



고로슬래그가 콘크리트의 전 과정 환경영향에 미치는 효과

양근혁^{1)*} · 서은아²⁾ · 정연백²⁾ · 태성호³⁾

¹⁾경기대학교 플랜트·건축공학과 ²⁾경기대학교 건축공학과 ³⁾한양대학교 건축학부

Effect of Ground Granulated Blast-Furnace Slag on Life-Cycle Environmental Impact of Concrete

Keun-Hyeok Yang,^{1)*} Eun-A Seo,²⁾ Yeon-Back Jung,²⁾ and Sung-Ho Tae³⁾

¹⁾Dept. of Plant-Architectural Engineering, Kyonggi University, Suwon 443-760, Korea

²⁾Dept. of Architectural Engineering, Kyonggi University Graduate School, Seoul 120-702, Korea

³⁾School of Architecture & Architectural Engineering, Hanyang University, Ansan 426-791, Korea

ABSTRACT To quantitatively evaluate the influence of ground granulated blast-furnace slag (GGBS) as a supplementary cementitious material on the life-cycle environmental impact of concrete, a comprehensive database including 3395 laboratory mixes and 1263 plant mixes was analyzed. The life-cycle assessment studied for the environmental impact of concrete can be summarized as follows: 1) the system boundary considered was from cradle to pre-construction; 2) Korea life-cycle inventories were primarily used to assess the environmental loads in each phase of materials, transportation and production of concrete; and 3) the environmental loads were quantitatively converted into environmental impact indicators through categorization, characterization, normalization and weighting process. The life-cycle environmental impacts of concrete could be classified into three categories including global warming, photochemical oxidant creation and abiotic resource depletion. Furthermore, these environmental impacts of concrete was significantly governed by the unit content of ordinary portland cement (OPC) and decreased with the increase of the replacement level of GGBS. As a result, simple equations to assess the environmental impact indicators could be formulated as a function of the unit content of binder and replacement level of GGBS.

Keywords : environmental impact, slag, unit content of binder, global warming

1. 서 론

구조물의 설계에 환경성능을 고려해야 하는 새로운 개념의 확산과 함께 건설방향도 가격, 품질 및 공사기간을 중요시하는 전통방식에서 환경영향, 문화·사회적 측면 및 경제제약을 우선하는 지속가능 방향으로 급변하고 있다.¹⁻³⁾ 이에 따라 콘크리트 및 콘크리트 구조물에서도 설계, 생산, 시공, 사용, 해체, 폐기 및 재활용에 이르는 전 과정 또는 각각의 단계에서 환경영향을 최소화하기 위한 설계기준⁴⁾ 및 시공가이드라인⁵⁾들의 개발을 위한 노력과 투자가 심화되고 있다. 하지만 콘크리트 산업분야에서의 환경영향을 정량적으로 평가하는 연구는 초보단계로서, 지속가능 콘크리트 산업체제로 전환하기 위한 정척수립

및 기술지원을 위한 객관적인 자료도 아직까지 매우 미흡한 상태이다.⁶⁾

한편, 콘크리트의 중요 구성재료인 보통 포틀랜드 시멘트(ordinary portland cement, OPC)는 공학적으로 매우 우수한 건설재료임에도 불구하고 전 세계적인 “지속가능 건설”이라는 기치아래 그 사용량을 줄여야 한다는 공감대가 점진적으로 형성되고 있다. 일반적으로 알려져 있는 OPC의 환경영향으로는 막대한 CO₂ 배출량(우리나라 경우 전체 CO₂ 배출량의 약 6.5%에 해당⁷⁾), 소성과정에서의 에너지고갈 및 석회석 사용에 따른 천연자원 고갈, 그리고 대기배출물인 질소산화물과 탄화수소물에 의한 광화학 산화생성물 등을 들 수 있다. 이에 따라 콘크리트 산업에서는 OPC를 대체 또는 치환하기 위한 다양한 기술 및 연구²⁾들이 제시되고 있다.

철강 산업의 주요 부산물인 고로슬래그(ground granulated blast-furnace slag, GGBS)는 잠재 수경성을 갖고 있기 때문에 주로 시멘트 원재료 또는 콘크리트용 혼화재로 널리 재활용되고 있다. 2008년도 국내 GGBS의 발생량은

*Corresponding author E-mail : yangkh@kyonggi.ac.kr

Received May 23, 2013, Revised August 18, 2013,

Accepted September 3, 2013

©2014 by Korea Concrete Institute

약 10228천톤이며, 이중 약 69.4%인 7098천톤이 시멘트 혼화제로 이용되었다.⁸⁾ 2010년까지 연간 5% 내외의 증가율을 나타내는 GGBS는 현대제철 당진공장에서의 고로 2호기 추가와 광양 제철소에서의 고로확장 예정으로 2013년도에는 2009년 대비 약 30% 증가가 예상되고 있다. 시멘트계 재료로서 GGBS의 활용전망은 그 발생량의 증가 및 잠재적 환경영향을 고려하면 매우 밝다고 인식되고 있다. 하지만 콘크리트 혼화제로서 GGBS를 이용할 경우 CO₂ 저감 및 천연자원 보존에 효과적이라는 인식은 다소 정성적이며, 정량적 데이터는 매우 부족한 실정이다.

이 연구의 목적은 콘크리트 배합에서 GGBS가 혼화제로서 OPC를 치환하여 사용될 경우 환경영향에 미치는 효과를 정량적으로 평가하는 것이다. 콘크리트의 환경영향 평가는 ISO 14040 시리즈⁹⁾에서 제시하는 전과정 평가 프로세스를 기반으로 하였으며, 환경영향 평가지표는 환경부¹⁰⁾에서 제시한 “한국형 환경영향평가지수 방법론”에 근거하였다. 콘크리트 배합에 대한 데이터베이스(3395개의 실험실 배합 및 1263개의 레미콘 배합)를 바탕으로 콘크리트 전과정 환경영향(주요 범주인 지구 온난화, 광화학 산화물생성 및 무생물 자원고갈)의 크기를 정량적으로 산정할 수 있는 평가 모델을 제시하였다. 또한 콘크리트 배합에서 이들 환경영향의 목표 감소율에 대해 GGBS의 치환율을 결정할 수 있는 설계용 차트를 제시하였다.

