

## 국가 LCI 데이터베이스 기반 알칼리활성 콘크리트의 CO<sub>2</sub> 평가

CO<sub>2</sub> Assessment of Alkali-Activated Concrete Based on Korean LCI Database



양근혁\*  
Keun-Hyeok Yang



송진규\*\*  
Jin-Kyu Song



최동옥\*\*\*  
Dong-Ok Choi

### 1. 서론

보통포틀랜드 시멘트(ordinary portland cement, OPC)의 탄소배출계수는 전세계 평균값으로써 0.815톤-CO<sub>2</sub>/톤<sup>1)</sup>으로 평가되고 있다. 반면 콘크리트의 혼화재로 주로 이용되는 고로슬래그(ground granulated blast-furnace slag; 이하 GGBS) 및 플라이 애쉬(fly ash; 이하 FA)는 소성과정을 거친 산업부산물로써 원자재 생산에서 화학적 반응에 의한 CO<sub>2</sub> 배출량은 없으며 및 분말화 공정 및 포집과정에서 소요되는 에너지에 의한 CO<sub>2</sub> 양은 매우 낮다<sup>1)</sup>. 이에 따라 높은 탄소배출계수를 갖는 OPC를 대체하기 위하여 GGBS 또는 FA 등에 알칼리속이온을 활성화제로 이용하여 수화반응을 유도하는 알칼리활성(Alkali-Activated, AA) 결합재(지오폴리머 결합재도 알칼리활성 반응을 기반으로 하므로 본 고에서는 AA 결합재로 통일한다)에 대한 관심이 1990년대 후반부터 급격히 증가하고 있다.

알칼리활성 콘크리트의 가장 큰 장점은 OPC 콘크리트에 비해 현저히 낮은 CO<sub>2</sub> 배출량임이 일반적으로 지적되고 있다<sup>2)</sup>. 하지만 AA 콘크리트에서 저감된 CO<sub>2</sub> 배출량에 대한 정량적 평가 자료는 매우 미미하다. AA 콘크리트의 압축강도 및 내구성은 사용 활성화제의 종류와 농도에 의해 중요한 영향을 받으며, 주성분이 알루미늄과 실리카 성분인 플라이 애쉬 또는 메타카올린(metakaolin, MK) 등은 안정적인 반응유도를 위해 60°C 이상의 고온양생을 필요로 한다<sup>3)</sup>. 따라서 OPC 콘크리트에 대한 AA 콘크리트의 CO<sub>2</sub> 배출 저감량은 목표 강도에 따라 결정되는 활성화제의 종류와 양 그리고 양생조건 등을 고려하여 평가되어야만 한다.

본 고에서는 AA 콘크리트의 압축강도와 사용 원재료(source material)에 따라 AA 콘크리트의 CO<sub>2</sub> 저감량을 각

재료들의 생애주기 원단위(life-cycle inventory; LCI) 데이터를 이용하여 평가하였다. AA 콘크리트의 타설 방법은 OPC 콘크리트와 동일하다고 가정하였으므로 각 구성 재료들의 운송, 콘크리트 배합 및 양생과 현장까지의 운송단계까지만 고려하여 CO<sub>2</sub> 배출량을 비교하였다. 원재료로써 플라이 애쉬 또는 메타카올린을 사용한 AA 콘크리트는 고온양생이 반드시 수반되어야 하므로 이들은 프리캐스트 제품으로 현장까지 운송된다고 가정하였다. 또한 국내 실용사례<sup>4)</sup>를 참조로 콘크리트 2차 제품들에서 AA 결합재 사용에 따른 CO<sub>2</sub> 저감량을 제시하였다.

