특 별 강 연

탄산화를 중심으로 한 시멘트·콘크리트의 환경성능 평가

이 한 승
<한양대학교 건축학부>

1. 서 언

2005년 2월 14일 교토의정서가 발효됨으로써 OECD 31개 협약 국가들은 환경부하 저감을 위하여 온실가스 감축 의무를 준수해야 하며, 이에 따라 우리나라도 1998년 4월 국무총리를 위원장으로 하는 기후변화협약 범정부대책기구를 설치하고 실행 중에 있다. 특히, 우리나라는 2013년부터 온실가스를 감축해야 하는 2차 의무이행 대상국에 편입될 것이 확실시됨에 따라 모든 산업분야에 걸쳐 반드시 온실가스를 감축해야하며, 특히, 시멘트 및 철강 등 건설과 관련하여 에너지를 대량 소비하고 폐기물을 많이 발생시키는 건설생산활동은 온실가스를 줄여야 하는 주요 대상으로 초점이 되고 있다. 일본 자료에 의하면 전체산업 CO_2 배출량의 4.4%가 시멘트산업에서 발생된다고 하여 그 심각성을 지적하고 있으며 일본 가지하라 교수 계산에 의하면 포틀랜드시멘트(OPC) 생산과정에서 OPC 1톤당 0.5톤의 CO_2가 발생, 또한 OPC 1톤을 생산하는 데에 필요한 원료로부터 0.5톤의 CO_2가 발생되어, 즉 OPC 1톤을 생산하면 CO_2도 1톤이 발생한다는 계산을 하고 있을 정도로 무방비 상태로 시멘트산업은 CO_2 발생의 온상으로 지목되고 있다. 그러나, 석회석($CaCO_3$)을 소성하여 CO_2를 대량 발생시키는 시멘트가 오히려 대기 중의 CO_2와 반응하여 지구온난화 주범인 CO_2 문제를 상당부분 해결한다던가, 1450℃로써 소성되는 시멘트가 다이옥신을 발생시키지 않고 인간생활에서 발생하는 모든 쓰레기 및 폐기물발생 문제를 해결하는 유일한 방법이라는 것 등, 시멘트산업의 친환경성을 명확하게 인식하고 홍보해야하는 것은 시멘트·콘크리트 산업 종사자의 임무라고 판단된다.

이러한 배경하에 본 고에서는 시멘트·콘크리트 산업에서의 CO_2 발생현황 및 CO_2 발생 저감대책을 살펴보고 콘크리트 탄산화에의한 CO_2 소비량을 개산적으로 검토하는 것에 의해 시멘트산업의 본질적인 CO_2 배출문제의 수지문제를 제기하고자 한다.

2. 세계기후변화협약의 동향

지구온난화를 막기 위한 교토의정서 발효에 따라 의정서 비준국 중 선진국 그룹은 2008년부터 2012년까지 지구온난화를 유발하는 이산화탄소, 메탄 등 6종류의 온실가스 배출량을 1990년보다 평균 5.2% 감축해야 한다. 한편, 의정서 발효로 에너지 다소비 산업구조를 가진 우리나라는 일부 업종에서 큰 타격을 입을 것으로 보이는 데다 유럽연합(EU), 일본 등 선진국들의 엄격해지는 환경규제로 산업에 있어 악영향을 미칠 것으로 전망돼 대책 마련이 매우 시급한 실정이다. 산업자원부와 에너지관리공단에 따르면 지난 95년 대비 배출량을 5% 감축할 경우 실질 국내총생산(GDP)성장률이 오는 2015년에는 0.78% 포인트 감소할 것으로 예상되며, 2000년을 기준연도로 동일한 의무부담을 받을 경우 실질 GDP성장률은 2015년에 0.47%포인트 하락할 것으로 예상되는 등 교토의정서는 우리 경제에 적지 않은 부담이 될 것으로 전망된다. 또한, 대한상공회의소는'교토의정서 발효에 따른

<표 1> CO_2의 원단위 (단위: g/kg)

구분	포틀랜드시멘트	고로시멘트 B종	플라이애쉬시멘트 B종
석회석 탈탄산 기원	448.9	268.5	374.6
화석연료 연소기원	297.7	191.5	245.1
(화석기원) 폐기물등 연소기원	36.2	21.6	29.5
소각불요에 의한 삭감	▲ 36.2	▲ 21.6	▲ 29.5
합계	746.6	460.0	619.7

주요산업 기상도'라는 보고서를 통해 철강, 시멘트, 석유화학, 정유, 제지 등 에너지 다소비업종과 발전, 항공 등은 어려움이 예상되는 반면 자동차, 건설업종은 단기 전망은 좋지 않지만 장기적으로 시장확대가 예상된다고 분석해 관심을 모으고 있다. 이에 따라, 철강, 정유, 석유화학, 시멘트 업종은 생산량 증가에 따른 온실가스 증가와 에너지 저감비용 상승을, 제지업종도 장기적으로 에너지소비 개선을 위한 기술 개발 어려움에 따른 생산비용 상승을 각각 경험해야 할 것으로 예상된다. 정부는 총리 주재로 '기후변화협약대책위원회'를 열고 2007년까지 3년간 21조5000억원을 투자, ▲협약이행기반 구축사업 ▲온실가스 감축사업 ▲기후변화 적응기반 구축사업을 3대 분야로 선정하고 90개 과제를 추진하기로 했으며, 아울러 국내 기업을 대상으로 이산화탄소 등 온실가스 배출권거래제를 이르면 2006년 시범사업으로 추진하기로 했고 2003년 대비 3% 에너지 절약을 목표로 공공기관 '에너지소비총량제'를 실시하는 한편, 신재생 에너지를 사용한 발전전력 의무구입제도 추진, 자동차 평균에너지소비효율제도 도입 등을 추진하기로 했다.정부는 이와 함께 하반기부터 시작되는 2차 이행기간 의무부담 협상에 대비, 상반기까지 범정부적인 협상대책을 마련할 방침이라고 한다. (파이낸셜뉴스 2005. 2. 14)

