

하계 한반도 해역(동해, 서해, 남해 및 동중국해)의 하위영양단계 먹이망 구조 : 탄소 및 질소 안정동위원소 활용

민준오* · 이창화** · 윤석현****

* 한양대학교 해양융합공학과 박사과정, ** 부산대학교 해양학과 석사과정, *** 국립수산물과학원 연구사

Food-Web Structures in the Lower Trophic Levels of the Korean Seas (East Sea, West Sea, South Sea, and East China Sea) during the Summer Season: Using Carbon and Nitrogen Stable Isotopes

Jun-Oh Min* · Chang-Hwa Lee** · Seok-Hyun Youn****

* Ph.D student, Department of Marine Science and Convergence Engineering Hanyang University, Ansan, 15588, Korea

** Master's Course, Department of Oceanography, Pusan National University, Busan, 46241 Korea

*** Senior Researcher, Oceanic climate and Ecology Research Division, National Institute of Fisheries Science, Busan, 46241 Korea

요약 : 본 연구는 2019년 8월 한반도 주변해역(동해, 서해, 남해, 동중국해)에서 탄소 및 질소 안정동위원소 기법을 활용하여 하위영양 단계에서의 먹이망 구조를 파악하였다. 입자성 유기물(POM)의 $\delta^{13}\text{C}$ 범위는 $-26.18 \sim -20.61 \%$, $\delta^{15}\text{N}$ 범위는 $5.36 \sim 15.20 \%$ 의 넓은 범위를 보였다. POM과 각 생물별 개체군 사이의 $\delta^{13}\text{C}$ 분별작용의 결과는 대부분 micro-POM을 섭식하는 것으로 확인하였으나 해역 간 차이를 보였다. 각 생물별 영양단계는 chaetognaths (3.40 ± 0.61)가 가장 높은 영양단계에 있음을 확인하였다. 동위원소 혼합모델을 적용한 결과에서 chaetognaths의 먹이원으로 copepods (13~48%)와 euphausiids (20~51%)가 가장 높은 기여도를 나타냈다. 본 연구결과와 각 해역별 먹이원의 제한적 공급 및 다양성의 차이가 먹이망 구조 및 각 생물별 동위원소 비에 영향을 미친 것으로 판단된다.

핵심용어 : 안정동위원소, 먹이망, 영양단계, 동위원소혼합모델, 먹이원

Abstract : Food web structures in the lower trophic levels of the seas around the Korean peninsula were investigated in August 2019 using stable isotopes. There were variable ratios of the carbon ($-26.18 \sim -20.61 \%$) and nitrogen stable ($5.36 \sim 15.20 \%$) isotopes in the particulate organic matter (POM). Most of the organisms ingested micro-POM as a major food source, but this varied spatially. The chaetognaths (3.40 ± 0.61) occupied the highest trophic level. The isotope mixing model showed that the proportions (13 ~ 51 %) of some organisms (i.e., copepods and euphausiids) reflected the relative contributions as major food sources for chaetognaths at each site.

Key Word : Stable isotope, Food-web, Trophic position, SLAR, Diet source

1. 서론

먹이망(food web)은 기초생산자(primary producer)에 의해 합성된 에너지가 상위 영양단계(high trophic level)로 전달되는 과정을 의미하며 해양생태계(marine ecosystem)를 구성하는 기본 기능이다(Krumins et al., 2013; Schückel et al., 2015). 또한

생물 다양성과 생태계 기능 사이의 관계 및 영양단계 연쇄 효과(trophic cascades)가 생태계를 어떻게 변화시킬 수 있는지에 대한 정보를 제공하여 자연적, 인위적 교란에 대한 반응을 추적함으로써 해양 생태계의 보전과 지속적인 관리를 위해 먹이망 구조와 기능을 이해하는 것은 필수적이다(Frank et al., 2005; Kortsch et al., 2015).

한반도 주변 해역은 동해(East Sea), 서해(West sea), 남해(South Sea)의 서로 다른 해양환경 특성을 나타내는 해역으로

* First Author : jomin8310@gmail.com, 051-510-3931

† Corresponding Author : younsh@korea.kr, 051-720-2233

구분되며, 제주도와 중국 양자강 하구 남단을 잇는 선에 의해 동중국해(East China Sea)로 구분할 수 있다. 동해는 대륙붕의 폭이 좁고 급경사 대륙사면이 형성되어 심해로 연결되어 있으며(Lee and Kim, 2007), 북한한류와 동한난류가 약 37°N 부근에서 아극전선이 형성되어 있어 기초생산력(primary production)이 높아 어장으로써 가치가 높은 지역이다(Choi et al., 2008; Yoon and Kim, 2009). 서해는 한국과 중국으로 둘러싸인 반 폐쇄성 연해로 남으로 동중국해와 연결되어 있으며 세계적으로 가장 크고 얕은 대륙붕 중 하나이며 생물 생산성이 높게 나타나며(Tang, 2003), 남해는 서해, 동중국해와 동해를 연결하는 해역으로 해안 굴곡이 심한 리아스식 해안(rias coast)이며 남쪽으로부터 유입되는 쿠로시오 해류 지류인 대마난류와 제주해협을 통해 유입되는 서해 연안수와 남해 연안수 등 다양한 수괴가 공존하여 먹이생물이 풍부하다(Choo and Kim, 1998; Kim and Pang, 2005).

최근 기후변화가 가속화됨에 따라 해양생태계 시스템이 변화되고 있으며 특히 해양의 수온 변화는 어획 대상종의 구성 변화, 어군의 서식지 이동, 어류의 성장률 등 어업생산에 있어 중요한 영향을 미치고 있음이 보고되고 있다(Lu and Lee, 2014). 이러한 변화는 일차 생산력의 분포와 속도에 변화를 주어 일차생산자로부터 먹이망을 통해 상위 소비자에게 연결되는 과정에 변화를 야기할 수 있으며(Kang et al., 2012), 해양생태계의 물질순환 및 어획량 감소에 영향을 미칠 수 있다(Eom et al., 2015). 따라서 우리나라 해역의 해양생태계를 보존하고 잠재적 어업 생산력을 유지하기 위해서는 먹이망 구조의 변화 및 각 해역별 먹이원 특성을 이해하는 것은 중요하다.

생태계의 먹이망 구조를 파악하기 위한 방법으로는 전통적으로 위 내용물 분석 방법과(Hopkins, 1985; Harris et al. 2000), 생화학적 기법인 안정동위원소 분석(Stable Isotope Analysis, SIA) 등의 방법이 활용되어왔다(Minagawa and Wada, 1984; Fry, 1999; Post, 2002a). 그러나 위 내용물 분석 방법은 상위 소비자가 섭취한 먹이를 직접 확인할 수 있는 보편적인 방법이지만 소화가 느린 먹이만을 확인할 수 있기 때문에 정확한 섭식 성향을 파악하는데 어려움이 있다(Feigenbaum, 1991). 안정동위원소를 활용한 먹이망 구조 해석은 먹이원(diet source)에 비해 섭식자(consumer) 체내에 상대적으로 무거운 동위원소가 남아있기 때문에 탄소 및 질소 안정동위원소는 섭식자의 먹이원에 대한 긴 시간 동안 축적된 정보를 얻을 수 있는 장점이 있어 해양 생태계의 영양단계를 해석하는데 유용한 방법이다(Minagawa and Wada, 1984).

안정동위원소를 활용한 분석 방법은 소비자 동물 사이에 각 영양단계마다 탄소 안정동위원소는 1% 이내, 질소 안정

동위원소는 3~4% 정도가 높아지는 동위원소 분별 작용(isotopic fractionation)이 나타나는 원리를 이용하며, 이 중 탄소 안정동위원소는 먹이원과 섭식자 사이의 안정동위원소비의 차이가 적게 나타나기 때문에 먹이원을 식별하는데 적합하고 질소 안정동위원소는 각 생물의 영양단계에 따라 상대적으로 크고 일정한 안정 동위원소비의 변화를 보이는 특성이 있어 생태계 구성 생물의 영양단계를 나타낼 수 있다(Minagawa and Wada, 1984; Post, 2002a; Post, 2002b). 이는 해양 생태계뿐만 아니라 수 생태계 전반적인 생물간 섭식 생태를 추적할 수 있으며, 수권 환경 내 에너지 흐름 및 물질순환을 파악하기 위한 연구에 중요한 정보를 제공할 수 있다.

안정동위원소 기법을 활용한 생태계 연구는 국내에서도 활발히 진행되고 있는데 호소, 하천, 하구 등과 같은 서로 다른 생태환경을 대상으로 먹이망 구조 및 유기물 기원을 정량적으로 파악하는데 활용되고 있다(Gal et al., 2012; Kim et al., 2013; Ha et al., 2014). 이뿐만 아니라 한반도 주변 해역에서 실시된 먹이망 연구로는 동해와 서해에서 *Euphausia pacifica* (*E. pacifica*)의 섭식형태 연구(Im and Suh, 2016; Kim et al., 2019), 지방산을 활용한 copepods의 서식 위도별 먹이원 연구(Ju et al., 2011), 위 내용물 및 지방산 분석을 통한 모악류의 먹이 섭식 특성(Yoon et al., 2016) 등 다양한 생물 대상을 가지고 해당 생태계의 먹이망 구조를 설명하였다. 그러나 한반도 주변 4개 해역의 대한 먹이망 구조 연구는 Kim et al.(2010)에 의해 연구된 동해, 서해, 남해에서 지방산 분석기법을 통한 *E. pacifica*의 섭식형태를 비교하여 고찰한 연구 외에 안정동위원소 분석기법을 활용하여 전 해역을 비교 분석한 연구결과는 미미하다.

