

삼천포화력발전소 주변해역 표층퇴적물중의 중금속원소함량 분포 연구

이두호 · 임주환 · 전병열 · 정년호

전력연구원 발전연구실

A Study on the Distribution of Heavy Metal Concentrations in Marine Surface Sediments around Samcheonpo Power Plant

Lee, Doo-Ho · Lim, Ju-Hwan · Jeon, Byeong-Yeol · Jeong, Nyeon-Ho

Korea Electric Power Research Institute, Yuseong-Ku

Abstract

An environmental geochemical survey of heavy metal distribution in marine surface sediments around the ocean of Samcheonpo coal-fired power plant was conducted to investigate the possibility of coal-ash leakage from ash pond and the associated heavy metal pollution in sedimental deposits due to the operation of the coal-fired power plant.

The X-Ray Diffractometry (XRD) analysis showed that the main leakage point of coal-ash was limited to a single site of the first ash pond. It also appeared that the amounts of organic carbon and metal elements were positively correlated to the grain size distribution, and that Co, Cr, Cu, Fe, Ni, and Zn were bounded to organic ligands. However, the distributions of Cd, Hg, and Mn did not have any significant correlation with the sediment grain size and organic matters. In particular, the distribution of Cd appeared to be affected by the concentration of the carbonate materials in the study area.

Keyword: Geochemical Survey, Heavy Metals, Coal-Ash

I. 서론

석탄회는 석탄이 노내에서 고온으로 연소될 때 석탄중의 회분이 용해되어 연도에서 급격히 냉각된 것을 미세 입자로 포집된 것이며 석탄 연소시

에는 분말상 석탄회 이외는 노밑으로 떨어지는 Clinker상 회(Bottom ash)와 연도를 통하여 날아가는 SO₂를 잡아 석회분말 Slurry에 흡입 반응시킨 오니형(FGD Sludge : Flue Gas Desulfurization Sludge) 등으로 형성된다(한국전력공사, 1990)⁴⁾.

석탄회는 시멘트 및 콘크리트 혼합제, 도로 충전제, 하수처리 흡착제, 경량골재 원료 등 산업적으로 이용하고 있으며 농업적으로는 토양 개량제, 비료원료 물질로 이용되고 있으나, 이용되는 양은 그리 많지 않아 석탄회는 대부분 쉽게 처리할 수 있는 발전소 인근에 매몰하여 폐기해 오고 있다. 이는 석탄회의 처리를 손쉽게 하는 방법이지만 회처리장 조성비가 막대하게 소요될 뿐만 아니라 유출수에 의한 해양환경의 변화를 초래할 수도 있다. 우리 나라의 경우 석탄회의 특성에 관하여 포괄적으로 시험분석 및 조사 연구한 자료가 축적되어 있지 않은 편이며, 또한 해양에서 석탄회 유출에 의한 퇴적물 오염 연구도 전무한 실정이다.

일반적으로 수계(aquatic system)에 유입된 중금속원소는 수중에 용해되어 이온 상태로 존재하기보다는 대부분 고상(solid phase)으로 분배되어 퇴적물이나 부유물에 흡착되어 존재하게 된다. 따라서 해양퇴적물은 해수에 비해 높은 중금속 함량을 나타내게 되며, 또한 그 함량의 계절적 변화 등이 적어 과거 또는 현재에 오염원이 존재하는 지역에서 중금속 분포에 의한 지속적인 환경 영향을 평가할 수 있는 보다 적절한 지구화학적 매개체가 될 수 있다(Thornton, 1983)¹³⁾. 특히 퇴적물에 함유되어 있는 중금속은 물리화학적인 환경 변화에 의해 물-퇴적물의 경계면에서 수중으로 재용출이 일어날 수 있기 때문에 오염을 발생시키는 원인이 제거된 후에도 지속적인 수질 오염을 야기시키며 그곳에 존재하는 생물체에도 영향을 미치게 된다. 그러므로 퇴적물의 중금속 오염에 대한 연구는 현재뿐만 아니라 앞으로의 중금속 오염을 평가·예측하는데 필요한 정보를 제공해 줄 수 있다.

본 연구에서는 발전소의 가동과 석탄회 처리장 운영에 따른 인근 해역의 환경영향평가의 일환으로 삼천포화력발전소 주변해역의 해양퇴적물 시료를 대상으로 퇴적물의 중금속원소 분포 양상을

파악하고자 하였으며, 이러한 연구 결과는 삼천포화력발전소 인근 해역 퇴적물의 지화학적 특성을 과학적으로 규명되는데 이용될 수 있으며 향후 본 조사해역의 환경 보전을 위한 기초 자료로 활용코자 하였다.

II. 시료채취 및 분석방법

삼천포화력발전소의 배수구를 중심으로 반경 5km 이내에서 33개의 퇴적물 시료를 1998년 10월 8일에 채취하였다(Fig. 1). 시료는 반빈 채니기(van-Veen grab sampler)를 이용하여 채취하였으며, 채취된 표층퇴적물을 대상으로 퇴적물의 입도분석과 화학분석을 실시하였다.

