

지반개량 재료로서의 시멘트 사용에 의한 지반오염문제 및 대책

천병식*

1. 서 언

세계적으로 건설현장에서 폭넓게 사용되어 오던 주입공법이, 1974년을 전후하여 각 국에서 주입공법의 건설공사에서의 사용이 규제되어 왔으나 시멘트는 규제대상이 아니었다. 그러나 그동안 시멘트의 공해에 대해 논의가 없었던 것은 아니나 고분자계약액에 비해 상대적으로 직접적 공해 피해가 많지 않은 것으로 인식되고 있고 또 워낙 방대한 양이 쓰여지고 있어서 이에 대한 대책을 경미하게 취급해온 것이 사실이다.

그러나 최근 시멘트 그라우팅 현장에서 발암물질인 6가크롬이 용출되고 이에 대한 공해문제가 대두됨에 따라 외국(예: 일본건설성)에서는 관련기관에서 이에 대한 규정이 발효되고 곧 바로 본격적인 법적 조치에 들어감으로서 도처에서 이로 인한 공사중단 사태가 야기되는 등 엄격히 규제가 되고 있는 실정이다.

본 고에서는 현재 국내의 건설현장에서 시멘트 밀크 그라우팅 및 심층혼합 또는 고압분사공법(천병식, 1998) 등에 의한 지반개량재료로서 많이 쓰이고 있는 보통포틀랜드시멘트의 사용으로 인한 지하수 및 지반오염문제 현황 및 대책에 대하여 기술하고자 한다.

2. 시멘트밀크에 의한 교반, 고압분사에 의한 지반오염

현재 국내외적으로 지반개량 또는 지반보강을 위해 Slurry상태의 시멘트(밀크) 또는 분체상의 시멘트에 의해 교반 또는 초고압으로 분사하는 등 연약지반 고화처리공법이 광범위하게 쓰여지고 있으나 포틀랜드시멘트를 주재로 사용하는 각종 교반공법 또는 고압분사주입의 경우 6가크롬(木暮敬二, 2000) 등의 유해물질이 발생하여 지반을 오염시킬 수 있으며 특히 6가크롬은 대표적인 발암물질이다.

크롬은 토양, 화산재, 화산가스 등에서 나오는 원소이며 크롬(0), 크롬(Ⅲ), 크롬(Ⅵ)의 세가지 상태로 존재한다. 3가 크롬은 자연상태에 존재하고, 나머지는 일반적으로 공업과정에서 생성되는 데 이 중 6가크롬은 자극적이며 높은 농도에 단시간 노출되는 경우 피부에 궤양이 생기며, 코 점막을 자극하고 위장을 자극하며 신장과 간에도 영향을 줄 수 있다. 크롬이 발생하는 대표적인 근원은 화학제조공장과 천연가스, 석유, 석탄을 연소하는 곳이며 보통포틀랜드시멘트에 약 10ppm 정도 함유되어 있는 데 그 원인은 시멘트의 제조시 킬른(Kiln)에 사용하는 연와(煉瓦)에 의한 것으로 알려져 있다. 대부분의 사람들은 크롬을 함유하고 있는 공기를 호흡하거나, 음료수나 음식을 섭취함으로써 적은 양의 크롬에 노출되고 있고, 연구결과에 의하면 고농도의 크롬에 장기간 노출되면 폐암이 유발될 수 있다고 밝혀져 미국의 보건복지부에서는 크롬과 크롬 화합물이 발암성 물질로 규정하고 있다.

* 정회원, 한양대학교 공과대학 도시건설 환경공학과교수

3. 건설현장에서의 환경규제

건설현장에서 Coal Ash, 동슬래그, 제철슬래그 등 부산물을 Sand Drain, Sand Compaction Pile 공법 등에서의 모래의 대체 개량재로서 사용할 경우 지반 오염가능성은 거의 없다. 그러나 도심주변의 쓰레기처리장, 공장폐기물 처리장 등에서와 같이 지중에 폐기물을 매립할 경우는 환경문제가 야기될 수 있

으므로 각별한 주의가 필요하다(천병식, 1999). 특히, 콘크리트 부스러기(松尾, 1999), 지반개량시 배출된 Slime등은 지반오염을 유발시킬 수 있으므로 Slime발생량이 적거나 거의 없는 장비(예, Clean Jet, J&C 등)를 사용하거나 6가크롬의 함유량이 적은 개량재료를 사용함이 바람직하다. 크롬에 대한 규제 범위 및 기준은 표 1과 같다.

