

동해 위도 차이에 따른 연안생태계 포식자의
생태지위(trophic niche)와 먹이망 구조(food web
structure) 변화 연구

제 출 문

한국해양과학기술원장 귀하

본 보고서를 “동해 위도 차이에 따른 연안생태계 포식자의 생태지위(trophic niche)와 먹이망 구조(food web structure) 변화 연구” 과제의 최종보고서로 제출합니다.

2020. 2. 28.

총괄연구책임자 : 박 주 면

참 여 연 구 원 : 노 현 수

“ : 정 의 영

“ : 이 희 갑

보고서 초록

과제고유 번호	PE99763	해당단계 연구기간	2019. 06. 01 - 2019. 12. 31	단계 구분	1차년도
연구사업명	중사업명	미래선도사업			
	세부사업명	신진연구자 기반구축 지원사업			
연구과제명	대과제명	동해 위도 차이에 따른 연안생태계 포식자의 생태지위(trophic niche)와 먹이망 구조(food web structure) 변화 연구			
	세부과제명				
연구책임자	박주면	해당단계 참여연구원수	총 : 4 명 내부: 3 명 외부: 1 명	해당단계 연구비	정부: 101,000천원 기업: 천원 계 : 101,000천원
		총연구기간 참여연구원수	총 : 4 명 내부: 3 명 외부: 1 명	총 연구비	정부: 101,000천원 기업: 천원 계 : 101,000천원
연구기관명 및 소속부서명	동해연구소 독도전문연구센터		참여기업명		
국제공동연구 위탁연구					
요약				보고서 면수	73
<ul style="list-style-type: none"> - 여름철 동해 연안 환경차이에 따른 먹이망 구조 차이를 분석하기 위하여 동해 위도별 3개의 정점에서 포식자(어류)를 채집하고 CTD를 이용하여 수심별로 수온과 염분을 관찰함 - 먹이망 구조 분석을 위하여 포식자의 소화관 내용물과 안정동위원소 분석한 뒤 그 결과를 통합하여 해석함 - 포식자 채집 결과 동해 북부에서 대구횃대(<i>Gymnocanthus herzensteini</i>), 기름가자미(<i>Glyptocephalus stelleri</i>), 동갈횃대(<i>Hemilepidotus gilberti</i>) 순이었고, 중부에서는 기름가자미, 용가자미(<i>Cleisthenes pinetorum</i>), 대구횃대, 남부에서는 조피볼락(<i>Sebastes schlegelii</i>)이 우점종이었음 - 2019년 여름철 동해 연안 수심 약 50~80 m에서 수온은 북부에서 가장 낮았고, 그 다음으로 중부, 남부 순이었으나, 염분은 정점별 차이가 없었음 - 동해 주요 어종의 탄소 및 질소 안정동위원소 값은 해역별 차이를 나타냈고, 주요 먹이생물의 안정동위원소 값은 각 먹이생물의 상대적 생태지위와 영양기원을 나타냄 - 주요 어종의 소화관내용물 분석 결과 갯지렁이류, 저서성 갑각류, 어류가 중요한 먹이생물로 나타남 - 전반적인 포식자의 영양단계는 북부에서 가장 높았고, 중부에서 저서성 기원의 먹이생물이 우세함을 나타냄 - 본 연구에서 먹이망 구조는 해역별로 차이를 나타냈고, 이는 수온 분포 차이를 반영함 					
색인어 (각 5개 이상)	한 글	해양생태계, 안정동위원소, 소화관내용물, 포식-피식관계, 생태지위, 먹이망 구조			
	영 어	Marine ecosystem, Stable isotope, Dietary contents, Predator-prey relationships, Trophic niche, Food web structure			

요 약 문

I. 제 목

동해 위도 차이에 따른 연안생태계 포식자의 생태지위(trophic niche)와 먹이망 구조(food web structure) 변화 연구

II. 연구개발의 목적 및 필요성

1. 연구개발의 필요성

- 해양생태계에서 생물종이 어떤 생물을 섭식하는가에 관한 연구는 각 생물종의 생태지위(trophic niche)와 생태계 내에서 기능적 역할을 이해하는데 중요한 요소가 됨
- 생태계 먹이망 구조(food web structure)의 연구는 인간 활동(어업 등)과 해양환경 변화(기후변화 등)에 의한 생물다양성 손실 및 생태계 반응을 나타낼 수 있는 대표적인 연구 분야 중 하나임
- 지금까지 생태계 먹이망 상호관계에 관한 연구는 소화관내용물 안정동위원소 분석방법을 통하여 제시하여 왔지만, 각각의 단점을 보완할 수 있는 해석기법은 거의 알려져 있지 않음
- 동해는 남해 또는 서해에 비해 기후변화(또는 기후체제 변화) 등에 의한 영향이 비교적 뚜렷한 해역이며, 이러한 해양환경변화에 의한 생태계 반응을 해석하는 연구는 해양환경 관리, 생물다양성 보전, 유용생물자원 관리의 관점에서 매우 중요한 연구임

2. 연구개발의 목적

- 본 연구는 탄소 및 질소 안정동위원소와 포식자 소화관내용물 분석을 이용하여 해양생태계 먹이망 구조 해석의 새로운 방법을 제시하고, 해양환경변화에 따른 먹이망 구조 변동 요인을 해석하고자 함. 본 연구의 세부 연구목표는 다음과 같음

- 1) 동해 연안 해양생태계 구성원의 탄소($\delta^{13}\text{C}$) 및 질소($\delta^{15}\text{N}$) 안정동위원소를 분석하여 각 종의 생태지위 추정
- 2) 포식자의 소화관내용물에서 발견된 먹이생물의 정량적 분석을 이용하여 해양생태계 내 포식-피식관계 완성
- 3) 안정동위원소와 포식-피식관계를 이용하여 먹이망 구조 완성하고 동해 연안 위도별 먹이망 구조 특성의 차이 해석

III. 연구개발의 내용 및 범위

1. 연구기간

- 2019년 6월 1일 ~ 12월 31일

2. 연구방법

가. 시료채집 및 해양환경 조사

- 2019년 여름철 동해 위도별 3개의 정점의 수심 약 50~80 m에서 자망을 이용하여 포식자(어류)를 채집함
- 연구해역의 수괴구조를 분석하기 위하여, CTD를 이용하여 수심별로 수온과 염분을 관측함

나. 포식자(어류) 소화관내용물 조사

- 채집된 어류는 종별, 해역별로 분류한 뒤 각 개체의 소화관(위 또는 장)을 분리하여 해부현미경을 이용하여 먹이생물을 분류함
- 각 개체의 소화관에서 발견된 먹이생물은 중량을 측정한 뒤 중량비를 이용하여 먹이생물의 섭식량을 표준화 함

다. 탄소 및 질소 안정동위원소 조사

- 채집된 어류는 각 개체는 몸체에서 근육조직을 떼어내고, 먹이생물은 몸체 일부를 분리하여 완전 건조 후 분쇄하여 가루로 만들
- 안정동위원소 질량분석기(Isotope Ratio Mass Spectrometer)를 이용하여 탄소 및

질소 안정동위원소의 상대적 비를 분석함

라. 먹이망 구조 분석

- 안정동위원소 값을 이용하여 포식자와 먹이생물의 생태지위를 평면상에 나타냄
- 소화관내용물 결과를 이용하여 포식-피식관계를 연결함
- 위도별 해양환경변화에 따른 먹이망 구조 차이를 해석함

IV. 연구개발결과

1. 해역별 어류군집의 종조성 및 수괴구조

- 동해 북부에서 대구횃대(*Gymnocanthus herzensteinii*), 기름가자미(*Glyptocephalus stelleri*), 동갈횃대(*Hemilepidotus gilberti*), 중부에서는 기름가자미, 용가자미(*Cleisthenes pinetorum*), 대구횃대, 남부에서는 조피볼락(*Sebastes schlegelii*)이 우점종 이었음
- 2019년 여름철 동해 연안 수심 약 50~80 m에서 수온은 북부에서 가장 낮았고, 그 다음으로 중부, 남부 순이었으나, 염분은 위도별 차이가 없었음

2. 포식자와 먹이생물의 안정동위원소 분석결과

- 동해 주요 어종의 탄소 안정동위원소 값은 기름가자미와 용가자미가 위도별 차이를 나타냈고, 질소 안정동위원소 값은 기름가자미와 대구횃대가 위도별 차이를 나타냄
- 주요 먹이생물의 안정동위원소 값은 각 먹이생물의 상대적 생태지위와 영양기원을 나타냄

3. 포식자 소화관내용물

- 주요 어종의 소화관내용물 분석 결과 갯지렁이류, 저서성 갑각류, 어류가 중요한 먹이생물로 나타남
- 각 어종은 종별, 위도별로 다른 범위의 먹이생물을 섭식하였고, 이들의 먹이생물 유사도에 따라 7개의 섭식그룹을 구분할 수 있었음

4. 동해 연안 먹이망 구조 해석 및 변동성 분석

- 본 연구에서 포식자와 먹이생물의 안정동위원소 분석결과와 생물중간 포식-피식 관계를 이용하여 위도별로 먹이망 구조를 완성함
- 전반적인 포식자의 영양단계는 북부에서 가장 높았고, 중부에서 저서성 기원의 먹이생물이 우세함을 나타냄

V. 연구개발결과의 활용계획

1. 연구개발의 기대효과

- 기술적 측면에서 해양생태계 구조 및 변동성 해석 기법 제시할 수 있음
- 경제적 측면에서 수산자원 및 생물다양성 손실 대처할 수 있음
- 사회적 측면에서 기후변화 대응 생태계 반응 해석할 수 있음

2. 연구개발결과의 활용계획

- 기후변화(또는 기후체제변화) 등의 해양환경변화와 생태계 변동의 연관성 규명 연구에 활용
- 해양생태계 및 수산자원 예측 기술 개발 연구에 활용
- 어업과 해양플라스틱 오염 등 해양생태계에 미치는 인간의 영향 연구에 적용

S U M M A R Y

Chapter I . Title

Latitudinal changes in trophic niche of marine predators and food web structure in East Sea coastal marine ecosystem

Chapter II . Research background and objectives

Section 1. Research background

- Studies on feeding habits of marine organisms are important components understanding trophic niches and functional roles of each species in marine ecosystems.
- Food web structure in marine ecosystem is main subject for detecting loss of marine biodiversity and ecological responses against anthropogenic (e.g. fisheries) and environmental (e.g. climate change) influences
- Historically, food web interaction have been described via each of dietary contents and stable isotope analyses, but reasonable interpretations have been problematic due to the difficulties associated with lack of combination between various methods.
- East Sea has more been influenced climate change impacts compare with adjacent southern sea or Yellow Sea. Evaluating climate change influences on marine ecosystems and its responses is important tasks in terms of management of marine environments, conservation of marine biodiversity and sustainable use of fisheries resources

Section 2. Research objectives

- This study aims to suggest new integrating method analyzing marine food web structure using both dietary contents and stable isotope analyses, and evaluate its variation against marine environmental changes. The specific objectives of this study were as follows;
- 1) Estimating trophic niches of the members in East Sea marine ecosystem by analyzing carbon ($\delta^{13}\text{C}$) and nitrogen ($\delta^{15}\text{N}$) stable isotope
 - 2) Determining predator-prey relationships using quantitative dietary analyses of predators
 - 3) Describing food web structures using combination of both stable isotope and dietary contents analyses, and interpreting differences of food web structure among different latitudinal areas.

Chapter III. Research contents and scopes

Section 1. Research period

- 1 June ~ 31 December 2019

Section 2. Methods

Subsection 1. Sampling and Oceanographic observation

- Predator (fish) samples were collected at depth between 50 m and 80 m from three different latitudinal stations using bottom gill nets in summer of 2019
- Vertical distributions of water temperature and salinity were also monitored using CTD in each sampling occasion

Subsection 2. Dietary contents analyses of predators

- All fish specimens were dissected, and stomachs were separated from each individuals. Each stomach was cut open and the contents were identified to the lowest possible taxonomic level with the aid of dissecting microscope

- Each prey item was measured its biomass, and dietary data were quantified by weight percentage

Subsection 3. Carbon and nitrogen stable isotope analyses

- White dorsal muscle tissue (or body part) from each predator and prey item, rinsed with RO (reverse osmosis) water, dried at 60°C for 24-48 h, and then ground to a powder using a mortar and pestle
- Ground samples were weighed (1~2 mg) into tin capsules and analysed carbon and nitrogen isotope values using a Isotope Ratio Mass Spectrometer

Subsection 4. Food web structure analyses

- Trophic niches of both predators and prey organisms were plotted using their carbon (x-axis) and nitrogen (y-axis) isotope values
- Predator-prey relationships were determined using dietary content data
- Latitudinal differences of food web structure according to oceanographic changes were also analyzed

Chapter IV. Results

Section 1. Fish species composition and vertical water column structure in each site

- Dominant fish species were *Gymnocanthus herzensteini*, *Glyptocephalus stelleri* and *Hemilepidotus gilberti* at northern site, *G. stelleri*, *Cleisthenes pinetorum* and *G. herzensteini* at middle site, and *Sebastes schlegelii* at southern site
- In summer 2019, the water temperature at depth of 50~80 m was the lowest at northern site, intermediate at middle site and the highest at southern site, while there were no such differences for salinity

Section 2. Stable isotope values of predators and prey organisms

- Carbon isotope values of *G. stelleri* and *C. pinetorum* were significantly different among latitudinal sites, while nitrogen isotope values showed significant

differences for *G. stelleri* and *H. gilberti* among sites

- Latitudinal differences in stable isotope values of prey items were representative their relative trophic level and trophic sources which were assimilated into predator' s diets

Section 3. Dietary contents of predators

- Dietary content analyses revealed that main prey items of common fish species were polychaetes, benthic crustaceans and small fishes
- Each fish species was ingested different range of prey items among sites, and they were divided into 7 feeding groups based on dietary similarities

Section 4. Variations in food web structures

- Food web structures were determined using both predator' s diets and stable isotope analyses in each sites
- Overall trophic levels of predatory communities were higher at northern than middle or southern site, and benthic trophic sources were predominant in the food web of middle site

Chapter V. Applications of the results

Section 1. Efficacy expectations

- Technological aspect: Providing analytics technique of marine ecosystem structure and its variation
- Economical aspect: Managing loss of fisheries resources and marine biodiversity
- Social and public aspect: Analyzing ecosystem responses against global climate change

Section 2. Applications of the results

- Investigation of relationships between climate change (or climate regime shift) and marine ecosystem variation
- Technical exploitation for forecasting marine ecosystem and fisheries resource variations
- Supporting further studies of anthropogenic influences (e.g. fisheries, marine plastic waste) on marine ecosystem

목 차

요 약 문	I
목 차	X
표 목 차	XV
그림목차	XVI
제 1 장 서 론	1
제 1 절 연구개발의 개요	1
1. 해양생태계 먹이망 구조 해석 기술	1
2. 동해 해양생태계와 해양환경 변동	2
3. 해양환경변화가 해양생태계에 미치는 영향	4
제 2 절 연구개발의 필요성	5
1. 해양생태계 생물종의 생태지위와 중간 포식-피식관계 규명	5
2. 해양생태계 생물종의 생태지위 및 먹이망 구조 차이 규명	6
3. 장기간 기후변화 대응 해양생태계 변동성 예측 연구	6
제 3 절 연구목표 및 내용	6
1. 연구목표 및 내용	6
2. 연구개발 추진체계 및 수행방법	7
제 2 장 국내외 연구현황	8
제 1 절 안정동위원소를 해양생태계 영양구조 연구	8
제 2 절 연안해역 어류군집의 먹이분할 및 생태지위 중복 연구	8
제 3 절 장기간 기후(또는 기후체제)변화와 어업이 해양생태계 생물상 및 수 산자원에 영향 연구	9
제 4 절 국내외 경쟁기관의 연구 현황	9
제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과	11
제 1 절 연구방법	11

1. 시료채집 및 해양환경 조사	11
2. 포식자(어류)의 소화관내용물 조사	12
3. 탄소 및 질소 안정동위원소 조사	12
4. 먹이망 구조 분석	13
5. 자료분석	14
제 2 절 연구결과	15
1. 해역별 어류군집의 종조성 및 수괴구조	15
2. 포식자와 먹이생물의 안정동위원소 분석결과	19
3. 포식자 소화관내용물	25
4. 동해 연안 먹이망 구조 해석 및 변동성 분석	37
제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도	40
제 1 절 연구개발목표 달성도	40
1. 총연구기간내 연구내용 대비 달성율	40
2. 연구내용 및 달성실적	40
제 2 절 대외기여도	42
1. 기술적 측면: 해양생태계 구조 및 변동성 해석 기법 제시	42
2. 경제적 측면: 수산자원 및 생물다양성 손실 대처	42
3. 사회적 측면: 기후변화 대응 생태계 반응 해석	42
제 5 장 연구개발결과의 활용계획	44
1. 해양환경변화와 생태계 변동의 연관성	44
2. 해양생태계 및 수산자원 예측 기술 개발	46
3. 해양생태계에 미치는 인간의 영향 연구	47
제 6 장 참고문헌	49

C O N T E N T S

Summary	V
Contents	XII
List of Tables	XVII
List of Figures	XVIII
Chapter I Introduction	1
Section 1 Research outline	1
Subsection 1. Analysis of marine food web structure	1
Subsection 2. Variations of marine environments and ecosystems in East Sea ..	2
Subsection 3. Influences of oceanographic changes on marine ecosystems	4
Section 2 Research background	5
Subsection 1. Determining trophic niches and predator-prey relations of marine organisms	5
Subsection 2. Investigation of changes in trophic niche and food web structure	6
Subsection 3. Long-term estimation of marine ecosystem variation against global climate change	6
Section 3 Research objectives	6
Subsection 1. Research aims and scopes	6
Subsection 2. Research procedure and strategy	7
Chapter II Technical developments of the research in domestic and foreign countries	8
Section 1 Research on trophic structure in marine ecosystem using stable isotope analyses	8
Section 2 Research on resource partitioning and niche overlap among fish species within a fish community	8
Section 3 Influences of long-term climate change (or climate regime shift)	

and fisheries on marine biodiversity and fisheries resources	9
Section 4 Technical developments of the research in domestic and foreign research institutes	9
Chapter III Research contents and results	11
Section 1 Research methods	11
Subsection 1. Sampling and oceanographic observation	11
Subsection 2. Dietary contents analyses of predators	12
Subsection 3. Carbon and nitrogen stable isotope analyses	12
Subsection 4. Food web structure analyses	13
Subsection 5. Data analyses	14
Section 2 Results	15
Subsection 1. Fish species composition and vertical water column structure in each site	15
Subsection 2. Stable isotope values of predators and prey organisms	19
Subsection 3. Dietary contents of predators	25
Subsection 4. Variations in food web structure	37
Chapter IV Achievement of research objectives and external contributions	40
Section 1 Achievement of research objectives	40
Subsection 1. Achievement of the research within research period	40
Subsection 2. Research contents and outputs	40
Section 2 External contributions	42
Subsection 1. Technological aspect: Providing analytics technique of marine ecosystem structure and its variation	42
Subsection 2. Economical aspect: Managing loss of fisheries resources and marine biodiversity	42
Subsection 3. Social and public aspect: Analyzing ecosystem responses against global climate change approaching treat climate change	42