3. 시멘트·콘크리트산업에서의 CO_2 발생량 및 CO_2 발생 저감 대책

3.1 시멘트 제조에서의 CO_2 발생량

시멘트제조시에 발생하는 환경부하물질로서는 CO_2, CH_4, N_2O, NOx, SOx 및 분진이 발생하며, CO_2의 원단위를 <표 1>에 나타낸다. <표 2>는 기타 환경부하물질로서 공장의 설비에 따라 다르므로 이들 물질의 공장에 있어서 배출량의 총량을 시멘트 생산량으로 나누어 산출할 수 있다. 한편, <그림 1~3>과 같이 시멘트산업에 있어서 발생원별 CO_2 배출비율을 분류 할 수 있다. CO_2는 원료기원과 에너지기원으로 분류할 수 있으며 원료기원의 CO_2는 석회석의 탈탄산량으로부터 계산될 수 있다. 또한, 에너지기원의 CO_2는 화석원료와 폐기물계로 구분하여 계산할 있다. 한편, 폐기물계의 CO_2는 폐기물을 시멘트제조에너지 대체로서 이용하는 것으로 발생하는 것이고 다른 시설에서 소각에 의해 처분된 경우에도 CO_2는 발생하기 때문에 소각불요에 따른 삭

<표 2> CH4, N2), SOx, NOx 및 분진의 원단위 (단위: g/kg)

종류	포틀랜드시멘트	고로시멘트 B종	플라이애쉬시멘트 B종
CH4	0.016	0.010	0.013
N2O	0.004	0.003	0.003
SOx	0.062	0.045	0.049
NOx	1.514	0.929	1.257
분진	0.035	0.022	0.029

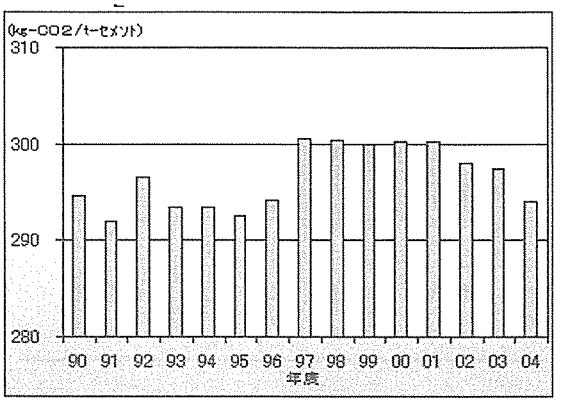
<표 3> 구입전력의 환경물질 원단위

환경 물질	원단위
CO_2 배출량 (kg/kWh)	0.407
SOx 배출량 (kg/kWh)	0.13
NOx 배출량 (kg/kWh)	0.16
분진 배출량 (kg/kWh)	0.03

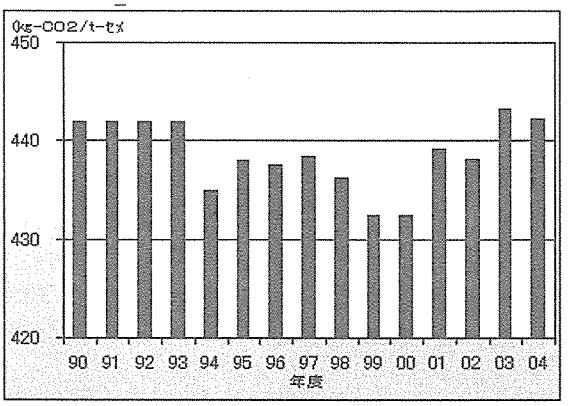
감으로서 같은 값을 부여한다. 또한, 소각불요에 의한 삭감에는 다른 시설에서의 소각시 배기기스 처리나 잔분의 매립처분 등에 따른 환경부하도 생각할 수 있지만 구체적인 값은 명확하지 않으므로 이들 계산은 하지 않는다. 또한, 구입전력의 환경부하물질에 대해서는 합계에 포함하지 않고 있다. 그러나, 구입전력에 대해서는 <표 3>에 나타내는 계수를 사용하여 계산하는 것이 가능하다.

