

Review

동해 방사성탄소동위원소 연구 현황과 전망

김민경*

경북대학교 자연과학대학 지구시스템과학부
(41566) 대구광역시 북구 대학로 80

Current Status and Prospects Regarding Radiocarbon Studies in the East Sea

Minkyong Kim *

*School of Earth System Sciences, College of Natural Sciences, Kyungpook National University,
Daegu 41566, Korea*

Abstract : Together with the development of measurement techniques, radiocarbon (^{14}C) has been increasingly used as a key tool to investigate carbon cycling and associated biogeochemistry in the ocean. In this paper, the current status of radiocarbon studies in the East Sea (Japan Sea) is reviewed. Previously, spatiotemporal distribution and change of the water masses in the East Sea from 1979 to 1999 were investigated by using the ^{14}C in the dissolved inorganic carbon (DIC). Researches on sinking particulate organic carbon (POC) revealed that POC in the deep ocean has more complex and heterogeneous origins than we expected. In particular, since 2011, Korean researchers have been collecting sinking particle samples for more than 10 years, so it is expected that ^{14}C of POC will provide important information to understand carbon cycling in relation to climate change. Although the quantity of ^{14}C data published in the East Sea is still limited, the importance and the future direction of using ^{14}C to understand the biogeochemical mechanisms of carbon cycling and its role as a carbon reservoir in the East Sea are detailed herein.

Key words : radiocarbon, sinking POC (particulate organic carbon), DIC (dissolved inorganic carbon), carbon cycling, East Sea

1. 서 론

탄소는 유기물을 구성하는 핵심 원소들 중 하나이자 대기 중 온실기체의 주요 구성 원소로, 탄소의 동위원소를 활용한 연구는 해양 탄소 순환을 이해하는 데 있어 중요한 정보를 제공한다. 탄소의 동위원소들 중, 방사성탄소동위원소(^{14}C)는 성층권과 대류권 상부에서 우주선(cosmic ray)에 의해 생성된 열 중성자(thermal neutron)와 대기 중 ^{14}N 이 핵반응을 일으켜 생성되며, 약 5730년의 반감기를 거쳐 자연 방사성 붕괴를 한다(Craig 1957). 대개 ^{14}C 값은 $\delta^{14}\text{C}$ 나 Fm (Fraction modern)으로 표기되며, 이는 동위원

소의 질량 차이로 인하여 자연적으로 발생하는 분별 작용(fractionation)의 영향을 제거한 값이기 때문에, 반감기에 따른 시간에 대한 정보를 제공하는 값으로 활용이 가능하다(Stuiver and Polach 1977). 해양에 존재하는 탄소는 그 기원에 따라 다양한 ^{14}C 값을 가지기 때문에, 이를 통해 탄소의 이동 및 퇴적 기작을 파악하고, 시공간적 변화와 성질을 이해할 수 있다(McNichol and Aluwihare 2007).

이렇듯 중요한 정보를 제공하는 화학적 추적자임에도 불구하고, 분석 방법과 비용 등의 제한으로 ^{14}C 를 활용한 연구는 전 세계적으로 많지 않은 실정이다. 동해에서는 한국과 일본의 연구진들이 용존무기탄소(Dissolved Inorganic Carbon, DIC)와 입상유기탄소(Particulate Organic

*Corresponding author. E-mail: minkyong@knu.ac.kr

Carbon, POC)에서 ^{14}C 를 활용한 연구를 산발적으로 진행해 왔으나 분지 단위에서 제한적 개수의 시료를 분석한 연구가 대부분으로, 동해 전체를 이해하기에는 어려움이 있다. 본 논문에서는 그 동안 동해에서 진행되어 온 ^{14}C 연구 결과들을 소개하고, 향후 나아가야 할 방향에 관하여 설명하였다. 이를 통해 동해의 다양한 생지화학적 기작을 연구하는 국내 학자와 학생들이 ^{14}C 값을 연구에 접목시키고, 활용할 수 있기를 기대한다.

2. ^{14}C 값의 활용과 동해 연구 현황

^{14}C 분포와 분석법의 발달

대류권 상부에서 생성된 ^{14}C 는 산소(O_2)와 반응하여 $^{14}\text{CO}_2$ 를 형성한다. 표층 해수에 존재하는 ^{14}C 는 주로 대기와 해양 사이의 물리적(예; 해수로의 용해), 생물학적(예; 식물플랑크톤의 광합성) 교환에 의한 값이며, 표층에 있던 수괴(water mass)가 해양 표층을 떠나면 ^{14}C 의 공급원인 대기와의 탄소 교환은 단절된다. 반면 방사성 붕괴는 지속됨으로써, 수괴 중 ^{14}C 의 농도를 통해 수괴의 나이나 이동 경로를 추적할 수 있다.

대기 중 ^{14}C 의 농도는 자연적 생성 외에도 인간 활동에 의한 두 가지 특이한 분포(signal)를 보인다. 첫번째로, 20세기 중반 핵실험의 결과로 인해 대기 중 ^{14}C 는 “bomb-spike”라고 불리는 모양을 보이며 그 농도가 급격히 증가하였다가, 1963년 핵실험을 금지하는 부분적 핵실험금지조약(Partial Test Ban Treaty, PTBT) 이후, 차츰 원래의 값으로 회복되고 있다(Fig. 1, Levin and Heshshaimer 2000; Schuur et al. 2016). 한편 1800년대 산업혁명 이후, 오랜 세월 동안 여러 차례의 반감기를 거쳐 ^{14}C 가 모두 붕괴된(dead-carbon) 화석 연료의 연소로 배출되는 CO_2 로 인해 대기 중의 ^{14}C 값은 점점 줄어들고 있는데, 이를 “Suess Effect”라고 부른다(Graven 2015). 한 예로 1890년에서 1950년 사이 북미 태평양 연안에 서식하는 나무의 나이테에서 ^{14}C 가 약 20% 감소하였고, 이 중 약 17%이 화석 연료의 사용으로 인한 CO_2 것으로 추정되었다(Stuiver and Quay 1981). 대기 중 ^{14}C 는 보다 안정적인 탄소 저장고인 해양으로 천천히 유입되어, 해양에서도 대기 중 ^{14}C 값과 비슷한 모양을 가진 완만한 그래프를 나타낸다(Fig. 1).

1960년 Libby 박사가 ^{14}C 연대 측정기술을 개발한 공로로(Libby 1946, 1955) 노벨 화학상을 수상한 이후, 꾸준히 분석 기술이 발달되어 왔다. 초창기 ^{14}C 측정 방법은 이산화탄소로 변환한 시료의 ^{14}C 가 ^{15}N 으로 베타 붕괴하며 방출하는 전자를 측정하는 것으로, 1 g 이상의 탄소가 필요하고 수일에서 수주 이상의 긴 측정 시간이 소요되었다(Arnold and Libby 1949; Polach 1992). 예를 들어, DIC의 $\Delta^{14}\text{C}$ (지금부터 DI^{14}C 로 기술)를 분석하기 위해서는 해

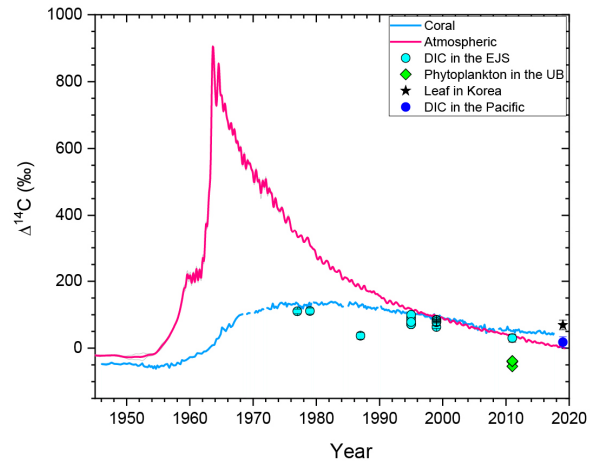


Fig. 1. History of radiocarbon levels in atmospheric CO_2 (red line, Hua et al. 2021) and coral records (Blue line, Wu et al. 2021). Symbols indicates measured ^{14}C values in various samples in the East Sea and surface water DIC from nearby Pacific (Ge et al. 2022). EJS and UB indicates East (Japan) Sea and Ulleung Basin, respectively

수 약 200 L가 필요했다(Broecker et al. 1960). 이후 1977년 가속질량분석기(Accelerator Mass Spectrometer, AMS)를 분석에 활용하여 ^{14}C 의 붕괴를 기다리지 않고도 시료에서 ^{14}C 의 수를 측정할 수 있게 되면서 필요한 시료량(약 1 mg)과 측정 시간(1시간 미만)이 대폭 줄어들었다(Bennett et al. 1977; Nelson et al. 1977; Santos et al. 2007). 최근에는 MICADAS (Mini Carbon Dating Systems; <https://www.ionplus.ch/micadas>) AMS로 ^{14}C 분석의 새로운 국면을 맞이하고 있다(Welte et al. 2018; Blattmann et al. 2018a). 약 100 μg 의 탄소로도 분석이 가능해졌으며, 원소 분석기(Elemental Analyzer) 등을 부착하여 이산화탄소 기체를 바로 이온화시키는 등 전처리와 분석 과정 또한 빠르고 간편해졌다(Synal et al. 2007; Wacker et al. 2010, 2013; McIntyre et al. 2017).

