

Original article

## 화합물안정동위원소 분석법을 활용한 낙동강 이입종 강준치 *Chanodichthys erythropterus*의 영양단계 해석

원은지<sup>1,2</sup> · 조하은<sup>2</sup> · 김도균<sup>2</sup> · 최지웅<sup>3</sup> · 안광국<sup>4</sup> · 신경훈<sup>1,2,\*</sup>

<sup>1</sup>한양대학교 해양대기과학연구소, <sup>2</sup>한양대학교 해양융합과학과, <sup>3</sup>(주)다운에코, <sup>4</sup>충남대학교 생명과학과

**Interpretation of Trophic Positions Using the CSIA Approach: Focusing on the Invasive Fish Lake Skygazer *Chanodichthys erythropterus*.** Eun-Ji Won<sup>1,2</sup> (0000-0001-6766-6307), Ha-Eun Cho<sup>2</sup> (0000-0002-2075-7399), Dokyun Kim<sup>2</sup> (0000-0002-5369-569X), Ji-Woong Choi<sup>3</sup> (0000-0002-2114-0622), Kwang-Guk An<sup>4</sup> (0000-0003-2018-580X) and Kyung-Hoon Shin<sup>1,2,\*</sup> (0000-0002-3169-4274) (<sup>1</sup>Institute of Ocean and Atmospheric Sciences (IOAS), Hanyang University, Ansan 15588, Republic of Korea; <sup>2</sup>Department of Marine Science and Convergent Technology, Hanyang University, Ansan 15588, Republic of Korea; <sup>3</sup>Daon Eco. Co., Ltd., Sejong 30081, Republic of Korea; <sup>4</sup>Department of Bioscience and Biotechnology, Chungnam National University, Daejeon 34134, Republic of Korea)

**Abstract** Invasive predators are one of the most damaging species groups to biodiversity. In the Nakdong River, the lake skygazer *Chanodichthys erythropterus* is a dominant species that is fiercely carnivorous and a concern for commercial fish. Although it is important to understand the ecological characteristics related to the feeding habit, studies on the diets of lake skygazer in Nakdong River have been limited to studies of gut contents. In this study, the trophic position (TP) and feeding habits of *C. erythropterus* were studied by calculating TPs using samples collected from 13 sites throughout the Nakdong River. Compound-specific isotopic analysis of amino acids provided reliable TPs from the muscle of Lake skygazer *C. erythropterus* without any isotope baseline. The results were approximately 3 to 3.6 and suggesting a carnivorous but size-dependent prey variation. In particular, the TP variability of *C. erythropterus* observed in the Nakdong River showed that it had a selective feeding habit compared to carnivorous fish species of relatively similar trophic levels.

**Key words:** invasive species, compound specific isotopes analysis (CSIA), amino acids, trophic amino acids, source amino acids

### 서론

담수생태계를 구성하는 생물간 관계는 종내 경쟁뿐 아니라 종간 경쟁, 포식, 공생 등으로 연결되어 있으며, 특히 생물의 섭식활동은 생태계 구조 형성에 영향을 미친다

(Thompson *et al.*, 2012). 일반적으로 포식자는 생태계 구조를 결정하는 중요한 구성 요소이며 (Karr, 1981; Rodríguez-Lozano *et al.*, 2015), 이와 관련해 mesopredator release hypothesis (Soulé *et al.*, 1988; 크기가 큰 포식자가 통제된 상황에서 중간 크기의 포식자가 풍부해지는 과정을 설명하는 가설)나 이입종 (invasive species)에 의해 섭식관계에 있는 생물 군집에 관찰되는 변화 등 생태계 먹이구조의 변화 연구가 꾸준히 진행되고 있다 (Carey and Wahl, 2010).

Manuscript received 30 August 2023, revised 19 September 2023, revision accepted 21 September 2023

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

© The Korean Society of Limnology. All rights reserved.

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

생태계에서 특정 포식종의 증감에 영향을 미칠 수 있는 원인은 다양한데, 인위적 활동, 환경 오염, 그리고 기후 변화를 포함하는 서식처의 환경 변화도 이에 포함된다. 따라서 지금까지 이 같은 원인에 의한 수생태계 구조의 변화를 모니터링하는 것은 수생태계 관리를 위해 필요한 연구임에 일반적인 합의가 있어왔다.

강준치 *Chanodichthys erythropterus* (Basilewsky, 1855)는 잉어목(Cypriniformes), 잉어과(Cyprinidae)에 속하는 어류로 최근 낙동강에서 우점도가 높아졌으며 이에 의해 수생태계 구조와 생물 다양성을 낮추는 등의 생태계 균형을 교란시키고 있다고 보고되어 많은 관심을 받고 있다(Jeong and Han, 2018). 이 종은 특히 강의 중·하류의 수심이 깊고 흐름이 느린 곳에서 주로 발견되고, 전장 약 100 cm까지 성장하는 큰 크기의 담수성 어종이다(FishBase, <http://www.fishbase.org>). 우리나라에서는 2000년대 초반 팔당호에서 우점종으로 확인되었고 최상위 포식자로 강한 육식성 섭식 특성에 대해 조사된 바 있다(Son and Byeon, 2001). 그러나 이 종이 우리나라 대부분의 담수 환경에 분포했던 것과 달리 낙동강 수계에는 원래 서식하지 않았던 종이었으며(Kim and Park, 2002), 2004년 낙동강 수계에 이입된 이후 점차적으로 개체수가 증가하여 최근 낙동강 수계 전 구간에 우점하여 출현하게 됨에 따라 수생태계 구조와 생물다양성을 낮추는 등, 생태계 균형을 교란시키고 있는 것으로 알려져 있다(Jeon, 1999; Jang *et al.*, 2001; Jeong and Han, 2018). 현재 국가장기생태연구로 조사되고 있는 낙동강 본류의 모든 조사지점과 낙동강 배후습지인 우포늪에도 출현함에 따라 환경부는 낙동강 수생태계에서 강준치를 이입종으로 분류하였다(MOE, 2016).

낙동강에서의 강준치 우점은 토착어종에 대해 영향을 미칠 것으로 여겨지고 있는데 이는 강준치와 같은 육식성 어종의 높은 구성비가 기존의 먹이망의 교란에 있어 주원인이 될 수 있기 때문이다. Kim(2002)과 Yoon *et al.* (2018)은 정수성 어종인 강준치가 포식력과 번식력, 그리고 내성도가 높아 타 수계에 정착하게 될 경우 토착종의 감소를 야기할 수 있음을 지적한 바 있다. 유사하게 Capps and Flecker (2013)은 멕시코강에 도입된 메기류를 대상으로 한 실험에서 이입된 어종이 새로운 환경에서 높은 밀도를 차지하는 경우 담수생태계에서 영양분의 저장 및 순환, 즉 먹이구조와 관계를 재구성할 수 있음을 보여주었다. 또한 강준치가 강의 중 하류의 흐름이 완만한 곳을 선호하여 서식하기 때문에 낙동강의 경우 보 설치로 인한 수위 변화와 정수성 수역의 면적이 넓어진 이후 우점도가 높아졌다고 추정되고 있으며(MOE, 2021), 해당 지역의 어업활동에 영향을 끼칠 수 있을 것이라는 우려로 급격한 개체수의 증가

에 대한 국가의 규제, 수매사업 등 다양한 방안이 강구되고 있는 중이다(MOE, 2021).

