

동해 표층수중 용존 Pb, Cd의 분포 특성

윤상철¹ · 윤이용^{2,*}

¹국립수산과학원 수산해양종합정보과
²가톨릭관동대학교 공과대학 보건환경학과

Distributions of Dissolved Pb and Cd in the Surface Water of East Sea, Korea

Sang Chol Yoon¹ and Yi Yong Yoon^{2,*}

¹Fishery and Ocean Information Division, NFRDI, Busan 619-705, Korea

²Department of Health & Environment, Catholic Kwandong University, Gangnung 210-701, Korea

요 약

2009년 7월 3일부터 7월 27일까지 러시아 조사선 R/V Lavrentyev를 이용하여 러시아 연안으로부터 4개의 Line(D, R, E, A)을 따라 표층 30 m 수심의 시료를 26개 정점에서 채수하여 Pb와 Cd의 농도를 분석하였다. 해역별로 Pb와 Cd의 농도를 비교하면, 연안역에서는 러시아 연안(평균 Pb, 0.08; Cd, 0.10 nM)보다 우리나라 동해 연안의 농도(평균 Pb, 0.49; Cd, 0.11 nM)가 Pb의 경우 6.0배 높은 반면 Cd의 농도는 비슷하게 나타났으며, 난수역(평균 Pb, 0.22; Cd, 0.10 nM)은 냉수역(평균 Pb, 0.13; Cd, 0.14 nM)에 비해 Cd의 농도는 0.4배 낮은 반면, Pb의 농도는 약 1.7배 높게 나타났다. 또한 Pb와 Cd의 농도 분포는 표층 수온 10 °C를 기점으로 구분되는 특성을 보이고 있다. 10 °C 이하에서 수온이 감소함에 따라 농도가 증가하는 추세로 한류수의 농도가 주변 연안이나 외해의 해수보다 농도가 다소 높게 나타났으며, 10 °C 이상에서는 온도가 증가함에 따라 농도가 증가하는 추세로서 대만난류와 인접국가(우리나라와 일본)의 직접적인 영향권에 있는 울릉분지에서 높은 농도를 보이고 있다. 특히 Pb의 경우, 고온의 대만난류가 유입되는 정점 D10을 최고점으로 고위도로 북상할수록 수온의 감소와 더불어 농도의 감소 현상이 두드러지게 나타났으며, 서지중해와 동태평양의 측정치보다 다소 높게 나타나서 대만난류를 통한 유입량과 우리나라와 일본으로부터 대기를 통한 전달량의 영향이 상대적으로 클 것으로 추론할 수 있다. 따라서 동해 표층수의 Cd농도 분포는 주로 동해에 존재하는 다양한 수괴의 혼합에 의해 영향을 받는 반면, Pb는 대기와 대만난류를 통한 전달량에 의해 크게 영향을 받으며, 기타 강물을 통한 유입과 유,무기성 입자물질과의 상호작용에 의해 결정될 것이다.

Abstract – The distributions of Pb and Cd concentrations in the surface seawater of the East Sea were investigated during the R/V Lavrentyev cruise (July 2009) in which four transects from Russia shore to South were conducted to collect 26 surface water samples. The total dissolved concentrations of Pb and Cd were measured using ICP-MS (Perkin Elmer, DRC-e). In the coastal area, their concentrations of Russia shore (Pb, 0.08; Cd, 0.10 nM) were comparable for Cd but on the other hand, 6 times lower for Pb than Korea shore (Pb, 0.49; Cd, 0.11 nM). In the subregion, their concentrations of Warm region (Pb, 0.22; Cd, 0.01 nM) were about 1.7 times higher for Pb but 0.4 lower for Cd than Cold region (Pb, 0.13; Cd, 0.14 nM). The distributions of Pb and Cd concentrations were divided by lowest level at 10 °C of water temperature. Below 10 °C, Pb and Cd concentrations increased when surface water temperatures decreased. Above 10 °C, their concentrations increased with temperature, which showed highest concentrations in the Ulleung basin, directly influenced by flux from East Korean Warm Current and neighboring countrys (Korea and Japan). Specially, in the case of Pb, the concentrations decrease remarkably with temperatures decrease from D10 directly influenced by flux from East Korean Warm Current, which shows highest Pb level. By comparing with other sea areas (Western Mediterranean, East Pacific), Pb concentrations in the East Sea were a little higher. The influence of East Korean Warm Current and neighboring countrys (Korea and

*Corresponding author: yoonyy@cku.ac.kr

Japan) may be relatively important. Therefore, the distribution of Cd may primarily be influenced by mixing of different water masses while the distribution of Pb may mainly be influenced by flux from East Korean Warm Current and atmospheric inputs. River inputs and interaction with particulate materials may also some roles for the distribution of these elements.

Keywords: Lead(납), Cadmium(카드뮴), the East Sea(동해), Ulleung basin(울릉분지), Japan basin(일본분지)

1. 서 론

미량금속은 자연적인 경로(광물을 포함하고 있는 암석의 풍화, 비산먼지, 산불 등)를 통하여 해역으로 유입되며, 인간의 활동으로부터 발생한 금속들은 대기를 통한 낙진, 강을 통한 유입, 직접적인 해양투기를 통하여 해역으로 유입된다. 외해에서는 주로 대기를 통한 강우나 직접적인 침강에 의해 농도가 조절되며, 유입되는 미량금속의 종류와 성상에 따라 유입량도 서로 다르다(Jickells[1995]).

해양으로 유입된 미량금속은 식물플랑크톤의 대사작용 및 입자물질에 흡착되어 해저로 침강 퇴적되며, 식물플랑크톤의 분해와 입자물질에서 탈착되어 재생산되는 순환기작을 갖게 된다(Laslett [1995]; Le Gall *et al.*[1999]; Tankere *et al.*[2001]). 일부 전이금속(transition metal)은 생명체가 살아가는데 필수원소이며, 식물플랑크톤의 성장에 중요한 역할을 하는 반면, Pb와 Cd은 일반적으로 생물체들의 대사활동에 필요하지 않으며, 낮은 농도에서 독성을 띠게 된다.

Pb은 인간의 활동에 의하여 대기로 유입되는 양이 자연적인 유입량 보다 훨씬 많으며, 대부분 대기를 통하여 해양으로 전달된다. 특히 1950년 이후 테트라에틸납이 가솔린첨가제로 사용되면서 이들 대부분이 대기로 유출되었으며, 가솔린 첨가제에서 Pb의 사용이 제한된 이후 일부 해양에서 Pb의 농도가 감소되었다(Jickells[1995]; Wu and Boyle[1997]). Pb은 입자물질에 강하게 흡착되는 특성을 보이며(Balls[1985]), 해수중 부유물질에 의한 scavenging 기작에 따라 Pb의 농도 분포가 영향을 받는다(Laslett[1995]), Celtic Sea에서 Pb은 표층에서 200m 수층까지 농도가 감소하는 경향을 보였으며 일부 수역에서는 인산염, 질산염과 유의한 양의 상관성을 보임에 따라 생물학적 영향의 가능성도 제기되었다(Cotté-Krief *et al.*[2002]). 서북대서양의 연구에서도 scavenging type의 제거기작을 나타냈으며, 연안역에서 멀어질수록 농도가 증가하여 외해에서 높은 농도를 보이고 수심이 증가함에 따라 농도가 감소하는 분포 특성을 나타냈다(Wu and Boyle[1997]). Black sea에서도 연안에서 보다 외해에서 용존 Pb의 농도가 높게 나타났다(Tankere *et al.*[2001]). 우리나라 동해의 경우, 황사에 의한 대기로부터의 유입 때문에 울릉분지에 비해 일본분지에서 ^{210}Pb 의 높은 농도가 관측되었으며(Kim and Kim[2012]), Pb의 수직분포는 계절과 해역에 따라 다소 차이가 있으나 대부분의 표층에서 최대 농도를 보이고 수심이 증가하면서 농도가 감소하는 scavenging 기작을 나타내었다(Kim *et al.*[2002]).

전 세계 해양으로 유입되는 Cd의 총량은 약 8,000 톤/년 정도로 추산되며, 이 중 절반이 인간의 활동에 의한 것이다. 강물과 대기를

통한 유입량이 거의 비슷하며, 해양에서 Cd의 물질수지는 불균형 상태로 농도가 서서히 증가하고 있는 실정이다(Clark[2001]). Cd은 일본에서 발병한 이타이이타이병의 원인물질로 판명됨에 따라 해양으로 배출하지 말아야 할 물질들의 “블랙리스트”에 등재되어 있다.

