

춘계 한국 동해남부 연안해역에서 해수중 ^{210}Po 와 ^{234}Th 의 제거

이행필 · 양한섭 · 김기현*
부산수산대학교 해양학과, *충남대학교 해양학과

Removal of ^{210}Po and ^{234}Th from Seawater at the East-southern Coastal Region of Korea Peninsula in Spring

Haeng-Pil LEE, Han-Soeb YANG and Kee-Hyun KIM*

Department of Oceanography, National Fisheries University of Pusan, Pusan 608-737, Korea

*Department of Oceanography, Chungnam National University, Taejeon 305-764, Korea

The vertical profiles of the natural ^{210}Po , ^{210}Pb and ^{234}Th activities were measured at the upper 150 m or 200 m of water column from west-east intersection in the east-southern coastal area of the Korea Peninsula during the period from 26 to 29 April 1994 to compare the removal rates (residence time) and removal processes for ^{210}Po and ^{234}Th .

At the inshore stations, the ^{210}Po activity was generally higher in the thermocline and its under layer than in the surface mixed layer, while represented the reversed pattern at the offshore stations. However, the ^{210}Pb activity decreased generally with depth. Also, the activity of ^{210}Po relative to its parent ^{210}Pb was deficient in the water column above the main thermocline, but was slightly excess or close to equilibrium in the thermocline and its under layer. The vertical profiles for the activity of ^{210}Pb relative to its parent ^{226}Ra showed the reversed pattern with the vertical variation of ^{210}Po excess (or deficiency). The ^{234}Th activity was significantly lower in the surface mixed layer and thermocline than in the deeper layer.

The residence time of ^{210}Po ranged from 1 to 4 years at the five stations except station E8 that showed very long residence time (approximately 10 years). The long residence time at the station E8 may resulted from the thicker surface mixed layer and subsequent the vertical mixing of ^{210}Po which was recycled in the lower surface mixed layer compared to at the other stations. Also, the residence time of ^{210}Po was shorter at the inshore stations than at the offshore stations. However, the residence time of ^{234}Th ranged from 52 to 74 days at all station without the significant variation, was very much shorter relative to the residence time of ^{210}Po .

The correlation between the removal rate of dissolved ^{234}Th and the concentration of total suspended matter (TSM) was generally positive. Therefore, it seems that the major route of the removal mechanism of ^{234}Th from seawater in the surface mixed layer is via adsorption onto suspended particle surfaces (most likely inorganic particles) and subsequent settling to the bottom layer. Between the removal rate of dissolved ^{210}Po and the concentration of chlorophyll-a was positively good correlation. Consequently, most likely the removal of ^{210}Po may be occurred by uptake to organisms (mainly such as planktonic debris or fecal pellets) and subsequent settling.

Key words : removal process, removal rate, residence time, adsorption, uptake

서 론

중에서 공급원이 각기 다른 ^{210}Po (반감기 138일), ^{210}Pb (반감기 22.3년) 및 ^{234}Th (반감기 24.1일)는 입 해양에 존재하고 있는 천연 U/Th계열 방사성 핵종 자물질과의 반응성이 크고 반감기가 비교적 짧기 때

문에 반응성 미량금속원소들의 해양지구화학적 운명을 이해하는 데 유용한 추적자로 사용되어 왔다 (Bacon et al., 1976; Kaufman et al., 1981; Tanaka et al., 1983; Mckee et al., 1984; Coale and Bruland, 1987; Nozaki et al., 1990). 그러나 이들 반응성 핵종은 원소의 화학적 성질에 따라 해양에서의 거동이 현저히 달라질뿐만 아니라, 그 해역의 해양학적 특성에 따라 서로 현저히 다른 농도분포를 보인다 (Yang et al., 1995). 일반적으로 ^{210}Po 는 생물체 (주로 동·식물플랑크톤)에 흡수 (uptake)되어 사체나 배설물의 침강에 의해 효과적으로 제거되는 반면에, ^{234}Th 는 육상기원의 무기입자물질에 잘 흡착 (adsorption) 제거된다 (Santschi et al., 1979; Bacon et al., 1988). 또한, 해양의 표면혼합층에서 ^{210}Po 는 어미핵종인 ^{210}Pb 보다 우선적으로 제거되지만, 수온약층에서는 생물기원의 유기입자물질이 분해되면서 ^{210}Po 가 수중으로 재순환된다고 알려져 있다 (Bacon et al. 1976, 1988; Chung and Finkel, 1988). 반면에, 캘리포니아 연안역 냉수과 filament해역에서는 표층에도 과잉의 ^{210}Po 가 나타나며, 이는 외양역과 달리 연안용승작용에 의해 수온약층에서 재순환된 과잉의 ^{210}Po 가 표층으로 운반되기 때문이라고 한다 (Kadko, 1993). 한편, 표면혼합층에서 ^{234}Th 의 체류시간은 연안역의 경우 무기입자물질의 농도에 따라 현저하게 달라지나, 외양역에서는 주로 생물생산력에 의해 좌우된다고 한다 (Coale and Bruland, 1985, 1987). 또한, Narragansett만의 경우 ^{234}Th 의 평균체류시간은 ^{210}Po 보다 훨씬 짧지만 (Santschi et al., 1979), Funka만에서는 여름철의 경우 ^{210}Po 와 ^{234}Th 의 평균체류시간은 약 60일로 비슷하였다 (Tanaka et al., 1983). 그리고 Funka만에서는 전 계절에 걸쳐 ^{210}Po 가 어미핵종보다 부족량을 보이는 반면에, Narragansett만의 경우 겨울철에는 ^{210}Po 가 어미핵종보다 과잉량을 보이거나 여름철에는 어미핵종보다 부족량을 보인다. 이처럼 ^{234}Th 와 ^{210}Po 는 입자물질과 반응성이 크에도 불구하고 제거속도 혹은 체류시간 및 제거과정은 해역의 특성에 따라 다르다.

동해에서 반응성 미량원소의 제거속도 및 제거과정에 대한 연구로는, Yamato분지와 Japan분지 부근에서 심층수중 ^{210}Pb 의 체류시간 (Nozaki et al., 1973)과 동해의 일본측 해역에서 ^{228}Th , ^{230}Th 및 ^{231}Pa 의 체류시간 및 해수중에서의 물질제거과정에 대한 연구 (No-

zaki and Yamada, 1987)가 있다. 국내의 연구로는 Yang et al. (1995)이 속초와 울릉도 사이에 출현하는 소용돌이 주변해역에서 ^{234}Th 와 ^{210}Po 의 체류시간과 재순환율을 측정 한 바 있다. 이처럼 동해에서 이들 핵종의 제거속도와 제거과정이 해역이나 계절에 따라 어떻게 달라지는지에 대한 연구는 아주 적다. 따라서 본 연구는 비교적 기초생산이 큰 춘계에 대마난류의 주류역인 동해 남부해역의 포항 연안에서 외해쪽으로 6개 정점을 선정하여 해수중 ^{234}Th , ^{210}Po 및 ^{210}Pb 의 연직농도분포 특성을 파악하고, ^{234}Th 와 ^{210}Po 의 제거속도 및 제거과정을 비교하였다.

재료 및 방법

해수시료는 1994년 4월 26일부터 29일까지 부산수산대학교 해양탐사선 (탐양호)을 이용하여 동해 남부해역의 포항 연안 $36^{\circ}10'N$ 의 동서단면상에 위치한 6개 정점에서 수중펌프 (양수속도: 20l/분)를 이용하여 150 m 혹은 200 m 수심까지 수층별로 채수하였다. 이 해역은 대마난류의 주류역으로서 가장 연안쪽의 정점 E3는 포항에서 동쪽으로 약 35 km지점에 위치하고, 각 정점간 간격은 약 7 km 정도이다. 수심은 정점 E3에서 약 350 m이며 바깥쪽으로 갈수록 점차 깊어져서 정점 E5에서 정점 E8까지는 수심이 1000 m 이상이다 (Fig. 1).

