

안정동위원소를 이용한 낙동강 하구 실뱀장어의 먹이 습성 분석

김정배* · 이원찬 · 김형철 · 홍석진 · 박경동¹

국립수산물과학원
¹수산자원생태연구소

Feeding Habits of the Glass Eel *Anguilla japonica* Determined by C and N Stable Isotopes in the Nakdong River Estuary of the Korean Peninsula

JEONG BAE KIM*, WON-CHAN LEE, HYUNG CHUL KIM, SOKJIN HONG AND KYEONG DONG PARK¹

National Institute of Fisheries Science, Busan, 46083, Korea

¹Institute of Fisheries Resources Ecology, Busan, 48498, Korea

우리나라에서 발견된 자연산 실뱀장어는 마리아나 해구에서 산란 및 부화의 과정을 거친후 북적도 해류를 따라 회유한다. 자연산 미성어인 실뱀장어는 우리나라의 남서해안에서 채집되어 양식용 종묘로 이용된다. 본 연구에서는 자연산 실뱀장어의 섭식과정을 알아보기 위하여 2014년 3월과 4월 낙동강 하구에서 실뱀장어를 채집하여 전장, 습중량, 건중량, 탄소 및 질소 함량, 안정동위원소비를 분석하였으며, 아울러 수온과 염분을 측정하였다. 낙동강 하구의 수온은 13.2 ± 1.0 (평균 \pm 1SE; 범위는 $10.1 \sim 15.7$) $^{\circ}\text{C}$ 이었고, 염분은 24.8 ± 2.4 ($13.2 \sim 34.0$)이었으며, 수문 개방시 염분은 $13.2 \sim 30.0$ (평균 21.2)로 낮은 값을 보였다. 실뱀장어의 전장은 56.5 ± 0.2 ($51.0 \sim 63.6$) mm, 습중량은 70.9 ± 1.4 ($33.6 \sim 133.2$) mg, 건중량은 16.5 ± 0.3 ($10.1 \sim 29.1$) mg이었다. 실뱀장어의 탄소와 질소 함량은 각각 $51.0 \pm 0.8\%$ 및 $13.9 \pm 0.1\%$ 이었다. 낙동강 하구에서 채집된 실뱀장어의 $\delta^{13}\text{C}$ 및 $\delta^{15}\text{N}$ 값은 각각 $-20.9 \pm 0.2\text{‰}$, $6.1 \pm 0.1\text{‰}$ 로 북적도 해류에서 채집된 뱀장어 자어인 렙토세팔루스와 유사한 값을 보였다. 따라서, 이러한 결과는 낙동강 하구에서 채집된 실뱀장어는 뱀장어 자어에서 실뱀장어로의 변태과정을 거친 이후 회유하는 동안 먹이를 섭이 하지 않는 것으로 나타났다.

Wild glass eels found in the Korean peninsula are thought to migrate along the North Equatorial Current and undergo the processes of spawning and incubation in the Mariana Trench. Juveniles of the wild glass eels are collected from the southern and western coasts of the Korean peninsula and used as seeds for aquaculture. To investigate the feeding behavior of wild glass eels, we collected glass eels from the Nakdong River estuary during March and April 2014 and analyzed the total length, wet weight, dry weight, carbon and nitrogen contents, and stable isotope ratio of eels as well as water temperature and salinity. Water temperature in the Nakdong River estuary was 13.2 ± 1.0 (mean \pm 1SE; range, $10.1 \sim 15.7$) $^{\circ}\text{C}$ and salinity was 24.8 ± 2.4 ($13.2 \sim 34.0$), showed a lower range from 13.2 to 30.0 (a mean of 21.2) when the floodgates were opened. The total length of glass eels was 56.5 ± 0.2 ($51.0 \sim 63.6$) mm, wet weight was 70.9 ± 1.4 ($33.6 \sim 133.2$) mg, and dry weight was 16.5 ± 0.3 ($10.1 \sim 29.1$) mg. Carbon and nitrogen contents of glass eels were $51.0 \pm 0.8\%$ and $13.9 \pm 0.1\%$, respectively. Mean $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ values of glass eels collected from the Nakdong River estuary were $-20.9 \pm 0.2\text{‰}$ and $6.1 \pm 0.1\text{‰}$, displaying similar values to those of leptocephalus, glass eel larvae collected from the North Equatorial Current. Therefore, this result suggest that the glass eels collected from the Nakdong River estuary do not feed on prey after metamorphosis from eel larvae to glass eels their migration.

Key words: Glass eel, *Anguilla japonica*, Food web, Stable isotopes, Nakdong River estuary

서 론

동아시아산 뱀장어(*Anguilla japonica*)는 우리나라를 비롯한 대만, 중국 및 일본에서 수산 경제적으로 중요한 자원이며, 양식에 필요한 실뱀장어를 자연산 실뱀장어에 의존하고 있다. 종묘생산에 필요한 자연산 실뱀장어는 태평양 마리아나 열도의 Suruga 해산 부근의 산란장으로부터 산란된 뱀장어 자어인 뱃뺨뱀장어(leptocephalus)가 북적도 해류와 쿠로시오 해류를 따라 이동하면서 실뱀장어(glass eel)로 변태하여 동아시아의 대만, 중국, 일본, 한국으로 이동한다(Tsukamoto, 2006). 그러나, 실뱀장어의 자원량 급감과 CITES(국제 야생동식물 멸종 위기종 거래에 관한 조약)에 의한 타 종 수입제한 등으로 뱀장어 양식 산업은 큰 어려움에 직면하고 있다. 이러한, 주변 여건의 어려움을 극복하기 위하여 난의 수정에서부터 성어까지 전 과정을 인공적으로 조절하는 완전 양식에 각 나라에서는 많은 투자와 연구를 수행하고 있고, 인공종묘 생산단가를 낮추기 위한 사료 및 사육 시스템을 개발 중에 있다(Tanaka et al., 2003; Okamura et al., 2007; Abe et al., 2010; NFRDI, 2012). 우리나라에서 뱀장어 인공종묘 생산을 위한 연구는 난의 수정, 부화한 자어의 먹이원인 액상 사료에 의한 성장, 실뱀장어로의 변태를 위한 기술을 확보하였으나 여전히 인공 실뱀장어의 대량 생산기술로의 전환의 어려움은 상존하고 있다(NFRDI, 2012). 뱃뺨뱀장어 형태의 자어 시기를 갖는 어류는 자어기에 날카로운 이빨이 있음에도 불구하고, 먹이활동과 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 겹테기(gelatinous house) 등으로 인하여 뱀장어목 어류의 자어시기 먹이원이 알려지기 시작하였다(Otake et al., 1993; Mochioka and Iwamizu, 1996; Miller et al., 2011). 최근에는 뱀장어 자어의 먹이원인 POM은 해양의 기초생산과 연계되어 있고, 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 육질의 성질을 지니고 있었다(Bardonnet and Riera, 2005). 또한, 실뱀장어가 회유하는 성질이 먹이습성과 관계가 있는데 굽주리거나 먹이를 먹는 것처럼 보이기도 한다(Bureau du Colombier et al., 2008).

