

# 시멘트 제조공정의 폐기물 사용에 따른 시나리오 비교 연구

\*구희준, 박은규, 정찬교, 최우진  
수원대학교 환경공학과, \*환경청정기술연구센터  
445-743 경기도 화성시 봉담읍 와우리 산2-2

## A Study on Comparative Scenario Analysis of Cement Manufacturing Process with Waste Utilization

\*Hee Jun Koo, Eun Kyu Park, Chan Kyo Chung, Woo Zin Choi  
Dept. of Environmental Engineering, The University of Suwon  
\*Center for Environmental & Clean Technologies  
San2-2, Wau-ri, Bongdam-eup, Hwaseong-si, Gyeonggi-do 445-743, Korea

### ABSTRACT

In case of cement industry, large amounts of waste by-products are effectively utilized as alternative sources for fuel and raw materials. The objective of this study is to assess environmental effects on cement manufacturing process in utilization of wastes compared to the alternative waste treatment systems, such as landfill and/or incineration, etc. Both LCI and LCIA were conducted with a perspective of gate to grave as well as scenario analysis in order to figure out more detailed environmentally key issues. The seven major manufacturing companies were chosen for portland cement - Type I and conducted LCI. Generally, site-specific data was applied. If it's not impossible, database was used. Impact assessment was carried out consecutively as classification, characterization, normalization and weighting by Eco-indicator. The eco-indicators of cement system, scenario A(bituminous coal), B(raw material), C(landfill/incineration/recycling) were 53.4288, 2.0307, 0.00077, respectively. The key issues of cement system is a GWP by CO<sub>2</sub> released kiln. The scenario analysis is performed in order to compare the reduction of environmental impact when recycled resources make used of kiln and treatment system. The environmental burden of kiln system is lower than landfill and/or incineration system.

**Key words** : Life Cycle Assessment, Portland Cement, Waste, Alternative Fuel, Scenario Analysis

### 요약문

시멘트 산업에서는 많은 양의 폐기물이 대체연료와 대체원료로 이용되고 있다. 본 연구의 목적은 소성로의 폐기물 재활용과 기존의 처리시스템인 매립이나 소각시스템의 환경영향을 비교평가하고, 주요환경영향을 규명하기 위해 시나리오 분석을 수행하였다. 7개 포틀랜드 시멘트 제조업체를 대상으로 현장데이터를 수집하였고, 시나리오 A(유연탄 사용), B(천연원료 사용), C(매립/소각/재활

용)의 총환경영향값은 53.4288, 2.0307, 0.00077로 각각 나타나 유연탄 사용에 의한 환경부하가 가장 높게 나타났다. 시멘트 제조공정의 주요이슈는 소성로에서 배출된 CO<sub>2</sub>에 의한 지구온난화이며, 순환자원 사용의 환경영향을 비교하기 위한 소성로 재활용과 처리시스템의 시나리오 분석결과 소성로 재활용이 소각이나 매립처리보다 환경부하가 저감되는 것으로 나타났다.

주제어 : 전과정평가, 포틀랜드시멘트, 폐기물, 대체연료, 시나리오분석

### 1. 서론

우리나라 시멘트 산업은 연간 5천만톤 이상을 생산하는 세계 시멘트 강국으로 성장하였으며, 산업발전의 원동력이 되어 왔다. 그러나 시멘트 산업은 석유화학 및 철강과 같은 에너지 다소비 업종으로 석회석 채굴에 따른 산림자원 파괴와 생산과정에서 1,450℃ 소성에 따른 에너지 고비용문제, 이산화탄소 배출에 의한 지구온난화 등으로 인해 많은 어려움을 겪고 있다. 게다가 '99년부터 자원의 재활용을 촉진하기 위해 시멘트 소성로에서의 폐기물 재활용을 허용한 이후, 순환자원의 사용량이 증가함에 따라 최근 들어 폐기물을 재활용하여 생산한 시멘트 제품의 안전성과 이로 인한 환경영향의 문제가 국내적으로 큰 이슈가 되고 있다.

이에 따른 방안으로 2009년 순환자원의 사용 관리기준을 마련하는 등 다각적인 노력을 기울이고 있다. 시멘트 소성로를 이용한 폐기물 재활용은 전 세계적으로 이루어지고 있으며 우리나라의 경우 약 10%, 일본 20%, 유럽 10 ~ 40%의 폐기물을 재활용하여 시멘트를 생산하고 있고, 최근에는 폐기물 종류와 재활용량을 증가시켜 가는 추세이다. 2006년 우리나라의 전국 사업장폐기물 발생량 대비 소성로 재활용량은 2,686천톤으로 전체 재활용량 29,293천톤의 9.2%를 차지할 정도로 많은 비중을 차지하고 있다. 소성로의 부원료로는 석탄재 48%, 슬래그 6%, 오토티 15%, 기타 8% 보조연료로는 페타이어 10%, 폐합성수지 8%, 폐유 4%가 재활용되어 부원료는 78%, 보조연료로 22%가 순환자원으로 재활용되고 있다.

대부분의 에너지를 수입에 의존하고 있는 우

리나라의 실정을 감안할 때 발열량이 높은 폐플라스틱 등 폐기물을 연료로 대체함으로써 폐기물 저감과 대체에너지 확보를 동시에 만족시킬 수 있기 때문에 매우 유용한 자원순환 방법으로 활용되고 있다.

