Article

명태(*Theragra chalcogramma*) 이석 내 산소동위원소 조성과 서식 수온 특성양윤선¹ · 강수경^{2*} · 김수암¹ · 김순송³¹부경대학교 수산과학대학 자원생물학과
(608-737) 부산광역시 남구 대연 3동 599-1²국립수산과학원 영동내수면연구소
(215-821) 강원도 양양군 손양면 송현리 424-1³국립수산과학원 어업자원본부
(619-902) 부산광역시 기장군 기장읍 시랑리 408-1Relationship between Oxygen Isotopic Composition of Walleye Pollock (*Theragra chalcogramma*) Otoliths and Seawater TemperatureYoon-Seon Yang¹, Sukyung Kang^{2*}, Suam Kim¹, and Soonsong Kim³¹Department of Marine Biology, Colleges of Fisheries Sciences
Pukyong National University, Busan 608-737, Korea²Yeongdong Inland Fisheries Reserch Institute, NFRDI
Yangyang 215-821, Korea³Headquarters for Fisheries Resources, NFRDI
Busan 619-902, Korea

Abstract : Oxygen isotopic composition ($\delta^{18}\text{O}$) of walleye pollock, *Theragra chalcogramma*, otoliths were measured to investigate interannual and regional correlation with habitat temperature. Specimens were collected from fishermen in Korea and Japan between 1997~1999, while seawater temperatures were obtained from Korean and Japanese Oceanographic Data Centers. Seawater temperature was generally lower off the eastern Korean Peninsula than off eastern Hokkaido (Japan). Sagittal otoliths were removed for measurement of $\delta^{18}\text{O}$ using a micro-drilling technique. In most cases, $\delta^{18}\text{O}$ and habitat temperature exhibited negative relationship in Korean and Japanese waters. Higher $\delta^{18}\text{O}$ was observed in Korean pollock compared to Japanese pollock. The marginal parts of otoliths exhibited higher $\delta^{18}\text{O}$ than cores from both regions. This is an indication that somatic growth of walleye pollock occurs in deeper and cooler waters. Interannual variation in $\delta^{18}\text{O}$ was also observed. Mean $\delta^{18}\text{O}$ values acquired from 1997 otoliths were lower (2.15‰) than those of 1998 (2.67‰) and 1999 (2.65‰) in Korean pollock. These measurements coincided with changes in observed temperature in Korean waters, in which mean seawater temperature was warmer in 1997 than in 1998 and 1999. In Japanese waters, mean seawater temperature was lowest in 1997, which coincided with highest $\delta^{18}\text{O}$ values in the same year.

Key words : walleye pollock, otolith, oxygen isotopic ratio ($\delta^{18}\text{O}$), micro-drilling, habitat temperature

1. 서 론

해양경골어류의 속귀(inner ear)에 위치하는 이석(耳石, otolith)은 어류의 평생 감각을 담당하는 작은 탄산칼슘

(CaCO_3) 성분의 ‘돌’로서, 주로 아라고나이트(약 96%)와 소량의 유기물 복합체(약 3%) 및 30여종의 미량원소(약 1%)로 구성되어 있다(Degens *et al.* 1969). 어류의 속귀에는 세 쌍(sagitta, lapillus, asteriscus)의 이석이 존재하며, 이 중 크기가 가장 큰 sagitta에 나타나는 성장륜(growth

*Corresponding author. E-mail : kangsk@nfrdi.go.kr

increment) 구조는 어류의 나이를 추정하는데 이용되어 왔다(Campana and Neilson 1985). 한편, 최근에는 이석 내 화학물질에 대한 연구가 각광을 받고 있다. 이석을 구성하는 화학성분은 생성된 후 거의 변함이 없는 안정된 상태로 있기 때문에, 이석 내 미량원소나 안정동위원소비의 차이는 어류의 생활환경(즉, 서식지, 먹이, 수온, 염분 등) 변화 연구에 자주 이용된다(Gauldie et al. 1998; Thorrold et al. 1998; Campana 1999; Kennedy et al. 2002).

해수의 안정동위원소 조성은 해양에서 어류가 섭이하고 성장을 하는 동안 어류 체내의 각 부분 및 이석의 동위원소 조성에 영향을 준다. 이석의 탄소동위원소비는 어류의 대사활동, 환경수 내 용존 무기탄소량(dissolved inorganic carbon)에 따라 그 비가 결정된다. 하지만 이석의 산소동위원소 조성은 분별계수(fractionation factor)가 대사활동에 의해 영향을 거의 받지 않고 무기 침전 아라고나이트와 거의 유사하기 때문에 환경수의 동위원소비와 해수 온도의 함수로 변화하게 된다(Campana 1999; Høie et al. 2004). Kalish(1991)는 오스트리아 연어의 이석에서 산소동위원소비를 측정하여, 이석 내 산소동위원소 함량이 수온과 역상관 관계에 있음을 보고하였다. 이를 근거로 해양 생물학 분야에서는 어류 이석의 산소동위원소비를 어류가 살았던 환경의 수온 지시자로 종종 이용하고 있다.

북태평양의 한류역에 널리 분포하는 명태(walleye pollock, *Theragra chalcogramma*)는 우리나라 동해에서부터 미국 캘리포니아 연안까지 대륙의 연안역에 분포하고 있으며, 각 해역마다 독립적인 산란장을 가지고 있는 계군이 존재한다(김 1992). 한반도의 동해안으로 회유해 오는 명태는 가을철에 북쪽으로부터 남하하여 함경도 연안에 이르고, 11~12월에 더 남하하여 주 산란장인 원산만(Wonsan Bay)에서 산란을 한다(Fig. 1). 주 산란군에서 벗어난 일부 산란어군은 강원도 및 경북 연안까지 이동한 후 산란을 마치고 2월 이후 수온이 상승됨에 따라 다시 북상한다고 알려져 있다(이 등 1989; 김과 강 1998). 일본 해역에서는 대부분 홋카이도 및 혼슈 연안의 대륙붕에서 11월부터 4월 사이에 명태 산란군이 출현하고 있으며, 홋카이도 남부의 폰카만(Funka Bay)에 산란장이 형성된다(Sakurai 1988).

