

두 삼림 호수에 공존하는 동물플랑크톤종의 다른 안정동위원소비

이재용 · 김범철* · 吉岡崇仁¹ · 日野修次²

(강원대학교 환경과학과, ¹교토대학교 필드과학교육연구센터,
²야마가타대학 물질생명화학과)

The Different Isotopic Signatures of Co-existing Zooplankton Species in Two Alpine Lakes. Lee, Jaeyong, Bomchul Kim*, Takahito Yoshioka¹ and Shuji Hino² (Department of Environmental Science, Kangwon National University, Chuncheon 200-701, Korea; ¹Field Science Education and Research Center, Kyoto University, Japan; ²Department of Material and Biological Chemistry, Yamagata University, Japan)

The stable isotopes ratios ($\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$) of two coexisting species of zooplankton (*Daphnia longispina* and *Acanthodiatomus pacificus*) and POM were determined in two alpine lakes in Japan. The difference of $\delta^{13}\text{C}$ between *A. pacificus* and *D. longispina* was $4.1 \pm 0.9\text{‰}$ in Lake Shirakoma, which was larger than in Lake Panke. Whereas the difference of $\delta^{15}\text{N}$ between *A. pacificus* and *D. longispina* ($2.6 \pm 0.8\text{‰}$) was larger in Lake Panke than in Lake Shirakoma. $\delta^{13}\text{C}$ of POM ($-26.6 \pm 1.2\text{‰}$) in Lake Shirakoma was different from those of zooplankton; it was heavier than those of *D. longispina* and *A. pacificus* by $3.7 \pm 1.6\text{‰}$ and $7.8 \pm 1.0\text{‰}$, respectively. Whereas $\delta^{15}\text{N}$ of POM ($2.0 \pm 0.8\text{‰}$) was similar with those of both *A. pacificus* and *D. longispina*. This implies that the two lakes may have different trophic structure and food sources for zooplankton, and each species are grazing on selectively different components of POM. The temporal variation of $\delta^{13}\text{C}$ for each zooplankton species was associated with lipid contents of zooplankton in both lakes. The results showed that stable isotope composition of zooplankton can be an useful information for understanding energy pathways and trophic structures in lakes.

Key words : isotopic signature, lipid, zooplankton species, trophic status

서 론

동물플랑크톤의 탄소 및 질소안정동위원소비는 호수 내 먹이의 기원을 파악하고 영양단계를 이해하는 데 사용되어 왔다(Fry and Sherr, 1984; Rounick and Winterbourn, 1986; Hamilton and Lewis, 1992). $\delta^{13}\text{C}$ 는 영양단계 (trophic level)가 한 단계 증가할 때마다 먹이와 포식

자 사이에 분별계수에 큰 차이(1‰)를 보이지 않기 때문에 먹이 기원 및 에너지 흐름의 경로를 추적하는 데 이용된다(DeNiro and Epstein, 1978). $\delta^{15}\text{N}$ 는 포식자와 피식자 사이의 분별계수의 차이(3.4‰)가 크므로 영양단계를 설명하는 데 사용되고 있다(Minagawa and Wada, 1987). 따라서 공존하는 동물플랑크톤 종들 간의 안정성 동위원소비 차이는 서로 다른 섭식방법에 의한 에너지의 흐름 및 먹이의 질적 차이를 파악하고 서식하는 수환경

* Corresponding author: Tel: 033) 252-4443, Fax: 033) 251-3991, E-mail: bkim@kangwon.ac.kr

의 지형적, 수문학적 특징 및 인위적인 교란 등의 영향을 설명하는데 유용한 정보를 제공하고 있다. 특히 다른 섭식방식(여과 섭식과 선택적 섭식)으로 한 서식처에 공존하는 동물플랑크톤의 안정동위원소비 차이는 육상생태계에서 기원한 유기물이 호수 내에서 흡수 및 이용되는 먹이연쇄에 대한 정보를 제공해 준다.

Vander Zanden and Rasmussen (1999)은 호수 내의 서식처를 달리하는 일차소비자의 동위원소비들 사이에 분명한 차이를 가진다고 보고한 바 있다. 동물플랑크톤의 경우 서식하는 호수의 수문학적인 환경, 영양상태 그리고 계절에 따라서 다양한 종들이 공존하고 체내 생화학적 차이를 보인다. 동물플랑크톤의 섭식방식은 공존하는 동물플랑크톤 사이의 영양단계를 결정하고 상위소비자로서의 에너지 흐름을 결정하는 중요한 요인이 된다. 여과섭식을 하는 지각류는 선택적인 섭식방식을 가지는 요각류에 비해 육상기원유기물의 에너지를 효과적으로 상위소비자에게 전달할 수 있다. 일반적으로 일차생산에 비해 호흡이 큰 호수에서 동물플랑크톤은 육상에서 기원하는 에너지에 크게 의존하기 때문에 섭식방법이 다른 동물플랑크톤들 사이에 큰 동위원소비 차이를 보인다(Hessen *et al.*, 1990; Jones *et al.*, 1998).

