

동해 서남해역에서 여름철 $^{234}\text{Th}/^{238}\text{U}$ 비평형을 이용한 입자상 유기탄소 침강플럭스 추정

김동선 · 최만식^{1*} · 오혜영¹ · 김경희 · 노재훈
한국해양연구원 해양환경연구본부
¹충남대학교 지구환경과학부

Estimate of Particulate Organic Carbon Export Flux Using $^{234}\text{Th}/^{238}\text{U}$ Disequilibrium in the Southwestern East Sea During Summer

DONGSEON KIM, MAN-SIK CHOI^{1*}, HAE-YOUNG OH¹, KYUNG HEE KIM AND JAE-HOON NOH
Climate Change & Coastal Disaster Research Department, KORDI
¹Division of Earth and Environmental Sciences, Chungnam National University, Daejeon 303-764, Korea

2007년 8월에 동해에서 처음으로 $^{234}\text{Th}/^{238}\text{U}$ 비평형(disequilibrium)을 이용하여 유광대에서 심층으로의 입자상 유기탄소 침강플럭스(export flux)를 추정하였다. 입자상 유기탄소 침강플럭스는 ^{234}Th 침강 플럭스에 $\text{POC}/^{234}\text{Th}_p$ 비율을 곱하여 구하였으며, ^{234}Th 플럭스는 표층에서 수심 100 m까지 $^{234}\text{Th}/^{238}\text{U}$ 비평형을 적분하여 계산하였고 $\text{POC}/^{234}\text{Th}_p$ 비율은 수심 150 m와 200 m에서 채집한 부유물질 시료(입자크기가 $0.7 \mu\text{m}$ 이상)에서 측정하였다. 유기탄소 침강플럭스는 $14\text{-}506 \text{ mg C m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 의 범위를 나타냈으며, 정점 A2에서 최고값을 보였고 정점 D4에서 최소값을 보였다. 유기탄소 침강플럭스는 유광대에서의 일차생산력과 매우 좋은 상관관계를 나타내었으며, 유기탄소 침강플럭스/일차생산력 비율은 $0.29\text{-}0.62$ (평균 0.43)의 범위를 보였고, 연안역에 비해 심해역에서 다소 높은 비율을 나타냈다. 동해에서 관측한 유기탄소 침강플럭스는 전반적으로 대양에서 관측한 값들보다는 높았고 대륙 주변해에서 관측한 값보다 다소 높거나 유사하였다. 동해에서의 침강플럭스/일차생산력 비율은 북해(North Sea)와 척치해(Chukchi Sea)에서 관측한 값들과는 유사하였지만, 라브라도해(Labrador Sea), 바렌츠해(Barents Sea), 리온스만(Gulf of Lions)에서 관측한 값들보다는 월등히 높았다. 따라서 동해는 전세계 해역에서 유광대에서 생성된 유기탄소가 수심 200 m 이하 심층으로 가장 많은 비율로 침강하는 해역들 가운데 하나라고 생각된다.

Export fluxes of particulate organic carbon were estimated for the first time by using $^{234}\text{Th}/^{238}\text{U}$ disequilibrium in the southwestern East Sea during August 2007. They were calculated by multiplying $\text{POC}/^{234}\text{Th}_p$ ratios of sinking particles (larger than $0.7 \mu\text{m}$) obtained from 150-200 m water depths to ^{234}Th fluxes that were estimated by integrating $^{234}\text{Th}/^{238}\text{U}$ disequilibrium from surface to 100 m water depth. Export fluxes ranged from 14 to 505 $\text{mg C m}^{-2} \text{ day}^{-1}$, with the highest value at station A2 and the lowest value at station D4. Primary production was well correlated with export flux, indicating that it was a major factor controlling export flux. Export flux in the East Sea was generally higher than those estimated in the open ocean and similar to or somewhat higher than those in the continental marginal seas. Export flux/primary production (EF/PP) ratios varied from 0.29 to 0.62, with an average of 0.43 and were somewhat higher in the basin area than in the coastal area. EF/PP ratio in the East Sea was rather similar to those estimated in the North Sea and Chukchi Sea, but much higher than those in the Labrador Sea, Barents Sea, and Gulf of Lions. Therefore, the East Sea is one of the major areas where a large amount of organic carbon produced in the euphotic zone sinks into the deep layer below 200 m water depth.

Keywords: ^{234}Th , export flux, primary production, East Sea

서 론

지구상에서 해양은 대기 이산화탄소의 가장 중요한 제거원으로 작용한다. 생물학적 펌프(biological pump)는 대기에서 해양으로

유입된 이산화탄소를 표층에서 심층으로 입자상 유기탄소(particulate organic carbon) 형태로 격리시키는 핵심적인 기작이다. 표층에서 심층으로의 유기탄소 침강플럭스는 전지구 탄소순환 모델을 운용 하는데 가장 중요한 입력요소(input parameter)이며, 전통적으로 해양 표층에 시계열 퇴적물트랩(time-series sediment trap)을 계류 하여 측정하였다. 하지만 퇴적물트랩을 이용하여 유기탄소 침강플

*Corresponding author: mschoi@cnu.ac.kr

력을 측정하는 것은 수리역학적 오류(hydrodynamic bias)와 시료채집시 발생하는 오류 때문에 3배에서 10배까지 큰 오차를 발생시키는 것으로 보고되었다(Buesseler, 1991). ^{234}Th 은 반감기가 24.1일이고 부유입자에 매우 강하게 흡착하는 성질 때문에 최근에 표층에서 심층으로의 유기탄소 침강플럭스를 추정하는데 많이 이용되고 있다(Moran *et al.*, 2003; Hung *et al.*, 2004; Moran *et al.*, 2005; Buesseler *et al.*, 2006; Giuliani *et al.*, 2007). ^{234}Th 방법은 고가의 계류장비가 없이 연구선에서 직접 측정가능하고 퇴적물트랩 이용시 발생하는 오류가 없는 장점을 가지고 있다.

동해는 우리나라 주변해 가운데 유일하게 수심이 2000 m 이상 되는 심해이며, 수심이 깊어 다량의 대기 이산화탄소를 심해에 저장할 수 있는 탄소저장고로서 중요한 역할을 한다(Park *et al.*, 2006). 특히 동해는 최근 30여 년간 심층수의 수온 상승과 용존산소량 감소와 같은 급격한 환경변화를 겪고 있으며(Kang *et al.*, 2004), 이런 변화양상은 지구온난화와 관련하여 예측되는 대양의 변화과정과 동일한 방향으로 진행되고 있다. 동해에서 탄소순환도 지구온난화에 의해 영향을 받을 가능성이 매우 크다. 따라서 탄소순환에 대한 지구온난화의 영향을 이해하기 위해서는 대기-해양 이산화탄소 플럭스, 일차생산력, 표층에서 심층으로의 유기탄소의 침강플럭스, 퇴적물 내에서 유기탄소의 퇴적플럭스 등과 같은 해양에서의 탄소플럭스를 정량적으로 파악해야 한다.

동해 울릉분지에서 시계열 퇴적물트랩을 이용하여 수심 1020 m에서 관측한 유기탄소 침강플럭스는 1999년에 $9.7 \text{ g C m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$, 2000년에 $7.3 \text{ g C m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$, 2001년에 $9.6 \text{ g C m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 로, 3년동안 평균 플럭스는 $8.8 \text{ g C m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 이었다(한국해양연구원, 2003). 또한, 헬륨 동위원소를 이용하여 측정된 표층에서 심층으로의 유기탄소 침강플럭스는 동해 울릉분지에서 $64 \text{ g C m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 이었고 일본 분지(Japan Basin)에서 $99 \text{ g C m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 이었다(Ham and Kim, 2001, 2008). 반면에 Moon *et al.*(2000)은 울릉분지 대륙사면 및 일본 분지역에서 1996년 봄철 ^{234}Th 의 침강플럭스를 0-100 m 사이에서 2385-2909 dpm/m²/d 범위라고 보고하였다. 하지만 현재까지 동해에서 ^{234}Th 방법을 이용한 유기탄소 침강플럭스 추정과 일차생산력과의 관계에 대한 연구가 전혀 수행되지 않았다. 본 연구의 목적은 동해 서남해역에서 여름동안 $^{234}\text{Th}/^{238}\text{U}$ 비평형을 이용하여 표층에서 심층으로의 유기탄소 침강플럭스를 측정하고 유기탄소 침강플럭스/일차생산력 비율을 계산하여, 동해에서 유광대에서 식물플랑크톤에 의해 생성된 입자대 유기탄소가 얼마나 수심 200 m 이하의 심층으로 침강하는지를 파악하는 것이다.