3.2 레미콘제조 및 운반에서의 CO_2 발생 현황

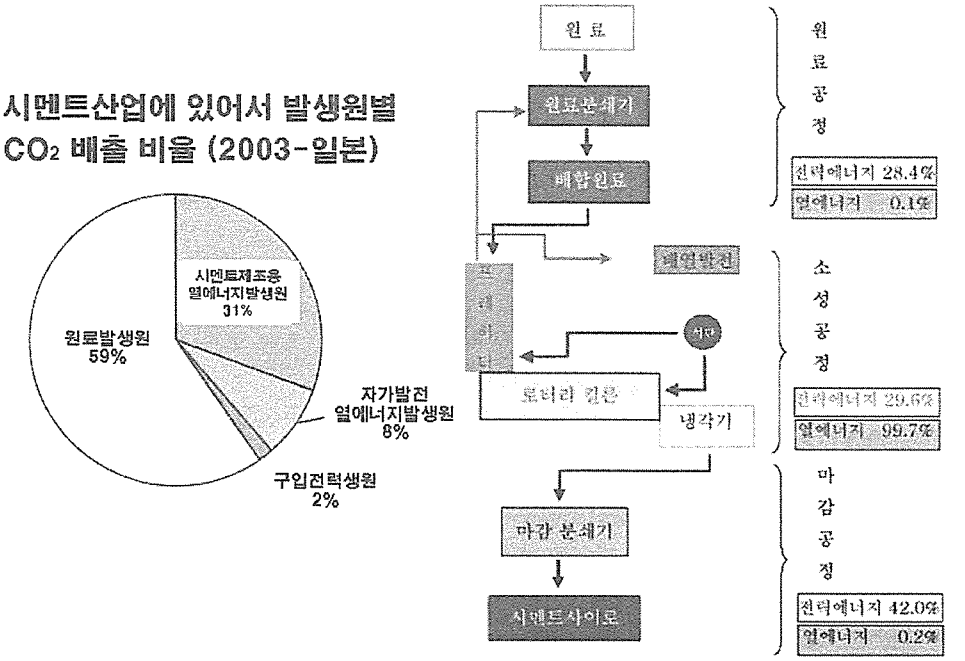
일반적으로 레미콘은 KS F 4009에 기초하여 제조설비를 가진 공장에서 믹싱을 하고 애지테



<그림 2> CO_2 배출 원단위 (에너지 기원)



<그림 3> CO_2 배출 원단위 (원료 기원)



<그림 1> 시멘트산업에서 발생원별 CO_2 배출 비율

<표 4> 레미콘 제조시의 에너지 및 환경부하 물질 배출량 계산(예)

공장	전력 (kWh/t)		CO_2 배출량 (kg-CO_2/t)	
	계산	317 위원회	계산	317 위원회
A	1.91	0.64	0.78	0.26
B	0.96		37	
C	2.15		109	

이터트럭으로 공사현장에 운반한다. 레미콘공장에서는 저장설비에서 뱃쳐플랜트로 재료 공급, 계량, 믹싱 등 주로 전력을 에너지원으로 하여 레미콘이 제조된다. 또한, 레미콘의 운반이나 원재료의 하차, 남은 콘크리트의 처리 등에는 주로 경유를 에너지원으로 하는 운반·작업기계가 사용된다. 레미콘의 제조·운반 공정에 있어서 환경부하에 미치는 영향을 파악하기 위해서는 사용재료와 함께 이들 에너지원의 소비량을 적절히 평가 할 필요가 있다.

① 레미콘 제조시의 CO_2 발생량

레미콘 제조시의 환경부하에 대하여 구입전력 원단위를 사용하여 시산한 결과의 예는 <표 4>와 같다.

② 레미콘 운반시의 CO_2 발생량

레미콘 운반시의 환경부하에 대하여 콘크리트 적재량을 A공장 4.5m3, C공장 2.2m3으로 하고 운반시간을 20분으로 하여 계산한 결과를 <표 5>에 나타낸다.

③ 레미콘 사용재료 CO_2 발생량

레미콘 사용재료의 환경부하물질의 배출량은 사용재료 및 배합을 사용하여 산출하는 것이 가능하며, 물시멘트비 및 단위시멘트량의 평균값을 활용하여 <표 6>과 같이 산출할 수 있다.

3.3 시멘트·콘크리트산업에서의 CO_2 발생 저감 대책

<그림 4>는 일본에서 2010년도 시멘트 제조용

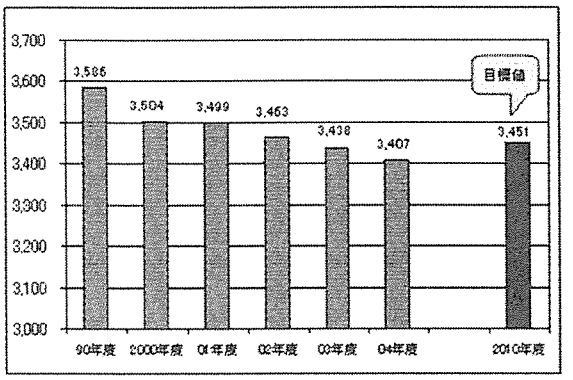
<표 5> 레미콘 운반시의 에너지 및 환경부하 물질 배출량 계산(예)

공장	자사차량 운반량 (m^3)	자사차량 경유량 (L)	경유 사용량 (L/h)		CO_2 배출량 (kg-CO_2/h)	
			계산	317 위원회	계산	317 위원회
A	96,418	165,383	11.6	0.282	32.7	33.8
C	10,123	44,500	14.5		40.9	25.7