명태는 생활사에 따라 수직 분포를 달리한다고 알려져 있는데, 해역마다 약간씩 차이를 보이지만 성장하면서 깊은 수심으로 이동한다(Muigwa 1988; Kendall et al. 1996). 베링해에서는 성어일 경우 수심 300~400 m에서 서식하지만, 미성어는 해양표면 약 100 m 이내에 살고 있고, 우리나라 명태의 경우 1~2세의 어린 시기에는 얕은 수심에서 살지만 그 이후에는 200 m 부근에, 그리고 간혹 수심 300~500 m에서도 발견되고 있다(국립수산과학원 동해수산연구소 은퇴, 허영희, pers. comm.). 일본 홋카이도 섬 부근에 서식하는 명태의 경우, 0~1세에는 50~200 m, 2~3

Fig. 1. Sampling areas for walleye pollock (*Theragra chalcogramma*) otolith (●) and seawater temperature during the 1997-1999 period (□).

세에는 100~300 m로 서식 수심이 깊어지고 4세에는 보통 200~300 m에서 서식한다고 한다(홋카이도 대학, Dr. Y. Sakurai, pers. comm.).

김과 강(2001)은 동해에서 수집한 명태의 이석에 함유되어 있는 산소동위원소의 비율이 채집된 연도마다 다르게 나타남을 밝혔다. 그러나 그들의 연구는 이석 전체의 동위원소 함량을 측정했었던 것이었으므로, 어류의 연령별 서식처 환경 특성을 규명할 수는 없었다. 본 연구에서는 한국과 일본에서 채집된 명태 이석으로부터 그들이 태어난 해와 어획된 해의 산소동위원소($\delta^{18}\text{O}$)의 함량을 조사하여 산소동위원소의 함량과 명태의 서식처 수온과의 관계를 검증하였다. 특히, 명태의 생활사 별로 산소동위원소를 분석하여, 어류가 성장하면서 경험하는 서식수심을 고찰하였다.

2. 재료 및 방법

어류 시료의 채집

우리나라 명태 시료는 1997년부터 1999년까지 3년 동안 강원도 속초(Sokcho) 부근의 어시장 혹은 어업자들로부터 10~11월에 걸쳐 수집하였다(Fig. 1). 명태 시료는 주로 영세 어업자들로부터 구입하였기 때문에 어획에 이용된 어구나 어획 수심에 대한 정보가 불분명하였고(Table 1), 명태가 수집된 1990년대 후반은 명태 자원량이 매우 낮은 상황이었으므로 이석 채취를 위해 선택된 명태의 체

Table 1. Information on walleye pollock (*Theragra chalcogramma*) collected from Korea (east side of the Korean Peninsula) and Japan (east side of the Hokkaido) for stable isotope analysis of otoliths

Country	Year	Month	Location	Gear	Depth (m)	Mean fork length (cm) (± SD, n)	Mean body weight (gram) (± SD, n)
Korea	1997	October	Gangwon-do (Sokcho)	unknown	60-70	26.1 (± 1.2, 5)	162.0 (± 9.6, 5)
	1998	November	Gangwon-do (Sokcho)	unknown	unknown	33.9 (± 1.1, 5)	261.6 (± 35.3, 5)
	1999	November	Gangwon-do (Sokcho)	unknown	unknown	30.7 (± 4.0, 4)	227.5 (± 68.0, 4)
Japan	1997	October	42° 42'N 144° 33'E	trawl	200	37.8 (± 2.2, 5)	391.0 (± 75.3, 5)
	1998	July	41° 39'N 143° 42'E	trawl	unknown	36.3 (± 5.2, 5)	371.8 (± 133.5, 5)
	1999	February	41° 58'N 141° 26'E	trawl	360	38.2 (± 5.9, 3)	397.3 (± 169.1, 3)
		March	41° 48'N 141° 26'E	trawl	200	29.1 (± 0.1, 2)	134.5 (± 29.0, 2)

SD: standard deviation, n: number of individuals

장과 체중은 해마다 달랐다. 수집된 명태 중에서 체장과 체중에 대한 정보가 있는 개체를 선택하여 이석을 추출하였다. 일본의 명태는 1997년 10월부터 1999년 3월까지 홋카이도 동부해역에서 조업하던 상업 트롤 어선으로부터 수집하였다(Fig. 1). 어획 수심은 200~360 m로서 우리나라 동해 연안에서보다는 깊은 곳에서 어획되었다(Table 1). 또한 어획 활동도 4계절 균등히 수행되었고, 어획된 어체의 체장과 체중도 우리나라 연안에서 수집된 것보다 크고 무거웠다.

해양수온 자료 분석

본 연구에 이용된 명태가 서식하였던 우리나라와 일본 홋카이도 동부해역의 수온 변화를 파악하기 위하여 한국 해양자료센터(Korea Oceanographic Data Center: KODC)와 일본해양자료센터(Japan Oceanographic Data Center: JODC)에서 받은 1994~1999년까지의 수온 자료를 분석하였다. 우리나라의 경우, 명태의 분포와 회유, 산란장, 서식처 및 성장 시기 등을 고려하여 국립수산물과학원의 연안 정선 관측점 중에서 비교적 북쪽에 위치한 연안 정점(107 Line-1, 2, 3, 4; 106 Line-2, 3, 4; 105 Line-3, 4; 104 Line-4)을 선택하여 분석하였고, 일본의 경우에는 트롤 어선이 어획 활동을 수행한 40~42° N, 142~145° E 해역을 선정하여 조사하였다(Fig. 1). 연구해역의 50 m, 100 m, 200 m, 300 m, 400 m, 500 m 각 수층별 수온자료를 분석하여 월 평균 수온 혹은 명태가 성장하는 기간 동안의 평균 수온과 명태 이석 내 산소동위원소 값과 비교하였다.

이석의 처리 및 산소동위원소 분석

어체로부터 이석을 추출한 후 표면에 붙어있는 이물질을 제거하고 80°C에서 1~2일 동안 건조시키거나 혹은 자연 상태에서 건조시켰다. 건조된 이석을 실리콘으로 제작한 몰딩 틀에 넣고 castolite resin 8 cc와 castolite hardener 7방울의 비율(몰딩 틀 한 블록)로 섞어서 만든 용액을 부

어주고 약 36시간 동안 응고시켰다. 명태 이석은 3차원적 곡면의 형태로 성장(Short *et al.* 2006)하기 때문에 몰딩된 이석을 한쪽 면만 핵에서부터 가장자리가 드러나도록 연마하였다. 사용된 연마지는 400, 800, 1200 grit와 1/4 micron polishing paper였다.

