

# 플라이애시가 콘크리트의 전과정 환경영향에 미치는 효과

## Influence of Fly Ash on Life-Cycle Environmental Impact of Concrete

정연백<sup>1\*</sup> 양근혁<sup>2</sup> 최동욱<sup>3</sup>

Jung, Yeon-Back<sup>1\*</sup> Yang, Keun-Hyeok<sup>2</sup> Choi, Dong-Uk<sup>3</sup>

Department of Architectural Engineering, Kyonggi University Graduate School, Seodaemun-Gu, Seoul, 120-702, Korea <sup>1</sup>

Department of Plant Architectural Engineering, Kyonggi University, Yeongtong-Gu, Suwon, 443-760, Korea <sup>2</sup>

Department of Architectural Engineering, Hankyong National University, Jungang-Ro, Ansong, 456-240, Korea <sup>3</sup>

### Abstract

In order to quantitatively evaluate the effect of fly ash (FA) as partial replacement of cement on the life-cycle environmental impact of concrete, a comprehensive database including 4023 laboratory mixes and 2120 plant mixes was analyzed. The environmental loads on the life-cycle assessment 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 decreased with the increase of the replacement level of FA and governed by the unit content of ordinary portland cement (OPC). As a result, simple equations to assess the environmental impact indicators could be formulated as a function of the unit content of binder and the replacement level of FA.

Keywords : environmental impact, fly ash, unit content of binder, global warming

## 1. 서 론

### 1.1 연구의 목적

콘크리트 구조물은 오랜 기간 동안 구조적 안전성, 내구성 및 사용성에 중점을 두고 설계되어 왔으나, 오늘날에 이르러서는 환경성에 대한 평가도 중요한 사항으로 인식되고 있다.[1,2,3] 이에 따라 콘크리트 및 콘크리트 구조물에서도 설계, 생산, 시공, 사용, 해체, 폐기 및 재활용에 이르는 전과정 또는 각각의 단계에서 부정적인 환경영향을 최소화하고 가능한 한 긍정적인 영향을 최대한 이용하는 설계기준[4] 및 시공가이드라인[5]들의 개발을 위한 투자 및 노력

이 이루어지고 있다.

OPC에 대한 일반적인 환경영향으로는 CO<sub>2</sub> 배출량, 석회석 사용에 따른 천연자원 고갈 및 소성과정에서의 에너지고갈, 그리고 대기배출물인 질소산화물과 탄화수소물에 의한 광화학 산화생성물 등을 들 수 있다. 이에 따라 콘크리트 산업에서는 OPC를 대체 또는 치환하기 위한 다양한 연구들[2]이 진행되고 있다. 그러나 아직까지 체계적으로 콘크리트 산업이 가지는 총체적인 환경영향을 정량적으로 분석하는 기반 연구의 진행이 미비한 실정이며, 국내 콘크리트 산업을 친환경산업체제로 전환하기 위한 정책수립의 기반이 되는 객관적인 자료도 매우 미흡한 상황이다[6].

석탄 화력발전소에서 석탄 연소 후 남은 물질을 석탄회라고 하며, 이 중 플라이애시(Fly Ash, FA)는 전기집진기에 의해 집진되며 재활용을 위해 공기이송 설비를 통해 플라이애시 사일로에 저장된다. 전력 산업부산물인 플라이애시는 콘크리트 단위수량의 감소, 유동성의 증대와 점성의 확보, 건조수축 균열의 제어, 수화열 저감 및 알칼리-골재

Received : May 22, 2014

Revision received : September 19, 2014

Accepted : September 19, 2014

\* Corresponding author : Jung, Yeon-Back

[Tel: 82-2-411-9897, E-mail: caujoyb@naver.com]

©2014 The Korea Institute of Building Construction, All rights reserved.

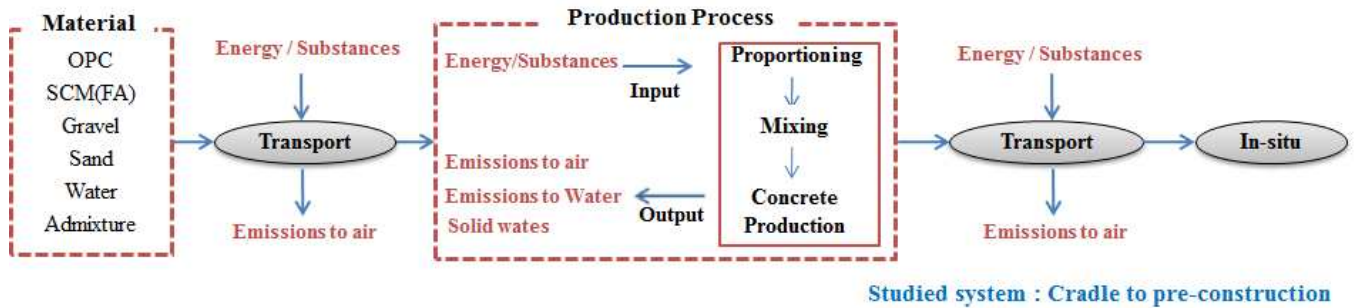


Figure 1. Process flow diagram of concrete in studied system.