### 2. AA 콘크리트의 CO<sub>2</sub> 절감량

#### 2.1 LCI 데이터<sup>5)</sup>

각 나라들은 자국의 데이터 수집을 통하여 건설재료들의 LCI 데이터베이스를 구축하고 있다. 우리나라의 경우 국토해양부, 환경부와 지식경제부에서 물질 및 부품제조, 가공공정, 수송, 사용 및 폐기활동 등에 대하여 약 400여 개의 LCI 데이터베이스를 구축하고 있다. 본 고에서 제시하는 AA 콘크리트의 CO<sub>2</sub> 절감량에 대한 평가는 국내의 LCI 데이터베이스를 기초로 하였다. 비록 LCI 데이터는 기온, 에너지원 및 천연자원의 차이에 따라 각 나라에 따라 상이하지만 아직 데이터가 구축되지 않은 재료에 대해서는 JSCE<sup>6)</sup>의 자료를 이용하였다. 결합재로서 FA 및 MK를 이용한 AA 콘크리트의 양생 시 CO<sub>2</sub> 배출계수는 사용 에너지, 소요온도와 지속 시간 등에 따라 변하는데 이에 대한 적절한 데이터를 얻기 힘들기 때문에 JSCE에서 제시하는 증기양생의 배출계수를 따랐다.

#### 2.2 콘크리트의 CO<sub>2</sub> 평가 절차 및 산정 예

콘크리트의 CO<sub>2</sub> 평가에 포함되는 범위는 각 재료, 운송, 제조, 양생 및 현장까지의 운반과정에 직접적으로 관여되는 대상으로

\* 정희원, 경기대학교 건축공학과 부교수  
yangkh@kyonggi.ac.kr

\*\* 정희원, 전남대학교 건축공학과 교수

\*\*\* 정희원, 한경대학교 건축공학과 교수

한정하였다. 이들 범위를 고려한 콘크리트의 CO<sub>2</sub> 평가절차를 요약<sup>8,9)</sup>하면 다음과 같다.

- 1) 콘크리트 목표 강도와 결합재에 따른 전형적인 배합상세에 대한 자료를 수집한다.
- 2) 각 구성재료 및 이들의 레미콘 공장까지의 운송수단에 따른 CO<sub>2</sub> 배출계수를 LCI 데이터베이스로부터 결정한다. 이때 운송거리는 서울을 중심으로 가능한 최대거리를 가정한다.
- 3) 각 재료의 생산 및 운송에 대한 CO<sub>2</sub> 배출계수의 기능단위를 고려하여 콘크리트 생산단계(배합 및 양생포함) 및 운송단계에서의 CO<sub>2</sub> 양(완성제품의 수송 포함)을 산정한다.
- 4) 결합재로서 FA 및 MK를 이용한 AA 콘크리트는 고온양생을 고려한 CO<sub>2</sub> 배출량을 산정하며, 운송 시 레미콘 차량이 아닌 프리캐스트 제품으로 운송됨을 가정한다.

콘크리트 설계 강도가 24, 40 및 70 MPa일 때의 사용 결합재에 따른 전형적인 배합 및 양생상세를 <표 1>에 나타내었다. AA 메타카올린 콘크리트의 경우 유용한 실험결과와 부재로 압축강도 24 MPa로 나타내었다. 혼화제로써 GGBS와 FA가 첨가된 OPC 콘크리트는 S레미콘사에서 적용하고 있는 전형적인 배합표이다. <표 1>에 나타낸 콘크리트 압축강도가 40 MPa일 때 재료들의 배합과 운송 그리고 콘크리트의 양생을 고려한 CO<sub>2</sub> 평가절차의 예를 <표 2, 3>에 나타내었다. GGBS와 FA가 첨가된 OPC 콘크리트 배합에서 콘크리트 1 m<sup>3</sup> 생산단계의 CO<sub>2</sub> 배출량은 371.6 kg이며, 콘크리트 생산을 위한 각 재료의

