

울릉분지와 시코쿠분지 심해퇴적작용의 비교에 관한 기초연구: 심층수순환과 저층류

이인태* · 전승수

전남대학교 지구환경과학부/기초과학연구소, 500-757 광주광역시 북구 용봉동 300번지

Preliminary Comparison of Deep-sea Sedimentation in the Ulleung and Shikoku Basins: Deep-sea Circulations and Bottom Current

In Tae Lee · Seung Soo Chun

Faculty of Earth Systems & Environmental Sciences/Basic Science Institute,
Chonnam National University, Kwangju 500-757, Korea

Abstract: Based on sedimentary structures, degree of bioturbation, and internal erosional layers, the deep-sea core sediments in the East Sea (Ulleung and Yamato basins) and the Northwestern Pacific Ocean (Shikoku Basin) can be divided into two parts (upper and lower) with the boundary of around 10,000 years B.P. in age. The upper part of core KT94-10 from Shikoku Basin is characterized by low sedimentation rate, internal erosion layer, high degree of bioturbation and cross-lamination structures. It can be interpreted as the bottom-current deposits which show some *different characteristics from turbidite or hemipelagic sediment*. However, its lower part consists of highly bioturbated, massive mud, suggesting that it be not related to the influence of bottom current. On the other hand, the cores in Ulleung and Yamato basins do not show any evidence of bottom-current deposits: their upper parts consist of bioturbated mud, and lower parts are characterized by laminated mud with pyrite filaments, indicating anaerobic condition. Consequently, these sedimentological characteristics suggest that deep-sea circulation would be changed from slow-moving to fast-moving one at this bounding time commonly in the Northwestern Pacific Ocean and the East Sea. Also, even in the same time, the deep-sea circulation in the Northwestern Pacific area would be relatively faster than that in the East Sea.

Keywords: bottom current deposit, Ulleung Basin, Shikoku Basin, East Sea, deep-sea circulation, deep-sea sedimentation

요약: 북서태평양과 동해에서 채취된 4개의 코어는 퇴적구조, 생물교란도와 내부침식면을 기준으로 과거 1만년 부근에서 상부와 하부로 구분된다. 특히, 시코쿠분지의 코어 KT94-10 상부퇴적물은 낮은 퇴적율, 높은 생물교란작용, 내부침식면, 사엽층리 등으로 특징지워지는데, 이러한 퇴적특징의 조합은 저탁류퇴적층이나 반원양성 퇴적물과는 다른 저층류퇴적물로 해석된다. 그러나 하부는 저층류의 영향을 받은 퇴적층이 관찰되지 않고, 생흔화석만 관찰되는 무구조 니질층의 특징을 보인다. 한편 동해 코어(95PC3)에서는 어떠한 저층류 관련 퇴적물도 관찰되지 않는다. 상부는 생물교란 니질층으로, 하부는 엽층리 니질층으로 구성되어 있으며 환원적 환경을 표시하는 황철석을 포함하고 있다. 결과적으로 북서태평양과 동해 코어의 퇴적특징은 심층수순환이 10,000년 전부터 빨라졌음을 표시하고 있다. 또 같은 시기일지라도, 심층수순환은 동해보다 북서태평양이 더 활발함을 보여주고 있다.

주요어: 저층류퇴적물, 울릉분지, 시코쿠분지, 동해, 심층수순환, 심해퇴적작용

서론

심해 원양성퇴적물은 과거의 해양표층에 서식하던 생물의 잔해가 순차적으로 퇴적되어 당시의 해양환경

을 연속적으로 기록하고 있기 때문에 고해양 연구를 위해 가장 많이 이용된다. 연속적 고해양환경 변천의 연구는 수직적인 층서에서 재동의 흔적이 없는 시추 자료를 이용해야 한다. 그러나 1960년대 초반, 정적인 세계로 인식되었던 심해에서 20~30m/s의 유속을 가진 저층류(bottom current)가 처음 발견되고(Heezen

*Corresponding author: itlee@chonnam.chonnam.ac.kr

et al., 1966), 그 이후 많은 연구자들에 의해 심해환경이 매우 동적인 환경으로 판명되면서, 심해 환경에서도 퇴적물이 광역적으로 재동될 수 있음이 인지되었다(Stow et al., 1998; Shanmugam et al., 1993).

북서태평양과 동해의 일부 지역은 표층의 생물생산성이 높고, 절대연령이 알려진 화산재층이 광역적으로 분포하고 있다. 이와 같은 특징은 고해양학적 연구에 매우 적합하므로 비교적 많은 연구가 수행되는 계기가 되었다(Oba et al., 1991; Murayama et al., 1993; Hyun et al., 1996; Tada, 1997; 한상준 외, 1997; Bahk et al., 2000; Gorbarenko and Southon,

2000; Bahk, 2001). 그러나 동해에서 수행된 연구의 대부분은 저층류에 의해 재동되었을 가능성을 배제하고 해수면 변동에 따른 연속적인 저층환경의 변화에 대해 초점이 맞추어져 있었다. 해수면 변동은 기후 변화와 밀접한 관계를 맺으며, 기후 변화는 저층류의 순환에 직접적인 영향을 미친다. 최근 수 만년 동안 해수면은 급격하게 변화하였으며, 이러한 과정에서 퇴적물을 재동시킬 수 있을 만큼의 빠른 저층수(bottom current)가 동해에 존재하였을 가능성은 적어도 배제할 수 없다. 실제로 북서태평양의 시코쿠분지(Shikoku Basin)나 동해에서 얻어진 최근의 심층순환