Cd은 대부분 해양에서 용존상으로 존재하며(Balls[1985]), 지중해 북서부해역에서는 대기로부터 표층수로 유입되는 Cd의 전량이 용존형태로 유입되었다(Guieu *et al.*[1997]). Cd의 분포는 표층에서 식물플랑크톤에 의해 흡수(uptake)되어 낮은 농도를 보이며, 저층에서 재생산에 의해 농도가 증가하는 경향을 보인다(Abe[2005]). 따라서 질산염과 인산염의 농도분포와 유사하며, Cd/PO₄-P ratio를 이용하여 해역간의 생지화학적 순환과 해역의 특성을 구명하기 위한 연구가 진행되었다(Saager *et al.*[1992]).

우리나라에서 미량금속에 관한 연구는 일부 만(bay)이나 강 하구 또는 연안역에서 주로 수행되었으며(Hong *et al.*[1988]; Lee[1992]; Yoon and Kim[1998]; Chin *et al.*[2000]; Jin *et al.*[2000]; Choi and Lee[2001]; Hahn *et al.*[2007]), 동해에서의 연구도 일부 수역에 국한되어 있다(Yang[1997]; Kim *et al.*[2002]). 동해로 유입되는 강이나 하천을 통한 Cd 과 Pb의 유입량과 하구에서의 거동특성에 관한 연구가 강릉 남대천(Yoon and Kim[1998])과 Amur 강(Kudo and Matsunaga[1998])에서 수행된 바 있으며, 우리나라 근해 일부 정점에서도 수행된 바 있다(Kim *et al.*[2002]; Kim *et al.*[2007]).

이와같이 동해 수역에서 용존 미량 금속에 대한 연구는 일부 연안과 울릉 분지내에서 수행되었으며, 동해 전반에 대한 연구는 전무한 실정이다. 따라서 이번 연구를 통하여 울릉분지 뿐만 아니라 동해에서 가장 큰 면적을 차지하고 있는 일본분지를 포함한 동해 북부 해역에서 Pb와 Cd의 수평분포를 조사하고 분포의 특성과 물리적인 인자와의 관계를 구명하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2009년 7월 3일부터 7월 27일까지 러시아 Pacific Oceanological Institute 연구선 R/V Lavrentyev를 이용하여 러시아 연안으로 부터 4개의 Line(D, R, E, A)을 따라 26개의 정점에서 표층 시료를 채수하여 분석하였다(Fig. 1).

Pb와 Cd을 분석하기 위한 시료는 Go-Flo 채수기를 미리 산세척한 후 현장에서 나일론 로프에 장착하여 사용하였으며, 조사선에 의한 오염의 가능성을 최소화하기 위해 수심 30 m 수층의 해수를 채수하였다. 채수된 시료는 즉시 청정벤치(Clean bench) 내에서 미리 산세척된 0.45 μm 멤브레인 여과지를 이용하여 감압 여과하였다. 초기 여과한 해수로 시료병과 여과기구를 세척하였고, 이 과정을

Table 1. Recoveries of the analytical method (CASS-4)

	Pb(nM)	Cd(nM)
Certified values	0.047±0.017	0.231±0.027
This study	0.053±0.003	0.276±0.006
Recovery(%)	112±6	120±2

3회 반복 실시하여 시료병이나 용기에 의한 오염을 최소화하였다. 여과한 시료는 500 mL 시료병(low-density polyethylene; LDPE)에 옮기고 고순도 질산(HNO₃, Ultra pure grade, Merck)을 이용하여 pH 2 이하로 조정한 후 비닐로 이중 포장하여 분석 전까지 냉장 보관하였다.

용존 미량금속 분석에 사용된 모든 실험기구는 HCl과 HNO₃를 이용하여 미리 산세척한 후 사용하였다. 금속의 추출은 Batterham and Parry[1996] 법을 따랐으며, APDC/NaDDC와 Di-isobutyl ketone (DIBK)으로 추출한 후 Hg로 역추출하여 유도결합플라즈마질량분석기(ICP-MS, Perkin Elmer, DRC-e)로 분석하였다. 시료분석의 신

뢰성 확보를 위해 캐나다 해수 인증 표준물질 CASS-4 (National Research Council Canada, NRCC)를 시료와 동일하게 추출하여 측정하였다. 세 번의 독립적인 추출 분석으로 부터 얻은 표준물질의 회수율(recovery)은 Pb 110%, Cd 120%이며, 표준편차는 Pb 6%, Cd 2%로서 분석의 신뢰성을 검증할 수 있었다(Table 1).

3. 결 과

3.1 조사수역의 수괴 및 해류 특성(Yoon *et al.*[2014])

동해로 유입되는 해류는 쿠로시오 해류 기원의 대마난류(TWC: Tsushima Warm Current)가 대한해협을 통해 동해로 유입되고, 대마난류의 일부는 우리나라 동해 연안과 일본 서해안을 따라 북상하며(EKWC: East Korean Warm Current) 동해에 열과 염을 공급한다. 동해 북부해역에서는 시베리아 연안을 따라 저온저염의 리만한류(LCC: Liman Cold Current)가 블라디보스토크까지 남하하며, 리만한류 기원의 수괴보다는 고수온의 특성을 가진 북한한류(NKCC: North Korean Cold Current)가 동해로 유입된다.

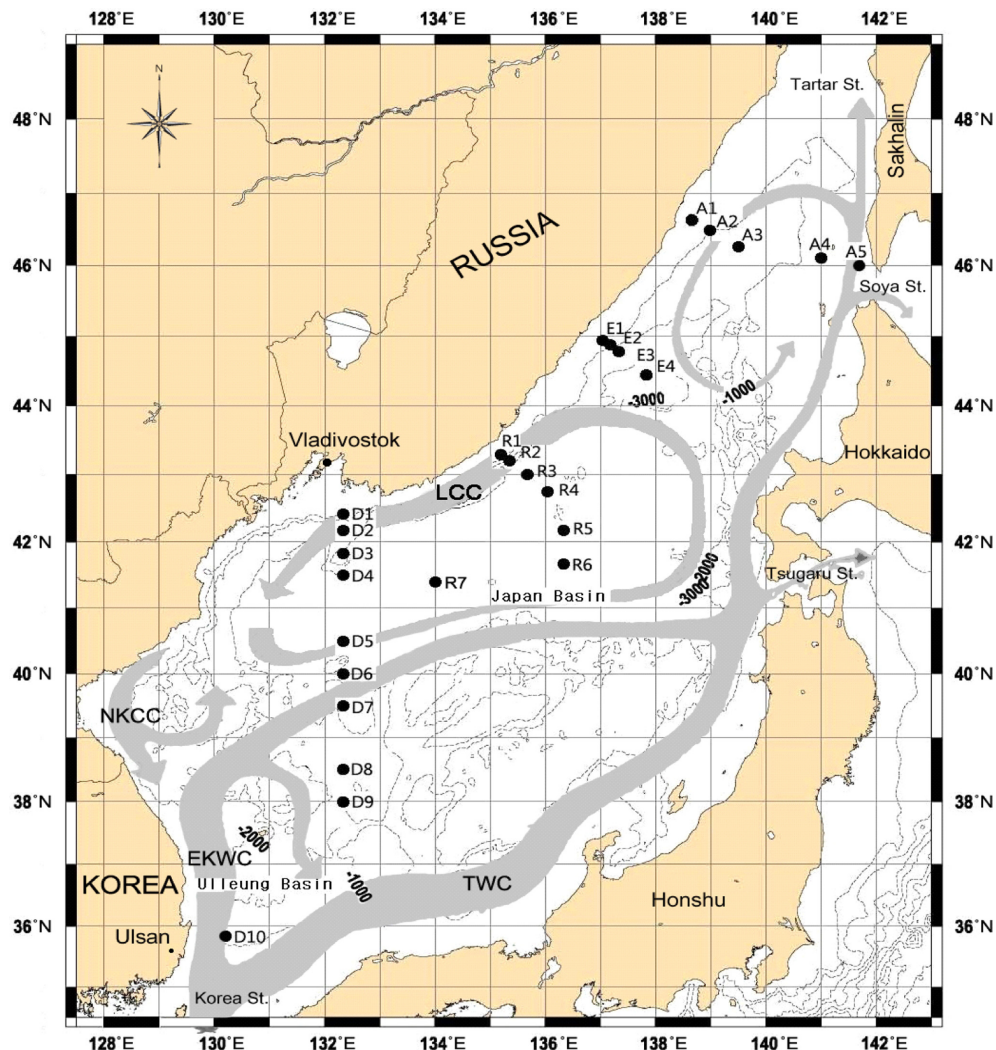


Fig. 1. Location of sampling stations and schematic map of the surface currents of the East Sea: LCC: Liman Cold Current, NKCC: North Korean Cold Current, EKWC: East Korean Warm Current, and TWC: Tsushima Warm Current (modified after Lee *et al.*[2009]).

