



시멘트 생산과정에 따른 CaO 함량과 CO₂의 발생량

김상호¹⁾ · 황준필^{1)*}

¹⁾연세대학교 사회환경시스템공학부

The CO₂ Emission in the Process of Cement Manufacture Depending on CaO Content

Sang-Hyo Kim¹⁾ and Jun-Pil Hwang^{1)*}

¹⁾School of Civil and Environmental Engineering, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea

ABSTRACT In this study, contents of limestone in cement manufactured by six domestic plants for Portland cement were investigated in terms of the strength and its relation to the CO₂ emission due to limestone material and its physical properties in cement manufacturing process. the relationship among CaO content, compressive strength, and CO₂ emission was surveyed for the limestone quantity in decomposition reaction and the loss of limestone quantity contained in each cement. As a result of CO₂ emission calculation for unit cement, it was found that the CO₂ emission due to decomposition of limestone was occupied 67% of total emission quantity. Furthermore, there was a difference in CO₂ emission quantity depending on the cement manufacturing process management. Also, it was shown that fossil fuel usage and material loss had a major influence as main factors of CO₂ emission. An increase in the CaO content in cement resulted in an increase in the compressive strength. On the contrary, CaO content and compressive strength were reduced with the growth of loss quantity of limestone. It was verified that the material and process management were more effective than CaO yield in cement manufacturing for CO₂ emission with the growth of CO₂ emission quantity. Pozzolanic materials such as PFA and GGBS in concrete mix affected the price, CO₂ emission and development of strength of concrete.

Keywords : CO₂ emission, cement, process control, CaO, strength

1. 서 론

최근 들어 콘크리트 생산 및 콘크리트 구조물의 건설에 따른 환경오염 및 환경부하에 관한 문제점이 부각되고 있으며, 특히 건설과 관련하여 가장 문제가 되는 것이 지구 온난화 문제이다. 지구 온난화의 원인으로 화석연료의 사용을 들 수 있는데, 건설 분야에서 사용되는 화석연료의 사용량이 전체 화석연료 사용량의 약 24%에 달하고 있고, 산업의 발전과 더불어 지속적인 증가 추세를 보이고 있다.¹⁾ 이 중 국내의 시멘트 산업에 의해 연간 약 1600만톤의 CO₂가 발생하며 국내 전체 CO₂ 배출량은 약 7%에 해당하는 매우 높은 수치이다.²⁾ 이에 국내외에서는 시멘트 및 콘크리트 생산에 따른 CO₂ 배출량 저감과 관련된 많은 연구가 진행되고 있으며 포졸란계 혼화재를

치환하여 시멘트 사용의 억제, 재생골재 및 페타이어 등 폐기물의 시멘트용 또는 콘크리트용 재료로 재활용, 콘크리트의 탄산화에 따른 배출된 CO₂의 재흡수에 대한 연구가 진행되고 있다. 포졸란계 혼화재를 치환한 CO₂ 배출 저감연구로 콘크리트에 사용되는 바인더의 단위 CO₂ 배출인자를 보통포틀랜드시멘트(ordinary portland cement; OPC) 0.82, 플라이애쉬(Pulverised fuel ash; PFA) 0.027, 고로슬래그(ground granulated blast-furnace slag; GGBS) 0.143(t CO₂-e/tonne)으로 산정하여, 콘크리트의 동일한 강도 발현 시 사용되는 바인더의 치환에 따른 CO₂ 배출량은 플라이애쉬 13~15%, 고로슬래그 22%의 감소효과를 볼 수 있으며, 경제성까지 뛰어나 환경성, 경제성, 그리고 일부 문제점이 있긴 하지만 공학적 우수성까지 확보할 수 있는 수단이다.^{3,4)} 또한 플라이애쉬를 사용할 경우 대체율 20%일 때 약 15% 정도의 CO₂ 배출 저감효과를 볼 수 있으며, 고로슬래그 미분말을 비롯한 제강슬래그의 활용에 따라서도 상당한 CO₂ 배출 저감효과를 비롯하여 공학적 우수성이 이미 수많은 연구를 통해 이루어졌다. 그리고 폐기물의 재활용을 통한 CO₂ 배출 저감연구는 미

