

시멘트 고화제 고결공법에 따른 공사장 주변해수의 용존성 중금속 농도 변화

김진태^{1,†} · 김은수¹ · 오영민² · 정경호³ · 조성록¹ · 박준건¹

¹한국해양연구원 해양기후·환경연구본부

²한국해양연구원 연안항만·공학 연구본부

³한국해양연구원 부설 극지연구소

Distribution of Dissolved Heavy Metals Released during Stabilizing Processes of Soft Sea-Bottom using Cement Stabilizers

Kyung Tae Kim^{1,†}, Eun Soo Kim¹, Young Min Oh², Kyung Ho Chung³,

Sung Rok Cho¹ and Jun Kun Park¹

¹Ocean Climate and Environment Research Division, KORDI, Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea

²Coastal Engineering and Harbour Research Division, KORDI, Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea

³Korea Polar Research Institute, KORDI, Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea

요 약

연약지반을 개량하기 위한 방법 중에서 최근에 시멘트 고화제를 주입하는 방법이 이용되고 있다. 이 방법은 고화제로부터 중금속을 수중으로 용출시킬 수 있으며, 그 정도를 확인하기 위하여 연약지반 개량공사를 시행하고 있는 천수만의 오천항에서 조사를 실시하였다. 조사 결과, 용존성 중금속 농도는 천공 지점에서 가장 높고, 거리가 멀어짐에 따라 농도는 급격히 낮아졌으며, 천공지점을 비롯한 각 지점의 중금속 농도는 우리 나라 뿐 아니라 미국과 영국의 해양환경 기준을 만족하는 것으로 나타났다.

Abstract – The injection of cement stabilizer is used as one of ways to stabilize soft sea-bottom. However, this method makes an argument for the possibility of releasing heavy metals from the cement stabilizer to the seawater. To investigate the effect of the cement stabilizer on the seawater, field measurements were carried out in Ocheon harbor of the Chunsoo Bay. Although the highest concentrations of dissolved heavy metals were found in the surface seawater of the injection point and the metal concentrations decreased with distances, the levels of heavy metals in all the seawater met the demand of environmental criteria of Korea, US and UK.

Keywords: Soft sea-bottom(연약지반), Cement stabilizer(시멘트 고화제), Dissolved heavy metal(용존성 중금속), Environmental assessment(환경평가)

1. 서 론

연약 지반에 구조물을 설치할 경우 토질 공학적으로 안정, 침하, 액상화 및 투수성에 의해 나타날 수 있는 문제 때문에 구조물의 안전을 확보하기 어려울 경우가 많이 발생하고 있으며, 이에 대한 합리적인 대책의 하나로 지반 개량 공법이 이용되고 있다. 연약 지반의 천층 안전처리에는 다양한 공법들이 있는데 일반적으로 통과 교통량이 적은 도로 또는 농로를 건설할 경우 원지반 토사에

석회, 시멘트, 역청제, 기타 화학첨가물을 혼합하거나 토목섬유를 부설하는 방법이 이용되고 있다(과학기술[1999], 한국건설기술연구원[1988]).

하안, 해안 등의 지반 개량 공법에는 시멘트 및 시멘트계 고화제를 주재료로 하는 공법이 이용되고 있다. 그러나 이 공법은 시공 중에 재료로부터 Cr⁶⁺을 비롯한 각종 중금속을 용출시켜서 주위 환경에 영향을 미칠 가능성이 있는 것으로 의심을 받고 있다. 오와 김[2002]에 의한 천수만 오천항에서 시멘트 고화제를 이용한 해안의 지반 개량 공사장 주변 해수중의 용존성 Cr과 Cr⁶⁺ 분석결과에 따르면 천공지점의 표층수에서는 주변 환경보다 10배 이

[†]Corresponding author: ktkim@kordi.re.kr

상 높은 농도를 나타내었으며, 천공지점과 거리가 멀어짐에 따라 농도가 급격히 감소하였을 뿐 아니라 우리 나라의 해역 환경 기준인 0.05 mg/l(50 µg/l)보다 매우 낮은 것으로 나타났다.

