

Article

마이크로네시아 웨노섬의 맹그로브 숲에 서식하는 고동류 및
집계의 영양원에 대한 이해

고아라¹ · 김민섭² · 주세종^{1*}

¹한국해양과학기술원 심해저자원연구부
(426-744) 경기도 안산시 상록구 해안로 787

²국립환경과학원 환경측정분석센터
(404-708) 인천시 서구 환경로 42

Understanding the Nutritional Sources of Gastropods and Anomura from the
Mangrove Forest of Weno Island, Micronesia

Ah-Ra Ko¹, Min-Seob Kim², and Se-Jong Ju^{1*}

¹Deep-Sea & Seabed Resources Research Division, KIOST
Ansan 426-744, Korea

²Fundamental Environment Research Department, NIER
Incheon 404-170, Korea

Abstract : Carbon cycling and productivity within Weno Island of Micronesia enclosed by the coral reef may be likely self-maintained and insignificantly affected by the open ocean. Therefore, it is important to understand the role of the mangrove known as providing the organic matter and habitats for many organisms in this enclosed area. In order to trace the nutritional source of fauna (mostly invertebrates) in the mangrove forest of Weno island, we analyzed the fatty acid (FA) and carbon and nitrogen stable isotopes of potential nutritional sources (mangrove leaf & pneumatophore, seagrass leaf & root, surface sediment, and particulate organic matter (POM) in water) and consumers (4 gastropods and anomura). The mangrove and seagrass contained the abundance of 18:2 ω 6, and 18:3 ω 3, whereas FAs associated with phytoplankton and bacteria were accounted for a high proportion in the surface sediment and POM. FA composition of consumers was found to be similar to those of the surface sediment, mangrove, and seagrass. These were also confirmed through the mixing model of stable isotope for contribution of nutritional sources to consumers. Overall results with the feeding types of investigated mangrove fauna indicate that investigated mangrove fauna obtained their nutrition from the various sources, i.e. the mangrove for *Littorina* cf. *scabra*, the microalgae for *Strombus* sp., and omnivorous *Pagurus* sp. and *Terebralia* cf. *palustris*. However, it is obvious that the nutrition of most species living in the mangrove ecosystem is highly dependent on the mangrove, either directly or indirectly. More detail food-web structure and function of the mangrove ecosystem would be established with the analysis of additional fauna and flora.

Key words : mangrove, nutritional source, fatty acid, stable isotope, Chuuk

*Corresponding author. E-mail : sjju@kiost.ac

1. 서 론

전 세계 열대/아열대 지역의 해안 및 하구 생태계에서 반염 또는 고염에 적응하여 살아가는 맹그로브는 약 1,500만 헥타르의 거대한 면적에 분포해 있으며, 이 지역에 서식하는 박테리아, 무척추동물, 넓게는 포유류까지 다양한 생물의 주요 에너지 공급원이기도 하다(Feller et al. 1999; FAO 2004). 이러한 맹그로브는 평균적으로 약 2500 mgC/m²/d의 높은 생산력을 가지며, 열대/아열대 해역에 영양염과 유기 탄소를 공급 및 저장함으로써 생지화학적 순환에 중요한 역할을 한다(Lee 1995; Duarte and Cebrian 1996; Jennerjahn and Ittekkot 2002). 따라서 생지화학적 측면에서 맹그로브에 관한 다양한 연구가 수행되어 왔다. Reef et al. (2010)은 전 세계 맹그로브 숲에서 맹그로브의 생산력(productivity)과 영양염(nutrient) 순환에 대해 보고하였으며, Suárez and Medina (2005)는 환경적 변화가 극심한 하구역에서의 맹그로브 생존 전략 등에 대해서 연구하였다. 이러한 환경적인 요인(수온, 염분, 영양염 등)과 기후(건/우기, 기온)의 변동에 따라 맹그로브 기반의 생태계 구조 및 에너지 기원은 시·공간적인 차이를 보이는 것으로 알려져 있다(Meziane and Tsuchiya 2000). 따라서 맹그로브 생태계 구조를 이해하기 위해 우선적으로 생산자와 상위 포식자를 연결시켜주는 무척추동물(Sheaves and Molony 2000)의 유기물/에너지 기원을 추적하고자 다양한 방법을 활용한 연구가 수행되고 있다(Wafar et al. 1997; Meziane and Tsuchiya 2002; Gonneea et al. 2004).

생화학적 기법(지방 바이오 마커 및 안정동위원소)은 다양한 해양생태계에서의 먹이망 구조 및 유기물 기원을 추적하기 위한 연구에 활용되고 있다(Budge et al. 2008; Belicka et al. 2012; Lecea et al. 2013; McMeans et al. 2013). 일부 지방산은 생물의 생존과 성장에 필수적이며, 특정 생산자만이 합성할 수 있어서 소비자는 생산자를 통해서만 이를 직간접적으로 획득할 수 있다. 또한 소비자로 전달되는 동안 다른 성분들에 비해 구조적 변화 정도가 적거나 일정하여, 생물의 먹이원을 추적하기에 매우 적합하다(Parrish et al. 2000). 예를 들면, 20:5 ω 3은 주로 규조류만이 합성할 수 있어서 규조류 기원, 22:6 ω 3은 와편모조류 기원(Parrish et al. 2000), 홀수개의 탄소 사슬 지방산(15:0, 17:0)은 박테리아 기원(Rajendran et al. 1993)으로 구분되어지며, 이들을 포함한 다양한 지방산이 먹이 추적자로 활용되고 있다. 그러나 최근에 와서 이러한 지방산 먹이 추적자 중 일부는 기존에 알려진 바와 달리 때때로 상위 포식자로 전달/추적되는 과정에서 변형되거나, 특정 생물기원이 아닌 것으로 밝혀지고 있다(Graeve et al. 1994; Dalsgaard et al. 2003; Ju and Harvey 2004). 더욱

이 지방산은 생체 내에서의 짧은 순환주기(일~주)로 장기간의 먹이원을 대변하기에는 어려움이 있다(Cook 1991; Pond et al. 1995; Alfaro et al. 2006).

지방산과 더불어 탄소·질소 안정동위원소 비($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$)는 생태계 구조와 기능을 이해하는데 널리 사용되고 있다. 안정동위원소간의 근소한 질량 차이로 인해 가벼운 동위원소가 무거운 동위원소보다 빠르게 반응한다. 탄소 안정동위원소는 물리화학적 분별작용(fractionation)이 큰 반면, 생물 특히 영양단계를 통한 분별작용은 매우 미미하여 상위 영양단계에서도 생산자의 탄소기원을 추적하는데 적절하다. 질소 안정동위원소의 경우, 동물들은 가벼운 질소(^{14}N)를 우선적으로 배출하고 체내에 무거운 질소(^{15}N)를 축적한다. 따라서 상위 영양단계로 갈수록 무거운 질소가 일정하게 농축되고, 질소 안정동위원소 비도 증가하게 된다. 이를 통해 생태계 구성생물들 사이의 영양단계를 추정할 수 있다(Gu et al. 1996; Vizzini et al. 2002). 이뿐만 아니라, 맹그로브를 포함한 식물의 질소 안정동위원소 비는 퇴적물에서의 식물과 미생물간 상호작용 및 질소 기원 등의 다양한 과정을 반영한다(Dawson et al. 2002). 그러나 탄소·질소 안정동위원소 비만을 통해서는 직접적인 생물 간의 포식-피식 관계를 파악하기는 어렵다. 또한 생물 종마다 안정동위원소의 분별작용에 차이가 나타나고 있기 때문에, 안정동위원소 비를 이용한 연구의 신뢰성과 정확도를 향상시키기 위해서는 각 생물들의 안정동위원소 분별작용에 대한 이해가 선행되어야 한다. Loneragan et al. (1997)은 호주 하구역에서 안정동위원소를 통해 참새우(penaeid prawn)의 유기 탄소가 맹그로브로부터 기원한다고 보고하였다. 그러나 같은 기법을 활용한 다른 연구에서는 맹그로브 생태계에 서식하는 참새우의 주 영양원이 맹그로브가 아닌 미세조류나 저서성 규조류일 것으로 보고하기도 하였다(Stoner and Zimmerman 1986; Newell et al. 1995; Primavera 1996). 이처럼 복잡하고 환경변화가 심한 하구역에서는 다양한 기원의 물질이 유입 및 혼합되기 때문에 단일한 방법을 통하여 정확히 물질순환을 이해하기에는 한계가 있다. 따라서 최근에는 각각의 생화학적 방법들이 가진 취약점들을 보완하고, 복잡한 생태계에서 좀 더 정확히 구성생물들의 먹이(에너지)기원과 생태계 내에서의 물질흐름, 그리고 구성생물의 영양학적 위치를 파악하고자 두 개 이상의 생화학적 기법을 동시에 활용한 연구가 수행되고 있다. 예를 들면, Alfaro et al. (2006)은 지방산 바이오 마커와 안정동위원소를 활용하여 뉴질랜드 하구역에서 맹그로브를 비롯한 다양한 동/식물의 에너지 흐름 및 영양학적 위치를 연구하였다.