Table 1. Kiln Recycling Amounts of By-products and Wastes

(Unit : Thousand ton/yr)

Year		2005	2006	Growth
Total amounts		2,265	2,686	16%
Alternative raw materials	SUM	1,867	2,096	11%
	Coal ash	1,107	1,287	14%
	Slag	210	165	-27%
	Sludges	363	412	12%
	Etc.	187	232	19%
Alternative fuels	SUM	398	590	33%
	Waste tires	255	265	4%
	Waste resin	91	215	58%
	Waste oils	52	110	53%

또한, 시멘트 제조시 석탄재, 철강슬래그 등 폐기물을 부원료로 사용함으로써 천연자원사용을 절감하고, 재활용을 증대시키는 효과가 있으나 유해물질의 유해성 논란으로 순환자원 재활용에 많은 문제들이 제기되고 있다. 이러한 순환자원 재활용에 따른 환경영향의 논란은 순환자원의 재활용에 따른 정량적인 환경성 평가 결과가 부족하기 때문이다. 이를 위해서는 현재 순환자원을 대체 원료 및 연료로 사용함으로써 야기될 수 있는 총괄적인 환경적 영향을 평가할 필요가 있으며, 이러한 평가도구로서 유용한 전과정평가(LCA) 방법을 이용하여 채광공정에서 시멘트생산까지 각 단계 및 시나리오별로 환경에 미치는 영향을 평가하여야 한다. 따라서, 본 연구에서는 전과정평가(LCA)를

통하여 시멘트 제조시 대체 연·원료의 사용과 기존의 화석연료 사용에 의한 환경영향을 비교 평가하고, 기존 처리방법(소각, 매립)과 소성로 재활용 처리시의 시나리오에 따른 환경성을 분석함으로써, 자원순환 측면에서 환경부하를 저감할 수 있는 방안을 연구 목표로 설정하였다.

## 2. 시나리오 작성방법

순환자원인 폐기물을 대체 원료 및 연료로 사용함으로써 야기될 수 있는 총괄적인 환경영향을 평가하기 위해 현재의 시멘트 제조공정을 기준공정으로 선정하고, 대체연료 사용에 의한 영향을 평가하기 위해 시나리오 A를 설정하였다. 시나리오 A는 현재 기준공정에서 사용하고 있는 대체연료의 열량을 기준으로 평가하였다. 시나리오 A1은 대체연료 대신에 국내 전기 에너지를 사용한 경우이며, A2는 일본의 무연탄을 채취하여 화력발전에 의한 에너지로 사용한 경우이며, A3는 유럽의 무연탄을 채취하여 에너지로 사용한 경우이며, A4는 유연탄을 채취하여 에너지로 사용한 방법이다.

시나리오 B는 각 원료대체에 따른 영향을 비교하기 위해 시나리오 B1은 석회석을 대체하기 위해 투입하는 폐기물을 사용하지 않고 천연 석회석을 채광한 경우, B2는 점토질, B3는 클링커 대체, B4는 이러한 천연자원 채광에 의한 영향 총계로 설정하였다.

시나리오 C는 소성로에서 재활용되는 폐기물들이 기존의 소각, 매립, 재활용 공정으로 처리될 때의 영향을 평가하기 위하여 설정하였다. 기준공정에서 사용된 폐기물 특성에 따라 가연성 폐기물은 소각처리하고, 불연성 폐기물은 매립으로, 페타이어와 같이 재활용율이 높은 폐기물은 재활용방법으로 처리하는 것으로 설정하였다. 시나리오 C1은 매립공정, C2는 소각공정, C3는 재활용 공정, C4는 처리시스템(매립/소각/재활용)으로 기준공정과 비교하였다.

## 3. 전과정 목록분석

### 3.1 목적 정의

본 연구의 목적은 전과정평가를 수행하여 1종 포틀랜드 시멘트 제조시 주요 이슈를 규명하고, 순환자원 사용에 따른 환경영향을 평가하기 위해 순환자원과 천연자원 사용에 따른 시나리오를 비교분석하며, 처리방법(소각, 매립, 재활용)에 따른 환경성을 평가하여 순환자원의 유효이용 방안을 모색하고자 함에 있다.

### 3.2 범위 정의

#### 3.2.1 기능 및 기능단위 설정

본 연구의 대상시스템은 1종 포틀랜드 시멘트 제조시스템으로, 연구의 목적과 관련된 기능은 건축공사 및 토목공사 원료로 사용되며 기능단위 및 기준흐름은 1종 포틀랜드 시멘트 1톤으로 정의하였다. 연구대상인 1종 포틀랜드 시멘트의 경우 2006년 기준 국내 모든 시멘트 생산량의 약 86% 이상을 차지하고 있는 제품이므로 대상제품으로 선정하였으며, 1종 포틀랜드 시멘트를 생산하는 대상 업체는 국내 7개사, 9개 공장으로 이 사업장을 연구범위에 포함하여 데이터를 수집하고 평균화 하였다.

#### 3.2.2 시스템경계 설정

본 연구의 시스템경계는 천연 원료의 채굴로부터 시멘트 제품을 제조하여 최종 1종 포틀랜드 시멘트 제품을 생산할 때까지로 하였다. 세부 공정으로는 채광 및 분쇄, 원료분쇄, 소성, 시멘트분쇄 등을 거쳐 최종 제품화까지 Cradle to gate로 정의하였다.

#### 3.2.3 데이터 수집 및 품질 요건

국내 시멘트 제조사의 1종 포틀랜드 시멘트를 생산하는 7개사 9개 공장의 자료를 수집하여 정리하였다. 대상제품 생산 공정의 데이터는 2006년 1년간의 현장 데이터이며, 상위 및 하위공정 및 시나리오는 문헌데이터 및 국가DB,

외국 DB에 우선순위를 두었다. 지역적 경계는 제조업체가 삼척, 강릉, 동해, 영월, 제천, 단양 지역에 위치하고 있으나 순환자원은 국내 전

지역을 대상으로 사용이 가능하므로 국내 전 지역을 대상으로 하였다.

