



저작자표시-동일조건변경허락 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



동일조건변경허락. 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건하에서만 배포할 수 있습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

석사학위논문

시멘트산업 대체연료의 온실가스  
배출계수 개발 및 저감량 평가 연구

세종대학교 대학원

지구환경과학과

윤 석 경

시멘트산업 대체연료의 온실가스  
배출계수 개발 및 저감량 평가 연구

지도 전의찬 교수

이 논문을 석사학위 논문으로 제출 함

2006 년 12 월 일

세종대학교 대학원

지구환경과학과

윤 석 경

석사학위논문

시멘트산업 대체연료의 온실가스  
배출계수 개발 및 저감량 평가 연구

세종대학교 대학원

지구환경과학과

윤 석 경

## 감사의 글

“그리워하는데도 한 번 만나고는 못 만나게 되기도 하고  
일생을 못잇으면서도 아니 만나고 살기도 한다.”

— 피천득, <인연> 中 —

사랑하는 많은 사람들과 인연이라는 끈을 맺어온 모든 분들께 감사드립니다. 오늘의 저를 있게 하고 저와 호흡을 같이 한 분들이 있었기에 저는 행복하였음을 느끼며, 항상 인연을 소중히 여기며 살겠습니다.

학문과 일상생활을 자상히 이끌어주시고, 늘 한결 같으신 모습으로 본 논문을 지도해 주신 전의찬 교수님께 먼저 마음 깊이 감사드립니다. 처음 뵈었을 때부터 변함없으신 교수님의 학문에 대한 열정을 존경으로, 제자들을 가족과 같이 사랑하며 아끼시는 교수님의 모습을 감사의 마음으로 깊이 간직하고자 합니다. 학부과정을 비롯하여 대학원과정에서도 아낌없이 많은 칭찬과 질타로 큰 가르침을 주신 김기현 교수님, 언제나 웃으시며 저를 격려해주신 송지현 교수님, 허진 교수님, 이 논문의 심사위원으로 논문지도를 아끼지 않으신 배위섭 교수님께 감사의 마음을 드립니다.

언제나 실험실의 큰 오빠로서 아낌없는 조언을 해주신 재환오빠, 부족한 저에게 항상 따뜻한 마음으로 많은걸 알려주신 종호오빠, 늘 웃음을 선사해 주신 성호오빠에게 감사의 마음을 전합니다. 항상 많은 도움을 주고 말벗이 되어준 대학원 동기이자 때론 친구 같은 재학오빠, 학부 동아리 때부터 친구처럼 지낸 호수, 뒤늦게 연을 맺었지만 항상 많은 조언

을 주신 명수정 박사님, Piw 든든한 동기이자 실험실 후배 진수와 논문 실험을 도와준 시형, 항상 굿은일도 마다하지 않고 묵묵히 열심인 정우에게 너무나 고마운 마음을 전합니다.

대기오염연구실의 대학원 동기인 문순오빠, 항상 밝은 미소로 대해준 윤정언니, 신영, 귀여운 꼬맹이들 가영, 가나에게도 고마운 마음을 전합니다.

뒤늦게 친해져 아쉽지만 항상 독특한 언어를 구사하는 승규오빠, 일 년 반 동안 과 조교로서, 애교 많은 동생으로서 많은 즐거움을 나눈 상은, 항상 응원과 격려해준 이쁜 아리에게도 감사의 말을 전합니다.

늘 즐거운 시간과 많은 웃음을 선사해준 건국대학교 기준오빠, 강남오빠, 윤석오빠, 유정오빠, 영일오빠, 현주, 보아에게도 감사의 말을 전하며, 항상 심적으로 힘들 때 많은 도움과 많은 사랑을 베풀어주신 증식오빠에게 특별한 감사의 말을 전합니다.

늘 바쁘다는 이유로 자주 만나지 못했지만 언제나 나의 든든한 후원자이자 소중한 벗 수연에게 미안하고 고마운 마음을 전하며, 특별한 감사의 말을 전합니다. 대학교부터 연을 맺어 정말 소중한 친구가 된 진연과 송이에게도 마음 깊은 감사의 말을 전합니다. 또한 대학교 동기이자 세달마다 회원들 민재, 석우, 기태, 형진, 우철, 정용, 동원, 정경에게 감사의 말을 전합니다.

바쁘다는 핑계로 집에 소홀한 딸에게 늘 한결같은 마음으로 사랑을 주시고, 항상 저의 의견을 존중해 주시며 튼튼한 버팀목인 아버지, 어머니께 끝없는 감사를 드리며, 사랑한다는 말을 전합니다. 그리고 누나를 위해 늦은 시간에 학교까지 와주며 끝까지 응원해준 동생 석현이에게도 감사의 마음을 표현하고자 합니다.

그리고 짧은 글에 빠져있는 모든 분들께 늘 감사하고 있다는 말씀을 드립니다.

# 목 차

<b>제 1 장. 서론</b> .....	<b>1</b>
1.1 연구의 배경 및 목적 .....	1
1.2 연구 내용 및 구성 .....	3
<b>제 2 장. 이론적 배경</b> .....	<b>4</b>
2.1 시멘트산업의 현황 .....	4
2.1.1 시멘트 수급 추이 .....	4
2.1.2 시멘트사업장의 현황 .....	6
2.2 시멘트 제조공정의 개요 .....	7
2.3 시멘트산업의 온실가스 배출 특성 .....	15
2.3.1 배출량 산정 방법론 .....	16
2.4 시멘트산업의 대체연료 특성 및 사용현황 .....	19
<b>제 3 장. 연구방법</b> .....	<b>22</b>
3.1 연구대상 선정 .....	22
3.2 대체연료 분석방법 .....	22
3.2.1 발열량 분석 .....	22
3.2.2 원소 분석 .....	23
3.2.3 연료 분석의 정도관리 .....	25
3.3 대체연료 배출계수 산정 방법 .....	30

제 4 장. 결과 및 고찰 .....	32
4.1 대체연료 배출계수 산정 .....	32
4.1.1 대체연료 발열량 분석 결과 .....	32
4.2.2 대체연료 원소분석 결과 .....	37
4.1.3 대체연료별 배출계수 산정결과 .....	42
4.2 기존 화석연료와 대체연료의 온실가스 배출계수 비교 .....	45
4.3 대체연료 사용에 의한 온실가스 배출량 산정 .....	47
4.4 대체연료 사용에 의한 온실가스 배출 저감량 산정 .....	48
제 5 장. 결론 .....	54
참고문헌 .....	57
Abstract .....	60



## List of Table

Table 1. Trend of demand and supply for cement in Korea	4
Table 2. Domestic cement manufacturing companies	6
Table 3. Current status of CO <sub>2</sub> emission from cement industry	15
Table 4. Recycling of waste by-products in cement industry	20
Table 5. Consumption ratio of alternative fuels in cement industry	21
Table 6. Quantity of Consumption of alternative fuels in domestic cement industry	21
Table 7. Analyzing condition of elemental analyzer	24
Table 8. Reproducibility test for calorific value analysis using benzoic acid.	26
Table 9. Worksheet for emission factor calculation	30
Table 10. Calorific values of waste tire	33
Table 11. Calorific value analyses for waste plastic	34
Table 12. Analyses of calorific value for WDF	35
Table 13. Analyses of calorific value for RDF	36
Table 14. Elemental analyses for waste tire	37
Table 15. Elemental analyses for waste plastic	38
Table 16. Elemental analyses for WDF	39
Table 17. Elemental analyses for RDF	41
Table 18. Summary of calorific value and elemental analysis for different fuel types	42
Table 19. Emission factors for alternative fuels	43
Table 20. Comparison of other result for emission factors	43
Table 21. CO <sub>2</sub> emission factors for different fuel types	45

Table 22. CO <sub>2</sub> emissions with respect to alternative fuel application for two companies.....	47
Table 23. Estimation of CO <sub>2</sub> emission factors for bituminous coal ..	49
Table 24. Estimation of CO <sub>2</sub> emissions using alternative fuels.....	50
Table 25. Estimation of CO <sub>2</sub> emissions using of only bituminous coal.....	50
Table 26. Estimation of CO <sub>2</sub> emissions in manufacture process.....	52
Table 27. Estimation of emission reduction for CO <sub>2</sub> when using alternative fuels.....	53

#### List of Figure

Fig. 1. Production trend of cement and clinker.....	5
Fig. 2. Flow diagram of chemical reactions and products.....	8
Fig. 3. Flow diagram of limestone mining.....	10
Fig. 4. Flow chart showing pulverization of raw material.....	11
Fig. 5. Flow chart for the developing of plasticity.....	13
Fig. 6. Flow chart for production of cement.....	14
Fig. 7. Results of calorific values using injecting standard.....	27
Fig. 8. Result analyzing reproducibility of sulfanilamide.....	28
Fig. 9. Result analyzing reproducibility of BBOT.....	29
Fig. 10. Reproducibility of BBOT with respect to reiteration analysis.....	29
Fig. 11. Comparison of various studies for CO <sub>2</sub> emission factors.....	44
Fig. 12. Comparison of CO <sub>2</sub> emission factor for alternative fuels with respect to bituminous coal.....	46
Fig. 13 Valorization of wastes in cement kilns reduces emissions.....	48
Fig. 14 Comparison of CO <sub>2</sub> emissions using alternative fuels.....	51
Fig. 15 Comparison of gross emission and net emission.....	53

## 제 1 장. 서론

### 1.1 연구의 배경 및 목적

지구온난화를 유발하는 온실가스의 대기 중 농도가 산업화의 진행에 따라 지속적으로 증가하는 추세를 보이고 있다. 온실가스가 현재와 같은 비율로 증가하게 되면 2100년까지 지구 전체의 평균기온이 현재에 비해 약 0.8~3.5 °C 상승할 것으로 예측되고 있으며, 이상기후, 생태계의 교란, 해수면의 상승, 토양침식 증가 등과 같은 추가적인 문제가 예측된다(이강복, 2002). 기상청의 발표에 의하면 한국의 평균기온도 과거 70년간 1 °C 상승하였으며, 국립해양조사원은 평균 해수온도가 최근 10년간 0.7 °C 상승했다고 발표했다. 이와 같은 지구온난화에 대한 현상은 명백히 인간 활동에 의해 야기된 것으로 추론하고 있다(임재규, 2004).

지구온난화현상에 대한 대책을 추진해야 한다는 주장이 세계적 공감대를 형성하여, 세계 각국은 지난 “1992년 RIO 세계환경정상회의”에서 기후변화협약(United Nations Framework Convention on Climate Change : UNFCCC)을 채택하여 지구온난화 방지를 위한 국제적인 노력을 개시하였다. 이어서 1997년 기후변화협약 제 3차 당사국총회에서 교토의정서(Kyoto Protocol)를 채택하였다. 교토의정서에는 흡수원에 대한 인정과 국가간 배출권 거래를 인정하도록 한 배출권거래제(Emission Trading : ET)와 선진국이 후진국에 온실가스 저감 기술을 전수하고 온실가스의 저감실적을 기술 투자국의 감축분으로 인정하는 청정기술개발체제(Clean Development Mechanism; CDM)에 대한 내용이 명시되어 있다. 그리고 온실가스 배출감축 의무가 있는 선진국(Annex I 국가)들은 제 1차 공약 기간(2009~2012년) 중에 온실가스 배출량을 1990년 대비 평균 5.2 % 감

축하기로 합의하였다(Kyoto Protocol, 1997).

이러한 추세에 따라 온실가스의 여러 가지 발생원에 대한 방출 및 흡수에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있으며, 특히 온실가스 배출량이 많은 시멘트 산업에 큰 관심이 집중되고 있다(CSI, 2005).

시멘트산업은 철강 및 석유화학산업과 함께 우리나라의 대표적인 에너지 다소비산업이다(에너지경제연구원, 2005). 우리나라의 경우 에너지 다소비산업에 대한 그동안의 지속적인 에너지 절약정책 추진결과 에너지 효율은 국제적으로 높은 수준에 이르고 있는 것으로 알려지고 있다. 이러한 노력에도 불구하고, 향후 우리나라가 유엔기후변화협약(UNFCCC)에 의한 온실가스 감축 의무부담을 이행하게 될 경우 시멘트산업을 포함한 에너지 다소비산업도 감축의무를 이행해야 할 것으로 예상된다(과학기술부, 2005).

본 연구에서는 시멘트산업에서 사용하고 있는 대체연료의 온실가스 배출계수를 개발하고자 한다. 또한 개발한 배출계수를 시멘트 산업에 적용함으로써 사업장에서 실제 배출되는 온실가스 배출량을 보다 정확히 산정하고자 한다. 그리고 대체연료 사용에 따른 온실가스 배출 저감량을 산정하여, 시멘트 산업의 온실가스 저감대책의 하나로서 대체연료 사용 가능성을 평가하고자 한다.

## 1.2 연구 내용 및 구성

시멘트산업은 에너지 다소비업종으로, 에너지 사용량이 다른 산업분야에 비하여 매우 많으며, 원료에서 이산화탄소가 다량 배출되는 특성을 갖고 있다. 이에 따라 기후변화협약에 의하여 온실가스 배출감축의 의무가 부과될 때, 타격이 큰 산업분야로 알려져 있다.(에너지경제연구원, 2005). 시멘트산업은 고온에서의 연소와 긴 반응시간 등의 이유로 CO<sub>2</sub> 이외의 다른 온실가스는 거의 배출되지 않는다(UNFCCC, 2006). 따라서 본 연구에서는 온실가스를 이산화탄소로 국한하고, 대체연료 중 폐유 및 폐합성수지(RDF)를 많이 사용하고 있는 ‘A’ 사업장과 폐타이어와 폐플라스틱을 많이 사용하고 있는 ‘B’ 사업장을 대상시설로 선정하였다.

본 연구의 내용 및 진행 절차는 아래와 같다.

1] 시멘트산업에서의 온실가스 배출계수 개발을 위한 연구 및 이론을 검토 정리하고, 시멘트 산업에서의 온실가스 배출 특성과 측정방법에 대해 고찰한다.