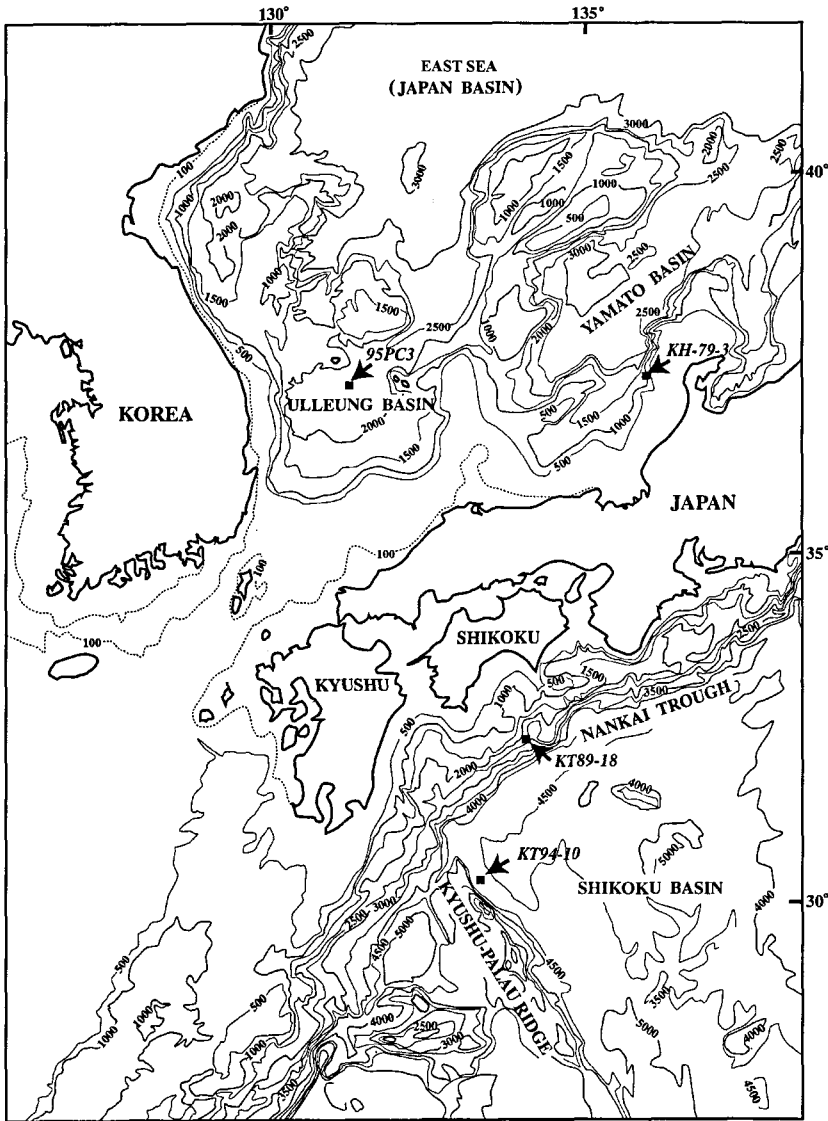


Fig. 1. Locations of piston cores 95PC3 and KH79-3 in the East Sea, KT94-10 and KT89-18 in the Northwestern Pacific Ocean.

자료에서는 비교적 빠른 저층류가 관측되고 있다 (Teramoto, 1990; Takematsu *et al.*, 1997). 따라서 현재는 물론 과거 이 지역의 심층퇴적물 속에 저층류 퇴적물이 포함되어 있을 가능성이 존재한다.

따라서 본 연구의 목적은 1) 동해와 북서태평양에서 채취된 심해퇴적물에 저층류 퇴적층이 존재하는가를 밝히고, 2) 기준층인 화산재층을 이용하여 시대별로 저층류의 활동 양상을 규명하고, 3) 지형적 특징에 따라 동해와 북서태평양에서 저층류의 활동이 어떻게 다른지 비교하는 것이다.

지역개관

동해는 동아시아 대륙과 일본 열도 사이에서 후열도 확장으로 형성된 주변해이고(Yoon, 1994), 외해와 연결된 4개 해협이 모두 수심 140m 이내이지만, 중심부의 수심이 2,500~3,700m로 대양의 특징을 가진다. 해저 지형은 한국대지(Korea Plateau), 야마토해령(Yamato Ridge) 그리고 오키해령(Oki Ridge)을 경계로 북쪽의 일본분지(Japan Basin), 남서쪽의 울릉분지(Ulleung Basin), 그리고 남동쪽의 야마토분지(Yamato Basin)로 구분된다(Fig. 1). 울릉분지는 울릉 해저화산, 울릉도 및 독도 해역을 제외하면 비교적 평탄하고, 한국대지와 오키해령 사이의 울릉분지간 통로(Ulleung Interplain Gap)를 통해 일본분지로 연결되어 북쪽으로 갈수록 수심은 깊어진다. 또 울릉분지간 통로에는 강한 저층류의 작용을 지시하는 침식기원의 해저수로가 발달되어 있다(Chough *et al.*, 2000).

북서태평양에 위치하는 시코쿠분지는 서쪽의 큐슈-파라우 해령(Kyushu-Palau Ridge)과 동쪽의 이즈-오가사와라 해령(Izu-Ogasawara Ridge) 사이에 위치하며, 수심 4,000~5,000m에 이르는 매우 평탄한 분지이다. 분지의 북쪽은 일본열도에 의해 막혀있으며 남쪽은 다수의 해저화산이 발달하므로 사방이 거의 폐쇄되어 있다. 그러나 남쪽의 해저화산 사이에 저층류의 통로역할을 하는 압 게이트웨이(Yap Gateway)가

존재하고, 이곳을 통해 남극저층수가 유입되고 있다 (Teramoto, 1990).

방 법

동해와 북서태평양의 저층류 퇴적층의 존재여부와 시대별 퇴적환경의 변화를 비교하기 위하여, 각 지역에서 2개의 코어자료를 조사하였다(Fig. 1). 채취된 코어의 위경도와 수심 그리고 코어의 길이는 Table 1에 표시하였다. 4개의 코어 중 KT94-10 코어만 본 연구자에 의해 채취·분석되었으며, KT89-18 코어는 Murayama *et al.*(1993)에 의해, 95PC3 코어는 해양연구소(1996), Bahk *et al.*(2000), Bahk(2001), 그리고 Chough *et al.*(2000)에 의해 그리고 KH79-3 코어는 Oba *et al.*(1991)에 의해 보고된 논문 자료를 인용하였다. 각 코어의 길이는 3~9m로 다양하지만, 본 논문에서는 코어 상호간에 비교가 가능한 표층에서 Aira-Tanzawa 화산재(이하 AT로 약술함) 층준까지 한정하여 연구하였다. 화산재층의 절대연대는 주로 Machida and Arai(1983) 자료를 인용하였다(Table 2).

KT94-10 코어는 연 엑스선 사진(X-ray radiograph)과 입도분석 자료를 이용한 퇴적상분석을 통하여 저층류 퇴적층의 존재 여부와 화산재층을 이용하여 시대별로 어떻게 변화하는지 파악하였다. 그리고 인용된 3개의 코어에서도 가능한 KT94-10 코어와 동일한 방법으로 비교하였다. 이렇게 분석된 자료를 이용하여 코어의 퇴적특징을 해석하고, 현재 동해와 서태평양의 저층류 순환패턴을 조사하였다.

코어퇴적물

코어 KT94-10

코어 KT94-10는 큐슈-파라오 해령의 동측에 위치한 시코쿠분지의 수심 4,278m(29° 57.4' N, 133° 26.8' E)에서 채취되었다. 퇴적물은 대부분 생물기원 물질로 구성되어 있으며, 부분적으로 화산재층을 협

Table 1. Position, water depth and length of the piston cores sampled in the East Sea and Northwestern Pacific Ocean.