2. 콘크리트의 전과정 환경영향 평가 절차

2.1 목적 및 범위 설정

이 전과정 평가(life-cycle assessment, LCA)의 목적은 콘크리트의 배합조건 및 압축강도에 따른 환경영향 크기를 평가하고, 혼화제로서 GGBS가 그 환경영향 크기에

미치는 효과를 정량화하는 것이다. 콘크리트의 기능단위는 1 m³이며, 시스템 경계는 콘크리트 구성요소들인 원재료들의 채취(요람)에서부터 현장에서의 타설 직전까지 단계¹¹⁾로서 구성재료, 운반, 콘크리트 생산 등으로부터의 대기 배출물, 수계 배출물, 고형 배출물 등을 고려하였다. 시스템 경계를 고려한 콘크리트 공정 흐름도는 Fig. 1과 같이 정의될 수 있다. 콘크리트 배합에 대한 데이터 품질로서 시간적 경계는 1990년~2012년이며, 지역적 경계는 서울 중심의 한국이며, 기술적 경계는 실내실험 및 표준기 레미콘 공장의 배합자료이다. 여기서 표준기란 3~5월과 9~10월이며, 실내실험은 대학교 또는 각 연구실에서 실시한 콘크리트 배합을 뜻한다. 콘크리트 생산 공정기술의 경계는 표준기의 레미콘 생산공정을 적용하였다. 운반단계에서의 환경영향을 산정하기 위하여 레미콘 공장의 위치는 서울 방배동으로 가정하였다. 시멘트는 전남담양, 굽은골재와 잔골재는 각각 경기도 광주와 인천, GGBS는 전남 광양, 혼화제는 평택에서 운송됨을 가정하

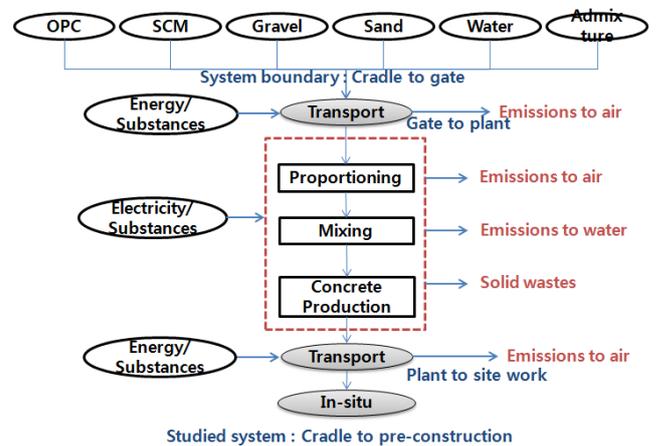


Fig. 1 Process flow diagram of concrete in studied system

Table 1 Summary of LCI DB used for assessing environmental loads of concrete

Item	Functional unit (FU)	Inventory for each environmental load (kg/FU)								
		CO ₂	CO	SO _x	NO _x	NH ₃	Anthracite coal	Bituminous coal	Natural gas	Crude oil
OPC	kg	9.31E-01	8.90E-02	5.64E-04	1.03E-03	4.36E-07	7.44E-03	1.80E-01	7.99E-03	2.42E-02
GGBS cement	kg	2.05E-01	1.64E-02	1.92E-04	5.13E-04	1.26E-07	1.37E-03	3.31E-02	2.43E-03	6.31E-03
GGBS ⁽¹⁾	kg	2.65E-02	-	8.36E-06	1.02E-06	-	-	-	-	-
Natural sand	m ³	2.34E-03	4.19E-06	9.49E-06	1.52E-05	3.83E-08	-	-	-	-
Gravel	m ³	3.23E-03	4.52E-06	1.49E-05	1.64E-05	5.15E-08	-	-	-	-
8.1-15 ton truck	kg/km	6.30E-05	1.60E-13	2.77E-08	8.63E-07	9.20E-12	1.18E-07	5.99E-08	9.26E-07	2.11E-05
23.1-25 ton truck	kg/km	5.18E-05	5.32E-07	2.12E-08	5.69E-07	7.26E-12	9.29E-08	4.73E-08	7.31E-07	1.67E-05
Facilities at ready-mixed concrete plant	kg	7.68E-03	-	3.42E-06	6.51E-05	-	-	-	-	-
Mixer (2.5 m ³) ⁽¹⁾	m ³	6.10E-04	-	1.95E-07	2.40E-07	-	-	-	-	-
Transit-mixer truck ⁽¹⁾	m ³ /km	6.60E-01	2.13E-03	4.30E-08	7.87E-03	1.06E-08	-	-	-	-

⁽¹⁾ LCI data given in JSCE are referenced wherever Korean LCI database is unavailable.

였다. 물은 상수도를 통해 조달되므로 운송에서의 투입과 배출물은 무시하였다. 콘크리트 구성재료들의 운송에서, OPC 및 GGBS와 같은 시멘트계 재료들은 23 톤 용량의 벌크차를, 골재는 15톤 트럭을, 감수제와 같은 혼화제는 1.5톤 트럭을 적용하였다. 생산된 콘크리트는 6 m³ 용량의 레미콘 트럭에 의해 현장까지 운반되며 운반거리는 운반시간 1시간 이내를 고려하여 30 km로 가정하였다.

2.2 전과정 목록(life-cycle inventory, LCI) 분석

전과정 목록분석 과정은 연구범위에서 설정한 시스템을 대상으로 에너지, 원료, 제품, 부산물 등의 투입(input) 요소와 환경오염물 등의 종류와 양의 배출(output)요소를 기록하여 목록화하는 과정이다. 따라서 Fig. 1에 나타낸

시스템에서의 콘크리트 각 구성재료, 이들 재료의 생산지 출구에서 레미콘 공장까지의 운반, 이들 재료의 계량 및 배합, 생산된 콘크리트의 현장까지 운반 등의 세부적인 재료, 운반, 공정에 대한 각각의 LCI 데이터들이 필요하다. Fig. 1에 나타낸 공정에서 이용된 LCI 데이터베이스(DB)를 Table 1에 요약하였다. 이 전과정 평가의 지역적 경계는 한국이므로 각 재료 및 운반에 대한 LCI는 기본적으로 국내 환경부에서 제공하는 데이터¹²⁾를 이용하였다. LCI 데이터는 기온, 에너지원 및 천연자원의 차이에 따라 각 나라마다 상이하므로, 자국에서 제공되는 원단위를 이용하는 것이 가장 바람직하다. 하지만 국내의 LCI DB는 건설자재에 대해 아직 그 수가 충분치 않기 때문에 GGBS 및 레미콘 플랜트 등에 대해서는 일본토목학회에서¹³⁾ 제공하는 자료를 이용하였다.