여러 개의 섬으로 구성된 마이크로네시아(Micronesia)는 전 세계 맹그로브의 약 0.06%인 8,564헥타르의 맹그로브 숲을 가지고 있다(Devoe and Cole 1998). 이들 중, 웨

노섬(Weno island)은 마이크로네시아의 चु크 주(Chuuk state)에 위치한 거대한 산호섬 및 화산섬으로써, 산호 군락의 띠로 둘러싸여 외양과는 단절된 지형적인 특징을 나타낸다. 이러한 지리적이고 환경적 요인으로 인해 웨노섬 주변 해역의 물질순환 및 기초 생산력이 대양과 달리, 산호 군락 내에서의 독립된 생지화학적 반응에 의해 이루어질 것으로 추정된다. 따라서 웨노섬 주변 해역에서의 물질순환을 이해하기 위해서는 우선적으로 웨노섬에 넓게 분포한 맹그로브가 생태계에 어떠한 영향을 미치는지 연구되어야 한다. 그러나 웨노섬을 포함한 마이크로네시아에서는 맹그로브 숲의 성장(Devoe and Cole 1998)과 자리돔의 연간 재생산력(Choi et al. 2013) 등 일부 분야에서 제한된 연구만 수행되고 있을 뿐, 맹그로브 생태계에서의 에너지 흐름이나 먹이망 구조에 대한 연구는 전무한 실정이다. 본 연구에서는 지방산 먹이 추적자와 안정동위원소비를 활용하여 웨노섬 맹그로브 숲에 서식하는 일부 고등류 및 집게의 주 영양 공급원으로써 맹그로브의 역할과 중요성을 파악하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

연구 지역 및 시료 채집

태평양 서북부에 위치한 마이크로네시아의 웨노섬은 산호 군락으로 둘러싸여 있으며, 섬을 기준으로 남쪽과 북쪽에 맹그로브 숲이 형성되어 있다. 본 연구에서는 웨노섬 주변의 맹그로브 숲 중, 접근성이 좋고 맹그로브 숲이 잘 발달되어 있는 북쪽 맹그로브 숲(151°53'E, 7°27'N; Fig. 1)

에서 2012년 우기(wet season; 5월)에 레드 맹그로브(*Rhizophora stylosa* Griff) 잎(leaf)과 호흡근(pneumatophore; aerial root), 표층 퇴적물, 입자유기물(particulate organic matter), 잘피(seagrass; *Enhalus acoroides*) 잎과 뿌리 그리고 고등류(*Littorina* cf. *scabra*, *Strombus* sp.1, *Strombus* sp.2, *Terebralia* cf. *palustris*) 및 집게(*Pagurus* sp.)를 채집하였다. 살아있는 맹그로브 나무에서 잎과 호흡근을 채집하였으며, 표층 퇴적물은 맹그로브 잎과 호흡근을 채집한 부근에서 표층 약 2-3 cm를 긁어서 채집하였다. 또한 입자유기물은 맹그로브 숲에서 채수한 해수 1 L를 47 mm GF/F 여과지(pre-combustion at 450°C)로 여과하여 여과지를 페트리디쉬에 보관하였다. 모든 시료는 분석하기 전까지 -20°C 이하에서 냉동 보관하였으며, 시료의 오염을 예방하기 위해 채집한 생물들의 표면에 붙어있는 퇴적물과 이물질을 분석 전에 증류수로 제거하였다.

지방산 구성

채집한 시료에서 지방을 추출하기 전, 맹그로브 잎과 호흡근, 잘피 잎과 뿌리, 고등류와 집게 시료를 잘게 부수어 시료 무게(맹그로브 잎 5-9 g, 호흡근 1-2 g, 퇴적물 2 g, 잘피 잎과 뿌리 2 g, 생물 100-200 mg)를 측정하였다. 이 때, 고등류와 집게는 껍데기를 제거하고 근육 조직만 사용하였다. 모든 유리용기는 혼합 유기용매로 2-3번 헹구어주었으며, 450°C에서 유기물을 제거하고 사용하였다. 준비된 각 시료를 유리용기에 넣고 혼합 유기용매(Dichloromethane:Methanol(CH₂Cl₂:MeOH) = 1:1)로 초음파 분해(gun sonication)하여 지방을 추출하였다(Bligh

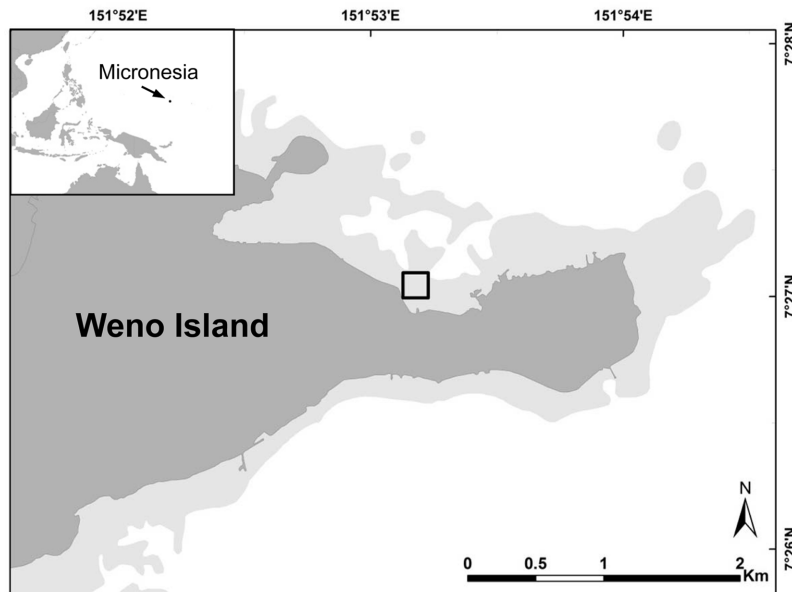


Fig. 1. Map of the study site (square) located at the northern part of Weno Island, Micronesia in the Northwest Pacific

and Dyer 1959). 추출된 지방을 혼합 유기용매(CH₂Cl₂: MeOH = 2:1)로 다시 용해시킨 후, 적정량(50-100 μl)을 새로운 유리용기에 넣고, 0.5N KOH/MeOH를 첨가하여 70°C에서 30분 동안 가열하였다. 혼합 유기용매(Hexane: Diethyl ether = 9:1)로 스테롤(sterol)과 알코올을 포함한 중성지방을 제거한 후, 염산을 넣어 KOH를 침전시켜, 혼합 유기용매(Hexane:Diethyl ether = 9:1)로 지방산을 포함한 극성 지방(polar lipid)을 추출하였다. 추출된 극성 지방에 BF₃/MeOH을 첨가하여 지방산을 에스테르화하였다. 이렇게 추출 및 에스테르화된 지방산(fatty acid methyl ester)은 Gas Chromatography-Flame Ionization Detector(GC-FID; Agilent 7890A)로 분리 및 분석되었다. 각 지방산 성분을 정량화하기 위해 상업용 표준물질(n-Nonadecanoic acid; Sigma-Aldrich Co.)을 모든 시료에 첨가하여 분석하였다. 분석에는 ZB-5ms 컬럼(길이 60 m, 직경 0.32 mm, 내부 코팅된 필름 두께 0.25 μm; Phenomenex)을 사용하였다. 적용 온도 조건은 시료 주입구 250°C와 검출기 320°C이며, 오븐은 50°C에서 120°C까지 10°C/분으로, 120°C에서 300°C까지 4°C/분으로 설정하였다. 이동상 가스는 헬륨(30 mL/분)을 사용하였으며, 각 지방산 성분의 peak는 표준물질과 비교하여 정량화되었다. 각 지방산의 정성화는 Gas Chromatography Mass-Spectrometry Detector(GC-MSD; Agilent 7890A GC, Agilent 5975C MSD)를 사용하여 70 eV에서 원자 질량 50~700 amu로 분석되었고, 기타 조건들(컬럼, 온도, 이동상 가스)은 GC-FID와 동일하게 설정되었다. 지방산 중 불포화 지방산의 이중결합(double bond) 위치는 dimethyl disulphide(Nichols et al. 1986)를 첨가하거나 fatty acid picolinyl ester(Destaillats and Angers 2002)로 전환하여 GC-MSD로 확인되었다. 지방산의 총 함량은 각 지방산 성분의 합으로 산출되었다.

탄소 및 질소 안정동위원소 비

지방은 다른 생화학 성분들에 비해 무거운 탄소비율이 높다. 따라서 신체부위나 종에 따라 지방함량의 차이로 인한 탄소 안정동위원소 비가 다르게 나타날 수 있기 때문에, 이러한 차이를 배제하고자 지방을 제거하고 측정한다.

고등류 및 집계의 δ¹³C를 측정하기 위하여 유기용매로 지방을 제거한 후(Bligh and Dyer 1959), 1N 염산(HCl)으로 무기탄소를 제거하였다. 또한 증류수로 염산을 제거하고, 시료를 동결건조하여 분쇄기로 갈아주었다. 그러나 지방 추출 및 염산 처리 과정이 질소 안정동위원소 비를 변화시킬 수 있기 때문에 질소 안정동위원소 분석을 위한 시료 전처리 과정에서는 이 과정을 생략하고, 동결건조 및 분쇄하여 분석되었다(Bunn et al. 1995). 이밖에 맹그로브 잎과 호홉근 그리고 퇴적물의 경우에는 지방의 함량이 낮아 전처리 과정에서 지방을 추출하지 않았으나, 탄산염을

제거하기 위해 염산 처리 후, 동결건조 및 분쇄하여 측정하였다. δ¹³C 및 δ¹⁵N은 원소(Euro EA 3000-D, Italy)-질량 분석기(Isoprime; GV Instrument, U.K.)를 이용하여 측정되었다.

