

# 시멘트 중의 크롬(Cr)에 대한 고찰

글 \_ 이승헌, 이종규\* || 군산대학교 신소재·나노화학공학부, \*요업기술원 세라믹·건재본부  
shlee@kunsan.ac.kr

## 1. 머리말

우리나라의 2005년도 시멘트 생산량은 5500만톤 정도로 주로 콘크리트 구조물로 사용되었으며, 이러한 시멘트 구조물은 사회기반 구축에 중요한 역할을 수행하여 왔다. 시멘트 산업은 연간 1100만톤 정도의 폐기물을 원료 및 연료로 사용하여 폐기물처리, 자원절약, 에너지절약 등에 크게 기여하여 순환형 사회 구축에 크게 이바지하고 있다. 한편 시멘트 산업은 지구온난화의 원인인 이산화탄소를 다량 배출하는 산업으로 인식되어 환경문제에서는 좋은 점과 나쁜 점을 동시에 가지고 있어 쌍방간의 영향을 정확히 파악할 필요가 있다.

시멘트는 천연의 석회석, 점토, 규석, 산화철 원료를 주원료로 하고 있지만 자원의 유효이용이라는 관점에서 각종 부산물과 폐기물이 원료 및 연료로 사용되고 있다. 이러한 천연 원료나 연료, 부산물, 폐기물 중에는 시멘트의 주요 구성 성분 외에 미량성분을 함유하고 있으므로 제조과정을 통하여 미량 성분이 최종 시멘트 제품에 포함되게 된다. 미량성분은 생활환경의 보존과 사람의 건강에 영향을 미치므로 환경기준법에 의해 환경기준이 설정되어 있다. 시멘트도 대상이 되는 일부 미량성분을 함유하고 있으므로 시멘트 및 시멘트 경화체가 환경에 미치는 영향을 검토하는 것은 환경보존과 인간의 건강유지라는 측면에서 매우 중요하다.

우리나라에서도 2005년 3월 이후 시멘트에 함유된 Cr(VI), (Cr<sup>III</sup>)의 발생원인 규명 및 저감방안에 대해 활발한 논의가 이루어져 환경부를 소관으로 하는 시멘트 민관정책협의회가 구성되었다. 민관정책협의회는 정부와

업계, 학계와 연구기관, 시민단체 등이 참여하고 있으며, 발생원인, 인체유해성 규명, 외국의 규제 및 시험방법, 가이드라인 설정 등의 제정을 목표로 활동하고 있다.

## 2 시멘트 중의 크롬의 기원

현재 요업기술원과 군산대학교를 중심으로 국내 시멘트 중의 Cr의 함유량, 시험방법, 가이드라인 등에 대해 조사를 하고 있다. 전 세계적으로 포틀랜드 시멘트에 포함된 Total-Cr량은 평균 100~300mg/kg 정도를 함유하고 있으며 포틀랜드 시멘트의 수용성 Cr(VI)은 30mg/kg까지 포함되어 있고 평균 5~15mg/kg 정도가 일반적이다.

참고로 일본에서 생산된 보통포틀랜드시멘트 및 고로시멘트B종의 Cr 함유량을 Table 1에 나타내었다. 시멘트에 존재하는 Cr 함량분석은 일본시멘트협회에서 제정한 시험방법인 JCAS I-51-1981에 따르고 있다. 이 방법은 "흡광광도법에 의한 시멘트 중의 수용성 C(VI)의 정량방법"이며, 플라스크에 시료 1g과 증류수 100 ml을 넣어 10분간 stirring 시킨 후 고체와 액체를 분리한 후 흡광광도법으로 측정한다. 보통포틀랜드시멘트 내에 존재하는 수용성 Cr(VI)의 함량이 약 8mg/kg, Cr함량은 70mg/kg 수준을 보였으며 고로시멘트B종은 수용성 Cr(VI)의 함량이 약 4mg/kg, Cr함량은 63mg/kg 이었다.