<표 6> 레미콘 사용재료의 환경부하 물질 배출량 계산(예)

계산예 : 물시멘트비 60%
단위시멘트량 300kg/m^3 (보통포틀랜드시멘트)
단위수량 170 kg/m^3
잔골재(쇄사) 850 kg/m^3
굵은골재(쇄석) 1000 kg/m^3
AE감수제(사용량 : 시멘트 질량의 0.25%)

300kg×0.7466(kg-CO_2/kg)+850kg×0.0037(kg-CO_2/kg)+1000kg×0.0028(kg-CO_2/kg)+(300kg×0.01)×0.25(kg-CO_2/kg)=223.98+3.15+2.80+0.75=**230.68(kg-CO_2/콘크리트 1m3)**



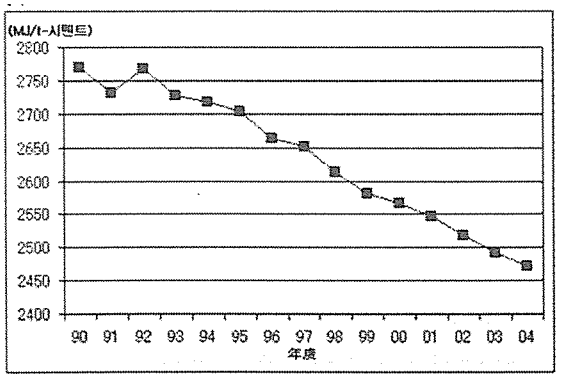
<그림 4> 시멘트제조용 원단위 (MJ/ton-C)

에너지 원단위(시멘트제조용+자가발전용+구입전력)을 1990년도와 비교하여 3% 저감 시키는 계획을 나타내고 있다. 또한, 시멘트업계에서는 <표 7>과 같이 목표를 달성하기 위한 대책으로 **(1) 에너지절약 설비의 보급 촉진 (2) 에너지 대체 폐기물 등의 사용확대 (3) 기타 폐기물 등의 사용 확대 (4) 혼합시멘트의 생산 비율 확대** 등 4가지 주제에 투자를 주로 진행하고 있다

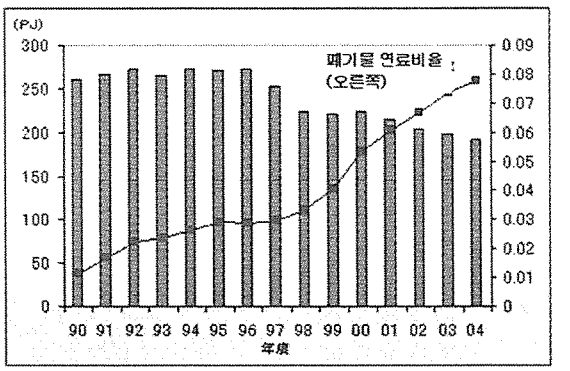
폐 플라시틱, 폐목재, 육골분 등의 연소설비설치를 실시하여 에너지 대체 폐기물 등의 사용확대를 추진하고 있다. 폐기물 등의 사용 확대는 전처리설비나 공장내 수송 등에서 시멘트공장의 전력원단위를 악화시키는 요인이 되지만 이것을 포함하여 전체의 에너지 소비 저감에 힘쓰고 있다. 폐기물이 시멘트산업에 의해 유효활용 되지 않는 경우 그 폐기물은 소각되지 않고 매립처분 되므로 이 경우 폐기물중의 탄소분은 최종적으로 CO_2 또는 강력한 온실효과를 갖는 CH_4로 되어 버린다. 한편, 폐기물을 에너지 대체로서 시멘트산업에서 유효 활용하는 경우에는 그 만큼 천연화석기원 에너지의 사용량이 삭감되어 시멘트 공장과 단순소각설비의 합계로서는 <그림 7>과 같이 온실효과 가스의 배출량은 저감되게 된다.

<표 7> 온난화 대책 설비 투자 상황 (2002~2004년도)

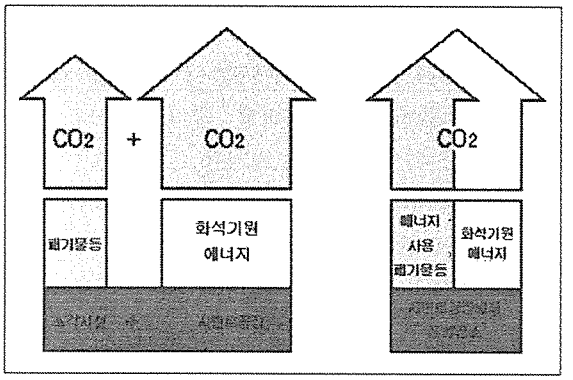
목표달성 대책	2002년도		2003년도		2004년도	
	건수	투자액 (백만엔)	건수	투자액 (백만엔)	건수	투자액 (백만엔)
(1) 에너지절약 설비 보급 촉진	38	417	32	341	13	651
(2) 에너지 대체 폐기물 등의 사용 확대	37	4,985	17	2,873	22	1,963
(3) 기타 폐기물 등의 사용 확대	34	2,999	51	4,991	56	4,860
(4) 혼합시멘트의 생산비율 확대					4	1,314
합계	109	8,201	100	8,205	95	8,518



