

[Note]

고해상 시료 채취를 통한 보구치 이석의 안정동위원소 분석

김부근* · 이태원¹

부산대학교 지구환경시스템학부

¹충남대학교 해양학과

High-resolution Stable Isotope Analyses of the Otolith of *Argyrosomus argentatus*

BOO-KEUN KHIM* AND TAE WON LEE¹

Division of Earth Environmental System, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

¹Department of Oceanography, Chungnam National University, Daejeon 305-764 Korea

미세채취기를 이용하여 보구치(*Argyrosomus argentatus*)의 이석으로부터 탄산염 시료를 매우 조밀하게 채취하여 성장에 따른 고해상의 안정동위원소비의 변화를 조사하였다. 이석의 $\delta^{18}\text{O}$ 값과 $\delta^{13}\text{C}$ 값은 성장에 따라 점진적으로 증가하는 경향을 보였다. 그러나, 이러한 증가는 서식환경의 변화에 의한 것이 아니라, 초기성장동안 어류의 생리적인 작용에 의한 영향을 많이 받다가 점차적으로 줄어들면서 해양환경에 평형을 이루는 것으로 해석된다. 이 연구 방법과 결과는 앞으로 다른 어류의 이석으로부터 고해상의 안정동위원소 변화를 획득하여 어류의 성장과 서식환경의 변화를 연구하는데 적용할 수 있는 가능성을 제시한다.

Using micromill, discrete carbonate powders from the otolith of *Argyrosomus argentatus* were sampled along the growth band, and high-resolution stable isotope profiles were obtained. The $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ values are increasing gradually from the core to the margin. However, such increases do not seem to be attributed to the environmental property changes during the growth, but to the dominant effect of metabolic carbons during the early growth, and then, the isotopic composition seems to be equilibrium to the environmental condition. This paper allows the diverse applicability of high-resolution isotope research to the fish otoliths in the future.

Keywords: *Argyrosomus argentatus*, Otolith, Micromill, Stable Isotope, Marine Environment

서 론

어류의 내이(inner ear)에는 물 속 소리의 진동을 뇌로 전달하고 몸의 균형을 유지하는 3쌍의 탄산석회질의 돌이 있는데, 이 돌들은 모두 이석(otolith)이라 한다. 그러나 일반적으로 이석은 소낭(sacculus)에 들어 있는 가장 큰 소낭이석(sagitta)을 의미한다. 수산자원의 효율적이고 체계적인 관리를 위해서는 어류의 정확한 나이를 파악하는 것은 매우 중요하데, 경골어류의 연령사정에는 비늘, 척추골, 아가미덮개 등과 더불어 이석이 널리 사용되었다. 어류의 이석을 포함한 골격은 체장의 성장과 비례하여 지속적으로 자라기 때문에 항상 일정하게 자라지 않고 환경에 따라 변화한다. 일반적으로 이석은 어류의 성장이 빠른 시기에 불투명대(opaque zone)가 형성되고, 성장이 늦거나 멈추는 시기에 투명대(translucent zone)가 형성되는 것으로 알려져 있어(Rhoads and Lutz, 1980), 대부분의 어류에서 이석의 불투명대 수를 계수하여 어류의 나이를 추정한다.

어린 어류의 이석에 나타나는 하루주기성장선(일륜, daily growth increment)을 이용하여 어류의 산란기 및 초기 성장 규명을 위한 많은 연구가 수행되었다(Lee and Lee, 1989; Lee and Hur, 1993; Lee and Byun, 1996; Lee and Kim, 2000; 문과 이, 1999; 김 등, 2003; 백과 허; 2004). Lee and Kim (2000)은 조피볼락을 산출 전 자어기부터 유어 단계까지 실험실에서 사육하면서 주기적으로 채집하여 이석의 미세구조를 관찰하여 부화일과 일일성장률을 추정하였으며, 초기생활사 동안 이석의 성장과 미세구조의 변화를 어류의 외형 및 체장 변화와 관련하여 분석하였다. 문과 이(1999)는 문치가자미 유어의 이석에 나타나는 미세구조와 일륜수를 관찰하여 연령을 결정하고 초기성장을 분석하였으며, 김 등(2003)은 황복의 이석에는 다른 성장선들과 구별되는 부화정지선이 형성되어 있으며, 부화정지선의 형성이전에 미세성장선이 관찰된다고 보고하였다. 성어의 경우 이석을 이용하여 연령을 판정하는데, 백과 허(2004)는 균형선이 이석의 윤문을 관찰하여 불투명대와 투명대의 이행경계인 이석의 윤문은 연변부성장지수가 최소값을 보이는 8 월경에 연 1회 형성된다고 보고하였다. 최근에 국립수산물학원(2005)은 우리나라 해역에 분포하는 어류들의 연령을 추정하기 위

*Corresponding author: bkkhim@pusan.ac.kr

하여 연령사정 방법과 사용된 장비에 대해 기술하여 정리하였다. 이석은 주로 연령을 추정하기 위해 이용되어 왔지만, 최근에는 이석에 포함되어 있는 여러 화학성분(산소, 탄소 안정동위원소 및 미량원소)을 분석하여, 연령, 분포, 회유경로, 산란군 구분, 어류가 살았던 해양환경의 특성을 밝히려는 연구들이 시도되고 있다(Kalish, 1989; Radtke *et al.*, 1996; Thorrold *et al.*, 1997; Beggs and Weidman, 2001; Campana and Thorrold, 2001; 김과 강, 2001).