따라서 본 연구에서는 한반도 주변 연근해역인 동해, 서해, 남해, 동중국해의 각 생물별 탄소 및 질소 안정동위원소를 비교 분석하였고, 각 해역별 먹이망 구조 및 영양단계를 파악하여 물질순환 및 에너지 흐름을 파악하는데 목적이 있다.

2. 재료 및 방법

2.1 연구 지역 및 시료 채집

본 연구는 하계 한반도 주변 연근해 동해, 서해, 남해 및 동중국해에서 국립수산물품질관리원 정선해양조사 체계를 활용하여 조사되었다. 시료는 각 해역(동해 : 105-05, 209-07; 서해 : 307-05, 309-09; 남해 : 314-07, 400-14; 동중국해 : 315-13, 317-21)에서 총 8개 정점에서 먹이망 조사를 위한 현장관측 및 시료채집을 실시하였다(Fig. 1).

하게 한반도 해역(동해, 서해, 남해 및 동중국해)의 하위영양단계 먹이망 구조 : 탄소 및 질소 안정동위원소 활용

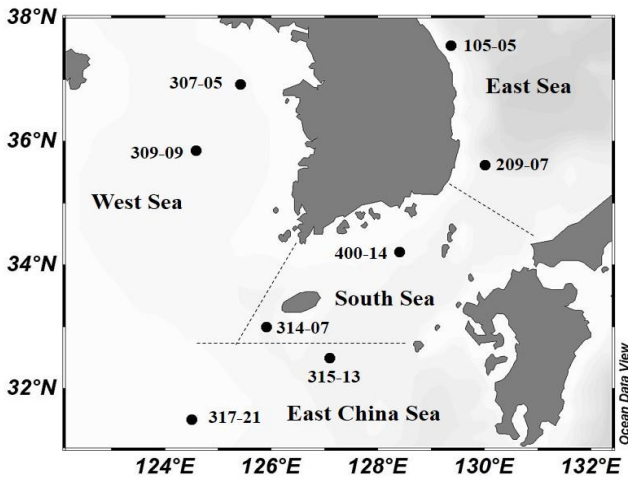


Fig 1. Map showing the sampling stations in the East Sea, West Sea, South Sea and East China Sea.

수온 및 염분 측정은 CTD(SBE-911, Seabird Electronics)를 이용하여 2 m 에서 200 m 이내에서 측정 되었으며, 해수 시료는 2 m, 10 m, 20 m, 30 m, 50 m, 75 m, 100 m에서 rosette sampler 에 부착된 Niskin bottle을 이용하여 유광층(euphotic zone) 범위 내에서 채수하였다.

입자성 유기물(POM, particle organic matter)은 1 L 이상 해수를 채수하여 total-POM(< 200 μ m), micro-POM(20-200 μ m), pico-POM (< 2 μ m)으로 구분하여 여과하였다. Total-POM 시료는 200 μ m 망목을 이용하여 동물플랑크톤 및 크기가 큰 입자성 유기물을 제거 후 미리 태운(450 $^{\circ}$ C, 4시간) 25 mm GF/F(pore size : 0.7 μ m)로 여과하였다. Micro-POM은 200 μ m 망목으로 거른 후 다시 20 μ m의 망목에 여과시킨 후 25 mm GF/F로 여과하였으며, pico-POM은 200 μ m 망목과 20 μ m의 망목으로 여과된 해수를 2 μ m 필터지에 여과 후 다시 25 mm GF/F 여과지로 여과하여 2 μ m 미만의 pico-size의 입자성 유기물을 포집하였다. 포집된 POM은 광분해를 막기 위해 알루미늄 호일에 포장 후 분석 시까지 초 저온 냉동고(-80 $^{\circ}$ C)에 보관하였다. 동물 플랑크톤 채집을 위한 샘플은 200 μ m 봉고 네트를 이용하여 각 해역별 최대 수심층에서 약 10 m 이상 상층부까지 1 m/s의 속도로 수직 채집하였다.

수직 채집된 시료는 광학 현미경을 이용하여 Copepods (large), Copepods(small), Amphipods, Chaetognaths, Euphausiids 분류군으로 구분 후 분석 시까지 냉동 보관하였다. Copepods의 크기별 구분 기준은 광학 현미경 관찰을 통해 체폭 0.5 mm 미만을 copepods(small)로 구분하였으며, 0.5 mm 이상을 copepods (large)로 구별하였다.

2.2 이화학적 수질 자료

입자성 유기물 내 엽록소-a(이하 chl-a로 표기) 측정을 위한 시료는 각 깊이에서 채수 후 200 μ m 망목으로 여과 후 45 mm GF/F에 여과하여 90% 아세톤으로 12시간 추출 후 syringe filter (PTFE, 25 mm, 0.2 μ m, Hydrophobic)를 이용하여 여과 후 fluorometer (Turner Designs, 10AU)로 분석하였다(Parsons et al., 1984).

영양염 시료는 채수된 해수를 syringe filter(PTFE, 25 mm, 0.45 μ m Hydrophilic)로 여과 후 Auto-Analyzer(QuAatro, Seal Analytical)로 분석하였다.

2.3 탄소 및 질소 안정동위원소 비 분석

각 해역에서 채집된 모든 시료는 개체 수가 충분치 않아 해역별로 통합(pooling)하여 분석 되었다.

탄소 및 질소 안정동위원소 분석을 위한 사이즈별 입자성 유기물 시료는 동결건조 후 1N 염산을 이용하여 무기탄소를 제거 후 주석 캡슐(tin capsule)에 밀봉하였다. 생물 시료는 동결건조 후 막자사발을 이용하여 잘게 분쇄 후 1N 염산을 이용하여 무기탄소 제거 후 0.1~0.5 mg을 주석 캡슐에 밀봉하였다. 전 처리된 시료는 University of Alaska Fairbanks의 동위원소 질량분석기(Finnigan Delta +XL, mass spectrometer)로 분석하였으며, 각 시료별 동위원소 비는 아래의 식(1)으로 계산되었으며 천분율로 나타내어 델타(δ) 기호로 표시하였다.

$$\delta^{13}C/\delta^{15}N = \left[\left(\frac{R_{sample}}{R_{standard}} \right) - 1 \right] \times 1000 (\text{‰}), \quad (1)$$

$$(R = {}^{13}C/{}^{12}C, {}^{15}N/{}^{14}N)$$

생물시료 내 지질 함량은 $\delta^{13}C$ 에 큰 영향을 끼치며 지방 함량에 따라 그 값이 가벼워질 수 있다(DeNiro and Epstein, 1977, Kim et al., 2013). 따라서 $\delta^{13}C$ 의 정확도를 향상시키기 위해서는 지질 제거가 필요하나, 지질 제거 방법은 $\delta^{15}N$ 값이 무거워지는 오류를 범할 수 있다(Sweeting et al., 2006; Kim et al., 2013). 따라서 정확한 $\delta^{13}C$ 및 $\delta^{15}N$ 분석을 위해서는 각 시료별 2번 이상의 분석이 필요하나 본 연구에서는 분석 시료양이 충분하지 않아 지질 제거를 실시하지 않았다. 따라서 아래의 식(2)을 활용하여 $\delta^{13}C$ 비를 보정하여 사용하였다(Kline and Willette, 2002). 동물샘플의 지질과 단백질의 조성비를 통해 도출된 방정식은 식(2)에 나타내었다. 여기서 6은 단백질과 비교한 지질의 ^{13}C 소모량의 추정 값이며, C:N 은 시료의 탄소 질소 비, 93은 지질 함량 비율을 나타낸다.

$$\delta^{13}C + 6 \left[\frac{-0.207 + 3.9}{1 + \{287(1 + 1/(0.246C : N/93))\}} \right] \quad (2)$$

2.4 영양단계(Trophic Position, TP)

한반도 연근해역 내 생물 시료별 생태적 지위는 각 생물 시료별 질소동위원소비를 활용하여 계산되었으며, 아래 Post et al.(2000b) 식(3)을 인용하였다.

$$TP = [(\delta^{15}N_{org} - \delta^{15}N_{base}) / f] + \lambda \quad (3)$$

여기서 $\delta^{15}N_{org}$ 비는 각 대상생물의 $\delta^{15}N$ 값이며, $\delta^{15}N_{base}$ 의 base 값은 연구해역의 기초생산자 또는 일차섭식자의 $\delta^{15}N$ 를 나타낸다. 본 연구에서는 일차섭식자인 copepods(small)의 $\delta^{15}N$ 비를 사용하였다. f 는 영양단계별 분별계수로 2.3‰ (McCutchan et al., 2003)를 사용하였고 λ 는 일차섭식자의 영양단계인 2를 사용하였다. 각 영양단계에 따라 2를 초식성, 2 이상 3 미만을 잡식성, 3 이상을 육식성으로 구분하였다 (Dickman et al., 2008).