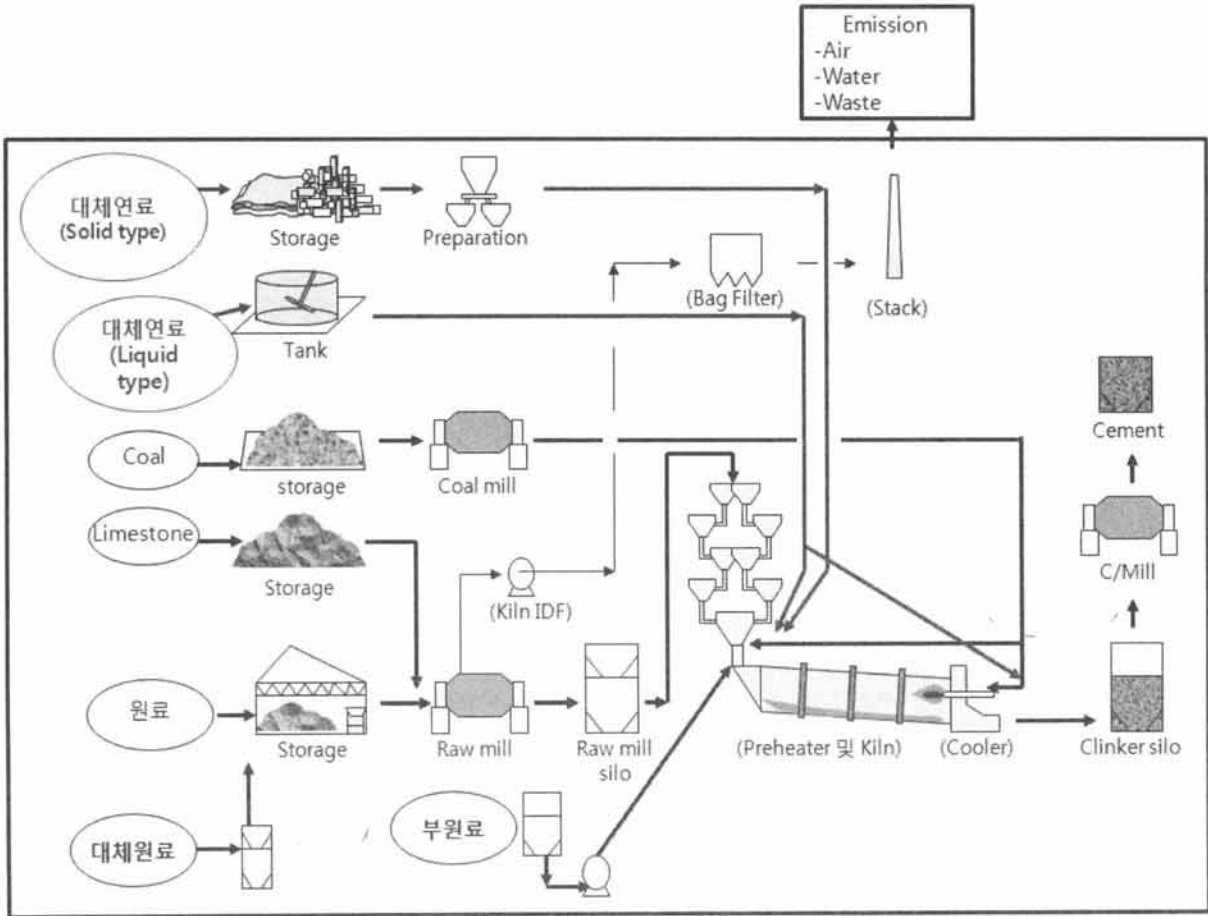


Fig. 1. Cement manufacturing process and system boundary used in the study area.

### 3.2.4 할당

본 연구에서는 시멘트 생산 공정에서 투입되는 순환자원 투입물들은 폐기물로 발생되어 직접 시멘트 공장에서 재활용되거나, 회수된 후 가공되어 시멘트 공장에서 사용되고 있다. 부원료로 사용되는 슬래그는 철강 제조시 발생하는 폐기물로서 Clinker를 대체하여 증량제로 사용되므로 슬래그 고유 성질의 변화 없이 재활용된다. 폐타이어와 폐플라스틱은 소성 공정의 대체연료로서 성질 변화를 일으키며 재활용된다. 그러므로 슬래그는 닫힌고리 재활용 절차를 가진 열린고리 재활용 시스템이며 폐타이어 및 폐플라스틱은 열린고리 재활용시스템이다. 소

각, 매립, 재활용 시나리오 비교에서 사용되는 순환자원에 대해 열린고리 재활용시스템의 할당방법으로 회피효과방법(avoided impact approach)을 적용하였다. 이 방법은 시스템경계를 모든 관련된 전과정 시스템으로 확장시켜 할당하는 방법으로, 재활용된 물질이 다음 단계에서 원료물질로 사용되는 경우, 이 재활용된 물질의 사용으로 인해 감소된 환경영향에 대한 이득을 재활용시스템에 부여하는 방식이다.

### 3.2.5 영향범주 및 영향평가 방법론

영향평가 방법론은 산업자원부의 영향평가 방법론을 적용하였으며, 고려된 영향범주로는 자

원고갈, 지구온난화, 오존층파괴, 광화학산화물 생성, 산성화, 부영양화, 인간독성, 생태독성 등 8가지 범주이다. 또한 과학적이지는 않지만 동등 시스템에서의 비교 및 전체 영향평가를 위해 정규화 및 가중치 부여를 통한 산업자원부 가중화 지수로 시나리오 비교를 실시하였다.

### 3.2.6 가정 및 제한사항

설비에 대한 인벤토리는 그 영향은 크지 않다고 판단하여 고려하지 않았으며 에너지, 원료로서 천연자원 이외에 타 제품시스템의 순환자원을 상당량 사용하고 있으므로, 이것들을 「외부 재활용품」으로서 천연자원과 구분하여 분류하였다. 분쇄/분급된 혼합재를 외부로부터 구입하고 있는 경우에도 외부에서의 분쇄/분급 에너지는 고려하지 않고, 외부 재활용품으로서의 부하는 「0」으로 가정하여 처리하였다. 온실 효과 가스 중 이산화탄소에 대해서는 연료기원, 원료기원, 간접항목으로 전력의 배출계수를 이용하여 계산하였다. 온실효과 가스 가운데, HFC, PFC, SF6에 대해서는 이론적으로 있을 수 없다고 판단하여 「0」으로 하였다. 대기오염 방지법으로 규제를 받고 있는 분진, NOx의 경우 TMS(TeleMetering System)의 실측자료와 SOx, 기타 대기배출물질의 경우에는 업체의 자가 측정 데이터를 근거로 산출하였다. 다이옥신의 경우 3회 측정된 자료를 연간 배출량으로 환산하여 계산치로 추정하였다.