이석은 주로 아라고나이트(aragonite)라는 탄산염(CaCO_3) 광물로 구성되어 있으며, 구성물질의 화학적(예, 안정동위원소) 조성의 차이가 어류의 서식환경 차이를 나타내는 정보 저장소로서의 역할을 한다. 예를 들어, 서로 다른 어류의 이석에 대한 안정동위원소 특성은 어류 군집을 뚜렷하게 구분할 수 있으며, 어류의 이동 또는 서식환경에 대한 생태학적 특성 등 다양한 정보를 획득할 수 있다(Radtke *et al.*, 1996; Campana and Thorrold, 2001). 국내에서도 김과 강(2001)은 이석의 안정동위원소 분석을 연어의 계군 분리에 적용하였다. 그러나, 이들 연구들에서는 안정동위원소 분석에 이석을 전시료(bulk sample) 형태로 이용하여 생활사별 환경의 영향을 규명하는데 부족한 점이 있었다.

어류에서의 이석과 마찬가지로 성장에 따라서 탄산염을 축적시키며 연륜을 형성하는 생물로 이때패가 있다. 이때패의 패각에서 성장에 따른 탄산염의 안정동위원소 차이를 분석하기 위하여 치과용 드릴(예, Dremel)을 이용하여 탄산염 분말을 채취하여 왔다(예, Khim *et al.*, 2000). 그러나, 어류의 이석은 상대적으로 그 크기가 매우 작아서 성장에 따른 안정동위원소 분석을 위하여 치과용 드릴을 이용하여 탄산염 시료를 채취하기란 불가능하다. 이러한 제한을 극복하기 위하여 크기가 작은 이석으로부터 탄산염 시료를 성장에 따라 채취할 수 있는 미세채취기(micromill)가 개발되었다(Dettman and Lohmann, 1995; Gao, 1999; Wurster *et al.*, 1999). 미세채취기를 이용하여 이석의 안정동위원소를 성장에 따라 고해상(high-resolution)으로 연속 측정할 연구들에 의하면, 이석에서 분석된 안정동위원소의 변화가 어류의 서식기간 동안의 환경변화를 뚜렷하게 반영하고 있는 것으로 나타났다(Wurster *et al.*, 1999). 최근에는, 어류의 특성상 담수어종의 이석에 대한 안정동위원소의 연속측정 결과 육상환경의 변화에 대한 정보도 획득할 수 있었으며, 고고학적 발굴지역에서 채취한 이석의 안정동위원소 분석으로 당시의 육상환경을 복원하였다(Patterson, 1998; Wurster and Patterson, 2001).

보구치(*Argyrosomus argentatus*)는 동중국해부터 황해까지 넓게 분포하는 어류이다(Okamura, 1986). 이 어류는 제주도 근해나 동중국해에서 월동하고 봄에 연안으로 이동하여 6-7월경에 산란을 하고 가을까지 성장을 한다. 일반적인 서식수온과 염분은 황해의 보통 값으로 수온은 12 °C에서 25 °C 사이이며, 염분은 30 psu 내외로 알려져 있다. 이 연구에서는 국내 최초로 미세채취기를 이용하여 보구치의 이석으로부터 성장에 따른 고해상의 시료를 채취하고 안정동위원소를 분석하였다. 그 결과 성장에 따른 안정동위원소의 변화를 어류의 서식환경의 변화에 근거하여 해석하였으며 앞으로의 연구에 적용할 수 있는 가능성을 제시하였다.

재료 및 방법

이 연구에 사용된 보구치 이석은 1998년 7월 군산시 어관장에서 채집한 것으로 군산 근해에서 연안정치망에 어획된 것이다. 보구치의 전장(TL)은 243.5 mm였고, 체장(BL)은 212.8 mm였으며, 습중량(WWt)은 185.9 g이었다. 보구치에서 추출된 이석은 표면에 붙어있는 유기물들을 제거한 후 slide glass 위에 올려놓고 유리판을 씌운 뒤 epoxy resin으로 고정시킨 후에, 이석의 한쪽 면을 1000, 1200목의 silicon carbide paper로 연마한 후, 1 mm alumina powder로 광택을 내었다. 연마과정에서 암시야 반사현미경 하에서 수시로 연마면을 관찰하며, 미세성장선이 잘 보일 때까지 sagittal 면까지 연마하였다(Fig. 1). 연마된 면에서 미세채취기를 이용하여 47 μm 간격으로 성장선을 따라 이석의 가장자리에서 핵 쪽으로 50 개의 탄산염 시료를 채취하였다(Table 1). 시료채취에 사용된 미세채취기와 안정동위원소 분석에 이용된 질량분석기는 캐나다의 사스카추ewan대학교(University of Saskatchewan)의 장비를 이용하였다.