안정동위원소 비는 다음과 같은 방정식을 따라 계산되었다.

$$\delta X = [(R_{\text{sample}}/R_{\text{standard}}) - 1] \times 1000 \text{ (‰)}$$

X는 ¹³C 또는 ¹⁵N을, R은 ¹³C/¹²C 또는 ¹⁵N/¹⁴N을 나타낸다. 탄소는 VPDB(Vienna PeeDee Belemnite), 질소는 대기 중 N₂를 표준물질로 사용하였으며, δ¹³C와 δ¹⁵N은 각각 0.2%와 0.5%의 정확도로 측정되었다.

3. 결과 및 토의

주요 영양 공급원의 지방산 구성

웨노섬 북쪽 맹그로브 숲에서 채집한 맹그로브 *R. stylosa* 잎과 호홉근의 지방산 분석 결과, 16:0, 18:2ω6, 18:3ω3 지방산의 상대적 구성비가 가장 높게 나타났다(Table 1). 특히 맹그로브 잎에서는 18:3ω3이 45.9%로 높았고, 호홉근에서는 18:3ω3(15.6%)보다 18:2ω6의 구성비가 46.5%로 가장 높았다. 이는 맹그로브 *Avicennia marina* 잎이 분해될수록 18:3ω3의 구성비가 점차 감소하는 것과 유사한 경향을 보였다(Alfaro et al. 2006). 이러한 지방산을 탄소 포화도에 따라 그룹화하여 살펴보니, 맹그로브 잎과 호홉근에서 다 불포화 지방산(Polyunsaturated fatty acid)이 총 지방산의 60% 이상으로 가장 높았으며, 포화 지방산(Saturated fatty acid)의 구성비도 약 30% 이상으로 나타났다. 본 연구에서 일부 지방산의 구성비는 맹그로브 잎과 호홉근에서 각각 차이를 보였으나, 그룹별 지방산은 유사하였다. 이와 달리 Wannigama et al. (1981)의 연구에 따르면, 같은 맹그로브 종 내에서는 잎과 호홉근의 지방산 구성, 특히 긴 사슬 지방산(Long chain fatty acid; 탄소수 24개를 초과하는 지방산) 구성의 차이는 나타나지 않았다. 맹그로브와 더불어 웨노섬 주변에 넓게 분포한 잘피 *E. acoroides* 잎과 뿌리의 지방산 구성에서도 포화 지방산인 16:0과 다 불포화 지방산인 18:2ω6과 18:3ω3이 가장 우점하였다(Table 1). 잘피 잎과 뿌리에서도 다 불포화 지방산이 50% 이상으로 가장 높았으며, 포화 지방산은 약 40%로 나타나 잘피의 잎과 뿌리사이의 그룹별 지방산 차이는 확인되지 않았다. 그러나 맹그로브 잎에서는 18:3ω3이 많았으나 잘피 잎에서는 18:2ω6이 더 많았고, 이와 반대로 맹그로브 뿌리에서 18:2ω6이 많았던 것과는 달리 잘피 뿌리에서는 18:3ω3이 더 우점하였다. 동해(일본해)에서 무척추동물의 에너지가 잘피로부터 기원한다고 보고한 Kharlamenko et al. (2001)의 연구에 따르면, 잘피 *Zostera*

Table 1. Relative abundance of fatty acids in mangrove leaf, pneumatophore (root), sediment, particulate organic matter (POM), seagrass leaf, and root collected at the northern part of Weno Island, Micronesia (% of the total fatty acids; standard deviations are shown in parentheses; non detected are denoted with a dash). SAFA: saturated fatty acid; MUFA: monounsaturated fatty acid; PUFA: polyunsaturated fatty acid; BrFA: branched fatty acid; LCFA: long-chain fatty acid

Fatty acids	Mangrove		Sediment	POM	Seagrass	
	Leaf	Root			Leaf	Root
14:0	1.0	0.4	0.7	-	0.4	0.7
15:0	0.2	0.6	3.2	0.5	0.5	0.6
16:3	-	-	-	0.1	0.1	0.2
16:1 ω 9	0.3	0.2	1.5	5.1	0.5	0.6
16:1 ω 7	0.3	0.4	0.2	0.3	0.7	0.7
16:1 ω 5	-	0.2	0.3	-	-	-
16:0	26.8	24.7	13.5	15.0	26.6	37.4
17:3	-	-	-	0.4	-	-
17:1	0.5	0.2	1.2	1.2	0.2	0.5
17:0	1.1	1.0	4.0	1.6	0.7	0.4
18:3 ω 3	45.9	15.6	-	0.2	22.8	35.5
18:2 ω 6	18.1	46.5	1.2	1.5	36.6	17.4
18:1 ω 9	-	-	2.8	9.4	-	-
18:1 ω 7	-	-	6.6	15.1	-	-
18:1 ω 5	-	-	0.2	0.3	-	-
18:0	1.8	4.6	10.4	16.2	5.2	4.5
19:1	-	-	1.4	-	-	-
20:4 ω 6	-	-	-	0.7	-	-
20:5 ω 3	-	-	-	2.1	-	-
20:0	0.2	0.9	1.6	-	0.7	0.5
20:2	-	-	-	0.4	-	-
21:0	-	-	1.2	-	-	-
22:6 ω 3	-	-	0.4	2.6	-	-
22:0	0.5	1.0	17.1	25.1	1.4	0.4
23:0	0.2	0.5	1.2	0.2	0.8	0.2
24:0	0.8	1.7	10.6	0.9	1.7	0.1
25:0	0.2	0.6	1.8	0.2	0.2	-
26:0	0.5	0.7	11.3	0.4	0.8	-
27:0	0.1	0.1	0.6	-	-	-
28:0	1.2	0.4	7.1	0.6	0.2	-
SAFA	33.5	35.4	75.9	58.5	44.0	38.0
MUFA	0.6	0.7	11.6	30.2	1.4	1.1
PUFA	64.1	62.1	1.6	7.6	53.1	59.5
BrFA	1.8	1.7	10.9	3.7	1.5	1.4
LCFA	2.0	1.8	20.8	1.2	0.1	1.2

*marina*은 주로 16:0, 18:2 ω 6, 18:3 ω 3의 지방산이 우점하였다. 특히 잎에서는 18:3 ω 3이, 뿌리에서는 18:2 ω 6이 우점하여, 본 연구에서의 잘피 지방산 구성과는 차이를 보였다. 본 연구에서는 맹그로브 잎과 호흡근 모두 긴 사슬 지방산의 구성비가 총 지방산의 2.0%와 1.8%로 낮았

며, 타 해역에서 잘피 기원으로 알려진 지방산인 18:2 ω 6과 18:3 ω 3(Nichols et al. 1982; Khotimchenko 1993; Kharlamenko et al. 2001)이 긴 사슬 지방산보다 훨씬 우점하여 출현하였다(Table 1, Fig. 2). Wannigama et al. (1981)은 맹그로브 잎과 호흡근의 지방산 및 스테롤을 분석하였

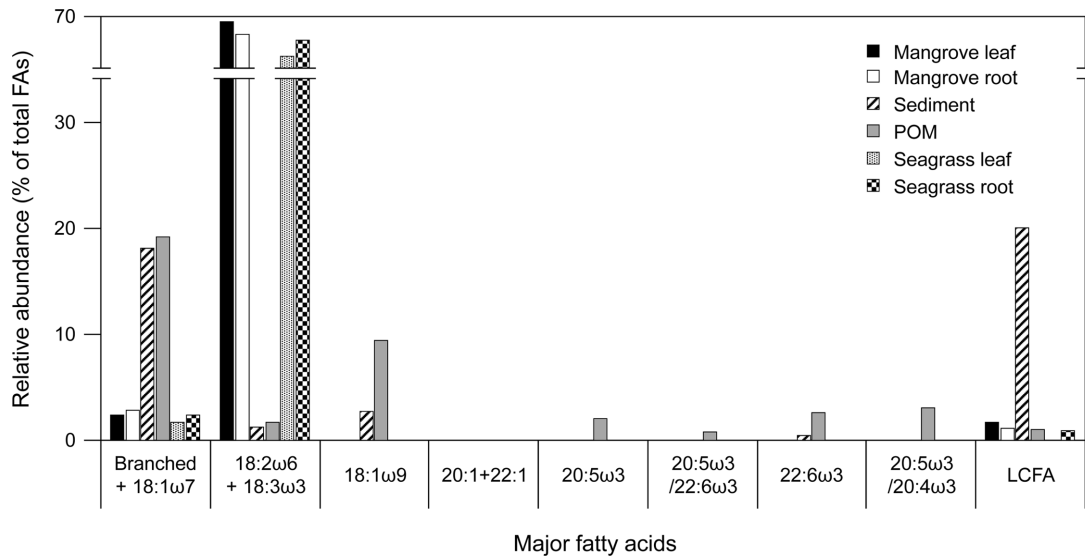


Fig. 2. Relative abundance of major source-specific fatty acids in mangrove, sediment, particulate organic matter (POM), and seagrass at the northern part of Weno Island

