

청정부품/제품설계

시멘트산업공정에서의 CO₂배출량 저감을 위한 청정기술 적용에 관한 연구

박영규,* 김정인

대진대학교 화학공학과
487-711 경기도 포천시 선단동 11-1

중앙대학교 산업경제학과
456-756 경기도 안성시 대덕면 내리 72-1

(2010년 6월 4일 접수 2010년 8월 23일 수정본 접수 2010년 8월 25일 채택)

A Study on the Reduction of CO₂ Emission by the Application of Clean Technology in the Cement Industry

Young G. Park* and Jeong-In Kim

Department of Chemical Engineering, Daejin University
11-1 Sundan-dong, Pocheon City, Gyeonggi 487-711, Korea

Department of Industrial Economics, Chung-Ang University
72-1 Nae-ri Daeduk-myun, Ansung City, Gyeonggi 456-756, Korea

(Received for review June 4, 2010; Revision received August 23, 2010; Accepted August 25, 2010)

요 약

시멘트공정 내 청정기술인 폐기물 재자원화 및 에너지회수공정을 이용하여 CO₂발생량 저감을 위한 타당성을 연구하였다. 원료투입물 대체방법으로써 용융슬래그를 시멘트 클링커 제조용 주원료로 사용하기 위한 전과정평가(life cycle assessment: LCA)를 실시하였다. 이를 통하여 시멘트소성로 내 탈탄산 과정에서 발생하는 이산화탄소의 양을 60% 이상 줄일 수 있었다. 이전 연구에서 환경영향평가 실시 후 우선순위로 선정된 시멘트공정의 에너지효율 개선 및 대체에너지를 적용하여 현 시점에서 가장 빠른 시일 내에, 가장 경제적인 방법으로, 탄소중립적 에너지소비체계의로의 전환을 위해 화석연료로 분류된 천연가스를 사용하여 가장 효율적인 녹색전략으로 CO₂배출량 저감을 위한 연구를 수행하였다.

주제어 : 시멘트, 재자원화기술, 이산화탄소, 슬래그, 환경영향평가, 전과정평가

Abstract : The feasibility of clean technology to minimize the CO₂ emission by recycling and reuse the waste materials and energy have been studied for the cement industry. A life cycle assessment (LCA) was performed for an alternative raw material-supply method to use the molted slag as the major raw material in the cement clinker manufacturing. Using this new method, a 60% of CO₂ could be reduced that comes out during the decarboxylation from the cement rotary kiln. The energy-efficiency improvement and the alternative energy methods that had been determined in our previous study through the environmental assessment of cement industry were applied to the study for the reduction of CO₂ emission. The natural gas, one of the fossil fuels, was also used as the first choice to get the result at the earliest time by the most economic and the most efficient green technology and to switch into the carbon neutral energy consumption pattern.

Keywords : Cement, Renewable technology, Carbon dioxide, Slag, Environmental assessment, Life cycle assessment (LCA)

* To whom correspondence should be addressed.

E-mail: ypark@daejin.ac.kr

1. 서 론

1980년대에 들어 이상기후로 인한 자연재해가 세계 각지에서 빈발하면서 지구온난화에 대한 인식이 확산되었다. 지구온난화를 유발하는 대기 중의 온실가스 농도는 산업화의 진행에 따라 꾸준히 증가하는 추세이다. 최근 시멘트산업에서의 연료 연소에 의한 이산화탄소 배출량은 1990년도에는 3,053천 탄소 환산톤(ton of carbon equivalent: TC)이며, 2007년에는 온실가스 배출량이 5,270천 TC로 급증하였다. 시멘트 공장 내 에너지 사용은 경유(0.6%), 유연탄(81.1%), 전력(18.3%)의 비중을 차지하고 있으며, 연간 연료의 가격상승으로 경유와 유연탄의 비중은 줄어들고 전력의 비중이 높아지고 있는 실정이다[1].

석회석의 주성분인 CaCO_3 가 고온(900~1000℃ 전후)에서 분해되어 CaO 가 생성되며, 이때 CO_2 가스가 발생한다. 또한 소성연료로 투입되는 유연탄도 반응하여 CO_2 가스를 생성하므로, 시멘트 공장에서의 CO_2 가스 발생량은 다른 산업보다 많은 양이라고 판단할 수 있다. 즉 시멘트산업은 석회석의 탈탄산과정과 연료의 연소과정에서 다량의 이산화탄소를 배출하며, 시멘트 1톤 당 약 1.15톤의 석회석을 소비하고, 0.8톤의 이산화탄소를 배출하는 온실가스 대량 배출산업으로 알려져 있다. 더불어 연소과정(소성과정)을 필히 거쳐야 하며, 이때 다량의 에너지(유연탄)를 소비하는 특징도 갖는다. 이러한 특성은 Table 1에서와 같이 매출액당 탄소발생량이 시멘트 498톤/억 원, 에너지 135톤/억 원, 철강 117톤/억 원 수준으로서 시멘트공정에서 가장 탄소가 많이 발생하는 것으로 설명된다. 즉 시멘트산업에서의 CO_2 저감 및 에너지 사용량 절감은 매우 중요하며, 이는 녹색산업 추진을 위한 국가적 차원의 문제이기도 하다[2].

본 연구에서는 시멘트산업 내 에너지회수를 통하여 CO_2 를 줄이고, 원가를 줄이기 위하여 대체연료를 사용하거나, 시멘트산업이 겪고 있는 에너지 가격의 상승과 이산화탄소 배출량 저감을 위하여 LCA과정을 도입하여 CO_2 배출량 및 환경영향평가를 분석하였다. 에너지 및 CO_2 감축을 위한 가장 효과적인 방법의 하나로써 혼합시멘트 사용량 증대를 들 수 있다. 국내 혼합시멘트는 전체 시멘트의 약 20%를 차지하고 있으나, 독일에서는 45%를 차지하고 있다. 따라서 현재보다 혼합시멘트 시장 규모를 늘려야 시멘트 공장에서의 에너지/ CO_2 감축이 가능하다. 또한 혼합시멘트 확대는 사용처의 제한 및 소비자의 기호 등에 영향을 받기 때문에 시멘트 업계의 노력만으로 결정될 사항은 아니다. 그러므로 시멘트 제조과정 중 에너지 소비량 및 석회석 사용량을 대폭 감소시킬 수 있는 원천기술 개발이 향후에는 필수적으로 검토되어야 한다. 그러므로 본 연구에서는 청정생산 방식 중 원료투입물 대체를 통한 에너지/ CO_2 감축의 일환으로 시멘트 제조공정에서 에너지 소비량과 석회석 사용량을 획기적으로 감축하기 위한 하나의 방법으로 용융슬래그를 시멘트 클링커 제조용 주원료로 사용하는 방법에 대한 환경영향평가의 타당성을 조사하였다.

