순환자원 사용에 따른 시멘트 제조공정의 환경성 분석

Environmental Impact Analysis on Cement Manufacturing Process with Waste Utilization

최우진* *Woo-Zin Choi*
박은규** *Eun-Kyu Park*
박기학*** *Ki-Hak Park*

1. 서론

최근 우리 정부는 저탄소 녹색성장 기본법을 시행함으로써 국제 사회에 저탄소 녹색성장을 새로운 국가비전으로 추진하겠다는 강력한 의지를 표명하였다. 이 법의 주요 내용은 오는 2020년까지 '온실가스 배출 전망치(BAU)' 대비 국가 온실가스 배출량의 30 %를 감축하는 것을 목표로 하고 있다. 이미 잘 알려진 바와 같이 에너지의 대부분을 해외에 의존하고 있는 우리나라는 화석연료의 사용량을 대폭 줄이는 한편 신재생에너지 사용의 확대를 본격적으로 추진해오고 있다. 에너지 다소비 업종인 시멘트 산업의 경우 에너지원단위를 줄이기 위한 노력을 지속적으로 해오고 있으며, 특히 10여년 전부터 폐타이어, 폐플라스틱, 폐유 등 순환자원을 대체 연료로 활용해오고 있다. 따라서 국내 시멘트 산업은 시멘트 제조 연료의 약 85 %를 유연탄으로 사용하고 있어서 향후 CO_2 감축을 위한 순환자원의 확대 활용이 요구되고 있다.

본 연구에서는 국내 1종 포틀랜드 시멘트 제조 공장에서 수집한 자료를 바탕으로 순환자원의 사용에 따른 환경성 분석을 수행하였으며, 대체연료의 사용에 의한 CO_2 발생량을 정량화하였다. 또한 사용중인 대체연료를 천연연료로 적용하였을 경우에 대한 환경부하 저감 효과 및 에너지 절감효과 등을 분석하였다.

2. 시멘트 산업과 순환자원 사용 현황

유럽의 시멘트 업체의 경우에는 폐타이어, 폐합성수지, 폐유, 종이류뿐만 아니라 폐차 잔재물(ASR)이나 동물 폐기물까지 사용하는 나라도 있다. 원칙적으로는 시멘트의 소성로에서 사용할 수 있는 폐기물의 종류는 제한하고 있지 않으나 각국의 시멘트 소성로 관련법이나 설비수준, 기술력, 폐기물의 처리정책 등으로 인하여 다소 종류의 차이가 있다. 순환자원 등의 사용으로 에너지의 약 40%를 대체연료로 활용하고 있으며, 일본의 대체연료 사용은 약 30%에 이르고 있다.

<그림 1>은 시멘트 소성로에서 순환자원 및 대체연료의 사용 현황을 제시하였다. 2000년의 경우 순환자원은 9,671천톤, 대체연료는 117천톤이 사용되었으며, 그 사용량은 지속적으로 증가하여 2008년에는 순환자원과 대체연료는 각각 14,386천톤, 1,253천톤이 사용되었다. 순환자원의 사용량은 약 50% 정도 증가한 반면 대체연료의 사용량은 약 10배 정도 증가하였다. 또한 2008년 순환자원 중 약 8.7%가 대체연료로 사용되었다.

국내 시멘트 소성로에서 연료용으로 사용하고 있는 순환자원은 폐타이어 및 고무류, 폐플라스틱 등의 합성수지, 정제유 및 재생연료유 등을 사용하고 있다. 다음 <표 1>에는 국내 시멘트 업계의 대체연료 사용 현황 등을 제시하였다.

2008년의 경우 순환자원의 사용량은 폐타이어 및 고무류 229,990톤, 폐플라스틱 등 합성수지 464,509톤, 정제유 및 재생연료유 231,438톤 등 총 925,937톤을 사용하였으며, 2000년의 사용량 116,623톤보다 약 8배 증가하였다.