Chapter V Applications of the results	44
Subsection 1. Relationships between oceanographic changes and ecosystem variations	44
Subsection 2. Development estimating marine ecosystems and fisheries resources	46
Subsection 3. Anthropogenic influences on marine ecosystems	47
 Chapter VI References	 49

표 목 차

표 1. 2019년 8월 동해 북부(고성 아야진), 중부(울진 후포), 남부(경주 감포)에서 채집된 어류군집의 종조성	16
표 2. 동해 연안 해역별로 채집된 어종의 탄소 및 질소 안정동위원소 값의 평균(\pm SD)	20
표 3. 동해 북부와 남부에 출현하는 먹이생물의 평균 탄소 및 질소 안정동위원소 값	21
표 4. 동해 북부 연안에서 채집된 주요 어종의 위내용물 조성	27
표 5. 동해 중부 연안에서 채집된 주요 어종의 위내용물 조성	28
표 6. 동해 남부 연안에서 채집된 주요 어종의 위내용물 조성	29
표 7. 주요 어종 소화관내용물의 해역별(위도별) 차이에 대한 ANOSIM 분석 결과 ...	32
표 8. 동해 연안 주요 어종의 해역별(위도별) 먹이생물 차이	34

그림 목 차

그림 1 안정동위원소 값과 먹이생물 분석을 통합한 먹이망 구조 모식도(예)	2
그림 2 최근 기후체제변화에 따른 위도별 동해 연안역 수온분포의 변화	3
그림 3 태평양 10년 주기 진동(PDO) 모드 변화에 따른 동해 대마난류 수송량 변화와 동해 기후체제의 변화	3
그림 4 해양환경변화와 먹이생물 현존량 변화에 따른 동해 강원도 북부 명태자원의 생태지위 변화(Park et al., unpublished)	5
그림 5. 연구개발의 추진체계	7
그림 6. 조사해역	11
그림 7. 동해 연안 3개 해역에서 수심별 수온과 염분	17
그림 8. 2019년 여름철 동해 연안 수심별 수온의 위도별 분포(국립수산과학원 정선해양관측자료, 좌=북쪽, 우=남쪽)	18
그림 9. 2010-2019년 동해 평균 수온 수평 분포의 계절 변화(국립수산과학원 정선해양관측자료)	18
그림 10. 동해 연안 주요 4개 어종(기름가자미, 대구, 대구횃대, 용가자미) 탄소 및 질소 안정동위원소 값의 위도별 변동(n.s. = no significance; a,b,c = ANOVA 사후 분석 결과 그룹)	22
그림 11. 동해 연안 위도별 어류 군집의 안정동위원소 값의 분포	23
그림 12. 동해 북부와 중부에서 포식자(어류)와 먹이생물의 생태지위 차이(포식자: 삼각형, 먹이생물: 역삼각형)	24
그림 13. 동해 연안 포식자 소화관에서 발견된 주요 먹이생물 사진	30
그림 14. 주요 어종 소화관내용물의 해역별(위도별) 차이	32
그림 15. 집괴분석(Cluster analysis)과 SIMPROF test에 의한 종별, 해역별 동해 연안 포식자의 섭식그룹	36
그림 16. 기존의 일반적인 해양생태계 먹이망 구조 모식도(좌)와 안정동위원소 및 소화관내용물 분석을 통합한 새로운 먹이망 구조 해석 기법(우)	37
그림 17. 동해 연안 먹이망 구조와 해양환경 변동에 따른 먹이망 구조 차이 모식도	39

List of Tables

Table 1. Fish species composition at northern (Ayajin, Goseong), middle (Hupo, Uljin) and southern (Gampo, Gyeongju) coasts of East Sea in August 2019	16
Table 2. Mean carbon and nitrogen values (\pm SD) of fish species in each site	20
Table 3. Mean carbon and nitrogen values (\pm SD) of prey items in northern and middle sites	21
Table 4. Dietary contents of major fish species collected from northern site	27
Table 5. Dietary contents of major fish species collected from middle site	28
Table 6. Dietary contents of major fish species collected from southern site	29
Table 7. ANOSIM results for latitudinal differences in dietary composition of major fish species	32
Table 8. Latitudinal differences in main prey items of major fish species	34

List of Figures

Figure 1 An example of delineating food web structure using stable isotope and dietary contents analyses	2
Figure 2 Recent trends of spatial water temperature distribution in East Sea	3
Figure 3 Variations in strength of Tsushima warm current and East sea environment according to changes of Pacific Decadal Oscillation (PDO) mode	3
Figure 4 Variation in trophic niche of walleye pollock according to changes of ocean environment and prey abundances in the northern coast of East Sea (Park et al., unpublished)	5
Figure 5. Research procedure and strategy	7
Figure 6. Map of study area	11
Figure 7. Vertical water temperature and salinity distributions at three study sites	17
Figure 8. Latitudinal and vertical distribution of coastal water temperature during summer 2019 in East Sea (left = northern direction, right = southern direction)	18
Figure 9. Mean horizontal distribution of surface water temperature between 2010 and 2019 in East Sea	18
Figure 10. Latitudinal changes in carbon and nitrogen isotope values for 4 common fishes species (n.s. = no significance; a,b,c = posterior groups after post-hoc ANOVA test)	22
Figure 11. Latitudinal distributions in carbon and nitrogen isotope values of fish communities in the coastal waters of East Sea	23
Figure 12. Differences in trophic niches of predators and prey items between northern and middle sites (predators: triangle, prey items: inverted triangle)	24
Figure 13. Photographs of main prey items occurring in the diets of major fishes	30
Figure 14. Latitudinal changes in dietary composition of major fish species	32
Figure 15. Classifying feeding groups of fish species in each site via Cluster analysis and SIMPROF test	36
Figure 16. Previous and common food web diagrams (left), and new analytic method for delineating food web structure (right)	37

Figure 17. Diagram for describing food web structure variations according to oceanographic changes 39

제 1 장 서 론

제 1 절 연구개발의 개요

1. 해양생태계 먹이망 구조 해석 기술

해양생물이 어떤 생물을 섭식하는가에 관한 연구는 생태계 내에서 각 종의 생태지위 (trophic niche)와 생태계 내에서 기능적 역할을 이해하는데 중요한 요소가 된다(Wootton, 1990). 전통적으로 먹이망 상호관계에 관한 연구는 소화관내용물 분석결과에 의존해 왔고, 이러한 방법은 섭식관계가 복잡한 생태계 먹이망에서 먹이생물의 분류학적 정보, 현존량, 직접적인 포식-피식관계에 관한 정보를 제공할 수 있다(Layman et al., 2005). 반면 안정동위원소 분석방법은 최근에 섭식 후 소화된 먹이가 아닌 장기간 동화 흡수된 먹이를 반영한 포식자의 영양위치에 관한 정보를 제공할 수 있고(Hobson and Welch, 1992), 저서 생태계와 표영 생태계에서 영양 흐름 경로를 구분하고 먹이생물의 기원(source)을 확인하는데 유용하다(Fry, 2007). 또한 질소 동위원소의 경우 영양단계에 따라 평균 3.4% 증가되기 때문에(Fry, 2007), 포식자의 생태지위와 먹이와의 영양관계를 추정하는데 유용하게 사용될 수 있다. 그러나 소화관내용물 분석방법은 짧은 기간에 소화, 흡수된 먹이가 누락될 수 있고, 먹이 종류별 소화정도가 달라 특정 먹이생물의 중요도가 저평가 또는 과평가 될 수 있다(Cortes, 1997). 반면 동위원소 방법은 포식자-피식자의 직접적인 상호연관성을 유추할 수 없고, 영양단계 추정하기 위하여 어떤 질소의 기원(pelagic or benthic)을 선택하느냐에 따라 차이를 나타내기도 한다(Post, 2002; Mancinelli et al., 2013). 따라서 보다 합리적이고 정확한 영양단계와 먹이망 구조 추정을 위하여 두 가지 방법을 통합 해석하는 것이 바람직하지만 이러한 비교 결과를 제시한 연구자료는 전 세계적으로 극히 소수에 불과하고, 두 방법을 통합한 뚜렷한 해석방법이 현재까지 알려지지 않았다.

생태계 먹이망 구조(food web structure)의 연구는 인간 활동(어업 등)과 해양환경변화(기후변화 등)에 의한 생물다양성 손실 및 생태계 반응을 나타낼 수 있는 대표적인 연구 분야 중 하나이다. 해양생태계 먹이망 구조의 정확한 해석을 위해 각 생태계 구성원의 생태지위(trophic niche)와 포식자와 피식자(먹이생물 중)의 포식-피식관계

(predator-prey relationships)에 관한 정량적인 정보가 필요하다. 생물체 내의 안정동위원소(질소 및 탄소) 분석법을 통하여 각 생물종의 영양위치(trophic level)와 먹이기원(food source)을 추정하여 생태지위를 해석할 수 있고, 포식자(predator)의 먹이분석(소화관내용물 분석)은 포식자와 피식자의 정량적인 포식-피식관계를 해석할 수 있다. 따라서 안정동위원소 분석과 포식자의 먹이생물분석은 해양생태계 먹이망 구조 해석을 위한 새로운 방법을 제시할 수 있다<그림 1>.

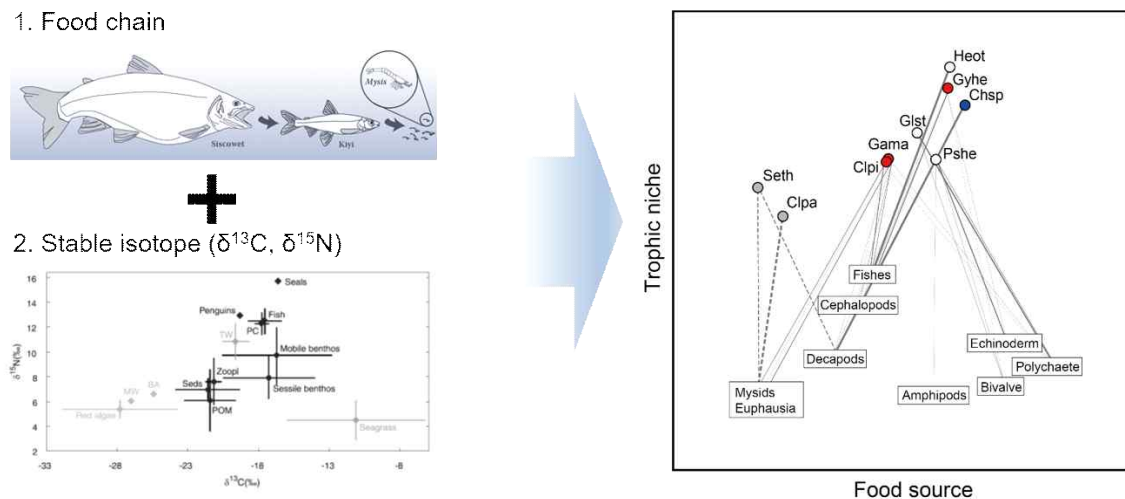


그림 1. 안정동위원소 값과 먹이생물 분석을 통합한 먹이망 구조 모식도(예)

2. 동해 해양생태계와 해양환경 변동

동해 해양환경은 남쪽에서 대한해협을 통해 유입된 대마난류와 북쪽에서 내려오는 북한난류의 영향을 받아 난류성과 한해성 해양생물이 공존하는 해양생태계 구조를 보인다. 동해 연안해역은 대게, 오징어류, 가자미류, 대구, 명태 등 우리나라에서 어업활동이 활발한 지역 중 하나이고 지속적인 어업활동의 결과로 어업생산성의 감소가 뚜렷한 지역이다. 또한 동해 남부 연안은 지형적 요인에 기인한 물리환경적 특성(용승, 와류, 혼합 등)으로 인해 기초생산력이 높고, 생물의 종 다양성과 생물량이 높고, 장기간 기후변화 및 해양환경 변화가 비교적 뚜렷한 해역이다.

최근 동해에서는 기후변화(또는 기후체제변화)로 인한 동해로 유입되는 대마난류와 북한난류 세기 변동과 이들이 상호작용에 따라 동해 생물상 및 생태계 구조와 물리학적 환경변화가 관찰되고 있다(Jung et al., 2017; Park et al., 2017a). 동해에서 난류와 한류의

상호작용, 기후변화 등의 영향으로 동해 연안해역은 위도에 따라 다른 해양환경 구조를 보인다<그림 2>. 특히 동해의 표층수온은 대한해협을 통하여 유입되는 대마난류의 세기 변동에 큰 영향을 받는데, 이러한 대마난류의 강도는 태평양 10년 주기 진동(PDO, Pacific decadal oscillation)과 유의한 상관성을 보인다<그림 3>.

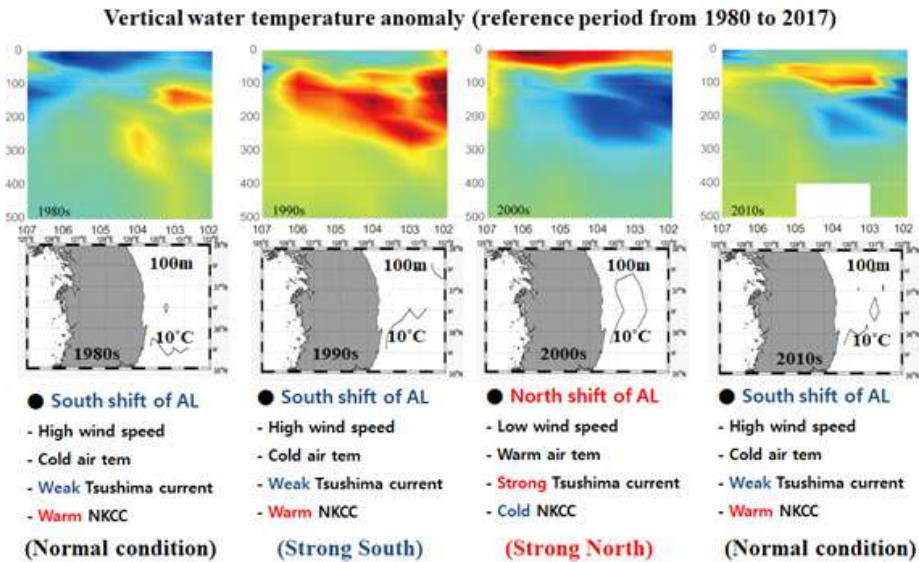


그림 2 최근 기후체제변화에 따른 위도별 동해 연안역 수온분포의 변화

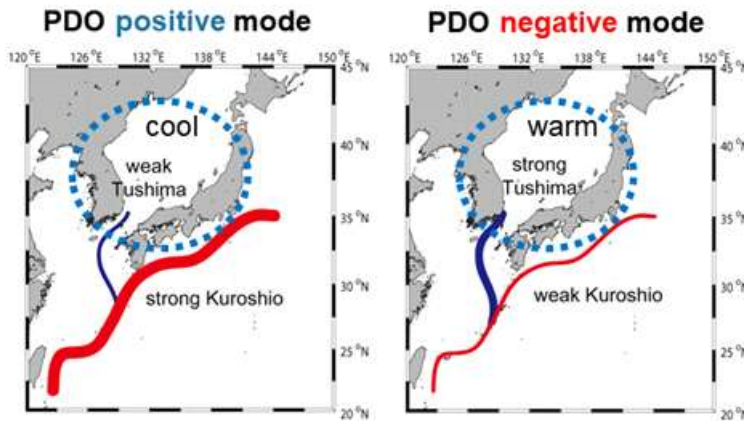


그림 3 태평양 10년 주기 진동(PDO) 모드 변화에 따른 동해 대마난류 수송량 변화와 동해 기후체제의 변화

해양생태계에서 생물상과 먹이망의 시간적 반응에 대하여 정확히 알려져 있지 않지만, 전문가들은 지속적인 인간 활동 결과물 또는 기후변화에 의한 영향 때문일 것이라고 예상하고 있다. 따라서 위도에 따라 해양환경 변동성이 크고 남해 또는 서해에 비해 기

후변화의 영향이 비교적 뚜렷한 동해에서 물리환경의 변화가 해양생태계의 생물상과 생물다양성에 어떤 영향을 미치는가에 관한 연구가 절실히 요구된다.

3. 해양환경변화가 해양생태계에 미치는 영향

해양생태계에서 먹이망 구조를 변동시킬 수 있는 요인은 크게 1) 어업과 2) 해양환경 변화로 볼 수 있다. 지속적인 어업은 상위 영양단계(trophic level)의 포식자 종을 감소시키고, 간접적으로 전반적인 생태계 영양단계를 낮출 수 있다(Pauly et al., 1998; Ward and Myer, 2005). Pauly et al. (1998)은 FAO (Food and Agriculture Organization)에서 지정한 전 세계 주요 어업구역(Large Fishing Areas, LFAs)에서 1950년 이후로 평균 0.05-0.1의 영양단계가 감소한 것으로 발견하였고, 이러한 현상을 'Fishing down the food web'이라고 지칭하였다. 이러한 경향은 지속적인 상위 포식자의 남획에 따른 먹이망 구조의 변화의 결과 때문이었고, 우리나라를 비롯한 전 세계적으로 이러한 현상이 지속적으로 나타나고 있다(Rahman and Lee, 2012; Alleway et al., 2014).

해양생태계 먹이망 구조는 기후변화 및 해양환경 변화에 따라 변할 수도 있다. 해양에서 기후(또는 기후체제)변화 또는 공간적 해양환경변화의 영향은 해양의 수온상승, 해류의 강도 및 방향의 변화, 수괴의 물리구조 변화 등을 야기하고, 생물상 구조에 영향을 미쳐 포식-피식관계와 먹이망 구조를 변동시킨다. 전 세계적으로 이러한 변화에 따른 중장기 생태계 구조 및 수산자원의 변화가 관찰되고 있다. 최근 동해 강원도 북부해역에서 해양환경(수괴구조)변화에 따라 명태(*Gadus chalcogrammus*) 서식지 내 먹이자원 조성 및 현존량이 변하였고, 따라서 명태 생태지위의 변화가 관찰되었다<그림 4>. 미국 NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) fisheries에서는 기후체제변화(climate regime shift)에 따라 명태의 초기 먹이생물 종류가 변하였고, 이러한 영향에 따라 명태자원이 변동함을 관찰하였다(www.fisheries.noaa.gov).