시료채취에 이용된 미세채취기(micromill)는 Fig. 2a에 나타난 것과 같이 모니터와 컴퓨터, 그리고 구동본체와 시료받침대로 구성되어 있다. 시료받침대 위에는 3차원으로 움직일 수 있는 고정된 미세채취바늘이 장착되어 있다(Fig. 2b). 시료받침대는 좌우, 상하, 전후로 0.05 μm 규모로 움직이며 시료의 곡선을 따라 최대한으로 정교하게 소량의 시료를 채취할 수 있다. 시료 채취과정은 컬러 디지털카메라가 장착된 모니터에서 관찰할 수 있으며(Fig. 2c), 시료채취 및 이동은 컴퓨터 프로그램으로 제어되고 있다. 미세시료 채취를 위해서는 시료준비과정, 내부구조의 디지털 특성 파악, 디지털특성에 의한 제동뿔기형 내삽, 시료채취 중간경로 계산, 그리고 탄산염시료의 미세채취 등의 과정을 통해 이루어진다. 미세채취기의 운용과 시료채취 과정은 Wurster *et al.*(1999)에 자세하게 기술되어 있다.

이석으로부터 채취된 탄산염시료들은 진공상태의 200 °C에서 1 시간 가량 태운 후에 안정동위원소를 분석하였다. 안정동위원소

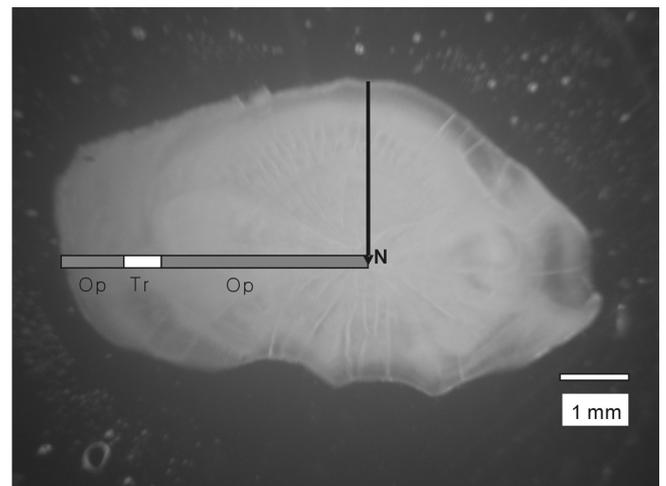
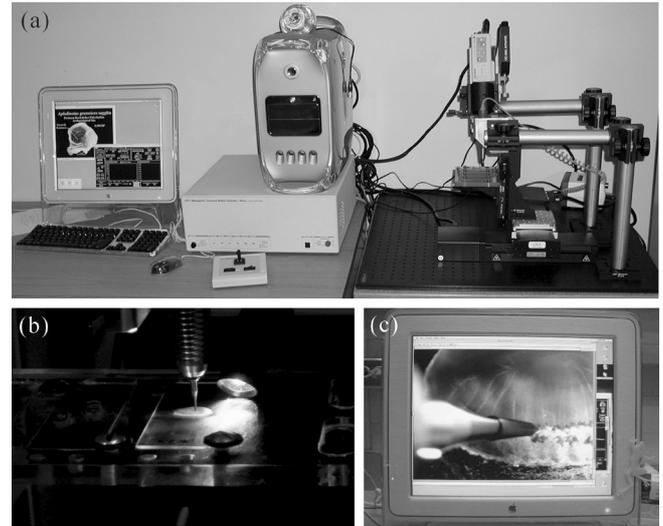


Fig. 1. Microphotograph of *Argyrosomus argentatus* otolith. One translucent zone (*Tr*) was formed between central and opaque zone (*Op*). The samples were sequentially collected using micromill system from the outer otolith margin to the nucleus (*N*) indicated by an arrow. Scale bar: 1 mm.

Table 1. Summary of sampling distance across the otolith from the margin to the core with $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ values.