방사성 핵종 분석용 해수는 채수 후 여과하지 않고 미리 산세척한 20 l 폴리에틸렌 용기에 넣고 진한 HNO_3 을 첨가하여 pH 1 이하로 산성화시켰다. 해수중 ^{234}Th , ^{210}Po 및 ^{210}Pb 의 분리과 농축은 산처리한 해수시료 약 20 l에 ^{230}Th 와 ^{209}Po 의 표준용액, Fe^{3+} 와 Pb^{2+} carrier용액을 적당량 첨가한 후 Yang et al. (1995)의 방법에 따랐다. 방사능 계측시 ^{210}Po 와 화학적 회수를 모니터로 첨가한 ^{209}Po 및 ^{230}Th 의 알파입자는 2048 channel alpha-spectrometer (active area 450 mm², silicon surface barrier detector)로, ^{234}Th 의 베타입자는 low background gas flow counter로 계수 (counting)하였다. 베타입자를 계수할 때는 알파입자 및 낮은 에너지의 베타입자를 차단하기 위해 알루미늄박 3장 (약 11.3 mg/cm²)을 계수관 위에 덮고 계수하였다. 이때 표준선원을 이용하여 측정 한 알파 및 베타 검출기

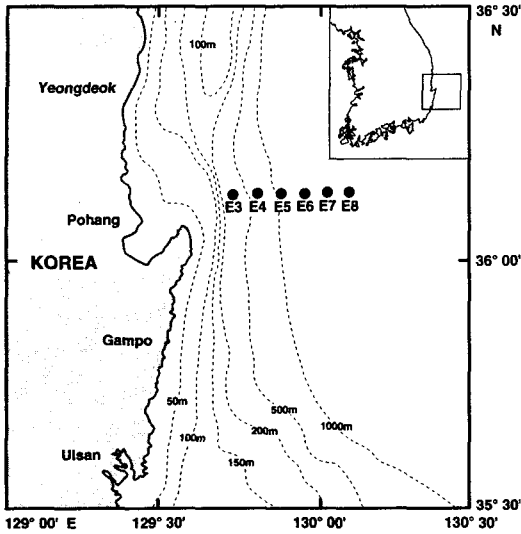


Fig. 1. Location of hydrographic stations at the east-southern coastal region of Korea Peninsula in April, 1994.

의 계수효율은 각각 약 30%와 약 60% 정도였다. 또한, 알파검출기의 background값은 ^{230}Th , ^{209}Po 및 ^{210}Po 의 에너지 영역에서 대체적으로 하루에 2 counts 정도였지만, 베타검출기의 background값은 1.01~1.05 cpm이었다.

시료수중 ^{210}Po 의 방사능 농도는 미리 농도가 알려진 ^{209}Po 표준용액과의 계수율비와 시료량으로부터 계산하고, ^{210}Pb 의 농도는 Pb의 화학적 회수율과 ^{210}Pb 분리 후 경과된 시간을 보정한 ^{210}Po 계수율로부터 계산하였다. 한편, ^{234}Th 의 농도는 ^{230}Th 의 알파 계수율로부터 화학적 회수율을 구하고, 베타 계수값으로부터 계산하였다.

이렇게 측정된 농도를 이용하여 어미핵종인 ^{210}Pb 에 비해 ^{210}Po 가 부족량을 보이는 수주에서 두 핵종의 현존량 차이로부터 ^{210}Po 의 체류시간을 계산하였다. 해수중 ^{210}Po 의 농도가 정상상태를 유지한다면, 어미핵종인 ^{210}Pb 로부터 생성되는 ^{210}Po 의 양은 아래의 식과 같이 방사붕괴에 의해 소멸되는 양 및 생물체에 흡수되어 사체나 배설물을 통하여 제거되는 양과 균형을 유지한다.

$$\lambda_{po}A_{po} = \lambda_{po}A_{pb} + kA_{po} \quad (1)$$

$$\tau = \frac{1}{k} \quad (2)$$

여기서 A_{po} 와 A_{pb} 는 각각 ^{210}Po 와 ^{210}Pb 의 현존량 (dpm/cm²), λ_{po} 는 ^{210}Po 의 붕괴상수 (1.83 yr⁻¹), k 는 ^{210}Po 의 제거속도상수 (yr⁻¹)이며, ^{210}Po 의 체류시간 (τ)은 제거속도상수의 역수이다.

한편, 식 (3)과 같은 방법으로 수층별 ^{210}Po 의 제거속도상수 (K_{po})를 계산하였다. 하지만 측정된 ^{210}Po 와 ^{210}Pb 의 농도는 여과하지 않은 해수중 농도이므로 총농도중 입자물질의 영향을 보정하기 위해 총농도에서 입자태 농도를 뺀 용존태 농도를 구했다. 여기서 입자태 농도는 외양수와 해수교환이 비교적 활발한 부산수영만의 바깥쪽 해역의 표층에서 측정된 입자물질중 ^{210}Po 및 ^{210}Pb 의 농도인 약 30 dpm/g (Kim and Yang, 1996)을 적용하였다. 총농도에서 입자태 농도를 뺀 값으로부터 용존태 ^{210}Po 의 수층별 제거속도상수를 식 (3)으로 계산하였다.

$$K_{po} = \frac{\lambda_{po}(1-R_d)}{R_d} \quad (3)$$

여기서 R_d 는 용존태 ($^{210}\text{Po}/^{210}\text{Pb}$) 방사능비이다.

^{226}Ra 의 농도는 Yang et al. (1994)이 하계에 동해남부 연안해역에서 측정 보고한 염분과 ^{226}Ra 의 관계식 [^{226}Ra (dpm/100 l) = -0.93 × salinity (‰) + 39.96]을 이용하여 계산하였고, ^{238}U 의 농도는 Ku et al. (1977)이 제시한 염분과의 관계식 [^{238}U (dpm/l) = 0.07081 × salinity (‰)]으로부터 계산하였다.

한편, ^{210}Po 의 경우와 마찬가지로 물질수지식을 이용하여 ^{234}Th 의 체류시간을 계산하였으며, 식 (3)과 같은 방법으로 수층별 ^{234}Th 의 제거속도상수 (K_{th})를 구하였다. 또한, ^{234}Th 의 총농도에서 입자물질중 ^{234}Th 의 농도를 뺀 값을 사용하여 용존태 ^{234}Th 의 수층별 제거속도상수 (K_{th})를 구하였다. 이때, 입자물질중 ^{234}Th 의 농도는 일본의 Funka만 (Minagawa and Tsunogai, 1980)과 남지나해 (Wei and Hung, 1992) 및 부산의 수영만 (Kim and Yang, 1996)의 표층에서 측정된 약 1000 dpm/g을 이용했다.