한편 국내 연안의 시멘트 고화제 고결공법을 적용한 공사장에서 발생하는 중금속에 대한 환경 영향 연구는 오와 김[2002]에 의한 Cr⁶⁺ 외에는 이루어진 바가 없는 실정이다. 최근 들어 해수를 비롯한 자연수 중에 중금속은 극미량으로 존재하고 있기 때문에 시료 채취 및 분석 등 모든 과정에 청결 기술을 적용하여야만 정확한 자료를 얻을 수 있으며, 이러한 기술이 결여될 경우 중금속 농도는 실제에 비해 높게 평가되거나 높은 검출한계를 가지기 때문에 중금속의 거동과 환경 평가에 있어 자료로서의 활용 가치가 없다(Förstner and Wittmann[1981], Burton and Statham[1990], 이 등[1989], 김 등[1994]).

따라서 본 연구에서는 시멘트 고화제를 이용한 해안의 지반 강화 공사장에서 발생하는 중금속의 환경에 대한 영향 평가를 위하여 청결 기술을 적용해 해수를 채취·분석하였으며, 그 결과를 제시하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1 조사 지점 및 시료 채취

본 조사의 현장 관측은 지반개량 공사가 진행 중인 충청남도 보령시 오천항의 물양장 공사장 주변해역에서 실시하였다. 시료채취 위치는 Fig. 1과 같으며, 그림에서 1번은 고화제를 주입하기 위한 천공 지점이고, 2, 3, 4번은 천공 지점으로부터 각각 5 m, 10 m, 20 m 떨어진 지점이며, 5번(Reference)은 비교 정점으로 1번에서 약 300 m 정도 떨어진 오천항의 중앙부를 나타낸다.

천공을 하기 위한 장비와 천공 장면은 Photo 1과 같다. 천공방법은 드릴로 구멍을 뚫으면서 Air jet를 분사하는 방식이기 때문에 사진에서와 같이 해수교란에 의한 혼합이 표층에서도 확인되고 있었다. 해수 시료는 저층수 시료 채취과정에 발생할 수 있는 높은 오염 가능성 때문에 표층수만 채취하였다. 또한, 수심의 영향을 최

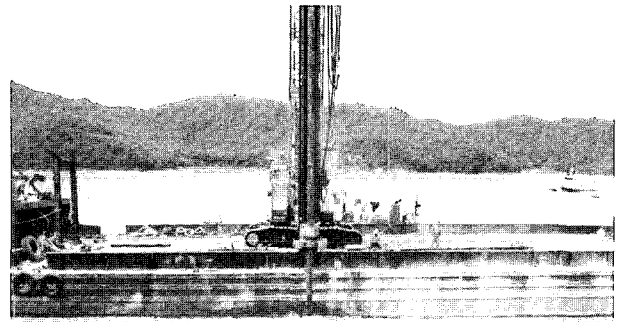


Photo 1. Drilling machine and injection of cement stabilizer.

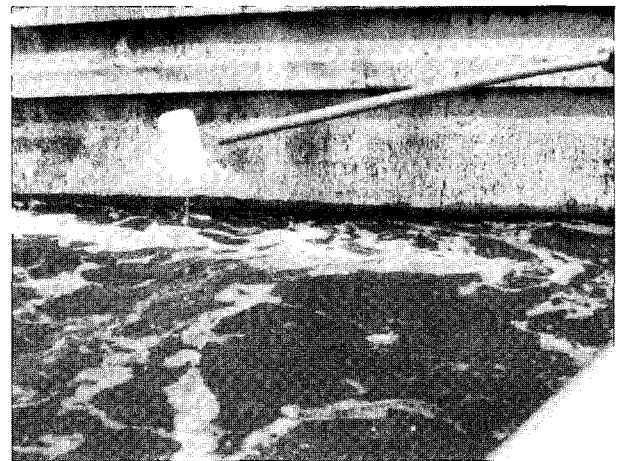


Photo 2. Water sampling.