에너지관리공단의 기획보고서[2]에 따르면 용융고로슬래그는 화학성분이 시멘트와 유사하고 중금속 함량이 시멘트보다

Table 1. CO_2 emission per cement sales (unit: ton/0.1 billion won) [2]

Types of Industry	Steel	Electronics	Glass	Cement	Petroleum	Energy
CO_2 Emission	117	3	24	498	19	135

매우 적은 장점이 있다고 보고하고 있다. 특히 슬래그의 CaO 성분은 전체 성분 중 약 40%를 차지하여 석회석 대체가 가능하고, CaCO_3 가 아닌 CaO 로 구성되어 CO_2 가스 발생이 전무하다는 특징도 갖는다. 그러므로 용융슬래그는 시멘트 클링커 제조성분으로 충분히 사용될 수 있다. 또한 용융슬래그는 자체 열(현열)을 가지고 있어, 클링커 소성에 필요한 열량을 대폭 감소시킬 수 있다. 이는 용융슬래그의 유출온도가 1,400℃ 이상으로 유지되어 클링커 제조용 열원으로 사용될 수 있기 때문이다. 그러므로 본 연구는 대표적 CO_2 다량 발생 산업, 에너지 다소비 산업, 광산개발에 따른 산림파괴 및 시멘트 중금속 함유 등의 문제를 근본적으로 해결할 수 있는 시멘트를 제조하고자 하는 것이다. 이를 위해 제철공정에서 부산물로 발생하는 1400℃ 이상의 용융슬래그를 주원료의 하나로 하고, 여기에 시멘트 제조에 필요한 부원료를 투입하여, 용융슬래그의 자체 열원으로 사용한 시멘트 제조에 관한 것이다 [2].

이 같은 연구를 분석하기 위해서 국내에서 생산되는 시멘트 제품에 대해 원료물질 취득에서부터 제품 제조까지 기준 공정 및 에너지 원료로서 대체에너지 및 용융슬래그를 사용하였다. 이를 위하여 시멘트산업공정에서 고려될 수 있는 경우를 시나리오별로 설정하여 이들이 지구온난화에 미치는 영향에 대하여 시멘트 생산업체 내 기준공정에 대한 데이터를 참고하여 전과정평가를 수행하였다. 또한 현재 사용하고 있는 연료들 중 천연가스는 근본적으로 화석연료로 분류되어 사용하지만, 현 시점에서 가장 빠른 시일 내에 가장 경제적인 방법으로 탄소중립적 에너지소비체계를 구현할 수 있는 에너지이다. 세계적으로도 천연가스를 중심으로 한 청정연료 사용 확대를 가장 효율적인 녹색전략으로 간주하고 있으며, 향후에 탄소제로 에너지 사용 실현을 위한 수소에너지, 태양광 등 미래 신에너지 기술이 시장에 완전 진입 및 정착하기 위한 준비기간까지 기후변화문제와 에너지 문제를 동시에 해결할 수 있는 에너지가 될 수 있다. 이를 위한 CO_2 배출량 저감을 위한 연구도 병행될 예정이다.

2. 연구방법

2.1. 시멘트 생산공정

시멘트산업은 주원료인 석회석과 기타 점토질 광물 등을 혼합 분쇄하여 1,400℃ 이상의 고온에서 소성시켜 시멘트를 제조하는 산업이다. 시멘트는 주성분이 규산(SiO_2), 알루미늄(Al_2O_3), 산화철(Fe_2O_3) 및 석회(CaO)로 구성되며, 석회질 원료와 점토질 원료를 배합비율로 혼합하여 분쇄 후 소성로에

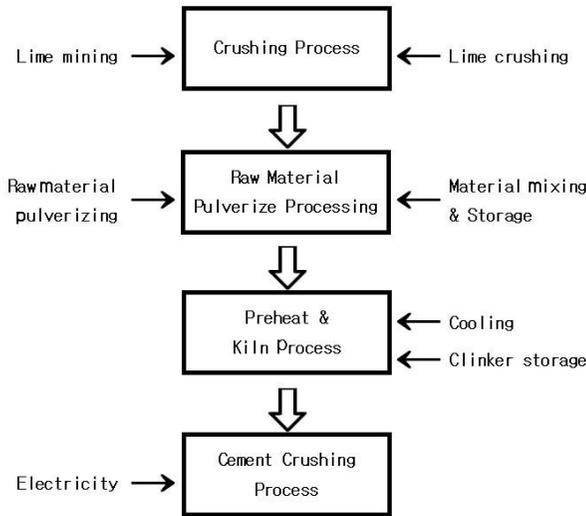


Figure 1. Flow diagram of the cement manufacturing process.

투입하여 킬른(kiln)에서 가열(소성)해서 단단한 괴상의 클링커(clinker)를 만들고, 냉각된 클링커를 석고(CaCO₄ · 2H₂O)와 혼합, 채광, 원료가공, 연료가공, 열처리 및 제품화 등 5개 공정을 통하여 만든다. 이는 15개의 세부공정으로 세분화될 수 있다. 우리나라에서 가장 많이 생산, 사용되는 시멘트는 포틀랜드 시멘트와 체철공정에서 생산된 부산물인 용융고로슬래그를 클링커와 혼합해서 만들어지는 슬래그 시멘트로 구분된다. Figure 1은 시멘트의 Production Process과정이다. 국내 현실을 반영한 시멘트 제품군에 대한 전과정목록분석 결과(life cycle inventory(LCI) 데이터베이스)를 구축하여 전과정영향평가를 수행하였다. 2005년 기준 전체 국내 시멘트 생산량 중 1종 포틀랜드시멘트와 고로슬래그시멘트가 차지하는 비율은 99.55%이다. 따라서 범용성 기준에 의해 1종 포틀랜드시멘트를 연구대상 제품으로 선정하였다.