2.5 먹이원 기여도 평가

해역별 먹이원에 대한 양적 기여율을 평가하기 위해 베이시안(bayesian) 기반의 혼합 모델(mixing model)인 SIAR v. 4.2 (Stable Isotope Analysis in R; Parnell et al., 2010)를 사용하여 계산되었으며, Chang et al.(2016)에 의해 서술된 SIAR package 정량 분석방법을 적용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 환경요인

하계 조사된 각 해역의 이화학적 수질분석 결과 및 chl-*a* 농도는 Table 1에 나타내었다. 조사된 해역의 수온(T) 및 염분(S) 범위는 동해(T=1.02~21.82℃, S=32.72~34.35), 서해(T=8.94~27.86℃, S=31.82~32.66), 남해(T=13.86~28.90℃, S=30.92~33.79), 동중국해(T=15.70~29.45℃, S=31.08~34.64)의 넓은 범위를 보였으며, 동해의 평균 수온은 다른 해역보다 낮은 결과를 나타냈다.

용존무기질소(DIN) 및 용존무기인(DIP)의 농도 범위는 동해(DIN=0.06~1.59 μM, DIP=0.02~1.59 μM), 서해(DIN=0.71~7.56 μM, DIP=0.04~7.32 μM), 남해(DIN=1.19~13.38 μM, DIP=0.36~1.53 μM), 동중국해(DIN=0.96~12.90 μM, DIP=0.02~0.97 μM)로 각각 나타났다. 식물플랑크톤의 생체량을 가늠할 수 있는 chl-*a*의 농도 범위는 조사된 모든 해역에서 1 μg L⁻¹의 미만으로 나타나 매우 낮은 결과를 보이고 있다. 일반적으로 온대해역은 여름철 높은 표층 수온이 형성됨에 따라 강한 수온약층(thermocline)이 형성되고 이는 수층혼합(vertical mixing)을 원활하게 하지 않아 심층에서 공급되는 영양염의 공급을 약화시켜 식물플랑크톤 성장에 영향을 미치게 된다 (Nybakken and Bertness, 2005). 따라서 본 연구결과에서 제시된 이화학적 수질결과 및 낮은 chl-*a* 농도는 하계 전형적인 온대해역의 특성을 반영한 것으로 보인다.

Table 1. The water temperature (T), salinity (S), chlorophyll-a (chl-a) and nutrient (dissolved inorganic nitrogen; DIN, dissolved inorganic phosphate; DIP) at sampling stations

Oceanographic setting	Station	Lat. (°N)	Long. (°E)	T (°C)	S	Chl- <i>a</i> (μg L ⁻¹)	DIN (μM)	DIP (μM)
East Sea	105-05	37.55	129.37	1.02-21.82 (5.20±5.6)	33.52-34.35 (34.05±0.15)	0.04-1.02 (0.35±0.37)	0.37-20.81 (12.54±7.09)	0.03-1.48 (0.89±0.51)
	209-07	35.61	130.01	1.18-7.07 (12.07±7.60)	32.72-34.34 (33.90±0.51)	0.04-0.80 (0.27±0.26)	0.06-21.59 (7.16±8.09)	0.02-1.59 (0.49±0.57)
West Sea	307-05	36.92	125.42	12.69-25.77 (18.77±4.95)	31.82-32.22 (32.02±0.14)	0.22-1.46 (0.72±0.48)	0.86-7.32 (3.31±2.42)	0.86-7.32 (3.31±2.42)
	309-09	35.85	124.59	8.94-27.86 (15.28±7.99)	32.02-32.66 (32.44±0.25)	0.12-0.65 (0.26±0.21)	0.71-7.56 (3.09±3.10)	0.04-0.53 (0.20±0.23)
South Sea	314-07	33.00	125.90	13.86-28.90 (17.02±4.48)	14.69-27.48 (19.10±4.29)	0.13-1.12 (0.50±0.35)	1.19-10.55 (5.16±4.73)	0.36-1.37 (0.84±0.40)
	400-14	34.21	128.40	14.69-27.48 (19.10±4.29)	31.58-34.18 (33.31±0.98)	0.10-0.42 (0.21±0.12)	1.19-13.38 (6.27±5.39)	0.53-1.53 (1.08±0.38)
East China Sea	315-13	31.50	124.50	15.70-28.39 (21.51±4.53)	31.95-34.64 (34.01±0.83)	0.43-0.70 (0.57±0.11)	1.56-12.90 (6.84±5.99)	0.05-0.52 (0.28±0.26)
	317-21	31.50	124.50	24.90-31.08 (26.79±2.17)	18.48-32.89 (31.80±2.45)	0.07-0.33 (0.22±0.10)	0.96-12.70 (4.78±4.70)	0.02-0.97 (0.29±0.41)

하계 한반도 해역(동해, 서해, 남해 및 동중국해)의 하위영양단계 먹이망 구조 : 탄소 및 질소 안정동위원소 활용

Table 2. Carbon ($\delta^{13}\text{C}$) and nitrogen ($\delta^{15}\text{N}$) stable isotope values and C/N ratios in the four different seas around the Korean peninsula

Oceanography setting	Sample	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)		$\delta^{15}\text{N}$ (‰)		C/N	
		Avg.	SD.	Avg.	SD.	Avg.	SD.
East Sea	Total-POM	-24.78	0.11	7.57	0.55	12.54	0.34
	Micro-POM	-21.76	0.22	5.37	0.93	5.57	0.13
	Pico-POM	-25.84	0.05	10.10	0.71	9.14	1.38
	Copepods (large)	-20.56	0.06	8.05	0.11	5.00	0.07
	Copepods (small)	-24.44	0.15	5.99	0.48	8.86	0.31
	Amphipods	-22.72	0.01	7.19	0.80	5.49	0.11
	Euphausiids	-21.41	1.13	7.19	0.52	4.50	0.16
	Chaetognaths	-21.75	0.01	8.74	0.02	4.97	0.22
West Sea	Total-POM	-24.53	1.55	8.22	1.10	9.18	0.00
	Micro-POM	-20.69	0.19	6.25	0.38	5.96	0.02
	Pico-POM	-26.18	0.00	8.06	0.00	11.21	0.00
	Copepods (large)	-22.64	0.02	6.33	0.44	6.04	0.09
	Copepods (small)	-22.83	0.00	6.14	0.00	6.35	0.00
	Amphipods	-22.51	0.00	6.92	0.00	2.89	0.00
	Chaetognaths	-22.96	0.07	7.59	1.02	6.86	0.05
	South Sea	Total-POM	-25.29	0.13	15.20	2.40	11.07
Micro-POM		-21.28	0.43	5.36	0.51	4.25	0.16
Pico-POM		-26.57	0.00	9.92	0.00	10.49	0.00
Copepods (large)		-19.86	0.36	7.72	0.11	2.68	0.07
Copepods (small)		-21.19	0.07	5.73	0.13	5.41	0.13
Amphipods		-20.35	0.15	8.48	0.26	5.96	0.34
Euphausiids		-20.50	0.00	9.03	0.00	5.45	0.19
Chaetognaths		-19.14	0.15	9.77	0.25	4.89	0.08
East China Sea	Total-POM	-25.45	0.00	10.30	0.00	9.16	0.35
	Micro-POM	-20.61	0.00	5.86	0.00	5.11	0.23
	Pico-POM	-26.34	0.00	10.32	0.00	8.62	0.00
	Copepods (large)	-19.53	0.40	8.27	0.17	4.72	0.23
	Amphipods	-19.70	0.03	8.64	0.40	4.83	0.09
	Euphausiids	-20.67	0.17	6.04	0.41	4.17	0.10
	Chaetognaths	-18.18	0.05	10.36	0.09	3.96	0.01

3.2 입자성 유기물의 안정동위원소 비

동해, 서해, 남해, 동중국해의 크기에 따라 구별된 POM의 $\delta^{13}\text{C}$ 및 $\delta^{15}\text{N}$ 비는 Table 2에 나타내었다.

동해의 크기별 POM의 평균 $\delta^{13}\text{C}$ 비는 total-POM (-24.78 ± 0.11 ‰), micro-POM (-21.76 ± 0.22 ‰), pico-POM (-25.84 ± 0.05 ‰)으로 나타났으며, micro-POM의 $\delta^{13}\text{C}$ 값은 다른 크기의 POM에 비해 약 3~4 ‰ 무거운 값을 보였고, $\delta^{15}\text{N}$ 비는 약 2~8 ‰ 가벼운 값을 나타냈다. 서해, 남해, 동중국해의 크기별 POM의 $\delta^{13}\text{C}$ 의 범위는 각각 $-26.18 \sim -20.69$ ‰, $-26.57 \sim -21.28$ ‰, $-26.34 \sim -20.61$ ‰의 결과를 보였으며, $\delta^{15}\text{N}$ 비는 서해 6.25~8.06 ‰, 남해 5.36~15.20 ‰, 동중국해 5.86~10.32 ‰의 결과를 보였다.