염분은 4개 정점 (E3, E4, E6, E8)의 경우 현장에서 CTD로 관측한 자료와 실험실에서 염분계로 측정된 자료를 비교하여 보정하였으며, 2개 정점 (E5, E7)은

Table 1. Chemical data for seawater at the east-southern coastal region of Korea Peninsula during 26~29 April, 1994. Standard deviation is based on propagated counting error

Sta. No.	Depth (m)	Temp. (°C)	Sal. (‰)	TSM (mg/l)	Chl.a (µg/l)	^{234}Th (dpm/l)	^{210}Po (dpm/100 l)	^{210}Pb (dpm/100 l)
E3	3	15.64	34.63	1.02	0.61	1.47±0.10	8.85±0.65	12.78±1.24
	25	14.66	34.59	1.14	0.55	1.23±0.10	7.11±0.60	10.86±1.08
	50	11.22	34.53	0.90	0.26	1.01±0.07	8.19±0.42	9.01±0.72
	75	5.30	34.11	0.82	0.13	1.40±0.08	7.88±0.76	6.70±0.69
	100	2.44	34.04	0.49	0.03	2.00±0.12	8.69±0.81	6.39±0.73
	125	1.83	34.04	0.51	0.09	2.31±0.10	9.91±0.89	7.48±0.86
	150	1.52	34.05	0.43	0.04	2.22±0.11	8.67±0.81	7.25±0.77
E4	3	15.64	34.61	1.29	0.58	1.61±0.11	10.25±0.89	15.12±1.34
	25	15.42	34.64	1.38	0.52	1.50±0.10	8.96±0.78	13.60±1.00
	50	13.68	34.55	1.00	0.27	1.29±0.07	11.67±1.04	10.81±0.73
	75	11.72	34.49	0.61	0.16	1.40±0.09	11.07±0.99	10.14±0.85
	100	3.59	34.14	0.80	0.08	1.59±0.10	10.81±0.95	8.81±0.77
	125	1.98	34.05	0.42	0.13	1.75±0.11	8.81±0.87	6.91±0.66
	150	1.66	34.04	0.38	0.05	2.30±0.13	7.70±0.66	7.45±0.70
E5	3	-	34.62	0.97	0.56	1.54±0.10	11.73±1.02	14.98±1.23
	25	-	34.66	1.17	0.85	1.26±0.10	6.41±0.62	12.47±0.85
	50	-	34.68	0.86	0.49	1.75±0.10	6.57±0.51	10.04±0.81
	75	-	34.55	0.69	0.18	1.29±0.09	11.77±0.96	9.05±0.79
	100	-	34.47	0.41	0.20	1.71±0.08	8.63±0.75	7.65±0.71
	125	-	34.11	0.46	0.06	2.23±0.12	10.08±0.76	7.63±0.84
	150	-	34.05	0.29	0.11	2.29±0.14	6.25±0.59	6.07±0.68
E6	3	15.50	34.61	1.20	0.74	1.59±0.08	9.31±0.87	16.05±1.22
	25	15.43	34.67	0.78	0.49	1.55±0.07	11.60±1.05	15.46±1.59
	50	15.08	34.72	0.61	0.24	1.48±0.10	10.71±0.97	13.38±1.32
	75	13.68	34.60	0.71	0.37	1.24±0.10	11.58±0.67	12.28±1.09
	100	12.51	34.55	0.50	0.22	1.23±0.09	10.61±0.93	10.58±1.12
	125	11.46	34.52	0.50	0.17	1.38±0.10	10.04±0.89	8.89±0.93
	150	3.40	34.17	0.37	0.09	2.32±0.17	6.66±0.61	6.08±0.62
E7	3	-	34.65	0.93	0.55	1.57±0.10	12.67±1.10	14.30±1.14
	25	-	34.64	0.87	0.45	1.38±0.09	12.33±0.94	13.50±1.19
	50	-	34.65	0.63	0.39	1.66±0.10	11.41±1.09	12.29±1.40
	75	-	34.68	0.59	0.31	1.55±0.08	7.96±0.73	10.23±1.14
	100	-	34.61	0.39	0.28	1.47±0.09	7.12±0.42	8.76±0.98
	125	-	34.53	0.50	0.10	1.35±0.06	8.15±0.76	6.64±0.60
	150	-	34.31	0.15	0.05	2.07±0.09	10.17±0.73	7.70±0.65
E8	3	15.11	34.67	0.70	0.45	1.62±0.11	12.90±1.15	14.88±1.08
	25	15.05	34.67	0.60	0.17	1.33±0.08	12.11±1.00	13.61±0.98
	50	14.68	34.68	0.68	0.20	1.66±0.09	11.04±1.09	11.12±0.88
	75	14.59	34.69	0.59	0.13	1.32±0.09	11.15±0.89	11.21±0.85
	100	14.41	34.70	0.49	0.16	1.64±0.11	9.96±0.87	10.02±0.85
	125	13.69	34.68	0.34	0.10	1.75±0.13	7.87±0.57	6.48±0.74
	200	2.16	34.03	0.30	0.02	2.01±0.10	8.02±0.71	6.76±0.63

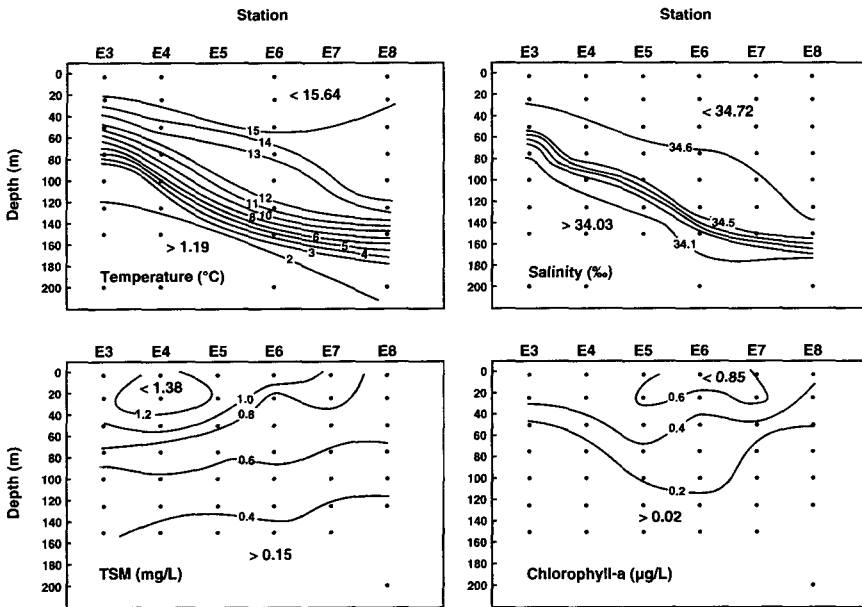


Fig. 2. Vertical distributions of temperature, salinity, total suspended matter(TSM) and chlorophyll-a.

현장에서 채수한 해수를 실험실로 옮겨 염분계 (Model E-2, Tsurumi Seiki Co.)로 측정된 자료를 사용하였다. 수온은 4개 정점 (E3, E4, E6, E8)에서만 CTD로 관측하였다. 총부유물질 (TSM)은 선상에서 공경 1.0 μm GF/C 여과지로 해수 약 2l를 여과하고 급속냉동시켜 실험실로 옮긴 후 중량법으로 측정하였으며, 클로로필 a는 선상에서 해수 약 250 ml를 취하여 공경 0.45 μm membrane filter로 여과하고 1% MgCO_3 용액 소량으로 고정시킨 후 급속냉동시켜 실험실로 옮긴 다음 형광광도계 (Turner Designs Model 10)로 비색정량 (Holm-Hansen et al., 1965)하였다.

결과 및 고찰

6개 정점에서 측정된 자료들을 Table 1에 나타내었고, 방사성 핵종의 농도는 여과하지 않은 해수중 농도로서 용존태와 입자태를 합친 총농도를 의미하며, 측정오차는 1 sigma 계수오차이다.

1. 수괴 및 총부유물질의 연직분포

조사해역에 출현하는 수괴의 분포특성을 파악하기 위하여 Table 1에 나타낸 자료 중 수온 및 염분을 총

부유물질과 클로로필 a의 연직분포와 함께 Fig. 2에 나타내었다.

수온의 연직분포를 보면, 수온범위가 3.0~12.0°C인 수온약층이 존재하였으며, 가장 연안쪽 정점 E3에서는 수심 50~85 m 사이의 수층에 존재하고, 바깥쪽으로 갈수록 점차 깊어져서 가장 바깥쪽 정점 E8에서는 수심 140~180 m 사이의 수층에 나타났다. 그리고 이 수온약층 상부층에는 수온범위가 12.0~15.6°C인 상대적 고온수가 있고, 그 하부층에는 1.2~3.0°C의 저온수가 존재하고 있었다.