용존무기탄소의 ^{14}C

전 세계적으로 해양에는 약 39,000 Gt의 탄소가 저장되어 있고, 이 중 95% 정도가 DIC 형태로 존재한다(Key et al. 2004; Schuur et al. 2016). DI^{14}C 값은 해양 수괴 순환이나 대기-해양 간의 탄소 교환 등 전지구적 탄소 순환에 있어 해양의 역할을 이해하는 데 유용한 정보를 제공하는 추적자로 다양하게 활용되고 있다(Graven 2015; Ge et al. 2016, 2022; Ding et al. 2018; Toggweiler et al. 2019).

동해에서는 1980년대 심층 해수 순환 연구의 일환으로 일본 연구진을 중심으로 DI^{14}C 연구가 수행되어 왔다(Figs. 2 and 3). Gamo and Horibe (1983)는 동해 전역의

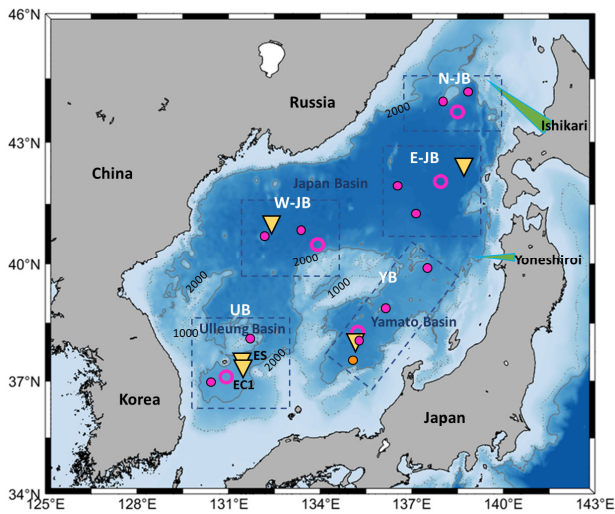


Fig. 2. Map of the East Sea and sampling stations of sinking particles (reversed triangle; Stations EC1 and ES) and DIC (open circle = Sim et al. 2014, closed circle = part of stations from Gamo and Horibe 1983, Kumamoto et al. 1998, 2008, Aramaki et al. 2007, 2013). UB, YB, W-JB, E-JB, and N-JB indicates Ulleung Basin, Yamato Basin, Western-Japan Basin, Eastern-Japan Basin, and Northern Japan Basin respectively

4개 정점에서 해양 표층과 심층수 1-3개 수심의 DI^{14}C 값을 제시하였으며, 일본분지와 야마토분지를 중심으로 한 Kumamoto et al. (1998, 2008)의 연구, 그리고 Aramaki et al. (2007)의 연구가 수행되었다(Fig. 1, Table 1). 이후 Sim et al. (2014)이 1999년 여름 CREAMS (Circulation Research of the East Asian Marginal Seas) 조사에서 획득한 동해 전역의 5개 정점에서 DI^{14}C 수직분포 자료를 얻었으며, 2001년 Aramaki et al. (2013)이 일본분지와 울릉분지를 지나는 7개 정점에서 DI^{14}C 값을 분석하였다.

Sim et al. (2014)은 1999년 각 분지의 DI^{14}C 수직분포를 이전의 연구 결과와 비교하였다(Fig. 3). 저자들은 1979년에 비해 1999년 일본분지 DI^{14}C 는 표층수(Surface Water)에서 약 50% 감소, 중앙수(Central Water)와 저층수(Bottom Water)에서는 80-100% 증가한 반면(Gamo and Horibe 1983; Kumamoto et al. 2008; Sim et al. 2014), 야마토분지의 표층수 DI^{14}C 는 1987년에 비해 약 10% 증가했고(Sim et al. 2014의 Fig. 4), 저층수에서는 거의 비슷함을 밝혔다(-68%; Gamo and Horibe 1983, Sim et al. 2014). 울릉분지에서는 Sim et al. (2014)과 Aramaki et al. (2013)의 시료 채수 시기가 비슷하여 수직분포의 차이를 볼 수 없었다(Fig. 3). 나아가 Sim et al. (2014)은 일본분

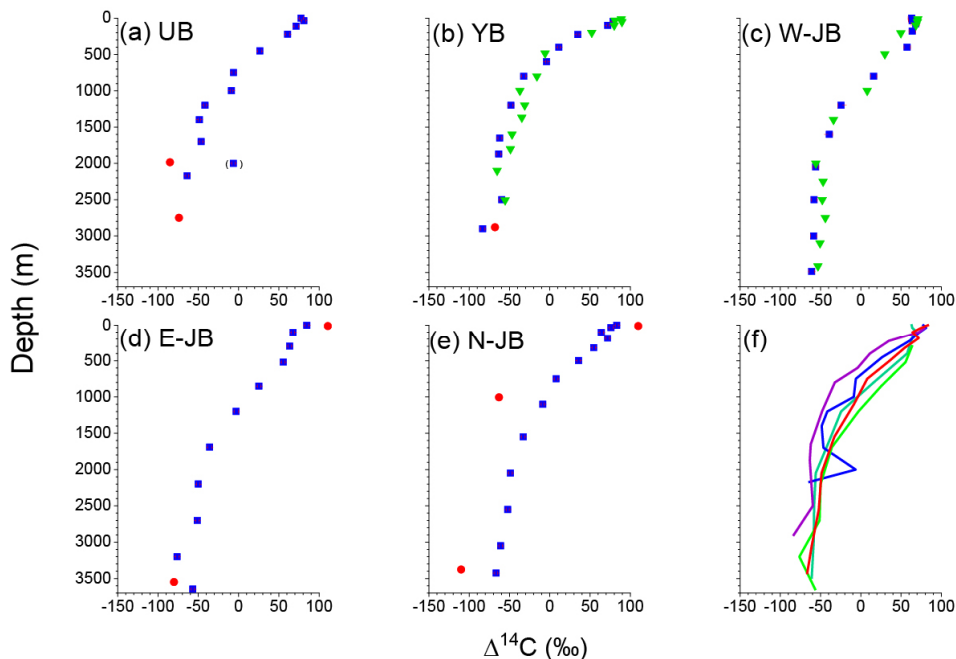


Fig. 3. Vertical profiles of DI^{14}C in the major basins in the East Sea (a-e). DI^{14}C in 1977/1979 (circle; Gamo and Horibe 1983), 1995 (reversed triangle; Kumamoto et al. 2008), and 1999 (square; Sim et al. 2014). DI^{14}C in 1999 at all basins are shown in (f) with different colors from red to purple based on the deep water circulation (red: N-JB, green: W-JB, E-JB, blue: UB, and purple: YB). Redrawn from Sim et al. 2014. UB, YB, W-JB, E-JB, and N-JB indicates Ulleung Basin, Yamato Basin, Western-Japan Basin, Eastern-Japan Basin, and Northern Japan Basin respectively

Table 1. Radiocarbon values measured in various ocean-related samples with region, year, sampling depth, and range of ^{14}C with original references. Latitude and Longitude information for more than one station are not shown. UB, W-JB, E-JB, and YB indicates Ulleung Basin, Western-Japan Basin, Eastern-Japan Basin, and Yamato Basin respectively

Samples	Region	Lat. (°N)	Long. (°E)	Year	$\Delta^{14}\text{C}$ (‰)	Trap/water depth (m)	References
Aerosols	Anmyeondo			2014–2016	-59–23	46 m above sea level	Lee et al. 2020a
	Hokkaido University, Japan			Mar.–Apr. 2001	-100–123	35 m height	Kawamura et al. 2010
	Gyeongju City, Korea			2019	60–86	ND	Lee et al. 2020b
Lake DIC	Lake Biwa, Japan			1995, 1996	-16–98	Whole water column	Nakamura et al. 1997
Phytoplankton	UB			2011	-43±8 (n = 4)	Surface	Kim et al. 2017
Sinking POC	W-JB	41.24	132.35	2000–2002	-13±18 -71±29	927 2746/3424	Otosaka et al. 2008
	E-JB	42.47	138.50	2000–2001	-21±20 -103±21	1057 3043/3642	Otosaka et al. 2008
	YB	38.02	135.03	2000–2001	-3±28 -18±27	1175 2100/2900	Otosaka et al. 2008
	UB (ES)	37.63	131.36	2011–2017	-5.7±29 -20±22 -48±24	300 1000 2000/2370	Kim et al. 2017, 2020b
Ocean Sediment	UB			2011, 2014	-127±21 (n = 3)	core-top	Kim et al. 2017, 2020b
	UB shelf, slope, strait			2011, 2014	-108±13 (n = 4)	core-top	Kim et al. 2017, 2020b
	W-JB			2000/02	-375±3	core-top	Otosaka et al. 2008
	E-JB			2000/02	-173±4	core-top	Otosaka et al. 2008
	YB					ND	
River sediment	6 major rivers in Japan			2000/02	-89±14 (n = 6)	River mouth	Otosaka et al. 2008, unpublished
DIC	East Sea			1977, 1979	-110–111	Deep water	Gamo and Horibe 1983
	JB	40	138	Jun. 1987	-66–37	Whole water column	Tsunogai et al. 1993
	JB, YB			Nov.–Dec. 1995	-49±4, -60±7	Whole water column	Kumamoto et al. 1998
	JB			July 2002	-65±5	Whole water column	Aramaki et al. 2007
	JB, YB			1995, 2000	-65–106	Whole water column	Kumamoto et al. 2008
	JB, UB			April. 2001	-63–100	Whole water column	Aramaki et al. 2013
	East Sea			1999	-83–84	Whole water column	Sim et al. 2014
Ground water	UB	37	131	2011	30±12 (n = 7)	0–300 m	Kim et al. 2017
	Northeast Japan			ND	-42–219	15–31 m	Takahashi et al. 2013

*ND = no data

지, 울릉분지, 그리고 야마토분지로의 해수 순환에 따라 DI^{14}C 가 감소함을 제시하였다(Fig. 3f; Sim et al. 2014).

