

안정동위원소와 위내용물 분석 기법을 이용한 여름과 가을 남해 연안 정어리 (*Sardinops melanostictus*)의 먹이원 평가

박종혁 · 김현지 · 정재묵 · 이정훈 · 신동훈*

국립수산과학원 수산자원연구센터

Food Resource of Sardine *Sardinops melanostictus* on the Southern Coast of Korea in Summer and Autumn Revealed by Stable Isotope and Stomach Content Analyses

Jong Hyeok Park, Hyun Ji Kim, Jae Mook Jeong, Jeong-Hoon Lee and Donghoon Shin*

Fisheries Resources Research Center, National Institute of Fisheries Science, Tongyeong 53064, Republic of Korea

This study, analyzed the stomach contents, stable isotope signatures ($\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$) in muscle tissue, and potential food sources (particulate organic matter, *Zostera marina*, epiphytes, and zooplankton) of *Sardinops melanostictus* in the southern coast of Korea to evaluate its dietary changes across seasons (summer and autumn 2022). The diet of *S. melanostictus* predominantly comprised organic detritus (99%) regardless of the season. The isotope results showed that *S. melanostictus* had mean $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ values of $-17.7\pm 0.4\text{‰}$ and $10.6\pm 0.5\text{‰}$, respectively and seasonal variations were observed (t -test, $P=0.010$, $P=0.002$). However, the isotopic mixing model showed that particulate organic matter was a major nutritional source for *S. melanostictus* in summer and autumn (88.7% and 90.2%, respectively). Based on the stomach contents and stable isotope signatures, these results may help improve the understanding of *S. melanostictus* and establish the management measures for their conservation.

Keywords: *Sardinops melanostictus*, Food resource, Stable isotope, Stomach content, South Sea

서론

기후변화에 따른 수온 상승과 해양산성화가 진행됨에 따라 연안생태계(coastal ecosystem)를 구성하고 있는 주요 종의 구성 변동, 어군 서식지 이동, 어류의 성장률 변화 등 어업생산에 큰 영향을 주어 자원관리를 정책을 수립하는데 실질적인 영향을 주고 있다(IPCC, 2007; Kim et al., 2007; Bunce et al., 2010; Perry et al., 2011; Cinner et al., 2012; Lu and Lee, 2014). 우리나라는 위도상 온대해역에 속하는데 남해는 서해, 동중국해와 동해를 연결하는 해역으로 쿠로시오로부터 분지한 대마난류수와 동중국해에서 유입되는 서해 연안수, 육상기원 담수 및 물질 유입 등의 영향을 받아 다양한 먹이생물이 풍부하게 분포한다(Kang et al., 2002; Kim and Pang, 2005). 또한 이곳에 서식하는 식물플랑크톤, 동물플랑크톤, 어류 등 해양생물 군집 변화

는 사계절이 뚜렷한 변화양상을 보여 준다(Moon et al., 2022; Shin et al., 2022a). 이러한 생태계 변화는 남해의 먹이망 및 에너지흐름에 영향을 주어 궁극적으로는 수산자원 변동으로 연결될 가능성이 높다(Kang et al., 2002; Ju and Kim, 2013). 소형 부어류(small pelagic fish)에 속하는 정어리(*Sardinops melanostictus*)는 청어목(Clupeiformes) 청어과(Clupeidae)에 속하는 어류로 여과섭식(filter feeding)을 통해 주로 플랑크톤을 먹이원으로 이용한다(Kim, 1983; Wada and Jacobson, 1998; Watanabe and Saito, 1998; Sarr et al., 2021). 또한 상위 소비자인 어류, 포유류, 조류의 주요 에너지 공급원으로 이용될 뿐 아니라, 인간에게도 중요한 단백질 공급원이자 생태학적인 측면과 더불어 상업적으로도 매우 중요한 수산자원이다(Ohizumi et al., 2000; Shimose et al., 2012). 정어리는 우리나라의 동해와 남해, 일본 전 해역, 동중국해 등에 출현하며, 생육초기 해류

*Corresponding author: Tel: +82. 55. 650. 2252 Fax: +82. 55. 650. 2206

E-mail address: dhshin2@korea.kr



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, provided the original work is properly cited.

<https://doi.org/10.5657/KFAS.2023.0419>

Korean J Fish Aquat Sci 56(4), 419-427, August 2023

Received 1 June 2023; Revised 24 July 2023; Accepted 16 August 2023

저자 직위: 박종혁(연구원), 김현지(연구원), 정재묵(연구원), 이정훈(연구관), 신동훈(연구원)

에 의한 이송방법에 따라 연안가입군과 근해가입군으로 나뉘는데, 연안가입군은 장기간(산란기, 1-5월)에 분산하여 산란기 및 부화기를 가지는 반면, 근해가입군은 4월 전후로 부화 개체가 출현하는 것으로 보고되었으며, 주 산란장은 남해 및 일본 큐슈 주변 해역으로 알려져 있다(Kim et al., 1994; Watanabe, 1996; Kim et al., 2005). 또한 수명은 최대 7세, 최대 체장은 22-24 cm 정도이며, 연령과 성장은 해역 및 자원수준에 따라 차이를 보이지만 1세 14-15 cm를 시작으로 연간 1 cm 정도 성장하는 것으로 보고되었다(Sarr et al., 2021). 최근까지의 우리나라 정어리 어획량 추이를 살펴보면, 1986년에 194,000 ton까지 증가했던 어획량은 1980년 말까지 증감을 반복하며 150,000 ton 내외로 어획 되다가 1991년에 43,000 ton으로 극감한 이후 지속적으로 감소하였지만, 2022년에는 연안가입군의 증가가 어획량 증가로 이어지는 현상이 나타났다(KOSIS, 2021).

전 세계적으로 정어리의 관한 연구를 살펴보면, 자원량 변동, 산란특성, 섭식생태 등과 같은 자원생물학적 연구가 지속적으로 보고되었으며(Kawasaki and Kumagai, 1984; Matsuyama et al., 1991; Watanabe and Saito, 1998; Fukami et al., 1999; Morimoto, 2003; Chiba et al., 2008; Yoo et al., 2010; Yamamoto and Katayama, 2012; Hirai et al., 2017), 국내에서는 정어리의 자원량 변동이나 연령과 성장, 난수층에 관련된 연구는 진행되었으나, 먹이자원 또는 섭식생태가 어떻게 되는지에 대한 연구는 없었다(Park and Kim, 1981; Kim and Kim, 1984; Kim et al., 1994; Kim, 1998).

