

ORIGINAL ARTICLE

안정동위원소 분석을 이용한 이식된 지네지누아리의 생태학적 기능 평가

전찬길 · 김형근 · 박현제*

강릉원주대학교 해양자원육성학과

Isotopic Assessment of Ecological Function of a Transplanted Macroalgal Habitat (*Grateloupia asiatica*)

Chan-Kil Chun, Hyung-Geun Kim, Hyun Je Park*

Department of Marine Bioscience, Gangneung-Wonju National University, Gangneung 25457, Korea

Abstract

To assess the trophic function of an artificial macroalgal habitat, we compared the stable carbon and nitrogen isotope ratios of two amphipods (*Caprella* sp. and *Ampithoe* sp.) and their potential food sources in a transplanted macroalgal habitat (*Grateloupia asiatica*) with those in a natural habitat. There were no significant differences in the isotopic values of both consumers and their potential food sources between the transplanted and natural habitats. Such isotopic similarities between the two sites indicate a comparable resource consumer relationship. Additionally, our results showed similar isotopic niche areas and high dietary overlap (>65%) of the two amphipods between the transplanted and natural sites, suggesting that the transplanted habitat plays ecological roles similar to the natural habitat. Overall, isotopic assessment can provide information on the trophic function of diverse transplanted macroalgal habitats and improve post-monitoring efforts in the management of artificial ecosystems.

Key words : Isotopic assessment, Transplantation, *Grateloupia asiatica*, Stable isotopes, Amphipods, Isotopic niche areas

1. 서론

홍조류 지누아리속(Genus, *Grateloupia*)은 열대부터 온대해역에 서식하는 지누아리과(Family, Halymeniaceae) 내에서도 가장 많은 종을 포함하고 있으며, 전 세계적으로 약 96종이 분포하는 것으로 알려져 있다(Lee et al., 2009). 우리나라에서는 지누아리속에 19종이 서식하는

것으로 기록되어 있으며, 동해안과 남해안의 파도의 영향을 많이 받는 조건대 하부에 주로 서식하는 것으로 보고되었다(Kim and Park, 2006). 독특한 식감으로 강원도 연안의 어민들이 오랜 기간 식량자원으로 이용해왔으며, 지누아리속 중에 지누아리사촌(*G. acuminata*), 지네지누아리(*G. asiatica*) 그리고 뺨지누아리(*G. divaricata*)는 다른 해조류에 비해 아연성분의 함량이 높아 기능성

Received 14 October, 2020; Revised 27 October, 2020;

Accepted 28 October, 2020

*Corresponding author: Hyun Je Park, Department of Marine Bioscience, Gangneung-Wonju National University, Gangneung 25457, Korea
Phone: +82-33-640-1680
E-mail: phj13579@gwnu.ac.kr

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.

© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

식품으로도 개발 가능한 것으로 알려져 있다(Caliceti et al., 2002; Lee et al., 2011). 지누아리속 해조 종의 다양한 유용성에도 불구하고, 지누아리류의 생산량은 현장에서 과도한 채취와 서식지 감소로 인해 급격히 감소하였으며, 대량 생산을 위한 양식 방법의 개발과 서식지 복원이 시급히 필요한 것으로 알려져 있다(Kim and Park, 2006).

전 세계적으로 연안역의 무분별한 개발, 인간 활동에 의한 다양한 환경오염 그리고 백화현상 등으로 인해 해조군락은 감소하거나 파괴되어 왔다(Mann, 2000; Steneck et al., 2002). 해조군락은 중요한 일차생산자로서 동물들의 먹이공급원으로서 유기물을 생성하며, 엽상체를 생활기반으로 다양한 부착동물들에게 서식처를 제공하고, 저서동물부터 어류에 이르는 많은 동물들의 산란장 및 은신처를 제공하여 높은 생산성과 풍부한 생물 다양성을 보이는 중요한 생태적 역할을 한다(Duggins et al., 1989; Nybakken and Bertness, 2005). 우리나라에서는 이러한 해조군락의 복원을 위해 해조류 이식에 의한 바다숲 복원 연구와 해조류 이식 방법에 대한 다양한 연구가 수행되었다(Choi et al., 2002; Kim et al., 2006; Cho et al., 2007; Kwak et al., 2014). 그러나 해조군락 복원 성공에 대한 평가는 복원 이후에 해조류의 성장 변화 및 서식하고 있는 저서동물과 어류의 군집구조 변화를 자연해조장과 비교하여 평가하는 것이 대부분이다(NFRDI, 2006). 해조류는 소형저서동물들의 먹이로서 직/간접적으로 이용되고, 이후 먹이연쇄과정을 통해 상위영양단계의 동물들에게 전달되는 과정을 거쳐 연안생태계 전반의 물질순환에 중요한 역할을 하는 것으로 알려져 있다(Jennings et al., 1997). 따라서 자연 해조군락과 비교하여 복원된 해조군락의 해조류가 부착동물을 포함하는 동물들의 생물생산에 어떤 역할을 하고 있는지에 대한 과학적 자료는 복원에 대한 평가와 생태학적 중요성을 이해하기 위한 기본적인 정보로서 활용될 수 있다(Kang et al., 2008).

해조장을 포함하여 연안생태계는 다양한 유기물 공급원이 존재하기 때문에 동물들의 이차생산에 대해 영양기저(trophic base)로서 기초생산자들의 상대적인 기여를 평가하는 것은 쉽지 않다. 이러한 점에서 소비자 동물이 이용하는 먹이원을 밝히기 위해 화학적 추적자로서 탄소 및 질소안정동위원소 비 값($\delta^{13}\text{C}$ 과 $\delta^{15}\text{N}$)이 효과적으로

이용될 수 있다(Fry and Sherr, 1984; Layman et al., 2012; Park et al., 2016). 안정동위원소 비값을 이용한 방법은 동물이 먹이를 섭식하게 되면 대사과정을 거치면서 먹이원이 가지는 원래의 특성은 사라지는 반면 안정동위원소 조성은 동물의 생체에 반영되는 특성을 이용하여 소비자 동물이 이용하는 먹이의 기여도를 평가할 수 있다(Michener and Schell, 1994). 대개 안정동위원소 비 값을 분석할 경우 먹이와 소비자 동물 사이에 영양단계당 탄소는 1% 이내, 질소는 2~4% 정도가 높아지는 동위원소 분별효과(isotopic fractionation)가 발생하여, $\delta^{13}\text{C}$ 값은 동물의 먹이원을 밝히는데 이용되고 $\delta^{15}\text{N}$ 값은 영양단계를 연구하는데 유용하게 이용될 수 있다(DeNiro and Epstein, 1978; Fry and Sherr, 1984; Minagawa and Wada, 1984; Post, 2002).

