

Article

지방 바이오마커를 활용한 북서태평양에서 요각류(*Euchaeta* sp. and *Pleuromamma* spp.)의 서식 위도별 영양상태 및 먹이원 연구

주세종^{1,2*} · 고아라¹ · 이창래³

¹한국해양연구원 심해해저자원연구부
(426-744) 경기도 안산시 해안로 787

²과학기술연합대학원대학교 해양생물학
(305-350) 대전광역시 유성구 가정로 217

³국립공원관리공단 국립공원연구원
(590-811) 전라북도 남원시 주천면 호경리 16-1

Latitudinal Variation of Nutritional Condition and Diet for Copepod Species, *Euchaeta* sp. and *Pleuromamma* spp., from the Northwest Pacific Ocean Using Lipid Biomarkers

Se-Jong Ju^{1,2*}, Ah-Ra Ko¹, and Chang-Rae Lee³

¹Deep-sea and Marine Georesources Research Department, KORDI
Ansan P.O Box 29, Seoul 425-600, Korea

²Marine Biology, University of Sciences & Technology
Daejeon 305-350, Korea

³National Park Research Institute, Korea National Park Service
Namwon 590-811, Korea

Abstract : In order to ascertain latitudinal variation of lipid contents and compositions in copepods, we collected warm water copepod species (*Euchaeta* sp. and *Pleuromamma* spp.) from four different regions from low (sub-tropical) to mid (temperate) latitudes in the Northwest Pacific Ocean. Total lipid contents of *Pleuromamma* spp. were about 11 ug·ind⁻¹ with little latitudinal variation, whereas *Euchaeta* sp. showed slightly higher lipid content (20 ug·ind⁻¹) than *Pleuromamma* spp. with latitudinal gradient (low at subtropic and high at temperate). Wax esters, known as the major storage lipid classes, were found to be the dominant lipid classes (accounting for more than 35% of total lipids) in *Euchaeta* sp., whereas in *Pleuromamma* spp., phospholipids, known as cellular membrane components, were the dominant lipid classes. However, the exception was specimens from warm pool region exhibiting dominance in storage of lipids as a form of triacylglycerols. Among fatty acids, polyunsaturated fatty acids (PUFA), especially docosahexaenoic acid (DHA : 22:6(n-3)) (about 35% of total fatty acids), were most abundant in *Euchaeta* sp., while saturated fatty acids (SAFA), specially hexadecanoic acid (16:0) (about 30% of total fatty acids), were most abundant in *Pleuromamma* spp.. Among the neutral fraction of lipids, phytol, originated from the side chain of chlorophyll, was found in all samples which generally indicate active copepods feeding on algae. While only trace amounts of short-chain fatty alcohols were found in *Pleuromamma* spp., significant amounts of fatty alcohols were found in *Euchaeta* sp.. Particularly, significant amounts of long chain monounsaturated fatty alcohols (20:1 and 22:1), generally found in cold water species, were found in *Euchaeta* sp. from low

*Corresponding author. E-mail : sjju@kordi.re.kr

latitudes. The latitudinal variation of trophic lipid markers in these copepods could be significantly related with *in-situ* food availability and species-specific diet preference. The result of this study suggests that the lipid contents and compositions in copepods may not only indicate their nutritional condition and feeding ecology but also provide insight into species-specific living strategies under different environmental conditions (i.e. water temperature, food availability).

Key words : latitudinal variation, feeding type, diet, nutritional condition, lipid biomarkers, copepods, Northwest Pacific

1. 서 론

해양생태계에서 동물플랑크톤은 기초 생산자 또는 미세 먹이망으로부터 에너지를 섭취/축적하여 효율적으로 상위 포식자에게 전달하는 중간자 역할(Benson and Lee 1975; Bougis 1976)을 할 뿐만 아니라, 표층에서 식물플랑크톤에 의해 고정된 탄소를 효율적으로 심해 생태계로 전달하거나 심해 퇴적물로 제거하는 등, 탄소순환에 있어서도 중요한 역할을 하고 있다(Fowler and Knauer 1986). 특히 해양 동물플랑크톤 중 요각류는 영양가치(에너지)가 높은 지방을 가장 많이 저장하고 있는 생물체 중 하나로서 지방을 이용하여 에너지를 축적 및 저장하며, 그 함량 및 구성이 이들의 생활사와 서식환경에 따라 큰 차이를 보이는 것으로 밝혀졌다(Lee et al. 1970; Ikeda 1974). 전 세계 해양에서 요각류의 지방함량과 성분은 지역과 종별로 다양한 특징을 보이고 있으며, 위도에 따라 크게 구분된 해양생물권(극지, 온대, 열대) 사이에는 뚜렷한 차이를 보이고 있다. 예를 들면, 열대해역에 서식하는 부유 동물플랑크톤은 높은 수온으로 대사활동이 높은 반면 낮은 기초 생산율로 잡식성과 육식성이 우점하며, 그 크기가 작고, 지방 함유량도 매우 낮은 편이다. 반면에 극지에 서식하는 동물플랑크톤은 극지의 환경특성 상 먹이원(식물플랑크톤)이 계절적으로 짧은 기간에만 국한되어 공급되기 때문에 나머지 기간 동안의 생존을 위해 많은 지방을 축적하고 있으며, 초식성이 우점하고, 대체로 크기가 큰 편이다(Kattner and Hagen 2010).

지방을 구성하는 주요 지방 class로는 트리아실글리세롤(triacylglycerols), 왁스 에스테르(wax esters), 인지질(phospholipids)과 다이아실글리세롤 에테르(diacylglycerol ether) 등이 있다. 이 중 트리아실글리세롤은 동물에 저장되는 지방의 가장 일반적인 형태로서, 거의 모든 동물플랑크톤에서 발견되며, 글리세롤(glycerol)에 3개의 지방산이 붙어있는 구조를 가지고 있다. 그러나 고위도 해역에 서식하는 대부분의 초식 동물플랑크톤은 왁스 에스테르의 형태로 지방을 저장한다(Lee et al. 2006). 인지질은 세포막을 구성하는 주요성분으로 비대칭 지방산을 가지고 있으며, 이러한 비대칭구조는 세포막의 구조와 기능에 중요한