2] 시멘트산업에서 현재 사용중인 폐타이어, 폐유, 폐합성수지(Refuse Derived Fuel; RDF), 폐플라스틱 등의 대체연료 시료의 원소 및 발열량 분석을 통해 대체연료의 배출계수를 개발하고, IPCC(Intergovernmental panel on Climate Change) 및 WBCSD(World Business Council for Sustainable Development)/CSI(Cement Sustainability Initiative)에서 제시하는 Default value와 비교한다.

3] 개발한 배출계수를 실제 시멘트 산업에 적용하여 대체연료에 의한 온실가스 배출량을 산정하고, 대체연료 사용에 따른 온실가스 저감량을 평가한다.

## 제 2 장. 이론적 배경

### 2.1 시멘트산업의 현황

#### 2.1.1 시멘트 수급 추이

우리나라 시멘트산업은 6·25전쟁으로 거의 모든 생산시설이 파괴된 상태에서 1957년 후반 문경공장이 새로 가동되면서 새로운 면모를 갖춰 나가기 시작하였다(한국양회공업회). 1971년에는 세계 제20위의 시멘트 생산국으로 부상했으며, 수출은 100만 톤을 상회하여 세계 제 11위의 수출국으로 부상하였다. 또한 시멘트의 생산 및 소비는 1980년대의 올림픽과 신도시 개발, 1990년대의 도시건설, 주택건설 및 도로공사 등의 사업으로 지속적인 증가세를 나타내고 있다(노동운, 2005).

시멘트 생산량은 1991년의 38,335천 톤에서 1997년에 59,796천 톤으로 정점에 이른 후, IMF의 영향으로 1998년에는 전년대비 23 % 하락하였다. 그러나 1999년부터 다시 증가하기 시작하여, 2003년의 생산량은 59,194천 톤으로 최고 생산년도인 1997년 수준에 근접하였으며, 이후 2004년 54,330천 톤, 2005년에는 47,197천 톤으로 2003년을 기점으로 다소 감소하고 있는 실정이다.

**Table 1. Trend of demand and supply for cement in Korea**  
(unit: thousand tons)

	1991	1995	2000	2003	2004	2005
Production	38,335	55,130	51,255	59,194	54,330	47,197
-slag	1,710	3,609	5,074	7,847	8,736	8,046
-clinker	34,999	51,894	45,719	51,575	48,251	43,071
Exportion	1,228	966	3,945	2,612	2,641	4,024
Importion	7,160	2,082	518	1,809	3,398	3,403
Domestic consumption	37,115	56,502	48,000	58,302	54,942	46,286

\* Korea cement industrial association

시멘트 소비량 역시 시멘트 생산량과 비슷한 추이를 나타내고 있으며 1997년을 정점으로 1998년에 급감한 이후 다시 증가하고 있다. 시멘트 소비량은 1991년 37,115천 톤에서 2003년에는 58,302천 톤에 이르러 연평균 3.83%의 증가율을 나타냈다. 그리고 2004년 54,942천 톤, 2005년에는 46,286천 톤으로 점차 감소하고 있는 실정이다. 클링커 생산량 역시 그림 1에서 보는 바와 같이 시멘트 생산량 및 소비량과 비슷한 추이를 나타내고 있다. 클링커 생산량은 1991년의 34,999천 톤에서 2003년에는 51,575천 톤으로 증가하여 연평균 3.28 %의 증가율을 기록했으나 2004년 48,251천 톤, 2005년에는 43,071천 톤으로 감소하는 추세이다. 클링커 생산량이 시멘트 생산량에서 차지하는 비중은 1991년의 91.3 %, 2003년 87.1 %로 소폭 축소되었으나, 2004년에는 88.8%, 2005년에는 91.3%로 소폭 상승했다(대한양회공업회).

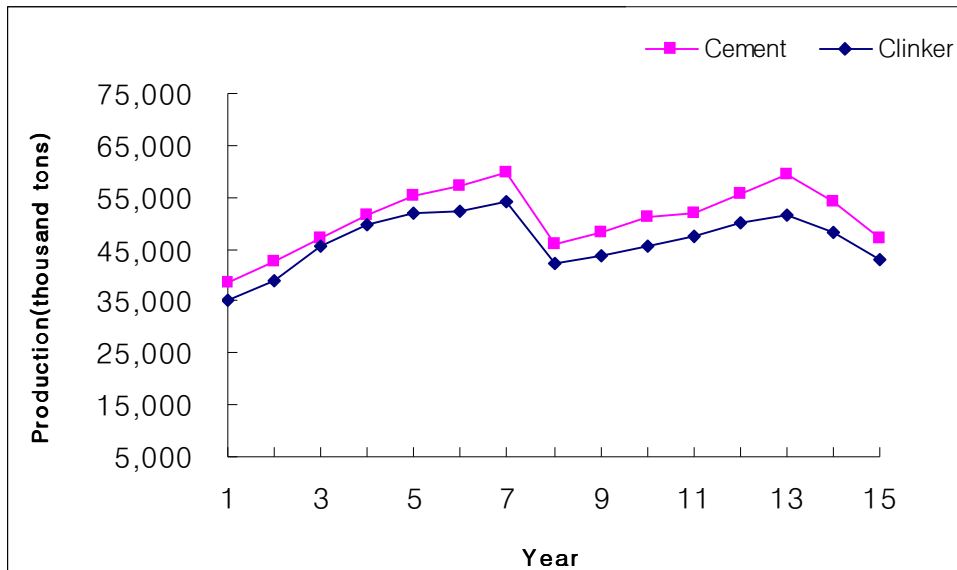


Fig. 1. Production trend of cement and clinker

한편, 1978년에 처음 도입된 고로슬래그시멘트는 생산비 절감 및 이산화탄소 감축 기술의 하나로 각광받으면서 생산량이 빠르게 증가하고 있다. 2004년 고로 슬래그시멘트 생산량은 8,736천 톤에 이르러 1991년 생산량 1,710천 톤에 비해 약 5배 정도 증가하였다. 이에 따라 슬래그시멘트가 전체시멘트 생산량에서 차지하는 비중도 1991년 4.5 %에서 2004년 16.1 %로 급상승했다. 2004년을 기점으로 경기 하락의 영향으로 시멘트 생산 및 소비가 감소하는 상황에서도 슬래그시멘트 생산량은 증가세를 나타내고 있다.

### 2.1.2 시멘트 사업장의 현황

국내 시멘트 제조업체의 현황은 표 2와 같다. 2003년 현재 국내에는 총 12개 사업장의 시멘트 제조업체가 가동 중에 있다. 포틀랜드시멘트 제조업체는 총 9개 사업장으로 해안 3개 사업장, 내륙 4개 사업장으로 구분할 수 있다. 대표적인 슬래그시멘트 제조업체는 고려시멘트, 한국고로시멘트, 대한시멘트 등 3개 사업장이며, 광양에 5개사, 포항에 3개사, 부강에 1개사 등이 슬래그시멘트를 생산하고 있다.

**Table 2. Domestic cement manufacturing companies**

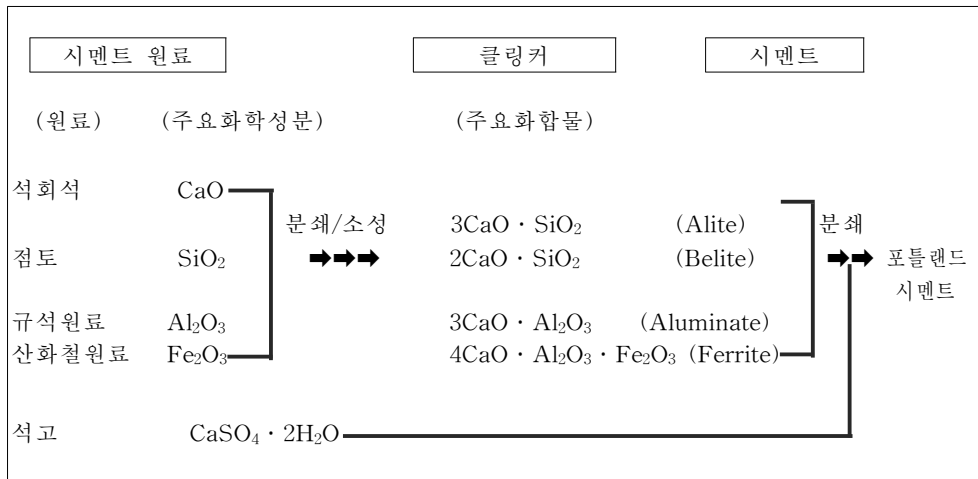
manufacturer for Portland cement			manufacturer for Slag cement		
해안사	내륙사	기타	광양	포항	부강
쌍용양회	한일	고려	대한	한국	성신양회
라파즈한라	현대	유니온	고려	한일	
동양	아세아		라파즈한라	수성	
	성신양회		동양		
			쌍용양회		
3개사	4개사	2개사	5개사	3개사	1개사
Total 9 company			Total 9 company		



## 2.2 시멘트 제조 공정의 개요

시멘트 산업은 주원료인 석회석과 기타 점토질 광물 등을 혼합 분쇄하여 1,400 °C 이상의 고온에서 소성시켜 시멘트를 제조하는 산업이다.

석회질 원료와 점토질 원료를 분쇄 혼합하여, 킬른에서 소성하여 단단한 고상의 클링커를 만들고, 냉각된 클링커를 석고와 혼합, 분쇄하면 시멘트가 만들어진다. 시멘트 제조공정은 크게 석회석 채광, 원료 가공, 연료 가공, 열처리 및 제품화 등 5개 공정으로 구분할 수 있다. 우리나라에서 현재 가장 많이 생산, 사용하고 있는 시멘트는 포틀랜드시멘트와 제철공정의 고로슬래그를 클링커와 혼합해서 만들어지는 슬래그시멘트로 구분한다. 슬래그시멘트는 혼합시멘트의 한 종류이지만 우리나라에서는 슬래그시멘트만 생산하고 있기 때문에 본 연구에서는 혼합 시멘트 대신 슬래그 시멘트로 통일하기로 한다. 이들의 개략적인 과정과 화학적 조성은 다음의 그림 2와 같은데, 중간 제품인 클링커는 소성 온도, 소성 속도, 냉각 방법에 따라 광물학적 특성이 변하므로 시멘트의 품질과 특성에 영향을 주고 있다.



**Fig. 2. Flow diagram of chemical reactions and products from production process of cement**

이와 같이 제조된 클링커의 광물조성은 주성분인 산화칼슘(CaO), 실리카( $\text{SiO}_2$ ), 산화알루미늄( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), 산화제이철( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) 등 4성분의 조성비에 따라 알라이트( $\text{C}_3\text{S}$ ), 벨라이트( $\text{C}_2\text{S}$ ), 알루미네이트( $\text{C}_3\text{A}$ ), 페라이트( $\text{C}_4\text{AF}$ )로 구분된다. 이들 클링커 광물의 조성 및 구조에 따라 시멘트의 수화 및 경화에 큰 영향을 미치고 있다.

시멘트 제조공정은 원료의 분쇄와 처리방법에 따라 1] 건조상태의 원료를 이용하여 소성하는 제조공정인 건식공정, 2] 원료를 수분으로 pellet화하여 소성하는 제조공정인 반건식공정, 3] 슬러리 상태의 원료를 여과하여 반슬러리 상태로 소성하는 제조공정인 반습식공정, 4] 슬러리 상태의 원료를 그대로 소성하는 제조공정인 습식공정 등의 총 4가지 공정으로 크게 구분된다.

습식공정은 가장 먼저 개발된 시멘트 제조공정으로 제품의 균일성은 유지되나, 킬른(소성로)의 길이가 길어서 에너지 소비량이 증대되고, 생

산량이 감소하는 단점이 있다. 에너지 소비량 및 생산용량의 개선을 위하여 비교적 소성로가 짧고, 에너지 소비량이 적은 건식공정이 개발되어, 현재 우리나라의 시멘트 사업장은 모두 건식공정을 채택하여 운전 중에 있다.

### 2.2.1 시멘트 제조 세부공정

시멘트 제조는 제품으로 보았을 때, 반제품인 클링커 제조공정과 완제품인 시멘트 제조공정으로 구분할 수 있으며, 제조공정에 따라서는 원료 채광공정, 원료 분쇄공정, 소성공정 및 제품공정의 4개 공정으로 구분할 수 있다.

국내 대부분의 시멘트 제조회사에서 생산하는 포틀랜드시멘트의 세부 제조공정과 관련설비의 특성은 다음과 같다(한국양회공업협회).

#### 1) 채광공정

##### 가. 석회석의 채굴

석회석의 채굴법에는 Slope Cut(경사면 공법), Glory hole(수직홀타입 공법), Bench cut(벤취타입 공법) 등이 있으며, 우리나라에서는 1960년대 초반까지는 Glory-hole방법도 사용하였지만 1970년대 이후부터 현재까지 Bench cut 공법이 대부분의 사업장에서 사용되고 있다.

이 공법은 산을 계단식(Bench)으로 평면 채굴하는 작업으로 안정성 및 중장비 사용이 용이하여 대규모 채굴이 가능하다. 채굴방법은 착암기로 계단면에 구멍을 뚫고 화약을 넣어 발파시키며, 보통 400mm~1,000mm 정도로 발파된 석회석을 대형 트럭으로 운반하여 분(파)쇄공정(1차 크래셔)에 투입한다.

### 나. 1, 2, 3차 분쇄

분쇄공정은 채굴된 석회석을 최초로 파쇄하는 공정으로, 분쇄기의 종류는 Jaw, Cone, Gyratory, Hammer, Impact, Disc crusher 등으로 다양하며, 1차, 2차 또는 1, 2, 3차 crusher를 통해 석회석 광석을 약 25~30 mm 정도로 파쇄한다.

때로는 1차 또는 2차 파쇄기 후단에 석회석 저장시설이 있기도 한데, 이는 석회석의 품질 조정 또는 석회석 재고 확보 차원에서 설치하는 것이다. 채광 위치에 따라 동일 광산에서도 석회석 품질은 변동이 심하므로 Premixing 시설을 사용하여 석회석을 쌓아두거나 벨트 콘베이어를 타고 곧바로 Raw mill용 호퍼(Hopper)에 직투입 된다. 위에서와 같은 석회석 채광공정을 그림으로 표시하면 다음의 그림 3과 같다.