Sampling spot	Distance from margin (mm)	Calibrated distance from margin (mm)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)
0	0.000			
1	0.047	0.024	0.36	-0.26
2	0.094			
3	0.141	0.118	-0.07	-0.21
4	0.188			
5	0.235	0.212	-0.36	-0.22
6	0.282			
7	0.329	0.306	-0.97	-0.66
8	0.376			
9	0.423	0.400	-1.16	-0.71
10	0.470			
11	0.517	0.494	-1.33	-0.90
12	0.564			
13	0.611	0.588	-1.83	-1.11
14	0.658			
15	0.705	0.682	-1.93	-1.37
16	0.752			
17	0.799	0.776	-2.19	-1.58
18	0.846			
19	0.893	0.893	-2.21	-1.70
20	0.940			
21	0.987			
22	1.034	1.034	-2.38	-1.84
23	1.081			
24	1.128			
25	1.175	1.175	-2.60	-1.81
26	1.222			
27	1.269			
28	1.316	1.316	-2.56	-1.72
29	1.363			
30	1.410			
31	1.457	1.457	-2.64	-1.66
32	1.504			
33	1.551			
34	1.598			
35	1.645	1.622	-2.83	-1.82
36	1.692			
37	1.739			
38	1.786			
39	1.833	1.810	-2.98	-2.03
40	1.880			
41	1.927			
42	1.974			
43	2.021	1.998	-3.23	-2.34
44	2.068			
45	2.115			
46	2.162			
47	2.209			
48	2.256	2.233	-3.00	-2.22
49	2.303			
50	2.350			

**Fig. 2.** Micromilling system equipped in the University of Saskatchewan.

분석에 필요한 최소한의 시료는 약 30 μg 이지만, 이석의 크기가 매우 작고 채취간격이 좁기 때문에, 분석에 충분한 양을 확보하기 위하여 몇 개의 시료를 합쳐서 분석하였다. 특히, 핵 주변에서 채취된 시료의 경우에 채취반경이 매우 작아서 바깥 쪽의 시료보다 더 많은 수의 시료를 합하여 분석하였다. 따라서 이석으로부터 채취된 탄산염 분말 시료는 총 50개였지만 실제로 분석된 총 시료의 개수는 18개였다(Table 1). 탄산염 시료는 Kiel III 자동준비장치에서 70 °C의 인산과 반응하여 발생된 이산화탄소가 Finnigan MAT 252 질량분석기에서 산소동위원소와 탄소동위원소로 측정되었다. 안정동위원소는 PDB의 표준시료에 대한 상대값으로 표기하였으며, 분석오차는 $\pm 0.1\%$ 이다.

결과 및 토의

보구치의 이석은 암시아에서 핵을 중심으로 불투명대로 둘러싸였으며, 시료를 채취한 단축 반경 2 mm 정도에서 투명대가 형성된다(Fig. 1). 이 투명대 밖에는 가장자리까지 다시 불투명대로 되어 있다. 핵을 중심으로한 불투명대는 부화 후 첫해의 성장기 동안에 형성되었고, 투명대는 첫 해 겨울에 형성된 것으로 판단된다. 투명대 밖 가장자리 불투명대는 두 째 해의 봄 이후 성장시기에 형성된 것으로 보인다.

Fig. 3은 보구치의 이석으로부터 성장에 따라 채취된 탄산염의 안정동위원소 값의 변화를 보여준다. $\delta^{18}\text{O}$ 값은 -3.23‰에서 0.36‰ 사이에서 변화되고, 이석의 내부에서 외부로 가면서, 즉 성장에 따라 점차적으로 $\delta^{18}\text{O}$ 값은 증가한다. 증가되는 $\delta^{18}\text{O}$ 값의 변화는 이석의 중간부인 1.2 mm까지는 작게 증가하다가 그 이후부터는 증가율이 급격히 상승한다(Fig. 3a). 마찬가지로 보구치의 이석에서 성장에 따라 분석된 $\delta^{13}\text{C}$ 값은 -2.34‰에서 -0.21‰의 범위에서 변화하며, $\delta^{18}\text{O}$ 값과 유사하게 이석의 안쪽에서 바깥쪽으로 가면서, $\delta^{13}\text{C}$ 값이 점차적으로 증가하는 경향을 보인다(Fig. 3b). 그러나, $\delta^{13}\text{C}$ 값의 증가는 $\delta^{18}\text{O}$ 값처럼 지속적인 것이 아니라, $\delta^{13}\text{C}$ 값의