운송 및 결과물인 콘크리트 운송과정에서 배출되는 CO<sub>2</sub> 양은 136.3 kg으로 평가될 수 있었다. 반면 AA FA 콘크리트의 생산단계에서 배출되는 CO<sub>2</sub> 양은 128 kg으로써 혼화재가 치환된 OPC 콘크리트에 비해 약 65%가 절감된 양이다. 하지만 운반과 양생을 고려하였을 때 AA FA 콘크리트의 CO<sub>2</sub> 배출량은 OPC 콘크리트에 비해 57% 절감되는데, 이 값은 양생으로부터 배출되는 CO<sub>2</sub> 양을 매우 보수적으로 평가한 것이다. 만일 국내의 증기양생을 위해 사용하는 B-C유 및 기타조건을 고려하면 양생으로부터 배출되는 CO<sub>2</sub> 양은 약 100 kg/m<sup>3</sup>에 달할 수 있으며, 이를 고려하면 OPC 콘크리트에 대한 AA FA 콘크리트의 CO<sub>2</sub> 배출 저감량은 단지 38%이다. 또한 활성화제로써 NaOH(1.232 kg-CO<sub>2</sub>/kg) 대신 Ca(OH)<sub>2</sub> (0.517 kg-CO<sub>2</sub>/kg)를 사용하면 생산단계에서 AA FA 콘크리트의 생산단계에서 배출되는 CO<sub>2</sub> 양은 74.4 kg으로써 현저히 감소한다. 이와 같이 AA FA 콘크리트의 CO<sub>2</sub> 배출량은 사용 활성화제와 양생방법에 의해 매우 중요한 영향을 받는다.

### 2.3 결합재 종류에 따른 콘크리트의 CO<sub>2</sub> 배출량 비교

<표 1>에 나타낸 각 콘크리트에서 재료, 제조, 운반 및 양생을 고려하여 국가 LCI 데이터베이스에 기반한 CO<sub>2</sub> 배출량의 비교를 <그림 1>에 나타내었다. OPC에 기반한 콘크리트는 결합재에서 배출되는 CO<sub>2</sub> 양이 전체 CO<sub>2</sub> 배출량의 50% 이상을 차지하며, 재료 및 완성제품의 운반으로 배출되는 CO<sub>2</sub> 배출량은 전체의 30% 정도이었다. 골재에서 재료에 의한 CO<sub>2</sub> 배출량은 매우 낮지만, 수송에 의한 CO<sub>2</sub> 양은 약 90 kg으로써 상당

표 1. 결합재 종류 및 설계 압축강도에 따른 콘크리트 배합상세

Cementitious material	f <sub>ck</sub> (MPa)	Unit weight(kg/m <sup>3</sup> )								W/B	Activator(kg/m <sup>3</sup> )			Curing			
		OPC	FA	GGBS	MK	Fine aggregate <sup>2)</sup>	Coarse aggregate <sup>2)</sup>	Water	Admixture <sup>3)</sup>		Ca(OH) <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	NaOH <sup>4)</sup>				
OPC	24	280	-	-	-	767	1,214	168	-	0.6	-	-	-	Air-drying			
	40	479	-	-	-	572	1,106	191	0.5	0.4							
	70	540	-	-	-	666	991	172.8	5.4	0.32							
OPC+SCM <sup>1)</sup>	24	291	51	-	-	829	930	178	1.7	-							
	40	361	23	68	-	805	918	163	3.1	-							
	70	435	56	210	-	670	822	163	5.25	-							
AA GGBS	24	-	-	540	-	700	849	185	5.06	0.3					46.2	6.2	-
	40	-	-	648	-	619	814	185	9.62	0.25					55.5	7.4	-
	70	-	-	677	-	572	752	185	12.6	0.22					63.1	100	-
AA FA	24	-	400	-	-	781	1035	62.4	-	0.13	-	-	58	Heating: 85°C/24h			
	40	-	469	-	-	623	935	112	-	0.2	-	-	75				
	70	-	630	-	-	551	731	115	-	0.15	-	-	106				
AA MK	24	-	-	-	411.1	759	998	185	-	0.20	-	-	62				

1) : 혼화제(supplementary cementitious material)가 OPC에 첨가된 결합재임.  
 2) : 잔골재와 조골재는 각각 바다모래와 쇄석을 사용을 가정하였음.  
 3) : Admixture는 폴리카르복산계 고성능 감수제임.  
 4) : 농도 10 ~ 12 mol의 수산화나트륨 수용액을 분말의 수산화나트륨으로 환산하였음.