소화하기 위하여 관측은 대조기(2002년 7월 9일, 음 5월 29일)의 저조를 약간 지난 시점으로, 그 때의 천공지점 수심은 4.2 m였다.

시료 채취는 Photo 2와 같이 소형선박을 이용하여 실시하였다. 먼저 선박에 의한 중금속 오염 방지를 위하여 선박의 전면에서 해수의 유향과 파도를 고려하여 시료 채취 위치를 정한 다음 손에 비닐장갑을 끼고 PVC 막대에 산 세척된 1 l들이 폴리에틸렌 병을 매달아 수면 아래 20-30 cm에서 채취하여 한번 행군 다음 다시 채취하여 뚜껑을 닫고 비닐로 이중 포장한 후 아이스박스에 넣어 냉장 보관하였다(Boyle *et al.*[1981]).

2.2 분석 방법

2.2.1 기구 및 시약

시료 채취 및 분석에 사용한 기구는 폴리에틸렌 및 테프론 재질이며, 세척은 먼저 세제로 표면의 먼지 및 유분을 제거한 후 10% HCl(GR급)에 7일 이상 넣었으며, 다시 새로운 10% HCl에 넣어 7일 동안 두었다. 다음에 고순도 HNO₃을 1 M, 0.1 M에 차례로 넣었으며, 각 과정마다 5일씩 두었다. 산세척은 Class 10,000 인 청정실에서 하였으며, 고순도 이온교환수로 세척한 용기는 Class

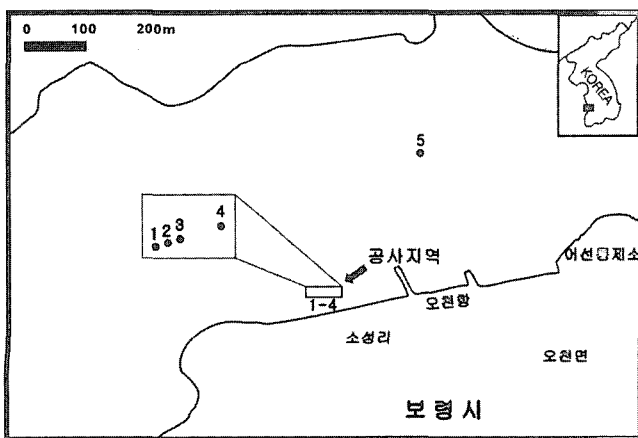


Fig. 1. Location map of water sampling.

100 청결벤취 안에서 말린 후 비닐로 이중 포장하여 사용할 때까지 플라스틱 용기에 넣어 보관하였다.

그리고 실험에 사용된 모든 시약은 시약에 의한 중금속 오염을 배제하기 위하여 중금속 함유량이 매우 낮은 고순도를 구입하거나 이 등[1989]의 방법에 따라 실험실에서 분석급 시약을 정제하여 사용하였다.

2.2.2 전처리 및 분석

채취한 시료는 수 시간 내에 실험실로 옮겨 Class 100의 청결벤취 안에서 미리 산으로 세척된 폴리카보네이트 막 여과지(직경 47 mm, Pore size 0.4 μm)를 폴리설폰 재질의 여과기에 설치하여 감압 여과하였다. 초기 여과액 약 50 ml는 버린 후 나머지 여과액을 받아서 고순도 HCl을 가하여 pH 2 이하로 처리하여 용존성 중금속 분석에 사용하였다.

용존성 중금속(Cd, Co, Cu, Ni, Pb, Zn)의 분리 농축은 Class 100의 청결벤취 내에서 시료를 Danielsson *et al.*[1978]의 DDTC-APDC-Freon 용매추출법을 변형한 이 등[1989]의 방법에 따랐으나 용매는 CFC-113 대신 대체물질로 개발되어 활용되는 HCFC-141b(CH₂ClCF₂)를 정제하여 사용하였다. 중금속이 추출된 용매는 증발시킨 다음 최종적으로 1% HNO₃로 용해하였으며, 원시료에 대하여 농축 비율은 50이었다. 이 용액은 내부표준물질로 Rh을 사용하여 ICP-MS(Perkin Elmer ELAN 6100)로 측정하였다. 한편 각 시료의 용존성 중금속 분석자료 정확도를 검증하기 위하여 NRC(National Research Council Canada)의 연안해수 표준물질인 CASS-4를 함께 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에 적용된 중금속 분석의 정확도를 파악하기 위하여 시행한 CASS-4의 분석 결과는 Table 1에 나타난 바와 같다. 각 용존성 중금속의 보증값에 대한 평균 회수율은 Pb의 91.8%에서 Co의 108%의 범위에 있었으며, 표준 편차도 비교적 작게 나타났고, 분석값은 모두 보증 범위내에 들었다. 따라서 시료에 대한 분석 결과는 신뢰성을 확보하고 있는 것으로 평가된다.