Table 2 Typical environmental loads of concrete according to the different replacement ratio of GGBS ($f_{ck} = 30$ MPa)

R_G (%)	Unit weight (kg/FU)					Amount of environmental loads (kg/FU)									
	Water	OPC	GGBS	Sand	Gravel	Anthracite coal	Bituminous coal	Natural gas	Crude oil	CO ₂	CO	NO _x	SO _x	NH ₃	
0	220	440	0	660	1025	3.35E+00	7.93E+01	3.58E+00	1.39E+01	4.56E+02	3.93E+01	2.62E-01	9.90E-01	6.51E-02	
10	220	396	44	659	1023	3.02E+00	7.14E+01	3.23E+00	1.28E+01	4.17E+02	3.53E+01	2.37E-01	1.00E+00	6.66E-02	
20	220	352	88	658	1022	2.69E+00	6.35E+01	2.88E+00	1.18E+01	3.77E+02	3.14E+01	2.13E-01	9.58E-01	6.80E-02	
30	220	308	132	657	1020	2.37E+00	5.56E+01	2.53E+00	1.08E+01	3.37E+02	2.75E+01	1.88E-01	9.15E-01	6.95E-02	
40	220	264	176	656	1019	2.04E+00	4.76E+01	2.18E+00	9.77E+00	2.98E+02	2.36E+01	1.64E-01	8.71E-01	7.09E-02	
50	220	220	220	655	1017	1.71E+00	3.97E+01	1.83E+00	8.75E+00	2.58E+02	1.96E+01	1.40E-01	8.27E-01	7.23E-02	

Note) For calculating each environmental load of concrete in studied system (Fig. 1), the following transport system was assumed: all of the cementitious materials are transported by a 23 ton capacity hydraulic truck, while aggregates are by a 15 ton capacity dump truck; and the fresh concrete produced from the plant is transported to a building site by a 6 m³ capacity transit-mixer truck. Water drawn from Han-river is assumed to be used for concrete mix.

Table 3 Impact category and relevant factors to assess the environmental impact¹⁰⁾

Impact category	Inventory parameter	Characterization factor $eqv_{i,j}$	Normalizatioin reference N_i	Weighting factor w_i
Abiotic resource depletion	Anthracite coal	4.61E-03 /yr	2.49E+04 g/pr-yr ²	0.231
	Bituminous coal	4.61E-03 /yr		
	Natural gas	1.671E-02 /yr		
	Crude oil	2.48E-02 /yr		
Global warming	CO ₂	1.00E+00g CO ₂ -eq/g	5.53E+06 g CO ₂ -eq/pr-yr	0.288
Photochemical oxidant creation	CO	2.70E+02g C ₂ H ₄ -eq/g	1.03E+04 g C ₂ H ₄ -eq/pr-yr	0.065
	SO _x	2.80E-02g C ₂ H ₄ -eq/g		
	NO _x	4.80E-02g C ₂ H ₄ -eq/g		
Acidification	SO _x	1.00E+00g SO ₂ -eq/g	3.98E+04 g SO ₂ -eq/pr-yr	0.036
	NO _x	7.00E-01g SO ₂ -eq/g		
	NH ₃	1.88E+00g SO ₂ -eq/g		
Eutrophication	NO _x	1.30E-01g PO ₄ ⁻³ -eq/g	1.31E+04 g PO ₄ ⁻³ -eq/pr-yr	0.038
	NH ₃	3.50E-01g PO ₄ ⁻³ -eq/g		
Human toxicity	SO _x	9.60E-02g 1.4DCB-eq/g	1.48E+06 g 1.4DCB-eq/pr-yr	0.105
	NO _x	1.20E+00g 1.4DCB-eq/g		

Note) pr = person, yr = year

Table 1에 나타난 LCI DB를 이용하면, 콘크리트의 구성재료, 재료운송, 생산공정 및 콘크리트 운송을 포함하는 시스템 경계에서의 환경부하량은 양근혁 등¹¹⁾에 의해 제시된 CO₂ 평가절차를 이용하여 정량적으로 산정할 수 있다. 콘크리트 설계 압축강도(f_{ck})가 30 MPa일 때 GGBS 치환율(R_G)에 따른 환경부하량의 예를 Table 2에 나타내었다. 환경부하 목록 중에서 가장 높은 비율을 차지하는 것은 CO₂ 발생이다. 다음으로 유연탄 소비량인데 이는 OPC 생산을 위한 석회석의 소성과정에서 주로 사용되는 것이 유연탄이기 때문이다. 세 번째로 발생량이 많은 환경부하는 CO였다. 일반적으로 GGBS 치환율이 증가할수록 각 환경부하량은 감소한다. 동일 f_{ck} 에서 GGBS 치환율이 0%에서 50%로 증가할 때 CO₂ 발생량은 41% 절감하였으며, 유연탄 소비량은 43.4% 감소하였다.

2.3 환경영향평가

환경영향평가는 LCI DB 분석 결과를 환경에 미치는 영향크기로 전환시키는 과정을 필요로 한다. 하지만 전과정 목록상의 모든 항목과 이것들이 환경에 미치는 영향간의 상관관계를 논리적, 객관적으로 정립하기는 매우 어려우며, 주관적인 측면이 적지 않게 포함된다. 이 주관적인 측면을 최소화하고 환경영향의 크기를 정량적으로 전환하기 위하여 영향평가에서는 분류화, 특성화, 정규화 및 가중치 부여의 과정을 도입한다.

2.3.1 분류화 및 특성화

분류화는 목록분석에서 도출된 목록항목들을 해당 영향범주로 모으는 과정이다. 이 연구에서는 환경영향 범주를 Table 3에 나타난 바와 같이 무생물 자원고갈, 지구온난화, 광화학산화물 생성, 산성화, 부영양화 및 인간독성의 6개로 분류하였다.¹⁰⁾ 특성화는 목록항목이 영향범주에 미치는 영향을 정량화하는 단계로서 식 (1)에 의해 평가될 수 있다.

$$CI_i = \sum_j CI_{i,j} = \sum_j (Load_j \cdot eqv_{i,j}) \quad (1)$$

여기서, CI_i 는 영향범주 i 에 포함된 모든 목록항목(j)들이 소속된 영향범주에 미치는 영향의 크기이며, $CI_{i,j}$ 는 목록항목 j 가 영향범주 i 에 미치는 영향의 크기이며, $Load_j$ 는 j 번째 목록항목의 환경부하량이며, $eqv_{i,j}$ 는 영향범주 i 에 속한 j 번째 목록항목의 특성화 계수 값이다. 각 목록항목의 특성화 계수는 환경부¹⁰⁾에서 제시한 값을 이용하였다(Table 3).