히 높은 점유율을 보였다. OPC 기반 콘크리트에서 감수제의 CO<sub>2</sub> 배출량은 전체의 0.2% 이하였다<표 3>. 한편, AA 콘크리트의 경우 알칼리활성화제를 포함하는 결합재의 CO<sub>2</sub>량은 OPC에 비해 현저히 낮지만 생산단계에서의 CO<sub>2</sub> 배출량은 사용 활성화제에 중요하게 영향을 받았다. 일반적으로 콘크리트의

CO<sub>2</sub> 배출량은 결합재 종류에 관계없이 압축강도 증가와 함께 증가하였다. 콘크리트 압축강도가 24 MPa에서 70 MPa로 증가할 때 CO<sub>2</sub> 배출량의 증가는 ① OPC 콘크리트의 경우 227 kg으로써 이는 약 1.5배 증가한 값이며, ② 혼화제가 치환된 OPC 콘크리트의 경우 89.9 kg으로써 이는 약 1.63배 증가한 값이며,

③ AA GGBS의 경우 128 kg으로써 이는 약 1.6배 증가한 값이다. 한편, AA FA의 경우 압축강도가 24 MPa에서 70 MPa로 증가할 때, CO<sub>2</sub> 배출량은 단지 약 10 kg 증가하는데 이는 골재량이 현저히 줄어들었기 때문이다. 즉, AA FA 콘크리트는 전체 CO<sub>2</sub> 배출량에 대해 활성화제의 종류 및 양생과 함께 골재의 운반에 의한 CO<sub>2</sub> 배출량이 중요하게 기여하고 있음을 알 수 있다.

동일 압축강도를 갖는 콘크리트의 CO<sub>2</sub> 배출량을 OPC 결합재를 사용한 콘크리트의 CO<sub>2</sub> 배출량으로 무차원한 값들을 <그림 2>에 나타내었다. 혼화제가 치환된 OPC 콘크리트는 콘크리트 압축강도가 40 MPa 이상일 때 OPC 콘크리트에 비해 약 20%의 CO<sub>2</sub> 저감율을 보였다. AA GGBS 콘크리트의 CO<sub>2</sub>는 OPC 콘크리트에 비해 콘크리트 압축강도가 24 MPa와 70 MPa일 때 약 55%, 압축강도가 40 MPa일 때 약 70% 감소되었다. AA FA 콘크리트의 CO<sub>2</sub>는 OPC 콘크리트에 비해 콘크리트 압축강도가 40 MPa 이하일 때 약 60% 감소되었다. OPC 콘크리트에 대한 AA 콘크리트의 CO<sub>2</sub> 저감률은 소요 압축강도에 대해 사용 활성화제 및 양생방법에 의해 다소 변동이 있지만 일반적으로 50 ~ 70% 범위에 있다고 판단된다.

표 2. OPC+SCM 결합재를 이용한 콘크리트의 CO<sub>2</sub> 평가 절차( $f_{ck} = 40$  MPa)