국내 1종 포틀랜드 시멘트 생산 공장의 시멘트 제조 프로세스는 모두 건식이며 기본적으로 오수가 거의 발생하지 않으며, 생활 잡·배수나 냉각수도 공장에 따라 파악하고 있는 범위가 다르기 때문에 업체가 가지는 수질 데이터는 조사대상에 포함하였으나 별다른 산출물이 없어 수계 배출물은 없는 것으로 산정하였다. 시멘트 업체로 유입되는 각종 순환자원에 따른 수송 및 업체내의 내부수송에 대한 영향은 각 업체별 편차가 크고, 투입물이 유입되는 경로의 거리가 다양하여 일반화 및 평균화가 어려

우므로 내부수송 및 유입, 출하시의 수송 등 수송공정은 연구대상에서 제외하였다. 또한 천연자원을 대체하여 순환자원 사용에 따른 시멘트 품질의 저하는 없다고 가정하였고, 일부 순환자원(슬러지, 슬래그, 소각재, 폐주물사 등)에서 기인하는 각종 중금속(6가크롬, 납, 비소, 수은, 카드뮴 등) 및 VOCs에 미치는 영향이 있을 것으로 판단되나 천연자원만을 사용하여 제조하는 공정이 없어 비교가 어렵기 때문에 고려하지 못하였다. 이는 다양한 순환자원별 성분함량 분석과 천연자원의 성분함량을 분석하여 비교함으로써 경향은 판단할 수 있으므로 향후 이에 대한 연구가 필요하다.

## 3.3 목록분석

### 3.3.1 전과정 목록분석

목록분석은 시멘트 제품시스템을 반영한 시멘트 생산 Process를 토대로 데이터 수집 대상 단위공정을 설정하여 현장 데이터를 수집하였다. 점토질 대체로 사용되는 순환자원은 석탄 회가 가장 많은 비중을 차지하며, 경석, 오니류, 소각재 등이 사용되고 있으며, 천연자원을 대체하여 투입하는 원료계 순환자원의 총 투입량은 시멘트 1톤당 155.6kg 이다. 또한 천연연료는 유무연탄, 중유, 석유코크스 등 화석연료가 102.7kg이 사용되고 있으며, 폐유, 폐타이어, 폐플라스틱 등 대체연료는 18.39 kg의 순환자원이 사용되는 것으로 조사되었다.

소성 공정에서 반제품인 Clinker 이외에 CO<sub>2</sub>, CO, NOx, SOx 등의 대기배출물질이 발생한다. 시멘트 제조공정의 특성상 연료 및 에너지 사용으로 인한 이산화탄소 발생 뿐 아니라 원료물질에서 기인하는 이산화탄소도 다량 발생하게 된다. 고온의 소성 공정에서 원료물질 중에 포함된 CaCO<sub>3</sub>가 탈탄산 화학반응을 일으켜 CaO로 변하며, 이때 다량의 CO<sub>2</sub>가 발생되기 때문이며, 이는 공정 특성에 기인한다. 시멘트 분쇄공정에는 응결지연제로 천연석고 보다는 많은 양의 부산석고가 사용되고 있으며, 추가

적으로 분쇄조제가 사용되고 있고, Clinker 증량제로 슬래그가 사용되어 Clinker 제조에 따른 환경부하를 경감시키는 역할을 한다.

Table 2. Major Items of Life Cycle Inventories

Inventory		Input/Output
Raw materials	Limestone	1,403.9 kg
	Alternative raw materials	155.6 kg
Fuels	Natural resources	102.7 kg
	Alternative fuels	18.4 kg
Electricity		113.8 kwh
Air emissions	Carbon dioxide	776.9 kg
	NOx	1.2 kg
Product	Portland cement- I	1,000 kg

Fig. 2와 같이 국내 시멘트 업체에서는 연간 약  $1.6 \times 10^8$  GJ의 에너지를 사용하고 있는 것으로 조사되었으며, 시멘트 생산에 사용하는 에너지별 사용현황을 보면 가장 많은 에너지는 화석연료로 2000년의 경우  $1.41 \times 10^8$  GJ(86.2%)에서 2006년에  $1.2 \times 10^8$  GJ(75%)의 화석연료를 사용하였다.

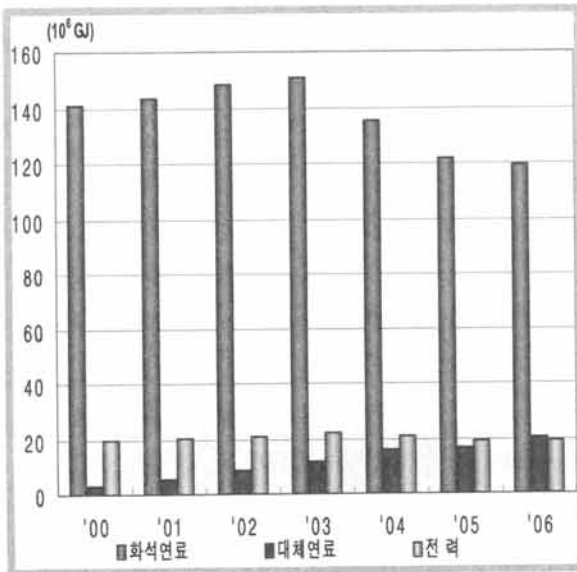


Fig. 2. Contribution of each energy source.

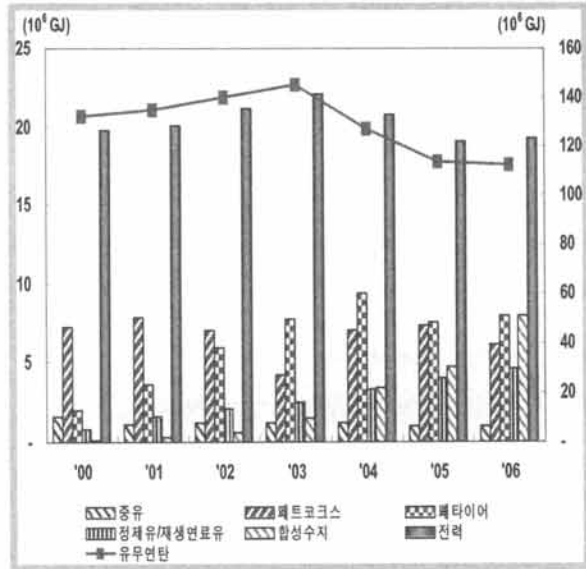


Fig. 3. Variation of alternative energy source.