DI^{14}C 자료가 존재하는 20년(1979–1999년) 동안, Sim et al. (2014)은 동해 표층수의 DI^{14}C 가 연간 약 2%씩 감소하는 양상을 보이며, 이는 핵실험 금지 이후 대기 중 ^{14}C 의 감소(Fig. 1)를 반영한다고 해석하였다. 연간 인간 활동

에 의한 CO_2 의 약 30–40%가 해양으로 흡수되는 것으로 알려져 있다(Tsunogai 2000; Gruber et al. 2009). Bomb-spike의 유입으로 인한 높은 DI^{14}C 값은 태평양에서 최소 1000 m 수심까지 나타났고, 이를 활용하여 대기과 해양의 CO_2 교환 양상 및 수온 약층 순환을 이해하는 연구가 진행되기도 하였다(Druffel et al. 2008; Key et al. 2004; Ku-

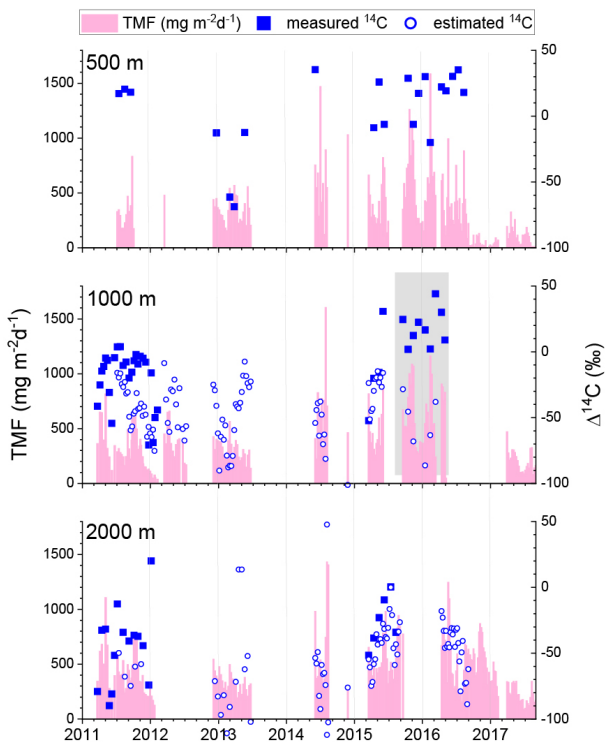


Fig. 4. The total mass flux (TMF; bar graph) and $\Delta^{14}\text{C}$ of POC at the three sampling depths (redrawn from Kim et al. 2017, 2020b). No bar indicates no data, and data from two sites (St. EC1 and ES) in 2011–2012 are shown together. Closed symbols are measured PO^{14}C and open symbols are estimated PO^{14}C values based on the equation in Fig. 6. Shaded area at 1000 m indicates where the measured and estimated PO^{14}C values are not matched well.

mamoto et al. 2013). 동해에서도 지속적인 시계열 DI^{14}C 분석을 통해 이산화탄소 흡수 능력을 규명할 수 있는 기초 자료를 제공할 수 있을 것으로 기대한다.

한편 같은 기간 동해 중앙수에서는 연간 약 3.3%씩 DI^{14}C 값이 증가한데 비해 심층수와 저층수의 DI^{14}C 는 증가하다가 1995년 이후 일정했는데, 저자들은 이를 표층에서 중앙수로의 표층수 공급은 강화되고, 저층수의 생성은 약화된 것으로 설명하였다(Kang et al. 2003; Aramaki et al. 2007; Kumamoto et al. 2008; Sim et al. 2014). 하지만 2000년대 이후, 해양 표층으로부터 용존산소(Dissolved Oxygen, DO) 공급이 동해 중앙수에서는 감소하고, 저층수에서는 증가하는 등의 새로운 관측 결과(Yoon et al. 2018)가 제시되었고, 이에 따라 동해 심층수 순환 규명에 도움을 줄 수 있는 화학적 추적자 연구가 필요한 실정이다. DI^{14}C 값은 화학적 추적자로서 다양한 해역에서 수괴의 이동 및 혼합을 연구하는 데 사용되고 있지만(Broecker et al. 1960; Craig 1969), 동해의 심층 해수 순환 규모는

100년 정도로 대양에 비해 짧기 때문에 반감기가 5730년 인 DI^{14}C 만을 활용하여 해수 순환 양상을 이해하기는 다소 난해할 수 있다. 반감기가 비교적 짧은 동위원소와 다양한 추적자(CFCs, ^3H , ^3He 등; Touratier et al. 2007)를 활용하고, 모델 연구를 접목하는 등(DeVries and Primeau 2011; Khatiwala et al. 2012)의 접근 또한 제안해 본다.

침강입자유기탄소의 ^{14}C

해수 표층의 유광대에서 식물플랑크톤의 일차 생산을 통해 DIC가 POC의 형태로 변환되고, 생물학적 탄소 펌프(Biological Carbon Pump, BCP) 기작을 통해 침강하는 탄소는 대기와의 교환이 어려운 심해나 해저면으로 이동, 격리된다(Volk and Hoffert 1985). 퇴적물 트랩(sediment trap)은 이렇게 침강하는 입자를 직접적으로 채취하는 도구로 널리 활용되고 있다(Honjo et al. 2008). 동해를 비롯한 세계 여러 해역에서 중장기적 퇴적물 트랩 연구가 진행되고 있지만 침강입자의 ^{14}C 를 분석한 연구는 제한적으로 수행되어 왔다. 하지만 최근 해양 심층수로 침강하는 유기탄소가 시공간적으로 다양한 기원을 가지고 있다는 것이 밝혀지면서 ^{14}C 를 활용한 연구의 중요성이 대두되고 있다(Druffel and Williams 1990; Eglinton et al. 2002; Hwang et al. 2010; Blattmann et al. 2018b; Kim et al. 2020a, 2020b).

동해 울릉분지에서는 1994–1996년, 그리고 2000년 초반 퇴적물 트랩 연구가 산발적으로 진행된 이후(Hong et al. 2008), 2011년부터 현재까지 약 10여 년 간 꾸준히 퇴적물 트랩을 계류 중이다(Fig. 1; Kim et al. 2017, 2020b). EC1 정점(37.33°N, 131.45°E, 수심 2300 m 트랩 1040 m, 2280 m)에서 2011–2012년, 그리고 ES 정점(ES (37.63°N, 131.36°E; 수심 2370 m, 트랩 1000 m, 2000 m)에서는 2011년 이후 침강입자 시료를 획득하고 있으며, 2017년까지 자료를 바탕으로 중장기적 연속 시계열 변동을 해석하고 그중 일부 시료에서 PO^{14}C 값을 분석하였다(Figs. 1 and 4; Kim et al. 2017, 2020a). 일본분지의 2개 정점과 야마토분지 1개 정점에서도 각각 2년(2000–2002년), 1년(2000–2001년) 동안 침강 입자의 양과 조성에 관한 연구가 진행되었으나, 그 이후로는 시료 채취가 지속되지 않았다(Fig. 1; Otosaka et al. 2004, 2008).

동해 전역에서 1000 m 수심의 POC 양은 일차 생산성의 2–5%에 달하며, 봄과 가을의 대변성 등 그 연간 변화를 반영하였다(Kim et al. 2017). 해수 표층에서 일차 생산을 통해 생성된 POC의 형성 기작 및 침강 속도를 고려한다면(Honjo et al. 1982; Berelson 2002), 침강 PO^{14}C 는 표층의 단성분(end-member; 표층수의 DI^{14}C 나 표층 부유입자, 또는 표층 식물플랑크톤의 PO^{14}C 값)을 반영해야 한다. 2011년 8월 울릉분지 연구항해에서 획득한 표층수의 단성분은 이 해역의 복잡한 생지화학적 순환을 시사하였다

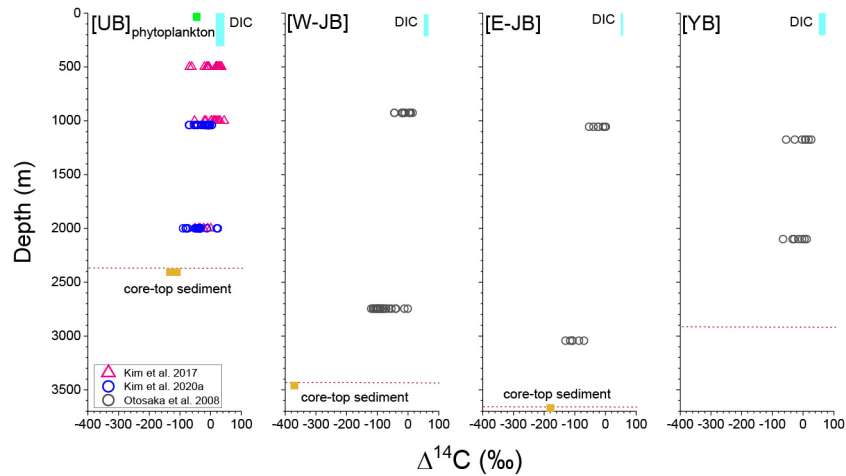


Fig. 5. Vertical change of $\Delta^{14}\text{C}$ of POC in the major basins in the East Sea (redrawn from Otosaka et al. 2008). Horizontal dotted lines indicate water depth. Data is from Kim et al. (2017, 2020b) for UB and Otosaka et al. (2008) for other basins. UB, W-JB, E-JB, and YB indicates Ulleung Basin, Western-Japan Basin, Eastern-Japan Basin, and Yamato Basin respectively

