

# 탄소배출저감형 에코혼화재의 활용방안

Utilization method of carbon-emission-reduction type eco-admixture material



김정진\*  
Jeong-Jin Kim



황인성\*\*  
Yin-Seong Hwang



이상현\*\*\*  
Sang-Hyun Lee

## 1. 서 언

### 1.1 현 상황

21세기 들어 지구환경 지속성에 대한 우려가 확산되면서 현재 세계 각국에서는 전 산업부분에서 온실가스인 이산화탄소를 저감하기 위한 노력이 한창 중에 있다. 특히, 최근 유엔산하 정부간기후변화협약체(IPCC)의 4차 평가보고서에서는 지구온난화는 명백하며 그 원인은 인간활동으로 인한 온실가스 농도 증가일 가능성이 매우 높다고 지적하고 있다.<sup>1)</sup>

그런데 오늘날 대부분의 건축물에 사용되고 있는 콘크리트는 골재를 채움재로, 시멘트를 결합재로 사용하는 건축재료로서 시멘트 제조 시, 주 원료인 석회석의 탈탄산과정에서 다량의 이산화탄소가 발생함에 따라, 콘크리트 재료는 반친환경적 건축재료라는 인식이 커져가고 있다. 보

통포틀랜드시멘트의 경우 1ton 생산 시 약 872kg의 이산화탄소가 발생할 정도로 다량의 이산화탄소를 방출하고 있다.

따라서 21세기 친환경 시대, 지구환경지속성을 위하여 전 지구적 차원에서의 이산화탄소 절감 노력과 함께 건설 산업에 대표적인 콘크리트 또한 환경부하 저감을 위한 기술개발이 적극적으로 요구되고 있는 상황이다.

### 1.2 에코혼화재 사용 국내외 동향 및 활용 당위성

지구 환경 지속성을 위하여 건축산업에서는 건축물의 생산 및 유지관리 단계에서의 에너지 사용량 저감 및 환경부하 저감을 위하여 선진국을 중심으로 한 친환경 건축물 인증제도가 시행되고 있다. 그림 1, 2는 2010년 녹색올림픽을 모토로 캐나다 밴쿠버 동계 올림픽에 사용된 건축물 중 일부로써, 대부분의 건축물들이 LEED 인증을 취득하였으며, 건축물 사용시 혼화재 사용량을 35~50% 치환하는 것을 LEED 인증의 주요 전략으로 하였다.<sup>2)</sup>

이러한 친환경건축물 인증제도의 도입 및 확대 적용은 각국에서 다량의 이산화탄소를 방출하는 건축산업에서의 온실가스 배출저감을 위한 주요 수단이 되고 있다.

국내의 경우, 친환경 건축물 인정을 받은 건축물에 대하여 서울시는 1) 부동산 취득세/등록세 감면, 2) 친환경건축물 인증금액 지원, 3) 용적률 완화 등의 인센티브를 제공함에 따라 이러한 콘크리트 내 혼화재 사용은 점차 확

\* 롯데건설(주) 기술연구원 책임연구원  
LOTTE Engineering & Construction / Research & Development Institute / Chief Researcher Ph.D  
E-mail : duson12@lottenc.com

\*\* 아세아시멘트 기술연구원 책임연구원  
Asia Cement Co., LTD. R&D Center/Senior Researcher  
E-mail : hwangys@asiacement.co.kr

\*\*\* 롯데건설 기술연구원 선임연구원  
Lotte E&C Insitute / Senior Researcher  
E-mail : paulus@lottenc.com



그림 1. Vancouver Olympic Village (LEED Platinum)



그림 2. Richmond Olympic Oval (LEED Silver)

대될 것으로 예상된다.