염분의 연직농도분포 역시 수온과 매우 유사하다. 즉 34.10~34.50 ‰ 범위의 염분약층은 수온약층이 존재하는 수심에 나타났고, 이 염분약층을 경계로 상부층에는 34.50~34.72 ‰ 범위의 고염수가 있으며, 하부층에는 34.03~34.10 ‰의 상대적 저염수가 존재하였다.

총부유물질 (TSM) 및 클로로필 a의 연직농도분포는 수온 및 염분의 분포와는 다소 달랐다. 즉 총부유물질의 농도는 0.15~1.38 mg/l의 범위로 표층에서 가장 높고 수심이 깊어질수록 점차 감소하는 경향을 보이나, 0.8 mg/l 이상의 비교적 높은 농도는 연안쪽 3개 정점 (E3, E4, E5)에서는 60~70 m 수심까지 보이고 그 외 바깥 정점들에서는 더 표층에 나타났다. 클로

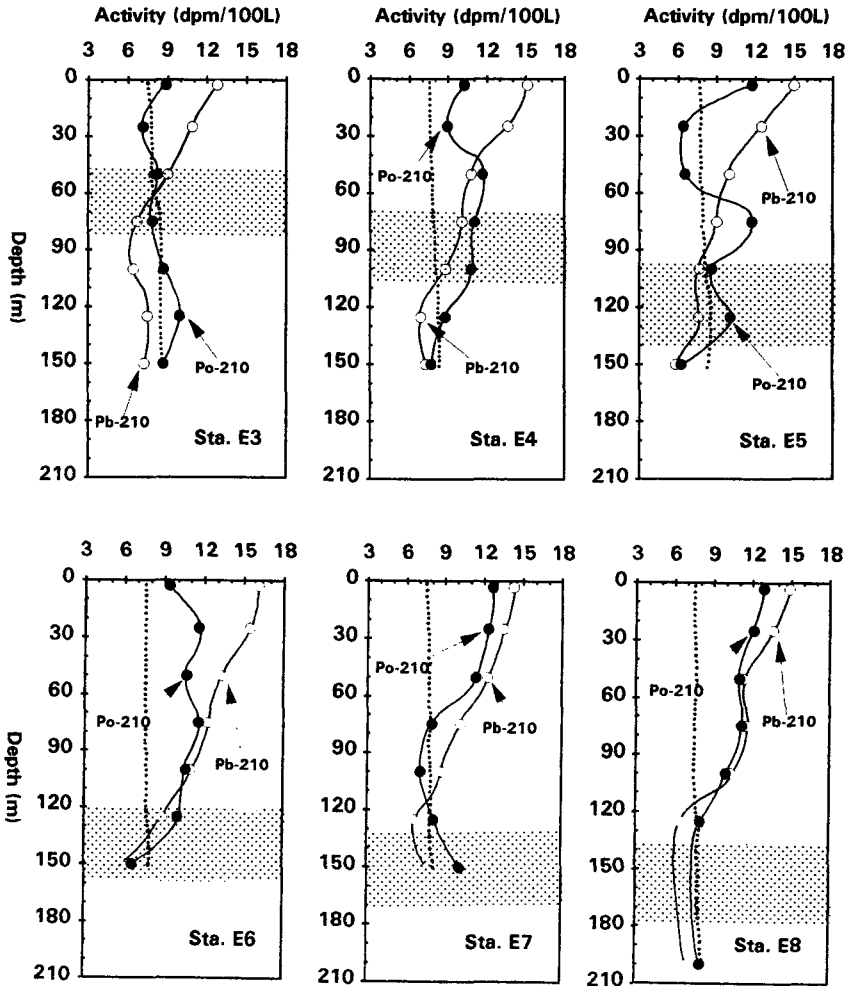


Fig. 3. Vertical profiles of total ^{210}Po and ^{210}Pb activities in the unfiltered seawater, dissolved ^{226}Ra activity in seawater. ^{226}Ra activity was calculated by a relation with salinity (Yang et al., 1994). The dashed line represents vertical profile of ^{226}Ra activity and the hatched area represents thermocline.

로필 a의 농도는 $0.02\sim 0.85\ \mu\text{g}/\text{l}$ 의 범위로 중간해역의 3개 정점 (E5, E6, E7)에서 상대적으로 높고, 이 정점들의 수심 25m 상부층에서는 다른 정점들의 표층에 비해 $0.2\sim 0.3\ \mu\text{g}/\text{l}$ 정도 높은 농도를 보이는 것이 총 부유물질과 다르다.

2. ^{210}Pb 및 ^{210}Po 의 연직분포와 ^{210}Po 의 제거

해수중 ^{210}Po 와 ^{210}Pb 의 총농도 및 ^{226}Ra 의 정점별 연직농도분포를 Fig. 3에 나타내었다. ^{226}Ra 의 농도범위는 $7.67\sim 8.31\ \text{dpm}/100\ \text{l}$ 로 정점별·층별 차이가 매우 작다. 한편, ^{210}Pb 의 농도범위는 $6.07\sim 16.05\ \text{dpm}/$

$100\ \text{l}$ 로 정점별 차이보다는 수층별 차이가 훨씬 크며, 6개 정점 모두 일반 외양역에서와 같이 표층에서 가장 높고 수심이 깊어질수록 점차 감소하는 경향을 보였다.

6개 정점에서 ^{210}Pb 와 ^{226}Ra 의 농도차이를 보면, 정점별로 다소의 차이는 있으나 대체적으로 표면혼합층에서는 어미핵종보다 ^{210}Pb 가 과잉량을 보이지만 수온 약층을 포함한 하부층에서는 어미핵종보다 다소 낮거나 거의 방사평형된 농도를 보였다. 특히, ^{210}Pb 가 과잉량을 보이는 표면혼합층의 경우 과잉량의 정도는 표층에서 가장 높으며, 이는 ^{210}Pb 가 대기로부터 공급

되고 있음을 시사한다 (Nozaki and Tsunogai, 1976; Bacon et al., 1976).

한편, 춘계에 표층수온이 20 °C 이상으로 높고 표면 혼합층의 존재가 뚜렷하지 않으며 수심 약 1000 m까지 영구수온약층이 존재하는 Kuroshio 해류역의 Okinawa 분지와 Philippine 해 부근에서 측정 보고된 자료 (Nozaki et al., 1990)와 비교해 보면, ²²⁶Ra의 농도는 수심 200 m 상부층의 경우 본 조사정점과 비슷한 값을 보였다. 그리고 ²¹⁰Pb는 Kuroshio 해류역의 경우 표층에서부터 수온약층의 중간까지는 어미핵종인 ²²⁶Ra보다 과잉량을 보이며, 그 하부층에서는 부족량을 보였다. 또한, 현존량이 있어서도 ²¹⁰Pb의 과잉량(약 10 dpm/cm²)이 본 조사정점에 비하여 훨씬 컸다. 한편, 본 조사정점에서는 정점에 따라 다소의 차이는 있으나, 대체적으로 표면혼합층에서는 어미핵종과의 현존량 차이가 0.160~0.639 dpm/cm²로 다소 과잉량을 보이고, 수온약층을 포함한 하부층에서는 충분한 깊이까지 조사하지 않았기 때문에 자세한 것은 알 수 없지만 어미핵종과의 현존량 차이가 0.003~0.006 dpm/cm² 정도로 약간의 부족량을 보이거나 거의 방사평형된 농도를 보였다(Table 2). 이처럼 본 조사정점이 Kuroshio 해류역에 비해 어미핵종에 대한 ²¹⁰Pb의 과잉량이 적은 것은 아마도 ²¹⁰Pb이 상대적으로 많이 제거되었기 때문일 것이다.