Table 2는 보통포틀랜드시멘트의 년도별 Cr함량을 나타낸 것이다. 일본의 시멘트업계는 1998년 9월 시멘트중의 Cr(VI) 함유량에 대해 20mg/kg 이하로 가이드라인을 제시하였으며 지속적인 관리로 Cr(VI)의 평균치가

Table 1. 일본 시멘트 중의 Cr함량

성분	보통포틀랜드시멘트		고로시멘트 B종	
	범위	평균치	범위	평균치
수용성 Cr <sup>6+</sup> (mg/kg)	30 ~ 144	8.1	1.0 ~ 11.4	4.4
Total-Cr (mg/kg)	53 ~ 114	70	52 ~ 106	63

Table 2. 일본에서의 연도별 Cr함량

구분	1995년		2001년	
	범위	평균치	범위	평균치
수용성 Cr <sup>6+</sup> (mg/kg)	< 0.4 ~ 32.4	10.8	3.0 ~ 14.4	8.1
Total-Cr (mg/kg)	52 ~ 204	98	53 ~ 114	70

Table 3. 일본에서 시멘트 제조 중에 발생하는 Cr원

기원		조사수	Cr 함유량(mg/시멘트kg)
원료	중류	클링커 원료	10 37.5 ~ 107.2
		석회석	10 3.0 ~ 35.1
		점토	9 2.9 ~ 13.7
		제냉 슬래그	6 0.5 ~ 26.9
		전조 슬래그	4 6.3 ~ 64.0
		철질 슬래그	6 0.5 ~ 26.9
		광재	4 2.0 ~ 8.1
		실리카질 원료	1 10.2
		규석	9 0.3 ~ 54.8
		기타	7 1.3 ~ 41.0
		석고	6 0.1 ~ 1.6
		수쇄 슬래그	7 0.0 ~ 6.0
		내화 연화	6 4.0 ~ 10.0
연료	4 0.0 ~ 0.8		
분쇄 매체	2 4.0		

10.8mg/kg에서 8.1mg/kg으로 Cr(VI)의 최대치도 32.4mg/kg에서 14.4mg/kg으로 낮아져 가이드라인 설정에 의해 Cr(VI)이 저감되는 효과를 도출하였다.

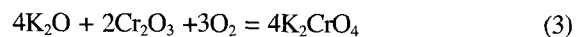
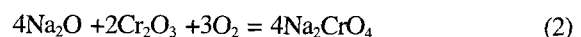
시멘트 중의 Cr은 원료, 연료, 가마의 내화물 및 불밀의 강구 등에서 유래된다. Table 3은 일본에서 조사한 시멘트 중의 Cr의 함유량을 종류별로 조사한 데이터이다. 이 결과에 의하면 시멘트 중의 Cr의 함유량은 클링커의 원료로부터 가장 많이 들어오고, 그 다음에는 내화물에서 유래되는 것으로 나타났다. 의외로 연료에서 기인하는 Cr의 양은 많지 않았다. Cr은 주기율표 제6A족에 속하는 크롬족 원소의 하나로 원자번호 24, 원자량 51.996, 융점 1890°C, 비등점 2482°C, 비중 7.188(20°C)의 성질을 가지고 있다. 또한 Cr은 공기 및 습기에 대해서 매우 안정하며 단단한 중금속으로, 통상 존재하는 화합물로서

는 2가에서 6가까지 있지만, 토양이나 암석 등에서는 대부분 Cr(III)의 형태로 존재하며 가장 안정하다. Cr 및 그 화합물의 주요 원료인 Cr 철광은 Cr(III)이며, Cr(VI) 화합물은 크롬산염 및 중크롬산염이 주류를 이루고 있고, 화학적 활성이 높으며 생체에 해를 끼친다. Cr은 비교적 희소한 금속으로 지각 중에 조성원소로서 평균 100ppm 정도 존재하며, 토양 중에 약 20ppm 농도로 존재하는 것으로 알려져 있다.