퇴적물의 입도분석을 위한 시료는 먼저 염산과 과산화수소로 탄산염과 유기물을 각각 제거한 후, 62.5 μ m 이상의 사질부분 입자는 표준체를 이용한 체질 방법으로, 그리고 니질부분의 분석은 확산제로 2% 칼콘용액을 사용하여 피펫 분석을 실시하였다. 분석결과는 Folk and Ward (1957)⁵⁾의 식으로 통계 처리하였다. 또한 강열감량(Loss

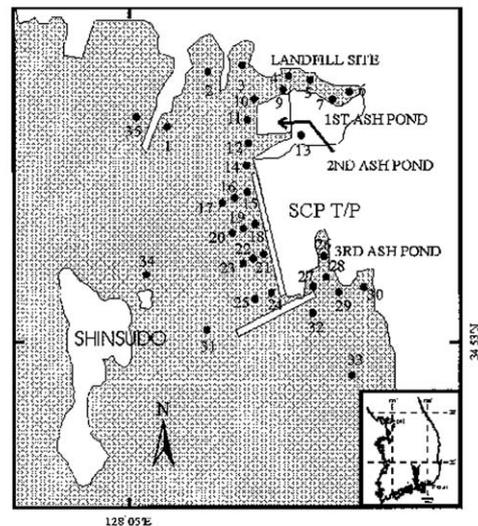


Fig. 1. Map showing the study area and stations of the sediment sample.

On Ignition, LOI)은 건조기에서 50~60°C로 충분히 말린 시료 약 5g을 도가니에 넣은 후 550°C의 전기로에서 4시간동안 가열한 다음 실온으로 식혀서 잔 무게와 원시료와의 무게 차이를 원시료의 무게에 대한 백분율로 구하였다. 유기탄소의 함량은 0.1N 중크롬산칼륨과 진한 황산 혼합용액 일정량을 약 0.5g의 분말 시료에 넣어서 90~100°C에서 30분간 가열하면서 시료 중의 유기탄소를 산화시키고 난 후, 남은 산화제의 양을 0.1N 황산 암모늄 제II철로 정량하는 역적정법을 이용하여 분석하였다. 매회 실험마다 분석값의 신뢰도 검증을 위해서 글루코오스를 시료와 병행하여 분석하였다(Jackson, 1967)⁷⁾. 화학적 산소요구량 분석을 위해 약 1g의 시료에 0.1N 과망간산칼륨용액 100ml와 10% 수산화나트륨용액 5ml를 넣고 100°C에서 1시간동안 가열한 후 증류수를 넣어 부피를 500ml로 만들었다. 여기에 10% 요오드화칼륨 용액과 4% 아지드나트륨용액을 넣고 유리섬유 여과지를 사용하여 여과한 후 여과한 용액 100ml에 30% 황산용액을 넣고 0.1N 티오황산나트륨을 이용하여 적정하는 방법을 이용하여 구하였다. 총 황 함량은 모든 형태의 황화합물을 강산으로 황산염으로 산화시킨 후 황산염을 황산바륨으로 침전시켜 침전물의 무게를 측정하고, 이 중 포함된 황의 무게를 계산하여 총 황 함량으로 환산하였다.

퇴적물의 탄산염 함량은 건조분말 시료 1g을 취하여 Bernard calcimeter로 측정하였으며, 또한 퇴적물의 금속원소 함량을 측정하기 위해서는 건조분말 시료 1g을 테프론 용기 내에서 HF-HNO₃-HClO₄ 혼합용액으로 반응시켜 Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Zn의 함량을 원자흡광분광기(AAS : Atomic Absorption Spectrophotometer)를 이용하여 전함량분석을 실시하였다. Hg의 경우 1.0N 질산을 이용하여 교반기에서 12시간 반응시킨 후 2800 rpm에서 15분간 원심분리한 용액을 유도결합플라즈마 질량분석기(ICP-MS :

Table 1. Accuracies for heavy metal analysis with BCSS-1(3 samples were analyzed).

Elements	Analyzed value ^a	Certified value	Accuracy ^b (%)
Cd (ppm)	0.22	0.25±0.4	88
Co (ppm)	11.8	11.4±2.1	104
Cr (ppm)	123	123±14	100
Cu (ppm)	19.2	18.5±2.7	104
Fe (%)	2.90	3.29±0.3	88
Mn (ppm)	209	229±15	91
Ni (ppm)	64.0	55.3±3.6	116
Pb (ppm)	22.1	22.7±3.4	97
Zn (ppm)	99.3	119±12	83

a : These were averaged values.

b : Calculated as sum of (each fraction)/certified value × 100.

Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometer)를 이용하여 분석하였다. 이상의 화학분석에서 발생될 수 있는 오류와 분석의 정밀도, 정확도를 검정하기 위하여 중복시료, 공시료 그리고 원소의 함량을 알고 있는 표준시료(BCSS-1)를 이용하여 비교·평가하였다(Table 1).

한편 석탄회 분포여부를 확인하기 위하여 선정된 시료에 대하여 X-선 회절분석(XRD : X-Ray Diffractometry)을 이용한 관찰을 실시하였으며, 또한 2, 6, 12, 15, 21, 29번 시료에 대해서는 한국 화학시험연구원에 의뢰하여 폐기물공정시험법에 따라 용출 시험(Leaching Test)을 실시하였다. 이때 용출 시험은 시료 적당량에 증류수와 염산으로 pH를 5.8~6.3으로 조절한 용매를 혼합하여 분당 약 200회로 6시간 연속 진탕한 후 원심분리한 상등액을 이용하여 분석하였다.

III. 결과 및 토의

1. 퇴적물 조성

연구지역 표층퇴적물의 평균입도는 1.86~7.18 ϕ 의 범위를 보였다(Table 2). 표층퇴적물의 퇴적상은 실트(silt)와 사질 실트(sandy silt)가 주종을 이

루었으며, 실트질 모래(silty sand), 니질 모래(muddy sand), 역질 니토(gravelly mud) 그리고 니질 자갈(muddy gravel)도 일부 나타났다(Fig. 2). 일반적으로 평균입도의 영향은 퇴적물 내 금속원소 분포에 큰 영향을 미치게 되는데 이는 평균입도가 금속원소를 집적(accumulation)시키는 지화학적 기질(geochemical substrate)로 작용하는 유기물 함량과 회석의 요인으로 작용하는 탄산염 함량에도 영향을 미치기 때문이다.