Functional Unit(FU) : m <sup>3</sup>	Production			Transportation		
	A	B	A · B	D <sup>3)</sup>	E	A · D · E
Item	$\frac{kg}{FU}$	$\frac{CO_2 - kg}{kg}$	$\frac{CO_2 - kg}{FU}$	km	$\frac{CO_2 - kg}{kg \cdot km}$	$\frac{CO_2 - kg}{FU}$
OPC <sup>1)</sup>	361	0.944	340.8	100	$3.37 \cdot 10^{-6}$	0.122
GGBS <sup>1)</sup>	68	0.0265 <sup>4)</sup>	1.802	300	$3.37 \cdot 10^{-6}$	0.069
FA <sup>1)</sup>	23	0.0196 <sup>4)</sup>	0.451	200	$3.37 \cdot 10^{-6}$	0.015
Sand	805	0.0026 <sup>5)</sup>	2.093	50	$1.03 \cdot 10^{-3}$	41.458
Coarse	918	0.0075 <sup>5)</sup>	6.885	50	$1.03 \cdot 10^{-3}$	47.277
Water <sup>2)</sup>	163	0.000196	0.032	-	-	-
Admixture	3.1	0.25 <sup>4)</sup>	0.775	50	$2.21 \cdot 10^{-4}$	0.034
Concrete	2341	0.008 <sup>4)</sup>	18.7	30	$6.74 \cdot 10^{-4}$	47.337
		Sum	371.6		Sum	136.31
Normal curing						
Total = 507.9 CO <sub>2</sub> -kg/FU						

- 1) 결합재로 이용되는 시멘트계 재료들은 모두 벌크로 운송됨을 가정.
- 2) 물은 한강수를 기준으로 함.
- 3) 각 재료의 운반거리는 국내의 원산지에서 레미콘 공장까지 가장 먼 거리로 추정함.
- 4) JSCE의 LCI DB를 이용함.
- 5) 골재의 기능단위인 m<sup>3</sup>를 단위용적중량으로 나누어 kg으로 환산하였으며, 운반은 15톤 덤프트럭에 의함.

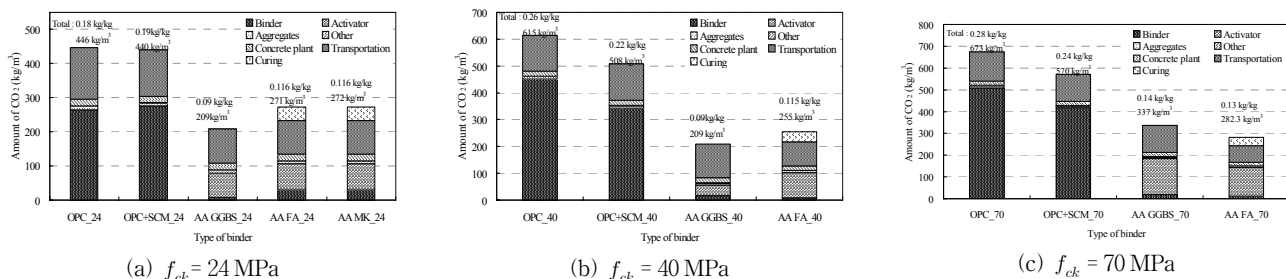
표 3. AA FA 콘크리트의 CO<sub>2</sub> 평가 절차( $f_{ck} = 40$  MPa)

Functional Unit(FU) : m <sup>3</sup>	Production			Transportation		
	A	B	A · B	D	E	A · D · E
Item	$\frac{kg}{FU}$	$\frac{CO_2 - kg}{kg}$	$\frac{CO_2 - kg}{FU}$	km	$\frac{CO_2 - kg}{kg \cdot km}$	$\frac{CO_2 - kg}{FU}$
FA	469	0.0196	9.192	200	$3.37 \cdot 10^{-6}$	0.316
Sand	623	0.0026	1.62	50	$1.03 \cdot 10^{-3}$	32.08
Coarse	935	0.0075	7.01	50	$1.03 \cdot 10^{-3}$	48.15
Water	112	0.000196	0.0219	-	-	-
NaOH	75	1.232	92.4	30	$2.21 \cdot 10^{-4}$	4.97
Concrete	2214	0.008	17.71	30 <sup>2)</sup>	$5.18 \cdot 10^{-5}$	3.44
		Sum	127.99		Sum	88.97
Heating curing <sup>1)</sup>						
Steam curing(85°C/24h) : 38.5 CO <sub>2</sub> -kg/m <sup>3</sup>						
Total = 216.96 CO <sub>2</sub> -kg/FU						