대체연료의 경우에는 2000년  $2.87 \times 10^6$  GJ(1.8%)에서 그 사용량이 계속 증가하여 2006년에는  $2.1 \times 10^7$  GJ(12.9%)로 약 7배 이상 증가하였다. 그러나, 전력의 경우에는 거의 12%의 일정 수준을 유지하는 것을 알 수 있다. 2000년과 2006년의 총에너지 사용량은 거의 변화가 없으나, 화석연료의 사용량을 약 11.2 % 정도 줄일 수 있었던 것은 순환자원의 사용으로 화석연료를 대체 할 수 있었기 때문이다. 2006년 순환자원중 페타이어는  $7.95 \times 10^6$  GJ(5%), 합성수지  $7.96 \times 10^6$  GJ(5%), 정제유/재생유  $4.6 \times 10^6$  GJ(2.9%)을 대체하였으며, 가장 급격히 점유율이 증가한 순환자원은 합성수지로서 2000년 약 0.1 %에서 2006년 5 % 수준으로 증가하였다.

### 3.3.2 이산화탄소 배출 특성

시멘트 산업의 해결해야 할 환경문제 중의 하나가 지구온난화를 유발하는 이산화탄소 배출이다. CO<sub>2</sub>는 시멘트가 만들어지는 클링커의 생산과 중간물질 생산 과정에서 발생한다. 석회석은 시멘트 킬른에서 고온의 열을 받아 시멘트 클링커로 변화되며 특히 석회석, 초크(chalk) 또는 기타 칼슘이 많은 물질에서 CaCO<sub>3</sub>은 가열되어, 소성공정에서 생석회(CaO)와 CO<sub>2</sub>를 형성한다. 시멘트 생산시 발생하는

CO<sub>2</sub>를 계산하는 방법은 클링커 생산량 기준과 시멘트 생산량 기준으로 구분되며 클링커 생산량을 파악할 수 없을 경우에 시멘트 생산량 기준을 적용하고 있다.

시멘트 생산으로부터의 CO<sub>2</sub> 배출량은 생산된 클링커 톤(ton) 당 배출된 CO<sub>2</sub> 톤으로 표현되는 배출계수와 연간 클링커 생산량의 곱인 Simple method로 얻을 수 있다.

$$CO_2 \text{ 배출량}_{(t)} = \text{클링커 생산량}_{(t)} \times EF_{\text{클링커}(CO_2/t\text{클링커})} \quad (1)$$

배출계수는 시멘트 클링커에서 사용된 생석회 함량과 단위 생석회 당 배출된 CO<sub>2</sub> 양의 곱으로 식(2)와 같이 계산된다.

$$EF_{\text{클링커}(CO_2/t\text{클링커})} = \text{Fraction } CaO_{(CaO/t\text{클링커})} \times \frac{44.01 \text{ (g/mole } CO_2)}{56.08 \text{ (g/mole } CaO)} \quad (2)$$

IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change) 가이드라인에서는 클링커의 생석회 함량을 64.6 %로 추정하였다. CO<sub>2</sub>/CaO의 분자량 비율과 곱하면 0.5071 tCO<sub>2</sub>/t클링커의 클링커 배출계수를 얻을 수 있다.

Advanced method는 시멘트 킬른 분진(cement kiln dust, CKD)의 소성에서 발생하는 CO<sub>2</sub> 배출량을 고려하는 방법으로 Simple method에서 계산한 클링커 생산량 기준 배출량에 CKD 배출량을 더하는 방법이다. 식 (3)을 적용할 때 CKD에 대한 정보가 없을 경우 IPCC에서는 클링커 생산에 의한 CO<sub>2</sub> 배출량에 2 %를 더하도록 제시하였다. 즉 시멘트 생산 공정에서 회수되지 않고 폐기된 CKD 양에 대한 보정계수는 1.02 이다.

$$CO_2 \text{ 배출량}_{(t)} = (\text{클링커 생산량}_{(t)} \times EF_{\text{클링커}(CO_2/t\text{클링커})}) + (CKD_D \times EF_{CKD}) \quad (3)$$

$$EF_{CKD} = \frac{\frac{EF_{\text{클링커}}}{1 + EF_{\text{클링커}}} \times d}{1 - \frac{EF_{\text{클링커}}}{1 + EF_{\text{클링커}}} \times d} \quad (4)$$

EF<sub>CKD</sub>는 시멘트 킬른 분진에 대한 CO<sub>2</sub> 배출계수(tCO<sub>2</sub>/tCKD)이며, d는 CKD소성도, CKD<sub>D</sub>는 폐기된 시멘트 킬른 분진의 양(톤) 이다. 클링커 생산량에 대한 정보가 부족할 경우 시멘트 생산량에 대한 CO<sub>2</sub> 배출계수는 연간 시멘트 생산량을 이용하여 구할 수 있으며, IPCC 가이드라인에서는 시멘트의 평균 생석회 함량을 63.5 %로 가정하여 0.4985 (tCO<sub>2</sub> /ton 시멘트)의 배출계수를 산출하였다. 대부분의 업체에서는 산출물을 다시 혼입하여 소성로에 투입하므로 CKD소성도를 100%, CKD<sub>D</sub>는 0으로 하여 계산하고 있다.

실제로 원단위를 계산할 경우 클링커 생산량으로 계산하는 것이 가장 정확하나 기준흐름을 포트랜드 시멘트로 산정하였고, 7개 업체의 평균데이터를 적용하여 계산치와는 약간의 차이가 발생한다.

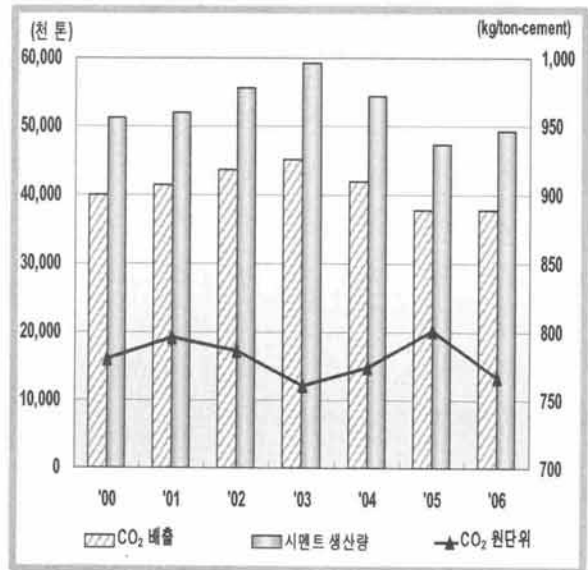


Fig. 4. Variation of CO<sub>2</sub> emission amount.