2.2. 시스템 경계

각 대상 제품의 기능, 기능단위 및 공정흐름도를 Figure 1에 나타내었다. 각 대상제품의 공정흐름도는 계산의 편의성 및 도출된 전과정목록분석 결과의 이용을 쉽게 하기 위하여 기능단위와 동일하게 각 대상 제품별 1 kg으로 선정하였다. 각 대상 제품 1 kg을 생산하기 위한 원료 취득부터 제품 생산까지 대표적이고 일반적인 공정 및 투입물/배출물을 시스템 경계 내에 포함시켰다. 즉, 관계자 및 산업계 전문가의 조언을 통해 시멘트 제조공정을 채광 및 조쇄공정, 원료분쇄공정, 소성공정 및 시멘트 분쇄공정의 4단계로 구분하였다. 또한 단위공정 중 제품 출하시의 검수 등 제품생산공정과 직접 관련이 없고 환경부하가 적을 것으로 판단되는 공정의 데이터는 조사대상에서 제외하였다.

원자재로 사용되는 슬래그는 철강제품 제조 시 발생하는 폐기물이며 시멘트 제조공정에서 연료로써 재활용된다. 이와 같은 슬래그는 다른 시스템에서 폐기된 것으로써 같은 시스템 내에서 재활용되지 않고 시멘트시스템에서 재활용된다. 슬래그는 슬래그 고유 성질의 변화 없이 재활용되며, ISO 14041에

근거하여 슬래그는 철강생산의 단하고리재활용 절차를 가진 열린고리재활용시스템(시멘트 생산공정)에 적용하였다. 지역적 경계로 원/부자재는 국내 데이터나 시멘트업계의 데이터를 기준으로 작성하였다. 특히 기술적 경계는 업계에서 가장 많이 사용하고 있어 국내 생산기술을 대표할 수 있는 평균 공정들을 선정하였다. 도출된 기업별 결과에 생산량 기준으로 평균하여 국내 1종 포틀랜드시멘트의 데이터베이스를 완성하였다.

2.3. 전과정 데이터의 범주

데이터 범주는 크게 에너지, 천연자원, 대기 배출물, 수계 배출물, 폐기물로 분류하였으며, 대상 제품의 전 과정 중 원료의 취득부터 시멘트 생산공정까지를 시스템 경계로 정의하였다. 대상 제품 제조공정의 데이터는 현장에서 수집 가능한 데이터와 문헌상에 나타난 데이터 및 외국 데이터베이스를 기초로 하여 수집하였다. 정의된 시스템 경계를 통과하는 투입물 및 배출물을 자연계 흐름으로 간주하였으며, 의사결정 기준으로서 각 대상제품 1 kg을 생산하기 위한 원료 취득에서부터 제품생산까지 대표적이고 일반적인 공정 및 투입물/배출물을 시스템 경계 내에 포함하였다. 전과정의 단계나 공정 혹은 데이터 요구의 생략은 이 연구에 비추어 봤을 때 전 과정의 단계 중 사용 및 폐기 단계를 제외한 대상 제품 제조공정에 대해 연구를 수행하였다. 또한 단위공정 중 제품 출하시의 검수 등 제품 생산공정과 직접 관련이 없고 환경부하가 적을 것으로 판단되는 공정은 조사대상에서 제외하였으며, 자료수집이 어려운 데이터는 외국의 문헌을 인용하였다. 또한 ISO 14041에 제시된 누적 무게, 누적 에너지 및 환경관련성 등의 기준을 적용하였다. 즉, 누적무게 99.9%까지의 투입물은 연구범위에 포함시켰으며, 에너지 및 유해 화학물질로 규정된 투입물은 투입량에 관계없이 제품 시스템에 포함시켰다.

2.4. 목록 분석

조사 완료된 자료를 투입물/kg 대상제품 및 산출물/kg 대상 제품의 형태로 나타낸 뒤 데이터를 작성하였다. 이때 사용된 원/부자재에 대한 성분조사도 함께 이루어졌으며 투입물에 대한 LCI 데이터베이스 조사도 함께 수행되었다. 투입물을 Simapro 등으로 LCA관련 소프트웨어의 데이터베이스 및 외국의 문헌 데이터를 이용하였다. 대상제품 생산과 관련하여 정량화된 투입물 및 배출물 자료를 이용하여 목록분석 결과를 도출하였다.

동일한 대상제품에 대해 조사된 각 업체별 목록분석 결과물 바탕으로 생산량 기준에서 가중평균값을 구하였는데, 이는 해당 제품군의 국내 전과정목록분석 데이터베이스가 된다. Table 2에 1종 포틀랜드시멘트의 LCI 데이터베이스 중에서 주요 지표만을 선정하여 제시하였다. 시멘트산업공정 내 LCA의 수행은 환경부의 환경성적표지제도에 사용되는 전과정평가 소프트웨어인 Total 3(친환경상품진흥원)과 Simapro 7.2를 이용하여 수행하였으며, 전기, 수송, 경유 등 국내에서 이용 가능한 전과정 환경목록이 존재하는 경우에는 국내의 LCI를 사용하였으며, 그렇지 않은 경우는 해외의 LCI자료를 인용하였다.

Table 2. LCI database in the portland cement industry

	Group	Name	Amount (kg)
Input	Resource	BaSO ₄	1.1990E-04
	"	Al ₂ O ₃	2.1669E-03
	"	Brown coal	0.1802
	"	Caliche	3.1164E-02
	"	CaSO ₄ · 2H ₂ O	7.1251E-02
	"	Crude oil	2.1351E-02
	"	CaF ₂	2.2604E-02
	"	Hard coal	8.0072E-02
	"	Iron ore	0.02136
	"	Limestone	1.6318
	"	Natural gas	3.7603E-03
	"	Quartzite	0.008892
	"	SiO ₂	2.9855E-04
	"	Shale	1.8764E-02
	"	Water	1.5708
Raw material	Unspecified chemicals	1.8093E-02	
	Sulfate	6.4797E-02	
Energy waste	Coal energy	8.3686E-02	
Output	Emission	CO ₂	0.8428
	Waste	Hazardous wastes (domestic)	0.002425
	"	Industrial wastes (domestic)	0.3443
	"	Industrial wastes (foreign)	0.003414
	Product	Portland cement	1
	Waste	Unspecified wastes	0.005928
	Emission	Vapor	0.001835
"	Waste gas	0.007179	

전과정영향평가는 전과정목록분석 결과를 토대로 제품 공정 내의 잠재적 환경영향을 평가하는 것이 주목적이며, 이를 통한 GWP(Global Warming Potential), ODP(Ozone Depletion Potential), AP(Acidification Potential), EP(Eutrophication Potential) 등 특성화된 환경영향을 나타내었다. 이 중 이산화탄소 배출에 따른 지구온난화지수를 전과정영향평가를 통하여 나타내었다. 데이터의 질 요구사항인 시간적 경계를 고려하여 2009년 5월 1일부터 2009년 10월 31일 6개월간의 제조 단계 데이터를 수집하였으며, 기타 데이터는 5년 이내의 데이터의 사용을 목표로 하였다.