현재까지 혼화재 사용량은 국내의 경우 약 19%, 일본의 경우 약 24% 수준으로 보고되고 있어, 독일 시멘트산업의 혼합시멘트 비율 45% 수준과 비교하여 그 사용실적이 저조한 편이다.<sup>3)</sup> 하지만 한국이 2013년 온실가스 저감 2차 의무대상국으로의 편입이 확실시 되고 있고, 탄소배출거래권 시장이 국제적으로 확대가 예상되는 등 정치적, 환경적인 압력하에서 콘크리트 내 혼화재 사용 증가는 선택이 아닌 필수적인 사항이 될 것이며 이에 따라 건설산업에서는 에코혼화재 활용방안을 적극적으로 모색해야 할 것이다.

## 2. 혼합시멘트 사용을 통한 탄소배출 저감의 필요성 및 에코혼화재 정의

### 2.1. 개요

현재까지 포틀랜드 시멘트를 생산하는 과정에서의 이산화탄소 배출량을 저감할 수 있는 새로운 기술들이 거의 없기 때문에 시멘트 클링커의 생산을 최소화하는 것이 이산화탄소 배출량을 저감할 수 있는 실질적인 해결책이며, 그 방법으로 혼합시멘트 재료, 고성능 감수제 등의 사용

방법 등이 주로 사용되고 있다. 이에 본 절에서는 혼화재 중 플라이애쉬 및 고로슬래그를 대상으로 활용성 및 자원의 잠재 사용량을 살펴보기로 한다.

### 2.2. 슬래그의 활용성<sup>4)</sup>

슬래그란 제철 산업의 주된 부, 폐산물을 말하며 고로슬래그와 제강슬래그(전로슬래그, 전기로슬래그)로 구분된다. 이와 같이 생산된 고로 및 제강슬래그는 그 화학적 성분과 물리적 성질이 달라 그 응용분야도 다르다.

제철소 고로에서 선철을 제조하는 과정에서 발생하는 고로슬래그는 그 구성원소가 일반암석과 같고 성분은 시멘트와 유사하다. 따라서 고로슬래그는 화학성분이 포틀랜드 시멘트와 유사하여 수경성이 있어 슬래그 시멘트의 원료로 사용된다. 반면 제강슬래그는 철에서 강을 만들기 위해 쇳물에 녹아있는 탄소, 규소성분 등을 제거하는 공정에서 발생하는 것으로 미반응 CaO(free-CaO)가 포함되어 있어, 성토용 골재 또는 도로용 골재로 주로 사용되고 있다.

따라서 시멘트의 결합재로 사용될 수 있는 슬래그는 수경성이 있는 고로슬래그이며, 일반적으로 발생량은 1톤 조강 시 약 300kg 가량 발생한다. 현재 세계 조강 생산량은

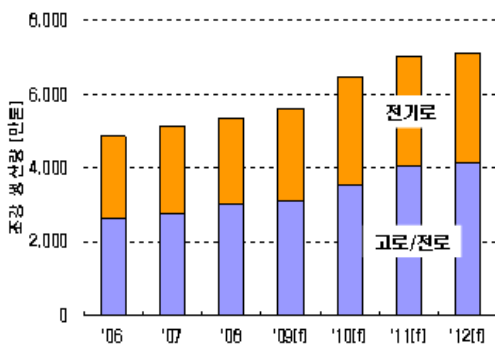


그림 3. 국내 조강 생산량 추이 및 전망

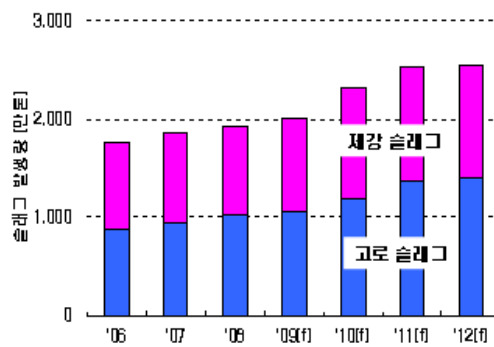


그림 4. 국내 철강슬래그 발생량 추이 및 전망

연간 10억톤에 이르며, 제강슬래그 발생량을 감안하면(1톤 조강시 약 170kg) 약 5억톤 이상으로 추산된다. 그림 3은 국내 고로 및 전로, 전기로에서의 조강 생산량 및 추이를, 그림 4는 국내 철강슬래그의 발생량 및 추이를 나타낸 것으로 2008년 고로슬래그 발생량은 약 1,000만톤을 넘어섰다. 2010년 현대 제철이 조강 생산 능력을 2,250만톤으로 대규모 확장함에 따라 국내 슬래그의 발생량은 급격하게 증가할 것으로 예상되며, 따라서 향후 건설산업에서 사용할 고로슬래그의 공급량은 충분할 것으로 사료된다.