### 3. 시멘트 중의 Cr(VI) 생성기구

클링커 원료 중의 Cr의 대부분은 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>로 존재하고 있으며, 원료 중의 Cr(VI)의 양은 극히 적은 것으로 보고되고 있다. 그러나 원료 중의 Cr(VI)은 미량이지만, 클링커 중에 수십 mg/kg의 Cr(VI)이 포함되어 있는 것으로 보아, 시멘트 중의 Cr(VI)은 클링커의 소성과정 중에서 산화와 알카리와의 결합에 의해서 생성되는 것으로 보고되고 있다.

Fig. 1.의 CaO-Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 상태도를 보면 CaO에 미량의 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>가 공존하면, 상태도의 왼쪽 끝 쪽 조성에 해당된다. 온도가 올라가면 산화분위기에서 100°C부터 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>가 CaO와 반응하여 미량의 CaCrO<sub>4</sub>가 만들어져 3가 Cr이 6가로 전환된다. 따라서 800°C까지는 Cr은 CaCrO<sub>4</sub>를 생성하여 6가의 상태로 존재한다. CaCrO<sub>4</sub>는 물과 만나면 물에 용해되어 수용성 Cr(VI)을 형성한다. 클링커 원료 중에는 Na<sub>2</sub>O와 K<sub>2</sub>O가 존재하기 때문에 용해도가 높은 Cr산염인 Na<sub>2</sub>CrO<sub>4</sub>, K<sub>2</sub>CrO<sub>4</sub>를 생성하며, 반응식은 다음과 같다. 클링커 소성온도는 1450°C이상이므로 이러한 반응은 800°C이하에서 발생하므로 클링커 냉각 시에도 이러한 화합물이 생성된다.



산화분위기에서 온도가 상승하면 800°C에서 1174°C까지는 9CaO · CrO<sub>3</sub> · Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>가 생성되어 Cr은 6가(CrO<sub>3</sub>)와

3가( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ )로 존재한다. 그러나 이 화합물은 용해도가 낮아 수용성 Cr(VI)에 대한 기여는 매우 적다.  $1174^\circ\text{C}$  이상에서 Cr은 용액 상태로 존재한다. 용액은 냉각 시 주로 간극질을 형성하므로 Cr의 일부는 간극질에 고용될 것이다. 또한 Cr은 클링커 광물 중에서 몇 개의 원자개로 존재한다. Alite( $\text{C}_3\text{S}$ )와 belite( $\text{C}_2\text{S}$ ) 중의 Cr은 4가 혹은 5가로 Si와 치환하여 고용하고 있다. 이렇게 클링커 광물에 고용하고 있는 Cr은 수화할 때 3가 혹은 6가로 변화되어 수화물에 안정하게 고용되는 것으로 알려져 있으나, 3가와 6가의 비율에 대해서는 정확하게 알려져 있지 않다.

Shirasaka 등의 연구결과에 의하면, 클링커 중의 Cr의 함유량은 분위기와 온도에 관계없이 거의 일정한 것으로 보고하였다. Cr의 함유량이 변화가 없다는 것은 Cr이 증발하지 않은 것으로 해석할 수 있다. 이러한 이유는 Cr이 휘발성이 약한 알칼리 화합물을 형성하고, 클링커 광물 중에 Si나 Al과 치환 고용되어 결합이 강화되기 때문에 분위기의 영향을 받지 않는 것으로 생각된다. 또한 클링커 중의 미세구조를 보면 Cr 등의 중금속을 함유한 클링커는 alite, belite의 크기는 변화하지 않지만 belite의 lamella 조직과 간극질 조직에서 차이가 보여 졌다. 즉 중금속이 포함되지 않은 클링커는 belite 특유의 lamella 구조가 존재하지만, Cr 등의 중금속이 함유된 클링커 조직은

lamella 구조가 나타나지 않은 것으로 보고하였다. 이것은 잔류율이 높은 Cr에 의해 belite가 고온변태로의 전이를 하지 못해 lamella 구조가 나타나지 않은 것으로 해석하였다. 그러나 이 경우는 Cr의 농도가 매우 높았을 때(500ppm) 일반 시멘트 클링커에서는 이러한 현상은 발생하지 않는다.  $1550^\circ\text{C}$ , 산화분위기에서 소성한 클링커의 Cr 고용량 변화를 보면, 알칼리 화합물을 형성하는 비율이 제일 컸고, 간극질>belite>alite 순으로 Cr이 고용되어 있었다.