해조장 복원 및 관리 그리고 해조류 양식을 위해서는 해조류 이식 이후에 초기양성 과정에서 부착동물들의 생태 상태에 대한 정보가 필수적이다(Hwang et al., 2006). 특히, 해조류 초기양성 단계에서는 조식동물로서 바다대벌레류(Caprellids)와 옆새우류(Gammarids)가 대표적인 것으로 알려져 있다(Sano et al., 2003; Yoo et al., 2007). 본 연구에서는 대량 양식 연구를 위해 강릉 연안에 이식된 지네지누아리 개체에 초기양성단계에서 부착된 저서단각류인 바다대벌레(*Caprella* sp.)와 참옆새우(*Ampithoe* sp.)가 이용하는 유기물의 기원과 상대적인 중요성을 평가하여 이들의 섭식생태를 밝히고자 하였다. 이를 위하여 부착된 바다대벌레와 옆새우 그리고 이들의 잠재먹이원들의 탄소 및 질소안정동위원소 분석을 실시하고 대조구로서 자연 지누아리 군락의 동일종과 비교 분석하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 연구지역

2020년 7월 강원도 강릉시 사근진의 조해대 지누아리 이식정점과 자연정점에서 조사를 실시하였다(Fig. 1A). 지누아리 이식은 사근진 해변가 암반 지역에 4월과 6월에 걸쳐 2차례 진행하였다. 이식 전에 암반 표면에 부착한 모든 생물을 전량 제거한 후 이식을 진행하였다. 이식은 플라스틱 재질의 판 위에 지누아리가 부착된 종묘판을 고정시켜 이식지 암반에 부착하였다(Fig. 1B). 7월 중

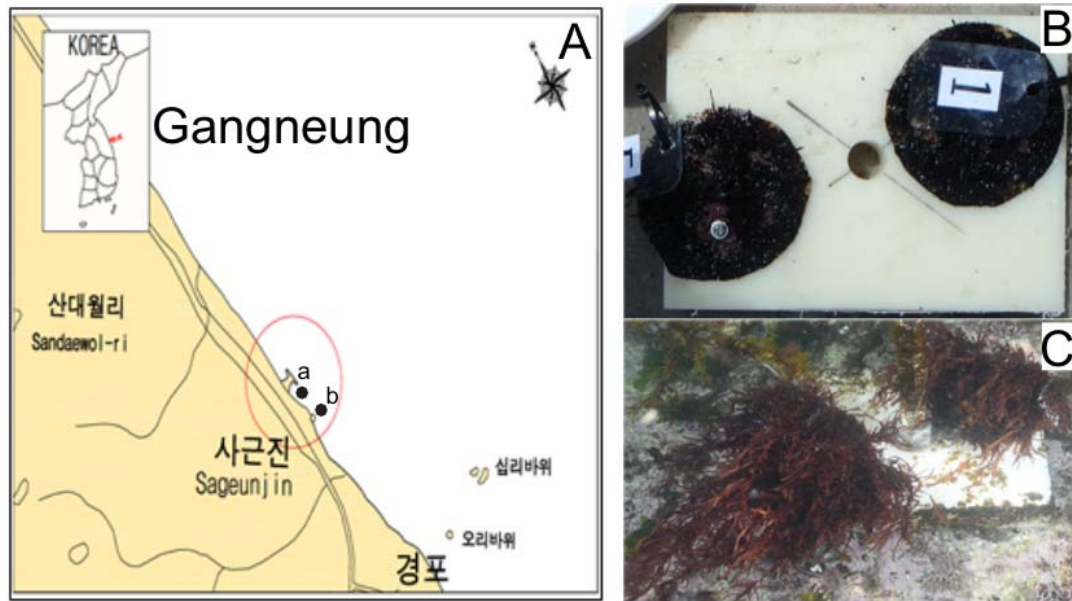


Fig. 1. Study areas on the eastern coast of Korea (A). Detailed location (37°48'84" N, 128°53'90" E) of macroalgae *Grateloupia asiatica* transplantation (a) and natural macroalgae (b) sites. Initial transplant stage of *G. asiatica* on a plastic board (B) and recent transplant view (C).

조사점의 수온은 21.1~22.8°C, 그리고 용존산소는 11.1~11.6 mg/L로 나타났다. 이식해역으로 선정된 사근진 해역은 외해에 접해있고 파도의 영향을 많이 받는 곳으로 해류 소통은 원활하며, 조간대 하부와 조하대에 빼지누아리와 지네지누아리가 서식하는 것으로 알려져 있다.