안정동위원소의 분별 작용은 자연에 존재하는 가벼운 동위원소와 무거운 동위원소 간에 서로 분별이 일어나는 것으로서 화학적인 과정, 물리적 과정 및 생물학적 과정으로 나누어 진다. 이들 중에서 화학적인 과정과 생물학적인 과정이 자연물질 중의 원소의 동위원소 존재량의 변화를 일으키는 중요한 요인이 되고 있으며, 확산과 증발과 같은 물리적인 과정에 의해서도 동위원소의 존재비에 영향을 줄 수 있다(Kim, 2010). 안정동위원소의 분별작용을 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 보

면 하구에서의 유럽산 실뱀장어의 먹이습이(Bardonnet and Riera, 2005), 뱀장어의 산란회유에 따른 성어의 먹이습이(Chow et al., 2010), 뱀장어 자어 및 먹이분석(Miller et al., 2012; Miyazaki et al., 2011), 우리나라 서해안 실뱀장어의 먹이습성(Kim et al., 2013) 등으로 주로 먹이원 연구에 이용되었다. 탄소와 질소는 생물체의 필수 구성원소로서 동위원소비로 생물체를 구성하고 있는 유기물의 기원, 식생, 영양단계에 대한 정보를 토대로 생태계의 생물종과 식성의 변화 등과 같은 물질의 거동을 연구하는데 유용한 원소이다. 따라서 실뱀장어의 안정동위원소인 탄소와 질소의 비를 측정하고, 가용 가능한 먹이원과 비교를 통하여 실제 먹이원을 추정할 수 있다. 본 연구는 낙동강 하구에서 채집한 실뱀장어의 탄소 및 질소 안정동위원소를 분석하여 앞서 연구된 영산강 하구, 금강 하구 및 한강하구에서의 실뱀장어와 먹이원 등을 비교 분석 함으로서 우리나라에서 채집되는 실뱀장어의 먹이원을 밝히는 것을 목적으로 수행되었다.

재료 및 방법

실뱀장어의 채집

낙동강 하구에서는 관행적으로 실뱀장어를 채집하거나 호망 선박을 이용하여 일시적으로 실뱀장어를 채집하고 있어, 양만 산업이 활성화 되어 있는 금강 하구에서의 선박을 이용한 실뱀장어 채집 방법과는 차이를 보였다(Kim et al., 2013). 대부분의 실뱀장어는 11월부터 이듬해 6월까지 우리나라 남-서해안에서 채집되고 있는데 본 연구에서는 2014년 3월 4일부터 4월 18일까지 5회에 걸쳐 낙동강 하구에서 실시되었다. 1회(2014년 3월 4일)때는 정점1에서 채집되었고, 나머지 4회는 정점2에서 채집 되었다. 실뱀장어의 채집은 호망 어구(가로 4m, 세로 6m, 길이 10m)가 선미의 좌현 및 우현에 설치되어있는 호망 선박을 이용하여 그물을 바다에 펼쳐놓고 있으면 뱀장어들은 개방된 그물로 들어가게 되며, 최종적으로는 자루그물 내 2m 길이의 깔대기에 채집되게 된다. 채집된 실뱀장어는 낱째 별로 구분하였고, 화학분석용은 시료가 건조되는 것을 방지하기 위하여 지퍼백에 현장해수와 실뱀장어를 넣고 드라이 아이스로 채워진 쿨러에서 얼려 실험실로 운반하였다. 채집된 실뱀장어는 전장(total length), 습중량(wet weight) 및 건중량(dry weight)을 각각 0.1 mm, 0.1 mg까지 측정하였고, 화학분석은 뱀장어의 육질 부분 만을 이용하여 분석하였다(Kim et al., 2013).

실뱀장어 성분 분석

현장의 수온과 염분은 실뱀장어 채집시 1일당 3회 이상 수질측정기(WQC-22A, TOA-DKK, Japan)를 이용하여 측정하였다. 실뱀장어의 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 시료 중 실뱀장어는 클로로포름과 메탄올 1:1용액(v/v)을 이용하여 지방을 제거하였고(Folch et al., 1957), HCl 원액 0.3 mL를 넣어 시료와 순간 접촉시킨 후 증류수로 깨끗이 세척한 다음 동결 건조기에서 7일간 건조하였다. 실뱀장어 건 시료는 0.5~1 mg의 시료를 탄소와 질소 함량 및 안정동위원소비 값을 측정하기 위하여 CNS 원소분석기(vario ISOTOPE select, Germany) 및 안정동위원소 질

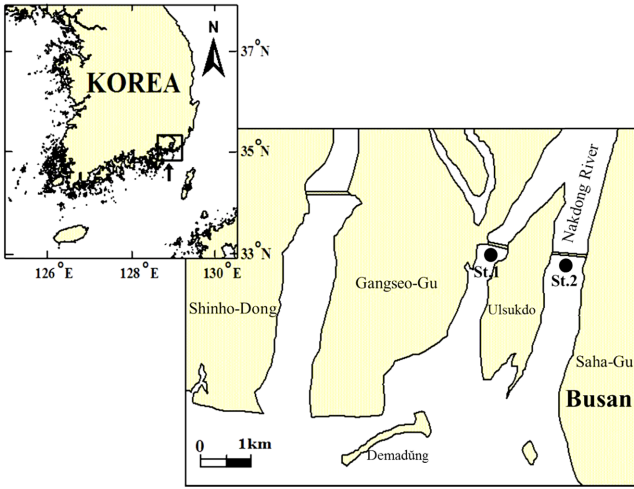


Fig. 1. Map showing the collection sites (St.1 and St.2) of the glass eel, *Anguilla japonica* specimens on the Nakdong River estuaries of the Korean peninsula.