POM의 안정동위원소 비는 시 공간적 및 해양학적 특성과 생지화학적 과정에 의해 차이가 나타나며(Michener and

Kaufman(2007), 본 연구 결과에서도 POM의 안정동위원소 비는 연구해역 및 POM의 크기에 따라 $\delta^{13}\text{C}$ 및 $\delta^{15}\text{N}$ 비가 차이를 보였다. 해양기원 유기물의 $\delta^{13}\text{C}$ 는 -23 ‰ ~ -18 ‰, 육상기원 유기물은 -28 ‰ ~ -25 ‰의 값을 나타내는데(Meyers et al., 1997), 4개 해역의 total-POM과 pico-POM의 $\delta^{13}\text{C}$ 값의 범위는 -26.57 ‰ ~ -24.53 ‰로 육상기원의 $\delta^{13}\text{C}$ 값에 가깝게 나타났다. 또한 POM 크기에 따른 안정동위원소 값의 차이는 식물 플랑크톤 중 조성과 연관이 있는데 micro-POM의 대부분은 규조류로 구성 되어있으며, nano-, pico-plankton으로 구성된 fine POM(FPOM)에 비해 탄소함량의 차이로 $\delta^{13}\text{C}$ 값이 상대적으로 무겁게 나타나며(Sato et al., 2006), pico-POM이 가벼운 탄소동위원소 값을 보이는 것은 박테리아 또는 prymnsciophytes가 동위원소 비에 기여할 수 있기 때문이다(Rau et al., 1990). $\delta^{15}\text{N}$ 비는 섭식자의 체내 대사작용 과정에서 분별 작용

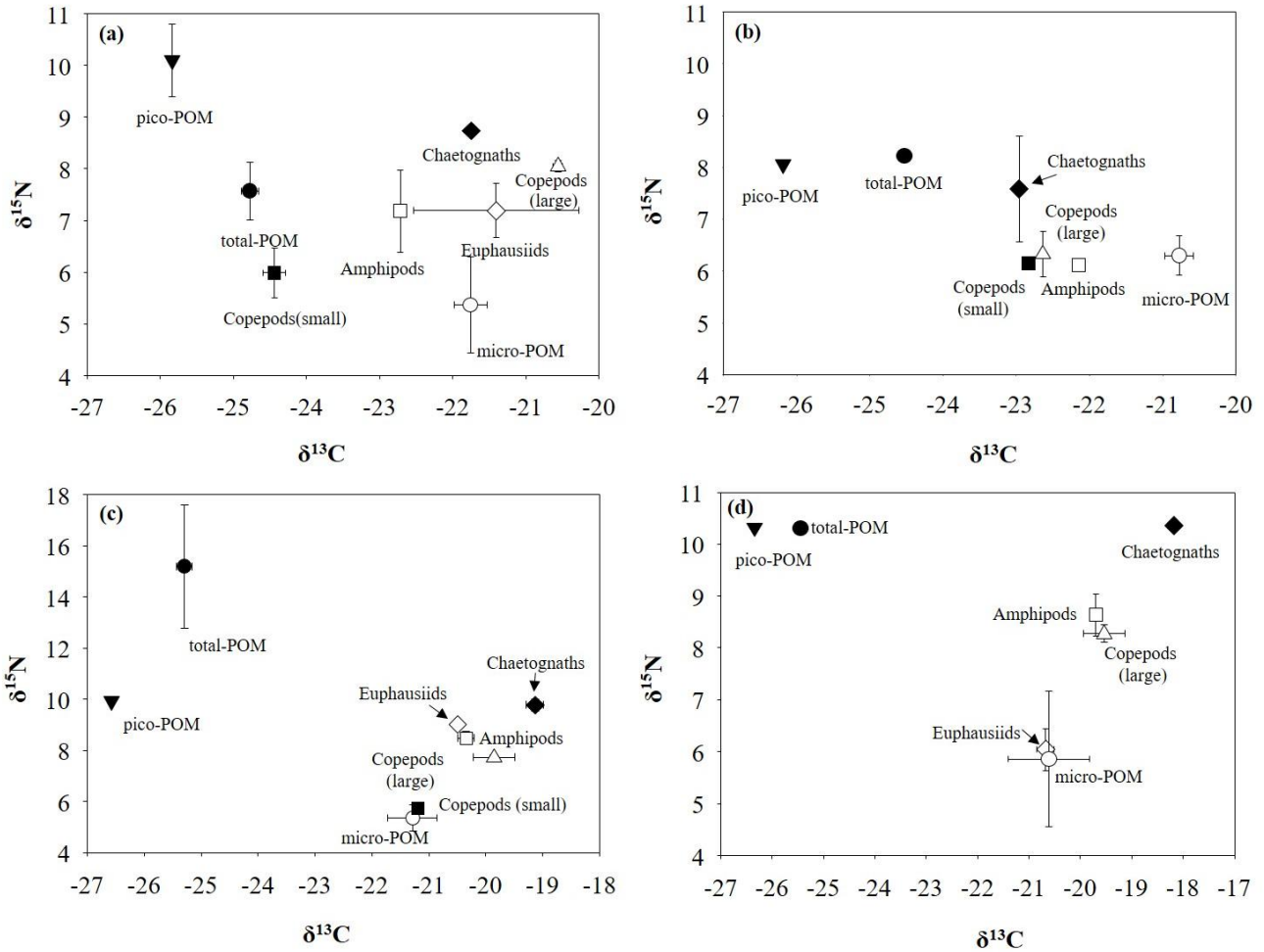


Fig 2. Bi-plots of $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ values (mean \pm SD) of size-fractionated particle organic matter (POM) and biota samples (copepods, amphipods, euphausiids and chaetognaths) at sampling stations in (a) East Sea, (b) West Sea, (c) South Sea and (d) East China Sea (●; total-POM, ○; micro-POM, ▼; pico-POM, △; copepods (large), ■; copepods (small), □; amphipods, ◇; euphausiids, ◆; chaetognaths).

(fractionation)을 겪게 되어 상대적으로 무거운 값을 나타내기 때문에(Minagawa and Wada, 1984), 동물성 유기물이 POM내 포함되어 있을 경우 $\delta^{15}\text{N}$ 값에 영향을 미칠 수 있다. 또한, POC/chl-*a* 비 값이 200 이상으로 높은 결과를 보일 경우 POM 내 구성성분이 유기체설물(detritus)의 존재가 크다는 것을 시사하는데(Cifuentes et al., 1988), 4개 해역에서 조사된 POC/chl-*a* 비는 각각 동해(388.05 ± 64.64), 서해(647.38 ± 102.50), 남해(400.23 ± 115.10), 동중국해(224.80 ± 43.42)에서 200 이상으로 나타나 POM 내 유기체설물의 존재를 시사한다. 따라서 POM내 구성성분이 식물플랑크톤 생체량 보다 동물성 유기체설물이 대부분을 차지하여 무거운 $\delta^{15}\text{N}$ 에 영향을 미친 것으로 사료 된다.

3.3 먹이망 구조

한반도 주변 해역에서 분석된 $\delta^{13}\text{C}$ 및 $\delta^{15}\text{N}$ 비는 Table 2에 나타내었고 먹이망 구조 해석을 위한 각 생물별 탄소 및 질소 동위원소비($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$)는 Fig. 2에 나타내었다.

Copepods는 해양 동물플랑크톤 주요 구성요소이며 탄소순환과 동물 플랑크톤 군집 역학에 중요한 역할을 한다(Mauchline 1998). 또한 pico-, micro size의 플랑크톤에 대한 크기별 선택적 섭식은 영양연쇄효과를 통해 낮은 영양 수준에서 개체군의 생물량 및 먹이 구조에 영향을 줄 수 있다(Vargas et al. 2008).

동해의 서식하는 copepods(large)의 평균 $\delta^{13}\text{C}$ 는 -20.56 ± 0.06 ‰로 나타났으며, 서해는 -22.64 ± 0.02 ‰, 남해는 -19.86 ± 0.36 ‰,

동중국해는 -19.53 ± 0.40 ‰로 나타냈으며, copepods(small)은 동해 -24.44 ± 0.15 ‰, 서해 -22.83 ‰, 남해 -21.19 ± 0.07 ‰의 값을 나타냈다. 먹이원의 $\delta^{13}\text{C}$ 는 약 1 ‰ 이내의 차이를 보이는데 동위원소의 분별 효과를 고려해 볼 때 동해, 남해, 동중국해에서는 micro-POM과 copepods(large) 사이에 1~2 ‰ 차이를 보이고 있으나 서해에서는 copepods(large)와 copepods(small) 모두 micro-POM 보다 약 2 ‰ 가벼운 값을 나타내고 있다. copepods(small)은 남해와 동중국해에서 copepods(large)와 유사하게 약 1 ‰의 차이를 보이고 있다. 따라서 남해, 동중국해에서의 copepods(large)와 copepods(small)는 먹이원으로 micro-POM을 주로 섭식한 여겨지나, 서해의 경우 상대적으로 가벼운 값을 보이기 때문에 micro-POM이 아닌 다른 먹이원의 영향을 복합적으로 받는 것으로 여겨진다. 그러나 동해에서는 다른 해역과 달리 copepods(small)과 micro-POM 간에 약 3 ‰ 차이를 보이고 있으며, pico-POM과는 약 1 ‰ 차이를 보이는 것으로 나타나 micro-POM이 아닌 주로 pico-POM을 먹이원으로 사용한 것으로 보이며 copepods의 크기별 선호하는 먹이원이 다를 수 시사했다.