국내 전체 폐기물 발생량의 약 20%가 시멘트 산업에서 재활

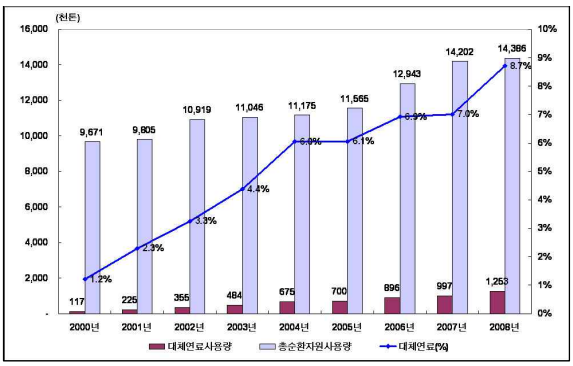

그림 1. 시멘트 소성로의 대체연료 사용 현황

* 정회원, 수원대학교 환경에너지공학과 교수
wzchoi@suwon.ac.kr
** 수원대학교 폐기물자원화 기술연구소 선임연구원
*** 제이피파트너스 대표이사

표 1. 시멘트 소성로의 대체연료 사용현황

(단위 : 톤)

구분	2000년	2001년	2002년	2003년	2004년	2005년	2006년	2007년	2008년
폐타이어 및 고무류	76,069	139,220	230,290	298,025	362,682	292,096	306,210	262,556	229,990
재생유 및 정제유	34,849	71,115	97,241	114,628	151,215	180,787	209,516	219,694	231,438
폐합성수지류	5,705	14,561	27,765	71,205	161,530	227,159	380,347	539,887	464,509
계	116,623	224,896	355,296	483,858	675,427	700,042	896,073	1022,137	925,937

용되고 있으며, 시멘트 산업의 순환자원 사용 원단위는 일본의 약 65% 수준에 불과한 실정이다. 일반적으로 시멘트 산업에서 사용 가능한 순환자원의 양은 시멘트 원료의 약 20%, 사용연료의 약 30%까지 대체가 가능한 것으로 알려져 있으며, 소각/매립처리로 발생할 수 있는 2차 환경오염을 감소하는데 기여할 것으로 기대된다. 시멘트 산업에서 사용되는 대체연료의 평균 발열량은 폐타이어 8,613 kcal/kg, 폐플라스틱 6,679 kcal/kg, 폐유 4,832 kcal/kg, RDF 8,185 kcal/kg으로 유연탄의 발열량과 동등하거나 그 이상이며, 탄소 배출계수는 폐타이어 24 ton-C/TJ, 폐플라스틱 21 ton-C/TJ, 폐유 21 ton-C/TJ, 폐합성수지 등 RDF 26 ton-C/TJ이다.

일본 시멘트 소성로의 순환자원 사용량에 의한 연료이용을 <표 2>에 제시하였으며, 폐플라스틱의 경우 2002년 211천톤에서 2006년 365천톤으로 약 1.7배 이상 증가하였으며, 폐유와 더불어 점차 증가하는 추세를 보이고 있다. 재생유(WDF)의 사용량은 약 245천톤 수준을 유지하고 있는 것으로 조사되었다. 그러나 폐타이어의 경우 2006년 사용량은 2002년 사용량보다 약 35% 감소하여 163천톤을 사용하였으며, 폐타이어 사용량은 점차 감소하는 경향을 보이고 있다.

3. 연구 방법

본 연구에서는 시멘트 제조공정에서 사용하는 순환자원의 환경성 분석을 위하여 전과정평가(LCA : life cycle assessment) 기법을 사용하였다. 전과정평가는 ISO 14040시리즈의 기술적 근간을 이루고 있으며, 대상 시스템의 전과정(Life Cycle ; 원료획득, 운송, 생산, 사용, 폐기 및 재활용)에 대한 투입물과 산출물의 정량적 목록을 작성하고 잠재적 환경영향을 평가하는 방법으로 방법론이 표준화, 규격화 되어있다. 또한 LCA는 상호 연관된 네가지의 요소로 크게 목록 및 범위 설정(goal definition and scope), 목록분석(inventory analysis), 영향평가(impact assessment), 결과해석(interpretation)의 4단계와 보고(reporting) 및 검토(critical review) 등으로 구성된다.

표 2. 일본 시멘트 산업의 순환자원 사용현황

(단위 : 천톤)

구분	2002년	2003년	2004년	2005년	2006년	2007년
폐플라스틱	211	255	283	280	365	408
재생유(WDF)	252	238	236	228	249	279
폐타이어	253	230	221	219	163	148
폐유	100	173	214	194	225	200

본 연구의 대상 시스템은 1종 포틀랜드 시멘트 제조공정으로 연구의 목적과 관련된 기능은 건축공사 및 토목공사 원료로 사용되며, 기능단위 및 기준흐름은 1종 포틀랜드 시멘트 1톤으로 정의하였다. 연구 대상인 1종 포틀랜드 시멘트를 생산하는 국내 공장 전체를 대상으로 연구범위에 포함하여 데이터를 수집하고 평균화하였으며, 연구의 시스템 경계는 천연 원료의 채굴로부터 시멘트 제품을 제조하여 최종 1종 포틀랜드 시멘트 제품을 생산할 때까지로 하였다.