3. 결과 및 토의

3.1. T시멘트회사의 CO₂배출량

공장 설립 당시에는 질 좋은 석회석이 많고 인력충원도 가능하였지만, 오늘날에는 지방에서 일하는 것을 기피하여 회사가 대도시에서 인접하게 되었으며, 이로 말미암아 공해 및 먼지 발생 등으로 환경민원이 발생하고 있다. 이에 대한 개선이 초미의 관심사이기 때문에 이에 적극적으로 대처하기 위해서 T시멘트회사는 공장내·외부에서 발생하는 먼지 및 이산화탄소 양을 철저히 조사하여 물질수지식에 입각하여 총 입출량과 총 발생량의 관계를 규명하기 위한 환경영향평가를 전사적으로 실시하였다. 환경영향 사전평가를 위해서 자체관리기준을 정하고 이에 대한 환경영향의 중요성을 점수로 나타내어 심각도를 분류하였다[1]. Table 3에서 보듯이 국내 시멘트회사가 사용하고 있는 에너지의 사용량을 도출하고 청정에너지 및 공해저감 제품을 개발하기 위한 시도로써 저공해연료를 사용을 유도하여 에너지사용량을 저감하면서 청정 공장이 될 수 있도록 원료의 공급에서부터 철저한 관리를 시도하였다. 이와 같은 환경영향의 지속적인 발전을 위하여 환경 개선사항 중 최적의 공해방지시설을 유지·관리하였으며 특히 3R(Reduce, Reuse,

Table 3. Utilization of energy in the cement industry [2]

Item	Energy Source	Unit	Amount of Fuel Used			
			1990	1995	2000	2005
Fossil Fuel	BC oil	K ℓ /year	43,067	218,646	42,445	40,394
	Cokes	ton/year	-	194,612	238,651	249,564
	Bituminous Coal	ton/year	3,712,500	5,752,806	4,810,733	4,226,034
	Coal (imported)	ton/year	-	-	-	41,166
	Coal (domestic)	ton/year	-	-	20,901	-
	Miscellaneous	ton/year	50,665	257,114	-	-
Electricity	Light oil	K ℓ /year	-	48	101	-
Alternative Fuel	Electricity	Mwh/year	3,618,757	6,003,758	5,415,009	5,249,475
	Wastes	ton/year	-	-	-	-
	Waste oil	ton/year	-	134	34,888	126,779
	Waste tile	ton/year	-	-	74,802	280,302
	Waste plastic	ton/year	-	-	3,963	162,486
	AFR	ton/year	-	-	-	12,204
	Waste Total			134	113,653	581,771

Table 4. CO₂ emissions in the cement manufacturing process [2]

(unit: thousand ton)

Item		1990	1995	2000	2005	'90vs'95	'90vs'95	'00vs'05	
Direct	Fuel	Fossil	8,946	14,978	12,349	11,060	67%	-18%	-11%
		Alternative	-	-	309	1,497	-	-	384%
		Sum	8,946	14,978	12,659	12,557	67%	-15%	-1%
	Excarbonation	15,373	27,244	24,002	22,612	77%	-12%	-6%	
Subtotal		24,319	42,222	36,661	35,169	74%	-13%	-4%	
Indirect	Electricity	1,516	2,516	2,269	2,200	66%	-10%	-3%	
Total		25,835	44,738	38,930	37,368	73%	-13%	-4%	

Recycle)운동의 대원칙을 정하여 본격적인 환경운동을 전사적으로 전개하고 이에 대한 실행을 점검하였다.

우선, 포틀랜드시멘트 제품의 환경영향을 정량적으로 평가하는 방법으로 물질로는 원료, 제품생산, 폐기물, 폐수, 대기오염원, 그리고 에너지로는 전기에너지, 연소에너지, 사용 재질의 에너지 사용량, 운송에너지 등의 입출력 데이터를 사용하고 있다. 시멘트 생산을 위한 공정흐름도(Figure 1) 내에서 공정분석을 위한 환경적인 요구사항 중 원재료, 에너지, 대기, 수질, 폐기물의 오염원 방출물에 대한 데이터 수집이 필수적이다. 여기서 얻어진 데이터들은 전과정분석을 전략적으로 이용하는데 사용하며, 장·단기적인 환경전략을 구체적으로 입안하는데 사용할 수 있다. Kiln #7의 공정 내 환경영향평가를 위해 T시멘트회사는 예열, 예비소성, 소결(sintering), 냉각, 저장의 소공정들을 통해 반제품을 만들고 이들에 대한 환경영향평가에서 얻어진 결과에 의해 환경개선의 우선순위를 정하였다[3]. 즉, 이러한 청정관리가 정성적으로 목표 내로 실천되면 생산자가 청정관리 및 에너지절약을 위해서 우선순위를 정하는데 수많은 판단자료로 활용할 수 있다.