### 2.3. 플라이애쉬의 활용성<sup>5)</sup>

2006년 연간 플라이애쉬 생산량은 중국, 인도, 미국을 중심으로 전 세계적으로 900만톤에 달한다. 또한, 수년간 수백만톤의 플라이애쉬가 쌓여져 왔다. 플라이애쉬는 화력 발전소에서 화석연료 연소시 발생하는 먼지들을 집진기를 이용하여 채취, 생산하는 것으로 산업부산물을 이용한 혼화재이다.

화력발전소는 다량의 이산화탄소를 방출하기 때문에 환경적이지 못하다. 그러나 미국, 인도, 중국 등 세계의 전력 수요는 저렴하고 매장량이 풍부한 화력발전을 통하여 그 수요를 충족할 것으로 예상된다. 전 세계적인 석탄 소비량은 2005년 60억톤에서 2025년 80억톤으로 증가할 것으로 예상된다. 미국에서는 2004년 생산된 전력의 50%가 화석연료에서 생산되었고, 그림 5, 6과 같이 2030년까지는 56%까지 늘어날 것으로 예상된다. 중국, 인도, 미국에서 계획된 377,000MW의 추가적인 전력수요를 충족하기 위해서는 2025년까지 수백개의 새로운 화력발전소를 세워야만 한다. (일반적인 화력발전소 용량: 500MW) 따라서, 최소한 2050년까지 상당한 양의 플라이애쉬가 안정적으로 공급될 것으로 예상된다.

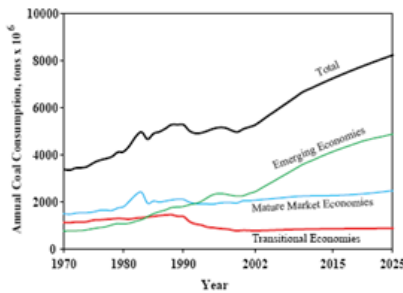


그림 5. 세계의 석탄 사용량 이력 및 추이<sup>5)</sup>

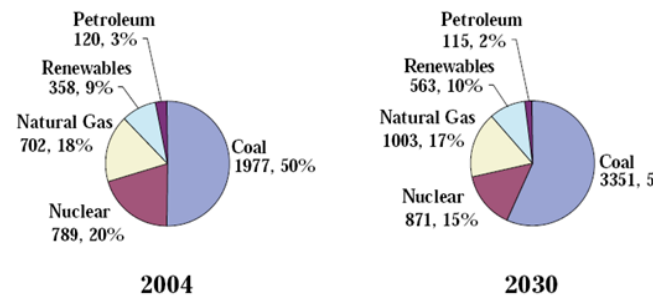


그림 6. 미국에서 연료별 전력 생산 비율(kW-h × 10<sup>9</sup>)<sup>5)</sup>

### 2.4. 에코혼화재 정의 및 현장 적용 시 기존 문제점

에코혼화재란 콘크리트 생산 시 발생하는 이산화탄소량을 저감하기 위하여 기존의 시멘트를 대체할 수 있는 혼화재를 통칭하는 것으로 국내에서는 고로슬래그와 플라이애쉬가 주로 사용되고 있다. 그러나 이러한 혼화재들은 시멘트를 대체 사용 시 저온의 환경에서 콘크리트의 강도발현이 늦어지기 때문에, 실무 건설사에서는 저온시 초기 강도저하로 혼화재의 사용량을 제한하고 시멘트를 중심으로 레미콘을 사용하고 있다. 따라서 기존의 에코혼화재의 활용을 증대하기 위해서는 혼화재를 사용하면서도 기존 보통포틀랜드시멘트 대비 강도발현 속도가 동등 이상 발현이 필수적이다. 본 고에서는 롯데건설과 아세아시멘트가 공동으로 개발한 에코멘트(이하 EM)의 현장 적용 결과를 바탕으로 활용방안을 제안하였다.