North Korean Cold Current)로 남하한다. 40°N 인근에서는 북상하는 동한난류와 남하하는 북한한류수가 서로 다른 수괴 특성에 따라 전선을 형성하며(Choi *et al.*[1993]; Cho *et al.*[1997]; Jeon *et al.*[2012]), 이 전선의 영향으로 동한난류는 북동방향으로 사행하며 쓰가루 해협, 소야해협, 타타르 해협을 통해 북서태평양과 오호츠크해로 유출된다(Kim and Lee[2004])(Fig. 1).

동해의 수괴에 대한 연구 결과는 조사해역과 시기에 따라 다소 차이가 있으나 1999년 하계에 나타난 수괴(Kim and Lee[2004])에서는 8개의 기원해수가 존재함을 밝혔다(TSW(Tsushima Surface Water), TSCW(Tatar Surface Cold Water), NKCW(North Korean Cold Water), TMW(Tsushima Middle Water), LCW(Liman Cold Water), ESIW(East Sea Intermediate Water), ESPW(East Sea Proper Water)).

본 연구의 조사기간 동안 전 수층에서 관측된 수온과 염분의 자료로부터 T-S diagram을 작성하여 Fig. 2에 도시하였으며, 동해 해역에서 보고된 각 수괴의 물리적 특성과 비교하여 Table 2에 나타내었다. Fig. 2에는 각 수괴의 영향권에 있는 수온, 염분 분포 범위를 네모상자로 표시하였으며, 중금속 분석을 위하여 표층시료를 채취한 정점을 별도로 표시하였다.

본 연구의 D Line에서는 정점 D10 표층수가 고온-저염의 대마난류표층수(TSW) 영향권에 있으며, 점차 북상함에 따라 고염의 대

마난류중층수(TMW)와 혼합되어 정점 D7,6에서는 TMW의 특성을 보이며, 정점 D4,3,2는 TMW와 LCW, NKCW의 혼합특성을 보이고 있다. 그러나 정점 D1은 전혀 다른 TSCW의 영향권에 있는 염분과 수온 분포를 보이나 육지 근원의 담수유입 영향으로 판단된다(Fig. 3). R Line에서는 정점 R1,2가 TSCW와 LCW의 혼합선상에 위치하며, R3,4,5,6이 NKCW와 유사한 수온과 염분 분포를 보이는 LCW 루프의 외류 중앙에 위치하고 있다. R Line 중에는 LCW 해류 루프의 중앙에 있는 R5와 R6 수온이 다른 R Line 정점보다 높게 나타났다. E Line에서는 정점 E1이 TSCW와 LCW의 혼합선상에 위치하며 정점 E2,3,4는 TSCW와 ESIW, LCW의 혼합적인 특성을 보이고 있다. A Line에서는 정점 A1이 TSCW와 ESIW의 혼합선상에 있고, A2 정점에서 TSCW의 영향을 가장 많이 받고 있다. 그러나 정점 A4,5에서는 TSW와 TMW의 혼합선상에 위치하며, 난류의 영향을 받고 있다. 모든 정점의 저층에서는 저온-고염-높은 용존산소의 동해중층수(ESIW)와 저온-고염-낮은 용존산소의 동해고유수(ESPW)에 의해 영향을 받고 있다.

따라서 본 연구에서 사용된 표층 시료는 주로 대마난류의 지류로서 북상하는 고온-저염의 대마난류표층수(TSW), 오호츠크해에서 타타르 해협을 통해 동해로 유입되는 저온-저염의 한류수(TSCW), 리만한류수(LCW), 북한한류수(NKCW)의 표층 수괴와 대마난류중층수(TMW), 동해중층수(ESIW)의 중층수괴가 혼합된 수괴로서

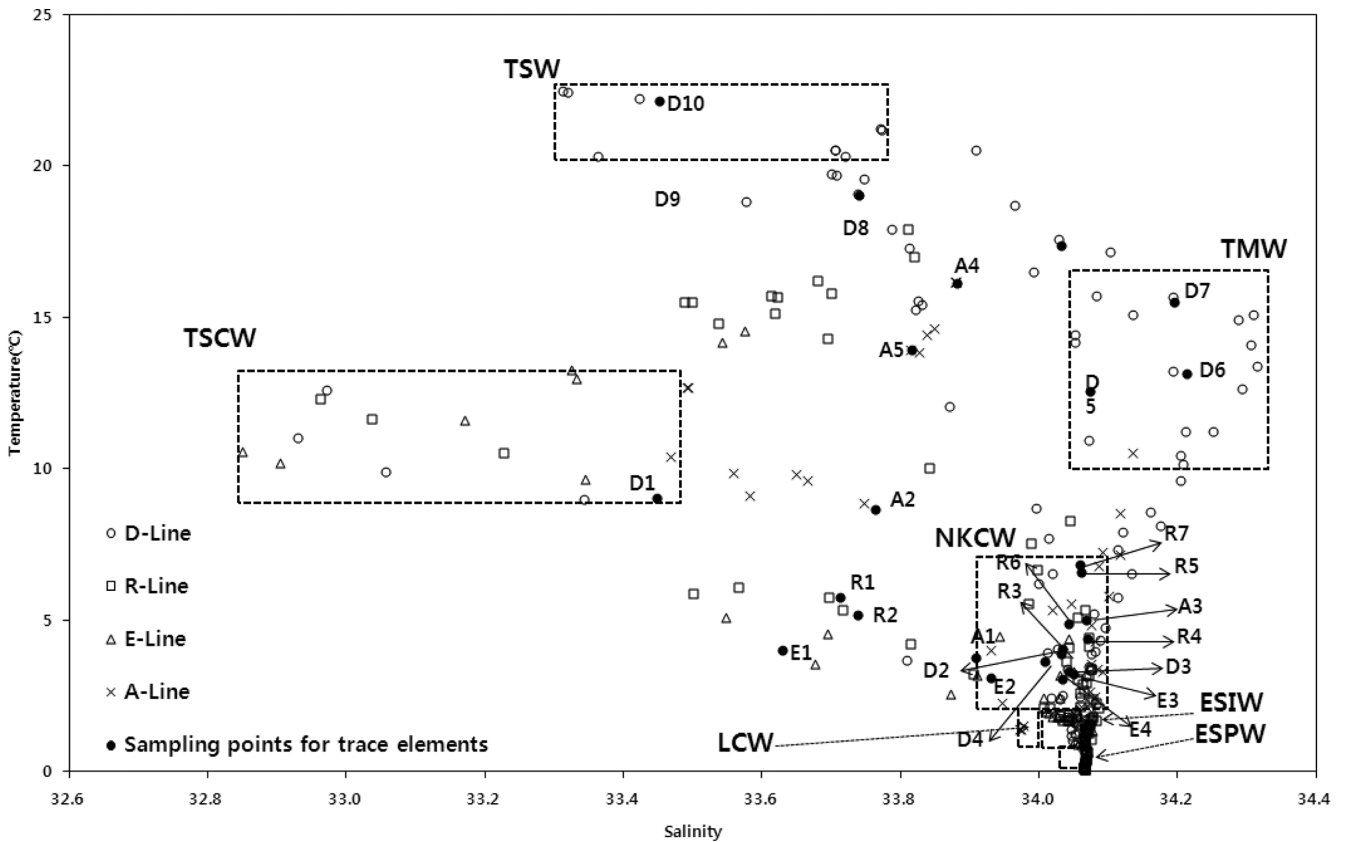


Fig. 2. T-S diagram for all the stations on four transects in the East sea of Korea (TSW; Tsushima Surface Water, TSCW; Tatar Surface Cold Water, NKCW; North Korean Cold Water, TMW; Tsushima Middle Water, LCW; Liman Cold Water, ESIW; East Sea Intermediate Water, ESPW; East Sea Proper Water).