연마가 끝난 표본을 저배율의 입체현미경(SZX-TR30, Olympus 社)을 이용하여 연령을 결정하였다. 이석의 핵에서부터 가장자리까지 연마하여 나타난 시상면(sagittal plane)을 현미경하에서 관찰하였다. 이 때 반사광 아래에서 어둡게 보이는 투명대(성장이 느릴 때 형성된 부분, translucent zone)와 밝게 보이는 불투명대(성장이 빠를 때 형성된 부분, opaque zone)가 대체로 규칙적으로 잘 나타났다. 본 연구에서는 투명대를 개수하여 연령사정 하였고 연령 사정의 정확성을 확인하기 위하여 sagitta 이석 쌍 중 연마 실험에 사용하지 아니한 이석에 한하여 이석을 절단하여 연령을 비교하였다. 이때 이석의 연륜을 명확히 구별하기 위하여 수직면(vertical plane)을 절단하고 알코올로 태우는 절단-소각방법(break-and-burn method)을 사용하였다(NOAA 2008). 연령사정 후에는 윤문이 연령형질로서 적합한가를 판단하기 위하여 이석경과 윤경과의 상관관계를 구하였으며 윤문의 형성 시기를 알아보기 위하여 다음의 식으로 연역지수(Marginal index: MI)(Fey 2005)를 구하였다.

$$MI = \frac{(R - r_n)}{R} \quad (1)$$

여기서, R 은 중심부 초점에서 최외측까지의 장축 반경, r_n 은 중심부 초점에서 가장 가장자리에 있는 n 번째 윤경까지의 거리이다(Fig. 2).

연령 사정 후, 미세 드릴을 사용하여 이석의 각 연령대 별로 분말 시료를 추출하였다. 실험에 사용된 드릴은 Dremel 社에서 나온 microdrill로서, 끝이 뾰족한 3.2 mm bit를 부착하여 사용하였다(Model 780, cordless rotary

Fig. 2. Sagittal plane of walleye pollock (*Theragra chalcogramma*) otolith, showing otolith radius (R), ring radius at age n (r_n) and drilling area for this study.

tool). 이석 내 한 연령대라고 하더라도, 이석이 생성된 계절에 따라 동위원소의 값이 달라질 수 있으므로(Villiers *et al.* 1995), 분말시료 채취과정에서 가장 실수의 요소가 적은 이석의 핵 부분(즉, 이석의 age-0의 성장)과 가장자리(즉, 어획된 연도에 성장한 부분) 시료 분석의 결과만 본 연구의 해석에서 이용하였다(Fig. 2). 한 연령대에서 아라고나이트 분말 시료를 최소한 50 μg , 많게는 200 μg 이상을 얻을 수 있었다. 분말의 형태로 만든 시료의 산소동위원소 분석은 한국기초과학지원연구원(Korea Basic Science Institute)에 의뢰하였고 VG OPTIMA 질량 분석기(VG OPTIMA linked with MultiPrep)로 측정되었다. 산소동위원소 분석 결과는 표준 시료인 VPDB(Vienna PeeDee Belemnite)에 대한 천분율(‰)로 나타냈고 정밀도는 측정 오차 범위 0.1‰ 이내의 값을 보였다.

$$\delta^{18}\text{O} = \frac{(O_{18}/O_{16})_{\text{sample}} - (O_{18}/O_{16})_{\text{standard}}}{(O_{18}/O_{16})_{\text{standard}}} \times 100 \quad (2)$$

산소동위원소와 서식지 수온의 관계

환경수온을 지시하는 생체물질을 파악하기 위하여 이석

내 산소동위원소 값과 명태가 서식할 것으로 생각되는 수심의 수온을 비교하였다. 두 연구 해역 모두 2월부터는 수온이 급격히 하강하고 있으므로, 이석의 성장은 여름부터 겨울까지 좋을 것이라 가정하였다. 계절적 평균 수온은 각 연도별로 형성된 이석 내 산소동위원소 값과 비교하였다. 또한, 대구류와 같은 저서어류는 치어 시기에 표층에 서식하다가, 그들이 성장함에 따라 깊은 곳으로 이동해서 사는 습성이 있는데, 수심 50~300 m에 서식하는 알래스카 만의 명태는 체장이 커짐에 따라 깊은 곳에 분포하고 있음이 밝혀졌다(Muigwa 1988). 그러나 우리나라 해역에서는 200 m보다 깊은 곳은 수온이 너무 낮아 서식수심으로 부적합할 것으로 가정하였다. 따라서 우리나라의 0~1세 명태에 대해서는 50 m, 2세 및 성어는 100~200 m의 수온을 선택하였다. 일본 해역 명태의 경우는 0세어가 50 m, 2세 명태는 100~200 m 그리고 3세 명태는 수심 200~300 m 사이에서 서식하리라고 가정하여 서식수온을 비교하였다. 대체로 200 m 수심 부근에서는 최대 수온이 12월 혹은 2월에 나타나므로 2세 혹은 성어의 성장이 12월에 왕성할 것으로 가정하였으며, 0세 명태가 서식하는 표층(<50 m)에서의 수온은 우리나라 해역에서는 10~12월, 일본 해역에서는 10~11월에 가장 높으므로 이 시기의 수온과 0세 명태의 산소동위원소 평균값을 비교하였다.

3. 결 과

연령사정 및 윤문형성 시기

연마된 이석과 절단된 이석에서 나타난 투명대의 수를 계수하여 비교하였다. 1997년과 1998년 우리나라에서 채집된 이석 중, 총 6쌍을 비교하였는데, 연마하여 투명대를 계수하는 본 연구진의 방법과 전통적인 절단-소각 방법의 결과가 동일하였다(Table 2). 연령사정을 실시한 후, 위문 및 이상륜이 있는지 없는지를 가려내기 위하여 이석경과 윤경 간의 상관관계를 살펴보았다. 실험에 사용된 표본의 수가 많지 않았지만, 각 윤문 측정치는 이석경과 윤경이 직선의 관계를 가지면서 일정한 간격으로 분포하고 있으

Table 2. Comparison of age determined by grinding (sagittal plane) and break-and-burn (vertical plane) methods for walleye pollock (*Theragra chalcogramma*) otoliths

Country	Sampling year	Specimen No.	Fork length (cm)	Otolith length (mm)	Age	
					Sagittal plane	Vertical plane
Korea	1997	4	26.2	12.89	2	2
		5	24.3	10.00	2	2
		8	26.4	12.80	2	2
		25	27.8	11.73	2	2
	1998	12	35.0	14.97	3	3
		13	34.5	15.78	3	3

Fig. 3. Monthly changes of marginal index of walleye pollock (*Theragra chalcogramma*). Results from this research (large circles) are superimposed on those (small dots) from Park *et al.* (1978). Note that the former were from otoliths and the latter from scales.