Area	Core No.	Position		Water Depth	Core Length
		Latitude	Longitude		
North-western Pacific	Shikoku Basin KT94-10	29° 57.4' N	133° 26.8' E	4,278 m	3.2 m
	ShikokuBasin KT89-18	32° 09' N	133° 54' E	2,700 m	7.84 m
East Sea	UlleungBasin 95PC3	36° 52.5' N	131° 04.7' E	2,151 m	10.88 m
	Oki Bank KH79-3	37° 03.5' N	134° 42.6' E	935 m	9.36 m

재한다. 총 3.2m의 코어 중 연구대상 부분은 표층에서 70cm까지이며, 약 25cm 층준을 경계로 상부와 하부로 구별된다. 황갈색의 상부퇴적물에는 방산층이나 규조류가 우세하고, 나노화석(nannofossil)이나 유공층은 거의 관찰되지 않는다. 이와 대조적으로 황회색의 하부는 방산층이나 규조류는 물론 미세화석이나 유공층도 관찰된다(Fig. 2). Ah와 AT 화산재층은 16cm와 64cm 층준에서 관찰되고, 그 이외에도 불연속적인 화산재층이 산재한다. 절대연대로부터 산출된 퇴적율은 현재부터 Ah 화산재층까지는 약 19mm/kyr, Ah와 AT 화산재층 사이는 약 29mm/kyr이다(Table 2).

상부퇴적층에는 생물교란구조가 잘 발달하고 있음에도 불구하고, 희미한 사엽층리나 평행층리와 같은 1차 퇴적구조(primary structure)가 관찰된다. 사엽층리는 10cm 깊이의 한 곳에서 관찰되며 고립된 렌즈상으로 나타난다. 평균입도는 사엽층리나 평행층리에서 5~7 ϕ , 기질에서 8 ϕ , 화산재층은 5~6 ϕ , 그리고 생흔화석이 발달하는 곳에서는 7 ϕ 를 나타낸다(Table 3). 사엽층리와 화산재층은 평균입도나 입도 분포가 거의 유사하지만, 기질은 이 보다 약 2 ϕ 세립한 중앙값을 나타낸다. 그리고 생흔화석이 존재하는 곳에서는 두 개의 중앙값이 관찰되는데, 각각은 사엽층리와 기질에서 보여준 중앙값과 동일한 곳에서 나타난다(Fig. 3). 하부퇴적층에는 1차 퇴적구조는 관찰되지 않고, 생흔교란구조만이 발달하고 있다.

생물교란구조는 전 층에서 발달하고 있으며, 반심해성 또는 심해성임을 나타내는 planolite나 chondrites가 주로 관찰된다. 특히 시코쿠분지의 코어에는 간헐적으로 화산재층이 협재되어 있는데, 화산재층은 같은 화산에서 분화되었다 하더라도 그 시기가 다르면 색깔이 조금씩 달라진다. 한편 생흔구조를 이루는 충진퇴적물은 일반적으로 생물의 작용에 의하여 상부에서 하부로 이동된다. 즉 생흔화석이 화산재로 구성되어 있는 경우, 상부에는 동일한 색깔의 층이 반드시 존재해야 하지만 코어 KT94-10에는 관찰되지 않는 곳도 있다. 이러한 부분은 상부 지층이 침

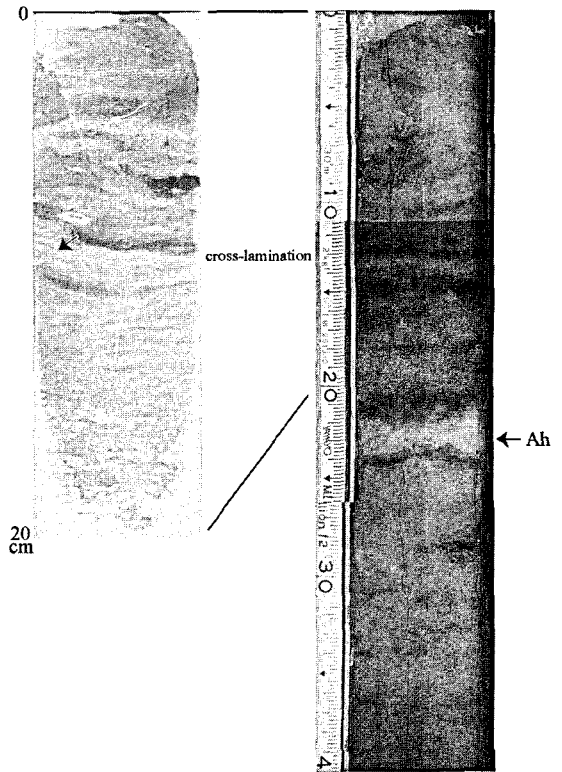


Fig. 2. Representative photo (right) and X-ray radiograph (left) of the KT94-10 core.

식된 내부침식면으로 사료된다. 또한 상기의 침식면은 저탁류에 의해 만들어지는 날카로운 경계면과는 다르게 육안식별의 매우 어렵다. 따라서 이와 같은 침식면은 매우 미묘하고 사진 상에 나타나지 않으므로 모식도로 표현하였다(Fig. 4).

코어 KT89-18

길이 7.83m의 코어(KT89-18)는 시코쿠분지의 북쪽 대륙사면 2,700m의 수심(32° 09' N, 133° 54' E)에서 채취되었다. 총 7.84m의 코어 중 연구대상은 표층에서 610cm까지이며, 140cm를 기준으로 상부와 하부로 구분된다. 회갈색의 상부와 황회색의 하부 퇴적물

Table 2. Sedimentation rate and age of tephra layers in the East Sea and the Northwestern Pacific (Machida and Arai, 1983). K-Ah: Akahoya

Tephra	Age	KT94-10		KT89-18		KH79-3		95PC-3	
		Depth	Sed. rate	Depth	Sed. rate	Depth	Sed. rate	Depth	Sed. rate
K-Ah	6,300 B.P.	16 cm	25 mm/kyr	110 cm	175 mm/kyr	40 cm	64 mm/kyr	-	-
U-Oki	9,300 B.P.	-	-	-	-	60 cm	50 mm/kyr	210 cm	225 mm/kyr
AT	22,000 B.P.	64 cm	30 mm/kyr	610 cm	312 mm/kyr	220 cm	122 mm/kyr	485 cm	212 mm/kyr

Table 3. Results of grain size analysis of Core KT94-10 (SI=Sorting Index, SK=Skewness, KU=Kurtosis and Mz=Mean Grain Size).

Depth(cm)	Lithology or Structure	SI	Silt (wt%)	Clay (wt%)	SK	KU	Mz
2.8~3.1	lamination	1.02	92.3	7.7	0.24	1.45	5.6
3.6~3.9	matrix	1.17	43.8	56.2	-0.22	0.84	8.7
4.3~4.6	trace fossil	1.91	56.5	43.5	-0.39	0.76	7.7
5.0~5.3	matrix or trace fossil	1.80	57.4	42.6	-0.28	0.81	7.6
5.9~6.2	lamination	1.80	53.2	46.8	-0.26	1.02	7.9
8.1~8.4	trace fossil	1.75	66.6	33.4	-0.24	0.76	7.3
9.0~9.3	faint cross-lamination	1.87	61.3	38.3	-0.36	1.28	7.5
11.0~11.3	lamination	1.81	65.9	34.1	-0.36	0.76	7.3
16.8~17.1	ash	1.41	86.7	13.3	0.44	0.88	6.0
18.5~18.8	ash	0.93	93.9	6.1	0.16	1.30	5.5
25.2~25.5	trace fossil	1.80	61.7	38.3	-0.23	1.11	7.7
30.0~30.3	lamination or matrix	1.25	38.8	61.2	-0.32	1.03	8.5

은 생물기원물질인 방산층, 규조, 미세화석 그리고 유공층으로 구성되어 있고, 일부 육성퇴적물도 포함한다. 생물교란구조는 전 층에서 잘 발달하고 퇴적구조가 관찰되지 않으므로, 해저사태나 저탁류에 의한 2차적인 퇴적작용의 영향은 거의 받지 않은 것으로 판단된다(Murayama *et al.*, 1993). Ah 화산재는 110cm, AT 화산재는 610cm의 깊이에 존재하며, 이것으로부터 퇴적율을 산출하면 표층에서 Ah까지는 175mm/kyr이고, Ah에서 AT까지는 312mm/kyr이다.