해양생태계의 먹이망을 구성하는 생물종들간의 섭식관계를 파악하기 위하여 위내용물 분석(Hopkins, 1985; Buckland et al., 2017)과 생화학적인 기법인 안정동위원소 분석 방법이 주로 활용되어 왔다(Fry and Sherr, 1989; Post et al., 2007; Kang et al., 2009; Park et al., 2018). 위내용물 분석은 포식자가 섭식한 먹이생물을 직접 확인할 수 있지만, 짧은 기간 섭식한 먹이생물을 분석하는 것으로 분석 대상종에 따라 소화가 진행된 먹이, 먹이생물 크기가 작은 경우, 형태적인 특징이 잘 나타나지 않는 생물의 경우 정확한 섭식 성향을 파악하는데 어려움이 있다(Feigenbaum, 1991). 반면, 비교적 최근에 먹이망 연구에 활용되고 있는 안정동위원소 분석은 장기간 축적된 포식자의 먹이선택을 더 정확하게 반영할 수 있다(Minagawa and Wada, 1984; Park et al., 2022).

안정동위원소 분석 방법은 포식자가 먹이를 섭식할 때 대사 과정을 거치면서 먹이생물의 탄소와 질소 안정동위원소 조성비($\delta^{13}\text{C}$ 와 $\delta^{15}\text{N}$)가 포식자의 안정동위원소 비값에 반영된다는 특성을 토대로 실제로 이용하는 먹이의 기여도를 평가할 수 있다(DeNiro and Epstein, 1977). 또한 체내의 안정동위원소 조성은 섭식활동이 장기간 동안 반영된 결과이기 때문에 이들이 서식하고 있는 먹이환경 정보를 해석할 수 있다(Fry and Sherr, 1989). 일반적으로 안정동위원소 비값을 분석하는 경우, 먹이와 소비자 동물 사이에 영양단계마다 탄소는 1.0%이내, 질소는

3.0-4.0% 높아지는 동위원소 분별효과(isotopic fractionation)가 나타나는 원리를 이용하여, $\delta^{13}\text{C}$ 값은 동물의 먹이원을 밝히는데 이용되고 $\delta^{15}\text{N}$ 값은 영양단계를 연구하는데 이용된다(DeNiro and Epstein, 1977; Fry and Sherr, 1989).

국외에서 해양생태계 먹이망이나 해양생물의 섭식생태 연구를 위해 위내용물 분석과 안정동위원소 분석 기법을 함께 이용하는 연구가 증가하고 있는 추세이다(Cresson et al., 2014; Knickle and Rose, 2014). 최근 국내에서도 두 방법을 결합하여 사용한 연구 결과들이 보고되고 있으나 미미한 실정이다(Park et al., 2018; Shin et al., 2022b).

따라서 본 연구에서는 최근 남해 통영 연안에 출현량이 증가한 정어리를 대상으로 여름과 가을 주요 영양원과 섭식생태를 평가하고자 위내용물과 안정동위원소 분석을 실시하였다. 또한 두 분석 기법을 동시에 활용하였을 때 우리나라 연안생태계에서 정어리의 기능을 밝히는데 효과적인 방법이 될 수 있다는 것을 제시하고자 하였다.

재료 및 방법

연구지역 및 시료채집

본 연구는 2022년 7월과 10월 우리나라 남해(경남 통영) 연안(위도, 경도)의 수심 5-15 m 사이에서 조사를 실시하였다(Fig. 1). 소비자 동물군인 정어리(*S. melanostictus*) 시료는 조사해역 내 2개 지점을 선정하여 정지망(길이 160 m, 폭 30 m, 길그물 150 m) 어구와 뜰채를 이용하여 무작위로 채집하였다.

조사해역인 통영의 수온과 염분 자료를 확보하기 위해 국립해양조사원 바다누리 해양정보 서비스의 통영지역 관측소 자료(<http://www.khoa.go.kr/oceangrid/khoa/koofs.do>)를 이용하였다.

조사해역에서 잠재먹이원인 부유입자유기물(suspended particulate organic matter, POM), 거머리말(*Zostera marina*), 거머리말 위에 부착된 epiphyte와 동물플랑크톤인 요각류(copepods), 단각류(amphipods)를 채집하였다. 남해 연안으로 유입되는 수주(water column) 내의 POM은 수심 1 m 정도의 표층수 20 L를 채수하여 200 μm 의 망목으로 동물플랑크톤이나 크기가 큰 입자물질을 제거한 후, 450°C에서 4시간 동안 태워서 준비한 GF/F 필터지(직경 47 mm, 공극 0.7 μm)를 이용하여 포집하였다. POM은 동결건조하여 분석시까지 데시케이터에 보관하였다. 거머리말(*Z. marina*)은 SCUBA diving을 통해 직접 손으로 채집하였고, 엽체 표면에 부착된 epiphyte는 일정 면적을 미세술로 긁은 후 200 μm 의 망목으로 크기가 큰 입자물질을 제거한 후 시료를 냉동 보관하였다.

동물플랑크톤 채집은 RN80 넷트(망구 80 cm, 망목 330 μm)에 유량계를 부착하여 선속 2 knots 속도를 유지하며 저층부터 표층까지 경사채집을 하였으며, 채집한 시료는 냉장보관하여 실험실로 이동해 전처리를 실시하였다.

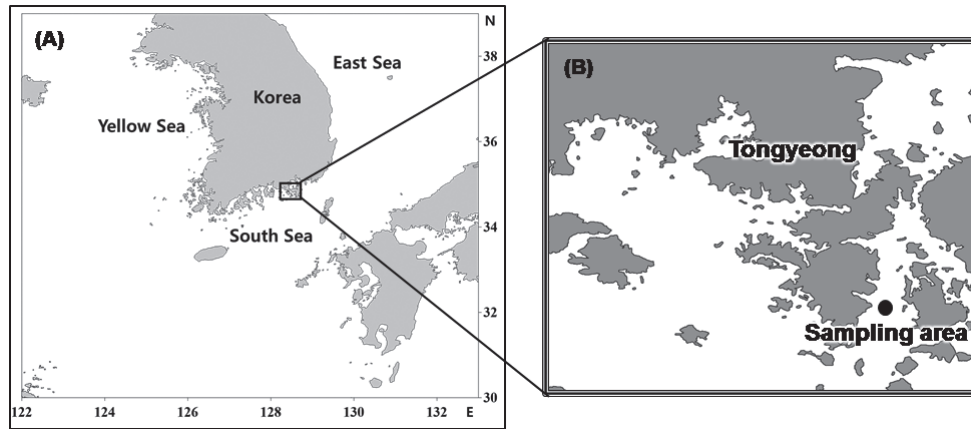


Fig. 1. Map of the sampling area in the southern coast of Korea. A, Field circle indicates the sampling site; B, Collected for potential food sources (particulate organic matter, *Zostera marina*, epiphyte, zooplankton, and sardine *Sardinops melanostictus*).