또한, 동해의 copepods(large)와 copepods(small)는 약 4 ‰의 차이를 보였는데 이는 서로 다른 선택적 먹이습성이 $\delta^{13}\text{C}$ 비차이에 영향을 미친 것으로 보인다. Lim et al.(2015) 등이 여름철 동해에서 안정동위원소를 활용한 copepods 섭식특성에 대한 연구를 통해 copepods(small)은 pico-POM을 선호하는 결과와 일치함을 보이고 있으나, pico-POM의 $\delta^{15}\text{N}$ 는 10.10 ‰의 무거운 결과를 보여 pico-size의 식물플랑크톤 외에 혼재되어 있는 여러 유기체설물의 영향도 배제할 수 없을 것으로 보인다.

Amphipods는 식물플랑크톤 및 입자성 유기체설물을 직접 섭식 하거나 이들을 먹이로 하는 미소동물을 섭식 후 어류와 같은 상위포식자에게 먹힘으로써 해양 생태계에 내 물질순환 및 에너지 흐름에 중요한 연결고리 역할을 하는 것으로 보고되고 있다(Thayer et al., 1984). 분석된 Amphipods의 $\delta^{13}\text{C}$ 는 동해(22.72 ± 0.01 ‰), 서해(-22.51 ‰), 남해(-20.35 ± 0.15 ‰), 동중국해(-19.70 ± 0.03 ‰)의 값을 나타냈다. 크기별로 POM의 탄소 동위원소와 Amphipods의 사이에 micro-POM은 동해, 남해, 동중국해에서 1 ‰ 이내의 차이를 보이고 있어 주 먹이원으로 사용된 것으로 보이며, total-POM과 pico-POM은 약 2~7 ‰ 차이를 보여 먹이원으로서의 역할이 최소인 것으로 추정된다. 그러나 동해와 남해의 경우 copepods(small)과 $\delta^{13}\text{C}$ 는 1~2 ‰ 이내의 차이를 보여 micro-POM과 함께 amphipods의 먹이원으로 작용한 것으로 판단할 수 있다. 서해는 total-POM과 pico-POM 간 2~4 ‰의 차이를 보였고,

copepods(large/small)간 약 0.5 ‰ 이내 차이를 보이고 있어, total-, pico-POM 과 함께 다양한 유기체설물 및 copepods가 먹이원으로 작용한 것으로 보인다.

Euphausiids는 해안 및 근해에서 지배적 분류군이며 이들은 일차생산이 이루어지는 표층에서부터 깊은 수심층에 이르기까지 유기물과 에너지 수송에 중요한 역할을 하며 (Marshall, 1979), 주된 섭식 특성은 식물플랑크톤, 동물 플랑크톤 및 유기체설물을 주로 섭식하는 잡식성 filter feeders로 간주된다(Suh and Choi, 1998). Euphausiids의 $\delta^{13}\text{C}$ 는 동해 (-21.41 ‰), 남해(-20.50 ‰), 동중국해(-20.67 ‰)의 값을 나타냈다.

Ohman(1984)는 *E. pacifica*의 먹이원으로서 구조류와 copepods를 이용한 실험에서 각 먹이원에 대한 선택적 섭식차이를 보였으며, 먹이원으로 copepods에 대해 불안정한 먹이 습성이 나타났음을 제시하였으며, Park et al.(2011)은 동해에서 *E. pacifica* 유생시기와 성체의 먹이습성을 비교한 연구결과에서 micro-POM을 각각 83%, 51%를 선호하는 것으로 나타났다. 또한, Kim et al.(2010)이 동해, 서해, 동중국해에서 *E. pacifica*의 지방산 분석을 통해 섭식 생태를 분석한 결과에서 micro size인 구조류와 관련 있는 지방산(20:5(n-3)) 조성이 동해에서는 19%를 차지함을 제시하였고, 동중국해와 서해에서는 녹조류 또는 육상 쇄설물에서 기원하는 지방산(18:2(n-6))이 4% 이상 나타남을 보고하였다. 이러한 결과들과 비교하면 동해와 동중국해에서는 크기별 POM 간의 각각 0.3~4 ‰의 넓은 차이를 보이고 있어 다양한 크기의 POM을 먹이원으로 사용한 것으로 보이며, 남해에서는 micro-POM과 copepods(small)이 1 ‰ 이내의 차이를 보여 euphausiids의 먹이원으로 기인하였을 것으로 판단된다.

Chaetognaths는 copepods, amphipods, euphausiids 등 다양한 동물플랑크톤을 주로 섭식하며 치어의 먹이원으로 작용하지만 치어와 먹이경쟁을 하거나 포식자로서 치어를 섭식하는 특성이 있는 것으로 보고되고 있다(Zhang et al., 2005).

조사된 모든 해역에서 chaetognaths의 $\delta^{13}\text{C}$ 는 $-22.96 \sim -18.18$ ‰의 범위로 다른 생물에 비해 상대적으로 무거운 값을 보이고 있으며 해역별로 약 1~4 ‰의 차이를 보이고 있어 다양한 먹이원을 섭식하는 것으로 보인다.

동해, 서해 동중국해에서는 chaetognaths와 copepods(large/small), amphipods, euphausiids 간 $\delta^{13}\text{C}$ 는 1~3 ‰의 넓은 범위를 보여 다양한 동물플랑크톤을 섭식하는 것으로 보이며, 서해에서는 copepods(large/small), amphipods, chaetognaths 사이에 $\delta^{13}\text{C}$ 차이가 미미하게 나타나 생물간 먹이 경쟁관계가 형성되는 것으로 판단된다.

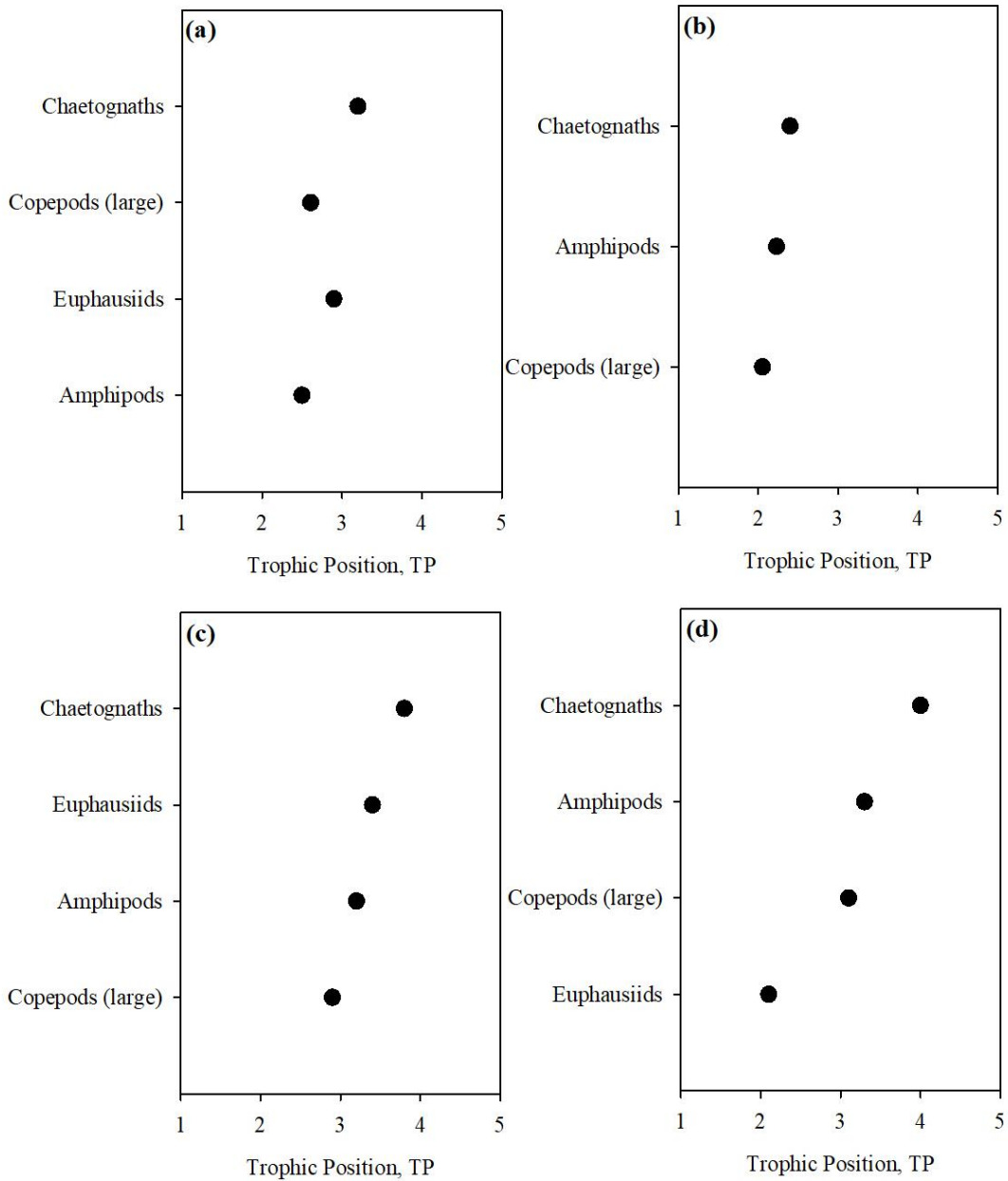


Fig. 3. Estimated trophic positions (TP) of biota (copepods, amphipods, euphausiids and chaetognaths) in (a) East Sea, (b) West Sea, (c) South Sea and (d) East China Sea.