역할을 한다. 하지만 특이하게도 고위도에 서식하는 크릴(krill)은 인지질 형태 중의 하나인 phosphatidylcholine을 저장지방처럼 축적하는 것으로도 알려져 있다(Hagen et al. 1996; Mayzaud et al. 2003). 다이아실글리세롤 에테르는 극지 및 온대해역에 서식하는 동물플랑크톤에서 가끔 발견되는 지방의 형태로서 익족류(pteropod)의 주요 저장지방으로 보고되고 있다(Kattner et al. 1998). 이와 같이 지방은 에너지 저장원으로서 동물플랑크톤의 성장, 번식 등 생존과 밀접한 관계를 가지고 있기 때문에, 지방의 함량 및 구성 변화를 비교, 분석하여 동물플랑크톤의 생존전략(빈영양, 먹이 생태) 및 생활사(산란, 성숙)를 이해하는데 많이 활용되어 왔다(Lee et al. 2006; Ju et al. 2009; Kattner and Hagen 2010). 뿐만 아니라, 지방을 구성하는 지방산이나 스테롤들 중에서 특정 지방성분들(긴 사슬 불포화 지방산 등)은 먹이를 통해서만 획득될 수 있기 때문에 생태계 내에서의 먹이 관계를 이해하는 추적자로도 많이 활용되고 있다(Sargent and Henderson 1986; Cripps and Atkinson 2000; El-Sabaawi et al. 2009; Swalethorp et al. 2011). 최근 한반도 주변 해역에서 빈번한 열대유해 생물(적조, 녹조, 해파리 등)의 대번식 및 거품돌산호를 비롯한 아열대성 해양생물의 정착 등 생태계 구조 변화가 일어나고 있다. 하지만, 아직도 한반도 주변해에 직접적인 영향을 주고 있는 쿠로시오 난류역의 생태계에 대한 정보는 매우 부족한 상황이다. 따라서, 향후 한반도 주변 해역의 생태계 변동을 정확히 예측하기 위해 직접적인 영향을 주고 있는 북서태평양의 생태계 구조 특성을 파악하는 것이 우선되어야 한다. 그러므로 본 연구에서는 북서태평양의 쿠로시오 해류계에서 출현하는 대표적 요각류(*Euchaeta* sp.와 *Pleuromamma* spp.)의 지방 함량 및 구성을 종간, 그리고 동일종 내에서 서식 위도별로 비교 분석하여, 이들의 생존전략과 생활사를 이해하고, 해양생태계에서 에너지 전달자로서의 역할을 파악하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

탐사해역 개요

본 연구의 대상해역은 북서태평양 저위도 해역에서부터

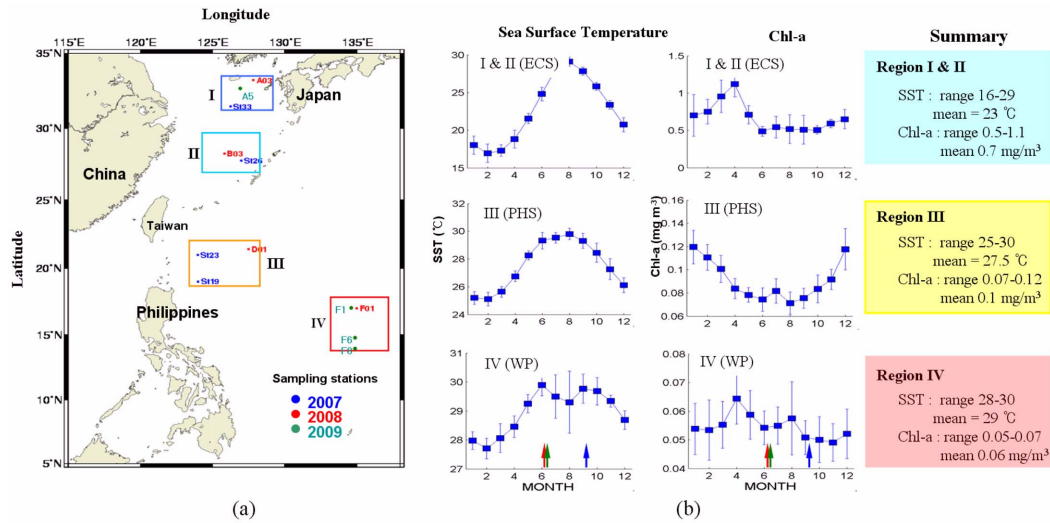


Fig. 1. (a) Map showing the sampling stations with the four regions having different environmental conditions. Blue dots indicate *Pleuromamma* spp.'s sampling stations in October, 2007; Red dots indicate *Euchaeta* sp.'s sampling stations in June, 2008; Green dots indicate *Pleuromamma* spp.'s sampling stations in June, 2009, (b) Annual variation of mean sea surface temperature (°C) and chlorophyll-a (mg/m³) of each sampling region obtained from 10 years' (1997-2008) satellite data (provided by Park) showing in the map. Red, blue, and green arrow indicate the sampling time of 2007, 2008, and 2009, respectively

중위도 해역에 이르는 광범위한 해역으로 위도와 해수 물리, 화학, 생물학적 특성에 따라 연구해역을 크게 4개 해역으로 구분할 수 있다(Fig. 1). 우선 연구해역의 가장 저위도에 위치한 쿠로시오 해류의 근원지인 뽀플해역 (Region IV)은 연 평균 표층수온이 29°C로 연구해역에서 가장 높으며, 엽록소-a 현존량도 연 평균 0.06 mg/m³로 매우 낮다. 또한 수직적으로 매우 안정적인 해역으로 수온이나 엽록소의 계절적 변화가 매우 작으며 연중 생산력은 매우 낮은 것으로 알려져 있다(Mackey et al. 1997). 그 다음은 쿠로시오 해류의 분류가 형성되어 대륙사면을 따라 북쪽으로 흘러가는 필리핀 동부해역 (Region III)으로서 연 평균 표층수온은 27.5°C로서 뽀플해역보다는 약간 낮지만 여전히 열대해역의 특성을 보이며, 엽록소의 현존량 또한 연 평균 0.1 mg/m³로 뽀플해역과 큰 차이를 보이지 않지만 미약하나마 수온 및 엽록소 현존량의 계절적 변화가 나타나는 해역이다. 그리고 연구해역에서 중위도에 위치한 강한 쿠로시오 분류가 흘러가는 오키나와 근해역 (Region II)과 쿠로시오 분류인 대마난류가 유입되는 제주 남부해역 (Region I)은 중위도 연근해역에서 일반적으로 나타나는 수온범위(연 평균 23°C)와 비교적 높은 엽록소 현존량(연 평균 0.7 mg/m³)을 보이며 뚜렷한 계절변동 양상을 보이고 있다. 두 해역간의 차이는 제주 남부해역은 육지와 가장 가까이 위치해 있어서 오키나와 근해역보다 육상의 영향을 더 받을 것으로 여겨지며, 특히 제주 남부해역은 계절적으로 특히 하계에 중국 양쯔강의 영향을 많

이 받는 해역으로도 잘 알려져 있다(최 등 2010).

시료채집과 준비

본 연구에서 사용된 대상 요각류인 *Pleuromamma* spp. 와 *Euchaeta* sp.는 북태평양 아열대 해역에 광범위하게 분포하며 대부분 표층에서 수심 100-200 m 이내의 혼합층에 서식하며 *Pleuromamma* spp.의 경우는 뚜렷한 주야 수직이동을 하는 것으로 알려져 있다(Hayward 1980; Ambler and Miller 1987). 특히 *Euchaeta* sp.는 북태평양에 서식하는 요각류 중 크기가 큰 분류군 중 하나이다 (Hayward 1980). 동물플랑크톤 채집은 2007년 10월, 2008년 6월, 2009년 6월에 한국해양연구원 온누리호를 이용하여 북서태평양의 열대해역(저위도~15°N)으로부터 온대해역(중위도~32°N)에 이르는 해역에서 봉고네트(망목 200 μm, 망구 60 cm)를 이용하였다. 이들은 수심이 깊은 대양해역에서는 수심 약 300-400 m(Wire out: 500 m)까지, 일부 오키나와 근해역과 제주해역처럼 수심이 100 m 내외로 얕은 정점에서는 표층에서 바닥 약 5 m까지의 상층부를 대상으로 경사 채집되었다(Fig. 1). 각 정점에서의 시료채집은 주야 상관없이 정점 도착시간에 따라 이루어졌다. 물론 요각류의 주야수직이동 특성에 따라 요각류의 주야간의 섭식활동에는 큰 차이가 있지만, 본 연구에서 살피고자 하는 먹이추적 지방마커는 단기간(1-2일)의 섭식활동보다는 좀 더 장기적인(1주일-1달) 섭식활동에 의해 축적된 먹이원을 지시하기에 요각류의 채집시간에 대