2.2. 시료채집 및 처리

저서단각류의 2020년 7월 강원도 강릉시 사근진의 조하대 수심 1~3 m에 이식된 지누아리 정점과 근처의 자연 지누아리 정점을 대상으로 조사를 실시하였다. 소비자 동물인 저서단각류의 생체내에서 먹이원의 안정동위원소 비 값을 반영하기 위한 회전시간(tissue turnover time)을 고려하여 시료채집 시기를 결정하였다(Remy et al., 2017). 각 조사 정점에서 잠재 먹이원(부유입자유기물과 해조류)과 저서무척추동물(바다대벌레와 참옆새우)을 채집하였다. 잠재 먹이원으로서 수주내(수심 1~3 m)의 부유입자유기물(Suspended Particulate Organic Matter, SPOM)은 van Dorn 채수기를 이용하여 수심 약 1 m 정도의 아표층수 60 L 이상을 채수하여 200 µm

의 net로 동물플랑크톤이나 크기가 큰 입자물질을 제거한 후, 다시 20 µm net에 여과시켜 20 µm 이상의 micro-phytoplankton으로 주로 구성된 coarse POM(CPOM)을 포집하였다. 이후 20 µm net에 여과된 해수를 450°C에서 4시간 동안 미리 태워서 준비한 GF/F 필터지(공극 0.7 µm)를 이용하여 다시 여과하여 pico-와 nano-plankton으로 구성된 fine POM(FPOM)을 포집하였다. net(20 µm)와 필터지(GF/F)에 포집된 각각의 POM은 동결건조하여 분석시까지 데시케이터에 보관하였다. 지네지누아리는 SCUBA diving을 통해 방형구(0.2 × 0.2 m)를 이용하여 직접 손으로 채집하였다. 채집한 지누아리는 냉장 보관하여 실험실로 운반한 후, 열체 표면에 붙은 이물질을 제거하고 시료를 냉동 보관하였다.

안정동위원소 분석을 위한 소비자 동물들은 조사 정점 각각에서 지누아리 열체를 채집하여 실험실로 냉장 보관하여 이동한 후, 현미경하에서 지누아리에 부착한 바다대벌레와 옆새우를 핀셋으로 채집하였다. 채집된 시료는 동정한 후 안정동위원소 분석을 위하여 1N 염산을 이용하여 시료내에 포함되어 있는 무기탄소(inorganic

carbonate)를 제거하고 다시 증류수로 세척한 후 시료를 냉동 보관하였다. 냉동된 잠재먹이원과 동물 시료는 -70°C 이하에서 동결건조하고 분말화한 뒤 분석 시까지 데시케이터에 보관하였다.

2.3. 탄소 및 질소안정동위원소 분석

잠재 먹이원(부유입자유기물과 해조류)에서 필터지에 포집된 POM 시료들은 tin disk에 밀봉하였고, 동물체인 바다대벌레와 참옆새우 시료는 균질화(homogenized)한 후 1.0~1.5 mg을 tin capsule에 넣고 밀봉하였다. 밀봉된 시료들은 원소분석기(Vario MICRO Cube elemental analyzer; Elementar Analysensysteme, Hanau, Germany)에 주입하여 고온(1,030°C)에서 연소시키고, 안정동위원소 분석을 위한 carrier gas로는 헬륨(He)을 이용하였다. 연소로 발생하는 CO₂ 와 N₂ 가스에 대하여 안정동위원소질량분석기(continuous flow isotope ratio-mass spectrometry, CF-IRMS; IsoPrime100; Cheadle Hulme, UK)를 이용하여 탄소 및 질소안정동위원소 비를 분석 하였다. 잠재 먹이원과 부착동물이 가지는 안정동위원소 비 값은 다음과 같은 식에 의해 국제 표준물질(International standard material)에 대한 시료의 비 값 변위를 천분율(‰)로 나타내어 δ 기호로 표현하였다: $\delta X(\%) = [(R_{\text{sample}}/R_{\text{standard}}) - 1] \times 10^3$, 여기서 X는 ¹³C 또는 ¹⁵N, R은 ¹³C/¹²C 또는 ¹⁵N/¹⁴N 비를 나타낸다.

사용한 탄소안정동위원소 표준물질은 VPDB (Vienna PeeDee Belemnite)로, 질소안정동위원소 표준물질은 air N₂로 국제표준 기준을 사용하였다. 안정동위원소 비 값을 알고 있는 국제적으로 공인된 표준물질[IAEA CH-6, sucrose C₁₂H₂₂O₁₁와 IAEA-N1, ammonium sulfate [NH₄]₂SO₄; National Institute of Standards and Technology (NIST)]을 이용하여 정밀도와 재현성을 확인하였고, urea를 이용하여 20회 이상의 반복실험에서 얻어진 값들에 대한 표준편차는 $\delta^{13}\text{C}$ 은 0.13% 그리고 $\delta^{15}\text{N}$ 은 0.22% 이하를 나타내었다.

2.4. 통계분석

모든 안정동위원소 분석 자료는 SPSS software (version 21.0, IBM corp., USA)를 이용하여 normality와 homogeneity 검정을 실시하였다. PRIMER 프로그램(version 6, PERMANOVA + PRIMER add-on)을

이용하여 잠재 먹이원(CPOM, FPOM 그리고 지네지누아리)들과 지누아리에 부착한 바다대벌레와 참옆새우 각각에 대한 $\delta^{13}\text{C}$ 과 $\delta^{15}\text{N}$ 값의 차이와 이식정점과 자연정점들 사이에 차이를 알아보기 위해 PERMANOVA (permutational multivariate analysis of variance) 검증을 실시하였다. 그리고 바다대벌레와 참옆새우 사이에 $\delta^{13}\text{C}$ 과 $\delta^{15}\text{N}$ 값 각각의 차이를 알아보기 위하여 student *t*-test를 통하여 비교 검정하였다.

지누아리 이식정점과 자연정점의 부착 단각류들의 생태지위면적(isotopic niche area)을 평가하기 위하여 R 프로그램(version 3.5.3, R Core Team, 2019)에서 SIBER (Stable Isotope Bayesian in R) 모델을 이용하였다. SIBER를 이용하여 동위원소 비값을 2차원에 도사한 생태지위면적의 총 면적 TA(total area)와 적은 수의 표본수를 고려하여 보정된 모델 결과인 SEAc (standard ellipse area)를 계산하였다(Jackson et al., 2011). 또한 이식정점과 자연정점의 바다대벌레와 참옆새우 각각에 대한 생태지위중첩(isotopic niche overlap)을 'MaxLikOverlap' 기능을 이용하여 계산하였다 (Catry et al., 2016).

