

시멘트産業과 環境

崔 相 紘

〈漢陽大學校教授·工博〉

1. 하나뿐인 지구

지금까지 15회에 걸쳐 “시멘트화학”을 연재하였다. 이제 “시멘트산업과 환경” 문제를 다루면서 이 연재를 끝맺을까 한다.

지구환경 문제는 1972년 국제연합환경회의에서 다루어진 이래 1992년 리우선언 및 올해 발효된 기후변화협약에 이르기까지 온 지구적 문제로 등장하였다.

“Only one earth”-이 지구환경보존은 온 인류가 해결하여야 할 문제이다. 오늘날 지구환경 문제는 산성비, 사막화, 지구 온난화, 오존층 파괴, 열대림 파괴, 야생동물의 감소, 해양오염, 산업화에 의한 공해발생 및 유해물질 폐기 등 다양하며 한 나라의 범주를 넘은 온 지구적 문제이고 모든 산업, 모든 인간의 문제이다.

여기에서는 먼저 시멘트산업과 환경문제를 개관하고, 시멘트산업과 CO₂ 문제를 다루려 한다.

2. 시멘트산업과 환경문제

가. 환경문제에의 기여

환경대책이란 관점에서 볼 때 시멘트산업은 양면성을 지니고 있다.^{1~4)} 먼저 환경문제에의 기여이다. 첫째, 시멘트산업에서는 다른 산업에서 발생하는 폐기물의 재이용이 가능하다는 면을 가지고 있다. 지금까지 환경문제란 개념없이 시멘트 혼합재⁵⁾

로서 활용되고 있는 플라이애쉬, 고로 수쇄슬래그, 부산 석고의 활용은 그 사용량 자체가 산업 부산물 및 폐기물의 처리는 물론 자원의 재활용과 절감 및 에너지 절감과 석회석 절감으로 CO₂ 배출량 감소에도 기여하므로 계속 그 활용을 적극 추진하여야 할 것이다.

둘째, 연료로서 가연성 폐기물의 활용이다. 국민 생활의 향상으로 폐기 쓰레기 배출량은 날로 증가일로에 있으며 그 중에는 가연성 물질도 많다. 일례로, 페타이어는 그 발열량으로 보아 시멘트 제조용 연료로서 충분한 수준이고 또 에너지 다소비 산업인 시멘트산업에서 대체연료로 사용할 경우 페타이어의 대량처리가 가능하며, 이미 미국, 일본, 유럽에서는 페타이어를 시멘트 공장에서 처리하고 있다. 물론 여기에는 연료를 페타이어로 대체하는데 필요한 시설투자 및 운전비, 페타이어의 안정공급과 적치장 확보, 연소조건 변동에 따른 기술개발과 위험부담 등을 고려하여야 하므로 이런 부담에 대한 대책이 있어야 할 것이다. 그외에도 폐유, 폐수지, 폐목재 등 다양한 가연성 물질의 처리 등도 고려된다. 이들 폐부산물은 그대로 폐기시 환경오염 부담이 크다. 이를 시멘트산업에서 활용한다는 것은 단순한 산업 폐기물 처리라는 점을 떠나 적극적인 자원의 재활용·재순환이라는 점에서 시멘트산업이 환경에 공헌한다고 자부할 수 있다.

셋째, 시멘트를 이용한 유해 폐기물의 고화처리이다. 저준위 방사선 폐기물에 대한 콘크리트 고화처리 등이 활용되고 있고, 단순히 물리적인 고정화

뿐만 아니라 시멘트의 수화과정을 이용한 화학적 반응으로 유해폐기물을 고형화·안정화시킬 수 있다.^{6~8)}

예를 들면, 수화생성물 ettringite의 Al 원자는 이온 반경이 비슷한 Ti, Cr, Mn, Fe 등과 치환가능하고 SO₄²⁻는 CrO₄²⁻, AsO₄³⁻ 등과 치환가능하여 ettringite는 중금속 고정기능을 갖는 수화물로 주목되고 있으며 monosulfate도 유사한 기능을 갖고 있다.

나. 환경공해

시멘트산업은 환경공해 발생을 유발하고 있다. 먼저, 자연환경의 훼손이다. 시멘트산업은 많은 석회석 자원을 필요로 하며 이의 채굴은 자연경관 훼손을 유발한다. 따라서 그 훼손을 최소화할 수 있는 석회석 채굴 공법개발을 게을리하지 말아야 할 것이다.

둘째, 시멘트산업은 대규모 장치산업으로 특히, 파쇄기, 분쇄기 등의 가동으로 소음이 발생하며 또 분체취급으로 많은 분진이 발생되고 있다. 따라서 소음방지를 위한 시설개발 및 집진설비 활용과 개발에 힘써, 앞으로 더욱 강화되고 있는 환경기준의 만족은 물론 쾌적한 생활환경을 만들어야 할 것이다.