*Corresponding author E-mail : anarchistjp@hanmail.net

Received September 3, 2012, Revised April 10, 2013,

Accepted April 17, 2013

©2013 by Korea Concrete Institute

미한 수준이나 자원의 재활용의 관점에서 전방위적으로 이루어지고 있다.⁵⁻⁸⁾ 콘크리트의 탄산화에 따른 CO₂ 재흡수에 대한 연구로는 “CO₂ 배출 보상”이라는 관점에서 시멘트 생산에 따른 CO₂ 배출량이 콘크리트 구조물이 건설된 이후에는 대기 중의 CO₂와의 화학반응을 통해 탄산화가 되고 이 과정에서 CO₂가 소모되어 CO₂ 배출이 보상을 이루는 것으로서 다만 CO₂ 배출과 탄산화에 의한 콘크리트 구조물의 열화가능성에 대해서는 적정점을 찾아야 할 듯하다.⁹⁾ 결론적으로 현재 우리나라에서 진행 중인 콘크리트의 CO₂배출저감에 관한 연구는 주로 혼화재의 사용을 늘려 시멘트의 사용을 억제하는데 국한되어 있다고 볼 수 있다.

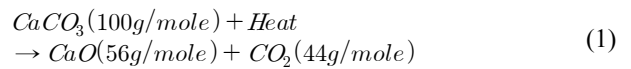
현재 국내 시멘트 산업에서 차지하는 CO₂ 배출량은 시멘트사 별로 시멘트 원료 및 에너지원에 따라 차이가 있다.¹⁰⁾ 또한 단위 시멘트 제조 시 투입되는 석회석 투입량, 클링커내의 CaO 함유량에 따라 콘크리트의 강도 및 CO₂ 배출량은 상당한 차이가 있다.^{11,12)} 국가별 시멘트 제조 시 발생하는 단위 CO₂ 배출량 역시 인도 0.93, 미국 0.89, 중국 0.88kg-CO₂/kg으로 차이를 보인다.¹³⁾

따라서 이 연구에서는 시멘트 생산 시 발생하는 CO₂ 배출량 저감을 위하여 시멘트 제조 공정분석, 원료 및 연료 사용현황, 시멘트 생산에 따른 에너지 소모량 및 비용, CO₂ 배출특성 및 배출인자를 조사하여 시멘트 제조 시 발생하는 CO₂ 배출량을 정량화 하였다. 또한 CO₂ 저감방안으로 시멘트 제조 시 킬른 내에서 석회석의 탈탄산 과정에서의 CaO로의 생성효율을 최대화하여 콘크리트의 물리적 특성도 향상시키고, 포졸란계 혼화재의 사용으로 CO₂ 배출량 저감 및 경제성을 최적화 하기위해 PFA, GGBS를 치환하여 이때 발생하는 CO₂ 배출량과 경제성에 대해 비교 분석하여 CO₂ 배출량 저감을 위한 방안을 제시하였다.

2. 실 험

2.1 CO₂ 배출 메커니즘

시멘트는 주원료인 석회석과 기타 점토질 광물 등을 혼합 분쇄하여 1400℃ 이상의 고온에서 소성시켜 제조되며 주성분은 규산(SiO₂), 알루미늄(Al₂O₃), 산화철(Fe₂O₃) 및 석회(CaO)로 구성되며 시멘트 제조 공정은 크게 채광 공정, 원료분쇄공정, 시멘트 소성공정, 제품 및 출하공정으로 이루어진다. 특히 시멘트 제조 시 발생하는 CO₂ 배출량은 시멘트 소성공정에서 발생하는 CO₂ 배출량이 대부분을 차지하며, 시멘트의 중간 생산품인 클링커 생산 중에 주로 발생된다. 시멘트 소성공정에서의 CO₂ 배출은 시멘트소성로 내 석회석의 탈탄산 과정에서 발생하는 것으로 소성시설에서 석회석(CaCO₃)이 가열되면, 다음 식과 같이 석회(CaO)가 생성되며 이 과정 중에서 CO₂가 배출되며, 배출 식은 다음과 같다.



또한 킬른 온도를 일정하게 유지하기 위한 연료의 연소와 분쇄설비와 같은 설비에서의 전력 사용으로 인하여 CO₂가 배출된다. 배출된 중 석회석의 탈탄산은 시멘트 제조 공정에서 배출되는 CO₂의 가장 큰 비율을 차지하므로, 이 연구에서는 석회석 투입에 대한 탈탄산 과정에서 CO₂ 배출 저감 부분에 대해 접근하여 탈탄산화 시 투입되는 석회석의 양을 조절하여 CO₂ 배출량을 감소시키는 방안에 대해 연구를 수행하였다.