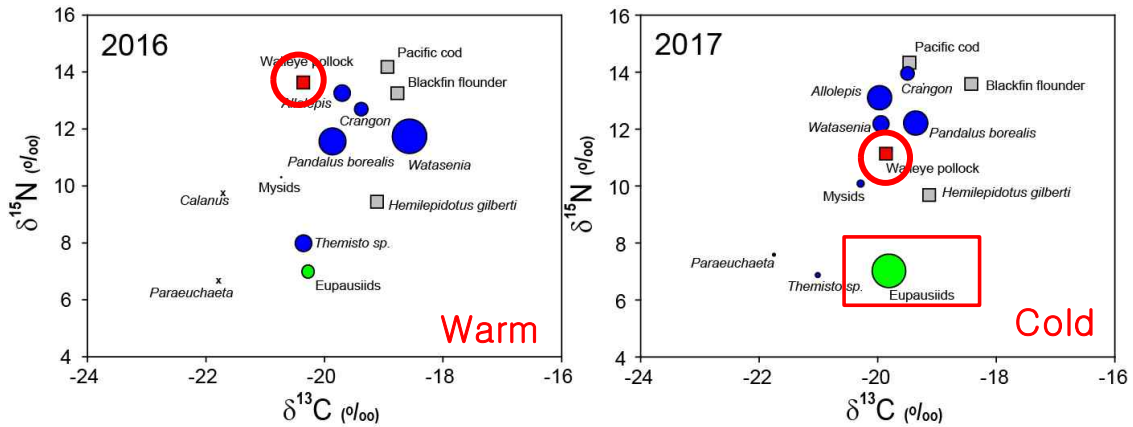


그림 4 해양환경변화와 먹이생물 현존량 변화에 따른 동해 강원도 북부 명태자원의 생태지위 변화(Park et al., unpublished)

해양생태계에서 정확한 먹이망 구조 해석 기술은 시간적 또는 공간적 해양환경변화 (또는 차이)가 생태계 구조화에 미치는 영향과 생태계 반응을 모니터링하기 위하여 반드시 필요하며, 나아가 장기간 생태계변화 예측을 위한 모델링(예. Ecopath with Ecosim)에 적용하여 모델 개선에 기여할 수 있다. 또한 동해 생태계 생물상과 먹이망 구조에서 지속적인 어업과 기후변화 및 해양환경 변화가 이러한 먹이망 구조 변화에 영향을 미치는 지에 관한 연구는 생태계 보전과 생물자원 관리를 위해 반드시 필요하다.

제 2 절 연구개발의 필요성

1. 해양생태계 생물종의 생태지위와 중간 포식-피식관계 규명

해양생물 종의 생태지위 해석은 생태계 구조와 해역별 생태계 기능적 특성을 이해하는데 있어 중요한 의미를 가지며, 해양생태계 생물종간 포식-피식관계 해석은 생물종간 직접적인 연관관계를 밝히고 주요 생물자원의 보호와 관리를 위한 중요한 도구가 된다.

따라서 해양생태계 생물종의 생태지위 분석과 포식-피식관계의 통합 해석방법은 국내에서 처음으로 시도하는 방법으로 생태계 구조를 정량적으로 밝히고, 외력(해양환경변화)의 영향을 평가하는데 매우 중요하다.

2. 해양생태계 생물종의 생태지위 및 먹이망 구조 차이 규명

해양생태계 서식지별 해양환경변화에 의한 생태계 반응을 탐지하기 위한 도구로 각 생물종의 생태지위 변동성을 모니터링하는 것은 중요하고, 결국 생물종의 생태지위와 포식-피식관계 변동은 전반적인 생태계 구조를 변경시켜 생물다양성과 생물자원 이용의 위기가 될 수 있기 때문에, 이와 관련된 연구기술개발은 매우 중요하다.

3. 장기간 기후변화 대응 해양생태계 변동성 예측 연구

본 연구의 결과는 미래 생물자원과 기후변화의 영향을 예측하기 위한 모델링 개발 및 기존 모델 개선을 위한 중요한 자료가 될 수 있다. 또한 미래 생태계 변화 원인 규명을 위해 비교를 위한 현재자료 축적의 관점에서도 중요하다.

제 3 절 연구목표 및 내용

1. 연구목표 및 내용

연구목표	연구내용	수행내용
1. 안정동위원소 분석	1-1. 해양생태계 구성원의 탄소($\delta^{13}\text{C}$) 및 질소($\delta^{15}\text{N}$) 안정동위원소를 분석하여 각 종의 생태지위 추정	- 동해 연안생태계 주요 포식자 생태지위 추정 - 동해 위도별 주요 포식자 생태지위 차이 발견
2. 포식자 소화관 내용물 분석	2-1. 포식자의 소화관내용물에서 발견된 먹이생물의 정량적 분석을 이용하여 해양생태계 내 포식-피식관계 완성	- 동해 연안생태계 주요 포식자 먹이생물 발견 - 동해 위도별 주요 포식자 먹이생물 차이 발견
3. 동해 연안 먹이망 구조 해석 및 변동성 분석	3-1. 안정동위원소와 포식-피식관계를 이용하여 먹이망 구조 완성 3-2. 동해 연안 위도별 먹이망 구조 특성의 차이 해석	- 동해 위도별 포식자 중심 먹이망 구조 도식화 - 동해 위도별 먹이망 구조 차이 발견

2. 연구개발 추진체계 및 수행방법

가. 연구의 추진체계

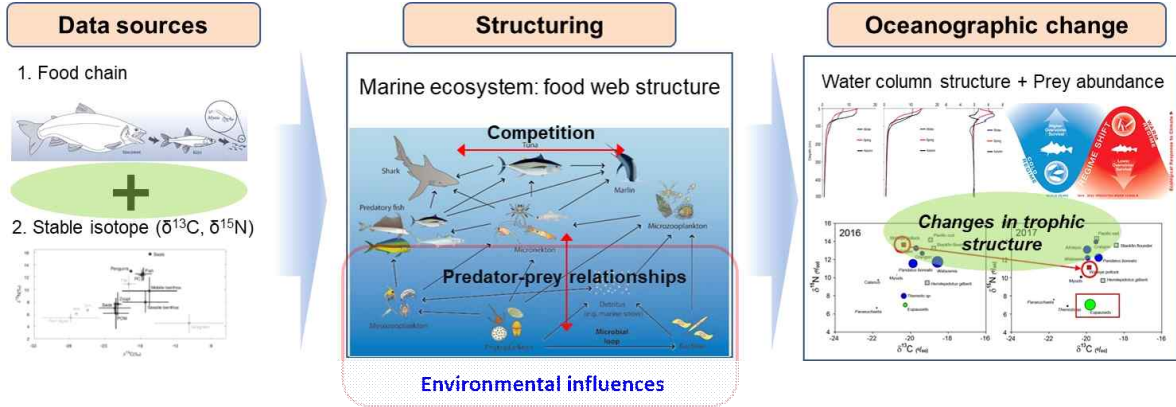


그림 5. 연구개발의 추진체계

나. 현장 조사 시료 및 자료 확보

- 현장 조사 시료(해양동물) 특성상 각 해역의 현지 어선과 상용어구(저층자망)를 이용하여 채집하였음
- 수괴의 물리구조 조사는 강릉원주대학교 수산해양연구실에서 보유중인 CTD (SBE 19plus)를 활용하였음

다. 조사 시료 분석

- 생물시료의 탄소 및 질소 안정동위원소 분석은 안동대학교 공동실험실습관에서 보유중인 안정동위원소비 질량분석기(DELTA V Advantage Isotope Ratio Mass Spectrometer, Thermo Fisher, USA)를 활용하였음
- 포식자의 소화관내용물 분석 및 영상촬영은 한국해양과학기술원 동해연구소에서 보유중인 해부현미경과 고해상도 현미경 영상분석기를 이용하여 분석하였음

라. 연구결과 자료 해석 및 자문

- 본 연구에서 수집한 모든 자료와 결과는 강릉원주대학교 교수진의 자문을 통하여 분석 및 해석하였음
- 본 연구에서 도출한 결과는 국외(호주 Macquarie University)의 연구자들의 자문을 통하여 신뢰성 있는 결과를 도출하고, 공동 논문작성을 수행할 예정임

제 2 장 국내외 연구현황

제 1 절 안정동위원소를 해양생태계 영양구조 연구

안정동위원소 먹이망 분석법은 Fry (1988)에 의해 미국 동부해역 생물군집의 영양구조(trophic structure)에 관한 연구에서 시작되었다. 안정동위원소 분석법은 기존 소화관내용물 분석법의 단점을 보완하기 위해 도입한 방법으로 현재까지 많은 연구에서 널리 사용되고 있다. 국내에서는 연안해역 소규모 저서 서식지내에서 안정동위원소 분석을 이용한 영양구조 연구가 진행되었지만, 최상위포식자(상어류 및 대형어류)와 부유생태계의 영양구조에 관한 연구는 미비한 실정이다. 최근 Park et al. (2019)은 안정동위원소 분석법을 이용하여 동해 중부 연안에 출현하는 어류군집의 영양구조를 연구하였다.

국외에서는 미국, 캐나다, 호주, 영국 등 선진국을 중심으로 다양한 연구자들이 해양생태계에 서식하는 가능한 모든 생물종을 대상으로 안정동위원소 분석 결과를 이용하여 특정 해역의 영양구조 및 먹이망 구조 특성을 연구하였다(e.g. Davenport and Bax, 2002; Hobson et al., 2002).

그러나 상기의 대부분 과거와 현재의 연구들은 안정동위원소 분석법에 의존하여 생물종간 포식-피식의 직접적인 관계를 정량적으로 해석하지 못하였고, 이러한 해양생태계 먹이망 구조가 해양환경변동과 어떤 상관성이 있는지 변화를 밝히지 못하였다.

제 2 절 연안해역 어류군집의 먹이분할 및 생태지위 중복 연구

많은 연구들은 해양생태계에서 어류군집의 먹이분할 및 생태지위 중복의 해석을 위해서 다양한 다변량분석 기법을 이용하여 왔다. 호주 Murdoch University 연구팀은 어류의 먹이분석과 영국 Plymouth Marine Laboratory에서 개발한 PRIMER 다변량분석 통계패키지를 이용하여 연안해역 어류군집의 먹이분할에 관한 연구를 광범위하게 수행하였고, 표준화된 방법을 지속적으로 제시하였다. 그리고 최근 미국과 호주 연구자들을 중심으로 어류 먹이분석을 통하여 포식자와 피식자의 상관관계 및 섭식-피식자 그룹(predator vs. prey guild)을 구분하여 먹이망 구조 해석을 위한 기초를 마련하였다(e.g. Bulman et al.,

2001; Boyle et al., 2006). 일본에서는 연안 조간대 서식지에서 소형 어종간 섭식그룹 (feeding guild)에 관한 연구가 활발히 진행되었고(e.g. Inoue et al., 2005), 다양한 서식지와 유용 수산자원 생물을 대상으로 이러한 연구를 확대해 나가고 있다.

국내에서는 남해 중부 잘피밭 서식지와 동해 남부 대륙붕에서 주요 우점 어종간 섭식관계를 연구하였지만(e.g. Park et al., 2017b, 2018), 국외 연구활동에 비하면 매우 미비한 수준이며, 최근 몇몇 연구에서 국외 사례를 바탕으로 국내 해양생태계 서식지에서 먹이망 연구를 위한 체계를 수립해나가고 있다.

제 3 절 장기간 기후(또는 기후체제)변화와 어업이 해양생태계 생물상 및 수산자원에 영향 연구

기후변화가 해양생태계에 미치는 영향(주로 생물상 변화)에 관한 연구는 최근 전 세계 해양생물학자들의 주요 관심하였고, 선진국을 중심으로 많은 연구자들이 활발히 연구를 진행하고 있다. 예를 들어, 호주 남동부 해역은 전 세계적으로 기후변화에 의한 해양생태계의 변화가 가장 뚜렷한 지역 중 하나이며, 타즈메니아 대학(University of Tasmania)의 연구팀이 장기간 기후변화에 의한 해양생물상과 분포 변화에 관한 연구를 수행하였다. Pauly et al. (1998)는 전 세계 해양생태계에서 기후변화 및 어업에 의해 생태계 영양구조와 생태계 평균영양단계(meal trophic level)의 점진적 감소를 발견하였다.

국내에서는 Rebstock and Kang (2003)은 기후체제변화와 관련된 우리나라 해양생태계 반응을 연구하였고, Kim et al. (2007)에 의해 기후변동이 우리나라 수산자원 변동성에 미치는 영향을 연구하였다. 최근 Park et al. (2017a)과 Jung et al. (2017)은 동해에서 기후변화에 의한 동해 해양환경 및 생태계 변동 특성을 발견하였다.

제 4 절 국내외 경쟁기관의 연구 현황

국내에서 광주과학기술원(GIST) 연구팀은 우리나라 해역을 서해, 남해, 동해, 제주도로 구분하여 장기간 해양생태계의 구조 및 기능을 연구하고 있으며, 기후변화 및 해양환

경변화가 생태계 과정에 미치는 영향을 탐지하는데 주력하고 있다. 국립수산과학원 수산자원연구센터는 매년 연근해 주요 수산자원생물의 먹이생물을 분석하여 각 종별로 주요 먹이생물을 찾고, 장기적인 관점에서 주요 수산자원생물의 변동성 예측에 주력하고 있다. 그리고 해양환경공단에서는 우리나라 해양생태계의 현황과 변화를 신속하게 진단하고 평가하기 위하여 국가 해양생태계 종합조사를 실시하고 있지만, 장기적인 관점에서 생태계를 전반적으로 관리하고 진단하기 위한 계획이 부족하다.

국외에서는 미국 NOAA Fisheries-Alaska regional office에서 북태평양 주요 수산자원생물을 장기 모니터링하면서 어종별 생물학적 특성을 조사하고 기후변화 또는 해양환경변화의 영향을 찾는데 주력하고 있다. 그리고 스웨덴 Stockholm University의 Stockholm Resilience Centre에서는 Ecopath with Ecosim (EwE) 모델링을 기반으로 기후변화가 해양생태계 먹이망 구조에 미치는 영향을 수치적으로 해석하는 기법을 연구하고 있다.

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 1 절 연구방법

1. 시료채집 및 해양환경 조사

본 연구는 동해 연안에서 해양환경변동(수괴구조 차이)에 따라 생태계 주요 생물종의 생태지위와 먹이망 구조가 어떤 변화를 나타내고, 그 원인을 무엇인지 파악하기 위하여 수행하였다. 따라서 동해 연안 해양환경차이를 고려하여 위도별 3개 해역(강원도 고성 아야진, 경북 울진 후포, 경남 경주 감포)에서 2019년 8월에 해양환경조사 및 시료를 채집하였다<그림 6>.



그림 6. 조사해역

연구해역의 위도별 수괴구조의 차이를 분석하기 위하여, CTD (Sea-Bird Electronics, SBE19 plus V2)를 이용 하여 수심별로 수온과 염분을 관측하였다. 또한 조사기간 동안

동해 연안의 수괴구조의 연속적 수직 및 수평 분포특성을 파악하기 위하여 국립수산과학원 해양자료센터(Korea Oceanographic Data Center, KODC)에서 제공하는 정선관측자료를 이용하여 장단기 수괴 특성을 분석하였다(<http://www.nifs.go.kr/kodc/index.kodc>).

각 정점에서 저어류(포식자) 시료 채집을 위하여 삼중자망(trammel net, 길이×높이×폭: 90 m×2.8 m×10 폭, 외망 망목: 600 mm, 내망 망목: 85 mm)과 저층자망(bottom gill net, 길이×높이×폭: 75 m×2 m×13 폭, 망목: 90 mm)을 이용하였다. 어류 시료 채집을 위해 북부와 중부 정점에서는 수심 약 80 m, 남부 정점에서는 수심 약 50 m에 어구를 설치하여 24시간 뒤에 어구를 수거하였고, 어구에 채집된 모든 어종을 분석하였다.

채집된 시료는 현장에서 ice box에 보관하여 실험실로 운반 후, 실험실에서 종수준까지 동정하였고 종별로 개체수와 생체량(0.1 g)을 측정하였다. 채집된 각 어류의 학명은 FishBase 웹사이트(www.fishbase.org)에서 확인하였다(Froese and Pauly, 2019).

2. 포식자(어류)의 소화관내용물 조사

포식자는 소화관내용물 분석을 위해 종별, 해역별(위도)로 다양한 체장에 걸쳐 최대 30개체를 무작위로 선택하였다. 각 개체는 전장(total length, TL)을 측정하고 전자저울을 이용하여 중량(g)을 측정하였다. 이 후 개체별로 소화관(위와 장)을 분리한 뒤 70% 에탄올(ethanol)에 고정하여 분석 전까지 -20℃ 냉동고에 보관하였다.

채집된 어종 중 주요 어종의 소화관은 광학현미경을 이용하여 소화관내용물(먹이생물)을 가능한 종 수준까지 구분하였다. 이후 소화관에서 발견된 먹이생물은 먹이분류군(taxa)별로 전자저울을 이용하여 중량(0.1 mg)을 측정하였다. 소화관 내용물에서 발견된 주요 먹이생물은 종류별, 해역별로 구분하여 분류한 뒤 증류수에 2-3회 세척한 후 먹이생물 안정동위원소 분석을 위해 냉동 보관하였다. 먹이생물의 중량 자료는 각 개체마다 다른 크기의 먹이생물을 섭식하였을 때, 먹이생물(taxa)의 상대적 중요도를 나타내기에 가장 적합한 방법이므로(Hyslop, 1980), 먹이생물 조성과 통계분석을 위하여 각 먹이생물의 중량비(%W) 값을 사용하였다.

3. 탄소 및 질소 안정동위원소 조사

채집된 모든 포식자(어류)와 먹이생물(어류 및 무척추동물 등)은 안정동위원소 분석을

위해 각 개체의 근육(white mussel)을 몸체에서 약 1×1×0.5 cm (소형 개체와 먹이생물의 경우 몸 전체 또는 일부)을 떼어내어 분석 전까지 냉동 보관하였다. 이후 근육조직 시료는 증류수로 세척 후 페트리디쉬에 두고 건조기(dry oven)에서 60℃로 24-48시간 건조시켰다. 건조된 조직은 막자(pestle)와 사발(mortar)을 이용하여 분쇄 후 가루로 만든 뒤 tin capsule에 약 1-2 mg을 털어내어 밀봉하였다.

분쇄된 시료는 안정동위원소 질량분석기(DELTA V Advantage Isotope Ratio Mass Spectrometer, Thermo Fisher, USA)를 이용하여 안정동위원소의 상대적 비를 분석하고, 분석 결과는 다음과 같이 각각 탄소(Pee Dee Belemnite)와 질소(atmospheric N₂) 동위원소의 δ 표기법으로 나타냈다.

$$\delta^{13}C \text{ or } \delta^{15}N = \left(\frac{R_{sample}}{R_{standard}} - 1 \right) \times 1000$$

(R_{sample}: 표본에서 ¹³C:¹²C 또는 ¹⁵N:¹⁴N의 비율, R_{standard}: Pee Dee Belemnite와 대기에서 ¹³C:¹²C 또는 ¹⁵N:¹⁴N의 비율)

4. 먹이망 구조 분석

본 연구에서 해양생태계 먹이망 구조 해석을 위해 안정동위원소 분석결과와 소화관 내용물 분석법을 통합하여 이용하였다. 우선 채집된 주요 어종과 해역별 주요 먹이생물의 종별 생태지위(trophic niche)는 탄소(x축, 먹이원) 및 질소(y축, 영양지위) 안정동위원소 값을 이용하여 2차원 상에 나타냈다. 이후 주요 포식자의 소화관 내용물 분석결과를 이용하여 주요 어종과 먹이생물 사이의 포식-피식관계(predator-prey relationships)를 연결하였고, 이때 각 먹이생물의 상대적 섭식량을 포식-피식관계 연결에서 적용하였다. 따라서 포식자와 먹이생물의 안정동위원소 결과를 이용한 생태지위와 포식-피식관계를 이용하여 정량적 먹이망 구조를 완성하였다.