연구 방법

2007년 7월 30일부터 8월 12일까지 한국해양연구원 연구선 *이여도호*를 이용하여 현장조사를 수행하였으며, 조사 정점은 모두 7개 정점으로 동해 서남해역에 위치한다(Fig. 1). 각 정점마다 SeaBird CTD를 이용하여 수온과 염분을 측정하였고, 표층에서 수심 200 m까지 표준수심에서 니스킨(Niskin) 채수병을 이용하여 해수를 채취하였다. 해수 1000 ml를 공극크기 0.7 μm 의 Whatman GF/F 여과지로 거른 후, 여과 해수 60 ml는 질산염 분석을 위해 냉동하였고, GF/F 여과지도 엽록소 분석을 위해 냉동하였다.

질산염 농도는 자동이온분석기(LaChat model, QuikChem AE)를

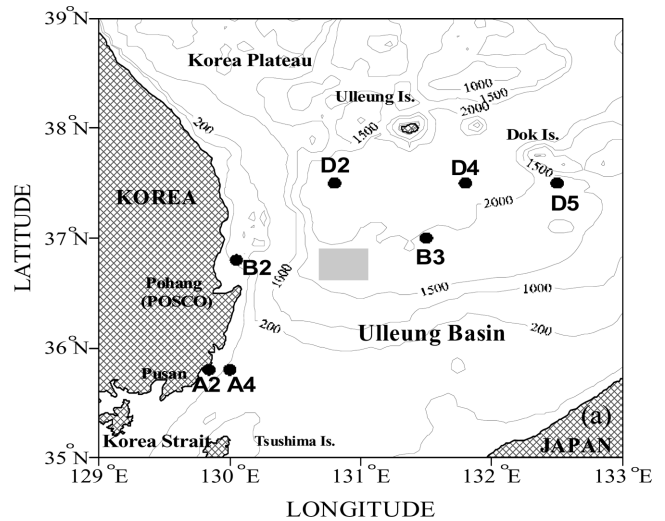


Fig. 1. Study area and sampling stations in the East Sea.

이용하여 측정하였으며, 각각의 측정값은 표준 해수시료(SRM)를 이용하여 검정하였다. 두 번 이상 분석을 통하여 얻은 분석 정밀도는 5% 이내였다. 엽록소 농도는 90% 아세톤 10 ml로 24시간 동안 추출한 후에 TD-700 fluorometer (excitation filter 436 nm, emission filter 680 nm)를 이용하여 측정하였다. Phaeopigment 농도는 아세톤으로 추출된 엽록소에 1 N 염산을 넣고 1분 30초 후에 Turner-designed fluorometer로 측정하였다. 본 연구에서는 엽록소 측정값에서 phaeopigment 농도를 뺀 보정된 엽록소 값을 이용하였다. 입자상 유기탄소 농도는 해수 500 ml를 여과한 GF/F 여과지(사용 전에 550 °C에서 5시간 태움)를 염산 원액이 들어있는 데시케이터에 24시간 동안 넣어 무기탄소(inorganic carbon)를 제거한 후에, CNS 분석기(EA1110, CE Instrument)를 이용하여 분석하였다. 식물플랑크톤의 P-E 특성은 Babin *et al.*(1994)의 radial photosynthetron 방법을 이용하여 구하였다. 표층과 아표층 엽록소 최고층(subsurface chlorophyll maximum)의 해수에 ^{14}C sodium bicarbonate(Amersham Inc.)을 첨가하여 2시간 배양하였으며, 항온수조를 이용 현장수온을 유지하였다. P-E 실험에서 얻어진 결과는 Platt *et al.*(1980)의 모형에 적합화하여 매개변수화 하였다. 일일 일차생산력은 P-E 매개변수를 조사 기간의 시간별 평균 광량, 조사정점의 수심별 엽록소 농도 및 소광계수와 결합 적분하여 구하였다.

해수 중 ^{234}Th 은 기체 흐름식 β -spectrometer(RISO National Laboratories)로 분석하였다(Buesseler *et al.*, 1992). 해수 2 L(용존상 및 총 ^{234}Th 용)에 진한 질산 3 ml를 넣어 pH를 2 이하로 만들고 회수를 보정용 ^{230}Th (12 pg g^{-1}) 용액 1 g을 첨가하고 8-12시간 동위원소 평형을 위해 놓아두었다. 암모니아 용액으로 pH를 8.0 ± 0.15 맞춘 후 KMnO_4 (7.5 g $\text{KMnO}_4/\text{L DIW}$) 100 μL 와 MnCl_2 (33.3 g $\text{MnCl}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}/\text{L DIW}$) 100 μL 를 넣어 망간침전물을 형성하였다. 수조에서 80 °C로 2-3시간 가열한 후 상온으로 냉각하였고 공극 1 μm 이고 직경이 25 mm인 Ag 여과지를 사용하여 여과하였다. 각 시료를 24일마다 5회 측정 후 망간침전물을 테플론 용기에 넣고 ^{229}Th (6 pg g^{-1}) 1 g을 넣고 진한 염산 2 mL와 과

산화수소 1 mL로 산분해 후 가열판에서 건조시켰고 잔류물을 1M 질산 용액 1mL로 용출하였다. 이 용액을 유도결합플라즈마 질량 분석기(ICP/MS; X-7 model, ThermoFinnigan Ltd)와 ASX-100 자동주입기(CETAC Ltd)를 사용하여 $^{230}\text{Th}/^{229}\text{Th}$ 비율을 측정하여 각 시료별 회수율을 산정하였다. 입자상 ^{234}Th 은 총 ^{234}Th 에서 용존상 ^{234}Th 을 빼줌으로써 계산하였다. ^{238}U 활동도는 염분에 의해 계산되었다($^{238}\text{U}=0.07097 \times \text{Salinity}$: Chen *et al.*, 1986).

결 과

연구 정점들은 크게 수심 200 m 이하의 연안역(A2, A4, B2)과 1500 m 이상의 심해역(B3, D2, D4, D5)으로 구분된다. 모든 정점에서 수온은 표층에서 수심 10 m까지 24-25 °C의 높은 값을 나타냈고 그 이하 수심에서 급격히 감소하였다(Fig. 2). 수온약층은 연안역에 위치한 정점에서는 대략 10-50 m이었고 심해역에 위치한 정점에서는 좀 더 깊은 10-100 m이었다. 정점 A2, A4, B2, B3, D2에서 염분은 표층에서 수심 10 m까지 33.0-33.3 psu로 최저값들을 나타냈고 그 이하에서 급격히 증가하여 수심 50 m 내외에서 34.2-34.4 psu로 최고값들을 나타냈으며, 그 이하 수심에서 다시 약간 감소하였다(Fig. 2). 하지만 정점 D4와 D5에서 염분은

표층에서 33.8-33.9 psu로 다른 정점에 비해 0.5-0.9 psu 가량 높았으며 수심에 따른 염분변화도 다른 정점과는 달리 큰 변화를 보이지 않았다.

연안역에서 질산염 농도는 표층에서 수심 20 m까지 $0.5 \mu\text{mol L}^{-1}$ 이하로 매우 낮았고 그 이하 수심에서 급격히 증가하여 수심 100 m에서 $15.2\text{-}19.3 \mu\text{mol L}^{-1}$ 의 높은 값들을 나타냈다(Fig. 3). 심해역에서는 질산염 농도가 $0.5 \mu\text{mol L}^{-1}$ 이하로 매우 낮게 나타나는 수심이 정점에 따라 다르게 나타났는데, 정점 B3에서는 20 m, 정점 D4에서는 30 m, 정점 D2와 D5에서는 40 m까지 나타났다. 따라서 표층해수에서 질산염 부족이 연안역보다 심해역에서 보다 심하게 일어났음을 알 수 있다. 수심 200 m에서 관측된 질산염 농도도 정점에 따라 다르게 나타났는데, 정점 B3에서 $13.0 \mu\text{mol L}^{-1}$ 로 최소값을 보였고 정점 D4에서 $22.8 \mu\text{mol L}^{-1}$ 로 최고값을 나타냈다.