3. 결과 및 고찰

3.1. 잠재 먹이원의 안정동위원소 조성

소비자 동물의 잠재 먹이원으로서 부유입자유기물과 지네지누아리의 탄소 및 질소안정동위원소 비값을 Table 1에 제시하였다. CPOM, FPOM 그리고 지네지누아리의 탄소 및 질소안정동위원소 비값을 비교한 결과, 이식정점과 자연정점 간에는 유의한 차이를 보이지 않았으나(PERMANOVA, pseudo- $F_{1, 35} = 0.75$, $p = 0.484$), 잠재 먹이원들 간에는 유의한 차이를 보였다 (pseudo- $F_{2, 35} = 263.44$, $p = 0.001$). 두 요인들 간에 상호작용(interaction, 정점×먹이원)은 유의하지 않았다 (pseudo- $F_{2, 35} = 0.13$, $p = 0.954$). 이식정점과 자연정점에서 CPOM, FPOM과 지네지누아리의 $\delta^{13}\text{C}$ 값은 각각 $-21.2(\pm 0.4)$ 와 $-21.0(\pm 0.5)\%$, $-21.6(\pm 0.3)$ 와 $-21.5(\pm 0.4)\%$ 그리고 $-16.6(\pm 0.5)$ 와 $-16.8(\pm 0.4)\%$ 의 범위를 나타내어 두 정점 모두에서 지네지누아리가 부유입자유기물에 비해 유의하게 높은 값을 보였다. 이식정점과 자연정점에서 세 시료의 $\delta^{15}\text{N}$ 값은 각각 $3.9(\pm 0.3)$ 와

Table 1. $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ values of potential food sources (*Grateloupia asiatica*; CPOM, coarse particulate organic matter; FPOM, fine particulate organic matter) at the transplanting (*G. asiatica*) and natural (control) sites. PERMANOVA test of $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ values for each potential food source between the two sites (significance at $p < 0.05$). Data represent means \pm 1 SD.

Potential food source	Transplanting site					Natural site					PERMANOVA <i>p</i> -value
	$\delta^{13}\text{C}$			$\delta^{15}\text{N}$		$\delta^{13}\text{C}$			$\delta^{15}\text{N}$		
	n	Mean	SD	Mean	SD	n	Mean	SD	Mean	SD	
<i>Grateloupia asiatica</i>	9	-16.6	0.5	5.2	0.5	8	-16.8	0.4	5.4	0.4	0.890
CPOM	8	-21.2	0.4	3.9	0.3	8	-21.0	0.5	4.0	0.4	0.484
FOM	4	-21.6	0.3	2.9	0.3	4	-21.5	0.4	2.9	0.2	0.720

4.0(\pm 0.4)%, 2.9(\pm 0.3)와 2.9(\pm 0.2)% 그리고 5.2(\pm 0.5)와 5.4(\pm 0.4)%의 범위를 나타내어 $\delta^{13}\text{C}$ 값과 비슷한 경향을 보였다. 잠재 먹이원 각각에 대하여 동위원소 비값을 이식정점과 자연정점 간에 비교한 결과, CPOM, FPOM과 지네지누아리 모두 통계적으로 유의한 차이를 보이지 않았다(각각, PERMANOVA, $p = 0.484$, $p = 0.720$, 그리고 $p = 0.890$).

본 연구에서 측정된 CPOM과 FPOM의 값은 해양 식물플랑크톤 기원의 유기물이 가지는 일반적인 값을 보였으며, 한반도 연안에서 보고된 값들과도 매우 유사하였다(Fry and Sherr, 1984; Kang et al., 2008; Park et al., 2020). 이러한 결과는 조사해역의 부유입자유기물이 다른 유기물 공급원 보다는 식물플랑크톤 기원의 유기물이 주요 구성 요소라는 것을 잘 나타낸다(Kang et al., 2009; Park et al., 2020). 또한 CPOM과 FPOM의 동위원소 비값은 유의한 차이를 보였는데(pseudo- $F_{1, 22} = 38.31$, $p = 0.001$), 비슷하게 이전의 여러 연구들에서 부유입자유기물의 크기에 따른 동위원소 비값의 차이를 보고하였다(Gearing et al., 1984; Rolff, 2000; Kang et al., 2009). 식물플랑크톤 기원의 부유입자유기물의 경우 수온, $p\text{CO}_2$, 영양염 농도, 식물플랑크톤 생물량, 생산력 그리고 종조성 등의 다양한 환경요인들과 식물플랑크톤의 특성에 따라 영향을 받는 것으로 이전의 연구들에서 보고되었다(Cifuentes et al., 1988; Rolff, 2000; Kang et al., 2009).

해조류의 경우 종에 따라 그리고 같은 종이라도 환경요인에 의해 매우 넓은 범위의 안정동위원소 비값을 보이는 것으로 알려져 있다(Dauby, 1989; Kang et al., 2007). 특히, 본 연구와 유사한 환경의 동해안에서 채집

된 해조류 군집의 경우 $\delta^{13}\text{C}$ 과 $\delta^{15}\text{N}$ 값이 각각 -34.8 ~ -10.3(\pm 2.0)% 그리고 0.9 ~ 4.7(\pm 1.0)%까지 매우 넓은 범위를 보였다(Kang et al., 2008). 본 연구에서 측정된 지네지누아리의 안정동위원소 비값은 동해안에서 채집된 해조류들의 동위원소 비값의 범위 내에 존재하였으며, 같은 과에 속한 참도박(*Grateloupia elliptica*; Kang et al., 2007, -15.7 \pm 0.4와 3.8 \pm 0.4; Kang et al., 2008, -14.8 \pm 2.2와 4.4 \pm 1.1)에 비하여, $\delta^{13}\text{C}$ 값은 낮고 $\delta^{15}\text{N}$ 값은 다소 높은 것으로 나타났다. 해조류의 동위원소 비값은 수온, 광조건, 그리고 영양염 농도 등 다양한 생육 환경조건에 영향을 받는 것으로 알려져 있다(McClelland and Valiela, 1998; Wang and Yeh, 2003).