(Kim et al. 2017). 표층수에서 식물플랑크톤 네트(직경 30 cm, 그물 크기 20 μm)로 획득한 식물플랑크톤의 $\Delta^{14}\text{C}$ 값 ($-43 \pm 8\%$)은 동일한 시기에 채취한 표층수의 DI^{14}C 값 ($+30 \pm 12\%$)보다 훨씬 낮았다(Fig. 5; Table 1). 반면, 1000 m 수심의 PO^{14}C 값의 대부분은 ($-20 \pm 22\%$) 표층 식물플랑크톤의 PO^{14}C 보다 높았다. 이는 일차 생산으로 만들어진 PO^{14}C 외에도 오래된 PO^{14}C 가 표층수에 공급되었음을 뜻하는데, 저자들은 그 잠재적인 기원을 하천의 부유 입자 또는 대기 중에서 공급되는 POC 등으로 추정했다(Kawamura et al. 2010; Kim et al. 2017).

깊은 수심(> 2000 m)에서 PO^{14}C 값은 울릉분지, 일본분지의 서쪽과 동쪽, 그리고 야마토분지에서 각각 평균 -48% , -71% , -103% , 그리고 -18% 였는데, 저자들은 이러한 분지 별 차이는 표층 퇴적물의 연대 차이에서 기인하는 것으로 해석하였다(Fig. 5; Otosaka et al. 2008, Kim et al. 2017). 오래된 POC는 비생물학적 입자(Lithogenic material, LM)와 결합되어 재부유나 수평적 이동 과정을 통해 해양 저층에 존재하는 것으로 알려져 있다(Taylor and McLennan 1985; Hwang et al. 2010; Kim et al. 2020a, 2020b). 동해는 깊은 수심의 분지가 있는 해역임에도 불구하고, 침강입자 중 비생물학적 입자의 비율이 울릉분지의 1000 m와 2300 m에서 각각 34%, 50%, 일본분지 서쪽의 927 m, 2746 m에서 34%, 46%, 일본분지 동쪽의 1057 m, 3043 m에서 25%, 43%, 그리고 야마토분지의 1175 m, 2100 m 수심에서 33%, 44% 로, 전지구 평균(약 25%)보다 높았다(Otosaka et al. 2008; Kim et al. 2017, 2020b).

이전에 Hwang et al. (2010)은 침강 입자의 PO^{14}C 값이 해양 저층 퇴적물을 대표할 수 있는 알루미늄 농도($\text{Al}\%$)

와 음의 상관관계를 보임을 제시하였는데, 이 관계는 오래된 POC의 주요 기원이 재부유 퇴적물과 관련이 있음을 의미한다(Sherrell et al. 1998; Honda et al. 2000; Hwang et al. 2010; Kim et al. 2020a). 최근 Kim et al. (2020a)은 침강입자 중 비생물기원 입자와 POC의 비율(=LM/POC)을 활용하여, 해역별로 LM/POC와 입자유기탄소의 PO^{14}C 가 직선형의 상관 관계를 보임을 확인하였다. LM/POC 값이 있다면, 관계식을 통해 PO^{14}C 값의 대략적 유추가 가능하다. 동해의 경우, 심층(> 500 m)에서 LM/POC와 침강입자의 PO^{14}C 가 상관 관계($y = -8.38x + 13.5$, $R^2 = 0.55$)를 보였다(Fig. 6). LM/POC 값과 식을 통해 추정된 PO^{14}C 값을 실제 분석한 PO^{14}C 값과 함께 나타내 본 결과, 대체로 실제 PO^{14}C 와 유사했다(Fig. 4). 이를 통해 입자의 양이 많은 대륙 주변부나 혼탁층 뿐만 아니라 동해와 같은 깊은 분지가 있는 해역에서도 퇴적물의 재부유와 이들의 수평 이동이 탄소 순환의 중요한 기작임이 밝혀졌다(Bauer and Druffel 1998; Dunne et al. 2007; Gardner et al. 2018; Kim et al. 2020a, 2020b). 나아가 LM/POC은 ^{14}C 에 비해 측정이 용이하고, 수층에서 쉽게 분해되거나 그 값이 변하지 않기 때문에, 시료의 ^{14}C 의 측정이 불가능할 경우 침강입자 시료의 LM/POC비를 통해 재부유 퇴적물의 유입 정도를 대략적으로 파악할 수 있을 것으로 기대한다(Kim et al. 2015, 2020b).

하지만, 연간 동해 심층 침강 입자의 PO^{14}C 값은 넓은 범위를 보이고 있어, 트랩 계류 지점에서 재부유된 퇴적물의 유입뿐만 아니라 주변부에서 재부유되어 수평 이동한 해저 퇴적물로부터의 기원, 육상과 대기로부터의 유입, 용존유기탄소의 흡착 등 다양한 기원을 가진 유기 탄소의

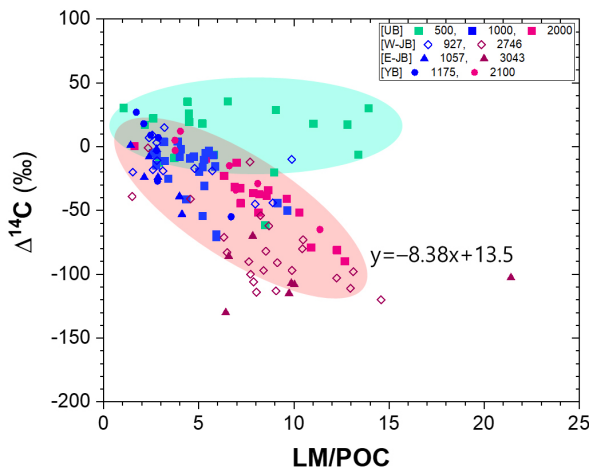


Fig. 6. $\Delta^{14}\text{C}$ values (‰) against the ratio of the content of lithogenic material to the POC (LM/POC) of sinking particles (redrawn from Kim et al. 2020a). Data from Kim et al. (2017, 2020b) for the UB (square), Otosaka et al. (2008) for western JB (diamond), eastern JB (triangle), and YB (circle). The cloud denotes the linear fit of the sinking particles at 500 m and at 1000–3000 m depths. UB, W-JB, E-JB, and YB indicates Ulleung Basin, Western-Japan Basin, Eastern-Japan Basin, and Yamato Basin respectively

영향을 받은 것으로 보인다(Fig. 5; Druffel and Williams 1990; Eglinton et al. 2002; Goni et al. 2005; Blattmann et al. 2018b). 한편 상층(300–500 m)의 LM/POC와 PO^{14}C 값은 심층의 값과 같은 관계식을 따르지 않았는데(Fig. 6), 이는 상층 PO^{14}C 도 재부유 퇴적물 외의 오래된 유기탄소의 영향을 받기 때문인 것으로 보인다. 상층의 PO^{14}C 나 LM 값은 MERRA (Meteorological and Aerosol Reanalysis)로 추정된 대기 중 분진(dust) 값과도 일치하지 않아 대기로 부터의 유입 외에도 다양한 기원의 유기탄소가 유입됨을 뜻한다(Otosaka et al. 2008; Kim et al. 2017, 2020a). 이러한 각각의 기원으로부터의 유기탄소 유입량과 그 변동을 규명하기 위해서는 기원지의 ^{14}C 단성분을 보다 정확히 파악하는 것이 필수적이다.

4. 맺음말: 동해 ^{14}C 연구의 나아갈 방향 고찰

^{14}C 를 활용한 연구는 해양에서의 탄소 순환과 역할을 이해하는 데 있어 중요한 정보를 제공하지만, 비용과 분석의 어려움으로 비교적 단발적으로 수행되어 왔다. 최근 분석 기술의 발달은 ^{14}C 데이터 획득에 긍정적 변화를 주고 있으며(Fagault et al. 2019), 이에 따른 ^{14}C 의 활용법과 전망에 대한 고찰도 꾸준히 진행되고 있다(Hwang 2012; Alves et al. 2018; Skinner and Bard 2022). 하지만 아직까

지 대부분의 국내 ^{14}C 결과는 국외 기관(스위스 연방공과대학교, 미국 우즈홀 해양연구소, 뉴질랜드 GNS SCIENCE 등)에 분석을 의뢰하여 얻은 값이며, 시료 1개 당 80-90만원 가량의 분석 비용이 발생하고 있다. 따라서, 궁극적으로는 국내 해양학 및 지구과학 연구를 위한 MICADAS 장비 구축이 필요할 것이다. 나아가 자연상태에서 ^{14}C 의 농도는 ^{14}C 는 전체 탄소의 약 $1.2 \times 10^{-10}\%$ 정도로 굉장히 낮기 때문에, 시료의 채취에서 보관, 분석에 이르는 일련의 과정에서 오염에 각별히 주의가 필요하므로, 분석 전문 인력의 양성도 필요하다.