연안역에서 엽록소 농도는 정점에 따라 매우 큰 차이를 보였다. 정점 A2와 B2에서 엽록소 농도는 수심 20-30 m에서 $1.5 \mu\text{g L}^{-1}$ 이상의 높은 값들을 나타내어 아표층 엽록소최대(subsurface chlorophyll maximum)을 보이는 반면, 정점 A4에서 엽록소 농도는 모든 수심에서 $0.5 \mu\text{g L}^{-1}$ 이하의 낮은 값들을 나타내 아표층 엽록소최대를 보이지 않았다(Fig. 4). 심해역에서 엽록소 농도는 수심 30-40 m에서 최고 값들을 나타냈지만 최고 농도들이 0.64-

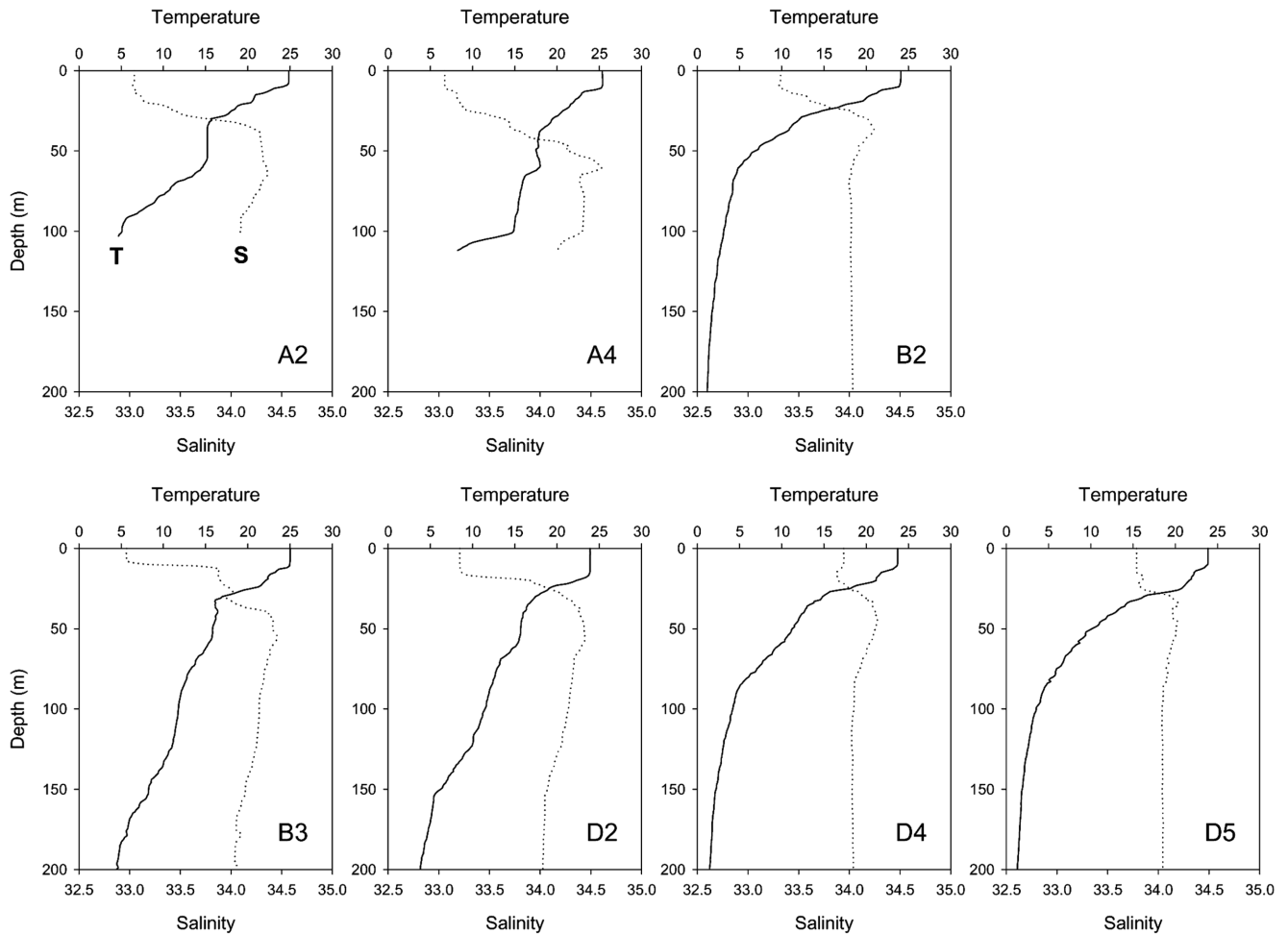


Fig. 2. Vertical profiles of temperature and salinity in the southwestern East Sea during summer.

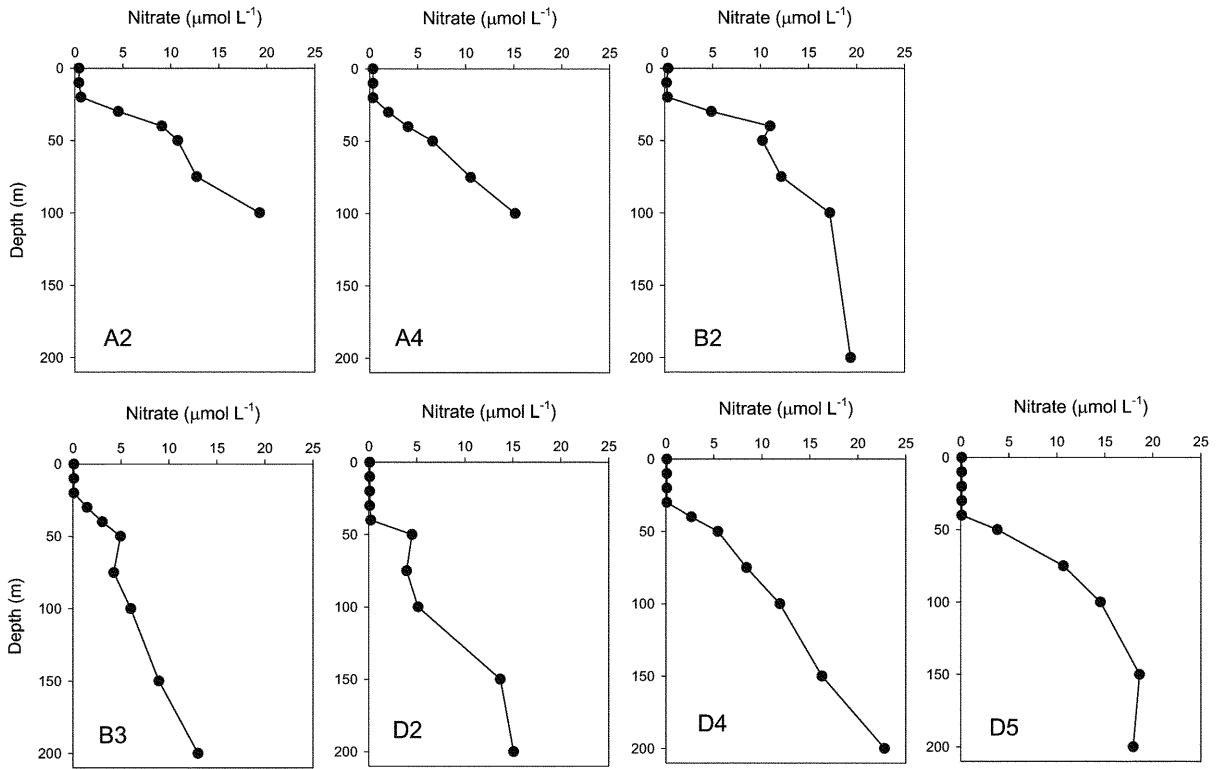


Fig. 3. Vertical profiles of nitrate in the southwestern East Sea during summer.