## 3. EM를 이용한 콘크리트 현장 적용

### 3.1. EM 콘크리트 공장 실내 실험 실시

EM의 현장 적용을 위하여 EM 사용에 따른 굳지 않은 콘크리트 특성 및 경화 특성을 평가하였다. 적용 대상 현장은 당사 시공 현장인 김포 스카이파크 및 용인 신동백 APT 현장을 대상으로 하였으며, 특히 김포 스카이파크의 경우 깊이 1.5m 정도의 매스콘크리트 부재에 적용함에 따라 수화열 측정 시험을 별도로 실시하였다. 표 1은 Plain과 EM 적용 콘크리트의 요구성능 및 시험인자를 나타낸 것이며, 표 2는 일반레미콘과 EM 적용 레미콘의 배합표를, 표 3은 굳지 않은 콘크리트 및 경화 콘크리트의 특성을 나타낸 것이다. 또한 굳지 않은 콘크리트 및 경화 콘크리트의 물성을 검토한 결과 슬럼프, 공기량의 경우 초기 콘크리트 요구성능으로 설정한 슬럼프 180±25mm, 공기

표 1. 콘크리트 요구성능 및 시험체 종류별 시험인자

구분	목표 슬럼프 (mm)	목표 공기량 (%)	결합재 혼합비(%)			시험사항
			OPC	FA	EM	
Plain	180±25	4.5±1.5	80	20	-	·슬럼프 ·공기량 ·수화열 ·압축강도 - 1, 2, 3일_12.5℃ - 3, 7, 28일_20℃
EM 20			60	20	20	

표 2. 콘크리트 배합표

구분	W/B (%)	S/a (%)	SP/C (%)	AE/C (%)	질량배합(kg/m³)							
					W	OPC	FA	EM	S	G	SP	AE
Plain	45	46	-	0.020	170	302	76	-	783	926	-	0.076
EM 20	45	46	-	0.020	170	227	76	76	781	923	-	0.076

OPC : 보통포틀랜드 시멘트 1종, FA : 플라이애시, EM : 에코멘트  
S(잔골재) : 세척사, 2.60g/cm³, G(굵은골재) : 25mm, 2.62g/cm³, SP제 : 준PC

표 3. 굳지 않은 콘크리트 및 경화 콘크리트의 특성

구분	슬럼프 (mm)	슬럼프 플로우 (mm)	공기량 (%)	압축강도(MPa)					
				12.5℃			20℃		
				1일	2일	3일	3일	7일	28일
Plain	195	290	4.0	3.49	11.0	15.9	19.6	28.3	40.3
EM 20	185	270	3.8	3.83	12.2	16.2	19.8	27.7	42.3

량 4.5±1.5를 만족하였고, 압축강도의 경우 저온 조건하 및 표준 조건에서는 Plain 대비 동등 이상을 확보하였다.

### 3.2. EM 현장 콘크리트 타설

에코멘트 현장 적용은 김포 스카이파크의 매스콘크리트 부재 및 골조 일부구간과 용인 신동백 APT 매스콘크리트 일부 구간에 대하여 레미콘 규격 25-27-150으로 타설을

실시하였다. 타설 시 결합재의 비율은 OPC : FA : EM = 60 : 20 : 20 로 하였다.

사진 1은 에코멘트를 적용한 레미콘의 김포 스카이파크 적용 모습이다. 현장 반입 레미콘의 품질 평가를 실시한 결과 소요 슬럼프 150mm을 만족하였으며, 공기량 4.1%을 충족하였으며, 경화 콘크리트의 28일 압축강도 측정결과 재령 1일 4.9MPa, 재령 3일 14.2MPa, 재령 28일 34.6MPa 을 나타내었다.