오천항 물양장 건설을 위해 지반 강화에 사용되는 시멘트 및 시멘트 고화제의 주입에 따른 공사장 주변 해수의 중금속 농도 변화를 파악하기 위하여 채취한 시료의 용존성 중금속 분석 결과는 Fig. 2에 나타내었다. 고화제 주입구의 표준수(St. 1)에서는 Cd

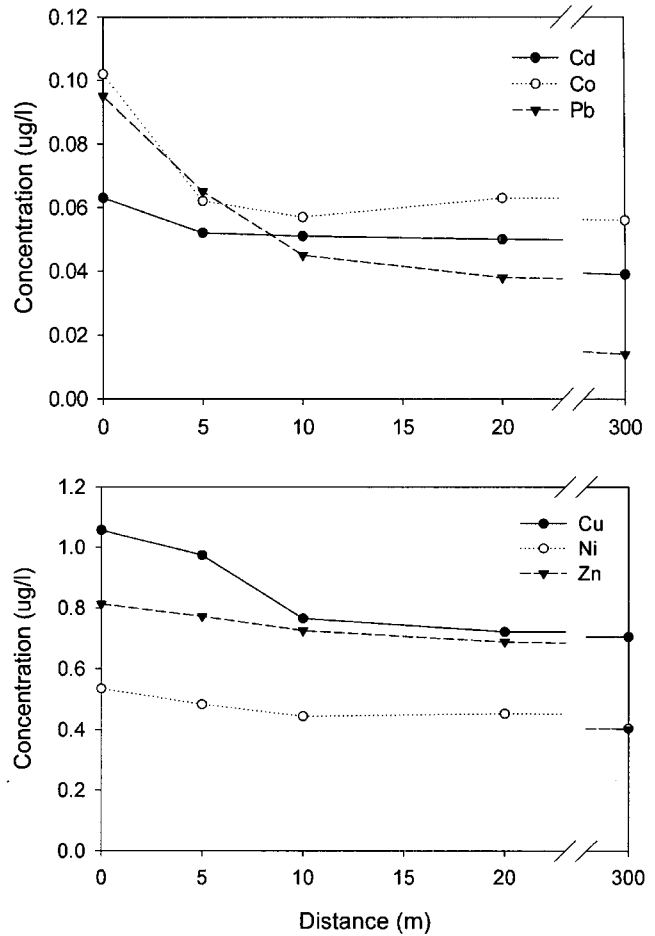


Fig. 2. Variations of dissolved heavy metals from the injection point to distances.

0.063 μg/l, Co 0.102 μg/l, Cu 1.06 μg/l, Ni 0.535 μg/l, Pb 0.095 μg/l, 그리고 Zn 0.813 μg/l로 조사 지점 중에서 가장 높은 농도를 나타내었다. 이들 중금속 농도는 주입구에서 멀어짐에 따라 감소하는 경향이었는데 Cu를 제외하면 0~5 m 구간에서의 농도 감소 경향이 두드러졌다. 원소별로 차이가 크지만 5 m 떨어진 St. 2의 농도는 St. 1에 비하여 5.1~39.1% 낮게 나타났는데 Co와 Pb이 30% 이상의 큰 감소폭을 보인 반면, Cu, Ni, Zn은 10%이하로 비교적 낮은 감소폭을 나타내었다.