해서는 시료 채집시 고려되지 않았다. 채집한 시료는 지방의 손실을 막기 위해서 초저온 냉동고(-70°C)에 분석 전까지 보관하였다. 실험실로 운반된 시료는 분석 전 실온에서 해동시킨 후, 해부현미경(ZEISS Stemi 2000-C)을 사용하여 각 분류군 별(주로 *Pleuromamma abdominalis*와 *Euchaeta rimana*)로 40-100개체씩 분류하여 유리용기에 옮긴 후 유기용매로 지방을 추출하였다.

지방추출 및 분석

지방분석을 위한 모든 유리용기는 혼합 유기용매(Dichloromethane:Methanol(CH₂Cl₂:MeOH)=1:1)로 몇 번 헹구면 후, 준비된 시료를 용기에 넣고 Bligh and Dyer (1959) 방법으로 지방을 추출하였다. 추출된 지방은 혼합 유기용매(CH₂Cl₂:MeOH=2:1)에 다시 용해시킨 후, 지방 class와 지방 성분(지방산과 스테롤)분석에 사용되었다. 주요 지방 class는 Iatroscan Mark-V Thin-Layer Chromatography with Flame-Ionization Detector(TLC-FID; IATRON LABORATORIES, INC.)로 정량, 정성 분석되었다(Ju et al. 1997). 추출된 지방의 적당량(약 1-2 µl)을 chromarod (Mitsubishi Kagaku Iatron)에 떨어뜨린 후, 혼합 유기용매(CH₂Cl₂:MeOH=1:1)로 농축하여 비극성 유기용매(Hexane:Diethyl ether:Formic acid=85:15:0.2)로 지방 class를 분리, 분석하였다. 이렇게 분리된 지방 class는 상업용 standard(Phospholipid는 1, 2-Dipalmitoyl-rac-glycero-3-phosphocholine hydrate, Cholesterol은 cholesterol, Free Fatty Acid는 n-Nonadecanoic acid, Triacylglycerol은 Glyceryl trioleate; Sigma-Aldrich Co.)와 비교하여 정성, 정량화하였다. 총 지방 함량은 정량화된 지방 class의 합으로 산출되었다.

극성지방(지방산)과 중성지방(알코올, 스테롤) 성분 분석을 위해 앞서 추출된 지방의 일정량을 뽑아서 새로운 시험관에 옮겨 0.5 N KOH/MeOH를 넣고, 30분간 70°C로 가열한 후, 3회에 걸쳐 혼합 유기용매(Hexane:Diethyl ether=9:1)로 중성지방을 분리, 추출하였다. 이렇게 추출된 중성지방은 10% pyridine으로 만들어진 bis(trimethylsilyl) trifluoro-acetamide(BSTFA; Sigma-Aldrich Co.)를 첨가하여 가열한 후, 중성지방을 trimethylsilyl (TMS) 에스테르화하여 gas chromatography-flame ionization detector (GC-FID; Agilent 7890A)로 분리, 분석하였다. 지방산을 포함한 극성지방은 중성지방이 추출되고 남은 용액에 염산을 첨가하여 KOH를 침전시킨 후, 혼합 유기용매(Hexane:Diethyl ether=9:1)를 이용하여 추출되며, 추출된 지방산은 BF₃/MeOH로 에스테르화하여 지방산 메틸에스테르(fatty acid methyl ester)로 유도하여 GC-FID로 분리, 분석되었다. 각 지방성분을 정량적으로 환산하기 위해 internal standard(중성지방에는 Cholestane, 극성지방에는

n-Nonadecanoic acid; Sigma-Aldrich Co.)를 각각의 시료마다 첨가하여 함께 분석하였다. 극성지방(지방산)과 중성지방(알코올, 스테롤)의 분리, 분석에는 HP-5 column(길이 60 m, 직경 0.32 mm, 내부 코팅된 필름 두께 0.25 µm; Agilent Tech.)을 사용하였으며, 적용된 온도조건으로는 시료주입구는 250°C, column 온도는 50-120°C까지 10°C/분으로, 120-300°C까지는 4°C/분으로 설정하였다. 이동상 가스는 헬륨(30 ml/분)을 사용하였으며, 각 지방성분의 peak는 internal standard와 비교하여 정량화되었다. 각 지방성분의 정성분석은 gas chromatography-mass spectrometry detector(GC-MSD; Agilent 6870 GC-Agilent 5973 MSD)로 70 eV에서 원자 질량 50-700 amu 범위 내에서 분석되었으며, 그 외 조건들(column, 온도, 이동상 가스)은 정량 분석 시와 동일하게 설정하였다. 추가적으로 지방산 중 불포화 지방산의 double bond 위치는 dimethyl disulphide(Nichols et al. 1986)를 첨가하거나 fatty acid picolinyl ester(Destaillats and Angers 2002)로 전환하여 GC-MS로 확인되었다.

3. 결과 및 토의

총 체지방 함량 및 지방 class 구성

Euchaeta sp.와 *Pleuromamma* spp.의 체지방 함량은 각각 개체당 14.2-30.0 µg(평균 19.8 µg)와 7.5-15.6 µg(평균 10.8 µg)로 *Euchaeta* sp.가 *Pleuromamma* spp.보다 개체당 다소 많은 량의 지방을 함유하고 있는 것으로 나타났다. 위도별 채집 해역에 따라 비교해 보면, *Euchaeta* sp.는 Region I(제주도 근해)에서 30.0 µg/개체, Region II(오키나와 근해)에서는 20.2 µg/개체, Region III(필리핀 동부해역)에서는 16.0 µg/개체, Region IV(웜풀해역)에서는 14.2 µg/개체로서 고위도 해역에서 저위도 해역으로 갈수록 개체당 지방 함량이 감소하는 위도 구배를 보인 반면, *Pleuromamma* spp.는 Region I(제주도 근해)에서 8.4 µg/개체, Region II(오키나와 근해)에서 7.5 µg/개체, Region III(필리핀 동부해역)에서는 11.4 µg/개체, Region IV(웜풀해역)에서는 15.6 µg/개체로 *Euchaeta* sp.와는 반대로 고위도로부터 저위도로 갈수록 지방 함량이 증가하는 경향으로 나타났다(Fig. 2). 동물플랑크톤의 지방함량은 대체로 저위도에서 고위도로 갈수록 증가하는 경향을 보이는 것으로 나타나고 있다. 이는 계절적인 환경변화가 큰 고위도 해역에서는 계절에 따른 먹이공급과 환경변화에 대한 동물플랑크톤의 생존전략과 밀접한 관계가 있다(Kattner and Hagen 2010). 하지만, *Pleuromamma* spp.의 경우는 일반적으로 알려진 경향과는 달리 저위도 해역에서 더 높게 나타났다. 이는 중위도에 비해 저위도에서 유사한 생태적 위치를 차지하는 경쟁종과의 경쟁에서 *Pleuromamma*