2.2 CO₂ 배출량 산정

이 연구에서는 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change) 방법론 중 Tier 1을 따랐으며, 연료기원의 배출계수를 적용하여 국내 6개 사 OPC의 CO₂ 배출량을 산정하였다. 시멘트 공정별 CO₂ 배출특성 및 배출인자에 대한 상세 정보는 국내시멘트 산업연관표를 이용한 통계적 추론을 통하여 분석하였다. CO₂ 배출량은 국내 6개사의 CaO 함유량을 바탕으로 산정하였다.

Table 1은 KS L 5120(포틀랜드시멘트의 화학분석 방법)에 따른 국내 6개사 OPC의 화학적 조성을 나타낸 것으로서 회사별 CaO 함유량은 60.2~63.1%로 나타났다. 시멘트 중의 CaO 함유량은 시멘트 생산에서의 CO₂ 배출기원에 가장 큰 영향을 미치고, CaO 함유량 조절은 시멘트 소성공정에서 CO₂ 배출을 감소하기 위한 가장 현실적인 방법이라 판단되어 시멘트 중의 CaO 함유량을 바탕으로 CO₂ 배출량을 산정하였다.

Table 2는 탈탄산에서의 석회석 투입량에 대한 CaO 생성량을 나타낸 것으로 전체적으로 석회석이 CaO로 100% 생성되지 않고 손실됨을 알 수 있다. 따라서 CaCO₃의 투입량과 CaO의 생성물은 직접적인 관련성이 없으며 제조 공정 및 설비에 따라 다르다고 판단된다.

Table 1 Oxide composition of OPC produced in Korea

	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃
OPC-A	60.2	21.2	4.9	3.2	1.9
OPC-B	61.1	21.8	5.5	3.4	1.6
COP-C	61.3	19.6	4.3	2.9	2.9
OPC-D	62.3	21.2	4.5	2.8	2.2
OPC-E	62.9	16.9	4.5	3.2	2.1
OPC-F	63.1	21.0	4.5	3.2	2.8

Table 2 Comparison of CaCO₃ and CaO

	OPC-A	OPC-B	OPC-C	OPC-D	OPC-E	OPC-F
CaCO ₃ (kg)	1293	1303	1198	1336	1471	1305
CaO (kg)	602	602	592	623	599	621

2.3 압축강도

시멘트 조성에 따른 압축강도의 차이를 평가하기 위해 국내 6개사에서 생산되는 OPC의 압축강도를 측정하였다. 골재의 형태, 치수 및 모양에 따라 콘크리트의 강도가 영향을 받는 것을 방지하기 위해 표준사를 이용한 모르타르 시험체(50×50×50 mm)를 제작하였다. 시멘트 : 물 : 잔골재의 비는 중량기준 0.40 : 1.00 : 2.45로 하였으며 7, 28, 56일에 측정하였다.

또한 산업부산물은 OPC와 비교하여 낮은 CO₂ 배출량에 기인한 환경성, 저렴한 원재료비에 의한 경제성, 수화열 저감 및 강도발현에 기인한 품질향상에 초점을 맞추어 최종적으로 CO₂ 배출량 저감을 위한 연구를 수행하였다. 이에 혼화재를 사용하지 않은 콘크리트에 비해 품질이 저하되지 않고, 경제성과 환경성을 최적화하기 위해 OPC, 60% GGBS, 30% PFA 모르타르를 제작하여 강도발현과 더불어 이때 발생하는 CO₂ 배출량 및 경제성에 대해 고찰하였다. OPC 및 산업부산물인 GGBS, PFA의 CaO 함유량, 단위 CO₂ 배출량, 가격을 Table 3에 나타내었다. 여기서 OPC의 CaO 함유량, 단위 CO₂ 배출량, 가격은 이 연구에서 수행한 전체 OPC의 평균값을 나타내었다. 또한 GGBS, PFA의 단위 CO₂ 배출량은 정제하는 과정에서 사용되는 연료 및 에너지 사용에 따른 CO₂ 배출량이다.