반응 제어 등을 통해 콘크리트의 성능을 향상시키기 위해 사용된다. 2009년 국내의 시멘트 총 출하량은 약 52.1백만 톤이며, 이 중 레미콘 생산을 위해 소요된 양은 약 36.3백만 톤이고 프리캐스트 콘크리트 및 기타 분야에 소비된 시멘트량은 약 6.5백만 톤이다. 한편, 2009년 레미콘 생산 시 시멘트 혼화재로서 소요된 플라이애시는 약 3.99백만 톤으로서 이는 시멘트량의 약 11%이다[8].

2000년부터 2009년까지 연간 10% 내외의 재활용량 증가율을 나타내는 FA는 신규 석탄화력후속기들의 건설에 따라 그 발생량은 지속적으로 증가할 것으로 예상되고 있다[8]. 시멘트계 재료로서 FA의 활용전망은 잠재적 환경영향 및 발생량의 증가를 고려하면 매우 밝다고 인식되고 있다. 하지만 콘크리트 혼화재로서 FA를 이용할 경우 환경보전, 에너지 절감 및 온실가스 방출 저감 등에 대한 기대 효과는 다소 정성적이며, 정량적 데이터는 매우 부족한 실정이다. 이에 본 연구에서는 플라이애시가 콘크리트 배합에서 혼화재로서 OPC를 치환하여 사용될 경우 환경영향에 미치는 효과를 정량적으로 평가하는 것을 목적으로 한다.

### 1.2 연구의 방법 및 범위

콘크리트의 환경영향 평가지표는 환경부[10]에서 제시한 “한국형 환경영향평가지수 방법론”에 근거하였으며, 환경영향 평가는 ISO 14040 시리즈[9]에서 제시하는 전과정 평가 프로세스를 기반으로 하였다. 콘크리트 배합에 대한 데이터베이스는 4023개의 실험실 배합 및 2120개의 레미콘 배합을 사용하였으며, 이를 바탕으로 플라이애시 치환율에 따른 콘크리트 전과정 환경영향의 크기를 간단히 산정할 수 있는 평가 모델과 콘크리트 배합에서 이들 환경영향의 목표 감소율에 대해 플라이애시의 치환율을 결정할

수 있는 설계용 차트를 제시하였다.

## 2. 콘크리트의 전과정 환경영향 평가 절차

### 2.1 평가 목적 및 범위 설정

본 전과정 평가(life-cycle assessment, LCA)의 목적은 콘크리트의 배합조건 및 압축강도에 따른 환경영향 크기를 평가하고, 혼화재로서 플라이애시가 그 환경영향 크기에 미치는 효과를 정량화하는 것이다. 지구 온난화, 광화학 산화물생성 및 무생물 자원고갈 등이 전과정 환경영향의 주요 범위이며, 콘크리트의 기능단위는 1 m<sup>3</sup>이다. 콘크리트 공정 흐름도는 Figure 1과 같으며 시스템 경계는 요람에서부터 현장에서의 타설 직전까지 단계[11]로서 구성재료, 운반, 콘크리트 생산 등으로부터의 대기 배출물, 수계 배출물, 고형 배출물 등을 고려하였다. 콘크리트 배합에 대한 데이터 품질로서 지역적 경계는 서울 중심의 한국이며, 기술적 경계는 실내실험 및 표준기 레미콘 공장의 배합자료이며, 시간적 경계는 1990년~2012년이다. 콘크리트 생산 공정 기술의 경계는 표준기의 레미콘 생산공정을 적용하였다. 운반단계에서의 환경영향을 산정하기 위해서 레미콘 공장의 위치를 서울 방배동으로 가정하였으며, 시멘트는 전남담양, 굽은골재와 잔골재는 각각 경기도 광주와 인천, FA는 경남 하동, 혼화제는 평택에서 운송되는 것으로 가정하였다. 물은 상수도를 통해 조달되므로 운송에서의 투입과 배출은 무시하였다. 콘크리트 주요 구성재료인 OPC 및 FA와 같은 시멘트계 재료들은 23 톤 용량의 벌포카를, 골재는 15 톤 트럭을, 감수제와 같은 혼화제는 1.5톤 트럭을 이용하고 생산된 콘크리트는 6 m<sup>3</sup> 용량의 레미콘 트럭에 의해 현장까지 운반되는 것으로 가정하였다.