셋째, 시멘트 생산공정에서 나오는 SO_x, NO_x 및 CO₂ 문제이다. 최근 시멘트 제조설비를 NSP 형식으로 개조한 후 열효율 및 생산성 향상과 함께 SO_x 및 NO_x 발생은 절감, 억제되고 있어 환경규제 조건을 만족하고 있다. 그러나 CO₂ 발생문제는 숙명적이다. 시멘트산업에서 CO₂는 석회석 분해와 연료의 연소로 발생한다. 따라서 석회석을 원료로 사용하고 그것을 소성해서 제조하는 시멘트산업에서 CO₂의 절감이란 시멘트산업의 존재 자체의 문제이다.

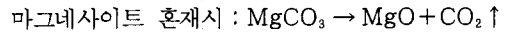
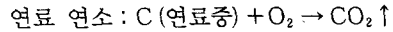
3. 시멘트 산업과 CO₂

가. 시멘트 산업에서의 CO₂ 배출

대기중의 CO₂ 농도는 인간활동에 의하여 급속히 증가하고 있으며 온실효과에 의한 지구 온난화가 우려되고 있다. 이 증가의 원인으로는 주로 화석연료 연소에 의한 CO₂ 발생이며, 그외의 열대림의 파괴 및 사막화에 따른 생물권에서의 CO₂ 방출을 들 수

있다. 그리고 철강산업, 시멘트산업 등과 같이 산업활동에 의한 CO₂ 방출을 들 수 있다. 산업별로 볼 때 CO₂ 배출량이 많은 것은 전력산업, 철강산업, 시멘트산업, 제지산업 순이다.

시멘트산업에서의 CO₂ 배출은 시멘트 클링커 소성에 따른 연료의 연소로 발생하는 것과 원료 석회석의 가열 분해에 따라 발생한다. 즉,



따라서, 시멘트 생산량의 증가는 곧 CO₂ 발생량의 증가에 직결된다. <표-1>은 우리나라 시멘트 클링커 생산량과 CO₂ 발생량의 추이를 보인 것이다. 즉 시멘트 클링커 1톤을 제조할 때 0.83톤의 CO₂가 배출되며 이중 약 38%는 연료의 연소에서, 약 62%는 석회석 분해에서 오는 것으로 CO₂의 배출량은 클링커 생산량에 비례한다. 따라서 우리나라 시멘트 클링커 생산량 증가율을 연 4.4%로 추산한다면 2000년도의 CO₂ 배출량은 13,800(천 TC)에 달할 것이다.

나. 시멘트 산업에서의 CO₂ 절감 대책

시멘트산업에서의 CO₂의 배출을 감소시키는 것은 매우 곤란한 일이나 그 대책으로는 단위 시멘트량당 클링커의 양을 절감시키는 것과 화석연료 사용량 및 원료 석회석 사용량을 감소시킴으로서 CO₂ 배출을 감소시키는 방안이다. 전자의 경우는 적극적으로 혼합재를 활용하는 것이며 후자의 경우에는 low energy cement 개발로 클링커 소성열량을 절감하고 상대적으로 CaO 양이 적은 새로운 시멘트 클링커의 개발 그리고 고탄소 화석연료인 석탄에서 저탄소 연료인 LNG로의 전환 등을 들 수 있다.

<표-1> Production of cement clinker and exhaust CO₂

		1990	1991	1992	1993
Production of clinker (1,000M/T)		29,281	34,999	39,999	45,523
Exhaust CO ₂ (1,000TC)	Fossil fuel	2,560	3,060	3,340	3,840
	Lime stone	4,110	4,940	5,530	6,360
	Total	6,670	8,000	8,870	10,200

* Korea Cement Industrial Association (1994).

(1) 슬래그 및 플라이애쉬 등의 혼합재로서의 활용⁵⁾

철강산업 부산물인 수쇄슬래그나 전력(화력) 산업에서 발생하는 플라이애쉬 등을 혼합한 혼합시멘트 생산은 앞서 언급한 바와 같이 타 산업의 폐기물 활용이란 점 외에도 그 혼합량에 비례하여 CO₂의 배출을 절감시킬 수 있다.

현재 포틀랜드 시멘트에 5% 이내의 수쇄슬래그나 플라이애쉬 등의 혼합이 허용되고 있고 또 슬래그 시멘트의 생산량도 증가하고는 있으나 더욱 적극적으로 수쇄슬래그나 플라이애쉬의 활용을 고려한다면 CO₂ 절감효과는 더욱 커질 것이다. 우리나라의 경우 시멘트에 사용되는 수쇄 슬래그량은 약 300만 톤으로 수쇄슬래그 생산량의 약 80%(전체 고로 슬래그 생산량의 약 38%)이며 플라이애쉬의 활용은 약 15% 정도이나, 올해에는 그 사용량은 더 증가할 것으로 보인다.