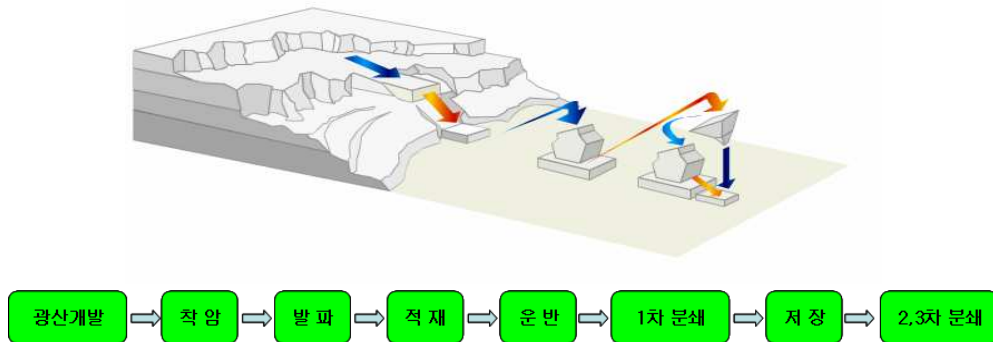


Fig. 3. Flow diagram of limestone mining

\* Korea cement industrial association

### 2) 원료 분쇄공정

#### 가. 석회석 및 부원료 저장시설

시멘트 제조에 필요한 석회석 및 다른 부원료 (점토, 납석, 규석, 철광석, 경석, 전로스래그, 플라이 애쉬 등)들을 저장하는 시설로서 천장 크

레인을 이용하거나 직투입 시설에 의해 호퍼에 투입된다.

#### 나. 조합원료 분쇄 및 저장

석회석 및 부원료를 각 배합비에 맞게 정확히 평량 조합하여 혼합한 후 Raw Mill에서 킬른 폐열을 이용하여 건조시키면서 분쇄한다. 분쇄기에서 분쇄된 분말은 분급기(Separator)에서 미분과 조분으로 분리되고 조분은 다시 Raw Mill로 보내어 재분쇄되며, 미분 원료는 원료 저장시설(Silo)로 이송 저장된다. 원료의 분말도 기준은 보통 입도가 88  $\mu\text{m}$  이상이 10~20 % 수준으로 관리되며, 사용되는 Raw mill에는 보통 원통형의 Ball mill(Tube mill) 또는 Roller mill(Vertical mill)이 사용된다. 이와 같은 원료의 분쇄과정은 그림4와 같다.

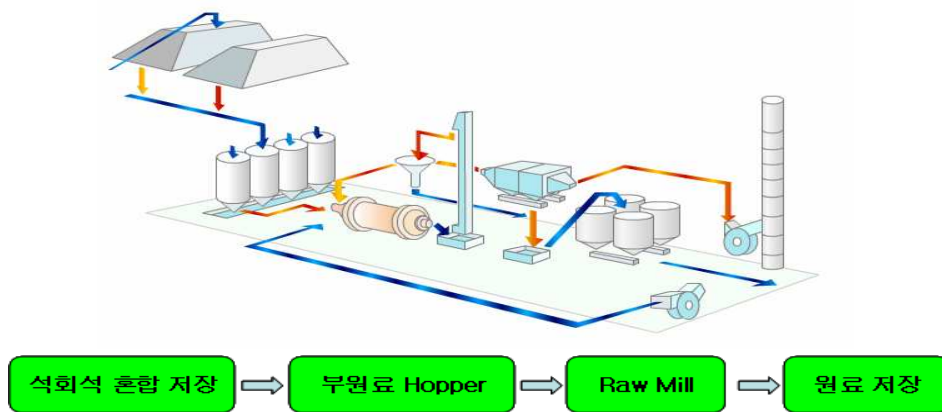


Fig. 4. Flow chart showing pulverization of raw material

\* Korea cement industrial association

### 3) 소성공정

시멘트 제조공정 중 제일 핵심부위로서 예열기를 거친 원료가 킬른에서 1,350~1,450℃ 정도의 열에 의해 용융·소성된 후 냉각기에서 냉각되고 20~60 mm 정도의 구형의 고형물이 만들어진다. 이것을 시멘트 반제품인 클링커(Clinker)라 하고, 시멘트 제조공정의 가장 핵심적인 공정이다.

#### 가. 예열기(Preheater)

예열기는 Cyclone이 수직방향으로 보통 4~5단 정도 세워 올린 형태로 이루어져 있는데, 원료는 최상단의 Cyclone 입구로 투입되어, 하단의 각 Cyclone과 calciner(하소로)를 거치면서 약 800~860℃까지 예열, 일부 탈탄산되어 소성로(Kiln)으로 투입된다.

킬른의 형식은 보통 이 예열기의 종류에 의해 결정되며, 초기에는 Slurry 상태의 원료를 투입하는 Wet type에서 SP(Suspension Preheater) type을 거쳐 최근에는 calciner를 가진 NSP(New Suspension Preheater) System으로 발전해 왔다. 설비공급 업체별로 그 구조와 명칭이 틀리지만 예열기를 흔히 "Precaliner 또는 2차 연소실"이라고 부른다.

#### 나. 소성로(Kiln)

현재 원료를 소성하는데 사용되는 킬른은 대부분 로터리 킬른(Rotary Kiln)이다. 로터리 킬른은 시멘트 생산능력에 따라 크기의 차이는 있지만, 일반적으로 2~6 m의 직경에 길이가 40~100 m나 되는 거대한 원통형 설비로서, 3~5도의 경사를 가지고 있으며 2~4 rpm의 속도로 회전한다.

예열기로 유입된 원료가 킬른을 통하면서 1,350~1,450℃까지 계속 가열되어 시멘트의 반제품인 클링커가 형성되고, 점진적으로 이동하여 킬

른의 끝에 설치된 냉각기(Cooler)로 배출 된다.

킬른에는 원료를 소성하기 위하여 버너(Burner)가 설치되어 있으며, 연료로는 유연탄이나 중유, 기타 재활용 연료 등을 사용한다. 원료는 보통 1,250~1,450 °C에서 소성되는데, 킬른 내부온도는 약 1,050~1,700 °C이며,이 온도범위에서 거의 모든 광물 반응 및 전이가 일어난다. 일반적으로 이 공정에서 소비되는 열량은 킬른의 형식별로 차이가 있으나 보통 650~750 kcal/kg-clinker 인 것으로 조사되었다.

#### 다. 냉각기(Cooler)

냉각기는 킬른에서 생성된 약 1,300~1,450 °C정도의 클링커를 약 150 °C정도로 냉각하는 설비로서, 에너지 관리측면에서 매우 중요한 설비이다. 냉각기는 물을 이용하는 수냉식과 공기를 이용하는 공냉식이 있으나, 국내 시멘트회사의 대부분은 공냉식(AQC: Air Quenching Cooler)을 채택하고 있다. 일반적으로 공냉식인 경우의 공기 공급량은 냉각기의 형태에 따라 상이하지만 보통 1.7~2.5 m<sup>3</sup>/kg-clinker가 소요되는 것으로 알려져 있다. 이와 같은 설비로 이루어진 소성공정의 개략적 공정도는 그림 5와 같다.

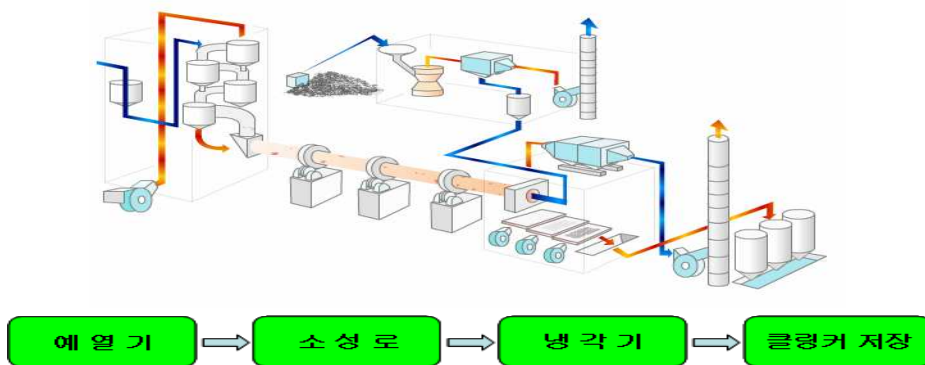


Fig. 5. Flow chart for the development plasticity

#### 4) 제품화 공정

##### 가. 클링커 분쇄

클링커에 3~5 %의 석고(응결 지연제) 등의 부원료를 첨가하여 시멘트 분쇄기(Cement Mill)에서 분쇄하여 시멘트를 생산하는 제품화 공정으로, 원료를 분쇄하는 공정과 유사한 설비를 이용한다. 다만 제품의 입도가 시멘트 품질에 영향을 미치므로 이를 제어하기 위하여 고성능의 분급기(Separator)를 이용하는 것이 특징이다.

고성능의 분급기를 이용하여 생산하는 시멘트의 분말도는 보통 비표면적으로 표시하고 있는데, 일반적으로 약 3,200~3,400 blaine( $\text{cm}^2/\text{g}$ )수준으로 생산하고 있다.

##### 나. 포장 및 출하

분쇄기에서 생산되어 사일로(Silo)에 저장된 시멘트는 사일로 하부에서 인출되어 Packing System에 의해 Bag으로 포장되거나 또는 Bulk Cement 상태로 출하하며, 일부는 클링커 상태로 출하하기도 한다.

이들의 공정도는 그림 6과 같다.

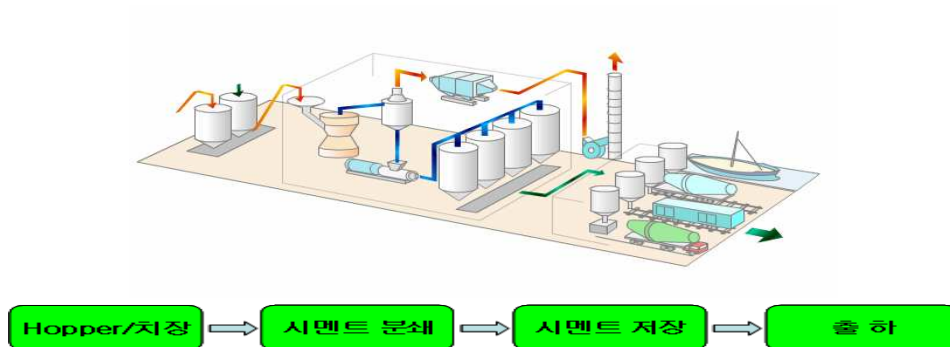


Fig. 6. Flow chart for cement production



### 2.3 시멘트산업의 온실가스 배출 특성

시멘트산업은 에너지 다소비업종으로, 에너지 사용량이 다른 산업분야에 비하여 매우 크며, 생산 공정에서 원료가 이산화탄소를 다량 배출하는 특성에 따라 온실가스 배출저감 의무부과 시 타격이 큰 산업분야이다(노동운, 2005). 표 3과 같이 시멘트산업은 연료 연소과정보다는 생산 공정에서 더 많은 이산화탄소를 배출하고 있다. 시멘트의 주원료인 석회석 1톤이 분해되어 시멘트 클링커가 되기 위해서는 440 Kg의 이산화탄소가 배출되며, 1450 ℃의 고온 소성에는 유연탄 등 화석연료가 대량으로 사용되고 시멘트 클링커의 분쇄 등에도 전기에너지가 다량 소모된다. 뿐만 아니라 원료 운반이나 제품 수송에도 비교적 많은 연료가 소모되고 있다(유동현, 2004).

시멘트 산업에서 발생하는 온실가스로는 CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O 등이 있지만, 앞서 언급한 바와 같이 고온에서의 연소와 긴 반응시간 등의 이유로 CO<sub>2</sub> 이외의 다른 온실가스는 거의 배출되지 않는다(UNFCCC, 2006). 우리나라의 시멘트산업에서의 이산화탄소 배출현황은 표 3 에서 보는 바와 같이 해마다 증가 추세를 보이고 있다(에너지경제연구원, 2004).

**Table 3. Current status of CO<sub>2</sub> emission from cement industry**  
(unit: 10<sup>3</sup>TC )

Year	Fuel				Power	Process	Total
	bituminous coal	B-C oil	Pet Coke	subtotal			
2000	3,295	36	172	3,503	722	6,323	10,548
2001	3,361	24	176	3,561	735	6,554	10,850
2002	3,491	26	171	3,688	776	6,922	11,386
2003	3,634	26	108	3,768	808	7,133	11,709

### 2.3.1 배출량 산정방법

시멘트산업의 온실가스 배출량 산정방법에는 크게 두 가지가 있다. 첫 번째 방법은 기후변화협약정부간협의체(IPCC)가 권고하는 클링커 생산량에 입각한 배출량 산정지침(Clinker-based GHG emission estimation methodology)이며, 두 번째 방법은 미국 환경보호청(U.S. EPA)에서 권고하는 시멘트 생산량에 입각한 온실가스 배출량 산정방법(Cement-based GHG emission estimation methodology)이다(EPA, 1999).

클링커 생산량에 입각한 방법은 이해하기 쉽고 온실가스 배출량 산정에 필요한 자료가 기업수준에서 쉽게 적용할 수 있다는 장점이 있다(IPCC, 1996). 이에 반해, 시멘트 생산량에 입각한 방법은 혼합시멘트의 생산공정을 변경할 경우의 온실가스 배출량 변화를 측정하기 위해 설계된 방법으로, 클링커의 혼합 비율과 기타 원료 사용과 관련된 신뢰할만한 자료가 가능할 경우에만 적용 가능하다.

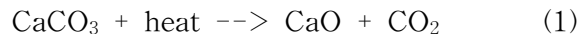
시멘트 생산에서 발생하는 온실가스는 공정 단계별로 구분하면, 크게 생산 공정(process), 고정연소시설(stationary sources), 이동연소시설(수송목적의 자동차), 폐기물처리(폐기물매립) 등으로 구분할 수 있다(WBCSD, 2005). 또 기업의 운영 및 조직 범위를 기준으로 온실가스 배출을 구분하면, 직접배출과 간접배출로 구분할 수 있다. 직접배출은 기업이 소유, 관리하고 있는 장소, 이동연소시설 및 쓰레기 매립에서 발생하는 온실가스 배출을 의미하며, 간접배출은 구입하는 에너지의 생산과정에서 발생하는 온실가스와 기업이 소유하지 않는 시설에서 발생하는 온실가스 배출을 의미한다(CSI, 2005).