<그림 2>에는 시멘트 세부 제조공정으로 채광 및 분쇄, 원료분쇄, 소성, 시멘트분쇄 등을 거쳐 최종 제품화까지 Cradle to Gate로 정의하였다. 1종 포틀랜드 시멘트는 현재 10개사 12개 생산 공장이 가동중에 있으며, 본 연구의 LCI용 데이터는 1종 포틀랜드 시멘트를 생산하는 공장의 자료를 이용하였다.

시멘트 제조공정의 환경성 분석 방법론은 산업자원부의 영향평가 방법론을 적용하였으며, 자원고갈, 지구온난화, 오존층파괴, 광화학산화물생성, 산성화, 부영양화, 인간 독성, 생태독성 등 8가지 영향범주로 나누어 수행하였다. 또한 영향범주 중 대체연료 사용에 따른 시멘트 제조공정의 지구온난화 영향을 비교 분석하였으며, 분석에 사용한 CO_2 배출계수는 IPCC 탄소배출 원단위를 적용하였다. 또한 폐유, 폐타이어, 폐플라스틱 등의 소각

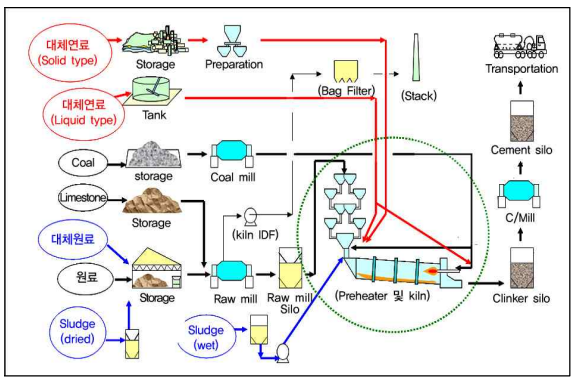

그림 2. 시멘트 제조 공정 및 시스템의 범위

처리로 인한 환경영향 분석은 국내 LCI 데이터베이스를 활용하였다.

4. 연구 결과

시멘트 소성로에서 재활용 가능한 순환자원을 소각처리 할 경우 발생하는 환경영향을 <표 3>에 나타내었으며, 지정폐기물 경우 1 kg 소각시 3.549E-05 환경영향 가중치 값, 일반폐기물 1.490E-05 환경영향 가중치 값으로 조사되었다. 특히 폐기물 1 kg 소각시 지구온난화에 미치는 영향을 지구온난화 특성화 값(g CO_2-eq)으로 환산할 경우 지정폐기물과 일반폐기물이 각각 343 g CO_2-eq/kg, 123 g CO_2-eq/kg으로 조사되었다. 그러나 폐기물을 소각처리하지 않고 에너지원으로 재활용함으로써 얻어지는 효과는 비용적인 측면뿐만 아니라 환경적으로 얻어지는 효과까지 매우 큰 것으로 나타났다.

1종 보통 포틀랜드 시멘트 제조공정의 전과정평가 결과를 <표 4>에 제시하였다. 전과정평가 결과 지구온난화가 4.48E-02로 가장 크게 나타났으며, 광화학 산화물생성 1.58E-02, 자원고갈 1.49E-02의 순으로 조사되었다.

환경부하 중 가장 높은 지구온난화에 대하여 시멘트 종류별 제조공정의 CO_2 배출량으로 분석하였으며, 그 결과를 <표 5>에 나타내었다. 시멘트 1톤 제조시 CO_2 평균 배출량은 105.6 kg이었으며, 1종 포틀랜드 시멘트는 860.3 kg, 슬래그 시멘트 192.3 kg으로 분석되었다. 1종 포틀랜드 시멘트 제조시 지구온난화에 영향을 미치는 물질 중 CO_2가 전체 영향의 96.4%를 차지하고 있으며, 공정별 기여도는 연료에 의한 CO_2 발생비율이 43.2%, 원료의 반응에 의한 발생비율이 56.8%로 구성되어 있다. 본 연구결과 포틀랜드 시멘트 1톤 생산시 평균 CO_2 배출량 860.3 kg 중 연료사용에 따른 CO_2 발생량이 328.87 kg으로 분석되었으며, 나머지 CO_2는 석회석의 탈탄산 반응에서 배출되는 양으로 판단된다.