동해는 해양 연구 목적에 대한 접근성이 좋을 뿐 아니라, “소형 해양(miniature ocean)”으로 불릴 만큼 자체적인 심층 순환을 비롯한 다양한 해양학적 기작이 발생하는 해역으로, 대기에서 해양으로의 이산화탄소 유입, 해양의 탄소 저장 능력에 관한 연구를 하기에 적합하다. 하지만 동해 탄소 순환을 이해하는데 있어 탄소의 다양한 기원과 이동량, 이동 기작, 기후 변화에 따른 시공간적 변동 등은 아직 해결해야 할 문제로 남아있다(Fig. 7). 본 리뷰에서는 ^{14}C 를 활용한 동해 연구의 방향으로 아래의 두 가지를 제시하고자 한다. 이로써 기후 변화에 따른 동해의 역할을 규명하고, 미래 탄소 순환을 예측하는 데 있어 보다 정확하고 다양한 정보를 제공할 수 있을 것이다.

중장기적, 고해상도의 ^{14}C 값 확보

DI^{14}C 는 시간에 따른 인간 활동에 의한 대기 중 탄소의 흡수 정도를 파악할 수 있는 좋은 추적자이기에, 장기 데이터 확보가 필요하다. 전 세계적으로 대양에서는 1970년대 GEOSECS (Geochemical Ocean Sections Study)를 통해 약 300개 정점에서 DI^{14}C 를 비롯한 해양 화학 인자를 분석하였으며, 1990년대에는 WOCE (World Ocean Circulation Experiment), OACES (Ocean Atmosphere Carbon Exchange Study) 등의 프로그램이 진행되었다(Key 1996; Dutta et al. 2010). 이후, GLODAP (Global Ocean Data Analysis Project)을 통해 DI^{14}C 를 포함한 해양 자료를 공유할 수 있게 되었다(Key et al. 2004; Lauvset et al. 2021; Ge et al. 2022; <https://www.glodap.info/index.php/merged-and-adjusted-data-product-v22021/>). 한편 2014년 Sim et al. (2014)이 1999년 동해 전역의 DI^{14}C 값 발표 이후, 동해에서 DIC 시료 채취와 농도 측정은 산발적으로 이루어졌으나(Na et al. 2022), DI^{14}C 결과는 논문으로 보고된 바가 없다. 2000년대를 지나며 대기 중 ^{14}C 의 값이 해양 산호 시료에서 측정된 ^{14}C 의 값보다 작아지는 전환점이 시작되었으며(Fig. 1), 이에 따른 해양 ^{14}C 의 장기적인 변화를 파악하는 것은 해양의 탄소 저장고로서의 역할을 규명하는 데 있어 중요한 정보를 제공할 것이다. 다양한 화학적 추적자(CFCs, ^3H , ^3He 등; Tsunogai et al. 2003), DO 등과

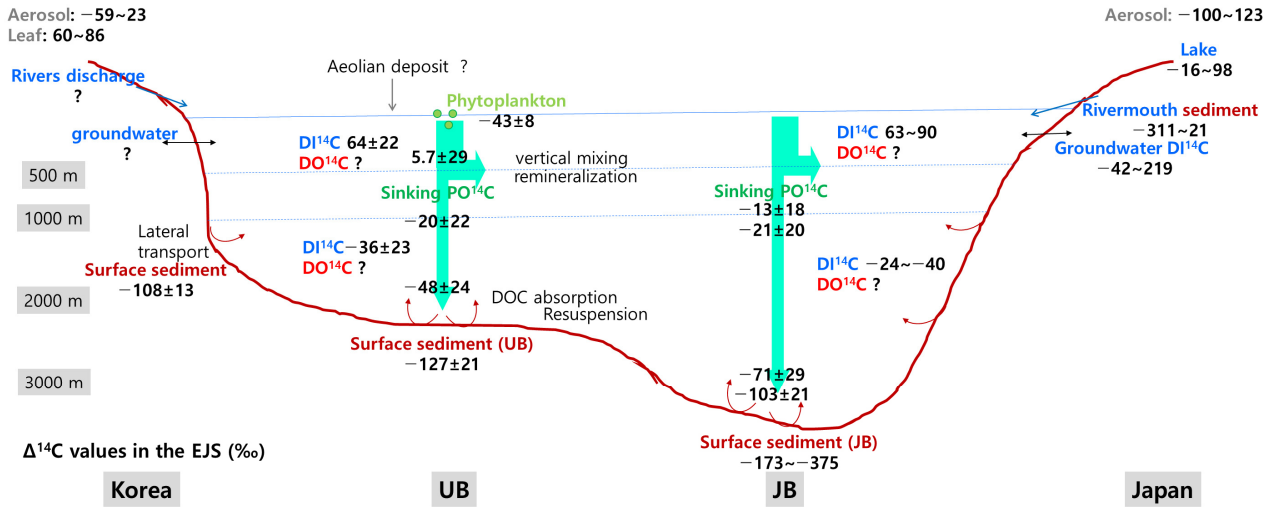


Fig. 7. Schematic of the $\Delta^{14}C$ values (‰) of various samples in the East Sea (redrawn from Kim et al. unpublished). Data and related references are in Table 1 and main text. $\Delta^{14}C$ of DIC is collected in 1999 (Sim et al. 2014)

저층수 생성의 장기 변동성(Yoon et al. 2018; Li et al. 2022)을 $DI^{14}C$ 값과 연계하여 해석한다면 동해 심층 해수 순환에 중요한 정보를 제공할 수 있을 것이다.

침강입자 시료는 2011년 이후 300 (500) m, 1000 m, 2000 m 수심에서 꾸준히 채취되어 오고 있으며(Kim et al. 2017, 2020a), 이를 통해 기후 변화에 따른 동해 BCP의 중장기적, 고해상도 변동을 규명하고 다양한 나이와 기원의 유기 탄소의 해양으로의 유입을 파악할 수 있을 것이다. 특히 침강입자 시료는 대부분 양이 굉장히 적기 때문에 동해 울릉분지는 북극해 캐나다 분지(Canada Basin; Hwang et al. 2015), 서남극 아문젠해(Kim et al. 2015), 태평양의 정점 M (Hwang et al. 2010), 북서대서양(Hwang et al. 2017) 등과 함께 장기 침강입자 시료의 ^{14}C 값이 존재하는 몇 안 되는 정점 중 한 곳이다. 따라서, 동해에서의 침강입자에 대한 연구는 향후 전지구적 BCP 기작을 규명하는 데 있어 핵심적인 중장기적 연구 정점으로 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

한편 동해에서는 비교적 시료의 양이 제한적이지 않은 표층 퇴적물의 ^{14}C 값도 거의 없는 실정이다(Kim et al. 2017). 인근의 동중국해에서 Bao et al. (2016)이 표층 퇴적물 시료 360여 개의 ^{14}C 값을 제시하고(Bao et al. 2016의 Fig. 1), 이 중 16개 시료를 입자의 크기(< 20, 20-32, 32-63 μm)별로 분별하여 ^{14}C 값을 분석하는 등(Bao et al. 2018a, 2018b, 2018c, 2019a, 2019b) 다양한 고찰을 해 온 것은 향후 동해에서 해양 표층 퇴적물의 ^{14}C 를 활용한 탄소 순환 연구를 수행하는 데 있어 좋은 예가 될 것이다.

DOC를 비롯한 다양한 기원과 형태의 ^{14}C 값 확보

울릉분지 침강입자의 $PO^{14}C$ 연구 결과, 수층의 $PO^{14}C$ 가 다양한 기원을 가지고 있음이 밝혀졌다(Kim et al. 2017; Otosaka et al. 2008). 동해로 유입될 수 있는 POC는 크게 대기로부터의 유입, 해양저 퇴적물에서의 재부유 및 수평 이동, 강이나 지하수로부터의 유입, 그리고 대마 난류를 통한 유입 등이 있는데(Kim et al. 2017, 2020b), 각각의 기원으로부터의 POC 유입 기작을 규명하고, 나아가 이를 정량화하기 위해서는, POC 기원지의 ^{14}C 단성분을 보다 정확히 파악해야 한다(Fig. 7).

안면도(해면 고도 46 m)와 홋카이도 대학(35 m 높이)에서 대기 중 에어로졸의 ^{14}C 를 분석한 값은 각각 약 -59~23‰과 -100~123‰로, 다양한 범위를 보여, 오래된 탄소가 대기로부터의 유입될 수 있는 가능성을 시사하였다(Kawamura et al. 2010; Lee et al. 2020a). 경주에서 채취한 나뭇잎의 ^{14}C 는 60~86‰로 대기 중 ^{14}C 값과 유사했는데, 이는 광합성을 하는 독립영양생물의 ^{14}C 가 대기 중 $^{14}CO_2$ 값을 갖는 특성을 잘 반영하고 있다(Figs. 1 and 7; Lee et al. 2020b). 하지만 강 등을 통해 해양으로 유입되는 육상 기원 유기 탄소는 대기로부터의 탄소 고정 이후 어느 정도 시간을 거쳤기 때문에, 실제 육상 기원 유기물의 ^{14}C 의 농도는 이보다 낮을 것이다(Tao et al. 2015). 실제로 황하나 양쯔강 등 거대한 강의 영향을 받는 해역에서 오래된 유기탄소의 함량이 높게 관측되었다(Bao et al. 2016; Yu et al. 2019). 한국의 강하구에서 ^{14}C 값의 연구 결과는 아직 없으나, 일본 북부의 Ishikari, Yoneshiro 등 강하구 퇴적물의 ^{14}C 값은 각각 -311‰, 21‰로, 지역에 따른 차이가 있지만 평균 -89±14‰ (n = 6; Otosaka et al.