본 연구에서는 동물플랑크톤의 동위원소비가 서식환경에 의해 결정된다는 가정을 확인하고자 인위적인 영향이 적고 유사한 성향을 보이는 두 삼림호수에서 공존하는 동물플랑크톤 중 사이의 동위원소비의 차이를 비교하였다. 또한 호수의 영양상태에 따른 동물플랑크톤의 동위원소비 분포의 차이를 보고된 자료를 이용하여 고찰하였다.

재료 및 방법

1. 조사지점 및 조사시기

시라코마호는 일본 나가노현에 위치한 해발 2,115 m의 부식산성호수로 수변은 주로 산림으로 둘러싸여 있다. 최대 수심은 8 m로 특별히 유입수와 유출수는 보이지 않으며 해빙기는 5월에서 11월 사이이다. 그리고 팡케호는 일본 북해도현에 있는 빈영양호로 해발 461 m에 위치하고 역시 삼림으로 둘러싸여 있다. 최대 수심은 54 m로 결빙은 12월에서 4월 사이이다. 조사시기는 각각 시라코마호의 경우 2002년 5월, 7월, 8월, 그리고 10월에 걸쳐 4회 행하였고, 팡케호는 1997년 6월, 7월, 그리고 10월 사이에 3회 실시하였다.

2. 분석방법

동물플랑크톤 net (75 µm mesh size, diameter 25 cm)를 사용하여 호심에서 채집하였다. 동물플랑크톤 시료는 동위원소분석 및 lipid 추출 측정을 위한 충분한 양을 얻기 어려운 관계로 반복 측정을 할 수 없었다. 채집된 동물플랑크톤 시료는 실험실로 운반하여 즉시 *Daphnia longispina* (*D. longispina*)와 *Acanthodiptomus pacificus* (*A. pacificus*)로 분리시킨 후 동결 건조하여 분말로 만들었다. POM은 시라코마호에서만 얻었으며 현장에서 40 µm net를 이용하여 동물플랑크톤을 제거한 후 미리 태워둔 GF/F 여과지로 여과하여 시료를 얻었다.

지방추출은 Kling *et al.* (1992)의 방법에 따랐다.

Table 1. Isotopic compositions ($\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$) of zooplankton species and POM in two alpine lakes.

Parameter	Lake	Date	<i>D. longispina</i>	<i>A. pacificus</i>	POM
$\delta^{13}\text{C}$	Panke	1997-6-03	-32.3	-33.9	-
		1997-7-02	-32.6	-32.3	-
		1997-10-28	-30.5	-31.1	-
	Shirakoma	2002-5-25	-29.0	-34.2	-26.4
		2002-7-20	-30.7	-34.2	-24.9
		2002-8-17	-32.0	-35.1	-27.7
		2002-10-26	-29.6	-34.0	-26.8
$\delta^{15}\text{N}$	Panke	1997-6-03	2.61	6.00	-
		1997-7-02	1.50	3.34	-
		1997-10-28	2.00	4.70	-
	Shirakoma	2002-5-25	1.45	1.82	2.66
		2002-7-20	0.28	1.48	3.23
		2002-8-17	1.12	-	2.27
		2002-10-26	1.96	1.02	1.64

- no data

시료의 동위원소비는 Minagawa and Wada (1984)의 sealed-quartz tube combustion method 분석 방법을 따랐다. 탄소와 질소동위원소분석은 질량분석기, Finnigan MAT 252 (Thermoquest, Ltd.)으로 하였다.

동위원소비는 delta (δ)표기를 하고 표준시료 (탄소의 경우, PeeDee Belemnite (PDB), 질소의 경우 대기 N_2)와의 차이로 얻어졌다.

식은 다음과 같으며

$$\delta X = (R_{\text{sample}}/R_{\text{standard}} - 1) \times 10^3,$$

여기서 X는 ^{13}C 와 ^{15}N , 그리고 R_{sample} 와 R_{standard} 는 각각 시료와 표준시료의 원자비 ($^{13}C/^{12}C$ 와 $^{15}N/^{14}N$), 분석의 정밀도는 $\delta^{13}C$ 와 $\delta^{15}N$ 모두 0.2‰ 이하이다.