량분석기(Isotope Ratio-Mass spectrometer, Micromass IsoPrime 100, UK)를 이용하여 분석 하였다. 탄소 안정동위원소의 경우 무기 탄소를 제거하기 위하여 산세척을 하였으나, 질소 안정동위원소의 경우 산 세척이 분석 값에 영향을 미칠 수 있으므로 산 세척을 하지 않은 시료(Bunn *et al.*, 1995)를 사용 하였다. 실뱀장어가 가지는 안정동위원소비 값은 아래 식으로 계산되었으며, 표준물질에 대한 각 시료의 안정동위원소비 값을 천분율로 나타내었다.

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

X: ¹³C 또는 ¹⁵N, R: 시료 및 표준물질의 ¹³C/¹²C 과 ¹⁵N/¹⁴N 비

표준물질(standard)로는 탄소의 경우는 PDB(Pee Dee Belemnite), 질소의 경우는 대기 중 질소(atmospheric N₂)의 국제표준 기준을 사용하였다. 실제 분석에서 20개의 EMA-P2 polymer(Elemental Microanalysis, UK)를 이용하여 측정된 탄소와 질소 함량의 분석 결과 표준오차(SE)는 각각 ±0.3%과 ±0.5% 및 안정동위원소비 값을 분석 결과 표준오차(SE)는 각각 ±0.2%과 ±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), Duncan의 사후분석을 실시하였으며, 채집 날짜 간의 비교는 t-test로 검정하였다. 통계분석은 SPSS 10.1을 이용하였으며, 측정값은 평균(mean)과 표준오차(SE)로 나타내었다.

결 과

본 연구에서 실뱀장어가 채집되는 해역인 낙동강 하구는 수심이 6 m의 해역이며, 표층 해수의 수온은 13.2±1.0(10.1~15.7)°C, 염분은 24.8±2.4(13.2~34.0)로 나타났다. 조사기간 동안 3월 31일 및 4월 18일의 2회에 걸쳐 수문 개방이 이루어져 수온은 12.3~14.9°C로 큰 변화가 없었으나, 염분 값은 최저 13.2 및 최고 30.0으로 염분 변화 폭이 높은 하구의 특징을 잘 나타내 주었다.

낙동강 하구에서 2014년 3월 4일 채집한 실뱀장어의 전장은 평

균(±SE) 59.0±0.5(53.9~63.6)mm (n=30), 3월 24일 채집한 실뱀장어 전장은 54.2±0.3(51.0~58.3)mm (n=30), 3월 31일 채집한 실뱀장어 전장은 56.9±0.4(53.2~60.7)mm (n=30), 4월 16일 채집한 실뱀장어 전장은 56.1±0.3(53.1~60.1)mm (n=30), 4월 18일 채집한 실뱀장어 전장은 56.5±0.3(53.6~60.2)mm (n=30)로 5회 채집한 실뱀장어의 전장은 유의한 차이를 보였다(one-way ANOVA, p<0.001; Fig. 2a). 이러한 차이가 채집된 어떠한 날짜들의 차이에서 기인하는지를 검토하기 위하여 개별적인 날짜에 대한 추가적인 통계분석인 Duncan의 사후검정 결과 날짜 3월 4일과 3월 24일의 평균 전장의 차이는 유의수준 0.05하에서 높은 차이를 보였고, 날짜 3월 31일, 4월 16일 및 4월 18일에 채집된 실뱀장어 평균 전장은 통계적으로 차이가 나타나지 않는 것으로 나타났다.

낙동강 하구에서 2014년 3월 4일 채집한 실뱀장어의 습중량은 평균(±SE) 86.2±3.2(58.8~133.2)mg (n=30), 3월 24일 채집한 실뱀장어 습중량은 63.3±2.0(41.2~92.5)mg (n=30), 3월 31일 채집한 실뱀장어 습중량은 80.8±2.6(53.5~113.7)mg (n=30), 4월 16일 채집한 실

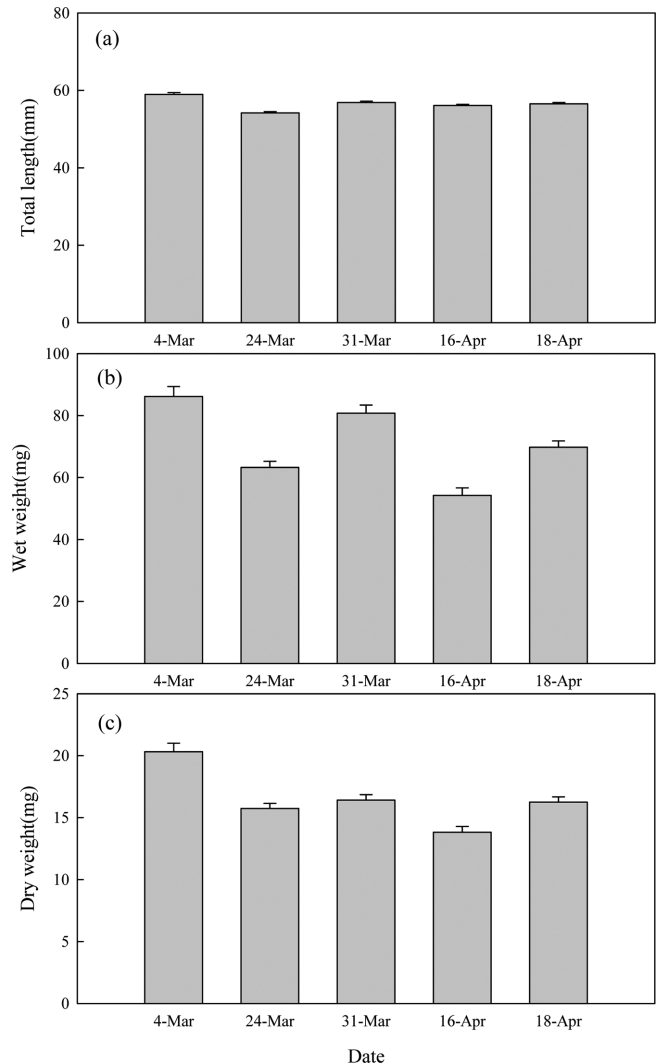


Fig. 2. Total lengths and weight of the glass eel, *Anguilla japonica* occurred on the Nakdong River estuaries of the Korean peninsula. Glass eels total length (a), Glass eels wet weight (b), Glass eels dry weight (c).