2008)로 낮은 ^{14}C 값을 보여 동해로 유입되는 하구역별 ^{14}C 값과 해양으로의 유입량과 중요성 등을 규명하는 연구가 필요함을 시사하였다.

한편 동해에서 DOC의 ^{14}C 값은 아직까지 출판된 자료가 부족한 만큼 값의 분석이 필요하다(Fig. 7). 심해에서 식하는 독립, 중속 영양 생물들은 동해 탄소 순환에 영향을 미칠 것이기 때문에, 탄소 순환에 있어 미생물 군집의 역할과 대사 과정을 DO^{14}C 연구를 통해 정량화할 수 있을 것으로 기대한다(Herndl and Reinthaler 2013). 남중국해의 경우, 대만에서 ^{14}C 값이 굉장히 낮은 petrogenic OC (kerogen 등)가 유입되어 해양 유기탄소 값에 영향을 미치는 것이 밝혀졌는데(Bao et al. 2016; Blattmann et al. 2019), 동해나 제주도 연안의 지하 용출수의 DO^{14}C 값 등 해양으로 유입되는 다양한 탄소 기원의 단성분을 이해하는 연구 또한 필요할 것이다. 일본 북부지역 3개 정점에서 깊이에 따른 지하수의 DI^{14}C 값을 분석한 결과 상층 15-31 m에서 -42-219‰로 지하수의 용출 또한 오래된 유기탄소의 기원이 될 수도 있음을 시사하였다(Fig. 7, Table 1; Takahashi et al. 2013). 따라서, 동해의 다양한 탄소 저장고의 ^{14}C 값을 통해 저장고 간의 상호작용 역할, 탄소의 체류 시간 및 수송 경로, 기원 등을 보다 정확히 추정하고 동해 내부 ^{14}C 값의 시공간적 변화를 파악할 수 있을 것으로 기대한다.

^{14}C 값은 붕괴 상수를 기반으로 탄소의 나이에 관한 정보만을 제공하지만, 해양 시료의 ^{14}C 는 다양한 물리적, 생지화학적 기작을 겪은 여러 기원의 ^{14}C 값을 통합하여 나타낸다. 분석법의 발달로 분석에 필요한 탄소량이 점차 줄어들고 있으며, 따라서 전체 입자의 ^{14}C 를 분석하는 방법에서 나아가 특정 화합물을 분석하거나(Eglinton et al. 1997; Gies et al. 2021), 시료를 밀도나 입자의 크기(Wakeham et al. 2009; Bao et al. 2019a)에 따라 또는 Ramped Pyrolysis (RP) 등 열처리(Subt et al. 2016; Hemingway et al. 2019)를 통해 세분하여 ^{14}C 를 분석함으로써 다양한 해양 기작에 관한 이해에 ^{14}C 를 활용할 수 있을 것이다. 이 리뷰 논문을 통하여 국내 연구자와 학생들이 ^{14}C 를 활용한 동해 연구에 보다 관심을 가지고 활약하기를 기대한다.

사 사

이 논문 작성에 도움을 주신 류예진, 심보람 씨, 그리고 원고를 읽고 유익한 조언을 주신 심사위원분들께 감사드립니다.

참고문헌

Alves EQ, Macario K, Ascough P, Bronk Ramsey C (2018)

The worldwide marine radiocarbon reservoir effect: definitions, mechanisms, and prospects. *Rev Geophys* **56**(1): 278-305

Aramaki T, Senjyu T, Togawa O, Otosaka S, Suzuki T, Kitamaru T, Amano H, Volkov YN (2007) Circulation in the Northern Japan sea studied chiefly with radiocarbon. *Radiocarbon* **49**(2):915-924

Aramaki T, Tanaka SS, Kushibashi S, Kim YI, Kim CJ, Hong GH, Senjyu T (2013) Spatial distribution of radiocarbon in the southwestern Japan/East Sea immediately after bottom water renewal. *Radiocarbon* **55**:1675-1682

Arnold JR, Libby WF (1949) Age determinations by radiocarbon content: Checks with samples of known age. *Science* **110**:678-680

Bao R, Blattmann TM, McIntyre C, Zhao M, Eglinton TI (2019a) Relationships between grain size and organic carbon ^{14}C heterogeneity in continental margin sediments. *Earth Planet Sci Lett* **505**:76-85. doi:10.1016/j.epsl.2018.10.013

Bao R, McIntyre C, Zhao M, Zhu C, Kao SJ, Eglinton TI (2016) Widespread dispersal and aging of organic carbon in shallow marginal seas. *Geology* **44**:791-794

Bao R, McNichol AP, Hemingway JD, Lardie Gaylord MC, Eglinton TI (2018a) Influence of different acid treatments on the radiocarbon content spectrum of sedimentary organic matter determined by rpo/accelerator mass spectrometry. *Radiocarbon* **61**:395-413. doi:10.1017/rdc.2018.125

Bao R, Strasser M, McNichol AP, Haghypour N, McIntyre C, Wefer G, Eglinton TI (2018b) Tectonically-triggered sediment and carbon export to the Hadal zone. *Nat Commun* **9**:121. doi:10.1038/s41467-017-02504-1

Bao R, Uchida M, Zhao M, Haghypour N, Montlucon D, McNichol A, Wacker L, Hayes JM, Eglinton TI (2018c) Organic carbon aging during across-shelf transport. *Geophys Res Lett* **45**:8425-8434. doi:10.1029/2018gl078904

Bao R, Zhao M, McNichol A, Galy V, McIntyre C, Haghypour N, Eglinton TI (2019b) Temporal constraints on lateral organic matter transport along a coastal mud belt. *Organic Geochem* **128**:86-93. doi:10.1016/j.orggeochem.2019.01.007

Bauer JE, Druffel ERM (1998) Ocean margins as a significant source of organic matter to the deep ocean. *Nature* **392**:482-484

Bennett CL, Beukens RP, Clover MR, Gove HE, Liebert RB, Litherland AE, Purser KH, Sondheim WH (1977) Radiocarbon dating using electrostatic accelerators-negative ions provide the key. *Science* **198**:508-510

Berelson WM (2002) Particle settling rates increase with depth in the ocean. *Deep-Sea Pt II* **49**:237-251

