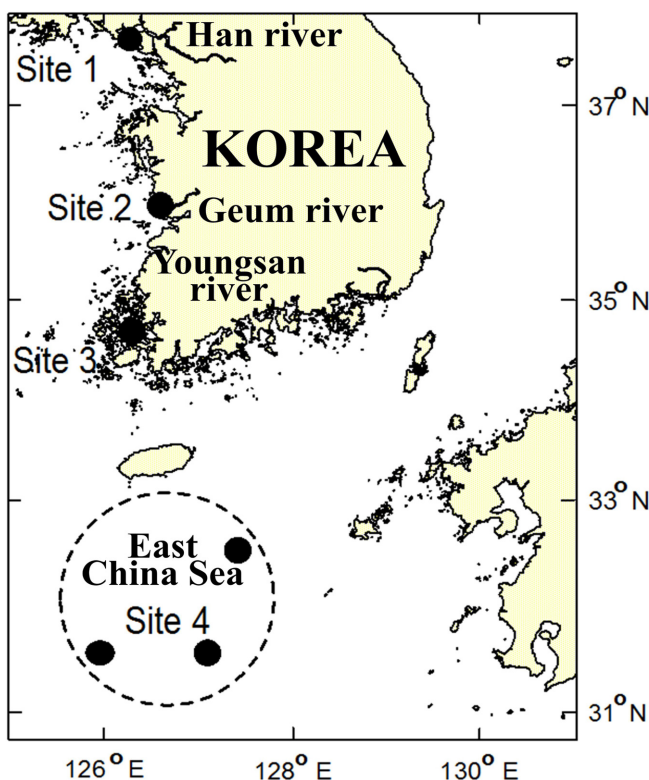


Fig. 1. Map showing the collection sites (1, 2, 3 and 4) of the *Anguilla japonica* specimens in the west coast estuaries of Korean peninsula and the East China Sea.

**Table 1.** Total lengths and weights of the 3 groups of glass eel and elver, *Anguilla japonica* (glass eel : natural; elver : aquaculture)

Sampling site	Sample No.	Glass eel						Elver				
		Total length (mm)		Wet weight (mg)		Dry weight (mg)		Total length(mm)		Wet weight (mg)		
		range	mean±SE	range	mean±SE	range	mean±SE	range	mean±SE	range	mean±SE	
Youngsan River Estuary	30	50.0-60.0	56.1±0.4	80.0-137.3	105.2±2.5	13.4-23.4	18.6±0.6	10	102.5-154.5	127.5±6.1	910.0-4950.0	2411.0±404.6
Geum River Estuary	30	50.2-60.2	56.2±0.4	83.2-122.1	103.4±1.8	11.9-24.4	19.8±0.6	10	97.5-167.5	125.7±6.4	870.0-4990.0	2150.0±378.9
Han River Estuary	30	54.5-61.2	57.6±0.3	86.9-126.0	106.0±1.5	14.8-26.8	21.5±0.5	10	102.0-182.0	131.0±8.0	1100.0-7650.0	3059.0±706.1
Mean			56.6±0.2		104.9±1.1		19.9±0.3			128.0±3.9		2540.0±297.3

치는 하구둑 인근에서 많이 이루어 지나, 영산강의 경우는 하구둑 인근 보다는 연안수의 영향이 미치는 지역에서 실뱀장어 채집이 이루어 지는 것을 알 수 있다. 영산강 하구에서 채집한 실뱀장어의 전장은 평균(±SE) 56.1±0.4 mm (n=30), 금강 하구에서 채집한 실뱀장어 전장은 56.2±0.4 mm (n=30)로 두 해역에서 채집한 실뱀장어의 평균 전장은 유의한 차이가 없었으며(t-test, p=0.822; Table 1), 한강 하구에서 채집한 실뱀장어의 평균 전장은 57.6±0.3 mm (n=30)로 유의하게 컸다(one-way ANOVA, p<0.05). 영산강, 금강 및 한강 하구에서 채집한 실뱀장어의 평균 습중량은 각각 105.2±2.5 mg, 103.4±1.8 mg 및 106.0±1.5 mg (n=30)으로서 해역에 따른 유의한 차이는 나타나지 않았다(one-way ANOVA, p=0.644; Table 1). 영산강 및 금강 하구에서 채집한 실뱀장어의 평균 건중량은 각각 18.6±0.6 mg, 19.8±0.6 mg (n=30)로 두 해역에서 채집한 실뱀장어의 평균 건중량은 유의한 차이가 없었다(t-test, p=0.142). 한강하구에서 채집한 실뱀장어의 평균 건중량은 21.5±0.5 mg으로서 유의한 차이를 보였다(one-way ANOVA, p<0.05; Table 1). 또한, 영산강, 금강 및 한강 하구에서 채집한 실뱀장어의 평균 수율은 각각 82.3±0.3 (78.5-85.2)%, 80.8±0.6 (73.7-87.3)% 및 79.7±0.5 (74.6-85.6)%를 보였다. 진해내수면연구소에서 영산강, 금강 및 한강 하구로 구분하여 사육한 어린 뱀장어의 평균 전장은 각각 127.5±6.1 mm, 125.7±6.4 mm 및 131.0±8.0 mm, 평균 습중량은 각각 2,411.0±404.6 mg, 2,150.0±

378.9 mg 및 3,059.0±706.1 mg로서 유의한 차이가 없었다(one-way ANOVA, 전장 p=0.860; 습중량 p=0.453, Table 1). 실뱀장어에서 어린 뱀장어로 성장한 평균 전장은 2.3배, 중량은 24배로 증가하였다.