3. 실험 결과

시멘트 제조 시 투입되는 원연료 및 전기 사용량을 바탕으로 시멘트 1톤 제조 시 발생하는 CO₂ 배출량을 Fig. 1에 나타내었다. 회사별로 729~911 kg-CO₂가 발생되며, 6개사 평균은 822 kg-CO₂로 나타났으며, OPC별 CO₂ 배출

Table 3 Comparison of OPC to PFA and GGBS

	CaO (%)	CO ₂ emission (kg/tonne)	Price (won/tonne)
OPC	61.8	822	60,000
GGBS	40.8	143	50,000
PFA	5.2	27	32,000

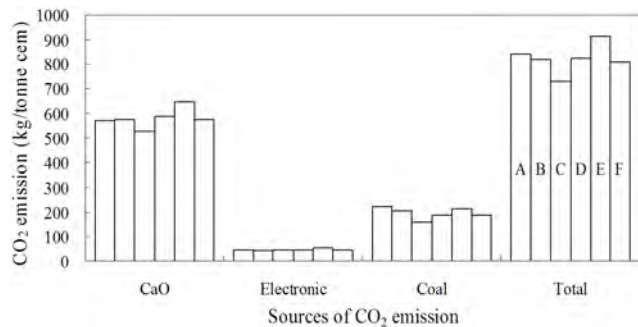


Fig. 1 CO₂ emission arising from the energy source and material

인자로는 킬른 내에서 석회석의 탈탄산에 따른 CO₂ 배출량이 평균 579 kg-CO₂로 전체 CO₂ 배출량의 67.5%를 차지하였다. 또한 킬른 온도를 일정하게 유지하기 위한 화석연료의 연소에 따른 CO₂ 배출량이 195 kg-CO₂로 전체 CO₂ 배출량의 26.7%, 설비에서의 전력 사용에 따른 CO₂ 배출량이 47 kg-CO₂로 전체 CO₂ 배출량의 5.8%를 차지하였다. 이상 3가지 배출원은 본질적으로 상호 독립적이며, 배출원 중 석회석의 탈탄산에 따른 CO₂ 배출이 시멘트 제조 공정에서 배출되는 CO₂의 가장 큰 비율을 차지하는 것으로 나타났다.

Fig. 2는 시멘트 생산에 따른 각 OPC별 비용조사를 분석한 것으로 시멘트 소성 공정에서의 CO₂ 배출주요 요인인 원료 부문에서의 CaO, 설비 및 연료 부문에서의 전력, 화석연료에 대한 가격 구성물은 각각 CaO 20%, 전력 35%, 화석연료 45% 정도로 나타났다. 원료 부문을 제외한 킬른 온도 유지를 위한 연료와 설비에서 사용되는 전력은 현재 대체 연료로서 기존 연료를 폐기물로 대체하는 방안이 있으나 실제 사용량은 미미한 수준이다.

Fig. 3은 시멘트 제조 시 발생하는 CO₂ 배출량의 원인을 파악하기 위해 시멘트 중의 CaO 함유량에 대한 CO₂ 배출량을 나타내었다. 6개사의 시멘트 중의 CaO 함유량은 60.2~63.1%로 측정되었으며, 각각의 시멘트 중의 CaO 함유량에 대한 CO₂ 배출량은 729~911 kg-CO₂로 산정되었다. 시멘트 중의 CaO 함유량에 따라 CO₂ 배출량은 차이를 보이거나 일관성이 떨어지는 것으로 나타났다. 따라서 시멘트 제조공정에서 발생하는 CO₂ 배출량은 시