으며, 그 결과 긴 사슬 지방산이 맹그로브로부터 기원한다고 발표하였다. 그러나 Kelly and Scheibling (2012)의 연구에 요약된 저서 생태계에서의 지방산 먹이 추적자에 따르면, 해역(온대지역, 열대/아열대지역, 심해, 열수지역, 남극, 북극)별 차이를 보였다. 북 뉴질랜드 해역에서 맹그로브 기원의 지방산은 긴 사슬 지방산(Alfaro et al. 2006)이고, 잘피 기원의 지방산은 18:2 ω 6과 18:3 ω 3이었다. 하지만 일본 오키나와 해역에서는 맹그로브 쇄설물 기원으로 16:1 ω 7, 18:1 ω 9, 18:2 ω 6, 18:3 ω 3이 제시되었다(Bachok et al. 2003). 이밖에도 호주 퀸즈 아일랜드에서의 연구에서는 긴 사슬 지방산과 18:2 ω 6, 18:3 ω 3 지방산이 맹그로브로부터 기원한다고 보고되었다(Meziane et al. 2006). 맹그로브 및 잘피 기원의 지방산이 해역에 따라 차이를 보이는 것처럼, 본 연구에서는 긴 사슬 지방산을 비롯하여 18:2 ω 6과 18:3 ω 3이 맹그로브 및 잘피에서 기원하는 것으로 나타났다.

표층 퇴적물의 지방산 구성은 맹그로브 및 잘피의 지방산 구성과는 달리 긴 사슬 지방산과 미생물 기원 지방산이 우점하여 나타났다. 본 연구지역의 주요 기초 생산자로 고려되는 맹그로브와 잘피에는 미량으로 함유된 긴 사슬 지방산이 표층 퇴적물에서는 총 지방산의 20.8%를 차지했으며, 이밖에도 박테리아 기원의 지방산(15:0, 15:1, 17:0, 17:1, 18:1 ω 7)이 총 지방산의 17.5%로 나타났다(Fig. 2). 그러나 맹그로브와 잘피에 우점한 18:2 ω 6과 18:3 ω 3의 상대적 구성비는 약 1.2%로 매우 낮았다. 입자유기물에서는 18:0과 22:0을 포함한 포화 지방산이 가장 우점하였으며, 박테리아 기원의 지방산도 다량 포함되어 있었다. 긴 사슬 지방산은 미량으로 나타났으나, 다른 기

초 생산자와는 달리 식물플랑크톤 즉 규조류 및 와편모조류에 의하여 합성되는 것으로 알려진 20:5 ω 3과 22:6 ω 3 지방산이 2.1%와 2.6%로 검출되었다(Table 1). 표층 퇴적물에는 대부분 근처에 서식하는 동·식물 기원의 유기물이 쌓이면서 높은 미생물 생산력과 생체량이 나타나게 된다(Benner and Hodson 1985; Mudge et al. 1998). 따라서 표층 퇴적물과 입자유기물에서 박테리아 기원의 지방산이 많이 검출되었으며, 반면에 긴 사슬 지방산의 일부는 섬내륙의 유관식물로부터 유입되었음을 배제할 수는 없다. 그러나 타 지방산에 비해 난분해성인 긴 사슬 지방산이 맹그로브와 잘피에서 생성된 후 퇴적물로 유입되어 장기간 분해되지 않고 축적되었기 때문으로 추정된다(Meziane et al. 1997; Hall et al. 2006). 일부 연구에서는 맹그로브 생태계에서 맹그로브뿐만 아니라 다른 기초 생산자, 즉 잘피 또는 식물플랑크톤도 탄소와 물질 순환에 중요할 것이라고 보고했다(de Boer 2000; Holmer and Olsen 2002). 그러나 타 해역과는 달리, 주요 영양공급원의 지방산 구성에 따르면, 웨노섬 맹그로브 숲의 표층 퇴적물과 부유입자의 유기물은 대부분 맹그로브 및 잘피, 그리고 이들의 쇄설물로부터 기원했을 것으로 사료된다.

안정동위원소 비를 통한 유기물 기원 추적

웨노섬 북쪽 맹그로브 생태계에서 에너지 공급원으로 추정되는 맹그로브, 표층 퇴적물, 그리고 입자유기물의 $\delta^{13}\text{C}$ 와 $\delta^{15}\text{N}$ 분석 결과, 맹그로브 잎과 호흡근의 $\delta^{13}\text{C}$ 는 각각 -31.6‰ 과 -28.2‰ 로 가장 낮았다. 그러나 $\delta^{15}\text{N}$ 은 맹그로브 잎이 -1.1‰ , 호흡근은 4.1‰ 로 맹그로브 잎과 호흡근 사이에 큰 차이를 보였다. 이러한 맹그로브의 $\delta^{13}\text{C}$

와 $\delta^{15}\text{N}$ 은 다른 연구결과와 유사하게 나타났다. 탄자니아 연안의 맹그로브 숲에서 맹그로브 *R. mucronata*를 여러 부위(꽃, 열매, 잎, 호흡근 등)별로 $\delta^{13}\text{C}$ 와 $\delta^{15}\text{N}$ 을 분석해 본 결과, 잎의 $\delta^{13}\text{C}$ 와 $\delta^{15}\text{N}$ 은 -28.3% 과 -1.8% 이며, 호흡근은 각각 -28.5% 과 1.9% 로 나타났다(Muzuka and Shunula 2006). 이는 본 연구에서 나타난 것처럼, 잎과 호흡근의 $\delta^{13}\text{C}$ 는 유사하나, $\delta^{15}\text{N}$ 은 차이를 보였다. 이러한 차이는 맹그로브 잎에서 공생하는 박테리아에 의한 질소 고정 때문인 것으로 여겨지기도 한다(Toledo et al. 1995). 이러한 경우 박테리아에 의해 고정된 질소원의 $\delta^{15}\text{N}$ 과 맹그로브 잎의 $\delta^{15}\text{N}$ 이 유사하다(Hoering and Ford 1960; Delwiche and Steyn 1970; Hoefs 1987). Mckee et al. (2002)의 레드 맹그로브 *R. mangle* 연구에서도 맹그로브 잎에서 박테리아에 의한 질소 고정이 일어나며, 이때 잎과 호흡근의 $\delta^{15}\text{N}$ 이 차이를 보일 수 있다고 제안했다. 특히 맹그로브 숲의 퇴적물에서 미생물에 의하여 유기물이 분해되며, 이때 방출된 암모니아 기체는 맹그로브 잎에서 흡수된다(Jordan et al. 1997). 즉, 본 연구에서 맹그로브 잎과 호흡근의 $\delta^{15}\text{N}$ 차이는 질소 고정 및 유기물 분해 과정

중, 잎에서 흡수하는 무기질소와 호흡근에서 흡수하는 무기질소의 기원이 다르기 때문인 것으로 추정된다(Jordan et al. 1997). 웨노섬의 맹그로브 주변에서 표층 퇴적물의 $\delta^{13}\text{C}$ 와 $\delta^{15}\text{N}$ 은 -16.4% 과 1.8% 로 나타났으며, 이는 맹그로브 잎의 $\delta^{13}\text{C}$ 와 $\delta^{15}\text{N}$ 보다 높았다(Fig. 4). 이처럼 맹그로브보다 표층 퇴적물에서 $\delta^{13}\text{C}$ 와 $\delta^{15}\text{N}$ 이 높은 것은 대기보다 ^{13}C 와 ^{15}N 이 높은 해양 기원의 질산염을 흡수한 생물들(수생식물, 미생물, 저서미세조류)로부터 유기물이 유입되었기 때문이다(Muzuka and Shunula 2006). 지방산 결과와 비교해 볼 때, 표층 퇴적물의 유기물들이 맹그로브 및 잘피의 쇄설물, 부유 플랑크톤, 미생물로부터 기원한 것으로 추정된다. 맹그로브 중에 따라 차이를 보이는 하지만, 대부분의 맹그로브 잎과 호흡근은 미생물에 의해 분해되어 퇴적층에 축적됨으로써 높은 영양염을 공급하고, 이는 다시 어린 맹그로브가 성장할 수 있는 영양원이 된다(McKee 2001).