3.4 영양단계

먹이망에서 다양한 먹이원을 섭식하는 생물은 섭식한 먹이원의 특성이 최종적으로 영양단계에 반영되기 때문에 영양단계는 생태계 먹이망 내 연쇄 및 상호작용을 이해하고 물질 순환과 에너지 흐름을 파악하기 위한 정보로 활용되며 먹이망 내 다양성과 안정성을 평가하는데 이용될 수 있다(Post, 2002b).

본 연구에서의 영양단계 산출은 영양단계가 2단계로 고정되는 copepods(small) 를 이용하여 계산하였다. $\delta^{15}\text{N}$ 를 이용한 영양단계의 정보는 활용가치가 높지만 일차생산자로 활용되는 POM의 $\delta^{15}\text{N}$ 가 높게 나타날 경우 상위 생물의 영양단계가 낮게 나타나는 한계점이 있다. 이는 일차생산자인 식물플랑크톤뿐만 아니라 다양한 유기물이 혼재 되어있기 때문에 $\delta^{15}\text{N}$ 가 높게 측정될 수 있다(Post, 2002b). 본 연구 결과

에서도 크기별 POM의 micro-POM을 제외하면 높은 $\delta^{15}\text{N}$ 를 보이고 있으며, micro-POM을 기본값으로 사용될 경우 생물별 영양단계가 과소평가되어 copepods(small)를 사용하여 계산되었다.

연구된 해역에서의 생물별 $\delta^{15}\text{N}$ 범위는 copepods(large)는 6.33~8.27 ‰, copepods(small) 5.99~6.14 ‰, amphipods 6.92~8.64 ‰, euphausiids 6.04~9.03 ‰, chaetognaths 8.74~10.36 ‰로 나타났으며, chaetognaths의 $\delta^{15}\text{N}$ 가장 높은 결과를 보였다 (Table 2). 대상 생물별 영양단계는 copepods(large)는 2.1~3.1, amphipods 2.3~3.3, euphausiids 2.1~3.4, chaetognaths 2.6~4.0의 범위를 보였다(Fig. 3). 생물별 영양단계를 산출한 결과 동해에서는 copepods(large)의 영양단계가 2.9로 잡식성(omnivorous)의 특징을 보였고, amphipods(TP=2.5), euphausiids(TP=2.5)잡식성, chaetognaths(TP=3.2)는 육식성의 특징을 보이는 것으로 나타났다.

서해는 copepods(large), amphipods의 영양단계는 각각 2.1, 2.3으로 나타나 초식성, chaetognaths 2.6으로 잡식성에 가까운 것으로 나타났다. 남해에서는 copepods(large)의 영양단계는 2.9로 잡식성, amphipods 3.2로 육식성에 가까운 것으로 나타났으며, euphausiids, chaetognaths는 각각 3.4, 3.8로 육식성

의 특성을 보였다. 동중국해역에서는 다른 해역과 마찬가지로 chaetognaths의 영양단계가 4.0으로 가장 높은 단계로 나타났으며, 육식성의 특성을 보였다. Copepods(large)와 amphipods는 각각 3.1, 3.3의 영양단계를 보였으며 euphausiids는 2.1로 초식성의 특성을 보였다. 본 연구결과 해역별 생물마다 영양단계의 차이를 보인 반면 서해의 경우 생물간 영양단계가 chaetognaths를 제외하고 초식성의 특성을 보이고 있어 영양단계별 큰 차이를 보이지 않았다.

Kim et al.(2019)은 서해에서 *E. pacifica*의 섭식특성을 분석한 결과에서 서해 냉수대 영향에 의해 먹이원 공급이 제한적으로 나타났으며, 이들의 먹이 행동은 계절에 따른 먹이원 조건에 따라 다름을 시사했다. 따라서 서해의 낮은 식물플랑크톤 생체량은 다양한 먹이 조건 형성에 제한적으로 작용하여 생물간 영양단계가 큰 차이를 보이지 않은 것으로 판단된다. 동해, 서해, 남해에의 euphausiids는 잡식성의 특성을 보인 반면 동중국해역에서는 초식성의 먹이 습성을 보였다. Nakagawa et al.(2001)은 일본 북동부 해안에서 *E. pacifica* 먹이 행동은 계절변화에 따라 차이가 나며, 식물플랑크톤 대발생 시기에는 주로 규조류를 섭식하는 반면 식물플랑크톤 양이 감소하는 시기에는 소형 동물플랑크톤을 섭식하는

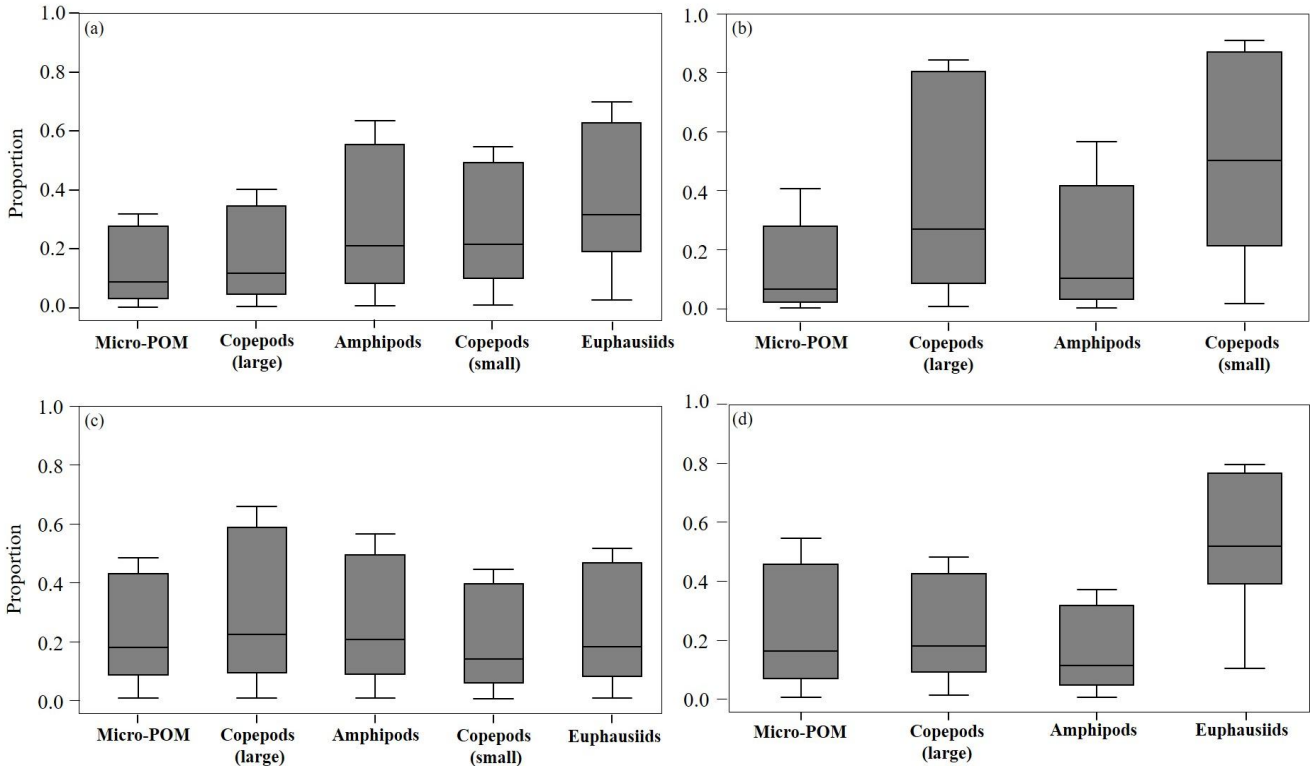


Fig. 4. SIAR box-plots showing the proportional contributions of potential prey for chaetognaths at the sampling stations ((a) : East Sea; (b) West Sea, (c) South Sea, (d) East China Sea).