연구지역 퇴적물 내의 강열감량은 2.45~15.84%로 함량이 비교적 많은 것으로 조사되었다. 평균입도에 따른 경향성을 잘 보이고 있으며(Fig. 3), 유기탄소 함량(0.01~1.28%)과 화학적 산소요구량(0.03~3.42%) 역시 입도에 대한 의존성을 잘 보이고 있다. 일반적으로 퇴적물 중의 유기물 함량은 그 자체로서 퇴적물의 오염 환경을 평가하는데 중요한 척도로 작용할 뿐만 아니라, 퇴적물의 평균입도가 감소함에 따라, 즉 퇴적물의 입도가 세립화함에 따라 그 함량이 증가하는 경향을 보이게 되는데 큰 비표면적과 양이온교환능력(Cation Exchange Capacity, CEC), 부전하량 등으로 인해 중금속원소 분포를 조절하는 특성을 지닌다. 한편 총 황 함량(0.000~0.688%)의 경우 평균입도나 유기물 함량과는 특별한 경향성을 보이지 않았다.

탄산염 함량의 경우 0.36~72.15%로 정점별 변

동폭이 컸으며, 주로 조립한 퇴적물이 분포하는 정점들에서 높은 값을 갖는 것으로 조사되었다. 이처럼 세립퇴적물보다 조립퇴적물에서 탄산염 함량이 높은 현상은 조립한 저서 생물의 폐각편에 의한 영향을 받은 것으로서, 황해 및 동해와는 다른 남해 퇴적물만의 뚜렷한 특징이다(조 등, 1994)³⁾.

2. X-선 회절분석 결과

본 연구에서는 해양퇴적물 중의 석탄회 분포 여부를 파악해보기 위하여 회처리장 인근에 위치한 7번, 9번, 10번, 28번 정점 시료 및 전기집진기에서 채취한 Fly ash를 대상으로 직경 0.125mm 이하의 시료를 이용하여 X-선 회절분석을 실시하였다. 일반적으로 Fly ash의 구성 광물은 mullite($3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$), quartz(SiO_2), spinels(Fe_3O_4 , Fe_2O_3)를 함유한 유리질이고, lime(CaO)이나 anhydrite($CaSO_4$), gypsum($CaSO_4 \cdot 2H_2O$)도 존재한다(Keefer and Sajwan, 1993)⁸⁾. 조사 지역의 Fly ash 분석결과 역시 대부분 석영과 고온하에서 생성되는 규산알루미늄 광물인 mullite로 이루어져 있음이 관찰되었으며(Fig. 4), 퇴적물 시료 중에서는 7번 시료만이 mullite 광물을 함유하고 있는 것이 뚜렷이 관찰되었다. 위의 결과로 판단해 보았을 때, 석탄회는 제 1 회처리장의 7번 정점 주변

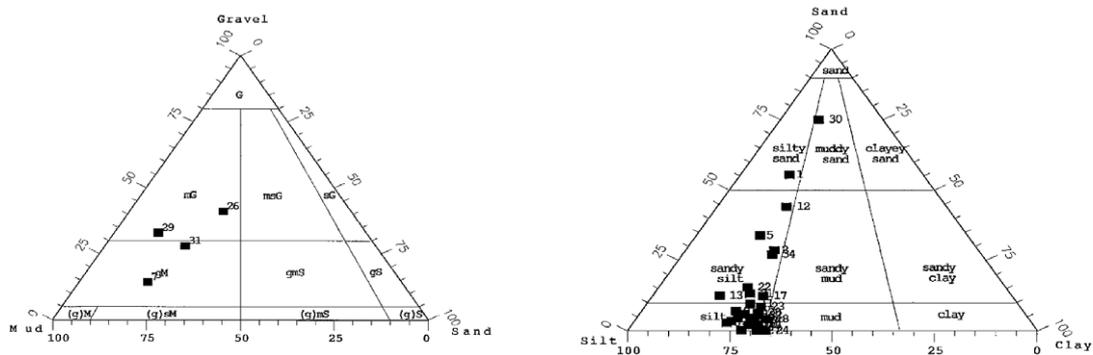


Fig. 2. Ternary diagram for the sediment types.