#### 4. 국내외의 Cr(VI) 분석방법

중금속의 분석기기는 ICP(Inductively Coupled Plasma), AAS(Atomic Absorption Spectrophotometer), UV-Vis Spectrometer(UV-Visible Spectrophotometer) 등이 있으며 각 분석 장비의 장·단점을 Table 4에 나타내었다. ICP는 분석 가능 원소가 AAS보다 다양하고, 화학적/이온화 간섭 등이 발생치 않으며 ppb 수준의 분석이 가능하지만 칼럼법, 공침법, 용매추출법에 의한 Cr(III)의 제거 과정 추가로 분석 결과에 오차가 발생할 수 있다는 단점이 있다. AAS는 기존 장비에 램프추가로 분석이 가능하다 그러나 칼럼법, 공침법, 용매추출법으로 Cr(III)의 제거가 필요하고, 제거과정의 추가로 오차발생 가능성이 증가하며, 화학적/이온화 간섭 등이 쉽게 발생하여 오차가 발생할 수 있다는 단점이 있다. UV-Vis Spectrometer 분석기는 발색제의 추가로 Cr(VI) 분석이 가능하고, AAS/ICP보다 시료의 전처리과정이 간단하여, Cr(VI) 분석시 국내 시험기관에서는 UV 분석기기를 사용하고 있다. 그러나 ppm 단위의 분석은 가능하나, ppb 수준의 분석이 불가능하다는 단점이 있다.

각 국가별 용출방법은 용출액 제조, 고/액체의 비, 용출시간, 용출상태 및 검액의 제조에서 차이를 보이고 있으며, 각 국가별 용출시험방법은 Table 5에 나타내었다. 국내 시험방법에는 토양오염공정시험법과 폐기물용출시험법이 있으며 국외 시험방법에는 일본시멘트협회시험법, ISO 시험법, 미국의 TCLP법, 유럽용출시험법이 있다.

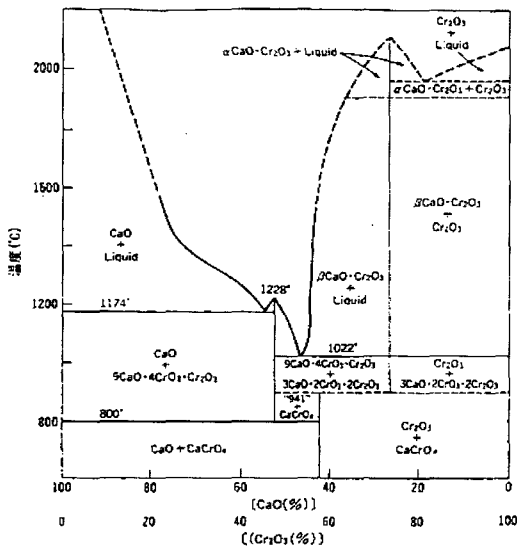
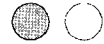


Fig. 1. CaO-Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 상태도.



#### 4.1 토양오염공정시험법

토양오염공정시험법은 소수점 4째자리까지 칭량한 시료를 0.1N HCl의 용매에 1g : 5 ml의 비로 1시간동안 30°C, 상압에서 100rpm의 속도로 수평진탕을 행한다. 수평진탕으로 제조된 용출액을 거름종이 5B로 여과하여 용출된 중금속을 분석한다.

#### 4.2 폐기물용출시험법

폐기물용출시험법은 소수점 4째자리까지 칭량한 시료를 탈이온수(pH5.8~6.3) 용매에 1g : 10 ml의 비로 6시간 동안 상온, 상압에서 200rpm으로 수평진탕 하고, 수평진탕으로 제조된 용출액을 1 μm의 유리섬유로 여과하여 용출된 중금속을 분석한다.

#### 4.3 일본시멘트협회시험법

일본시멘트협회시험법은 시멘트 중의 수용성 Cr(VI) 함량 시험을 위한 방법으로 소수점 4째자리까지 칭량한 시료(전처리과정이 없는)를 탈이온수(pH5.8~6.3)에 1g :

100 ml의 비로 10분간 상온, 상압에서 stirrer를 사용하여 stirring을 행한다.