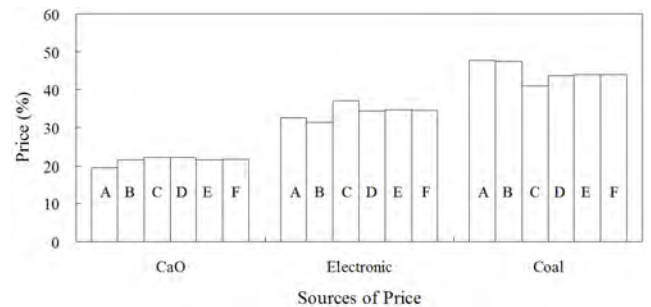


Fig. 2 Price allocated to sources in cement industry

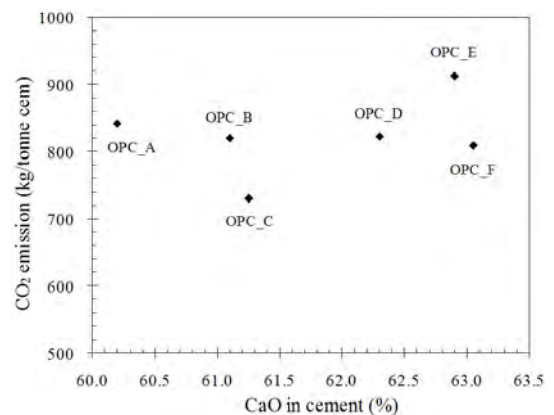


Fig. 3 The relation between CaO in cement and CO₂ emission

멘트 중의 CaO의 발생에서 비롯되긴 하나 각 시멘트사별 결과를 비교할 때 큰 영향성은 없는 것으로 판단된다.

Fig. 4는 시멘트 제조 시의 CaO 손실률에 대한 CO₂ 배출량을 나타낸 것이다. CaO 손실률이 23.62~8.69%로 감소할수록 CO₂ 배출량은 911 kg-CO₂에서 729 kg-CO₂로 감소하는 것으로 나타났다.

Fig. 3과 4를 바탕으로 시멘트 제조 시 투입재료에 비해, 손실되는 원재료로 인해 추가적인 소성과정을 거치게 되므로 이로 인해 발생하는 CO₂ 배출이 영향성이 높음을 알 수 있다. 킬른 내에서 석회석의 탈탄산에 따른 CO₂ 배출량은 시멘트 제조 시 발생하는 전체 CO₂ 배출량의 67.5%를 차지한다. CaO의 손실률을 23.62%에서 8.69%로 14.9%를 줄인다면 탈탄산화에 따른 CO₂ 배출량을 120 kg-CO₂ 정도 줄일 수 있으며 이를 환산화하면 18.5% 줄일 수 있다. 또한 시멘트 제조 공정에서 발생하는 전체 CO₂ 배출량의 13.1% 감소시킬 수 있다.

석회석의 탈탄산에 따른 CaO의 손실률의 차이는 시멘트 제조 시 원가에도 직접적인 영향을 미치는데 추가적인 재료의 투입, 에너지의 사용에 따른 것으로 보이며 Fig. 5에서 보는 바와 같이 CaO 손실률에 따른 최대 단위

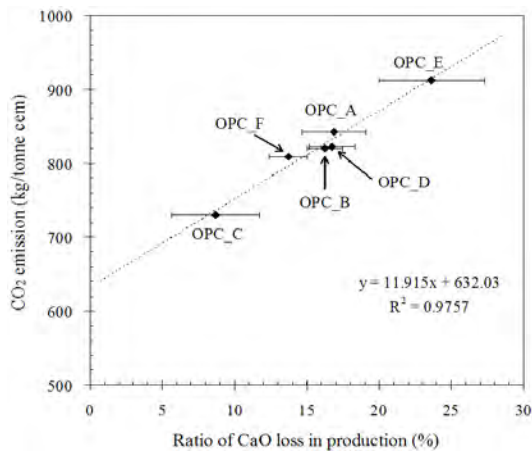


Fig. 4 CO₂ emission with the loss ratio of CaO in cement production

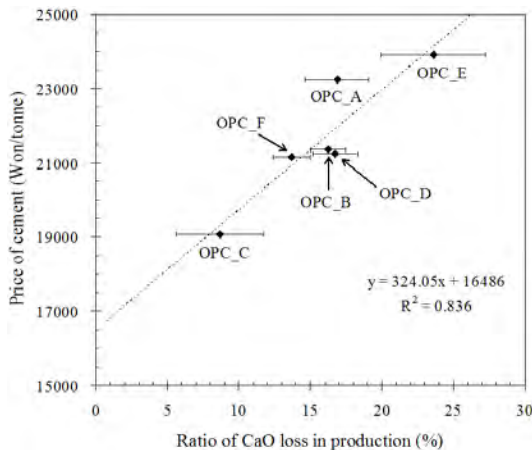


Fig. 5 Price of cement with the loss ratio of CaO in cement production

시멘트(톤) 가격을 4,851원 줄일 수 있으며, 이는 시멘트 1톤 제조 시 생산 가격의 20.2%에 해당한다.