코어 95PC3

길이 1,088cm인 코어(95PC-3)는 수심 2,151m의 울릉분지 중앙에서 채취되었다(36° 52.5 N, 131° 04.7' E). 코어의 구성물질은 생물기원의 유공층과 규조, 육성기원의 퇴적물이며 부분적으로 화산재를 포함한다. 95PC-3 코어도 퇴적특징과 암상을 기초로 260cm를 기준으로 상부와 하부로 구분된다. 상부는 생물교란 니질층(bioturbated mud)으로 구성되어 있고, 하부는 균질 니층(homogeneous mud)과 엽층리 니질층(laminated mud)이 교호한다. 일부 생물교란층의 생흔화석 충전물은 황철석(pyrite filament)으로 이루어져 있다.

U-Oki와 AT 화산재층은 각각 210cm와 485cm에 존재하며, 이것으로부터 퇴적율은 현재부터 U-Oki 화산재층까지는 225mm/kyr, U-Oki부터 AT 화산재층까지는 212mm/kyr이다(Table 2). 평균입도는 상부층에서 자갈을 포함한 215cm와 120cm의 층준을 제외하면, 전체적으로 약 10φ이다. 하부층은 모래가 63% 포함된 390cm 층준을 제외하면 평균입도가 9φ로 거

의 유사하게 나타나 상부층에 비해 약간 조립한 경향을 보여준다(Table 4).

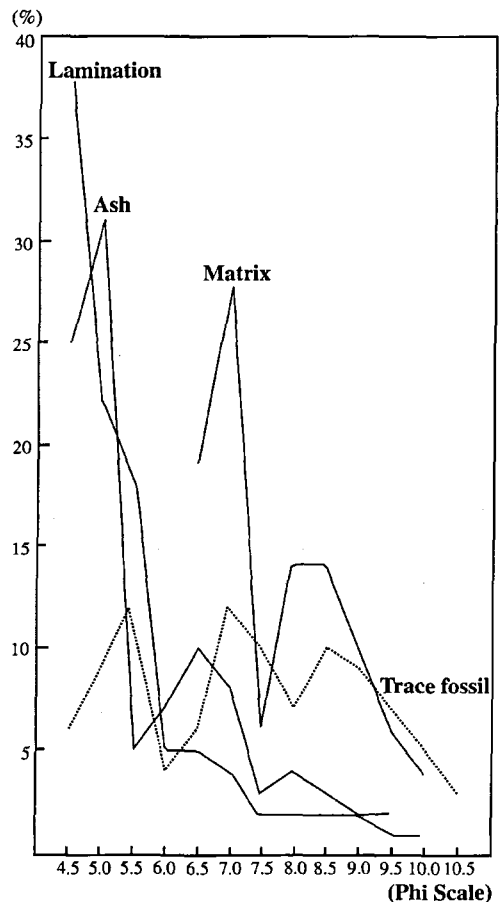


Fig. 3. Grain-size distribution of lamination, ash, bioturbation and matrix layers in the KT94-10 core.

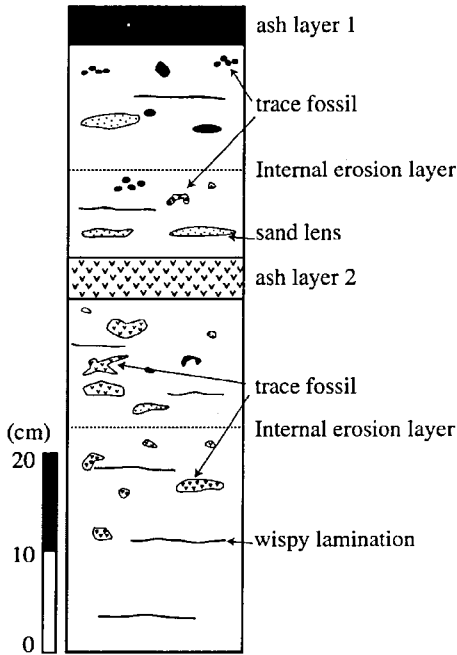


Fig. 4. Internal erosion layers in the fine-grained beds deduced from different composition of ash in trace fossils.

코어 KH79-3

코어(KH79-3)는 오키해령 북동해역의 해저대지인 오키뱅크의 정상부 수심 935m에서 채취되었다(37° 03.5' N, 134° 42.6' E). 이 코어의 색이나 구성물의 특징으로부터 60cm를 기준으로 상부와 하부로 구분

된다. 상부는 암갈색의 균질한 점토로 이루어졌고, 규조나 방산층 등의 규질 각을 가진 화석을 풍부하게 포함한다. 하부도 암갈색을 띠고 저생동물의 흔적이 관찰되는 점토와 부유성 유공층 화석을 포함하고, 1~2mm의 간격의 엽층리층과 무구조의 니질층이 교호하는 특징을 보인다. 코어 하부의 층준에는 자생광물인 황철석이 산재한다.

KH79-3 코어는 Ah, U-Oki, 그리고 AT 화산재를 포함되고 있으며, Ah는 40cm, U-Oki는 60cm, 그리고 AT는 220cm의 위치에 존재한다. 퇴적율은 현재부터 Ah까지는 64mm/kyr, Ah부터 U-Oki까지는 50mm/kyr, 그리고 U-Oki부터 AT까지는 122mm/kyr이다.

해수순환

동해와 북서태평양의 심층순환은 각각 다른 시스템에서 움직이고 있다. 즉, 동해는 지역적인 심층순환이지만 북서태평양은 전지구적인 심층순환에 의해 움직이므로 동해와 북서태평양의 심층순환을 각각 나누어서 설명하였다.

동해

현재, 쿠로시오 해류의 지류인 고온, 고염분의 대마난류는 큐슈의 서측을 통과하여 동해로 유입되고 있다. 동해로 유입된 대마난류는 두 갈래로 분지되

Table 4. Sediment characteristics of Core 95PC-3 (after KORDI, 1996). (SI=Sorting Index and Mz=Mean Grain Size).