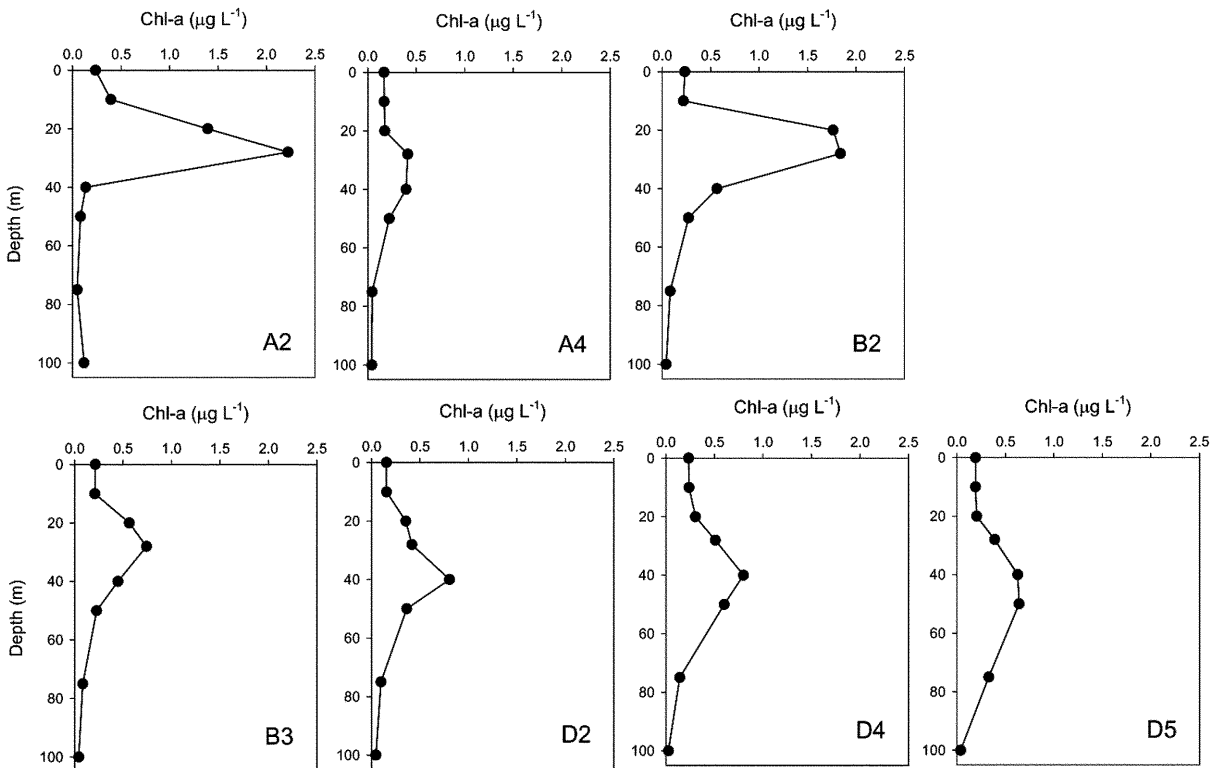


Fig. 4. Vertical profiles of chlorophyll in the southwestern East Sea during summer.

0.81 $\mu\text{g L}^{-1}$ 의 범위를 보여, 연안역에서와 같이 뚜렷한 아표층 엽록소 최대를 보이지 않았다.

연안역에서 유기탄소 농도는 아표층 엽록소최대를 보이는 정점 A2와 B2의 수심 30-40 m에서 15.0 $\mu\text{mol L}^{-1}$ 이상의 높은 값을

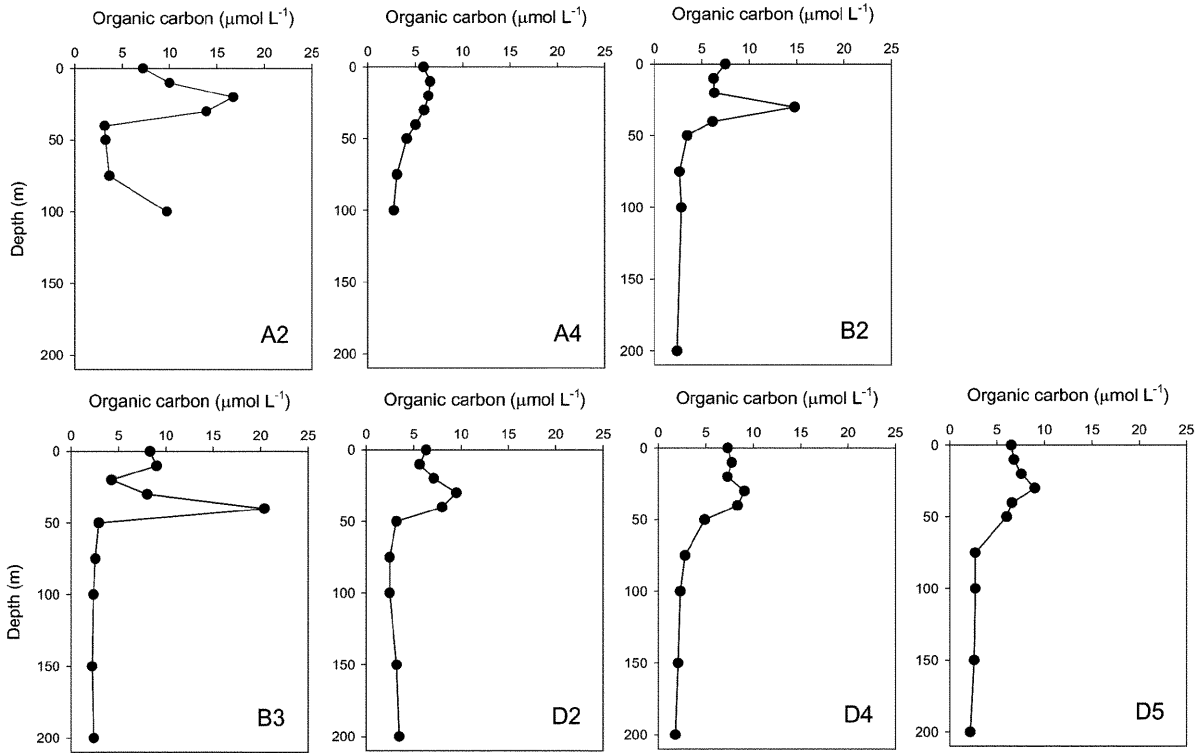


Fig. 5. Vertical profiles of particulate organic carbon (POC) in the southwestern East Sea during summer.

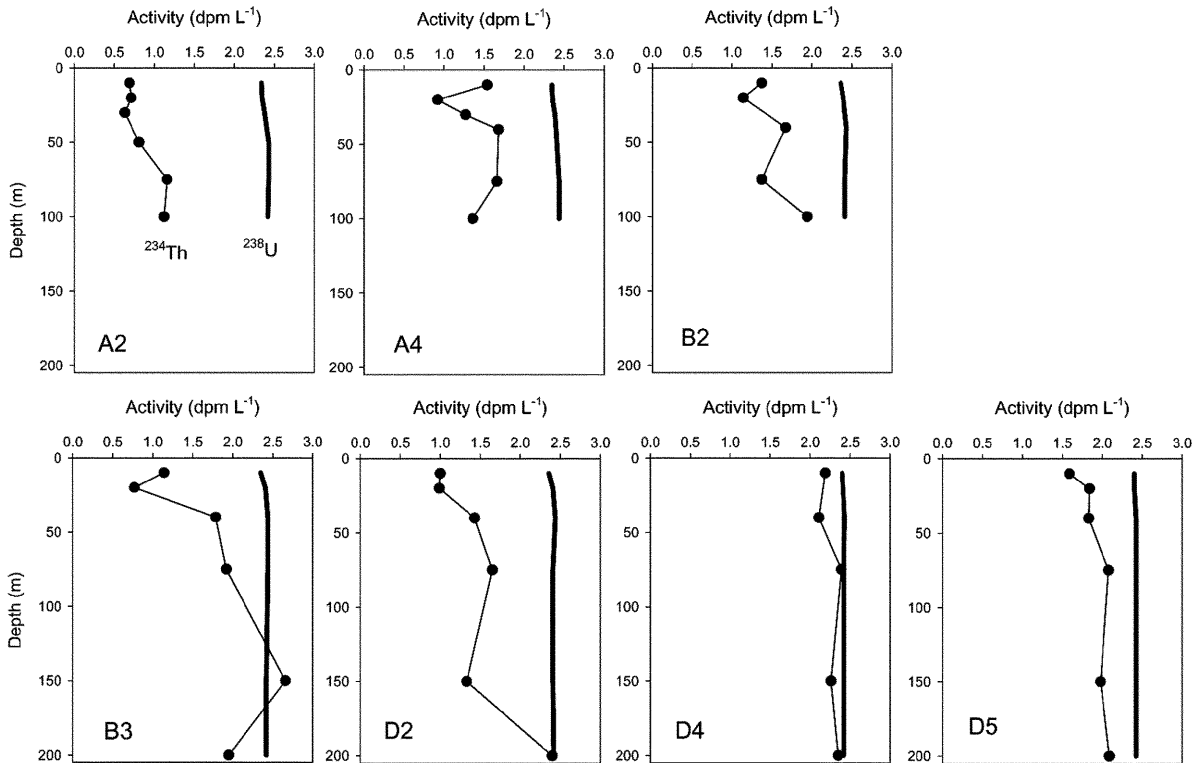


Fig. 6. Vertical profiles of total ^{234}Th and ^{238}U activity in the southwestern East Sea during summer. Dot lines indicate total ^{234}Th activity, and straight lines total ^{238}U activity.