뱀장어 습중량은 $54.2 \pm 2.4 (33.6 \sim 85.3) \text{mg}$ ($n=30$), 4월 18일 채집한 실뱀장어 습중량은 $69.8 \pm 2.0 (49.9 \sim 97.5) \text{mg}$ ($n=30$)로 5회 채집한 실뱀장어의 습중량은 유의한 차이를 보였다(one-way ANOVA, $p < 0.001$; Fig. 2b). 이러한 차이가 채집된 어떠한 날짜들의 차이에서 기인하는지를 검토하기 위하여 개별적인 날짜에 대한 추가적인 통계분석인 Duncan의 사후검정 결과 날짜 3월 4일과 4월 16일의 평균 전장의 차이는 유의수준 0.05하에서 높은 차이를 보였고, 날짜 3월 4일과 3월 31에 채집된 실뱀장어 평균 습중량은 통계적으로 차이가 나타나지 않는 것으로 나타났다. 실뱀장어의 채집 날짜에 대한 평균 전장 및 습중량이 차이가 나는 것은 3월 4일에 채집된 실뱀장어가 전장도 크고, 습중량도 높은 것으로 나타났으나, 다른 시기에는 전장과 습중량이 비례관계가 나타나지 않는 이유는 산란시기가 다르거나 회유 하는 동안 주변 환경의 영향 및 자가 영양분에 의한 성장 등으로 인한 결과로서 나타나는 것으로 판단된다.

낙동강 하구에서 2014년 3월 4일 채집한 실뱀장어의 건중량은 평균($\pm \text{SE}$) $20.3 \pm 0.7 (15.9 \sim 29.1) \text{mg}$ ($n=30$), 3월 24일 채집한 실뱀장어 건중량은 $15.7 \pm 0.4 (11.4 \sim 19.4) \text{mg}$ ($n=30$), 3월 31일 채집한 실뱀장어 건중량은 $16.4 \pm 0.4 (12.2 \sim 20.9) \text{mg}$ ($n=30$), 4월 16일 채집한 실뱀장어 건중량은 $13.8 \pm 0.5 (10.1 \sim 19.7) \text{mg}$ ($n=30$), 4월 18일 채집한 실뱀장어 건중량은 $16.3 \pm 0.4 (11.1 \sim 21.9) \text{mg}$ ($n=30$)로 5회 채집한 실뱀장어의 건중량은 유의한 차이를 보였다(one-way ANOVA, $p < 0.001$; Fig. 2c). 각 채집 날짜의 수율은 3월 4일은 76.4%, 3월 24일은 75.1%, 3월 31일은 79.7%, 4월 16일은 74.5% 및 4월 18일은 76.7%로서 수문을 개방한 3월 31일 및 4월 18일이 수율이 높은 것으로 나타났다.

실뱀장어의 채집시기인 3월 4일, 3월 24일, 3월 31일, 4월 16일 및 4월 18일 각각의 탄소 함량은 $52.4 \pm 0.4\%$, $51.6 \pm 0.5\%$, $52.4 \pm 0.4\%$, $49.5 \pm 0.9\%$ 및 $49.3 \pm 1.5\%$ 로 채집한 실뱀장어의 탄소 함량은 유의한 차이를 보였다(one-way ANOVA, $p < 0.05$; Fig. 3a). 이러한 차이가 채집된 어떠한 날짜들의 차이에서 기인하는지를 검토하기 위하여 개별적인 날짜에 대한 추가적인 통계분석인 Duncan의 사후검정 결과 날짜 3월 31일과 4월 18일의 평균 탄소 함량의 차이는 유의수준 0.05하에서 높은 차이를 보였고, 날짜 3월 24일과 3월 31에 채집된 실뱀장어 평균 탄소 함량은 통계적으로 차이가 나타나지 않는 것으로 나타났다.

실뱀장어의 채집시기인 3월 4일, 3월 24일, 3월 31일, 4월 16일 및 4월 18일 각각의 질소 함량은 각각 $14.0 \pm 0.1\%$, $13.9 \pm 0.2\%$, $13.6 \pm 0.1\%$, $14.1 \pm 0.1\%$ 및 $13.7 \pm 0.2\%$ 로 채집한 실뱀장어의 질소 함량은 유의한 차이를 보이지 않았다(one-way ANOVA, $p = 0.072$; Fig. 3b). 탄소/질소비는 각각 3.7 ± 0.0 , 3.7 ± 0.1 , 3.9 ± 0.0 , 3.5 ± 0.1 및 3.6 ± 0.1 로 탄소/질소비는 유의한 차이를 보였다(one-way ANOVA, $p < 0.05$; Fig. 3c). 이러한 차이가 채집된 어떠한 날짜들의 차이에서 기인하는지를 검토하기 위하여 개별적인 날짜에 대한 추가적인 통계분석인 Duncan의 사후검정 결과 3월 31일과 4월 16일의 평균 탄소/질소비의 차이는 유의수준 0.05하에서 높은 차이를 보였고, 날짜 3월 24일과 3월 31에 채집된 실뱀장어 평균 탄소/질소비는 통계적으로 차이가 나타나지 않는 것으로 나타났다. 실뱀장어의 채집 날짜에 대한 평균 탄소 함량 및 탄소/질소비가 차이가 나타나는 것은 산란시기가 다르거나 회유 하는 동안 또는 하구에서 머무르는 동안 굶주리면서 자가 영양분을 소진한 결과에 의하여 나