이러한 먹이망 구조는 시공간 차이를 나타낼 수 있기 때문에, 해역별 물리환경의 차이에 따른 먹이망 구조의 전반적인 형태와 그 특성의 차이를 분석하였다. 동해 연안에서 물리환경의 차이를 결정하는 가장 큰 요소는 수심별 수온과 염분 분포의 차이이다. 따라서 본 연구에서는 해역별(위도별) 수심별 수온과 염분 분포 특성에 따라 특정 수괴를 대표하는 먹이생물 종류의 출현과 분포 차이가 있을 것으로 가정하고, 이러한 먹이생물 종

류 차이에 따른 먹이망 구조 및 생물종의 생태지위 변동성을 해석하였다.

5. 자료분석

본 연구에서 연구자료의 통계적 유의성을 검증하기 위하여, 다양한 통계프로그램을 이용하여 일변량분석과 다변량분석을 실시하였다. 각 자료는 자료간 분산을 동질화 하고 우점종 또는 우점 먹이생물의 영향을 최소화하기 위하여 분석 전에 자료변환($\log_{10}[x+1]$, square root 등)을 실시하였다.

가. 일변량분석(uni-variate analyses)

- 주요 포식자와 안정동위원소 값의 해역별 차이에 관한 통계적 유의성은 분산분석(one-way ANOVA)을 이용하여 분석하였다.
- 분산분석 결과 차이가 유의한 경우, Tukey's test를 통하여 사후분석을 실시하여 그룹간 차이를 분석하였다.
- 정점별 물리환경요인의 차이는 Student's t-test를 이용하여 유의성을 검증하였다.

나. 다변량분석(multi-variate analyses)

- 포식자 중간 섭식 관계 및 먹이자원 이용의 유사도는 Bray-Curtis 유사도 매트릭스를 이용하여 유사도를 계산하고 집괴분석(cluster analysis) 및 SIMPROF 분석을 사용하여 그룹화 하였다.
- 포식자 섭식특성의 공간적 또는 중간 변동성은 ANOSIM (analysis of similarities)를 이용하여 통계적 유의성을 분석하였다.

다. 자료분석 프로그램

- PRIMER v7 + add-on module (www.primers-e.com)
- SYSTAT software (Systat version 18, SPSS Inc., Chicago, IL, USA)

제 2 절 연구결과

1. 해역별 어류군집의 종조성 및 수피구조

가. 주요 어류의 종조성

본 연구에서 동해 연안 해역별(위도별)로 2019년 8월에 총 29종의 어류가 채집되었다. 동해 북부에서 총 13종, 230개체, 36,220.2g의 어류가 채집되었고, 중부에서는 총 11종, 340개체, 38,660.6g, 남부에서는 총 13종, 56개체, 14,325.8g의 어류가 채집되었다<표 1>. 개체수 면에서 우점종은 해역별로 차이를 나타냈다. 동해 북부에서는 대구횃대(*Gymnocanthus herzensteini*)가 총 57개체로 가장 많이 채집되었고, 그 다음으로 기름가자미(*Glyptocephalus stelleri*), 동갈횃대(*Hemilepidotus gilberti*) 순이었다. 중부에서는 기름가자미가 120개체, 용가자미(*Cleisthenes pinetorum*)가 105개체, 대구횃대가 75개체 순으로 채집되었다. 남부에서는 전반적으로 채집 개체수가 적었는데, 조피볼락(*Sebastes schlegelii*)이 22개체로 가장 많이 채집되었고, 그 외 어종들은 10개체 이하가 채집되었다. 생체량 면에서 가장 우점종을 살펴보면, 동해 북부와 중부에서는 대구횃대, 남부에서는 조피볼락이었다. 각 해역별 2개체 이상 출현한 고유종을 살펴보면, 동해 북부에서는 가시횃대(*Gymnocanthus intermedius*), 노랑볼락(*Sebastes steindachneri*), 도다리(*Pleuronichthys cornutus*), 동갈횃대, 삼세기(*Hemitripterus villosus*), 청어(*Clupea pallasii*)였고, 중부에서는 물메기(*Liparis tessellatus*), 임연수어(*Pleurogrammus azonus*), 참가자미(*Pleuronectes herzensteini*)였다. 말쥐치(*Thamnaconus modestus*), 망상어(*Ditrema temminckii*), 성대(*Chelidonichthys spinosus*), 쏨뱅이(*Sebastiscus marmoratus*), 조피볼락, 황아귀(*Lophius litulon*)는 남부에서만 출현하였다.

표 1. 2019년 8월 동해 북부(고성 아야진), 중부(울진 후포), 남부(경주 감포)에서 채집된 어류군집의 종조성

국명	학명	아야진		후포		감포	
		N	W	N	W	N	W
가시횃대	<i>Gymnocanthus intermedius</i>	2	113.9				
게르치	<i>Scombrops boops</i>					1	213.5
기름가자미	<i>Glyptocephalus stelleri</i>	53	3,224.3	120	7,572.0	6	914.3
노랑볼락	<i>Sebastes steindachneri</i>	13	805.4				
대구	<i>Gadus macrocephalus</i>	28	9,628.0	12	7,534.5		
대구횃대	<i>Gymnocanthus herzensteini</i>	57	10,105.3	75	10,516.5		
도다리	<i>Pleuronichthys cornutus</i>	2	441.6				
동갈횃대	<i>Hemilepidotus gilberti</i>	42	5,791.9				
말쥐치	<i>Thamnaconus modestus</i>					2	539.9
망상어	<i>Ditrema temminckii</i>					3	692.6
물가자미	<i>Eopsetta grigorjewi</i>			1	167.3		
물메기	<i>Liparis tessellatus</i>			5	655.5		
빨간횃대	<i>Alcichthys elongatus</i>	6	828.7	3	181.2		
삼세기	<i>Hemitripteris villosus</i>	2	235.1				
삼치	<i>Scomberomorus niphonius</i>					1	29.4
성대	<i>Chelidonichthys spinosus</i>					5	1,143.6
쏨뱅이	<i>Sebastiscus marmoratus</i>					2	230.6
양태	<i>Platycephalus indicus</i>					1	259.0
용가자미	<i>Cleisthenes pinetorum</i>	13	1,026.4	105	7,587.8	4	333.5
임연수어	<i>Pleurogrammus azonus</i>			6	1,861.7		
장어베도라치	<i>Lumpenus sagitta</i>			1	40.5		
전갱이	<i>Trachurus japonicus</i>					1	132.2
조피볼락	<i>Sebastes schlegelii</i>					22	5,953.3
줄가시횃대	<i>Icelus cataphractus</i>	1	18.5				
줄가자미	<i>Clidoderma asperrimum</i>			1	1,023.2		
취노래미	<i>Hexagrammos otakii</i>	2	208.5			1	645.6
참가자미	<i>Pleuronectes herzensteini</i>			11	1,520.4		
청어	<i>Clupea pallasii</i>	9	3,792.6				
황아귀	<i>Lophius litulon</i>					4	3,238.3
합계		230	36,220.2	340	38,660.6	53	14,325.8
종수		13		11		13	

나. 동해 해역별 수괴구조

본 연구에서 해역별 수괴의 수온 및 염분의 연직구조는 공간적 변동 특성이 뚜렷하였다(그림 7). 북부 정점에서는 표층부터 수심 약 40 m 정도까지 약 24°C에서 8°C까지 수온이 지속적으로 감소하였고, 본 연구의 시료 채집 수심(약 80 m)에서는 상하로 연직 혼합이 잘 이루어져 균질하였다. 반면, 중부 정점에서는 표층에서 약 26°C를 보였고 수심 20 m 정도까지 연직 혼합이 잘 이루어졌다. 이후 수심 약 60 m까지 약 15°C로 감소하는 양상을 보이다 100 m 수심까지 다시 수심별 균질하였다.

염분의 경우 북부 정점에서는 표층에 약 33.5‰에서 수심 100 m에 34.0‰까지 수심별 염분차이가 적었다. 중부 정점에서는 표층에 약 32.0‰을 나타냈지만, 수심이 깊어짐에 따라 수심 40 m에서 34.0‰까지 지속적으로 증가하다가 이후 균질한 상태를 나타냈다. 북부와 중부 정점에서 어류 채집수심에서는 염분의 차이가 거의 없었다.

본 연구에서 남부 정점에서는 CTD자료 획득의 실패로 수괴구조를 분석하지 못하였지만, 전반적으로 어류채집 수심의 수온은 북으로 갈수록 낮아지는 경향을 나타냈고, 염분은 위도별 차이가 거의 없었다.

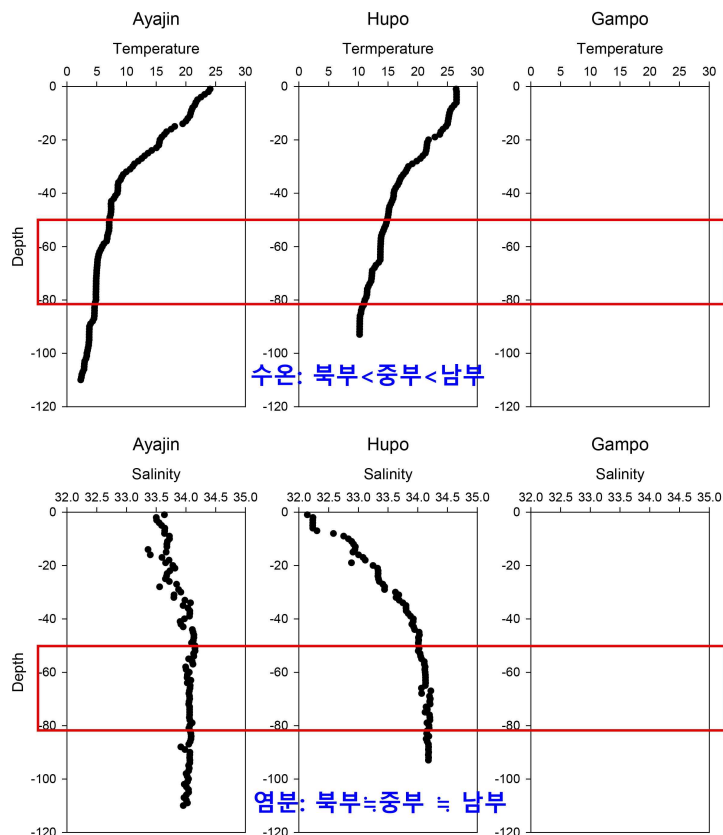


그림 7. 동해 연안 3개 해역에서 수심별 수온과 염분

본 연구에서 동해 연안 해역별 해양환경 요인 중 수온의 차이가 뚜렷하였기 때문에, 국립수산과학원 정선해양관측자료를 이용하여 수온의 수평 및 수직분포를 살펴보았다(그림 8, 9). 2019년 여름철 동해 정선해양관측자료의 가장 연안쪽 정점에서 수온 수직분포의 위도별 변화를 살펴보면, 표층수온은 20℃ 이상을 나타냈지만, 10℃, 7℃, 5℃ 등온선은 고위도에서 더 높아지고 표층혼합층은 저위도로 갈수록 깊어지는 경향을 나타냈다. 그러나 100 m 이하에서는 위도와 상관없이 수온분포가 균질한 경향을 보였다. 동해 최근 10년간(2010~2019) 평균 수평 수온분포의 계절변동을 살펴보면, 전반적으로 연안이 외양보다 낮은 수온이 관찰되었으며, 봄과 여름에 냉수괴가 더 남쪽으로 확장하는 경향을 나타냈다. 이와 반대로 외양의 수온은 여름과 가을에 높아지는 경향을 나타냈고, 특히 가을에 고온의 수괴가 울릉분지를 따라 북쪽으로 확장하는 현상을 보였다. 이러한 경향은 북한한류수와 대마난류수의 계절별 상호작용에 의해 동해 수온분포를 결정하는 것으로 판단되었다.

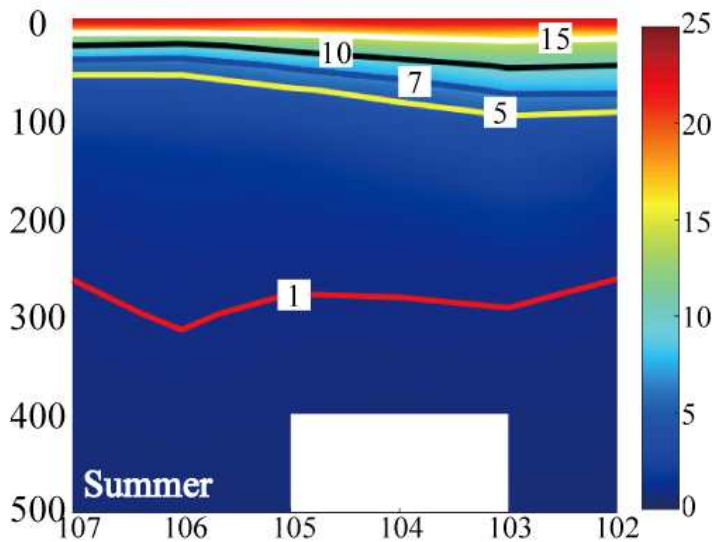


그림 8. 2019년 여름철 동해 연안 수심별 수온의 위도별 분포(국립수산과학원 정선해양관측자료, 좌=북쪽, 우=남쪽)

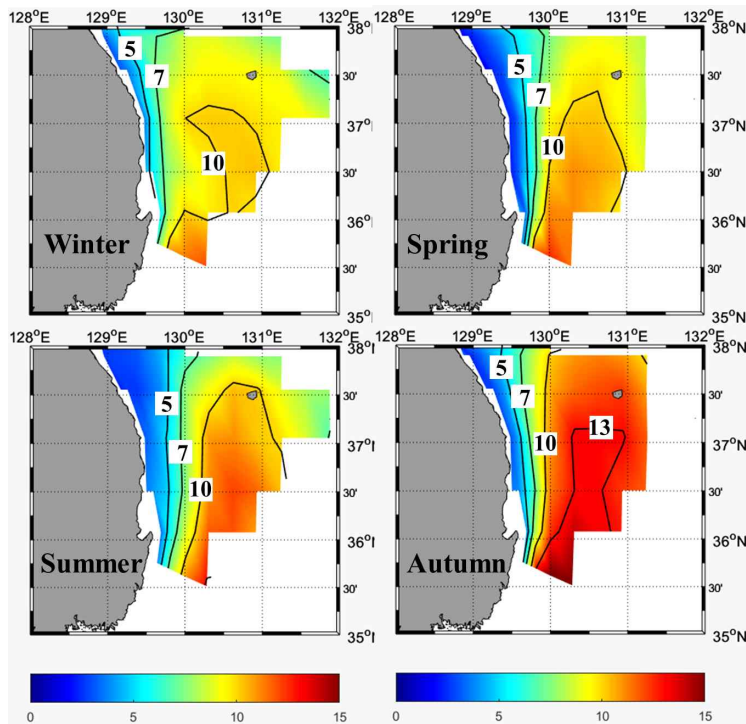


그림 9. 2010-2019년 동해 평균 수온 수평 분포의 계절 변화 (국립수산과학원 정선해양관측자료)

2. 포식자와 먹이생물의 안정동위원소 분석결과

가. 동해 해양생태계 구성원의 탄소 및 질소 안정동위원소 값의 분포

2019년 8월 동해 연안에서 채집된 주요 어종(27종)의 평균 탄소($\delta^{13}\text{C}$) 및 질소($\delta^{15}\text{N}$) 안정동위원소 값은 종별, 공간적으로 차이를 보였다<표 2>. 북부 정점에서 탄소 안정동위원소 값은 삼세기가 -16.8로 가장 높았고, 노랑볼락이 -19.6으로 가장 낮았다. 질소 안정동위원소 값은 동갈횃대가 16.2로 가장 높았고, 기름가자미가 13.5로 가장 낮았다. 중부 정점에서는 줄가자미(*Clidoderma asperrimum*)와 빨간횃대(*Alcichthys elongatus*)가 각각 -16.1과 14.4로 가장 높은 탄소 및 질소 안정동위원소 값을 보였고, 대구횃대와 물가자미가 각각 가장 낮은 값을 보였다. 반면, 남부정점에서 탄소 안정동위원소 값은 쥐노래미(*Hexagrammos otakii*)가 가장 높았고(-15.9), 전갱이(*Trachurus japonicus*)가 가장 낮았으며(-19.4), 질소 안정동위원소 값은 쥐노래미가 가장 높았고(13.1) 말쥐치가 가장 낮았다(11.3).

표 2. 동해 연안 해역별로 채집된 어종의 탄소 및 질소 안정동위원소 값의 평균(\pm SD)

어종	North		Middle		South	
	$\delta^{13}\text{C}$	$\delta^{15}\text{N}$	$\delta^{13}\text{C}$	$\delta^{15}\text{N}$	$\delta^{13}\text{C}$	$\delta^{15}\text{N}$
가시횃대	-16.8 \pm 0.2	13.9 \pm 0.3				
케르치					-17.1	13.0
기름가자미	-18.7 \pm 0.4	13.5 \pm 0.7	-17.7 \pm 1.9	14.4 \pm 1.9	-17.4 \pm 0.8	12.3 \pm 0.6
노랑볼락	-19.6 \pm 0.2	13.7 \pm 0.3				
대구	-17.2 \pm 0.6	13.7 \pm 0.4	-17.8 \pm 1.9	13.3 \pm 1.9		
대구횃대	-18.5 \pm 0.4	15.5 \pm 0.4	-18.1 \pm 1.7	14.2 \pm 1.7		
도다리	-17.1 \pm 0.1	14.8 \pm 0.1				
동갈횃대	-17.9 \pm 0.4	16.2 \pm 0.4				
말퀴치					-17.8 \pm 0.2	11.3 \pm 0.1
망상어					-16.1 \pm 0.2	11.8 \pm 0.0
물가자미			-16.3	12.2		
물메기			-16.7 \pm 0.1	14.3 \pm 0.1		
빨간횃대	-17.6 \pm 0.1	14.2 \pm 0.2	-16.6 \pm 0.2	14.4 \pm 0.2		
삼세기	-16.8 \pm 0.2	14.7 \pm 0.1				
삼치					-17.6	10.6
성대					-17.1 \pm 0.8	11.7 \pm 0.7
솜뱅이					-16.3 \pm 0.1	12.0 \pm 0.3
양태					-16.0 \pm 0.0	12.6 \pm 0.7
용가자미	-17.4 \pm 0.5	13.9 \pm 0.2	-17.8 \pm 1.2	12.8 \pm 1.2	-17.9 \pm 0.4	11.9 \pm 0.7
임연수어			-18.8 \pm 0.3	14.1 \pm 0.3		
전갱이					-19.4 \pm 1.7	11.5 \pm 0.8
조피볼락					-17.8 \pm 0.3	12.5 \pm 0.4
줄가시횃대	-17.5	13.8				
줄가자미			-16.1	14.2		
귀노래미	-17.6 \pm 0.0	15.1 \pm 0.4			-15.9 \pm 0.2	13.1 \pm 0.2
참가자미			-16.5 \pm 1.2	14.1 \pm 1.2		
황아귀					-17.9 \pm 0.5	12.6 \pm 0.4

동해 북부와 중부 정점에서 출현한 어종의 주요 먹이생물을 대상으로 탄소 및 질소 안정동위원소 값의 공간적 특성을 분석하였다<표 3>. 남부에 출현한 어종은 전반적으로 개체수가 적고 먹이생물의 소화진행상태가 높아 먹이생물의 안정동위원소 분석에 적합하지 않았기 때문에 먹이생물 안정동위원소 분석에서 제외하였다. 동해 북부에서 먹이생물의 탄소 안정동위원소 값은 오막손참집게(*Elassocirus cavimanus*)가 -18.3으로 가장 높았고, *Themisto* spp.가 -22.8로 가장 낮았다. 질소 안정동위원소 값은 진흙새우(*Argis lar*)가

11.6으로 가장 높았고, 미확인 자주새우류(Crangonidea)가 3.9로 가장 낮았다. 동해 중부에서는 문어류의 탄소 안정동위원소 값이 -16.7로 가장 높았고, 고슴도치갯지렁이과(Aphroditidae)가 -19.7로 가장 낮았다. 질소 안정동위원소의 가장 높은 값은 문어류에서 12.9로 나타났고, 대게(*Chionoecetes opilio*)에서 3.5로 가장 낮게 나타났다.