것으로 나타났다. Kim et al.(2010)은 한국 근해의 지방산 분석을 통한 *E. pacifica*의 섭식특성 결과에서 동해, 서해에서는 초식성의 특성을 보였으며, 동중국해역에서는 잡식성 형태를 나타냈는데 이는 일차생산자의 부족으로 인한 미세생물 고리의 최종 소비자인 원생동물을 포함한 미세 동물플랑크톤을 주 먹이원으로 사용한 것으로 추정하였다. 본 연구결과에서도 chl-*a*는 매우 낮았으며 이전 연구와 유사한 결과를 보이고 있으나 반면에 동중국해역에서는 초식성의 섭식 특성을 보이는 것은 식물플랑크톤 생체량은 낮았지만 euphausiids의 먹이원으로 작용할 수 있는 원생동물을 포함한 미세동물플랑크톤의 생체량 차이가 다른 해역과 상이한 특성을 보인 것으로 사료된다.

3.5 먹이원 기여도 평가 : SIAR 기법활용

Chaetognaths는 해양에서 가장 풍부한 육식성 동물플랑크톤이며, 그들에 의한 포식이 일차 소비자에게 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 이는 chaetognaths의 섭식활동을 통해 하위영양단계의 에너지를 상위 영양 단계로 전달과정은 먹이망 특성을 이해하기 위한 중요한 정보를 제공한다(Harris et al., 2000). 본 연구에서 chaetognaths의 영양단계는 전 해역에서 가장 높게 나타났으며, 잡식성 또는 육식성의 특성을 보였다(Fig. 3). 따라서 SIAR 기법을 활용하여 chaetognaths의 먹이원별 기여도를 파악하였다(Fig. 4).

동해 및 남해에서는 chaetognaths의 먹이원으로 micro-POM, copepods(large/small), amphipods, euphausiids로 선정하였으며, 서해와 동중국해역에서는 micro-POM, copepods(large/small), amphipods, micro-POM, copepods(large), amphipods, euphausiids로 선정하였다. Total-POM과 pico-POM은 탄소동위원소비가 낮게 나타나 먹이원으로 기여도가 낮을 것으로 예상하여 제외하였다. 동해에서 분석된 chaetognaths의 먹이원 기여도는 euphausiids 32%, amphipods 23%, copepods(small) 22%, copepods(large) 13%, micro-POM을 9.9%로 나타나, euphausiids가 먹이원으로 기여도가 가장 높은 것으로 나타났다.

서해는 copepods(small) 48%, copepods(large) 31%, amphipods 13%, micro-POM 8.3%를 섭식하는 것으로 나타났으며 copepods(small)의 기여도가 가장 높게 나타났다. 남해의 먹이원 기여도는 copepods(large) 24%, amphipods 22%, euphausiids 20%, micro-POM 19%, copepods(small) 16%로 나타났다. 동중국해역에서는 euphausiids 51%, copepods(large) 19%, micro-POM 18%, amphipods 12%로 copepods의 기여도가 먹이원으로써 높은 것으로 나타났다. Yoon et al.(2016)은 서해에서 chaetognaths의 위 내용물 분석결과 copepods가 76.5%, cladocera가 18.9%로 구성되어 있었으며, 이외에도 euphausiids, nematods, fish egg

등 다양한 먹이 생물이 혼재되어 있는 것을 보고 하였으며, Nomura et al.(2007)의 위 내용물 결과에서도 copepods(*O. davisae*)가 주 먹이원으로 나타났다. SIAR 분석결과, 서해와 남해에서는 위에서 언급한 기존 선행연구 결과들과 유사하게 나타났으며, 전 해역에서 먹이원으로써 micro-POM은 8.3~19%의 넓은 범위를 보였는데 이는 chaetognaths가 직접 섭식한 것이 아니라 식물플랑크톤을 먹이로 하는 초식성 또는 잡식성 동물플랑크톤을 섭식하여 chaetognaths의 체내 동위원소비에 반영된 것으로 보이며 이와 같은 결과는 Yoon et al.(2016) 등이 분석한 지방산 결과에서 식물플랑크톤을 지시하는 지방산이 검출되어 본 연구결과를 뒷받침한다. 반면 동해와 동중국해역에서는 euphausiids가 먹이원으로 높은 기여를 나타냈는데 이는 선호하는 먹이원의 우점도 차이에 의한 것으로 판단되나 추후 각 먹이원으로 작용하는 대상 생물의 우점도를 각 해역별로 파악할 필요성이 있다.

본 연구에서는 안정동위원소를 활용하여 하계 한반도 주변 4개 해역의 생태 먹이망 구조를 파악 하였으며 각 해역별 영양단계 및 포식자(chaetognaths)의 먹이원이 서로 다를 수 있음을 확인하였다. 이는 각 해역별 먹이원의 풍부도 및 다양성의 차이가 먹이망 구조에 영향을 미친 것으로 판단된다.

4. 결 론

$\delta^{13}\text{C}$ 및 $\delta^{15}\text{N}$ 를 활용하여 동해, 서해, 남해, 동중국해역의 생태계 구조를 정량적으로 파악하였다. 각 생물별 $\delta^{13}\text{C}$ 는 해역별 넓은 범위를 보여 서식처의 환경특성에 따라 다양한 먹이원을 섭식하는 것으로 나타났다. $\delta^{15}\text{N}$ 를 이용한 영양단계 산출을 통해 해역별 섭식 특성의 차이를 보였으며, chaetognaths가 높은 영양단계를 차지하였다. chaetognaths는 동해, 동중국해역에서는 euphausiids를 각각 32%, 51%를 선호하는 것으로 나타났으며, 서해는 copepods(small) 48%, 남해는 copepods(large) 24%를 선호하는 것으로 나타났다.

본 연구결과에서 제시된 생물별 $\delta^{13}\text{C}$ 및 $\delta^{15}\text{N}$ 와 각 해역별 생태계 구조 특성은 향후 한반도 주변해역의 생태계 반응평가, 잠재성 예측 및 에너지 흐름 연구에 활용 될 수 있을 것으로 보인다.

사 사

이 논문은 2020년도 국립수산물과학원 연근해 생태계 구조 변동 평가기술 개발(PM2020062)의 지원으로 수행되었습니다.

References

- [1] Chang, K. H., D. I. Seo, S. M. Masaki Sakamoto, G. S. Nam, J. Y. Choi, M. S. Kim, K. S. Jeong, G. H. La, and H. W. Kim(2016), Feeding Behavior of Crustaceans (Cladocera, Copepoda and Ostracoda): Food Selection Measured by Stable Isotope Analysis Using R Package SIAR in Mesocosm Experiment, Korean Journal of Ecology and Environment, Vol. 49, No. 4, pp. 279-288.
- [2] Choi, K. H., C. I. Lee, K. S. Hwang, S. W. Kim, J. H. Park, and Y. Gong(2008), Distribution and migration of Japanese common squid, *Todarodes pacificus*, in the southwestern part of the East (Japan) Sea, Fisheries Research, Vol. 91, No. 2-3, pp. 281-290.
- [3] Choo, H. S. and D. S. Kim(1998), The effect of variations in the Tsushima warm currents on the egg and larval transport of anchovy in the Southern Sea of Korea, Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, Vol. 31, No. 2, pp. 226-244.
- [4] Cifuentes, L. A., J. H. Sharp, and M. L. Fogel(1988), Stable carbon and nitrogen isotope biogeochemistry in the Delaware estuary, Limnology and Oceanography, Vol. 33, pp. 1102-1115.
- [5] DeNiro, M. J. and S. Epstein(1977), Mechanism of carbon isotope fractionation associated with lipid synthesis, Science, Vol. 197, pp. 261-263.
- [6] Dickman, E. M., J. M. Newell, M. J. Gonzalez, and M. J. Vanni(2008), Light, nutrients, and food-chain length constrain planktonic energy transfer efficiency across multiple trophic levels, Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, Vol. 105, No. 47, pp. 18408-18412.
- [7] Eom, H. K., H. S. Kim, I. S. Han, and D. H. Kim(2015) An Analysis of Changes in Catch Amount of Offshore and Coastal Fisheries by Climate Change in Korea, Journal of Fisheries Business Administration, Vol. 46, No. 2, pp. 31-41.
- [8] Feigenbaum, D. L.(1991), Food and feeding behaviour. In: Barker GM (ed) The biology of terrestrial molluscs. Oxford University Press, Oxford, pp. 259-288.
- [9] Frank, K., T., B. Petrie, J. S. Choi, and W. C. Leggett(2005), Trophic cascades in a formerly cod-dominated ecosystem, Science, Vol. 308, pp. 1621-1623.
- [10] Fry, B.(1999), Using stable isotopes to monitor watershed influences on aquatic trophodynamics, Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Science, Vol. 56, pp. 2167-2171.
- [11] Gal, J. G., M. S. Kim, Y. J. Lee, J. W. Seo, and K. H. Shin(2012), Foodweb of aquatic ecosystem within the Tamjin river through the determination of carbon and nitrogen stable isotope ratios, Korean Journal of Limnological Society, Vol. 45, No. 2, pp. 242-251.
- [12] Ha, S. Y., W. K. Min, D. S. Kim, and K. H. Shin(2014), Trophic importance of meiofauna to polychaetes in a seagrass (*Zostera marina*) bed as traced by stable isotopes, Journal of Marine Biological Association of the United Kingdom, Vol. 94, No. 1, pp. 121-127.
- [13] Harris, R., P. Wiebe, J. Lenz, H. R. Skjoldal, and M. Huntley(2000), ICES zooplankton methodology manual. Academic Press, San Diego, p. 684.
- [14] Hopkins, T. L.(1985), Food web of an Antarctic midwater ecosystem, Marine Biology, Vol. 89, pp. 197-212.
- [15] Im, D. H. and H. L. Suh(2016), Ontogenetic feeding migration of the euphausiid *Euphausia pacifica* in the East Sea (Japan Sea) in autumn: a stable isotope approach, Journal of Plankton Research, Vol. 38, No. 4, pp. 904-914.
- [16] Im, D. H., J. H. Wi, and H. L. Suh(2015), Evidence for ontogenetic feeding strategies in four calanoid copepods in the East Sea (Japan Sea) in summer, revealed by stable isotope analysis, Ocean Science Journal, Vol. 50, pp. 481-490.
- [17] Ju, S. J., A. R. Ko, and C. R. Lee(2011), Latitudinal Variation of Nutritional Condition and Diet for Copepod Species, *Euchaeta* sp. and *Pleuromamma* spp., from the Northwest Pacific Ocean Using Lipid Biomarkers, Ocean and Polar Research, Vol. 33, No. 3, pp. 349-358.
- [18] Kang, Y. H., S. J. Ju, and Y. G. Park(2012), Predicting Impacts of Climate Change on Sinjido Marine Food Web, Ocean and Polar Research, Vol. 34, No. 2, pp. 239-251.
- [19] Kim, H. J., S. J. Ju, J. H. Kang, and K. H. Shin(2019), Diet source of *Euphausia pacifica* revealed using carbon- and nitrogen-stable isotopes in the Yellow Sea Cold Water Mass in summer, Journal of Oceanography, Vol. 75, No. 1, pp. 51-59.
- [20] Kim, H. S., S. J. Ju, and A. R. Ko(2010), Comparisons of Feeding Ecology of *Euphausia pacifica* from Korean Waters Using Lipid Composition, Ocean and Polar Research, Vol. 32, No. 2, pp. 165-175.
- [21] Kim, M. S., J. Y. Hwang, O. S. Kwon, and W. S. Lee(2013), Analytical Methodology of Stable Isotopes Ratios: Sample Pretreatment, Analysis and Application. Korean Journal of Limnological Society, Vol. 46, No. 4, pp. 471-487.