Table 2. Definition of water masses in the East Sea of Korea

Water mass	Temperature (°C)	Salinity (psu)	Reference
TSW (Tsushima Surface Water)	>20.00	<33.80	Yang <i>et al.</i> [1991]
	17.60-20.30	33.39-33.86	Moon <i>et al.</i> [1996]
	19.47-21.51	32.39-33.71	Cho <i>et al.</i> [1997]
	>20.00	>34.0	Kim and Lee[2004]
	18.40-26.00	33.45-34.30	Yoon <i>et al.</i> [2007]
TMW (Tsushima Middle Water)	20.32-22.48	33.31-33.77	This study
	12.00-17.00	34.30-34.50	Yang <i>et al.</i> [1991]
	10.40-17.40	34.01-34.40	Moon <i>et al.</i> [1996]
	11.01-16.63	34.28-34.50	Cho <i>et al.</i> [1997]
	-	<34.50	Kim and Lee[2004]
TSCW (Tatar Surface Cold Water)	12.20-17.60	34.25-34.62	Yoon <i>et al.</i> [2007]
	10.17-15.73	34.05-34.31	This study
	<20.00	<33.50	Kim and Lee[2004]
NKCW (North Korean Cold Water)	8.99-15.53	32.85-33.49	This study
	1.00-7.00	34.06-34.20	Yang <i>et al.</i> [1991]
	1.00-7.42	33.98-34.18	Cho <i>et al.</i> [1997]
	2.00-7.00	33.90-34.10	Kim and Lee[2004]
	1.95-7.22	33.90-34.10	Yoon <i>et al.</i> [2007]
LCW (Liman Cold Water)	2.00-6.81	33.90-34.09	This study
	<2.00	<34.00	Kim and Lee[2004]
	1.40-1.53	33.97	This study
ESIW (East Sea Intermediate Water)	1.20-5.00	34.00-34.07	Moon <i>et al.</i> [1996]
	<2.00	>34.00	Kim and Lee[2004]
	1.00-1.98	34.01-34.08	This study
ESPW (East Sea Proper Water)	<1.00	34.02-34.16	Yang <i>et al.</i> [1991]
	0.20-1.00	34.06	Moon <i>et al.</i> [1996]
	0.37-0.93	34.05-34.07	Cho <i>et al.</i> [1997]
	<1.00	>34.00	Kim and Lee[2004]
	0.00-1.05	33.90-34.18	Yoon <i>et al.</i> [2007]
	0.08-0.99	34.05-34.07	This study

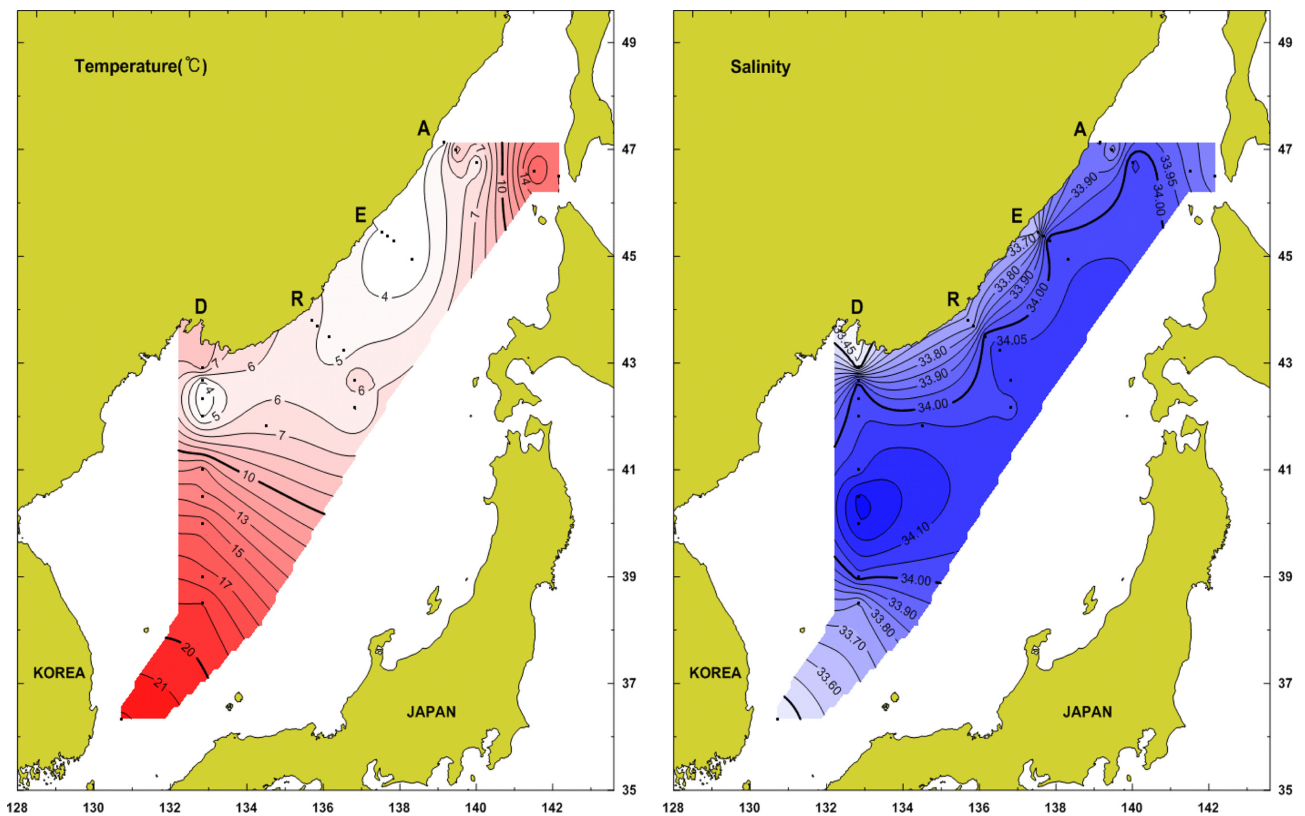
**Fig. 3.** Horizontal distribution of temperature and salinity at 30 m depth.

Table 3. Temperature, Salinity and Concentrations of dissolved Cd, Pb at sampling sites in the East Sea

Subareas	Station	Temp. (°C)	Sal.	Pb (nM)	Cd (nM)
	A1	3.76	33.91	0.11	0.13
	A2	8.65	33.76	-	0.10
	A3	5.02	34.07	0.09	0.15
	D1	9.05	33.45	0.07	0.08
	D2	3.63	34.01	0.19	0.19
	D3	3.32	34.04	0.13	0.23
	D4	3.90	34.03	0.20	0.12
	E1	3.99	33.63	0.08	0.12
	E2	3.08	33.93	0.12	0.09
	E3	3.23	34.05	0.17	0.19
	E4	3.06	34.03	0.21	0.20
	R1	5.74	33.71	0.06	0.07
	R2	5.19	33.74	0.18	0.13
	R3	4.07	34.03	0.17	0.20
	R4	4.40	34.07	0.15	0.14
	R5	6.81	34.06	0.11	0.19
	R6	4.90	34.04	0.11	0.10
	R7	6.58	34.06	0.14	0.13
	aver	4.91	33.92	0.13	0.14
	A4	16.13	33.88	0.15	0.06
	A5	13.91	33.82	0.22	0.15
	D5	12.55	34.07	0.02	0.03
	D6	13.15	34.21	0.07	0.14
	D7	15.52	34.20	0.20	0.12
	D8	17.36	34.03	0.24	0.09
	D9	19.03	33.74	0.38	0.10
	D10	22.16	33.45	0.49	0.11
	aver	16.23	33.93	0.22	0.10

정점별로 서로 다른 수괴가 상이하게 혼합된 특성을 보이고 있다.

미량금속 분석용 시료를 채수한 30 m 수층의 수온과 염분의 평면 분포를 보면(Fig. 3), 정점 A1에서 4°C 이하의 해수가 유입되어 시베리아 연안을 따라 남하하여 D2,3,4 까지 영향을 주고 있으며, 연안 정점 D1은 수온이 높고 염분이 낮아 육지근원의 담수 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 고온-저염의 대마난류표층수(TSW)의 직접적인 영향을 받고 있는 정점 D10부터 수온은 북상하면서 점차 감소하고 있다. 염분은 정점 D10부터 점차 증가하다가 TMW의 영향권에 있는 정점 D6,7에서 가장 높았으며 러시아 연안으로 갈수록 다시 감소하는 추세를 보이고 있다.