<그림 5> 시멘트제조용 열에너지의 원단위 추이(폐기물 연료 포함하지 않음)



<그림 6> 시멘트제조용 열에너지 소비량과 폐기물 연료비율의 추이



<그림 7> 시멘트산업에 있어 에너지대체 폐기물 등 사용에 의한 CO_2 배출량 저감

석탄회, 하수 오니, 도시 쓰레기의 활용 등에 의해 천연원료의 사용 저감을 도모할 수 있다. 재이용 되지 않는 거의 모든 폐기물 등은 소각후 혹은 소각되지 않고 매립처분 된다. 시멘트산업이 이들 폐기물 등을 시멘트원료나 에너지 대체물로서 유효이용 하는 것은 최종처분장의 새로운 건설이나 처분을 위하여 소비되는 에너지의 삭감에 연결된다. 또한, CaO를 많이 포함한 폐기물 등을 재이용하는 것으로 원료기원 CO_2의 삭감에도 연결된다. 시멘트 산업의 이와 같은 활동은 온난화 가스의 삭감 뿐만아니라 순환형 사회의 형성에도 크게 공헌할 수 있다. 혼합시멘트는 포틀랜드시멘트의 클링커(시멘트 중간제품)과 석고 이외에 각 종의 혼합재를 혼합하여 만든 시멘트로써 각종 혼합 시멘트는 반드시 적절한 사용용도 및 사용량을 준수하여 사용되어야 한다. 포틀랜드시멘트와 비교하여 클링커의 비율이 작은 만큼 소성 에너지가 적게 되기 때문에 혼합시멘트의 생산설비의 확충이나 출하설비의 증강 등에 노력을 기울이고 있다.

4. 콘크리트의 탄산화 메커니즘과 그에 따른 CO_2 소비량

4.1 콘크리트의 탄산화 메커니즘

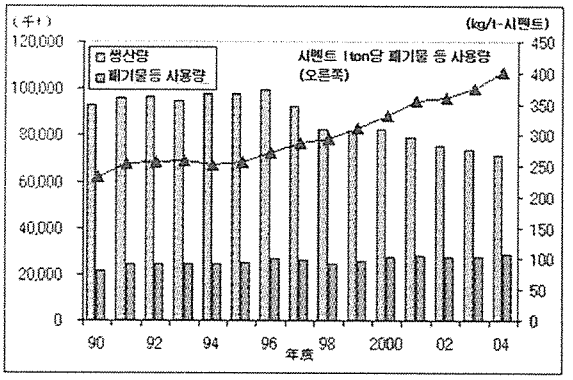
1t의 시멘트는 1.2t의 석회석과 0.3t의 점토(주성분은 Al_2O_3)를 소성하여 만들어진다. 이 경우 석회석은 800 ℃의 고온 하에서 45 wt%의 이산화탄소를 방출하고 산화물인 CaO로 되며 소성에 의하여 점토의 구성성분과 결합하고 이 것들은 물과 반응하여 아래와 같은 시멘트 수화물을 생성한다.

① 규산칼슘 수화물 : $xCaO \cdot ySiO_2 \cdot zH_2O$ (C-S-H, 수화생성물의 60% 이상 용적을 점함)

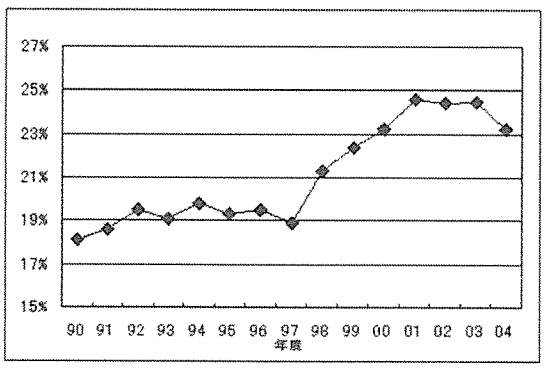
② 수산화 칼슘 : $Ca(OH)_2$ (수화생성물의 25%를 점함)

③ 에트린자이트 : $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$ (콘크리트 중 황산이온 고정, 복염을 형성함)

④ 프리델씨염 : $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$ (콘크리트 중 염화물 이온 고정, 복염을 형성함)



<그림 8> 생산량과 폐기물 등 사용량의 추이



<그림 9> 혼합시멘트 생산비율 추이

이들 시멘트 수화물은 공기중의 이산화탄소 (약산성으로 중량으로 0.035% 정도임)와 반응하여 아래와 같이 탄산칼슘과($CaCO_3$) 기타 물질로 분해한다. 이러한 현상을 탄산화(Carbonation)라 한다. 따라서, 탄산화란, 상온하에서 안정한 암석인 석회석($CaCO_3$)을 소성하여 이산화탄소를 유리시켜 만든 시멘트 수화물이 다시 이산화탄소를 흡수하여 안정한 탄산칼슘($CaCO_3$)으로 돌아가는 현상이며, 철광석(Fe_2O_3)를 고온에서 환원하여 산소를 유리시켜 만든 철이 다시 산소와 반응하여 안정한 산화철(Fe_2O_3)로 돌아가는 현상과 유사하다고 말할 수 있다.