(2) Belite계 시멘트 및 alite계 시멘트의 개발¹⁰⁾

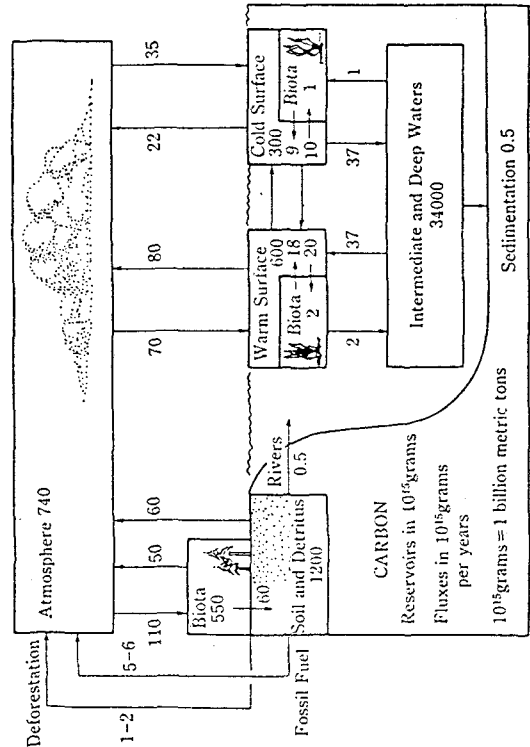
포틀랜드시멘트 클링커광물 중 belite는 alite에 비하여 상대적으로 CaO의 함량이 적으므로, belite를 주광물로 하는 시멘트는 보통 포틀랜드시멘트보다 석회석 사용량이 적고 또 소성온도도 낮아 CO₂ 발생량을 절감시킬 수 있다. 그러나 수화반응 속도가 alite에 비하여 늦으므로 초기강도 발현이 낮아 이에 대한 개선이 요구된다. Belite의 수화활성을 위하여 수화촉진제 개발이나 수화활성이 큰 active belite cement의 개발이 시도되었으며 modified belite cement의 개발도 시도되었다.

한편 포틀랜드시멘트의 alite를 alinite로 대체한 alinite 시멘트가 개발되었는데, 이 시멘트는 비교적 빠른 수화성을 보이거나 시멘트에 Cl성분을 함유하고 있으므로 철근콘크리트에는 부적합하므로, Cl 성분 대신 F를 포함하는 fluorine alinite 시멘트가 연구되고 있다.

4. CO₂의 처리 기술

가. 대기중의 CO₂

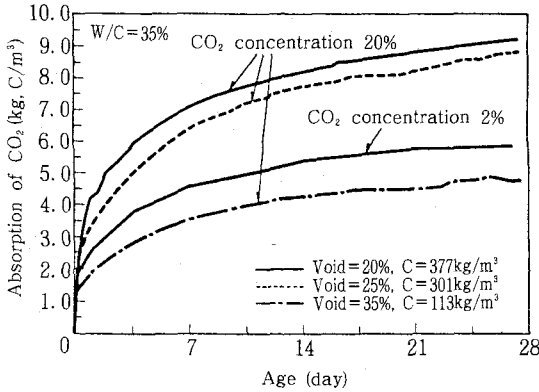
<그림-1>은 지구규모로 본 탄소순환을 나타낸 것



<그림-1> The global carbon cycle : Current estimates of the major reservoirs (in 10¹⁵ grams of carbon) and fluxes (in 10¹⁵ grams of carbon per year) involved in the global carbon cycle.

이다.¹¹⁾ 대기-삼림 및 대기-해양간의 CO₂의 교환이 인간활동으로 그 균형은 깨지고 그 결과 대기중의 CO₂ 농도는 계속 증가하고 있다. 산업혁명 이전 대기중의 CO₂ 농도는 280ppm 수준¹²⁾에서 현재 350ppm 수준에 이르고 있는데, 대기중 CO₂ 농도는 지구 북반구에서 높고 남반구에서는 낮은 것으로 보아 인간활동이 활발한 북반구쪽이 CO₂ 배출원이 많음을 시사하고 있다.