3.2. 부착 단각류의 안정동위원소 조성

지네아리에 부착한 바다대벌레와 참옆새우의 탄소 및 질소안정동위원소 비값을 비교한 결과(Table 2), 이식정점과 자연정점 간에는 유의한 차이를 보이지 않았으나(PERMANOVA, pseudo- $F_{1, 44} = 0.80$, $p = 0.490$), 두 종간에는 유의한 차이를 보였다(pseudo- $F_{1, 44} = 35.73$, $p = 0.001$). 각각 종의 동위원소 비값에 대하여 이식정점과 자연정점 간 비교한 결과 두 종 모두 유의한 차이를 보이지 않았다(PERMANOVA, 바다대벌레, $p = 0.842$; 참옆새우, $p = 0.814$). 바다대벌레와 참옆새우의 $\delta^{13}\text{C}$ 값은 이식정점에서는 각각 -20.0(\pm 0.5)과 -18.7(\pm 0.6)% 그리고 자연정점에서는 각각 -20.1(\pm 0.4)과 -18.8(\pm 0.5)%의 범위를 보여, 두 정점 모두에서 바다대벌레에 비해 참옆새우의 $\delta^{13}\text{C}$ 값이 큰 것으로 나타났다(각각, Student t -test, $p < 0.001$, $p < 0.001$). 반면에, $\delta^{15}\text{N}$ 값은 각각 7.1(\pm 0.3)과 6.7(\pm 0.4)% 그리고 7.2(\pm 0.4)와 6.8(\pm 0.5)%로서, 바다대벌레가 참옆새우에 비해 큰

Table 2. $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ values of *Caprella* sp. and *Ampithoe* sp. at the transplanting (*Grateloupia asiatica*) and natural (control) sites. PERMANOVA test of $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ values for each macrobenthic consumer between the two sites (significance at $p < 0.05$). Data represent means \pm 1 SD. Isotopic niche areas of *Caprella* sp. and *Ampithoe* sp. by the total area (TA) and standard ellipse area (SEAc) and isotopic niche overlaps (percentage) between the two sites using the Stable Isotope Bayesian Ellipse in R (SIBER) procedure.

Species name	Transplanting site					Natural site					PERMANOVA <i>p</i> -value
	n	$\delta^{13}\text{C}$		$\delta^{15}\text{N}$		n	$\delta^{13}\text{C}$		$\delta^{15}\text{N}$		
		Mean	SD	Mean	SD		Mean	SD	Mean	SD	
<i>Caprella</i> sp.	12	-20.0	0.5	7.1	0.3	12	-20.1	0.4	7.2	0.4	0.842
<i>Ampithoe</i> sp.	12	-18.7	0.6	6.7	0.4	12	-18.8	0.5	6.8	0.5	0.814

Isotopic niche areas	TA	SEAc	TA	SEAc	Percentage overlap
<i>Caprella</i> sp.	1.24	0.55	1.08	0.50	70.9
<i>Ampithoe</i> sp.	1.23	0.73	1.40	0.78	65.4

것으로 나타났다(각각, Student *t*-test, $p = 0.015$, $p = 0.038$). 두 정점의 동일한 동물들 사이에 동위원소 비값의 차이가 없다는 것은 각각의 소비자 동물들이 비슷한 먹이원을 이용하고 있음을 보여준다. 대개 일차생산자 이식을 통한 서식처 조성은 먹이망을 지지하는 유기물 조성에 직접적 또는 간접적으로 영향을 미칠 수 있으며, 소비자 동물에 대한 먹이원의 기여는 이식의 생태적 기능 평가에 대한 근거가 된다(James et al., 2020). 이식정점과 자연정점 사이에 소형 갑각류들의 비슷한 먹이원은 두 서식처 사이에 생태적 기능에 차이가 없음을 반영하며, 이식된 지누아리가 동물들에게 적절한 서식처를 제공하고 있음을 시사해준다(Kang et al., 2008).

소비자 동물들의 동위원소 비값은 이들의 섭식양식(feeding strategy)과 밀접한 관련이 있는 것은 잘 알려져 있다(Grall et al., 2006). 해조장과 잘피장처럼 연안의 특정 서식처에서 생활하는 단각류는 일차생산자에서 유래된 유기쇄설입자를 직접적으로 섭식하거나, 유기쇄설입자를 먹이로하는 미소동물을 섭식하는 것으로 알려져 있다(Jeong et al., 2004; Yoo et al., 2007). 동위원소 분별효과를 고려하면, 본 연구에서 두 소비자 동물들은 지누아리를 직접적으로 섭식하기 보다는 수중의 부유입자 유기물(CPOM과 FPOM)과 함께 지누아리 기원의 유기쇄설물을 이용하는 것으로 생각된다(Fig. 2). 일반적으로 연안생태계에서 해조류의 높은 기초 생산을 바탕으로 해조류 기원의 유기쇄설물이 일차소비자인 부유물 섭식자나 퇴적물 섭식자의 먹이원으로서 중요한 역할을 한다

는 것은 잘 알려져 있다(Fredriksen, 2003; Kang et al., 2007). 또한, 본 연구에서 이식정점과 자연정점 모두에서 바다대벌레와 참옆새우의 $\delta^{13}\text{C}$ 과 $\delta^{15}\text{N}$ 값이 차이를 보이는 것은 정점에 상관없이 이들이 이용하는 유기물의 상대적 중요성이 다른 것을 잘 보여준다. 비록 두 종은 같은 단각류에 속하여 비슷한 섭식 양식을 가질 것으로 추측되었으나, 이들 각각의 생리-생태 특성의 차이에 따라 이용하는 먹이원이 상대적으로 다른 점이 반영된 것으로