결 과

1. 동물플랑크톤 종 간의 $\delta^{13}C$ 과 $\delta^{15}N$ 의 차이 비교

두 호수에서 각 종의 동물플랑크톤이 가지는 $\delta^{13}C$ 과 $\delta^{15}N$ 는 뚜렷한 차이를 보였다 (Table 1). 조사기간 평균 $\delta^{13}C$ 의 경우 시라코마호에서 *D. longispina*가 *A. pacificus*에 비해 3‰ 이상 높게 나타났으나, 팽게호에서는 이들 두 종 간의 $\delta^{13}C$ 차이는 거의 없었다. 시라코마호의 *A. pacificus*가 보이는 $\delta^{13}C$ 변동은 거의 일정하였으나 *D. longispina*는 3‰의 변동을 보였으며, 팽게호의 경우에는 두 종 모두 2‰ 전후의 비슷한 변동을 보였다. $\delta^{15}N$ 는 시라코마호에서 두 종의 동물플랑크톤 (*D. longispina*와 *A. pacificus*) 사이에 중간 차이 및 변동을 거의 보이지 않

았다 (Table 1). 이에 반해, 팽게호에서는 *D. longispina*와 *A. pacificus*의 $\delta^{15}N$ 값 사이에 큰 차이를 보였고 이들 사이에 약 2‰ 이상 차이가 있었다 (Table 1).

2. 동물플랑크톤의 동위원소비의 결정요인

동물플랑크톤과 POM 사이의 $\delta^{13}C$ 의 차이를 비교한 결과에서 *D. longispina*와 *A. pacificus*의 $\delta^{13}C$ 는 모두 POM의 $\delta^{13}C$ 에 비해 각각 $3.9 \pm 1.5\%$, $7.9 \pm 1.0\%$ 의 낮은 값을 보였다. POM의 $\delta^{15}N$ 는 *D. longispina*와 *A. pacificus*의 $\delta^{15}N$ 와 각각 $0.2 \pm 1.1\%$, $0.3 \pm 1.0\%$ 의 차이로 유사하였다 (Table 1). 시라코마호에서의 클로로필 *a* 농도와 POM의 $\delta^{13}C$ 사이에서 음의 상관관을 보였다 ($R^2=0.36$, $P<0.05$). 클로로필 *a* 농도가 증가할수록 POM의 $\delta^{13}C$ 가 가벼워지는 현상은 동물플랑크톤이 가지는 $\delta^{13}C$ 가 POM의 $\delta^{13}C$ 보다 가벼운 원인을 설명한다 (Fig. 1). 다시 말해서, 시라

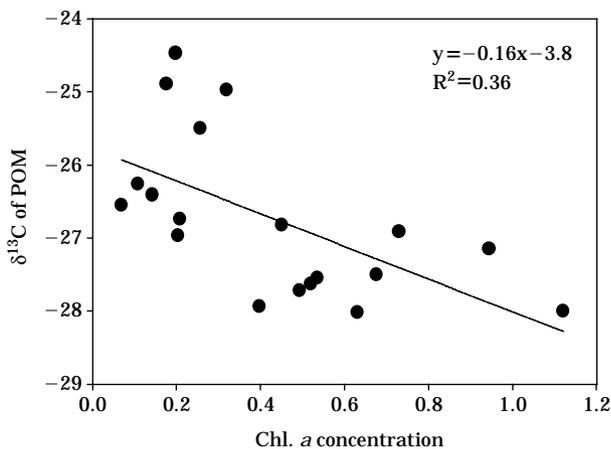


Fig. 1. Relationship between $\delta^{13}C$ of POM and chl. *a* concentration in Lake Shirakoma.

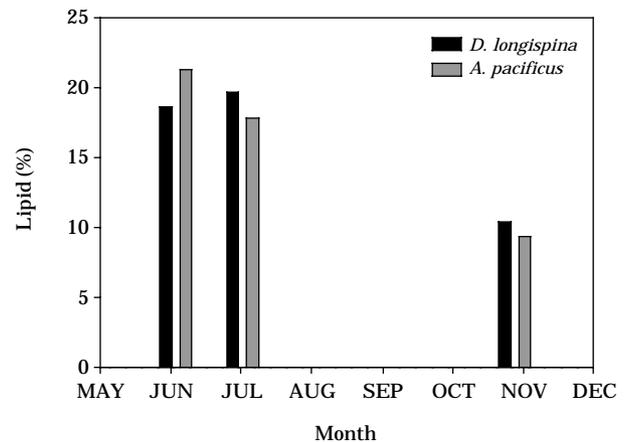
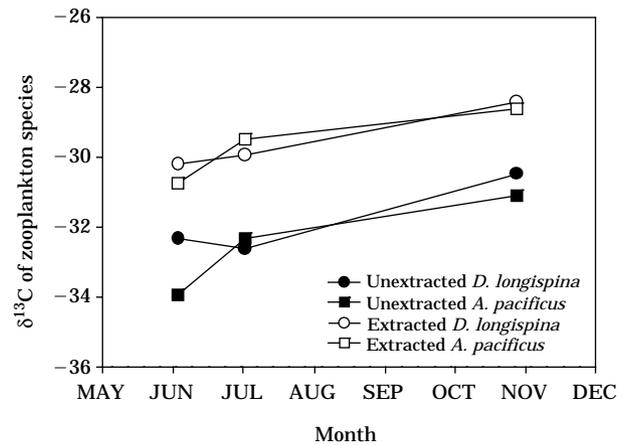


Fig. 2. Isotopic shift between unextracted (solid circle) and extracted (open circle) zooplankton species and lipid content (%).