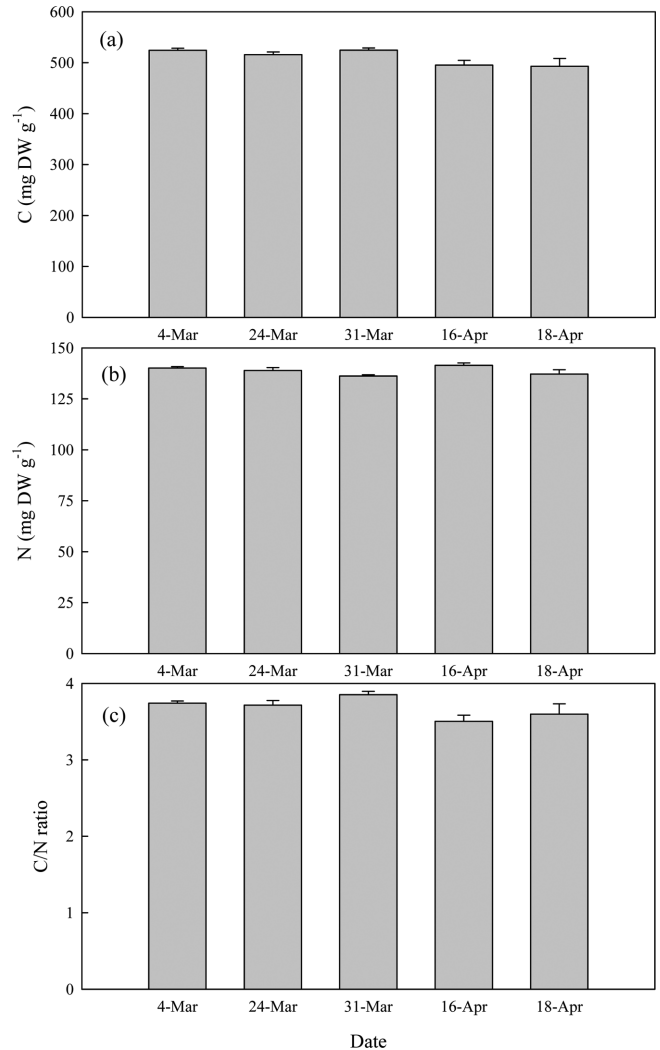


Fig. 3. Carbon and nitrogen concentrations of the glass eel, *Anguilla japonica* occurred on the Nakdong River estuaries of the Korean peninsula. Glass eels carbon concentrations (a), Glass eels nitrogen concentrations (b), Glass eels C/N ratio (c).

타나는 것으로 판단된다.

낙동강 하구에서 채집한 실뱀장어의 안정동위원소비 값을 보면 다음과 같다. $\delta^{13}\text{C}$ 값은 3월 4일, 3월 24일, 3월 31일, 4월 16일 및 4월 18일 채집시기에 각각 $-21.3 \pm 0.2\text{‰}$, $-21.1 \pm 0.1\text{‰}$, $-20.7 \pm 0.3\text{‰}$, $-20.7 \pm 0.3\text{‰}$ 및 $-20.9 \pm 0.2\text{‰}$ 로 채집 시기간 유의한 차이는 나타나지 않았다(one-way ANOVA, $p = 0.270$; Fig. 4a). $\delta^{15}\text{N}$ 값은 3월 4일, 3월 24일, 3월 31일, 4월 16일 및 4월 18일 채집시기에 각각 $5.8 \pm 0.1\text{‰}$, $5.8 \pm 0.1\text{‰}$, $6.1 \pm 0.1\text{‰}$, $6.4 \pm 0.1\text{‰}$ 및 $6.3 \pm 0.1\text{‰}$ 로 채집 시기간 유의한 차이를 보였다(one-way ANOVA, $p < 0.001$; Fig. 4b). 이러한 차이가 채집된 어떠한 날짜들의 차이에서 기인하는지를 검토하기 위하여 개별적인 날짜에 대한 추가적인 통계분석인 Duncan의 사후검정 결과 3월 4일과 4월 16일의 평균 질소 안정동위원소비 값의 차이는 유의수준 0.05하에서 높은 차이를 보였고, 날짜 3월 24일과 3월 31에 채집된 실뱀장어 평균 질소 안정동위원소비 값은 통계적으로 차이가 나타나지 않는 것으로 나타

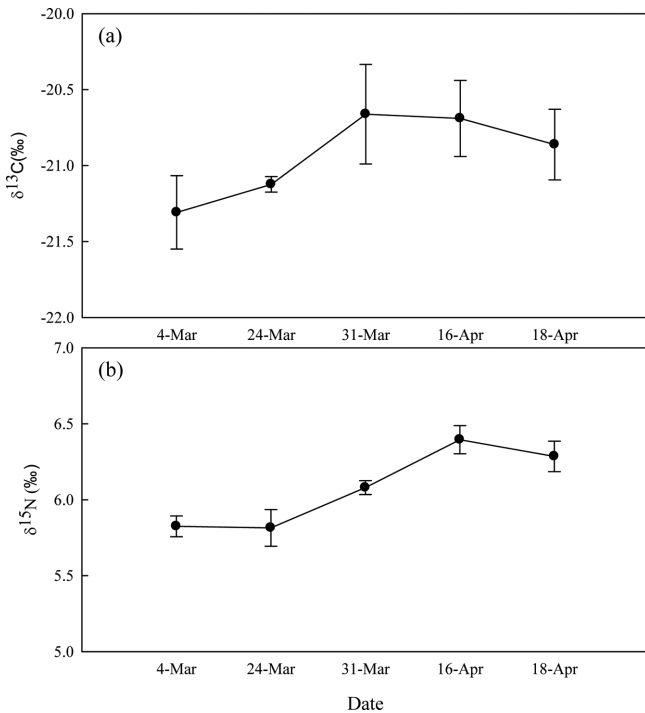


Fig. 4. Daily Mean $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ values (± 1 SE) of *Anguilla japonica* occurred on the Nakdong River estuaries of the Korean peninsula. Glass eels carbon stable isotope (a), Glass eels nitrogen stable isotope (b).

났다. 실뱀장어의 채집 날짜에 대한 평균 탄소 안정동위원소비 값은 차이를 보이지 않고 평균 질소 안정동위원소비 값이 차이가 나타나는 것은 평균 탄소 함량 및 탄소/질소비의 평균값이 차이를 보이는 것처럼 자가 영양분의 소진 등으로 인한 결과로 나타나는 것으로 판단된다.

토 의

뱀장어는 자연산을 식용으로 이용해 왔으나, 1970년대부터 자연산 실뱀장어를 채포하여 양식 뱀장어의 종묘로서 이용하여 왔다(Yoo, 1994). 금강 하구에서 수온은 6~7°C에서 최적으로 실뱀장어의 채집이 이루어 졌고, 14~16°C에서는 적은 양의 실뱀장어들이 채집되었으며, 염분은 20 부근에서 10톤 이상의 실뱀장어가 채집이 이루어진 것으로 나타났다(Hwang *et al.*, 2014). 낙동강 하구에서는 조사시 평균 수온이 13.2(10.1~15.7)°C로서 수온의 영향은

거의 없었으나(Yoo, 1994), 염분은 실뱀장어 채집시 수문 개방 등으로 인한 염분 값이 낮은 21.2 \pm 3.2(13.2~30.0)으로 Hwang *et al.* (2014)의 금강하구에서와 비슷한 염분값 부근에서 대체적으로 실뱀장어 채집이 많이 이루어 졌다.