해수중 ²¹⁰Po의 총농도를 정점별로 살펴보면 (Fig. 3), ²¹⁰Po의 농도는 6.25~12.90 dpm/100 l의 범위로

어미핵종인 ²¹⁰Pb와 다소 다른 분포양상을 보였다. 이를테면, 가장 연안쪽의 정점 E3에서는 수층별 농도차이는 그다지 크지 않으나, 수온약층과 그 하부층이 표면혼합층보다 약간 높은 농도를 보였다. 또한, 정점 E4, E5, E6에서도 정점별로 다소의 차이는 있으나 대체적으로 표면혼합층의 하부경계 및 수온약층에서 비교적 높은 농도를 나타내었다. 반면에, 바깥쪽의 2개 정점 (E7, E8)에서는 ²¹⁰Pb와 같이 표층에서 가장 높고 수심이 증가함에 따라 대체적으로 감소하는 경향을 보였다.

한편, 어미핵종인 ²¹⁰Pb와 ²¹⁰Po의 농도차이를 보면, 대체적으로 상부 표면혼합층에서는 어미핵종에 비해 ²¹⁰Po가 부족량을 보이지만, 수온약층 및 그 하부층에서는 어미핵종보다 약간의 과잉량을 보이거나 거의 방사평형된 농도를 보였다. 특히, 가장 바깥쪽에 위치한 정점 E8의 표면혼합층에서 ²¹⁰Pb에 비해 ²¹⁰Po의 부족량이 매우 작은 것은 다른 정점들에 비해 ²¹⁰Po의 제거량이 적거나 하부 표면혼합층에서 생물기원의 유기입자물질이 분해될 때 ²¹⁰Po가 해수중으로 재순환되었기 때문일 것이다.

²¹⁰Pb와 ²¹⁰Po의 농도를 속초와 울릉도 사이에 출현하는 소용돌이 주변해역에서의 춘계 측정값 (Yang et al., 1995)과 비교해 보면, ²¹⁰Pb의 농도는 속초 동쪽 약 110 km 떨어진 소용돌이 중심부에 위치한 정점과 묵호-울릉도의 중간에 위치한 정점 (소용돌이의 남쪽 가장자리)에서의 4.52~12.58 dpm/100 l와는 그다지

Table 2. Inventory and residence time of each radionuclide

Sta.	Z(m)*	Inventory(dpm/cm ²)				Residence time(τ)	
		²¹⁰ Pb	²¹⁰ Po	²³⁸ U	²³⁴ Th	²¹⁰ Po(yr)	²³⁴ Th(day)
E3	0~60	0.629	0.472	30.00	18.44	1.6	55
	0~125						
E4	0~45	0.589	0.422	36.50	23.71	1.4	64
	0~150						
E5	0~60	0.723	0.460	30.18	19.35	1.0	62
	0~125						
E6	0~95	1.289	1.025	36.71	22.07	2.1	52
	0~150						
E7	0~110	1.272	1.113	36.75	23.05	3.8	59
	0~150						
E8	0~100	1.208	1.144	48.98	33.38	9.8	74
	0~200						

* The layer which daughter nuclide is deficient relative to its parent.

큰 차이가 없으나, 속초 연안 정점에서의 3.31~6.69 dpm/100l에 비해 비교적 높은 편이었다. ^{210}Po 의 농도는 소용돌이의 남쪽 가장자리에 위치한 정점에서의 7.04~11.60 dpm/100l와는 비슷하였으나, 소용돌이 중심부와 속초 연안에 위치한 정점에서의 4.40~8.09 dpm/100l보다는 다소 높았다. 한편, ^{210}Po 의 연직농도 분포 특성은 연안쪽의 3개 정점(E3, E4, E5)에서는 소용돌이 외부의 두 정점-표면혼합층의 수온이 13.9~15.0°C로 본 조사해역과 비슷하고, 수심 10~50 m 사이에 수온약층이 존재하는 속초 연안의 정점 및 정점과 표면혼합층의 두께는 비슷하지만 수온이 3.0~3.6°C 높고, 수심 50~160 m 사이에 수온약층이 존재하는 소용돌이 남쪽 가장자리의 정점과 비슷한 분포경향을 보였다. 그러나 정점 E7과 E8에서 ^{210}Pb 는 소용돌이 주변해역의 3개 정점과 비슷한 분포경향을 보이지만, ^{210}Po 는 소용돌이 주변해역과는 달리 표층에서 높고 수심이 깊어짐에 따라 감소하였다.

해수중 ^{210}Po 의 제거속도를 파악하기 위해 어미핵종인 ^{210}Pb 에 비해 ^{210}Po 가 부족량을 보이는 수주에서 두 핵종의 현존량 차이로부터 식 (1)과 (2)에 의해서 ^{210}Po 의 체류시간을 계산하여 Table 2에 나타내었다. ^{210}Po 의 체류시간은 정점 E8을 제외하면 1~4년으로 비교적 연안쪽의 정점들(E3, E4, E5)에서 짧고, 바깥쪽에 위치한 정점들(E6, E7)에서 길었다. 특히, 가장 바깥쪽의 정점 E8에서 체류시간이 10년으로 매우 긴 것은 앞서 언급한 바와 같이 다른 정점들에 비해 표면혼합층이 두꺼운 관계로 하부 표면혼합층에서 재순환된 ^{210}Po 가 수직혼합되었기 때문일 것이다. 한편, ^{210}Po 의 체류시간은 Yang et al. (1995)이 춘계에 속초 부근에 출현하는 소용돌이 주변해역의 표면혼합층에서 구한 값인 0.4~1.1년에 비해 대부분의 정점들에서 훨씬 길었다. 소용돌이 주변해역의 경우 본 조사정점에 비해 비교적 강한 계절수온약층이 존재했고, 생물생산력의 간접적인 지표인 클로로필 a의 농도도 약 3배 정도 높았다. 이처럼 계절 및 조사해역이 비슷한 데도 불구하고 ^{210}Po 의 체류시간이 Yang et al. (1995)이 보고한 값보다 긴 것은 본 조사정점이 소용돌이 주변해역과는 달리 계절수온약층이 뚜렷이 형성되어 있지 않고, 낮은 생물생산력으로 인해 상대적으로 제거가 적게 일어났기 때문이라고 생각된다.

해수중 ^{210}Po 의 제거과정을 파악하기 위해 식 (3)과

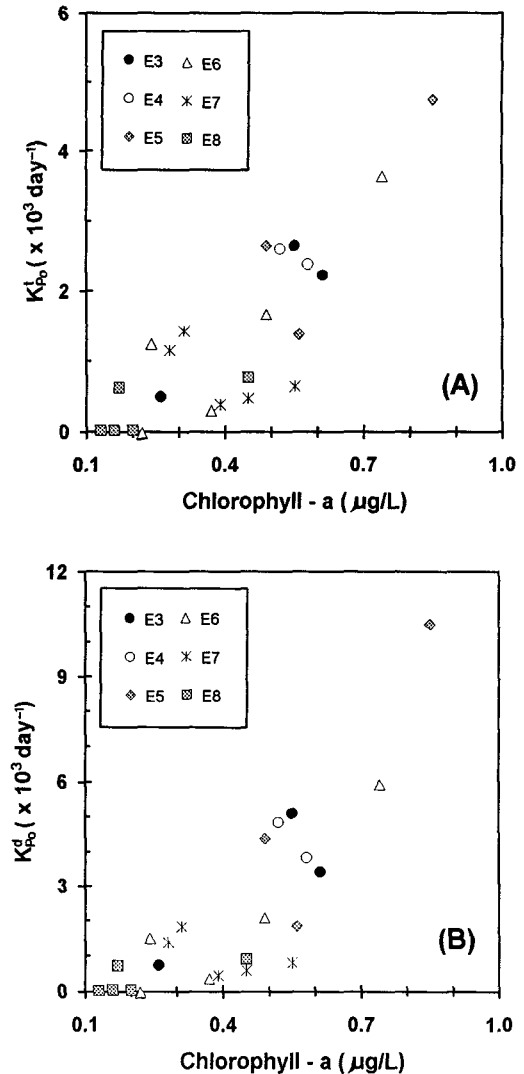


Fig. 4. Plots of removal rates (K'_{po} and K^d_{po}) of total ^{210}Po (A) and dissolved ^{210}Po (B) versus chlorophyll-a in the layer which daughter nuclide is deficient relative to its parent. Dissolved ^{210}Po activity is value that subtract particulate form from total form. The specific activity for ^{210}Po was assumed to be equal to 30 dpm/g(Kim and Yang, 1996), and particulate ^{210}Po in seawater was corrected as multiplying this value by TSM concentration.