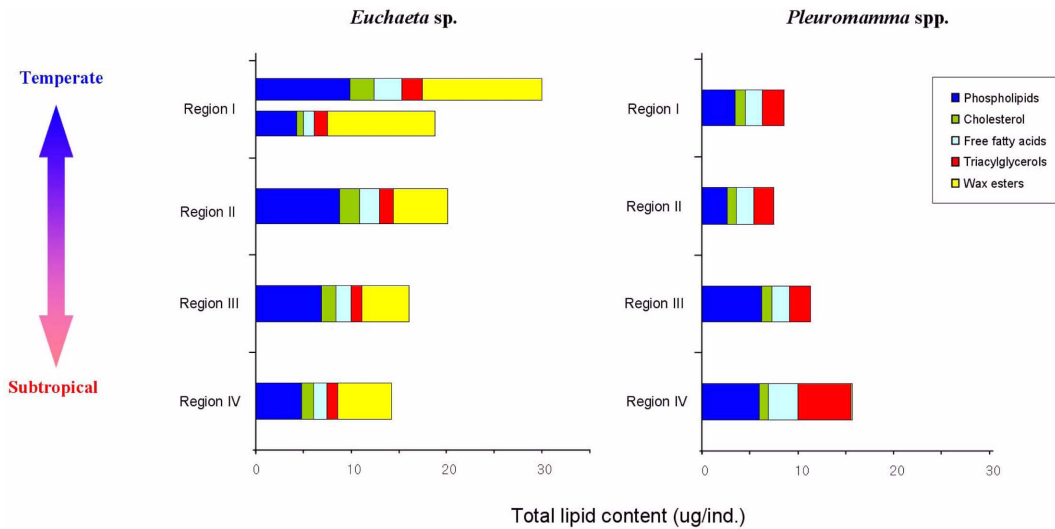


Fig. 2. Latitudinal variation of total lipid contents (µg/ind.) with lipid class compositions in warm water copepod species (*Euchaeta sp.* and *Pleuromamma spp.*). Sampling regions (Region I, II, III, and IV) are indicated in Fig. 1a

spp.가 더 효과적으로 에너지를 획득 저장하고 있거나 위도에 따라 이들의 우점 성숙단계 또는 생존전략의 차이에 의해 나타나는 차이로도 유추해 볼 수 있다. 하지만 현미경을 이용한 형태적 분류시에 인지한 것처럼 필리핀 동부해역과 워플해역에서는 다양한 *Pleuromamma spp.*들이 혼재되어 나타나 이러한 결과가 단일종을 대표하기 보다는 다양한 특성을 가진 여러 *Pleuromamma spp.*들의 지방 축적이나 성숙단계, 성비 등의 차이가 반영되어 나타난 결과일 가능성도 배제할 수 없다. Thin Layer Chromatography-Flame Ionization Detector(TLC-FID; Iatroscan MK-5)를 이용하여 분리 분석한 지방 class 성분 분석 결과, 두 분류군 모두 인지질과 저장 지방(트리아실글리세롤과 왁스)이 우점하였다. 지방함량과는 달리 지방 class 성분 구성은 위도에 따라 뚜렷한 변동 양상이 나타나진 않았으며, *Euchaeta sp.*와 *Pleuromamma spp.*은 각각 왁스 에스테르(wax esters)와 트리아실글리세롤(triacylglycerols)을 에너지 저장원으로 체내에 축적하고 있었다. 특히 왁스 에스테르는 주로 고위도 해역에 서식하는 요각류의 주요저장지방으로 알려져 있음(Lee et al. 2006)에도 불구하고 난수성인 본 연구 대상 중, *Euchaeta sp.*에서도 저장지방으로 활용되는 것은 매우 특이한 경우이다. 상대적으로 높은 *Euchaeta sp.*의 지방함량과 구성(주로 왁스 에스테르)의 특이성은 성체 수컷의 형태, 생리적 특성과 연관될 수 있다. Yen (1988)의 연구에 따르면 *Euchaeta rimana* 수컷은 마지막 성체 단계의 molt를 통해 섭식을 위한 입 모양이 미발달 상태로 남게 되며 긴 시간 먹이를 섭취하지 않고 성공적인 생식을 위한 생존전략으로 수컷 성체는 많은 양의 지방을 저장하고 있을 것이라

주장하였다. 특히 본 연구에서 긴 시간의 에너지원으로 적합한 왁스에스테르 형태의 지방이 많은 양으로 출현한 것은 이러한 주장을 뒷받침해 주고 있다(Lee et al. 2006). 하지만 본 연구에서는 대상종을 성별로 분리하여 분석을 수행하지 않았으므로 이러한 주장을 확실하게 확인하기 위해서는 추후 성별로 분류하여 분석하는 것이 필요하다.

위도별 주요 지방산 및 스테롤 구성 비교

두 난수성 요각류는 탄소 원자수가 14-24개의 다양한 지방산을 함유하고 있었다. 총지방산 함량은 *Euchaeta sp.*와 *Pleuromamma spp.*이 각각 개체당 7.0-16.9 µg(평균 10.7 µg)와 2.0-12.0 µg(평균 6.1 µg)로 총체지방함량결과와 유사하게 *Euchaeta sp.*가 *Pleuromamma spp.*보다 개체당 다소 많은 양의 지방산을 함유하고 있는 것으로 나타났다. 그리고 위도별 총지방산 함량도 *Euchaeta sp.*는 고위도 해역에서 저위도 해역으로 갈수록 감소하는 구배를 보인 반면, *Pleuromamma spp.*는 고위도로부터 저위도로 갈수록 증가하는 경향을 보여, 총 체지방 함량의 위도별 변동 경향과 동일하게 나타났다. *Euchaeta sp.*에는 포화지방산인 C16:0, 단일 불포화 지방산인 C18:1ω7, 그리고 긴 사슬 불포화 지방산인 C20:5ω3(EPA: eicosapentaenoic acid)와 C22:6ω3(DHA: docosahexaenoic acid)가 우점(총 지방산의 10% 이상)하여 출현하였으며, *Pleuromamma spp.*에는 포화지방산인 C16:0와 C18:0, 그리고 긴 사슬 불포화 지방산인 C22:6ω3가 우점(총 지방산의 10% 이상)하여 출현하였다(Fig. 3). 두 요각류의 지방산 구성 분포는 위도에 따라 약간의 차이를 보이고 있다. 특히 지방산의 기원에 따라 먹이추적자로 알려진 규조류 기원 지방산인

C16:1 ω 7와 EPA, 와편모조류 기원인 DHA, 그리고 미생물 기원인 branched & odd chain 지방산들의 함량이 상대적으로 중요한 차이를 보이고 있다(Dalsgaard et al. 2003 and reference therein). 예를 들면, 아열대 해역(Region III, Region IV)의 *Pleuromamma* spp.에서는 와편모조류 기원의 DHA의 함량이 타 해역에 비해 상대적으로 높게 나타난 반면, 온대해역의 시료에서는 구조류 기원의 C16:1 ω 7