3.2 표층에서 Pb와 Cd의 수평분포

조사기간 동안 동해 표층수에서 조사된 Pb와 Cd의 농도를 Table 3에 나타내었으며, 농도의 수평분포를 Fig. 4에 도시하였다.

일반적으로 동해를 40°N 부근에 발달하는 극전선(Polar front)을 경계로 난수역(warm region)과 냉수역(cold region)으로 구분하지만(Choi *et al.*[1993]; Lee *et al.*[2003]; Kim and Lee[2004]), 본 연구에서는 수온 10°C를 경계로 하여 난수역과 냉수역을 구분하

였으며, 난수역은 주로 울릉분지에, 냉수역은 일본분지에 위치하는 수역이다.

Pb의 경우, 냉수역(평균 0.13 nM)보다 난수역(평균 0.22 nM)의 농도가 1.7배 정도 높게 나타났다. 대한해협을 통해 동해로 유입되는 대마난류수의 직접적인 영향을 받고 있고 조사정점 중 가장 남쪽에 위치한 정점 D10에서 최고 농도(0.49 nM)가 관측되었으며, 고위도로 갈수록 점진적으로 농도가 감소하여 러시아 연안 정점 D1에서 최저농도(0.07 nM)가 관측되었다. 따라서 동해에서 Pb의 수평 분포는 대한해협을 통해 동해로 유입되는 대마난류수의 영향과 인접한 한국과 일본으로 부터 대기를 통한 유입의 영향이 클 것으로 사료된다.

Cd의 경우, Pb와 상반되는 수평분포 특성을 보이고 있으며, 난수역(평균 0.10 nM)보다 냉수역(평균 0.14 nM)의 농도가 약 1.4배 정도 높게 나타났다. 난수역에서는 농도의 변화(0.03-0.15 nM)가 적은 반면, 냉수역에서는 농도의 변화(0.07-0.23 nM)가 크며, 러시아 연안 정점(A1, E1, R1, D1)보다 한류의 직접적인 영향을 받고 있는 근해 정점에서 높은 농도를 보이고 있다. 따라서 동해에서 Cd의 수평분포는 인위적인 기원 보다는 해류의 흐름에 따른 수괴의 혼합과 같은 자연적인 요인에 의해 결정된다.

3.3 Pb, Cd의 농도와 수온, 염분과의 관계

동해의 상층해류로 냉수역에는 연해주와 북한 연안을 따라 남하하는 저온-저염의 리만해류와 북한한류가 대표적이며, 난수역에는 북태평양에서 기원하여 대한해협을 통해 동해로 유입되는 고온고염의 대마난류, 동해안을 따라 북상하는 동한난류가 대표적이다. 이러한 해류는 계절적으로 그리고 수 십일 주기로 그 세기와 방향의 변동성이 크며, 특히 울릉분지와 독도해역 근처에서는 다양한 소용돌이와 해류의 사행으로 인해 변동성이 상대적으로 크다(Shin *et al.*[2005]).

본 연구기간에 조사된 Pb와 Cd의 농도 분포에 대한 표층해류의 영향을 파악하기 위하여 수온에 대한 농도분포를 Fig. 5에 도시하였다. 수온은 한류의 영향을 직접 받고 있는 러시아 외해역(E4)에서 3.06°C로 가장 낮았고, 난류의 영향을 직접 받고 있는 우리나라 포항 외해역(D10)에서 22.16°C로 가장 높았다. Pb와 Cd의 농도분포는 수온 10°C를 저점으로 구분되는 특성을 보이고 있다. 10°C 이하의 해역은 주로 러시아 연안과 일본분지의 냉수역이며, 10°C 이상의 해역은 울릉분지와 사할린 섬 부근의 난수역 정점이다.

Pb와 Cd은 10°C 이하에서 수온이 감소함에 따라 농도가 증가하는 추세로 한류수계수의 농도가 주변 연안이나 외해의 해수보다 농도가 다소 높게 나타났으며, 10°C 이상에서는 온도가 증가함에 따라 농도가 증가하는 추세로서 대마난류와 인접국가(우리나라와 일본)의 직접적인 영향권에 있는 울릉분지에서 높은 농도를 보이고 있다. 특히 Pb의 경우, 고온의 대마난류가 유입되는 정점 D10을 최고점으로 고위도로 북상할수록 수온의 감소와 더불어 농도의 감소 현상이 두드러지게 나타났다.

전 조사 정점을 대상으로 한 염분에 대한 농도 분포는 다소 분산

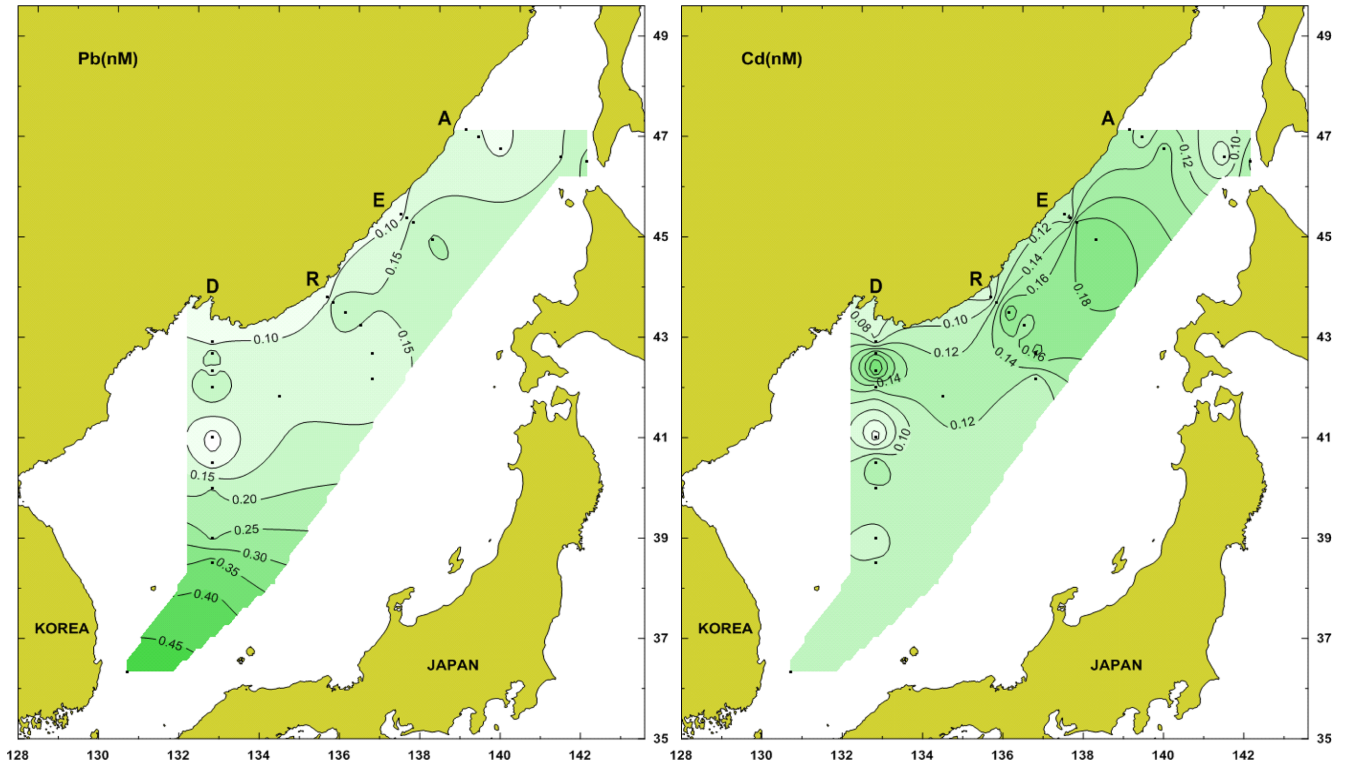


Fig. 4. Horizontal distribution of Cd and Pb at 30 m depth.

