

迎日灣 漂泳群集内の ²¹⁰Po 蓄積

徐海莛 · 金聲秀* · 高有峰** · 南基完*** · 尹晟圭**** · 尹良湖***** ·
 趙守根***** · 洪在上*****
 全南大學校 海洋學科 · *釜山水產大學校 海洋科學共同研究所 · **濟州大學校 海洋學科 ·
 釜山水產大學校 海洋生物學科 · *大邱大學校 生物教育科 ·
 *****麗水水產大學校 海洋學科 · *****群山大學校 海洋資源育成學科 ·
 *****仁荷大學校 海洋學科

²¹⁰Po Accumulation in the Pelagic Community of Yongil Bay, Korea

Hae-Lip SUH, Seong-Soo KIM*, You-Bong GO**, Ki Wan NAM***,
 Sung Gyu YUN****, Yang-Ho YOON*****, Soo-Gun JO*****and Jae-Sang HONG*****

Department of Oceanography, Chonnam National University, Kwangju 500-757, Korea

*Korea Inter-University Institute of Ocean Science, National Fisheries University of Pusan, Pusan 608-737

**Department of Oceanography, Cheju National University, Cheju 690-756, Korea

***Department of Marine Biology, National Fisheries University of Pusan, Pusan 608-737, Korea

****Department of Biology Education, Taegu University, Taegu 713-714, Korea

*****Department of Oceanography, Yosu National Fisheries University, Yosu 550-749, Korea

*****Department of Living Marine Resources, Kunsan National University, Kunsan 573-360, Korea

*****Department of Oceanography, Inha University, Incheon 402-751, Korea

A study was made of the concentration of the naturally occurring radionuclide ²¹⁰Po in seawater, plankton and fishes collected from Yongil Bay, Korea, in summer 1993. The mean value of the ²¹⁰Po concentration in sea water was determined to be about 1.9 mBq/l, with the proportion of the dissolved forms being about 46%. The mean ²¹⁰Po concentration factor in the centric diatom *Skeletonema costatum*, comprises > 95% of the total phytoplankton cell number, was 7.6×10⁴. Of five species of zooplankton examined, four species (two copepods and two mysids) had ²¹⁰Po concentrations in the range of 210~585 mBq/g dry weight. A copepod *Labidocera bipinnata*, however, was exceptional with a particularly high ²¹⁰Po level of 2,070 mBq/g. This indicates that *L. bipinnata* is primarily a raptorial feeder. The concentration of ²¹⁰Po in the pyloric caecum of pelagic fishes was 2,979~3,811 mBq/g, with the concentration factors of 3.4~4.3×10⁶. The food chain concentration of ²¹⁰Po occurred as follows: phytoplankton < filter feeding copepods < omnivorous mysids < raptorial copepod < pelagic fishes.

Key words : ²¹⁰Po accumulation, pelagic community, food chain

序 論

해양생태계에는 時·空間을 공유하는 여러 생물군집들이 존재하며, 각 군집의 생물은 긴밀하게 상호작용하며 살아간다. 생태계 내의 모든 생물은 먹이사슬

을 경유하여 에너지 흐름에 참여하므로, 각 생물군의 영양단계를 파악하면 에너지 흐름의 경로를 쉽게 이해할 수 있다. 해양생태계의 영양단계를 주로 胃內容物 분석, 糞粒內容物 분석, 기능형태학적 조사, 사육 실험 등으로 연구해 왔다. 게다가 최근 安定同位元素

이 논문은 1993년도 교육부 학술연구조성비(해양과학분야)에 의하여 연구되었음.

(^{15}N 와 ^{13}C)와 天然放射性 核種 (^{210}Po 와 ^{210}Pb) 분석으로 영양단계를 연구하기에 이르렀다.