는 아열대 해역에 비해 상대적으로 높았다. 하지만 *Euchaeta* sp.에서는 이러한 먹이 추적 지방산의 해역별 차이가 뚜렷하지는 않았다. 또한, *Euchaeta* sp.에서는 왁스에스테르 주요 구성 성분인 지방 알코올(fatty alcohol)이 상당량(평균 2.7 μ g/개체) 검출되었다. 검출된 지방 알코올 중 C16:0 알코올(알코올 총량의 70% 이상)이 가장 우점하였다. 흥미롭게도 일반적으로 냉수성 요각류에 의해서

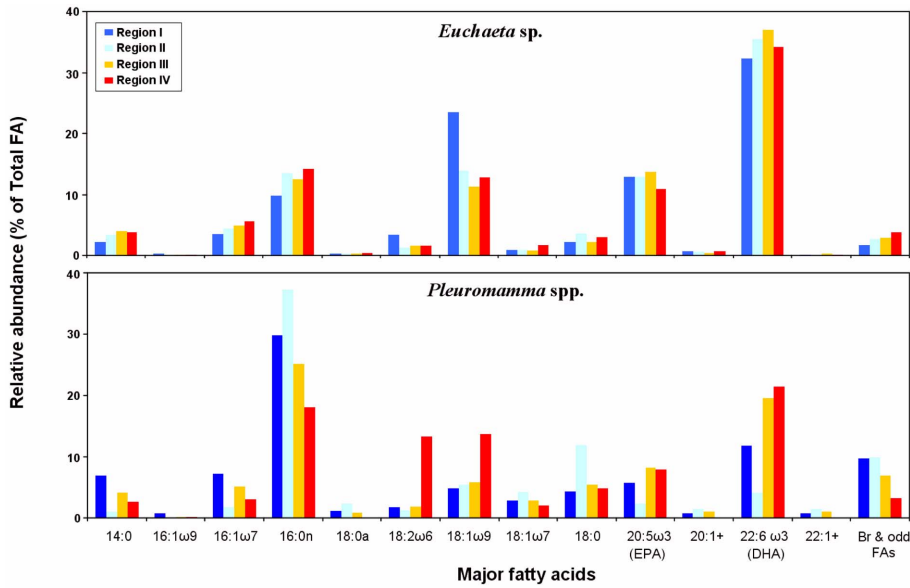


Fig. 3. The relative abundance (%) of major fatty acids in *Euchaeta* sp. and *Pleuromamma* spp. from the sub-tropical to temperate regions in the Northwest Pacific Ocean. Sampling regions (Region I, II, III, and IV) are indicated in Fig. 1a

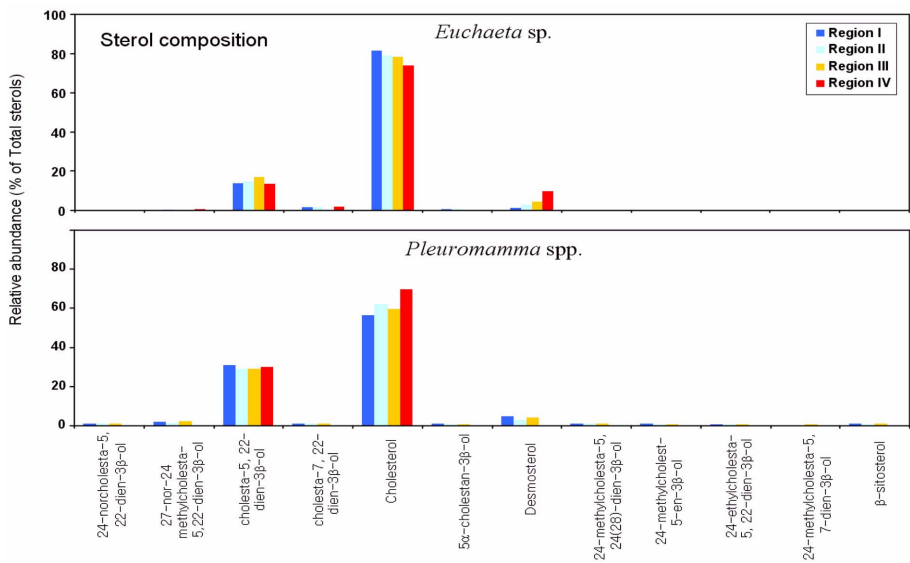


Fig. 4. The relative abundance (%) of free and esterified sterols in the calanoid copepods, *Euchaeta* sp. and *Pleuromamma* spp. from the Northwest Pacific Ocean. Sampling regions (Region I, II, III, and IV) are indicated in Fig. 1a

만 합성되는 것으로 알려져 있는 긴사슬 불포화 알코올인 20:1와 22:1도 *Euchaeta* sp.에서만 검출되었다(Albers et al. 1996). *Pleuromamma* spp.에서는 극미량의 알코올(개체당 0.02 µg 이하)만이 발견되었다. 하지만, 특이하게도 엽록소-*a*에서 유래하는 알코올 성분인 phytol(3, 7, 11, 15-tetramethylhexadec-2-en-ol)이 *Pleuromamma* spp.에서만 검출되어, *Pleuromamma* spp.은 초식성임을 추정할 수 있다(Ju and Harvey 2004). 그 외 지방 구성 성분 중 스테롤은 두 분류군 모두 낮은 량(평균 1.0 µg/개체 이하)이 검출되었으며, 약 10여종의 다양한 스테롤이 감지되었다. 그 중 콜레스테롤(cholesterol)이 두 종 모두에서 가장 우점(총 스테롤 량의 60% 이상)하였다(Fig. 4). 해양 미세조류의 식물성 스테롤이 요각류에 흡수되어 변형된 주요 형태인 desmosterol(cholesta-5, 24-dien-3β-ol)은 총 스테롤의 약 10%로 미만으로 두 분류군 모두에서 검출되었다(Goad 1978). 특히 *Euchaeta* sp.에 비해 *Pleuromamma* spp.에서 더 많은 종류의 식물 기원 스테롤인 24-norcholesta-5, 22-dien-3β-ol, 24-methylcholesta-5, 24 (28)-dien-3β-ol, cholesta-5, 22-dien-3β-ol 그리고 24-ethylcholesta-5, 22-dien-3β-ol 등이 검출되어서 *Pleuromamma* sp.는 초식성 요각류임을 재확인할 수 있었다(Volkman et al. 1998; Rampen et al. 2010). 두 분류군 모두 지방 알코올이나 스테롤 함량 및 성분의 뚜렷한 위도구배 양상을 볼 수는 없었다.