코마호가 외부에서 기원하는 유기물의 기여가 큰 수환경이므로 POM을 구성하는 유기물은 내부생성유기물에 비해 외부기원유기물의 기여가 클 것이다. 이러한 수환경에서는 내부생성유기물(식물플랑크톤)의 $\delta^{13}\text{C}$ 는 상당히 낮은 값을 보인다. 따라서 동물플랑크톤이 이들 식물플랑크톤을 우선적으로 이용한다면 동물플랑크톤의 $\delta^{13}\text{C}$ 는 외부기원 유기물의 기여가 큰 POM에 비해 낮은 $\delta^{13}\text{C}$ 값을 가질 수 있다.

3. 광케호의 동물플랑크톤의 $\delta^{13}\text{C}$ 의 변동과 지방축적

광케호에서 *D. longispina*와 *A. pacificus*의 체내 평균 lipid 함량비는 각각 $16.2 \pm 6.1\%$, $16.2 \pm 5.1\%$ 로 거의 차이를 보이지 않았다(Fig. 2). 동물플랑크톤의 체내 lipid 함량의 시기별 변동은 6월과 7월에 높고 11월에 낮은 값을 보였다. 체내 lipid를 제거하기 전과 후의 *D. longispina*와 *A. pacificus* 각각의 $\delta^{13}\text{C}$ 의 변동을 비교한 결과 같은 종 사이에 각각 3% 전후의 차이를 보였다. 동물플랑크톤의 체내 lipid 함량에 대한 $\delta^{13}\text{C}$ 의 변동은 음의 상관관을 보였다($R^2=0.85$, $P<0.05$). 이는 동물플랑크톤이 축적하는 lipid가 동물플랑크톤의 $\delta^{13}\text{C}$ 의 계절변동과 밀접한 관련을 가지고 있음을 의미한다. 그리고 체내 lipid를 제거하기 전과 후의 *D. longispina*와 *A. pacificus* 각각의 $\delta^{13}\text{C}$ 의 계절변동의 패턴의 경우에는 거의 변화를 보이지 않았다.

고 찰

1. 동물플랑크톤 종 간의 $\delta^{13}\text{C}$ 와 $\delta^{15}\text{N}$ 의 차이 및 변동

동물플랑크톤의 $\delta^{13}\text{C}$ 의 계절변동은 외부기원유기물과 내부생성유기물의 먹이원으로서의 상대적인 기여 또는 지방축적의 영향이 주요한 원인으로 알려져 있다(Jones et al., 1999; Grey et al., 2001; Matthews and Mazumder, 2005).

시라코마호에서는 두 종의 동물플랑크톤의 $\delta^{13}\text{C}$ 값의 차이는 다른 호수들과 뚜렷한 차이를 보였다. 이러한 $\delta^{13}\text{C}$ 값의 커다란 차이는 두 종의 동물플랑크톤의 먹이 기원이 전혀 다르다는 것을 의미한다. 육상기원 유기물의 영향을 크게 받는 호수에서 심층의 유기물 분해에 의한 CO_2 생성은 낮은 $\delta^{13}\text{C}$ 의 식물플랑크톤을 생성하는데, 이를 이용하는 동물플랑크톤은 육상에서 기원하는 유기물을 직접 또는 간접적으로 이용하는 동물플랑크톤의 $\delta^{13}\text{C}$ 에 비해 낮다(Pulido-Villena et al., 2005). 반면에 광케호

에서는 요각류와 지각류 사이에 거의 $\delta^{13}\text{C}$ 의 차이가 없었다(Table 1).

시라코마호에서 $\delta^{13}\text{C}_{\text{POM}}$ 는 동물플랑크톤의 $\delta^{13}\text{C}$ 에 비해 높은 값을 보였다(Table 1). 일반적으로 육상수생태계에서 $\delta^{13}\text{C}_{\text{POM}}$ 는 동물플랑크톤의 $\delta^{13}\text{C}$ 에 비해 높은 값을 보인다. 빈영양호에서 보다 부영양호에 가까울수록 POM과 동물플랑크톤 사이의 $\delta^{13}\text{C}$ 의 차이가 가까워지는 경향성을 보이는데 이는 부영양호의 POM을 구성하는 유기물이 육상기원유기물에 비해 식물플랑크톤이 차지하는 비가 크기 때문이다(Gu et al., 1994; France et al., 1997). 시라코마호에서 POM의 $\delta^{13}\text{C}$ 와 클로로필 *a* 농도 사이의 음의 상관관계는 동물플랑크톤이 POM의 $\delta^{13}\text{C}$ 값에 비해 낮은 이유를 설명한다. 다시 말해서, 동물플랑크톤은 POM에서 선택적으로 낮은 $\delta^{13}\text{C}$ 값을 가지는 먹이원을 이용할 수 있다는 것을 의미한다(Grey et al., 2001; Pulido-Villena et al., 2005). 그리고 동물플랑크톤의 종들 사이의 $\delta^{13}\text{C}$ 의 차이는 시라코마호와 광케호에서 분명히 달랐다. 이는 두 호수에 서식하는 동물플랑크톤이 이용하는 먹이원의 $\delta^{13}\text{C}$ 의 차이가 있음을 의미한다.