- Blattmann TM, Liu Z, Zhang Y, Zhao Y, Haghypour N, Montluçon DB, Plötze M, Eglinton TI (2019) Mineralogical control on the fate of continentally derived organic matter in the ocean. *Science* **366**:742–745
- Blattmann TM, Wessels M, McIntyre C, Eglinton TI (2018a) Projections for future radiocarbon content in dissolved inorganic carbon in Hardwater Lakes: a retrospective approach. *Radiocarbon* **60**(3):791–800. doi:10.1017/RDC.2018.12
- Blattmann TM, Zhang Y, Zhao Y, Wen K, Lin S, Li J, Wacker L, Haghypour N, Plotze M, Liu Z, Eglinton TI (2018b) Contrasting fates of petrogenic and biospheric carbon in the South China Sea. *Geophys Res Lett* **45**: 9077–9086
- Broecker WS, Gerard R, Ewing M, Heezen BC (1960) Natural radiocarbon in the Atlantic Ocean. *J Geophys Res* **65**(9): 2903–2931
- Craig H (1957) The natural distribution of radiocarbon and the exchange time of carbon dioxide between the atmosphere and the sea. *Tellus* **9**(1):1–17. doi:10.3402/tellusa.v9i1.9078
- Craig H (1969) Abyssal carbon and radiocarbon in the Pacific. *J Geophys Res* **74**(23):5491–5506
- DeVries T, Primeau F (2011) Dynamically and observationally constrained estimates of water-mass distributions and ages in the global ocean. *J Phys Oceanogr* **41**(12):2381–2401
- Ding L, Ge T, Gao H, Luo C, Xue Y, Druffel ERM, Wang X (2018) Large variability of dissolved inorganic radiocarbon in the Kuroshio Extension of the northwest North Pacific. *Radiocarbon* **60**(2):691–704. doi:10.1017/RDC.2017.143
- Druffel ERM, Bauer JE, Griffin S, Beaupré S, Hwang J (2008) Dissolved inorganic radiocarbon in the north Pacific Ocean and Sargasso Sea. *Deep-Sea Res Pt I* **55** (4):451–459. doi:10.1016/j.dsr.2007.12.007
- Druffel ERM, Williams PM (1990) Identification of a deep marine source of particulate organic carbon using bomb ¹⁴C. *Nature* **347**:172–174
- Dunne JP, Sarmiento JL, Gnanadesikan A (2007) A synthesis of particle export from the surface ocean and cycling through the ocean interior and on the seafloor. *Global Biogeochem Cycles* **21**:GB4006. doi:10.1029/2006GB002907
- Dutta K, Prasad G, Ray D, Raghav S (2010) Decadal changes of radiocarbon in the surface bay of bengal: three decades after geosecs and one decade after WOCE. *Radiocarbon* **52**(3):1191–1196. doi:10.1017/S0033822200046269
- Eglinton TI, Benitez-Nelson BC, Pearson A, McNichol AP, Bauer JE, Druffel ERM (1997) Variability in radiocarbon ages of individual organic compounds from marine sediments. *Science* **277**:796–799. doi:10.1126/science.277.5327.796
- Eglinton TI, Eglinton G, Dupont L, Sholkovitz ER, Montluçon D, Reddy CM (2002) Composition, age, and provenance of organic matter in NW African dust over the Atlantic Ocean. *Geochem Geophys Geosyst* **3**(8):1–27. doi:10.1029/2001GC000269
- Fagault Y, Tuna T, Rostek F, Bard E (2019) Radiocarbon dating small carbonate samples with the gas ion source of Aix-MICADAS. *Nucl Instrum Methods Phys Res B* **455**:276–283. doi:10.1016/j.nimb.2018.11.018
- Gamo T, Horibe Y (1983) Abyssal circulation in the Japan Sea. *J Oceanogr Soc Japan* **39**:220–230
- Gardner WD, Richardson MJ, Mishonov AV (2018) Global assessment of benthic nepheloid layers and linkage with upper ocean dynamics. *Earth Planet Sci Lett* **482**:126–144
- Ge T, Luo C, Ren P, Zhang H, Chen Z, Sun S, Xu L, Wang X (2022) Decadal variations in radiocarbon in dissolved inorganic carbon (DIC) along a transect in the western North Pacific Ocean. *J Geophys Res* **127**(2):e2021JC017845
- Ge T, Wang X, Zhang J, Luo C, Xue Y (2016) Dissolved inorganic radiocarbon in the Northwest Pacific continental margin. *Radiocarbon* **58**(3):517–529. doi:10.1017/RDC.2016.23
- Gies H, Hagedorn F, Lupker M, Montluçon D, Haghypour N, van der Voort TS, Eglinton TI (2021) Millennial-age glycerol dialkyl glycerol tetraethers (GDGTs) in forested mineral soils: ¹⁴C-based evidence for stabilization of microbial necromass. *Biogeosciences* **18**:189–205. doi:10.5194/bg-18-189-2021
- Goni MA, Yunker MB, Macdonald RW, Eglinton TI (2005) The supply and preservation of ancient and modern components of organic carbon in the Canadian Beaufort Shelf of the Arctic Ocean. *Mar Chem* **93**:53–73
- Graven H (2015) Impact of fossil fuel emissions on atmospheric radiocarbon and various applications of radiocarbon over this century. *Proc Nat Acad Sci* **112**: 9542–9545
- Gruber N, Gloor M, Fletcher SE, Doney SC, Dutkiewicz S, Follows MJ, Gerber M, Jacobson AR, Joos F, Lindsay K, Menemenlis D, Mouchet A, Muller SA, Sarmiento JL, Takahashi T (2009) Oceanic sources, sinks, and transport of atmospheric CO₂. *Global Biogeochem Cy* **23**:GB1005. doi:10.1029/2008GB003349
- Hemingway JD, Rothman DH, Grant KE, Rosengard SZ, Eglinton TI, Derry LA, Galy VV (2019) Mineral protection regulates long-term global preservation of natural organic carbon. *Nature* **570**:228–231. doi:10.1038/s41586-019-1280-6

- Herndl GJ, Reinthaler T (2013) Microbial control of the dark end of the biological pump. *Nature Geosci* **6**:718–724
- Honda MC, Kusakabe M, Nakabayashi S, Katagiri M (2000) Radiocarbon of sediment trap samples from the Okinawa trough: lateral transport of ^{14}C -poor sediment from the continental slope. *Mar Chem* **68**:231–247
- Hong GH, Baskaran M, Lee HK, Kim SH (2008) Sinking Fluxes of Particulate U-Th Radionuclides in the East Sea (Sea of Japan). *J Oceanogr* **64**:267–276
- Honjo S, Manganini SJ, Cole JJ (1982) Sedimentation of biogenic matter in the deep ocean. *Deep-Sea Res Pt I* **29**:609–625
- Honjo S, Manganini SJ, Krishfield RA, Francois R (2008) Particulate organic carbon fluxes to the ocean interior and factors controlling the biological pump: a synthesis of global sediment trap programs since 1983. *Progr Oceanogr* **76**:217–285
- Hua Q, Turnbull J, Santos G, Rakowski A, Ancapichún S, De Pol-Holz R, Turney C (2021) Atmospheric radiocarbon for the period 1950–2019. *Radiocarbon* **1**–23. doi:10.1017/RDC.2021.95
- Hwang J (2012) Radiocarbon for studies of organic matter cycling in the Ocean. *J Korean Soc Oceanogr* **17**(3):189–201 (in Korean)
- Hwang J, Druffel ERM, Eglinton TI (2010) Widespread influence of resuspended sediments on oceanic particulate organic carbon: Insights from radiocarbon contents in sinking particles. *Global Biogeochem Cy* **24**:GB4016. doi:10.1029/2010GB003802
- Hwang J, Kim M, Manganini SJ, McIntyre CP, Haghypour N, Park J, Krishfield RA, Macdonald RW, McLaughlin FA, Eglinton TI (2015) Temporal and spatial variability of particle transport in the deep Arctic Canada Basin. *J Geophys Res* **120**:2784–2799
- Hwang JSJ, Manganini J, Park DB, Montlucon JMT, Eglinton TI (2017) Biological and physical controls on the flux and characteristics of sinking particles on the Northwest Atlantic margin. *J Geophys Res* **122**:4539–4553
- Kang DJ, Park SY, Kim YG, Kim K, Kim KR (2003) A moving-boundary box model (MBBM) for oceans in change: an application to the East/Japan Sea. *Geophys Res Lett* **30**(6):1299. doi:10.1029/2002GL016486
- Kawamura K, Matsumoto K, Uchida M, Shibata Y (2010) Contributions of modern and dead organic carbon to individual fatty acid homologues in spring aerosols collected from northern Japan. *J Geophys Res* **115**:D22310
- Key R (1996) WOCE pacific ocean radiocarbon program. *Radiocarbon* **38**(3):415–423
- Key RM, Kozyr A, Sabine CL, Lee K, Wanninkhof R, Bullister JL, Feely RA, Millero FJ, Mordy C, Peng TH (2004) A global ocean carbon climatology: results from Global Data Analysis Project (GLODAP). *Global Biogeochem Cy* **18**:GB4031
- Khatiwala S, Primeau F, Holzer M (2012) Ventilation of the deep ocean constrained with tracer observations and implications for radiocarbon estimates of ideal mean age. *Earth Planet Sc Lett* **325**:116–125
- Kim HJ, Kim D, Hyeong K, Hwang J, Yoo CM, Ham DJ, Seo I (2015) Evaluation of resuspended sediments to sinking particles by benthic disturbance in the clarion-clipperton nodule fields. *Mar Geo Geotechnol* **33**(2):160–166. doi:10.1080/1064119X.2013.815675
- Kim M, Hwang J, Eglinton TI, Druffel ERM (2020a) Lateral particle supply as a key vector in the oceanic carbon cycle. *Global Biogeochem Cy* **34**(9):e2020GB006544. doi:10.1029/2020GB006544
- Kim M, Hwang J, Rho T, Lee T, Kang DJ, Chang KI, Noh S, Joo H, Kwak JH, Kang CK, Kim KR (2017) Biogeochemical properties of sinking particles in the southwestern part of the East Sea (Japan Sea). *J Marine Syst* **167**:33–42
- Kim M, Kim YI, Hwang J, Choi KY, Kim CJ, Ryu Y, Park JE, Park KA, Park JH, Nam S, Haghypour N, Eglinton TI (2020b) Influence of sediment resuspension on the biological pump of the southwestern East Sea (Japan Sea). *Front Earth Sci* **8**(144). doi:10.3389/feart.2020.00144
- Kumamoto Y, Aramaki T, Watanabe S, Yoneda M, Shobata Y, Togawa O, Morita M, Shitashima K (2008) Temporal and spatial variations of radiocarbon on Japan Sea bottom water. *J Oceanogr* **64**:429–441
- Kumamoto Y, Murata A, Kawano T, Watanabe S, Fukasawa M (2013) Decadal changes in bomb-produced radiocarbon in the Pacific Ocean from the 1990s to 2000s. *Radiocarbon* **55**(3–4):1641–1650. doi:10.2458/azu_js_rc.55.16238
- Kumamoto Y, Yoneda M, Shibata Y, Kume H, Tanaka A, Uehiro T, Morita M, Shitashima K (1998) Direct observation of the rapid turnover of the Japan Sea bottom water by means of AMS radiocarbon measurement. *Geophys Res Lett* **25**(5):651–654
- Lauvset SK, Lange N, Tanhua T, Bittig HC, Olsen A, Kozyr A, Álvarez M, Becker S, Brown PJ, Carter BR, da Cunha LC, Feely RA, van Heuven S, Hoppema M, Ishii M, Jeansson E, Jutterström S, Jones SD, Karlsen MK, Monaco CL, Michaelis P, Murata A, Pérez FF, Pfiel B, Schirmick C, Steinfeldt R, Suzuki T, Tilbrook B, Velo A, Wanninkhof R, Woosley RJ, Key RM (2021) An updated version of