우리나라의 주요 강하구와 하천을 따라서 실뱀장어가 회유를 하고 있는데, Moon(2002)의 제주도 천제연, 낙동강 및 금강하구에서 채집된 실뱀장어의 전장의 평균은 57.1 \pm 2.1(50.4~62.5) mm로서 각 하구에서 채집한 실뱀장어의 전장의 평균은 시간간에는 차이가 있었으며, 지역간에는 차이가 없었다. Kim *et al.*(2013)의 한강, 금강 및 영산강 하구에서 채집된 실뱀장어의 전장은 각각 57.6 \pm 0.4(54.5~61.2) mm, 56.2 \pm 0.4(50.2~60.2) mm, 56.1 \pm 0.4(50.0~60.0) mm으로서, 낙동강 하구 실뱀장어의 전장의 평균인 56.5 \pm 0.2(51.0~63.6) mm과 비슷하였다. 그러나, 낙동강 하구의 날짜 별 실뱀장어 채집 시기와 비교하면 3월 4일은 59.0 \pm 0.5 mm, 3월 24일은 54.2 \pm 0.3 mm으로 채집 시기에 따라 약 5 mm의 차이를 보였을 뿐만 아니라, 우리나라 서해안 및 남해안에서 최근에 채집된 실뱀장어의 평균 전장이 작은 것으로 나타났다. 동중국해의 쿠로시오 해류에서 채집된 실뱀장어 전장은 55.8 \pm 2.7(51.3~61.2) mm로서 낙동강 하구에서 채집된 실뱀장어와 비슷한 경향을 보이는 것으로 나타났다(Shinoda *et al.*, 2011; Table 1). 낙동강 하구에서 채집된 실뱀장어의 습중량과 건중량은 2012년 4월에 서해안에서 채집된 실뱀장어 보다 작은 값을 가지는 것으로 나타나, 시기적 또는 지역적인 차이로 인하여 작은 값을 보이는 것으로 판단된다(Table 1; Kim *et al.*, 2013).

실뱀장어의 탄소 및 질소 함량에 대하여 살펴 보면 Kim *et al.* (2013)에서는 세 지역인 영산강, 금강, 한강 하구에서 Table 2와 같이 비슷한 값을 보여 세 지역의 탄소 및 질소 함량의 평균 값인 43.5 \pm 0.3%, 10.6 \pm 0.1%으로 나타났으나, 낙동강 하구에서는 51.0 \pm 0.8%, 13.9 \pm 0.1%으로 나타나 탄소 및 질소 함량은 증가하는 경향을 보였다(Table 2). 실뱀장어의 탄소/질소비에 대하여 살펴 보면 Kim *et al.*(2013)에서는 2012년에 서해안의 세 지역인 영산강, 금강, 한강 하구에서는 세지역이 4.1로 비슷한 경향을 보였으나, 2014년의 낙동강 하구에서는 평균 3.7(3.5-3.9)의 값을 보였다. 이러한, 값의 차이를 보이는 것은 낙동강 하구에서 채집된 실뱀장어의 탄소 및 질소 함량이 상대적으로 높았고, 더욱이 질소 함량이 높은 관계로 탄소/질소비는 낮은 것으로 나타났다. 또한, 영산강, 금강, 한강 하구에서 채집된 실뱀장어를 진해내수면연구소에서 사육한 양식산 뱀장어(2개월 성장한 어린 뱀장어)의 먹이원의 탄소 및 질소 함량은 각각 41.3 \pm 0.0%, 8.3 \pm 0.0%이었고 탄소/질소비는 5.0로서 상대적으로 질소 함량은 낮았지만, 양식산 어린 뱀장어의 탄소 및 질소 함량(영산강: 49.6 \pm 0.3, 11.7 \pm 0.1; 금강: 51.8 \pm 0.2, 11.0 \pm 0.1; 한강:

Table 1. Total lengths and weights of the 5 groups of glass eel, *Anguilla japonica*

Sampling site	Sample No.	Glass eel						References
		Total length (mm)		Wet weight (mg)		Dry weight (mg)		
		range	mean \pm SE	range	mean \pm SE	range	mean \pm SE	
Youngsan River Estuary	30	50.0~60.0	56.1 \pm 0.4	80.0~137.3	105.2 \pm 2.5	13.4~23.4	18.6 \pm 0.6	Kim <i>et al.</i> , 2013
Geum River Estuary	30	50.2~60.2	56.2 \pm 0.4	83.2~122.1	103.4 \pm 1.8	11.9~24.4	19.8 \pm 0.6	Kim <i>et al.</i> , 2013
Han River Estuary	30	54.5~61.2	57.6 \pm 0.3	86.9~126.0	106.0 \pm 1.5	14.8~26.8	21.5 \pm 0.5	Kim <i>et al.</i> , 2013
East China Sea	-	51.3~61.2	55.8 \pm 2.7	-	-	-	-	Shinoda <i>et al.</i> , 2011
Nakdong River Estuary	150	51.0~63.6	56.5 \pm 0.2	33.6~133.2	70.9 \pm 1.4	10.1~29.1	16.5 \pm 0.3	This study

Abbreviations: Glass eel, *Anguilla japonica*

Table 2. Mean values and standard error of C and N content of the samples collected in the western and southern coast estuaries of Korean peninsula

Sampling site	Sample No.	Glass eel		References
		C(%)	N(%)	
Youngsan River Estuary	6	43.8±0.4	10.7±0.1	Kim <i>et al.</i> , 2013
Geum River Estuary	6	43.3±0.2	10.6±0.1	Kim <i>et al.</i> , 2013
Han River Estuary	6	43.2±0.2	10.4±0.1	Kim <i>et al.</i> , 2013
Nakdong River Estuary	30	51.0±0.8	13.9±0.1	This study

Abbreviations: Glass eel, *Anguilla japonica*

50.7±0.4, 11.7±0.3; 단위: %)은 각각 50.8±0.3%, 11.4±0.1%이었고 탄소/질소비는 4.5로서 상대적으로 질소함량이 높았으며, 이러한 영양성분을 바탕으로 양식산 뱀장어는 고단백질의 뱀장어로 성장하는 것으로 판단된다(미발표자료). 또한, 자연에서 채집된 유럽산 뱀장어 성어의 경우 탄소/질소비는 3.1-3.3으로 낮은 값을 보이고 있었다(Kiljunen *et al.*, 2006).