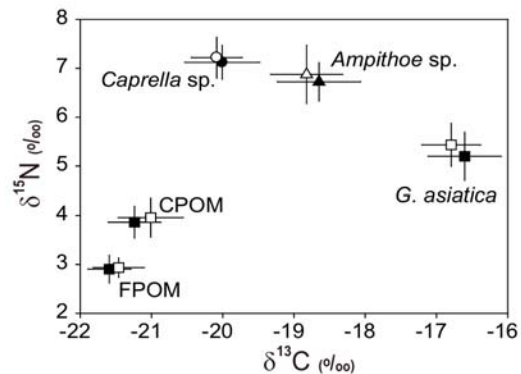


Fig. 2. Dual isotope plots of $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ values of two macrobenthic consumers (circles, *Caprella* sp. and triangles, *Ampithoe* sp.) at the transplanting (black) and natural (white) sites. Values of the potential food sources are illustrated by squares: *G. asiatica*, *Grateloupia asiatica*; CPOM, coarse particulate organic matter; FPOM, fine particulate organic matter). Values are means (‰) \pm 1 SD.

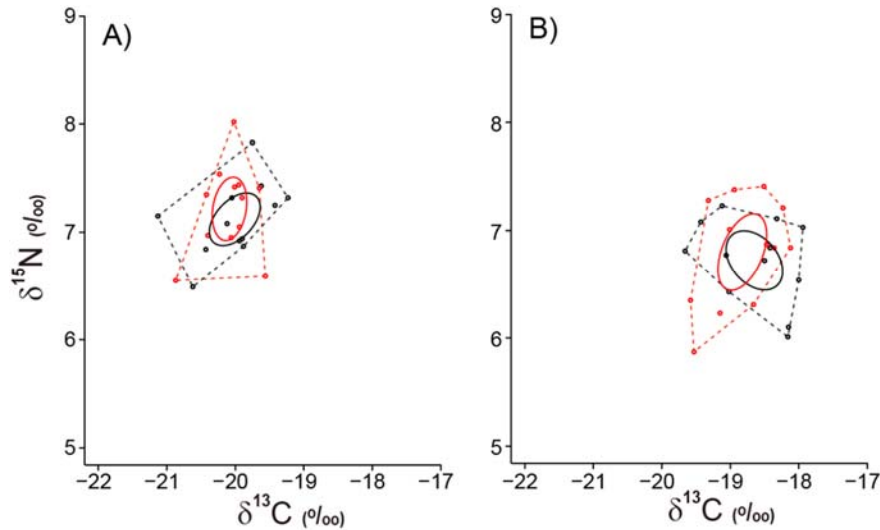


Fig. 3. Isotopic niche areas of two macrobenthic consumers (A, *Caprella* sp. and B, *Amphithoe* sp.) estimated as the total area (TA, dotted lines) and standard ellipse area (SEAc, solid lines) at the transplanting (black color, *Grateloupia asiatica*) and natural (red color, control) sites, using the Stable Isotope Bayesian Ellipse in R (SIBER) procedure.

보인다. 이와 같은 결과는 다른 생태계에서 같은 섭식양식을 가진 비슷한 종들이 생리·생태학적 특성의 차이로 인해 먹이원을 달리한다는 것이 보고된 바 있다(Grall et al., 2006; Kang et al., 2009).

3.3. 부착 단각류의 안정동위원소 기반 생태지위면적

바다대벌레와 참옆새우의 안정동위원소 비값을 이용하여 각각의 생태지위면적을 계산한 결과를 Table 2에 나타내었다. 바다대벌레의 TA와 SEAc 값은 이식정점에서는 각각 1.24와 0.55 그리고 자연정점에서는 1.08과 0.50으로 나타났다. 참옆새우의 TA와 SEAc 값은 이식정점과 자연정점에서 각각 1.23과 0.73 그리고 1.40과 0.78로 나타나 두 종 모두 정점 간에 비슷한 값을 보였다. 이식정점과 자연정점 사이에 소비자 동물의 동위원소 비값의 분포에 대하여 생태지위중첩을 분석한 결과, 바다대벌레는 70.9% 그리고 참옆새우는 65.4%로 높은 값을 보였다(Fig. 3). 안정동위원소 분석 기반의 생태지위면적 계산은 다양한 환경요인들과 상호작용하여 나타나는 소비자 동물들의 먹이 다양성과 생태적 지위 그리고 먹이 경쟁 등에 대한 정보를 정량적으로 표현할 수 있는 방법으로 알려져 있다(Newsome et al., 2007). 특히, 다른 서식처에 서식하는 동물들의 TA와 SEAc 값은 서식처가 소

비자 동물들의 먹이에 영향을 주는지를 종합적으로 비교·평가할 수 있는 지표로서 활용될 수 있다(Layman et al., 2007). 본 연구에서, 이식정점과 자연정점 사이에 동물들의 비슷한 TA와 SEAc 값은 정점에 관계없이 두 종 모두 비슷한 먹이 다양성과 생태적 지위를 가지는 것을 의미한다(Rigolet et al., 2015). 또한 두 정점 사이에 동일종들의 60% 이상의 높은 생태지위중첩률은 동물들의 먹이환경과 먹이선택에 있어 매우 높은 유사성을 가지는 것을 시사한다(Guzzo et al., 2013). 그러므로 지누아리 이식을 통한 서식처 조성이 자연 지누아리 군락과 같이 부착 단각류를 위한 먹이공급의 생태적 기능을 하고 있는 것으로 판단된다.

4. 결론

결론적으로 본 연구에서는 이식된 지누아리 서식처와 대조구의 부착 단각류들이 비슷한 먹이 이용성을 보여 지누아리의 이식이 동물들에게 자연 생태계와 같은 먹이 공급의 기능을 하는 것으로 나타났다. 또한 두 서식처 사이에 동물들의 비슷한 생태지위면적과 높은 생태지위중첩률은 이식된 지누아리 서식처가 자연 서식처와 같이 비슷한 생태계 서비스를 제공하고 있는 것으로 생각된다.