나타냈고 정점 D4에서는 모든 수심에서 $7.0 \mu\text{mol L}^{-1}$ 이하의 낮은 값들을 나타냈다(Fig. 5). 심해역에서 유기탄소 농도는 정점 B3,

수심 40 m에서 $20.4 \mu\text{mol L}^{-1}$ 의 최고값을 나타냈고 다른 정점에서는 수심 30 m에서 $9.0 \mu\text{mol L}^{-1}$ 내외의 최고값들을 나타냈다.

따라서 유기탄소의 수직분포가 연안역에서는 엽록소의 수직분포와 유사하였지만, 심해역에서는 서로 다른 양상을 나타냈다.

연안역에서는 수심이 얇아 총 ^{234}Th 활동도(total ^{234}Th activity)를 100 m까지 측정하였고 심해역에서는 200 m까지 측정하였다. 이 중 연안역에서 75 m 및 100 m 그리고 심해역의 경우 150 m 및 200 m에서 총 ^{234}Th 활동도는 용존 ^{234}Th 활동도(dissolved ^{234}Th activity)와 입자상 ^{234}Th 활동도(particulate ^{234}Th activity)를 합한 것이다. 연안역에서 총 ^{234}Th 활동도는 수심에 따라 약간 증가하였으며 정점 A2에서 가장 작은 값들을 나타냈다(Fig. 6). 연안역에서 표층에서 수심 100 m까지 $^{234}\text{Th}/^{238}\text{U}$ 활동도 비율은 정점 A2에서 0.26-0.48, 정점 A4에서 0.39-0.70, 정점 B2에서 0.48-0.80으로, ^{234}Th 와 ^{238}U 사이에 매우 강한 비평형(disequilibrium)을 보였다. 심해역에서도 총 ^{234}Th 활동도가 수심에 따라 전반적으로 증가하였으며, 정점 D2에서 가장 작게 관측되었고 정점 D4에서 가장 크게 관측되었다. 심해역에서 표층에서 수심 200 m까지 $^{234}\text{Th}/^{238}\text{U}$ 활동도 비율은 정점 B3에서 0.32-1.10, 정점 D2에서 0.41-0.99, 정점 D4에서 0.87-0.99으로, 정점 D5에서 0.66-0.90으로, ^{234}Th 와 ^{238}U 사이의 비평형은 정점 D2에서 가장 강하게 나타났고 정점 D4에서 가장 약하게 나타났다.

토 의

유광대(euphotic zone)에서 심층으로 입자상 유기탄소의 침강플럭스(export flux)는 ^{234}Th 의 흡착모델에 의해 다음과 같이 침강입자의 $\text{POC}/^{234}\text{Th}_p$ 비율을 유광대로부터 침강하는 ^{234}Th 플럭스와 곱함으로써 구할 수 있다(Buesseler *et al.*, 1992; Moran *et al.*, 2003);

$$P_{\text{POC}} = \text{POC}/^{234}\text{Th}_p \times \lambda \int (A_U - A_{\text{Th}}) dz$$

여기서 POC는 유기탄소 농도($\mu\text{mol L}^{-1}$), $^{234}\text{Th}_p$ 는 입자상 ^{234}Th 활동도(dpm L^{-1}), λ 는 ^{234}Th 의 붕괴상수(0.0288 d^{-1}), A_U 는 총 ^{238}U 활동도(dpm L^{-1}), A_{Th} 는 총 ^{234}Th 활동도(dpm L^{-1})를 나타낸다. 위의 식은 입자의 침강 현상이 수괴의 수평적, 수직적 이동보다 훨씬 빠르고 시간에 따른 총 ^{234}Th 활동도의 변화가 없다는 정상상태(steady state)를 가정하고 있다.

이 방법은 몇 가지의 단점들이 있을 수 있는데 가장 중요한 점들은 1) 플랑크톤 대번성(bloom)과 같은 비정상 상태의 스케빈징이 일어 날 경우 2) 이류에 의한 비평형 증가 효과 3) POC와 ^{234}Th 이 같은 시료에서 분석되지 않으며 4) 침강하는 입자의 $\text{POC}/^{234}\text{Th}_p$ 비율이 수심 및 입자 크기에 따라 변화한다는 것이다 (Cochran and Masqué, 2003). 이 연구의 경우 여름철이라서 플랑크톤 대번성과 같은 경우는 없어 입자에 의한 ^{234}Th 제거가 비교적 일정하리라 가정할 수 있으나 수직 및 수평적 이류에 의한 비평형 변화는 충분히 가능하리라 예상된다. 즉, 연안 용승 작용 및 외류에 의한 활발한 수직적 혼합 그리고 연구 해역의 남쪽에서 유입하는 대마 난류에 의한 해수 이동을 예상할 수 있다. 특히 정점 A2, A4 및 B2의 연안역에서 가능할 것으로 예상되나 이류의 영향이 클 경우 비평형이 점차 증가하는 경향은 찾아 볼 수 없었다. 오히려 A2 정점에서 비평형이 가장 크게 일어나는 것으로 보아 연구 지역에서는 이류의 영향보다는 입자의 침강이 훨씬 빠르게 일어날 수 있다.

Table 1. $\text{POC}/^{234}\text{Th}_p$ ratios of sinking particles in the southwestern East Sea during summer

Station	Water depth (m)	$^{234}\text{Th}_p$ (dpm L^{-1})	POC ($\mu\text{mol L}^{-1}$)	$\text{POC}/^{234}\text{Th}_p$ ($\mu\text{mol dpm}^{-1}$)
A2	75	0.49	3.72	7.55
	100	0.86	10.6	12.4
A4	75	0.78	2.88	3.68
	100	0.53	2.56	4.84
B2	75	0.18	2.86	15.9
	100	1.02	2.90	2.83
B3	150	0.82	2.98	3.63
	200	0.51	2.11	4.09
D2	150	0.66	5.08	7.73
	200	1.15	2.76	2.41
D4	150	1.00	2.58	2.58
	200	0.65	1.97	3.05
D5	150	0.42	2.54	6.00
	200	0.47	2.28	4.85

유기탄소 침강플럭스는 유광대 이하로 침강하는 유기탄소의 양을 나타내기 때문에 $\text{POC}/^{234}\text{Th}_p$ 비율은 유광대 이하로 침강하는 입자들에서 측정하여야한다. 본 연구에서 $\text{POC}/^{234}\text{Th}_p$ 비율은 연안역에서는 수심 75 m와 100 m에서 측정하였고 심해역에서는 수심 150 m와 200 m에서 측정하였다(Table 1). 연안역에서 $\text{POC}/^{234}\text{Th}_p$ 비율은 연구정점 뿐 만아니라 수심에 따라서도 큰 차이를 나타냈다. 특히 정점 B2에서 $\text{POC}/^{234}\text{Th}_p$ 비율이 수심에 따라 큰 차이를 보였는데, 수심 75 m에서는 $15.9 \mu\text{mol dpm}^{-1}$ 이었고 수심 100 m에서는 $2.83 \mu\text{mol dpm}^{-1}$ 로, 5배 이상의 차이를 나타냈다. 정점 A2에서 측정된 $\text{POC}/^{234}\text{Th}_p$ 비율은 정점 A4에서 측정된 것보다 두 수심 모두에서 2배 이상 높았다. 심해역에서 $\text{POC}/^{234}\text{Th}_p$ 비율은 연안역보다 대체로 작았으며, 연구정점과 수심에 따른 차이도 연안역보다 크지 않았다. 정점 D2에서 $\text{POC}/^{234}\text{Th}_p$ 비율이 수심에 따라 큰 차이를 나타내, 150 m에서 $7.73 \mu\text{mol dpm}^{-1}$ 이었고 200 m에서 $2.41 \mu\text{mol dpm}^{-1}$ 로 3배 이상 차이를 나타냈다.