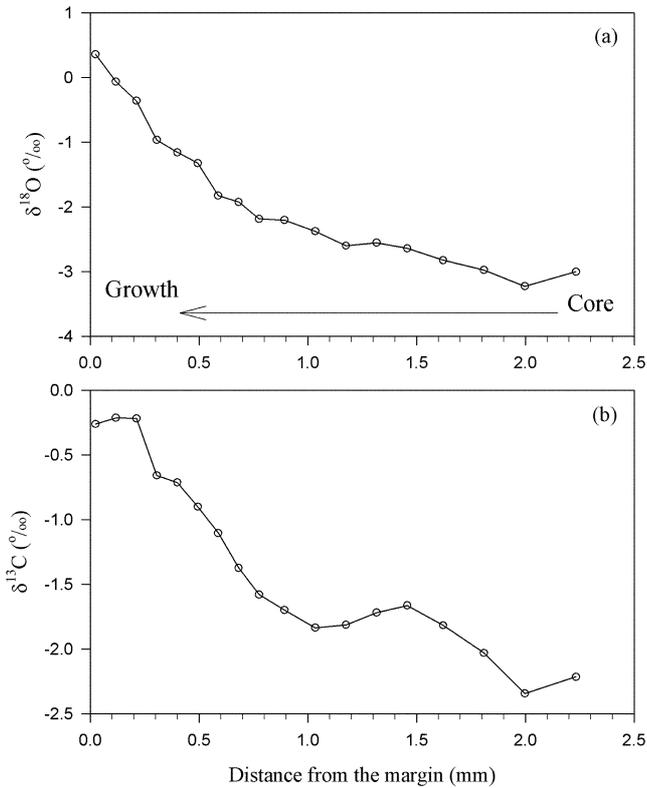


Fig. 3. High resolution (a) $\delta^{18}\text{O}$ and (b) $\delta^{13}\text{C}$ profiles of otolith (*Argyrosomus argenteus*).

증감을 보이면서 전체적으로 증가한다.

탄산염광물의 안정동위원소의 경우에 일반적으로 $\delta^{18}\text{O}$ 값은 광물의 형성 당시, 즉 생물학적 탄산염인 경우에는 생물이 성장하던 시기의 해수의 온도와 해수의 $\delta^{18}\text{O}$ 값에 의하여 결정된다(Epstein *et al.*, 1953). 따라서, 해수의 $\delta^{18}\text{O}$ 값이 일정하다면 해수의 온도가 높은 여름철에는 탄산염광물의 $\delta^{18}\text{O}$ 값은 낮게 측정되지만, 온도가 낮은 겨울철에는 탄산염의 $\delta^{18}\text{O}$ 값이 높게 나타난다. 일반적으로, 해수의 $\delta^{18}\text{O}$ 값은 해수의 염분과 정비례의 상관 관계를 가지고 있다(예, Khim and Krantz, 1996). 즉, 염분이 높은 환경이나 계절에는 해수의 $\delta^{18}\text{O}$ 값이 높게 나타나지만, 담수의 유입이 증가하는 경우에는 반대현상이 나타난다. 따라서, 염분(해수의 $\delta^{18}\text{O}$ 값)의 변화는 탄산염 각질에서 분석되는 $\delta^{18}\text{O}$ 값을 결정하는 또 다른 요인으로 작용된다.

보구치가 여름철(25°C)에 부화하여 이석의 성장이 시작되었다고 가정하고, 황해 해수의 $\delta^{18}\text{O}$ 값을 약 0‰에서 -1.0‰로 가정한다면(Chung, 1998), 이러한 온도에서 평형으로 형성된 보구치 이석의 $\delta^{18}\text{O}$ 값은 약 -3.0‰에서 -1.8‰로 계산된다(Epstein *et al.*, 1953). 한편, 성장을 하면서 겨울철(12°C)에 이석이 형성될 경우에는 약 0‰에서 1.1‰의 $\delta^{18}\text{O}$ 값을 보여야 한다. 보구치 이석에서 분석된 $\delta^{18}\text{O}$ 값의 변화는 이석의 중앙에서 -3.23‰ 보이는 반면에 이석의 바깥 쪽에서 0.36‰ 측정되었다(Fig. 3a). 따라서, 보구치 이석의 탄산염은 적어도 해수에서 평형으로 형성되는 것으로 해석된다. 또한 $\delta^{18}\text{O}$ 값의 변화된 범위인 약 3.6‰ 보구치의 이석이 성장하는 동안의 해수의 온도변화라고 가정한다면, 보구치는 성장

기간동안 약 15°C의 온도 변화를 지시하며, 이러한 범위는 앞서 제시한 해수의 온도변화와 유사하다고 해석될 수 있다. 그러나, 이석이 성장하면서 보이는 $\delta^{18}\text{O}$ 값의 점진적인 증가는 온도에 의한 영향으로 조절되는 것은 배제할 수는 없지만, 앞서 설명한 바와 같이 해수의 $\delta^{18}\text{O}$ 값의 변화와 함께 다른 여러 가지 변수들에 의해서도 조절된다.

보구치가 부화한 이후에 1998년 7월에 채취될 때까지 적어도 한 번의 겨울철을 지냈다고 생각한다면, 이석의 중앙부분에서 겨울철에 형성되는 탄산염의 $\delta^{18}\text{O}$ 값이 나타나고, 바깥 쪽으로 가면서 온도가 상승하는 봄-여름을 가정한다면 그 값이 점차적으로 감소해야 하지만, 실제로 측정된 $\delta^{18}\text{O}$ 값은 점진적인 증가를 보인다(Fig. 3a). 따라서, 자료가 충분하지는 않지만, 보구치의 이석인 경우에 적어도 초기 성장상태에서는 이석의 $\delta^{18}\text{O}$ 값이 해수와 평형을 이룬다고 할 수 없다. 일반적으로 이석의 성장 초기에는 탄산염의 형성이 해수와 평형을 이루지 않는다고 보고되었다(Kalish, 1989; Thorrold *et al.*, 1997). 특히, 탄산염의 탄소동위원소인 경우에는 산소동위원소 보다 비평형의 효과가 뚜렷하고, 초기 성장 동안에는 난황의 기록 또는 어류의 성장에 의한 생리적인 이산화탄소의 영향을 받기 때문에 대부분 낮은 동위원소를 보이고 있다. 보구치의 경우에도 부화된 이후에 초기 성장 기간동안 $\delta^{18}\text{O}$ 값이 낮은 것은 온도 이외에 어류의 생리적인 활동에 의한 이산화탄소의 영향을 받다가 성장이 지속되면서 탄산염이 해수와 평형으로 형성되는 것으로 생각된다.