#### 4.4 TCLP법

미국의 TCLP법은 소수점 4째자리까지 칭량한 시료에 0.1N acetic acid를 이용하여 pH2.93으로 적정한 용매를 1g : 20 ml의 비로 18시간동안 roller-table을 사용하여 용출액을 제조한다. 제조된 용출액은 멤브레인 필터를 통하여 여과하고, 여과액의 중금속을 분석한다.

#### 4.5 ISO시험법

ISO시험법은 소수점 4째자리까지 칭량한 시료를 용매 (0.05N NaOH)에 1g : 100 ml의 비로 1시간동안 boiling을 하고, 여과하여 중금속을 분석한다.

#### 4.6 유럽용출시험법

유럽의 용출시험법은 소수점 4째자리까지 칭량한 시료에 용매(탈이온수)를 1g : 10 ml의 비로 24시간동안

Table 4. 분석기기의 비교

구분	장점	단점
AAS	1. 기존 장비에 램프 추가로 분석 가능	1. 칼럼법, 공침법, 용매추출법으로 Cr(III) 제거필요 2. Cr(III) 제거과정의 추가로 오차발생 가능성 증가 3. 화학적/이온화 간섭 등이 쉽게 발생 4. 분석 결과의 오차가 상대적으로 증가
ICP	1. 분석 가능 원소가 AAS보다 다양 2. 화학적/이온화 간섭 등이 발생하지 않음 3. ppb 수준의 분석 가능	1. 칼럼법, 공침법, 용매추출법에 의한 Cr(III)의 제거과정 추가로 분석결과 오차발생 요인으로 작용
UV	1. 발색제의 첨가로 Cr(VI) 분석가능 2. AAS/ICP 보다 전처리 과정 간단함 3. Cr(VI) 분석시 국내시험기관에서 UV 분석기 사용	1. ppm 단위의 분석은 가능하나, ppb수준의 분석 불가능

Table 5. 시험방법 별 크롬 분석방법

구분	한국토양오염 공정시험법	한국폐기물 용출시험법	미국 TCLP	일본시멘트 협회시험법	ISO시험법 (ISO 3613)	유럽용출 시험법
용출액 조제	0.1N HCl (pH1)	탈이온수 (pH 5.8-6.3)	0.1N Acetic acid (pH 2.93)	탈이온수 (pH 5.8 ~ 6.3)	0.05N NaOH (pH 12.7)	탈이온수 (pH 5.8-6.3)
고/액체 의비	시료:용매 1g:5 ml	시료:용매 1g:10 ml	시료:용매 1g:20 ml	시료:용매 1g:100 ml	시료:용매 1g:100 ml	시료:용매 1g:10 ml
용출 시간	1시간	6시간	18시간	10분	1시간	24시간
용출 상태	수평진탕 (100rpm) 30°C, 상압	수평진탕 (200rpm) 상온, 상압	Roller-table (30rpm) 상온, 상압	Stirring 상온, 상압	Boiling	Roller-table (10rpm) 상온, 상압
검액 제조	거름종이 5B로 여과	1 μm 유리섬유 여과	Membrane filter (0.6-0.8 μm)	거름종이 5B로 여과	여과	Membrane filter (0.45 μm)