고등류 및 집게의 영양 공급원 추적

5종의 고등류 및 집게는 탄소 14~22개의 다양한 지방산

Table 2. Relative abundance of fatty acids in 4 gastropods (*Littorina cf. scabra*, *Strombus* sp.1, *Strombus* sp.2, and *Terebralia cf. palustris*) and anomura (*Pagurus* sp.) at northern part of Weno Island, Micronesia (% of the total fatty acids; non detected are denoted with a dash). SAFA: saturated fatty acid; MUFA: monounsaturated fatty acid; PUFA: polyunsaturated fatty acid; BrFA: branched fatty acid

Fatty acids	<i>Littorina cf. scabra</i> (n=8)	<i>Strombus</i> sp.1 (n=2)	<i>Pagurus</i> sp. (n=13)	<i>Strombus</i> sp.2 (n=4)	<i>Terebralia cf. palustris</i> (n=1)
14:0	1.5	5.5	4.2	6.2	3.3
15:0	0.5	2.5	-	-	12.3
16:2	0.2	0.4	1.2	0.6	1.1
16:1 ω 9	0.1	-	0.4	0.4	0.3
16:1 ω 7	0.9	1.1	7.6	7.9	2.1
16:1 ω 5	0.2	0.1	0.8	0.2	0.3
16:0	11.6	15.4	18.9	20.0	31.3
17:0	2.0	3.0	2.8	3.5	7.4
18:2 ω 6	12.7	4.1	5.0	2.6	1.3
18:1 ω 9	5.2	5.0	6.4	15.9	4.9
18:1 ω 7	4.0	2.3	8.1	6.5	6.0
18:1 ω 5	0.2	0.2	0.4	0.2	0.5
18:0	8.6	10.0	8.2	5.5	13.9
20:4 ω 6	28.0	22.8	12.4	7.9	5.2
20:5 ω 3	6.3	8.6	13.9	14.6	3.6
20:2	11.5	8.8	1.8	0.9	1.2
20:1 ω 9	1.5	2.8	1.0	0.4	0.3
22:6 ω 3	5.0	7.4	6.7	6.7	5.3
SAFA	21.7	30.9	31.3	31.7	48.5
MUFA	12.2	11.5	24.8	31.6	14.3
PUFA	63.6	52.1	41.1	33.2	17.6
BrFA	2.5	5.5	2.8	3.5	19.6

을 함유하고 있었으며, 각 생물에 따라 상대적 지방산 구성비는 차이를 보였다(Table 2). 고둥 *L. cf. scabra*에서는 18:2 ω 6과 20:4 ω 6을 포함한 다 불포화 지방산이 우점하였으며, 포화 지방산인 16:0의 상대적 구성비도 높았다. 이와 달리 고둥 *Strombus* sp.1의 지방산 구성에서는 20:4 ω 6과 16:0이 우점하였으며, 집게 *Pagurus* sp.와 고둥 *Strombus* sp.2에서는 20:5 ω 3의 구성비가 다른 생물에 비해 높았다. 그러나 대부분의 생물에서는 박테리아 기원의 지방산이 미량으로 검출된데 반해, 고둥 *T. cf. palustris*에서는 박테리아 지방산이 총 지방산의 19.6%로 비교적 높은 구성비를 보였다. 이동성을 가진 고둥 *L. cf. scabra*와 집게 *Pagurus* sp.는 맹그로브의 줄기 또는 호흡근에 서식하며 (Stewart and Creese 2004), 이러한 서식 유형은 시료 채집 시 확인할 수 있었다. Alfaro et al. (2006)은 맹그로브 줄기에서 채집한 쇠고둥 *Lepsiella scobina*이 다량의 긴 사슬 지방산을 포함하고 있으며, 이는 맹그로브로부터 기원한 것으로 추정하였다. 그러나 본 연구지역의 모든 고둥류 및 집게에서는 긴 사슬 지방산이 검출되지 않았다. 본 연구지역에 서식하는 맹그로브와 잘피에서 긴 사슬 지방산 보다는 18:2 ω 6와 18:3 ω 3 지방산이 더 많이 함유되어 있었다(Table 2). 특히, 맹그로브에 서식하는 고둥 *L. cf. scabra*와 집게 *Pagurus* sp.에서 18:2 ω 6 지방산이 각각 12.7%와 5.0%로 나타났고, 이는 맹그로브 또는 잘피로부터 기원했을 것으로 보인다. 이뿐만 아니라, 고둥 *L. cf. scabra*와 집게 *Pagurus* sp.의 지방산에서는 박테리아와 규조류 기원의 지방산도 발견되었다(Table 2, Fig. 3). 일반적으로 고둥류를 포함한 연체동물의 섭식 형태는 퇴적물식자(deposit feeder), 부유물식자(suspension feeder), 유

기 쇄설물식자(detrital feeder) 등으로 나누어진다. 대부분의 *Littorina*는 유기 쇄설물식자이나(Marple 1966), 고둥 *L. cf. scabra*는 *Littorina* 중에서도 유일하게 수생식물을 비롯하여 맹그로브 잎을 직접 섭취하는 것으로 알려져 있다(Macnae 1963). 또한 하구역에 서식하는 집게는 대부분 잡식성으로써, 유기 쇄설물식자이다(Caine 1975). 이들은 이동성이 활발하기 때문에 주로 동물의 사체를 섭취하지만, 때때로 살아있는 미세 동물을 포식하기도 한다 (McLaughlin and Bailey-Brock 1975; Hazlett 1979). 그러나 집게는 일부 종에 따라 여러 섭식 형태를 보인다. 예를 들어, *Pagurus longicarpus*는 얇은 물이 섞이면서 형성되는 해수 표면의 포말(foam)에서 유기 쇄설물을 포집하기도 한다(Scully 1978). 반면, *P. bernhardus*는 부유물식자으로써, 체내 기관을 통해 해수를 여과하여 플랑크톤을 섭취하지만(Gerlach et al. 1976), 여과섭식(filter feeding)을 할 수 있기 때문에 유기 쇄설물로부터 동/식물의 사체를 흡수하기도 한다(Yonge 1949). 고둥 *L. cf. scabra*와 집게 *Pagurus* sp.의 $\delta^{13}\text{C}$ 는 -24.3‰과 -21.1‰이며, $\delta^{15}\text{N}$ 은 3.5‰와 2.6‰로 나타났다(Fig. 4). 이들의 $\delta^{13}\text{C}$ 는 맹그로브 잎(-31.6‰)과 호흡근(-28.2‰)보다 더 높았으나, 5종의 동물 중에서 고둥 *L. cf. scabra*는 가장 낮은 $\delta^{13}\text{C}$ 를 가졌으며, 맹그로브와의 차이가 가장 적었다(Fig. 4). 먹이망에서 같은 유기물의 기원을 가질 경우, 영양단계에 상관없이 탄소원과 유사한 $\delta^{13}\text{C}$ 값을 가지므로 탄소 기원을 추적할 수 있다. 그러나 고둥 *L. cf. scabra*와 집게 *Pagurus* sp.는 맹그로브보다 높지만, 퇴적물보다는 낮은 $\delta^{13}\text{C}$ 를 보였기에, 이들의 영양분은 표층 퇴적물보다 맹그로브에서 더 많이 기원했을 것으로 추정된다. 이와 더불어 $\delta^{15}\text{N}$ 은

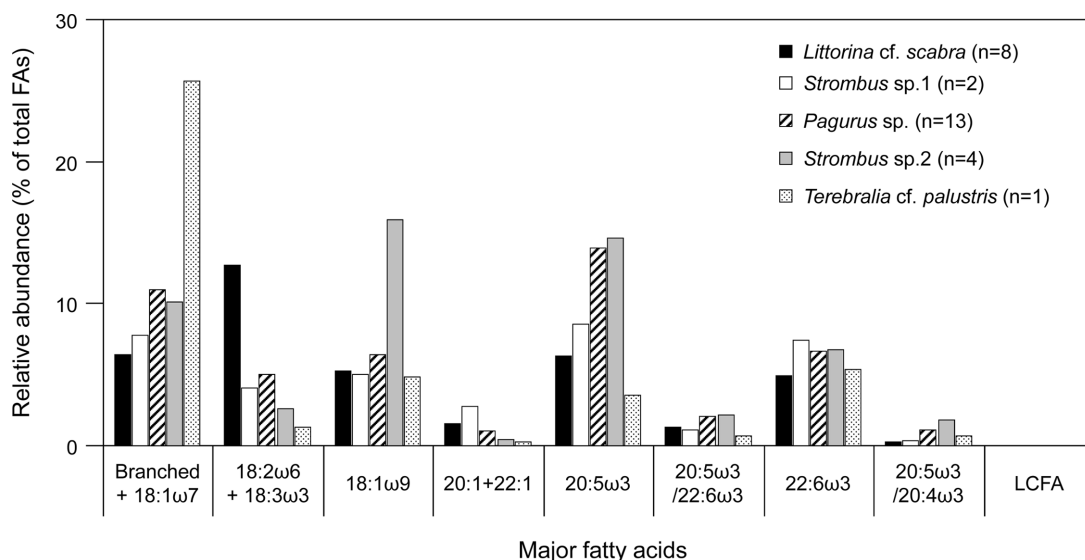


Fig. 3. Relative abundance of major source-specific fatty acids in invertebrates collected at the northern part of Weno Island