## 1) 클링커 생산량을 기준한 온실가스 배출량

클링커 생산량을 기준한 온실가스 배출량은 클링커 제조과정에서 이산화탄소 직접배출의 주요 배출원인 원료의 하소과정과 킬른 연료의 연소로 구분하여 산정한다(IPCC, 1996). 그 밖에 다른 이산화탄소 배출원으로서 비킬른 연료에서 발생하는 직접배출 즉, 공간 난방, 부지내 수송 등과 부지 외부에서의 전력 생산 및 수송 등에서 발생하는 간접배출을 들 수 있다. 시멘트산업에서 이산화탄소 이외의 온실가스 배출량은 극소량에 그치기 때문에 시멘트 생산에서의 온실가스 배출은 킬른 연료의 연소와 원료의 하소에서 발생하는 이산화탄소로 국한한다(Kyoto protocol, 1997).

### 가) 원료의 하소에서 발생하는 CO<sub>2</sub>

이산화탄소는 식(1)과 같이 석회석을 석회로 분해하는 화학적 분해과정인 하소과정으로 클링커에 열을 가하면 이산화탄소가 발생한다(CSI, 2005).



하소과정에서 발생한 이산화탄소는 크게 실제 클링커 생산에서 발생하는 이산화탄소와 부분적으로 하소된 시멘트 킬른 먼지 혹은 완전히 하소된 부산 먼지와 같이 사용한 원료에서 발생하는 이산화탄소로 분류한다(CSI, 2005).

실제 클링커 생산에서 발생하는 이산화탄소는 클링커의 석회 함유량에 비례하고 있으며, 시멘트 공장별 혹은 기간별 클링커의 석회 함유량에는 약간의 차이가 있으나 클링커 톤당 이산화탄소 배출계수는 안정적인 것으로 나타나고 있다. IPCC의 경우 클링커 1톤에서 발생하는 이산화탄소 배출량을 약 510 kg으로 적용하고 있다(IPCC, 1996).

## 나) 킬른연료의 연소에서 발생하는 이산화탄소

시멘트 산업은 전통적으로 시멘트 킬른을 작동할 때 석탄, pet coke, 중유, 천연가스 등 다양한 화석연료를 사용한다. 최근에는 폐기물에서 추출한 연료가 중요한 대체연료로 등장하고 있는데, 이들 대체연료를 화석연료와 혼합하여 킬른의 연료로 사용하고 있다. 또한 대체연료의 사용량도 점차 증가 추세에 있다.

## 2) 시멘트 생산량을 기준한 온실가스 배출 특성

시멘트 생산량을 기준한 온실가스 배출량은 화학공정(chemical process)과 에너지 소비과정으로 구분하여 산정한다(IPCC, 1996). 화학공정의 온실가스 배출은 석회(lime)를 생산하기 위한 석회석 하소(calcination) 과정에서 발생하게 된다. 이렇게 생산된 석회는 킬른속에서 원료 구성성분인 산화철, 알루미늄, 실리카 등과 반응하여 클링커로 생산된다. 또한, 생산공정에서 재활용되지 않은 시멘트 킬른 먼지(Cement Kiln Dust; CKD)에서 이산화탄소가 발생하기도 한다. 또 에너지 소비과정에서 온실가스는 주로 킬른의 연료용 에너지 소비에서 발생하고 있다.

생산공정의 이산화탄소 배출량을 산정하기 위해서는 1] 시멘트 생산량, 2] 시멘트의 클링커 혼합비율, 3] 클링커의 원료 혼합비율에 관한 자료가 필요하다. 이러한 방법론은 원료, 시멘트에 대한 클링커 비율에 관한 자료가 신뢰할 만한 경우에 한정해서 사용해야 한다(WBCSD, 2005)

이산화탄소 배출량은 다음과 같은 식에 의해 계산된다.

이산화탄소 배출량 = 시멘트 생산량 × 클링커 혼합비율 × 원료 혼합비율 × CaCO<sub>3</sub> 등가 × CaCO<sub>3</sub>대 이산화탄소 비율

## 2.4 시멘트산업의 대체연료 특성 및 사용현황

시멘트 산업에서는 부족한 점토질 원료를 대체하고 에너지 비용을 절감하기 위하여, 석탄 산업에서 발생하는 저질탄이나, 경석 등을 원료 겸 연료 대체원으로 사용하여 왔다. 최근 산업이 발달하고 경제 규모가 확장됨에 따라 폐타이어, 폐유 등 산업폐기물과 도시생활폐기물이 다량으로 발생하며 도시환경을 오염시키면서 이러한 가연성 폐기물의 처리에 대한 관심이 고조되고 있다(강현주, 2000). 특히 소각처리 수단의 한 방법인 시멘트 킬른은 그 활용도가 높아 크게 각광받고 있으며, 관련연구 또한 많이 진행되는 것으로 조사되었다(김상현, 2005).

시멘트는 석회석, 점토 등 천연광물을 고온에서 소성하여 제조하는 대규모 열처리 산업이다. 그리고 시멘트 제조공정은 소각처리 공정과 유사하고 그 잔재인 소각회와 주성분은 시멘트의 주성분과 같다. 따라서 시멘트산업은 폐기물을 안전하게 대량으로 소각처리하기에 적합한 공정과 원료 조건을 구비하고 있다(유동현, 1995). 또한, 산업폐기물에 포함되어 있는 유해성분이 시멘트 제조시 시멘트 입자사이에 고착되므로 쓰레기 소각장에서 소각하는 방법보다 환경오염을 줄일 수 있다(한국건설기술연구원, 1996).

시멘트 산업에서의 사용하는 대체연료의 경우, 1) 일반적인 연료를 사용한 경우 보다 경제성이 있고, 2) 시멘트 품질에 악영향을 미치지 않고, 3) 산업폐기물의 사용으로부터 새로운 환경오염을 일으키지 않으며, 4) 안전한 산업폐기물로서 계속 존재할 것 등을 원칙으로 대체연료를 사용하고 있다.

표 4에서 보는 바와 같이 시멘트산업에서는 다양한 산업폐기물을 원료 및 연료로서 재활용하고 있으며, 사용하는 산업폐기물의 양은 점차 증가 추세에 있다(한국양회공업협회). 프랑스, 일본 등 선진국에서도 1970년대부터 폐기물을 시멘트 소성로의 대체연료로 사용을 허용하고 있는데, 특

히 Annex 1 국가인 일본의 경우, 대체연료를 사용량에 포함시키지 않고 ‘화석연료’와 ‘구입전력’만을 대상으로 온실가스를 산정하고 있다(일본경단련, 2005).

표 5에서 보는 바와 같이 여러 선진국들의 경우 시멘트산업에서 유연탄 대신 대체연료를 많이 사용하고 있으며, 재생연료유 및 고품폐기물연료 등 대체연료의 사용량은 증가 추이를 보이고 있다(WBCSD, 2005) 그러나 일본과 한국의 경우 대체연료 사용이 타 선진국에 비해 미미한 수준이다.

**Table 4. Recycling of waste by-products in cement industry**  
(unit: thousand tons)

원료 및 연료		1999	2000	2001	2002	2003	
클링커 원료	점토질	경석	1,298	1,097	1,031	1,105	898
		석탄회	816	929	945	1,121	1,282
		오니류	36	156	239	178	212
		소각재	11	102	117	111	102
	철질	제강(전로)슬래그	484	461	702	693	793
		비철슬래그	536	501	326	402	332
	규산질	폐주물사	67	117	180	302	422
	기타		185	278	220	310	294
연료	P/Cokes		227	222	245	241	153
	폐타이어, 고무류		63	77	139	230	298
	WDF(폐유, 정제유등)		27	35	71	97	115
	기타(폐플라스틱 등)		6	5	15	28	71
혼합재	고로슬래그		3,890	5,080	4,821	5,224	5,101
	석탄회 및 소각재		132	122	95	82	71
	기타		282	64	55	63	100
응결지연제	탈황석고		351	529	613	662	607
	중화석고			66	187	252	299
	기타(티탄석고 등)		27	52	49	58	49
합계		8,438	9,893	10,050	11,159	11,199	

**Table 5. Consumption ratio of alternative fuels in cement industry.**  
(unit: %)

Country	Bituminous coal	Oil	Gas	Heavy oil	Alternative fuels
America	58	2	13	0	26
Canada	52	6	22	4	15
Europe	48	4	2	4	42
Japan	94	1	0	<1	3
Korea	87	11	0	0	2

우리나라에서 사용하고 있는 대체연료의 종류로는 폐타이어, 폐합성수지, 폐유 등이 있으며, 이 중 폐타이어는 환경 측면에서 안전하며 대량처리가 가능한 장점을 갖고 있는 것으로 알려지면서 가장 많이 사용하는 대체연료이다(노동운, 2005). 또한 폐타이어의 성분중 steel wire는 소성과정에서 시멘트원료(철분)화 되며 황성분 또한 소성과정에서 석고로 변환되어 시멘트 원료로 활용된다. 또한 폐타이어 투입시 NO<sub>x</sub>절감효과가 있으며, 완전 연소되므로 대기오염물질 발생량이 적은 이점이 있다(유동현 1995). 표 6 에서 보는 바와 같이 우리나라 시멘트 산업의 대체연료 사용량은 해마다 증가 추이를 보이고 있다.

**Table 6. Quantity of consumption alternative fuels in domestic cement industry**  
(unit: thousand tons)

Alternative fuels	2000	2001	2002	2003	2004
Waste tire	70	125	206	274	333
Waste rubber	7	14	24	23	29
Waste plastic	5	15	27	68	160

\* Korea cement industrial association

## 제 3 장 연구방법

### 3.1 연구대상 선정

본 연구의 대상은 현재 가동중인 시멘트 사업장중 우리나라 전체 클링커 총생산량의 약 40 %를 생산하고 있는 ‘A’ 와 ‘B’ 사업장을 선정하였다.

### 3.2 대체연료 분석방법

#### 3.2.1 발열량 분석

발열량은 가연성 연료가 완전 연소될 때 단위질량당 발생하는 열량을 의미하며, 각종 에너지 통계와 설비 효율 분석의 기초 자료로 사용된다.

또한, 최근에는 온실가스 발생량 산정의 기초 자료로 사용하면서, 활용 범위가 확대되고 있다. 이러한 발열량은 연료의 종류에 따라 다른 값을 가지게 되며, 같은 연료의 경우에도 연소과정에서 발생하는 수증기의 응축잠열 포함여부에 따라 총발열량(Gross Calorific Value)과 순발열량(Net Calorific Value)으로 구분된다.

$$\bullet \text{ 총발열량} = 81C + 342.5 \times \left( H - \frac{O}{8} \right) + 22.5S \quad (2)$$

$$\bullet \text{ 순발열량} = 81C + 342.5 \times \left( H - \frac{O}{8} \right) + 22.5S - 6 \times (9H + W) \\ = \text{총발열량} - 6 \times (9H + W) \quad (3)$$

기후변화협약에 효과적으로 대처하기 위해서는 무엇보다도 정확한 온



실가스 발생량 자료를 확보하여야 하므로, 본 연구에서는 시멘트 사업장에서 실제로 사용하고 있는 대체연료의 발열량을 분석하였다. 시료의 발열량 분석을 위하여 IKA사의 WERKE C2000 basic를 사용하였으며, 분석방법은 표준분석방법인 Iso-peribolic 25 °C Mode를 이용하였다. 발열량 분석기는 가연성물질을 연소시켜 발생하는 열을 수온의 변화로 전환하여 온도 변화에 따라 열량을 측정하게 된다. 일반적으로 발열량 분석기는 시료를 태워서 발열시키는 bomb 부분과 평형된 온도차를 유지하는 수온조절기로 구분된다.

본 연구에서 사용한 대체연료의 발열량 분석기의 분석 절차는 다음과 같다.

- ① IKA WERKE C2000 basic과 KV-600(수온조절기)의 전원을 켜다.
- ② C2000의 전원을 켜고 최초 설정인 Isoperibolic at 25 °C Mode로 설정되면, 수온이 안정될 때까지 기다린다.
- ③ 주입용 시료는 0.0001 g까지 측정할 수 있는 전자저울을 이용하여 약 0.7 ~ 1.0 g을 취한 후, Capsule Holder에 올려놓는다.
- ⑤ 분석기에 시료의 무게 및 샘플특성 등을 입력한다.
- ⑥ Bomb Cover의 중앙에 발화용 면사를 연결하고 Bomb을 결합한다.
- ⑦ Start 버튼을 누르면 Bomb이 body로 들어가면서 30 bar의 O<sub>2</sub>(99.95 %)가 주입되며 수통에 물을 채운다.
- ⑨ 산소의 주입이 완료되고 자켓에 상온 수의 주입이 완료되면 발화가 진행되며 약 25분이 지나면 분석이 완료된다.

### 3.2.2 원소분석

원소분석은 시료를 대상으로, 탄소(C), 수소(H), 질소(N), 연소성 유황(S), 회분(Ash)의 함유량을 분석하여, 시료에 대한 질량비로 표시하는 것

으로 원소분석 결과를 이용하여 연소계산을 할 수 있다.

원소분석기의 일반적인 원리는 Dynamic flash combustion method 방식으로 화합물 내의 원소들을 각각 산화시켜 Column으로 분리시킨 후, TCD detector를 이용하여 정량해내는 방법이다. 원소분석기는 시료자동 주입장치, Column 및 TCD detector로 구성되어 있다. 시료주입량은 0.1 ~ 100 mg으로 미량을 주입하기 때문에 0.001mg까지 정량할 수 있는 정밀저울을 이용하여 정량하여야 한다.