시라코마호의 경우, *A. pacificus*와 *D. longispina* 사이의 $\delta^{13}\text{C}$ 의 변동은 조사기간 거의 일정한 차이를 유지하였다. 동물플랑크톤의 $\delta^{13}\text{C}$ 는 먹이원의 $\delta^{13}\text{C}$ 의 변동을 반영한다(Yoshioka et al., 1994; Zohary et al., 1994; Jones et al., 1999). Grey et al. (2001)은 식물플랑크톤과 육상기원유기물의 상대적인 기여에 따라 POM의 $\delta^{13}\text{C}$ 의 계절적인 변동이 있음을 보이고 POM의 $\delta^{13}\text{C}$ 의 계절변동과 일치하여 동물플랑크톤의 $\delta^{13}\text{C}$ 역시 계절변동을 한다고 하였다.

하지만 시라코마호는 낮은 pH로 인해 대부분의 DIC는 $\text{CO}_{2(\text{aq})}$ 상태로 존재하고 낮은 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 를 보인다. 또한 시라코마호는 낮은 일차생산성과 상대적으로 높은 외부기원유기물의 분해에 따른 CO_2 의 기여를 보이는 호수이다(Nozue et al., 2005). 식물플랑크톤이 광합성 시에 고정하는 CO_2 가 조사기간 동안에 충분히 공급된다면 식물플랑크톤의 $\delta^{13}\text{C}$ 는 거의 계절적인 변동이 없다(Rau et al., 1978; Takahashi et al., 1990). 더불어 CO_2 와 식물플랑크톤 사이에 상당히 큰 분별작용이 일어나 상대적으로 낮은 $\delta^{13}\text{C}$ 를 가지는 식물플랑크톤이 존재할 것이다(Rau et al., 1999). 또한 육상기원유기물의 $\delta^{13}\text{C}$ 는 일반적으로 평균 -27‰ 로 알려져 있으며 분해에 의한 동위원소비의 변동이 거의 없는 것으로 알려져 있다(Coffin et al., 1989). 시라코마호에서 공존하는 동물플랑크톤의 $\delta^{13}\text{C}$ 의 계절적인 변동은 먹이원인 식물플랑크톤과 육상기원유기물의 각각의 $\delta^{13}\text{C}$ 의 차이를 반영한 결과라 생각한다.

동물플랑크톤의 먹이원의 실제적인 $\delta^{13}\text{C}$ 의 계절변동을 추측하기 위해 lipid 추출은 유용할 수 있다(Matthews and Mazumder, 2005). 시라코마호의 경우, 공존하는 동물플랑크톤 사이에 $\delta^{13}\text{C}$ 의 계절변동은 lipid 추출 전과 후에 뚜렷한 차이를 보인 바 있다(Lee *et al.*, unpublished data). 광케호를 비롯한 다른 연구들에서는 동물플랑크톤의 $\delta^{13}\text{C}$ 의 계절변동은 lipid 추출 전과 후에 거의 차이를 보이지 않았다(Syvaranta *et al.*, 2006). 대부분의 호수들에서 동물플랑크톤의 lipid 함량의 변동은 동물플랑크톤의 $\delta^{13}\text{C}$ 의 계절변동 및 두 공존하는 동물플랑크톤의 $\delta^{13}\text{C}$ 의 차이에 큰 영향을 미치지 않았다. 하지만 동물플랑크톤이 선호하는 식물플랑크톤과 같은 좋은 질의 먹이원이 부족한 호수에서는 동물플랑크톤의 체내 lipid의 축적을 통해 먹이원의 $\delta^{13}\text{C}$ 의 계절변동이 상쇄될 수 있다. 따라서 lipid의 추출은 동물플랑크톤의 먹이원의 $\delta^{13}\text{C}$ 을 예측하는 데 중요하다.