많은 연구결과에 따르면, $\text{POC}/^{234}\text{Th}_p$ 비율은 입자 크기에 따라 큰 차이를 보인다고 보고되었다.(Charette and Moran, 1999; Benitez-Nelson *et al.*, 2001; Moran *et al.*, 2003; Hung *et al.*, 2004). 따라서 Buesseler *et al.* (2006)은 $\text{POC}/^{234}\text{Th}_p$ 비율을 유광대 이하로 침강하는 입자에서 측정해야하기 때문에 퇴적물트랩(sediment trap)을 이용하여 채집한 시료에서 측정하는 것이 가장 적합하다고 주장하였다. 본 연구에서는 퇴적물트랩 시료를 확보하지 못하여 크기가 $0.7 \mu\text{m}$ 이상의 부유물질 시료에서 $\text{POC}/^{234}\text{Th}_p$ 비율을 측정하였다. 본 연구에서 수심에 따라 $\text{POC}/^{234}\text{Th}_p$ 비율이 큰 차이를 보이기 때문에 두 수심의 평균값을 이용하였다. $\text{POC}/^{234}\text{Th}_p$ 비율은 $2.81\text{-}9.97 \mu\text{mol dpm}^{-1}$ 의 범위를 나타냈으며, 정점 A2에서 최고값을 보였고 정점 D4에서 최소값을 보였다(Table 1). 기존연구에서 퇴적물트랩 시료에서 측정된 $\text{POC}/^{234}\text{Th}_p$ 비율은 생산성이 낮은 해역에서는 $5 \mu\text{mol dpm}^{-1}$ 이하의 낮은 값들을 나타냈고 생산성이 높은 해역에서는 $10 \mu\text{mol dpm}^{-1}$ 이상의 높은 값들을 나타냈으며, 대부분이 $3\text{-}10 \mu\text{mol dpm}^{-1}$ 의 범위를 나타냈다(Buesseler *et al.*, 2006). 본 연구에서 부유물질에서 측정된 $\text{POC}/^{234}\text{Th}_p$ 비율은 퇴적

Table 2. Export fluxes of organic carbon and export flux/primary production(EF/PP) ratio in the southwestern East Sea during summer.

Station	POC/ $^{234}\text{Th}_p$ ($\mu\text{mol dpm}^{-1}$)	^{234}Th flux ($\text{dpm m}^{-2} \text{day}^{-1}$)	Organic carbon export flux ($\text{mg C m}^{-2} \text{day}^{-1}$)	Primary production ($\text{mg C m}^{-2} \text{day}^{-1}$)	EF/PP ratio
A2	9.97	4,233	506	1743	0.29
A4	4.26	2,743	140	306	0.45
B2	9.39	2,473	278	731	0.38
B3	3.86	1,903	88	279	0.31
D2	5.07	2,782	169	324	0.52
D4	2.81	423	14	306	0.04
D5	5.42	2,013	131	208	0.62

물트랩 시료에서 측정된 값들과 매우 유사한 값들을 나타냈다.

본 연구에서 관측한 유광대 깊이는 100 m보다 깊지 않기 때문에 ^{234}Th 플럭스는 표층에서 수심 100 m까지 $^{234}\text{Th}/^{238}\text{U}$ 비평형을 적분하여 계산하였으며, 유기탄소 침강플럭스는 ^{234}Th 플럭스에 POC/ $^{234}\text{Th}_p$ 비율을 곱하여 계산하였다(Table 2). 유기탄소 침강플럭스는 14-506 $\text{mg C m}^{-2} \text{day}^{-1}$ 의 범위를 나타냈으며, 정점 A2에서 최고값을 보였고 정점 D4에서 최소값을 보였다. 연안역에서 유기탄소 침강플럭스의 평균값은 308 $\text{mg C m}^{-2} \text{day}^{-1}$ 이었고 심해역에서 평균값은 101 $\text{mg C m}^{-2} \text{day}^{-1}$ 로, 연안역에서 유기탄소 침강플럭스는 심해역보다 3배 정도 높았다. 본 연구에서 관측한 유기탄소 침강플럭스는 북대서양에서 봄철 식물플랑크톤 대번성(bloom) 동안 관측한 값보다는 작았지만 태평양, 동중국해, 북극해(Arctic Ocean), 리온스만(Gulf of Lions)에서 관측한 값들보다는 높았으며, 북해(North Sea), 라브라도해(Labrador Sea), 바렌츠해(Barents Sea), 척치해(Chukchi Sea)에서 관측한 값들과는 유사하였다(Table 3). 따라서 동해에서의 유기탄소 침강플럭스는 대양에서 관측한 값들보다는 높았고 대륙 주변해에서 관측한 값보다 다소 높거나 유사하였다.

유기탄소 침강플럭스는 연구정점에 따라 매우 큰 차이를 보인다. 최고값을 보이는 정점 A2와 최소값을 보이는 정점 D4 사이에는 무려 36배의 매우 큰 차이를 나타낸다. 정점 A2는 울기에 인접하고 있으며 용승이 일어나는 해역이다. 정점 A2에서 관측한 일차생산력은 1743 $\text{mg C m}^{-2} \text{day}^{-1}$ 로 가장 높은 값을 나타냈으며(Table 3), 엽록소와 유기탄소 농도도 다른 연구정점들에 비해 높게 관측되었다(Figs. 4, 5). 따라서 정점 A2에서 관측한 유기탄소

침강플럭스의 최고값, 506 $\text{mg C m}^{-2} \text{day}^{-1}$ 은 예상 가능한 값으로 별다른 문제가 없어 보인다. 하지만 정점 D4에서 관측한 유기탄소 침강플럭스의 최소값, 14 $\text{mg C m}^{-2} \text{day}^{-1}$ 은 예상 밖에 매우 작은 값으로 문제가 있는 것으로 생각된다. 왜냐하면 정점 D4에서 관측한 일차생산력, 엽록소 농도, 유기탄소 농도는 정점 D2와 큰 차이가 없음에도 불구하고 유기탄소 침강플럭스는 10배 이상의 큰 차이를 나타냈기 때문이다(Table 3). 또한 정점 D5에서 관측한 일차생산력은 정점 D4보다 작음에도 불구하고 유기탄소 침강플럭스는 오히려 정점 D4보다 9배가량 높았다.

정점 D4에서 침강입자의 POC/ $^{234}\text{Th}_p$ 비율은 2.81로 최고값(9.97)에 비해 3.5배 가량 차이를 나타냈으며, 유광대로부터의 ^{234}Th 플럭스는 423 $\text{dpm m}^{-2} \text{day}^{-1}$ 로 최고값(4,233 $\text{dpm m}^{-2} \text{day}^{-1}$)에 비해 10배 차이를 보였다(Table 3). 일반적으로 POC/ $^{234}\text{Th}_p$ 비율이 입자 크기에 따라 큰 차이를 보일 뿐만 아니라 수심에 따라서도 큰 변화를 보이기 때문에(Benitez-Nelson *et al.*, 2001; Moran *et al.*, 2003; Buesseler *et al.*, 2006), 정점 D4에서 POC/ $^{234}\text{Th}_p$ 비율이 최고값에 비해 3.5배 가량 차이 나는 것은 정상적이라 생각된다. 하지만 정점 D4에서 관측한 ^{234}Th 플럭스가 최고값에 비해 10배 차이가 나고 그 밖의 정점들과도 5배 이상의 차이를 보이는 것은 정상적이지 않다고 판단된다. ^{234}Th 플럭스는 유광대내에서 ^{234}Th 와 ^{238}U 활동도 차이로부터 계산하는데, 해수 중에서 ^{234}Th 와 ^{238}U 활동도가 차이를 보이는 것은 ^{238}U 은 부유물질에 전혀 흡착하지 않는 반면, ^{234}Th 은 부유물질에 매우 잘 흡착하여 해수 중에서 제거되기 때문이다. 부유물질 농도가 높은 표층해수(0 - 200 m)에서는 ^{234}Th 와 ^{238}U 활동도 차이가 크게 관측되지만 수심 200 m 이하 심

Table 3. ^{234}Th -derived export flux of organic carbon and export flux/primary production (EF/PP) ratio in other studies