본 연구에서는 대체연료의 탄소와 수소함량을 분석하기 위해 자동원소분석기 (Thermo Finnigan-Flash EA 1112, USA)를 이용하였으며, 원소분석을 하기 위하여 시료를 전처리한 후 Container에 약 1.5~2 mg 주입한 다음 Autosampler에 주입 후 분석하였다. 표 7 은 원소분석에 이용된 분석조건이다.

**Table 7. Analyzing condition of elemental analyzer**

		GC/TCD
Column		ParaQ-X(2 m)
Detector		TCD
Carrier gas		He(99.999 %)
Flow	Carrier	140 mL/min
	O <sub>2</sub>	240 mL/min (99.9995 %)
	Reference	100 mL/min
Temperature	Furnace	900 °C
	Oven	700 °C

본 연구에서 사용한 원소 분석기의 분석 순서는 다음과 같다.

- ① Furnace temperature를 950 °C로 설정한다.
- ② TCD의 oven temperature를 70 °C로 설정한다.
- ③ Carrier gas(He 99.999 %) flow를 140 mL/min로 설정한다.

- ④ O<sub>2</sub>(99.995 %) gas flow를 240 mL/min로 설정한다.
- ⑤ Reference flow를 100 mL/min로 설정한다.
- ⑥ 정밀저울(10~6 g)을 이용하여 container에 분석할 시료를 1.5~2.0 mg 정도 주입한다.
- ⑦ 시료가 주입된 Container는 핀셋을 이용하여 밀봉한다.
- ⑧ 정량된 시료량의 입력 및 분석순서를 기입한다.
- ⑨ 정량된 시료는 Auto injector를 이용하여 주입된다.
- ⑩ 분석된 시료의 분석 결과를 확인한다.

### 3.2.3 연료분석의 정도관리

#### 1) 발열량 분석

발열량 분석의 신뢰도를 확보하기 위하여 본 연구에서는 표준시료를 이용한 재현성 평가 및 시료 주입량에 따른 평가를 실시하였다. 표 8은 표준시료 Benzoic acid(제조사: Leco, 발열량:  $6319 \pm 9$  Kcal/Kg)를 이용하여 동일한 방법으로 5회 반복 분석한 결과를 나타낸 것이다. 5회 반복 분석한 평균 발열량은  $6,320 \pm 1.14$  Kcal/Kg 으로서 표준시료 발열량과의 오차는 약 1 Kcal/Kg으로 재현성이 매우 우수함을 확인하였다.

Table 8. Reproducibility test for calorific value analysis using benzoic acid.

Times	Mass of Standard(g)	Net calorific(Kcal/Kg)
1	0.9997	6,320
2	1.0314	6,319
3	1.0002	6,320
4	0.9983	6,318
5	1.0189	6,321
	Mean	6,320
	SD	1.14
	RSD(%)	0.018
	SE	0.51
	RSE(%)	0.008
	Min.	6,314
	Max.	6,317

또한, 표준시료 Benzoic acid(제조사: IKA, 발열량:  $6323 \pm 4.57$  Kcal/Kg)를 이용하여 주입시료의 주입량에 따른 발열량 비교실험을 실시하였다. 그림 7에서 보는 바와 같이 표준시료의 무게를 각각 0.4998 g, 1.004 g, 1.5001 g으로 각각 주입하여 분석한 결과 측정된 발열량은 오차범위가 1 ~ 4 cal/g인 6,328 cal/g ~ 6,332 cal/g 으로서 오차가 매우 작음을 확인하였다.

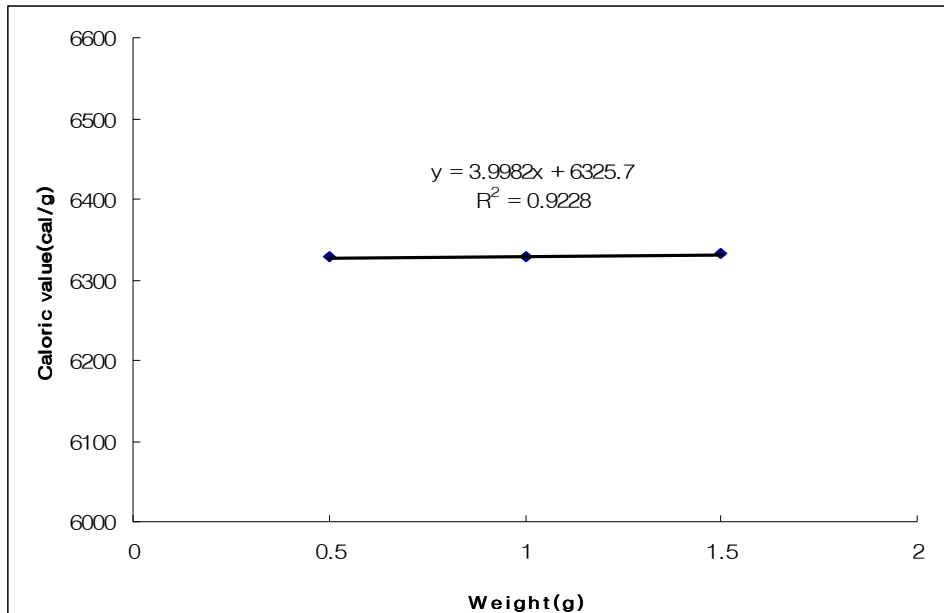


Fig. 7. Results of calorific values using injecting standard

## 2) 원소분석

본 연구에서는 에너지원의 주요 구성성분 중 C(탄소)와 H(수소)의 원소분석에 대한 신뢰도를 높이기 위한 검증 실험을 실시하였다.

사용한 원소분석기는 표준시료명과 표준시료에 함유된 각 원소의 함량을 입력한 후 분석결과를 이용해서 보정하며, 임의의 시료를 주입하여 분석한 값은 표준시료 보정값을 이용하여 보정하게 된다.

표준시료로는 C와 H의 함량이 서로 다른 Sulfanilamide standard (C=41.84, H=4.68, N=16.27, S=18.62, O=18.58)와 BBOT(C=72.53, H=6.09, N=6.51, S=7.44, O=7.43)를 사용하였다.

실험방법으로는 Sulfanilamide와 BBOT의 두가지 표준시료의 사양(각 원소 함량)을 입력한 상태와 입력하지 않는 상태(Unknown)에서 각각 분석하였다. 분석 결과는 그림 8과 그림 9에서 보는 바와 같다.

Sulfanilamide에 대한 분석결과, C의 경우 표준시료는 41.84 %, 사양을 입력하지 않는 표준시료는 43.88 %로 분석되었으며, H의 경우 각각 4.68 %, 4.65 %로 분석되었다. 상대표준편차(RSD)는 각각 3.37 %, 0.47 %로 분석되어 높은 재현성을 확인하였다.

BBOT 표준시료에 대한 분석결과, C의 경우 표준시료에서는 72.53 %, 사양을 기입하지 않는 표준시료에서는 72.90 %로 분석되었으며, H의 경우 각각 6.09 %, 6.24 %로 분석되었다. 상대표준편차는 각각 0.36 %, 1.72 %로 Sulfanilamide 표준시료와 같이 우수한 재현성 확인할 수 있다.

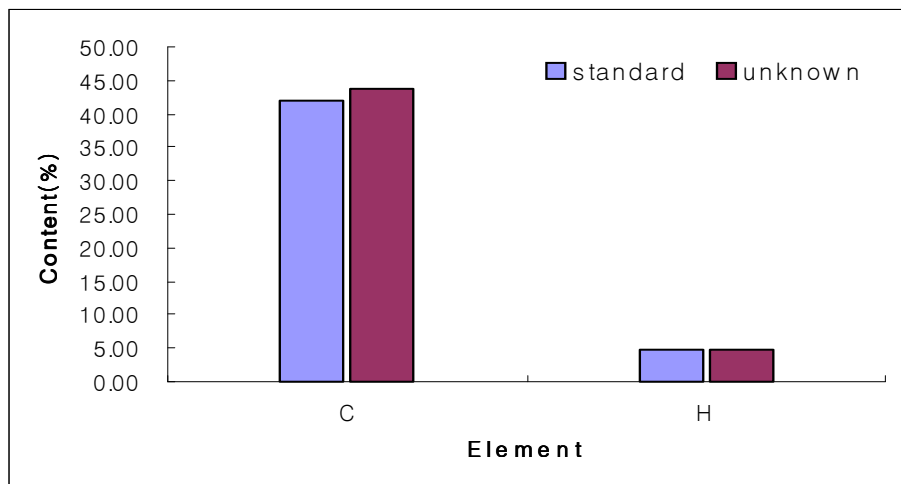


Fig. 8. Results of analyzing reproducibility of sulfanilamide

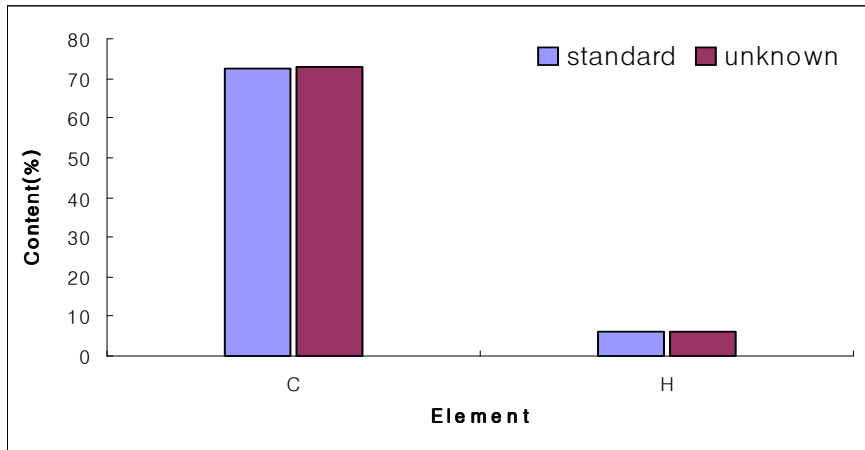


Fig. 9. Results of analyzing reproducibility of BBOT

또한, BBOT 표준시료를 이용하여 분석 횟수에 따른 재현성평가 실험을 실시하였다. 5회 반복 분석한 결과 그림 10에서 보는 바와 같이 N 6.51 %, C 72.53 %, H 6.09 %로 5회 모두 같은 함량을 나타냄으로써, 우수한 재현성을 확인하였다.

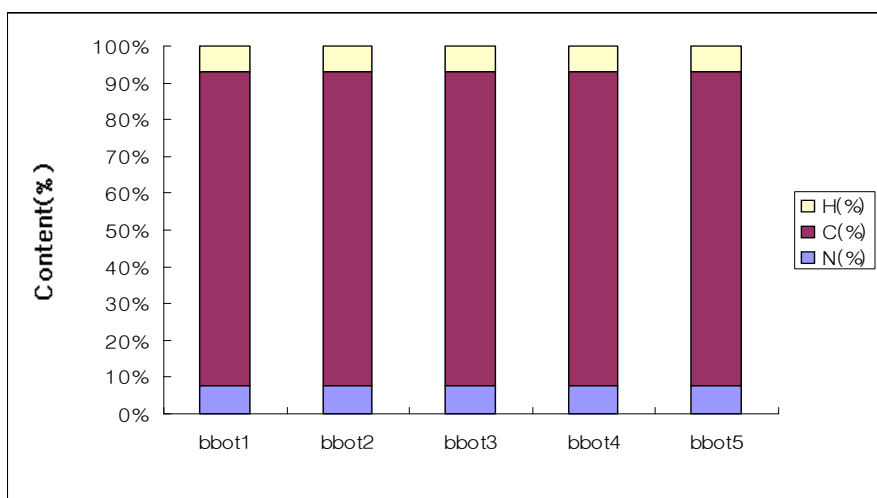


Fig. 10. Reproducibility of BBOT with respect to reiteration analysis

### 3.3 대체연료 배출계수 산정 방법

본 연구에서는 표 9에서 보는 바와 같이 IPCC에서 제시하는 Worksheet에 따라 시멘트산업에서 사용하는 대체연료의 발열량분석과 원소분석 결과를 이용하여 대체연료의 배출계수를 산정하였다(IPCC, 1996).

먼저, 1단계는 연료 관련 데이터를 입력하는 단계로 원소분석 결과를 이용하여 대체연료의 탄소와 수소 함량, 그리고 수분 함량을 적용하여 ①~④까지 입력하여 A값을 계산한다. 2단계는 열 생산량을 계산하는 단계로서, 발열량 분석 결과를 이용하여 대체연료의 고위발열량, 저위발열량 값을 적용하고, 연료소비량을 이용하여 열생산량 F값을 계산한다. 3단계는 배출량을 계산하는 단계로서, 앞에서 계산한 연료의 탄소 함량과 저위발열량을 이용하여 탄소배출계수인 G값을 계산하고, 계산한 탄소배출계수 값에 열생산량을 곱하여 탄소의 배출량 H값을 계산하는 단계이다. 4단계는 실제 탄소배출계수를 계산하기 위한 단계로서, 세 번째 단계에서 계산한 탄소배출량과 산화율을 적용하여 실제탄소배출계수를 계산하는 단계이다. 마지막 단계는 이산화탄소 배출계수를 계산하기 위한 단계로서, 전 단계에서 계산한 실제 탄소배출량에 이산화탄소의 분자량을 곱하고 탄소의 분자량으로 나뉘므로써, 실제 이산화탄소 배출계수를 계산하는 단계이다.