국내 생산되는 시멘트를 기준으로 CO<sub>2</sub> 총 배출량은 2006년 약 37,000천톤 정도로 점차 감소하는 경향을 보이고 있다. 시멘트 1톤당 발생하는 CO<sub>2</sub> 배출원단위(kg/ton-cement)는 슬래그 시멘트 등 특수 시멘트의 생산량과 연계되어 있으며, CO<sub>2</sub> 배출원단위가 2000년 781.1 kg/ton-cement에서 2006년 767.5 kg/ton-cement

로 톤당 약 4 kg 정도 감소하였다. CO<sub>2</sub> 배출원 단위의 이러한 경향은 시멘트 생산품종의 변화와 Clinker 재고량의 변동 폭이 커서 나타나는 것으로 판단된다.

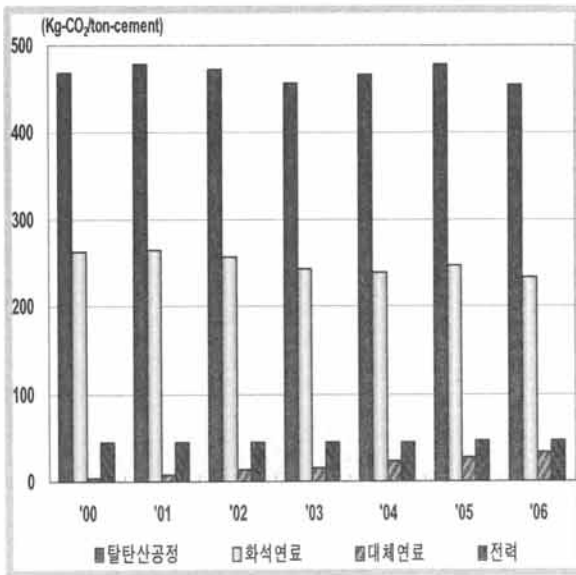


Fig. 5. Contribution of CO<sub>2</sub> emission sources.

또한 시멘트 제조 공정에서 배출되는 CO<sub>2</sub> 배출원단위는 가장 많은 비중이 탈탄산 공정(60%)이며, 화석연료(30%), 전력(6%), 대체연료(4%) 순이다. 순환자원인 대체연료의 사용량 증가로 화석연료 기원 CO<sub>2</sub>는 감소하고, 대체연료 기원 CO<sub>2</sub>는 증가하는 경향을 보이며, 대체연료는 2000년 4.6 kg/ton에서 2006년 32.9 kg/ton로 증가한 것으로 나타났다.

#### 4. 결과 및 고찰

##### 4.1 기준공정의 영향평가

포틀랜드 시멘트 1톤 생산시의 영향평가를 수행하였다. 특성화 결과 유연탄 사용에 의한 자원고갈, 소성공정 NO<sub>x</sub>에 의한 산성화와 부영양화, CO<sub>2</sub>에 의한 지구온난화, 다이옥신에 의한 인체독성, 소성공정 CO에 의한 광화학산화물생성 등이 주요 환경영향과 영향인자로 나타났다. 지식경제부 가중화지수에 의한 가중화 평가결과 총환경영향값은 4.612로 나타났으며

이 값을 기준공정과 시나리오를 비교하기 위한 기준값으로 설정하였다.

##### 4.2 화석연료 사용 시나리오(시나리오A)

화석연료를 대체하기 위하여 사용하는 폐기물은 폐유, 폐타이어, 폐플라스틱, Biomass 등이다. 이러한 대체연료의 사용으로 대체한 에너지는 시멘트 1톤당 약 417.41 MJ로 이 양은 전체 에너지 사용량의 11.8%에 해당된다. 대체연료에 의한 에너지를 생산하기 위해서는 유연탄은 16.05 kg이 필요하고, 무연탄은 15.23 kg, 전력은 115.95 kWh가 필요하다. 그러므로 대체연료를 사용함으로써 천연연료인 유연탄을 16.05 kg 절감시킬 수 있으며, 이러한 대체연료에 의한 유연탄 대체율은 유연탄 사용량의 14.2%를 차지할 정도로 대체연료가 전체 필요 에너지에서 차지하는 비중이 높은 것으로 나타났다.

또한 대체연료를 사용하면 유연탄을 사용하는 것보다 이산화탄소 배출량을 저감시킬 수 있다. 유연탄 대체에 따른 이산화탄소 저감량을 산출한 결과, 시멘트 1톤당 이산화탄소 발생량을 약 8.7 kg 저감할 수 있는 것으로 계산되었다.

Table 3. Substitution Amounts of Fossil Fuel against Alternative Fuel

Item	Alternative Energy	Calory (MJ/kg)	Substitution Amount
Alternative Fuel	417.41 MJ	22.7	18.39 kg
Bituminous Coal		26.0	16.05 kg
Anthracite Coal		27.4	15.23 kg
Bunker C Oil		41.4	10.08 ℓ
Electricity		3.6MJ/kWh	115.95 kWh

대체연료 사용에 따른 시나리오는 천연연료를 사용하지 않고 순환자원인 대체연료를 사용함으로써 얻을 수 있는 환경영향이다. 그러므로 대체연료로 417.41 MJ에 해당되는 에너지를 얻



기 위한 대표적인 4가지 방법을 대상으로 대체 연료 시나리오를 구성하여 비교한 결과 Table 4와 같이 도출되었다. 영향평가 결과 유연탄을 채광하여 에너지로 사용하는 시나리오 A4의 환경부하가 가장 높은 것으로 나타났으며, 국내 전기에너지를 사용하는 시나리오 A1 방법이 가장 환경부하가 적은 것으로 나타났다.