실뱀장어의 총유기물질 농도는 영산강, 금강 그리고 한강 하구에서 탄소가 각각 438.1±3.7 mg DW g<sup>-1</sup>, 433.3±2.2mg DW g<sup>-1</sup>, 432.1±2.0 mg DW g<sup>-1</sup>이었으며, 질소가 각각 106.8±0.8 mg DW g<sup>-1</sup>, 106.0±1.4 mg DW g<sup>-1</sup>, 103.7±0.8 mg DW g<sup>-1</sup>를 나타내었다. 실뱀장어를 채집한 영산강 및 금강 하구에서 식물플랑크톤 및 입자유기물질의 탄소 및 질소 농도를 분석한 결과 식물플랑크톤의 농도는 영산강과 금강 하구에서 탄소가 각각 222.3±11.1 mg DW g<sup>-1</sup> 그리고 134.4±11.7 mg DW g<sup>-1</sup>, 질소가 각각 40.9±2.9 mg DW g<sup>-1</sup> 그리고 25.9±2.8 mg DW g<sup>-1</sup>를 보였다. 입자유기물질의 농도는 영산강과 금강하구에서 탄소가 각각 462.5±118.8 μgL<sup>-1</sup> 및 1046.0±72.6 μgL<sup>-1</sup>, 질소가 44.2±8.9 μgL<sup>-1</sup> 165.4±16.5 μgL<sup>-1</sup>를 기록하였다(Table 2).

서해 연안의 영산강, 금강 및 한강 하구에서 채집한 실뱀장어의 안정동위원소 비값을 보면 다음과 같다. δ<sup>13</sup>C값은 영산강, 금강 및 한강 하구에서 각각 -20.9±0.2‰, -20.8±0.2‰ 및 -20.4±0.2‰로 해역간 유의한 차이는 나타나지 않았다(one-way ANOVA, p=0.245; Table 3; Fig. 2). δ<sup>15</sup>N값은 영산강, 금강 및 한강 하구에서 각각 3.4±0.7‰, 3.9±0.4‰ 및 3.9±0.7‰로 해역에 따른 차이는 기록되지 않았다(one-way ANOVA, p=564, Table 3; Fig. 2). 실뱀장어를 채

**Table 2.** Mean values and standard error of C and N content of the samples collected in the west coast estuaries of Korean peninsula (-, no detection)

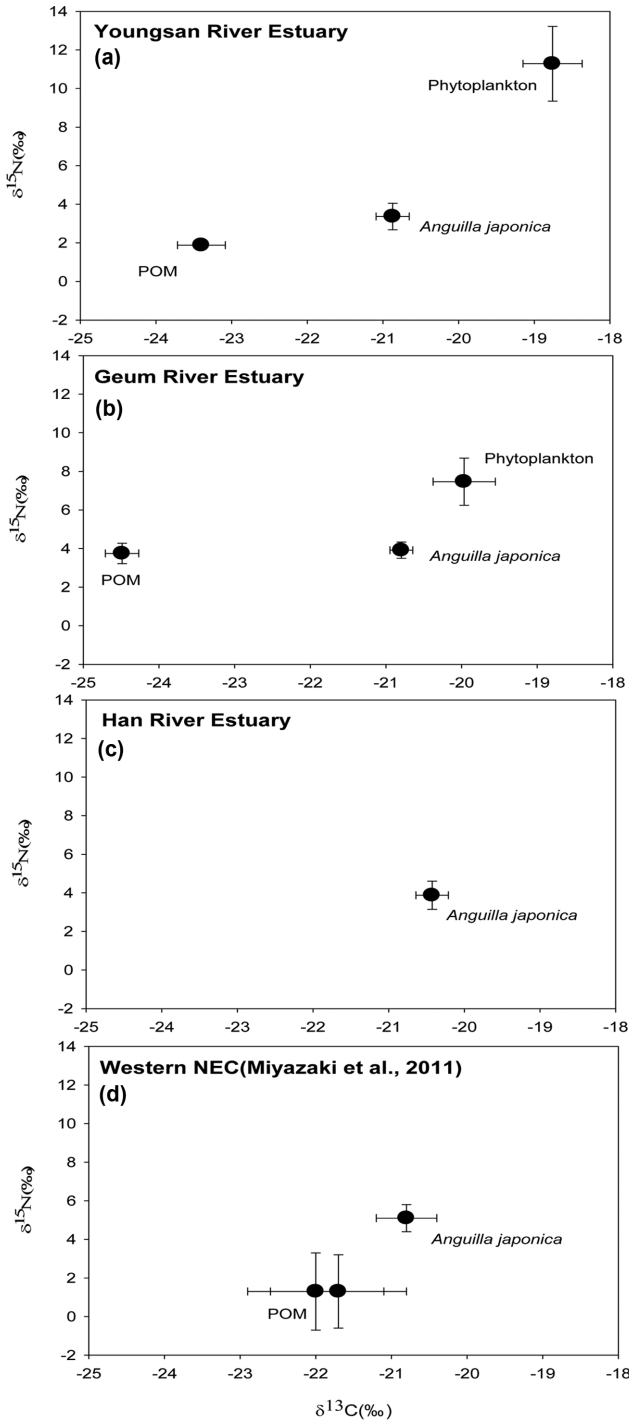
Sampling site	N	Glass eel		POM		Phytoplankton	
		C (mg DW g <sup>-1</sup> )	N (mg DW g <sup>-1</sup> )	C (μg L <sup>-1</sup> )	N (μg L <sup>-1</sup> )	C (mg DW g <sup>-1</sup> )	N (mg DW g <sup>-1</sup> )
Youngsan River Estuary	6	438.1±3.7	106.8±0.8	462.5±118.8	44.2±8.9	222.3±11.1	40.9±2.9
Geum River Estuary)	6	433.3±2.2	106.0±1.4	1046.0±72.6	165.4±16.5	134.4±11.7	25.9±2.8
Han River Estuary	6	432.1±2.0	103.7±0.8	-	-	-	-
Mean		434.5±2.6	105.5±1.0	754.3±95.7	104.8±12.7	178.34±11.37	33.4±2.8