므로 이석의 윤경을 연륜형질로 사용할 수 있었다. 그리고 실험에 사용된 우리나라와 일본 명태 시료를 이용해 연역 지수를 계산한 결과, 7월에 낮은 값을 보이다가 10월, 11월에 점차 값이 증가하고 2~3월까지 비교적 높은 값이 나타나므로 4~5월 사이에 윤문이 생성되는 것으로 추정할 수 있었다(Fig. 3). 이 결과는 명태의 체성장이 여름부터 항상되기 시작하여, 이듬해 초까지 지속되는 것으로 이해된다.

수온 변동

우리나라 동해 연안역의 표층수온은 계절에 따라 큰 차이가 있지만, 수심 200 m 보다 깊은 곳에서는 연중 1.0~1.5°C 안정된 수온을 보이고 있다. 연구에 이용된 명태가 태어난 1994년부터 연구가 종료된 1999년까지의 수심 50 m의 10월, 12월의 평균 수온이 8.8°C, 10.4°C로 6월, 8월의 평균 수온 5.3°C, 7.8°C보다 높았다(Fig. 4). 100 m 수심에서는 12월부터 다음해 2월까지의 수온이 연중 최고치를 나타내고 있었으며, 수심 200 m 이상에서는 계절적 변동이 거의 없었다. 연구 기간 동안 상층부에서 미약하게나마 수온의 상승이 있었던 것과는 달리, 200 m 보다 깊은 곳에서는 1990년대 후반에 들어와 더 낮아졌다. 수온의 계절적 변화는 상층부에서 심하게 일어났는데, 특히 1996년 50 m의 8월 수온이 4.4°C인 것에 비하여 1997년과 1998년에 8.0°C, 11.7°C로 수온이 매우 많이 상승한 것을 알 수 있었다. 이석의 성장이 가장 왕성할 것이

Fig. 4. Seawater temperature variation off the east sides of (a) the Korean Peninsula and (b) Hokkaido during the 1994-1999 period. Regression lines showed the increasing trend of seawater temperature at 50 m during the 1990s.

라고 가정한 6~12월 동안 수심 50 m에서의 6년 평균 수온은 8.0°C이었으나, 1996년에는 6.2°C로 평균 수온보다 1.8°C나 낮았던 반면 1997년과 1998년은 각각 8.5°C, 9.0°C로 평균 수온보다 약 1°C 높아 1997년과 1998년에 수온이 많이 상승한 것을 확인할 수 있었다.

일본 홋카이도 동부 해역의 수온 특성은 우리나라 해역과는 약간 다른 양상을 보인다. 일본 연안은 우리나라 조사 해역보다 위도가 높지만, 우리나라와 마찬가지로 가을에 수온이 가장 높고, 특히 1990년대 말에 수심 50 m에서의 급격한 수온 상승이 나타나고 있다. 온난한 쿠로시오의 영향을 많이 받고 있는 이 해역은 수심 50 m에서 7~8월에 수온이 급상승하여 11월까지 이어지다가 12월부터 수온이 점차 내려가 1~6월까지 비슷한 수온이 유지된다(Fig. 4). 그리고 4월, 12월의 평균 수온이 4.7°C, 10.0°C로 우리나라의 4월, 12월의 평균 수온 6.0°C, 10.4°C보다 낮은 반면, 8월, 10월의 평균 수온은 9.1°C, 13.0°C로 우리나라 8월, 10월의 평균 수온 7.8°C, 8.8°C보다 높았다. 100 m 이하 수심에서는 우리나라 수온보다 모두 높았고, 300 m의 깊은 수심에서도 계절적으로 수온변화가 뚜렷하였다. 깊은 곳에서의 수온은 우리나라 연안의 수온보다 상당히 높은데, 대체로 수심 400 m에서의 수온이 우리나라 해역 100 m에서의 수온과 비슷하였다. 특히, 일본 해역에서는 1990년대 후반에 온난한 현상이 우리나라보다 뚜렷하여, 1999년에는 수심 50 m, 100 m, 200 m, 300 m, 400 m, 500 m의 수온이 연구기간 평균보다 각각 1.5°C, 0.9°C,

Table 3. Oxygen isotope ($\delta^{18}\text{O}$) values of walleye pollock (*Theragra chalcogramma*) otoliths collected in Korean waters during the 1997-1999 period

Sampling time	Specimens	$\delta^{18}\text{O}$ (‰) (age)			
		1995	1997	1998	1999
October, 1997	1	2.31 (0)	2.23 (2)		
	2	2.24 (0)	2.29 (2)		
	3	2.11 (0)	2.01 (2)		
	4	-	2.32 (2)		
	5	2.53 (0)	1.91 (2)		
Mean		2.30	2.15		
November, 1998	1	2.41 (0)		2.35 (3)	
	2	2.68 (0)		2.50 (3)	
	3	2.50 (0)		3.15 (3)	
	4	2.55 (0)		2.44 (3)	
	5	2.04 (0)		2.92 (3)	
Mean		2.44		2.67	
November, 1999	1			2.25 (0)	3.39 (1)
	2			2.54 (0)	1.70 (1)
Mean				2.40	2.55
November, 1999	1		2.32 (0)		2.17 (2)
	2		2.56 (0)		3.32 (2)
Mean			2.44		2.75

0.4°C, 0.5°C, 0.4°C, 0.3°C 높았다.