- 1) 양생에 대한 CO<sub>2</sub> 계수는 JSCE의 값을 이용하였지만, 양생시간 등에 대한 정확한 정보가 없어서 기능함수를 1일로 가정함.
- 2) 18 ~ 23톤 트럭을 이용한 프리캐스트 제품의 운송을 고려함.

### 2.4 콘크리트 2차 제품에서 CO<sub>2</sub> 배출량 비교

슬래그 시멘트 및 AA GGBS를 주 결합재로 이용한 경우 콘크리트 2차 제품들에서 CO<sub>2</sub> 배출



주1) 활성화제인 NaOH, Ca(OH)<sub>2</sub> 및 Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>의 CO<sub>2</sub> 배출계수는 각각 1.232, 1.32 및 0.517 kg-CO<sub>2</sub>/kg이며, 이들은 1.25톤 트럭으로 운반됨을 가정.

그림 1. 결합재 종류에 따른 콘크리트 CO<sub>2</sub> 양의 비교

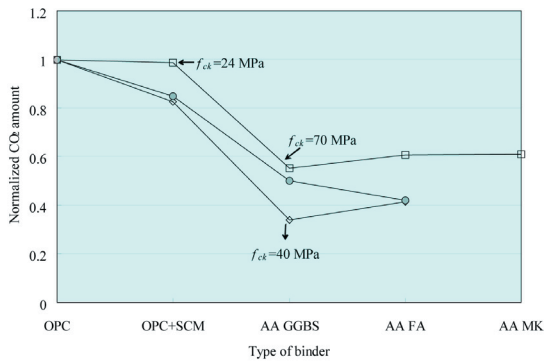


그림 2. OPC 콘크리트에 대한 각 콘크리트의 CO<sub>2</sub> 저감률

양을 <그림 3>에 나타내었다. 슬래그 시멘트를 사용한 콘크리트 2차 제품들의 배합상세는 공장에서 이용되는 것을 이용하였으며, AA GGBS를 결합재로 이용한 2차 제품들의 배합은 KS 기준의 요구 성능을 만족하면서 경제성을 확보할 수 있도록 계획된 것이다<sup>4)</sup>. <그림 3>에 나타낸 콘크리트 2차 제품들의 CO<sub>2</sub> 배출량은 재료, 재료운반과 배합을 포함하는 생산 및 양생 단계까지만을 고려한 것이다. 콘크리트 벽돌의 배합은 골재와 결합재의 비가 약 10:1이므로 결합재보다는 골재의 운반에 의한 CO<sub>2</sub> 배출량이 가장 많았다. 따라서 AA GGBS 벽돌의 CO<sub>2</sub> 배출량은 슬래그 시멘트 벽돌에 비해 단지 15 kg 감소되었다. 한편, 도로 경계석의 경우 골재와 결합재의 비가 약 3.5:1로써 결합재가 차지하는 비율이 벽돌에 비해 상대적으로 높다. 이로 인해 AA GGBS 도로경계석의 CO<sub>2</sub> 배출량은 슬래그 시멘트 경계석에 비해 64 kg이 낮으며, 이는 약 20% 저감된 값이다. 알칼리활성화제를 이용한 콘크리트 2차 제품에서 CO<sub>2</sub> 배출 저감량은 KS 기준에서 요구하는 성능에 따라 결정되는 배합설계에 의해 중요한 영향을 받는다. 따라서 콘크리트 2차 제품의 배합설계는 사용결합재와 함께 CO<sub>2</sub> 저감을 위한 방안이 함께 고려될 필요가 있다.