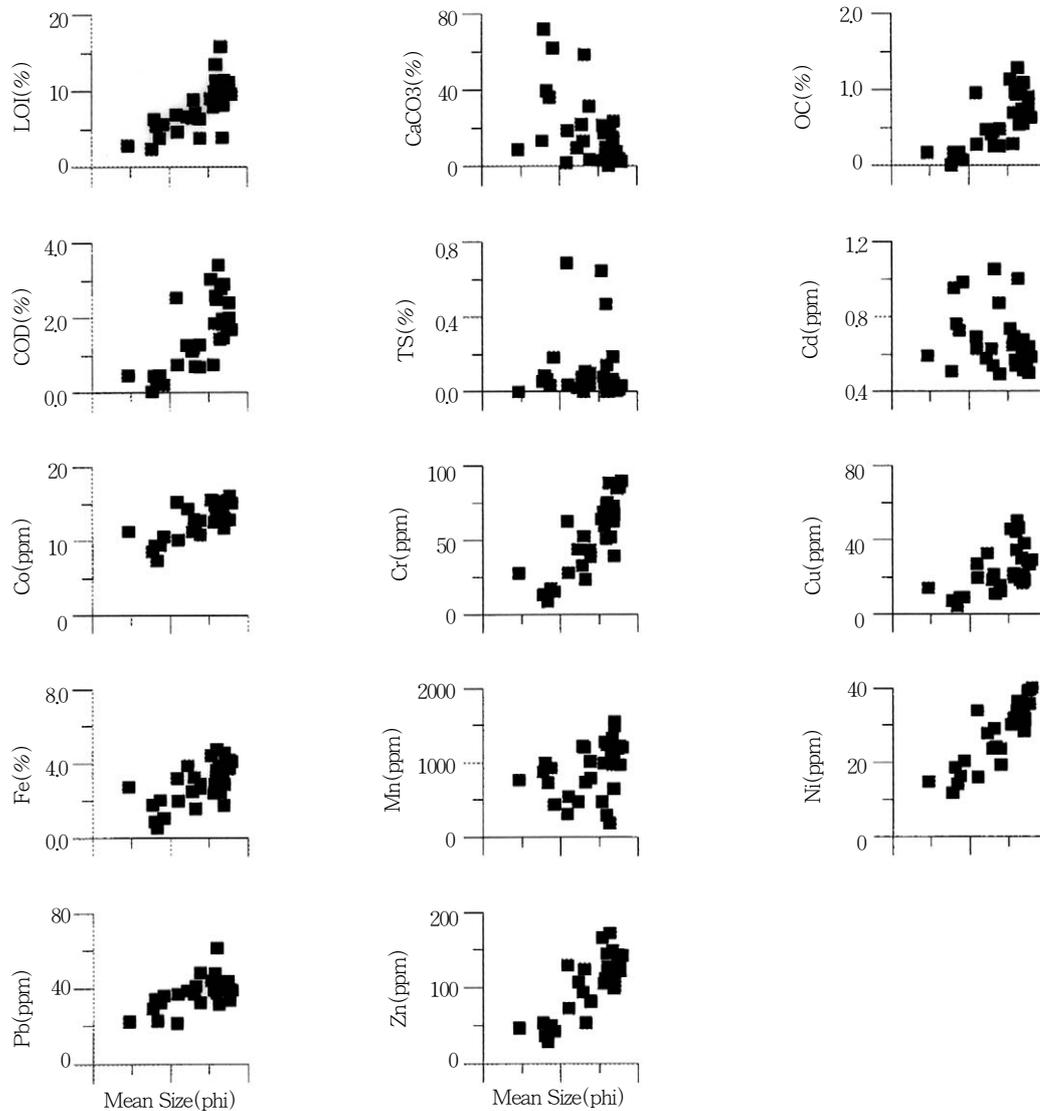


Fig. 3. Correlation plot with mean grain size from Samcheonpo region.

이 주요 침출 지역으로 판단되며, 10번과 28번 시료의 X-선 회절분석 결과와 비교해 보았을 때 이러한 석탄회 분포는 제 1 회처리장 주변에만 국한된 문제로 파악할 수 있다.

3. 중금속 함량 분포특성

퇴적물과 Fly ash에서 나타난 중금속의 평균

함량과 그 범위를 Table 2에 제시하였다. 금속원소의 함량범위는 카드뮴 0.5~1.1 ppm, 코발트 7.4~28.1 ppm, 크롬 8.7~90.1 ppm, 구리 4.3~84.1 ppm, 수은 0.00~0.18 ppm, 철 0.52~4.75%, 망간 184~1,554 ppm, 니켈 11.7~87.6 ppm, 납 21.6~65.1 ppm, 아연 28.0~227.7 ppm으로 조사되었으며, 특히 코발트, 구리, 수은, 니켈, 납, 아연의 경우 Fly ash 중에서 최대값을 나타내었다.