한편, 광케호에서의 *D. longispina*와 *A. pacificus*의 $\delta^{15}\text{N}$ 사이의 차이는 다른 영양단계를 의미한다. Karlson *et al.* (2004)은 지각류가 요각류에 비해 낮은 $\delta^{15}\text{N}$ 을 가지는 이유로 박테리아에 대한 효과적인 이용능력 때문이라고 하였다. 지각류는 요각류에 비해 박테리아를 효과적으로 이용할 수 있다. 요각류는 박테리아보다는 박테리아를 섭식할 수 있는 원생동물을 먹이 대상으로 선호하는 것으로 알려져 있다(Yoshida *et al.*, 2001). 따라서 광케호에서 지각류에 비해 요각류의 높은 $\delta^{15}\text{N}$ 은 영양단계의 차이로 해석될 수 있다. 그러나 시라코마호의 경우 *D. longispina*와 *A. pacificus*의 $\delta^{15}\text{N}$ 의 중복은 먹이원의 $\delta^{15}\text{N}$ 의 중복 또는 각각의 동물플랑크톤의 먹이제한에 따른 영향일 수 있다. Gutseit *et al.* (2007)은 산성호수는 육상기원유기물의 상당한 기여를 받는 호수임에도 불구하고 clear water lakes에 비해 동물플랑크톤이 이용할 수 있는 에너지원이 제한되어 있어 이들 호수 사이에는 동물플랑크톤의 성장 및 생식의 차이가 있음을 보고하였다. Adams and Sterner (2000)에 의하면 먹이가 제한된 환경에 있는 동물플랑크톤은 ^{14}N 을 우선적으로 소모하므로 높은 $\delta^{15}\text{N}$ 을 가지는 것으로 보고한 바 있다. 시라코마호의 *D. longispina*와 *A. pacificus* 사이의 C/N비의 경우 *D. longispina* (4.8 ± 0.2)가 *A. pacificus* (4.3 ± 0.5)에 비해 높았다(Lee *et al.*, unpublished data). 이는 먹이의 질 또는 동물플랑크톤 사이의 체내 대사의 차이가 있음을 의미한다(Vanderklift and Ponsard, 2003). 따라서 공존하는 동물플랑크톤 사이의 $\delta^{15}\text{N}$ 의 차이는 동물플랑크톤의 영양단계와 생화학적 대사의 차이에 따라 다를 수 있다.

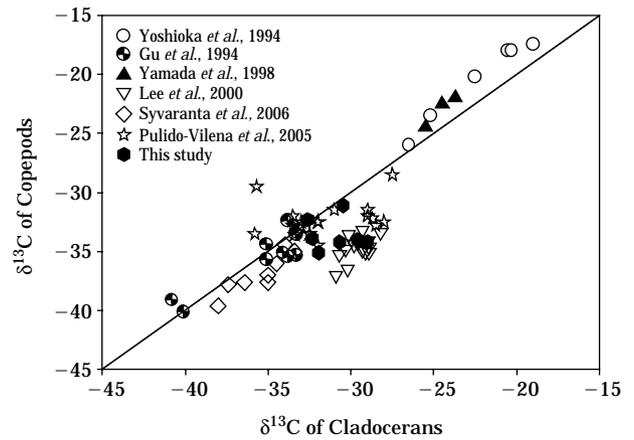


Fig. 3. Comparison of $\delta^{13}\text{C}$ value between co-existing cladocerans and calanoid copepods in other literatures of lakes. Eutrophic lakes: Yoshioka *et al.*, 1994, Gu *et al.*, 1994, Syvaranta *et al.*, 2006, Mesotrophic lake: Yamada *et al.*, 1998, Oligo-dystrophic lake: Lee *et al.*, 2000, Pulido-Vilena *et al.*, 2005, This study.

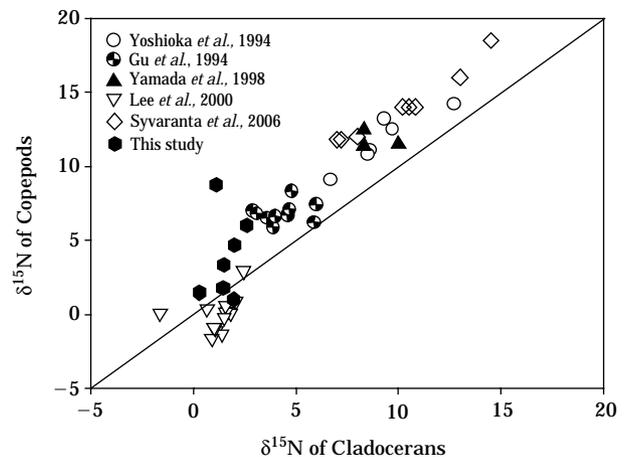


Fig. 4. Comparison of $\delta^{15}\text{N}$ value between co-existing cladocerans and calanoid copepods in other literatures of lakes.

Fig. 3은 본 연구를 포함한 다른 영양상태를 가지는 호수들에서 공존하는 지각류와 요각류의 $\delta^{13}\text{C}$ 값의 분포이다. 대부분의 호수에서 분명한 섭식방식의 차이를 가짐에도 불구하고 일차소비자로서의 요각류와 지각류의 $\delta^{13}\text{C}$ 값의 차이는 크지 않았다. 이는 호수들에 공존하는 두 동물플랑크톤의 $\delta^{13}\text{C}$ 값의 차이가 먹이를 둘러싼 수환경의 차이에 기인한다는 것을 의미한다. 빈영양한 호수는 부영양화된 호수들에 비해 공존하는 동물플랑크톤의 $\delta^{13}\text{C}$ 사

이에 큰 차이를 보였다.