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

Item	Functional Unit (FU)	Inventory for environmental loads (kg/FU)								
		CO <sub>2</sub>	CO	SOX	NOX	NH <sub>3</sub>	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
Natural sand*	m <sup>3</sup>	2.34E-03	4.19E-06	9.49E-06	1.52E-05	3.83E-08	-	-	-	-
Gravel*	m <sup>3</sup>	3.23E-03	4.52E-06	1.49E-05	1.64E-05	5.15E-08	-	-	-	-
FA**	kg	1.96E-02	-	6.20E-06	7.54E-06	-	-	-	-	-
8.1-15 ton truck	kg/km	6.30E-05	8.13E-07	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
Plant	kg	7.68E-03	-	3.42E-06	6.51E-05	-	-	-	-	-
Mixer(2.5m <sup>3</sup> )**	m <sup>3</sup>	6.10E-04	-	1.95E-07	2.40E-07	-	-	-	-	-
Transit-mixer truck**	m <sup>3</sup>	6.60E-01	2.13E-03	4.30E-08	7.87E-03	1.06E-08	-	-	-	-

Note : LCI data given in Europea Commission (marked using \*) and JSCE (marked using \*\*) are referenced wherever Korean LCI database is unavailable.

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

전과정 목록분석은 연구범위에서 설정한 시스템을 대상으로 에너지, 원료, 제품, 부산물 등의 투입(input)요소와 환경오염물 등의 배출(output)요소의 종류와 양을 기록하여 목록화하는 과정으로 환경부하를 계산하는 과정이다. 따라서 본 전과정 평가에서 설정한 시스템에서의 콘크리트 생산에 필요한 재료, 이들 재료에 대한 생산지 출구에서 레미콘 공장까지의 운반, 각 재료들의 계량 및 배합, 생산된 콘크리트의 현장까지 운반 등에 대한 각각의 LCI 데이터들이 필요하다. Figure 1의 공정에서 이용된 LCI 데이터베이스(DB)를 Table 1에 요약하였다. LCI 데이터는 기온, 에너지원 및 천연자원의 차이에 따라 각 나라에 따라 상이하므로, 자국에서 제공되는 원단위를 이용하는 것이 가장 바람직하다. 본 전과정 평가의 지역적 경계는 한국이므로

각 재료 및 운반에 대한 LCI 데이터는 기본적으로 국내 환경부에서 제공하는 데이터[12]를 이용하였다. 하지만 국내의 건설자재에 대한 LCI DB는 아직 그 수가 충분하지 않기 때문에 본 연구에서는 모래 및 자갈 등에 대해서는 유럽 [17]에서 제공하는 자료를 이용하고, 플라이애시 및 레미콘 플랜트 등에 대해서는 일본토목학회에서[13] 제공하는 자료를 이용하였다.

Table 1에 나타난 LCI DB를 이용하면, 콘크리트의 구성재료, 재료운반, 생산공정 및 콘크리트 운반을 포함하는 시스템 경계에서의 환경부하량은 Yang et al[11]에 의해 제시된 CO<sub>2</sub> 평가절차를 이용하여 쉽게 산정할 수 있다. 콘크리트 설계 압축강도( $f_{ck}$ )가 24 MPa일 때 FA 치환율( $R_F$ )에 따른 환경부하량의 예를 Table 2에 나타내었다.

환경부하 목록 중에서 CO<sub>2</sub> 발생량이 가장 높은 비율을

Table 2 Typical environmental loads of concrete according to the different replacement ratios of FA ( $f_{ck}=24$  MPa)

$R_F$ (%)	Unit weight (kg/FU)					Amount of environmental loads (kg/FU)								
	Water	OPC	FA	Sand	Gravel	Anthracite coal	Bituminous coal	Natural gas	Crude oil	CO <sub>2</sub>	CO	NOX	SOX	NH <sub>3</sub>
0	168	319	0	826	951	2.43E+00	5.75E+01	2.60E+00	1.05E+01	3.61E+02	2.84E+01	8.93E-01	2.56E+00	4.73E-02
10	166	287	32	871	942	2.19E+00	5.18E+01	2.34E+00	9.73E+00	3.32E+02	2.56E+01	8.62E-01	2.37E-01	4.80E-02
15	170	272	48	819	945	2.08E+00	4.91E+01	2.22E+00	9.34E+00	3.19E+02	2.43E+01	8.47E-01	2.30E-01	4.85E-02
20	168	256	64	874	922	1.96E+00	4.62E+01	2.10E+00	9.00E+00	3.04E+02	2.28E+01	8.32E-01	2.21E-01	4.89E-02
25	179	239	80	870	882	1.84E+00	4.31E+01	1.96E+00	8.56E+00	2.89E+02	2.13E+01	8.16E-01	2.15E-01	4.91E-02
30	153	214	92	828	1093	1.65E+00	3.86E+01	1.76E+00	8.01E+00	2.47E+02	1.92E+01	7.45E-01	1.35E-01	4.75E-02

Note : For calculating each environmental load of concrete in studied system (Figure 1), the following transport system was assumed: all of the cementitious materials are transported by a 23 ton capacity hydraulic truck, while aggregates are transported by a 15 ton capacity dump truck; and the fresh concrete produced from the plant is transported to a building site by a 6 m<sup>3</sup> capacity transit-mixer truck. Water drawn from Han-river is assumed to be used for concrete mix.

차지하고 있다. 다음으로 발생량이 많은 것은 유연탄 소비량인데 이는 OPC 생산을 위한 석회석의 소성과정에서 주로 사용되는 것이 유연탄이기 때문이다. 일반적으로 플라이애시 치환율이 증가할수록 각 환경부하량은 감소한다. 동일 콘크리트 설계 압축강도( $f_{ck}$ )에서 FA 치환율이 0%에서 30%로 증가할 때 CO<sub>2</sub> 발생량은 32% 절감하였으며, 유연탄 소비량은 33% 감소하였다.