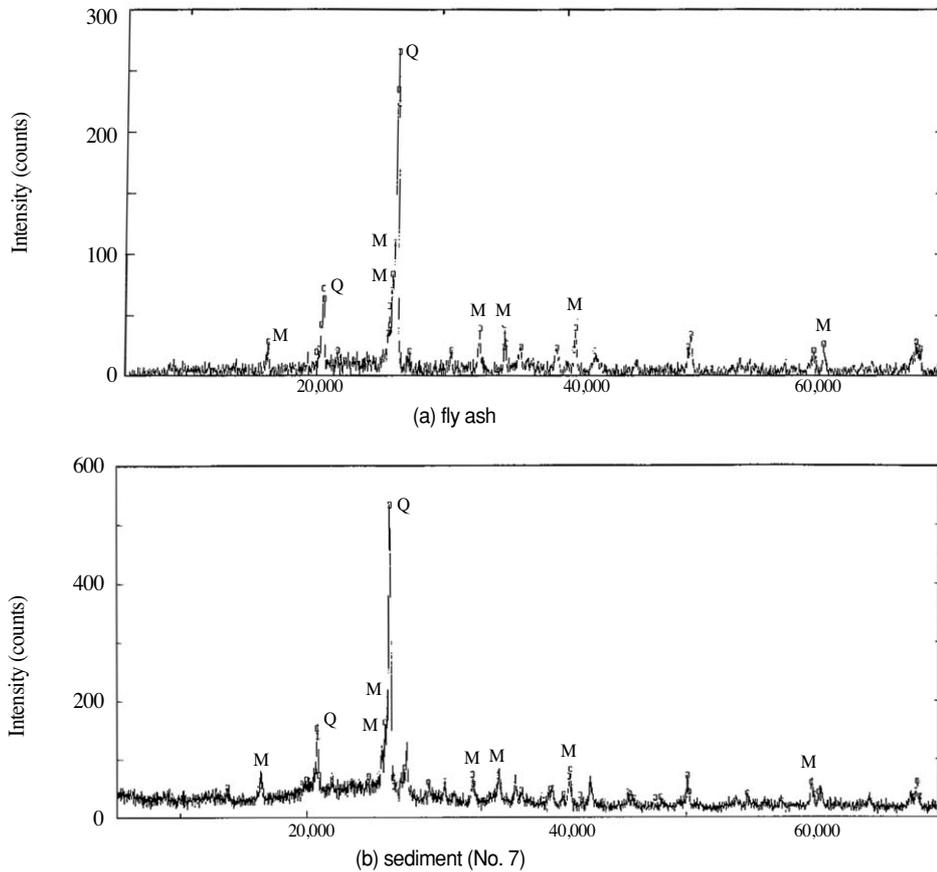


Fig. 4. X-ray diffractogram of the fly ash and sediment (Q : quartz, M : mullite).

연구지역 퇴적물 중의 중금속 함량을 우리나라의 여러 지역과 지각중의 평균 함량 등과 비교해 보았다(Table 4). 화학원소의 함량은 퇴적물의 구성에 따라 크게 좌우되고 퇴적물의 조성 또한 근원지의 암상과 불기질의 관계를 갖기 때문에 지역성이 매우 강하다고 볼 수 있으며(Salomons and Förstner, 1984)¹¹⁾, 따라서 이러한 자료들의 비교를 절대적인 기준으로 파악하는 것은 경우에 따라 해석상의 오류를 범할 소지가 크다고 할 수 있다. 조사지역의 코발트, 크롬, 구리, 철과 니켈의 함량은 동해 대륙붕과 남해 대륙붕 퇴적물의 금속원소 함량과 비슷한 값을 보이고 있는 것으로 나타났으며, 카드뮴과 망간, 납, 아연의 함량은

이들 지역에 비해 전반적으로 다소 높은 값을 보이는 것으로 조사되었다. 한편 석탄회가 분포하고 있는 것으로 조사된 제 1 회처리장 주변 퇴적물(4, 5, 6, 7, 9번 정점)의 함량을 중심으로 비교해 보았을 때, 구리와 아연의 함량이 연구지역내 타 정점 시료에 비해 높은 값을 가지고 있는 것으로 조사되었다.

퇴적물 내에 함유된 금속원소들의 분포 경향성을 살펴보기 위하여 상관관계 분석을 실시하였다(Table 3). 앞서 언급한 바와 같이 강열감량과 유기탄소 함량, 화학적 산소요구량 등 지화학적 요인들이 평균입도와 비교적 좋은 상관관계(각각 $r = 0.74, 0.71, 0.71$)를 보이고 있다. 또한 분석된

Table 2. Analytical results of surface sediments from Samcheonpo region.

Sample No.	Mz (Φ)	CaCO ₃ (%)	LOI (%)	OC (%)	TS (%)	COD (%)
1	3.10	13.34	2.45	0.01	0.058	0.03
2	5.55	31.43	6.42	0.26	0.035	0.69
4	6.13	3.01	9.05	1.14	0.646	3.04
5	4.40	18.82	4.68	0.28	0.038	0.75
6	6.52	0.36	11.02	1.28	0.004	3.42
7	4.36	1.96	6.92	0.96	0.688	2.55
9	6.38	6.38	13.50	0.97	0.470	2.59
10	6.73	9.78	8.86	0.69	0.191	1.84
11	5.31	58.86	7.18	0.26	0.111	0.69
12	3.68	62.26	5.66	0.08	0.185	0.21
13	4.90	9.89	6.67	0.48	0.022	1.27
14	6.95	7.76	10.13	0.68	0.007	1.80
15	6.42	6.62	11.32	0.94	0.142	2.50
16	6.80	14.25	11.44	1.09	0.050	2.90
17	6.30	17.44	9.89	0.70	0.044	1.87
18	6.66	6.22	15.84	1.04	0.029	2.78
19	6.41	10.03	10.54	0.97	0.000	2.60
20	6.74	15.41	3.90	0.75	0.007	1.99
21	5.23	13.20	8.89	0.45	0.001	1.20
22	5.15	22.10	6.50	0.42	0.080	1.12
23	6.25	21.39	7.98	0.28	0.080	0.75
24	7.18	2.55	9.62	0.63	0.032	1.69
25	7.07	3.82	11.17	0.75	0.014	2.01
26	1.86	8.68	2.83	0.17	0.000	0.46
27	7.07	4.02	10.34	0.91	0.016	2.41
28	6.60	21.21	9.90	0.54	0.016	1.43
29	3.34	39.67	5.38	0.11	0.067	0.29
30	3.49	36.48	3.86	0.17	0.035	0.46
31	3.21	72.15	6.35	0.17	0.089	0.46
32	6.80	13.39	9.87	0.72	0.025	1.91
33	6.70	9.60	10.17	0.70	0.070	1.85
34	5.56	3.50	3.80	0.48	0.100	1.29
35	6.78	23.71	8.20	0.55	0.040	1.47
Fly ash	-	0.68	3.41	0.44	0.113	1.17

LOI : Loss On Ignition, OC : Organic Carbon, TS : Total Sulfur

대부분의 중금속원소들이 평균입도와는 비교적 좋은 상관관계를 보이고 있으며, 입도가 세립화함에 따라 함량이 증가하는 일반적인 경향성을 보이고 있다(Fig. 3). 이처럼 퇴적물의 입도는 중금속원소 분산에 큰 영향을 미치게 되는데 입자