그러나 강준치에 대한 최근 연구는 식용으로서의 생화학성분에 대한 국외 연구(Li *et al.*, 2009; Kindong *et al.*, 2017), 국내 연구로는 한강에 서식하는 주요 세 육식 어종의 식성 연구 중 대상 종으로 위 내용물 분석법에 기반 해 먹이가 연구된 바 있으며(Son and Byeon, 2001), 수생태 어류상 조사 결과 내 우점도(Jeong and Han, 2018, Byeon 2019) 및 중하류에서 음향수신기를 이용한 이동성 연구(Yoon *et al.*, 2012), 그리고 폐사와 관련된 기생충(조충)에 관한 연구(Heo *et al.*, 2018)로 한정되어 수행되었다. 특히 낙동강에 서식하는 강준치에 대해서는 최상위 포식자라고 알려져 있음에도 다른 어종과 함께 생태계 먹이 구조 해석을 시도한 연구에서 대상 어종 중 하나로 조사된 예(Oh *et al.*, 2019)를 제외하면 이 어종이 야기하는 생태학적 문제를 설명하고 대응하는 데에 중요한 정보인 섭식 특성과 영양학적 지위(영양 단계, trophic position)에 대한 연구는 아직까지 수행된 바 없다. 강준치의 생태계 내에서의 영양학적 지위의 검토는 상업성 어종에 대해 발생하는 민원과 관련해 강준치의 개체수 조절 및 상업성 어종 유지 관리에 있어서 중요한 자료가 될 수 있다.

어류의 섭식 특성에 대한 연구를 위한 다양한 방법이 존재하는데, 위 내용물을 동정하여 분석하는 방법(microscopic approach)과 위 내용물 중 남아있는 먹이생물의 유전자 정보 분석을 이용하는 방법(metagenomic approach) 등이 있으며 섭식 관계를 해석하는 안정동위원소비 분석 기법(stable isotope analysis approach)이 있다. 이 중 탄소와 질소 안정동위원소비는 각각 먹이원과 영양학적 지위(영양단계)에 대한 정보를 나타낼 수 있어 수생태계에서 다양한 생물을 대상으로 먹이구조를 해석하는 방법에 유용하게 활용될 수 있다. 특히 질소 안정동위원소비는 1차 생산자의 값에서 섭식 단계에 따라 거의 일정한 증가(약 3.4‰)를 하기 때문으로 1차 생산자의 질소비와의 차이를 통해 영양단계를 파악할 수 있다. 강준치를 포함한 여러 어종에 대한 먹이 구조를 해석한 선행 연구에서는 5개의 보에서 육식, 잡식, 저서성 섭식길드를 갖는 7개 어종에 대해 영양단계를 비교 조사 하였으나(Oh *et al.*, 2019), 총 질소 안정동위원소비를 이용한 영양단계 산출 방법은 낙동강과 같은 넓은 수역을 대상으로 하는 연구에서는 해석의 결과의 신뢰도가 낮을 수 있다는 결과가 보여지기도 했다. 실제로 본 연구의 저자는 해당 연구 역시 섭식길드 및 서식특성, 또한 강우 시기에 따라 지점별, 시기별 탄소 안정동위원소비 값의 분포 경향이 상이하게 나타나는 등 먹이의 다양성이 확인되는 결과를 바탕으로 영양단계를 산

출하기 위한 질소 안정동위원소비의 기준 값을 입자성 유기물과 동물플랑크톤으로 지정할 경우 나타나는 변동에 대한 문제를 제기하였다(Oh *et al.*, 2019). 이는 다양한 질소의 유입으로 1차 생산자(식물플랑크톤)의 질소안정동위원소비가 변동성을 갖는 반면 상위 영양자인 어류의 질소 turnover rate가 길어 그 값을 비교하는 것에서 발생하는 차이를 의미한다(Choi and Shin, 2021).

최근 이를 대체할 수 있는 방법으로 개체의 아미노산 질소 안정동위원소비를 이용해 영양단계를 해석하는 기법이 주목 받고 있다(Chikaraishi *et al.*, 2007; Choi *et al.*, 2020; Won *et al.*, 2022). 이는 생물체 내 먹이로부터 기인하는 아미노산의 대사의 특징을 활용한 방법으로 먹이의 값을 반영하고 있는 source amino acid와 대사의 정도, 즉 영양단계의 결과를 보여주는 trophic amino acid의 동위원소비를 이용하는 계산법으로, 영양단계 상에서 비교적 큰 분별 값을 갖는 trophic amino acid와 영양단계에서 거의 변화되지 않는 source amino acid 사이의 차이를 이용한다. 특히 이 기법은 먹이생물 없이 목표로 하는 대상 시료(e.g., 어류)만으로 생태계 내 생물의 신뢰도 높은 영양학적 지위를 해석할 수 있다는 장점으로 강준치와 같이 넓은 수역을 유영하며 다양한 먹이를 먹는 어류에 대해서는 가장 유용한 방법으로 여겨진다.

본 연구에서는 아미노산의 질소안정동위원소 분석기법을 활용하여 낙동강 전 수역에서 채집된 강준치의 영양단계를 해석해보고자 하였으며 특히 다른 어종의 분포와 강준치의 크기에 따른 영양단계의 변화를 측정하고 낙동강에서 조사된 문헌으로부터 확인한 다른 어류의 값들과 비교를 통해 이들의 섭식 특성을 확인해보고자 하였다.

## 재료 및 방법

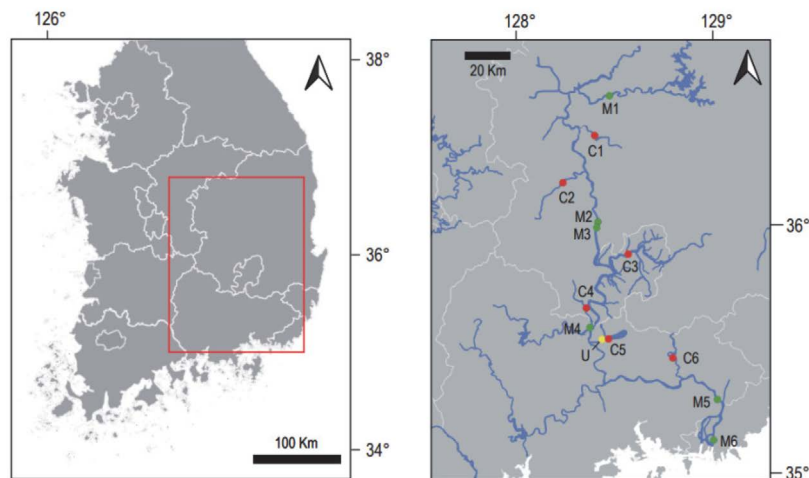
### 1. 조사지점

낙동강은 총 유로 연장이 525 km, 유역면적이 23,860 km<sup>2</sup>의 남한에서 가장 긴 강으로 부산광역시, 대구광역시를 포함 주요 도시를 거치며 이들 도시의 상수원과 농·공업용수로 이용되고 있다. 용수의 효율적인 이용을 위해 총 4개의 다목적 댐과 염분의 유입으로 인한 서낙동강 유역 피해를 줄이기 위해 하굿둑이 운영되고 있으며 상류에서부터 하류까지 4대강 사업에 일환으로 설치된 10개의 보가 위치해 있다.

본 연구에서는 낙동강의 상류에서 하굿둑까지 총 13개의 지점(본류: 안동 M1, 칠곡 M2, 왜관 M3, 적포 M4, 물금 M5, 하굿둑 M6/ 지류: 위천 C1, 감천 C2, 금호강 C3, 회천 C4, 토평 C5, 밀양 C6, 우포 U)을 선정하였다. 정점 부근 위치한 보는 본류의 칠곡과 왜관 사이(칠곡보), 왜관 하류 부근(강정고령보), 회천 상류 부근(달성보), 적포 하류 부근(합천강령보), 밀양 상류 부근(창녕함안보)이다(Fig. 1).