- [22] Kim, S. H. and I. C. Pang(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, Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, Vol. 38, No. 5, pp. 331-341.
- [23] Kline, T. C. Jr. and T. M. Willette(2002), Pacific salmon (*Oncorhynchus* spp.) early marine feeding patterns based on $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ and $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ in Prince William Sound, Alaska, Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Science, Vol. 59, pp. 1626-1638.
- [24] Kortsch, S., R. Primicerio, M. Fossheim, A. V. Dolgov, and M. Aschan(2015), Climate change alters the structure of arctic marine food webs due to poleward shifts of boreal generalists, Proceedings of The Royal Society B, Vol. 282, p. 20151546.
- [25] Krumins, J. A., D. van Oevelen, T. M. Bezemer, G. B. de Deyn, W. H. G. Hol, E. van Donk, and W. H. van der Putten(2013), Soil and freshwater and marine sediment food webs: their structure and function. Bioscience. Vol. 63, No. 1, pp. 35-42.
- [26] Lee, B. K. and S. Y. Kim(2007), Sedimentary facies and processes in the Ulleung Basin and southern East Sea, Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, Vol. 40, No. 3, pp. 160-166.
- [27] Lu, H. J. and H. L. Lee(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), Fisheries research, Vol. 155, pp. 103-113.
- [28] Mauchline, J.(1998), The biology of calanoid copepods, Advance in Marine Biology, Vol. 33, pp. 1-710.
- [29] McCutchan, J. H, W. M Lewis, C. Kendall, and C. C. McGrath(2003), Variation in trophic shift for stable isotope ratios of carbon, nitrogen, and sulfur, Oikos, Vol. 102, pp. 378-390.
- [30] Meyers, P. A.(1997), Organic geochemical proxies. Organic Geo-chemistry, Vol. 27, pp. 213-250.
- [31] Michener, R. H. and L. Kaufman(2007), Stable isotope ratios as tracers in marine food webs: an update. In: Stable Isotopes in Ecology and Environmental Science, 2ed, Oxford. Wiley-Blackwell, pp. 238-282.
- [32] Minagawa, M. and E. Wada(1984), Stepwise enrichment of ^{15}N along food chains: further evidence and the relation between $\delta^{15}\text{N}$ and animal age, Geochimica et Cosmochimica Acta, Vol. 48, pp. 1135-1140.
- [33] Nybakken J. W. and M. D. Bertness(2005), Marine biology: An Ecological Approach, 6ed, Benjamin Cummings, San Francisco, pp. 151-152.
- [34] Ohman, M. D.(1984), Omnivory by *Euphausia pacifica*: the role of copepod prey, Marine Ecology Progress Series, Vol. 19, pp. 125-131.
- [35] Park, J. I., C. K. Kang, and H. L. Suh(2011), Ontogenetic diet shift in the euphausiid *Euphausia pacifica* quantified using stable isotope analysis, Marine Ecology Progress Series, Vol. 429, pp. 103-109.
- [36] Parnell, A., R. Inger, S. Bearhop, and A. L. Jackson(2010), Source partitioning using stable isotopes: coping with too much variation, PLOS One, Vol. 5, p. e9672.
- [37] Post, D. M.(2002a), The long and short of food-chain length. Trends Ecology & Evolution, Vol. 17, pp. 269-277.
- [38] Post, D. M.(2002b), Using stable isotopes to estimate trophic position: models, methods, and assumptions, Ecology, Vol. 83, pp. 703-718.
- [39] Rau, G. H., J. L. Teyssie, F. Rassoulzadegan, and S. W. Fowler(1990), $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ and $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ variations among size-fractionated marine particles: implications for their origin and trophic relationships, Marine Ecology Progress Series, Vol. 59, pp. 33-38.
- [40] Sato, T., T. Miyajima, H. Ogawa, Y. Umezawa, and I. Koike(2006), Temporal variability of stable carbon and nitrogen isotopic composition of size-fractionated particulate organic matter in the hypertrophic Sumida River estuary of Tokyo Bay, Japan, Estuarine, Coastal and Shelf Science, Vol. 68, pp. 245-258.
- [41] Schückel, U., I. Kröncke, and D. Baird(2015), Linking long-term changes in trophic structure and function of an intertidal macrobenthic system to eutrophication and climate change using ecological network analysis. Marine Ecology Progress Series, Vol. 526, pp. 25-38.
- [42] Suh, H. L. and S. D. Choi(1998), Comparative morphology of the feeding basket of five species of *Euphausia* (Crustacea, Euphausiacea) in the western North Pacific, with some ecological consideration, Hydrobiologia, Vol. 385, pp. 107-112.
- [43] Sweeting, C. J., N. V. C. Polunin, and S. Jennings(2006), Effects of chemical lipid extraction and arithmetic lipid correction on stable isotope ratios of fish tissues, Rapid Communication in Mass Spectrometry, Vol. 20, pp. 595-601.
- [44] Tang, Q.(2003), The Yellow Sea LME and mitigation action. In: Hempel G, Sherman K (eds) Large marine ecosystems of

the world-trends in exploitation, protection and research.
Elsevier BV, Amsterdam, pp. 121-144.

- [45] Thayer, G. W., K. A. Bjorndal, J. C. Ogden, S. L. Williams, and J. C. Zieman(1984), Role of larger herbivores in seagrass communities, *Estuaries*, Vol. 7, pp. 351-376.
- [46] Vargas, C. A., R. A. Martínez, H. E. González, and N. Silva(2008), Contrasting trophic interactions of microbial and copepod communities in a fjord ecosystem, Chilean Patagonia. *Aquatic Microbial Ecology*, Vol. 53, pp. 227-242.
- [47] Yoon, H. J., A. R. Ko, J. H. Kang, J. K. Choi, and S. J. Ju(2016), Diet of Chaetognaths *Sagitta crassa* and *S. nageae* in the Yellow Sea Inferred from Gut Content and Fatty Acid Analyses, *Ocean and Polar Research*, Vol. 38, No. 1, pp. 35-46.
- [48] Yoon, J. H. and Y. U. Kim(2009), Review on the seasonal variation of the surface circulation in the Japan/East Sea. *Journal of Marine Systems*, Vol. 78, No. 2, pp. 197-211.
- [49] Zhang, B., Q. S. Tang, X. S. Jin, and Y. Xue(2005), Feeding competition of the major fish in the East China Sea and the Yellow Sea, *Current Zoology*, Vol. 51, No. 4, pp. 616-623.

Received : 2020. 06. 12.

Revised : 2020. 07. 22.

Accepted : 2020. 08. 28.