### 2.3 환경영향평가

환경영향평가에서는 LCI DB 분석결과를 환경에 미치는 영향 크기로 전환시키기 위해 주관적인 측면을 최소화하고 환경영향의 크기를 정량적으로 전산화하기 위하여 분류화, 특성화, 정규화 및 가중치 부여의 과정의 단계를 거쳐 평가한다. 본 연구에서는 주로 환경부[10] 및 Yang et al[16]에 의해 제시된 한국형 환경영향 평가지표 방법론(식 1)을 따라 각 범주들에서 콘크리트의 환경영향 크기( $W_i$ )를 정량화하였다.

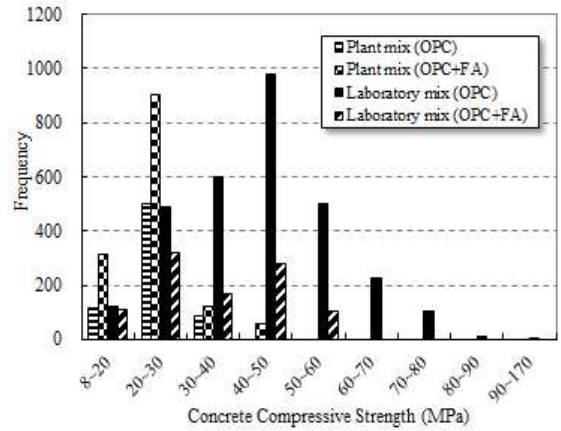
$$W_i = \frac{CI_i}{N_i} \quad w_i = \frac{\sum_j (Load_j \cdot eqv_{i,j})}{N_i} \quad w_i \quad \text{-----} \quad (1)$$

여기서  $CI_i$ 는 영향범주  $i$ 에 포함된 모든 목록항목( $j$ )들이 소속된 영향범주에 미치는 영향의 크기이며,  $N_i$ 는 영향범주  $i$ 의 정규화 기준값이며,  $w_i$ 는 영향범주  $i$ 의 가중치 값이며,  $Load_j$ 는  $j$ 번째 목록항목의 환경부하량이며,  $eqv_{i,j}$ 는 영향범주  $i$ 에 속한  $j$ 번째 목록항목의 특성화 계수 값이다. 각 목록항목의 특성화 계수는 환경부[10]에서 제시한 값을 이용하였다.

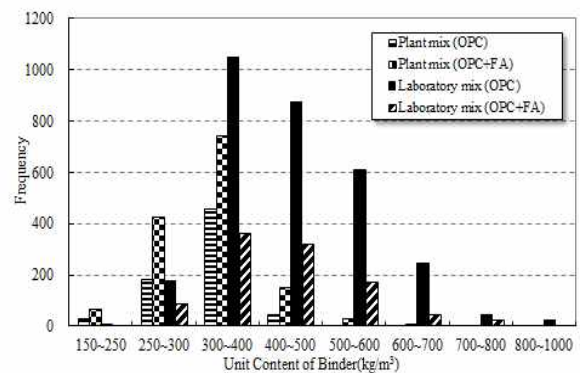
## 3. 콘크리트의 환경영향 평가

### 3.1 콘크리트 배합에 대한 데이터베이스

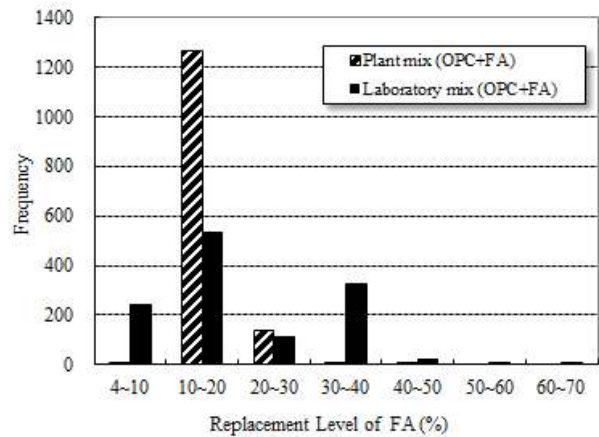
플라이애시가 콘크리트의 환경영향에 미치는 영향을 평가하기 위하여 국내 논문집(대한건축학회, 한국콘크리트학회 및 한국건축사공학회 등) 및 레미콘 시를 중심으로 콘크리트 배합 및 28일 압축강도에 대한 데이터베이스를 구축하였다. 이 데이터베이스는 모두 4023개의 실내배합과 2120개의 레미콘 배합을 포함하고 있다(Figure 2).