Fig. 6은 시멘트 제조 시 화석연료 사용량에 대한 CO₂ 배출량을 나타내었다. 시멘트 제조사별 1톤의 시멘트를 생산하기 위한 화석연료의 사용량이 증가할수록 CO₂ 배출량은 증가함에 따라 시멘트 제조 시 투입되는 화석연료 사용량은 CO₂ 배출 및 시멘트의 생산원가에 직접적인 영향을 미침을 알 수 있다. 시멘트 제조 시 사용되는 화석연료의 양이 97 kg에서 68 kg으로 감소됨에 따라서 CO₂ 배출량 역시 224 kg-CO₂에서 157 kg-CO₂로 감소되는 것으로 나타났다. 킬른 온도를 일정하게 유지하기 위한 화석연료의 연소에 따른 CO₂ 배출량은 전체 CO₂ 배출량의 26.7%를 차지한다. 이를 시멘트 제조 공정에서 발생하는 전체 CO₂로 환산하면 배출량의 7.4%를 감소시킬 수 있다.

Fig. 7은 CO₂ 배출량과 모르타르의 압축강도 측정 결과를 나타내었다. CO₂ 배출량 증가에 따른 모르타르의 강도는 일관성이 부족하므로 시멘트 제조 시의 CO₂ 배출은 강도와는 무관한 것으로 판단된다.

Fig. 8은 시멘트의 CaO 함유량과 모르타르의 압축강도 측정 결과를 나타내었다. 시멘트의 CaO 함유량에 따라 압축강도는 크게 변하지 않았으나 약간의 강도 증가효과

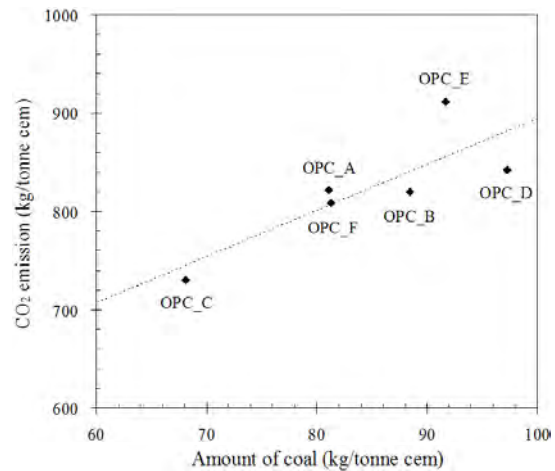


Fig. 6 CO₂ emission with the use of coal for energy in the kiln

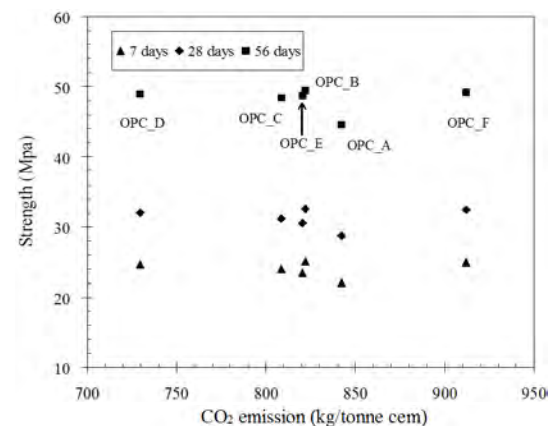


Fig. 7 Development of strength with CO₂ emission

는 있었다. 즉 시멘트 내에서 CaO의 함유량은 압축강도 및 CO₂ 배출에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다. 기존의 가설처럼 CaO를 다량 함유 할 경우, 강도증진효과는 있으나 CO₂ 배출량이 증가하므로 이에 대한 최적의 선택은 잘못된 것으로 보인다. 오히려 CaO 생성에 있어 킬른에서 소모되는 화석연료의 에너지 효율이나, 원재료 관리를 통한 석회석 처리 등이 강도증진, CO₂ 발생에 효과적인 방법이라 할 수 있다.