Depth (cm)	Textural Composition (%)				Mz	SI
	Gravel	Sand	Silt	Clay		
10	0.0	0.0	9.9	90.1	10.4	1.7
40	0.0	0.0	6.0	94.0	10.5	1.5
70	0.0	0.0	10.2	89.8	10.3	1.8
100	0.0	0.0	6.4	93.6	10.5	1.6
135	0.0	0.0	15.2	84.8	10.4	1.9
150	0.0	0.0	8.2	91.8	10.6	1.7
165	0.0	0.3	11.4	88.3	10.5	1.8
190	0.0	0.3	23.6	76.1	9.9	2.2
215	13.8	1.6	13.8	70.9	8.4	4.8
240	0.4	1.1	18.4	80.1	10.1	2.4
290	0.0	0.7	25.5	73.8	9.9	2.3
315	0.0	0.8	27.1	72.2	9.7	2.3
360	0.0	0.6	32.3	67.2	9.5	2.4
390	0.0	63.5	22.6	13.9	4.9	2.6
420	0.0	2.0	32.2	65.9	9.4	2.5
450	0.0	3.4	33.2	63.4	9.1	2.5
480	0.0	0.9	25.3	73.7	9.8	2.2

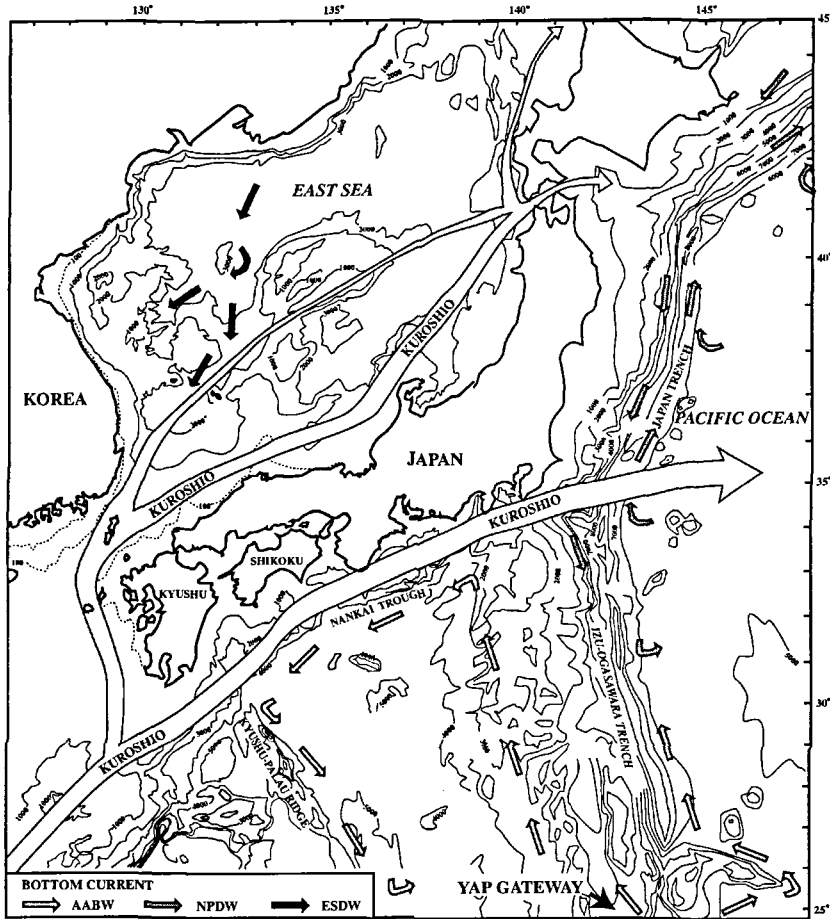


Fig. 5. The surface and deep-sea circulation system around Japanese islands and Korean Peninsula.

며, 그 한줄기는 동해의 서측사면을 따라 그리고 다른 한줄기는 동측사면을 따라 북상한다(Fig. 5). 이때, 대마난류는 가지고 있던 열은 천천히 빼앗기지만 염분은 어느 정도 유지한 상태로 북상한다(Gamo, 1995). 동해 북부의 고위도 지역까지 이동한 대마난류는 겨울철 시베리아부터 불어온 북서계절풍에 의해 수온이 저하되고, 해수증발에 의해 염분이 증가되어 고밀도의 표층수를 형성시킨다. 고밀도의 표층수는 궁극적으로 동해 저층류의 기원이 된다(Gamo, 1995). 이와 같은 저층수의 형성은 매년 겨울 정상적으로 일어나며, 기후의 한냉정도에 따라 형성량이 달라진다. 따라서 동해를 순환하는 저층수의 세기는 기후에 따라 그 형성량이 변화하며, 그에 대응하여 심층수 순환의 속도도 강약을 반복한다(Nitani, 1972). 이러한 사실은 1969~1984년까지 15년 동안 일본 기상청에 의해 일본분지에서 직접 측정된 자료에서 간

접적으로 유추할 수 있다(Fig. 6). 이 기간 동안 일본분지 저층수의 용존산소 농도와 두께가 점진적으로 감소하고 있는데, 이것은 최근 동해에서 저층류 형성량이 감소하고 있음을 반영하는 것이다. 결과적으로 동해의 저층류 순환속도가 천천히 느려지고 있는 것을 의미한다(Gamo, 1995). 한편 1993년부터 동해의 순환을 이해하기 위해 조직된 CREAMS(Circulation Research of the East Asian Marginal Seas)의 연구그룹에서는 일본분지의 심층에 6개의 유속계를 설치하여 저층류를 관측하였다. 그 결과, 2,000 m의 수심에서 남쪽방향으로 약 15cm/sec의 최대 유속이 관측되었으며(Takematsu *et al.*, 1996; 1997), 울릉도와 독도 사이에 위치하는 울릉분지간 통로에서 측정된 해류자료에서도 남동쪽 방향으로 약 10cm/sec의 최대 유속이 관측되었다(해양연구소, 1997). 위의 자료를 요약하면, 동해의 북부지역에서 형성된 저층수는 15cm/

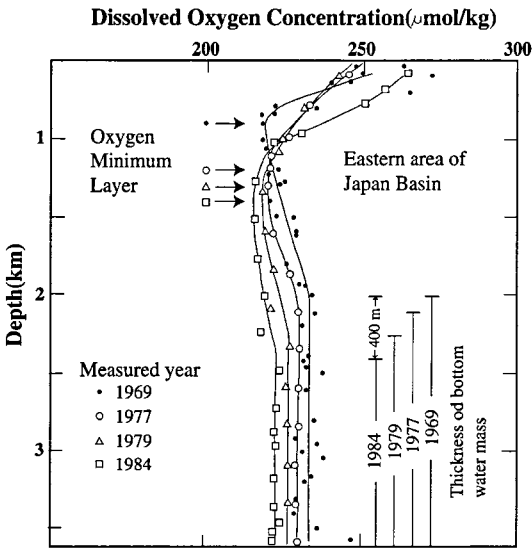


Fig. 6. Change of dissolved oxygen concentration measured in the Japan Basin during 15 years.

sec 이하의 유속을 가지고 반시계방향으로 순환하고 있음을 지시하고 있다.