(a) Compressive Strength at 28 days



(b) Unit Content of Binder



(c) Replacement Level of FA

Figure 2. Distribution of main parameters in the database

이 중 결합재로서 OPC만을 사용한 콘크리트는 실내 3024배합, 레미콘 713배합이며, FA가 치환된 콘크리트는 실내 999배합, 레미콘 1407배합이다. 재령 28일 압축강도



의 범위는 OPC 콘크리트의 경우 실내배합에서는 7.7 MPa ~128 MPa, 레미콘 배합에서는 16 MPa~52 MPa이며, OPC+FA 콘크리트의 경우에는 실내배합에서는 13 MPa~93 MPa, 레미콘 배합에서는 8 MPa~71 MPa이다. 단위 결합재 양의 범위는 OPC 콘크리트의 경우 실내배합에서는  $150 \text{ kg/m}^3 \sim 900 \text{ kg/m}^3$ , 레미콘 배합에서는  $58 \text{ kg/m}^3 \sim 489 \text{ kg/m}^3$ 이며, OPC+FA 콘크리트의 경우에는 실내배합에서는  $228 \text{ kg/m}^3 \sim 1,115 \text{ kg/m}^3$ , 레미콘 배합에서는  $142 \text{ kg/m}^3 \sim 616 \text{ kg/m}^3$ 이다. 일반적으로 레미콘 배합과 실내배합에서 동일 압축강도에 대한 단위 결합재양의 차이는 거의 없었다. 또한 FA의 치환율이 단위결합재 양 변화에 미치는 영향도 특별히 나타나지 않았다. 플라이애시의 최대 치환율은 실내배합의 경우 67%, 레미콘 배합의 경우 40% 이었다.

### 3.2 환경영향 크기

Table 2에 나타난 FA 치환율이 30%인 콘크리트의 재료, 운송 및 배합단계에서 모든 목록항목들이 소속된 영향 범주에 미치는 영향의 크기를 Figure 3에 나타내었다. 영향크기는 지구온난화, 광화학 산화생성물, 무생물 자원고갈 순으로 나타났는데, 이들 값에서 OPC가 차지하는 비율은 86% 이상이며, 운송이 지구온난화 영향크기에서 차지하는 비율은 13.34%이었다. 콘크리트의 전과정 부영양화, 산성화 및 인간독성의 크기는 무시할 만큼 작았다. 따라서 본 연구에서는 콘크리트의 환경영향에 대한 플라이애시의 효과를 지구온난화, 무생물자원고갈 및 광화학 산화물생성 관점에서 분석하였다.

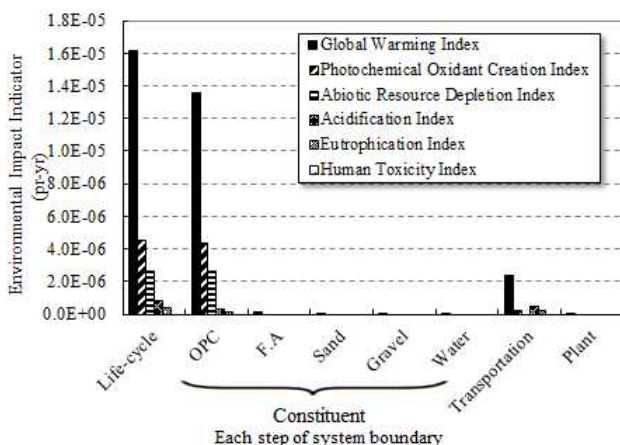


Figure 3. Typical life-cycle environmental impact of concrete in each step of system boundary

### 3.3 결합재 지수 ( $B_{ck}$ )

콘크리트의 전과정 평가에 의한 환경영향 지수의 크기는 주로 OPC를 포함한 결합재 양에 의해 결정되었다(Figure 3). Yang et al[15]에 의해 제시된 결합재 지수 ( $B_{ck} = B/f_{ck}$ )와 콘크리트 압축강도의 관계를 Figure 4에 나타내었는데, 여기서  $B$ 는 단위 결합재 양이다.  $B_{ck}$ 는 플라이애시 치환에 관계없이 콘크리트 압축강도의 증가와 함께 감소하였다. 이는 Yang et al[16]에서 제시한 것처럼 압축강도가 증가함에 따라 단위 압축강도 (1 MPa) 발현을 위한 결합재 양이 감소될 수 있음을 의미한다. 결합재 지수의 감소속도도 GGBS 치환율에 따른 분석 결과[16]와 유사하게  $f_{ck}$ 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 않았고 단지 실내배합에서 OPC+FA 콘크리트의 결합재 지수가 약간 높은 경향으로 있었다.