Abbreviations: Glass eel, *Anguilla japonica*; POM, particulate organic matter

**Table 3.** Mean values and standard error of δ<sup>13</sup>C and δ<sup>15</sup>N for the different trophic compartments collected in the west coast estuaries of Korean peninsula (-, no detection)

Sampling site	Sample No.	Glass eel		POM		Phytoplankton		Elver	
		δ <sup>13</sup> C(‰)	δ <sup>15</sup> N(‰)	δ <sup>13</sup> C(‰)	δ <sup>15</sup> N(‰)	δ <sup>13</sup> C(‰)	δ <sup>15</sup> N(‰)	δ <sup>13</sup> C(‰)	δ <sup>15</sup> N(‰)
Youngsan River Estuary	6	-20.9±0.2	4.6±0.3	-23.4±0.3	1.9±0.2	-18.8±0.4	11.3±1.9	-19.4±0.3	12.8±0.9
Geum River Estuary	6	-20.8±0.2	5.1±0.2	-24.5±0.2	3.7±0.5	-20.0±0.4	7.5±1.2	-19.3±0.6	13.1±0.1
Han River Estuary	6	-20.4±0.2	5.0±0.4	-	-	-	-	-19.4±0.4	13.1±0.1
East China sea	4*	-	-	-24.0±0.4	1.0±0.4	-	-	-	-
	5**	-	-	-25.0±0.5	0.5±0.1	-	-	-	-
Mean		-20.7±0.1	5.0±0.2	-24.2±0.4	1.8±0.3	-19.4±0.3	9.8±1.5	-19.4±0.2	13.0±0.2

Abbreviations: Glass eel, *Anguilla japonica*; Elver, *Anguilla japonica*; POM, particulate organic matter, \*: surface, \*\*: 50 m



**Fig. 2.** Dual plots of  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{15}\text{N}$  of *Anguilla japonica* (a, b, c: glass eel; d: leptocephalus) and their potential food sources in the west coast estuaries of Korean peninsula and the western North Equatorial Current(NEC) (d); Data are derived from Miyazaki *et al.* (2011). Abbreviations: POM, particulate organic matter.

집한 영산강 및 금강 하구에서 엽상 자어 및 실뱀장어의 먹이원으로 추정되는 식물플랑크톤 및 입자유기물질을 채집하여  $\delta^{13}\text{C}$ 과  $\delta^{15}\text{N}$ 값을 측정된 결과, 식물플랑크톤의 안정동위원소 비 값은 영산강 하구에서  $\delta^{13}\text{C}$ 값은  $-18.8 \pm 0.4\%$ ,  $\delta^{15}\text{N}$ 값은  $11.3 \pm 1.9\%$ 이었