### 2. 어류 시료 채집 및 보관

강준치와 공서종의 채집은 2020년 9월과 10월 사이 수행되었다. 어류의 채집은 EPA의 방법을 우리나라 특성에 맞게 수정, 적용한 An *et al.* (2001)의 방법을 따랐으며, 조사구간 내 다양한 서식지 유형을 모두 포함하여 채집하였다. 채집도구는 투망(cast net, 7×7 mm), 족대(kick net, 5×5 mm) 및 정치망(유도망 길이 20 m, 유도망 높이 2 m, 망목 4 mm, 포켓 3개)을 이용하였으며, 조사정점의 하천



**Fig. 1.** Sampling sites of Nakdong River. The lake skygazer *Chanodichthys erythropterus* and co-existence species were collected at each site from 22 Sept to 8 Oct 2020.

규모와 수심에 따라 본류에서는 정치망, 수변부와 지류에서는 투망과 족대를 이용하는 등 현장에 적합한 어구를 사용하였다. 채집된 시료는 현장에서 형태학적 분류를 통해 강준치 *C. erythropterus*와 이외의 어종에 대해 동정 후 종별 개체 수를 파악하였으며 강준치의 경우 지점별 다양한 크기의 개체가 확보가 되는 것에 초점을 두고 채집을 수행하였다. 조사 기간 동안 본류와 지류를 포함한 13개 정점에서 채집된 개체 중 지점별 개체의 평균 크기를 고려한 총 73개체를 선정하여 이들의 전장과 무게를 측정하였고, 이 중 영양단계 분석의 신뢰성 확보를 위한 비교가 가능하도록 유사한 크기와 질량을 고려한 35개체를 선택하여 아미노산 질소 안정동위원소비 분석에 이용하였다. 단, 유사한 크기와 질량의 개체가 채집되지 않은 지점에서는 가능한 시료를 선정하였다. 분석을 위한 35개체의 강준치는 현장에서 등 근육(dorsal muscle)을 적출해 냉동하여 실험실로 이동하였다. 아미노산 질소 정동위원소비 분석에 이용된 강준치 시료의 평균 체중은 271.2 g (최소 1.8 g (도령), 최대 916.0 g (왜관))이었으며 전장은 58.0~500.0 mm (평균 305.5 mm)였다.

### 3. 정점별 공서 우점종 및 먹이 후보종의 우점도

강준치 이외의 어종에 대해서는 본류 조사 지점에서 채집된 개체를 대상으로 우점종과 아우점종을 분석하고, 특히 강준치의 먹이 후보군으로서의 특징(유형 특성 및 어류의 크기)을 갖는 어종을 조사하였다. 먹이후보로는 현장에서 채집된 평균 개체의 전장과 체고를 고려하였으며 특히, 강준치 위 내용물에서 유전자를 바탕으로 조사된 어종 정보를 참고하였다(MOE, 2021). 먹이후보로는 납자루(*Tanakia lanceolata*), 참붕어(*Pseudorasbora parva*), 참물개(*Squalidus glaucilis*), 누치(*Hemibarbus labeo*), 피라미(*Zacco platypus*), 꼬리(*Opsariichthys uncirostris*), 치리(*Hemiculter leucisculus*), 돌고기(*Pungtungia herzi*), 블루길(*Lepomis macrochirus*), 민물검정망둑(*Tridentiger brevispinis*) 등을 포함하였다.

먹이후보종의 풍부도는 상대풍부도 계산을 참고로 하여 지점별 2회 어류상 총 조사 결과를 바탕으로 조사된 총 개체수 대비 먹이후보의 종수와 개체 수를 이용하여 계산하였다.

$$\text{먹이원 상대풍부도}(\%) = \frac{\text{먹이후보군 개체수}}{\text{어류 총개체수}}$$

### 4. 안정동위원소비 분석

현장에서 해부된 어류의 등 근육은 안정동위원소비 분

석을 위해  $-80^{\circ}\text{C}$ 에 보관 후 동결 건조 및 균질화시켜 보관하였다. 유기탄소 안정동위원소비( $\delta^{13}\text{C}$ -bulk) 분석은 염산(1N)과 chloroform/methanol (2 : 1, v/v)을 이용해 무기탄소와 지질성분을 제거한 후 건조 균질화를 실시한 시료에 대해 안정동위원소 측정용 질량분석기(IRMS, Isotope Ratio Mass Spectrometers, Isoprime, UK)를 이용하여 측정하였다. 탄소에 대한 표준물질은 각각 Vienna Pee-Dee Belemnite (VPDB)로 원소 존재 비를 비교하여 천분율(‰)로 계산하였다.

어류 시료의 아미노산 질소 안정동위원소비( $\delta^{15}\text{N}_{\text{AAs}}$ ) 분석을 위한 전처리는 Chikaraishi *et al.* (2007)에 의해 정립된 가수분해 및 유도체화 과정을 이용하였다. 균질화된 약 5 mg의 등 근육 시료를 HCl (6 M)을 이용하여  $110^{\circ}\text{C}$ 에서 반응(12~24 hr)시켜 가수분해를 진행하였다. 이후 hexane : dichloromethane (6 : 5, v/v)을 시료에 첨가하여 지질을 제거한 후, Thionyl chloride : 2-propanol (1 : 4, v/v)과 pivaloyl chloride : dichloromethane (1 : 4, v/v)을 시료에 첨가하여  $110^{\circ}\text{C}$ 에서 2시간 동안 반응시켜 유도체화 반응을 진행하였다. 아미노산 질소 안정동위원소비( $\delta^{15}\text{N}_{\text{AAs}}$ ) 분석은 가스크로마토그래피(Agilent 6890N, Agilent, California, USA)와 Isoprime사의 안정동위원소 질량분석기(Isoprime 100)를 연결한 가스크로마토그래피-안정동위원소 질량분석기(Gas Chromatography-Combustion-Isotope Ratio Mass Spectrometry, GC-C-IRMS)를 이용하여 분석하였다. GC oven 내 조건은  $40^{\circ}\text{C}$ 에서 2.5분 동안 유지 후,  $15^{\circ}\text{C min}^{-1}$ 의 속도로  $110^{\circ}\text{C}$ 까지 승온,  $3^{\circ}\text{C min}^{-1}$ 의 속도로  $150^{\circ}\text{C}$ 까지 승온, 이후  $6^{\circ}\text{C min}^{-1}$ 의 속도로  $220^{\circ}\text{C}$ 까지 승온시킨 후 17.3분간 유지하였다. 이동상(He gas)의 flow rate는  $1.2 \text{ mL min}^{-1}$ 으로 설정하였다. 산화관은 CuO, NiO, Pt wire가 충전된 석영관을  $950^{\circ}\text{C}$ 에서 가열하여 사용하였으며, 환원관은 Cu, Rh wire가 충전된 세라믹관을 상온에서 사용하였다. 시료의  $\delta^{15}\text{N}_{\text{AAs}}$  분석의 정확성을 확인하기 위해 질소 안정동위원소비가 알려진 아미노산 표준 물질을 10개의 시료마다 분석하여 이를 이용하여 시료의 값을 보정하였다. 각 아미노산 표준 물질의 질소 안정동위원소비는 시료의  $\delta^{15}\text{N}_{\text{AAs}}$ 의 보정 과정에서 0.7‰ 미만의 표준 오차를 나타내었다.

### 5. 영양단계(Trophic position, TP) 산출

영양단계 산출은 아미노산의 질소안정동위원소비  $\delta^{15}\text{N}_{\text{AAs}}$ 를 이용하였다. 계산을 위해서 glutamic acid (glu)와 phenylalanine (phe)의 질소 안정동위원소비를 각각 trophic amino acid와 source amino acid로 하였으며 다음과 같은 식을 사용하였다.

$$TP_{AAs} = \left[ \frac{(\delta^{15}N_{Glu} - \delta^{15}N_{Phe} - \beta)}{TDF} \right] + 1$$

해당 식은 섭식에 의한 영양단계 상에서 glutamic acids의  $\delta^{15}N$ 가 약 8.0‰ 정도 비교적 크게 증가하여 영양단계에 대한 정보를 제공하고 (trophic amino acid), phenylalanine의  $\delta^{15}N$ 는 먹이전이에 따라 거의 변화되지 않기 때문에 먹이원 (source amino acid)에 대한 정보를 제공할 수 있다는 점을 활용한다.  $\beta$ 는 경험 식에 의한 상수로 수생태계 내 일차생산자에서 관찰되는  $\delta^{15}N_{Glu}$ 와  $\delta^{15}N_{Phe}$ 의 차이값 (3.4‰)을 사용하였고 (Chikaraishi *et al.*, 2015), trophic discrimination factor (TDF)는 6.9‰을 사용하였다 (Blanke *et al.*, 2017).