**Table 9. Worksheet for emission factor calculation**

Step 1(Fuel Data)						
Item	Carbon of Fuel (as received basis)	Carbon of Fuel (air-dried basis)	Carbon of Fuel (dry basis)	Total Moisture	Inherent Moisture	Hydrogen
Sub-item	A		①	②	③	④
Unit	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
Calculation	$① \times ((100 - ②) \div 100)$					



### Step 2(Heating Output)

Item	Gross Calorific Value	Net heating value	Fuel Consumption	Electric Power	Heating Output
Sub-item	B	C	D	E	F
Unit	(kcal/kg)	TJ/ton	ton/hr	MWh	TJ/hr
Calculation		$([B - (6 \times (9 \times ④ + ②))] \times 4.18) \times 10^{-6}$			$C \times D$

### Step 3(Emission)

Item	Carbon Emission Factor	Carbon emission	Fraction of Carbon Oxidized
Sub-item	G	H	I
Unit	ton C/TJ	ton C/hr	-
Calculation	$(A \div 100) \times C$	$F \times G$	-

### Step 4(Carbon Emission Factor)

Item	Real Carbon Emission	Real Carbon Emission Factor		
Sub-item	J	K	L	M
Unit	ton C/hr	ton C/TJ	ton C/ton	ton C/MWh
Calculation	$H \times I$	$J \div F$	$J \div D$	$J \div E$

### Step 5(Carbon dioxide Emission Factor)

Item	Real CO <sub>2</sub> Emission Factor			
Sub-item	N	O	P	Q
Unit	ton CO <sub>2</sub> /hr	ton CO <sub>2</sub> /TJ	ton CO <sub>2</sub> /ton	ton CO <sub>2</sub> /MWh
Calculation	$J \times (44 \div 12)$	$N \div F$	$N \div D$	$N \div E$

## 제4장 결과 및 고찰

### 4.1 대체연료 배출계수 산정

본 연구에서는 시멘트 산업에서 실제 사용하고 있는 대체연료의 배출계수를 개발하였다. 대체연료의 배출계수를 산정하기 위해서는 먼저 발열량 분석과 원소분석이 수행되어야 한다.

#### 4.1.1 대체연료 발열량 분석 결과

##### 가) 페타이어

페타이어의 발열량을 분석하기에 앞서, 타이어의 steel wire를 포함한 부분과 steel wire를 포함하지 않은 부분을 선별하여 두 그룹으로 나누어 분석을 수행하였다. 표 10에서 보는 바와 같이 steel wire를 포함한 페타이어의 경우 5회 반복 분석한 결과 건식 고위발열량 기준으로 7,958 ~ 8,285 Kcal/Kg의 열량을 확인하였으며, 평균 발열량은 8,137 Kcal/Kg, 표준편차는 약 118 Kcal/Kg, 상대표준편차(RSD)는 1.45 %, 상대표준오차(RSE)는 0.65 %로 나타났다. steel wire를 포함하지 않은 페타이어의 경우 5회 반복 분석한 결과 건식 고위발열량 기준으로 9,029 ~ 9,131 Kcal/Kg의 열량을 확인하였으며, 평균 발열량은 9,088 Kcal/Kg이었고, 표준편차는 약 38.4 Kcal/Kg, RSD 0.42 %, RSE 0.19 %의 높은 재현성을 확인하였다. 페타이어 발열량 분석 결과 steel wire를 포함하지 않은 타이어를 분석한 발열량 값이 steel wire를 포함하여 분석한 발열량 값보다 10 %정도 큰평균 약 950

Kcal/Kg의 발열량을 나타냄을 확인할 수 있었다.

실제 시멘트 사업장의 경우, 대체연료로 폐타이어를 통째로 투입하여 사용하기 때문에, 본 연구에서 대체연료의 온실가스 배출계수 산정을 위하여 폐타이어의 발열량은 두 그룹의 평균 발열량인 8,613 Kcal/Kg을 사용하였다.

**Table 10. Calorific values of waste tire**

No.	Gross calorific value, dry basis (Kcal/Kg)	
	w/ Steel wire	w/o Steel wire
1	8,169	9,029
2	8,154	9,131
3	7,958	9,109
4	8,285	9,078
5	8,119	9,093
Mean	8,137	9,088
SD	117.88	38.39
RSD(%)	1.45	0.42
SE	53	17
RSE(%)	0.65	0.19
Min.	7,958	9,029
Max.	8,285	9,131
<b>Total Mean</b>	<b>8,613</b>	

나) 폐플라스틱

폐플라스틱의 발열량은 표 11에서 보는 바와 같이 최대값은 6,700 Kcal/Kg, 최소 6,650 Kcal/Kg 으로 분석되었으며, 평균 발열량은 6,679 Kcal/Kg이었다. 동일 시료를 5회 반복 분석한 결과 RSD는 0.27 %, RSE는 0.12 %의 우수한 재현성을 확인하였다. 따라서 본 연구에서는 평균 발열량인 6,679 Kcal/Kg를 사용하여 폐플라스틱의 온실가스 배출계수를 산정하였다.

Table 11. Calorific value analyses for waste plastic

No.	Gross calorific value, dry basis (Kcal/Kg)
1	6,680
2	6,696
3	6,670
4	6,700
5	6,650
<b>Mean</b>	<b>6,679</b>
SD	18.18
RSD(%)	0.27
SE	8.13
RSE(%)	0.12
Min.	6,650
Max.	6,700

#### 다) 폐유(WDF)

폐유의 발열량은 표 12에서 보는 바와 같이 최대값은 4,925 Kcal/Kg, 최소 4,740 Kcal/Kg으로 분석되었으며, 평균 발열량은 4,832 Kcal/Kg이었다. 동일 시료를 5회 반복 분석한 결과 RSD는 1.56 %, RSE는 0.7의 우수한 재현성을 확인하였다. 따라서 본 연구에서는 폐유의 평균 발열량값인 4,832 Kcal/Kg를 사용하여 폐유의 온실가스 배출계수를 산정하였다.

**Table 12. Analyses of calorific value for WDF**

No.	Gross calorific value, dry basis (Kcal/Kg)
1	4,917
2	4,776
3	4,925
4	4,803
5	4,740
<b>Mean</b>	<b>4,832</b>
SD	75.25
RSD(%)	1.56
SE	34
RSE(%)	0.70
Min.	4,740
Max.	4,925

라) 폐합성수지

폐합성수지의 경우 다양한 성분들이 혼합되어 있기 때문에 성분의 혼합정도에 따라 발열량이 크게 차이가 발생한다. 이에 본 연구에서는 다른 경우보다 반복 분석 횟수를 늘려 신뢰도 및 재현성을 높였다. 그 결과 평균 발열량은 8,185 Kcal/Kg으로 나타났고, 이 평균값을 폐합성수지의 온실가스 배출계수를 산정하는데 적용하였다.

Table 13. Analyses of calorific value for RDF

No.	Gross calorific value, dry basis (Kcal/Kg)
1	7,298
2	8,756
3	8,625
4	7,734
5	7,963
6	8,741
7	7,649
8	7,818
9	8,600
10	8,663
<b>Mean</b>	<b>8,185</b>
SD	546.80
RSD(%)	6.68
SE	245
RSE(%)	2.99
Min.	7,298
Max.	8,756

## 4.2.2 대체연료 원소분석 결과

### 가) 폐타이어

폐타이어의 온실가스 배출계수를 산정하기 위해서는 폐타이어의 탄소와 수소의 함량을 알아야만 한다. 따라서 본 연구에서는 탄소와 수소의 함량을 측정하기 위해 원소분석을 실시하였다. 표 14에서 보는 바와 같이 폐타이어의 평균 탄소 함유량은 83.7 %, 평균 수소 함유량은 6.89 %로 분석되었고, 각각의 표준편차는 탄소의 경우 0.18 %, 수소의 경우 0.12 %로 편차가 거의 없음을 확인하였다. 또한 탄소 함유량의 RSD는 0.21 %, RSE는 0.05 %로서 우수한 재현성을 확인하였고, 수소의 함량 역시 RSD는 1.7 %, RSE는 0.38 %로서 우수한 재현성을 보임에 따라 폐타이어를 구성하고 있는 원소의 함량은 거의 균일함을 확인하였다. 따라서 본 연구에서는 폐타이어의 평균 원소 분석결과를 적용하여 온실가스 배출계수를 산정하였다.

Table 14. Elemental analyses for waste tire

NO.	C(%)	H(%)
1	83.72	7.06
2	83.79	6.83
3	83.58	6.88
4	83.47	6.75
5	83.92	6.94
<b>Mean</b>	<b>83.70</b>	<b>6.89</b>
SD	0.18	0.12
RSD(%)	0.21	1.70
SE	0.04	0.03
RSE(%)	0.05	0.38
Min.	83.47	6.75
Max.	83.92	7.06

나) 폐플라스틱

폐플라스틱의 원소분석결과는 표 15에서 보는 바와 같다. 폐플라스틱의 평균 탄소함량은 50.8 %, 평균 수소함량은 15.57 %로 나타났으며, 각각의 표준편차는 탄소의 경우 0.94 %, 수소의 경우 0.13 %로 편차가 거의 없음을 확인할 수 있다. 또한, 탄소 함량의 RSD는 1.86 %, RSE는 0.42 %이었으며, 수소의 함량의 RSD는 0.85 %, RSE는 0.19 % 로서 수소 함량의 재현성이 탄소 함량의 재현성보다 우수하였다. 따라서 본 연구에서는 폐플라스틱의 평균 원소 분석결과를 이용하여 온실가스 배출계수를 산정하였다.

Table 15. Elemental analyses for waste plastic

NO.	C(%)	H(%)
1	50.93	15.71
2	49.45	15.69
3	50.69	15.52
4	50.84	15.39
5	52.11	15.54
<b>Mean</b>	<b>50.80</b>	<b>15.57</b>
SD	0.94	0.13
RSD(%)	1.86	0.85
SE	0.21	0.03
RSE(%)	0.42	0.19
Min.	49.45	15.39
Max.	52.11	15.71



#### 다) 폐유

폐유의 탄소와 수소의 함량을 측정하기 위해 원소분석을 실시하였다. 표 16에서 보는 바와 같이 5회 반복 분석을 수행한 결과 폐유의 평균 탄소 함유량은 51.80 %, 평균 수소 함유량은 13.50 %로 분석되었고, 각각의 표준편차는 탄소의 경우 1.16 %, 수소의 경우 1.45 %로 수소의 표준편차에 비해 탄소의 표준편차가 더 적음을 확인하였다.

또한 탄소 함량의 RSD는 2.24 %, RSE는 0.50 %, 수소 함량 RSD는 10.73 %, RSE는 2.40 %이다. 따라서 본 연구에서는 폐유의 평균 원소 분석결과를 이용하여 온실가스 배출계수를 산정하였다.

**Table 16. Elemental analyses for WDF**

NO.	C(%)	H(%)
1	53.21	14.53
2	52.18	14.50
3	52.38	13.04
4	50.79	14.28
5	50.42	11.15
Mean	51.80	13.50
SD	1.16	1.45
RSD(%)	2.24	10.73
SE	0.26	0.32
RSE(%)	0.50	2.40
Min.	50.42	11.15
Max.	53.21	14.53

#### 라) 폐합성수지

폐합성수지의 탄소와 수소 함량을 측정하기 위해 원소분석을 실시하였는데 폐합성수지의 경우 구성 성분이 매우 다양하므로 분석횟수를 늘려 20회의 반복 실험을 수행하였다. 표 17에서 보는 바와 같이 폐합성수지의 탄소 함량은 73.41 % ~ 85.91 %의 분포를 보였으며, 수소 함량은 10.13 % ~ 15.11 %의 분포를 보였다. 평균 탄소 함유량은 80.98 %, 평균 수소 함유량은 12.84 %로 분석되었고, 각각의 표준편차는 탄소의 경우 3.73 %, 수소의 경우 1.5 %로 폐합성수지 역시 탄소 표준편차에 비해 수소 편차가 더 적음을 확인하였다.

또한, 폐합성수지 탄소 함량의 RSD는 4.6 %, RSE는 1.03 %, 수소의 함량 RSD는 11.72 %, RSE는 2.62 %로서 원소분석의 재현성이 발열량 분석에 비해 우수함을 확인하였다. 따라서 본 연구에서는 폐합성수지의 평균 원소 분석결과를 이용하여 온실가스 배출계수를 산정하였다.

**Table 17. Elemental analyses for RDF**

NO.	C(%)	H(%)
1	79.62	11.67
2	80.39	12.08
3	74.57	11.21
4	82.33	13.50
5	81.19	13.46
6	84.30	15.11
7	85.67	14.95
8	77.19	10.63
9	82.97	10.13
10	75.48	11.47
11	73.41	11.61
12	85.91	14.28
13	85.00	13.12
14	82.09	13.30
15	79.17	13.14
16	84.11	14.46
17	79.89	13.65
18	78.61	10.99
19	83.02	13.68
20	84.74	14.41
Mean	80.98	12.84
SD	3.73	1.50
RSD(%)	4.60	11.72
SE	0.83	0.34
RSE(%)	1.03	2.62
Min.	73.41	10.13
Max.	85.91	15.11

### 4.1.3 대체연료별 배출계수 산정결과

본 연구에서는 대체연료의 배출계수를 개발하기 위하여 앞서 3.3에서 설명한 Worksheet를 이용하였다. Worksheet에서 적용한 대체연료별 발열량 및 원소분석 값은 표 18에서 보는 바와 같다.

**Table 18. Summary of calorific value and elemental analysis for different fuel types**

Alternative fuels type	Calorific value	Elemental analysis
	Gross calorific value, dry basis (Kcal/Kg)	Carbon content (%)
Waste tires	8,613	83.70
Waste plastics	6,679	50.8
Waste oil	4,832	51.79
RDF.	8,185	80.98

시멘트 산업에서 사용하고 있는 대체연료들의 온실가스 배출계수를 산정한 결과는 표 19에서 보는 바와 같다. 이산화탄소 배출계수의 경우, 폐타이어는 약 89 ton CO<sub>2</sub>/TJ, 폐플라스틱은 약 78 ton CO<sub>2</sub>/TJ, 폐유는 약 77 ton CO<sub>2</sub>/TJ, 폐합성수지 등 RDF의 배출계수는 약 95 ton CO<sub>2</sub>/TJ로 산정되었으며, 배출계수 크기는 RDF>폐타이어>폐플라스틱>폐유 순이었다. 또한, 탄소 배출계수의 경우 폐타이어는 약 24 ton C/TJ, 폐플라스틱은 약 21 ton C/TJ, 폐유는 약 21 ton C/TJ, 폐합성수지 등 RDF의 배출계수는 약 26 ton C/TJ로 산정되었다.

**Table 19. Emission factors for alternative fuels**

Fuels type	CO <sub>2</sub>	C
	ton CO <sub>2</sub> /TJ	ton C/TJ
Waste tires	89	24.30
Waste plastics	78	21.18
Waste oil	77	21.02
RDF	94.8	25.86

본 연구에서 산정한 대체연료별 온실가스 배출계수를 WBCSD/CSI 및 IPCC에서 제공하는 대체연료 default 값과 함께 표 20에 나타내었다.