의 크기가 감소할수록 표면적이 증가하게 되고, 또한 표면적이 증가할수록 흡착률이 커지게 되어 결국 원소의 흡착을 증가시키는 기초 변수로 작용하기 때문이다. 또한 위에서도 언급한 바와 같이 입자의 크기는 지화학적 요인들과도 밀접한

Table 2. (Continued)

Sample No.	Cd (ppm)	Co (ppm)	Cr (ppm)	Cu (ppm)	Fe (%)	Mn (ppm)	Ni (ppm)	Pb (ppm)	Zn (ppm)	Hg (ppm)
1	0.5	8.6	13.4	7.2	1.77	872	11.7	29.2	52.9	0.09
2	0.9	12.8	43.8	15.4	2.68	1,006	23.5	48.2	82.2	0.11
4	0.7	15.6	64.1	45.9	4.39	477	30.1	44.1	166.7	0.09
5	0.6	10.2	28.1	19.6	1.98	540	15.9	36.8	72.2	0.04
6	1.0	13.9	88.7	46.3	3.88	184	31.0	31.6	172.1	0.03
7	0.7	15.3	63.0	27.2	3.19	309	33.9	21.6	128.7	0.00
9	0.6	14.2	51.2	44.2	3.24	289	30.2	37.5	144.9	0.00
10	0.6	14.6	73.1	16.6	3.48	643	33.2	39.5	98.1	0.00
11	1.1	11.8	23.6	10.8	1.56	736	24.0	40.8	53.0	0.05
12	1.0	10.6	15.5	9.1	1.06	433	20.2	35.8	42.2	0.05
13	0.6	14.3	43.9	32.5	3.86	475	27.7	38.7	106.8	0.00
14	0.6	15.5	84.7	28.5	4.02	1,182	39.2	43.8	142.8	0.00
15	0.7	15.4	75.3	50.4	4.75	1,241	36.4	61.4	127.0	0.00
16	0.5	12.9	68.3	38.1	4.56	1,554	31.0	40.1	115.7	0.00
17	0.7	14.8	60.0	19.9	2.88	1,271	31.9	47.8	111.6	0.00
18	0.6	14.3	72.4	30.1	3.61	1,326	36.4	40.8	149.0	0.00
19	0.5	13.5	72.4	34.4	3.61	1,235	33.9	41.8	120.4	0.00
20	0.6	13.4	62.8	21.3	2.88	1,073	32.6	42.0	111.1	0.02
21	0.5	13.0	52.7	21.3	3.22	1,197	29.1	36.7	124.1	0.00
22	0.6	11.3	33.0	18.1	2.51	1,213	23.4	38.7	93.9	0.00
23	0.6	12.6	68.7	21.6	2.39	990	31.8	38.8	105.4	0.03
24	0.6	15.1	90.1	29.3	4.08	1,200	39.9	38.8	141.9	0.00
25	0.5	12.9	86.3	26.8	3.70	961	35.6	33.7	121.9	0.00
26	0.6	11.3	27.8	14.0	2.74	758	14.7	22.2	45.9	0.00
27	0.6	16.1	86.2	26.7	4.16	1,215	39.4	39.0	130.3	0.00
28	0.7	12.8	52.5	18.5	2.41	1,111	30.5	42.6	106.1	0.03
29	0.8	7.4	8.7	4.3	0.52	726	14.0	22.6	28.0	0.06
30	0.7	9.5	17.4	9.0	2.02	922	16.2	32.1	49.2	0.03
31	1.0	9.5	13.6	7.3	0.88	990	18.5	34.0	36.2	0.03
32	0.6	13.1	66.9	18.0	2.87	1,216	31.8	39.9	109.4	0.00
33	0.6	13.8	73.0	17.7	3.41	967	33.1	40.4	109.9	0.03
34	0.5	10.9	38.8	12.3	2.89	788	19.2	32.3	80.5	0.00
35	0.7	11.7	39.4	18.8	1.74	1,485	28.3	43.8	101.4	0.00
Fly ash	0.9	28.1	64.7	84.1	2.32	401	87.6	65.1	227.7	0.18

상관관계를 가지므로 중금속원소의 분산은 일차적으로는 퇴적물의 평균입도에 의해 지배되고 있다고 할 수 있다. 특히 코발트, 크롬, 구리, 철, 니켈, 아연 등은 유기물 함량을 지시하는 유기탄소 함량과 화학적 산소요구량과도 좋은 양의 상관관계(각각 $r=0.78, 0.80, 0.85, 0.80, 0.76, 0.89$)를 보이고 있어 이들 원소들이 주로 세립한 퇴적물에 흡

착되어 있는 유기물과 결합된 형태로 존재하고 있을 가능성을 시사하고 있다. 물론 위의 원소들은 강열감량과도 유의한 상관성을 보이고 있으나, 유기탄소 함량과 화학적 산소요구량에 비해서는 상대적으로 낮은 상관성을 보이고 있어 중금속을 집적시키는 지화학적 요인을 지시해주는 인자로 강열감량에 비해 유기탄소 함량이나 화학

Table 3. The correlation matrix of element concentration and textural characteristics in sediment samples from Samcheonpo region.