표 3. 동해 북부와 남부에 출현하는 먹이생물의 평균 탄소 및 질소 안정동위원소 값

Taxa	학명	North		Middle	
		$\delta^{13}\text{C}$	$\delta^{15}\text{N}$	$\delta^{13}\text{C}$	$\delta^{15}\text{N}$
Amphipoda	<i>Anonyx</i> sp.	-20.5	7.8		
	<i>Themisto</i> spp.	-22.8	6.7		
	Unidentified			-18.1	6.3
Brachyura	<i>Chionoecetes opilio</i>	-19.8	6.5	-19.4	3.5
Caridea	<i>Argis lar</i>	-21.0	11.6		
	Crangonidae	-21.4	3.9	-18.8	4.5
	<i>Eualus middendorffi</i>			-18.5	7.7
	<i>Pandalus borealis</i>	-21.2	11.4		
	<i>Paracrangon echinata</i>	-19.7	10.5		
Cephalopoda	<i>Octopus</i> sp.			-16.7	12.9
	<i>Watasenia scintillans</i>	-19.7	11.5		
	Unidentified			-18.5	11.2
Copepoda	Unidentified	-22.1	5.5		
Euphausiacea	<i>Euphausia pacifica</i>			-19.5	6.5
Mysidacea	Unidentified	-22.4	6.1	-18.8	8.0
Paguroidea	<i>Elassocirus cavimanus</i>	-18.3	5.2	-18.3	7.1
	Unidentified	-21.4	6.8		
Polychaeta	Aphroditidae			-19.7	6.7
	Unidentified			-17.9	11.2
Teleostei	Agonidae	-20.0	10.4		
	Unidentified	-20.1	9.2	-17.0	10.8

나. 주요 어종 및 먹이생물 안정동위원소 값의 위도별 변동특성

본 연구에서 채집된 어류(포식자) 중 2개 이상의 해역에서 출현하였고, 각 해역에서 분석을 위한 충분한 개체수가 확보된 4개 어종(기름가자미, 대구, 대구횃대, 용가자미)을 대상으로 탄소 및 질소 안정동위원소 값의 공간적 변동성을 조사하였다<그림 10>. 기름가자미의 탄소 및 질소 안정동위원소 값은 모두 위도에 따라 유의한 차이를 보였는데

(ANOVA, $p < 0.05$), 탄소 안정동위원소 값은 북부에서 가장 낮았고 중부와 남부에서는 유의한 차이가 없었다(Tukey's HSD test). 기름가자미의 질소 안정동위원소 값은 위도별 차이가 뚜렷하였는데, 중부>북부>남부 순으로 높은 값을 나타냈다. 반면, 대구는 탄소와 질소 안정동위원소 모두 위도별 유의한 차이가 없었다($p > 0.05$). 대구횃대는 탄소 안정동위원소 값에서 북부와 중부 사이에 유의한 차이를 보였고, 질소 안정동위원소는 이러한 유의한 차이가 없었다. 반대로 용가자미는 탄소 안정동위원소에서 위도별 차이는 없었고, 질소 안정동위원소 값은 북부에서 가장 높고, 중부에서 중간 정도의 값, 남부에서 가장 낮은 값을 나타냈다(Tukey's HSD test).

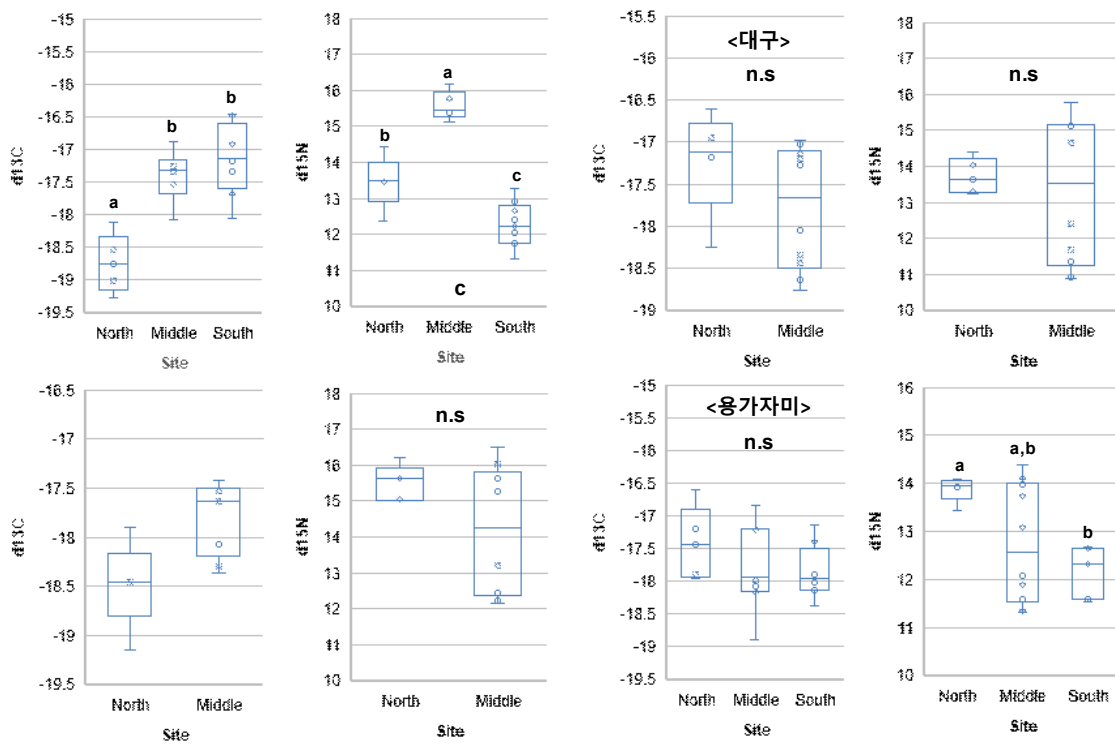


그림 10. 동해 연안 주요 4개 어종(기름가자미, 대구, 대구횃대, 용가자미) 탄소 및 질소 안정동위원소 값의 위도별 변동(n.s. = no significance; a,b,c = ANOVA 사후분석 결과 그룹)

동해 연안 위도별 전반적인 어류 군집의 생태지위는 공간적으로 차이를 나타냈다(그림 11). 일반적으로 질소 안정동위원소는 해당생물의 서식지 내에서 상대적인 영양단계(trophic level)를 나타내며, 탄소 안정동위원소는 먹이원(food source)을 나타낸다. 질소 안정동위원소 값이 높을 수록 상위영양 단계의 포식자에 가깝고, 낮을 수록 저차 단계의 포식자임을 나타낸다. 그리고 상대적으로 높은 탄소 안정동위원소 값은 해당 포식자의

먹이생물이 저서성 먹이원이 우세함을 나타내고, 낮은 탄소 안정동위원소 값은 부유성 먹이원이 우세함을 나타낸다. 본 연구에서 동해 북부, 중부, 남부 어류 군집의 전반적인 안정동위원소 값을 살펴보면, 질소 안정동위원소 값은 공간적으로 유의한 차이를 보였지만(ANOVA, $p < 0.05$), 탄소 안정동위원소는 해역별 어류군집 간 유의한 차이가 없었다($p > 0.05$). 질소 안정동위원소 값은 북부에서 가장 높고 남쪽으로 갈수록 감소하는 경향을 보였다(Tukey's HSD test). 그리고 탄소 안정동위원소 값은 공간적으로 유의한 차이는 없었지만, 북부와 남부에서는 부유성 먹이원이 우세하는 경향을 보였다, 중부에서는 저서성 먹이원이 우세하는 경향을 나타냈다.

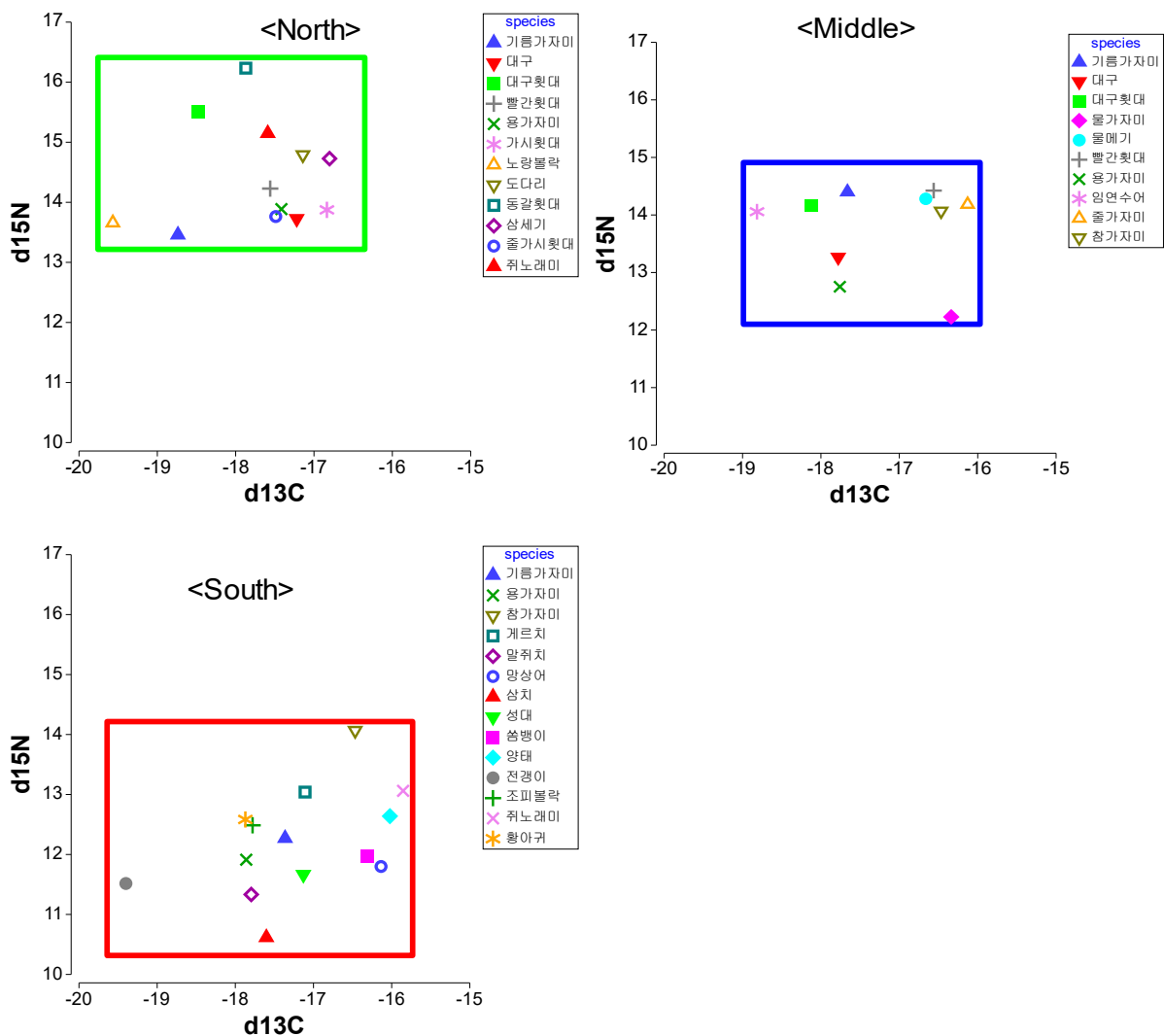


그림 11. 동해 연안 위도별 어류 군집의 안정동위원소 값의 분포

본 연구에서 동해 북부와 중부에서 채집된 주요 어종과 주요 먹이생물의 생태지위를 살펴본 결과, 위도에 따라 전반적인 어류 군집 및 먹이생물 군집의 생태지위가 차이가 있음을 발견하였다(그림 12). 동해 북부에서 포식자 어류 군집의 생태지위는 중부에 비해 높은 영양단계를 나타내었고, 좌우로 좀 더 넓은 범위를 나타냈지만 중부에 비해 왼쪽으로 좀 더 치우쳐 있었다. 먹이생물 군집의 경우 동해 북부에서는 중부에 비해 좌측에 치우쳐 있어, 부유성 먹이원의 기여도가 높음을 알 수 있었지만, 먹이생물의 영양단계는 중부에서 문어류를 제외하면 유사하였다. 일반적으로 포식자의 생태지위는 이들의 먹이생물의 영향을 많이 받는다. 동해 북부에서 부유성 먹이원의 기여도가 높기 때문에 포식자의 전반적인 생태지위가 낮은 탄소 안정동위원소 값으로 나타났지만, 먹이생물의 영양단계가 포식자 군집의 영양단계 결정하는데 큰 기여도가 없었다. 이는 동해 북부에서 포식자 군집의 영양단계를 결정하는데 먹이생물의 직접적인 요인 외 다른 요인이 작용했기 때문으로 판단되었다.

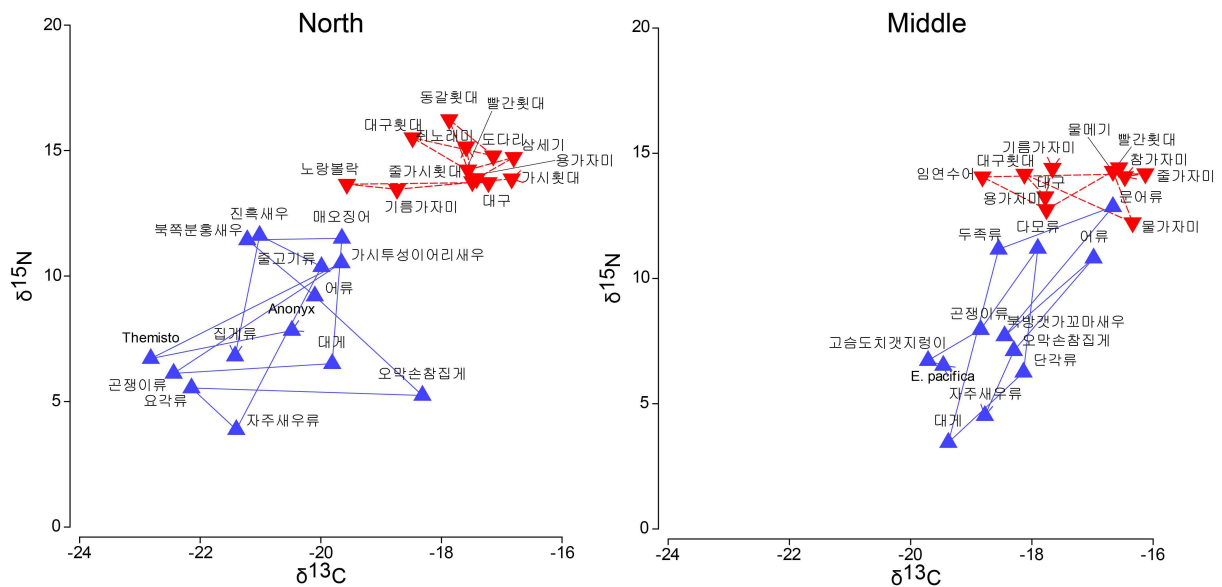


그림 12. 동해 북부와 중부에서 포식자(어류)와 먹이생물의 생태지위 차이(포식자: 삼각형, 먹이생물: 역삼각형)

3. 포식자 소화관내용물

가. 포식자의 소화관내용물

본 연구는 동해 북부, 중부, 남부에서 출현한 주요 어종 14종의 소화관내용물을 분석하였고, 총 29개의 확인 가능한 먹이 분류군(taxa)이 발견되었다<표 4~6, 그림 13>.

동해 북부에서는 주요 어종 중 기름가자미, 노랑볼락, 대구, 대구횃대, 동갈횃대, 빨간횃대, 용가자미, 쥐노래미의 소화관내용물을 분석하였다<표 4>. 기름가자미는 소화관내용물에서 중량비 39.9%를 차지한 갯지렁이류(Polychaeta)가 가장 중요한 먹이생물이었고, 그 다음으로 단각류(Amphipoda)와 미확인 무척추동물(Unidentified invertebrate)이 각각 소화관내용물 중량비 23.9%와 22.8%를 차지하였다. 노랑볼락은 요각류(Copepoda)를 가장 많이 섭식하였는데, 요각류는 소화관내용물 중량비의 60.7%를 차지하였다. 대구는 두족류(Cephalopoda)와 어류(Teleostei)를 가장 많이 섭식하였는데, 각각 소화관내용물 중량비 34.6%와 23.7%를 차지하였다. 동갈횃대와 빨간횃대의 가장 중요한 먹이생물을 두 종 모두 단각류였는데, 단각류는 두 종의 소화관내용물에서 각각 38.9%와 28.3%의 중량비를 차지하였다. 단각류 다음으로 동갈횃대는 집게류(Paguroidea)를 12.3% 섭식하였고, 빨간횃대는 새우류(Caridea)를 12.3% 섭식하였다. 용가자미는 곤쟁이류(Mysidacea)와 어류를 가장 많이 섭식하였고, 각각 소화관내용물 중량비 51.23%와 28.2%를 차지하였다. 그리고 쥐노래미의 소화관내용물에서는 단각류가 46.3%, 어류가 10.8%를 차지하였다.