고, 금강 하구에서  $\delta^{13}\text{C}$ 값은  $-20.0 \pm 0.4\%$ ,  $\delta^{15}\text{N}$ 값은  $7.5 \pm 1.2\%$ 이었다(Table 2; Fig. 2). 영산강 및 금강 하구에서 입자유기물질의  $\delta^{13}\text{C}$ 값은 각각  $-23.4 \pm 0.3\%$ 과  $-24.5 \pm 0.2\%$ ,  $\delta^{15}\text{N}$ 값은 각각  $1.9 \pm 0.2\%$ 과  $3.7 \pm 0.5\%$  나타났(Table 3; Fig. 2). 또한, 실뱀장어 및 뱀장어 성어의 이동 경유지로 판단되는 동중국해 북부해역의 표층 및 50 m 층에서 조사된  $\delta^{13}\text{C}$ 값은 각각  $-24.0 \pm 0.4(-24.8 \sim -23.2)\%$  및  $-25.0 \pm 0.5(-26.0 \sim -23.3)\%$ 로 나타났고,  $\delta^{15}\text{N}$ 값은 각각  $1.0 \pm 0.4(0.6 \sim 1.5)\%$  및  $0.5 \pm 0.1(0.4 \sim 0.6)\%$ 로 나타났(Table 3). 진해내수면연구소에서 영산강, 금강 및 한강 하구로 구분하여 사육한 어린 뱀장어의  $\delta^{13}\text{C}$ 값은 각각  $-19.4 \pm 0.3$ ,  $-19.3 \pm 0.6$  및  $-19.4 \pm 0.4$ 로 해역적으로 뚜렷한 차이는 나타나지 않았고(one-way ANOVA,  $p=0.995$ ; Table 3),  $\delta^{15}\text{N}$ 값도 각각  $12.8 \pm 0.9$ ,  $13.1 \pm 0.1$  및  $13.1 \pm 0.1$ 로 해역간 유사한 값을 보였다(one-way ANOVA,  $p=0.936$ ; Table 3). 사육기간에 급이한 사료의  $\delta^{13}\text{C}$ 값은  $-20.1 \pm 0.2\%$ ,  $\delta^{15}\text{N}$ 값은  $10.4 \pm 0.4\%$ 로써 어린 뱀장어와 사료간의 영양단계별 증가비는  $\delta^{13}\text{C}$ 가  $+0.7\%$ ,  $\delta^{15}\text{N}$ 가  $+2.6\%$ 로 나타났(Table 3).

## 토 의

동북아시아 뱀장어의 회유경로로 알려진 북적도 해류를 따라서 산란장으로부터 서쪽으로 멀어질 수록 전장이 큰 뱀장어 자어가 채집되고, 쿠로시오 해류를 따라서는 변태중인 자어들이 채집되며, 대만, 중국, 일본, 우리나라의 연안에서는 실뱀장어가 분포하는 것으로 알려져 있다(Shinoda *et al.*, 2011). 우리나라의 주요 강하구와 하천을 따라서 실뱀장어가 회유하고 있는데, 그 평균 전장은  $57.4 \pm 2.2(50.4 \sim 62.5)\text{mm}$  정도로 연구 해역에서 채집된 실뱀장어와 유사 하였고(Moon, 2002), 동중국해의 쿠로시오 해류에서 채집된 실뱀장어 전장은  $55.8 \pm 2.7(51.3 \sim 61.2)\text{mm}$ 로서 우리나라 연안에서 채집된 실뱀장어 보다 평균 전장이 작은 것으로 나타났(Shinoda *et al.*, 2011). 실뱀장어의 채집은 지역적으로 다른 해역임에도 불구하고 유기탄소 및 질소 농도가 3개 해역 모두 비슷한 농도를 보여 실뱀장어의 먹이습성은 비슷한 것으로 판단된다. 식물플랑크톤의 농도는 금강하구보다 영산강 하구에서 입자유기탄소와 질소가 각각 1.5배 높은 것으로 나타났. 또한, 입자유기물질의 농도는 영산강 하구와 섬진강 하구와 비슷한 값을 보였으나, 금강하구에서는 입자유기탄소가 2배, 입자유기질소는 3배이상 높은 값을 보여 금강하구에서 육역의 영향을 많이 받는 것으로 나타났(Kang *et al.*, 2001). 식물플랑크톤 농도와 입자유기물질 농도의 해역간 차이를 보이는 이유는 금강 하구역은 세립사 퇴적상이 우세하며, 얕은 수심으로 인하여 조사기간 동안 세립물질의 재 부유가 활발하여 영산강 하구와 비교하였을 때 식물플랑크톤의 농도 보다는 입자유기물질의 농도가 높은 것으로 판단된다(Choi, 1993). 뱀장어 산란장으로 알려진 마리아나 열도 근해와 북적도 해류계에서 채집된 뱀장어 자어(leptocephalus)의  $\delta^{13}\text{C}$ 값은  $-20.8 \pm 0.4\%$ , 그리고  $\delta^{15}\text{N}$ 값은  $5.1 \pm 0.7\%$  이었고, 산란 해역에서 부화하여 랩토세팔루스 단계에서의 먹이원인 입자유기물질의 5 m 수심에서  $\delta^{13}\text{C}$ 값은  $-22.0 \pm 0.9\%$ ,  $\delta^{15}\text{N}$ 값은  $1.3 \pm 2.0\%$  이었고, 50 m에서  $\delta^{13}\text{C}$ 값은  $-21.7 \pm 0.9\%$ ,  $\delta^{15}\text{N}$ 값은  $1.3 \pm 1.9\%$ 인 것으로 보고되었다(Miyazaki *et al.*, 2011). 자연의 수서 생태계에서 먹이망에 의한 영양단계별 증가율(영양단계 증가에 따른 분별 trophic fractionation: 무거운 원소의 축적은  $\delta^{13}\text{C}$