천연 U/Th계열 방사성 핵종 중 ^{210}Po (반감기: 138일)은 ^{210}Pb (반감기: 22년)이 放射崩壞하면서 ^{210}Bi (반감기: 5일)을 거쳐 태어난다. 표층수중의 ^{210}Po 은 대기에서 일부 들어오지만, 해수중의 ^{210}Pb 이 붕괴하여 대부분 공급된다. 해수중 ^{210}Po 은 입자물질과 반응을 잘하는 원소이므로, 입자물질이 많은 연안역에서 효과적으로 제거된다 (Tsunogai and Nozaki, 1971; Bacon et al., 1988; Nozaki et al., 1991). 영양염류처럼 표층수중 ^{210}Po 은 생물기원 입자와 주로 결합하여 有光層 아래로 가라앉으며, 그곳에서 다시 해수중으로 재생된다 (Bacon et al., 1976; Nozaki and Tsunogai, 1976; Beasley et al., 1978; Cochran et al., 1983; Kadko, 1993). 특히 ^{210}Po 은 다른 방사성 핵종보다 생물체에 잘 농축되므로, 해양 플랑크톤 중의 농도가 沈降粒子나 無機懸濁粒子보다 훨씬 높게 나타난다 (Shannon et al., 1970; Kharkar et al., 1976; Fellow et al., 1981). 이로써 ^{210}Po 이 세포질과 잘 결합하는 것을 알 수 있다 (Fisher et al., 1983). 생물체내의 ^{210}Po 농도는 영양단계에 비례하여 증가하므로 먹이사슬의 상위 단계에서 가장 높다 (Heyraud and Cherry, 1979). 이러한 生物濃縮 현상을 바탕으로, ^{210}Po 을 생태계 먹이순환의 추적자로 이용한 연구가 여러 해역에서 시도되었다 (Shannon et al., 1970; Cherry et al., 1975; Cherry et al., 1987; Skwarzec and Bojanowski, 1988).

그러나, 표영균집을 이루는 식물플랑크톤, 동물플랑크톤, 유영동물의 ^{210}Po 농도를 지금까지 균집 수준에서 대부분 연구했고, 종수준 (species level)에서 연구한 예는 거의 없다. 동해에 사는 생물의 ^{210}Po 농도도 매우 드물게 연구되었고, 김 (1993)이 수영만에서 海藻類 몇 종을 조사했을 뿐이다. 그러므로, 1) 여름철 영일만에 나타나는 珪藻 大發生 시기 중 표영균집 내에 우점하는 종의 ^{210}Po 농도를 분석하여 濃縮係數를 구하고, 2) 우점종의 영양단계와 섭식생태를 본 연구에서 구명하고자 한다.

材料 및 方法

1. 試料採集

본 연구의 시료는 모두 1993년 8월 14일에 동해 영일만에서 채집됐다 (Fig. 1). 해수시료를 van Dorn 채수기로 정점 세 곳에서 표층 채수했다. 채수하면서 T-S 브리지로 수온과 염분을 잴고, 그 값은 21.3~21.8°C와 25.7~27.2‰이었다. 또, 미리 무게를 재 둔 유리섬유 여과지 (GF/C, 직경: 47 mm, 공경: 1.0 μm)로 해수 21를 걸러서 여과지의 중량차로 총부유물질을 잰다. 해수 500 ml를 밀리포아 여과막 (공경: 0.45 μm)으로 걸러, 여과막을 90% 아세톤 10 ml에 담귀 색소를 추출한 후, 원심분리하여 상등액의 흡광도를 측정하여 클로로필 a를 잰다. 표층에서 250 ml를 채수하여 5% 중성 포르말린으로 고정·농축시켜, 실험실에서 식물플랑크톤의 종조성과 세포수를 광학현미경으로 조사했다. ^{210}Po 농도를 분석하려고 식물플랑크톤을 기타하라식 넷트 (직경: 30 cm, 망목: 100 μm)로 수심 5 m에서 표층까지 수직으로 채집하고 원심분리하여 60°C에서 24시간 말렸다.

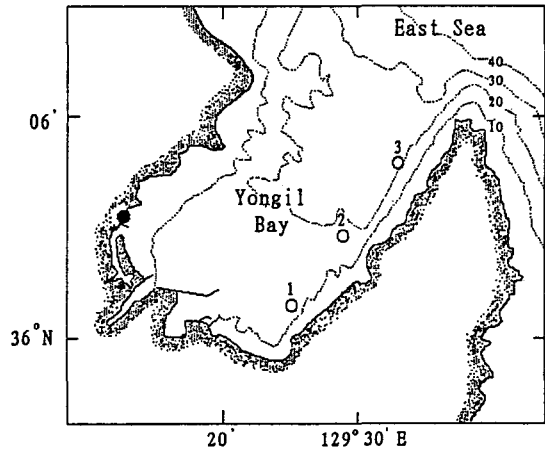


Fig. 1. Location of the sampling stations (open circles) in Yongil Bay. Mysids were caught at a station (solid circle) in the sandy beach surf zone. Bathymetric contours are in meters.

표준 넷트 (직경: 60 cm, 망목: 300 μm)를 약 1 m/sec로 비스듬히 끌어 동물플랑크톤을 채집했다. 또한, 모래해안 쇄파대에서 우점하는 동물플랑크톤인 곤쟁이류를 썰매 넷트 (망구: 12×30 cm, 망목: 300 μm)로 바닥을 끌어 채집했다. 채집한 동물플랑크톤을 현장

에서 5% 증성 포르말린으로 모두 고정하고, 실험실에서 동정하여 우점종을 종별로 골라내어 60℃에서 24시간 말렸다. 정치망에 잡힌 어류 다섯 종을 포함 위판장에서 4~5마리씩 사서 조사했다. 기존 자료와 비교하느라고 幽門盲囊 (pyloric caecum)의 ²¹⁰Po 농도를 조사했으며, 이 시료는 60℃에서 36시간 말렸다.