본 연구의 대상 업체에서 시멘트 1톤 생산시 사용되는 에너지와 에너지 종류별 발생되는 CO_2의 발생량을 IPCC 탄소배출계수를 적용하였으며, 대체연료의 배출계수는 국내 LCI 데이터베이스 일반·지정폐기물 소각시 발생하는 CO_2 발생량을 적용하여 조사·분석한 결과를 <표 6>에 제시하였다. 2008년의 경우 사용되는 총 에너지는 3,341 MJ/ton으로 이중 화석연료가 2,519.8 MJ/ton으로 약 75.4 %로 가장 많았으며, 대체연료 421.0 MJ/ton(12.6 %), 전력 400.5 MJ/ton(12.0 %)으로 구성되어 있다. 사용되는 화석연료는 유·무연탄, 중유, 석유코크스 등이며 유·무연탄의 사용에 의한 CO_2의 배출이 가장 많은 것으로 나타났다. 화석연료의 CO_2 발생량 원단위 결과 0.098 CO_2-kg/MJ, 대체연료 0.015 CO_2-kg/MJ(발열량 기준 : 0.0838 CO_2- kg/MJ)로 대체연료가 CO_2 배출이 적은 것으로 나타났다. 즉, 지구온난화에 미치는 영향을 최소화 할 수 있

표 3. 재활용 가능 폐기물의 소각처리시 환경영향 평가 결과

영향범주명	지정폐기물 1 kg 소각	일반폐기물 1 kg 소각
자원고갈(ARD)	1.071E-05	5.368E-06
산성화(AP)	1.231E-06	8.131E-07
부영양화(EP)	4.892E-07	3.543E-07
지구온난화(GWP)	1.785E-05	6.397E-06
인간독성(HTP)	3.769E-06	9.593E-07
오존층파괴(ODP)	1.096E-08	6.184E-08
광화학산화물생성(POCP)	1.418E-06	8.650E-07
생태독성(TETP)	1.058E-08	8.070E-08
가중치 합계	3.549E-05	1.490E-05
지구온난화 특성화(g CO_2-eq)	343	123

표 4. 1종 포틀랜드 시멘트 제조공정의 전과정 평가 결과

영향범주명	1종 보통 포틀랜드 시멘트 1톤 생산
자원고갈(ARD)	1.49E-02
산성화(AP)	5.68E-04
부영양화(EP)	3.52E-04
지구온난화(GWP)	4.48E-02
인간독성(HTP)	2.92E-03
오존층파괴(ODP)	1.02E-04
광화학산화물생성(POCP)	1.58E-02
생태독성(TETP)	1.43E-04
가중치 합계	7.95E-02

표 5. 시멘트 종류별 CO_2 배출량 분석 결과

구분	포틀랜드 시멘트				슬래그 시멘트	시멘트
	1종	2종	3종	5종		
kg-CO_2/ton-cement	8.603E + 02	1.381E + 07	6.681E + 06	1.442E + 07	1.923E + 02	1.056E + 03
가중치 합계	7.954E - 02	1.260DE + 03	6.094E + 02	1.315E + 03	1.790E - 02	7.654E - 02

표 6. 시멘트 소성로의 에너지 사용량에 대한 CO_2 발생량

(단위 : 시멘트 1톤)

구분		에너지 (MJ, %)	사용량 (kg)	발열량 (MJ/kg)	CO_2 발생량 (kg, %)**
천연연료	석탄	2,418.3(72.4)	91.15	26.53	237.56(77.29)
	중유	9.9(0.3)	0.33	30.3	0.78(0.25)
	석유코크스	91.6(2.7)	3.01	30.39	9.2(2.99)
	계	2,519.8(75.4)	94.5	-	247.54(80.53)
대체연료*	폐유	99.4(3.0)	4.48	22.19	1.53(0.5)
	폐타이어	115.5(3.5)	4.45	25.95	1.53(0.5)
	폐플라스틱	143.3(4.3)	8.99	15.94	1.1(0.36)
	산업폐기물	62.8(1.9)	3.32	18.9	0.42(0.14)
	계	421.0(12.6)	21.25	-	4.58(1.49)
연료 합계		2,940.8(88.0)		-	252.12(82.02)
전력(MJ)		400.5(12.0)	-	-	55.26(17.98)
합계		3,341(100)	-	-	307.38(100)

* 대체 연료의 CO_2 배출량은 일반·지정폐기물 LCI 데이터베이스 활용으로 산출함.