Chow *et al.*(2010)에 의하면 실뱀장어의 $\delta^{13}\text{C}$ 값은 $-21.4\pm 0.3\%$ 이었고, Miyazaki *et al.*(2011)은 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 먹이원으로 추정되는 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. 자연의 수서 생태계에서 먹이망에 의한 영양단계별 증가율(영양단계 증가에 따른 분별 trophic fractionation: 무거운 원소의 축적)은 $\delta^{13}\text{C}$ 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 입자유기물질은 영양단계별 안정동위원소 증가비는 이 범위들과 잘 일치하였다. 연구 해역인 낙동강 하구에서 채집되는 실뱀장어의 평균 $\delta^{13}\text{C}$ 값 및 $\delta^{15}\text{N}$ 값은 각각 $-20.9\pm 0.2\%$, $6.1\pm 0.1\%$ 으로써 마리아나 열도 근해와 북적도 해류계에서 채집된 뱀장어 자어에서 나타나는 비들과 매우 유사한 값을 보였는데, 이와 같은 결과는 낙동강 하구에서 채집된 실뱀장어가 앞서 Kim *et al.*(2013)에서 발표된 자료와 마찬가지로 뱀장어 자어의 먹이원과 같은 먹이를 섭취하며 이동했을 것으로 추정할 수 있다. Kim *et al.*(2013)에 의하면 실뱀장어를 채집한 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 안정동위원소비 값은 영산강 하구에서 탄소가 $-18.8\pm 0.4\%$, 질소가 $11.3\pm 1.9\%$ 이었고, 금강 하구에서 탄소가 $-20.0\pm 0.4\%$, 질소가 $7.5\pm 1.2\%$ 이었으며, 영산강 및 금강하구에서 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 $3.7\pm 0.5\%$ 로 나타났다. 일반적으로 알려진 영양단계의 증가에 따른 안정동위원소비 값의 증가율과는 큰 차이를 보일 뿐만 아니라, 실뱀장어의 먹이원으로 추정되는 POM과 식물플랑크톤의 $\delta^{13}\text{C}$ 및 $\delta^{15}\text{N}$ 값은 서해안 및 동중국해 북부해역과 산란장으로 알려진 마리아나 열도 근해 및 북적도 해류 사이에 매우 큰 차이를 보였다(Miyazaki *et al.*, 2011; Kim *et al.*, 2013; Fig. 5). Choy *et al.*(2008)에

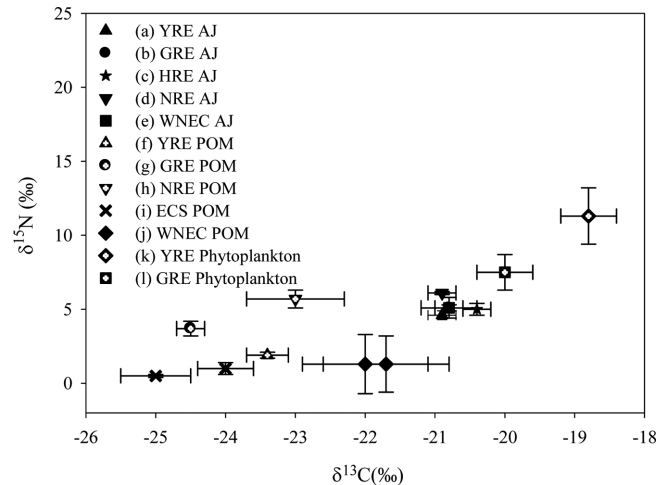


Fig. 5. Dual plots of $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ of *Anguilla japonica* (a, b, c, d: glass eel; e: leptocephalus) and their potential food sources. (a, b, c, f, g, i, k, l): Data are derived from Kim *et al.* (2013). (e, j): Data are derived from Miyazaki *et al.* (2011). (h): Data are derived from Choi *et al.* (2008). Abbreviations: YRE, Youngsan River Estuary; GRE, Geum River Estuary; HRE, Han River Estuary; NRE, Nakdong River Estuary; WNEC, Western North Equatorial Current; ECS, East China Sea; AJ, *Anguilla japonica*; POM, particulate organic matter.

의하면 낙동강 하구에서 조사된 POM의 $\delta^{13}\text{C}$ 및 $\delta^{15}\text{N}$ 값은 각각 $-23.0\pm 0.7\%$, $\delta^{15}\text{N}$ 값은 $5.7\pm 0.6\%$ 으로써 금강하구와 비슷한 값을 보이고, 상대적으로 실뱀장어의 먹이원으로서의 가능성은 희박한 것으로 나타났다. Yu *et al.*(2008)는 동중국해 주변해역과 대한해협의 표층에서 입자유기물질을 분석한 결과 $\delta^{13}\text{C}$ 값은 $-23.5\sim -23.0\%$, $\delta^{15}\text{N}$ 값은 $0.5\sim 1.9\%$ 의 범위로 Kim *et al.*(2013)의 결과와 유사한 비값들을 가지는 것으로 나타났다(Fig. 5). 따라서, 이상의 결과에서 나타난 $\delta^{13}\text{C}$ 과 $\delta^{15}\text{N}$ 값의 분포는 남서해안과 동중국해 북부해역의 POM은 우리나라 연안으로 회유하는 실뱀장어의 주요한 먹이로써 이용될 가능성이 낮다는 것을 알 수 있다(Kim *et al.*, 2013). Kawakami *et al.*(1999)에 의하면 일본 북부 큐슈지역 Saigo 강의 입구에서 채집된 실뱀장어의 장에서는 먹이를 발견할 수 없었고, 먹이가 충분히 공급되지 않은 상태에서 물의 온도가 상승함으로 인하여 신선대사 에너지가 필요할 때에는 복강에 있는 지질을 이용하여 에너지를 충족한다고 하였다. 또한, 뱀장어 자어는 마리아나 해구 부근에서부터 오끼나와 북부까지만 채집되었고, 실뱀장어는 동중국해에서만 채집되었다(Shinoda, *et al.*, 2011; Tsukamoto, 2006). 따라서, Kim *et al.*(2013)의 결과에 의한 동중국해의 POM과 우리나라 연안의 POM은 유사한 경향을 보이는 것, 마리아나 해구 부

Table 3. Mean values and standard error of $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ for the different trophic compartments collected in the western and southern coast estuaries of Korean peninsula, the East China Sea and Western NEC

Sampling site	Sample No.	Glass eel		POM		References
		$\delta^{13}\text{C}(\text{‰})$	$\delta^{15}\text{N}(\text{‰})$	$\delta^{13}\text{C}(\text{‰})$	$\delta^{15}\text{N}(\text{‰})$	
Youngsan River Estuary	6	-20.9±0.2	4.6±0.3	-23.4±0.3	4.6±0.3	Kim <i>et al.</i> , 2013
Geum River Estuary	6	-20.8±0.2	5.1±0.2	-24.5±0.2	5.1±0.2	Kim <i>et al.</i> , 2013
Han River Estuary	6	-20.4±0.2	5.0±0.4	-	-	Kim <i>et al.</i> , 2013
East China Sea	4*	-	-	-24.0±0.4	1.0±0.4	Kim <i>et al.</i> , 2013
	5**	-	-	-25.0±0.5	0.5±0.1	
Western NEC	101	-20.8±0.4	5.1±0.7	-22.0±0.9	1.3±2.0	Miyazaki <i>et al.</i> , 2011
Nakdong River Estuary	30	-20.9±0.2	6.1±0.1	-	-	This study

Abbreviations: Glass eel, *Anguilla japonica*; NEC, North Equatorial Current; POM, particulate organic matter; *: surface, **:50 m.