정어리 시료는 각 개체의 가랑이체장(fork length, FL)과 체중(body weight)을 각각 0.1 cm, 0.01 g 단위까지 측정하였다. 탄소 및 질소 안정동위원소 분석을 위한 정어리 시료는 무작위로 선정해 등근육을 적출하여 동결건조 후 분말화(homogenized)한 뒤 분석시까지 데시케이터에 보관하였다. 위내용물 분석을 위해 측정된 정어리 개체는 위 부분을 분리한 뒤 위내용물 분석 전까지 10% 중성 포르말린에 보관하였다.

위내용물 분석

정어리 각 개체의 위 부분은 해부현미경(LEICA L2; Leica Microsystems, Wetzlar, Germany)을 이용하여 해부가위와 핀셋을 이용하여 절개한 뒤, 먹이생물을 종류별로 분류하였다. 출현한 먹이생물은 가능한 낮은 종(species) 수준까지 동정하였으며, 소화가 진행되어 분류가 어려운 경우 그보다 상위 단계까지만 분류하였다. 위내용물에서 발견된 모든 먹이생물은 정밀전자저울(ME204TE/00; Mettler Toledo, Greifensee, Switzerland)을 이용하여 중량을 0.0001 g까지 측정하였다. 위내용물 분석 결과는 각 먹이생물의 출현빈도(%F)와 중량비(%W)로 나타내었으며 아래 식을 이용하여 구하였다.

$$\%F = A_i / N \times 100$$

$$\%W = W_i / W_{total} \times 100$$

여기서 A_i 는 위내용물 중 해당 먹이생물이 발견된 정어리의 개체수이며, N 은 먹이를 섭식한 정어리의 총 개체수, W_i 는 해당 먹이생물의 중량, W_{total} 은 전체 먹이 중량이다.

먹이생물의 순위지수(ranking index, RI)는 Hobson (1974)의 식을 사용하여 나타내었다. 순위지수는 백분율로 환산하여 순위지수비(%RI)로 나타내었다.

$$RI = \%F \times \%W$$

$$\%RI = RI_i / \sum_{i=1}^n RI_i \times 100$$

정어리의 위내용물에서 발견된 일부 먹이생물은 분쇄되어 있거나 소화가 진행되어 정확한 개체수 산정이 힘들었기 때문에 개체수비(%N)는 먹이생물 정량화에서 제외하였다.

안정동위원소 분석

잠재먹이원인 POM, *Z. marina*, epiphyte는 tin disk에, 동물체인 정어리와 동물플랑크톤인 요각류(copepods)와 단각류(amphipods) 시료는 균질화(homogenized)한 후, 0.5–1.0 mg을 tin capsule에 넣고 밀봉하였다. 밀봉된 시료는 원소분석기(CNSOH elemental analyzer; EA Isolink, Bremen, Germany)에 주입하여 고온(1020°C)에서 연소시키고, 안정동위원소 분석을 위한 유도기체로는 헬륨(He)을 사용하였다. 연소로 발생하는 CO₂와 N₂ 가스에 대하여 안정동위원소 질량분석기(continuous-flow isotope ratio mass spectrometer, CF-IRMS; DELTA V PLUS, Bremen, Germany)를 이용하여 탄소 및 질소 안정동위원소 분석을 실시하였다.

잠재먹이원들과 동물군이 가지는 안정동위원소 비값은 다음과 같은 식에 의해 국제표준물질(International standard material)에 대한 시료의 비값 변위를 천분율(‰)로 나타내어 delta (δ)기호로 표현하였다.

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

여기서 X는 ¹³C 또는 ¹⁵N, R은 ¹³C/¹²C 또는 ¹⁵N/¹⁴N 비를 나타낸다.

사용한 탄소 안정동위원소 표준물질은 VPDB (Vienna Pee

Dee Belemnite)이며, 질소 안정동위원소 표준물질은 air N₂로 국제표준 기준을 적용하였다. 안정동위원소 비값을 알고있는 국제표준물질인 sucrose (C₁₂H₂₂O₁₁; NIST, Gaithersburg, MD, USA)와 ammonium sulfate ([NH₄]₂SO₄; NIST)를 이용하여 20회 이상의 반복실험에서 얻어진 값들에 대한 표준편차는 δ¹³C는 0.11‰, δ¹⁵N는 0.15‰ 이하를 나타내었다.

자료 분석

모든 분석 자료는 SPSS software (version 23.0; IBM, Armonk, NJ, USA)를 이용하여 normality와 homogeneity 검정을 실시하였다. 잠재먹이원(POM, *Z. marina*, epiphyte)과 동물 플랑크톤(copepods와 amphipods), 정어리의 δ¹³C와 δ¹⁵N값의 차이와 계절별 차이를 확인하기 위해 다변량분석을 PRIMER version 6 + PRIMER add-on (PRIMER-e, Auckland, New Zealand)와 PERMANOVA +add-on module을 사용하여 분석하였다. 정어리에 대한 먹이기여율은 SIAR mixing model (the SIAR on R package as Bayesian approach)을 사용하여 산출하였다(Phillips, 2001; Parnell et al., 2013).

결과 및 고찰

수온과 염분의 특성

2022년 7월과 10월 통영 연안의 월별 표층수온과 염분 변동 양상을 확인한 결과(Table 1), 수온은 7월에 23.5°C, 10월에 20.3°C로 7월이 3.2°C 더 높았으며, 염분은 32.4(10월)–33.2(7월) psu 범위로, 7월이 10월에 비해 0.8 psu 더 낮았다. 전반적으로 조사점점의 수온과 염분은 전형적인 남해 연안의 계절에 따른 변화가 나타났는데, 이는 기존 같은 해역에서 수행된 연구 결과의 변동 특성과 유사하게 나타났다(Park et al., 2017).