요각류의 섭식형태 및 먹이 선호도 추적

동물플랑크톤의 섭식형태(또는 먹이 습성)추적을 위해 자주 활용되는 C18:1ω7/C18:1ω9 비율(육식≤0.1≤초식(또는 잡식))을 이용하여(Graeve et al. 1994; Falk-Petersen et al. 1990, 2000; Auel et al. 2002) 두 요각류의 섭식형태를 살펴본 결과, *Euchaeta* sp.와 *Pleuromamma* spp.의 C18:1ω7/C18:1ω9 비율은 각각 0.08과 0.50으로 나타나 *Euchaeta* sp.은 육식성, *Pleuromamma* spp.는 초식성임을 추정할 수 있다(Fig. 5a). 특히 *Pleuromamma* spp.의 경우 해역별로 이 비율이 큰 차이를 보이는 것으로 볼 때 이 종은 서식지의 먹이환경에 따라 초식과 잡식의 섭식형태를 보이는 것으로 여겨진다. 하지만 요각류 체내의 C18:1ω7/C18:1ω9 비율은 서식지의 먹이를 포함한 다른 환경 변화에 따라 변할 수도 있기 때문에 명확하게 섭식형태를 구별하기 위한 척도로 활용하기에는 아직 주의가 요구된다(Ederington et al. 1995; El-Sabaawi et al. 2009). 또 다른 먹이 추적자인 EPA(규조류 기원)/DHA(와편모조류 기원)비율을 이용하여(Graeve et al. 1994; Auel et al. 2002) 초식성인 *Pleuromamma* spp.의 식물플랑크톤 먹이 선호도(또는 먹이 선택성)를 채집 해역에 따라 추정/비교한 결과에 따르면, 뽕골 해역(Region IV)에서 0.15, 필리핀 동부 해역(Region III)에서 0.47, 오키나와 근해(Region II)에서 0.78 그리고 제주도 남해(Region I)에서 0.60의 비율을 보여 저위도에서 중위도로 갈수록 그 비율이 증가하였다

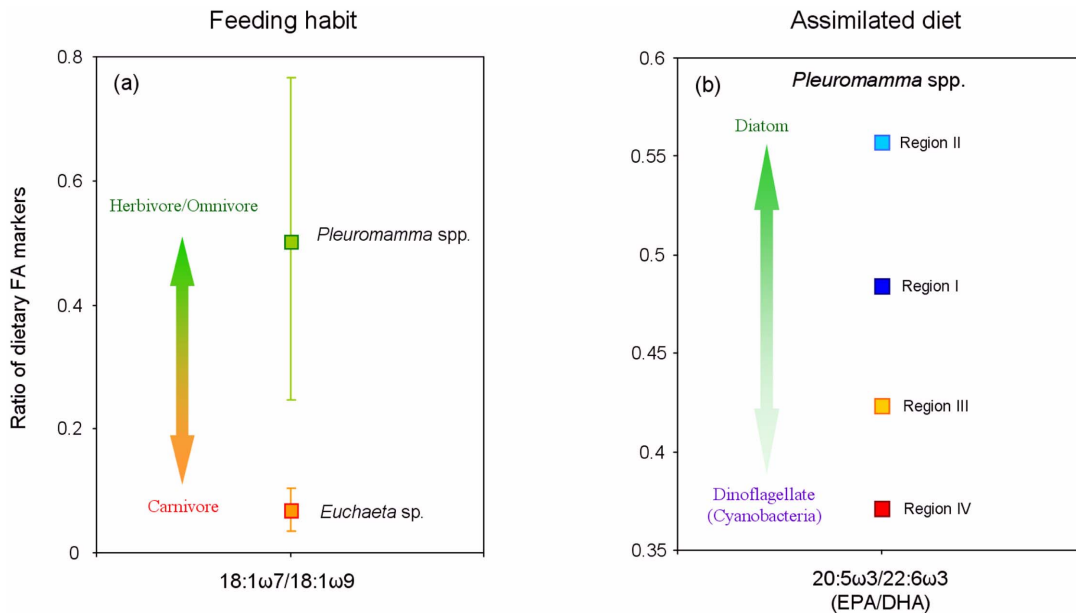


Fig. 5. The ratios of dietary fatty acid markers in *Euchaeta* sp. and *Pleuromamma* spp. from subtropical to temperate regions in the Northwest Pacific Ocean. (a) The mean ratios of 18:1ω7/18:1ω9 in *Euchaeta* sp. and *Pleuromamma* spp., indicating the feeding habit of these copepods and (b) the ratios of EPA/DHA, indicating diet preference (or food selectivity), in *Pleuromamma* spp. from subtropical (Region IV) to temperate (Region I and II) regions in the Northwest Pacific Ocean

(Fig. 5b). 이 비율에 따르면, *Pleuromamma* spp.는 그들의 먹이로 아열대 해역에서는 외편모조류를 비롯한 미세 식물플랑크톤(*Prochlorococcus* 등)을, 온대해역에서는 규조류를 포함한 비교적 크기가 큰 식물플랑크톤을 우점하여 섭취하는 것으로 추정할 수 있으며, 이러한 결과는 연구해역의 식물플랑크톤 군집 분포와도 잘 일치되는 것으로 확인되었다(한국해양연구원 2008). 그러므로 *Pleuromamma* spp.는 비선택적 섭식자(non-selective feeder)로써 그들이 서식하는 환경에 적응하여 각각의 환경에서 우점하게 존재하는 그룹의 플랑크톤을 그들의 주요 먹이원으로 활용하는 것으로 판단된다(Hayward 1980; Frost et al. 1983; Schnetzer and Steinberg 2002). 이렇게 지방산 먹이추적자를 이용하여 파악된 두 요각류의 섭식생태는 위 내용물 분석을 통한 선행연구결과와도 잘 일치하고 있다(Hayward 1980). 또한 다른 먹이관계 추적자로 많이 활용되고 있는 질소안정동위원소비¹⁾에 대한 기존 분석결과(한국해양연구원 2008)를 위도에 따른 동물플랑크톤의 먹이원의 질소기원을 추적하기 위해 재분석 하였다. 그 결과 북서태평양에서 채집된 동물플랑크톤과 요각류 *Euchaeta* sp.의 질소안정동위원소비 ($\delta N^{15} = [(^{15}N/^{14}N)_{sample} / ^{15}N/^{14}N)_{standard} - 1] \times 1000$; standard-air N_2)와 시료가 채집된 위도 사이에 중요한 양의 직선함수관계(위도=2.08 δN^{15} (‰)+14.51, regression coefficient(R^2)=0.53)를 보이는 것으로 나타났다(Fig. 6).

동물플랑크톤(특히, *Euchaeta* sp.)이 해양생물먹이망에서 유사한 영양단계를 차지하고 있음에도 불구하고 북서태평양 저위도에서 고위도로 갈수록 동물플랑크톤이 함유하고 있는 질소에 상대적으로 무거운 질소동위원소(^{15}N)의 함량이 높아지는 것은 위도와 해역에 따라 무기질소 주요 공급원(대기 질소가스, 용존 암모니아, 아질산염, 질산염 등)이 달라진다는 걸 보여주고 있다. 예를 들면, 아열대 외해역(Region III & IV)은 1차 생산자로 질소고정박테리아가 우점하고 있어서 이 해역의 주된 질소 기원은 상대적으로 가벼운 질소동위원소를 많이 포함하는 대기의 질소기체($\delta N^{15} = -2 \sim 0\%$)로부터 기원한다. 따라서 이러한 질소를 흡수한 1차 생산자를 기초 먹이원으로 하는 동물플랑크톤과 같은 상위포식자의 질소동위원소비가 고위도해역이나 연안역(해수 중의 질소가 주로 용승이나 육상에서 기원)의 동물플랑크톤보다 훨씬 낮은 δN^{15} 값을 나타내고 있는 것이다(Wada and Hattori 1991; Michener and Kaufman 2007). 또한 이런 빈영양 환경의 저위도 해역에서는 질소고정박테리아와 같은 미세식물플랑크톤이 우점하고 있어서 미세먹이망(microbial loop)을 통하여 동물플랑크톤과 같은 상위포식자로의 에너지 전달이 우세하다. 따라서 위도별로 나타나는 단일 동물플랑크톤 종의 영양조건이나 먹이 추적자의 변화는 그들이 서식하는 환경의 물리적인 조건뿐만 아니라 생물학적 조건(먹이량, 우점