영양단계의 변동성은 평균 영양단계 ( $TP_{avg}$ )와 각 개체의 영양단계 ( $TP_{ind.}$ )의 차이를 이용해 나타내었다.

$$TP_{variability} = TP_{ind.} - TP_{avg.}$$

## 6. 통계분석

본류와 지류 사이의 개체 크기 및 영양단계에 대한 비교와 개체의 크기와 영양단계의 관계를 비교하기 위해 각각 *t*-test와 Pearson correlation을 이용하였다. 분석은 SPSS 18.0 (IBM Corporation, USA)을 이용하여 이루어졌으며 유의성은 0.05로 하였다.

## 결과 및 고찰

### 1. 낙동강 서식 강준치의 안정동위원소비와 영양단계

본류와 지류의 지점별 강준치 개체특성을 분석한 결과, 강준치의 크기(전장) 및 무게 등의 개체 결과는 유의한 특성을 보이지 않았다. 통계적으로는 본류와 비교하여 지류의 개체 크기가 작았으나 (*t*-test,  $p < 0.01$ ), 이는 토평 (C5)에서 채집된 개체의 크기가 작았던 영향으로 이 지점의 개체를 제외한 경우에는 본류와 지류의 차이 역시 관찰되지 않았다 (*t*-test,  $p > 0.05$ ). 실제로 수심은 강준치 서식에 있어 주요 환경요소 중 하나로 언급되고 있으며 (Byeon, 2019), 낙동강 유역 내 강준치 서식처 조사 결과, 수심과 유속의 변화가 적은 수채안정기에는 수심이 얕은 지류에서 강준치의 상대풍부도 낮고 우점도 또한 낮은 것으로 분석되었다 (MOE, 2021). 또한, 지리적으로 근접한 정점에서 유사한 크기의 개체가 조사되었으나 통계적으로는 모든 조사 정점 및 보의 유무에 따른 개체의 크기 분포에 차이가 관찰되지 않았다 ( $p > 0.05$ ).

강준치의 탄소 안정동위원소비는 안동 (M1)지점을 제외하고 비슷한 값 (약  $-26.4 \pm 0.8\text{‰}$ )을 나타내었다 (Table 1). 안동에서 채집된 개체는 다른 정점과 비교되는 무거운 탄소 안정동위원소비를 가지고 있었으며 (평균  $-23.33\text{‰}$ ), 탄소 안정동위원소비의 유의한 차이가 먹이의 동위원소비를 반영한다고 보았을 때 이 정점에 서식하는 개체가 다른 정점의 개체와 서식지와 섭식에 있어 구분될 수 있음을 보여준다. 안동에서 관찰된 탄소 안정동위원소비의 차이는 다양한 요인에 의한 결과로 해석될 수 있으나 그 중 하나는 안동 (M1)정점이 상주보 보다 상류에 위치해 있으며 넓은 영역에서 유수역의 특성을 갖는 것이다. 유수역은 보의 영향으로 정수역의 특징을 보이는 다른 지점들과 다르게 수심이 낮고 부유성 플랑크톤이 어류의 먹이원이 되기 어려운 조건을 갖는다. 또한, 정수역에 비해 부착조류와 다양한 저서성 대형무척추동물이 서식할 수 있어 이를 먹이로 활용할 수 있다. 탄소 안정동위원소비의 경우 정수역에 비해 유수역에 서식하는 생산자가 무거운 안정동위원소비를 갖는다고 알려져 있으며 이는 유속의 변화에 의해 무기 탄소의 공급 속도가 제한되기 때문 (diffusion effect)으로 설명된다 (France, 1995). 실제로 이후 수행된 연구에서 안동정점에 서식하는 다양한 어류의 탄소 안정동위원소비는 다른 정점에 비해 전체적으로 무거운 탄소 안정동위원소비를 보이고 있는 것이 확인되었으며 (MOE, 2021), 안동정점에서는 부착조류를 주로 섭식하는 것으로 알려진 작은 어종 (돌마자, 돌고기, 납자루 등)이 높은 상대풍부도를 보였다 (MOE, 2021). 보다 정확한 해석을 위해서는 향후 강준치의 서식을 구분지을 수 있는 지역 구획 내에서의 1차 유기물 기여자 (생산자 및 유기물)의 탄소 안정동위원소비의 끝단 값 (end-member) 비교 및 섭식 관계에 있는 주요 어종에 대한 먹이망 연구가 수행될 필요가 있을 것으로 생각된다.

아미노산의 질소 안정동위원소비에 기반한 강준치의 영양단계 (TP)는 최소 2.9에서 최대 3.6 (평균 3.2)로 산정되었다. 상류 (안동, M1)에서 하류 (하굿둑, M6) 방향으로 갈수록 영양단계가 감소하는 경향을 보이나 이 역시 개체의 크기와 정점의 관계에서 관찰된 것과 같이 통계적으로 유의한 변동은 아니었다 ( $p > 0.01$ ). 토평 (C5)에서 채집된 작은 크기 (평균전장 72 mm)의 강준치는 영양단계가 평균 3.0으로 동물플랑크톤과 같은 1차 소비자 (TP=2)를 직접 먹이로 하는 생물을 섭식하고 있다는 것을 추측해 볼 수 있었으며, 결과적으로 낙동강 본류와 지류에 서식하고 있는 강준치가 동물플랑크톤과 같은 1차 소비자 (TP=2)와 2차 소비자 (TP=3), 그리고 1차 생산자를 포함하는 유기물과 이들의 1, 2차 소비자를 먹이로 하는 생물 (TP=2.5)을



**Table 1.** The stable isotope ratios (Avg. (std.)) of specific amino acid (trophic (glutamic acid) and source (phenylalanine) amino acids) and the trophic position (TP) (Avg. (std.)) calculated from the lake skygazer collected from Nakdong River.

Nakdong River	Sites	Isotope values (‰)			TP <sub>glu/phe</sub>
		Bulk Carbon ( $\delta^{13}\text{C}$ )	Glutamic acid (Trophic) ( $\delta^{15}\text{N}_{\text{glu}}$ )	Phenylalanine (Source) ( $\delta^{15}\text{N}_{\text{phe}}$ )	
Main stream	An-dong (M1)	-23.4 (0.2)	27.9 (0.5)	8.3 (1.2)	3.3 (0.2)
	Chil-gok (M2)	-26.5 (0.7)	28.3 (3.5)	8.7 (1.8)	3.4 (0.2)
	Woegwan (M3)	-26.0 (1.1)	30.3 (3.6)	11.2 (3.3)	3.3 (0.1)
	Jeockpo (M4)	-25.8 (0.4)	31.6 (2.2)	13.0 (2.2)	3.2 (0.1)
	Mulgeum (M5)	-26.7 (0.3)	26.8 (2.4)	8.4 (2.0)	3.2 (0.2)
	Estuary (M6)	-26.2 (0.1)	28.4 (0.6)	10.8 (0.0)	3.1 (0.1)
Creeks	Wui-cheon (C1)	-26.2 (0.6)	29.8 (1.1)	10.6 (2.1)	3.3 (0.1)
	Gam-cheon (C2)	-25.8 (0.8)	31.1 (1.5)	11.4 (0.6)	3.4 (0.2)
	Geumho (C3)	-26.5 (0.6)	31.1 (0.8)	12.2 (1.3)	3.2 (0.1)
	Hwe-cheon (C4)	-26.0 (0.1)	30.4 (0.4)	12.1 (0.2)	3.2 (0.1)
	Topyeong (C5)	-27.7 (1.1)	27.0 (2.1)	9.8 (1.3)	3.0 (0.1)
	Milyang gang (C6)	-26.5 (0.7)	22.5 (1.4)	5.6 (0.9)	3.0 (0.1)
Upo wetland (U)		-26.6 (-)	31.4 (-)	12.6 (-)	3.2 (-)
Average (S.D)		-26.1 (1.2)	29.3 (3.5)	10.6 (3.0)	3.2 (0.2)