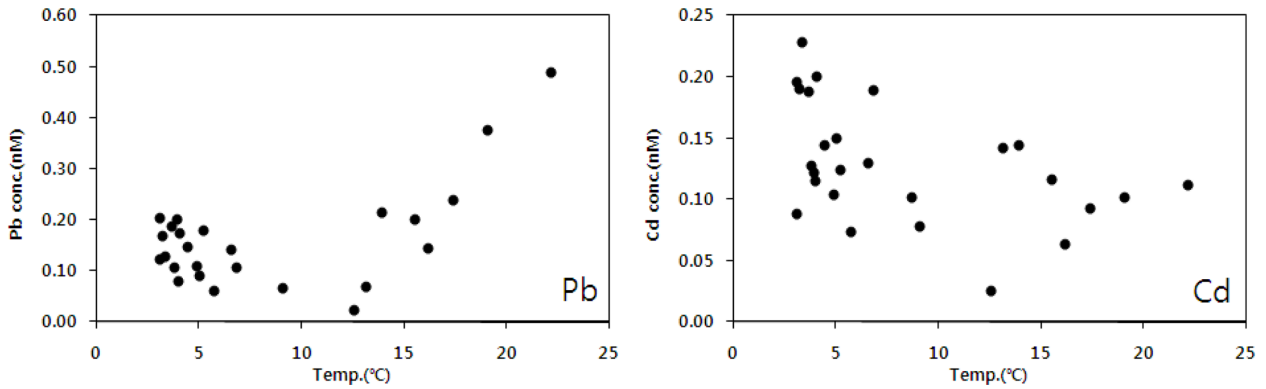


Fig. 5. Relation between trace metals (Pb and Cd) and water temperature.

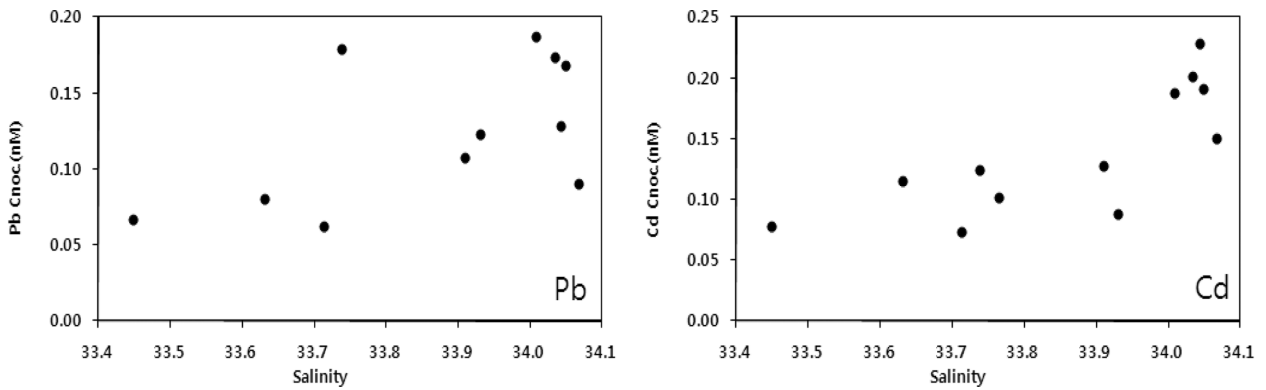


Fig. 6. Relation between trace metals (Pb and Cd) and salinity in the surface water of Russia coast.

의 정도가 크며 상관성을 볼 수 없으나 냉수역에서는 전반적으로 저염분 정점보다 고염분 정점의 Pb와 Cd의 농도가 다소 높은 경향이 있다(Fig. 6). 정점 D1의 블라디보스토크 연안에서 염분이 가장 낮으며, 러시아 연안 정점이 외해 정점에 비해 염분이 낮고, 염분이 증가함에 따라 미량금속의 농도도 증가하는 경향을 보이고 있다. 그러나 난수역에서는 대마난류의 영향권에 있는 정점 D10에서 상대적으로 낮은 염분을 보이며, 북상함에 따라 염분의 증가와 더불어 Cd은 뚜렷한 변화를 보이지 않고 Pb은 다소 감소하지만(Fig. 4), 전반적인 상관성은 보이지 않는다. 동해 표층수에서 저염의 대마난류수와 타타르해협으로부터 유입되는 저염수 그리고 블라디보

스토크 인근 해역에서 육지의 영향 등으로 염분과 미량금속의 상관성이 수온과 미량금속의 상관성 보다 미비하게 나타났다.

4. 고찰

동해에서 미량금속에 대한 연구는 일부 연안정점에서 수행된 적은 있으나(Yang[1997]; Yoon and Kim[1998]; Kim *et al.*[2002]; Kim *et al.*[2007]), 동해 전체에 대한 분포를 알기에는 아직 미비한 실정으로 일본분지, 울릉분지를 포함한 광범위한 연구는 본 연구에서 처음 실시되었다. 따라서 현재까지 조사된 연구의 모든 자료를 종합하여

Table 4. Distribution of Trace metals (nM) in the East Sea

	Korea coast	Russia coast	Warm region	Cold region	Reference
Pb	0.07-0.10				Yoon and Kim[1998]
			0.15		Kim <i>et al.</i> [2002]
	0.01-0.17(0.14)				Kim <i>et al.</i> [2007]
	0.49	0.06-0.11(0.08)	0.02-0.49(0.22)	0.06-0.21(0.13)	This study*
Cd	0.12-0.19				Yoon and Kim[1998]
			0.07		Kim <i>et al.</i> [2002]
				0.24	Abe[2005]
	0.10-0.52(0.24)				Kim <i>et al.</i> [2007]
	0.11	0.07-0.13(0.10)	0.03-0.15(0.10)	0.07-0.23(0.14)	This study*

*East Sea coast:D10, Russia coast:A1, D1, E1, R1

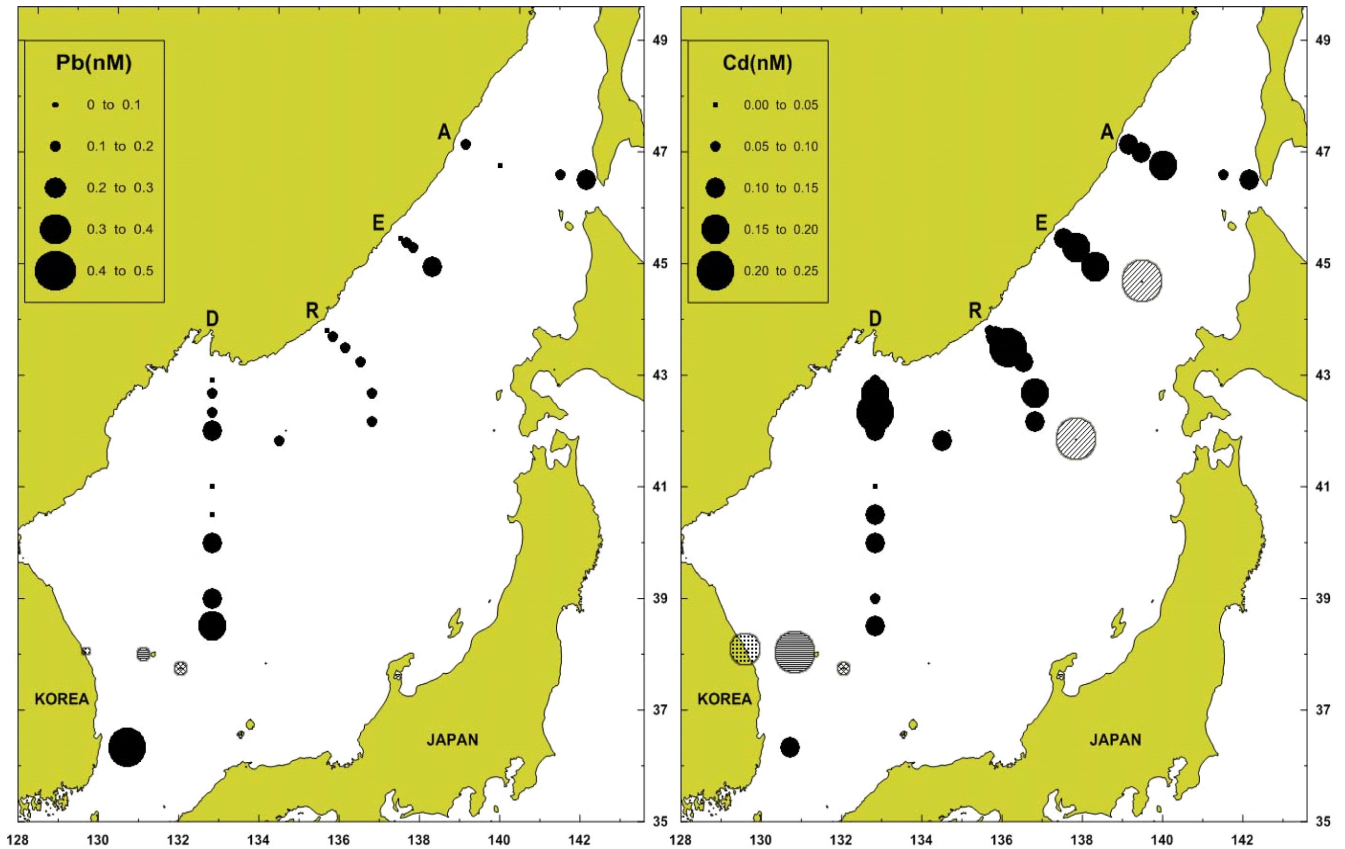


Fig. 7. Horizontal distribution of Cu and Ni concentrations in surface water of East Sea. (●: this study, ⊞: Yoon and Kim [1998], ⊗: Kim *et al.* [2002], ⊙: Abe [2005], ⊕: Kim *et al.* [2007]).