Fig. 9는 포졸란계 혼화재의 사용에 따른 압축강도와 CO₂ 배출량과의 관계를 나타내었다. 56일 재령의 압축강도는 OPC < 30% PFA < 60% GGBS 순으로 나타났으며, CO₂ 배출량은 60% GGBS < 30% PFA < OPC 순으로 확인됨에 따라 강성 및 환경영향성 측면에서 포졸란계 혼화재를 첨가한 시험체가 우수함을 알 수 있다. 60% GGBS의 경우 강도는 약 21% 증가한 반면 CO₂ 배출량은 OPC의 50% 정도 수준이었다. 30% PFA는 강도증진 14%, CO₂ 배출 감소율은 28%로 우수하였다. 그러나 경제적인 측면에서 30% PFA가 가장 우수하였으나 이는 정

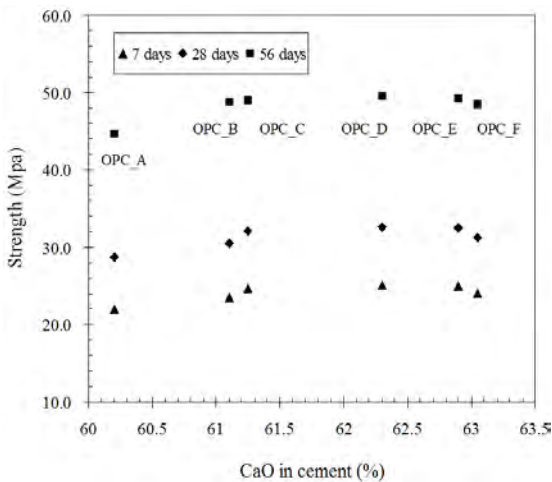


Fig. 8 Development of strength with CaO content in cement

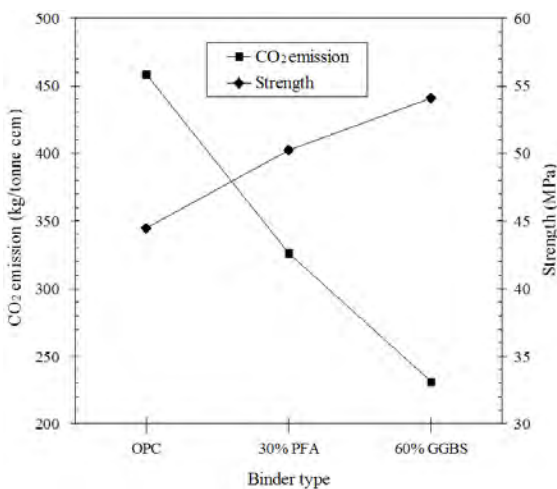


Fig. 9 Effect of pozzolanic materials in strength and reduction of CO₂

제과정 및 혼입률에 따라 크게 변할 것으로 예상되며 기본적으로 OPC와 비교해서 경제적인 것으로 판단된다.

4. 결 론

이 연구에서는 시멘트 생산에 따른 CO₂ 배출에 관한 주요인자 및 해결방안에 대해 다루었다. 특히 CO₂ 배출의 주요 원인이 화석연료의 사용과 CaO를 시멘트 내에 생성시킴에 있어 발생하는 화학적 전이에 초점을 맞추어 연구를 진행하였고 아래와 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 시멘트 제조 시 CO₂ 발생의 주요인자인 화석연료에 대하여 제조사별 일정량의 시멘트 생산을 위한 화석연료 사용량이 클수록 CO₂ 발생량은 증가하였으나, 화석연료 사용에 따른 시멘트 내의 CaO의 양과는 무관하였다.
- 2) 시멘트 제조 시 석회석의 화학적 전이에 따른 CaO로의 생성효율이 떨어질수록 추가적인 화석연료의 사용으로 인한 CO₂ 발생은 증가하였다.
- 3) 국내에서 생산되는 보통포틀랜드시멘트로 제작된 모르타르의 강도 측정 결과, 시멘트의 CaO 함유량이 높을수록 약간의 강도증진은 보였으나 미미한 수준이었으며, 강도와 같은 시멘트의 품질향상을 위해 CaO 함유량을 증가시키는 것은 강도 및 환경에 큰 도움이 되지 않음을 보여준다.
- 4) CO₂ 배출 저감을 위한 포졸란계 혼화재인 PFA, GGBS의 사용은 강도증진, CO₂ 배출저감 및 경제성까지 갖추었다. 특히 GGBS의 경우 강도는 21% 증가한 반면 CO₂ 배출량은 오히려 50% 감소하는 결과가 도출되었다.