2.3.2 가중치

가중치 부여는 각 영향범주들이 환경전반에 미치는 영향을 고려하여 영향범주간에 상대적인 우위(중요도)를 결정하는 과정이다. 따라서 가중치 부여는 환경영향평가

의 핵심 중 하나이다. 가중치 부여는 과학적인 사실보다는 환경영향에 대한 사회적, 정치적, 윤리적 기준 등에 따라 결정되므로 국가 및 문화 그리고 시간에 따라 다르다. 가중치 부여는 전문가 집단에 의한 Delphi-like 방법, 비용으로 환산하는 방법 및 Distance-to-target 등의 다양한 방법에 의해 산정된다. 이 연구에서는 각 영향범주들의 가중치에 대한 신뢰성을 확보하기 위하여 서열정보에 기반한 계층분석법을 이용하여 산정한 환경부 제시값¹⁰⁾을 이용하였다.

2.3.3 환경영향 평가지표

환경영향의 평가는 시대적 상황 및 사회적·정치적 요구사항을 함께 고려하여야만 한다. 따라서 제품설계 시 사용되는 재료, 공정, 운송 및 폐기 등의 환경성을 하나의 점수로 지표화하는 노력¹⁴⁾이 이루어지고 있다. 콘크리트의 환경영향 평가에서도 고려된 시스템 전체에서 j 번째 목록항목의 환경부하가 i 번째 범주에 미치는 환경영향을 하나의 점수로 나타낼 필요가 있다. 이 연구에서는 환경부¹⁰⁾에서 제시한 한국형 환경영향 평가지표 방법론(식 (2))을 따라 각 범주들에서 콘크리트의 환경영향 크기(WI_i)를 정량화하였다.

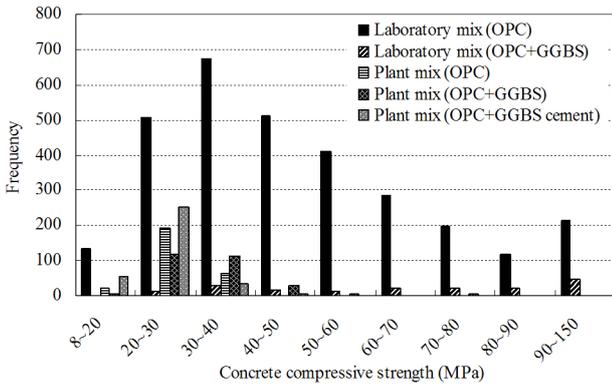
$$WI_i = \frac{CI_i}{N_i} w_i = \frac{\sum_j (Load_j \cdot eqv_{i,j})}{N_i} w_i \quad (2)$$

여기서, N_i 는 영향범주 i 의 정규화 기준값이며, w_i 는 영향범주 i 의 가중치 값이다. 해당지역에서 일정기간 배출되는 영향범주 i 의 잠재적인 환경영향 값인 정규화 기준 및 가중치에 대해 환경부에서 제시하는 값들을 Table 3에 요약하였다.

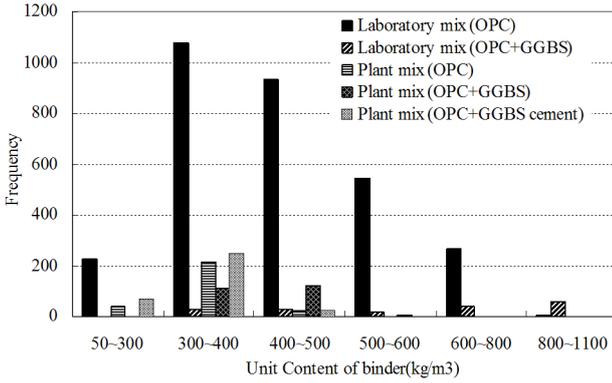
3. 콘크리트의 환경영향 평가

3.1 콘크리트 배합에 대한 데이터베이스

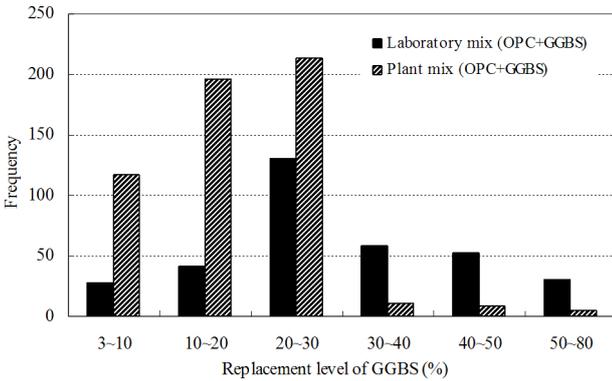
GGBS가 콘크리트의 환경영향에 미치는 영향을 평가하기 위하여 국내 논문집(대한건축학회, 한국콘크리트학회 및 한국건축시공학회 등) 및 레미콘 사를 중심으로 콘크리트 배합 및 28일 압축강도에 대한 데이터베이스를 구축하였다. 이 데이터베이스는 모두 3395개의 실내배합과 1263개의 레미콘 배합을 포함하고 있다(Fig. 2). 이 중 결합재로서 OPC만을 사용한 콘크리트는 실내 3053배합, 레미콘 713배합이며, GGBS가 치환된 콘크리트는 실내 342배합, 레미콘 550배합이다. 레미콘 배합에서 GGBS 시멘트 2종과 OPC가 혼용된 콘크리트는 346배합이다. 재령 28일 압축강도의 범위는 OPC 콘크리트의 경우 실내배합에서는 8.4~150 MPa, 레미콘 배합에서는 16~52 MPa이며, OPC+GGBS 콘크리트의 경우에는 실내배합에서는 10~139 MPa, 레미콘 배합에서는 11~73 MPa이다. 단위 결



(a) Concrete compressive strength at 28 days



(b) Unit content of binder



(c) Replacement level of GGBS

Fig. 2 Distribution of main parameters in the database (Range given in horizontal axis: less or equal-greater than)

합재 양의 범위는 OPC 콘크리트의 경우 실내배합에서는 150~800 kg/m³, 레미콘배합에서는 58~489 kg/m³이며, OPC+GGBS 콘크리트의 경우에는 실내배합에서 236~1245 kg/m³, 레미콘 배합에서 244~838 kg/m³이다. 일반적으로 레미콘 배합과 실내배합에서 동일 압축강도에 대한 단위 결합재 양의 차이는 미미하였다. 또한 GGBS의 치환율이 단위결합재 양 변화에 미치는 영향도 특별히 나타나지 않았다. GGBS의 최대 치환율은 실내배합의 경우 80%, 레미콘 배합의 경우 70%였다.