** 지정·일반폐기물 소각시 발생되는 CO_2 원단위(LCI 데이터베이스) 적용하여 산출하였음. 각 사용량 폐유, 폐타이어 지정폐기물. 플라스틱, 산업폐기물 일반폐기물. 바이오가스 IPCC 고체 바이오가스 적용

는 방안으로 대체연료의 사용이 확대 되어야 할 것으로 판단된다.

현재 시멘트 1톤 생산시 대체연료로 사용되고 있는 421.0 MJ/ton-cement(연료점유율 12.6 %)을 화석연료와 전력으로 대체할 경우 발생되는 CO_2 배출량 산정 결과를 <표 7>에 나타내었다. 국내 전력을 이용하여 에너지원으로 충당할 경우 약 58.60 kg-CO_2/ton-cement 발생하게 되며 대체연료 사용 시보다 약 25.87 kg-CO_2/ton-cement를 더 발생하게 된다. 또한 유연탄으로 대체하였을 경우 7.38 kg-CO_2/ton-cement를 저감할 수 있는 것으로 분석되었다. 조사대상 시멘트 사업장에서 연간 시멘트 생산량 51,653,418톤(2008년 기준)에서 대체연료의 사용으로 환경부하 저감효과를 분석한 결과 유연탄 기준 약 385,105톤 CO_2, 무연탄의 경우 약 465,466톤 CO_2 발생 저감에 기여한 것으로 분석되었다.

표 7. 대체연료를 다른 에너지로 전환할 경우의 CO_2 배출량 산정 결과

구분	421.0 MJ/ton을 대체할 경우 CO_2 배출량(kg)	CO_2 저감량 (kg/ton-cement)
무연탄	41.38	8.92
유연탄	39.83	7.38
중유	32.59	0.12
석유코크스	42.44	9.99
전력	58.60	25.87

시멘트 1톤 생산시 사용된 대체연료 421.0 MJ을 에너지열량 환산기준을 적용하여 화석연료와 전력으로 대체가 가능한 양과 비용을 분석하여 결과를 <표 8>에 제시하였다. 즉, 1톤의 시멘트 제조공정에서 사용되는 에너지의 양은 발열량 기준으로 B-C유가 41.4 MJ로 가장 높았으며, 무연탄, 유연탄이 그 다음으로 나타났다. 이를 대체 가능량으로 환산할 경우 유연탄 16.19 kg, 무연탄 15.36 kg, B-C유 10.17 l, 전력 116.94 kWh로 조사되었다. 2008년 시멘트 생산량 51,653,418톤을 감안할 경우 대체연료 사용으로 연간 유연탄 836,269톤, 무연탄 793,397톤, B-C유 525,315 k l 의 화석연료와 전력 6,040 GWh를 절약한 것으로 조사되었다. 이를 비용으로 환산할 경우에는 유연탄 약 920억원, 무연탄 약 567억원, B-C유 약 3,204억원, 전력 약 3,322억원의 경제적 이익이 있는 것으로 조사되었다.

5. 결론 및 고찰

본 연구에서는 순환자원의 사용에 따른 시멘트 제조공정의 환경성 분석을 수행하였으며, 소성로의 CO_2 배출량을 정량화하였다. 순환자원 중 대체연료의 사용으로 인한 환경부하 저감효과 및 에너지 절감효과 등을 분석하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 시멘트 소성로에서 사용되는 대체연료 폐기물 1 kg 소각 시 지구온난화에 미치는 영향을 LCA 기법으로 분석하였으며, 그 결과 지구온난화 특성화 값(CO_2 배출량)으로 환산할 경우 지정폐기물 소각 시 343 g 일반폐기물 소각 시 123 g이 발생하는 것으로 조사되었다.