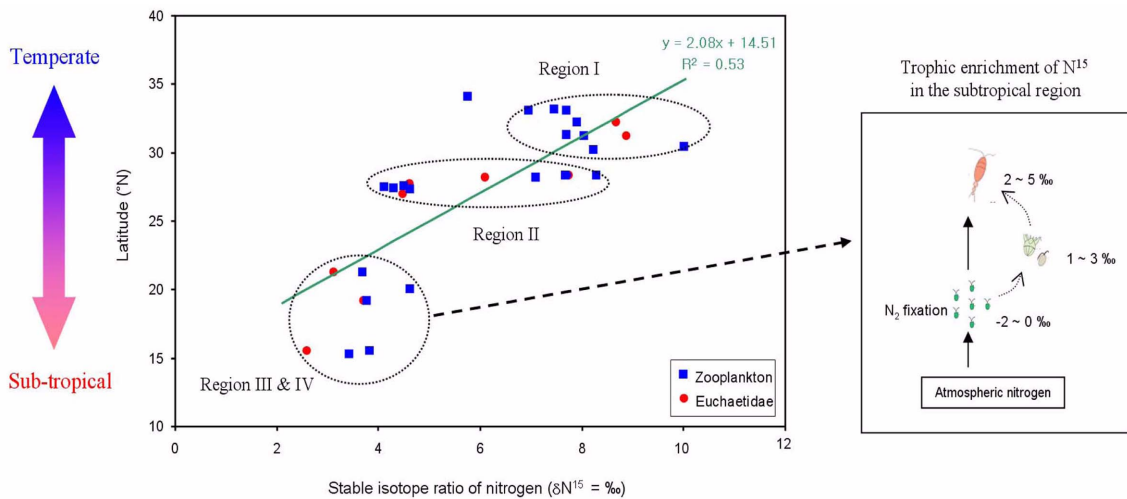


Fig. 6. The relationship between latitude where zooplankton collected and δN^{15} (‰) of zooplankton (data taken from KORDI (2008)) with schematic diagram of potential trophic enrichment of N^{15} in the subtropical region (Region III and IV)

¹⁾일반적으로 생체에 동화되는 안정동위원소의 비는 먹이의 그 비에 영향을 받아 먹이와 비슷하지만, 안정동위원소의 원소간의 작은 질량차이에 의하여 물리, 생물, 화학적 반응에서 가벼운, 혹은 무거운 원소가 우선적으로 반응을 하는 분별작용에 의해 그 비가 다르게 변할 수 있다. 이러한 분별작용은 동화된 생체 내에서도 일어난다. 그 중 황은 먹이와 섭식자의 동위원소적 구성비($\delta^{34}S$)가 거의 같으며, 탄소($\delta^{13}C$)와 질소($\delta^{15}N$)는 먹이에 비해 무거운 동위원소가 많아진다. ^{13}C 는 영양단계당 1‰, ^{15}N 은 3~4‰ 정도 증가하는 것으로 알려져 있다. 질소 동위원소의 생체 내 분별작용을 이용하여 동위원소비가 영양단계의 지표로서 활용 가능하다.

먹이중, 중간 경쟁, 포식)에도 크게 영향을 받고 있음을 시사하고 있다.

4. 결 론

북서태평양에 서식하는 요각류 중 *Euchaeta* sp.와 *Pleuromamma* spp.를 위도 별로 채집하여 지방함량 및 구성 성분을 분석 비교한 결과, 개체별 지방 함량은 *Euchaeta* sp.가 *Pleuromamma* spp.보다 다소 높았으며, *Euchaeta* sp.은 아열대(저위도)에서 온대(중위도)해역으로 갈수록 지방함량이 증가하는 수온차이에 따른 일반적인 위도 구배 양상을 보이는 반면, *Pleuromamma* spp.은 이와는 반대되는 양상으로 나타났다. 두 요각류의 지방 class 구성은 위도에 관계없이 유사한 분포를 보이며, 두 종은 서로 다른 저장지방성분(*Euchaeta* sp.-왁스 에스테르, *Pleuromamma* spp.-트리아실글리세롤)을 에너지원으로 축적하고 있는 것으로 나타났다. 이들 요각류의 지방산 구성 분포는 종과 위도에 따라 뚜렷한 차이를 보이고 있으며, 특히 특정 먹이 추적 지방산 비(C18:1 ω 7/C18:1 ω 9과 EPA/DHA)에 따르면, *Euchaeta* sp.는 소형 초식 동물 플랑크톤을 주로 섭식하는 육식성 요각류인 것으로, *Pleuromamma* spp.는 초식성으로 위도에 따라 그들의 주요 먹이원이 달라짐(아열대-와편모조류, 온대해역-규조류)을 추정할 수 있었다. 본 연구에서 밝혀진 요각류의 지방함량과 구성의 위도별 변화는 향후 기후변동으로 인한 수온상승과 쿠로시오 난류의 확장(또는 강화) 등과 같은 서식환경(수온, 먹이원) 변동에 따른 이들 요각류의 생존전략과 생태계 내에서의 이들의 역할을 이해하는데 중요한 정보로 사용될 수 있을 것이다.

사 사

위도에 따른 4개 해역별 수온 및 엽록소 위성자료를 정리하여 제공해 주신 박지수 박사와 식물플랑크톤 구성과 동물플랑크톤 동위원소자료를 제공해주신 노재훈, 유옥환 박사님께 감사드립니다. 이 논문은 한국해양연구원 과제인 “북서태평양이 한반도 주변해(대한해협)에 미치는 영향 연구(PE98563)”의 지원을 받아 수행되었습니다.