2. 前處理

여과하지 않은 해수중의 ²¹⁰Po 농도 (총농도)와 용존성의 농도를 나누어 잰다. 총농도 측정용 시료는 채수 하자마자 미리 산으로 세척한 용량 20l의 폴리에틸렌 용기에 넣고, 진한 질산을 더하여 시료수를 pH 1 이하로 했다. 해수를 실험실로 옮겨, 대량여과장치에서 밀리포아 여과막 (직경: 142 mm, 공경: 0.45 μm)으로 걸르고, 산을 더하여 pH 1 이하로 만들어 용존성 농도 측정용 시료로 썼다.

건조시킨 플랑크톤과 어류시료 무게를 정밀하게 재고 나서 테프론 비이커에 옮기고, 化學的 收率 모니터로 ²⁰⁹Po 표준용액 적당량을 더하여, 진한 질산과 과염소산과 불소산을 더하여 완전히 녹였다. 남아있는 불소산은 진한 질산으로 완전히 없애고, 찌꺼기를 0.5 M HCl 용액 약 50 ml에 녹여 Po동위체 電着用 시료로 사용했다.

3. 分析方法

해수중 ²¹⁰Po를 분리하여 농축하는 방법은 Harada and Tsunogai (1985)와 같다. 즉, 산으로 처리한 해수 약 20l에 화학적 수율 모니터로 ²⁰⁹Po 표준용액 적당량, Pb²⁺담체 18 mg과 Fe³⁺담체 30 mg을 더하여 잘 섞고 6시간 이상 그대로 둔다. 여기에 (1+2)

NH₄OH용액과 25% Na₂CO₃용액 약 240 ml를 더하여 해수중의 Pb과 Po 동위체를 수산화철과 탄산칼슘 침전물과 함께 가라앉힌다. 침전물을 모아 7.5N HNO₃ 용액으로 녹여서 약 30분간 가열하여 CO₂를 완전히 없앤다. 이 용액에 암모니아수를 더하여 용액 중의 Pb과 Po 동위체를 다시 수산화철과 함께 가라앉힌다. 이 침전물을 모아 0.5N HCl 용액 약 50 ml로 녹인다. 이 용액에 20% NH₂OH · HCl 용액 1 ml와 아스코르브산 약 50 mg을 더하고, 85~90℃에서 3시간 이상 서서히 저으면서 Po 동위체를 銀板 위에 電着시킨다. 여과하지 않은 시료의 찌꺼기를 불소산으로 완전히 녹여서 전착시킨다.

Po 동위체의 알파계수를 2048 채널 알파 검출기 (silicon surface barrier detector, 활성면적: 450 mm²)로 잰다. 또, 이 검출기의 계수효율을 일본 홋카이도 대학에서 제작한 ²⁰⁹Po 준표준선원으로 檢定했으며, 계수효율은 표준 계수 시료판에서 10 mm 가량 떨어졌을 때 약 30%였다. 이 검출기의 배경값은 ²⁰⁹Po과 ²¹⁰Po의 에너지 영역에서 보통 하루에 2 카운트 정도였다.

結 果

영일만 8월 표층수중 ²¹⁰Po의 총농도는 1.84~1.98 mBq/l (평균: 1.90 ± 0.07 mBq/l) 범위였으며, 총농도 가운데 44~48%는 용존성이었다. 총부유물은 3.62~11.5 mg/l (평균: 8.3 ± 4.1 mg/l)였다. 입자성 물질에 대한 비방사능 [specific activity=(총농도-용존성 농도)÷총부유물질 농도]은 162 ± 113 mBq/g d.w. (건

Table 1. ²¹⁰Po concentration in seawater samples of Yongil Bay. Data are in SI units of mBq/g rather than in pCi/g or dpm/g; values of mBq/g are converted from those of pCi/g and dpm/g multiplying by 37 and 16.67, respectively

Sample No.	Dissolved forms mBq/l	Suspended forms		Total concentration mBq/l
		mBq/l	% of the total amount	
1	0.81 ± 0.08	1.03 ± 0.09	56	1.84 ± 0.17
2	0.92 ± 0.07	1.06 ± 0.07	54	1.98 ± 0.14
3	0.91 ± 0.08	0.98 ± 0.14	52	1.89 ± 0.22
Mean	0.88 ± 0.06	1.02 ± 0.04	54	1.90 ± 0.07