일본 건설성에서는 2000년 3월 보통포틀랜드시멘

표 1. 국내에서의 크롬에 대한 규제범위 및 관련기준

규제법명	규제기준구분	크롬의 기준		
환경정책기본법	수질환경기준	6가크롬(Cr ⁶⁺) : 0.05mg/L 이하 (하천, 호수, 해역)		
유해화학물질관리법	유 독 물	크롬산 염류 및 이를 0.1% 이상 함유하는 혼합물질, 다만 크롬산납을 70%이하 함유한 것은 제외		
폐기물관리법	광재, 분진, 폐주물사, 폐사, 폐내화물, 도자기 편류, 소각잔재물, 안정화 또는 고형화 처리물, 폐촉매, 폐흡착제, 오폐수 등 지정 폐기물의 유해물질 함유기준	6가크롬 화합물 : 1.5mg/L(용출액) 이상		
토양환경보전법	토양오염 우려기준	6가크롬 - 가지역: 4mg/kg 나지역: 12mg/kg		
	토양오염 대책기준	6가크롬 - 가지역: 10mg/kg 나지역: 30mg/kg		
대기환경보전법	대기오염물질	크롬 및 화합물		
	특정대기 유해물질	크롬 화합물		
	배출허용기준	모든 배출시설: 크롬화합물 1.0mg/m ³ 이하		
수질환경보전법	수질오염물질	크롬 및 그 화합물		
	특정수질 유해물질	6가크롬 화합물		
	오염물질의 배출허용기준	구분	총 Cr(mg/L)	Cr ⁶⁺ (mg/L)
		청정	0.5 이하	0.1 이하
		가	2 이하	0.5 이하
		나	2 이하	0.5 이하
특례	2 이하	0.5 이하		
방류수 수질기준	총 크롬 2mg/L 이하, 6가크롬 0.5mg/L 이하			
수도법	음용수 수질기준			
먹는물 관리법	먹는 물의 수질기준	6가크롬 : 0.05mg/L 이하		
	먹는 샘물의 수질기준	6가크롬 : 0.05mg/L 이하		
지하수법	지하수 수질기준	6가크롬 생활용수 : 0.05mg/L 이하 농업용수 : 0.05mg/L 이하 공업용수 : 0.10 mg/L 이하		

* 가지역 : 전 담, 과수원, 목장용지, 임야, 학교용지, 하천, 수도용지, 공원, 체육용지(수목·잔디식생지에 한함)·유원지·종교용지 및 사적지

* 나지역 : 지적법 제 5조 제 1항의 규정에 의한 공장용지, 도로, 철도용지 및 집중지

트에 함유되어 있는 이러한 크롬의 독성 때문에 6가 크롬에 관한 규정이 발효되고, 2000년 4월부터는 시멘트를 지반에 주입한다든가 지반과 혼합하는 지반개량공법 적용시에는 반드시 6가크롬의 용출시험을 실시하여 안전을 확인하도록 법적규제가 되어 있어서 보통포틀랜드시멘트 대신에 신개발 개량재(석회계 지반개량재) 또는 고로슬래그시멘트가 사용되고 있으며, 우리나라의 경우 생산품으로는 Soilcrete(천병식, 2001)가 대표적이다.

시멘트 및 시멘트계의 지반개량에의 사용 및 개량토의 재이용에 관하여 2000년 3월 일본 건설성에서 발표한 내용을 살펴보면 표 2와 같고, 6가크롬 용출시험의 대상이 되는 공법은 표 3과 같으며 시험방법은 표 4와 같다.