**Table 20. Comparison of other result for emission factors**

Alternative fossil fuels Category	This study	CSI default value	IPCC default value
	ton CO <sub>2</sub> /TJ	ton CO <sub>2</sub> /TJ	ton CO <sub>2</sub> /TJ
Waste tires	89	85	-
Waste plastics	78	75	-
Waste oil	77	74	73.3
Other fossil based wastes	94.8	80	91.7

표 20에서 보는 바와 같이 본 연구에서 산정한 배출계수는 페타이어의 경우 89 ton CO<sub>2</sub>/TJ로서, CSI에서 제시한 85 ton CO<sub>2</sub>/TJ과 비교하여 약 4.7 % 높은 값을 나타내었다.

페플라스틱은 78 ton CO<sub>2</sub>/TJ로서, CSI의 default값과 비교하면, 약 4

% 높게 산정됨을 확인하였다.

폐유의 경우 77 ton CO<sub>2</sub>/TJ로 산정되었으며, 이는 CSI와 IPCC에서 제공하는 폐유의 default값과 비교하였을 때, 약 3~4 ton CO<sub>2</sub>/TJ 약 4~5 % 높은 값을 나타내었다.

폐합성수지의 경우 CSI와 IPCC에서 제공하는 특정 default값이 없기 때문에 Other fossil based wastes로 간주하여 비교하였으며, 본 연구에서 산정한 폐합성수지의 배출계수는 94.8 ton CO<sub>2</sub>/TJ로서, CSI와 제공하는 default값과 비교하였을 때는 약 20 %정도 높게 산정되었으며, IPCC의 default값과는 약 3 % 높게 산정되었다.

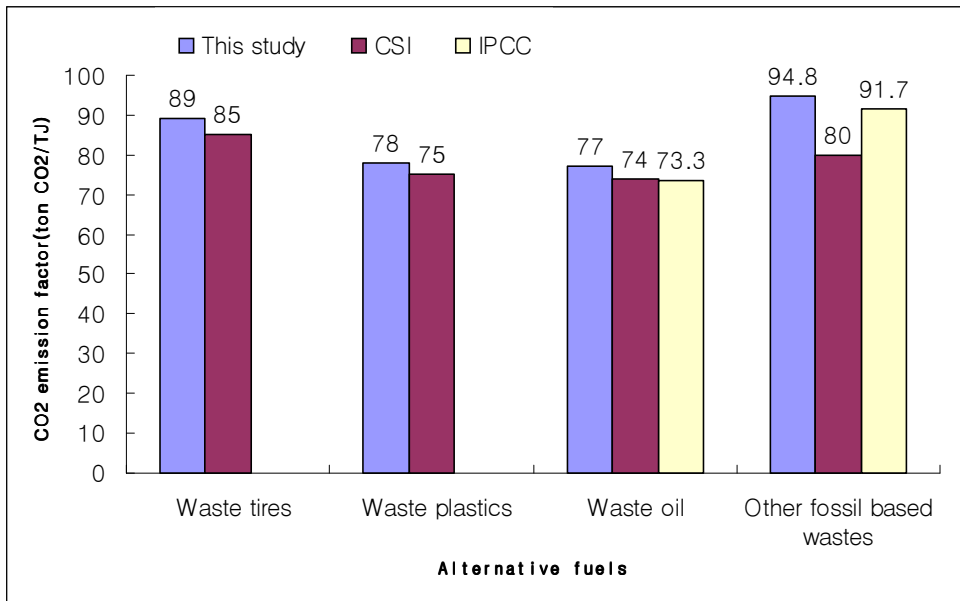


Fig. 11. Comparison of various studies for CO<sub>2</sub> emission factors

## 4.2 기존 화석연료와 대체연료의 온실가스 배출계수 비교

앞서 산정한 대체연료들의 온실가스 배출계수를 IPCC와 CSI에서 제시하고 있는 화석연료들의 default value와 함께 표 21에 나타내었다.

**Table 21. CO<sub>2</sub> emission factors for different fuel types**

Fossil fuels ton CO <sub>2</sub> /TJ		Alternative fossil fuels (This study) ton CO <sub>2</sub> /TJ	
Bituminous coal(IPCC)	96	Waste tires	89
Anthracite (IPCC)	98	Waste plastics	78
B-C oil (IPCC)	77	Waste oil	77
Pet coke (CSI)	93	Other fossil based wastes	95

위에서 보는 바와 같이 화석연료의 중 액체연료인 B-C oil의 경우 1 TJ 당 77 ton의 이산화탄소가 배출되며, 대체연료 중 액체연료인 폐유의 경우도 1 TJ 당 77 ton의 이산화탄소를 배출하는 것으로 산정되어 액체연료의 경우 같은 양의 이산화탄소가 배출됨을 확인하였다. 기존의 화석연료 중 고체연료의 경우 대부분 1 TJ 당 93~96 ton의 이산화탄소를 배출하였으며, 대체연료 중 고체상 연료의 경우 1 TJ 당 78~95 ton의 이산화탄소를 배출하는 것으로 밝혀졌다. 일반적으로 시멘트 산업에서 많이 사용하고 있는 유연탄을 기준으로 비교해볼 때, 고체상의 대체연료의 경우 모두 이산화탄소 배출계수가 작았다. 대체연료로 폐타이어를 사용할 경우 유연탄과 비교 시 배출계수 차이는 약 7 ton CO<sub>2</sub>/TJ로서, 약 7.3 %정도의 이산화탄소 저감효과가 있으며, 폐플라스틱을 대체연료로

사용할 경우 유연탄과 비교 시 배출계수 차이는 약 18 ton CO<sub>2</sub>/TJ, 약 18.8 %정도 이산화탄소 발생량을 저감시킬 수 있음을 확인하였다.

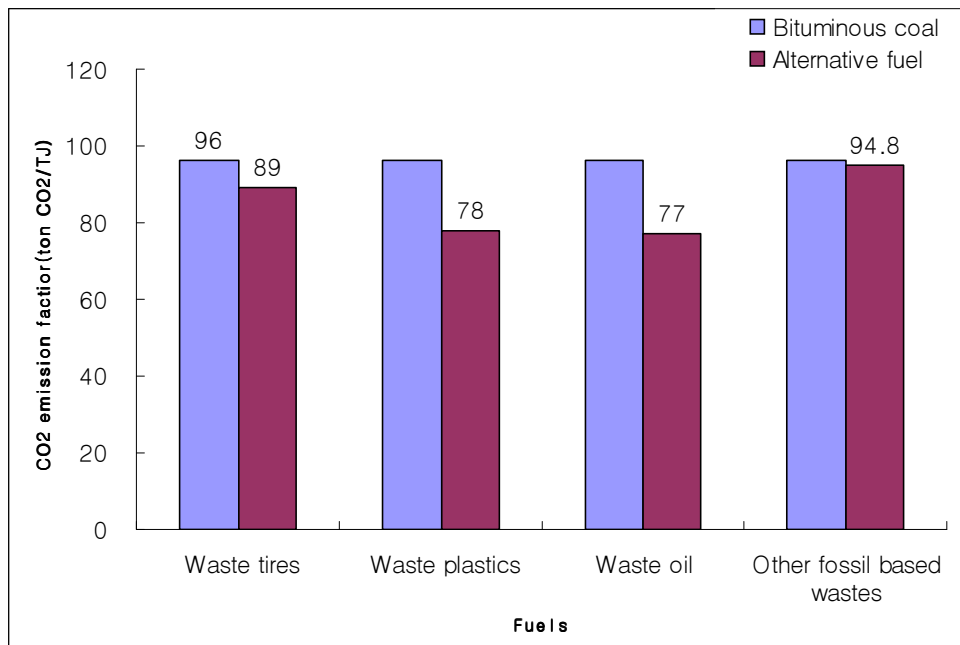


Fig. 12. Comparison of CO<sub>2</sub> emission factors for alternative fuels with respect to bituminous coal



### 4.3 대체연료 사용에 의한 온실가스 배출량 산정

본 연구에서 산정한 대체연료들의 배출계수를 이용하여 대상 사업장에 서의 대체연료 사용에 의한 온실가스 배출량을 표 22와 같이 산정하였다. ‘A’ 사업장의 경우 대체연료 중 폐유의 사용으로 연간 약 3만 톤의 이산화탄소를 배출하고, 가연성 고체연료(RDF) 사용으로 연간 약 16만 톤의 이산화탄소를 배출하는 것으로 산정되었다. ‘B’ 사업장의 경우 대체연료 중 폐타이어의 사용으로 이산화탄소가 연간 약 480만 톤 배출되는 것으로 산정되었으며 폐플라스틱의 사용으로 연간 약 1만 톤의 이산화탄소를 배출하는 것으로 산정되었다.

**Table 22. CO<sub>2</sub> emissions with respect to alternative fuel application for two companies**

Company	Alternative fuels type	Fuel consumption	CO <sub>2</sub> Emission factor	CO <sub>2</sub> Emission
		ton/yr	ton CO <sub>2</sub> /TJ	ton CO <sub>2</sub> /yr
A	Waste oil	26,013	77	34,538
	RDF	54,180	94.8	160,843
B	Waste tires	156,898	89	481,017
	Waste plastics	5,830	78	11,132

#### 4.4 대체연료 사용에 의한 온실가스 배출 저감량 산정

독일 및 일본의 경우, 그림 13에서 보는 바와 같이 대체연료 에너지는 에너지 사용량에 포함시키지 않고 ‘화석연료’와 ‘구입전력’만을 대상으로 온실가스를 산정하고 있다. 즉, 전체 온실가스 배출량에서 대체연료 사용 시 배출하는 온실가스 배출량만큼을 삭감해주고 있다(일본경단련, 2005; Martin Schneider, 2006).

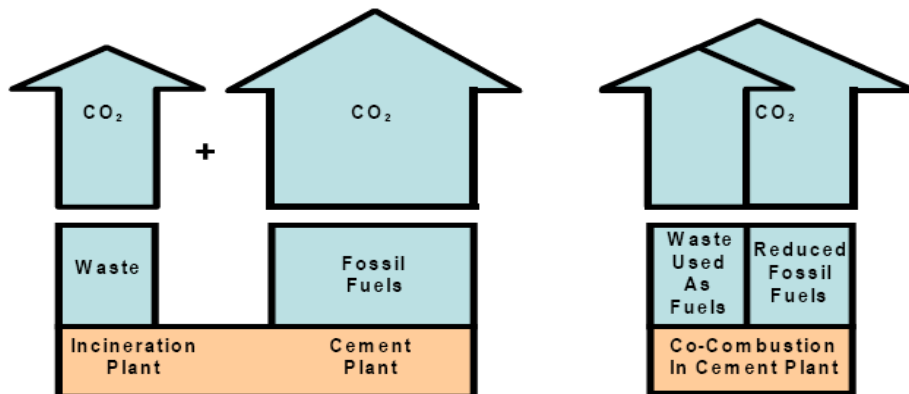


Fig. 13 Valorization of wastes in cement kilns reduces CO<sub>2</sub> emissions

\* Martin Schneider VDZ, Dusseldorf Germany

본 연구에서는 대체연료 사용에 의한 온실가스 배출 저감량을 산정하기 위해 두 가지 방법으로 저감량을 산정하였다. 1] 두 시멘트 사업장을 대상으로 실제 사용하는 연료들에 의한 배출량이 아닌 오직 유연탄만을 사용할 경우로 가정하고 실제 대체연료사용에 따른 온실가스 배출량을 산정하여 비교분석하였다. 2] 일본의 경우처럼 두 사업장에서 공정까지 고려한 총배출량(Gross emission total)을 산정하여 대체연료 사용 시 배출하는

온실가스 배출량을 삭감시켜 순배출량(Net emission)을 산정하였다.

국내 클링커 생산량의 약 40 % 이상 차지하는 대형 사업장(‘A’, ‘B’사)을 대상으로, 실제 사용하고 있는 대체연료를 포함한 연료소비에 따른 온실가스 배출량을 산정하였으며, 그 결과는 표 23과 같다. 대체연료 사용에 따른 온실가스 배출량과 대체연료 대신 유연탄을 사용하는 것으로 가정하였을 때의 온실가스 배출량을 비교분석 함으로써, 대체연료 사용에 의한 온실가스 저감량을 산정하였다. 대체연료의 온실가스 배출량은 표 22에서 산정한 배출량을 이용하였으며, 유연탄 사용에 따른 온실가스 배출량은 각 사업장에서 분석한 발열량 및 원소분석 값을 이용하였으며 산정한 결과는 표 23과 같다.

**Table 23. Estimation of CO<sub>2</sub> emission factors for bituminous coal**

Company	Calorific value	Element analysis	Bituminous coal
	As received basis (Kcal/Kg)	Carbon content (%)	CO <sub>2</sub> Emission factor ton CO <sub>2</sub> /TJ
A	5,814	62.3	95.4
B	5,938	63.5	95.3

표 24는 ‘A’와 ‘B’사업장에서 실제 사용하고 있는 연료들의 사용량에 따른 이산화탄소의 배출량을 나타낸 것으로써, ‘A’사업장의 경우 연간 연료사용에 따른 이산화탄소의 총 배출량은 약 150만 톤으로 산정되었으며, ‘B’사업장의 경우는 약 270만 톤으로 산정되었다.

**Table 24. Estimation of CO<sub>2</sub> emissions using alternative fuels**

Company	Alternative fuels type	Fuel Consumption	CO <sub>2</sub> Emission factor	CO <sub>2</sub> Emission
		ton/yr	ton CO <sub>2</sub> /TJ	ton CO <sub>2</sub> /yr
A	Bituminous coal	548,686	95	1,303,130
	Waste oil	26,013	77	34,538
	RDF	54,180	94.8	160,843
<b>Total</b>		<b>1,498,511</b>	<b>ton CO<sub>2</sub>/yr</b>	
B	Bituminous coal	930,915	95	2,210,923
	Waste tires	156,898	89	481,017
	Waste plastics	5,830	80.57	11,132
<b>Total</b>		<b>2,703,073</b>	<b>ton CO<sub>2</sub>/yr</b>	

동일한 양의 시멘트를 생산하기 위해서는 동일한 열량이 필요하다. 따라서 대체연료를 사용하지 않고 유연탄만을 사용하였을 때를 가정하여 온실가스 배출량을 산정한 결과는 표 25에서 보는 바와 같다.