이와 같은 감소율의 차이는 시멘트 및 시멘트계 고화제로부터의 용출 정도와 함께 조사 해역이 갖고 있는 용존성 중금속 절대

Table 1. Analytical results of CASS-4 nearshore seawater reference material.

Element	Certified value (μg/l)	Analytical value (μg/l)		Mean recovery (%)	N
		First	Second		
Cd	0.026±0.003	0.025	0.027	100	2
Co	0.026±0.003	0.029	0.027	108	2
Cu	0.592±0.055	0.577	0.594	99.0	2
Ni	0.314±0.030	0.322	0.301	99.4	2
Pb	0.0098±0.0036	0.0108	0.0088	91.8	2
Zn	0.381±0.057	0.365	0.362	95.5	2

Table 2. Seawater quality standards in Korea and other countries and dissolved heavy metal concentrations in the study area ($\mu\text{g/l}$).

Element	Korea	US	UK	This study
Cd	10	8.8	2.5	0.039-0.063
Cu	20	3.1	5.0	0.71-1.06
Ni	-	8.2	-	0.404-0.535
Pb	50	8.1	25	0.014-0.095
Zn	100	81	40	0.402-0.813

농도에 영향을 받고 있기 때문인 것으로 판단되는데, 대조 정점으로 천공 지점에서 300 m 떨어진 St. 5에서의 중금속 농도를 보면 Cu, Ni 및 Zn은 Cd, Co, Pb에 비해 7~50배 높은 농도를 보이고 있다. 5~10 m 구간에서는 Cu의 경우 더욱 감소폭이 컸으며, Ni, Zn과 Pb도 이전의 구간과 비슷한 농도 감소를 보였지만 그 외의 중금속은 다소 완만하게 감소하였다. 10~20 m 구간에서는 Co와 Ni은 약간 상승하였지만 그 외의 중금속은 이전 구간에 비해 더욱 완만한 감소를 나타내었는데 20 m 떨어진 St. 4에서의 중금속 농도는 Cd 0.050 $\mu\text{g/l}$, Co 0.063 $\mu\text{g/l}$, Cu 0.721 $\mu\text{g/l}$, Ni 0.452 $\mu\text{g/l}$, Pb 0.038 $\mu\text{g/l}$, 그리고 Zn 0.688 $\mu\text{g/l}$ 였다. 공사지점에서 가장 먼 St. 5에서는 Cd 0.039 $\mu\text{g/l}$, Co 0.056 $\mu\text{g/l}$, Cu 0.705 $\mu\text{g/l}$, Ni 0.404 $\mu\text{g/l}$, Pb 0.014 $\mu\text{g/l}$, 그리고 Zn 0.402 $\mu\text{g/l}$ 로 본 조사 정점 중에서 가장 낮았다.

참고로 본 조사에서 비교 정점으로 중금속 농도가 가장 낮은 St. 5의 자료를 2002년 10월부터 2003년 7월까지 4회에 걸쳐 실시된 천수만 주변 연안의 자료(한국해양연구원[2004]) 중에서 본 정점과 가까운 오천항의 용존성 중금속의 평균 농도인 Cd 0.036 $\mu\text{g/l}$, Co, 0.046 $\mu\text{g/l}$, Cu 0.65 $\mu\text{g/l}$, Ni 0.442 $\mu\text{g/l}$, Pb 0.015 $\mu\text{g/l}$, Zn 0.24 $\mu\text{g/l}$ 와 비교하면 대부분의 중금속은 10%내외의 차이를 나타내었지만 Zn의 경우 본 조사값이 1.7배 높게 나타났다.