위내용물 조성

연구기간 동안 채집된 총 120개체의 정어리 중에서 공복으로 나타난 개체는 25개체로 공복률은 20.8%였다. 정어리 시료의 FL 범위는 12.0–15.7 cm였고, 체중 범위는 18.2–41.2 g을 나타내어 중형 이상의 크기군이 채집되었다(NFRDI, 2013). 계절별 분포를 살펴보면, 여름에는 12.0–15.2 cm, 18.9–37.0 g이었고, 가을에는 13.2–15.7 cm, 18.2–41.2 g의 범위를 보였다(Fig. 2).

여름에 채집된 60개체 중 공복인 개체는 12개체로 20.0%의 공복률을 나타내었다. 먹이를 섭취한 48개체의 위내용물을 분석

Table 1. The environmental factors (water temperature and salinity) at the surface layers in the southern coast of Korea during summer and autumn, 2022

Month	Water temperature (°C)	Salinity (psu)
July	23.5	33.2
October	20.3	32.4

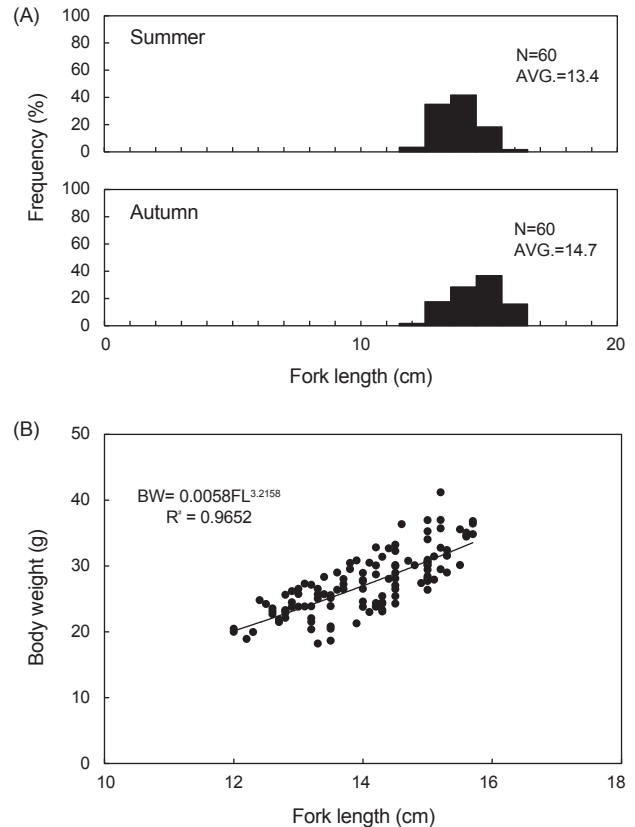


Fig. 2. Size frequency distribution (A) and the relationship between the fork length (FL, cm) and the body weight (BW, g) (B) of sardine *Sardinops melanostictus* collected at the sampling area in summer and autumn, 2022.

한 결과, 여름의 가장 중요한 먹이생물은 출현빈도 100%, 중량비 99.9%를 보여 순위지수비 99.9%를 나타낸 입자유기물(organic matter)이었다(Table 2). 그 외에 만각류 유생(Cirripedia cyprii), 요각류(Copepods)가 출현하였으나 각각 0.1% 미만의 순위지수비를 보여 그 양은 매우 적었다. 가을에 채집된 60개체 중 공복인 개체는 13개체로 21.7%의 공복률을 나타내었다. 먹이를 섭취한 47개체의 위내용물을 분석한 결과, 가을의 가장 중요한 먹이생물 또한 출현빈도 100%, 중량비 99.9%를 보여 순위지수비 99.9%를 나타낸 입자유기물(organic matter)이었다. 만각류도 출현하였으나 0.1% 미만의 순위지수비를 나타내었다. 조사가 실시된 두 계절 모두 입자유기물(organic matter)의 중량비(%W)가 99.9%로 주먹이원으로 나타났으며, 만각류 유생(Cirripedia cyprii), 요각류(Copepods)가 여름에 각각 0.1% 미만의 비율로 나타났으며, 가을에는 만각류만 0.1% 미만으로 나타났다. 정어리는 전형적인 플랑크톤 식성 어류로써 주로 낮에 먹이 활동을 하며 일반적으로 대형 및 중형 정어리는 식물성 플랑크톤을 많이 섭취하고, 소형 정어리는 동물성 플랑크톤을 주로 섭취한다는 연구와 유사한 결과를 나타냈다(Kim, 1983).

안정동위원소 조성

연구해역에서 분석된 정어리 잠재먹이원들(POM, 거머리말, epiphyte, 단각류, 요각류)의 $\delta^{13}\text{C}$ 및 $\delta^{15}\text{N}$ 값은 각각, -18.9‰에서 -9.9‰, 6.5‰에서 11.7‰의 범위를 가졌는데, PERMANOVA 분석 결과, 두 계절에서 잠재먹이원들간 유의한 차이를 보였다(각각, pseudo- $F_{4,9} = 317.27$, $P=0.003$; pseudo- $F_{4,9} = 727.48$, $P=0.003$). POM의 $\delta^{13}\text{C}$ 값은 여름과 가을 각각 -18.9– -19.1‰, -19.4– -19.5‰의 범위였고, 거머리말(*Z. marina*)의 $\delta^{13}\text{C}$ 값은 -10.1– -10.5‰, -9.9– -10.5‰의 범위였으며, epiphyte의 $\delta^{13}\text{C}$ 값은 -11.5– -11.9‰, -12.2– -12.4‰의 범위를 나타냈는데, 동물플랑크톤(단각류, 요각류)의 $\delta^{13}\text{C}$ 값은 여름과 가을 각각 -21.4– -21.0‰, -20.1– -19.9‰의 범위를 나타내었다. $\delta^{15}\text{N}$ 값은 POM의 경우, 여름과 가을 각각 6.5–7.2‰, 7.8–7.9‰의 범위였고, 거머리말의 $\delta^{15}\text{N}$ 값은 6.8‰, 6.2–6.3‰의 범위였으며, epiphyte의 $\delta^{15}\text{N}$ 값은 7.5–7.8‰, 5.5–5.6‰의 범위를 나타내었다. 동물플랑크톤(단각류, 요각류)의 $\delta^{15}\text{N}$ 값은 여름과 가을에 각각 9.8–10.3‰, 10.5–11.7‰의 범위를 나타내었다(Table 3).