Area	Season	Organic carbon export flux ($\text{mg C m}^{-2} \text{day}^{-1}$)	Average EF/PP ratio	References
Equatorial Pacific	Summer	36 - 72	-	Murray <i>et al.</i> (1996)
North Pacific	Spring	6 - 49	0.10	Benitez-Nelson <i>et al.</i> (2001)
North Atlantic	Spring	240 - 840	-	Buesseler <i>et al.</i> (1992)
North Sea	Summer	60 - 540	0.36	Amiel <i>et al.</i> (2002)
East China Sea	Summer	26 - 67	-	Hung and Gong (2007)
Labrador Sea	Summer	37 - 360	0.20	Moran <i>et al.</i> (2003)
Barents Sea	Summer	84 - 312	-	Coppola <i>et al.</i> (2002)
Chukchi Sea	Summer	10 - 468	0.32	Moran <i>et al.</i> (2005)
Arctic Ocean	Summer	4 - 84	-	Moran <i>et al.</i> (1997)
Gulf of Lions	Spring	11 - 52	0.08	Giuliani <i>et al.</i> (2007)
East Sea	Summer	14 - 506	0.43	This study

층에서는 부유물질 농도가 매우 낮아 ^{234}Th 와 ^{238}U 활동도 차이가 거의 일어나지 않는다. 본 연구에서도 심해역에 위치한 정점 B3, D2, D5의 수심 150-200 m에서 ^{234}Th 와 ^{238}U 활동도 차이는 수심 0-100 m에서 관측된 것보다 매우 작게 나타났다(Fig. 6). 하지만 정점 D4에서는 거의 모든 수심에서 ^{234}Th 와 ^{238}U 활동도 차이가 매우 작게 관측되었다. 정점 D4에서 엽록소와 유기탄소 농도의 수직분포가 다른 정점들에서 관측한 것들과 큰 차이를 나타내지 않는 것으로 보아, ^{234}Th 와 ^{238}U 활동도 차이가 작은 것이 ^{234}Th 이 부유물질에 적게 흡착하였기 때문은 아닌 것으로 생각된다. 본 연구에서 표층플개를 이용하여 표층해류를 관측한 결과, 정점 D4에서 직경이 2 km 가량의 시계방향 와류(anticyclonic eddy)가 발견되었다. 와류가 있는 장소에서는 일반적으로 표층과 심층의 수직혼합이 활발히 일어나기 때문에 심층에서 높은 농도의 ^{234}Th 이 표층에 영향을 주었을 거라고 생각할 수 있으나 심층에서 재생산에 의해 농도가 높아지는 다른 인자 (예를 들면, 질산염; Fig. 3)에도 같은 경향이 보여야 하기 때문에 수직혼합에 의한 ^{234}Th 증가는 예상하기 어렵다. 다른 가능성으로는 침강하는 입자의 POC/ $^{234}\text{Th}_p$ 이 매우 작고 입자상 $^{234}\text{Th}_p$ 농도가 다른 정점들보다 오히려 높은 편이기 때문에 ^{234}Th 이 흡착은 잘 되지만 스케빈징은 잘 안되는 경우가 될 것이다. 이 연구에서 플랑크톤에 관한 조사를 하지는 않았으나 2006년 4월 울릉분지 조사에서 와류가 나타났던 정점들에서 와류 외부 지역에 비하여 크기가 아주 작은 식물플랑크톤이 많이 존재하였고 와류 외부해역에서는 크기가 비교적 큰 식물 플랑크톤이 많이 존재하였다(김 등, 2007). 따라서 와류와 관련된 플랑크톤의 변화에 의해 ^{234}Th 의 스케빈징이 변화한 것으로 판단된다. 그러나 2005년 7월 조사에서는 와류 내·외부에서 작은 식물플랑크톤이 차지하는 비율의 차이가 없었기에(김 등, 2007) 플랑크톤의 종류 차이에 의한 스케빈징 변화에 대해서는 추가적인 연구가 필요하다.

유기탄소 침강플럭스는 유광대에서의 일차생산력과 매우 좋은 상관관계를 나타내지만, 표층에서 수심 100 m 사이에 존재하는 엽록소와 유기탄소의 총량은 그다지 좋은 상관관계를 보이지 않는다(Fig. 7). 따라서 유기탄소 침강플럭스는 표층해수의 엽록소와 유기탄소 농도보다는 일차생산력에 의해 더 큰 영향을 받는 것으로 판단된다. 왜냐하면 엽록소와 유기탄소의 총량은 침강하고 남은 것을 나타내고 입자상 유기탄소 침강플럭스는 일차생산력에 직접적으로 관련되기 때문이다. 각 연구정점에서 계산한 유기탄소 침강플럭스/일차생산력 비율은 0.04-0.62의 범위를 보였으며, 최고값은 정점 D5에서 관측되었고 최소값은 정점 D4에서 관측되었다(Table 2). 앞에서 언급한 바와 같이 정점 D4에서 관측한 유기탄소 침강플럭스는 와류에 의한 생물 종류 변화로 과소평가(underestimate)되었기 때문에 이 정점에서 관측한 값을 제외하면, 침강플럭스/일차생산력 비율은 0.29-0.62의 범위를 보였고 평균비율은 0.43이었으며, 연안역에 비해 심해역에서 다소 높은 비율을 나타냈다(Table 2). 침강플럭스/일차생산력 비율이 0.43이라는 것은 유광대에서 식물플랑크톤에 의해 생성된 유기탄소 가운데 43%가 수심 200 m 이하 심해로 침강하고 나머지 57%는 수심 0-200 m에서 분해되어 재순환한다는 것을 의미한다. 본 연구에서 관측한 침강플럭스/일차생산력 비율은 북해(North Sea)와 척키해(Chukchi Sea)에서 관측한 값들과는 유사하였지만, 라브라도해(Labrador Sea), 바렌

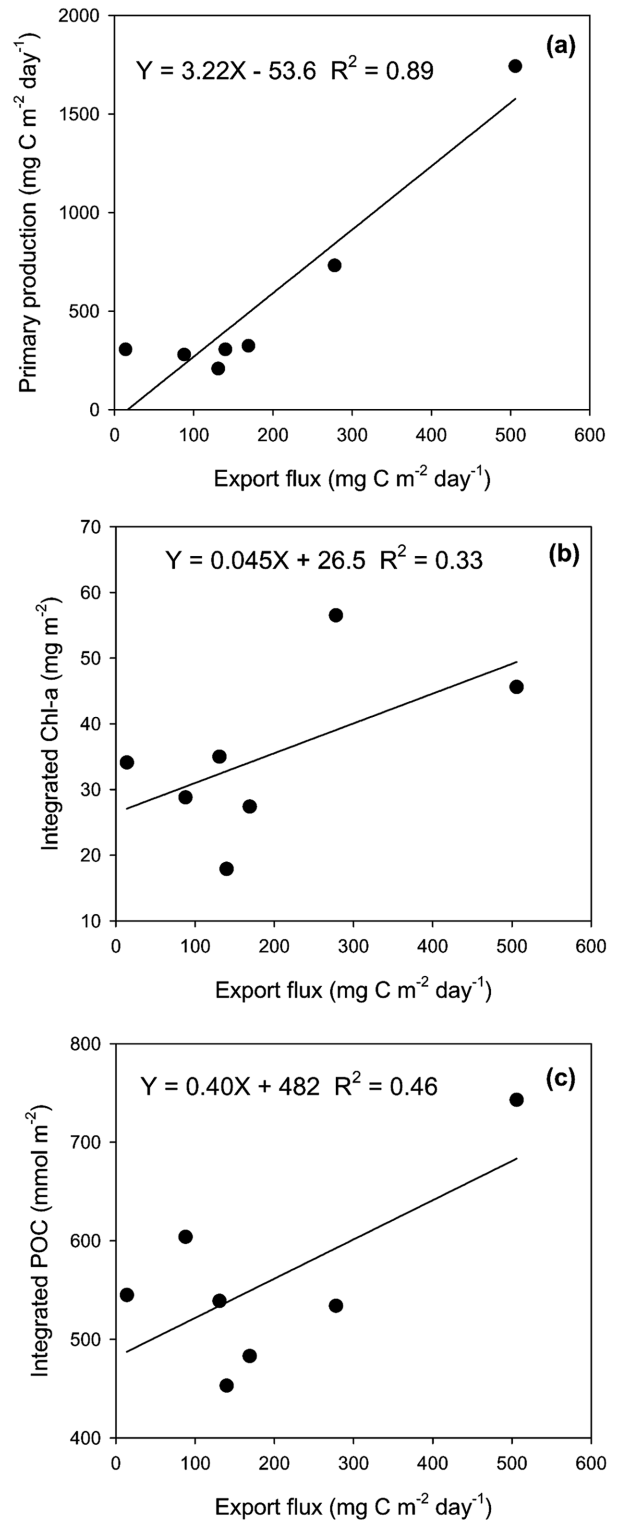


Fig. 7. Plots of export flux of organic carbon vs. primary production (a), depth-integrated chlorophyll (b), and depth-integrated POC (c).