값의 경우 한 영양단계 당 평균 +1.1‰ (DeNiro and Epstein, 1978; Rau *et al.*, 1983),  $\delta^{15}\text{N}$ 값의 경우 평균 +3.4‰ (DeNiro and Epstein, 1981; Minagawa and Wada, 1984; Post, 2002)로 알려져 있는데, Miyazaki *et al.* (2011)에 의하여 조사된 뱀장어 자어와 입자유기 물질은 영양단계별 안정동위원소 증가비는 이 범위들과 잘 일치하였다. 연구 해역인 서해 연안의 강 하구로 들어오는 실뱀장어의 평균  $\delta^{13}\text{C}$ 값은  $-20.7\pm 0.1\%$ , 평균  $\delta^{15}\text{N}$ 값은  $5.0\pm 0.2\%$ 으로써 마리어나 열도 근해와 북적도 해류계에서 채집된 뱀장어 자어에서 나타나는 비들과 매우 유사한 값을 보였는데, 이와 같은 결과는 서해 연안 하구에서 채집된 실뱀장어가 뱀장어 자어의 먹이원과 같은 먹이를 섭취하며 이동했을 것으로 추정할 수 있는 근거를 제시한다. 또한, 우리나라 연안이나 강하구에서 먹이를 섭이 했을 것으로 추정되는 입자유기물질의  $\delta^{13}\text{C}$ 값은  $-23.9\pm 0.3\%$ ,  $\delta^{15}\text{N}$ 값은  $2.8\pm 0.5\%$ 으로써 일반적으로 알려진 영양단계의 증가에 따른 안정동위원소 비값 증가율과는 큰 차이를 나타내었다. 실뱀장어의 먹이원으로 추정되는 POM의  $\delta^{13}\text{C}$  및  $\delta^{15}\text{N}$ 값은 서해안 및 동중국해 북부해역과 산란장으로 알려진 마리어나 열도 근해 및 북적도 해류 사이에 매우 큰 차이를 보였고(Miyazaki *et al.*, 2011; Fig. 2), 나아가 동중국해 북부해역은 본 조사시기가 8월 중순으로 염분이 전년도에 비하여 0.1~3.4에 이르는 저염수(표층 염분 29.3~32.9)를 나타내어 양자강 유출수의 영향이 상대적으로 크게 미친 것을 시사해 주었다(NFRDI, 2012b). 시료 채집이 하구둑 부근에서 이루어진 점, 금강 하구의 경우 육수의 영향을 받아 낮은 염분값을 보이는 점등을 고려하면 영산강 및 금강에서 유입되는 영양물질 또는 유기물이 안정동위원소 값에 영향을 준 것으로 판단되며(Lee *et al.*, 2013), 실뱀장어의 영양단계별 안정동위원소 증가비 범위내에 존재하지 않았다. Kang *et al.*(2001)에 의하면 광양만의 먹이망에 대한 조건대 저서 기초생산자의 중요성에서 식물플랑크톤의 경우  $\delta^{13}\text{C}$ 값은  $-21.6\%$ 에서  $-19.6\%$ 으로 섬진강 하구 입구에서 연안으로 갈수록 증가하였고, 입자유기물질의 경우  $\delta^{13}\text{C}$ 값이  $-26.0\%$ 에서  $-19.8\%$ 로서 강상류에서 연안으로 갈수록 증가하였으나, 분포범위가 넓었다. 본 연구 결과에서도 식물플랑크톤과 입자유기물질의 안정동위원소 비값 들의 차이는 육지 기원의 유기물의 유입에 의한 영향으로 판단된다. Kang(2005)에 의하면 제주도 남부 어장(253해구), 서해남부 어장(228해구), 남해어장(113해구)의 2005년도 동중국해 해양생태계 먹이망의 시·공간적인 변동을 비교하여 평가한 자료에서 POM의 봄철  $\delta^{13}\text{C}$ 값은  $-21.5\sim -19.7\%$ ,  $\delta^{15}\text{N}$ 값은  $5.4\sim 5.7$ 의 범위를 보였고, 여름철  $\delta^{13}\text{C}$ 값은  $-21.1\sim -17.0\%$ ,  $\delta^{15}\text{N}$ 값은  $4.9\sim 11.5$ 의 범위를 보여  $\delta^{13}\text{C}$  및  $\delta^{15}\text{N}$ 값 모두 상대적으로 높은 값을 보였다. Yu *et al.*(2008)는 동중국해 주변해역과 대한해협의 표층에서 입자유기물을 분석한 결과  $\delta^{13}\text{C}$ 값은  $-23.5\sim -23.0\%$ ,  $\delta^{15}\text{N}$ 값은  $0.5\sim 1.9$ 의 범위로 본 조사에서 나타난 결과와 유사한 비값들을 가지는 것으로 나타났다. 따라서, 이상의 결과에서 나타난  $\delta^{13}\text{C}$ 과  $\delta^{15}\text{N}$ 값의 분포는 서해안과 동중국해 북부해역의 POM은 우리나라 연안으로 회유하는 실뱀장어의 주요한 먹이로써 이용될 가능성이 낮다는 것을 시사해주며, 이로부터 서해안의 금강, 영산강, 한강 하구에서 채집된 실뱀장어는 연안에서 섭이 활동을 하지 않을 것으로 기대된다. 이러한 결론은 실험실 환경에서 인공사료( $\delta^{13}\text{C}$ ,  $-20.2\pm 0.1\%$ ,  $\delta^{15}\text{N}$ ,  $8.6\pm 0.9\%$ )의 섭이를 통하여 성장한 뱀장어 자어가 실뱀장어로 변태한 후 동일 인공사료를 주었지만 한달 정도