본 연구에서 측정된 POM의 값은 한반도 연안에서 보고된 해양 식물플랑크톤 기원의 유기물이 가지는 일반적인 안정동위원소 비값과 매우 유사한 경향을 가졌는데, 이러한 결과는 부유성

입자유기물이 다른 유기물 공급원보다는 식물플랑크톤 기원의 유기물이 주요 구성 요소라는 것을 잘 나타낸다(Fry and Sherr, 1989; Kang et al., 2008; Park et al., 2020; Shin et al., 2022a). 이러한 식물플랑크톤 기원의 POM은 수온, $p\text{CO}_2$, 영양염 농도, 식물플랑크톤의 특성과 종조성에 따라 영향을 받는 것으로 이전의 연구에서 보고되었다(Cifuentes et al., 1988; Rolff, 2000; Kang et al., 2009). 또한 각 계절별 먹이원들의 안정동위원소 비값은 통계적으로 유의한 차이를 보였는데, 잠재먹이원들의 종간, 종내 그리고 개체 내의 부위에 따라 안정동위원소 비값의 차이가 나타날 수 있다는 이전의 보고와도 잘 일치하였다(Fry and Sherr, 1989).

7월에 20개체, 10월에 30개체의 정어리 탄소 및 질소 안정동위원소 비값을 비교한 결과, 계절간 유의한 차이를 보였다(각각, t -test, $P=0.010$, $P=0.002$). 정어리의 $\delta^{13}\text{C}$ 값은 7월에 $-17.9 \pm 0.5\%$, 10월에 $-17.6 \pm 0.3\%$ 범위를 보여, 먹이원의 $\delta^{13}\text{C}$ 값의 범위 내에 포함되는 것을 확인하였다.

해양생태계에서 $\delta^{13}\text{C}$ 값은 다양한 유기물 기원(식물플랑크톤, 저서미세조류, 해조류, 해초류 등)을 통하여 소비자 동물군의 체내에 누적된 먹이원을 반영한다(Fry and Sherr, 1989). 본 연구 결과는 기존의 연구 결과들과 유사한 경향으로, 정어리의 탄소원이 본 연구에서 채집된 기초생산자에서 비롯된 결과로 해

Table 2. Composition of the stomach contents of sardine *Sardinops melanostictus* by frequency of occurrence (%F), wet weight (%W), and ranking index (%RI) collected in the Southern coast of Korea during summer and autumn 2022

Prey organisms	Summer			Autumn		
	%F	%W	%RI	%F	%W	%RI
Cirripedia	27.1	+	+	19.1	+	+
Cyprid larvae	27.1	+		19.1	+	
Copepods	6.3	+	+			
<i>Calanus sinicus</i>	6.3	+				
Organic matters	100.0	99.9	99.9	100.0	99.9	99.9
Total		100.0	100.0		100.0	100.0

+, Less than 0.1%.

Table 3. $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ values of potential food sources (POM, *Zostera marina* and epiphyte), zooplankton (amphipods and copepods), and sardine *Sardinops melanostictus* collected in summer and autumn 2022 in the southern coast of Korea

Sample		Summer					Autumn				
		$\delta^{13}\text{C}$			$\delta^{15}\text{N}$		$\delta^{13}\text{C}$			$\delta^{15}\text{N}$	
		n	Mean	SD	Mean	SD	n	Mean	SD	Mean	SD
Potential food source	Particulate organic matter (POM)	2	-19.0	0.1	6.9	0.4	2	-19.4	0.1	7.9	0.0
	Seagrass <i>Zostera marina</i>	2	-10.3	0.3	6.8	0.0	2	-10.2	0.4	6.2	0.1
	Epiphyte	2	-11.7	0.3	7.7	0.2	2	-12.3	0.2	5.5	0.1
Zooplankton	Amphipods	1	-21.4	-	10.3	-	1	-11.7	-	7.7	-
	Copepods	2	-21.2	0.3	9.9	0.2	2	-20.0	0.1	11.6	0.1
Consumer	<i>Sardinops melanostictus</i>	20	-17.9	0.5	10.3	0.5	30	-17.6	0.3	10.7	0.4

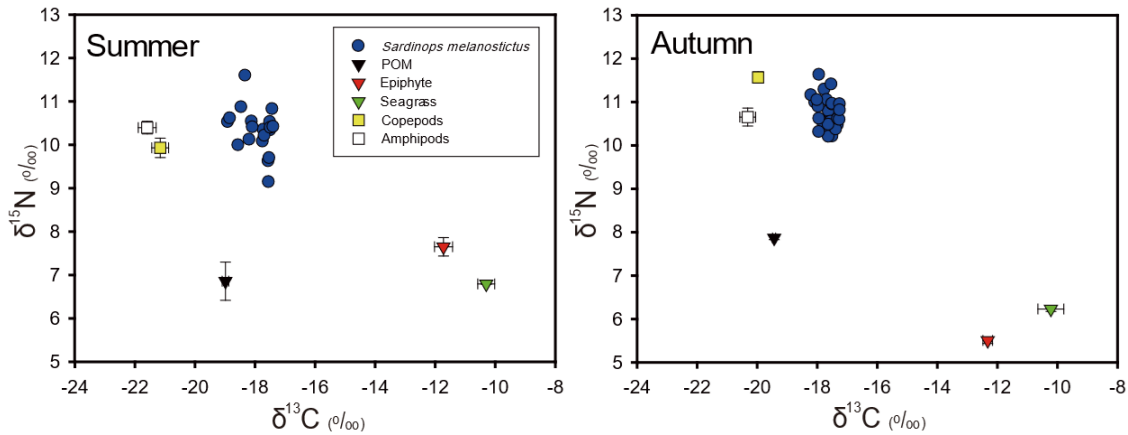


Fig. 3. Dual isotope plots of $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ values of the potential food sources (POM, seagrass, epiphyte), zooplankton (amphipods and copepods), and sardine *Sardinops melanostictus* in the Southern coast of Korea during summer and autumn 2022. Values are presented as mean $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ ($\text{‰} \pm 1$ SD). POM, Particulate organic matter.