Table 2. ^{210}Po concentration in phytoplankton samples of Yongil Bay. In all phytoplankton samples, the centric diatom *Skeletonema costatum* contained >95% of the total phytoplankton cell number

Sample No.	Chlorophyll-a mg/m ³	Cell number cells/l ×10 ⁶	^{210}Po concentration mBq/g d. w.	Concentration factor ×10 ⁴
1	11.48	6.6	59.2 ± 9.3	7.3
2	4.22	1.5	81.2 ± 7.3	8.8
3	18.45	11.5	60.0 ± 8.5	6.6
Mean	11.38	6.5	66.8 ± 12.5	7.6

조종량) 이었다 (Table 1). 조사기간에 영일만에는 규모 *Skeletonema costatum*이 大發生했는데 (클로로필 a: 4.22~18.45 mg/m³, 세포수: 1.5~11.5×10⁶ cells/l), 식물플랑크톤 총세포수의 95% 이상이 *S. costatum*이었다. *S. costatum*의 ^{210}Po 농도는 59.2~81.2 mBq/g 범위였으며, 농축계수 (concentration factor = 생물체내 ^{210}Po 농도 ÷ 해수중 용존성 ^{210}Po 농도)는 6.6~8.8×10⁴ 범위였다 (Table 2). 동물플랑크톤의 ^{210}Po 농도와 농축계수는 따로따로 210.2~2,070.4 mBq/g과 2.4~23.5×10⁵ 범위 안에 들었다 (Table 3). 플랑크톤 중 *Labidocera bipinnata*에서 최고값이 나타났지만 다른 요각류는 곤쟁이류보다 낮았다. 어류의 유문맹낭에서 ^{210}Po 농도와 농축계수는 따로따로 2,978.9~3,810.8 mBq/g과 3.4~4.3×10⁶으로 측정됐다 (Table 4).

Table 3. ^{210}Po concentration in zooplankton samples of Yongil Bay

Sample	^{210}Po concentration mBq/g d. w.	Concentration factor ×10 ⁵
Copepods		
<i>Calanus sinicus</i>	210.2 ± 20.7	2.4
<i>Paracalanus indicus</i>	361.9 ± 34.3	4.1
<i>Labidocera bipinnata</i>	2070.4 ± 213.9	23.5
Mysids		
<i>Acanthomysis</i> sp.	432.8 ± 28.5	4.9
<i>Archaeomysis kokuboi</i>	584.5 ± 43.2	6.6
Mean*	396.8 ± 155.4	4.5

**Labidocera bipinnata* was not taken into account due to its extreme value.

Table 4. ^{210}Po concentration in the pyloric caecum of fish samples caught in the waters of Yongil Bay

Sample	^{210}Po concentration mBq/g d. w.	Concentration factor ×10 ⁵
<i>Trachurus japonicus</i>	2978.9 ± 113.4	3.4
<i>Scomber japonicus</i>	3325.7 ± 140.0	3.8
<i>Thamnaconus modestus</i>	3442.4 ± 81.7	3.9
<i>Scamberomorus nipponius</i>	3655.7 ± 95.0	4.2
<i>Seriola quinqueradiata</i>	3810.8 ± 123.4	4.3
Mean	3442.7 ± 320.0	3.9

考 察

1. 海水

영일만 8월 표층수중 ^{210}Po 의 총농도는 1.84~1.98 mBq/l (평균: 1.90 ± 0.07 mBq/l) 범위였다 (Table 1). 남해와 동해 연안역 표층수 중 ^{210}Po 의 총농도를 분석하여, 김 (1993)은 따로따로 1.2~2.3 mBq/l과 0.7~1.3 mBq/l 범위에 있다고 했다. 본 연구결과는 김 (1993)의 동해 자료보다 조금 높았으나, 남해와는 비슷했다. 그리고, New York Bight 표층수중 ^{210}Po 농도의 연변 동쪽 0.3~1.5 mBq/l (Li et al., 1981), 봄철 동중국해와 황해 표층수중의 0.1~0.7 mBq/l (Nozaki et al., 1991), 겨울철 북해의 0.84 mBq/l (Zuo and Eisma, 1993), 발틱해의 0.4~0.6 mBq/l (Skwarzec and Bojanowski, 1988)보다는 본 연구결과가 높았다. 한편, 김 (1993)은 여름철 진해만과 수영만의 표층수중 총농도를 따로따로 1.3~1.9 mBq/l과 1.1~1.5 mBq/l로 보고했다.

영일만 8월 표층수중 ^{210}Po 농도는 赤潮가 자주 나타나 는 진해만의 최고값 1.9 mBq/l와 여름철 Narragansett만 표층수의 1.3~2.2 mBq/l (Santschi et al., 1979)와 비슷했다. 그러나 여름철 일본 혼카만 표층수의 0.4~0.9 mBq/l (Tanaka et al., 1983)보다는 높았다.