해역별 농도의 분포를 Table 4에 나타냈으며, Fig. 7에 도시하였다.

동해의 해역별로 Pb와 Cd의 농도를 비교하면, 연안역에서는 러시아 연안(평균 Cd, 0.10; Pb, 0.08 nM)보다 우리나라 동해 연안의 농도(평균 Cd, 0.11; Pb, 0.49 nM)가 Pb의 경우 6.0배 높은 반면 Cd의 농도는 비슷하게 나타났다. 난수역(평균 Cd, 0.10; Pb, 0.22 nM)은 냉수역(평균 Cd, 0.14; Pb, 0.13 nM)에 비해 Cd의 농도는 0.4배 낮은 반면, Pb의 농도는 약 1.7배 높게 나타났다. 일반적으로 Pb는 다른 미량금속에 비해 대기를 통한 유입량이 상대적으로 많아서 저층보다 표층에서 높은 농도를 보이는 특성이 있다. 우리나라 동해와 유사한 지형적 특성을 지닌 서지중해의 경우, 대기를 통한 유입량이 자연적인 정화능력을 초과하여 서지중해에 축적되고 있음을 시사한다(Yoon *et al.*[1999]). 유럽의 서지중해(Cd; 0.06, Pb; 0.12 nM)와 비교해 볼 때 동해의 Pb와 Cd의 농도는 다소 높은 편이다. 특히 동해 난수역 Pb의 평균 농도는 서지중해 보다 약 1.8배 높으며, 울릉분지에서 관측된 Pb의 최대치(0.49 nM)는 동중국해 춘계 표층에서 관측된 0.52 nM(Li *et al.*[2014])과 유사한 농도를 나타내고 있다. 따라서 러시아의 영향을 받는 냉수역보다 산업화된 우리나라와 일본의 영향권에 있는 난수역에서의 높은 표층농도는 대기를 통한 직접 유입과 대마난류를 통한 유입에 기인한 것으로 판단된다.

Cd의 분포도 대기를 통한 유입에 의해 어느 정도 영향을 받을 수 있으나 서지중해의 경우, 주로 다양한 수괴들의 혼합에 의해 농도 분포가 결정되었다(Yoon *et al.*[1999]). 일부 수역에서는 표층에서 식물플랑크톤에 의해 흡수되어 낮은 농도를 보이며, 저층에서 재생산에 의해 농도가 증가하는 경향도 있다(Abe[2005]). 미량금속의 분포 특성을 고려하면 상대적으로 저염분이 나타나는 연안정점에서 높은 미량금속 농도를 보여야 하나(Byrne *et al.*[1988]), Cd의 경우, 고염분에서 농도가 증가하는 경향을 나타냈다. 하계에 동해로 유입되는 대마난류 이동 경로에서 관측된 Cd의 농도는 동중국해의 남서해에서 0.08 nM이하(Abe[2007]), 남중국해에서 0.02 nM(Norisuye *et al.* [2007]), 타이완연안의 북쪽에서 0.08-0.11 nM(Fang *et al.* [2006])로 농도가 비교적 낮다. 따라서 난수역의 낮은 농도는 대마난류 유입수의 낮은 농도에 기인한 것으로 판단되며, 고위도로 갈수록 Cd의 농도가 상대적으로 높은 한류수의 영향으로 난수역보다 냉수역에서 높은 농도분포를 보인다.

동해에서 Pb와 Cd에 대한 연구는 매우 미비하며, 독도 주변해역(Kim *et al.* [2002, 2007])에서 선행 연구된 자료와 본 연구에서 조사된 자료를 비교해 볼 때, 다소 낮거나 높은 농도를 보였는데 이는 울릉분지와 독도해역 근처에서는 다양한 소용돌이와 해류의 사행으로 인해 상대적인 변동성이 크기 때문에 조사시기별 정점별 농도의 편차가 다소 크게 나타날 것으로 추론할 수 있다.

5. 결 론

울릉분지와 일본분지를 포함한 동해의 전 수역에서 표층수 중 Pb와 Cd의 수평분포를 조사하고 물리적인 인자와의 관계를 구명하고자 하였다. 연안역에서는 러시아 연안(평균 Cd, 0.10; Pb, 0.08 nM)

보다 우리나라 동해 연안의 농도(평균 Cd, 0.11; Pb, 0.49 nM)가 Pb의 경우 6.0배 높은 반면 Cd의 농도는 비슷하게 나타났으며, 난수역(평균 Cd, 0.10; Pb, 0.22 nM)은 냉수역(평균 Cd, 0.14; Pb, 0.13 nM)에 비해 Cd의 농도는 0.4배 낮은 반면, Pb의 농도는 약 1.7배 높게 나타났다. 동해 표층수의 Cd농도 분포는 주로 동해에 존재하는 다양한 수괴의 혼합에 의해 영향을 받는 반면, Pb는 대기와 대마난류를 통한 전달량에 의해 크게 영향을 받으며, 기타 강물을 통한 유입과 유, 무기성 입자물질과의 상호작용에 의해 결정될 것이다.

후 기

본 연구는 East Asian Seas Time series-I(EAST-I)사업 지원으로 수행된 연구 결과임을 밝히며, EAST-I 공동조사에 도움을 주신 모든 분들께 감사드립니다.

References

- [1] Abe, K., 2005, "Concentration and regeneration of cd in the Japan Sea proper water", *J. Oceanogr.*, Vol. 61, 455-463.
- [2] Abe, K., 2007, "Concentration level of dissolved cadmium and its variation in surface seawater of Urasoko bay, Ishigaki Island", *J. Oceanogr.*, Vol. 63, 341-347.
- [3] Balls, P.W., 1985, "Copper, lead and cadmium in coastal waters of the western North Sea", *Mar. Chem.*, 15, 363-378.
- [4] Batterham, G.J. and David, L. Parry, 1996, "Improved dithiocarbamate/oxime solvent extraction method for the preconcentration of trace metals from seawater using metal exchange back-extraction", *Mar. Chem.*, 55, 381-388.
- [5] Byrne, R.H., Kump, L.R. and Cantrell, K.J., 1988, "The influence of temperature and pH on Trace metal speciation in seawater", *Mar. Chem.*, 25, 163-181.
- [6] Chin, Y.H., Kim, K.T., Kim, S.H., Yang, D.B., Hong, G.H. and Lee, K.W., 2000, "Distribution characteristics of dissolved and particulate trace metals in Kwangyang Bay, Korea", *J. Kor. Soc. Water Qual.*, Vol. 16, No. 4, 421-430.
- [7] Cho, H.J., Moon, C.H., Yang, H.S., Kang, W.B. and Lee, K.W., 1997, "Regeneration processes of nutrients in the Polar Front of the East Sea", *J. Kor. Fish. Soc.*, Vol. 30, No. 3, 393-407.
- [8] Choi, M.S. and Lee, C.B., 2001, "The behaviors of trace metals (Fe, Mn, Co, Cu, Cd, Zn and Pb) in the Han River Estuary, Korea", *J. Kor. Soc. Oceanogr.*, Vol. 36, No.3, 59-71.
- [9] Choi, Y.K., Yang, S.K., Cho, K.D., Lee, J.C. and Hong, C.H., 1993, "Possible Formation Area of the Japan Sea Proper Water I. Subareas by the Polar Front", *J. Kor. Environ. Sci. Soc.*, Vol. 2, No.1, 27-42.
- [10] Clark, R.B., 2001, *Marine pollution*, Fifth edition, Oxford, NY, 110.
- [11] Cotté-Krief, M.H., Thomas, A.J. and Martin, J.M., 2002, "Trace metal (Cd, Cu, Ni and Pb) cycling in the upper water column near the shelf edge of the European continental margin (Celtic Sea)", *Mar. Chem.*, 79, 1-26.