탄산염광물의 $\delta^{13}\text{C}$ 값은 열역학적인 이론에 의하여 해수의 온도에 의해 영향을 받는 것으로 보고 되었지만(Emrich *et al.*, 1970; Romanek *et al.*, 1992), 온도에 의한 영향은 매우 낮다. 탄산염의 $\delta^{13}\text{C}$ 값은 일반적으로 해수에 녹아있는 무기탄소(dissolved inorganic carbon)의 $\delta^{13}\text{C}$ 값에 의해 제어되는 것으로 해석된다(Grossman and Ku, 1986). 예를 들어, 해수에서 일반적으로 일차생산에 의해 무기탄소가 소비되는 경우에 ^{12}C 가 선택적으로 제거되기 때문에 해수 내에는 ^{13}C 의 수가 상대적으로 증가하여 해수의 $\delta^{13}\text{C}$ 값은 증가한다. 반대로 생성된 유기물이 분해되는 경우에는 ^{12}C 가 해수 내로 재공급되어 해수의 $\delta^{13}\text{C}$ 값이 낮아진다. 이와 같이 해수의 $\delta^{13}\text{C}$ 값의 변화는 해수에서 생성된 탄산염광물의 $\delta^{13}\text{C}$ 값을 조절한다.

보구치의 이석에서 분석된 $\delta^{13}\text{C}$ 값은 안쪽에서 바깥쪽으로 증가하는 경향을 보인다(Fig. 3b). 이석의 $\delta^{13}\text{C}$ 값은 해수 온도 변화에 의하여 크게 영향을 받지 않기 때문에, 이러한 증가가 보구치가 서식했던 해수의 무기탄소의 $\delta^{13}\text{C}$ 값의 증가를 전적으로 반영하는 것으로 해석될 수 있다. 그러나, 보구치가 서식했던 실제 해수의 무기탄소의 $\delta^{13}\text{C}$ 값은 없지만, 일반적인 해수의 $\delta^{13}\text{C}$ 값은 약 0‰ 정도이며, $\delta^{13}\text{C}$ 값의 연변화는 1‰ 정도로 작게 변화한다(Thorrold *et al.*, 1997). 따라서, 보구치 이석에서 분석된 $\delta^{13}\text{C}$ 값의 변화는 해수의 무기탄소의 $\delta^{13}\text{C}$ 값의 변화보다는 다른 요인에 의한 것으로 생각된다. 앞서 산소동위원소에서 나타났듯이, 초기 성장 동안에는 탄산염의 탄소동위원소가 비평형으로 나타난다. Fig. 3b에서 관찰할 수 있듯이 $\delta^{13}\text{C}$ 값의 변화는 뚜렷하지는 않지만 두 번의 증감이 반복되면서 증가한다. 첫 번째는 핵에서 약 1.0 mm까지의 변화와 그 이후에 또 다른 증감이 나타난다. 첫 번째의 $\delta^{13}\text{C}$ 값의 변화는 증가율이 작은 $\delta^{18}\text{O}$ 값의 범위와 일치한다. 두 번째의 증감은 증가율이 상승된 $\delta^{18}\text{O}$ 값의 범위와 일치한다. 따라서, 원인

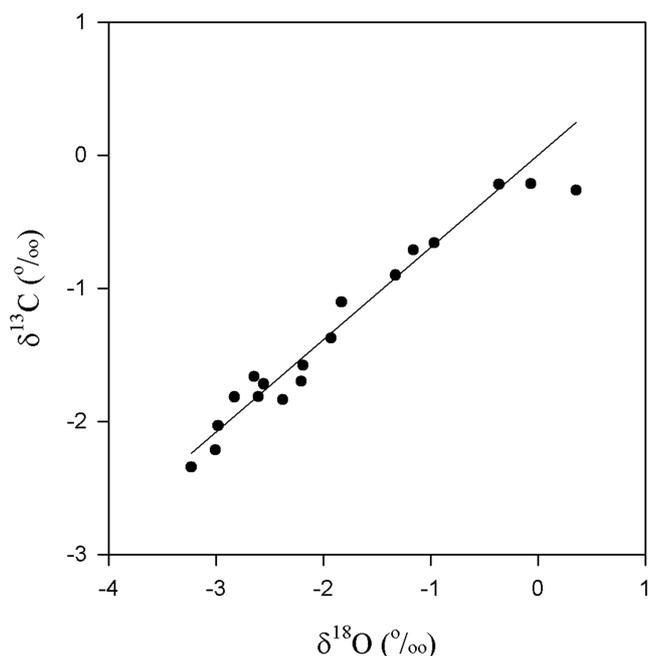


Fig. 4. Correlation between $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ values of otolith (*Argynosomus argentatus*).