국내 시멘트 공장은 주요 소성 열원으로 유연탄을 사용하고 있으며, 이 외에 생활폐기물과 페타이어 등의 대체연료를 사용하고 있다. 유연탄은 전량 수입에 의존하고 있으며, 주요 수입국은 중국, 호주 등이다. Table 3과 같이 1990년 유연탄 사용량은 약 370만 톤이었으나, 이후 시멘트 공장의 킬른 증설에 따라 수입량은 증가하였다. 2000년 이후 유연탄을 대체하기 위한 다양한 연료를 사용하였으며, 이에 따라 최근에는 유연탄 사용량이 소폭 감소하기도 하였다. 그러나 유연탄 수입량은 최근까지도 약 400만 톤을 상회하는 수준이며, 유연탄 가격을 150,000원/톤으로 추정 시 약 6,000억 원 수준이다(Table 3). 또한 유연탄의 카본 함량을 65%로 가정할 경우, 유연탄으로부터의 CO₂ 발생량은 953만 톤(총유연탄의 약 25% 수준)에 이른다. Table 4에서 보듯이 국내 시멘트공장에서의 CO₂ 발생량은 1990년부터 매년 증가하다가 1995년을 정점으로 감소하여 2005년에는 약 3,700만 톤 수준에 이르고 있는데, 이는 유연탄과 석회석 및 전력사용량을 모두 포함한 것이다. 최근 CO₂ 발생량이 소폭 감소한 것은 신형 설비의 교체 및 대체연료 사용에 따른 효과라고 판단되지만, 그 폭은 미미하여 지속적인 감축 노력이 필요하다. 또한 CO₂ 감축은 에너지 사용

량 감소로 이어져 에너지 수입량 감소도 동반될 수 있다. 그러므로 시멘트 공장에서의 에너지 사용량과 CO₂ 발생량 감축을 위해 여러 가지 방안이 검토되고 있으나, 아직까지 획기적인 감축방안은 도출되지 않고 있는 상황이다. 이들 방안은 크게 공정개선, 대체연료/원료 사용, 혼합시멘트 비율 증대, CCS (Carbon dioxide capture and Storage) 개발 등으로 구분할 수 있다.

3.2. 원자재의 대체

석회석을 소성하는 공정은 다량의 이산화탄소를 방출할 뿐만 아니라 에너지 소비량이 많고 폐석회와 같은 폐기 부산물이 발생하므로 이에 대한 청정관리가 시급하다. 최근에 슬래그를 원자재의 일부로 대체하고 있는데, 이 경우에는 폐기되는 슬래그의 재활용율을 높일 수 있을 뿐만 아니라 소성이 필요한 석회석의 양이 줄기 때문에 방출하는 이산화탄소의 양도 감소된다. Figure 2에서 보듯이 Simapro 7.2을 이용하여 Table 2의 데이터베이스 등을 이용하여 포틀랜드시멘트 1 kg을 생산 시 나오는 CO₂발생량을 계산하였다. 실제 T시멘트회사의 경우에는 병커C유, 석유 코크스, 유연탄, 그리고 무연탄을 Table 3의 구성비로 사용하고 있고, 이를 바탕으로 시멘트 1 kg 당 CO₂가 0.322 kg 발생하는 것으로 나타났다(Figure 3). 시멘트 원

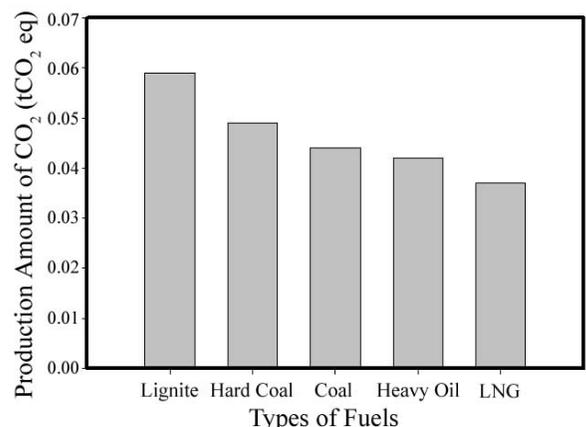


Figure 2. Amounts of CO₂ emissions for various fuels estimated by LCA method.

료인 크링커 100%와 화석연료인 석탄을 사용하는 경우, 시멘트 1 kg을 생산하기 위한 물질유입량과 환경오염원 배출량 등의 inventory data (Table 2)를 기준으로 한 전과정계산 결과는 Table 5와 같다. 이 경우에 발생하는 지구온난화지수(GWP)는 0.375 kg CO₂-eq이고, 오존층과파괴지수(ODP)는 4.81×10⁻⁹ kg CFC-eq이며, 산성화지수는 0.00114 kg SO₂-eq로 나타났다.

그러나 이를 철강제철소에서 발생하는 폐자원인 용융슬래그를 혼합하여 사용하면 화석연료의 사용이 줄어들고, 에너지 비용이 줄어들기 때문에 현재 시멘트산업 현장에서 이를 적극적으로 대체하기를 염원하고 있다. 용융슬래그로 기존의 석회석을 대체하는 경우 기존 석회석을 소성하는 과정에서 탈탄산 과정에서 발생하는 CO₂량이 크게 줄어들기 때문에 시멘트공정에서 발생하는 이산화탄소의 양은 줄어든다. 예를 들면, 1 kg 시멘트 생산을 위하여 석회석 대신에 100% 슬래그로 대체하여 사용하는 경우에는 0.0974 kgCO₂-eq 만이 발생한다. 그러므로 75% 이상의 CO₂배출량이 줄어들었다. Figure 3은 클링커와 용융슬래그의 배합비율에 따라 CO₂배출량의 차이를 보여 주고 있으며, 용융슬래그의 혼합비율에 따라 CO₂배출량이 20%씩 감소하는 것으로 나타났다. 여기서 용융슬래그는 철강(steel)생산하는 과정에서 폐기물인 부산물로 생산되며, 1 kg 철강생산 시 0.314 kg의 슬래그가 철강생산 공정에서 발생하는 것으로 LCA분석 결과 확인되었다. 이 경우에 Figure 3에서 보듯이 1 kg 철강생산 시 LCA 분석결과 CO₂배출량은 1.07 kg CO₂-eq이 생산되는 것으로 나타났다. 이를 단순히 비교하기는 어렵지만 시멘트 생산공정에서 용융슬래그를 원자재 클링커 대신에 대체하여 사용하게 되면 기존 클링커의 탈탄산 과정에서 75% CO₂배출량은 감소하지만 철강생산공정에서

서 슬래그 생산 시 다량의 CO₂ 배출이 수반된다. 이는 철강제품 생산 시 발생하는 부산물로서 필수불가결하게 나타나는 현상으로 본 논문에서는 용융슬래그에 대한 전과정평가 요소로는 고려하지 않았다.

3.3. 대체에너지의 적용

대체연료 및 원료의 사용은 Table 3에서와 같이 2005년 기준 581,000톤 수준으로, 매년 사용량이 증대하는 특징을 나타내고 있다. 그러나 환경 및 인체 유해성 등으로 인하여 폐기물 사용량 증대에 한계가 있으며, 시멘트 공장 주변 주민들의 민원이 제기되기도 한다. 또한 대체연료로 사용할 수 있는 폐기물 자체도 한정적이어서 지속적인 사용량 증대는 어렵다. 시멘트 공정 내 환경영향평가내용을 기준으로 T시멘트회사는 이산화탄소를 비롯한 환경오염물질 배출 감소 및 에너지 사용량 저감을 위해 청정기술을 적용하였다.