북서태평양

북서태평양 시코쿠분지의 저층수순환은 지역적인 동해의 해수순환과는 다르게, 전지구적인 남극저층수 (Antarctic Bottom Water: AABW)의 유입에 의해 이루어진다. 남극저층수는 남극 주변의 웨델해(Weddell Sea)에서 만들어지며 형성된 이후, 주 지류는 남극대륙을 순환하다가 그 일부가 태평양으로 유입된다. 태평양으로 유입된 남극저층수는 오스트레일리아, 뉴질랜드 외해를 거쳐 마리아나 해구에 도착하게 된다. 이곳에서 남극저층수는 다시 두 개의 지류로 분리되며, 하나는 이즈-오가사와라 해령(Izu-Ogasawara Ridge)의 동쪽을 따라 북상하고 다른 한 지류는 압게이트웨이(Yap Gateway)를 통해 시코쿠분지로 유입한다(Fig. 5). 시코쿠분지를 유입한 남극저층수는 3,000~4,000 m의 수심에서 반시계방향으로 순환하고 있다. 특히 시코쿠분지의 북쪽과 서쪽의 저층에서는 강한 경계류가 형성되는 곳으로 보고되고 있다 (Teramoto, 1990). 측정된 유량과 유속은 북쪽 경계에서는 서쪽 방향으로 4~8cm/sec, 서쪽 경계에서는 남서 방향으로 4~8cm/sec로 관측되었다. 남극에서 저층수가 형성된 이후 시코쿠분지까지 이동하는데 필요한 시간은 약 1500년이 소요된다(Teramoto, 1990). 이

지역 저층수의 유속 변화는 남극에서 만들어지는 저층류의 형성량에 밀접하게 관계된다.

토 론

북서태평양과 동해에서 채취된 4개의 코어 중, 연구에 사용된 부분은 표층에서 AT 화산재층까지이며, 이것의 퇴적연대는 22,000년 전에서 현재에 이르는 것이다. 이 사이의 퇴적층은 공통적으로 두 개의 층준으로 구분되며, 그 경계부 시기는 화산재층을 토대로 산출하였다. 즉, 코어 95PC3은 상부층의 길이 260cm 중 9300년 전을 표시하는 U-OkI 화산재가 210cm 지점에 분포하는 것과, 코어 KT94-10은 상부층의 길이 25cm 중 6300년 전을 지시하는 Ah 화산재층이 약 16cm 지점에 위치하는 것을 외삽하면 경계면의 연대는 약 10,000년 부근으로 추정된다. 즉 상부와 하부는 10,000년 전을 경계로 구분된다. 그리고 코어 KT89-18과 KH79-3의 경우는 인용된 논문에서 자료가 빈약하므로 저층류퇴적물의 존재여부를 확인하는 것이 불가능하여 주로 KT94-10과 95PC-3 코어를 이용하여 두 지역을 비교하였다.

KT94-10 코어의 상부에서는 잘 발달된 생물교란구조, 낮은 퇴적율, 내부 침식면, 그리고 렌즈상의 사엽층리가 존재하는 특징을 보인다. 이와 같은 퇴적특징은 심해환경에서 흔히 관찰되는 저탁류퇴적층이나 반원양성 퇴적물의 특징과는 양상이 다르다. 즉, 저탁류퇴적층은 하나의 유니트에서 상방세립이나, 측방으로 발달된 사엽층리 그리고 기저면의 명료한 침식면이 나타나는 것이 일반적이다. 그러나 KT94-10의 상부에서는 저탁류퇴적층이라고 할 수 있는 뚜렷한 유니트는 존재하지 않고, 사엽층리가 고립된 렌즈상으로 관찰되며, 그리고 생흔화석을 통해 내부침식면의 존재가 인지된다. 또 반원양성퇴적물에는 사엽층리나 내부침식면은 나타날 수 없다. 따라서 이러한 퇴적층의 조합은 저탁류퇴적층이나 반원양성 퇴적물보다는, Hollister and Heezen(1972), Stow(1985), Stow et al. (1998) 등이 보고한 저층류퇴적물(bottom-current deposit)에 가깝다.

Planolite나 chondrites와 같이 두 가지 이상의 생흔 화석이 코어 KT94-10의 전 층에서 다수 관찰되는 사실은 이 퇴적물이 퇴적되는 동안 생물이 서식할 수 있을 정도로 산소가 공급되었다는 것을 의미한다. 이와 동시에 층 내부에서 관찰되는 사엽층리와 침식