표 8. 대체연료의 화석연료 및 전력 대체 가능량 산정 결과

구분	발열량 (MJ/kg[1)])	대체 가능량 (kg/ton-cement)	대체 가능량 (2008년 시멘트 생산량)	대체 저감비용(원)* (2008년 시멘트 생산량)
유연탄[2)]	26.0	16.19 kg	836,269톤	92,000백만
무연탄[3)]	27.4	15.36 kg	793,397톤	56,728백만
B-C유[4)]	41.4	10.17 l	525,315 k l	320,442백만
전력[5)]	3.6 MJ/kWh	116.94 kWh	6,040 GWh	332,200백만

주 1) 에너지기본법시행규칙별표 에너지열량환산기준의 총발열량 기준

2) 발열량 6,080 kcal/kg, 가격 100 usd/t, 1 USD = 1,100원

3) 발열량 6,000 kcal/kg, 가격 65 usd/t, 1 USD = 1,100원

4) 2010년 1월 기준(610원/ l)

5) 한국전력공사 산업용(갑) 고압B 선택 I 기준(전력량요금 55원/kw)

* 비용 산정시 대체연료의 구입 및 운송 등의 제반비용 제외

(2) 1종 포틀랜드 시멘트 제조 시 사용되는 에너지는 총 3,341 MJ/ton-cement로 화석연료 75.4 %, 대체연료 12.6 %, 전력 12.0 %로 조사되었다. 또한 에너지 사용에 따른 CO_2의 배출량은 화석연료 80.53 %, 대체연료 1.49 %, 전력 17.98 %로 대체연료의 경우 화석연료나 전력에 비해 적은 양의 CO_2를 배출하는 것으로 조사되어 대체연료의 사용으로 CO_2 배출량의 저감이 가능할 것으로 판단된다.

(3) 소성로에서 사용하는 대체연료에 해당되는 421.0 MJ/ton-cement는 유연탄에 비해 7.38 kg-CO_2/ton-cement의 저감효과, 무연탄에 비해 8.92 kg-CO_2/ton-cement의 환경저감 효과가 발생하는 것으로 나타났다. 대체연료의 사용으로 유연탄 환산 시 약 385,105톤, 무연탄 약 465,466톤의 CO_2 저감효과가 있는 것으로 조사되었다.

(4) 소성로에서 사용하는 대체연료는 2008년 한 해 동안 유연탄 환산 시 약 836,269톤, 무연탄 793,397톤, 전력 6,040 GWh를 대체한 것으로 나타났다. 대체량을 비용으로 환산할 경우에는 유연탄의 경우 약 920억원, 무연탄 약 567억원, B-C유 약 3,200억원, 전력 약 3,322억원의 에너지 비용을 절약한 것으로 조사되었다.

(5) 현재 시멘트 산업에서 사용하는 대체연료의 사용량을 확대할 경우 에너지비용의 절감과 함께 CO_2의 발생 저감을 통하여 시멘트 산업의 국제경쟁력을 강화할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

1. 황성원, 시멘트 산업에서의 폐기물 사용에 따른 환경영향 연구, 한양대학교 석사학위논문, 2008.
2. 산업자원부 에너지관리공단 신·재생에너지센터, 2004년 대체에너지보급 통계, 2006.
3. 이종열, 전병용, 시멘트 산업과 환경, 2006.
4. 윤석경, 시멘트 산업 대체연료의 온실가스 배출계수 개발 및 저감량 평가연구, 세종대학교 석사학위논문, 2007.
5. 한국양회공업협회, http://www.cement.or.kr/.
6. 한국양회공업협회, 순환자원 처리방법에 따른 LCA 비교, 2007.
7. 국가 LCI DB(1,2,3,5,고로슬래그 시멘트 생산공정 : 지식경제부, 시멘트 : 환경부)자료.
8. 박필주, 이건모, 전과정평가를 이용한 포틀랜드 시멘트 제조공정의 지구온난화에 미치는 영향평가, 대한환경공학회지, 2003, Vol. 25, pp. 688 ~ 693.

담당 편집위원 :
권기주(한국전력공사) *kyeunkjoo@kepco.co.kr*

◇◇◇ 「포토에세이」 회원 사진 공모 ◇◇◇

「콘크리트학회지」는 격월간(홀수달)으로 발행되어 7,000여 회원을 비롯한 콘크리트 관련 업계, 학계, 유관 기관 및 단체 등에 배포되고 있습니다. 우리 학회지는 'Photo Essay'이라는 장을 마련하여 회원님들께 감성적 욕구를 충족시켜 드리고자 노력하고 있습니다. 회원님들의 적극적인 참여를 유도하기 위하여 회원님들께서 직접 촬영하신 사진과 간단한 에세이를 공모하고자 합니다.

- 공모기간 : 2010년 6월 1일 ~ 2010년 12월 31일
- 참여대상 : 우리 학회 회원(준회원 포함)
- 보내실 곳 : kke@kci.or.kr