동해 중부에서는 주요 어종 중 기름가자미, 대구, 대구횃대, 빨간횃대, 용가자미, 참가자미의 소화관내용물을 분석하였다<표 5>. 이 중 기름가자미는 갯지렁이류와 이매패류(Bivalvia)를 가장 많이 섭식하였는데, 각각 소화관내용물 중량비 39.5%와 22.2%를 차지하였다. 대구의 소화관내용물에서는 곤쟁이류, 어류, 두족류가 함께 가장 많이 출현하였고, 각각 소화관내용물 중량비의 34.3%, 22.7%, 18.5%를 차지하였다. 대구횃대는 두족류(20.1%), 어류(19.3%), 새우류(18.1%), 갯지렁이류(10.9%) 순으로 많이 섭식하였고, 빨간횃대는 게류(Brachyura), 곤쟁이류, 어류, 미확인 무척추동물을 유사한 비율로 섭식하였다. 용가자미의 소화관내용물에서는 난바다곤쟁이류(Euphausiacea), 곤쟁이류, 어류가 함께 중요한 먹이생물이었는데, 각각 중량비의 25.4%, 24.5%, 35.5%를 차지하여, 전체의 85.3%를 나타냈다. 그리고 참가자미는 거미불가사리류(Ophiuroidea), 갯지렁이류, 단각류 등 저서성 먹이가 중요한 먹이생물이었고, 각각 소화관내용물 중량비의 54.9%, 22.4%, 20.0%를 차지하였다.

동해 남부에서는 주요 어종인 기름가자미, 말쥐치, 성대, 용가자미, 전갱이, 조피볼락, 쥐노래미, 황아귀의 소화관내용물을 분석하였다<표 6>. 기름가자미는 갯지렁이류와 새우류가 각각 소화관내용물 중량비의 55.5%와 24.5%를 차지하여 가장 중요한 먹이생물이었다. 말쥐치의 소화관내용물에서는 단각류, 해초강(Ascidiacea), 해조류(seaweed) 3종류의 먹이생물이 발견되었는데, 각각 전체 중량비의 31.3%, 31.3%, 37.5%를 차지하여 유사한 비율로 섭식되었다. 성대의 소화관내용물에서는 게류와 어류가 각각 42.5%와 52.2%로 전체 중량비의 대부분(94.7%)을 차지하였다. 용가자미의 소화관내용물에서는 새우류와 어류 2종류의 먹이생물이 발견되었는데, 어류가 중량비의 대부분(85.1%)을 차지하였다. 전갱이는 단각류, 갯가재류(Stomatopoda), 어류를 주로 섭식하였고, 각각 소화관내용물 중량비의 32.8%, 30.8%, 20.5%를 차지하였다. 조피볼락 또한 3종류의 먹이생물만 섭식하였는데, 어류는 소화관내용물 중량비의 42.9%, 게류와 바다나리류(Crinoidea)가 모두 28.6%를 차지하였다. 쥐노래미와 황아귀는 특정 먹이생물을 대부분 섭식하는 경향을 나타냈는데, 쥐노래미는 게류(100%), 황아귀는 어류(78.9%)를 집중적으로 섭식하였다.

표 4. 동해 북부 연안에서 채집된 주요 어종의 위내용물 조성

Prey item	Prey type	기름가자미	노랑볼락	대구	대구횃대	동갈횃대	빨간횃대	용가자미	쥐노래미
Amphipoda	benthic	23.9		13.4	0.5	38.9	28.3	0.7	46.3
Amphipoda (pelagic)	semi-pelagic			5.2		0.5			
Arrow worm	pelagic		5.1						
Ascidacea	benthic								
Bivalvia	benthic	4.5		<0.1		1.9	1.3	7.3	<0.1
Brachyura	epi-benthic				6.4	2.4	6.3		
Caridea	epi-benthic			10.9	29.2	4.9	12.3	12.5	14.5
Cephalopoda	semi-pelagic			34.6	0.2	6.8			8.9
Copepoda	pelagic		60.7						
Crinoidea	benthic								
Cumacea	benthic	0.7				<0.1			
Echinoidea	benthic						1.7		
Euphausia	semi-pelagic	1.6	5.6		<0.1				
Galatheidae	epi-benthic				5.3				
Gastropoda	benthic	0.1		0.1	3.5	1.0	6.3		0.2
Hydrozoa	benthic								
Isopoda	benthic	2.6							
Mysidacea	semi-pelagic	2.6	14.3	6.8		0.7	7.3	51.3	6.3
Nematoda	paracite								
Nemertinea	benthic								
Ophiuroidea	benthic	0.1							
Paguroidea	epi-benthic	0.9			28.1	12.3	10.4		
Polychaeta	benthic	39.9		4.8	0.4	9.9	7.5		0.2
Porcellanidae	epi-benthic					0.4			
seaweed	benthic				1.0	0.4			1.9
Sponge	benthic					3.5			
Stomatopoda	epi-benthic								
Tanaidacea	benthic	0.1							
Teleostei	semi-pelagic			23.7	21.5	6.6	6.3	28.2	10.8
Thoracica	benthic				0.2				
Unid. crustaceans	benthic				3.6		12.5		
Unid. invertebrates	benthic	22.8		0.4		10.0			10.8
Unid. pelagic invertebrates	pelagic		14.4						

표 5. 동해 중부 연안에서 채집된 주요 어종의 위내용물 조성

Prey item	Prey type	기름가자미	대구	대구횃대	빨간횃대	용가자미	참가자미
Amphipoda	benthic	2.0		0.2		0.1	20.0
Amphipoda (pelagic)	semi-pelagic						
Arrow worm	pelagic						
Ascidacea	benthic			1.4			
Bivalvia	benthic	22.2					2.7
Brachyura	epi-benthic	3.8	0.8	9.2			
Caridea	epi-benthic	2.7	9.5	18.1	24.7	2.6	
Cephalopoda	semi-pelagic		18.5	20.1	0.3		
Copepoda	pelagic						
Crinoidea	benthic						
Cumacea	benthic	4.7					
Debris	others	11.8				4.8	
Echinoidea	benthic		0.8	3.5			
Euphausia	semi-pelagic					25.4	
Galatheidae	epi-benthic						
Gastropoda	benthic						
Hydrozoa	benthic	1.7					
Isopoda	benthic			1.5			
Mysidacea	semi-pelagic		34.3	1.5	25.0	24.5	
Nematoda	paracite					1.3	
Nemertinea	benthic	1.1					
Ophiuroidea	benthic	0.1		1.3		5.9	54.9
Paguroidea	epi-benthic	1.9		3.0			
Polychaeta	benthic	39.5	8.6	10.9			22.4
Porcellanidae	epi-benthic						
seaweed	benthic	3.4					
Sponge	benthic						
Stomatopoda	epi-benthic						
Tanaidacea	benthic	2.2					
Teleostei	semi-pelagic		22.7	19.3	25.0	35.5	
Thoracica	benthic						
Unid. crustaceans	benthic		4.8		25.0		
Unid. invertebrates	benthic	14.63		9.9			
Unid. pelagic invertebrates	pelagic						

표 6. 동해 남부 연안에서 채집된 주요 어종의 위내용물 조성

Prey item	Prey type	기름가자미	말쥐치	성대	용가자미	전갱이	조피볼락	취노래미	황아귀
Amphipoda	benthic		31.3			32.9			
Amphipoda (pelagic)	semi-pelagic								
Arrow worm	pelagic								
Ascidacea	benthic		31.3						
Bivalvia	benthic			4.5					
Brachyura	epi-benthic			42.5		2.2	28.6	100.0	
Caridea	epi-benthic	24.5		0.5	14.9	3.2			9.7
Cephalopoda	semi-pelagic								11.4
Copepoda	pelagic								
Crinoidea	benthic						28.6		
Cumacea	benthic								
Echinoidea	benthic								
Euphausia	semi-pelagic								
Galatheidae	epi-benthic								
Gastropoda	benthic								
Hydrozoa	benthic								
Isopoda	benthic								
Mysidacea	semi-pelagic								
Nematoda	paracite								
Nemertinea	benthic								
Ophiuroidea	benthic								
Paguroidea	epi-benthic								
Polychaeta	benthic	55.5				10.5			
Porcellanidae	epi-benthic								
seaweed	benthic		37.5						
Sponge	benthic								
Stomatopoda	epi-benthic			0.3		30.8			
Tanaidacea	benthic								
Teleostei	semi-pelagic			52.2	85.1	20.5	42.9		78.9
Thoracica	benthic								
Unid. crustaceans	benthic								
Unid. invertebrates	benthic	20.0							
Unid. pelagic invertebrates	pelagic								
















		
Polychaetes	Brittle star	Bivalves
		
Copepods	Mysida	Euphausia
		
Amphipods-benthic	Amphipods-pelagic	Cumaceans
		
Shrimps	Hermit crabs	Snow crab
		
Cephalopods beak	Small fish	Medium fish

그림 13. 동해 연안 포식자 소화관에서 발견된 주요 먹이생물 사진

나. 주요 어종의 먹이생물 조성의 해역별(위도별) 변동

동해 연안 2개 이상 해역에서 충분한 개체수가 확보된 5종(기름가자미, 대구, 대구횃대, 빨간횃대, 용가자미)을 대상으로 해역별(위도별) 먹이생물 차이를 분석하였다<그림 14>. 기름가자미는 모든 해역에서 갯지렁이류를 가장 많이 섭식하였지만, 두 번째 중요 먹이생물에서는 해역별 차이를 나타냈다. 두 번째 먹이생물 중 동해 북부에서는 단각류, 중부에서는 이매패류, 남부에서는 새우류의 비율이 높았다. 대구는 동해 북부와 남부에서 비슷한 종류의 먹이생물을 섭식하였지만, 각 해역에서 각각 먹이생물의 기여도는 차이를 나타냈다. 동해 북부에서는 두족류, 어류, 단각류의 순으로 섭식량이 많았지만, 중부에서는 곤쟁이류, 어류, 두족류 순이었다. 대구횃대는 동해 북부와 중부에서 공통적으로 어류와 새우류가 먹이생물로써 중요도가 높았지만, 그 외 동해 북부에서는 집게류, 중부에서는 두족류의 기여도 또한 높아 전반적인 먹이조성에 차이를 보였다. 빨간횃대는 동해 북부와 중부에서 공통적으로 새우류, 곤쟁이류, 어류 등을 많이 섭식하였지만, 북부 정점에서는 단각류, 계류, 새우류, 집게류 등 저서성 갑각류의 먹이 다양도가 높았고, 중부에서는 새우류, 곤쟁이류, 어류, 기타 저서성 갑각류가 소화관내용물의 대부분을 차지하였다. 용가자미의 경우 동해 북부와 중부에서는 어류와 곤쟁이류를 함께 많이 섭식하였지만, 남부에서는 어류의 섭식 비율이 매우 높게 나타나 소화관내용물 조성에서 해역별 차이를 보였다.

각 어종의 해역별 먹이생물 조성에 대한 ANOSIM 분석 결과<표 7>, 기름가자미, 대구, 대구횃대는 해역별 먹이생물 조성에서 유의한 차이를 나타냈으나($P < 0.05$), 빨간횃대와 용가자미는 유의한 차이가 없었다($P > 0.05$). ANOSIM 사후분석 결과 기름가자미의 소화관내용물 조성은 동해 북부와 중부 사이에서 유의한 차이를 보였고, 나머지 해역별 상호비교에서는 유의한 차이가 없었다(ANOSIM Pairwise tests). 용가자미는 동해 북부, 중부, 남부 모두 유사한 소화관내용물 조성을 보였다.

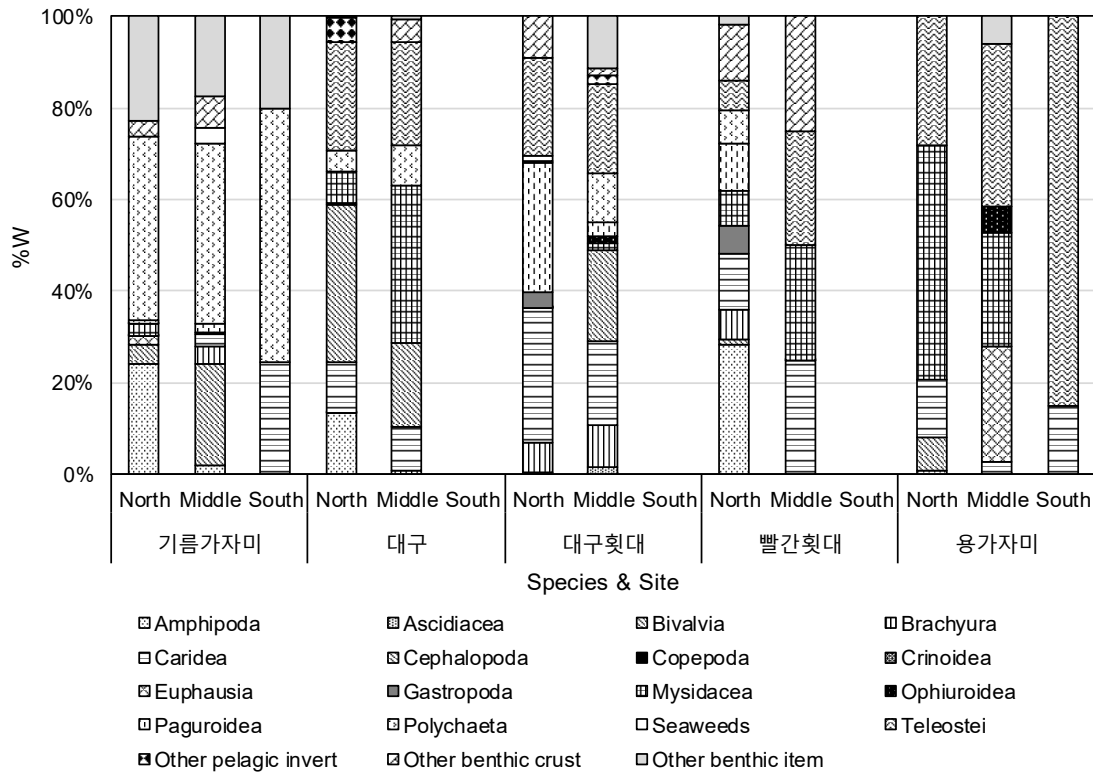


그림 14. 주요 어종 소화관내용물의 해역별(위도별) 차이

표 7. 주요 어종 소화관내용물의 해역별(위도별) 차이에 대한 ANOSIM 분석 결과

Species	global-R	P	Pairwise tests
기름가자미	0.072	0.034	N=S, M=S, N≠M
대구	0.086	0.034	n/a
대구횃대	0.150	0.002	n/a
빨간횃대	0.147	0.104	n/a
용가자미	-0.003	0.500	N=M=S

N=north, M=middle, S=south

다. 종별, 해역별 주요 먹이생물에 대한 먹이분할 관계

동해 연안 출현한 주요 어종은 종별, 해역별로 주요 먹이생물에서 차이를 보였다(표 8). 기름가자미 소화관내용물에서는 모든 해역에서 공통적으로 갯지렁이류가 가장 중요한 먹이생물이었고, 그 다음으로 단각류, 이매패류, 새우류 등 해역별 차이를 보였다. 북부에서만 출현한 노랑블락은 부유성 먹이원이 요각류와 곤쟁이류가 주요 먹이생물이었다. 대구의 경우 북부에서는 두족류, 중부에서는 곤쟁이류를 가장 많이 섭식하였지만, 두

번째 주요 먹이생물은 공통적으로 어류였고, 중부에서 두족류의 먹이생물으로써 중요도 또한 다소 높았다. 대구횃대는 해역별로 중요 먹이생물에서 차이를 보였으나, 공통적으로 십각류(새우류와 집게류)와 어류의 중요도가 높았다. 북부에서만 출현한 동갈횃대는 단각류와 집게류를 주로 섭식하였고, 남부에서만 출현한 말쥐치는 해조류를 가장 많이 섭식하였다. 빨간횃대는 북부에서 갑각류를 주로 섭식하였지만, 중부에서는 어류, 곤쟁이류, 새우류를 주로 섭식하였다. 남부에서만 출현한 성대와 조피볼락은 공통적으로 어류와 새우류를 많이 섭식하였다. 용가자미는 중부와 남부에서는 어류를 가장 많이 섭식하였고, 그 다음으로 갑각류의 비율이 높았지만, 북부에서는 갑각류, 어류 순으로 많이 섭식하였다. 쥐노래미는 북부에서 단각류, 새우류 등 갑각류가 중요한 먹이생물이었고, 남부에서는 게류만 섭식하였다. 남부에서 출현한 삼치 또한 게류만 섭식하였고, 남부에서만 출현한 황아귀는 전형적인 어류+두족류 섭식자였다. 중부에서만 출현한 참가자미는 거미불가사리류, 갯지렁이류, 단각류 등 저서성 먹이원이 중요한 먹이생물이었다.

표 8. 동해 연안 주요 어종의 해역별(위도별) 먹이생물 차이

종명	해역	먹이생물 중요도 순위		
		1st	2nd	3rd
기름가자미	North	Polychaeta	Amphipoda	Unid. Benthic items
	Middle	Polychaeta	Bivalvia	Unid. Benthic items
	South	Polychaeta	Caridea	Unid. Benthic items
노랑볼락	North	Copepoda	Mysidacea	Unid. Pelagic items
대구	North	Cephalopoda	Teleostei	Amphipoda
	Middle	Mysidacea	Teleostei	Cephalopoda
대구횃대	North	Caridea	Paguroidea	Teleostei
	Middle	Cephalopoda	Teleostei	Caridea
동갈횃대	North	Amphipoda	Paguroidea	Polychaeta
말취치	South	Seaweed	Amphipoda	Asciacea
빨간횃대	North	Amphipoda	Caridea	Paguroidea
	Middle	Teleostei	Mysidacea	Caridea
삼치	South	Brachyura		
성대	South	Teleostei	Brachyura	Bivalvia
용가자미	North	Mysidacea	Teleostei	Caridea
	Middle	Teleostei	Euphausiacea	Mysidacea
	South	Teleostei	Caridea	
조피볼락	South	Teleostei	Brachyura	Crinoidea
쥐노래미	North	Amphipoda	Caridea	Teleostei
	South	Brachyura		
참가자미	Middle	Ophiuroidea	Polychaeta	Amphipoda
황아귀	South	Teleostei	Cephalopoda	Caridea

동해 연안에서 출현한 어류는 종별, 해역별 먹이 유사도에 따른 집괴분석 결과 총 7개의 섭식 그룹(feeding group)으로 구분할 수 있었다<그림 15>. 첫 번째 그룹(group A)은 가장 많은 해역별 어종이 속해 있으며, 주로 저서성(또는 반저서성) 갑각류를 섭식하는 어종들이 속하였다. 북부에서는 빨간횃대, 동갈횃대, 쥐노래미, 대구, 대구횃대, 용가자미가 속하였고, 중부에서는 대구횃대, 빨간횃대, 대구, 용가자미, 남부에서는 전갱이가 속하였다. 두 번째 그룹(group B)은 남부에 출현한 조피볼락과 성대가 속하였는데, 어류와 갑각류를 주로 섭식한 그룹이었다. 세 번째 그룹(group C)은 어류를 대부분 섭식한 어식성 어류(piscivore)로 북부에서 삼세기, 남부에서 황아귀, 용가자미, 양태가 속하였다. 네 번째 그룹(group D)은 전 해역에 출현한 기름가자미와 중부에서 출현한 참가자미가 속하였는데, 전형적인 갯지렁이 섭식 어종들이 속하였다. 다섯 번째 그룹(group E)은 남부 정점에

서 출현한 말쥐치가 속하였는데, 해조류와 기타 무척추동물을 섭식하는 유일한 잡식성어류(omnivore)였다. 여섯 번째 그룹(group F)은 남부 정점에서 출현한 쥐노래미와 삼치가 속하였는데, 십각류를 주로 섭식하였다. 마지막 그룹(group G)은 북부에서 출현한 노랑볼락이 속하였는데, 유일하게 부유성 먹이원을 섭식하는 어종이었다.