이석 내 산소동위원소 비

실험에 사용된 우리나라 명태는 1997년, 1998년에 채집된 각 5마리, 1999년의 4마리로, 이들 명태에서 추출한 이석 내 산소동위원소($\delta^{18}\text{O}$) 값은 최대 3.39‰, 최소 1.70‰의 범위를 나타냈다(Table 3). 1997년의 명태는 2세어로 1995년(핵 부분)과 1997년(가장자리 부분)에 형성된 부분에서 산소동위원소 평균값은 각각 2.30‰, 2.15‰이었고 1998년 명태는 3세어로 1995년(핵 부분), 1998년(가장자리 부분)에 형성된 부분에서 각각 2.44‰, 2.67‰의 평균값을 보였다. 그리고 1999년의 1세 명태는 1998년(핵 부분)과 1999년(가장자리 부분)에 형성된 것으로 평균값이 각각 2.40‰, 2.55‰이었고 2세 명태는 1997년(핵 부분)과 1999년(가장자리 부분)에 형성된 것으로 각각 2.44‰, 2.75‰의 평균값을 나타냈다. 연도별 산소동위원소의 표준편차의 범위는 0.17~0.81‰이었다.

실험에 사용된 일본 명태는 매년 5마리로, 이들 명태 이석 내 산소동위원소 최대, 최소값은 각각 2.91‰, 1.66‰이었다. 1997년에 어획된 명태는 3세어로 1994년(핵 부분), 1997년(가장자리 부분)에 형성된 부분의 산소동위원소 평균값은 각각 1.93‰, 2.60‰를 나타냈고 1998년 명태 역

Table 4. Oxygen isotope ($\delta^{18}\text{O}$) values of walleye pollock (*Theragra chalcogramma*) otoliths collected in Japanese waters during the 1997-1999 period

Sampling time	Specimens	$\delta^{18}\text{O}$ (‰) (age)				
		1994	1995	1996	1997	1998
October, 1997	1	2.10 (0)			2.91 (3)	
	2	2.24 (0)			-	
	3	1.84 (0)			2.37 (3)	
	4	1.83 (0)			2.73 (3)	
	5	1.66 (0)			2.38 (3)	
Mean		1.93			2.60	
July, 1998	1		2.33 (0)			2.21 (3)
	2		2.49 (0)			2.70 (3)
	3		2.38 (0)			2.27 (3)
	4		2.34 (0)			2.23 (3)
	5	2.21 (0)				2.02 (4)
Mean			2.39			2.35
February, 1999	1		2.04 (0)			2.27 (3)
	2		1.94 (0)			2.37 (3)
	3	2.44 (0)				2.71 (4)
Mean			1.99			2.32
November, 1999	1			1.95 (0)		2.60 (2)
	2			2.09 (0)		1.95 (2)
Mean				2.02		2.28

시 3세어로 1995년에 형성된 부분(핵 부분)의 평균값은 2.39‰, 1998년에 형성된 부분(가장자리 부분)의 평균값은 2.35‰이었다. 그리고 1999년 명태는 2세어와 3세어로 1996년(핵 부분), 1998년(가장자리 부분)에 형성된 부분에서 각각 2.02‰, 2.28‰, 1995년(핵 부분), 1998년(가장자리 부분)에 형성된 부분에서 각각 1.99‰, 2.32‰의 평균값을 보였다(Table 4). 실험에 사용된 시료의 수가 적었기 때문에 분산값을 정확하게 추정하기에는 무리가 따랐으나, 우리나라와 마찬가지로 분산값이 작았고, 표준편차의 범위는 0.07~0.46‰이었다. 이때 1998년과 1999년에 어획되어 실험에 사용된 명태 중 4세 명태의 수가 하나씩 밖에 없었기 때문에 4세 명태의 산소동위원소 값은 제외시켰다.

우리나라와 일본 명태 이석의 핵 부분과 가장자리 부분의 산소동위원소 값을 비교해 보았을 때 핵 부분의 경우, 한국 연안에서 채집된 명태 이석의 산소동위원소 평균값이 일본 것에 비하여 대체로 높았다. 하지만 명태가 어획된 해에 형성된 이석으로부터의 동위원소 값은 양국간에 차이가 크지 않았다. 또한 산소동위원소는 1997년 한국 시료와 1998년 일본 시료를 제외한 모든 시료에서 핵 부분보다 가장자리 부분이 높았다. 즉, 명태가 성장을 하면

서 산소동위원소 값이 증가하는 경향을 보였고 이러한 경향은 일본 명태 이석에서 더 뚜렷하게 나타났다. 분산값의 경우, 핵 부분이 가장자리에서의 분산값에 비하여 낮은 것이 보편적이었다.

산소동위원소와 서식처 수온과의 관계

우리나라 근해에 서식하는 명태의 적수온은 3~5°C라고 알려져 있으며(국립수산진흥원 2000), 북태평양의 다른 해역 명태 계군들도 대체로 이 수온 범위에 분포하고 있다. 일반적으로 명태는 자치어 시기에 표층에 서식하다가 고령어가 될수록 깊은 수심으로 이동하는 것으로 알려져 있다(Muigwa 1988). 한국 연안의 200 m 수심에서는 연중 1.1~1.4°C의 수온이 나타나고 있으며, 이 정도의 낮은 수온은 명태 서식수온으로 적합하지 않을 것으로 보인다. 그러므로 우리나라 동해 연안에서는 따뜻한 대마난류 수괴가 간헐적으로 깊은 수심을 차지할 때를 제외하고는 명태가 200 m보다 얕은 곳에 위치할 것이다. 반면, 일본의 동쪽 연안은 쿠로시오의 영향을 받기 때문에 수심 500 m에서도 평균 3.0~3.6°C의 따뜻한 수괴가 연구 기간 내내 출현하고 있었으며, 그 결과 어업 수심도 200~360 m로 한국 연안보다는 훨씬 깊게 나타났다(Table 1).