을 정확하게 알 수는 없지만, 적어도 보구치가 성장하는 동안 이석을 형성하는 탄산염의 $\delta^{13}\text{C}$ 값은 증감이 $\delta^{18}\text{O}$ 값의 변화와 함께 하는 것은 초기상태의 이석의 형성동안에는 어류의 생리적 이산화탄소의 영향 때문으로 해석될 수 있다.

Fig. 4는 보구치의 이석에서 분석된 $\delta^{18}\text{O}$ 값과 $\delta^{13}\text{C}$ 값 사이의 관계를 보여준다. 성장기간 동안 $\delta^{18}\text{O}$ 값과 $\delta^{13}\text{C}$ 값은 양의 상관관계를 보이고 있으며, 이러한 특성은 적어도 한 가지 중요한 요인이 두 가지의 $\delta^{18}\text{O}$ 값과 $\delta^{13}\text{C}$ 값을 우세하게 조절하고 있는 것으로 해석된다. 앞서 설명하였듯이 일반적으로 탄산염의 $\delta^{18}\text{O}$ 값은 해수의 온도와 해수의 $\delta^{18}\text{O}$ 값에 의해서 조절되며, 탄산염의 $\delta^{13}\text{C}$ 값은 해수의 온도에 적게 영향을 받고, 해수의 무기탄소의 $\delta^{13}\text{C}$ 값에 의해 조절된다. 따라서, 이러한 인자들이 서로 함께 같은 영향을 줄 수도 있지만, 보구치의 이석이 초기 성장상태에서 채취되었다는 것을 고려한다면, 서식 환경의 여러 인자들보다는 보구치의 서식활동에 의한 생리적인 이산화탄소가 우세하게 두 동위원소에 영향을 동시에 끼친 것으로 해석된다.

결 론

아라고나이트 탄산염으로 주로 구성되어 있는 이석의 안정동위원소 특성은 어류의 성장과 서식환경의 정보를 제공한다. 어류의 이석은 상대적으로 그 크기가 매우 작아서 성장에 따른 안정동위원소 분석을 위하여 미세채취기(micromill)가 개발되어 사용되고 있다. 국내에서 최초로 보구치(*Argynosomus argentatus*)의 이석으로부터 성장에 따라 미세채취기를 이용하여 탄산염 시료를 채취하였다. 안정동위원소 분석 결과, 이석의 $\delta^{18}\text{O}$ 값과 $\delta^{13}\text{C}$ 값은 성장에 따라 점진적으로 증가하는 경향을 보인다. 그러나, $\delta^{18}\text{O}$ 값과 $\delta^{13}\text{C}$ 값의 증가는 서식환경의 변화에 의한 것이 아니라, 초기 성

장상태부터 점차적으로 감소된 생리적인 이산화탄소 때문으로 해석된다. 그러나, 성공적인 미세채취기의 사용 및 고해상의 안정동위원소 분석은 향후 어종의 계군 분리, 회유 경로 등 다양한 수산자원의 관점에서 연구가 응용될 수 있는 가능성을 제시한다.

사 사

이 연구의 분석을 위해 실험실 및 분석기기를 친절하게 제공해주신 캐나다 사스카툰대학의 William Patterson 교수에게 감사드립니다. 이 연구는 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 수행되었다. 이 논문을 심사하시고 건설적인 비평을 아끼지 않으신 김수갑교수님과 강수경박사님께 감사한 마음을 전합니다.