같은 방법으로 수층별로 측정된 ($^{210}\text{Po}/^{210}\text{Pb}$) 방사능 비로부터 수층별 ^{210}Po 의 제거속도상수 (K'_{po})를 계산하여 다른 성분들과의 관계를 살펴보았다. 그 결과, 수층별 제거속도상수 (K'_{po})는 수온, 염분, 총부유물질

및 영양염류와는 뚜렷한 상관성을 나타내지 않았으나, 클로로필 a와 K_{po}^4 의 사이에는 비교적 좋은 정의 상관성을 보였다 (Fig. 4A). 하지만 측정된 ^{210}Po 와 ^{210}Pb 의 농도는 여과하지 않은 해수중 농도이므로 총농도중 입자물질의 영향을 보정하기 위해 총농도에서 입자태 농도를 뺀 값으로부터 용존태 ^{210}Po 의 수층별 제거속도상수 (K_{po}^4)를 계산하였다. 한편, 식 (3)의 K_{po}^4 는 식 (1)의 k 값과는 다르다. 즉 k 값은 어미핵종인 ^{210}Pb 에 비해 ^{210}Po 가 부족량을 보이는 수주에서 두 핵종의 현존량으로부터 계산한 제거속도상수로서, ^{210}Po 가 해수중의 어미핵종으로부터 생성된 후 생물체에 흡수되고 사체나 배설물의 침강에 의해 하부층으로 제거될 때까지의 속도상수를 의미한다. 그러나 K_{po}^4 값과 K_{pb}^4 값은 각 수층에서 총농도 및 용존태 방사능비 ($^{210}Po/^{210}Pb$)로부터 계산한 수층별 제거속도상수로서 K_{po}^4 값이 클수록 ^{210}Po 가 (용존 → 생물체에 흡수 → 사체나 배설물의 침강) 과정에 의해 빠르게 각 수층으로부터 제거된다는 것을 의미하고, K_{po}^4 값이 클수록 용존태 ^{210}Po 가 입자태로 전이되는 속도가 빠름을 의미한다.

용존태 ^{210}Po 의 제거속도상수 (K_{po}^4)와 클로로필 a 사이에도 대체적으로 좋은 정의 상관성을 보였다 (Fig. 4B). 이는 해수중 ^{210}Po 의 제거에 있어서 총부유물질의 영향을 거의 받고 있지 않음을 의미한다. 따라서 표면혼합층에서 ^{210}Po 는 주로 생물기원의 유기입자물질에 의해 제거되고 있음을 시사한다. 그러나 클로로필 a의 농도가 $0.3 \mu g/l$ 이하인 수온약층 및 그 하부층에서는 ^{210}Po 가 어미핵종과 거의 방사평형되거나 다소의 과잉량을 보였으며, K_{po}^4 값도 0 이하의 값을 나타내었다. 이는 표면혼합층으로부터 생물기원 입자물질에 의해 제거된 ^{210}Po 가 입자물질이 침강하면서 분해될 때 ^{210}Po 가 해수중으로 재생되기 때문이라고 할 수 있다. 이러한 현상은 외해역의 아표층 혹은 수온약층 부근과 연안역의 중·저층에서 자주 발견되는 현상이다 (Bacon et al., 1976, 1988; Chung and Finkel, 1988; Yang et al., 1995).

3. ^{234}Th 의 연직분포와 제거

해수중 ^{234}Th 는 용해성이 크고 안정한 ^{238}U 의 방사붕괴에 의해 공급된다. 따라서 이 두 핵종의 정점별 연직농도분포를 Fig. 5에 나타내었다.

^{238}U 의 농도는 2.41~2.46 dpm/l로 정점별 수층별 차이가 매우 작았다. 그러나 ^{234}Th 의 농도범위는 1.01~2.32 dpm/l로 정점별 차이보다는 수층별 차이가 훨씬 컸다. 즉 정점에 따라 다소의 차이는 있으나 대체적으로 표면혼합층에서 가장 낮았고, 수온약층 혹은 그 하부층에서는 어미핵종인 ^{238}U 와 비슷한 농도를 보였다. 또한, 어미핵종에 대한 ^{234}Th 의 부족량은 대체적으로 연안쪽 및 중간해역에 위치한 정점들에서 다소 크고, 바깥쪽에 위치한 정점들 (E7, E8)에서 상대적으로 작았다.

한편, 본 조사정점과 소용돌이 주변해역 (Yang et al., 1995)의 100 m 상부층에서 측정 보고한 ^{234}Th 와 ^{238}U 의 농도를 비교해 보면, 소용돌이 주변해역에서 측정된 ^{234}Th 의 농도는 0.76~1.18 dpm/l 범위로 본 조사해역보다 0.25~0.82 dpm/l 정도 낮았으나, 연직분포 양상은 소용돌이 남쪽 가장자리에 위치한 정점과 본 조사정점이 비슷했다. 이와 같이 소용돌이 주변해역보다 ^{234}Th 의 농도가 다소 높은 것은 아마도 계절수온약층의 세기나 형성시기에 따른 표면혼합층 내의 해수의 체류시간에 의한 차이 때문이라고 생각된다.

^{210}Po 의 경우와 같이 물질수지식을 이용하여 ^{234}Th 의 체류시간을 계산하였다. ^{234}Th 의 체류시간은 52~74일의 범위로 정점 E6에서 가장 짧고 정점 E8에서 가장 길었다 (Table 2). 그리고 ^{210}Po 의 체류시간보다 수십 배 혹은 수백배나 작은 값을 보였다. 한편, ^{234}Th 의 체류시간은 Yang et al. (1995)이 소용돌이 주변해역에서 보고한 18~30일보다는 다소 길었지만, 일반외양역에서의 약 50~70일 (Coale and Bruland, 1985, 1987)과 대서양 동부 대륙봉역에 위치한 New York Bight의 바깥쪽 해역에서의 70일 (Kaufman et al., 1981)과는 비슷하였다. 소용돌이 주변해역에서는 총부유물질의 농도가 본 조사정점에 비해 약 2배 정도 낮았다. 그럼에도 불구하고 본 조사정점에서의 ^{234}Th 체류시간이 소용돌이 주변해역에 비해 긴 것은 계절수온약층이 상대적으로 뚜렷이 형성되어 있지 않기 때문에 적게 제거된 것으로 생각된다.