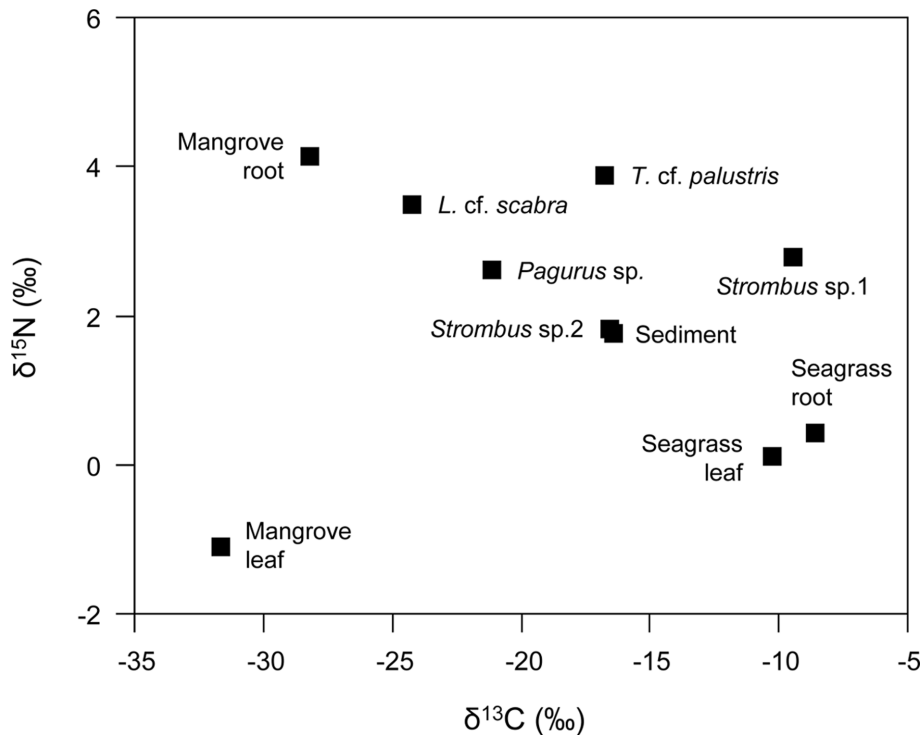


Fig. 4. $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ of potential nutritional sources and consumers from Weno Island. Nutritional sources include mangrove (*Rhizophora stylosa*), seagrass (*Enhalus acoroides*), and sediment. Consumers include 4 gastropods (*Littorina cf. scabra*, *Strombus sp.1*, *Strombus sp.2*, and *Terebralia cf. palustris*) and anomura (*Pagurus sp.*)

먹이망에서 영양단계를 나타낸다. 영양단계마다 ^{15}N 이 증가하여 영양단계와 영양단계 사이에서는 $\delta^{15}\text{N}$ 이 약 3.0-3.4‰ 정도 차이를 보인다(DeNiro and Epstein 1981; McCutchan et al. 2003). 웨노섬에서 집게 *Pagurus sp.*는 맹그로브 잎과 약 3.7‰의 차이를 보였다. 그러나 고둥 *L. cf. scabra*는 *T. cf. palustris*와 함께 본 연구에서 분석된 고둥류 및 집게 시료중 가장 높은 $\delta^{15}\text{N}$ 를 나타냈다. 퇴적물 속에 서식하는 고둥 *T. cf. palustris*는 고둥류 및 집게 중에서 18:206이 총 지방산의 1.3%로 가장 낮았으며, 박테리아 기원의 지방산이 가장 높았다(Table 2, Fig. 3). 이들은 맹그로브 잎(특히, *Rhizophoraceae* 잎) 중에서도 떨어진 잎을 주로 섭취하며, 토양에 서식하면서 일부 퇴적물 속에 있는 유기물을 흡수하기도 한다(Slim et al. 1997; Fratini et al. 2000). 이러한 지방산 구성과 더불어 서식 및 섭식 형태로부터 추정해 본 결과, 이들은 표층 퇴적물의 유기 쇄설물을 섭취하였을 것으로 사료된다. 지방산 구성 결과뿐만 아니라, 고둥 *T. cf. palustris*(-16.9‰)의 $\delta^{13}\text{C}$ 는 표층 퇴적물(-16.4‰)과 거의 유사하게 나타났다. *T. cf. palustris*를 비롯하여 고둥 *Strombus sp.2*(-16.6‰)도 표층 퇴적물의 $\delta^{13}\text{C}$ 와 약 0.2‰의 차이를 보이며 거의 같은 비율을 가졌다. 일반적으로 고둥 *Strombus sp.*는 퇴적물식자로서, 미세조류와 유기 쇄설물을 섭취한다(Chapman and

Connell 1986). 그러나 웨노섬에서 서식하는 *Strombus sp.* (*Strombus sp.1* vs. 2)의 지방산 구성뿐만 아니라, $\delta^{13}\text{C}$ 와 $\delta^{15}\text{N}$ 는 두 종간에 차이를 보였다(Fig. 3, Fig. 4). 안정동위원소 비율을 통해서 그들의 정확한 영양 공급원을 파악하기는 어려웠으나, 지방산 구성을 통해 이들이 주로 미세조류로부터 유기물을 섭취하는 것으로 추정된다.

Loneragan et al. (1997)은 호주의 하구역에서 참새우의 유기탄소 기원을 추적하기 위해 안정동위원소의 혼합 모델(mixing model)을 사용하였다.

$$P_A = (\delta^{13}\text{C}_{\text{consumer}} - f - \delta^{13}\text{C}_{\text{sourceB}}) / (\delta^{13}\text{C}_{\text{sourceA}} - \delta^{13}\text{C}_{\text{sourceB}})$$

이 혼합 모델식에서 P_A 는 먹이원 A에 대한 기여도이며, f 는 동위원소 분별작용 비(‰)를 의미한다. 이는 소비자에 대한 추정 먹이원의 기여도를 파악하기 위한 것으로, 여러 가지 먹이원간의 비교는 할 수 없으나, 두 개의 먹이원 사이에서 선호도를 표현할 수 있다. 이를 웨노섬에서 먹이원으로 추정되는 맹그로브, 잘피, 표층 퇴적물, 그리고 본 연구에서는 분석되지 않았지만, 타 지역에서의 입자유기물에 적용하여 고둥류 및 집게의 유기물이 어느 기원을 가지는지 살펴보았다. 본 연구에서는 입자유기물의 안정동위원소, 특히 질소 안정동위원소 측정시, 너무 미량이라서 분석기기에 감지되지 않아 측정할 수 없었다. 따라서 유사

열대해역에 서식하는 입자유기물의 $\delta^{13}\text{C}$ 와 $\delta^{15}\text{N}$ 을 사용하여 비교하였다. 우선, 맹그로브 및 잘피 잎(-10.4%)과 비교하였을 때, 맹그로브 잎은 *L. cf. scabra*와 *Pagurus* sp.에서 각각 0.7과 0.5로 나타나, 고등류 및 집게 중에서 가장 높은 기여도를 보였다. 그러나 이를 제외한 고등류 (*Strombus* sp., *T. cf. palustris*)는 맹그로브보다 잘피와 표층 퇴적물에 더 많이 의존하는 것으로 나타났다. 웨노섬의 고등류 및 집게에서 규조류, 박테리아, 외편모조류 등의 다양한 지방산이 검출된 것처럼, $\delta^{13}\text{C}$ 를 활용한 혼합 모델 결과에서도 대부분 입자유기물(-22.3%; Bouillon et al. 2000)의 의존도 또한 높았다. 본 연구에서의 결과와 유사하게, 뉴질랜드의 맹그로브 숲에 서식하는 여과식자와 유기 쇄설물식자도 수층의 식물플랑크톤(외편모조류)에서 기원하는 지방산을 많이 함유하고 있었다(Alfaro et al. 2006). 외편모조류는 부유성 미세조류로써, 수층에서 여과식자에게 직접적으로 쉽게 이용될 수 있다. 반면, 하구역에서 규조류는 퇴적물의 표면에 많은 양이 존재하기 때문에, 여과식자에 의하여 이용되기 위해서는 대부분 수층으로 부유되어야 한다. 따라서 대부분의 하구 생태계에서 여과식자의 지방산에는 외편모조류 마커가 규조류 마커보다 상대적으로 더 많은 비를 차지하게 된다(Alfaro et al. 2006). 하지만 웨노섬의 고등류 및 집게는 외편모조류보다 규조류와 박테리아 지방산이 더 우점하였다. 이는 웨노섬의 북쪽 맹그로브 숲에서는 해류나 생물에 의한 표층 퇴적물의 재부유가 일어나고 있으며, 이를 통하여 일부 고등류와 집게가 영양분을 섭취하였을 가능성이 높다.

본 연구에서 웨노섬 고등류 및 집게의 섭식 형태와 생화학적 방법(지방산 바이오 마커, 안정동위원소)을 통해 확인된 그들의 먹이는 주로 맹그로브로부터 기원하는 것으로 사료된다. 호주 embley 강 하구역에서 맹그로브 숲에 서식하는 sesarimid 계는 떨어진 맹그로브 잎을 섭취하고, 이들의 유충(larvae)은 어류의 중요한 먹이가 된다(Robertson and Blaber 1992). 이러한 먹이사슬을 통해 맹그로브 기원의 유기물들이 상위 포식자까지 전달될 수 있다. 따라서 웨노섬 맹그로브 숲에서도 직접적으로 맹그로브 잎을 섭취하는 고등류 및 집게는 토양에 서식하면서 배출한 배설물이 토양에 축적되고, 표층 퇴적물에 축적된 배설물과 유기 쇄설물은 퇴적물식자나 유기 쇄설물식자에 의해 섭취된다. 이뿐만 아니라 맹그로브나 잘피에 비해서는 미량이지만 수층 또는 표층 퇴적물에 서식하는 식물플랑크톤도 유기 쇄설물식자와 부유물식자에 의해 소비될 것이다. 향후 웨노섬에서 입자유기물의 안정동위원소뿐만 아니라 추가적인 맹그로브 생물종들이 분석된다면 웨노섬 북쪽 맹그로브 생태계에서의 영양흐름 및 물질순환에 대한 정확한 정보를 제공할 수 있을 것이다.