이와 같은 호수의 영양상태의 차이는 질소동위원소비의 차이에서 더욱 뚜렷이 나타났다(Fig. 4). 두 동물플랑크톤의 $\delta^{15}\text{N}$ 의 비교에 따르면 부영양호에서 높은 값을 보였고 빈영양호에서 낮은 값에 위치하였다(Fig. 4). 인위적인 영향에 따른 호수의 부영양화 및 성층화의 발달에 의한 퇴적물의 탈질화과정은 서식하는 동물플랑크톤의 높은 $\delta^{15}\text{N}$ 값을 갖게 한다(Yoshioka *et al.*, 1988; Yoshioka *et al.*, 1989; Vander Zanden and Rasmussen, 1999).

대부분의 연구에서 요각류는 지각류에 비해 높은 영양단계를 보였으며, 팅케호에서도 *A. pacificus*는 *D. longispina*보다 높은 영양단계를 보였다(Fig. 4). 호수의 영양상태가 높을수록 원생동물에 대한 섭식물이 커지고, 요각류는 지각류에 비해 더 원생동물을 섭식할 수 있는 것으로 보고된 바 있다(Jansson *et al.*, 2000; Yoshida *et al.*, 2001). 이와 같은 요각류의 선택적 먹이 습성은 먹이의 크기에 의존하는 것으로 보인다. 다시 말해서, 지각류는 박테리아의 크기의 먹이원을 효율적으로 제거 가능하나 요각류는 거의 제거하지 못한다(Peterson *et al.*, 1978). 요각류는 박테리아를 먹는 원생동물을 선택적으로 이용함으로써 지각류와는 다른 영양단계에 위치할 수 있는 것이다. 따라서 요각류의 높은 $\delta^{15}\text{N}$ 값은 먹이원으로서 잠재적인 중속영양단계의 관여를 의미한다(Karlsson *et al.*, 2007).

본 연구의 결과, 동물플랑크톤의 섭식방식에 따른 차이는 호수의 먹이연쇄구조를 이해하는데 중요할 것으로 사료된다. 공존하는 동물플랑크톤의 종의 $\delta^{13}\text{C}$ 와 $\delta^{15}\text{N}$ 의 분포는 호수의 영양상태와 에너지의 흐름 및 영양단계를 이해하기 위한 유용한 정보를 제공하여 준다.

사 사

이 논문 저자 중 이재용은 「2008년도 2단계 BK21사업」의 지원을 받았음.

본 연구 결과에 대한 조언을 아끼지 않으시고 여러모로 도움을 주신 김재구 박사님과 나공태 박사님께 감사드립니다.

인 용 문 헌

Adams, T.S. and R.W. Sterner. 2000. The effect of dietary nitrogen content on trophic level ^{15}N enrichment. *Lim-*

nol. Oceanogr. **45**: 601-607.
 Coffin, B.R., B. Fry and R.T. Wright. 1989. Carbon isotopic compositions of estuarine bacteria. *Limnol. Oceanogr.* **34**(7): 1305-1310.
 DeNiro, M.J. and S. Epstein. 1978. Influence of diet on the distribution of carbon isotopes in animals. *Geochim. Cosmochim. Acta.* **42**: 495-506.
 France, R.L., P.A. Del Giorgio and K.A. Westcott. 1997. Productivity and heterotrophy influences on zooplankton $\delta^{13}\text{C}$ in northern temperature lakes. *Aquatic Microbiology Ecology* **12**: 85-93.
 Fry, B. and E.B. Sherr. 1984. $\delta^{13}\text{C}$ Measurements as indicators of carbon flow in marine and freshwater ecosystems. *Contributions of Marine Science* **27**: 13-47.
 Grey, J., R.I. Jones and D. Sleep. 2001. Seasonal changes in the importance of the source of organic matter to the diet of zooplankton in Loch Ness, as indicated by stable analysis. *Limnol. Oceanogr.* **46**: 505-513.
 Gu, B., D.M. Schell and V. Alexander. 1994. Stable carbon and nitrogen isotope analysis of the plankton food web in a subarctic lake. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* **51**: 1338-1344.
 Gu, B., V. Alexander and D.M. Schell. 1999. Seasonal and interannual variability of plankton carbon isotope ratios in a subarctic lake. *Freshwater Biol.* **42**: 417-426.
 Gutseit, K., O. Berglund and W. Graneli. 2001. Food quality for Daphnia in humic and clear water lakes. *Freshwater Biol.* **52**: 344-356.
 Hamilton, S.K. and W.M. Lewis. 1992. Stable carbon and nitrogen isotopes in algae and detritus from the Orinoco River floodplain, Venezuela. *Geochim. Cosmochim. Acta.* **56**: 4237-4246.
 Hessen, D.O., T. Andersen and A. Lyche. 1990. Carbon metabolism in a humic lake: Pool sizes and cycling though zooplankton. *Limnol. Oceanogr.* **35**: 84-99.
 Jansson, M., A.K. Bergström, P. Blomqvist and S. Drakare. 2000. Allochthonous organic carbon and phytoplankton/bacterioplankton production relationship in lakes. *Ecology* **81**: 3250-3255.
 Jones, R.I., J. Grey, D. Sleep and L. Arvola. 1999. Stable isotope analysis of zooplankton carbon nutrition in humic lakes. *Oikos* **86**: 97-104.
 Jones, R.I., J. Grey, D. Sleep and C. Quarmby. 1998. An assessment, using stable isotopes, of the importance of allochthonous organic carbon sources to the pelagic food in Loch Ness. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* **265**: 105-111.
 Karlsson, J., A. Jonsson, M. Meili and M. Jansson. 2004. $\delta^{15}\text{N}$ of zooplankton species in subarctic lakes in north-