① 규산칼슘 수화물의 탄산화 : $3CaO \cdot SiO_2 \cdot 3H_2O$의 경우

$$3CaO \cdot SiO_2 \cdot 3H_2O + CO_2 \rightarrow 3\mathbf{CaCO_3} + 2SiO_2 + 3H_2O \quad (1)$$

② 수산화 칼슘의 탄산화 : $Ca(OH)_2$

$$Ca(OH)_2 + CO_2 \rightarrow \mathbf{CaCO_3} + H_2O \quad (2)$$

③ 에트린자이트의 탄산화 : $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$

$$3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O + 3CO_2 \rightarrow 3\mathbf{CaCO_3} + 2Al(OH)_3 + 3CaSO_4 \cdot H_2O + 23H_2O \quad (3)$$

④ 프리델씨염의 탄산화 : $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$

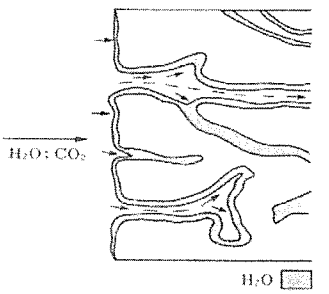
$$3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O + 3CO_2 \rightarrow 3\mathbf{CaCO_3} + 2Al(OH)_3 + 3CaCl_2 + 29H_2O \quad (4)$$

식(2)의 수산화칼슘은 pH 12~13의 강알카리성으로 이것이 콘크리트의 pH를 주로 결정한다. 수산화칼슘은 공기중의 이산화탄소와 반응하여 탄산칼슘으로 되고 이 부분은 pH 8.5~10정도로 되므로 이것을 일본에서는 주로 중성화라고 한다. 그러나, 중성화는 시멘트 경화체의 알카리성이 저하하는 현상을 말하는 것이며 식(2)를 포함하여 식 (1) 및 (3), (4)처럼 이산화탄소에 의하여 탄산칼슘이 만들어지는 과정을 탄산화(Carbonation)라고 하며, 중성화(Neutralization)는 <그림 10>에 나타낸 바와 같이 탄산화를 포함한 산성비, 산성토양, 화재 등에 의한 콘크리트 알카리성 저하를 포함한 범위라고 생각 할 수 있다. 또한, 콘크리트 탄산화는 <그림 11>과 같이 콘크리트 표면에서 내부로 통하는 모세관 공극으로 침입하여 발생하므로 탄산화를 억제하기 위한 방법으로는 콘크리트 표면으로부터 이산화탄소 침입을 억제하기 위하여 표면마감재를 시공하던가, 콘크리트 내부의 모세관 공극을 최소한으로 하는 수밀한 콘크리트를 타설 할 필요가 있다. 또한, 페놀프탈레인 1%에탄올 용액은 pH 8.2~10이상에서 적색을 나타내므로 일반적으로 현장에서 콘크리트의 탄산화 깊이를 측정하는 방법으로 사용되고 있다.

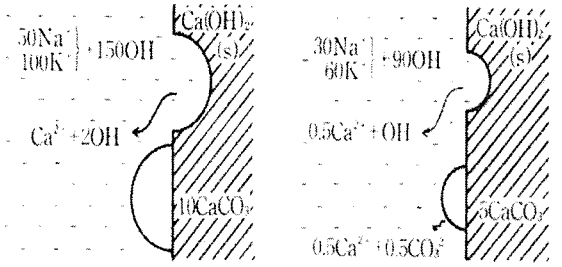
한편, 이산화탄소는 세공용액 중의 물에 용해되어 탄산으로 되며($CO_2 + H_2O \rightarrow H_2CO_3$), 여기서 생긴 탄산은 이온화하여 탄산이온($H_2CO_3 \rightarrow 2H^+ + CO_3^{2-}$)으로 된다. 세공용액 중에 존재하는 Ca^{2+}는 탄산이온과 일단 반응하면 물에 거의 용해하지 않는 탄산칼슘($Ca^{2+} + CO_3^{2-} \rightarrow \mathbf{CaCO_3}$)을 생성하며 세공벽면에 침적한다. 그림 12와 같이 이러한 반응에 의해 Ca^{2+}가 소실되면 세공용액 중의 Ca^{2+}의 농도가 감소하므로 고체상태로 존재한 수산화칼슘이 다시

【탄산화】	【중성화】
C-S-H, Ca(OH)2, ettringite NaOH, monosulphate, KOH 등이 이산화탄소, 탄산이온, 탄산수소이온 등과 반응	탄산화 이외에 산성비 산성토양 화재 등

<그림 10> 탄산화 및 중성화의 개념도



<그림 11> 콘크리트 공극으로 CO_2가스 침입



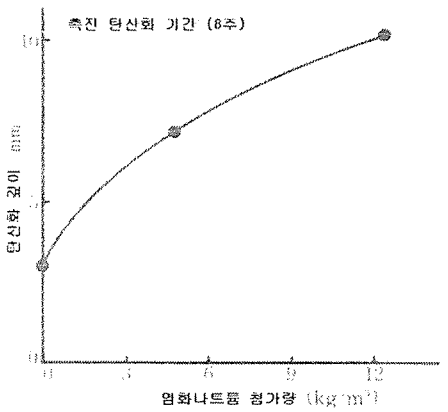
(세공용액 pH가 높은 경우) (세공용액 pH가 낮은 경우)