또한, 식 (3)과 같은 방법으로 구한 수층별 ^{234}Th 의 제거속도상수 (K_{th}^4)와 각 성분과의 관계로부터 해수중 ^{234}Th 의 제거과정에 대해 알아보았다. 수층별 제거속도상수 (K_{th}^4)와 다른 성분들간에는 분산이 심하여 뚜렷한 상관성이 나타나지 않았다. 총부유물질의 농

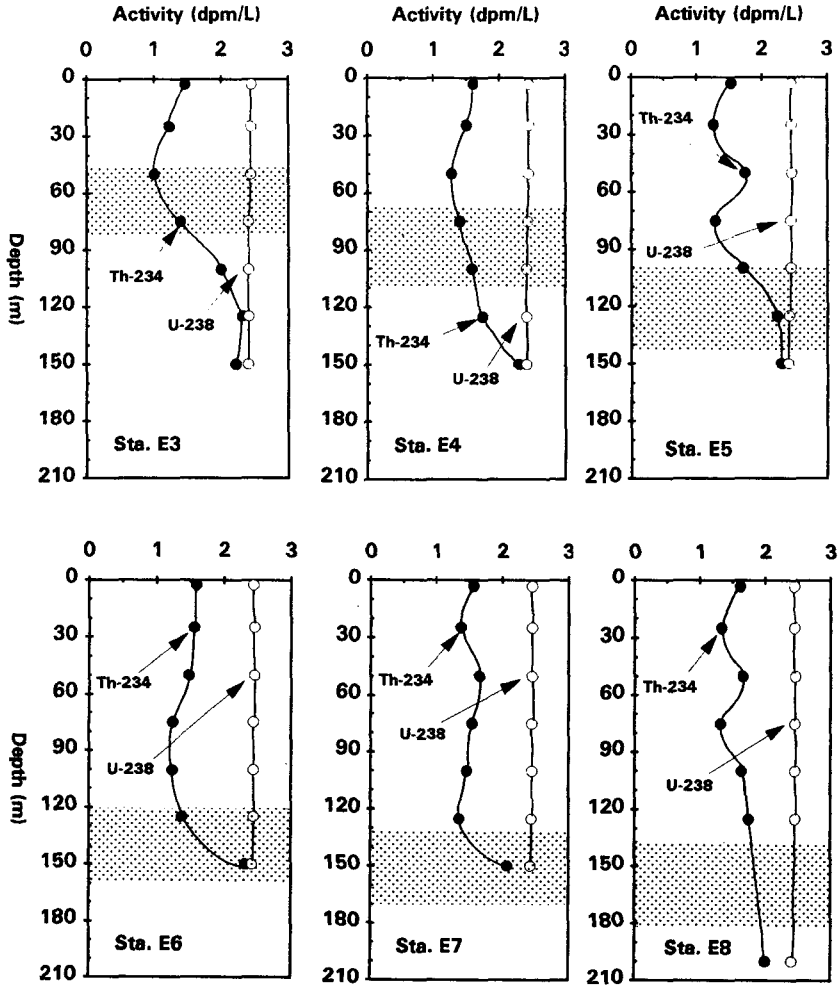


Fig. 5. Vertical profiles of total ^{234}Th and dissolved ^{238}U activities in seawater. ^{238}U activity was calculated by a relation with salinity (Ku et al., 1977). The hatched area represents thermocline.

도 역시 수층별 제거속도상수와 뚜렷한 상관성을 보이지 않지만, 대체적으로 입자물질의 농도가 비교적 낮은 수온약층 하부층에서 상대적으로 제거속도상수가 작았다. 그러나 표면혼합층에서는 수온약층 하부층에 비해 상대적으로 제거속도상수가 크지만, 총부유물질의 농도변화와 관계없이 수층별 ^{234}Th 의 제거속도상수가 대체적으로 일정한 범위의 값을 보였다 (Fig. 6A). 한편, ^{210}Th 의 경우와 마찬가지로 식 (3)을 이용하여 용존태 ^{234}Th 의 수층별 제거속도상수 (K_{Th}^{d})를 구하였다.

용존태 ^{234}Th 의 제거속도상수 (K_{Th}^{d})와 총부유물질의 농도 사이에는 몇개의 자료를 제외하면 비교적

좋은 정의 상관성을 보였다 (Fig. 6B). 그러나 4개 수층 (정점 E3의 25 m, 50 m 수층과 정점 E4, E5의 25 m 수층)의 자료들은 총부유물질의 농도가 비슷한 다른 수층들에 비해 제거속도상수가 훨씬 크다. 이들 4개 수층에서 ^{234}Th 의 총농도에 대한 입자태 농도의 비율이 90% 이상으로 총부유물질의 농도가 비슷한 다른 수층들에 비해 상대적으로 용존태 농도의 비율이 훨씬 낮았다. 즉 이들 4개 수층에서는 비슷한 총부유물질 농도를 보이는 다른 수층들에 비해 입자물질에 대한 ^{234}Th 의 친화력 (분배계수)이 훨씬 크기 때문에 상대적으로 제거속도상수가 큰 것으로 생각된다. Welschmeyer and Lorenzen (1985)은 온대 fjord해역의

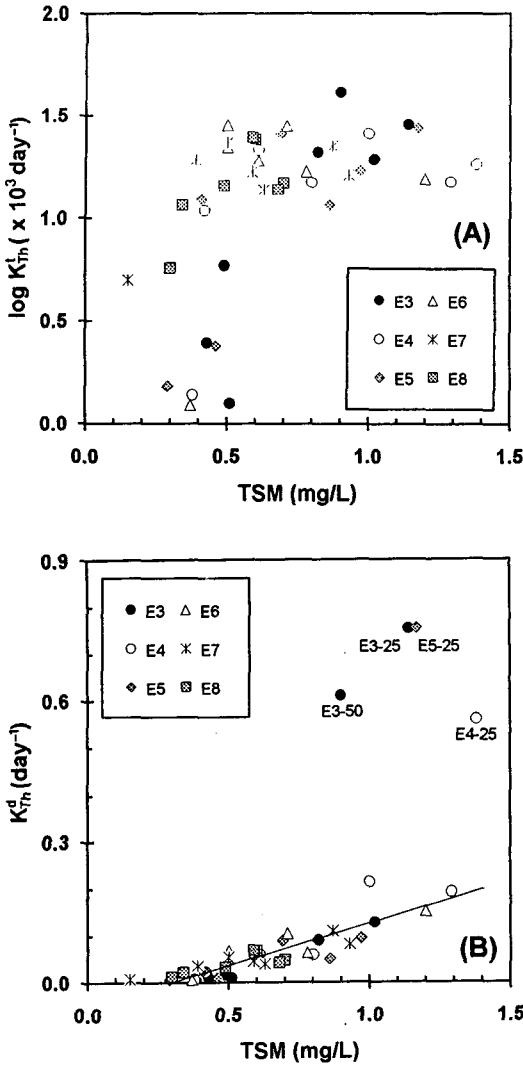


Fig. 6. Plots of removal rates ($\log K_{th}^t$ and K_{th}^d) of total ^{234}Th (A) and dissolved ^{234}Th (B) versus total suspended matter (TSM). Dissolved ^{234}Th activity is value that subtract particulate from total. The specific activity for ^{234}Th was assumed to be equal to 1000 dpm/g (Minagawa and Tsunogai, 1980; Wei and Hung, 1992), and particulate ^{234}Th in seawater was corrected as multiplying this value by TSM concentration.

유광층에서 생산된 클로로필의 80% 이상이 동물플랑크톤의 배설물이나 식물플랑크톤의 사체 형태로 하층으로 제거된다고 보고하였다. 그러나 온대 fjord해역에서 총부유물질중 유기탄소의 함량은 4계절에 걸쳐 9~22% (Bennett, 1980) 범위였으며, North Sea에서 총

부유물질중 총유기물 (TOM)은 추계에 2~26% (Zuo and Eisma, 1993) 범위였다. 따라서 총부유물질의 대부분은 주로 육상기원의 무기입자라고 생각할 수 있다. 그러므로 본 조사정점의 표면혼합층에서 ^{234}Th 는 주로 비생물기원의 무기입자물질에 의해 효과적으로 제거된다고 생각되며, ^{234}Th 의 총농도중 입자태 농도가 90% 이상인 4개 수층에서 K_{th}^t 값이 큰 것은 아마도 무기입자물질의 표면에 유기물질이 피복되어 입자태로의 분배계수가 더욱 커졌기 때문일지도 모른다 (Mckee et al., 1986).