비록 본 연구에서는 부착 단각류라는 제한적인 범위로 이식 지누아리 서식처를 평가하였으나, 안정동위원소 분석 기법을 이용하여 소비자 동물의 생태지위면적에 대한 정보는 새로운 서식처 조성과 같은 복원생태계를 평가함에 있어 효과적으로 활용될 것으로 기대된다. 또한, 향후 다양한 복원생태계를 평가하기 위한 객관적 지표로서 안정동위원소 비값을 활용한 모델 기법들의 응용에 대한 추가 연구가 필요할 것으로 생각된다.

REFERENCES

- Caliceti, M. E., Argese, A., Sfriso, A., Pavoni, B., 2002, Heavy metal contamination in the seaweeds of the Venice lagoon, *Chemosphere*, 47, 443-454.
- Catry, T., Lourenco, P. M., Lopes, R. J., Carneiro, C., Alves, J. A., Costa, J., Rguibi-Idrissi, H., Bearhop, S., Piersma, T., Granadeiro, J. P., 2016, Structure and functioning of intertidal food webs along an avian flyway: a comparative approach using stable isotopes, *Funct. Ecol.*, 30, 468-478.
- Choi, C. G., Kim, H. G., Sohn, C. H., 2002, Effect of transplantation of *Ecklonia stolonifera* Okamura with adhesive glue, *J. Korean Fish. Soc.*, 35, 608-613.
- Cho, S. H., Choi, C. G., Choa, J. H., 2007, Restoration of the seaweed forest and algal succession on a porous type (shaped half saw teeth) artificial reef, *J. Korean Fish. Soc.*, 40, 220-225.
- Cifuentes, L. A., Sharp, J. H., Fogel, M. L., 1988, Stable carbon and nitrogen isotope biogeochemistry in the Delaware estuary, *Limnol. Oceanogr.*, 33, 1102-1115.
- Dauby, P., 1989, The stable carbon isotope ratios in benthic food webs of the Gulf of Calvi, Corsica, *Cont. Shelf. Res.*, 9, 181-195.
- DeNiro, M. J., Epstein, S., 1978, Influence of diet on the distribution of carbon isotopes in animals, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 42, 495-506.
- Duggins, D. O., Simenstad, C. A., Estes, J. A., 1989, Magnification of secondary production by kelp detritus in coastal marine ecosystems. *Science*, 245, 170-173.
- Frederiksen, S., 2003, Food web studies in a Norwegian kelp forest based on stable isotope ($\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$) analysis, *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 260, 71-81.
- Fry, B., Sherr, E., 1984, $\delta^{13}\text{C}$ measurements as indicators of carbon flow in marine and freshwater ecosystems, *Contrib. Mar. Sci.*, 27, 13-47.
- Gearing, J. N., Gearing, P. J., Rundick, D. T., Requejo, A. G., Hutchins, M. J., 1984, Isotopic variability of organic carbon in a phytoplankton-based temperate estuary, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 48, 1089-1098.
- Grall, J., Le Loc'h, F., Guyonnet, B., Riera, P., 2006, Community structure and food web based on stable isotopes ($\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$) analysis of a North Eastern Atlantic maerl bed, *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, 338, 1-15.
- Guzzo, M. M., Haffner, G. D., Legler, N. D., Rush, S. A., Fisk, A. T., 2013, Fifty years later: trophic ecology and niche overlap of a native and non-indigenous fish species in the western basin of Lake Erie, *Biol. Invasions*, 15, 1695-1711.
- Hwang, E. K., Ha, D. S., Baek, J. M., Wee, M. Y., Park, C. S., 2006, Effects of pH and salinity on the cultivated brown alga *Sargassum fulvellum* and associated animals, *Algae*, 21, 317-321.
- Jackson, A. L., Inger, R., Parnell, A. C., Bearhop, S., 2011, Comparing isotopic niche widths among and within communities: SIBER – stable isotope Bayesian ellipses in R, *J. Anim. Ecol.*, 80, 595-602.
- James, W. R., Lesser, J. S., Litvin, S. Y., Nelson, J. A., 2020, Assessment of food web recovery following restoration using resource niche metrics, *Sci. Total Environ.*, 711, 134801.
- Jennings, S., Reñones, O., Morales-Nin, B., Polunin, N. V. C., Moranta, J., Coll, J., 1997, Spatial variation in $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{13}\text{C}$ stable isotope composition of plants, invertebrates and fishes on Mediterranean reefs: implications for the study of trophic pathways, *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 146, 109-116.
- Jeong, S. J., Yu, O. W., Suh, H. L., 2004, Seasonal variation and feeding habitats of amphipods inhabiting *Zostera marina* beds in Gwangyang Bay, Korea, *J. Kor. Fish. Soc.*, 37, 122-128.
- Kang, C. K., Choy, E. J., Song, H. S., Park, H. J., Soe, I. S., Jo, Q., Lee, K. S., 2007, Isotopic determination of food sources of benthic invertebrates in two different macroalgal habitats in the Korean Coasts, *J. Korean Soc. Oceanogr.*, 12, 380-389.
- Kang, C. K., Choy, E. J., Son, Y., Lee, J. Y., Kim, J. Y., Kim, Y., Lee, K. S., 2008, Food web structure of a restored macroalgal bed in the eastern Korean peninsula determined by C and N stable isotope analyses, *Mar.*