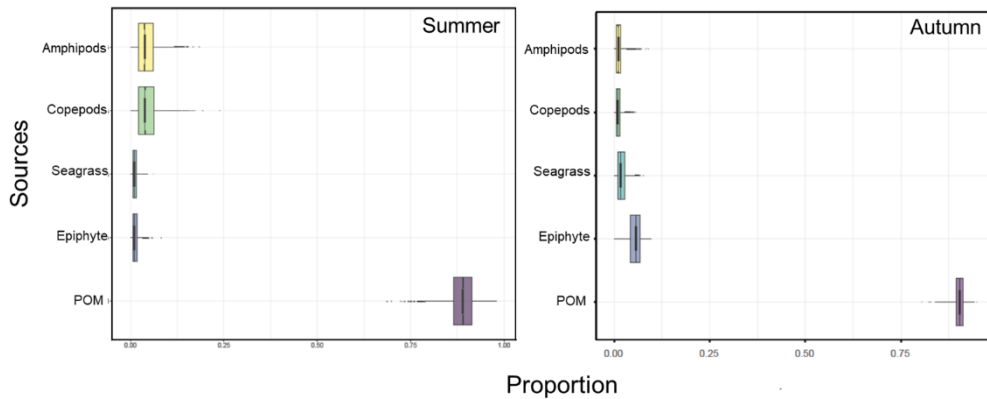


Fig. 4. Relative contributions (95% credibility interval) of the potential food sources (POM, seagrass and epiphyte), zooplankton (amphipods and copepods) to sardine *Sardinops melanostictus* resulted from Bayesian mixing model using SIAR software. POM, Particulate organic matter.

석된다. 정어리의 $\delta^{15}\text{N}$ 값은 여름에 $10.4 \pm 0.5\text{‰}$ (9.1–11.6‰), 가을에 $10.7 \pm 0.4\text{‰}$ (10.2–11.6‰)으로, 동물플랑크톤을 제외한 다른 잠재먹이원들이 가지는 값보다 높은 분포를 나타내었다(Fig. 3). $\delta^{15}\text{N}$ 값은 상대적인 영양단계를 나타내는 지시자로 영양단계가 높은 먹이생물을 많이 섭식할수록 소비자 동물군의 $\delta^{15}\text{N}$ 값은 증가하는 경향을 나타낸다(Cresson et al., 2014).

FL에 따른 정어리의 $\delta^{13}\text{C}$ 및 $\delta^{15}\text{N}$ 값을 비교한 결과, $\delta^{13}\text{C}$ 값은 7월과 10월 모두 상관관계가 나타나지 않았다(각각, t -test, $P=0.138$, $P=0.688$). 반면에, $\delta^{15}\text{N}$ 값의 경우, 7월에는 상관관계가 없었으나, 10월에는 유의한 차이를 보였다(각각, t -test, $P=0.156$, $P=0.035$).

SIAR mixing model을 이용한 먹이 기여율

정어리에 대한 먹이원별(POM, 거머리말, epiphyte, 단각류,

요각류) 잠재기여율을 평가하기 위하여 안정동위원소 비값을 기반으로 SIAR mixing model을 사용하여 결과를 산출하였다. 여름의 경우, 정어리의 가장 큰 먹이원은 POM (89%)으로 나타났다으며, amphipods (4%), copepods (4%), *Z. marina* (1%), epiphyte (1%) 순으로 나타났다. 가을의 경우, POM (90%), epiphyte (5%), *Z. marina* (2%), amphipods (1%), copepods (1%) 순으로 나타났다(Fig. 4). 이는 두 계절 모두 정어리의 먹이원으로써 POM의 기여도가 89–90%로 다른 먹이원에 비해 아주 높게 나타났는데, 이 결과는 위내용물 분석 결과와 일치하였다.

그러므로 여름과 가을철 우리나라 남해 연안에 출현하는 정어리는 식물플랑크톤 기원의 부유유기물을 주먹이원으로 이용하는 결과를 보여주었다.

안정동위원소와 위내용물 분석 기법을 결합한 먹이원 평가

본 연구는 최근 남해 통영 연안에 출현량이 증가한 정어리를 대상으로 먹이원의 계절 변동 특성을 파악하기 위하여 안정동위원소와 위내용물 분석 기법을 활용하여 수행하였다. 정어리의 위내용물 분석을 통해 여름과 가을 입자유기물(organic matter)이 주요 먹이원으로 분석되었다. 정어리와 잠재먹이원들의 탄소 및 질소 안정동위원소 비값을 기반으로 한 SIAR mixing model 분석 결과에서도 두 계절 모두 부유성 기원의 유기물의 기여가 높은 것으로 확인하였다.

본 연구를 통해 안정동위원소 분석기술은 해양생태계 내에서 여러 생물들의 섭식활동 및 에너지 공급원 등을 파악하는데 효과적인 수단임을 확인하였다. 동시에 위내용물 분석 기법과 병행하였을 때 더 해상도 높은 수산자원의 섭식생태 연구를 진행할 수 있음을 검증할 수 있었다. 본 연구는 남해안에 서식하는 정어리의 섭식생태 및 먹이 관계를 밝히는 첫 연구로 두 계절에 대한 연구 결과라는 한계점은 있지만, 이러한 해양생물의 섭식생태 연구는 해양생태계 내에서 피포식 관계와 생태계 내 지위를 파악하기 위한 중요한 자료이다. 따라서 본 연구결과는 기후변화 등의 해양환경 변화에 따른 우리나라 해양생태계 반응을 이해하고, 생태계 기반 수산자원관리를 위한 연구에 대한 기초 자료로 이용될 수 있을 것으로 사료된다.

사 사

본 연구는 2023년 국립수산과학원 수산과학연구사업(R2023001)의 지원을 받아 수행된 연구입니다.