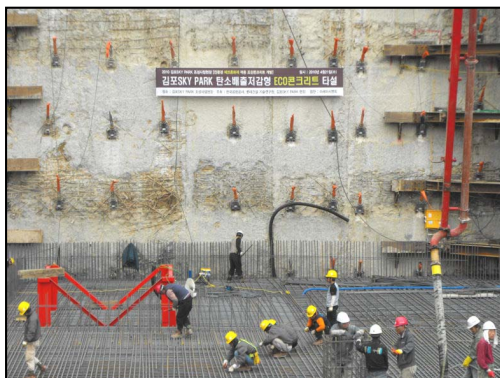


사진 1. 현장 적용 사진

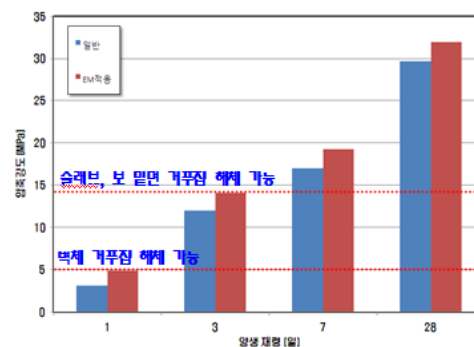


그림 7. EM 적용에 따른 강도 증진 효과 비교

현장 적용 결과 실내 실험 결과와 마찬가지로 EM 치환이 경시변화에 따른 슬럼프 로스 및 공기량 변동이 크게 발생하지 않았으며, 그 결과 현장 레미콘 타설이 약 60m의 배관을 통과하여 타설하는 구간임에도 불구하고 무리없이 타설할 수 있었다. 또한 재령 초기 압축강도는 그림 7과 같이 일반 콘크리트의 경우 재령 1일 3.09MPa, 28일 29.7MPa로 EM 적용시 일반 콘크리트 대비 약 38%, 10%의 강도 증진효과가 확인되었으며, 특히 재령 초기인 1일 강도 증진효과가 탁월하여 현장의 초기 거푸집 탈형 시기를 앞당겨 공사 기간 단축이 가능할 것으로 사료된다.

#### 4. EM 및 EM 적용 콘크리트의 이산화탄소 저감량 평가

EM의 친환경성 평가 수단으로 EM 생산에 따른 이산화탄소 발생량 저감을 일본토목학회<sup>6)</sup>의 콘크리트 배합에 사용되는 원재료의 이산화탄소 원단위를 근거로 평가하였다. 에코멘트의 경우 주성분이 고로슬래그이며, 부 결합재인 석회석 미분말과 조강성분을 위해 첨가되는 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>의 경

우 아직까지 이산화탄소 발생량에 대한 원단위가 산출되지 않아, 석회석 제조과정에서 발생한 미분말을 포함한 것으로 추가적인 이산화탄소 발생량이 미비한 점, 그 혼합량이 경미한 것을 고려하여 전체적인 EM의 경우 BS에 준한 것으로 가정하여 평가를 실시하였다.

표 4, 5는 강도별 일반레미콘 및 EM 적용 레미콘의 1m<sup>3</sup> 생산 시 발생하는 이산화탄소 발생량을 산정한 것으로 EM는 보통포틀랜드시멘트에 비하여 약 38%, EM를 사용한 콘크리트의 경우 약 8%의 저감효과가 있는 것으로 추정된다.

표 6은 김포 스카이파크 현장에 사용될 레미콘 강도별 물량이며, 이에 따른 일반레미콘 및 EM 적용 레미콘의 강도별 사용물량을 고려한 총 이산화탄소 배출량 및 저감효과를 산정한 것이다. 그 결과 EM 적용 시 약 3,800톤 정도의 이산화탄소가 저감될 것으로 추정된다.