먹이를 먹지 않고 살고 있는 것이 관찰되었다. 적도지역 및 일본 연안에서 성숙한 뱀장어가 산란을 위하여 마리어나 해구까지 회유한 뱀장어를 채집하여 안정동위원소 분석을 실시한 결과 일본 연안에서 성숙한 뱀장어는 적도지방에서 성장한 뱀장어와는 다르게 일본 연안에서 채집할 때 가졌던  $\delta^{13}\text{C}$ 과  $\delta^{15}\text{N}$ 값을 가지는 것으로부터 먹이의 섭이 없이 일본연안에서 마리어나 해구 까지 회유한다는 것을 밝혔다(Chow *et al.*, 2010). 대조적으로 마리어나 해구에서 부화하여 성장한 염상 자어가 변태한 후 우리나라 연안으로 회유하여 채집된 실뱀장어는 한동안 먹이를 먹지 않고 체중의 감소와 함께 연안으로 유입될 수 있다는 것이 보고되었다(Han, 2011). 이러한 현상은 다음의 자료들로부터 설명될 수 있을 듯하다. 첫째, 실험실과 현장관측에 의하면 저온에서 더 긴 뱀장어 자어 상태로 남아있고, 회유하는 동안 차가운 물속에서 성장이 정지하여 몇 달 동안 초기 착색 상태로 남아 연안으로의 가입이 지연된다(Han, 2011). 둘째, 실뱀장어나 어린 뱀장어 이석의 운문이  $10^\circ\text{C}$ 의 낮은 온도 또는 미섭이로 인하여 이석 성장이 방해를 받는 일이 일어난다(Umezawa and Tsukamoto, 1991; Fukuda *et al.*, 2009). 셋째, 일본 북부 큐슈지역 Saigo 강의 입구에서 채집된 실뱀장어의 장에서는 먹이를 발견할 수 없었고, 먹이가 충분히 공급되지 않은 상태에서 물의 온도가 상승함으로 인하여 신진대사 에너지가 필요 할 때에는 복강에 있는 지질을 이용하여 에너지를 충족한다(Kawakami *et al.*, 1999). 넷째, 뱀장어 자어는 마리어나 해구 부근에서부터 오끼나와 북부까지만 채집되었고, 실뱀장어는 동중국해에서만 채집되었다(Shinoda *et al.*, 2011; Tsukamoto, 2006).

국내에서 채집되는 실뱀장어 자원량은 점점 감소하고 있고, 양식을 위한 종묘 확보가 시급한 실정이다. 또한, 양식된 어린 뱀장어의 경우  $\delta^{13}\text{C}$ 값은 높지 않으나,  $\delta^{15}\text{N}$ 값 매우 높은 값을 가지는 것으로 나타났다. 따라서, 뱀장어 자어와 실뱀장어 먹이원 연구를 위해 뱀장어의 회유 경로, 뱀장어 자어와 변태 중인 실뱀장어를 확보하는 동시에 실뱀장어 자원량 조사도 병행되어야 할 것이다. 또한, 인공사육을 통해 부화한 뱀장어 자어에서 변태한 실뱀장어가 원활한 먹이 활동을 유지할 수 있도록, 자연 상태에서 새롭게 가입한 실뱀장어가 선호하는 수생환경과 먹이생물에 대한 연구가 필요하다. 이를 위해서 회유로의 일반 해양환경과 먹이원에 대한 조사는 우리나라의 EEZ 어업자원조사와 뱀장어 어획 금지기간 설정에 따른 생태조사와 병행하여 추진하는 것이 효율적일 것으로 판단된다.