Table 4. Weighting Results of Scenario A  
(Scenario basis : 417.41 MJ)

Scenario	A1	A2	A3	A4
	Electricity (Domestic)	Anthracite Coal (Japan)	Anthracite Coal (Europe)	Bituminous Coal
ARD	1.86E-03	2.74E-06	2.67E-06	0.00E+00
AC	8.78E-05	4.43E-05	3.01E-04	8.88E-04
EP	5.24E-05	1.56E-05	4.94E-05	8.64E-05
GW	2.95E-03	2.23E-03	2.69E-03	8.22E-03
HT	9.43E-07	6.54E-05	3.86E-04	6.21E-05
OD	9.48E-09	0.00E+00	6.40E-06	3.36E-06
POC	2.49E-04	1.55E-05	5.71E-04	1.40E-05
ET	1.51E-07	3.55E+00	1.31E+01	5.34E+01
Total	0.005	3.548	13.084	53.429

#### 4.3 천연자원 사용 시나리오(시나리오B)

시멘트 업체에서는 천연자원을 대체하기 위하여 다양한 원료계 순환자원을 사용하고 있다. 원료계 순환자원은 시멘트의 주 원료인 철질, 석회석, 점토질, 석고 등을 대체하기 위해 사용된다. 원료계 순환자원 사용으로 인한 환경이득을 비교하기 위하여 천연원료의 채광에 따른 환경부하를 시나리오 별로 설정하였다. 그러나 제강슬래그, 석고 등 천연원료와 대비가 어렵거나 비교 데이터 수집이 어려운 경우에는 비교대상에서 제외하였다.

시나리오 B1은 필요한 9.68 kg의 석회석 천연자원을 채광하기 위한 시나리오이며, B2는 점토 천연자원 70.18 kg의 채광, B3는 Clinker 증

량제로 슬래그가 투입되어 Clinker 생산에 따른 환경부하를 저감시키므로, 기준공정의 저감 Clinker 양 17.1kg 만큼 환경부하를 차감하여 클링커 대체율을 1.7%로 계산하였다. 시나리오 B4는 시나리오 B1, B2, B3 에서 유발되는 환경부하를 총 합산한 천연자원 채광시의 환경영향으로 시멘트 1톤 생산시에 순환자원을 사용하지 않고 천연자원 사용시에 발생하는 총환경영향값이다.

시나리오 B의 가중화 결과는 천연자원인 석회석, 점토 등의 천연원료를 사용하지 않고 대체원료를 사용함으로써 얻을 수 있는 환경이득이다. 시나리오 B3의 기준공정 대비 클링커 대체율에 의해 가장 적은 환경영향을 나타냈으며, 석회석 채광시의 환경부하가 크기 때문에 적은양의 석회석으로도 가장 큰 영향을 나타내는 것으로 나타났다.

Table 5. Weighting Results of Scenario B

Scenario	B1	B2	B3	B4
	Limestone Mining	Clay Mining	Alternative Clinker	Sum
ARD	1.77E-06	2.18E-05	6.52E-08	2.37E-05
AC	2.17E-06	3.42E-05	4.11E-03	4.14E-03
EP	8.48E-07	1.13E-05	8.37E-04	8.49E-04
GW	5.10E-04	1.18E-03	4.80E-02	4.97E-02
HT	1.13E-05	2.53E-05	1.34E-03	1.37E-03
OD	0.00E+00	5.64E-06	1.50E-07	5.79E-06
POC	3.62E-06	2.61E-05	1.55E-04	1.85E-04
ET	1.11E+00	6.32E-01	2.29E-01	1.97E+00
Total	1.113	0.633	0.284	2.030

#### 4.4 처리시스템(소각/매립/재활용) 시나리오(시나리오C)

순환자원을 소성로에서 이용하지 않을 경우 일반 폐기물이나 부산물은 처리시스템인 매립/소각/재활용 처리시스템으로 처리하여야 한다.

그러므로 시나리오 C는 순환자원이 가연성인 경우 소각처리 대상폐기물로 분류하고, 비가연성은 매립 처리 대상 물질로 분류하며, 타 산업이나 업체에서 재활용이 가능한 경우에는 재활용 처리 대상 순환자원으로 분류하였다. 이에 따라 매립처리 대상 폐기물(경석, 석탄회, 소각재, 폐주물사 등)은 79.8 kg, 소각처리 대상은 폐합성수지만을 대상으로 고려하여 7.8 kg, 재활용 처리 대상은 물질재활용이 가능한 페타이어 및 고무류로 7.2 kg을 산정하여 평가하였다.

매립 시나리오 C1은 매립 DB를 활용하였고, 소각 시나리오 C2는 지정폐기물소각(폐유, 폐합성고분자) DB, 물질 재활용되는 시나리오 C3는 플라스틱 재활용 DB를 이용하였다. 시나리오 C4는 전체 처리시스템에 대한 환경영향 총계로 계산하였다.

Table 7. Weighting Results of Scenario C

Scenario	C1	C2	C3	C4
	Landfill	Incineration	Recycling	Sum
ARD	2.32E-05	4.63E-05	-1.45E-03	-1.38E-03
AC	2.07E-06	9.65E-06	-1.84E-05	-6.71E-06
EP	3.17E-05	3.84E-06	-1.07E-05	2.49E-05
GW	2.28E-03	1.40E-04	-3.62E-04	2.06E-03
HT	1.59E-06	2.85E-05	-2.30E-06	2.78E-05
OD	1.00E-07	8.59E-08	-8.57E-07	-6.70E-07
POC	5.65E-05	1.09E-05	-1.48E-04	-8.05E-05
ET	8.56E-07	1.46E-04	-1.31E-05	1.33E-04
Total	0.00239	0.00039	-0.002	0.00077

Table 7.과 같이 시나리오 C3의 가중화 결과 재활용에 따른 이득으로 전체 환경영향값이 마이너스 값을 가지며, C4는 자원고갈, 산성화, 오존층파괴, 광화학산화물생성의 환경영향은 환경이득이 발생하나, 나머지 영향범주는 소각

이나 매립 처리시스템에 의한 환경부하가 재활용 이득보다 크기 때문에 환경부하가 발생하는 것으로 분석되었다. 처리시스템 전체에 대한 총 환경영향값은 0.00077 로 계산되었으며, 주요 원인이 지구온난화이며, 특히 매립 시나리오 C1에 의한 영향이 크기 때문에 환경부하가 높은 것으로 분석되었다.