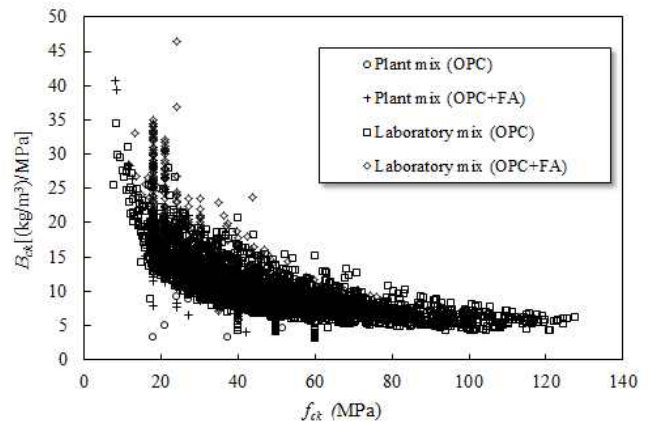


Figure 4.  $f_{ck}$  versus  $B_{ck}$

### 3.4 FA 치환 콘크리트의 환경영향 크기 평가모델

콘크리트의 환경영향을 주관적이지 않고 정량적으로 평가하는 것은 매우 중요하다. 따라서 콘크리트 환경영향 평가에 대해 정량적으로 쉽고 간단하게 접근할 수 있는 자료 또는 가이드라인의 확립은 실무적 측면에서 매우 유용하게 이용될 수 있다. 콘크리트의 각 범주별 환경영향의 크기를 간단하게 예측하기 위한 모델을 제시하기 위하여 결합재 지수 및 FA 치환율을 주요 변수로 다중회귀분석을 수행하였다. 콘크리트의 각 범주별 환경영향의 크기는 FA 치환율

의 증가와 함께 비선형적으로 감소하며 이론적으로 결합재가 없으면 콘크리트의 생산이 불가능하므로 환경영향도 없다. 이와 같은 경계조건을 고려하면, FA 치환율에 따른 콘크리트의 범주  $i$ 에서 환경영향 지수( $\lambda_i$ )와 결합재 지수( $B_{ck}$ )의 관계는 다음 식과 같이 모델링될 수 있다.

$$\lambda_i = A_1 [1 - (R_f/100)^{B_1}] B_{ck} \quad (2)$$

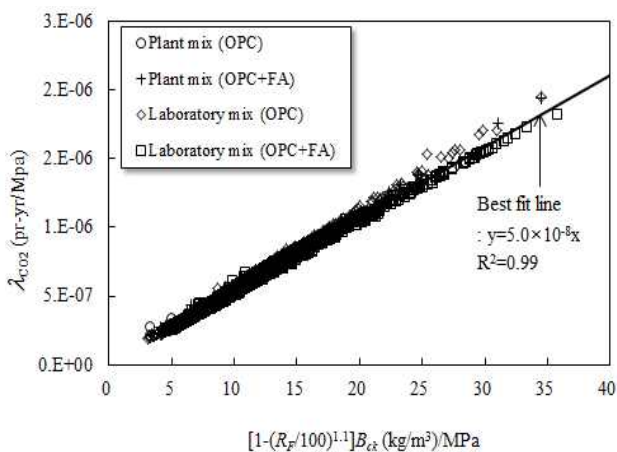
여기서  $A_1$ 과  $B_1$ 은 실험상수이다. 회귀분석 결과를 나타낸 Figure 5로부터  $A_1$ 과  $B_1$ 의 값은 각각  $\lambda_{CO_2}$ 에 대해  $5.0 \times 10^{-8}$ 와 1.1을,  $\lambda_{ARD}$ 에 대해  $1.0 \times 10^{-8}$ 와 0.85을,  $\lambda_{POC}$ 에 대해  $2.0 \times 10^{-8}$ 와 1.0을, 그리고  $\lambda_T$ 에 대해  $8.0 \times 10^{-8}$ 와 1.2로서 평가될 수 있었다. 환경영향 지수  $\lambda_i$ 와 결합재 지수  $B_{ck}$ 는 콘크리트 압축강도로 무차원한 값이다. 결국, 플라이애시가 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.

$$WI_{CO_2} = 5.0 \times 10^{-8} [1 - (R_f/100)^{1.1}] B \quad (3)$$

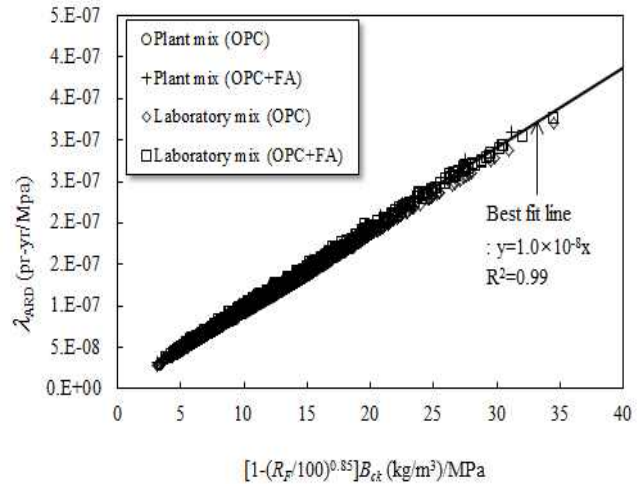
$$WI_{ARD} = 1.0 \times 10^{-8} [1 - (R_f/100)^{0.85}] B \quad (4)$$