영일만 8월 표층수의 경우 총농도에서 차지하는 용존성 ^{210}Po 의 비율 44~48% (평균: 46%)는 김 (1993)이 보고한 진해만 7월 표층수의 60~99% (평균: 79%)와 수영만 8월 표층수의 57~94% (평균: 71%)와 비교하자면 현저히 낮은 값이었다. 게다가 발틱해의 68~90% (평균: 81%)보다도 낮았다 (Skwarzec and Bojanowski, 1988). 하지만 겨울철 북해 표층수의 45%와는 비슷했으며 (Zuo and Eisma, 1993), 반폐쇄적인 Narragansett만에서 용존성의 비율이 연중 30% 이하로 나타나 (Santschi et al., 1979) 영일만보다 더 낮았다. Zuo and Eisma (1993)는 겨울철 북해에서 ^{210}Po 의 총농도가 0.84 mBq/l에 불과했다는 점을 들어, 용존성의 비율이 낮았던 원인을 퇴적물이 재부유하여 입자성 물질이 증가한 데에서 찾았다. 앞에서와 같이, 수영만과 진해만의 용존성 ^{210}Po 농도는 영일만과 비슷했으나, 용존성의 비율은 영일만보다 높았다. 생물생산력이 높은 내만에서는 부유물질 (주로 식물플랑크톤)이 해수중 ^{210}Po 을 효과적으로 제거하므로 용존성 ^{210}Po 의 비율은 입자성 물질의 농도가 낮은 해역보다 일반적으로 낮다 (Tanaka et al., 1983). 영일만에서는 중심목 규조 *Skeletonema costatum*이 대발생하여 (Table 2) 생물기원 부유성 입자가 증가하였고, 이에 따라 용존성의 비율이 낮아진 듯하다.

2. 식물플랑크톤

식물플랑크톤의 ^{210}Po 농도는 주로 혼합종 (mixed-species) 시료를 대상으로 연구했는데 이는 대부분 채집이 어려웠기 때문이다. 지금까지 연구를 종합하면, 식물플랑크톤의 농도와 농축계수는 따로따로 25.0~338.4 mBq/g과 $2.4 \times 10^3 \sim 9 \times 10^4$ 범위 안에 든다 (Shannon et al., 1970; Cherry et al., 1987; Heyraud and Cherry, 1979; Skwarzec and Bojanowski, 1988). 진해만 식물플랑크톤을 혼합종 시료에서 측정된 농도와 농축계수는 따로따로 72~191 mBq/g과 $0.7 \sim 2.3 \times 10^5$ 이었다 (김, 1993). 식물플랑크톤 총세포수에서 한 종이 95% 이상을 차지하는 것을 단종 (monospecies)

시료라 하는데, 이 시료에서 종수준의 ^{210}Po 농도 현 장값을 알 수 있다. Fisher et al. (1983)과 Skwarzec and Bojanowski (1988)가 단종시료를 연구했다. 발틱해 규조류 *Coscinodiscus granii*와 황갈조식물 *Dinobryon balticum*의 단종시료를 분석하여, Skwarzec and Bojanowski (1988)는 따로따로 ^{210}Po 농도를 20.8 mBq/g과 60.8 mBq/g이고 농축계수를 2.8×10^3 과 7.4×10^4 이라고 보고했다. 게다가, *D. balticum*의 농도와 농축계수는 *C. granii*보다 높고, 혼합종 시료의 값은 두 종의 측정값 사이에 있다고 했다. 진해만의 경우 (김, 1993), 식물플랑크톤의 ^{210}Po 농도와 농축계수에서 시료간의 차가 따로따로 120 mBq/g과 1.5×10^5 으로 매우 크게 나타났다. 발틱해 (Skwarzec and Bojanowski, 1988)처럼, 그 이유는 진해만에서도 종조성이 변한 데 있는 듯 하지만, 식물플랑크톤의 종조성 자료가 없어 불행하게도 확인할 수 없다. 그리고, 지중해 규조류 *Thalassiosira pseudonana*와 녹조류 *Dunaliella tertiolecta*에서 ^{210}Po 농축과정을 조사하여, Fisher et al. (1983)은 세포의 생리상태와 세포 주변 해수의 화학적 상태에 따라 농축률이 변한다고 했다.