References

- Buckland A, Baker R, Loneragan N and Sheaves M. 2017. Standardising fish stomach content analysis: The importance of prey condition. *Fish Res* 196, 126-140. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2017.08.003>.
- Bunce M, Rosendo S and Brown K. 2010. Perceptions of climate change, multiple stressors and livelihoods on marginal African coasts. *Environmen Dev Sustain* 12, 407-440. <https://doi.org/10.1007/s10668-009-9203-6>.
- Chiba S, Aita M, Tadokoro K, Saino T, Sugisaki H and Nakata K. 2008. From climate regime shifts to lower-trophic level phe-nology: Synthesis of recent progress in retrospective studies of the western North Pacific. *Prog Oceanogr* 77, 112-126. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2008.03.004>.
- Cifuentes LA, Sharp JH and Fogel ML. 1988. Stable carbon and nitrogen isotope biogeochemistry in the Delaware estuary. *Limnol Oceanogr* 33, 1102-1115. <https://doi.org/10.4319/lo.1988.33.5.1102>.
- Cinner JE, McClanahan TR, Graham NAJ, Daw TM, Maina J, Stead SM, Wamukota A, Brown K and Bodin O. 2012. Vulnerability of coastal communities to key impacts of climate change on coral reef fisheries. *Glob Environ Change* 22, 12-20. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2011.09.018>.
- Cresson P, Ruitton S, Ourgaud M and Harmelin-Vivien M. 2014. Contrasting perception of fish trophic level from stomach content and stable isotope analyses: A mediterranean artificial reef experience. *J Exp Mar Biol Ecol* 452, 54-62. <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2013.11.014>.
- DeNiro MJ and Epstein S. 1977. Mechanism of carbon isotope fractionation associated with lipid synthesis. *Science* 197, 261-263. <https://doi.org/10.1126/science.327543>.
- Feigenbaum DL. 1991. Food and feeding behaviour. In: *The Biology of Terrestrial Molluscs*. Barker GM, ed. Oxford University Press, Oxford, U.K., 259-288.
- Fry B and Sherr EB. 1989. $\delta^{13}\text{C}$ Measurements as indicators of carbon flow in marine and freshwater ecosystems. In: *Stable Isotopes in Ecological Research*. Rundel PW, Ehleringer JR, Nagy KA, eds. Ecological Studies. vol 68. Springer, New York, NY, U.S.A. https://doi.org/10.1007/978-1-4612-3498-2_12.
- Fukami K, Watanabe A, Fujita S, Yamaoka K and Nishijima T. 1999. Predation on naked protozoan microzooplankton by fish larvae. *Mar Ecol Prog Ser* 185, 285-291.
- Hirai J, Hidaka K, Nagai S and Ichikawa T. 2017. Molecular-based diet analysis of the early post larvae of Japanese sardine *Sardinops melanostictus* and Pacific round herring *Etrumeus teres*. *Mar Ecol Prog Ser* 564, 99-113. <https://doi.org/10.3354/meps12008>.
- Hobson ES. 1974. Feeding relationships of teleostean fishes on coral reefs in Kona, Hawaii. *Fish Bull* 72, 915-1031.
- Hopkins TL. 1985. Food web of an Antarctic midwater ecosystem. *Mar Biol* 89, 197-212. <https://doi.org/10.1007/BF00392890>.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2007. IPCC the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. <http://www.ipcc.ch/report/ar4/syr/> on May 30, 2023.
- Ju SJ and Kim SJ. 2013. Assessment of the impact of climate change on marine ecosystem in the South Sea of Korea II. *Ocean Polar Res* 35, 123-125. <https://doi.org/10.4217/OPR.2013.35.2.123>.
- Kang CK, Choy EJ, Hur YB and Myeong JI. 2009. Isotopic evidence of particle size-dependent food partitioning in cocultured sea squirt *Halocynthia roretzi* and Pacific oyster *Crassostrea gigas*. *Aquat Biol* 6, 289-302. <https://doi.org/10.3354/ab00126>.
- Kang CK, Choy EJ, Son YS, Lee JY, Kim JY, Kim YD and Lee KS. 2008. Food web structure of a restored macroalgal bed in the eastern Korean peninsula determined by C and N stable isotope analyses. *Mar Biol* 153, 1181-1198. <https://doi.org/10.1007/s00227-007-0890-y>.
- Kang YS, Kim JY, Kim HG and Park JH. 2002. Long-term chang-

- es in zooplankton and its relationship with squid, *Todarodes pacificus*, catch in Japan/East Sea. Fish Oceanogr 11, 337-346. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2419.2002.00211.x>.
- Kawasaki T and Kumagai A. 1984. Food habits of the far Eastern sardine and their implications in the fluctuation pattern of the sardine stock. Bull Jpn Soc Fis 50, 1657-1663.
- Kim IS, Choi Y, Lee CL, Lee YJ, Kim BJ and Kim JH. 2005. Illustrated Book of Korean Fishes. Kyo-Hak Publishing Co., Seoul, Korea, 98-102.
- Kim JY. 1998. Annual variation of biomass and distribution area of Pacific sardine, *Sardinops melanostictus* off Korea. Bull Nat Fish Res Dev Inst 54, 27-36.
- Kim JY, Kim JI and Choi GH. 1994. Comparisons of egg distribution and mortality rate between anchovy and sardine during spring in the Southern Waters of Korea. Bull Korean Fish Soc 27, 299-305.
- Kim SA, Zhang CI, Kim JY, Oh JH, Kang SK and Lee JB. 2007. Climate variability and its effects on major fisheries in Korea. Ocean Sci J 42, 179-192.
- Kim SH and Pang IC. 2005. Distribution and characteristic of transport mechanism of eggs and larvae of anchovy, *Engraulis japonica*, in the Southwestern Sea of Korea in July and November, 2001. Fish Aquatic Sci 38, 331-341. <https://doi.org/10.5657/kfas.2005.38.5.331>.
- Kim YM. 1983. The ecological characteristics and fishing conditions of sardine, *Sardinops melanostictus*. J Kor Soc Fish Tech 16, 54-57.
- Kim YM and Kim JY. 1984. Stock assessment of Pacific sardine, *Sardinops melanosticta* (Temminck et Schlegel), in the Korean waters. Bull Fish Res Dev Agency 33, 35-47.
- Knickle DC and Rose GA. 2014. Dietary niche partitioning in sympatric gadid species in coastal Newfoundland: Evidence from stomachs and C-N isotopes. Environ Biol Fish 97, 343-355. <https://doi.org/10.1007/s10641-013-0156-0>.
- KOSIS (Korean Statistical Information Service). 2021. Survey of Fishing Production Trends. Retrieved from <https://kosis.kr/index/index.do> on May 10, 2023.
- Lu HJ and Lee HL. 2014. Changes in the fish species composition in the coastal zones of the Kuroshio current and China Coastal current during periods of climate change: Observations from the set-net fishery (1993-2011). Fish Res 155, 103-113. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2014.02.032>.
- Matsuyama M, Adachi S, Nagahama Y, Kitajima C and Matsuura S. 1991. Annual reproductive cycle of the captive female Japanese sardine *Sardinops melanostictus*: Relationship to ovarian development and serum levels of gonadal steroid hormones. Mar Biol 108, 21-29. <https://doi.org/10.1007/BF01313467>.
- Minagawa M and Wada E. 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.
- Moon SY, Lee MH, Jung KM, Kim HY and Jung JH. 2022. Spatial and temporal distribution and characteristics of zooplankton communities in the Southern Coast of Korea from spring to summer period. Korean J Fish Aquatic Sci 55, 154-170. <https://doi.org/10.5657/KFAS.2022.0154>.
- Morimoto H. 2003. Age and growth of Japanese sardine *Sardinops melanostictus* in Tosa Bay, south-western Japan during a period of declining stock size. Fish Sci 69, 745-754. <https://doi.org/10.1046/j.1444-2906.2003.00682.x>.
- NFRDI (National Fisheries Research & Development Institute). 2013. Ecology and Fishing Ground of Fisheries Resources in Korean Waters. Yemoonsa Publication Co., Paju, Korea, 228-235.
- Ohizumi H, Kuramochi T, Amano M and Miyazaki N. 2000. Prey switching of Dall's porpoise *Phocoenoides dalli* with population decline of Japanese pilchard *Sardinops melanostictus* around Hokkaido, Japan. Mar Ecol Prog Ser 200, 265-275.
- Park HJ, Park TH, Lee C and Kang C. 2018. Ontogenetic shifts in diet and trophic position of walleye pollock, *Theragra chalcogramma*, in the western East Sea (Japan Sea) revealed by stable isotope and stomach content analyses. Fish Res 204, 297-304. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2018.03.006>.
- Park JM, Lee CI, Jung HG, Lee CL and Park HJ. 2022. Winter food resource partitioning between sympatric *Gadus macrocephalus* and *G. chalcogrammus* in the Northern Coast of East Sea, South Korea inferred from stomach contents and stable isotopes analyses. Korean J Ichthyol 34, 102-112.
- Park MO, Lee YW, Ahn JB, Kim SS and Lee SM. 2017. Spatiotemporal distribution characteristics of temperature and salinity in the coastal area of Korea in 2015. J Korean Soc Mar Environ Energy 20, 226-239. <https://doi.org/10.7846/JKOSMEE.2017.20.4.226>.
- Park TH, Lee CI, Kang CK, Kwak JH, Lee SH and Park HJ. 2020. Seasonal variation in food web structure and fish community composition in the East/Japan Sea. Estuaries Coast 43, 615-629. <https://doi.org/10.1007/s12237-019-00530-4>.
- Park YC and Kim JY. 1981. A study on the age and growth of sardine, *Sardinops melanosticta* (TEMMINCK et SCHLEGEL) in the Korean waters. Bull Fish Res Dev Agency 27, 71-79.
- Parnell AC, Phillips DL, Bearhop S, Semmens BX, Ward EJ, Moore JW, Jackson AL, Grey J, Kelly DJ and Inger R. 2013. Bayesian stable isotope mixing models. Environmetrics 24, 387-399. <https://doi.org/10.1002/env.2221>.
- Perry RI, Ommer RE, Barange M, Jentoft S, Neis B and Sumaila UR. 2011. Marine social-ecological responses to environmental change and the impacts of globalization. Fish Fish 12, 427-450. <https://doi.org/10.1111/j.1467-2979.2010.00402.x>.
- Phillips DL. 2001. Mixing models in analyses of diet using multiple stable isotopes: A critique. Oecologia 127, 166-170.