## 결 론

뱀장어는 동북아시아의 중요한 수산자원으로서의 가치를 가지고 있는 동시에 국내 양식산업 부흥이라는 두 가지의 의미를 가지고 있는 어류이다. 최근에는 대량으로 양식이 성행하고 있으나, 양식에 필요한 종묘는 전적으로 하구역에서 자연산 실뱀장어를 채집하여 이용하고 있다. 이러한, 실뱀장어가 우리나라 서해안에서 채집되기까지 먹이습성에 대해서는 알려진 바가 거의 없었다. 마리어나 해구에서 산란된 랩토세팔루스는 북적도 해류와 쿠로시오 해류를 따라 우리나라 서해안으로 회유하는 동안 실뱀장어로의 변태과정을 거치게 되는데 안정동위원소에 의한 최근의 결과에 의하면 랩토세팔루스의 먹이원이 입자유기물질로 밝혀졌다. 이러한

연구 결과를 토대로 우리나라 서해안에서 채집되는 실뱀장어의 먹이원을 밝히고자 안정동위원소를 이용하여 분석한 결과는 다음과 같다. 실뱀장어의 안정동위원소 비값은 마리아나 해구에서 산란된 렙토세팔루스와 동일하였으나, 우리나라 서해안 및 북부 동중국해 까지 먹이원으로의 가능성이 있는 입자유기물질은 자연 수서 생태계에 존재하는 먹이망에 의한 단계별 증가율은 다른 값을 보이는 결과를 얻었다. 따라서 서해안과 동중국해의 입자유기물질은 자연산 실뱀장어의 먹이원으로 이용되지 않았으며, 우리나라에서 채집되는 실뱀장어는 렙토세팔루스 단계에서 먹이를 섭이 하지만 변태 이후 먹이를 섭이 하지 않고 회유하는 것으로 나타났다.

## 사 사

본 연구는 국립수산과학원(RP-2013-ME-095)의 지원에 의해 수행되었습니다. 논문의 심사를 맡아주신 두 분의 심사위원님께 감사드립니다. 자료해석에 많은 도움을 주신 국립수산과학원의 김희용 박사님, 최광호 박사님, 김신권 박사님과 이배익 박사님께 감사의 말씀을 드립니다.

## 참고문헌(References)

- Abe, T., S. Ijiri, S. Adachi and K. Yamauchi, 2010. Development of an in vitro culture system for producing eel larvae from immature ovarian follicles in Japanese eel *Anguilla japonica*. *Fish. Sci.*, **76**: 257–265.
- Bardonnet, A. and P. Riera, 2005. Feeding of glass eels(*Anguilla Anguilla*) in the course of their estuarine migration: New insights from stable isotope analysis. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, **63**: 201–209.
- Bunn, S.E., N.R. Loneragan and M.A. Kempster, 1995. Effects of acid washing on stable isotope ratios of C and N in penaeid shrimp and seagrass: Implication for food-web studies using multiple stable isotopes. *Limnol. Oceanogr.*, **40**: 622–625.
- Bureau du Colombier, S., P. Lambert and A. Bardonnet, 2008. Is feeding behaviour related to glass eel propensity to migrate? *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, **80**: 323–329.
- Choi, J.Y., 1993. Seasonal variations of suspended matters in the Keum Estuary and its adjacent coastal area. *J. Oceanol. Soc. Korea*, **28**: 272–280.
- Chow, S., H. Kurogi, S. Katayama, D. Ambe, M. Okazaki, T. Watanabe, T. Ichikawa, M. Kodama, J. Aoyama, A. Shinoda, S. Watanabe, K. Tsukamoto, S. Miyazaki, S. Kimura, Y. Yamada, K. Nomura, H. Tanaka, Y. Kazeto, K. Hata, T. Handa, A. Tawa and N. Mochioka, 2010. Japanese eel *Anguilla japonica* do not assimilate nutrition during the oceanic spawning migration: evidence from stable isotope analysis. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **402**: 233–238.
- DeNiro, M.J. and S. Epstein, 1978. Influence of diet on the distribution of carbon isotopes in animals. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **42**: 495–506.
- DeNiro, M.J. and S. Epstein, 1981. Influence of diet on the distribution of nitrogen isotopes in animals. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **45**: 341–351.
- Folch, J., M. Lees and G.H.S. Stanley, 1957. A simple method for the isolation and purification of total lipids from animal tissue. *J. Biol. Chem.*, **226**: 497–509.
- Fukuda N., M. Kuroki, A. Shinoda, Y. Yamada, A. Okamura, J. Aoyama and K. Tsukamoto, 2009. Influence of water temperature and feeding regime on otolith growth in *Anguilla japonica* glass and elvers: does otolith growth cease at low temperatures? *J. Fish Bio.*, **74**: 1915–1933.
- Fry, B., 2008. *Stable isotope ecology*. Springer, New York, USA., 308 pp.
- Han, Y.-S., 2011. Temperature-dependent recruitment delay of the Japanese glass eel *Anguilla japonica* in East Asia. *Mar. Biol.*, **158**: 2349–2358.
- Kang, C.K., 2005. *Ecological modeling*. Pusan University. Busan. 69 pp.
- 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. Oceanol. Soc. Korea*, **36**: 109–123.
- Kaekami, Y., N. Mochioka, R. Kimura and A. Nakazono, 1999. Seasonal changes of the RNA/DNA ratio, size and lipid contents and immigration adaptability of Japanese glass-eels, *Anguilla japonica*, collected in northern Kyushu, Japan. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, **238**: 1–9.
- Lee, Y.J., B.-K. Jeong, Y.-S. Shin, S.-H. Kim and K.-H. Shin, 2013. Determination of the origin of particulate organic matter at the estuary of Youngsan river using stable ratios ( $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$ ). *KJEE* **46**: 175–184.
- Miller, M.J., T. Otake, J. Aoyama, S. Wouthuyzen, S. Suharti, H.Y. Sugeha and K. Tsukamoto, 2011. Observations of gut contents of leptocephali in the North Equatorial Current and Tomini Bay, Indonesia. *Coasta. Mar. Sci.*, **35**: 277–288.
- Miller M.J., Y. Chikaraishi, N.O. Ogawa, Y. Yamada, K. Tsukamoto and N. Ohkouchi, 2012. A low trophic position of Japanese eel larvae indicates feeding on marine snow. *Biol. Lett.* Doi: 10.1098/rsbl.2012.08.26, Published online 7 November.
- Minagawa, M. and E. Wada, 1984. Stepwise enrichment of  $\delta^{15}\text{N}$  along food chain: Further evidence and the relation between  $\delta^{15}\text{N}$  and animal age. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **48**: 1135–1140.
- Miyazaki, S., H.-Y. Kim, K. Zenimoto, T. Kitagawa, M.J. Miller and S. Kimura, 2011. Stable isotope analysis of two species of anguilliform leptocephali (*Anguilla japonica* and *Ariosoma major*) relative to their feeding depth in the North Equatorial Current region. *Mar. Biol.*, **158**: 2555–2564.
- Mochioka, N. and M. Iwamizu, 1996. Diet of anguilloid larvae: leptocephali feed selectively on larvacean houses and fecal pellets. *Mar. Biol.*, **125**: 447–452.
- Mochioka, N., 2003. *Leptocephali*. In: *Eel biology*, edited by Aida, K., K. Tsukamoto and K. Yamauchi, Springer-Verlag, Tokyo, pp. 51–60.
- Moon, H.T., 2002. The early life history of eel *Anguilla japonica* determined by otolith microstructure and catch data of glass eels. Ph.D. Thesis, Chungnam University, Taejon, 111 pp.
- NFRDI, 2012a. Development of Rearing Technique in Eel, *Anguilla japonica*. 2011 Report of National Fisheries Research & Development Institute., 53 pp.