참고문헌

- 국립수산과학원, 2005. 이석 연령 사정 기술서. 수산자원평가보고서 제9호, 131 pp.
- 김동우, 한경남, 임양재, 2003. 황복, *Takifugu obscurus*의 초기성장과 이석의 미세구조. 바다, 8: 237-242.
- 김수갑, 강수경, 2001. 동해 생태계 규명을 위한 안정동위원소의 이용: 명태와 연어 이석의 경우. 한국수산자원학회지, 4: 64-72.
- 문형태, 이태원, 1999. 이석의 미세구조를 이용한 가덕도 천혜역 문치가자미(*Limanda yokohamae*) 유어의 연령과 성장. 한국어류학회지, 11: 46-51.
- 백근욱, 허성희, 2004. 남해에 서식하는 군평선이(*Hapalogenys mucronatus*)의 이석사정에 의한 연령과 성장. 한국어류학회지, 16: 301-308.
- Beggs, G.A. and C.R. Weidman, 2001. Stable $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ isotopes in otoliths of haddock *Melanogrammus aeglefinus* from the Northwest Atlantic Ocean. Mar. Ecol. Prog. Ser. 216: 223-233.
- Campana, S.E. and S.R. Thorrold, 2001. Otoliths, increments, and elements: keys to a comprehensive understanding of fish populations? Can. J. Fish. Aqu. Sci. 58: 30-38.
- Chung, C.S., 1998. Origin of water masses and fluxes of chemical materials in the East China Sea and South Sea of Korea. Ph.D. thesis, Inha Univ., 159 pp. (in Korean)
- Dettman, D.L. and K.C. Lohmann, 1995. Microsampling carbonates for stable isotope and minor element analysis: physical separation of samples on a 20 micrometer scale. J. Sediment. Res. 65A: 566-569.
- Emrich, K., D.H. Ehhalt, and J.C. Vogel, 1970. Carbon isotope fractionation during the precipitation of calcium carbonate. Earth Planet. Sci. Lett. 8: 363-371.
- Epstein, S., R. Buchsbaum, H. Lowenstam, and H.C. Urey, 1953. Revised carbonate-water isotopic temperature scale. Geol. Soc. Am. Bull. 64: 1315-1326.
- Gao, Y.W., 1999. Microsampling of fish otoliths: a comparison between DM2800 and Dremel in stable isotope analysis. Environ. Biol. Fishes 55: 443-448.
- Grossman, E.L. and T.L. Ku, 1986. Oxygen and carbon isotope fractionation in biogenic aragonite: temperature effects. Chem. Geol. 59: 59-74.
- Kalish, J.M., 1989. Otolith microchemistry: validation of the effects

- of physiology, age and environment on otolith composition. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* **132**: 151–178.
- Khim, B.K. and D.E. Krantz, 1996. Oxygen isotopic identity of the Delaware Coastal Current. *J. Geophys. Res.* **101**: 16509–16514.
- Khim, B.K., K.S. Woo, and J.G. Je, 2000. Stable isotope profiles of bivalve shells: seasonal temperature variations, latitudinal temperature gradients and biological carbon cycling along the east coast of Korea. *Cont. Shelf Res.* **20**: 843–861.
- Lee, J.U. and Y.H. Hur, 1993. Comparative study on age determination using scales and otoliths of Walleye Pollock *Theragra chalcogramma* in the Bering Sea and Gulf of Alaska. *Korea J. Ichthy.* **5**: 177–183.
- Lee, T.W. and J.S. Byun, 1996. Microstructural growth in otoliths of conger eel (*Conger myriaster*) leptocephali during the metamorphic stage. *Mar. Biol.* **125**: 259–268.
- Lee, T.W. and K.S. Lee, 1989. Daily growth increments and lunar pattern in otolith of the eel, *Anguilla japonica*, in the freshwater. *Bull. Korean Fish. Soc.* **22**: 36–40.
- Lee, T.W. and G.C. Kim, 2000. Microstructural growth in otoliths of black rockfish (*Sebastes schlegeli*) from prenatal larval to early juvenile stages. *Ichthy. Res.* **47**: 335–341
- Okamura, O. (ed). 1986. Fishes of the East China Sea and the Yellow Sea. Sekai Reg. Fish. Res. Inst., 501 pp.
- Patterson, W.P., 1998. North American continental seasonality during the last millennium: high-resolution analysis of sagittal otoliths. *Palaeogeogr. Palaeoclimat. Palaeoecol.* **138**: 271–303.
- Radtke, R.L., W. Showers, E. Moksness, and P. Lenz, 1996. Environmental information stored in otoliths: insights from stable isotopes. *Mar. Biol.* **127**: 161–170.
- Rhoads, D.C. and R. Lutz, 1980. Skeletal growth of aquatic organisms. Plenum Press, New York. 750 pp.
- Romanek, C.S., E.L. Grossman, and J.W. Morse, 1992. Carbon isotopic fractionation in synthetic aragonite and calcite: effects of temperature and precipitation rate. *Geochim. Cosmochim. Acta* **56**: 419–430.
- Thorrold, S.R., S.E. Campana, C.M. Jones, and P.K. Swart, 1997. Factors determining $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ fractionation in aragonitic otoliths of marine fish. *Geochim. Cosmochim. Acta* **61**: 2909–2919.
- Wurster, C.M. and W.P. Patterson, 2001. Late Holocene climate change for the eastern interior United States: evidence from high-resolution $\delta^{18}\text{O}$ values of sagittal otoliths. *Palaeogeogr. Palaeoclimat. Palaeoecol.* **170**: 81–100.
- Wurster, C.M., W.P. Patterson, and M.M. Cheatham, 1999. Advances in micromilling techniques: A new apparatus for acquiring high-resolution oxygen and carbon stable isotope values and major/minor elemental ratios from accretionary carbonate. *Comp. Geosci.* **25**: 1155–1162.

2007년 4월 18일 원고접수

2007년 12월 11일 수정본 채택

담당편집위원: 강동진