석탄을 100% 사용하는 경우에 발생하는 CO₂배출량은 1 kg 시멘트 생산 시 0.375 kg이지만, 석탄 90%-슬래그 10% 혼합연료를 사용하는 경우에 이산화탄소가 0.368 kgCO₂-eq 발생하여 1.9%의 CO₂배출량이 감소하는 것으로 나타났다. 그러나 T시멘트에서 전체 연료를 석탄에서 용융슬래그로 100% 대체하였을 때에는 이산화탄소가 0.308 kg CO₂-eq 발생하는 것으로 나타났고 18%의 이산화탄소의 발생량이 감소하였다. Figure 4는 석탄과 용융슬래그의 화석연료 대체비율을 통해 발생하는 이산화탄소 발생량을 그림으로 나타낸 것이며 슬래그 10%씩 대체비율을 증가시키면 발생하는 이산화탄소의 발생량은 최종 18%까지 감소되는 것을 보여 주고 있다. 그러나 연산 1억1천만 톤의 시멘트를 생산하는 T시멘트산업공정에서는 석탄(유연탄)과 용융슬래그를 혼합하여 사용하고 있고 혼

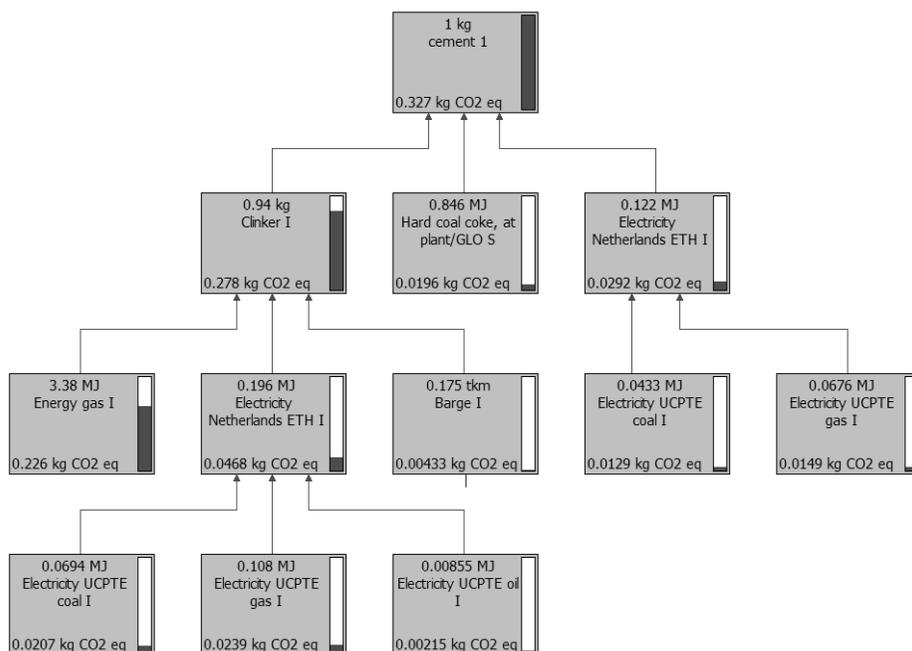


Figure 3. LCA results obtained from Simapro 7.2 software.

Table 5. Environmental effects in the mixed raw materials

Environmental Factor	Unit	Total			Clinker			Fossil fuel (Oil)	Electricity
		Clinker 100%	Clinker 50%, Slag 50%	Slag 100%	Clinker 100%	Clinker 50%, Slag 50%	Slag 100%		
Global warming (GWP 100)	kg CO ₂ -eq	0.375	0.236	0.0974	0.278	0.139	0	0.0672	0.0292
Ozone depletion (ODP)	kg CFC-11-eq	4.81 × 10 ⁻⁹	3.33 × 10 ⁻⁹	1.85 × 10 ⁻⁹	2.96 × 10 ⁻⁹	1.48 × 10 ⁻⁹	0	0	1.85 × 10 ⁻⁹
Photochemical oxidation	kg C ₂ H ₄	6.73 × 10 ⁻⁵	5.02 × 10 ⁻⁵	3.32 × 10 ⁻⁵	3.41 × 10 ⁻⁵	1.7 × 10 ⁻⁵	0	2.49 × 10 ⁻⁵	7.17 × 10 ⁻⁶
Acidification	kg SO ₂ -eq	0.00114	0.000865	0.000587	0.000556	0.000278	0	0.000461	0.000112
Eutrophication	kg PO ₄ ²⁻ -eq	0.000134	8.09 × 10 ⁻⁵	2.82 × 10 ⁻⁵	0.000105	5.27 × 10 ⁻⁵	0	1.67 × 10 ⁻⁵	8.92 × 10 ⁻⁶

합비율이 석탄 70% : 슬래그 30%인 경우에 저감되는 이산화탄소의 양은 220만 ton CO₂-eq인 것으로 나타났다.

3.4. 폐열의 재이용

시멘트 제조공정에서 에너지 효율성 향상을 위해 고려될 수 있는 설비 개선방법은 크게 mill separator의 개선, 에너지효율 개선 및 폐열발전시스템의 도입 등 다양한 방법을 들 수 있다. 그러나 고효율 설비로의 개조를 위해서는 에너지 효율성뿐만 아니라, 현재 국내에서 기설치 현황 및 경제적 투자 타당성 등이 고려되어야 한다.

이산화탄소 배출량을 줄이기 위해 킬른공정에서 기존의 클린커를 예비소성로로 대체함으로써 에너지사용량을 줄일 수 있었다. 또한 대체되는 기술로는 고효율의 전기모터를 사용하고 분쇄시스템을 향상시키기 위해 고강도 분쇄공구를 사용하는 사례를 통해 에너지 절감과 이산화탄소 배출을 줄일 수 있다. 그러나 이 경우에 저감되는 CO₂발생량은 0.2% 미만으로 미미한 수준이다. 현재 시멘트 제조공정 중 소성로에서 발생하는 열을 제품생산에 사용한 후 폐열을 이용한 전력생산에 재

활용하기 위한 연구가 다음과 같이 진행되고 있다. Figure 5에서 보듯이 실제 T시멘트 제조공정에서 kiln에서 배출되는 배기가스의 온도는 평균적으로 450℃이며 이 배기가스의 폐열을 회수하여 kiln의 버너 연소용 공기를 예열하기 위하여 에너지를 공급하거나 열교환기의 열원으로 이용하기 위하여 341℃로 방출되고 있다. 배기가스와 열교환 승온 후 버너로 공급되는 예열공기의 일부를 분기 후 열교환기를 설치하여 전력을 생산, 공정 내에서 재이용하고 있다.