근의 뱀장어 자어와 영산강, 금강, 한강 하구에서 채집된 실뱀장어의 안정동위원소가 비슷하다는 점, 실험실 환경에서 인공사료($\delta^{13}\text{C}$, -20.2±0.1‰; $\delta^{15}\text{N}$, 8.6±0.9‰)의 섭이를 통하여 성장한 뱀장어 자어가 실뱀장어로 변태한 후 동일 인공사료를 주었지만 한달 정도 먹이를 먹지 않고 살고 있는 것이 관찰된 것 등의 사실들로 부터 영산강, 금강, 한강 하구에서 채집된 실뱀장어는 연안에서 섭이 활동을 하지 않았을 것으로 추정된 바와 마찬가지로 낙동강 하구에서 시기를 달리하여 채집된 실뱀장어에서도 연안에서 섭이 활동을 하지 않았을 것으로 추정된다. 실뱀장어의 섭이 형태에 대한 연구는 우리나라 연안으로 회유하는 자연산 실뱀장어를 채집·양식 하고 있는 양만 산업의 활성화에 기여할 뿐만 아니라, 인공사육을 통해 부화한 뱀장어 자어가 변태하여 실뱀장어에서 원활한 먹이 활동을 유지할 수 있도록 인공적으로 조성하는 사육 시스템의 수생환경과 먹이생물에 대한 문제점 해결의 실마리를 풀어 줄 수 있다는 점에서 시사하는 바가 크다. 또한, 뱀장어 자어와 실뱀장어 먹이원 연구를 위해 뱀장어의 회유 경로, 뱀장어 자어와 변태중인 실뱀장어를 확보하는 동시에 자원 및 생태 조사를 위하여 해양 잠수정 등을 이용한 산란해역 생태조사가 병행 되어야 할 것으로 판단 된다.

결 론

뱀장어는 우리 나라에서 많은 사람들이 즐겨 찾는 보양식으로 알려져 있으나, 최근 채집 불황 등으로 인한 가격 상승으로 경영의 어려움이 나타나고 있으며, 생산단가를 낮추기 위한 사료 및 사육 시스템을 개발 중에 있다. 또한, 한편에서는 인공종묘 생산에 의한 완전 양식을 위하여 뱀장어 우량 수정란 대량생산 기술 접목으로 인공 실뱀장어 생산에 많은 노력을 기울이고 있다. 이러한 시점에서 마리아나 해구에서 산란된 뱀장어 자어는 복제도 해류와 쿠로시오 해류를 따라 우리 나라로 회유하는 동안 실뱀장어로의 변태과정을 거치게 되는데 안정동위원소에 의한 최근의 결과에 의하면 뱀장어 자어의 먹이원이 입자유기물질로 밝혀졌다. 앞서 연구된 결과에 의하면 우리나라 서해안에서 채집되는 실뱀장어의 경우 뱀장어 자어에서 실뱀장어로의 변태 이후에는 먹이를 먹지 않고 회유하는 것으로 밝혀 졌으나, 이러한 결과가 우리나라 전역에 걸쳐서 이루어 지는지를 알아보고, 낙동강 하구에서 채집되는 실뱀장어의 먹이원에 대하여는 시기적으로 어떻게 되는지를 알아보기

위하여 탄소 및 질소 안정동위원소를 이용하여 분석한 결과는 다음과 같다. 실뱀장어의 안정동위원소비 값은 마리아나 해구에서 산란된 뱀장어 자어와 앞서 우리나라 영산강 하구, 금강 하구 및 한강 하구에서 채집된 실뱀장어와 동일한 것으로 나타나 우리나라 남·서해안에서 채집되는 실뱀장어는 뱀장어 자어 단계에서는 먹이를 섭이 하지만 실뱀장어로 변태 이후 회유하는 동안 먹이를 섭이 하지 않는 것으로 나타났다.

사 사

이 논문은 2016년도 국립수산물과학원 수산과학연구사업(R2016055)의 지원으로 수행된 연구이며 연구비 지원에 감사드립니다. 논문의 심사를 맡아주신 세 분의 심사위원님께도 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.
- 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.
- 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.

- 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.
- Hwang, S.D., T.W. Lee, I.S. Choi and S.W. Hwang, 2014. Environmental factors affecting the daily catch levels of *Anguilla japonica* glass eels in the Geum River estuary, South Korea. *J. Coastal Res.*, **30**: 954–960.
- Kiljunen, M., J. Grey, T. Sinisalo, C. Harrod, H. Immonen and R.I. Jones, 2006. A revised model for lipid-normalizing $\delta^{13}\text{C}$ values from aquatic organisms, with implications for isotope mixing models. *J. Appl. Ecol.*, **43**: 1213–1222.
- Kim, J.B., W.-C. Lee, D.-J. Kim, K.B. Seong, H.-G. Choi, W.-J. Choi, H.B. Hwang, S. Hong, H.C. Kim, S.-E. Park, J.H. Shim and C.-K. Kang, 2013. Food habits of the glass eel *Anguilla japonica* in the west coast estuaries of Korean peninsula determined by using C and N stable isotopes. 「The Sea」 *J. Kor. Soc. Oceanogr.*, **18**(4): 206–213.
- Kim, K.H., 2010. Isotope geochemistry. Sigmapress, Seoul, 401 pp.
- 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 ^{15}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 anguillid 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, Taejeon, 111 pp.
- NFRDI, 2012. Development of Rearing Technique in Eel, *Anguilla japonica*. 2011 Report of National Fisheries Research & Development Institute., 53 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.
- Yoo, S.K., 1994. Introduction to Aquaculture. Kudukpress, Busan, pp. 114–116.

2015년 5월 25일 원고접수

2015년 8월 18일 수정본 접수

2015년 11월 9일 수정본 채택

담당편집위원: 양은진