요 약

본 연구는 대마난류의 주류역인 동해 남부해역의 포항 연안의 6개 정점에서 1994년 4월 26일부터 29일까지 수층별로 채수하고, 이 해역에서 ^{210}Po 와 ^{234}Th 의 제거속도 혹은 체류시간과 제거과정을 알아보았다.

^{210}Po 는 대체적으로 연안쪽 정점들에서는 표면혼합층에서 낮고 수온약층을 포함한 하부층에서 다소 높지만, 바깥쪽 정점들에서는 표면혼합층에서 오히려 높아지는 경향을 보였다. 그러나 ^{210}Pb 는 수심이 깊어짐에 따라 점차 감소하는 경향을 보였다. 또한, 표면혼합층에서는 대체적으로 ^{210}Po 가 어미핵종보다 부족량을 보이나, 수온약층을 포함한 하부층에서는 어미핵종과 거의 방사평형된 농도를 보이거나 약간의 과잉량을 보였다. ^{210}Pb 는 표면혼합층에서는 어미핵종인 ^{226}Ra 보다 과잉량을 보이나, 수온약층을 포함한 하부층에서는 약간 부족량을 보이거나 혹은 거의 방사평형된 농도를 보인다. ^{234}Th 는 표면혼합층과 수온약층이 그 하부층보다 현저히 낮다.

^{210}Po 의 체류시간은 1~4년의 범위로 비교적 연안쪽의 정점들 (E3, E4, E5)이 바깥쪽에 위치한 정점들 (E6, E7)보다 짧았다. 그러나 정점 E8에서는 약 10년으로 매우 길었으며, 이는 다른 정점들에 비해 표면혼합층이 두꺼운 관계로 하부 표면혼합층에서 재순환된 ^{210}Po 가 수직혼합되었기 때문일 것이다. 한편, ^{234}Th 의 체류시간은 52~74일의 범위로 정점별 차이가 그다지 크지 않았으며, ^{210}Po 의 체류시간에 비해서 훨씬 짧았다.

표면혼합층 내에서 해수중 ^{234}Th 는 용존태의 수층

별 제거속도상수가 총부유물질과 정의 상관성을 나타내는 것으로 보아 주로 비생물기원의 무기입자에 흡착되어 제거되고 있는 반면에, ^{210}Po 는 용존태의 제거속도상수가 콜로이드 a와 정의 상관성을 나타내는 것으로 보아 주로 생물체(주로 동·식물플랑크톤)에 흡수되어 제거되고 입자물질 농도에는 크게 영향을 받지 않는 것 같다.

참 고 문 헌

- 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.
- Bacon, M. P., R. A. Belastock, M. Tecotzky, K. K. Turekian and D. W. Spencer. 1988. Lead-210 and polonium-210 in ocean water profiles of the continental shelf and slope south of New England. *Contin. Shelf Res.*, 8, 841~853.
- Bennett, J. T. 1980. The biogeochemical significance of zooplankton fecal material in a biologically productive, temperate fjord. Ph.D. thesis, Univ. Washington, 258p.
- Chung, Y. and R. Finkel. 1988. ^{210}Po in the western Indian Ocean: distributions, disequilibria and partitioning between the dissolved and particulate phases. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 88, 232~240.
- Coale, K. H. and K. W. Bruland. 1985. ^{234}Th : ^{238}U disequilibria within the California Current. *Limnol. Oceanogr.*, 30, 22~33.
- Coale, K. H. and K. W. Bruland. 1987. Oceanic stratified euphotic zone as elucidated by ^{234}Th : ^{238}U disequilibria. *Limnol. Oceanogr.*, 32, 189~200.
- Holm-Hansen, O., C. J. Lorenzen, R. W. Holms and J. D. H. Strickland. 1965. Fluorometric determination of chlorophyll. *J. Cons. Perm. Int. Explor. Mer.*, 30, 3~15.
- Kadko, D. 1993. Excess ^{210}Pb and nutrient recycling within the California coastal transition zone. *J. Geophys. Res.*, 98, 857~864.
- Kaufman, A., Y. H. Li and K. K. Turekian. 1981. The removal rates of ^{234}Th from waters of the New York Bight. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 54, 385~392.
- Kim, S. S. and H. S. Yang. 1996. The geochemical behavior of ^{234}Th and ^{210}Po in seawaters from the Suyeong Bay, Pusan. *J. Korean Soc. Oceanogr.*, (in press).
- Ku, T. H., K. G. Knauss and G. G. Matheiu. 1977. Uranium in the open ocean: concentration and isotopic composition. *Deep-Sea Res.*, 24, 13~26.
- Mckee, B. A., D. J. DeMaster and C. A. Nittrouer. 1984. The use of $^{234}\text{Th}/^{238}\text{U}$ disequilibrium to examine the fate of particle-reactive species on the Yangtze continental shelf. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 68, 431~442.
- Mckee, B. A., D. J. DeMaster and C. A. Nittrouer. 1986. Temporal variability in the partitioning of thorium between dissolved and particulate phases on the Amazon shelf: implications for the scavenging of particle-reactive species. *Contin. Shelf Res.*, 6, 87~106.
- Minagawa, M. and S. Tsunogai. 1980. Removal of ^{234}Th from a coastal sea: Funaka Bay, Japan. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 47, 51~64.
- Nozaki, Y., S. Tsunogai and M. Nishimura. 1973. Lead-210 in the Japan Sea. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, 29, 251~256.
- Nozaki, Y. and S. Tsunogai. 1976. ^{226}Ra , ^{210}Pb and ^{210}Po disequilibria in the western North Pacific. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 32, 313~321.
- Nozaki, Y. and M. Yamada. 1987. Thorium and protactinium isotope distributions in waters of the Japan Sea. *Deep-Sea Res.*, 34(8), 1417~1430.
- Nozaki, Y., N. Ikuta and M. Yashima. 1990. Unusually large ^{210}Po deficiencies relative to ^{210}Pb in the Kuroshio current of the East China and Philippine Seas. *J. Geophys. Res.*, 95, 5321~5329.
- 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.
- Tanaka, N. Y. and S. Tsunogai. 1983. Biological effect on removal of ^{234}Th , ^{210}Po and ^{210}Pb from surface water in Funka Bay, Japan. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 47, 1783~1790.
- Wei, C. L. and C. C. Hung. 1992. Spatial variation of ^{234}Th scavenging in the surface water of the Bashi Channel and the Luzon Strait. *J. Oceanogr.* 48, 427~437.
- Welschmeyer, N. A. and C. J. Lorenzen. 1985. Role of herbivory in controlling phytoplankton abundance: annual pigment budget for a temperate marine fjord. *Mar. Biol.* 90, 75~86.
- Yang, H. S., P. J. Kim, J. C. Lee and C. H. Moon. 1994. Origin of the cold water below 10°C occurring in the southern coastal region of the Korean East Sea in summer by Ra isotope distribution. *Bull. Korean Fish. Soc.* 27(4), 404~412 (in Korean).
- Yang, H. S., S. S. Kim and J. C. Lee. 1995. Effect of eddy on the cycle of ^{210}Po and ^{234}Th in the central region of Korean East Sea. *J. Korean Soc. Oceanogr.*, 30(4). 279~287 (in Korean).
- 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. *Contin. Shelf Res.*, 13, 999~1022.

1996년 1월 31일 접수

1996년 5월 4일 수리