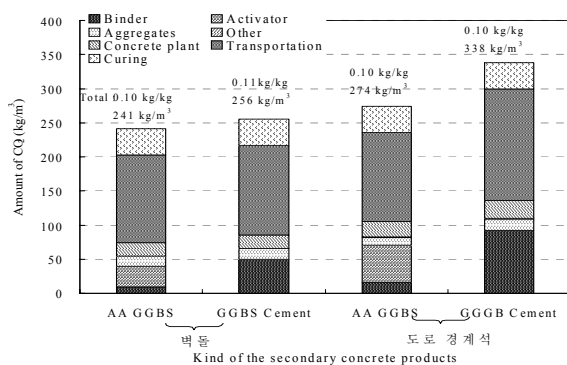


그림 3. 콘크리트 2차 제품에서 CO<sub>2</sub> 평가 예

### 3. 결론

본 고에서는 국가 LCI 데이터베이스에 기반하여 OPC 콘크리트에 대한 AA 콘크리트의 CO<sub>2</sub> 저감률을 평가하였다. OPC 콘크리트에 대한 AA 콘크리트의 CO<sub>2</sub> 저감율은 소요 압축강도에 대해 사용 활성화제 및 양생방법에 의해 다소 변동이 있지만 일반적으로 50 ~ 70% 범위에 있었다. 특히 플라이 애쉬 또는 메타카올린을 원재료로 사용한 AA 콘크리트의 경우 양생에 의한 CO<sub>2</sub> 배출량이 중요하므로 양생온도와 양생실의 면적에 따른 에너지원과 에너지소비량이 정확하게 측정될 필요가 있었다. 한편, AA 콘크리트 2차 제품의 CO<sub>2</sub> 배출 저감량은 KS 기준에서 요구하는 성능에 따라 결정되는 배합설계에 의해 중요한 영향을 받으므로 결합재와 골재의 비의 결정에 있어서 CO<sub>2</sub> 배출량이 함께 고려될 필요가 있다. □

### 참고문헌

- Gartner, E., "Industrially Interesting Approaches to 'Low-CO<sub>2</sub>' Cements", *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, No. 9, 2004, pp. 1,489 ~ 1,498.
- Duxson, P., Provis, J. L., Lukey, G. C., van Deventer, J. S. J., "The Role of Inorganic Polymer Technology in the Development of 'Green Concrete'", *Cement and Concrete Research*, Vol. 37, 2007, pp. 1,590 ~ 1,597.
- Duxson, P., Fernández-Jiménez, Provis, J. L., Lukey, G. C., Palomo, A., and van Deventer, J. S. J., "Geopolymer Technology: The Current State of the Art", *Journal of Material Science*, Vol. 42, 2007, pp. 2,917 ~ 2,933.
- 양근혁, 송진규, '고로슬래그 기반 지오폴리머 콘크리트의 구조적 특성 및 실용화 사례', *전산구조공학*, Vol. 24, No. 1, 2011, pp. 26 ~ 30.
- 한국환경산업기술원, 국가 LCI 데이터베이스 정보망, <http://www.edp.or.kr>.
- Sakai, K., and Kawai, K., "JSCE Guidelines for Concrete No. 7; Recommendation of Environmental Performance Verification for Concrete Structures", JSCE, 2006.
- Davidovits, J., *Geopolymer: Chemistry and Applications*, Institut Geopolymere, France, 2008.
- 김태형, 태성호, '콘크리트 생산에 의한 CO<sub>2</sub> 배출량 평가 시스템 개발에 관한 연구', *콘크리트학회논문집*, Vol. 22, No. 6, 2010, pp. 787 ~ 796.
- Clavind, M., Sakai, K., Oberg, M., and Muller, Christophe, *Guideline for Green Concrete Structures*, Fib TG 3.8, 2011.

담당 편집위원 :  
이한승(한양대학교) [ercleehs@hanyang.ac.kr](mailto:ercleehs@hanyang.ac.kr)