이석 내 산소동위원소 값과 명태가 서식하는 수심의 수온을 비교하였다. 이석 가장자리 부분(어획된 연도에 성장한 부분)의 산소동위원소 평균값은 우리나라 명태의 경우, 1997년(2세), 1998년(3세), 1999년(1세와 2세 평균) 각각 2.15‰, 2.67‰, 2.65‰로 1998년 3세 명태와 1999년 2세 명태에서 비교적 높은 값이 나타났고, 1997년 2세 명태에서 가장 낮은 값을 보였다(Fig. 5a). 주위 환경 수온이 낮으면 이석의 산소동위원소 값은 높아지므로, 연령이 같은 2세어인 1997년, 1999년에 어획된 명태의 산소동위원소 값을 비교해 보았을 때 1997년 명태가 1999년 명태보다 좀 더 따뜻한 수온 범위에서 서식했음을 추정할 수 있었고, 실제로 명태가 왕성하게 성장했을 것이라고 가정한 12월의 100~200 m 수온범위는 1997년에 1.5~5.6°C로 가장 높았고, 1998년, 1999년에는 1.3~3.2°C와 1.2~3.9°C로 다소 낮았다. 1998년에 어획된 명태는 3세어이기 때문에 다른 연령 명태의 서식 수심과 다소 다를 가능성이 있으므로 해석에서 제외하였다. 일본 3세 명태 이석의 가장자리 부분의 산소동위원소 값은 1997년부터 1999년까지 각각 2.60‰, 2.35‰, 2.32‰이었다(Fig. 5b). 명태가 서식했으리라 가정한 수심 200~300 m의 12월 수온범위는 1997년에 2.3~4.0°C, 1998년에 3.3~3.6°C이었고 1999년에 4.6~5.0°C이었다. 즉, 산소동위원소 값은 1997년에 가장 높았고 1998년, 1999년 순이었으며, 명태 서식 수층의 수온은 그 반대로 나타나 산소동위원소와 수온간에 음의 상관관계를 보였다(예: 300 m 수심의 수온과 산소동위원소의 r

Fig. 5. Relationship between seawater temperature range (●) in December and oxygen stable isotope ($\delta^{18}\text{O}$) content (□) at marginal area of walleye pollock otolith. (a) Korean waters (temperature at 100~200 m depth), and (b) Japanese waters (temperature at 200~300 m depth).

$= -0.87$).

한편, 핵 부분(age-0)의 산소동위원소 평균값은, 우리나라 명태의 경우 1995년, 1997년과 1998년에 채집된 것 모두 1995년에 형성된 것으로 각각 2.30‰, 2.44‰(평균 2.37‰)이었고, 1999년에 채집된 시료는 1997년과 1998년에 형성된 것으로 각각 2.44‰, 2.40‰를 나타냈다(Fig. 6a). 이 값들은 통계적으로 유의한 차이가 없었고($p > 0.05$), 0세 명태가 주로 서식하는 수심 50 m에서의 10~12월 수온범위는 1995년 9.3~10.4°C, 1997년 6.7~9.6°C, 1998년 9.0~10.8°C이었다. 일본 명태의 경우 1997년, 1998년에 채집된 이석의 핵은 1994년과 1995년에 형성된 것으로 평균 산소동위원소값이 1.93‰, 2.39‰이었고 1999년에 채집된 이석에서 1995년과 1996년에 형성된 핵은 각각 1.99‰, 2.02‰를 보였다(Fig. 6b). 측정치가 하나씩 있는 자료는 해석에서 제외하였으므로 1994~1996년의 평균값은 각각 1.93‰, 2.25‰, 2.02‰이다. 그때 수심 50 m의 10~11월 수온범위는 1994년 14.0~14.4°C, 1995년 11.8~13.1°C, 1996년 10.7~11.3°C로서 1994년의 따뜻한 수온이 낮은 산소동위원소의 함량을 유발한 것으로 보인다. 두 지역의 산소동위원소 값과 수온을 비교해 보면 대체로 우리나라 명태 이석의 핵 부분과 가장자리 부분 모두 일본 명태 이석보다 산소동위원소 값이 높게 나타났으며, 명태 서

Fig. 6. Relationship between seawater temperature (●) and oxygen stable isotope ($\delta^{18}\text{O}$) content (□) at core area of walleye pollock otolith. (a) Korean waters (temperature at 50 m depth during Oct.~Dec.), and (b) Japanese waters (temperature at 50 m depth during Nov.~Dec.).

식지의 수온은 우리나라보다 일본 동부해역이 높았다.

4. 고 찰

실험에 사용되었던 명태는 모두 1997~1999년 사이에 채집된 것으로, 2~3세의 미성어와 이제 막 산란에 참여한 어린 성어가 대부분이었다. 일반적으로 이석의 성장은 그 어종의 성장 형태와 같으며, 수온 혹은 먹이 생물의 풍도 등에 큰 영향을 받아 수온이 낮은 늦겨울부터 성장이 느려지다가 수온이 올라가는 봄부터 초겨울까지 성장이 빠르다(Blacker 1974). 본 연구에서 얻은 연역지수는 겨울에서 여름으로 넘어가는 4~5월에 가장 낮은 값을 보였으며, 해양의 수온도 이 시기에 가장 낮게 나타나므로 윤문이 봄에 형성된다고 추정할 수 있었다. 그러나 실험에 사용된 표본수가 많지 않았을 뿐만 아니라 월별 채집이 이루어지지 않았기 때문에 명태의 비늘을 가지고 윤문형성 시기를 추정한 박 등(1978)의 연구와 결과를 비교하였다(Fig. 3). 그들의 연구 결과에서는 겨울에 연역지수가 낮고 여름에 높은 경향을 보여 12월부터 2월에 윤문이 형성된다고 보았다. 그러나 비늘을 이용한 연구에서도 4월과 5월에 조사된 결과가 없었기 때문에 대략적인 결과만을 보여주는 것이라고 할 수 있으며, 두 결과를 종합하면 명태의 경우

5월 이전에 윤문이 형성된다고 할 수 있다.

명태가 생활사에 따라 서식 수심을 달리한다는 가정하에, 산소동위원소 값과 서식 수온과의 관계를 살펴보았으며, microdrill을 사용하여 이석의 연령별 산소동위원소 분석을 시도하여 환경 지시자(environmental indicator)로서의 이석의 역할을 살펴보았다. 이 방법은 이석 내 화학 조성을 어류의 생활사 별로 추적할 수 있으므로, 과거에 김과 강(2001)이 이석을 통째로 갈아서 분석한 방법으로부터 발생하는 문제를 일정 부분 해결하였다. 이 방법으로 산소동위원소와 명태가 경험하는 수온간에 음의 상관관계가 있음을 알 수 있었고, 이석의 핵 부분에서 가장자리 쪽으로 갈수록 산소동위원소 값이 증가하는 경향이 나타나 명태가 성장을 하면서 깊은 수심으로 이동하는 것을 확인할 수 있었다. 본 연구에서는 이석의 연령대 별로 시료를 채취하는 과정에서 가장 실수의 요소가 적은 핵과 가장자리 부분만을 선택하였다. 핵과 가장자리 사이에 해당되는 어류의 중간 생활사 단계의 생태현상을 정확하게 파악하기 위해서는, 연령대별 이석 시료를 정확하게 얻을 수 있는 방법이 개발되어야 한다.