감사의 글

이 연구는 국토해양부 과제 “친환경 화학처리기술을 통한 콘크리트 구조물의 환경오염저감 및 환경영향성 평가 (10기술혁신E02)”의 지원으로 수행되었다.

References

1. Song, D. S. and Leigh, S. B., “A Study for Estimating Environmental Load Throughout Building Life Cycle,” *Journal of the Architectural Institute of Korea*, Vol. 13, No. 6, 1997, pp. 175-183.
2. Korea Institute of Construction Technology, *Development and Application of Cement-Zero Concrete*, Korea, 2008.
3. Flower, D. J. M. and Sanjayan, J. G., “Greenhouse Gas Emission due to Concrete Manufacture,” *The International Journal of Life Cycle Assessment*, Vol. 12, 2007, pp. 282-288.
4. Nowak, R., “Geopolymer Concrete Opens to Reduce CO₂ Emissions,” *The New Scientist*, Vol. 197, 2008, pp. 28-29.
5. Yang, K. H., “Status and Recycling for Electricity

- Production,” *Concrete and Environment Symposium*, 2011, pp. 100-122.
6. Hwang, K. R., “Current Technical Tendency of Concrete Using Fly Ash,” *Magazine of the Korea Concrete Institute*, Vol. 14, No. 5, 2002, pp. 96-103.
 7. Korea Environmental Industry and Technology Institute, Korea LCI Database Information Network, <http://www.edp.or.kr>, Accessed 2011.
 8. Korea Institute of Construction Technology, Building Materials using National LCI D/B, <http://apess.kict.re.kr>, Accessed 2011.
 9. Lee, S. H., Lee, S. B., and Lee, H. S., “Study on the Evaluation CO₂ Emission-Absorption of Concrete in the View of Carbonation,” *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 21, No. 1, 2009, pp. 85-92.
 10. Hwang, J. P., Jin, S. H., and Ann, K. Y., “Estimation of CO₂ Emission with Raw Materials and Energy Sources,” *Proceedings of the Korea Concrete Institute*, Vol. 23, No. 2, 2011, pp. 785-786.
 11. Rosković, R. and Bjegović, D., “Role of Mineral Additions in Reducing CO₂ Emission,” *Cement and Concrete Research*, Vol. 35, Issue 5, 2005, pp. 974-978. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.04.028>)
 12. Gartner, E., “Industrially Interesting Approaches to Low CO₂ Cements,” *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, Issue 9, 2004, pp. 1489-1498. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.01.021>)
 13. Hendriks, C. A., Worrell, E., Jager, D., Blok, K., and Riemer, P., “Emission Reduction of Greenhouse Gases from the Cement Industry,” *Greenhouse Gas Control Technologies Conference*, London, UK, 2004, pp. 1-11.

요 약 이 연구에서는 시멘트 생산공정에서 석회석 원료에 따른 CO₂ 배출량 및 그에 따른 물리적 특성을 파악하기 위해 국내 6개사의 보통포틀랜드시멘트에 대한 CaO 함유량 및 모르타르의 압축강도를 측정하였다. 탈탄산반응 시 발생하는 CaO와 각각의 시멘트에 함유된 석회석의 손실량에 대하여 CaO 함유량 및 압축강도, CO₂ 배출량과의 관계를 비교분석하였다. 단위 시멘트에 대한 CO₂ 배출량 산정 결과 석회석의 탈탄산에 따른 CO₂ 배출량이 전체 배출량의 67%가량 차지하였고, 시멘트 제조 시 공정관리에 따라 CO₂ 배출량에 차이가 있음을 확인하였다. 또한 CO₂ 배출의 주요 인자로 화석연료의 사용 및 재료 손실률이 지대한 영향을 미친다는 것을 확인하였다. 시멘트 내의 CaO 함유량이 증가함에 따라 압축강도 역시 증가하였으며, CaO 손실량이 클수록 CaO 함유량 및 압축강도는 감소하였으나 CO₂ 배출량은 증가함에 따라 시멘트 제조 시 CaO 생성량보다는 재료 및 공정관리가 CO₂ 배출에 더 영향력이 있음을 알 수 있었다. 그리고 포졸란계 혼화제인 PFA, GGBS를 사용함으로써 이에 따른 가격, CO₂ 배출 및 강도증진 효과가 있음을 확인하였다.

핵심용어 : CO₂ 배출, 시멘트, 제조공정, CaO, 강도