영일만 규조류 *S. costatum*의 ^{210}Po 농도가 발틱해 규조류 *C. granii*보다 높았고, 오히려 황갈조식물 *D. balticum*과 비슷했다 (Skwarzec and Bojanowski, 1988). 이로써 식물플랑크톤의 ^{210}Po 농도가 분류군 뿐만 아니라 같은 분류군내에서도 시·공간적으로 변할 수 있다는 것을 알 수 있다. 같은 종 안에서도 비슷한 현상이 나타날 것 같다. 이것을 확인하려면, 여러 해역에서 여러 종의 ^{210}Po 농도를 측정해야 할 것이다.

3. 동물플랑크톤

동물플랑크톤의 ^{210}Po 농도는 종에 따라 크게 변하고 (Skwarzec and Bojanowski, 1988), 종조성은 채집 장소, 수심, 채집용 네트의 종류에 따라서도 변한다. 동물플랑크톤의 ^{210}Po 농도는 주로 대형 플랑크톤 (2~20 mm)인 새우류와 크릴새우류에서 종수준으로 연구되었고 (Heyraud et al., 1976; Heyraud and Cherry, 1979; Cherry and Heyraud, 1982; Cherry et al., 1987; Heyraud et al., 1988), 중형 플랑크톤 (0.2~2 mm)에서는 매우 드물다. 지금까지 중형 동물플랑크톤의 ^{210}Po 농도와 농축계수의 범위는 따로따로 118.4~1,900.4 mBq/g과 $0.8 \sim 15 \times 10^5$ 으로 밝혀졌다 (Khar-

kar et al., 1976; Heyraud and Cherry, 1979; Skwarzec and Bojanowski, 1988). 중형 플랑크톤은 채집용 네트와 망목의 크기 따위를 조절하면 쉽게 많이 채집할 수 있지만, 同定이 어려워 중수준의 연구는 거의 없다. 더구나, 동물플랑크톤 가운데 생물량이 가장 많은 요각류의 ^{210}Po 농도를 중수준에서 밝힌 것은 중요한 의미를 갖는다.

본 연구에서 동물플랑크톤 다섯 종에 대한 섭식생태를 일부 구명할 수 있었다. 표층에 사는 요각류와 달리 곤쟁이류는 모래해변 쇄파대의 근저층 (near bottom)에 분포하므로, 곤쟁이류의 먹이 환경은 요각류와 다르다. 조사기간에 근저층에 있는 입자물질이 표층 것보다 두 배 정도 ^{210}Po 농도가 높게 나타나 (김성수, 미발표), 근저층에 사는 곤쟁이류는 표층에 사는 요각류보다 ^{210}Po 농도가 높은 먹이를 먹는 듯하다.

여름철 영일만 표층수에서 우점했던 요각류 가운데 *Labidocera bipinnata*의 ^{210}Po 농도는 2,070 mBq/g으로 나머지 요각류 두 종보다 10배 가량 높았다. Cherry et al. (1987)은 ^{210}Po 농도가 동물플랑크톤 크기에 반비례하여 낮아지는 특성, 곧 크기 효과가 있다고 했다. 그러므로 *L. bipinnata*의 고농도가 단순히 크기 효과에 따른 것인지 아니면 먹이 때문인지를 검토해야 한다. 조사기간에 우점했던 요각류 세 종 가운데 *Calanus sinicus*의 체장은 2.5 mm 정도였으나, *Paracalanus indicus*와 *L. bipinnata*는 모두 약 1 mm로 크기가 비슷했다. 그래도 *L. bipinnata*의 ^{210}Po 농도가 *P. indicus*보다 10배 정도 높게 나타났다 (Table 3). 이로써 *L. bipinnata*의 고농도는 먹이와 관련이 깊다는 것을 알 수 있다. 일찍이, *Labidocera*속의 요각류가 육식성이라는 것이 기능형태학적 연구 (Itoh, 1970), 糞粒내용물 조사 (Turner, 1984), 사육실험 (Anraku, 1963) 등으로 밝혀졌다. 본 연구에서 *L. bipinnata*가 전형적 육식성 포식자로 재확인되었다. 곧, 중형 동물플랑크톤에 속하면서도 본 종은 영양단계에서 다른 요각류보다 한 단계 높았다. *L. bipinnata*는 여름철 우리나라 연안에 흔하게 나타나므로 (서 등, 1991), 본 종이 다량 출현할 때는 연안생태계 내 에너지 흐름이 바뀔 수도 있겠다. 또한, *L. bipinnata*의 ^{210}Po 농도는 플랑크톤 시료에서 지금까지 최고값이었던 1,900 mBq/g (Kharkar et al., 1976)을 넘어서는 것이다.