- the global interior ocean biogeochemical data product, GLODAPv2. 2021. *Earth Syst Sci Data* **13**(12):5565–5589
- Lee H, Dlugokencky EJ, Turnbull JC, Lee S, Lehman SJ, Miller JB, Petron G, Lim JS, Lee GW, Lee SS, Park YS (2020a) Observations of atmospheric ^{14}C at Anmyeondo GAW station, South Korea: implications for fossil fuel CO_2 and emission ratios. *Atmos Chem Phys* **20**(20):12033–12045
- Lee SH, Park SH, Kong M, Kim YS (2020b) A new compact AMS facility at the Dongguk University. *Nucl Instrum Methods Phys Res B* **465**:15–18
- Levin I, Hesshaimer V (2000) Radiocarbon—a unique tracer of global carbon cycle dynamics. *Radiocarbon* **42**:69–80
- Li L, Chen B, Luo Y, Xia J, Qi D (2022) Factors controlling acidification in intermediate and deep/bottom layers of the Japan/East Sea. *J Geophys Res* **127**:e2021JC017712. doi:10.1029/2021JC017712
- Libby WF (1946) Atmospheric helium three and radiocarbon from cosmic radiation. *Phys Rev* **69**(11–12):671–672. doi:10.1103/PhysRev.69.671.2
- Libby WF (1955) Radiocarbon dating. University of Chicago Press, Chicago, 175 p
- McIntyre CP, Wacker L, Haghpor N, Blattmann TM, Fahrni S, Usman M, Eglinton TI, Synal HA (2017) Online ^{13}C and ^{14}C gas measurements by EA-IRMS-AMS at ETH Zurich. *Radiocarbon* **59**:893–903
- McNichol AP, Aluwihare LI (2007) The power of radiocarbon in biogeochemical studies of the marine carbon cycle: Insights from studies of dissolved and particulate organic carbon (DOC and POC). *Chem Rev* **107**:433–466
- Na T, Hwang J, Kim S-Y, Jeong S, Rho TK and Lee T (2022) Large Increase in dissolved inorganic carbon in the East Sea (Japan Sea) From 1999 to 2019. *Front Mar Sci* **9**:825206. doi:10.3389/fmars.2022.825206
- Nakamura T, Kojima S, Ohta T, Oda H, Ikeda A, Okuno M, Kretschmer W (1997) Isotopic analysis and cycling of dissolved inorganic carbon at Lake Biwa, Central Japan. *Radiocarbon* **40**(2):933–944. doi:10.1017/S0033822200018907
- Nelson DE, Korteling RG, Stott WR (1977) ^{14}C detection at natural concentrations. *Science* **198**:507–508
- Otosaka S, Tanaka T, Togawa O, Amano H, Karasev EV, Minakawa M, Noriki S (2008) Deep sea circulation of particulate organic carbon in the Japan Sea. *J Oceanogr* **64**:911–923
- Otosaka S, Togawa O, Baba M, Karasev E, Volkov TN, Omata N, Noriki S (2004) Lithogenic flux in the Japan Sea measured with sediment traps. *Mar Chem* **91**:143–163
- Polach HA (1992) In radiocarbon after four decades. In: Taylor RE, Long A, Kra R (eds) An interdisciplinary perspective. Springer-Verlag, New York, pp 198–213
- Santos GM, Southon JR, Griffin S, Beaupre SR, Druffel ERM (2007) Ultra small-mass AMS ^{14}C sample preparation and analyses at KCCAMS/UCI Facility. *Nucl Instr Meth B* **259**:293–302
- Schuur EAG, Carbone MS, Pries CEH, Hopkins FM, Natali SM (2016) Radiocarbon in terrestrial systems. In: Schuur EAG, Druffel E, Trumbore SE (eds) Radiocarbon and climate change. Springer, Switzerland, pp 167–220
- Sherrell RM, Field MP, Y Gao (1998) Temporal variability of suspended mass and composition in the Northeast Pacific water column: relationships to sinking flux and lateral advection. *Deep-Sea Res Pt II* **45**:733–761
- Sim BR, Kang DJ, Park YG, Kim KR (2014) Spatial and temporal variation of dissolved inorganic radiocarbon in the East Sea. *Ocean Polar Res* **36**(2):111–119. doi:10.4217/OPR.2014.36.2.111
- Skinner LC, Bard E (2022) Radiocarbon as a dating tool and tracer in palaeoceanography. *Rev Geophys* **60**(1):e2020RG000720
- Stuiver M, Polach HA (1977) Reporting of ^{14}C data. *Radiocarbon* **19**:355–363
- Stuiver M, Quay PD (1981) Atmospheric ^{14}C changes resulting from fossil fuel CO_2 release and cosmic ray flux variability. *Earth Planet Sc Lett* **53**(3):349–362. doi:10.1016/0012-821x(81)90040-6
- Subt C, Fangman KA, Wellner JS, Rosenheim BE (2016) Sediment chronology in Antarctic deglacial sediments: reconciling organic carbon ^{14}C ages to carbonate ^{14}C ages using ramped PyrOx. *Holocene* **26**(2):265–273. doi:10.1177/0959683615608688
- Synal HA, Stocker M, Suter M (2007) MICADAS: a new compact radiocarbon AMS system. *Nucl Instrum Methods Phys Res B* **259**:7–13
- Takahashi HA, Nakamura T, Tsukamoto H, Kazahaya K, Handa H, Hirota A (2013) Radiocarbon dating of groundwater in granite fractures in Abukuma Province, Northeast Japan. *Radiocarbon* **55**(02):894–904. doi:10.1017/s0033822200058057
- Tao S, Eglinton TI, Montluçon DB, McIntyre C, Zhao M (2015) Pre-aged soil organic carbon as a major component of the Yellow River suspended load: regional significance and global relevance. *Earth Planet Sci Lett* **414**:77–86. doi:10.1016/j.epsl.2015.01.004
- Taylor SR, McLennan SM (1985) The continental crust: its composition and evolution. Blackwell Science, Oxford, 312 p
- Toggweiler JR, Druffel ERM, Key RM, Galbraith ED (2019) Upwelling in the ocean basins north of the ACC: 1. On

- the Upwelling Exposed by the Surface Distribution of $\Delta^{14}\text{C}$. *J Geophys Res-Oceans* **124**:2591–2608
- Touratier F, Azouzi L, Goyet C (2007) CFC-11, $\Delta^{14}\text{C}$ and ^3H tracers as a means to assess anthropogenic CO_2 concentrations in the ocean. *Tellus B* **59**(2):318–325
- Tsunogai S (2000) North Pacific water's larger potential sink capacity for absorbing anthropogenic CO_2 and the processes recovering it. In: Handa N, Tanoue E, Hama T (eds) *Dynamics and characterization of marine organic matter*. Springer, pp 533–560
- Tsunogai S, Kawada K, Watanabe S, Aramaki T (2003) CFCs indicating renewal of the Japan Sea Deep Water in winter 2000–2001. *J Oceanogr* **59**:685–693
- Tsunogai S, Watanabe YW, Harada K, Watanabe S, Saito S, Nakajima M (1993) Dynamics of the Japan Sea deep water studied with chemical and radiochemical tracers. In: Teramoto T (ed) *Deep ocean circulation, physics and chemical aspects*, Elsevier, Switzerland, pp 105–119
- Volk T, Hoffert MI (1985) Ocean carbon pumps: analysis of relative strength and efficiencies of in ocean-driven circulation atmospheric CO_2 changes. In: Sundquist ET, Broecker WS (eds) *The carbon cycle and atmospheric CO_2 : natural variations archean to present*, Geophysical Monogr. Ser. 32, AGU, Washington DC, pp 99–110
- Wacker L, Bonani G, Friedrich M, Hajdas I, Kromer B, Nemeš M, Ruff M, Suter M, Synal HA, Vockenhuber C (2010) MICADAS: routine and high-precision radiocarbon dating. *Radiocarbon* **52**:252–262
- Wacker L, Fahrni SM, Hajdas I, Molnar M, Synal HA, Szidat S, Zhang YL (2013) A versatile gas interface for routine radiocarbon analysis with a gas ion source. *Nucl Instrum Methods Phys Res B* **294**:315–319
- Wakeham SG, Canuel EA, Lerberg EJ, Mason P, Sampere TP, Bianchi TS (2009) Partitioning of organic matter in continental margin sediments among density fractions. *Mar Chem* **115**(3–4):211–225
- Welte C, Hendriks L, Wäcker L, Haghypour N, Eglinton TI, Günther D Synal HA (2018) Towards the limits: analysis of microscale ^{14}C samples using EA-AMS. *Nucl Inst Meth B* **437**:66–74. doi:10.1016/j.nimb.2018.09.046
- Wu Y, Fallon S, Cantin N, Lough J (2021) Surface ocean radiocarbon from a porites coral record in the great barrier reef: 1945–2017. *Radiocarbon* **63**(4):1193–1203. doi:10.1017/RDC.2020.141
- Yoon ST, Chang KI, Nam S, Rho TK, Kang D-J, Lee T, Park K-A, Lobanov V, Kaplunenko D, Tishchenko P, Kim K-R (2018) Re-initiation of bottom water formation in the East Sea (Japan Sea) in a warming world. *Sci Rep* **8**:1576. doi:10.1038/s41598-018-19952-4
- Yu M, Eglinton TI, Haghypour N, Montluçon DB, Wacker L, Wang Z, Jin G, Zhao M (2019) Molecular isotopic insights into hydrodynamic controls on fluvial suspended particulate organic matter transport. *Geochim Cosmochim Acta* **262**:78–91. doi:10.1016/j.gca.2019.07.040

Author's Information

Minkyong Kim

Assistant Professor, Kyungpook National University

Received Feb. 15, 2022

Revised Feb. 28, 2022

Accepted Mar. 2, 2022