동해 3개 해역에서 출현한 주요 어종들 대부분은 지역에 상관없이 같은 그룹에 속하는 경향을 보였다. 그러나 용가자미의 경우 남부에서 출현한 그룹은 어식성어류 그룹에 속하였는데, 이는 북부와 중부에 출현한 개체들에 비해 어류의 섭식량이 더 많았기 때문이었다. 그리고 쥐노래미의 경우 북부에서는 갑각류 섭식그룹, 남부에서는 십각류 섭식그룹에 속하였지만, 해역에 상관없이 갑각류를 주로 섭식함을 알 수 있었다. 기존의 많은 섭식그룹 연구들에서 연안해역 저어류 군집내에는 잡식성 어종과 부유성 먹이 섭식 어종이 항상 소규모 그룹을 형성하고 있었다(e.g. Bulman et al., 2001; Egan et al., 2017). 각 위도별 공동 출현하는 어종은 먹이 종류의 차이를 나타냈고, 이는 같은 해역에 출현하는 어종간 공통으로 이용 가능한 먹이자원에 대한 먹이분할(food resource partitioning)의 전략을 나타내고 있음을 암시한다.

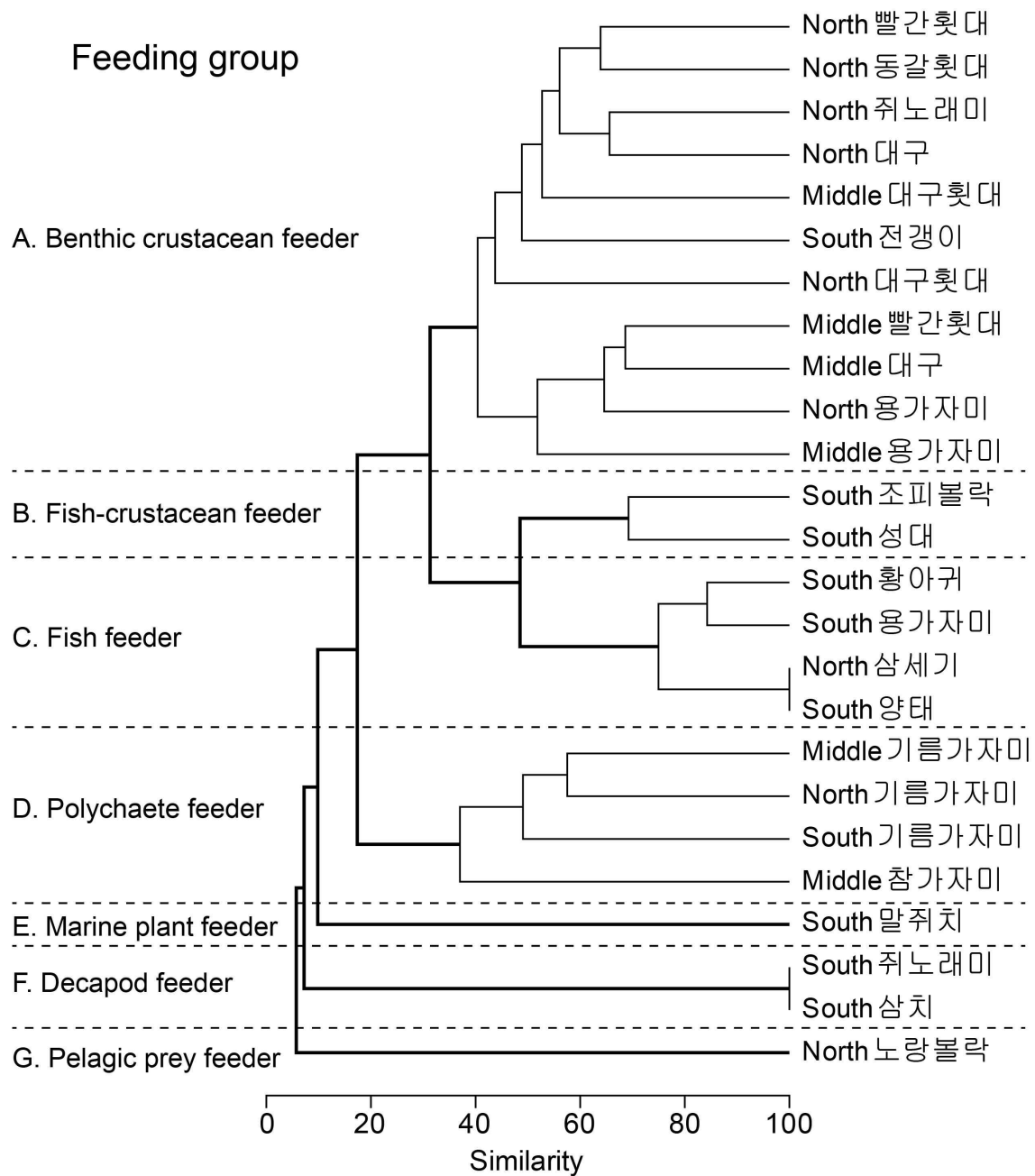


그림 15. 집괴분석(Cluster analysis)과 SIMPROF test에 의한 종별, 해역별 동해 연안 포식자의 섭식그룹

4. 동해 연안 먹이망 구조 해석 및 변동성 분석

가. 안정동위원소와 포식-피식관계를 이용한 먹이망 구조 완성

본 연구에서 해양생태계 먹이망 구조 완성을 위하여 포식자의 안정동위원소와 소화관 내용물 분석을 이용하였고, 다음의 순서로 먹이망 구조를 도식화하였다<그림 16>.

- (1) 탄소(x축), 질소(y축) 안정동위원소 값을 이용하여 각 포식자의 생태지위를 평면상에 나타낸다.
- (2) 먹이생물의 생태지위(안정동위원소 분석 또는 문헌자료 이용)를 포식자와 같이 평면상에 나타낸다.
- (3) 포식자 소화관 내용물의 정량적 섭식량(중량비 이용)을 이용하여 포식자와 먹이생물의 포식-피식관계를 연결시킨다.

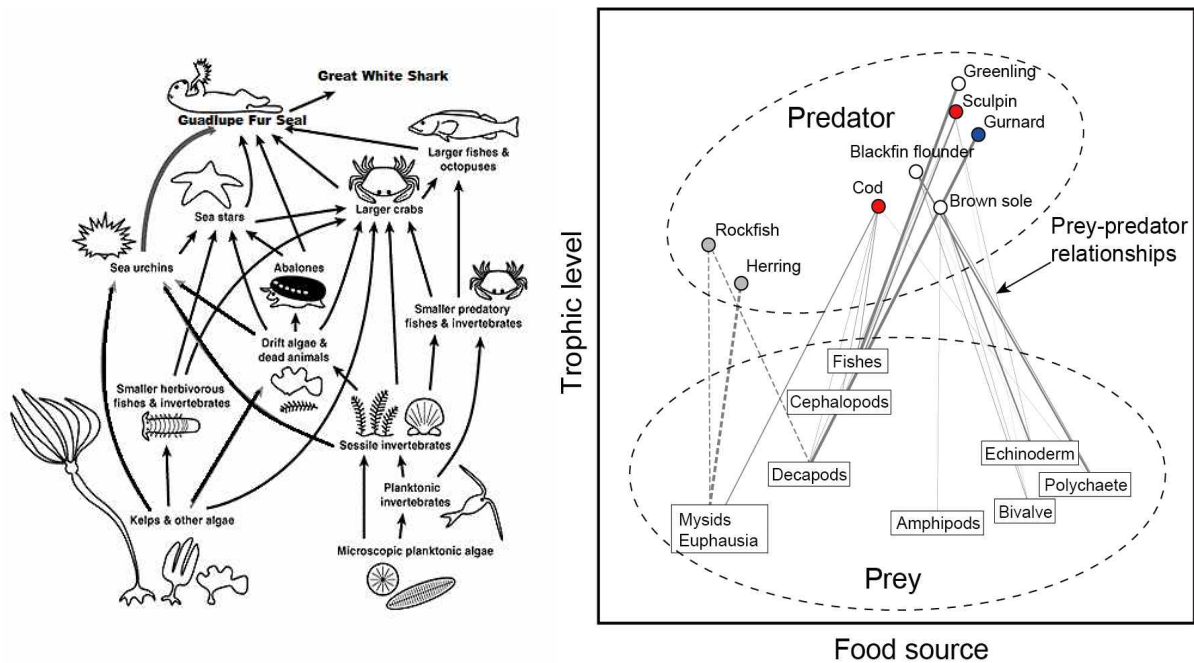


그림 16. 기존의 일반적인 해양생태계 먹이망 구조 모식도(좌)와 안정동위원소 및 소화관내용물 분석을 통합한 새로운 먹이망 구조 해석 기법(우)

이러한 정량적 먹이망 구조 해석 방법은 해양생태계 구성원(생산자, 포식자, 피식자 등)의 생태계 내에서 정확한 생태학적 위치를 해석할 수 있고, 생물종간에 먹고 먹히는

관계와 공통으로 이용하는 먹이자원에 대한 경쟁관계도 해석할 수 있다. 또한 수치화된 먹이망 구조는 해양생태계 특성을 대변할 수 있으며, 시공간 변동성에 대한 객관적인 해석방법을 제시할 수 있다.

나. 동해 연안 위도별 먹이망 구조 특성의 차이 해석

동해에서 수온의 수평적 또는 수직적 분포양상은 대마난류와 북한한류의 상호작용에 의해 결정된다. 쿠로시오 해류로부터 분지한 대마난류는 대한해협을 통과한 뒤 동해에서 외양쪽으로 확장하고 북한한류는 중·저층에서 동해 연안을 따라 남하하는 경향을 보인다. 이러한 대마난류와 북한한류의 상호작용과 장단기 변화에 따라 동해 연안의 해양환경은 뚜렷한 시공간 변동을 나타내며, 장기적으로는 기후체제변화와 연관성을 보이기도 한다(Jung et al., 2017). 그리고 해양환경변화에 따른 수괴특성의 변화는 해양생태계 내에서 특정 수괴를 대표하는 생물종(먹이생물)의 유입을 가져올 수 있으며, 단기적 또는 장기적으로 포식자의 먹이 이용도와 이에 따른 먹이망 구조의 변화를 일으킬 수 있다. 예시로, 동해 북부에서 해양환경변화에 따라 명태의 먹이원이 바뀌고 그 결과로 생태지위가 변함을 발견하였다<그림 4>.

본 연구에서 여름철 동해 연안의 해양환경은 해역별(위도별)로 뚜렷한 차이를 나타냈다. 이러한 차이는 수심별 수온의 분포에서 뚜렷하였는데, 본 연구의 시료 채집수심에서 수온은 북부<중부<남부 순으로 높아지는 경향을 나타냈고, 염분은 큰 차이를 보이지 않았다<그림 7>. 반면, 동해 해역별 포식자 군집의 영양단계는 동해 북부>중부>남부 순으로 낮아지는 경향을 보였고, 북부에서 포식자 군집이 부유성 먹이원을 더 우세하게 이용하는 경향을 보였다<그림 17>. 즉 북부 해양생태계에서는 부유성 기원의 먹이생물과 영양단계가 높은 먹이원이 풍부하여 포식자 그룹이 이용하기 쉬웠을 것이다. 그러나 본 연구에서 해역별 포식자의 먹이 종류와 포식자의 생태지위 결정 사이의 뚜렷한 연관관계를 발견하지 못하였다. 다만 북부에서 부유성 먹이원(요각류, 곤쟁이류, 난바다곤쟁이류 등)이 우세하고, 전반적인 먹이생물의 생태지위가 부유성 기원의 먹이원에 치우쳐져 있어<그림 12>, 이러한 먹이원의 영향이 포식자 군집의 생태지위 결정에 반영되었음을 알 수 있었다. 그럼에도 불구하고 먹이생물과 포식자 생태지위 결정을 위한 연결고리의 불분명은 안정동위원소 분석과 소화관내용물 분석결과의 시간적 해상도 차이 때문으로 판단된다(Park et al., 2017c). 일반적으로 포식자 체내에서 안정동위원소 값은 몇 주에서 몇 달 동안 섭식-동화된 먹이원의 영향을 나타내며(Buchheister and Latour, 2010), 소화관내용

물은 특정 시기에 섭식한 먹이원의 snapshot을 나타내기 때문이다(Fry, 2007). 따라서 향후 연속적인 시료채집 및 분석을 통하여 동해 해양환경변화와 먹이망 구조 변동성의 해석을 위한 후속 연구가 요구된다.

결론적으로, 본 연구는 포식자 및 먹이생물의 안정동위원소 분석과 포식자 소화관내 용물 분석을 이용하여 여름철 동해 연안 해역별(위도별) 먹이망 구조를 해석하였다. 동해 연안은 해역별로 다른 수온분포를 보였고, 먹이망 구조 또한 뚜렷한 차이를 나타냈다. 이러한 결과는 해역별 다른 수괴에 분포하는 먹이생물 종류 차이 때문이었고, 먹이생물 차이가 전반적인 먹이망 구조 차이를 반영하는 것으로 판단되었다<그림 17>. 본 연구 결과는 장기적으로 해양생태계 먹이망 기반 유용생물자원 변동성을 해석하기 위한 연구과제에 중요한 자료 및 방법으로 이용될 것이며, 나아가 상위생태계 모델링(Ecopath, NEMURO, EwE 등)의 입력자료를 제공하여 모델의 정확도를 향상시키기 위한 자료로 활용될 것이다.

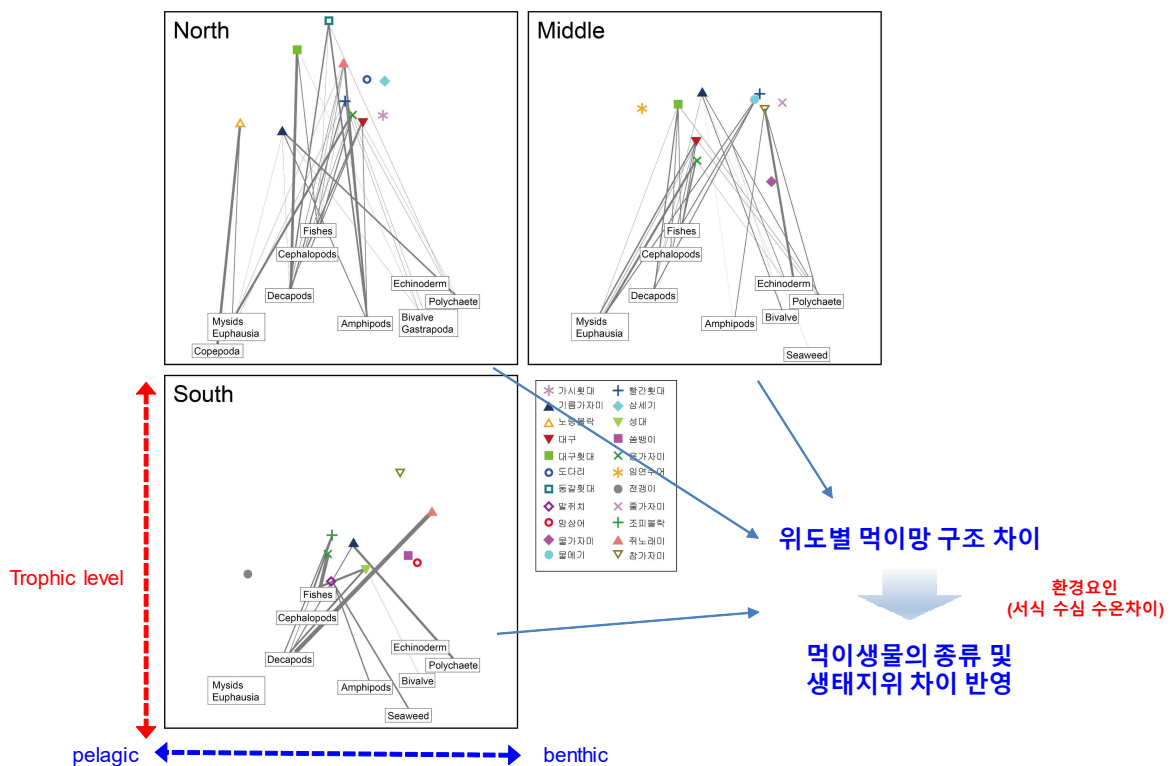


그림 17. 동해 연안 먹이망 구조와 해양환경 변동에 따른 먹이망 구조 차이 모식도

제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

제 1 절 연구개발목표 달성도

1. 총연구기간내 연구내용 대비 달성율

총연구기간내 연차별 목표 대비 달성율(%)					
구분	연차별 달성내용				연차별 계획대비 연구실적 달성율(B) (%)
	성과목표	연구내용	가중치 (A)	달성실적	
1년차 (2019)	1. 안정동위원소 분석	1-1. 해양생태계 구성원의 탄소($\delta^{13}\text{C}$) 및 질소($\delta^{15}\text{N}$) 안정동위원소를 분석하여 각 종의 생태지위 추정	0.5	- 동해 연안생태계 주요 포식자 생태지위 결정 - 동해 위도별 주요 포식자 생태지위 차이 발견	100
	2. 포식자 소화관내용물 분석	2-1. 포식자의 소화관내용물에서 발견된 먹이생물의 정량적 분석을 이용하여 해양생태계 내 포식-피식관계 완성	0.3	- 동해 연안생태계 주요 포식자 먹이생물 탐색 완료 - 동해 위도별 주요 포식자 먹이생물 차이 발견	100
	3. 동해 연안 먹이망 구조 해석 및 변동성 분석	3.1. 안정동위원소와 포식-피식관계를 이용하여 먹이망 구조 완성 3.2. 동해 연안 위도별 먹이망 구조 특성의 차이 해석	0.2	- 동해 위도별 포식자 중심 먹이망 구조 도식화 - 동해 위도별 먹이망 구조 차이 발견	100
	계		1.0		100

2. 연구내용 및 달성실적

가. 성과목표 1. 안정동위원소 분석

- (1) 연구내용 1-1: 해양생태계 구성원의 탄소($\delta^{13}\text{C}$) 및 질소($\delta^{15}\text{N}$) 안정동위원소를 분석하여 각 종의 생태지위 추정
- 탄소 안정동위원소 결과를 이용하여 어종별 먹이원(trophic source) 추정
 - 질소 안정동위원소 결과를 이용하여 어종별 영양단계(trophic level) 추정

- 주요 어종의 생태지위는 위도에 따라 차이를 나타냄
- 위도별 서식지내 먹이 종류의 차이에 따라 군집 영양단계(북부>중부>남부)와 먹이 source (pelagic source: 북부, 남부; benthic source: 중부)의 차이를 반영하고 있음