4. 어류

어체 전체에서 측정된 ^{210}Po 농도는 8~1,234 mBq/g 범위 안에 있지만 (Cherry and Heyraud, 1982), 농도는 어체 부위에 따라 차가 크게 나타난다. Heyraud and Cherry (1979)는 참다랑어 *Thunnus thynnus*의 유문맹낭과 근육에서 ^{210}Po 농도를 따로따로 1,750~2,334 mBq/g과 6~8 mBq/g으로 측정하고, 같은 어체 내에서도 농도가 약 300배 차이 난다고 했다. 이러한 현상은 남극크릴새우 *Euphausia superba*에서도 나타나, 肝膵臟 (hepatopancreas)과 몸전체의 농도 사이에서 10~20배 정도 차이가 났다 (Cherry et al., 1987). 어류의 유문맹낭과 갑각류의 간체장은 기능적으로 비슷하여, 모두 소화효소를 분비하고 영양분을 저장한다. 이러한 기능과 고농도 값은 밀접한 관련이 있는 듯 하다 (Heyraud and Cherry, 1979; Cherry et al., 1987). 일반적으로 생물체내의 ^{210}Po 농도는 근육 < 몸전체 < 유문맹낭 및 간체장 順이다 (Heyraud and Cherry, 1979; Cherry et al., 1987). 본 연구에서는 어류 다섯 종의 유문맹낭에서 농도를 분석했는데, 그 값은 모두 참다랑어에서 측정된 지금까지의 최고값 (2334mBq/g; Heyraud and Cherry, 1979)을 넘었다.

要 約

1993년 여름 영일만에서 채집한 해수, 플랑크톤, 어류 내의 천연 방사성 핵종 ^{210}Po 농도를 조사했다. 해수중의 평균농도는 1.9 mBq/l이었고, 용존성의 비율은 46%였다. 식물플랑크톤 세포수의 95% 이상을 차지한 중심목 규조 *Skeletonema costatum*의 농축계수는 7.6×10^4 이었다. 동물플랑크톤 다섯 종을 조사했는데, 그 가운데 요각류와 곤쟁이류 두 종씩 모두 네 종의 농도범위는 210~584 mBq/g (건조중량)이었으나, 요각류 *Labidocera bipinnata*는 2,070 mBq/g으로 예외적으로 매우 높았다. 이 자료에서 *L. bipinnata*가 육식성 포식자로 나타났다. 어류 幽門盲囊의 ^{210}Po 농도와 농축계수는 따로따로 2,979~3,810 mBq/g과 $3.4 \sim 4.3 \times 10^6$ 이었다. 생물체내 ^{210}Po 의 농축계수는 식물플랑크톤 < 여과섭식 요각류 < 잡식성 곤쟁이류 < 육식성 요각류 < 浮魚類 順이었다.

謝 辭

자료채집과 실험실 분석작업에 참가하여 헌신적으로 도와 준 각 교수연구실의 학생들께 감사하며, 원고의 내용 중 부족한 점을 친절하게 지적해 주신 부산수산대 양한섭 교수님께 감사드립니다. 아울러 著者一同은 우리나라 해양생물학 발전에 크게 기여하신 漢陽大 生物學科 劉光日 교수님의 回甲을 축하드리면서 이 논문을 헌정합니다.