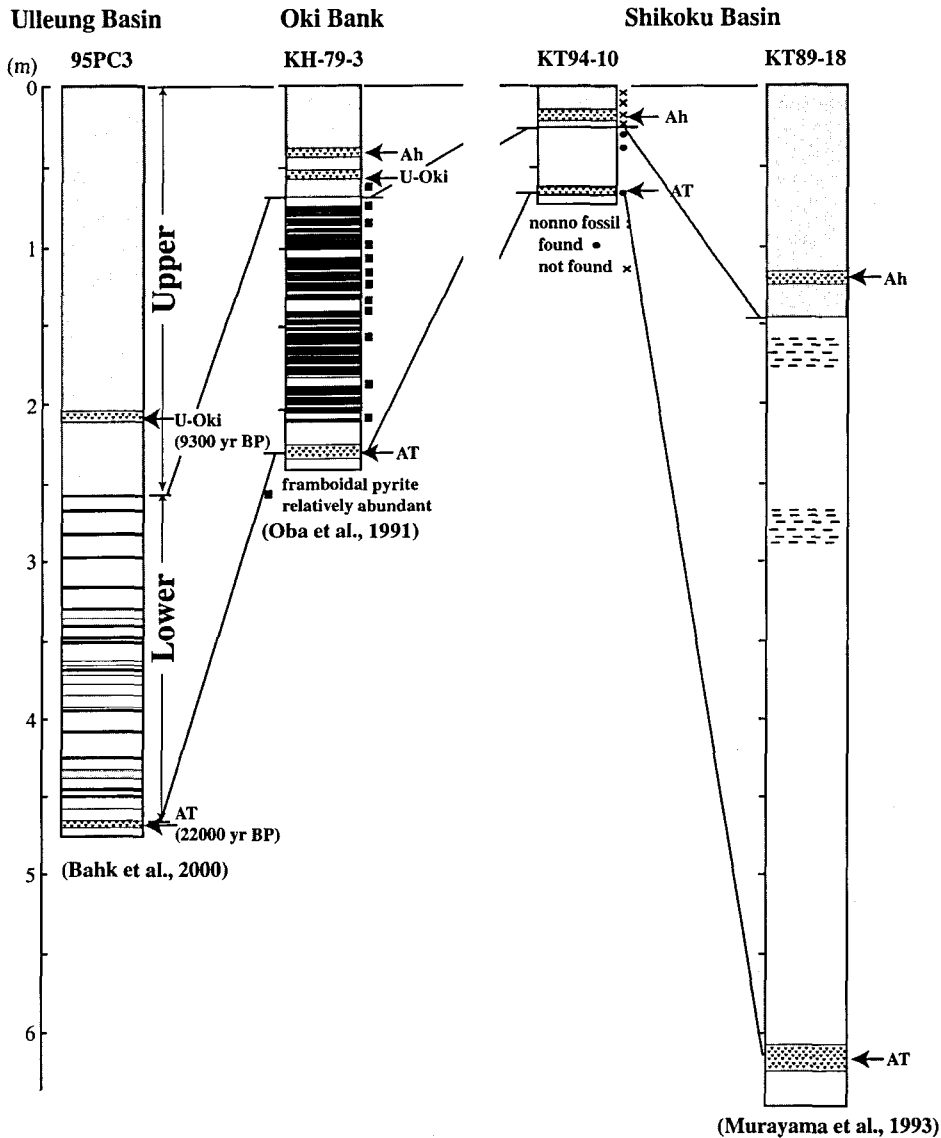


Fig. 7. Summary of sedimentary logs and correlation of cores. Solid arrows indicate tephra layers with known eruption ages.

면의 존재는 충분한 산소의 공급뿐만 아니라 빠른 저층류에 의해 퇴적물이 재동된 것을 의미한다. 이와 대조적으로 코어 KT94-10의 하부퇴적층에는 저층류와 관련된 어떠한 퇴적구조도 관찰되지 않지만, 생흔 화석이 전 층에서 잘 발달하고 있다. 따라서 이 당시의 저층류는 퇴적물을 재동시킬 수 있는 유속을 가지지는 못하였어도, 산소를 원활하게 공급할 정도의 흐름은 유지되었던 것으로 사료된다.

현재 KT94-10이 채취된 장소는 서안경계류의 영향을 받는 지역으로 평균 약 4~8 cm/sec의 저층류가 관

측된 지역이다(Teramoto, 1990). 그러나 4~8cm/sec의 유속은 실트 크기의 세립퇴적물조차 움직이게 할 수 없다. 그러나 이 측정치는 1시간 중 5분만의 흐름을 측정하여 평균하여 기록한 값이므로, 실제 최대유속보다 낮은 값이라고 할 수 있다. 따라서 순간 최대유속은 실제 측정된 값보다 클 수 있으므로, 현재 조건에서도 퇴적물이 재동되었을 가능성이 높다. 결과적으로 코어 KT94-10의 상부에서 관찰되는 퇴적물은 이와 같은 흐름에 의해 퇴적된 저층류퇴적물로 해석할 수 있다. 코어 KT94-10의 상부에서는 저층류와 관련된 퇴

적물이 존재 하지만, 하부에서는 어떠한 저층류의 흔적을 관찰할 수 없다. 이러한 사실은 저층류순환이 22,000년에서 10,000년 전까지는 느리게 순환하였지만, 10,000년을 경계로 순환속도가 빨라졌다는 것을 의미한다. 한편 Murayama *et al.*(1993)은 코어 KT89-18에서 부유성 유공충을 이용하여 과거의 심층수순환 속도에 대해 연구하였으며, 그 결과 남극에서 형성된 저층수가 시코쿠분지에 도착하는 시간이 약 18,000년 전에는 약 2000년, 그리고 최근은 약 1500년의 속도로 순환한다는 값을 얻었다. 이것은 코어 KT94-10 퇴적물에서 상부층이 하부층보다 저층수의 순환이 더 원활하였다는 해석을 뒷받침해주는 것이다.

코어 95PC3과 KH79-3은 퇴적물의 차이가 있지만 역시 10,000년 전을 경계로 퇴적상이 달라지며, 또 그 특징도 매우 비슷하다. 두 코어 상부의 퇴적특징은 생물교란구조는 잘 발달되어 있지만, 그 외의 퇴적구조는 거의 관찰되지 않고 있다. 이러한 특징으로 미루어 북서태평양의 하부층과 마찬가지로 이 시기에 생물이 서식할 수 있을 정도로 산소의 공급이 원활하였던 것으로 사료되지만, 퇴적물을 재동시킴 정도의 빠른 저층류는 존재하지 않았던 것으로 판단된다. 한편 하부의 퇴적층은 엽층리 니질층과 황철석이 산재하는 것이 특징이다. 특히 황철석은 저층류가 순환되는 곳이면 존재하지 않으므로, 이 시기는 저층류의 순환이 거의 정체되어 있었던 것으로 판단된다.

현재 동해의 일본분지에서는 최대 15cm/sec의 비교적 빠른 저층류가 관찰되어 저층류퇴적물의 존재 가능성이 시코쿠분지 보다 오히려 높아 보이지만, 본 연구에 이용된 코어에서는 저층류퇴적물이 시코쿠분지의 KT94-10의 상부에서만 저층류퇴적층이 관찰되고 그 이외의 코어에서는 관찰되지 않고 있다. 물론 동해북부에서 형성된 저층류는 일본분지에서 빠르게 흐르지만, 울릉 분지간통로를 통해 울릉분지에 유입되면서 저층류가 약화되어 퇴적물을 재동시키지 못하였을 가능성도 있다. 또 시료채취 장소가 저층류의 흐름이 활발한 대륙대가 아니라, 미약한 분지의 한 가운데이기 때문일 수도 있다. 본 연구에서 고찰된 동해의 코어는 22,000년 전부터 현재까지의 층준이며 기술된 자료만으로는 저층류퇴적물의 징후를 관찰하지 못하였지만, 현재의 심층순환의 자료로부터 유추하면 다른 코어에서 관찰될 수 있는 가능성이 존재한다. 동해는 오늘날과 같은 대양의 모습을 갖춘 후, 전 지구적 해수면 변동을 받았을 것이기 때문이다. 현재

동해와 외해를 연결하는 4개의 해협이 모두 140m 이하인 점을 고려하면 해수면 변동에 따라 동해는 외해와 고립되거나 연결되는 일을 반복하였을 것이며, 심층순환은 그 상황에 맞는 형태로 존재하였을 것이다. 한편 Fig. 6은 15년 동안 일본분지에서 측정된 용존 산소의 농도를 관측한 자료이다. 일본분지의 저층수는 불과 15년 동안에 그 두께가 약 400m나 얇아졌으며, 이는 급격한 유속 변화가 짧은 시간동안 일어날 수 있음을 암시하는 것이다. 즉 해수면의 변동과정에서 어떠한 시기에는 울릉분지에서도 퇴적물을 운반시킬 강력한 순환이 존재할 수 있고, 그에 따른 저층류 퇴적물이 형성되었을 가능성을 예측할 수 있다.

두 지역의 코어에 기록된 퇴적특징은 공통적으로 10,000년 전을 기준으로 저층류의 순환에 큰 변화가 일어났음을 보여주고 있다. 즉 저층류는 22,000~10,000년 전 사이에는 상대적으로 느리게 순환하다가, 10,000년~현재에 이르러 빠르게 순환하게 되었다. 전반적으로 동해와 북서태평양의 코어 퇴적물에서는 같은 층준일지라도 동해보다는 북서태평양 지역에서 심해저층수의 순환속도가 빠르게 나타내고 있다.