- ern Sweden: effects of diet and trophic fractionation. *Freshwater Biol.* **49**: 526-534.
- Karlsson, J., D. Ilymer, K. Vrede and M. Jansson. 2007. Differences in efficiency of carbon transfer from dissolved organic carbon to two zooplankton groups: an enclosure experiment in an oligotrophic lake. *Aquat. Sci.* **69**: 108-114.
- Kling, G.W., B. Fry and W.J. O'Brien. 1992. Stable isotopes and planktonic trophic structure in arctic lakes. *Ecology* **73**(2): 561-566.
- Matthews, B. and A. Mazumder. 2005. Temporal variation in body composition (C : N) helps explain seasonal patterns of zooplankton $\delta^{13}\text{C}$. *Freshwater Biol.* **50**: 502-515.
- Minagawa, M. and E. Wada. 1984. Stepwise enrichment of ^{15}N along food chains: further evidence and the relation between $\delta^{15}\text{N}$ and animal age. *Geochim Cosmochim Acta* **48**: 1135-1140.
- Nozue, Y., K. Fukushima and F. Kumon. 2005. Paleoenvironment inferred a sediment core of Lake Shirakoma. *Jpn. J. Limnol.* **66**: 81-92.
- Peterson, B.J., J.E. Hobbie and J.F. Haney. 1978. *Daphnia* grazing on natural bacteria. *Limnol. Oceanogr.* **23**(5): 1039-1044.
- Pulido-Villena, E., I. Reche and R. Morales-Baquero. 2005. Food web reliance on allochthonous carbon in two high mountain lakes with contrasting catchments: a stable isotope approach. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* **62**: 2640-2648.
- Rau, G.H. 1978. Carbon-13 depletion in a subalpine lake: carbon flow implications. *Science* **20**: 901-902.
- Rounick, J.S. and M.J. Winterbourn. 1986. Stable carbon isotopes and carbon flow in ecosystems-measuring ^{13}C to ^{12}C ratios can help trace carbon pathways. *BioScience* **36**(3): 171-177.
- Syväranta, J., H. Hämäläinen and R.I. Jones. 2006. Within-lake variability in carbon and nitrogen stable isotope signatures. *Freshwater Biol.* **51**: 1090-1102.
- Takahashi, K., T. Yoshioka, E. Wada and M. Sakamoto. 1990. Temporal variations in carbon isotope ratio of phytoplankton in a eutrophic lake. *J. Plankton Res.* **12**: 788-808.
- Vander Zanden, M.J. and J.B. Rasmussen. 1999. Primary consumer $\delta^{13}\text{C}$ and ^{15}N and the trophic position of aquatic consumers. *Ecology* **80**: 1395-1404.
- Vanderklift, M.A. and S. Ponsard. 2003. Sources of variation in consumer-diet $\delta^{15}\text{N}$ enrichment: a meta-analysis. *Oecologia* **136**: 169-182.
- Yoshioka, T., E. Wada and H. Hayashi. 1994. A stable isotope study on seasonal food web dynamics in a eutrophic lake. *Ecology* **75**(3): 835-864.
- Yoshioka, T., E. Wada and Y. Saijo. 1988. Isotopic characterization of Lake Kizaki and Lake Suwa. *Jpn. J. Limnol.* **49**(2): 119-128.
- Yoshioka, T., H. Hayashi and E. Wada. 1989. Seasonal variations of carbon and nitrogen isotope ratios of plankton and sinking particles in Lake Kizaki. *Jpn. J. Limnol.* **50**(4): 313-320.
- Yoshida, T., T.B. Gurung, M. Kagami and J. Urabe. 2001. Contrasting effects of a cladoceran (*Daphnia galeata*) and a calanoid copepod (*Eodiaptomus japonicus*) on algal and microbial plankton in a Japanese lake, Lake Biwa. *Oecologia* **129**: 602-610.
- Zohary, T., J. Erez, M. Gophen, I. Berman-Frank and M. Stiller. 1994. Seasonality of stable carbon isotopes within the pelagic food web of Lake Kinneret. *Limnol. Oceanogr.* **39**: 1030-1043.

(Manuscript received 5 August 2008,
Revision accepted 10 September 2008)