<그림 12> 콘크리트 탄산화 화학적 진행 모식도

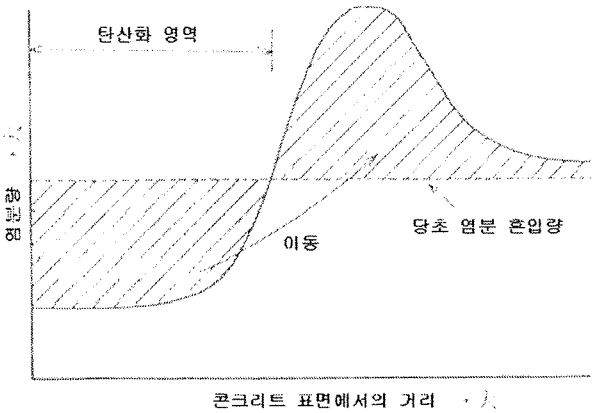
세공용액 중에 용해하게 되고 이 과정이 반복되어 탄산화가 진행됨으로서 세공내부에 탄산칼슘이 성장한다. 세공용액 중의 pH는 Na^+와 K^+와 평형상태에 있는 수산기이온$(OH)^-$에 의하여 결정되므로, 고체상태의 수산화칼슘은 계속해서 수산기이온$(OH)^-$을 공급하게 되므로 콘크리트의 pH는 급격하게 저하하게 된다.

또한, 세공용액중의 pH가 높으면 탄산화가 촉진되는 결과를 나타낸다. 이는 시멘트의 알카리량이 높아진 것과 함께, 해사중의 염화나트륨에 의해 수산기이온 농도가 상승하기 때문이다. 이것은, 염화나트륨이 물의 존재 하에서 Na^+와 Cl^-로 이온화하며, 시멘트 중의 알루민산삼석회($3CaO \cdot Al_2O_3$)가 시멘트중량의 0.4%까지 Cl^-이온과 결합하여 프리델씨염을 생성하므로 세공용액중의 염화물이온은 감소하게 된다. 따라서, 세공내부에서는 여분의 Na^+와 평형을 이루는 음이온이 필요하게 되고 고체상태로 존재하는 수산화칼슘이 용해하게 된다. 이 때문에 알루민산삼석회의 염화물이온 고정화능력 한도 내에서는 염화나트륨량 증가와 함께 수산기이온 농도가 상승하며, 염화나트륨량을 많이 포함한 콘크리트일수록 탄산화 깊이가 크게되므로 콘크리트내 염분은 탄산화를 촉진시킨다. <그림 13>에 염화나트륨 첨가량과 탄산화 깊이에 대한 실험결과를 나타낸다. 한편, 공기중의 이산화탄소가 콘크리트 물성에 미치는 영향은 단순히 수산화칼슘을 탄산칼슘으로 변화시키는 것이 아니고, 식 (3)과 식 (4)처럼 에트린자이트와 프리델씨염이 이산화탄소와 반응하여 분해하고 탄산칼슘을 생성함과 동시에 수용성의 염화물과 유황 화합물을 생성시킨다. 이러한 반응의 결과 세공용액 중에는 염화물이온과 유산이온이 존재하며 이들 이온이 <그림 14>와 같이 농도확산에 의해 비탄산화부분의 콘크리트 내부로 이동하여 농축하게 된다. 이들 이온이동에 의하여 비탄산화 부분의 OH^-의 농도는 감소하고 염화물의 농축과 복합되어 철근 부식을 촉진시키게 된다. 따라서, 콘크리트에 염분이 존재하는 경우, 콘크리트 탄산화는 콘크리트내의 프리델씨염을 해리시켜 염소이온이 콘크리트 내부로 진행하게 하는 원동력이 되므로 콘크리트 탄산화와 염소이온에 의한 철근부식이 복합하여 발생한다.

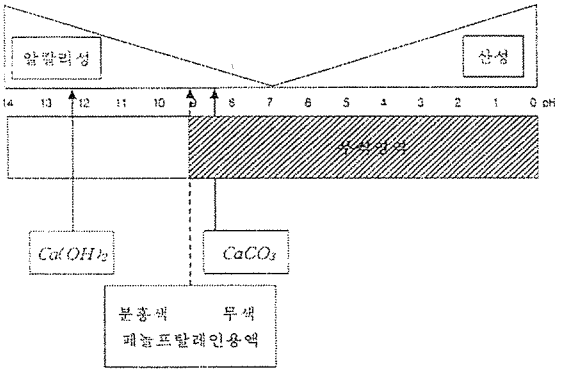
또한, 콘크리트의 pH가 11이상이 되면 철은 표면에 부동태피막을 형성하여 산소와 수분이 존재하여도 발청하지 않으나, 탄산화에 의해 pH가 11보다 작아지게 되고 염화물이온 등 음이온이 존재하면 철근의 부동태 피막은 손상을 받게 된다. 여기에, 산소와 수분의 존재 하에 철근은 부식하게 되며, 철은 약 2.5배정도 체적팽창을 일으키게 되어 콘크리트 균열



<그림 13> NaCl 첨가량과 탄산화 깊이



<그림 14> 콘크리트 탄산화에 따른 염분농도 구배모델



<그림 15> 콘크리트의 탄산화와 철근 부식과의 관계

과 함께 박리·박락을 발생시켜 RC 구조물의 내구성은 저하하게 된다. <그림 15>에 콘크리트의 탄산화와 철근부식과의 관계를 나타낸다.