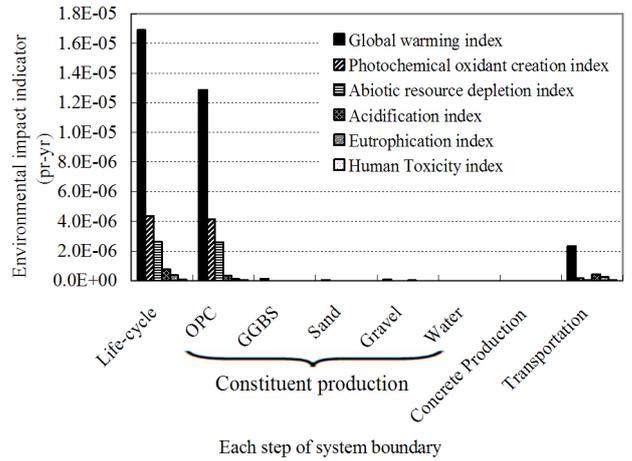


Fig. 3 Typical life-cycle environmental impact of concrete in each step of system boundary

3.2 환경영향 지수

Table 2에 나타난 GGBS 치환율이 40%인 콘크리트의 재료, 운송 및 배합단계에서 모든 목록항목들이 소속된 영향범주에 미치는 영향의 크기를 Fig. 3에 나타내었다. 영향크기는 지구온난화, 광화학 산화생성물, 무생물 자원 고갈 순으로 나타났는데, 이들 값에서 OPC가 차지하는 비율은 76% 이상이며, 레미콘 플랜트와 운송이 지구온난화 영향크기에서 차지하는 비율은 각각 0.01%와 14.15%였다. 운송단계의 지구온난화 영향이 높게 나타난 이유는 레미콘 트럭의 LCI DB의 환경부하 계수가 다른 운송 수단과 비교하여 현저히 높기 때문이다. 콘크리트의 전 과정 산성화, 부영양화 및 인간독성의 크기는 무시할 만큼 작았다. 따라서 이 연구에서는 콘크리트의 환경영향에 대한 GGBS의 효과를 지구온난화, 무생물자원고갈 및 광화학 산화물생성 관점에서 분석하였다. 한편, Yang 등¹⁵⁾에 의해 제시된 바와 같이 콘크리트의 환경에 대한 효율성은 소요 압축강도 및 내구연한에 대한 전체 결합재 소비측면에서 정의될 필요가 있다. 콘크리트의 압축강도 증가는 많은 양의 결합재 소비를 요구하지만 구조부재의 단면크기를 줄일 수 있으므로 콘크리트 양의 감소에 의한 환경영향 크기를 줄일 수 있기 때문이다. 따라서 콘크리트의 환경영향은 단위 압축강도(1 MPa)의 발현을 기준으로 평가될 필요가 있다. 이 연구에서는 각 범주별 환경영향크기 및 총 환경영향크기를 콘크리트 압축강도로 무차원한 환경영향 지수를 다음과 같이 정의하였다.

$$\lambda_{CO_2} = \frac{WI_{CO_2}}{f_{ck}} \quad (3)$$

$$\lambda_{ARD} = \frac{WI_{ARD}}{f_{ck}} \quad (4)$$

$$\lambda_{POC} = \frac{WI_{POC}}{f_{ck}} \quad (5)$$

$$\lambda_T = \frac{WI_T}{f_{ck}} \quad (6)$$

여기서, λ_{CO_2} , λ_{ARD} , λ_{POC} 및 λ_T 는 콘크리트 압축강도 1 MPa 발현을 위한 지구 온난화 지수, 무생물 자원고갈 지수, 광화학 산화물생성 지수 및 총 환경영향 지수이며, WI_{CO_2} 는 지구 온난화 영향의 크기, WI_{ARD} 는 무생물 자원고갈 영향의 크기, WI_{POC} 는 광화학 산화물생성물 영향의 크기이며, WI_T 는 총 환경영향 크기이다.

3.3 각 환경영향 지수에 대한 GGBS 치환율의 영향

GGBS 치환율(R_G)이 콘크리트의 각 범주별 환경영향 지수(λ_{CO_2} , λ_{ARD} , λ_{POC}) 및 총 환경영향 지수(λ_T)에 미치는 영향을 Fig. 4에 나타내었다. 일반적으로 R_G 가 증가할수록 각 범주별 환경영향 지수 및 총 환경영향 지수는 감소하였다. 이는 OPC에 비해 GGBS의 환경영향 크기가 무시할 만큼 작기 때문이다(Fig. 3). GGBS 치환율의 증가에 따른 환경영향 지수의 감소 기울기는 R_G 가 약 30%를 넘어서면서 완만하게 변하였다. 동일 GGBS 치환율에서 λ_{CO_2} 는 λ_{ARD} 에 비해 약 6배~8배, λ_{POC} 에 비해 약 4배~5배 높았는데, 이 비율은 GGBS 치환율이 증가할수록 다소 증가하였다. 결과적으로 λ_{CO_2} 는 콘크리트의 총 환경영향 지수의 66%를 차지하였으며, GGBS 치환율이 증가함에 따라 총 환경영향 지수에서 λ_{CO_2} 이 차지하는 비율은 증가하였다. 한편, 각 범주별 환경영향 지수 및 총 환경영향 지수는 레미콘 배합과 실내배합에서의 차이가 매우 미미하였다. 이는 콘크리트 배합에 대한 데이터베이스에서 나타내었듯이 동일 압축강도에서 결합재 사용량이 레미콘 배합과 실내배합에 따른 차이가 매우 작기 때문이다. 따라서 콘크리트의 전과정 환경영향 평가에서 실내배합과 레미콘 배합에 따른 차이는 무시할만하다고 판단된다.