- [12] Fang, T.H., Hwang, J.S., Hsiao, S.H. and Chen, H.Y., 2006, "Trace metals in seawater and copepods in the ocean outfall area off the northern Taiwan coast", *Mar. Environ. Res.*, 61, 224-243.
- [13] Guieu, C., Chester, R., Nimmo, M., Martin, J.-M., Guerzoni, S., Nicolas, E., Mateu, J. and Keyse, S., 1997, "Atmospheric input of dissolved and particulate metals to the northwestern Mediterranean", *Deep Sea Res. II*, Vol. 44, No. 3-4, 655-674.
- [14] Hahn, Y.H., Lee, J.S. and Lee, J.H., 2007, "Determinations of Environmental hormones and Heavy metals in seawater of Tongyeong marine ranching ground of Korea", *Kor. J. Environ. Biol.*, Vol. 25, No. 4, 313-318.
- [15] Hong, G.H., Yang, D.B. and Lee, K.W., 1988, "Nutrients and trace metals in permanently well-mixed coastal waters of Korea", *J. Oceanolog. Soc. Kor.*, Vol.23, No. 4, 159-168.
- [16] Jeon, H.D., Rho, T.K. and Lee, T.S., 2012, "Spatial distribution of transparent exopolymer particles (TEP) and their relation to carbon species in the euphotic layer of the Northern East Sea", *J. Kor. Soc. Oceanogr.*, Vol. 17, No. 2, 33-44.
- [17] Jickells, T., 1995, "Atmospheric inputs of metals and nutrients to the oceans: their magnitude and effects", *Mar. Chem.*, 48, 199-214.
- [18] Jin, Y.H., Kim, K.T., Chung, C.S., Kim, S.H., Yang, D.B. and Hong G.H., 2000, "Behavior of trace metals in Masan Bay, Korea during oxygen deficient period", *J. Kor. Soc. Mar. Environ. Engineering*, Vol. 3, No. 4, 56-64.
- [19] Kim, I.N. and Lee, T.S., 2004, "Summer Hydrographic Features of the East Sea Analyzed by the optimum multiparameter method", *Ocean and Polar Res.*, Vol. 26, No. 4, 581-594.
- [20] Kim, K.T., Jang, S.H., Kim, E.S., Cho, S.R. and Park, J.K., 2007, "Distribution of dissolved trace metals in the deep ocean waters of the East Sea", *J. Kor. Soc. Mar. Environ. & Safety*, Vol. 13, No. 1, 1-7.
- [21] Kim, K.T., Kim E.S., Lee S.H. and Cho S.R., 2002, "Trace metals in surface seawaters and mussels around the Dokdo, Korea", *Ocean and Polar Res.*, Vol. 24, No. 4, 399-406.
- [22] Kim, T.H. and Kim, G.B., 2012, "Important role of colloids in the cycling of 210Po and 210Pb in the ocean: Results from the East/Japan Sea", *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 95, 134-142.
- [23] Kudo, I. and Matsunaga K., 1998, "Behavior of Cu, Ni and Cd during nutrient depletion in a spring bloom in Funka Bay", *J. Oceanogr.*, Vol. 54, 619-627.
- [24] Laslett, R.E., 1995, "Concentrations of dissolved and suspended particulate Cd, Cu, Mn, Ni, Pb and Zn in surface waters around the coasts of England and Wales and in adjacent seas", *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 40, 67-85.
- [25] Lee, C.B., 1992, "The behaviour of dissolved iron and its variability in the Keum Estuary, a macrotidal system on the western coast of Korea", *J. Oceanlog. Soc. Kor.*, Vol. 27, No. 2, 101-111.
- [26] Lee, C.I., Cho, K.D. and Choi, Y.K., 2003, "Spatial variation of the polar front in relation to the Tsushima Warm Current in the East Sea", *J. Environ. Sci.*, Vol. 12, No. 9, 943-948.
- [27] Lee, J.Y., Kang, D.J., Kim, I.N., Rho, T.K. and Lee, T.S., 2009, "Spatial and temporal variability in the pelagic ecosystem of the East Sea (Sea of Japan): A review", *J. Mar. Syst.*, 78, 288-300.
- [28] Le Gall, A.C., Statham, P.J., Morley, N.H., Hydes, D.J. and Hunt, C.H., 1999, "Processes influencing distributions and concentrations of Cd, Cu, Mn and Ni at the North West European shelf break", *Mar. Chem.*, 68, 97-115.
- [29] Li, Y., Yang, R., Zhang, A. and Wang, S., 2014, "The distribution of dissolved lead in the coastal waters of the East China Sea", *Mar. Pollut. Bull.*, Vol. 85, 700-709.
- [30] Moon, C.H., Yang, H.S. and Lee, K.W., 1996, "Regeneration processes of nutrients in the polar front area of the East Sea", *J. Kor. Fish. Soc.*, Vol. 29, No. 4, 503-526.
- [31] Norisuye K., Ezoe M., Nakatsuka S., Umetani S. and Sohrin Y., 2007, "Distribution of bioactive trace metals (Fe, Co, Ni, Cu, Zn and Cd) in the Sulu Sea and its adjacent Seas", *Deep Sea Res.*, II, Vol.54, 14-37.
- [32] Sagger, P.M., Baar, H.J.W.D. and Howland, R.J., 1992, "Cd, Zn, Ni and Cu in the Indian Ocean", *Deep Sea Res.*, Vol. 39, No. 1, 9-35.
- [33] Shin, H.R., Shin, C.W., Kim, D.C., Byun, S.K. and Hwang, S.C., 2005, "Movement and structural variation of warm eddy WE92 for three years in the western East/Japan Sea", *Deep Sea Res. II*, Vol. 52, 1742-1762.
- [34] Tankere, S.P.C., Muller, F.L.L., Burton, J.D., Statham, P.J., Guieu, C. and Martin, J.-M. 2001, "Trace metal distributions in shelf waters of the northwestern Black Sea", *Cont. Shelf Res.*, 21, 1501-1532.
- [35] Wu, J. and Boyle, E.A., 1997, "Lead in the Western North Atlantic Ocean: Completed response to leaded gasoline phaseout", *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61, 3279-3283.
- [36] Yanagi, T., 2002, "Water, salt, phosphorus and nitrogen budgets of the Japan Sea", *J. Oceanogr.*, Vol. 58, 797-804.
- [37] Yang, H.S., Kim, S.S., Kang, C.G. and Cho, K.D., 1991, "A study on sea water and ocean current in the sea adjacent to Korea peninsula", *Bull. Kor. Fish. Soc.*, Vol. 24, No. 3, 185-192.
- [38] Yang, J.S., 1997, "Vertical distributions of dissolved Cu and Ni in the central East Sea", *J. Kor. Soc. Oceanogr.*, Vol. 2, No. 2, 117-124.
- [39] Yoon, S.C., Yoo, Y.Y. and Suh, Y.S., 2014, "Dissolved Copper and Nickel in the surface water of East Sea, Korea", *J. of the Korean Soc. for Mar. Environ. and Energy*, Vol. 17, No. 4, 257-267.
- [40] Yoon, Y.Y., Martin, J.M. and Cotte, M.H., 1999, "Dissolved trace metals in the Western Mediterranean Sea: total concentration and fraction isolated by C18 Sep-Pak technique", *Mar. Chem.*, 66, 129-148.
- [41] Yoon, Y.Y. and Kim, K.T., 1998, "Level and fate of trace metals in the Namdae Stream", *J. Kor. Soc. Environ. Engineers*, Vol. 20, No. 8, 1039-1049.
- [42] Yoon, Y.Y., Chong, S.J. and Yoon, S.C., 2007, "Characteristics and long term variation trend of water mass in offshore of the east coast of Korea", *J. Kor. Soc. Environ. Engineers*, Vol. 10, No. 1, 59-65.

Received 18 September 2014

Revised 18 December 2014

Accepted 10 March 2015