- NFRDI, 2012b. Oceanographic information in the east Chana Sea august 2012. Oceanographic information 59ho of National Fisheries Research & Development Institute., 17 pp.
- Okamura, A., Y. Yamada, N. Horie, T. Utoh, N. Mikawa, S. Tanaka and K. Tsukamoto, 2007. Effects of water temperature on early development of Japanese eel *Anguilla japonica*. Fisheries Science, **73**: 1241–1248
- Otake T., K. Nogami and K. Maruyama, 1993. Dissolved and particulate organic matter as possible food sources for eel leptocephali. Mar. Ecol. Prog. Ser., **92**: 27–34.
- Post, D.M., 2002. Using stable isotopes to estimate trophic position: models, methods, and assumptions. Ecology, **83**: 703–718.
- Rau, G.H., A.J. Mearns, D.R. Young, R.J. Olson, H.A. Schafer and I.R. Kaplan, 1983. Animal  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  correlates with trophic level in pelagic food webs. Ecology, **64**: 1314–1318
- Shinoda, A., J. Aoyama, M.J. Miller, T. Otake, N. Mochioka, S. Watanabe, Y. Minegishi, M. Kuroki, T. Yoshinaga, K. Yokouchi, N. Fukuda, R. Sudo, S. Hagihara, K. Zenimoto, Y. Suzuki, M. Oya, T. Inagaki, S. Kimura, A. Fukui, T.W. Lee and K. Tsukamoto, 2011. Evaluation of the larval distribution and migration of the Japanese eel in the western North Pacific. Rev Fish Biol Fisheries, **21**: 591–611.
- Tanaka, H, H. Kagawa, H. Ohta, T. Unuma and K. Momura, 2003. The first production of glass eel in captivity: fish reproductive physiology facilitates great progress in aquaculture. Fish Physiol. Biochem., **28**: 493–497.
- Tsukamoto, K., 2006. Spawning of eels near a seamount. Nature, **439**: 929.
- Yu, O.K., S.-G. Paik, H.-G. Lee, C.-K. Kang, D.-S. Kim, J.-H. Lee and W.S. Kim, 2008. A preliminary study of the effect of pelagic organisms on the macrobenthic community in the adjacent East Sea and Korea strait. Ocean and Polar Res., **30**: 303–312.

---

2013년 9월 23일 원고접수

2013년 11월 4일 수정본 접수

2013년 11월 5일 수정본 채택

담당편집위원: 이충일