3.4 결합재 지수(B_{ck})

콘크리트의 전과정 평가에 의한 환경영향 지수의 크기는 주로 OPC를 포함한 결합재 양에 의해 결정되었다(Fig. 3). Yang 등¹⁵⁾에 의해 제시된 결합재 지수($B_{ck}=B/f_{ck}$)와 콘크리트 압축강도의 관계를 Fig. 5에 나타내었는데, 여기서 B 는 단위 결합재 양이다. 결합재 지수는 GGBS 치환에 관계없이 콘크리트 압축강도의 증가와 함께 감소하였다. 이는 압축강도가 증가함에 따라 단위 압축강도(1 MPa) 발현을 위한 결합재 양이 감소될 수 있음을 의미한다. 결합재 지수의 감소속도는 f_{ck} 가 약 60 MPa 이상에서 점차 완화되면서 그 값이 약 $5 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{MPa}^{-1}$ 에 수렴하는 경향을 보였다. 동일 콘크리트 압축강도에서 실내배합과 레미콘 공장배합에 따른 결합재 지수 값의 차이는 뚜렷이 나타나지 않았다. 단지 실내배합에서 OPC+GGBS 콘

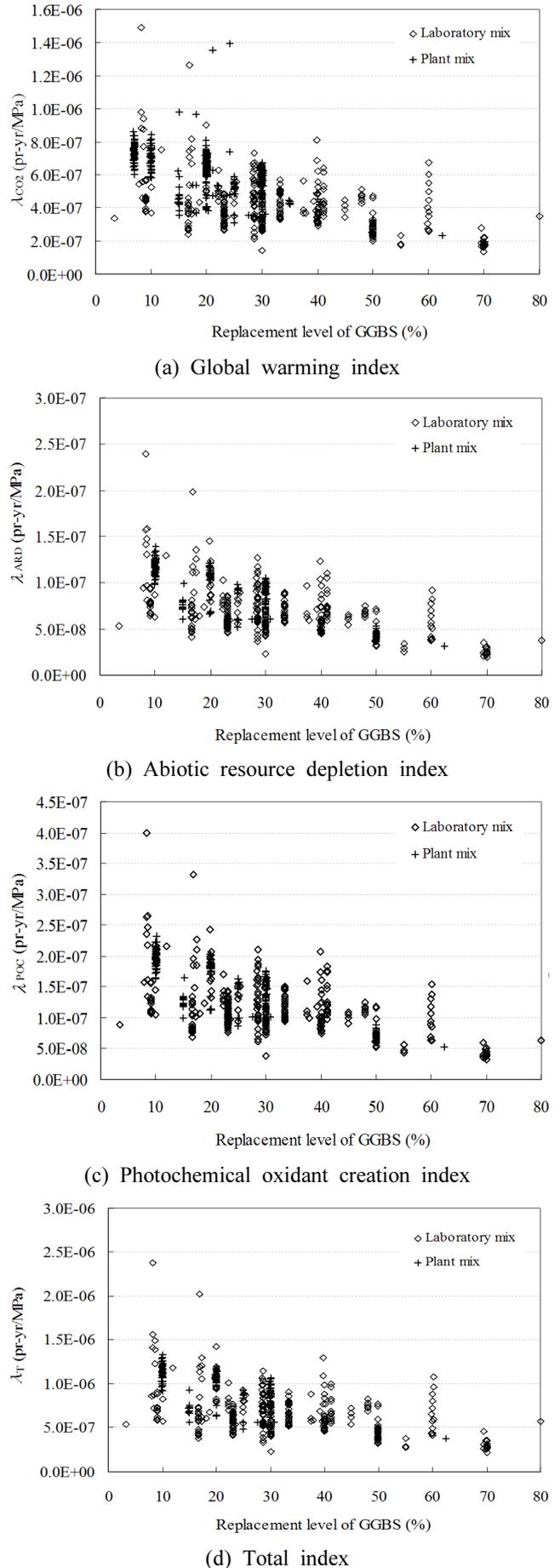


Fig. 4 Environmental impact index according to R_G

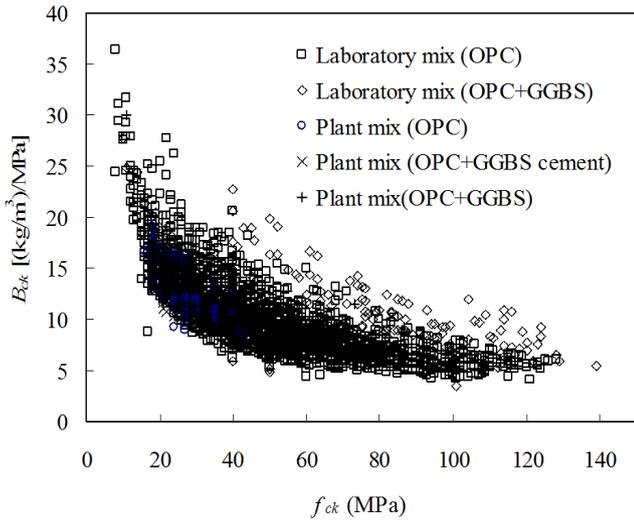


Fig. 5 f_{ck} versus B_{ck}

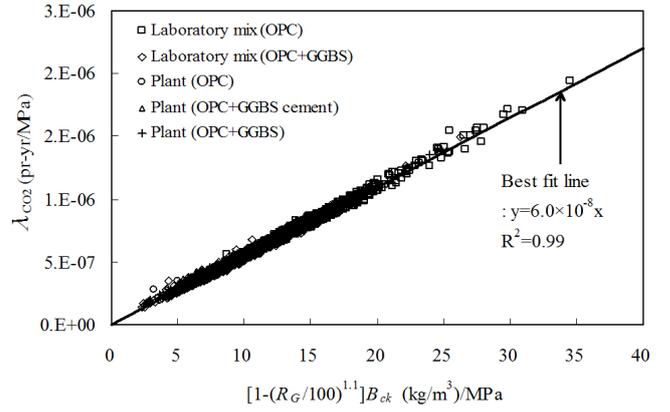
크리트의 결합재 지수가 약간 높은 경향으로 있었다.