$$WI_{POC} = 2.0 \times 10^{-8} [1 - (R_f/100)] B \quad (5)$$

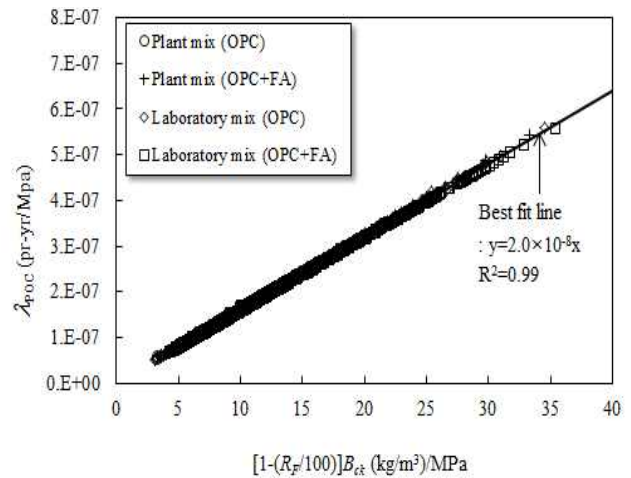
$$WI_T = 8.0 \times 10^{-8} [1 - (R_f/100)^{1.2}] B \quad (6)$$



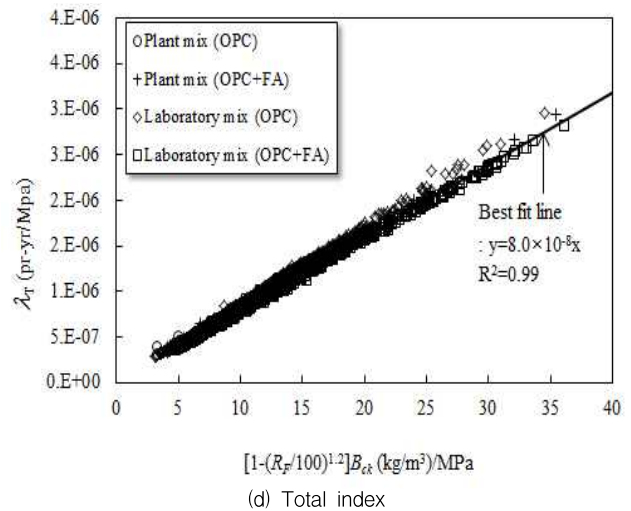
(a) Global warming index



(b) Abiotic resource depletion index



(c) Photochemical oxidant creation index



(d) Total index

Figure 5. Regression analysis for  $\lambda_i - B_{ck}$  relationship

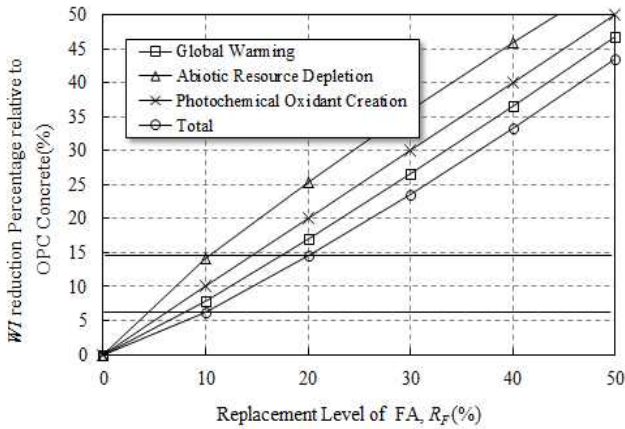


Figure 6. Design chart for determining  $R_f$  in reducing environmental impact of concrete

### 3.5 콘크리트 환경영향 저감과 FA 치환율의 관계

플라이애시가 치환되지 않은 OPC 콘크리트의 범주  $i$ 에서의 환경영향 지수는 식 (2)로부터 단순히  $A_i \cdot B_{ck}$ 로 산정된다. 따라서 식 (2)의  $[1 - (R_f/100)^{B_i}]$ 는 OPC 콘크리트에서 결합재 양이 동일할 때 FA의 치환에 따른 환경영향의 크기 감소율을 의미한다. 식 (3)~식 (6)을 이용하여 콘크리트에서 FA 치환율에 따른 환경영향 크기 저감비를 Figure 6에 나타내었다. IGCC (international green construction code)[4]에서 요구하는 전과정 환경영향 크기의 저감율 20%를 고려하면 OPC 콘크리트의 배합에서  $R_f$ 는 약 25% 이상으로 설계되어야 한다. 이와 같이 식 (5)~식 (6) 또는 Figure 6의 설계 차트를 이용하면 콘크리트 배합에서 목표 환경영향 크기 저감율에 대하여 FA 치환율을 간단하게 결정할 수 있다.