	Mz	CaCO ₃	LOI	OC	TS	COD	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Hg	Mn	Ni	Pb	Zn
Mz	1.00															
CaCO ₃	-0.49	1.00														
LOI	0.74	-0.37	1.00													
OC	0.71	-0.66	0.75	1.00												
TS	-0.07	-0.13	0.08	0.31	1.00											
COD	0.71	-0.66	0.75	1.00	0.31	1.00										
Cd	-0.29	0.69	-0.16	-0.22	0.13	-0.22	1.00									
Co	0.72	-0.62	0.66	0.78	0.27	0.78	-0.22	1.00								
Cr	0.84	-0.71	0.72	0.80	0.01	0.80	-0.35	0.86	1.00							
Cu	0.56	-0.62	0.67	0.85	0.32	0.85	-0.19	0.73	0.69	1.00						
Fe	0.64	-0.79	0.60	0.80	0.12	0.80	-0.46	0.85	0.84	0.82	1.00					
Hg	-0.36	0.41	-0.39	-0.40	0.15	-0.40	0.50	-0.40	-0.45	-0.29	-0.41	1.00				
Mn	0.38	-0.03	0.26	0.05	-0.54	0.05	-0.38	0.08	0.23	-0.06	0.15	-0.31	1.00			
Ni	0.87	-0.53	0.78	0.76	0.08	0.76	-0.27	0.90	0.93	0.64	0.75	-0.50	0.31	1.00		
Pb	0.62	-0.07	0.46	0.32	-0.13	0.32	-0.02	0.50	0.39	0.42	0.41	-0.04	0.47	0.50	1.00	
Zn	0.78	-0.74	0.75	0.89	0.25	0.89	-0.30	0.85	0.87	0.85	0.83	-0.36	0.07	0.84	0.39	1.00

Table 4. Average chemical composition of surface sediments from Samcheonpo Power Plant, together with those of other areas for comparison.

	Continental shelf of East Sea ^a	Jinhae bay ^b	Continental shelf of South Sea ^c	SCP Power Plant ^d		Crust (shale) ^e
				range	mean	
Cd (ppm)				0.5-1.1	0.7	0.3
Co (ppm)	11	12	12	7.4-16.1	12.8	25
Cr (ppm)	71	59	53	8.7-90.1	53.3	100
Cu (ppm)	20	30	11	4.3-50.4	23.1	55
Fe (%)	3.1	3.6	2.5	0.52-4.75	2.94	5.6
Hg (ppm)				0.00-0.11	0.02	0.4
Mn (ppm)	365	386	409	184-1554	927	950
Ni (ppm)	33	27	26	11.7-39.9	28.1	75
Pb (ppm)	31	37	27	21.6-61.4	38.1	13
Zn (ppm)	95	128	62	28.0-172.1	102.5	70

Source of data : ^aLee et al.(1991)⁹) and 조(1994)²); ^bLee and Lee(1983)¹⁰); ^c조 등(1994)³); ^dThis study; ^eTaylor(1964)¹²).

적 산소요구량이 더 좋은 지시자가 될 수 있음을 암시해주고 있다. 한편 카드뮴과 수은, 망간 함량은 평균입도와는 의미있는 상관성을 보이지 않고 있다. 카드뮴 함량의 경우 탄산염 함량과 양의 상관관계($r=0.69$)를 보이고 있어 이 등(1999)¹¹)의 앞선 고찰과 마찬가지로 탄산염 물질에 의해 카드뮴 함량이 지배되고 있음을 알 수 있다. 수은 함량의 경우 카드뮴 함량과는 양의 상관관계

($r=0.50$)를 보이고 있으나 함량과 변화 폭이 작아 의미있는 관계를 유추하기는 힘들 것으로 판단된다. 망간의 경우 어떤 다른 성분과도 의미있는 상관관계를 보이지 않았다.

한편 퇴적물과 석탄회에 함유된 중금속의 수중에의 재용출 가능성 정도를 파악해보기 위하여 위의 실험과는 별도로 2, 6, 12, 15, 21, 29번 퇴적물 시료와 석탄회 시료에 대해서는 한국화학시험

Table 5. Analytical results of leaching test.

Sample No.	As (ppm)	Cd (ppm)	CN (ppm)	Cr6+ (ppm)	Cu (ppm)	Hg (ppm)	Pb (ppm)
2	nd	nd	nd	nd	0.07	nd	nd
6	0.08	nd	nd	nd	0.10	nd	nd
12	0.06	nd	nd	nd	nd	nd	nd
15	nd	nd	0.02	nd	0.02	nd	nd
21	nd	nd	0.03	nd	nd	nd	nd
29	nd	nd	nd	nd	0.02	nd	0.04
Fly ash	0.04	nd	0.05	nd	0.02	nd	nd

nd : not determined.

연구원에 의뢰하여 폐기물공정시험법상의 용출시험을 실시하였다(Table 5). 제 1 회처리장 주변 시료 중에서 6번 정점을 선정한 이유는 Table 2의 중금속원소 함량 결과에서도 볼 수 있듯이 7번 정점에 비해 그 함량이 대체로 높게 나타나고 있으며, 또한 인근 쓰레기 매립장의 영향도 나타나고 있을 것이라는 판단에서이다. 용출시험 분석결과, 대부분의 금속원소들이 검출한계 이하로 나타났다. 이렇듯 용출정도는 총함량 분석에 의한 값보다는 원소들의 이온 형태나 기질(solid matrix) 내에서의 분포 등에 의해 영향을 많이 받고 있으며(Keefer and Sajwan, 1993)⁸⁾, 위의 연구 결과는 앞선 이 등(1999)¹⁾의 1997년 삼천포 주변 해역 퇴적물 시료에 대한 연속추출분석결과에서도 알 수 있듯이 대부분의 금속원소들이 쉽게 용출될 수 있는 교환가능한 형태보다는 잔류상 형태 또는 유기물과 결합된 형태 등으로 많이 존재하고 있다는 사실을 반영하고 있다. 물론 위의 결과는 추출제의 종류와 농도, 추출 시간, 온도 등 여러 가지 요인에 대한 많은 변수를 포함하고 있어 실제 현장 상황들(field conditions)을 정확히 모사하고 있지는 못하며, 이러한 문제점을 보완하기 위해서는 퇴적물의 간극수 분석 등 보다 직접적인 방법을 이용한 분석도 병행하여 할 것으로 생각된다.