Table 6. 우리나라의 Cr에 대한 각종 기준

규제법령	규제기준구분	크롬의 각종 기준
환경정책기본법	수질환경기준	Cr(VI)(Cr <sup>6+</sup> ) : 0.05mg/liter이하 (하천, 호소, 해역)
유해화학물질관리법	유독물	크롬산 염류 및 이를 0.1%이상 함유하는 혼합물질. 다만 크롬산 납을 70%이하 함유한 것은 제외
폐기물관리법	광재, 분진, 폐주물사, 폐사, 폐내화물, 도자기 편류, 소각잔재물, 안정화 또는 고형화 처리물, 폐촉매, 오니 등 지정폐기물의 유해물질함유 기준	Cr(VI)화합물 : 1.5mg/liter(용출액)이하
토양환경보전법	토양오염 우려 기준 토양오염 대책 기준	Cr(VI) : 가지역 : 4mg/kg 나지역 : 12mg/kg Cr(VI) : 가지역 : 10mg/kg 나지역 : 30mg/kg
대기환경보전법	대기오염물질 특정대기 유해물질 배출허용기준	크롬 및 그 화합물 모든 배출시설 : 크롬화합물(Cr기준) 1.0mg/sm <sup>2</sup> 이하
수도법	음용수 수질기준	Cr(VI) : 0.05mg/liter 이하
먹는 물 관리법	먹는 물의 수질기준 먹는 샘물의 수질기준	Cr(VI) : 0.05mg/liter 이하 Cr(VI) : 0.05mg/liter 이하
지하수법	지하수 수질기준	Cr(VI) : 생활용수 : 0.05mg/liter 이하 농업용수 : 0.05mg/liter 이하 공업용수 : 0.10mg/liter 이하

상온, 상압에서 roller-table를 사용하여 용출액을 제조한다. 제조한 용출액을 멤브레인 필터를 통해 여과한 검액의 중금속을 분석한다.

우리나라에서 법률로 정해진 Cr에 대한 각종 기준을 Table 6에 나타냈다. 토양오염우려 기준에서 가 지역은 지적법에 의한 지목이 전, 답, 대, 과수원, 목장용지, 임야, 학교용지, 하천, 수도용지, 공원체육용지, 유원지, 종교용지 및 사적지인 지역이고, 나 지역은 지적법에 의한 지목이 공장용지, 도로, 철도용지 및 잡종인 지역이다.

### 5. 시멘트 수화물에 의한 미량성분의 고정화

시멘트는 경화과정에서 중금속 성분을 고정화시키는 능력을 가지고 있어, 지정 폐기물 중의 유해 중금속을 고정시키는 결합재로서 사용되고 있다. 시멘트에 의한 미량성분의 고화처리하는 많은 실증사례와 연구 논문이 보고되고 있다.

시멘트 수화물에 의한 Cr(VI)의 고정화 능력의 한 예

Table 7. 시멘트 수화물에 의한 Cr(VI)의 고정능력

클링커 광물	생성 수화물	Cr(VI)첨가량 (mg/광물kg)	재령 (일)	Cr(VI) 고정능력 (mg/광물kg)
C <sub>3</sub> S	C-S-H	100	21	97.0
C <sub>3</sub> A+3CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O	Etringite		14	88.2
C <sub>3</sub> A+CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O	Monosulphate			>99.8
C <sub>2</sub> A	C <sub>3</sub> AH <sub>6</sub>			>99.8

를 Table 7에 나타냈다. 일반적으로 시멘트 클링커 구성 광물의 비율을 C<sub>3</sub>S 50%, C<sub>2</sub>S 20%, C<sub>3</sub>A 10%, C<sub>4</sub>AF 10%로 하고, 완전 수화하였을 때 Cr(VI)의 고정화 양을 계산하면 시멘트에 대해서 87.9mg/kg가 된다. 이러한 계산에 의하면 최종적으로 시멘트 중의 거의 모든 Cr(VI)은 시멘트 수화물에 고정되어 용출되지 않는다. 일본에서 콘크리트 중의 bleeding 수에 함유한 Cr(VI)의 양을 실험하기 위하여, 수용성 Cr(VI)이 16.3mg/kg 포함된 보통포틀랜드시멘트를 사용하여 물/시멘트가 0.5, 0.6, slump가 8cm, 18cm인 콘크리트를 조사하였다. 그 결과, Cr(VI)의 농도는 11.2~17.2mg/liter이었고, 시간의 변화에 따른 뚜렷한 변화는 없었으며, 물/시멘트비가 적은 쪽이 약간 높은 Cr 농도를 나타냈다. 그러나 bleeding 수는 경화함에 따라 콘크리트에 흡수되므로 bleeding수중의 Cr(VI)의 대부분은 시멘트 수화물에 고정된다. 그리고 수용성 Cr(VI)의 함유량이 다른 보통포틀랜드시멘트 5종류(Cr(VI)의 함유량 : 7.4~16.3mg/kg)를 이용하여 모르타 및 콘크리트의 Cr(VI)의 용출량을 측정하였다. 측정 결과에 의하면, 모르타나 콘크리트로부터의 Cr(VI)의 용출량은 시멘트 중의 함유량, 재령에 관계없이 모든 시멘트가 일본에서의 환경기준값 0.05mg/liter값 보다 적었다. 또한 구조물, 옥외폭로 공시체, 콘크리트 제품, 재생 골재 등에 대해서도 조사한 결과, Cr(VI)의 용출량은 0.05mg/liter 이하로 나타났다.