한편 본 조사의 중금속 농도를 한국(해양수산부 국립수산과학원[2004]), 미국(USEPA[2002]), 영국(<http://www.environment-agency.gov.uk>)의 해역 수질환경 기준과 비교하였다(Table 2). 최고 농도를 나타낸 천공 지점(St. 1)의 용존성 중금속 농도를 우리나라의 기준과 비교하면 Cu는 1/19, Zn은 1/123, Cd은 1/159, 그리고 Pb은 1/525의 수준으로 기준에 비해서 매우 낮게 나타났다. 최근의 중금속에 대한 환경 기준은 분석 기술과 함께 생태계 및 인간의 건강을 고려한 영향 평가 기술의 발전을 반영하여 더욱 엄격해지고 있는 추세이며, 미국과 영국은 우리나라보다 낮은 농도로 정해져 있다. 그러나 미국과 영국의 기준을 적용하더라도 본 조사 자료에서 기준에 가장 근접한 Cu의 최대 농도도 미국과 영국의 기준에 대하여 각각 1/3, 1/5 정도였으며, 그 외의 중금속은 더욱 낮은 비율을 나타내었다.

이상과 같이 시멘트 고화제를 이용한 연약지반 개량 공사장의 용존성 중금속 농도는 천공 지점으로부터 멀어짐에 따라 급격히 낮아졌으며, 가장 높은 농도를 나타낸 천공지점의 농도도 우리나라 뿐 아니라 미국과 영국의 해양환경 기준을 만족하는 것으로 나

타났다. 그러나 본 연구에서는 공사장 주변 해수에 대한 중금속의 농도 분포만을 파악하였을 뿐이며, 환경 영향을 더욱 정확하게 평가하기 위해서는 공사장의 각종 자연 환경 시료, 공사 규모와 함께 공사장에서 유출된 시멘트 고화제의 장기적인 중금속 용출량, 생물 영향 등에 대한 연구가 필요하다.

후 기

본 논문은 대산지방해양수산청 항만공사과의 지원과 (주)활립 건설의 협조에 의하여 이루어졌으며, 두 기관의 관계자 및 논문의 심사를 해 주신 세분의 심사위원님께 감사드립니다.

참고문헌

- [1] 과학기술, 1998, 연약지반 대책공법 -설계에서 시공까지-, 491.
- [2] 김경태, 홍기훈, 이수형, 이동수, 김석현, 김은수, 1994, “진해만 표층해수중의 중금속 농도 분포”, 해양연구, 제16권, 1호, 19-27.
- [3] 오영민, 김경태, 2002, “시멘트 고화제 고결공법에서 발생하는 Cr⁶⁺의 환경영향 검토”, 한국해양-해양공학회지, 제14권, 4호, 319-321.
- [4] 이동수, 김경태, 홍기훈, 이수형, 1989, “한강 본류와 지류의 중금속 농도분포”, 한국수질보전학회지, 제5권, 1호, 47-56.
- [5] 한국건설기술연구원, 1988, 연약지반 천층 안정처리 연구, 건기연88-GE-111, 193.
- [6] 한국해양연구원, 2004, 보령북합화력발전소 가동으로 인한 해양영향조사, BSPI 35100-1673-3, 198-207.
- [7] 해양수산부 국립수산과학원, 2004, 한국해양환경 조사연보 2003, 제8권, 236.
- [8] Boyle, E.A., S.S. Husted and S.P. Jones, 1981, “On the distribution of copper, nickel, and cadmium in the surface waters of the North Atlantic and North Pacific Ocean”, J. Geophys. Res., Vol. 86, 8048-8066.
- [9] Burton, J.D. and P.J. Statham, 1990, Trace metals in seawater, In *Heavy Metals In The Marine Environment*, eds by R.W. Furness and P.S. Rainbow. CRC Press, Boca Raton, U.S.A., 5-25.
- [10] Danielsson, L., B. Magnusson, and S. Westerlund, 1978, “An improved metal extraction procedure for the determination of trace metals in seawater by atomic absorption spectrometry with electrothermal atomization”, Anal. Chim. Acta, Vol. 98, 47-57.
- [11] Förstner, U. and G.T.W. Wittmann, 1981, *Metal Pollution in the Aquatic Environment*. Springer-Verlag, New York, 486.
- [12] <http://www.environment-agency.gov.uk/yourenv/eff/water/213902/290690>.
- [13] USEPA, 2002, National recommended water quality criteria: 2002, EPA-822-R-02-047.

2005년 3월 18일 원고접수
2005년 5월 10일 수정본 채택