배기가스의 폐열을 회수하고는 있지만, 341℃의 고온 폐열을 배기가스와 열교환으로 승온되는 터빈버너 연소 공급공기의 일부를 전기 생산의 열원으로 이용함으로써 Kiln의 소성로의 전기사용료를 절감할 수 있도록 한다. 연산 1억1천만 톤의 시멘트를 생산하는 T시멘트 공장인 경우에는 폐열을 전기 생산에 활용하는 비율이 10%로 가정할 때, 절감할 수 있는 이산화탄소의 양은 Figure 6에서 보듯이 32만 톤 CO₂-eq의 양이 된다. Figure 6은 상당량의 폐열을 이용하여 전기사용량을 20%에서 70%까지 대체하는 경우에는 일 년에 77만 ton CO₂-eq에서 231만 ton CO₂-eq의 양을 감소시킬 수 있다. 그러나 T시멘트회사의 경우에 재활용된 폐열을 이용해 생산된

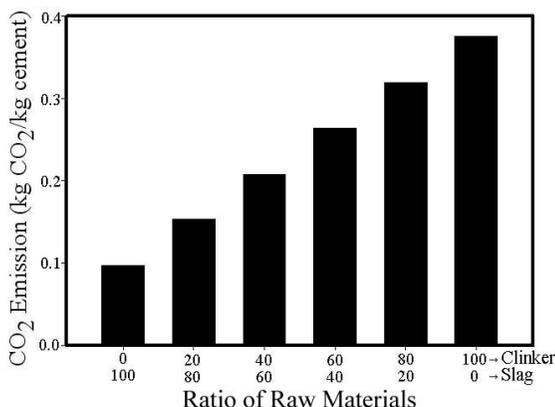


Figure 4. Variations in the CO₂ emission depending upon the ratio of clinker and slag in the raw material.

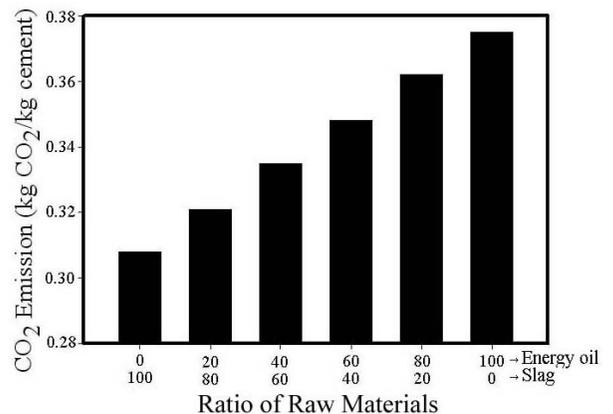


Figure 5. Variations in the CO₂ emission depending upon the ratio of clinker and slag as an alternative fuel.

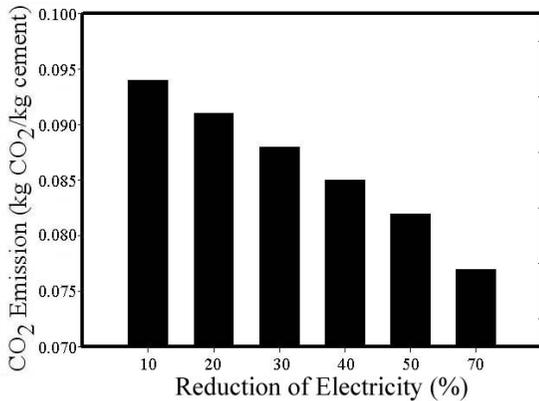


Figure 6. Variations in the CO₂ emission vs. percent electricity reduction.

전기량은 26.1 MWh/yr이고, 실제로 저감할 수 있는 이산화탄소의 양은 82,000 ton CO₂-eq이며, 절감되는 전기료는 일년에 50억 원 되는 것으로 나타났다. 이는 전체 T시멘트회사에서 사용하는 전체 소요되는 전기사용량과 비교할 경우에 저감할 수 있는 전기 절약율은 2.5%이고, 저감되는 이산화탄소의 양은 0.76%인 것으로 나타났다. 이로써 폐열을 이용하면 전기 생산을 통한 전기사용료 대체효율은 크지만, 실제 청정기술적인 측면에서 CO₂발생량을 저감하는 데에는 크게 기여하지 못하는 것을 알 수 있다.

3.5. 천연가스로의 에너지 대체

천연가스는 화석연료이지만 물질구조상 수소 대 탄소의 비가 4 : 1로써 석탄, 석유 등 타 화석 연료에 비해 탄소 1개당 수소의 수가 많으므로 연소 시 상대적으로 적은 이산화탄소를 배출하며, 황, 질소 등의 불순물이 거의 없기 때문에 LNG로의 액화공정에서 황산화물, 질소산화물과 대기오염물질 배출이 타 화석연료에 비해 적고 사용 후 잔여 폐기물이 남지 않아 재처리가 필요 없는 편리한 연료이다. 기후변화협약이 진행되면서 천연가스가 비록 화석연료이기는 하지만 저탄소 연료인 천연가스에 대한 관심이 높아지고 있다. 온실가스 배출이 상대적으로 적은 천연가스로의 연료전환을 청정개발체제(CDM)사업으로 승인해주는 등 이미 천연가스의 친환경성은 국제적으로 인정되고 있으며, 천연가스와 관련한 다양한 CDM사업들이 국내에서도 진행되고 있다. 화석연료를 이용한 에너지 사용을 천연가스로 대체하는 경우에 시멘트 1톤 생산 시 발생하는 이산화탄소의 양이 0.315톤으로서 기존의 연료보다 37%의 저감효과를 가져온다. 여기서 37%의 CO₂ 발생 저감율은 석회석 탈탄산반응과정에서 자체 발생하는 CO₂량을 제외한 화석연료 대체사용에 따른 것이다.