#### 4.5 소성로 순환자원 사용에 따른 환경영향 (시나리오D)

소성로에 사용되는 순환자원에 따른 환경이득은 앞에서 분석된 천연연료 및 천연원료 시나리오를 통해 간접적으로 계산할 수 있다. 순환자원 사용에 따른 환경부하는 외부 재활용품이나 폐기물로서 시멘트 공정에 유입되기 때문에 환경부하가 없는 것으로 가정하였다. 그러므로 순환자원을 사용함으로써 천연자원 사용에 따른 환경부하는 그만큼이 환경이득으로 전환될 수 있다. 소성로 순환자원 사용에 따른 환경이득을 평가한 결과 국내 전기에너지를 사용하고 천연자원을 채광하는 시나리오D1의 총 환경영향값이 -2.04로 환경이득이 가장 작으나, 유연탄을 에너지원으로 하고 순환자원 대신 천연원료를 채광한다면(시나리오D4) 총 환경영향값이 -55.46으로 순환자원 사용에 따른 환경이득이 가장 큰 것으로 분석되었다. 그러므로 순환자원을 사용함으로써 현재의 시멘트 생산시스템 가중화 결과인 4.612의 최소 44%에서 최대 12배 이상의 환경부하를 저감시키는 효과가 있는 것으로 나타났다.

Table 6. Profit of Waste Utilization by Kiln

Scenario	D1	D2	D3	D4
	(A1+B4)	(A2+B4)	(A3+B4)	(A4+B4)
Total	-2.04	-5.58	-15.11	-55.46

또한 소각/매립/재활용 처리시스템으로 처리하였을 경우와 소성로 재활용에 따른 환경영향

을 비교하면 처리시스템(시나리오C4)은 환경부하가 발생하고 소성로 재활용(시나리오D)은 환경이득이 발생하는 것을 알 수 있다. 특히 매립의 경우 우리나라 매립지 확보가 어려운 현실을 반영하면, 매우 큰 효과가 있다. 소성로에서 재활용하지 않고 순환자원이 매립될 경우 2006년 기준 수도권매립지 연간 반입폐기물의 약 70%인 3,433천톤이 증가하게 된다. 그러므로 현재 수도권매립지의 가채년수 15년이 소성로 순환자원의 사용으로 50년으로 연장하여 사용이 가능한 것으로 추산되었다.

### 5. 결론

현재 1종 포틀랜드 시멘트 생산공정을 기준공정으로 전과정평가를 수행하였다. 기준공정의 영향평가 결과 이산화탄소에 의한 지구온난화와 일산화탄소에 의한 광화학산화물생성 등의 영향이 있는 것으로 나타났으며 특히 지구온난화에 미치는 기여율은 소성공정이 93%, 전력 사용에서 발생하는 기여율이 6.3%를 차지하는 것으로 분석되었고, 이는 소성 공정에서 발생하는 CO<sub>2</sub>가 주요 원인인 것으로 나타났다. 또한 순환자원 사용에 따른 영향을 비교평가하기 위하여 순환자원 사용에 따른 천연자원 및 화석연료 대체효과를 평가하기 위해 시나리오 분석을 수행하였다. 소성로에 순환자원을 사용함으로써 현재의 시멘트 생산시스템 환경부하의 최소 44%에서 최대 12배 이상의 환경부하를 저감시키는 효과가 있는 것으로 나타났다. 이는 대체연료 대신에 유연탄을 사용하고 순환자원 대신에 천연자원을 사용한다면(시나리오D4) 지금의 환경부하보다 12배 이상의 높은 환경부하를 유발한다는 것을 의미하는 것이므로 순환자원 사용에 따른 환경부하 저감 효과는 매우 크다고 할 수 있다.

또한 소성로 재활용과 처리시스템(소각/매립/재활용)을 비교한 결과 소성로 재활용은 환경이득이, 처리시스템은 환경부하가 발생하는 것

으로 나타났다.

우리나라와 일본 시멘트 제조공정의 물질수지를 비교하면 일본에 비해 유연탄은 2.19% 더 많은 양을 사용하고 있으며, 전력은 약 75.5 kWh/ton-cement를 더 사용하고 있는 것으로 나타났다. 물론 일본은 시멘트 품종이 다양하고, 자가전력을 사용하며, 순환자원의 사용량이 높기 때문에 단순비교는 어려우나 일본이나 유럽처럼 다각적 방법을 통하여 보다 친환경적으로 환경부하를 저감할 수 있도록 전환되어야 한다.

먼저 유연탄 저감을 위해서는 대체연료 사용량을 증대시켜야 하며, 이를 통해 이산화탄소 발생량 저감도 함께 기대할 수 있다. 또한 시멘트 품종을 다양화하여 슬래그시멘트 생산량을 높이고 친환경적인 에코시멘트 개발에도 노력하여야 할 것이다. 그러나 이러한 순환자원의 활용 촉진을 위해서는 지역주민과의 갈등과 일명 쓰레기 시멘트에 대한 인식 제고 등 향후 친환경적으로 순환자원을 유효 이용할 수 있도록 제도정비와 관리가 필요한 것으로 사료된다.

사 사

본 연구는 한국양회공업협회와 회원사의 지원 하에 수행한 연구결과이며 연구비를 지원해주신 관계자 여러분께 감사드립니다.

### Reference

1. 김종오, "시멘트 킬른에서 폐유의 대체연료 활용기술 개발", 산업자원부(2000).
2. 김수룡, "환경부하저감형 포틀랜드시멘트 제조공정 및 소재기술 개발", 요업기술원(2005).
3. 박필주, 이진모, "전과정평가를 이용한 포틀랜드 시멘트 제조 공정의 지구온난화에 미치는 영향평가", 대한환경공학회지 VOL. 25, NO. 6(2003).
4. 한국양회공업협회, <http://www.cement.or.kr/>
5. Eiichi Onuma, Ecobalance of Utilization of

- Recycled Materials in Cement Manufacturing, *EcoBalance*(1998).
6. The European Cement Association, "Environmental Benefits of Using Alternative Fuels in Cement Production(A LIFE-CYCLE APPROACH)"(1999).
  7. Koji Amano, Junji Hosokawa, Allocation of Environmental Loading on the Industrial Cluster related to Cement and Concrete, *EcoBalance* (2000).
  8. Susumu Sano, Evaluation of the environmental impact of cement manufacturing using recycled materials, *EcoBalance*(2000).
  9. Di Xianghua, The Life Cycle Assessment of Cement Processes, *EcoBalance*(2000).
  10. Cement Sustainability Initiative, "Guidelines for the Selection and Use of Fuels and Raw Materials in the Cement Manufacturing Process"(2005).