나. 성과목표 2. 포식자 소화관내용물 분석

- (1) 연구내용 2-1: 포식자의 소화관내용물에서 발견된 먹이생물의 정량적 분석을 이용하여 해양생태계 내 포식-피식관계 완성
- 어종별 먹이생물 정량화를 통하여 주요 먹이생물 파악
 - 먹이 종류에 따라 섭식방법 및 영양단계 추정 가능
 - 어종별 위도에 따라 먹이생물을 차이를 나타냄(기름가자미는 유사함)
 - 각 해역에서 공존하는 어종들은 먹이 종류의 차이를 나타냈고, 먹이자원에 대한 먹이분할(food resource partitioning) 관계를 보임

다. 성과목표 3. 동해 연안 먹이망 구조 해석 및 변동성 분석

- (1) 연구내용 3-1: 안정동위원소와 포식-피식관계를 이용하여 먹이망 구조 완성
- 포식자 생태지위 결정 후 먹이생물과 직접적인 포식-피식관계 연결
 - 하계 동해 북부, 중부, 남부 연안해역 먹이망 구조 완성
- (2) 연구내용 3-2: 동해 연안 위도별 먹이망 구조 특성의 차이 해석
- 위도별 전반적인 먹이망 구조 및 해양환경의 차이 탐색
 - 주요 포식자의 위도별 먹이생물 차이에 따른 생태지위 차이 발견
 - 주요 포식자 서식 수심 수온 차이에 따른 먹이생물의 종류 및 생태지위 차이 반영

제 2 절 대외기여도

1. 기술적 측면: 해양생태계 구조 및 변동성 해석 기법 제시

- 해양생태계 먹이망 구조는 생태계 구성원인 각 생물종의 생태학적 위치(trophic niche)와 생물종간 포식-피식관계의 연결을 통하여 해석할 수 있기 때문에, 안정동위원소 분석(생태학적 지위 결정)과 포식자 소화관내용물 분석 기법(포식-피식관계 연결)을 통합한 방법을 이용한 해양생태계 먹이망의 정량적 분석 기법 제안함
- 기후변화(또는 기후체제변화) 등에 의한 해양환경변화는 해양생태계 전반에 영향을 미치고 나아가 인간에게 잠재적 위협을 가할 수 있기 때문에, 해양환경변화에 의한 생태계 반응(먹이망 구조 변동)을 탐지하고 해석하는 기술을 통하여 자연재해에 대응하는 연구방법을 제안할 수 있음
- 해양생태계 생물종 또는 생물군집의 변동성을 탐색하고 예측하는 기술(생태계 모델링)은 유용생물자원을 지속적으로 이용하기 위한 기술로 본 연구결과를 통하여 한국형 생태계 모델링 개발을 위한 기반 기술을 제공할 수 있음

2. 경제적 측면: 수산자원 및 생물다양성 손실 대처

- 수산자원생물의 장단기 변동 요인을 탐색하기 위한 방법의 일환으로 먹이망 구조 및 생태지위 변동 측면에서 해석할 수 있는 방법 제시하고 지속가능한 수산자원 이용을 위한 정책을 제안할 수 있음
- 장단기 환경변화 또는 어업은 특정 생태학적 위치에 속해있는 생물종의 현존량에 영향을 가할 수 있기 때문에 취약 생물종을 탐지하여 생물다양성 손실에 대처하기 위한 방안을 제시할 수 있음

3. 사회적 측면: 기후변화 대응 생태계 반응 해석

- 장기간 기후변화(또는 기후체제 변화)에 의한 영향은 해양의 물리환경변화에 의해 나타나며, 이러한 환경변화가 유발한 생태계 변화는 장기적으로 인류에 자연환경 혜택

의 감소로 연결될 수 있음. 따라서 기후변화의 영향을 탐지하여 생태학적 측면에서 기후변화의 심각성 알리고 대처 방안을 모색할 수 있음

- 장기간 해양생태계 모니터링 을 통하여 미래 생태계 변화를 예측 하고, 자연환경 보전의 중요성을 알릴 수 있음

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

1. 해양환경변화와 생태계 변동의 연관성

- 해양생태계 먹이망 구조를 정량적 해석하기 위한 기술(분석 tool 및 프로그램) 개발
- 기후변화(또는 기후체제변화) 등에 따른 해양생태계 변동성을 규명하고, 향후 대안을 마련하기 위한 정책연구에 활용

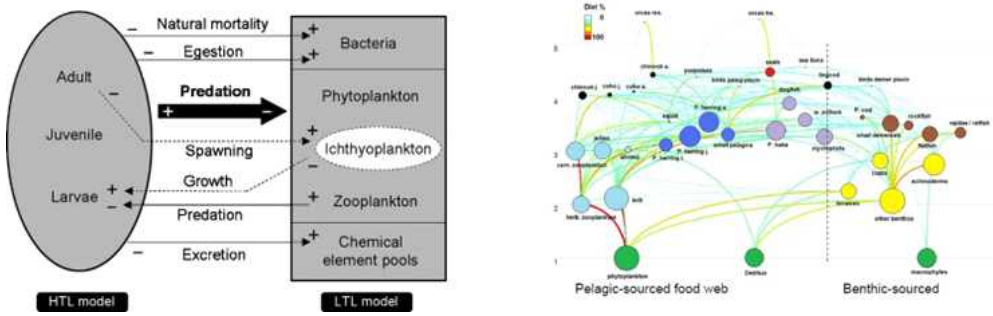
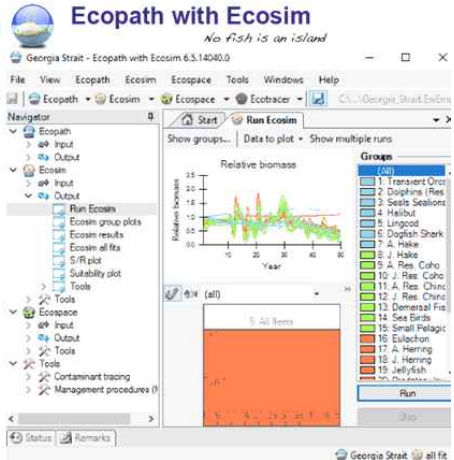
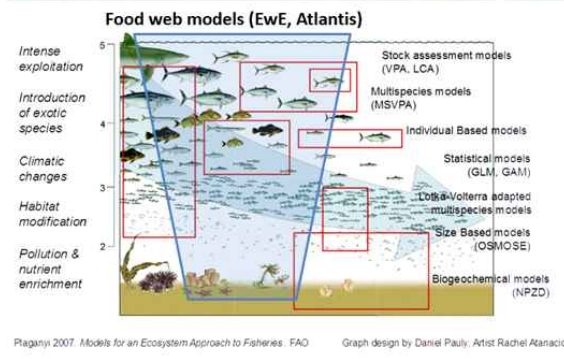
〈활용연구 1〉	
연구제목	해양생태계 먹이망 구조 해석 기술 개발
연구내용	<ul style="list-style-type: none"> - 포식자와 먹이생물을 포함한 생태계 구성원의 안정동위원소 분석 - 포식자 소화관내용물 분석을 이용한 포식-피식관계 완성 - 먹이망 구조 분석 및 해석을 위한 자료분석 code 개발 - 먹이망 구조의 시공간 정량적 비교를 위한 통계분석 tool 개발
활용계획	<ul style="list-style-type: none"> - 해석별 생태계 구조 및 계절-연간 변동 해석에 이용 - 해양환경변화에 따른 생태계 반응 정량적 탐지 가능 - 새로운 통계분석 tool 개발 및 활용
예시	<p>Integrating analyses of stable isotope and predator' s diets</p> <p>(출처: https://www.camnl.wr.usgs.gov/isoig/projects/fingernails/results/compare2003.html)</p>

<활용연구 2>	
연구제목	동해 아열대화에 따른 수산자원 변동성 연구
연구내용	<ul style="list-style-type: none"> - 동해 아열대화에 따른 생물종 분포 변화 조사 - 기후변화 등에 의한 동해 아열대 생물종 유입의 먹이망 구조 영향 조사 - 동해 생태계 토착종과 유입종(아열대성 어종)의 생물학적 경쟁관계 연구
활용계획	<ul style="list-style-type: none"> - 해양생태계에서 주요 수산자원 생물종 간 경쟁관계 해석 - 기후변화에 의한 이용 가능한 수산자원 생물종 발굴 - 기후변화 대응 수산자원 개발 및 보전 정책에 활용
예시	<p>동해 아열대화와 수산자원 분포 변동</p> <p><출처: 국립수산물관리원></p>

<활용연구 3>	
연구제목	기후변화에 의한 먹이망 구조 변동성 연구
연구내용	<ul style="list-style-type: none"> - 중장기 해양생태계 먹이망 구조 변동 해석 - 기후변화에 의한 생물군집 변동과 먹이망 구조 변화 탐색
활용계획	<ul style="list-style-type: none"> - IPCC 대응 자료 제공 - 기후변화 대응 생태계 반응 연구결과 홍보 및 연구논문 작성 - 중장기 해양생태계 변동 모니터링을 위한 연구개발에 활용
예시	<p>기후변화 vs. food web: poleward shift of food web</p> <p>(출처: Blanchard, J. L. (2015). Climate change: A rewired food web. Nature, 527(7577), 173-174.)</p>

2. 해양생태계 및 수산자원 예측 기술 개발

- 해양생태계 내에서 이용 가능한 먹이종류 및 변동에 따른 상위 포식자 변동성 추정 (수산자원 예측 모델링에 적용)
- 중장기 수산자원 평가 및 예측을 위한 한국형 모델 개발

〈활용연구 4〉	
연구제목	한국형 수산자원 모델링 개발
연구내용	<ul style="list-style-type: none"> - 수산자원 모델링 파라미터 획득 - 포식-피식관계 적용 - 하위영양단계(LTL), 상위영양단계(HTL) 모델링 접합 - 해양환경 변동에 따른 모델링 변동성 구현
활용계획	<ul style="list-style-type: none"> - 수산자원 변동성 예측력 강화 - 수산자원 관리 정책 수립에 활용
예시	<p>Combined food web model: HTL vs. LTL models, Pelagic vs. Benthic-sourced food web</p>  <p>Ecopath with Ecosim</p>  <p>Food web models (EwE, Atlantis)</p>  <p>Ragunani 2007. Models for an Ecosystem Approach to Fisheries. FAO. Graph design by Daniel Pauly. Artist Rachel Atanovic.</p>

3. 해양생태계에 미치는 인간의 영향 연구

- 해양생태계 구조는 어업, 해양오염 등 인간의 직접적인 활동에 영향을 받음
- 인간의 영향을 평가하고 생태계기반 수산자원 관리 정책을 위한 연구가 요구됨

〈활용연구 5〉	
연구제목	지속적인 어업이 생태계 구조 및 생물자원 변동에 미치는 영향 연구
연구내용	- 어업에 의한 상위포식자 감소 및 전반적인 생태계 구조 변동성 조사 - 먹이망 구조 기반 지속적인 어업이 잠재적 수산자원 감소에 미치는 영향 조사
활용계획	- 지속 가능한 어업활동을 위한 어획 가이드라인 제시 - 어업에 의한 연쇄적인 생물다양성 감소에 대처 - 장기적 국가 수산자원 관리 정책에 활용
예시	<p>Trophic Cascade (top-down)</p> <p>The diagram illustrates the Kelp Forest Food Webs in two states:</p> <ul style="list-style-type: none"> A. With sea otters, kelp forest food web: This diagram shows a complex network of interactions. At the top, sea otters (circled in red) prey on sea urchins (indicated by a red arrow and a red 'no' symbol). Sea urchins prey on kelp and other algae. Kelp and other algae are consumed by smaller herbivorous fishes and invertebrates. These are eaten by smaller predatory fishes and invertebrates, which are in turn eaten by larger fishes and octopuses. Sea stars also prey on sea urchins. The base of the food web consists of microscopic planktonic algae, which are eaten by planktonic invertebrates, which are eaten by sessile invertebrates. B. Without sea otters, urohin barren food web: This diagram shows a degraded state. The sea otters are absent (indicated by a red 'no' symbol). Without their control, sea urchins proliferate and consume kelp and other algae, leading to a 'barren' food web. The interactions between other organisms remain similar to scenario A, but the overall structure is dominated by the unchecked population of sea urchins. <p>Source: Brumbaugh © AMNH-CBC http://research.amnh.org/biodiversity/crisis/index.html</p>

<활용연구 6>	
연구제목	미세 및 거대 플라스틱의 해양생태계 먹이망 내 거동 및 생태계 위해성 연구
연구내용	<ul style="list-style-type: none"> - 해양생태계 먹이망 단계별 생물종의 미세플라스틱 체내 축적 조사 - 주요 수산자원 생물의 해양쓰레기 섭식 및 위해성 조사 - 해양 쓰레기에 의한 해양 보호종의 위협 및 보호 방안 연구
활용계획	<ul style="list-style-type: none"> - 상위포식자(수산자원 생물)의 해양 미세플라스틱 위해성 평가 - 해양 쓰레기의 생태계 위해성 평가 - 인류 식량자원의 지속적인 유지 및 확보를 위한 해양환경 관리 정책에 활용
예시	<p>Influences of macro- and micro-plastic wastes on marine food web</p> <p>(https://steemkr.com/nature/@jyeshua/study-reveals-worlds-tap-water-is-contaminated-with-plastics) (https://medium.com/@shaquillerawlins/did-you-know-about-the-largest-natural-accumulation-of-plastic-in-the-world-be3e9c139a5)</p>

제 6 장 참고문헌

- Alleway, H. K., Connell, S. D., Ward, T. M., & Gillanders, B. M. (2014). Historical changes in mean trophic level of southern Australian fisheries. *Marine and Freshwater Research*, 65(10), 884-893.
- Boyle, K. S., & Horn, M. H. (2006). Comparison of feeding guild structure and ecomorphology of intertidal fish assemblages from central California and central Chile. *Marine Ecology Progress Series*, 319, 65-84.
- Buchheister, A., & Latour, R. J. (2010). Turnover and fractionation of carbon and nitrogen stable isotopes in tissues of a migratory coastal predator, summer flounder (*Paralichthys dentatus*). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 67(3), 445-461.
- Bulman, C. M., Althaus, F., He, X., Bax, N. J., & Williams, A. (2001). Diets and trophic guilds of demersal fishes of the south-eastern Australian shelf. *Marine and Freshwater Research*, 52(4), 537-548.
- Cortes, E. (1997). A critical review of methods of studying fish feeding based on analysis of stomach contents: application to elasmobranch fishes. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 54, 726-738.
- Davenport, S. R., & Bax, N. J. (2002). A trophic study of a marine ecosystem off southeastern Australia using stable isotopes of carbon and nitrogen. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 59(3), 514-530.
- Egan, J. P., Chew, U. S., Kuo, C. H., Villarroel-Diaz, V., Hundt, P. J., Iwinski, N. G., Iwinski, M. P., & Simons, A. M. (2017). Diets and trophic guilds of small fishes from coastal marine habitats in western Taiwan. *Journal of Fish Biology*, 91(1), 331-345.
- Froese, R., & Pauly, D. Editors. (2019). FishBase. World Wide Web electronic publication. www.fishbase.org, version (08/2019).
- Fry, B. (2007). *Stable Isotope Ecology*. Springer Science & Business Media, pp. 308.
- Hobson, K. A., & Welch, H. E. (1992). Determination of trophic relationships within a

- high Arctic marine food web using $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ analysis. *Marine Ecology Progress Series*, 9-18.
- Hobson, K. A., Fisk, A., Karnovsky, N., Holst, M., Gagnon, J. M., & Fortier, M. (2002). A stable isotope ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$) model for the North Water food web: implications for evaluating trophodynamics and the flow of energy and contaminants. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 49(22-23), 5131-5150.
- Hyslop, E. J. (1980). Stomach contents analysis: a review of methods and their application. *Journal of fish biology*, 17(4), 411-429.
- Inoue, T., Suda, Y., & Sano, M. (2005). Food habits of fishes in the surf zone of a sandy beach at Sanrimatsubara, Fukuoka Prefecture, Japan. *Ichthyological Research*, 52(1), 9-14.
- Jung, H. K., Rahman, S. M., Kang, C. K., Park, S. Y., Lee, S. H., Park, H. J., Kim H-W., & Lee, C. I. (2017). The influence of climate regime shifts on the marine environment and ecosystems in the East Asian Marginal Seas and their mechanisms. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 143, 110-120.
- Kim, S., Zhang, C. I., Kim, J. Y., Oh, J. H., Kang, S., & Lee, J. B. (2007). Climate variability and its effects on major fisheries in Korea. *Ocean Science Journal*, 42(3), 179-192.
- Layman, C. A., Winemiller, K. O., & Arrington, D. A. (2005). Describing the structure and function of a Neotropical river food web using stable isotopes, stomach contents, and functional experiments. In: *Dynamic Food Webs: Multispecies Assemblages, Ecosystem Development and Environmental Change* (Eds P.C. de Ruiter, V. Wolters & J.C. Moore), pp. 395-406. Elsevier, Amsterdam.
- Park, J. M., Huh, S. H., Choi, H. C., & Kwak, S. N. (2017a). Larval distribution of the common dolphinfish *Coryphaena hippurus* Linnaeus, 1758 (Coryphaenidae) in the East Sea/Sea of Japan. *Journal of Applied Ichthyology*, 33, 815-818.
- Park, J. M., Kwak, S. N., Huh, S. H., & Han, I. S. (2017b). Diets and niche overlap among nine co-occurring demersal fishes in the southern continental shelf of East/Japan Sea, Korea. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in*

- Oceanography, 143, 100-109.
- Park, J. M., Gaston, T. F., & Williamson, J. E. (2017). Resource partitioning in gurnard species using trophic analyses: The importance of temporal resolution. *Fisheries Research*, 186, 301-310.
- Park, J. M., Kwak, S. N., & Han, I. S. (2018). Feeding relationships among six seagrass-associated fishes in the northeastern Gwangyang Bay, southern Korea. *Ocean Science Journal*, 53(1), 63-72
- Park, T. H., Lee, C. I., Kang, C. K., Kwak, J. H., Lee, S. H., & Park, H. J. (2019). Seasonal variation in food web structure and fish community composition in the East/Japan Sea. *Estuaries and Coasts*, 1-15.
- Pauly, D., Christensen, V., Dalsgaard, J., Froese, R., & Torres, Jr F. (1998). Fishing down marine food webs. *Science*, 279, 860-863.
- Post, D. M. (2002). Using stable isotopes to estimate trophic position: models, methods, and assumptions. *Ecology*, 83, 703-718.
- Rahman, S. M., & Lee, C. I. (2012). Long term changes pattern in marine ecosystem in Korean waters. *Journal of the Korean Society of Marine Environment and safety*, 30: 193-198.
- Ward, P., & Myers, R. A. (2005). Shifts in open-ocean fish communities coinciding with the commencement of commercial fishing. *Ecology*, 86, 835-847.
- Wootton, R. J. (1990). *Ecology of Teleost Fishes*. Chapman Hall, New York, USA, pp. 404.