만일 시멘트회사들이 연차적으로 연료 대체계획을 수립하여 100% 천연가스로 대체한다고 가정해 보기로 한다. Figure 2에서 보듯이 시멘트생산을 1억1천만 톤이라고 가정할 경우 클린커 생산 시 탈탄산 화학반응에 의해 공정 내에서 발생하는 CO₂의 양을 제외하면, 연료로 사용하는 경우에 발생하는 CO₂

의 양은 석탄은 4,840,000 ton CO₂-eq, 갈탄은 6,490,000 ton CO₂-eq, 무연탄은 5,390,000 ton CO₂-eq, 중유는 4,620,000 ton CO₂-eq, 천연가스는 4,070,000 ton CO₂-eq인 것으로 나타났다. 결론적으로 무연탄 대신 천연가스를 사용하게 되면 1,070,000 ton CO₂-eq의 이산화탄소 발생량을 줄일 수 있으며, 이는 24.5%의 이산화탄소 저감을 의미한다. T시멘트의 경우에는 천연가스를 사용할 경우 갈탄에 비해 2,420,000 ton CO₂-eq의 이산화탄소를 줄일 수 있으며, 37.3%의 이산화탄소 발생량을 감소시키는 것으로 LCA분석결과 나타났다. 그러므로 현재 우수한 CO₂ 저감 방법을 사용하지 않는 T시멘트의 경우에는 천연가스 사용에 의해 이산화탄소 배출량을 크게 감소시킬 수 있을 것이다.

3.6. 기대효과

T시멘트의 경우에 보일러 등 에너지원을 용융슬래그로 대체하고 원자재를 슬래그로 대체하는 경우에는 화석연료를 사용하는 경우와 비교하여 90% 정도 개선효과가 있으며, 가용한 청정기술로 대체하는 경우에는 현재 가동 중인 T시멘트회사의 이산화탄소 배출량을 크게 줄일 수 있는 것으로 나타났다. 즉, 석탄을 에너지원으로 사용하는 경우에는 이산화탄소가 4,125만 ton CO₂-eq 정도가 발생하나 용융슬래그로 대체하는 경우에는 이론적으로 3,795만 ton CO₂-eq로 줄일 수 있다.

시멘트회사의 환경에 대한 강점과 약점을 파악하고 환경 관련 절차를 수립해 봄으로써 초보적인 회사 내 하부구조 구축을 통한 청정관리가 가능하게 되었다. 특히 환경 관련 데이터베이스를 구축하여 보다 정성적인 관리가 가능하게끔 함으로써 청정기술의 도입을 통한 개선사항들을 정량화하는 데 크게 기여하였다. 그리고 환경경영의 효율적인 운영을 통하여 종업원의 환경의식을 고취시키고 관련 법규를 준수하면서 환경성과를 향상시키는 계기가 되었다. 특히 에너지를 절감하면서 폐기물을 재자원화하는 청정관리의 초보적인 단계를 수립하였는데, 청정관리적인 측면에서 에너지 관리를 통하여 공정별 에너지절감을 실시하였으나 첫해부터 크게 감소시킬 수는 없었다. 그러나 원재료 사용의 공정대체기술 등으로 소성로 내 시멘트 원료인 클린커의 탈탄산반응이 일어나지 않는 것만으로도 CO₂ 발생량을 74% 저감효과를 가져올 수 있다.

4. 결 론

온실가스 배출 저감을 위해 시멘트업계는 폐자원의 대체연료 사용, 시멘트 첨가제의 투입 비용 확대 등 다각적인 조치를 취하고 있다. 이 연구에서는 시멘트산업공정 내 에너지 회수를 통한 다양한 시나리오를 전과정평가를 통하여 이산화탄소 배출량 및 오존층에 끼치는 영향을 분석하였다. 시멘트 제조공정에서 유연탄만을 연료로 사용한 경우에 CO₂ 배출량이 가장 많고 지구온난화에도 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 유연탄을 사용하는 경우보다 폐기물을 에너지원으로 전량 전환하여 사용하는 경우에 이산화탄소가 최대 18% 저감되는 것으로 나타났다. 또한 시멘트산업공정에서 탈탄산과정을 통한 CO₂발생

량이 워낙 크기 때문에 소석회 상태의 원자재사용을 대체하는 경우에 CO₂발생량을 74% 이상 크게 감소시킬 수 있다. 시멘트 회사들은 점차 연료용 폐기물 사용 비중을 늘리고 있는 추세이지만, 아직도 이러한 폐기물 관련 시설 투자 및 운송비에 대한 국내 업체들의 투자 비중이 선진국보다 현저히 낮다.

앞으로 이러한 문제를 해결하고 폐자원을 이용하여 이산화탄소 저감 효과도 얻고 이를 통해 지구온난화에 끼치는 영향도 줄여야 할 것이다. 본 연구에서는 제조공정에 대한 데이터로서 통계자료를 기반으로 한 현장 데이터를 조사하여 사용하였으므로 데이터의 신뢰성이 높다. 그러나 원자재 및 부자재 등의 upstream에 대한 데이터는 외국의 데이터베이스 및 문헌데이터를 활용함으로써 데이터의 신뢰성이 낮게 되었다고 판단된다. 향후 국내에서도 전과정목록 데이터베이스의 추가 구축을 통하여 upstream 데이터베이스의 신뢰성을 제고시킬 필요가 있다.

감 사

본 논문을 위해 시멘트공정의 데이터 수집을 위해 노력하신

(주)푸른들의 우항구님과 환경영향평가 소프트웨어 운영 및 데이터베이스 도출을 위해 협조를 주신 대진대학교 홍유나님에게 감사드립니다. 또한 연구논문을 위해 물심양면으로 협조를 주신 한국환경산업기술원 관련자분들에게도 진심으로 감사드립니다. 또한 본 연구 수행을 위해 일부 연구비(2010년)를 지원한 대진대학교에도 감사드립니다.

참고문헌

1. KEMCO, "Database Structure of Energy Technology," Korean Energy Management Cooperation Report, April, 2004.
2. KIETEP, "CO₂ Minimum Cement Manufacturing Using Slag," Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning's Strategy Report, March, 2010.
3. Park, Y., "Clean Process Management using ISO 14001 Environmental Assessment Method," *Clean Tech.*, 5(2), 13-23 (1999).