3.5 GGBS 치환 콘크리트의 환경영향 크기 평가모델

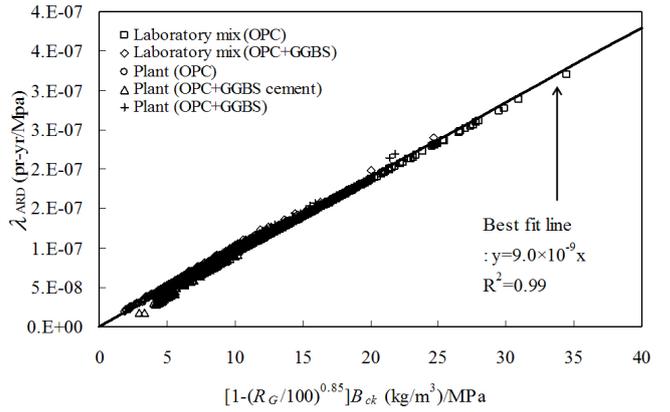
전 세계적으로 개발되고 있는 그린 시방서^{1,4)}와 함께 콘크리트의 환경영향을 정량적으로 평가하는 것은 매우 중요한 영역이다. 따라서 콘크리트 환경영향 평가에 대한 쉽고 간단하게 접근할 수 있는 자료 또는 가이드라인의 확립은 실무적 측면에서 다양하게 이용될 수 있다. 콘크리트의 각 범주별 환경영향의 크기에 대한 R_G 의 영향은 콘크리트 압축강도 및 이에 따른 단위 결합재 양에 의해 영향을 받는다. 더구나 재료단계에서의 골재와 혼화제, 그리고 운송단계와 배합단계가 콘크리트의 환경영향 크기에 미치는 영향은 15% 이내로 작다. 이를 고려하여 콘크리트의 각 범주별 환경영향의 크기를 간단하게 예측하기 위한 모델을 제시하기 위하여 결합재 지수 및 GGBS 치환율을 주요 변수로 다중회귀분석을 수행하였다. 콘크리트의 각 범주별 환경영향의 크기는 GGBS 치환율이 증가함에 따라 비선형적으로 감소하며 이론적으로 결합재가 없으면 콘크리트의 생산이 불가능하므로 환경영향도 없다. 이와 같은 경계조건을 고려하면, 콘크리트의 범주 i 에서 환경영향 지수(λ_i)와 B_{ck} 의 관계는 다음 식과 같이 모델링될 수 있다.

$$\lambda_i = A_1 [1 - (R_G/100)^{B_1}] B_{ck} \quad (7)$$

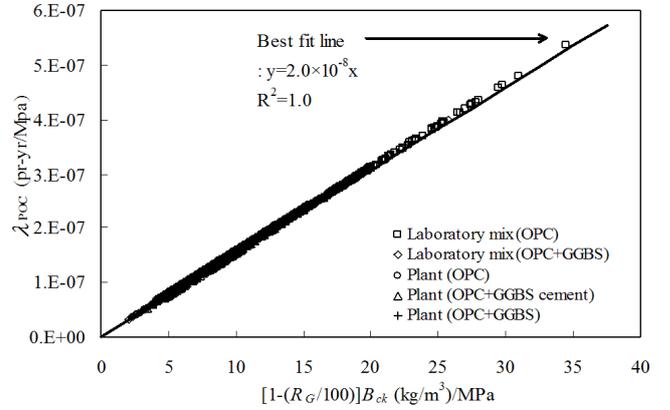
여기서 A_1 과 B_1 은 실험상수이다. 회귀분석 결과를 나타낸 Fig. 6으로부터 A_1 과 B_1 의 값은 각각 λ_{CO_2} 에 대해 6.0×10^{-8} 과 1.1을, λ_{ARD} 에 대해 9.0×10^{-9} 과 0.85을, λ_{POC} 에 대해 2.0×10^{-8} 과 1.0을, 그리고 λ_T 에 대해 8.8×10^{-8} 과 1.2로서 평가될 수 있었다. 환경영향 지수 λ_i 와 결합재 지수 B_{ck} 는 콘크리트 압축강도로 무차원한 값을 고려하



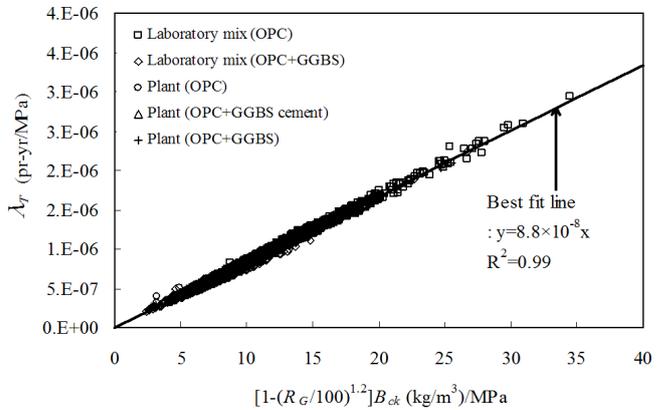
(a) Global warming index



(b) Abiotic resource depletion index



(c) Photochemical oxidant creation index



(d) Total index

Fig. 6 Regression analysis for $\lambda_i - B_{ck}$ relationship

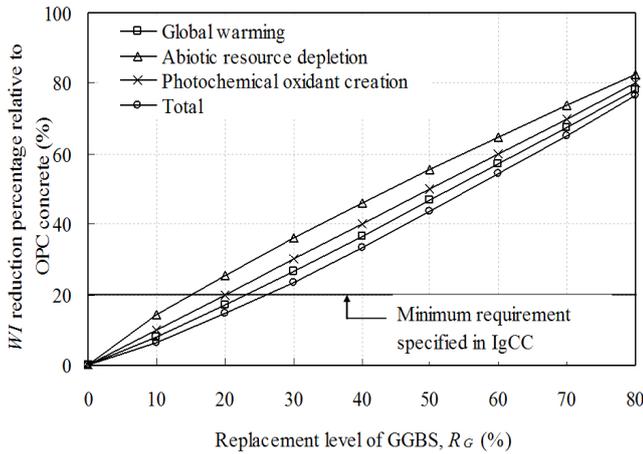


Fig. 7 Design chart for determining R_G in reducing environmental impact of concrete

면 GGBS가 치환된 콘크리트의 주요 범주 i 에서의 환경영향 크기(지구 온난화: WI_{CO_2} , 무생물 자원고갈: WI_{ARD} , 광화학 산화생성물: WI_{POC}) 및 총 환경영향 크기(WI_T)는 다음과 같이 제시될 수 있다.

$$WI_{CO_2} = 6.0 \times 10^{-8} [1 - (R_G/100)^{1.1}] B \quad (8)$$

$$WI_{ARD} = 9.0 \times 10^{-9} [1 - (R_G/100)^{0.85}] B \quad (9)$$

$$WI_{POC} = 2.0 \times 10^{-8} [1 - (R_G/100)^{1.0}] B \quad (10)$$

$$WI_T = 8.8 \times 10^{-8} [1 - (R_G/100)^{1.2}] B \quad (11)$$

3.6 콘크리트 환경영향 저감과 GGBS 치환율의 관계

GGBS가 치환되지 않은 OPC 콘크리트의 범주 i 에서의 환경영향 지수는 식 (7)로부터 단순히 $A_i \cdot B_{ik}$ 로 산정된다. 따라서 식 (7)의 $[1 - (R_G/100)^{B_i}]$ 는 OPC 콘크리트에서 결합재 양이 동일할 때 GGBS의 치환에 따른 환경영향의 크기 감소율을 의미한다. 식 (8)~(11)을 이용하여 콘크리트에서 GGBS의 치환율에 따른 환경영향 크기 저감비를 Fig. 7에 나타내었다. IgCC(international green construction code)⁴⁾에서 요구하는 전과정 환경영향 크기의 저감율 20%를 고려하면 OPC 콘크리트의 배합에서 R_G 는 약 25% 이상으로 설계되어야 한다. 이와 같이 식 (8)~(11) 또는 Fig. 7의 설계 차트를 이용하면 콘크리트 배합에서 목표 환경영향 크기 저감율에 대하여 GGBS 치환율을 간단하게 결정할 수 있다.