츠해(Barents Sea), 리온스만(Gulf of Lions)에서 관측한 값들보다는 월등히 높았다(Table 3). 따라서 동해는 전세계 해역에서 유광대에서 생성된 유기탄소가 수심 200 m 이하 심층으로 가장 많이 침강하는 해역들 가운데 하나라고 생각된다.

감사의 글

본 연구에 많은 도움을 주신 연구선 이어도호 선생님과 승조원 여러분께 감사드립니다. 또한 현장조사에 많은 도움을 주신 한국해양연구원 이태희, 신창용, 양은진, 최동한 박사님께도 진심으로 감사드립니다. 본 연구는 한국해양연구원의 일반사업인 '동해 생태계 장기 변화 예측 연구(PE98030)'의 일환으로 수행되었습니다. 논문의 심사를 맡아주신 서울대 김규범 교수님과 또 한분의 심사위원 그리고 주관 편집 위원께 감사드립니다.

참고문헌

- 김동선, 김경희, 심정희, 유신재, 2007. 동해 울릉분지에서 봄과 여름동안 시계방향 와류가 영양염과 엽록소에 미치는 영향. *The SeaJ. Kor. Soc. Ocean.*, **12**(4): 280–286.
- 한국해양연구원, 2003. 동해 기후변동 예측 연구. 한국해양연구원 연구보고서, BSPE 825-00-1495-3.
- Amiel, D., J.K. Cochran and D.J. Hirschberg, 2002. $^{234}\text{Th}/^{238}\text{U}$ disequilibrium as an indicator of the seasonal export flux of particulate organic carbon in the North Water. *Deep-Sea Res. II*, **49**: 5191–5209.
- Babin, M., A. Morel and R. Gagnon, 1994. An incubator designed for extensive and sensitive measurements of phytoplankton photosynthetic parameters. *Limnol. Oceanogr.*, **39**: 694–702.
- Benitez-Nelson, C., K.O. Buesseler, D. Karl, J. Andrews, 2001. A time-series study of particular matter export in the North Pacific subtropical gyre based upon $^{234}\text{Th}/^{238}\text{U}$ disequilibrium. *Deep-Sea Res.*, **48**: 2595–2611.
- Buesseler, K.O., 1991. Do upper ocean sediment traps provide an accurate record of particle flux? *Nature*, **353**: 420–423.
- Buesseler, K.O., M.P. Bacon, J.K. Cochran and H.D. Livingston, 1992. Carbon and nitrogen export during the JGOFS North Atlantic Bloom Experiment estimated from $^{234}\text{Th}/^{238}\text{U}$ disequilibria. *Deep-Sea Res. I*, **39**: 1115–1137.
- Buesseler, K.O., C.R. Benitez-Nelson, S.B. Moran, A. Burd, M. Charette, J.K. Cochran, L. Coppola, N.S. Fisher, S.W. Fowler, W.D. Gardner, L.D. Guo, O. Gustafsson, C. Lamborg, P. Masque, J.C. Miquel, U. Passow, P.H. Santschi, N. Savoye, G. Stewart and T. Trull, 2006. An assessment of particulate organic carbon to thorium-234 ratios in the ocean and their impact on the application of ^{234}Th as a POC flux proxy. *Mar. Chem.*, **100**: 213–233.
- Charette, M.A. and S.B. Moran, 1999. Rates of particle scavenging and particulate organic carbon export estimated using ^{234}Th as a tracer in the subtropical and equatorial Atlantic Ocean. *Deep-Sea Res. II*, **46**: 885–906.
- Chen J.H., Edwards, G.J., Wasserburg, G.J., 1986. ^{238}U , ^{234}U and ^{232}Th in seawater. *Earth Planet Sci. Lett.*, **80**: 241–251
- Cochran, J.K. and P. Masqué, 2003. Short-lived U/Th series radionuclides in the ocean: tracers for scavenging rates, export fluxes and particle dynamics. Chap. 11. In "Uranium-Series Geochemistry" eds. by Bourdon, B., G.M. Henderson, C.C. Lundstrom, and S.P. Turner. *Reviews in Mineralogy & Geochemistry* vol. 52. *Geochem. Soc. and Mineral. Soc. America*. pp 656.
- Coppola, L., M. Roy-Barman, P. Wassmann, S. Mulrow and C. Jean-del, 2002. Calibration of sediment traps and particulate organic carbon export using ^{234}Th in the Barents Sea. *Mar. Chem.*, **80**: 11–26.
- Giuliani, S., O. Radakovitch, M. Frignai and L.G. Bellucci, 2007. Short time scale variations of $^{234}\text{Th}/^{238}\text{U}$ disequilibrium related to mesoscale variability on the continental slope of the Gulf of Lions (France). *Mar. Chem.*, **106**: 403–418.
- Hahn, D. and K.-R. Kim, 2001. An estimation of the new production in the southern East Sea using helium isotopes. *J. Korean Soc. Oceanogr.*, **36**: 19–26.
- Hahn, D. and K.-R. Kim, 2008. Observation of bottom water renewal and export production in the Japan Basin, East Sea using tritium and helium isotopes. *Ocean Sci. J.*, **43**: 39–48.
- Hung, C.-C., L.D. Guo, K.A. Roberts and P.H. Santschi, 2004. Upper ocean carbon export flux determined by size fractionated ^{234}Th data and sediment traps in the Gulf of Mexico. *Geochem. J.*, **38**: 601–611.
- Kang, D.J., K. Kim and K.-R. Kim, 2004. The past, present and future of the East/Japan Sea in change: A simple moving boundary box model approach. *Prog. Oceanogr.*, **61**: 175–191.
- Moon, D.-S., Kim, K.H. and Noh, I., 2000. The vertical fluxes of particles and radionuclides in the East Sea. *J. Kor. Soc. Oceanogr.*, **35**(1): 16–33.
- Moran, S.B., K.M. Ellis and J.N. Smith, 1997. Th-234/U-238 disequilibrium in the central Arctic Ocean: implications for particulate organic carbon export. *Deep-Sea Res. II*, **44**: 1593–1606.
- Moran, S.B., S.E. Weinstein, H.N. Edmonds, J.N. Smith, R.P. Kelly and M.E.Q. Pilson, 2003. Does $^{234}\text{Th}/^{238}\text{U}$ disequilibrium provide an accurate record of the export flux of particulate organic carbon from the upper ocean? *Limnol. Oceanogr.*, **48**: 1018–1029.
- Moran, S.B., R.P. Kelly, K. Hagstrom, J.N. Smith, J.M. Grebmeier, L.W. Cooper, G.F. Cota, J.J. Walsh, N.R. Bates, D.A. Hansell, W. Maslowski, R.P. Nelson and S. Mulrow, 2005. Seasonal changes in POC export flux in the Chukchi Sea and implications for water column-benthic coupling in Arctic shelves. *Deep-Sea Res. II*, **52**: 3427–3451.
- Murray, J.W., J. Young, J. Newton, J. Dunne, T. Chapin, B. Paul and McCarthy, 1996. Export flux of particulate organic carbon from the central equatorial Pacific determined using a combined drifting trap- ^{234}Th approach. *Deep-Sea Res.*, **43**: 1095–1132.
- Park, G.-H., K. Lee, P. Tishchenko, D.H. Min, M.J. Warner, L.D. Telly, D.J. Kang and K.-R. Kim, 2006. Large accumulation of anthropogenic CO₂ in the East (Japan) Sea and its significant impact on carbonate chemistry. *Global Biogeochem. Cycles*, **20**, doi: 10.1029/2005GB002676.
- Platt, T., C. Gallegos and W. G. Harrison, 1980. Photoinhibition of photosynthesis in natural assemblages of marine phytoplankton. *J. Mar. Res.*, **38**: 687–701.

2008년 7월 14일 원고접수

2008년 11월 27일 수정본 채택

담당편집위원: 강동진