6가크롬에 이미 오염되어 있는 지반에 대한 처리 방법으로는 Cr^{6+} 을 Cr^{3+} 로 환원시킴으로써 오염도를 줄이는 것으로 알려져 있는 데, 만약 시안화합물과 6가크롬 화합물이 혼재하여 오염되어 있는 경우에는 먼저 산화분해를 실시하고 계속해서 Fe^{2+} 을 첨가하여, Cr^{6+} 을 Cr^{3+} 로 환원하고 Fe^{2+} 를 과잉첨가하여 착체화 한 후, Fe^{3+} 을 가하여 불용화 하는 방법으로 지반을 정화시킬 수 있다(木暮敬二, 2000).

이 외에도 생석회에 의한 지반개량시 알칼리화에 대한 것도 일부에서 제기되고 있다. 즉, 생석회를 사용할 경우 지반은 알카리성으로 변화하는 데 특별히 pH 9.5이상의 강 알칼리성일 경우는 농작물의 생장에 지장을 줄 수 있으므로 유의하여야 한다.

표 2. 일본 건설성의 조치(2000.3)

(기자발표자료)

시멘트계 및 시멘트계 고화재의 지반개량에서의 사용 및 개량토의 재이용시 당면의 조치	
시멘트 및 시멘트계 고화재에 의해 지반개량을 실시한 개량토로부터 조건에 따라서는 크롬이 토양환경기준(0.05mg/l)을 초과하는 농도로 토양중에 용출하고 있을 우려가 있기 때문에 건설성소관의 건설공사의 시공에 있어서는 아래에 대응하도록 한다.	
(1) 시멘트 및 시멘트계를 고화재로 지반개량에 사용하는 경우, 현지토양과 사용예정의 고화재에 대하여 6가크롬의 용출시험을 실시한다.	
(2) 사전의 6가크롬 용출시험에 있어서 토양환경기준을 초과하는 6가크롬의 용출량이 확정되는 경우 용출이 작은 고화재 사용등 배합설계의 변경, 또는 공법의 변경을 행한다.	
(3) 시멘트 및 시멘트계 고화재의 사용한 개량토를 재이용 할 경우 6가크롬 용출시험을 실시하고, 용출량이 토양환경기준 이하인 것을 확인한다	

표 3. 용출시험 대상공법(木暮敬二, 2000)

지반개량 공법	고결공	분체분사교반 고입분사교반 슬러리교반	〈심층혼합처리공법〉 지표로부터 상당한 깊이의 구간까지 미치게 하여 시멘트 및 시멘트계 고화재와 원지반토를 강제적으로 교반혼합하여 강력한 지반개량을 형성하는 공법	
지반개량 공법	고결공	약액주입	지중에 약액(시멘트계)을 주입하여 투수성의 감소나 원지반강도를 증대시키는 공법	
		표층안정처리공법	안정처리	〈표층안정처리공법〉 시멘트 및 시멘트계 고화재를 혼합하여 지반강도를 개량하는 공법
		노상안정처리공법	노상안정처리	노상토에 시멘트 및 시멘트계 고화재를 혼합하여 노상의 지지력을 개선하는 공법
포장공	포장공 각종	하층노반 상층노반	〈시멘트 안정처리공법〉 현지발생재, 지역산재료 또는 이들에 보조재를 가한 것을 골재로 하고, 여기에 시멘트 및 시멘트계 고화재를 첨가하여 처리하는 공법	
가설공	지중연속벽공 (주열식)	주열항	지중에 연속한 벽면 등을 구축하여 지수벽 및 토류용벽으로하는 공법, 소일시멘트주열벽 등과 같이 원지반토와 강제적으로 혼합하여 시공된 것을 대상으로 하고 현장타설 콘크리트벽은 대상으로 한다.	
〈비고〉				
1. 토사에 시멘트 및 시멘트계 고화재를 혼합한 개량토를 사용하여 시공한다. 성토, 매립, 토지조성공사에 대해서도 대상으로 한다.				
2. 본 시험요령에서는 석회파일공법, 약액주입공법(물유리계·고분자계), 동결공법, 부설재공법, 표층배수공법, 샌드매트공법, 치환공법, 석회안정처리공법을 대상으로 한다.				