혼합하여 섭식하고 있음을 보여준다. 반면에 평균 3.6의 높은 영양단계를 갖는 개체는 낙동강의 상류인 안동(M1)과 감천(C2), 칠곡(M2)지점에서 관찰되었다. 이는 낙동강의 상류에 위치한 정점으로 이러한 수치는 해당 수역에 우점하는 것으로 관찰된 어종인 참몰개 (Korean gudgeon *Squalidus gracilis*), 돌고기 (Stonefish *Pungtungia herzi*), 피라미 (Freshwater minnow *Zacco platypus*) 같은 소형 잡식성 어류나 그것들의 치어를 섭식할 수 있음을 보여준다 (Table 2).

### 2. 크기에 따른 영양단계(TP)의 변화

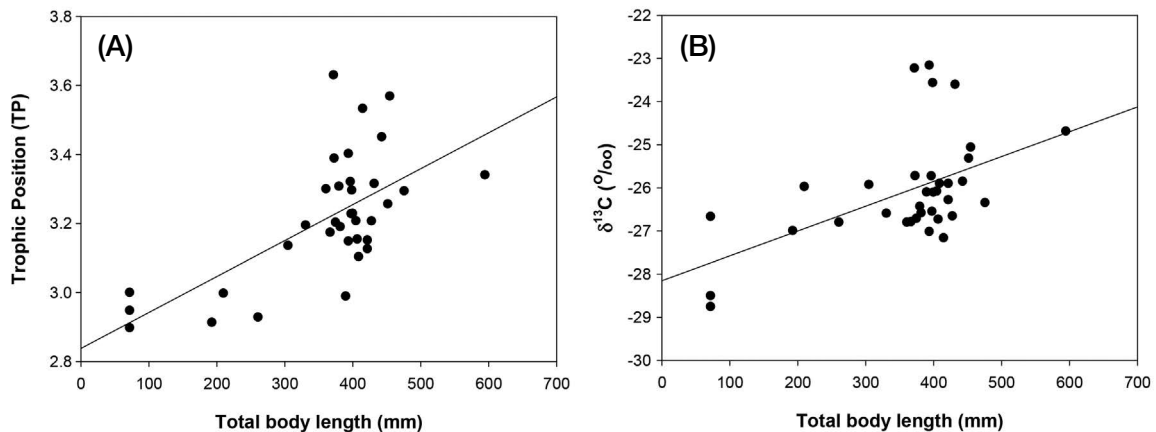
가장 높은 영양단계를 보이는 개체는 상류의 두 정점(안동 M1, 칠곡 M2)에서 채집된 개체였으며 두 정점의 강준치 시료는 평균 전장이 약 40.5 cm (37.2~44.3 cm)으로 그 크기가 타 정점에 비해 컸다. 낙동강 전체 수역에서 조사 분석된 35개체의 크기와 영양단계 관계는 크기(전장)가 커짐에 따라 영양단계가 높아지는 경향을 나타내었다(Fig. 2A, Pearson correlation  $R=0.57, p<0.01$ ). 이 같은 경향은 크기와 강준치의 근육에서 분석된 탄소 안정동위원소비의 관계와도 유사하게 관찰되었다(Fig. 2B). 이는 탄소 안정동위원소비의 값이 먹이가 가진 탄소의 값을 반영함에 따라 (Minagawa and Wada, 1984), 강준치가 성장함에 따

라 이용할 수 있는 유기물(먹이)의 탄소 안정동위원소비의 변화가 있음을 추정하게 한다. 이는 개체가 커지면서 이동 거리와 먹이가 다양해질 수 있는 가능성을 의미하며 실제로 어류의 크기는 먹이의 크기와 종류를 결정하는 데에 있어 중요한 요소라고 보고된 바 있다 (Paul *et al.*, 2017). 성장에 따른 영양단계의 변화는 대부분의 어류가 성장과 같이 입의 크기가 커지기 때문에 섭식할 수 있는 먹이가 다양해지거나, 섭식하는 먹이의 크기가 커짐에 따라 먹이의 영양단계도 증가할 수 있기 때문으로 설명된다 (Paul *et al.*, 2017; Choi *et al.*, 2020). 또한 개체의 이동거리가 큰 육식성 어종의 경우 다양한 환경에서 작은 물고기, 곤충이나 새우와 같은 생물을 섭식할 수 있어 이들의 탄소 안정동위원소비는 넓은 환경의 유기물 값이 반영될 가능성이 높은데, 강준치의 경우 30 cm 이상이 되는 개체의 서식처 범위가 약 10 km 내외로 다른 어종에 비해 넓다고 알려져 있으며 (Yoon *et al.*, 2012), 낙동강의 경우 앞서 언급한 바와 같이 서식환경에 따라 탄소 안정동위원소비의 값이 다른 생산자로부터 기인하는 유기물을 섭취할 수 있기 때문에 크기가 큰 강준치의 넓은 탄소 안정동위원소비는 이들의 이동거리나 넓은 서식 면적 때문으로 해석된다.

또한 본 연구에서 강준치의 먹이 후보가 될 수 있는 기타 공서종 및 1차 생산자(플랑크톤 및 식물)에 대한 탄소 및 질소의 안정동위원소비의 측정이 수행되지 않았으나

**Table 2.** The dominant species and the relative abundance (%) of potential diet species in study sites.

Nakdong River	Sites	Total Individuals			Potential diet			
		Dominant species	Sub dominant species	No. of species	Total number of individuals	No. of potential diet	Total number of individuals	Relative abundance (%)
Main stream	An-dong (M1)	<i>Zacco platypus</i> / <i>Squalidus gracilis</i>	<i>Pungtungia herzi</i>	14	136	7	107	78.7
	Chil-gok (M2)	<i>Chanodichthys erythropterus</i> / <i>S. gracilis</i>	<i>Opsarlichthys bidens</i>	14	168	5	71	42.2
	Woegwan (M3)	<i>Z. platypus</i>	<i>O. bidens</i>	11	170	7	128	75.3
	Jeockpo (M4)	<i>S. gracilis</i>	<i>O. bidens</i>	15	763	6	702	92.0
	Mulgeum (M5)	<i>C. erythropterus</i>	<i>Lepomis macrochirus</i>	8	40	4	19	47.5
	Estuary (M6)	<i>L. macrochirus</i>	<i>C. erythropterus</i>	14	127	6	65	51.2
Creeks	Wui-cheon (C1)	<i>Z. platypus</i>	<i>Rhinogobius brunneus</i>	7	44	3	20	45.5
	Gam-cheon (C2)	<i>Z. platypus</i>	<i>O. bidens</i>	7	100	2	63	63.0
	Geumho (C3)	<i>Z. platypus</i>	<i>Pseudogobio esocinus</i>	11	103	6	76	73.8
	Hwe-cheon (C4)	<i>Z. platypus</i>	<i>Microphysogobio yaluensis</i>	9	68	4	54	79.4
	Topyeong (C5)	<i>Pseudorasbora parva</i>	<i>C. erythropterus</i>	20	406	8	280	69.0
	Milyang gang (C6)	<i>Z. platypus</i>	<i>O. bidens</i>	10	109	5	83	76.1
Upo wetland (U)		<i>C. erythropterus</i>	<i>P. parva</i>	11	300	6	92	30.7

**Fig. 2.** Relations of total body length (mm) with the (A) Trophic position (TP) calculated by nitrogen isotope ratios of amino acid and (B) the bulk stable carbon isotope ratio ( $\delta^{13}\text{C}$ ) of the lake skygazer *Chanodichthys erythropterus* collected from 13 different sites from Nakdong River.