대기중 CO₂ 감소책으로는 우선 화석연료에서 방출되는 CO₂의 절감방안에의 기대이다. 1986년 통계에서 보면 화석연료 소비에 의한 CO₂ 발생량은 5.4×10¹⁵Cg으로 미국이 22.2%, 소련 18.5%, 중국 9.9%, 일본 4.6%, 서독 3.4% 순이며, 개발도상국의 화석연료 사용량은 전세계 소비량의 25%라고 하고 있다. CO₂ 발생량이 적은 천연가스 사용이나 CO₂ 발생이 없는 에너지 이용기술 개발이 절실



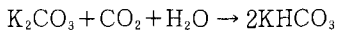
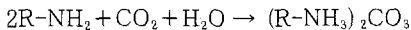
〈그림-2〉 Absorption of CO₂ in porous concrete.

하다. 다음으로 기대되는 것은 배출 CO₂ 가스의 제거 기술 그리고 나아가 CO₂의 자원화 기술개발이다.

나. CO₂의 분리·고정 및 자원화^{11~14)}

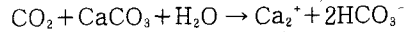
CO₂ 문제는 여러 측면에서 연구되고 고정화 또는 유효이용 등이 고려되고 있다. 대량 발생원에서 CO₂를 회수처리하는 방법으로는 CO₂의 분리 농축(흡수, 흡착, 막분리), 저장(고압가스, dry ice), 격리(바다속 격리, 땅속 격리), CO₂의 고정(생물 고정, 환원고정) 및 자원화(집축수소화에 의한 메탄올, 탄화수소 합성) 등이 있으나 현재로는 분리 방법으로는 화학흡수법이, 그리고 처리법으로는 바다속이나 땅속에 격리하는 방법이 유력한 방법으로 꼽히고 있다.

화학흡수법은 CO₂와 흡수제간에 화학반응으로 흡수하는 것으로 흡수제로는 MEA, DEA, TEA 등과 열탄산칼리제가 있다.



거대한 쓰레기인 CO₂를 바다속 및 땅속 깊이 저장, 격리할 수도 있다. 해양의 CO₂ 흡수능력은 대기중에 비하여 50배의 CO₂가 화학적으로 용해한다. CO₂를 액화하여 500m 이하의 바다속에 넣으면 수압에 의해 CO₂를 가두어 해수에 용해시킨다. 또 3000m 이하의 깊은 바다속에서는 액체 CO₂의 비중이 해수보다 무거워 바다속 저장이 가능하다. 한편, dry ice나 사베트상으로 하여 깊은 바다에 넣는 방법도 있다. 바다속에서 CO₂는 HCO₃⁻ 이온

형으로 용해되어 있다.



땅속 저장법으로는 땅속의 수층, 폐가스광, 유전 등에 격리하는 방법으로 바다속 저장의 경우처럼 액화할 필요없이 직접 지층으로 수송할 수 있다.

다. 콘크리트에의 흡수¹⁵⁾

콘크리트에 의한 CO₂의 흡수도 시험되어졌다. 콘크리트의 중성화현상에서 보는 바와 같이 콘크리트는 CO₂를 흡수하는 성질을 갖고 있다. 최근 CO₂의 흡수를 효율적으로 하기 위하여 다공질 콘크리트를 제작하여 CO₂의 흡수능을 검토한 결과가 보고되었다. 다공성 콘크리트의 CO₂ 흡수는 초기재령(3~14일)에서 현저하였으며, 흡수량은 단위 시멘트량이 많을수록 많았다(그림-1). 또 CO₂의 흡수에 의하여 다공성 콘크리트의 강도는 시험한 조기재령에서는 증가함을 보였으며 내해수성도 좋았다. 앞으로 더 검토를 요할 것이다.

〈참 고 문 헌〉

1. 藤村正哉, *Gypsum & Lime* No.243, 1(1993).
2. 오희갑, *요업재료의 과학과 기술*, 9(5), 459(1994).
3. 飯塚洲一, *Cement & Concrete*, No.563, 37(1994).
4. 外谷興生, *産業公書*, 28(9), 110(1992).
5. 최상훈, *시멘트*, No.130, 20(1993).
6. 菅野卓治, *Cement & Concrete*, No.566, 1(1994).
7. 황한식, 권이연, 최상훈, *한양대 산업과학연구소 논문집*, No.25, 195(1987).
8. 김창은, 이승규, *요업재료의 과학과 기술*, 9(5), 517(1994).
9. 최상훈, *시멘트*, No.133, 35(1993).
10. 정해문, 최상훈, *요업재료의 과학과 기술*, 9(4), 367(1994).
11. B. Moore III, B. Bolin, *Oceanus*, 29, 9(1986/87).
12. A. Neftel, E. Moor, H. Oeschger, B. Stauffel, *Nature*, 315, 45(1985).
13. 白田利勝, *Cement & Concrete*, No.530, 1(1991).
14. 進藤勇治, *化學工業*, 43(8), 27(1992).
15. 小川洋二, 島 弘, 河野清, *Cement & Concrete*, No.568, 12(1994).