표 4. 토양환경기준의 측정방법(木暮敬二, 2000)

카드뮴	검액 : 1 l ~ 0.01mg 이하(동시에농용지외에 쌀 1kg에서 1mg미만)	검액 : JIS K 0102의 55, 경고 59호부표 1 (1971년)
시안	검액중에 검출되지 않아야한다.	JIS K 0102의 38 (38의 1.1은 제외)
납	검액 1 l ~ 0.01mg 이하	JIS K 0102의 54 경고 59호 부표 1
6가크롬	검액 1 l ~ 0.05mg 이하	JIS K 0102의 65.2 경고 59호 부표 1
비소(As)	검액 1 l ~ 0.01mg 이하(동시에 농용지 토양 1kg~15mg미만)	검액 : JIS K 0102의 61 경고 59호부표 2 토양: 총리부령제31호(1975년)
총수은	검액 1 l ~ 0.0005mg 이하	경고59호부표3
알킬기수은	검액중에 검출되어선 안됨	경고59호부표4 및 경고64호부표4(1974년)
PCB	검액중에 검출되어선 안됨	경고 59호부표 5
셀레늄	검액 1 l ~ 0.01mg 이하	JIS K 0102의 67.2, 경고59호 부표2
동	농용지외에 토양 1kg~125mg 이하	총리부령제 66호 (1972년)
유기니스	검액중에 검출되어선 안됨	경고 64 호부표 1, JIS K 0102의 31.1 가수쿠로마트쿠 라후법 이외의 것
Thiuram	검액 1 l ~ 0.006mg 이하	경고 59 호부표 6
Simazine	검액 1 l ~ 0.003mg 이하	경고 59 호부표 7의 제 1, 제 2
치오벤갈브	검액 1 l ~ 0.02mg 이하	경고 59 호부표 7의 제 1, 제 2
디클로로메탄	검액 1 l ~ 0.02mg 이하	JIS K 0125의 5.1, 5.2, 5.3
사염화 염소	검액 1 l ~ 0.002mg 이하	JIS K 0125의 5.1, 5.2, 5.3.1, 5.4.1, 5.5
1,2-디클로로에탄	검액 1 l ~ 0.004mg 이하	JIS K 0125의 5.1, 5.2, 5.3.1, 5.3.2
1-디클로로에치렌	검액 1 l ~ 0.02mg 이하	JIS K 0125의 5.1, 5.2, 5.3.2

4. 결론 및 제언

지반개량재료로서 보통포틀랜드시멘트의 주입 또는 고압분사·혼합처리로 인한 지하수오염, 지반오염문제는 최근 국제적으로 사회문제로 대두되고 있다. 따라서 이러한 지반개량공법을 건설현장에서 적용시에는 반드시 환경영향성 시험으로 평가하여 주입재료를 선별, 사용하여야 하며 검증된 개량재라 하더라도 시공시에는 미반응, 유수에 의한 희석, 유실되는 일이 없도록 품질관리에 특별히 유의하여야 한다. 더욱, 이러한 개량재료에 의한 고압분사 또는 혼합처리 공법에서는 지반오염이 우려되지 않는 새로운 개량재의 개발이 시급한 실정이다.

일반적으로 건설현장에서 발생하는 건설발생토류는 지반오염을 유발할 수 있으므로 각별한 주의가 필요하며, 특히 지반개량중 배출된 slime은 지반오염을 유발시킬 수 있으므로 slime 발생을 최소화 할 수 있도록 적극적인 장비의 개선이 바람직하다고 본다.

참고문헌

1. 천병식(1998), "최신지반주입 -이론과 실제-", 원기술, pp. 217~234
2. 천병식(1999), "지반공학 -이론과 실제-", 구미서관, pp. 739~772
3. 松尾 稔·本城 勇介(1999), "地盤環境工學の新しい視点: 建設發生土類の有 活用", 技報堂出版, pp.51, 171
4. 木暮敬二(2000), "地盤環境の汚染と浄化修復システム", 技報堂出版 pp.44
5. Byung-Sik, Chun(2001), "Engineering Properties of Soft Marine Clay by Using Soilcrete Stabilizer", First International Congress on Petroleum Contaminated Soils, Sediment, and Water, August 14-17, 2001, London, United Kingdom