연구 결과를 바탕으로 개체의 전장 약 20~30 cm 사이의 개체를 기준으로 먹이의 급격한 변화가 있는 것으로 나타났다 (Fig. 2), 이러한 결과는 Son and Byeon (2001)에 의해 한강에서 채집된 강준치에서 조사되었던 이전 연구 결과와 유사한 것으로 판단되었다. 본 연구에서 탄소 안정동위원소비의 범위가 급격하게 변하는 크기는 강준치의 성장

을 고려했을 때에 약 3~5년 생의 성체였으며 보다 가벼운 값의 탄소 안정동위원소비를 갖는 개체는 크기가 20 cm보다 작은 토평 (C5)과 밀양강 (C6)에서 채집된 개체였다. 이렇게 작은 개체의 영양단계는 평균 3.0으로 동물플랑크톤과 같은 1차 소비자를 섭식함을 보였는데 이러한 결과는 동물플랑크톤과 같은 1차 소비자가 위 내용물에서 높은

비율을 차지했던 팔당호 강준치의 위 내용물 분석 결과와 유사하다(Son and Byeon, 2001). 팔당호의 경우 20 cm 이하의 강준치 개체에서는 요각류, 지각류, 수서곤충의 유충 순의 먹이 구성을 보였고 개체의 크기가 커짐에 따라 어류와 육상곤충, 수서곤충 유충의 섭식률이 증가하여 그 입계 사이즈를 약 20 cm로 언급한 바 있다(Son and Byeon, 2001).

성장에 따라 먹이의 크기가 커지고 다양해지는 변화는 강준치 외에도 어류에서 일반적으로 관찰되는 현상이다. 낙동강에 서식하는 기수종인 전갱이(*Trachurus japonicus*)를 비롯해 연안에 서식하는 눈볼대(*Doederleinia berycooides*)에서도 보고되었으며(Huh and Cha, 1998; Choi *et al.*, 2014), Choi *et al.*(2020)은 금강의 꺾저기(*Coreoperca kawamebari*)의 크기에 따른 영양단계와 섭식 특성 연구에서 10 cm 미만인 개체의 높은 곤충 의존도와 달리, 10 cm 이상의 개체는 작은 크기의 물고기를 주로 섭식함에 따라 유의한 영양단계의 증가함을 보여주었다. 이에 대해 Schoener(1987)은 성장에 따른 먹이 변화가 단위 시간당 에너지 섭취를 최대화하기 위한 어류의 진화적 경향이며 특히 육식성 어종에서만 관찰되는 일반적인 특징으로 보고되기도 하였다(Keppeler *et al.*, 2020).

### 3. 강준치의 먹이 선택성

강준치는 육식성 어종으로 알려져 있으며(Zhao *et al.*, 2022), 먹이에 대한 강한 포식압을 가져 특히 낙동강에 서식하는 상업성 어종(붕어, 잉어, 메기, 뱀장어 등)의 감소에 영향을 미칠 것으로 추정되고 있다. 일반적으로 육식성 어종은 수서곤충과 저서생물, 작은 어류까지 섭식할 수 있으며 본 연구에서 성체에 해당되는 강준치의 영양단계 범위는 2.9에서 3.6까지 넓은 값을 보이며 동물플랑크톤부터 수서곤충, 작은 어류를 먹은 2차 소비자를 섭식하는 것으로 보여진다. 큰 개체에서 관찰되는 넓은 영양단계의 변동성(TP variability)은 이들이 성체임에도 불구하고 어류뿐만 아니라 동물플랑크톤과 수서곤충을 기회적으로 섭식하고 있음을 보여주는 결과이다. Fig. 3은 낙동강에서 수행된 연구 중 모래무지(*Pseudogobio esocinus*)와 큰입배스(*Micropterus salmoides*)에 대해 분석된 영양단계 결과 값(Choi *et al.*, 2020)의 개체의 변동성과 강준치의 결과를 비교해 나타내었다(Fig. 3). 영양단계에서 관찰되는 개체의 영양단계의 변동성은 섭식 특성에 있어 일반종(generalist)과 특이종(specialist)을 구별할 수 있도록 하는데 이를 바탕으로 낙동강에 서식하는 모래무지와 큰입배스는 각각 대표적인 특이종과 일반종으로 구분된다고 보고된 바 있

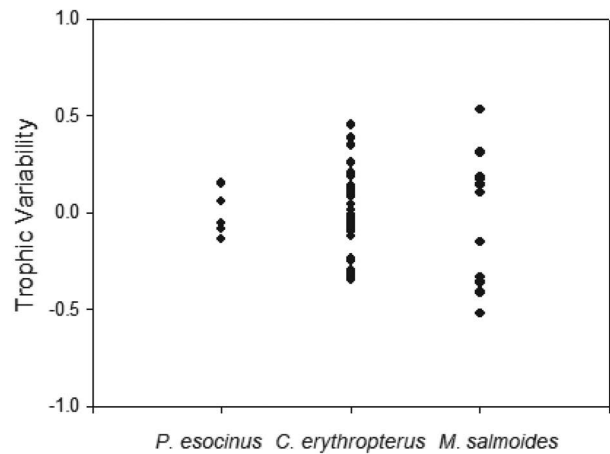


Fig. 3. Trophic variability of three different species from Nakdong River. The results of *Chanodichthys erythropterus* was collected from this study and those of other species (e.g., Pike Gudgeon *Pseudogobio esocinus* and Largemouth bass *Micropterus salmoides*) were cited from previous study of Choi *et al.* (2020).

으며(Choi *et al.*, 2020), 이는 전장에 비해 큰 입을 가지고 비선택적인 포식을 하는 큰입배스에서 넓은 폭의 영양단계 결과가 관찰되는 반면 구조적으로 하층부를 헤엄치며 저서의 유기물을 대상으로 먹이 섭식을 하는 모래무지는 상대적으로 선택적인 먹이를 섭식하기 때문으로 해석된다. 이 같은 결과에 비추어 보면, 낙동강에 서식하고 있는 강준치는 큰입배스보다는 선택적인 섭식을 하고 있으며 모래무지보다는 비선택적 섭식을 하는 것으로 보여진다. 이는 강준치가 비선택적 섭식을 하는 사나운 육식성 어종으로 알려져 있음에도 불구하고 큰입배스와 달리 전장에 비해 상대적으로 작은 크기의 입을 가지고 있으며 이러한 입의 크기가 섭식할 수 있는 먹이를 제한함에 따라(Paul *et al.*, 2017) 큰입배스에 비해 상대적으로 선택적인 섭식을 하고 있음을 의미한다. 이는 본 연구의 분석에 이용된 강준치의 개체 크기가 큼에도 불구하고(평균 388.8 mm, 193~595 mm, TP<sub>avg</sub> = 3.2), 문헌의 결과와 비교했을 때 보다 작은 육식성 어종(e.g., 큰입배스 평균 202.6 mm, 300~495 mm, TP<sub>avg</sub> = 3.3, Choi *et al.*, 2020)에 비해 유사한 영양단계를 보이고 있는 결과를 뒷받침 하기도 한다. 또 다른 이유로는 위쪽을 향해 있는 강준치 입의 구조 때문으로(e.g., common name: top mouth culter) 강준치는 저서성의 어종이나 저서생물을 섭식하기 부적합한 형태를 가지고 수면에서 먹이활동을 한다. 일부 개체의 크기에 비해 낮은 영양단계가 관측된 개체(하굿둑과 회천)는 어류의 포식보다는 곤충이나 1차 소비자 위주의 섭식이 이루어졌기 때문으로 추정해 볼 수 있으며 또한 잡식성의 저서성



어종으로 퇴적 유기물을 주로 섭식하는 모래무지에 비해 넓은 유영 면적과 다양한 부유 생물 및 곤충, 그리고 작은 어류와 같은 다양한 먹이에 의해 모래무지보다 큰 영양단계 변동성을 갖는 것으로 사료된다.