참고문헌

최동림, 노재훈, 유주형, 이재학, 장풍국, 이태희, 최동한 (2010) 2008년 여름철 북부 동중국해에서 대규모 녹조(가시파래) 출현. *Ocean and Polar Res* **32**(4):351-359
한국해양연구원 (2008) 북서 태평양이 한반도 주변해(대한해협)에 미치는 영향 연구. 한국해양연구원, BSPP07401-

- 1917-1, 783 p
Albers CS, Kattner G, Hagen W (1996) The composition of wax esters, triacylglycerols and phospholipids in Arctic and Antarctic copepods: evidence of energetic adaptations. *Mar Chem* **55**:347-358
Ambler JW, Miller CB (1987) Vertical habitat-partitioning by copepodites and adults of subtropical oceanic copepods. *Mar Biol* **94**:561-577
Auel H, Harjes M, da Rocha R, Stubing D, Hagen W (2002) Lipid biomarkers indicate different ecological niches and trophic relationships of the Arctic hyperiid amphipods *Themisto abyssorum* and *T. libellula*. *Polar Biol* **25**:374-383
Benson AA, Lee RF (1975) The role of wax in oceanic food chains. *Sci Am* **232**:77-83
Bligh EG, Dyer WJ (1959) A rapid method of total lipid extraction and purification. *Can J Biochem Physiol* **37**:911-917
Bougis P (1976) *Marine Plankton Ecology*. Elsevier, New York, 169 p
Cripps GC, Atkinson A (2000) Fatty acid composition as an indicator of carnivory in Antarctic krill, *Euphausia superba*. *Can J Fish Aquat Sci* **57**:31-37
Dalsgaard J, St. John M, Kattner G, Muller-Navarra D, Hagen W (2003) Fatty acid trophic markers in the pelagic marine environment. *Adv Mar Biol* **46**:225-340
Destailats F, Angers P (2002) Base-catalyzed derivatization methodology for FA analysis. application to milk fat and celery seed lipid TAG. *Lipids* **37**(5):527-532
Ederington MC, McManus GB, Harvey HR (1995) Trophic transfer of fatty acids, sterols, and a triterpenoid alcohol between bacteria, a ciliate, and the copepod *Acartia tonsa*. *Limnol Oceanogr* **40**:860-867
El-Sabaawi R, Dower JF, Kainz M, Mazumder A (2009) Characterizing dietary variability and trophic positions of coastal calanoid copepods: insight from stable isotopes and fatty acids. *Mar Ecol Prog Ser* **156**:225-237
Falk-Petersen S, Hagen W, Kattner G, Clarke A, Sargent JR (2000) Lipids, trophic relationships, and biodiversity in Arctic and Antarctic krill. *Can J Fish Aquat Sci* **57**:178-191
Barnes M, Gibson RN (1990) Trophic relationships in marine environments: proceedings of the 24th European Marine Biology Symposium. Aberdeen University Press, Aberdeen, 642 p
Fowler SW, Knauer GA (1986) Role of large particles in the transport of elements and organic compounds through the oceanic water column. *Prog Oceanogr* **16**:147-194
Frost BW, Landary MR, Hassett RP (1983) Feeding behavior

- of large calanoid copepods *Neocalanus cristantus* and *N. plumchrus* from the subarctic Pacific Ocean. *Deep-Sea Res I* **30**:1-13
- Goad LJ (1978) The sterols of marine invertebrates: composition, biosynthesis and metabolites. In: Scheure PJ (ed) *Marine natural products*, Academic Press, New York, pp 74-172
- Graeve M, Kattner G, Hagen W (1994) Diet-induced changes in the fatty acid composition of Arctic herbivorous copepods: experimental evidence of trophic markers. *J Exp Mar Biol Ecol* **182**:97-110
- Hagen W, Van Vleet ES, Kattner G (1996) Seasonal lipid storage as overwintering strategy of Antarctic krill. *Mar Ecol Prog Ser* **134**:85-89
- Hayward TL (1980) Spatial and temporal feeding patterns of copepods from the North Pacific Central Gyre. *Mar Biol* **56**:295-309
- Ju S-J, Harvey HR (2004) Lipids as markers of nutritional condition and diet in the Antarctic krill *Euphausia superba* and *E. crystallorophias* during austral winter. *Deep-Sea Res II* **51**:2199-2214
- Ju S-J, Kang H-K, Kim WS, Harvey HR (2009) Comparative lipid dynamics of euphausiids from Antarctic and Northeast Pacific Oceans. *Mar Biol* **156**:1459-1473
- Ju S-J, Kucklick JR, Kozlova T, Harvey HR (1997) Lipid accumulation and fatty acid composition during maturation of three pelagic fish species in Lake Baikal. *J Great Lakes Res* **23**(3):241-253
- Kattner G, Hagen W, Graeve M, Albers C (1998) Exceptional lipids and fatty acids in the pteropod *Clione limacina* (Gastropoda) from both polar oceans. *Mar Chem* **61**:219-228
- Kattner G, Hagen W (2010) Lipids in marine copepods: latitudinal characteristics and perspective to global warming. In: Arts MT, Brett MT, Kainz MJ (eds) *Lipids in Aquatic ecosystem*, Springer, London, pp 257-280
- Lee RF, Nevenzel JC, Paffenhofer GA (1970) Wax esters in marine copepods. *Science* **167**:1510-1511
- Lee RF, Hagen W, Kattner G (2006) Lipid storage in marine zooplankton. *Mar Ecol Prog Ser* **307**:273-306
- Ikeda T (1974) Nutritional ecology of marine zooplankton. *Mem Fac Fish Hokkaido Univ* **22**:1-97
- Mackey DJ, Parslow J, Griffiths FB, Higgins HW, Tilbrook B (1997) Phytoplankton productivity and the carbon cycle in the western Equatorial Pacific under El Nino and non-El Nino conditions. *Deep-Sea Res II* **44**:1951-1978
- Mayzaud P, Boutoute M, Alonzo F (2003) Lipid composition of the Antarctic euphausiids *Euphausia vallentini* and *Thysanoessa macrura* during summer in the Indian sector of the Southern ocean. *Antarctic Sci* **15**:463-475
- Michener RH, Kaufman L (2007) Stable isotope ratios as tracers in marine food webs: an update. In: Michener RH, Lajitha K (eds) *Stable isotopes in ecology and environmental science*. Blackwell Publishing Ltd., Oxford, pp 238-282
- Nichols PD, Guckert JB, White DC (1986) Determination of monosaturated fatty acid double-bond position and geometry for microbial monocultures and complex consortia by capillary GC-MS of their dimethyl disulphide adducts. *J Microbiol Meth* **5**(1):49-55
- Rampen SW, Abbas BA, Schouten S, Damste JSS (2010) A comprehensive study of sterols in marine diatoms (Bacillariophyta): implications for their use as tracers for diatom productivity. *Limnol Oceanogr* **55**(1):91-105
- Sargent JR, Henderson RJ (1986) Lipids. In: Corner EDS and O'Hara SCM (eds) *The biological chemistry of marine copepods*, Clarendon Press, London, pp 59-108
- Schnetzer A, Steinberg DK (2002) Natural diets of vertical migrating zooplankton in the Sargasso Sea. *Mar Biol* **141**:89-99
- Swailethorp R, Kjellerup S, Dunweber M, Nielsen TG, Moller EF, Rysgaard S, Hansen BW (2011) Grazing, egg production, and biochemical evidence of differences in the life strategies of *Calanus finmarchicus*, *C. glacialis* and *C. hyperboreus* in Disko Bay, western Greenland. *Mar Ecol Prog Ser* **429**:125-144
- Volkman JK, Barrett SM, Blackburn SI, Mansour MP, Sikes EL, Gelin F (1998) Microalgal biomarkers: a review of recent research developments. *Org Geochem* **29**(5-7):1163-1179
- Wada E, Hattori A (1991) Nitrogen in the sea: forms, abundances, and rate processes. CRC press, Boston, 208 p
- Yen J (1988) Directionality and swimming speeds in predator-prey and male-female interactions of *Euchaeta rimana*, a subtropical marine copepod. *Bull Mar Sci* **43**(3):395-403

Received Jul. 13, 2011

Revised Aug. 18, 2011

Accepted Sep. 1, 2011