#### 5. 결론

탄소배출저감형 에코혼화제로 산업부산물 활용을 통한 자원절감 및 다량의 이산화탄소를 발생하는 시멘트 대체

표 4. 일반 레미콘 강도별 1m<sup>3</sup> 생산 시 이산화탄소 배출량 산정

(단위 : kg)								
MPa	W/C	W	C	F/A	S	G	AE감수제	CO <sub>2</sub> 배출량 (kg-CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> )
27	48%	170	333	37	849	927	2.59	278
30	47%	170	352	39	823	935	2.74	293
35	46%	170	392	44	787	931	3.05	326
CO <sub>2</sub> 원 단위 (kg-CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> )	-	0.7466	0.6197	0.0037	0.0028	0.25		

표 5. EM 적용 레미콘 강도별 1m<sup>3</sup> 생산 시 이산화탄소 배출량 산정

(단위 : kg)									
MPa	W/C	W	C	F/A	EM	S	G	AE감수제	CO <sub>2</sub> 배출량 (kg-CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> )
27	48%	170	259	37	74	849	927	2.59	257
30	47%	170	273	39	78	823	935	2.74	270
35	46%	170	304	44	87	787	931	3.05	301
CO <sub>2</sub> 원 단위 (kg-CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> )	-	0.7466	0.6197	0.46	0.0037	0.0028	0.25		

표 6. 강도별 사용물량 및 이에 따른 이산화탄소 배출량 산정

(단위 : kg-CO <sub>2</sub> )					
		27MPa	30MPa	35MPa	전체 물량
콘크리트물량 (m <sup>3</sup> )		171,137	1,643	6,647	179,427
CO <sub>2</sub> 발생량 (kg-CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> )	일반	47,564,189	481,956	2,168,380	50,214,526
	EM 적용	43,934,655	443,998	1,997,678	46,376,331
저감효과		3,629,534	37,958	170,702	3,838,195

재 측면에서 고로슬래그 미분말 및 플라이애쉬의 국내의 현황을 살펴보았다.

국내에서의 혼화재 사용은 강도발현 저하의 문제로 시공사에서 그 사용량을 제한하고 있으며, 관공사에서도 감리의 승인하에서만 사용이 가능한 현실이다. 이런 가운데 에코 혼화재의 활용 증대를 통한 건설산업분야에서의 탄소배출 저감 방안은 에코혼화재를 사용하면서도 강도 발현이 기존의 보통포틀랜드시멘트만을 사용한 콘크리트 대비 동등이상 확보하는 것이 무엇보다 중요하겠으며, 실무자와 관계자들의 혼화재 사용에 대한 인식 개선이 필요하다. EM는 보통포틀랜드 시멘트와 비교하여 양생 재령에 상관없이 동등 이상의 강도 발현을 통하여 계절별 기후에 상관없이 현장 적용할 수 있으며, 경제성 측면에서도 보통포틀랜드시멘트보다 저렴하여 이점이 있다.

경제성과 친환경성을 바탕으로 최근 문제가 되고 있는 온실가스 저감을 위한 전 지구적인 노력과 국내 녹색성장 전략을 감안하였을 때, 본 기술은 향후 그 활용성 및 중요성이 점차 증가할 것으로 기대되며, 에코혼화재의 활용을 더욱 증대하기 위해서는 관련 업계의 지속적인 연구개발을 통하여 혼화재 사용시 조기강도 개선대책과 발주처의 혼화재 사용을 장려하기 위한 정부의 인센티브 제도와 같은 정책적 지원 확대 및 관계 법령의 개정, 현장 감리 및 시공사의 인식 개선 등 종합적이고 지속적인 노력이 요구된다.

## 참고문헌

- 1) J.T.Houghton, Climate Change 2001 ; The Scientific Basis, Report, the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2001, pp.2~7.
- 2) Concrete International, February, 2010, pp.45~48.
- 3) 유럽 시멘트 산업의 대응방향, 한국양회공업협회, 2007.
- 4) 최상원, 국내·외 철강 슬래그의 발생, 재활용 현황 및 친환경적 이용에 대한 연구 동향, 2006.
- 5) Concrete International, September, 2006, pp.42~45.
- 6) 日本土木学会, コンクリート構造物の 環境性能照査指針(試案), 2005, pp.69.