위의 결과들을 바탕으로 고찰해보면 연구지역

퇴적물 중의 금속원소 함량은 전반적으로 카드뮴과 망간, 납 아연이 우리 나라의 여러 지역 퇴적물 중의 함량보다 부화(enrichment)되어 있는 것으로 조사되었다. 한편 퇴적물 내의 석탄회 분포에 의한 금속원소 함량의 변화나 수중으로의 재용출 가능성은 미약한 것으로 판단되는데, 이는 제 1 회처리장 주변 정점(4, 5, 6, 7, 9번 정점)이 다른 정점에 비해 그다지 높은 금속원소 함량을 보이지 않고 있으며, 그 분포가 단지 평균입도에 따른 경향성만을 나타내는 것에서 알 수 있다. 다만 석탄회 유출에 의한 영향을 파악하기 위해서는 구리와 아연 함량에 대해서는 앞으로도 계속적인 모니터링이 필요할 것으로 생각되는데 여기에는 석탄회 분포에 의한 문제뿐만 아니라 인근 쓰레기 매립장의 영향도 함께 고려해야 할 요소로 판단된다.

IV. 결론

화력발전소의 가동에 따른 중금속원소들의 분산양상과 오염특성을 파악하기 위하여 삼천포화력발전소의 표층퇴적물을 대상으로 실시한 중금속의 총함량 분석(Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Ni, Pb, Zn)의 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 삼천포화력발전소 주변해역에서 분석된 표층 퇴적물은 실트와 사질 실트가 주종을 이루고

있으며, 입도가 세립화함에 따라 강열감량, 유기탄소 함량, 화학적 산소요구량 등 퇴적물 내의 유기물 함량이 증가하는 것으로 나타났다. 탄산염 함량은 조립한 퇴적물에서 대체로 높은 값을 보이고 있다.

2. X-선 회절분석을 이용한 관찰 결과 석탄회의 경우 제 1 회처리장의 7번 정점 주변이 주요 침출 지역으로 판단되며, 이러한 석탄회 분포는 제 1 회처리장 주변에만 국한된 문제로 파악할 수 있다.
3. 유기물 함량과 대부분의 금속원소 함량은 평균입도와 비교적 좋은 양의 상관관계를 보이고 있다. 특히 코발트, 크롬, 구리, 철, 니켈, 아연 등은 유기물 함량을 지시하는 유기탄소 함량과 화학적 산소요구량과도 좋은 양의 상관관계를 보이고 있어 이들 원소들이 세립한 퇴적물에 흡착되어 있는 유기물과 결합된 형태로 존재하고 있을 가능성을 시사해주고 있다. 그러나 카드뮴의 경우 탄산염 함량에 의해, 망간의 경우 위와는 다른 지화학 요인에 의해 분포가 지배되고 있으며, 수은의 경우 함량과 변화 폭이 작아 의미있는 결과를 도출하기는 어렵다.
4. 퇴적물 내의 석탄회 분포에 의한 금속원소 함량의 변화는 미미한 것으로 판단된다. 이는 제 1 회처리장 주변 정점이 다른 정점에 비해 그다지 높은 중금속 함량을 보이고 있지 않으며, 그 분포가 단지 평균입도에 따른 경향성만을 나타내고 있다는 것에서 알 수 있다. 다만 구리와 아연의 함량이 제 1 회처리장 주변 정점에서 높은 값을 나타내고 있는 것으로 나타나 앞으로도 지속적인 모니터링이 필요할 것으로 판단된다.

주변 표층퇴적물내 중금속원소 분산 특성, 한국해양학회지 「바다」, 4: 25-32.

2. 조영길, 1994, 한반도 주변해역 퇴적물 중 중금속원소의 분포와 기원에 관한 연구, 서울대학교 박사학위논문, 262.
3. 조영길, 이창복, 최만식, 1994, 남해 대륙붕 표층퇴적물중 중금속 원소의 분포 특성, 한국해양학회지, 29: 338-356.
4. 한국전력공사, 1990, 석탄회의 농업적 활용 기초연구, 190.
5. Folk, R.L. and W.C. Ward, 1957, Brozos river: A study in the significance of grain-size parameters, *J. Sed. Petrology*, 27: 3-27.
6. Horowitz, A.J., 1991, A primer on sediment-trace element chemistry (2nd ed.), Lewis Publisher, Michigan, 136.
7. Jackson, M.L., 1967, Soil chemical analysis, Prentice-Hall of India Private Limited, New Delhi, 485.
8. Keefer, R.F. and K.S. Sajwan, 1993, Trace elements in coal and coal combustion residues, Lewis Publishers, Michigan, 308.
9. Lee, C.B., Y.A. Park, H.J. Kang and D.C. Kim, 1991, Geochemical characteristics of the continental shelf and slope sediments off the southeastern coast of Korea, *Korean J. Quater. Res.*, 5: 15-32.
10. Lee, S.H. and K.W. Lee, 1983, Heavy metals in sediments from Jinhae Bay Korea, *J. Korean Soc. Oceanogr.*, 18: 49-54.
11. Salomons, W. and U. Förstner, 1984, Metals in the Hydrocycle, Springer-Verlag, Berlin, 349.
12. Taylor, S.R., 1964, Abundance of chemical elements in the continental crust, a new table, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 28: 1274-1285.
13. Thornton, I., 1983, Applied environmental geochemistry, Academic Press, London, 501.

참고문헌

1. 이두호, 전병열, 이창복, 김범수, 1999, 발전소