조사기간 중 전체적으로 어류가 적게 조사된 물금(M5)과 위천(C1)을 제외하고, 칠곡(M2)과 우포(U)에서 강준치 먹이후보어종의 풍부도가 낮게 관찰되었고, 그 밖의 정점에서는 먹이가 될 수 있는 후보어종의 상대풍부도가 평균 73%로 매우 높았다(Table 2). 강준치의 이동성을 고려했을 때 각 정점에서 관찰되는 먹이후보어종의 풍부도는 안정동위원소비를 이용한 장기간 통합된 영양단계 결과와 직접 비교하기 어려울 것으로 판단된다. 실제로 조사 지점에서 관찰된 먹이후보어종의 상대풍부도와 강준치의 크기, 각 정점에서 채집된 개체의 영양단계, 그리고 탄소 안정동위원소비나 source amino acid의 동위원소비의 관계에서는 유의미한 관계가 관찰되지 않았고 이는 조사시기가 어류의 개체수가 풍부했던 시기였고, 강우 후 유량이 증가하여 이동 거리가 넓어질 수 있던 시점이었다는 점에서 설명될 수 있다.

먹이풍부도에 따른 강준치의 섭식 특성을 확인하기 위해서는 강우 또는 산란기 전 후 강준치의 극우점 지역을 대상으로 먹이망 해석과 함께 생태영역 해석 연구가 필요하다고 판단된다.

## 결 론

이입종의 섭식 특성에 대한 정보는 이입종의 극우점에 의해 발생하는 다양한 문제를 이해하는 데에 도움을 줄 수 있다. 강준치는 매우 넓은 지역을 이동하며 다양한 먹이를 섭식할 수 있는 대형 포식어종으로 낙동강에서 이들의 우점은 수생태계 군집구조 및 먹이망을 교란하는 요인으로 작용할 수 있을 것으로 예상된다. 본 연구에서는 아미노산의 질소안정동위원소비 분석법을 이용하여 해당 어종에 대한 영양단계를 확인하였고, 강준치의 크기에 따른 먹이의 변화를 확인해 볼 수 있었다. 또한 강준치가 낙동강에서 다양한 먹이를 섭식하고 있는 것을 보여주었으며(1차 소비자부터 영양단계 3 정도의 생물을 혼합하여 섭취), 나아가 향후 수생태계 관리에 중요한 정보 및 방향성을 전달할 것으로 사료된다. 특히 본 연구에서 이용한 아미노산의 질소 안정동위원소 분석 기법은 기존의 유기탄소와 총질소의 안정동위원소비 분석 방법에서 언급된 시공간적 변동성과 어류의 이동성으로 인한 해석의 한계를 보완할 수 있게 하였다. 이는 낙동강과 같이 유역 면적이 넓고 길어

다양한 유기물의 유입 경로가 존재하고 입자성유기성물질과 동물플랑크톤의 변동성이 발생하는 지역에서 활용하기에 적합한 기법으로 판단된다. 또한 여러 개체에서 관찰된 영양단계의 변동성을 이용한 이들의 섭식 특성 해석은 신뢰성 있는 영양단계를 이용하였던 점에서 아미노산의 질소 안정동위원소비 분석기법을 이용한 생물생태 해석의 가능성을 보여주었다.

향후 연구에서 개체 이동이 많은 강우 후와 산란기 전후 조사, 그리고 공서종에 대한 분석이 함께 이루어진다면 이입종으로서 강준치가 수생태계에 미치는 영향에 대해 보다 잘 이해할 수 있을 것으로 기대된다.

## 적 요

강준치 *C. erythropterus*는 육식성 어종으로 이 종이 낙동강 전역에서 극우점하게 됨에 따라 상업성 어종이 감소하는 등 여러 이슈가 있어왔으며 이들의 섭식과 관련된 생태 특성을 이해하는 것이 중요함에도 불구하고 섭식특성에 대한 연구는 위 내용물에 대한 분석에 국한되어 수행되어왔다. 본 연구에서는 낙동강 이입종인 강준치 *C. erythropterus*의 생태학적 특성을 이해하기 위한 연구의 일환으로 낙동강 일대 13개 정점에서 채취한 강준치 표본으로부터 화합물의 안정동위원소 분석 기법을 활용하여 영양학적 지위(trophic position)를 계산하고 섭식특성을 해석하였다. 아미노산의 질소 안정동위원소 분석은 *C. erythropterus* 단독의 시료로부터 신뢰할 수 있는 TP를 도출할 수 있게 하였으며, 그 결과 개체의 크기에 따라 약 3에서 3.6으로 증가하는 결과를 얻었다. 또한 성체에서 관찰된 TP의 변동성을 통해 상대적으로 유사한 영양단계를 갖는 육식성 어종에 비해 선택적인 섭식 습성을 가지고 있음을 확인하였다.

**저자정보** 원은지 (한양대학교 해양대기과학연구소 부교수), 조하은 (한양대학교 해양융합과학과 연구원), 김도균 (한양대학교 해양융합과학과 박사과정), 최지웅 ((주)다운 에코 학술이사), 안광국 (충남대학교 생물과학과 교수), 신경훈 (한양대학교 해양융합과학과 교수, 해양대기과학연구소 소장)

**저자기여도** 실험디자인: 신경훈, 안광국, 현장조사: 원은지, 김도균, 조하은, 최지웅, 분석: 조하은, 자료분석: 원은지, 김도균, 최지웅, 초안작성: 원은지, 원고교정: 저자 전원, 연구비 수주: 신경훈

**이해관계** 이 논문에는 이해관계 충돌의 여지가 없습니다.

## 사 사

본 연구는 2022년 환경부 재원으로 한국환경산업기술원 (KEITI)에서 지원하는 “생활화학제품 안전관리 기술개발 사업 [2020002970007, 1485018715]”과 낙동강수계관리기금 환경기초조사사업을 통해 수행되었습니다.