### 6. 맺는 말

환경보존이라는 입장에서 환경정책기본법에 의거 특정 중금속이나 유기물에 관한 환경기준이 설정되고 있다. 이러한 설정 대상 물질 중의 일부인 Cr은 시멘트의 미량 성분으로서 함유되고 있어, 선진국에서는 이에 대한 시

협방법과 자체 가이드라인을 설정하여 시멘트 제조관리를 하고 있다. 우리나라에서도 시멘트 업계를 중심으로 정부, 연구기관, 학계, 시민단체 등이 참여하여 현재 시멘트에 포함된 중금속 등 미량성분에 대한 발생원인을 파악하고, 시멘트 업계 자율적으로 효과적인 저감방안과 가이드라인 설정에 노력을 기울이고 있다.

한편 시멘트는 중금속을 시멘트 수화물에 고화시켜 환경오염확대를 방지하는 우수한 재료이므로 앞으로도 유해물질 처리에 큰 공헌을 할 것이다. 따라서 환경보전에 입각해서 효과적인 시멘트 관리를 할 필요가 있다.

### 참고문헌

1. Sakai Etsuo, Leaching of minor elements from concrete, Concrete library 111, Japan Society of Civil Engineering, 2003. 5.
2. Shigeru Takahashi, The effect of the trace elements in cement on the environment, Cement · Concrete, No.

640, pp.20-29, 2000. 6.

3. M. Firas et al., Contribution of toxic elements : Hexavalent chromium in materials used in the manufacture of cement, Cement and Concrete Research, Vol. 24(3), pp.553-541, 1994. 3.
4. D. Bones, The present state of the art of immobilization of hazardous heavy metals in cement based materials, Advances in Cement and Concrete, pp.481-498, 1994. 5.
5. Daimon Masaki, 지구에 친화적인 산업폐기물 이용 시멘트의 내구성 향상 대책에 관한 연구, 연구보고서, 1997. 5.
6. Tokuhiko Shirasaki et al., Influence of specified elements in wastes on the texture and elemental distribution in four major clinker minerals, The 49th Annual Meeting of JCA, Japan Cement Association, pp. 26-31, 1995. 6.
7. 이승헌, 시멘트 중의 미량성분에 대한 고찰, 제32회 시멘트 심포지움, 한국양회공업협회, pp. 5-14, 2005. 7.
8. 이승헌, 시멘트 중의 크롬에 대하여, 시멘트, No. 156, pp. 67-71, 2002.6.

### ●● 이승헌



- 1979년 연세대학교 세라믹공학과(학사)
- 1981년 연세대학교 세라믹공학과(석사)
- 1988년 연세대학교 세라믹공학과(박사)
- 1988년-1989년 동양시멘트 기술연구소 과장
- 1995년-1996년 동경공업대학 방문연구원
- 1989년-현재. 군산대학교 신소재·나노화학 공학부 교수

### ●● 이종규



- 1988년 한양대학교 무기재료공학과(학사)
- 1990년 한양대학교 무기재료공학과(석사)
- 1993년 한국과학기술연구원(연구원)
- 1997년 동경공업대학교(박사)
- 1998년 동경공업대학교(조수)
- 2000년 니이가타대학교(조수)
- 2000년-현재. 요업기술원 시멘트·콘크리트팀 팀장(책임연구원)