4. 결 론

마이크로네시아 웨노섬의 맹그로브 숲에 서식하는 동물들의 먹이원(맹그로브, 잘피, 표층 퇴적물, 입자유기물)과 소비자(고등류 및 집게)의 지방산 구성 및 안정동위원소 비를 통해, 에너지원으로써 맹그로브의 중요성 및 다양한 무척추동물과의 관계를 확인할 수 있었다. 특히 18:2 ω 6, 18:3 ω 3 지방산은 웨노섬 하구 생태계에서 맹그로브 및 잘피 기원을 추적할 수 있는 지방산으로써, 서식 동물들의 영양 공급원 추적에 유용한 것으로 사료된다. 고등류 및 집게는 맹그로브 및 잘피 기원의 지방산뿐만 아니라, 박테리아와 미세조류 기원의 지방산도 다량 함유하였다. 먹이원과 소비자 중, 맹그로브 잎의 탄소·질소 안정동위원소 비가 가장 낮았으며, 동·식물의 쇄설물이 축적된 표층 퇴적물은 유기물의 분해 과정을 거치면서 안정동위원소 비가 증가한 것으로 보인다. 맹그로브 생태계 구성 생물들에 대해 종에 따른 서식 및 섭식 형태와 더불어, 생화학적 방법(지방산 먹이 추적자, 안정동위원소)을 통해 고등류 및 집게의 영양원을 추적할 수 있었다. 고등 *L. cf. scabra*와 집게 *Pagurus* sp.는 맹그로브와 밀접한 관계가 있지만, 잡식성인 *Pagurus* sp.와 *T. cf. palustris*는 맹그로브 기원 유기물뿐만 아니라 입자유기물의 미세조류 및 유기 쇄설물에서도 영양분을 흡수한다. 나머지 고등 *Strombus* sp.는 종에 따라 다양한 섭식형태를 나타내며, 웨노섬에서는 여과섭식을 하면서 미세조류(규조류, 외편모조류)를 섭취한다. 이는 안정동위원소의 혼합 모델을 통해서도 확인할 수 있었다. 그러나 웨노섬 맹그로브 생태계에서 생물들의 유기물 섭취 경로는 다소 차이를 보이지만, 이들 유기물의 근원은 맹그로브로부터 기원하는 것으로 사료된다.

사 사

잘피 시료를 제공해주신 나공태 박사님과 고등류 및 집게를 동정하는데 도움을 주신 윤건택 박사님께 감사드립니다. 또한 원소-질량분석기로 안정동위원소 비를 측정할 수 있도록 협조해주신 한양대학교 생지화학연구실에 감사드립니다. 이 논문은 한국해양과학기술원 과제인 '열대 태평양기저 자원생물 생산 및 기본 연구활동 지원(PE99161)'의 지원을 받아 수행되었습니다.

참고문헌

- Alfaro AC, Thomas F, Sergent L, Duxbury M (2006) Identification of trophic interactions within an estuarine food web (northern New Zealand) using fatty acid

- biomarkers and stable isotopes. *Estuar Coast Shelf Sci* **70**:271-286
- Bachok Z, Mfilinge PL, Tsuchiya M (2003) The diet of the mud clam *Geloina coxans* (Mollusca, Bivalvia) as indicated by fatty acid markers in a subtropical mangrove forest of Lkinawa, Japan. *J Exp Mar Biol Ecol* **292**:187-197
- Belicka LL, Matich P, Jaffé R, Heithaus MR (2012) Fatty acids and stable isotopes as indicators of early-life feeding and potential maternal resource dependency in the bull shark *Carcharhinus leucas*. *Mar Ecol Prog Ser* **455**:245-256
- Benner R, Hodson RE (1985) Microbial degradation of the leachable and lignocellulosic components of leaves and wood from *Rhizophora mangle* in a tropical mangrove swamp. *Mar Ecol Prog Ser* **51**:221-230
- Bligh EG, Dyer WJ (1959) A rapid method of total lipid extraction and purification. *Can J Biochem Phys* **37**:922
- Bouillon S, Mohan PC, Sreenivas N, Dehairs F (2000) Sources of suspended organic matter and selective feeding by zooplankton in an estuarine mangrove ecosystem as traced by stable isotopes. *Mar Ecol Prog Ser* **208**:79-92
- Budge SM, Wooller MJ, Springer AM, Iverson SJ, McRoy CP, Divoky GJ (2008) Tracing carbon flow in an arctic marine food web using fatty acid-stable isotope analysis. *Oecologia* **157**:117-129
- Bunn S, Loneragan N, Kempster M (1995) Effects of acid washing on stable isotope ratios of c and n in penaeid shrimp and seagrass: Implications for food-web studies using multiple stable isotopes. *Limnol Oceanogr* **40**:622-625
- Caine EA (1975) Feeding and masticatory structures of selected Anomura (Crustacea). *J Exp Mar Biol Ecol* **18**:277-301
- Chapman HF, Connell DW (1986) Uptake and clearance of diesel alkanes from sediments by the Great Barrier Reef gastropod *Strombus luhuanus*. *Mar Biol* **92**:15-19
- Choi YU, Lee DW, Yoon KT, Oh CH, Heo SJ, Kang DH, Park HS (2013) Annual reproductive cycle of female staghorn damselfish *Amblyglyphidodon curacao* in the Chuuk Lagoon, Micronesia. *Ichthyol Res* **60**:198-201
- Cook HW, McMaster CR (1991) Fatty acid desaturation and chain elongation in eucaryotes. In: Vance DE and Vance JE (eds) *Biochemistry of lipids, lipoproteins, and membranes*. Elsevier, Amsterdam, pp 141-169
- Dalsgaard J, St John M, Kattner G, Müller-Navarra D, Hagen W (2003) Fatty acid trophic markers in the pelagic marine environment. *Adv Mar Biol* **46**:225-340
- Dawson TE, Mambelli S, Plamboeck AH, Templer PH, Tu KP (2002) Stable isotopes in plant ecology. *Annu Rev Ecol Syst* **33**:507-559
- de Boer W (2000) Biomass dynamics of seagrasses and the role of mangrove and seagrass vegetation as different nutrient sources for an intertidal ecosystem. *Aquat Bot* **66**:225-239
- Delwiche CC, Steyn PL (1970) Nitrogen isotope fractionation in soils and microbial reactions. *Environ Sci Technol* **4**:929-935
- DeNiro MJ, Epstein S (1981) Influence of diet on the distribution of nitrogen isotopes in animals. *Geochim Cosmochim Acta* **45**:341-351
- Destailats F, Angers P (2002) One-step methodology for the synthesis of FA picolinyl esters from intact lipids. *J Am Oil Chem Soc* **79**:253-256
- Devoe NN, Cole TG (1998) Growth and yield in mangrove forests of the Federated States of Micronesia. *Forest Ecol Manag* **103**:33-48
- Duarte CM, Cebrian J (1996) The fate of marine autotrophic production. *Limnol Oceanogr* **41**:1758-1766
- FAO (2004) Status and trends in mangrove area extent worldwide. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy, 277 p
- Feller IC, Whigham DF, O'Neill JP, McKee KL (1999) Effects of nutrient enrichment on within-stand cycling in a mangrove forest. *Ecology* **80**:2193-2205
- Fratini S, Cannicci S, Vannini M (2000) Competition and interaction between *Neosarmatium smithi* (Crustacea, Grapsidae) and *Terebralia palustris* (Mollusca, Gastropoda) in a Kenyan mangrove. *Mar Biol* **137**:309-316
- Gerlach SA, Ekstrøm DK, Eckardt PB (1976) Filter feeding in the Hermit Crab, *Pagurus bernhardus*. *Oecologia* **24**:257-264
- Gonneea ME, Paytan A, Herrera-Silveira JA (2004) Tracing organic matter sources and carbon burial in mangrove sediments over the past 160 years. *Estuar Coast Shelf Sci* **61**:211-227
- Graeve M, Kattner G, Hagen W (1994) Diet-induced changes in the fatty acid composition of Arctic herbivorous copepod: Experimental evidence of trophic markers. *J Exp Mar Biol Ecol* **182**:97-110
- Gu B, Schelske CL, Hoyer MV (1996) Stable isotopes of carbon and nitrogen as indicators of diet and trophic structure of the fish community in a shallow hypereutrophic lake. *J Fish Biol* **49**:1233-1243
- Hall D, Lee SY, Meziane T (2006) Fatty acids as trophic tracers in an experimental estuarine food chain: tracer transfer. *J Exp Mar Biol Ecol* **336**:42-53