4.2 탄산화에 의한 콘크리트의 CO_2 소비량 계산

<표 8>에 나타낸 바와 같이 시멘트 구성성분에서서 CaO의 함유량은 전체성분의 65%를 차지한다. 또한, 콘크리트이 탄산화에 의해서 각 시멘트 수화생성물과 CO_2가 콘크리트 $1m^3$에서 흡수되는 CO_2 mo(mol/m^3)는 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

<표 8> oxide analysis of Portland cements(%) (p185 ,concrete, second edition, Mehta)

oxide	Cement no.1
S(SiO_2)	21.1
A(Al_2O_3)	6.2
F(Fe_2O_3)	2.9
C(CaO)	65
S(SO_3)	2
Rest	2.8

$$m_0=[Ca(OH)_2]^0+3[CSH]^0+3[C_3S]^0+2[C_2S]^0$$

한편, 시멘트 킬른에서는 석회석이 열분해하여 CaO와 CO_2로 분해되면서 CO_2가 발생되며($RMCO_2$), 시멘트소성과정에서 연료에 의한여 CO_2가 발생된다($FDCO_2$). 여기서, $RMCO_2$는 $CaCO_3$가 열분해 하면서 발생되는 CO_2로써 CaO와 CO_2는 몰비가 56:44이므로 65%를 차지하는 CaO와 분해되는 CO_2의 양은 0.52ton이 된다. 한편, $FDCO_2$ 계산에 있어서는 양질의 1ton 석탄의 총 열량은 32.6 GJ이고 이에 따라 완전연소가 이루어 지면 2.94ton의 CO_2가 발생된다. 그러나, 유효 열량은 약 석탄발열량의 60%이므로 1ton당 19.5 GJ이 발생된다. 클링커를 1ton 만드는데는 총 1.76 GJ/ton이 들어가므로 CO_2는 0.27 ton이 발생하게 된다.

따라서, 시멘트 1ton을 제조하는 데에는 $RMCO_2$ +$FDCO_2$=0.79ton의 CO_2가 발생된다. 한편, 콘크리트 $1m^3$을 제조하는데 시멘트가 350kg/m^3이 사용되었다고 하면 CO_2는 276.5 kg-CO_2/m^3-con이 발생하게 되며 콘크리트 1m3이 완전 탄산화가 된 경우에 약 142 kg-CO^2/m^3-con의 CO_2가 소비되게 된다.

5. 결 언

지금까지 시멘트·콘크리트의 친환경성에 관한 새로운 시각을 도출하기 위하여 시멘트·콘크리트 산업에서의 CO_2 발생현황 및 CO_2 발생 저감대책을 살펴보고 콘크리트 탄산화에의한 CO_2 소비량을 개산적으로 검토하였다. 산술적인 결과이지만 시멘트를 사용한 콘크리트를 $1m^3$ 제조하는데 발생하는 CO_2가 탄산화에 의해 약 1/2이 콘크리트로 흡수된다는 것을 알 수 있었으며, 또한, 건물의 체적보다 면적이 큰 점 및 장기간에 걸쳐 탄산화가 진행되므로 정확한 데이터가 없는 상황에서 정확한 시뮬레이션이 곤란하지만 시멘트제조에 의해 발생되는 상당량의 CO_2가 다시 콘크리트 속으로 흡수된다는 것을 쉽게 알 수 있고 어느 건설재료에서도 볼 수 없이 나무처럼 광합성을 하여 친환경적인 재료라고 할 수 있겠다.

21세기에도 시멘트 및 콘크리트를 대체할 경제성 있는 구조재료가 발명되지 않는 다는 것은 주지의 사실이며, 좀 더 자신감을 가지고 시멘트 및 콘크리트의 친환경성에 관한 연구를 활발히 실시하고 홍보하여 시멘트·콘크리트산업이 반환경적 산업이 아니라 지구의 지속적인 개발을 책임지는 친환경 국가기간산업이라는 것에 자부심을 가졌으면 한다.

< 참 고 문 헌 >

1. 建築物耐久性向上技術普及委員會編:鐵筋コンクリート造建築物の耐久設計・施工指針・同解說, (財)國土開發技術センター

2. 建築工事標準仕樣書・同解說 JASS 5 鐵筋コンクリート工事, 日本建築學會, 1997.1

3. コンクリート構造物の構造・耐久設計境界問題研究委員會報告書, 日本 コンクリート工學協會, 1998. 7

4. 平成11年版 : コンクリート標準示方書[施工編] - 耐久性照査型 改訂資料, コンクリートライブラリー第99號, 日本土木學會, 2000.1

5. 한국콘크리트학회, 콘크리트 염해 및 탄산화로 인한 내구성 저하 방지대책 연구, 2001. 10

6. 和泉 意登志 외 2인, 中性化, 技報堂出版, 1988