일반적으로 어류 이석 내 산소동위원소 1‰의 변화는 어류 서식 수온의 약 4~5°C 차이에 해당한다고 알려져 있다(Grossman and Ku 1986; Kim and O'Neil 1997). 본 연구에서 대부분의 분석 결과는 명태의 연령이 증가할수록 산소동위원소의 값이 높고, 서식 수온이 낮았음을 보여주고 있었지만, 산소동위원소 함량과 서식수온과의 관계는 기존의 연구결과와 약간의 차이가 있었다. 특히, 1997년 한국 시료와 1998년 일본 시료의 경우 핵 부분보다 가장자리 부분의 산소동위원소 값이 낮게 나타났는데, 1997년 한국에서 채집된 2세 명태의 경우 속초 앞바다의 수심 60~70 m에서 어획되었으므로, 서식 수심이 100~200 m가 아니라 더 얕을 수 있는 가능성을 제시하고 있다. 또 다른 해석으로는 수온측정지역과 명태의 지리적 분포의 차이를 고려하는 것이다. 명태 서식지의 수온을 파악하기 위한 해역은 연안 가까이의 냉수가 출현하는 해역으로 국한되었지만, 실제로 명태가 분포하는 범위는 아직 알려져 있지 않다. 만약 명태가 난류수가 우세한 외양쪽으로 넓게 분포하고 있었다면, 산소동위원소의 값이 낮게 나타날 수 있다. 실제로 1997년 명태의 서식 수심인 100~200 m 수온은 다른 해에 비교하여 높았기 때문에 이 해에는 명태가 비교적 높은 수온에 노출되어 있었을 가능성이 있다. 또한 1998년 채집된 일본 시료도 이석의 핵 부분(2.39‰)보다 가장자리 부분(2.35‰)의 산소동위원소 값이 낮았는데, 1998년 시료는 채집시기가 7월이므로 명태의 주성장시기로 가정할 달의 수온 변동을 명확히 반영한다고 보기 어렵다. 또한 명태 이석의 산소동위원소 변화폭은 이석의 주요 성장시기 동안의 평균 수온의 변화를 정확히 반영하지

못하고 있다. 예를 들면, 1997년 한국 명태 이석의 가장자리에서 채집된 산소동위원소의 값은 2.15‰로 같은 해 일본 명태 이석의 산소동위원소 값(2.60‰) 보다 0.45‰ 낮게 나타났지만, 평균 수온은 0.4°C만 차이가 났다(Fig. 5). 또한, 수층별 수온 차이가 큰데 비하여, 명태 이석내 산소동위원소의 차이는 미약하게 나타나고 있어, 명태의 성장에 따른 수직회유 만으로 산소동위원소의 값을 해석하는 것은 무리가 있는 것으로 판단되며, 명태의 수평 이동에 따른 서식지의 수온변화가 동위원소에 일부 반영되었을 것으로 이해된다. 향후, 시료의 채집 시기, 수온의 정밀 관측 결과, 지역 계군 등을 고려하여 이 관계를 재검토하여야 할 것이다.

본 연구로부터 이석 내 산소동위원소 함량 비교를 통해 우리나라와 일본 명태의 서식 환경이 해마다 그리고 생활사에 따라 조금씩 다를 수 있었다. 핵 부분의 산소동위원소의 값은 한국 명태가 일본 명태보다 높았으며, 이는 0세 명태가 서식하는 한국 측 표층해역이 일본 측 해역보다 더욱 차가 때문이다. 하지만 가장자리에서의 산소동위원소 값은 양 해역 모두에서 서로 비슷하게 나타났는데, 그 원인은 성어가 되면서 서식 깊이를 조절하면서 적정 수온에 서식하기 때문인 것으로 생각된다. 핵 부분의 산소동위원소 분산값이 가장자리보다 낮게 나타나는 현상은, 생존에 성공한 명태들이 갓 태어났을 때에는 비교적 유사한 환경을 경험하고 있었지만, 나이가 들면서 더욱 다양한 환경변화를 경험하였기 때문일 것이다. 명태의 생활사별 서식지 이동 상황이 좀 더 정밀하게 관측되고, 이석의 핵과 가장자리 부분뿐만 아니라 중간 연령에서의 화학분석 결과 해석이 가능했다면, 해양환경의 변동을 지시하는 환경지시자로서의 이석의 역할이 더 분명했을 것이다. 이와 같은 화학물 분석 연구 방법은 특히 지난 세기에 북태평양에서 발생하였던 급격한 기후 및 환경변동(예: 1976/77, 1988/89, 1997/98년의 climate regime shift)이 생태계에 미친 영향(Hare and Francis 1995; Hare *et al.* 1999)을 설명하는 좋은 수단이 될 것이다.

5. 요 약

이석(otoliths)은 경골 어류의 내이(inner ear)에 존재하는 평형석으로 어류의 성장과 함께 성장하며, 이석 내 산소동위원소는 어류가 서식했던 수온에 영향을 받으며 침전되기 때문에 어류가 서식했던 서식처의 수온을 반영한다고 알려져 있다. 본 연구에서는 명태 이석 내 산소동위원소($\delta^{18}\text{O}$)와 서식 수온과의 관계를 조사하여, 명태의 생활사에 따른 서식지의 변동을 비교하였다. 우리나라와 일본의 동쪽 해역에서 1997~1999년 사이에 채집된 명태로부터 이석을 채취하여 연령대 별로 산소동위원소 함량을

분석하였으며, 수온 자료는 양국의 해양자료센터(KODC, JODC)로부터 획득하였다. 명태가 서식하는 수심의 수온은 가을과 겨울에 걸쳐 연중 가장 높았고, 우리나라 동해 연안은 200 m 이상의 수심에서는 계절적 변동이 거의 없이 낮은 수온이 분포하는 안정된 상태였으나, 일본 해역에서는 300 m의 비교적 깊은 수심에서도 계절적 변화를 보였다. 전반적으로 모든 수심에서 우리나라 보다 일본 연안의 수온이 높았으며, 일본 해역의 명태가 우리나라 명태보다 깊은 곳에 서식하였다. 우리나라와 일본 명태 이석의 산소동위원소 값은 대부분 시료에서 이석의 핵 부분 보다는 가장자리 부분에서 산소동위원소 값이 높아 명태가 성장하면서 수온이 낮은 깊은 수심으로 이동하는 것으로 이해된다. 또한, 3년 동안의 수온변화와 그 당시 성장하였던 이석의 산소동위원소 값은 역상관 관계를 보이고 있다.