- Hazlett BA (1979) Individual distance in Crustacea. IV. Distance and dominance hierarchies in *Pagurus pollicaris*. *Mar Behav Physiol* **6**:225-242
- Hoefs J (1987) *Stable Isotope Geochemistry*, third ed. Springer-Verlag, Berlin, 241 p
- Hoering TC, Ford HT (1960) The isotope effect in the fixation of nitrogen by *Azotobacter*. *J Am Chem Soc* **82**:376-378
- Holmer M, Olsen AB (2002) Role of decomposition of mangrove and seagrass detritus in sediment carbon and nitrogen cycling in a tropical mangrove forest. *Mar Ecol Prog Ser* **230**:87-101
- Jennerjahn TC, Ittekkot V (2002) Relevance of mangroves for the reduction and deposition of organic matter along tropical continental margins. *Naturwissenschaften* **89**:23-30
- Jordan MJ, Nadelhoffer KJ, Fry B (1997) Nitrogen cycling in forest and grass ecosystems irrigated with treated wastewater enriched in ^{15}N . *Ecol Appl* **7**:864-881
- Ju S-J, Harvey HR (2004) Lipids as markers of nutritional condition and diet in the Antarctic krill *Euphausia superba* and *Euphausia crystallorophias* during austral winter. *Deep Sea Res II* **51**:2199-2214
- Kelly JR, Scheibling RE (2012) Fatty acids as dietary tracers in benthic food webs. *Mar Ecol Prog Ser* **446**:1-22
- Kharlamenko VI, Kiyashko SI, Imbs AB, Vyshkvartzev DI (2001) Identification of food sources of invertebrates from the seagrass *Zostera marina* community using carbon and sulfur isotope ratio and fatty acid analyses. *Mar Ecol Prog Ser* **220**:103-117
- Khotimchenko SV (1993) Fatty acids and polar lipids of seagrasses from the Sea of Japan. *Phytochemistry* **33**:369-372
- Lecea AM, Fennessy ST, Smit AJ (2013) Processes controlling the benthic food web of a mesotrophic bight (KwaZulu-Natal, South Africa) revealed by stable isotope analysis. *Mar Ecol Prog Ser* **484**:97-114
- Lee SY (1995) Mangrove outwelling: a review. *Hydrobiologia* **295**:203-212
- Loneragan NR, Bunn SE, Kellaway DM (1997) Are mangroves and seagrass sources for penaeid prawns in a tropical Australian estuary? A multiple stable-isotope study. *Mar Biol* **130**:289-300
- Macnae W (1963) Mangrove swamps in South Africa. *J Ecol* **51**:1-25
- Marples TG (1966) A radionuclide tracer study of arthropod food chains in a *Spartina* salt marsh ecosystem. *Ecology* **47**:270-277
- McCutchan JH, Lewis WM, Kendall C, McGrath CC (2003) Variation in trophic shift for stable isotope ratios of carbon, nitrogen, and sulfur. *Oikos* **102**:378-390
- McKee K, Feller I, Popp M, Wanek W (2002) Mangrove isotopic ($\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{13}\text{C}$) fractionation across a N vs. P limitation gradient. *Ecology* **83**:1065-1075
- McKee KL (2001) Root proliferation in decaying roots and old root channels: a nutrient conservation mechanism in oligotrophic mangrove forests? *J Ecol* **89**:876-887
- McLaughlin PA, Bailey-Brock JH (1975) A new Hawaiian hermit crab of the genus *Trizopagurus* (Crustacea, Decapoda, Diogenidae), with notes on its behavior. *Pac Sci* **29**:259-266
- McMeans BC, Rooney N, Arts MT, Fisk AT (2013) Food web structure of a coastal Arctic marine ecosystem and implications for stability. *Mar Ecol Prog Ser* **482**:17-28
- Meziane T, Bodineau L, Retiere C, Thoumelin G (1997) The use of lipids markers to define sources of organic matter in sediment and food web of the intertidal salt-marsh-flat ecosystem of Mont-Saint-Michel Bay, France. *J Sea Res* **38**:47-58
- Meziane T, d'Agata F, Lee SY (2006) Fate of mangrove organic matter along a subtropical estuary: small-scale exportation and contribution to the food of crab communities. *Mar Ecol Prog Ser* **312**:15-27
- Meziane T, Tsuchiya M (2000) Fatty acids as tracers of organic matter in the sediment and food web of a mangrove/intertidal flat ecosystem, Okinawa, Japan. *Mar Ecol Prog Ser* **200**:49-57
- Meziane T, Tsuchiya M (2002) Organic matter in a subtropical mangrove-estuary subjected to wastewater discharge: Origin and utilisation by two macrozoobenthic species. *J Sea Res* **47**:1-11
- Mudge SM, East JA, Bebianno MJ, Barreira LA (1998) Fatty acids in the Ria Formosa Lagoon, Portugal. *Org Geochem* **29**:963-977
- Muzuka ANN, Shumula JP (2006) Stable isotope compositions of organic carbon and nitrogen of two mangrove stands along the Tanzanian coastal zone. *Estuar Coast Shelf Sci* **66**:447-458
- Newell RI, Marshall N, Sasekumar A, Chong V (1995) Relative importance of benthic macroalgae, phytoplankton, and mangrove sources of nutrition for penaeid prawns and other coastal invertebrates from Malaysia. *Mar Biol* **123**:595-606
- Nichols PD, Johns RB, Klumpp DW (1986) Lipid components and utilization in consumers of a seagrass community: an indication of carbon source. *Comp Biochem Phys B* **83**:103-113

- Nichols PD, Klumpp DW, Johns RB (1982) Lipid components of the seagrasses *Posidonia australis* and *Heterozostera tasmanica* as indicators of carbon source. *Phytochemistry* **21**:1613-1621
- Parrish CC, Abrajano TA, Budge SM, Helleur RJ, Hudson ED, Pulchan K, Ramos C (2000) Lipid and phenolic biomarkers in marine ecosystems: analysis and applications. In: Wangersky P (ed), *The handbook of environmental chemistry, Part D, Marine chemistry*. Springer, Berlin, Heidelberg, pp 193-233
- Pond CM, Mattacks CA, Gilmour I, Johnston M, Pillinger C, Prestrud P (1995) Chemical and carbon isotopic composition of fatty acids in adipose tissue as indicators of dietary history in wild arctic foxes (*Alopex lagopus*) on Svalbard. *J Zool* **236**:611-623
- Primavera JH (1996) Stable carbon and nitrogen isotope ratios of penaeid juveniles and primary producers in a riverine mangrove in Guimaras, Philippines. *B Mar Sci* **58**:675-683
- Rajendran N, Suwa Y, Urushigawa Y (1993) Distribution of phospholipids ester-linked fatty acids biomarkers for bacteria in the sediment of Ise Bay. *Mar Chem* **42**:39-56
- Reef R, Feller IC, Lovelock CE (2010) Nutrition of mangroves. *Tree Physiol* **30**:1148-1160
- Robertson AI, Blaber SJM (1992) Plankton, epibenthos and fish communities. In: Robertson AI, Alongi DM (eds) *Tropical mangrove ecosystems*, American Geophysical Union, Washington DC, pp 173-224
- Scully EP (1978) Utilization of surface foam as a food source by the hermit crab, *Pagurus longicarpus* Say, 1817. *Mar Behav Physiol* **5**:159-162
- Sheaves M, Molony B (2000) Short-circuit in the mangrove food chain. *Mar Ecol Prog Ser* **199**:97-109
- Slim FJ, Hemminga MA, Ochieng C, Jannink NT, Cocheret de la Morinière E, van der Velde G (1997) Leaf litter removal by the snail *Terebralia palustris* (Linnaeus) and sesarmid crabs in an East African mangrove forest (Gazi Bay, Kenya). *J Exp Mar Biol Ecol* **215**:35-48
- Stewart MJ, Creese RG (2004) Feeding ecology of whelks on an intertidal sand flat in north-eastern New Zealand. *New Zeal J Mar Fresh* **38**:819-831
- Stoner AW, Zimmerman RJ (1986) Food pathways associated with penaeid shrimps in a mangrove-fringed estuary. *Fish Bull US* **86**:543-555
- Suárez N, Medina E (2005) Salinity effect on plant growth and leaf demography of the mangrove, *Avicennia germinans* L. *Trees* **19**:722-728
- Toledo G, Bashan Y, Soeldner A (1995) Cyanobacteria and black mangroves in Northwestern Mexico: colonization, and diurnal and seasonal nitrogen fixation on aerial roots. *Can J Microbiol* **41**:999-1011
- Vizzini S, Sara G, Michener RH, Mazzola A (2002) The role and contribution of the seagrass *Posidonia oceanica* (L.) Delile organic matter for secondary consumers as revealed by carbon and nitrogen stable isotope analysis. *Acta Oecol* **23**:277-285
- Wafar S, Untawale AG, Wafar M (1997) Litter fall and energy flux in a mangrove ecosystem. *Estuar Coast Shelf Sci* **44**:111-124
- Wannigama GP, Volkman JK, Gillan FT, Nichols PD, Johns RB (1981) A comparison of lipid components of the fresh and dead leaves and pneumatophores of the mangrove *Avicennia marina*. *Phytochemistry* **20**:659-666
- Yonge CM (1949) *The sea shore*. London, Collins, 311 p

Received Sep. 9, 2013

Revised Oct. 30, 2013

Accepted Nov. 22, 2013