## 4. 결론

플라이애시가 콘크리트의 전과정 환경영향 크기에 미치는 영향을 실내배합 4023개와 레미콘 배합 2120개의 데이터를 활용하여 정량적으로 평가하였다. 2013년 개정된 KS L 5201 포틀랜드 시멘트는 그 구성성분들의 차이로 인해 LCI가 변할 수 있다. 따라서 본 연구에서 평가한 환경영향 값은 2013년 개정된 시멘트의 LCI를 적용할 경우 다소 다를 수 있다. 본 연구에서 고려된 시스템 경계는 요람에서 시공 전 단계까지이며, 플라이애시 치환에 따른 콘크리트의 전과정 환경영향평가로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 콘크리트의 영향크기는 지구온난화, 광화학 산화생성물, 무생물 자원고갈 순으로 나타났는데, 이들 값에서 OPC가 차지하는 비율은 86% 이상이며, 운송이 지구온난화 영향크기에서 차지하는 비율은 13.34%이었다.
- 2) 콘크리트의 실내배합과 레미콘 배합에 따른 환경영향 크기의 차이는 무시할 만큼 작았다.
- 3) 플라이애시가 치환된 콘크리트의 각 범주에서 환경영향 크기는 단위 결합재 양 및 플라이애시 치환율의 함수로 합리적으로 선형 모델링 될 수 있었다.
- 4) 플라이애시 치환율이 25% 이상일 때 콘크리트의 총 환경영향 크기를 20% 이상 저감시킬 수 있었다.

## 요 약

혼화재로서 플라이애시가 콘크리트의 전과정 환경영향에 미치는 효과를 정량적으로 평가하기 위하여, 4023개의 실내배합 및 2120개의 레미콘 배합을 분석하였다. 전과정 환경 평가에서 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 플라이애시 치환율의 증가와 함께 감소하였으며, 대부분 보통 포틀랜드 시멘트의 양에 의해 결정되었다. 이를 고려하여, 콘크리트의 환경영향 지표들은 단위 결합재 양 및 플라이애시 치환율의 함수로 간단하게 모델링 될 수 있었다.

키워드 : 환경영향, 플라이애시, 단위 결합재 양, 지구 온난화

## Acknowledgement

This research was supported by a grant(Code 11-Technology Innovation-F04) from Construction Technology Research Program(CTRP) funded by Ministry of Land, Infrastructure and Transport(MLIT) of Korean government.

## References

1. Task Group 3.3, Environmental design, Switzerland: International Federation for Structural Concrete (fib); 2004, 74 p.
2. Malhotra VM, Introduction: Sustainable development and concrete technology. ACI Concrete International, 2002 Jul;24(7):22.
3. Korea Concrete Institute, Concrete and Environment, Seoul: Kimoonang Publishing Company: c2011, Chapter 12, Environmental management of concrete and concrete structures: p.224–44, Korean.
4. IgCC Public Comment Hearing Committee, International green construction code, Washington, DC: International Code Council; 2012, 147 p.
5. CEN, CEN Guide 4: Guide for addressing environmental issues in product standards, 3rd ed, Brussels: European Committee for Standardization: 2008, 36 p.
6. Choi DS, Lee ME, Cho KH, A study on environmental impact assessment in domestic construction industry using life cycle, Journal of KIAEBS, 2012 Mar;6(1):46–55.
7. Korea Concrete Institute, Concrete and Environment, Seoul: Kimoonang Publishing Company: c2011, Chapter 1, Reduction of CO<sub>2</sub> in the cement industry: p.16–30, Korean.
8. Korea Concrete Institute, Concrete and Environment, Seoul: Kimoonang Publishing Company: c2011, Chapter 6, Status and recycling of power industrial by-products: p.100–22, Korean.
9. ISO, Environmental management–Life cycle assessment–Principles and Framework, ISO 14040, Geneva: International Standardization Organization (ISO); 2006, 20 p.
10. Korean Ministry of Environment, Hankookhyeng Hwangyeong Yeonghyang Pyeonggajisu Bangbeopron [Korean environmental impact assessment index methodology], 2003, 166 p. Korean.
11. Yang KH, Moon JH, Design of supplementary cementitious materials and unit content of binder for reducing CO<sub>2</sub> emission of concrete, Journal of Korea Concrete Institute; 2012 Oct;24(5):597–604.
12. KEITI, Korea LCI Database Information Network [Internet], Seoul: KEITI; 2014 Jun [cited 2014 Jun 23]. Available from: [http://www.edp.or.kr/lci/lci\\_db.asp](http://www.edp.or.kr/lci/lci_db.asp)
13. Sakai K, Kawai K, JSCE Guidelines for Concrete No.7: Recommendation of environmental performance verification for concrete structures, Japan Society of Civil Engineering; c2006, 576 p.
14. Baumann H, Rydberg T, Lifecycle Assessment: A comparison of three methods for impact analysis and evaluation, Journal of Cleaner Production, 1994 Mar;2(1):13–20.
15. Yang KH, Song JK, Song KI, Assessment of CO<sub>2</sub> reduction of alkali-activated concrete, Journal of Cleaner Production, 2013 Jan;39(1):265–72.
16. Yang KH, Seo EA, Jung YB, Tae SH, Effect of ground granulated blast-furnace slag on life-cycle environmental impact of concrete, Journal of the Korea Concrete Institute, 2014 Feb;26(1):13–21.
17. European Commission, European reference Life-Cycle Database Information Network [Internet], Ispra: European Commission; 2014 Jun [cited 2014 Jun 23]. Available from: <http://elcd.jrc.ec.europa.eu/ELCD3/>