사 사

본 연구에 필요한 시료의 수집에서부터 분석의 종료에 이르기까지 많은 시간이 지났으며, 그 과정에 많은 사람의 도움이 있었습니다. 그간 수고하였던 본 연구실 내외의 여러 협조자에게 감사드립니다. 이 논문에 대한 최종 정리는 “기상청 기상지진기술개발사업(CATER 2006-4503)”의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 국립수산진흥원. 2000. 배타적경제수역(EEZ) 주요어업자원의 생태와 어장. 국립수산진흥원 자원조사자료집 제20호. 332 p.
- 김수암. 1992. 베링해 명태자원의 현황과 연구방향: (III)생물학적 특징(성어). *해양연구*, **14**, 171-189.
- 김수암, 강수경. 1998. 동해의 수산자원 현황 및 연구 방향. *한국수산자원학회지*, **1**, 44-58.
- 김수암, 강수경. 2001. 동해생태계 특성 규명을 위한 안정동위원소의 이용: 명태와 연어 이석의 경우. *한국수산자원학회지*, **4**, 64-72.
- 박병하, 허장봉, 김현길. 1978. 한국동안 명태의 연령과 성장. 국립수산진흥원 연구보고, **20**, 33-42.
- 이병기, 박승원, 김진건. 1989. 연근해어업개론. 태화출판사, 서울. 313 p.
- Blacker, R.W. 1974. Recent advances in otolith studies. p. 67-90. In: *Sea Fisheries Research*, ed. by F.R. Harden Jones. Elek, London.
- Campana, S.E. 1999. Chemistry and composition of fish otoliths: Pathways, mechanism and application. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **188**, 263-297.
- Campana, S.E. and J.D. Neilson. 1985. Microstructure of fish otoliths. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, **42**, 1014-1032.

- Degens, E.T., W.G. Deuser, and R.L. Haedrich. 1969. Molecular structure and composition of fish otoliths. *Mar. Biol.*, **2**, 105-113.
- Fey, D.P. 2005. Is the marginal otolith increment width a reliable recent growth index for larval and juvenile herring? *J. Fish Biol.*, **66**, 1692-1703.
- Gauldie, R.W., C.E. Thacker, and L. Wang. 1998. Movement of water in fish otoliths. *Comp. Biochem. Physiol. Part A*, **120**, 551-556.
- Grossman, E.L. and T.-L. Ku. 1986. Oxygen and carbon isotopes fractionation in biogenic aragonite: Temperature effects. *Chem. Geol.*, **59**, 59-74.
- Hare, S.R. and R.C. Francis. 1995. Climate change and salmon production in the Northeast Pacific Ocean, p. 357-372. In: *Climate change and northern fish populations*, *Can. Spec. Publ. Fish. Aquat. Sci.*, **121**, ed. by R.J. Beamish. National Research Council of Canada.
- Hare, S.R., N.J. Mantua, and R.C. Francis. 1999. Inverse production regimes: Alaska and west coast Pacific salmon. *Fisheries*, **24**, 6-14.
- Høie, H., E. Otterlei, and A. Folkvord. 2004. Temperature-dependent fractionation of stable oxygen isotopes in otoliths of juvenile cod (*Gadus morhua* L.). *ICES J. Mar. Sci.*, **61**, 243-251.
- Kalish, J.M. 1991. Oxygen and carbon stable isotopes in fish otoliths of wild and laboratory-reared Australian salmon (*Arripis trutta*). *Mar. Biol.*, **110**, 37-47.
- Kendall Jr., A.W., J.D. Schumacher, and S. Kim. 1996. Walleye pollock recruitment in Shelikof Strait: Applied fisheries oceanography. *Fish. Oceanogr.*, **5**, 4-18.
- Kennedy, B.P., A. Klaue, J.D. Blum, C.L. Folt, and K.H. Nislow. 2002. Reconstructing the lives of fish using Sr isotopes in otoliths. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, **59**, 925-929.
- Kim, S.T. and J.R. O'Neil. 1997. Equilibrium and nonequilibrium oxygen isotopes effects in synthetic carbonates. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **61**, 361-375.
- Muigwa, N.M. 1988. Vertical distribution patterns of prespawning and spawning pollock (*Theragra chalcogramma*) in Shelikof Strait. p. 403-432. In: *Proc. Int. Symp. Biol. Mgmt. Walleye pollock*, November 14-16.
- NOAA. 2008. Age and Growth Program. Available from WWW: <<http://www.afsc.noaa.gov/refm/age/procedures.htm>> [cited 2008-06-30].
- Sakurai, Y. 1988. Reproductive characteristics of walleye pollock with special reference to ovarian development, fecundity and spawning behavior. p. 97-115. In: *Proc. Int. Symp. Biol. Mgmt. Walleye pollock*, November 14-16.
- Short, J.A., C.M. Gburski, and D.K. Kimura. 2006. Using otolith morphometrics to separate small pollock, *Theragra chalcogramma* from Arctic cod *Boreogadus saida* in mixed samples. *Alaska Fish. Res. Bull.*, **12**, 147-152.
- Thorrold, S.R., C.M. Jones, P.K. Swart, and T.E. Targetta. 1998. Accurate classification of juvenile weakfish cynoscion regalis to estuarine nursery areas based on chemical signatures in otoliths. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **173**, 253-265.
- Villiers, de S., B.K. Nelson, and A.R. Chivas. 1995. Biological controls on coral Sr/Ca and $\delta^{18}\text{O}$ reconstructions sea surface temperature. *Science*, **269**, 1247-1249.

Received Feb. 26, 2008

Revised Jul. 10, 2008

Accepted Sep. 1, 2008