결 론

북서태평양의 코어 KT94-10 상부에는 낮은 퇴적율, 렌즈상의 고립된 사업층리, 뚜렷한 유니트의 부재, 생물교란구조 그리고 내부침식면 등이 관찰되는데, 이러한 퇴적특징의 조합은 저탁류퇴적층이나 반원양성 특징과는 구분되는 것으로 해석된다. 현재 이 지역의 심층은 서안경계류의 영향으로 강한 저층류가 흐르고 있으므로, 상부퇴적층은 이러한 흐름에 의해 퇴적된 저층류퇴적물로 해석된다. 그러나 같은 시기에 동해의 퇴적층에는 저층류와 관련된 어떠한 퇴적 특징도 관찰되지 않고, 단지 생물교란구조만이 관찰되므로 동해 심층수는 상대적으로 느리게 흐르는 것으로 해석된다. 한편, 코어 KT94-10 하부에는 생물교란작용의 흔적이 다수 관찰되지만, 저층류와 관련된 퇴적구조는 관찰되지 않는다. 대조적으로 동해의 코어 95PC3이나 KH79-3 하부에는 평행층리나 황철석과 같은 환원 상태를 나타내는 증거들이 관찰됨으로서, 이 시기에 동해의 해수순환이 정체되었던 것으로 해석된다. 즉, 북서태평양과 동해의 심층수순환은 약 10,000년 전에 큰 변화가 일어났으며 22,000~10,000년 전 사이에는 상대적으로 느리게 순환하다

가, 10,000년 전부터 현재까지는 좀 더 빠르게 순환했던 것으로 사료된다. 특히, 22,000~10,000년 전 사이에 동해의 심층순환은 순환이 멈추었던 것으로 사료된다. 그리고 동일 시기의 저층류순환을 4개의 코어에 한정해서 비교해 보면, 북서태평양이 동해보다 상대적으로 빠르게 순환하는 것으로 해석된다.

사 사

이 논문은 한국 학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었습니다 (이인태 1997년 박사후 연수과정의 지원사업; 전승수, KRF-1998-001-000889). 또한 유익한 토론을 해 주신 김승범박사에게도 감사사를 드립니다. 그리고 본 논문을 심사해 주신 허식박사님과 익명의 심사위원에게도 감사드립니다.

참고문헌

- 한국해양연구소, 1996, 한국대수심 해역의 지구적 해저환경 연구(2~3차년도). 과학기술처, 548 p.
- 한국해양연구소, 1997, 동해 해분의 해양환경 변화와 지구 조 진화연구(1차년도). 해양수산부, 657 p.
- 한상준 · 허식 · 박장준 · 천종화 · 김석현 · 우한준 · 이희준 · 홍기훈 · 신동혁 · 이희일, 1997, 동해 울릉도와 독도주변 울릉분지 북동해역의 고해양연구. 해양연구, 19-7, 71-90.
- Bahk J.J., 2001, Late Quaternary sedimentation and paleoceanography of the Ulleung Basin, East Sea. Seoul National Univ. PhD Thesis, 99 p.
- Bahk, J.J., Chough, S.K., and Han, S.J., 2000, Origins and paleoceanographic significance of laminated muds from the Ulleung Basin, East Sea (Sea of Japan). *Marine Geology*, 162, 459-477.
- Chough, S.K., Lee, H.J., and Yoon, S.H., 2000, *Marine Geology of Korean Seas*. Elsevier, 313 p.
- Gamo, T., 1995, Deep-sea circulation in the East Sea(Japan Sea). *Monthly Science*, 65-5, 316-323(in Japanese).
- Gorbarenko, A.S.A. and Southon, J.R., 2000, Detailed Japan Sea paleoceanography during the last 25kyr: constraints from AMS dating and 1/4O of planktonic foraminifera. *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology*, 156, 177-193.
- Heezen, B.C., Hollister, C.D., and Ruddiman, W.F., 1966, Shaping of the continental rise by deep geostrophic contour currents. *Science*, 152, 502-508.
- Hollister, C.D. and Heezen, B.C., 1972, Geological effects of ocean bottom currents. In: (Ed) Gordon, A.L., *Studies in physical oceanography - A tribute to George Wust on his 80th birthday*. Gordon and Breach, New York, 2, 37-66.
- Hyun, S.M., Ahagon, N., Saito, S., Ikehara, M., Oba, T., and Taira, A., 1996, Geochemical evidence for spatial paleoproductivity variations in the Northwest Pacific (Shikoku Basin) during the last glacial maximum. *Journal of Korean Society of Oceanography*, 31-4, 207-216.
- Machida, H. and Arai, F., 1983, Extensive ash falls in and around the sea of Japan from large late Quaternary eruptions. *Journal of Volcanology Geothermal Research*, 18, 151-164.
- Murayama, M., Yasuda, H., Nakamura, T., and Taira, A., 1993, Deep-sea circulation change in the Northwestern Pacific Ocean during 35,000B.P. *Monthly Ocean*, 25-6, 337-343(in Japanese).
- Nitani, H., 1972, Research in hydrography and oceanography. Shoji, D ed., Hydrographic Department of Japan, 151 p.
- Oba, T., Kato, M., Kitazato, H., Koizumi, I., Omura, A., Sakai, T., and Takayama, T., 1991, Paleoenvironmental changes in the Japan Sea during the last 85,000 years. *Paleoceanography*, 6, 499-518.
- Shanmugam, G., Spalding, T.D., and Rofheart, D.H., 1993, Processes, sedimentology and reservoir quality of deep-marine bottom-current reworked sands (sandy contourites): an example from the Gulf of Mexico. *American Association of Petrology Geological Bulletin*, 77, 1241-1259.
- Stow, D.A.V., 1985, Fine-grained sediments in deep water: An Overview of processes and facies Models. *Geomarine Letters*, 5, 17-23.
- Stow, D.A.V., Faugeres, J.C., Viana, A., and Gonther, E., 1998, Fossil contourites: a critical review. *Sedimentary Geology*, 115, 3-31.
- Tada, R., 1997, Dansgaard cycle. *Monthly Science*, 67-8, 597-605(in Japanese).
- Takematsu, M., Hase, H., Nagano, Z., and Kita, T., 1996, Moored instrument observations in the Japan Sea proper water. *Proceedings of the CREAMS'96 international symposium*, 101-105.
- Takematsu M., Nagano, Z., Ostrovskii, A.G., and Kita, T., 1997, Seasonal deep current in the sea of Japan. *Proceedings of the CREAMS'97 international symposium*, 25-30.
- Teramoto, T., 1990, Report of study on deep-sea water circulation process. Monbusho Grant Report, 157 p.
- Yoon, S.H., 1994, The eastern continental margin of Korea: seismic stratigraphy, geologic structure and tectonic evolution. Unpublished Ph.D. Thesis, Seoul National University, 245 p.