4. 결 론

GGBS가 콘크리트의 전과정 환경영향 크기에 미치는 영향을 실내배합 3395개와 레미콘 배합 1263개의 데이터를 활용하여 정량적으로 평가하였다. 고려된 경계시스템

은 원재료들의 채취(요람)에서 시공 전 단계까지이며, 환경부하량은 국가 생애주기 데이터목록에 기반하여 계산되었다. 환경부하들은 분류화, 특성화, 정규화 및 가중치 단계를 거쳐 정량적인 환경영향 지표로 환산되었다. 이 콘크리트의 전과정 환경영향평가로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 콘크리트의 영향크기는 지구온난화, 광화학 산화생성물, 무생물 자원고갈 순으로 나타났는데, 이들 값에서 OPC가 차지하는 비율은 76% 이상이며, 레미콘 플랜트와 운송이 지구온난화 영향크기에서 차지하는 비율은 각각 0.01%와 14.15%였다.
- 2) 각 범주별 환경영향 지수 및 총 환경영향 지수는 GGBS 치환율의 증가와 함께 감소하는데, 그 감소 기울기는 GGBS 치환율이 약 30%를 넘어서면서 완만하게 변하였다.
- 3) 콘크리트의 실내배합과 레미콘 배합에 따른 환경영향 크기의 차이는 무시할 만큼 작았다.
- 4) GGBS가 치환된 콘크리트의 각 범주에서 환경영향 크기는 단위 결합재 양 및 GGBS 치환율의 함수로 합리적으로 선형 모델링 될 수 있었다.
- 5) GGBS 치환율이 25% 이상일 때 콘크리트의 총 환경영향 크기를 20% 이상 저감시킬 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 국토교통과학기술진흥원 건설교통기술촉진 연구사업(12기술혁신05)의 연구비지원에 의해 수행되었습니다.

References

1. Task Group 3.3, Environmental Design, *International Federation for Structural Concrete (fib)*, 2004, Switzerland, 74 pp.
2. Malhotra, V. M., "Introduction: Sustainable Development and Concrete Technology," *Concrete International*, Vol. 24, 2002, 22 pp.
3. Korea Concrete Institute, *Concrete and Environment*, Kimoonang Publishing Company, Seoul, Korea, 2011, pp. 224-244.
4. ICC, *International Green Construction Code*, International Code Council, USA, 2012, 147 pp.
5. CEN Guide 4, *Guide for Addressing Environmental Issues in Product Standards*, 3rd Edition, 2008, 36 pp.
6. Choi, D. S., Lee, M. E., and Cho, K. H., *Environmental Impact Assessment in Domestic Construction Industry Using Life Cycle Assessment*, Korea Institute of Architectural Sustainable Environment and Building Systems, 2012, pp. 46-55.
7. Korea Concrete Institute, *Concrete and Environment*, Kimoonang Publishing Company, Seoul, Korea, 2011, pp. 16-30.

8. Korea Concrete Institute, *Concrete and Environment*, Kimoondang Publishing Company, Seoul, Korea, 2011, pp. 123-144.
9. ISO, *Environmental Management-Life Cycle Assessment-Principles and Framework*, ISO 14040, International Standardisation Organisation (ISO), 2006, 28 pp.
10. The Ministry of Environment, *Method of Environmental Impact Assessment Index of Korea*, 2003, 166 pp.
11. Yang, K. H. and Moon, J. H., "Design of Supplementary Cementitious Materials and Unit Content of Binder for Reducing CO₂ Emission of Concrete," *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 24, No. 5, 2012, pp. 597-604. (doi: <http://dx.doi.org/10.4334/JKCI.2012.24.5.597>)
12. Korea LCI Database Information Network, <http://www.edp.or.kr/lcidb>, Access on May 1, 2013.
13. Sakai, K. and Kawai, K., "JSCE Guidelines for Concrete No.7: Recommendation of Environmental Performance Verification for Concrete Structures," *Japan Society of Civil Engineering*, 2006, 28 pp.
14. Baumann, H. and Rydberg, T., "Lifecycle Assessment: A Comparison of Three Methods for Impact Analysis and Evaluation," *Journal of Cleaner Production*, Vol. 2, No. 1, 1994, pp. 13-20.
15. Yang, K. H., Song, J. K., and Song, K. I., "Assessment of CO₂ Reduction of Alkali-Activated Concrete," *Journal of Cleaner Production*, Vol. 39, No. 1, 2013, pp. 265-272.

요약 혼화재로서 고로슬래그가 콘크리트의 전과정 환경영향에 미치는 효과를 정량적으로 평가하기 위하여, 3395개의 실내 배합 및 1263개의 레미콘 배합을 분석하였다. 콘크리트의 환경영향을 평가하기 위한 전 과정 평가 방법을 요약하면, 1) 고려된 시스템 경계는 요람에서 시공 전단계까지이며, 2) 재료, 운송 및 콘크리트 생산에서의 환경부하 평가는 국가 생애주기 데이터목록을 주로 기반으로 하였으며, 3) 환경부하는 분류화, 특성화, 정규화 및 가중치 단계를 거쳐 정량적인 환경영향 지표로 환산되었다. 콘크리트 전과정 환경영향은 주로 지구 온난화, 광화학 산화생성물 및 무생물 자원고갈의 세 범주로 분류될 수 있었다. 또한, 콘크리트의 환경영향 지표들은 주로 보통 포틀랜드 시멘트의 양에 의해 결정되었으며, 고로슬래그 치환율의 증가와 함께 감소하였다. 이를 고려하여, 콘크리트의 환경영향 지표들은 단위 결합재 양 및 고로슬래그 치환율의 함수로 간단하게 모델링 될 수 있었다.

핵심용어 : 환경영향, 슬래그, 단위 결합재양, 지구 온난화