- Post DM, Layman CA, Arrington DA, Takimoto G, Quattrochi J and Montaña CG. 2007. Getting to the fat of the matter: Models, methods and assumptions for dealing with lipids in stable isotope analyses. *Oecologia* 152, 179-189. <https://doi.org/10.1007/s00442-006-0630-x>.
- Rolff C. 2000. Seasonal variation in $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ of size-fractionated plankton at a coastal station in the northern Baltic proper. *Mar Ecol Prog Ser* 203, 47-65. <https://doi.org/10.3354/meps203047>.
- Sarr O, Kindong R and Tian S. 2021. Knowledge on the biological and fisheries aspects of the Japanese sardine, *Sardinops melanostictus* (Schlegel, 1846). *J Mar Sci Eng* 9, 1403. <https://doi.org/10.3390/jmse9121403>.
- Shimose T, Watanabe H, Tanabe T and Kubodera T. 2012. Ontogenetic diet shift of age-0 year Pacific bluefin tuna *Thunnus orientalis*. *J Fish Biol* 82, 263-276. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.2012.03483.x>.
- Shin DH, Park HT, Lee CI, Jeong JM, Lee SJ, Kang SY and Park HJ. 2022. Trophic ecology of largehead hairtail *Trichiurus japonicus* in the South Sea of Korea revealed by stable isotope and stomach content analyses. *Front Mar Sci* 9, 1322. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.910436>.
- Shin DH, Park TH, Lee CI, Hwang KS, Kim DN, Lee SJ, Kang SY and Park HJ. 2022. Characterization of trophic structure of fish assemblages in the east and south seas of Korea based on C and N stable isotope ratios. *Water* 14, 58. <https://doi.org/10.3390/w14010058>.
- Wada T and Jacobson LD. 1998. Regimes and stock-recruitment relationships in Japanese sardine (*Sardinops melanostictus*), 1951-1995. *Can J Fish Aquat Sci* 55, 2455-2463. <https://doi.org/10.1139/f98-135>.
- Watanabe Y and Saito H. 1998. Feeding and growth of early juvenile Japanese sardines in the Pacific waters off central Japan. *J Fish Biol* 52, 519-533. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.1998.tb02014.x>.
- Watanabe Y, Zenitani H and Kimura R. 1996. Offshore expansion of spawning of the Japanese sardine, *Sardinops melanostictus*, and its implication for egg and larval survival. *Can J Fish Aquat Sci* 53, 55-61. <https://doi.org/10.1139/f95-153>.
- Yamamoto M and Katayama S. 2012. Interspecific comparisons of feeding habit between Japanese anchovy *Engraulis japonicus* and Japanese sardine *Sardinops melanostictus* in eastern Hiuchi-nada, central Seto Inland Sea, Japan, in 1995. *Bull Jpn Soc Fish Oceanogr* 76, 66-76.
- Yoo S, An YR, Bae S, Choi S, Ishizaka J, Kang YS, Kim ZG, Lee C, Lee JB, Li R, Park J, Wang Z, Wen Q, Yang EJ, Yeh SW, Yeon I, Yoon WD, Zhang CI, Zhang X and Zhu M. 2010. Status and trends in the Yellow Sea and East China Sea region. In: *Marine Ecosystems of the North Pacific Ocean, 2003-2008*. No. 4. McKinnell SM and Dagg MJ, eds. PICES Special Publication, Saanich Road, Canada, 360-393.