## REFERENCES

- An, K.-G., D.-H. Yeom and S.-K. Lee. 2001. Rapid bioassessments of Kap stream using the index of biological integrity, *Korean Journal of Environmental Biology* **19**(4): 261-269. (In Korean)
- Basilewsky, S. 1855. Ichthyographia Chinae Borealis. *Nouveaux mémoires de la Société impériale des naturalistes de Moscou* **10**: 215-263.
- Blanke, C.M., Y. Chikaraishi, Y. Takizawa, S.A. Steffan, P.S. Dharampal and M.J. Vander Zanden. 2017. Comparing compound-specific and bulk stable nitrogen isotope trophic discrimination factors across multiple freshwater fish species and diets. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* **74**(8): 1291-1297.
- Byeon, H.-K. 2019. Variation of fish community by reduced the amount of water in Cheonggye Stream, Korea. *Korean Journal of Ichthyology* **31**(3): 165-171.
- Capps, K.A. and A.S. Flecker. 2017. Invasive fishes generate biogeochemical hotspots in a nutrient-limited system. *PLOS One* **8**(1): e54093.
- Carey, M.P. and D.H. Wahl. 2010. Native fish diversity alters the effects of an invasive species on food webs. *Ecology* **91**(10): 2965-2974.
- Chikaraishi, Y., Y. Kashiyama, N.O. Ogawa, H. Kitazato and N. Ohkouchi. 2007. Metabolic control of nitrogen isotope composition of amino acids in macroalgae and gastropods: implications for aquatic food web studies. *Marine Ecology Progress Series* **342**: 85-90.
- Chikaraishi, Y., S.A. Steffan, Y. Takano and N. Ohkouchi. 2015. Diet quality influences isotopic discrimination among amino acids in an aquatic vertebrate. *Ecology and Evolution* **5**: 2048-2059.
- Choi, B. and K. Shin. 2021. Determination of precise nitrogen stable isotopic baselines from heterotrophic organism in coastal ocean environments using compound specific isotope analysis of amino acids. *Marine Pollution Bulletin* **171**: 112777.
- Choi, B., C. Lee, Y. Takizawa, Y. Chikaraishi, H.-J. Oh, K.-H. Chang, M.-H. Jang, H.-W. Kim, K.-L. Lee and K.-H. Shin. 2020. Trophic response to ecological conditions of habitats: Evidence from trophic variability of freshwater fish. *Ecology and Evolution* **10**: 7250-7260.
- Choi, J.H., S.H. Choi and D.W. Lee. 2014. Feeding ecology of the Blackthroat Seaperch *Doederleinia berycoides* in the Southern Seas of Korea. *Korean Journal of Fisheries and Aquatic Science* **47**(6): 895-900.
- Choi, J.-Y., S.-K. Kim, J.-C. Kim and J.-D. Yoon. 2020. Trophic position and diet shift based on the body size of *Coreoperca kawamebari* (Temminck & Schlegel, 1843). *Journal of Ecology and Environment* **44**: 2.
- France, R.L. 1995. Differentiation between littoral and pelagic food webs in lakes using stable carbon isotopes. *Limnology & Oceanography* **40**: 1310-1313.
- Heo, A., N.-S. Lee, K. Kim, N.Y. Kim, S.-H. Jung and M.S. Kim. 2018. Molecular identification of Cestoda isolated from *Erythroculter erythropterus*. *Journal of Fisheries and Marine Sciences Education* **30**(6): 1978-1984.
- Huh, S.-H. and B.-Y., Cha. 1998. Feeding habits of Jack Mackerel, *Trachurus japonicus*, collected from the Nakdong River estuary. *Bulletin of the Korean society of Fisheries Technology* **34**(3): 320-327.
- Jang, M.H., G.I. Cho and G.J. Joo. 2001. Fish fauna of the main channel in the Nakdong River. *Korean Journal of Limnology* **34**: 223-238.
- Jeon, S.R. and K. Watanabe. 1995. A study on the distribution of the bagrid fish (Family Bagride) from Naktong River, Korea. *Journal of Basic Science* **8**: 1-18.
- Jeong, C.-H. and K.-N. Han. 2018. Review on the fish fauna of the Imha-dam reservoir in the Nakdong River system, Korea. *Korean Journal of Ichthyology* **30**(2): 119-124.
- Karr, J.R. 1981. Assessment of biotic integrity using fish communities. *Fishes* **6**(6): 21-27.
- Keppeler, F., C.G. Montana and K.O. Winemiller. 2020. The relationship between trophic level and body size in fishes depends on functional traits. *Ecological Monographs* **90**(4): e01415.
- Kim, D.S. 2002. A study of fishing gear for Skygager (*Erythroculter erythropterus*). *Korean Journal of Aquaculture* **14**: 75-87.
- Kim, I.S. and J.Y. Park. 2002. Freshwater Fishes of Korea. Kyo-Hak Publishing Co. Seoul.
- Kindong, R., P. Nagarajan, A. Apraku, L.A. Christian and X. Dai. 2017. Biochemical composition of predatory carp (*Chandichthys erythropterus*) from Lake Dianshan, Shanghai, China. *Egyptian Journal of Basic and Applied Sciences* **4**(4): 297-302.
- Li, H., C. Xia, S. Li, Q. Gao and Q. Zhou. 2009. The nutrient contents in the muscel of *Culter erythropterus* and its nutritional evaluation. *Acta Nutrimenta Sinica* **31**(3): 285-288.
- Minagawa, M. and E. Wada. 1984. Stepwise enrichment of  $^{15}\text{N}$  along: 285-288. food chains: further evidence and the re-

- lation between  $\delta^{15}\text{N}$  and animal age. *Geochim Cosmochim Acta* **48**: 1135-1140.
- MOE (Ministry of Environment, Korea). 2016. Final report. "A study on the management plan for invasive freshwater fish" (in Korean).
- MOE (Ministry of Environment, Korea). 2021. Final report. "Spatial distribution, population growth, and the efficient management introduced fish species (*Erythroculter erythropterus*) in Nakdong River" (in Korean).
- Oh, H.-J., M.-Y. Jin, B. Choi, K.-H. Shin, G.-H. La, H.-W. Kim, M.-H. Jang, K.-L. Lee and K.-H. Chang. 2019. Analysis of food web structure of Nakdong River using quantitative food web parameters obtained from carbon and nitrogen stable isotope ratios. *Korean Journal of Environment and Ecology* **52**(1): 50-64 (In Korean).
- Paul, M., S. Pradit, S. Hajisamae, P. Permsak, F. Hisam and S. Chaibundit. 2017. Relationships of body lengths with mouth opening and prey length of nemipterid fishes (Regan, 1913) in the Gulf of Thailand. *Egyptian Journal of Aquatic Research* **43**: 297-302.
- Rodríguez-Lozano, P., I. Verkaik, M. Rieradevall and N. Prat. 2015. Small but powerful: Top predator local extinction affects ecosystem structure and function in an intermittent stream. *PLoS One* **10**(2): e0117630.
- Schoener, T.W. 1987. A brief history of optimal foraging ecology. In: Schoener T.W. 1987. A brief history of optimal foraging ecology. In: Kamil AC, Krebs JR, Pulliam HR, editors. Foraging behavior. Boston: MA. Springer. p. 5-67.
- Son, Y.-M. and H.-K. Byeon. 2001. Feeding habit of main carnivorous fish (*Erythroculter erythropterus*, *Opsariichthys uncirostris* and *Micropterus salmoides*) at Lake Paldang. 基礎科學研究論叢 **15**: 61-78.
- Soulé, M.E., D.T. Bolger, A.C. Alberts, J. Wright, M. Sorice and S. Hill. 1988. Reconstructed Dynamics of Rapid Extinctions of Chaparral-Requiring Birds in Urban Habitat Islands. *Conservation Biology* **2**(1): 75-92.
- Thompson, R.M., J.A. Dunne and G. Woodward. 2012. Freshwater food webs: towards a more fundamental understanding of biodiversity and community dynamics. *Freshwater Biology* **57**: 1329-1341.
- Won, E.-J., H.-E. Cho, D. Kim, S. Hong and K.-H. Shin. 2022. A direction of the monitoring of household chemical products in aquatic environments: The necessities for a trophic magnification factor (TMF) research on fish. *Korean Journal of Environment and Ecology* **55**(3): 185-200.
- Yoon, J.D., J.-H. Kim, D.S. In, J.J. Yu, M. Hur, K.-H. Chang and M.-H. Jang. 2012. Evaluation of movement pattern of *Erythroculter erythropterus* inhabit in the mid-lower part of Nakdong River using acoustic telemetry. *Korean Journal of Environment and Ecology* **45**(4): 403-411 (in Korean).
- Yoon, J.D., J.H. Jeong, S.H. Park and M.H. Jang. 2018. The distribution and diversity of freshwater fishes in Korean peninsula. *Korean Journal of Environment and Ecology* **51**: 71-85.
- Zhao, S., X. Yang, B. Pang, L. Zhang, Q. Wang, S. He, H. Dou and H. Zhang. 2022. A chromosome-level genome assembly of the redfin culter (*Chanodichthys erythropterus*). *Scientific Data* **9**: 535.