參 考 文 獻

- Anraku, M. 1963. Feeding habits of planktonic copepods. *Bull. Plankton Soc. Japan*, 9, 10~35.
- Bacon, M. P., R. A. Belastock, M. Tecotzky, K. K. Turekian and D. W. Spencer. 1988. Lead-210 and polonium-210 in ocean water profile of the continental shelf and slope south of New England. *Continent. Shelf Res.*, 8, 841~853.
- Bacon, M. P., D. W. Spencer and P. G. Brewer. 1976. $^{210}\text{Pb}/^{226}\text{Ra}$ and $^{210}\text{Po}/^{210}\text{Pb}$ disequilibria in seawater and suspended particulate matter. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 32, 277~296.
- Beasley, T. M., M. Heyraud, J. J. W. Higgo, R. D. Cherry and S. W. Fowler. 1978. ^{210}Po and ^{210}Pb in zooplankton fecal pellets. *Mar. Biol.*, 44, 325~328.
- Cherry, M. I., R. D. Cherry and M. Heyraud. 1987. Polonium-210 and lead-210 in Antarctic marine biota and sea water. *Mar. Biol.*, 96, 441~449.
- Cherry, R. D., S. W. Fowler, T. M. Beasley and M. Heyraud. 1975. Polonium-210: its vertical oceanic transport by zooplankton metabolic activity. *Mar. Chem.*, 3, 105~110.
- Cherry, R. D. and M. Heyraud. 1982. Evidence of high natural radiation doses in certain mid-water oceanic organisms. *Science*, 218, 54~56.
- Cochran, J. K., M. P. Bacon, S. Krishnaswami and K. K. Turekian. 1983. ^{210}Po and ^{210}Pb distributions in the central and eastern Indian Ocean. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 65, 433~452.
- Fellows, D. A., D. M. Karl and G. A. Knauer. 1981. Large particle fluxes and the vertical transport of living carbon in the upper 1500m of northeast Pacific Ocean. *Deep-Sea Res.*, 28, 921~936.
- Fisher, N. S., K. A. Burns, R. D. Cherry and M. Heyraud. 1983. Accumulation and cellular distribution of ^{241}Am , ^{210}Po , and ^{210}Pb in two marine algae. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 11, 233~237.
- Harada, K. and S. Tsunogai. 1985. A practical method for the simultaneous determination of ^{234}Th , ^{226}Ra , ^{210}Pb and ^{210}Po in seawater. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, 41, 98~104.
- Heyraud, M. and R. D. Cherry. 1979. Polonium-210 and lead-210 in marine food chains. *Mar. Biol.*, 52, 227~236.
- Heyraud, M., P. Domanski, R. D. Cherry and M. J. R. Fasham. 1988. Natural tracers in dietary studies: data for ^{210}Po and ^{210}Pb in decapod shrimp and other pelagic organisms in the Northeast Atlantic Ocean. *Mar. Biol.*, 97, 507~519.
- Heyraud, M., S. W. Fowler, T. M. Beasley and R. D. Cherry. 1976. Polonium-210 in euphausiids: a detailed study. *Mar. Biol.*, 34, 127~136.
- Itoh, K. 1970. A consideration on feeding habits of planktonic copepods in relation to the structure of their oral parts. *Bull. Plankton Soc. Japan*, 17, 1~10.
- Kadko, D. 1993. Excess ^{210}Po and nutrient recycling within the California coastal transition zone. *J. Geophys. Res.*, 98, 857~864.
- Kharkar, D. P., J. Thomson and K. K. Turekian. 1976. Uranium and thorium decay series nuclides in plankton from the Caribbean. *Limnol. Oceanogr.*, 21, 294~298.
- Kim, S. S. 1993. The behaviour of ^{210}Po and ^{234}Th in the Korean coastal waters. Ph. D. thesis, Nat. Fish. Univ. of Pusan, 106 pp (in Korean).
- Li, Y. H., P. H. Santschi, A. Kaufman, L. K. Benninger and H. W. Feely. 1981. Natural radionuclides in waters of the New York Bight. *Earth Planet. Sci.*

- Lett., 55, 217~228.
- Nozaki, Y. and S. Tsunogai. 1976. ^{226}Ra , ^{210}Pb and ^{210}Po disequilibria in the western North Pacific. Earth Planet. Sci. Lett., 32, 297~303.
- Nozaki, Y., H. Tsubota, V. Kasemsupaya, M. Yashima and N. Ikuta. 1991. Residence times of surface water and particle-reactive ^{210}Pb and ^{210}Po in the East China and Yellow Seas. Geochim. Cosmochim. Acta, 55, 1265~1272.
- Santschi, N. R., Y. H. Li and J. Bell. 1979. Natural radionuclides in the water of Narragansett Bay. Earth Planet. Sci. Lett., 45, 201~213.
- Shannon, L. V., R. D. Cherry and M. J. Orren. 1970. Polonium-210 and lead-210 in the marine environment. Geochim. Cosmochim. Acta, 34, 701~711.
- Skwarzec, B. and R. Bojanowski. 1988. ^{210}Po content in sea water and its accumulation in southern Baltic plankton. Mar. Biol., 97, 301~307.
- Suh. H-L., H. Y. Soh and S. S. Cha. 1991. Salinity and distribution of zooplankton in the estuarine system of Mankyong River and Dongjin River. J. Oceanol. Soc. Korea, 26, 181~192 (in Korean).
- Tanaka, N., Y. Takeda and S. Tsunogai. 1983. Biological effect on removal of ^{234}Th , ^{210}Po from surface water in Funka Bay, Japan. Geochim. Cosmochim. Acta, 47, 1783~1970.
- Tsunogai, S. and Y. Nozaki. 1971. Lead-210 and polonium-210 in the surface water profiles from the Pacific. Geochem. J., 5, 165~173.
- Turner, J. T. 1984. Zooplankton feeding ecology: contents of fecal pellets of the copepods *Acartia tonsa* and *Labidocera aestiva* from continental shelf waters near the mouth of the Mississippi River. Mar. Ecol., 5, 265~282.
- Zuo, Z. and D. Eisma. 1993. ^{210}Pb and ^{210}Po distributions and disequilibrium in the coastal and shelf waters of the southern North Sea. Continent. Shelf Res., 13, 999~1022.

1994년 11월 21일 접수

1995년 3월 11일 수리