- Biol., 153, 1181-1198.
- Kang, C. K., Choy, E. J., Hur, Y. B., Myeong, J. I., 2009, Isotopic evidence of particle sizedependent food partitioning in cocultured sea squirt *Halocynthia roretzi* and Pacific oyster *Crassostrea gigas*, Aquat. Biol., 6, 289-302.
- Kim, H. G., Park, J. G., 2006, Tissue culture of *Grateloupia acuminata* (Rhodophyta) from the eastern coast of Korea, J. Korean Aquac. Soc., 19, 216-221.
- Kim, Y. D., Song, H. I., Hong, J. P., Jeon, C. Y., Kim, S. K., Han, H. K., Kim, D. S., Bang, J. D., 2006, Growth and maturation of the brown seaweed *Costaria costata* transplanted for the wildstock enhancement, J. Life Sci., 16, 1044-1051.
- Kwak, C. W., Chung, E. Y., Gim, T. Y., Lee, J. H., Kim, Y. S., 2014, Marine algal assemblages on artificial reefs in Jeju-do before and after rocky cleaning and the growth pattern of *Ecklonia cava* with water depth, J. Fish. Mar. Sci. Edu., 26, 34-48.
- Layman, C. A., Arrington, D. A., Montaña, C. G., Post, D. M., 2007, Can stable isotope ratios provide for community-wide measures of trophic structure?, Ecology, 88, 42-48.
- Layman, C. A., Araujo, M. S., Boucek, R., Hammerschlag-Peyer, C. M., Harrison, E., Jud, Z. R., Matich, P., Rosenblatt, A. E., Vaudo, J. J., Yeager, L. A., Post, D. M., Bearhop, S., 2012, Applying stable isotopes to examine food-web structure: an overview of analytical tools, Biol. Rev., 87, 545-562.
- Lee, J. I., Kim, H. G., Geraldino, P. J. L., Hwang, I. K., Boo, S. M., 2009, Molecular classification of the genus *Grateloupia* (Halymeniaceae, Rhodophyta) in Korea, Algae, 24, 231-238.
- Lee, J. I., Hwang, I. K., Park, J. K., Kim, H. G., 2011, Seasonal growth of *Grateloupia asiatica* and *G. divaricata* (Rhodophyta), Korean J. Nat. Conserv., 5, 7-16.
- Mann, K. H., 2000, Ecology of coastal waters, with implications for management. Blackwell Scientific Publications, Oxford.
- McClelland, J. W., Valiela, I., 1998, Changes in food web structure under the influence of increased anthropogenic nitrogen inputs to estuaries, Mar. Ecol. Prog. Ser., 168, 259-271.
- Michener, R. H., Schell, D. M., 1994, Stable isotope ratios as tracers in marine aquatic food webs. In: Lajtha, K., Michener, R. H. (Eds.), Stable Isotopes in Ecology and Environmental Science, Blackwell Scientific Publications, Oxford, pp. 138-157.
- Minagawa, M., Wada, E., 1984, Stepwise enrichment of $\delta^{15}\text{N}$ along food chains: further evidence and the relation between $\delta^{15}\text{N}$ and animal age, Geochim. Cosmochim. Acta, 48, 1135-1140.
- Newsome, S. D., Martinez del Rio, C., Bearhop, S., Phillips, D. L., 2007, A niche for isotopic ecology, Front. Ecol. Environ., 5, 429-436.
- NFRDI (National Fisheries Research and Development Institute), 2006, Final report, a study on construction of seaweed forest in the East Sea, East Sea Fisheries Institute of NFRDI, Kwangwon.
- Nybakken, J. W., Bertness, M., 2005, Marine biology: an ecological approach, 6th edn. Perason Education Inc., San Francisco.
- Park, H. J., Han, E., Lee, Y. J., Kang, C. K., 2016, Trophic linkage of a temperate intertidal macrobenthic food web under opportunistic macroalgal blooms: a stable isotope approach, Mar. Pollut. Bull., 111, 86-94.
- Park, H. J., Kwak, J. H., Kang, H. Y., Kwon, K. Y., Lim, W., Kang, C. K., 2020, Incorporation of *Cochlodinium* bloom-derived organic matter into a temperate subtidal macrobenthic food web as traced by stable isotopes, Mar. Pollut. Bull., 154, 111053.
- Post, D. M., 2002, Using stable isotopes to estimate trophic position: models, methods, and assumptions, Ecology, 83, 703-718.
- Remy, F., Darchambeau, F., Melchior, A., Lepoint, G., 2017, Impact of food type on respiration, fractionation and turnover of carbon and nitrogen stable isotopes in the marine amphipod *Gammarus aequicauda* (Martynov, 1931), J. Exp. Mar. Biol. Ecol., 486, 358-367.
- Rigolet, C., Thiébaud, E., Brind'Amour, A., Dubois, S. F., 2015, Investigating isotopic functional indices to reveal changes in the structure and functioning of benthic communities, Funct. Ecol., 29, 1350-1360.
- Rolff, C., 2000, Seasonal variation in $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ of size-fractionated plankton at a coastal station in the northern Baltic proper, Mar. Ecol. Prog. Ser., 203, 47-65.
- Sano, M., Omori, M., Taniguchi, K., 2003, Predator-prey

- systems of drifting seaweed communities off the Tohoku coast, northern Japan, as determined by feeding habit analysis of phytal animals, *Fish. Sci.*, 69, 260-268.
- Steneck, R. S., Graham, M. H., Bourque, B. J., Corbett, D., Erlandson, J. M., Estes, J. A., Tegner, M. J., 2002, Kelp forest ecosystems: biodiversity, stability, resilience and future, *Environ. Conserv.*, 29, 436-459.
- Wang, W. L., Yeh, H. W., 2003, $\delta^{13}\text{C}$ values of marine macroalgae from Taiwan, *Bot. Bull. Acad. Sin.*, 44, 107-112.
- Yoo, J. W., Lee, H. J., Kim, H. J., Lee, C. G., Kim, C. S., Hong, J. S., Hong, J. P., Kim, D. S., 2007, Interaction between invertebrate grazers and seaweeds in the east coast of Korea, *J. Korean Soc. Oceanogr.*, 12, 125-132.
-
- Graduate (Ph.D. course) student. Chan-Kil Chun
Department of Marine Bioscience, Gangneung-Wonju National University
kwchun21@daum.net
 - Professor. Hyung-Geun Kim
Department of Marine Bioscience, Gangneung-Wonju National University
kimhg@gwnu.ac.kr
 - Professor. Hyun-Je Park
Department of Marine Bioscience, Gangneung-Wonju National University
phj13579@gwnu.ac.kr