**Table 25. Estimation of CO<sub>2</sub> emissions in case of using only bituminous coal**

Company	Alternative fuels type	Fuel Consumption	Net heating value	Heating output	CO <sub>2</sub> Emission factor	CO <sub>2</sub> Emission
		ton/yr	TJ/ton	TJ/yr	ton CO <sub>2</sub> /TJ	ton CO <sub>2</sub> /yr
A	Bituminous coal	663,381	0.025	16,584	95	1,575,530
B	Bituminous coal	1,153,643	0.025	28,841	95	2,739,902

‘A’ 사업장의 경우 대체연료를 사용하지 않았을 경우 연간 약 158만 톤의 이산화탄소를 배출하게 되는데, 표 24의 결과와 비교하면 대체연료 사용에 의하여 연간 약 8만 톤 가량의 이산화탄소를 적게 배출하는 것으로 나타났다. 즉, 유연탄만을 사용하였을 때와 비교하여 이산화탄소 배출량이 약 5 % 정도 저감하였음을 확인할 수 있다. ‘B’ 사업장의 경우 유연탄만을 사용하였을 경우 연간 약 270만 톤의 이산화탄소를 배출하게 되며, 대체연료를 사용에 따라 연간 약 1.4 %인 4만 톤 가량의 이산화탄소 배출이 저감되는 것으로 나타났다.

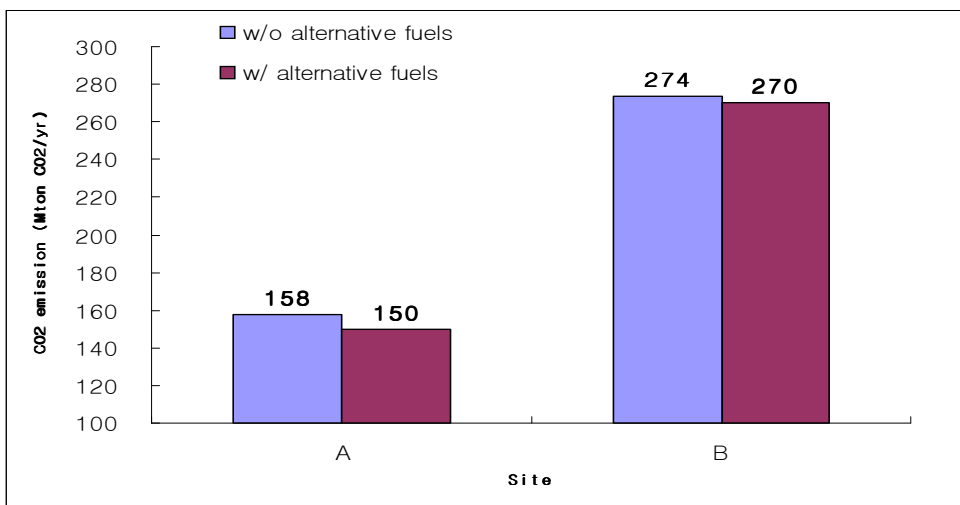


Fig. 14. Comparison of CO<sub>2</sub> emissions using alternative fuels

대체연료 사용에 따른 온실가스 배출량만큼을 사업장 배출량에서 삭감시켜주는 유럽 및 일본의 정책을 우리나라 실정에 맞게 적용하여 온실가스 저감량을 산정해 보았다. 연료의 연소에 의한 온실가스 배출량은 표 24의 배출량 자료를 이용하였고, 공정에서의 온실가스 배출량은 IPCC에

서 제시하는 클링커 생산량을 기준으로 산정하였다(식 4참조). 산정 방법은 아래와 같으며, 공정에서 발생하는 온실가스 배출량은 표 26에 나타난 바와 같다.

$$EF_{Clinker} = Fraction\ CaO \times \frac{44.01g/mole\ CO_2}{56.08g/mole\ CaO} \quad (4)$$

**Table 26. Estimation of CO<sub>2</sub> emissions in manufacture process**

Company	CaO fraction %	Mole fraction of CO <sub>2</sub> per CaO	CO <sub>2</sub> Emission factor ton CO <sub>2</sub> /ton clinker	Clinker production ton/yr	CO <sub>2</sub> Emission ton CO <sub>2</sub> /yr
A	63.85	0.785	0.501	6,641,225	3,328,731
B	63.92	0.785	0.502	10,062,159	5,048,910

공정에서 발생하는 온실가스 배출량을 산정한 결과, ‘A’ 사업장의 경우 연간 333만 톤의 이산화탄소를 배출하며, ‘B’ 사업장의 경우는 연간 505만 톤의 이산화탄소를 배출하는 것으로 산정되었다. 각 사업장별로 연간에너지 사용량에 따른 클링커 생산량을 분석해 본 결과 ‘A’ 사업장의 경우 클링커 1톤을 생산하기 위해 약 2.8 GJ의 에너지가 필요하며, ‘B’ 사업장의 경우는 1톤의 클링커를 생산하기 위해 약 3.3 GJ의 에너지가 필요한 것으로 확인하였다.

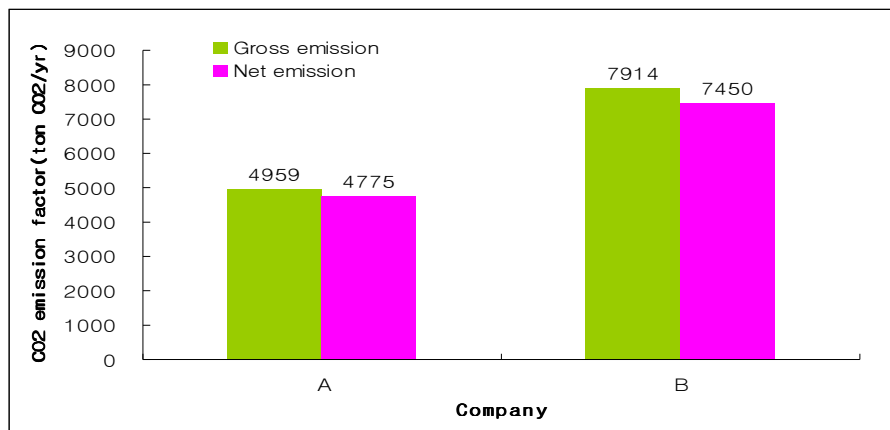
따라서 표 24에서 산정한 연료의 연소에 따른 온실가스 배출량과 표 26에서 산정한 제조공정의 온실가스 배출량과 합하여 총 온실가스 배출량을 산정하였다(표 27참조). ‘A’ 사업장의 총 이산화탄소 배출량(Gross CO<sub>2</sub> Emission)은 연간 약 500만 톤, ‘B’ 사업장의 경우는 연간 약 790

만 톤의 이산화탄소를 배출하는 것으로 나타났다.

이렇게 산정한 총 배출량에서 대체연료 사용에 따른 온실가스 배출량만큼을 삭감 시켜주면, 각 사업장별로 순배출량(Net CO<sub>2</sub> Emission)을 산정할 수 있으며 그 결과는 표 27과 같다. 대체연료의 사용에 따른 온실가스 저감량은 ‘A’ 사업장의 경우 약 18만 톤으로 연간 약 4 %의 저감효과를 확인 하였으며, ‘B’ 사업장의 온실가스 저감량은 약 46만 톤으로 연간 약 6 % 저감효과를 확인할 수 있다.

**Table 27. Estimation of emission reduction for CO<sub>2</sub> when using alternative fuels**

Company	Combustion	Process	Gross CO <sub>2</sub> Emission	w/ alternative fuels	Net CO <sub>2</sub> Emission
	ton/yr	ton/yr	ton/yr	ton/yr	ton/yr
A	1,630,756	3,328,731	4,958,866	184,273	4,774,587
B	2,864,764	5,048,910	7,913,673	463,209	7,450,465



**Fig. 15. Comparison of gross emission and net emission**

## 제5장 결론

시멘트산업은 에너지 다소비 업종이며, 또한 공정의 특성상 지구온난화의 주범인 다량의 이산화탄소를 배출하는 산업이다. 우리나라의 경우 현재는 온실가스 감축 의무가 없지만, 포스트 교토체제에서는 의무감축 국가가 될 가능성이 높으며, 이러한 기후변화협상에서 유리한 입장에 서기 위해서는 우리나라 실정에 맞는 고유 배출계수 개발이 무엇보다 중요하다.

따라서 본 연구에서는 우리나라 시멘트산업에서 실제 사용하고 있는 대체연료를 분석하여 적합한 배출계수를 개발하고, 개발한 배출계수를 적용하여 시멘트산업에서의 온실가스 배출량을 보다 정확하게 산정하였다. 또한 대체연료 사용에 의한 온실가스 배출량을 산정하여 시멘트산업의 온실가스 저감대책의 하나로서 ‘대체연료 사용’의 가능성을 평가하였다.

연구결과, 시멘트산업에서 사용하고 있는 대체연료들의 온실가스 배출계수는 페타이어는 약 89 ton CO<sub>2</sub>/TJ, 폐플라스틱은 약 78 ton CO<sub>2</sub>/TJ, 폐유는 약 77 ton CO<sub>2</sub>/TJ, RDF의 배출계수는 약 95 ton CO<sub>2</sub>/TJ로 산정되었으며, 배출계수의 크기는 RDF>페타이어>폐플라스틱>폐유 순으로 밝혀졌다. 또한, 탄소 배출계수의 경우 페타이어는 약 24 ton C/TJ, 폐유는 약 21 ton C/TJ, RDF는 약 26 ton C/TJ로 산정되었다.

본 연구에서 산정한 배출계수의 값들을 선행연구와 비교 분석한 결과 페타이어의 경우 CSI에서 제시한 값에 비해 약 4.7 %정도 높게, 폐플라스틱은 CSI의 default값과 비교하였을 때, 약 4 %정도 더 높게 산정되었다. 폐유의 경우 CSI와 IPCC에서 제시하는 폐유의 default값과 비교하였을 때, 약 4~5 % 높게 산정되었으며, 폐합성수지의 경우 CIS의 default값과 비교하였을 때, 약 20 % 정도 높게 산정되었으나, IPCC의 default값과 비교하였을 때에는 거의 유사한 값으로 확인되었다. 따라서 정확한 온실가



스 배출계수 산정에 있어서 에너지원 분석인 발열량 분석과 원소분석의 중요성을 확인할 수 있다.

본 연구에서는 대체연료 사용에 의한 온실가스 배출 저감량을 산정하기 위해 두 가지 방법으로 저감량을 산정하였다. 먼저 우리나라 클링커 총생산량의 40 %를 생산하고 있는 두 시멘트 생산 사업장을 대상으로 대체연료를 포함하여 실제 사용하는 연료들에 의한 배출량과 오직 유연탄만을 사용할 경우의 온실가스 배출량을 산정하여 대체연료 사용에 따른 저감량을 추정하였다. 두 번째로, 유럽이나 일본의 경우처럼 공정까지 고려한 총배출량(Gross emission total)에서 대체연료 사용으로 대체된 유연탄의 온실가스 배출량을 삭감시켜 순배출량(Net emission)을 산정하여 대체연료 사용에 따른 온실가스 저감량을 추정하였다.

‘A’ 사업장의 경우 대체연료를 사용하지 않았을 경우 연간 약 158만 톤의 이산화탄소를 배출하며, 대체연료를 사용하였을 경우, 연간 약 5 % 인 약 8만 톤 가량의 이산화탄소가 적게 배출되는 것으로 밝혀졌다. ‘B’ 사업장의 경우 유연탄만을 사용하였을 경우 연간 약 274만 톤의 이산화탄소가 배출되며, 대체연료를 사용하였을 경우, 연간 약 1.4 % 인 4만 톤 가량의 이산화탄소가 적게 배출되는 것으로 밝혀졌다.

시멘트산업에서 에너지사용과 생산공정에서의 총온실가스 배출량을 산정한 결과 ‘A’ 사업장의 경우 연간 약 500만 톤, ‘B’ 사업장은 연간 약 790만 톤의 온실가스를 배출하는 것으로 나타났다. 이렇게 산정한 총 배출량에서 대체연료 사용에 따른 온실가스 배출량만큼을 삭감 시켜 각 사업장별로 순배출량(Net CO<sub>2</sub> Emission)을 산정해본 결과, 대체연료의 용에 따른 온실가스 저감량은 ‘A’ 사업장의 경우 약 18만 톤으로 연간 약 4 %의 저감효과를 확인 하였으며, ‘B’ 사업장의 온실가스 저감량은 약 46만 톤으로 연간 약 6 % 저감효과를 확인할 수 있다.

IPCC에서는 대체연료 사용 시에도 대기 중으로 온실가스가 배출되므로 배출계수 차이에 의한 저감량만 고려하고 있다. 그렇지만 독일, 일본 등에서는 폐기물 재활용을 촉진하고 화석연료 사용량을 억제하기 위하여, 대체연료 사용에 따른 온실가스 배출량을 해당 사업장의 온실가스 감축분으로 인정하고 있다. 따라서 우리나라도 온실가스 배출량 감소에 따른 환경상 이득을 감안한다면, WRI/WBCSD의 CSI(Cement Sustainability Initiative) Protocol 에서 제시하고 있는 “순 배출량” 개념 도입을 적극 검토할 필요가 있다.

## 참고문헌

과학기술부(2005) 기후변화에 대한 대응현황, 과학기술부/한국과학기술정보연구원

김상현(2005) 생활폐기물을 시멘트 킬른의 대체연료로 활용하는 방안에 관한 연구, 강원대학교 대학원 환경학과 석사학위 논문

수도권매립지관리공사(2006) 가연성폐기물 고품연료(RDF)의 경제성 분석 및 제도도입에 관한 연구

이강복(2002) 매립지 온실가스 분석에 관한연구, 호서대학교 대학원 교육석사학위논문

임재규(2004) 기후변화협약 제3차 국가보고서 작성을 위한 기반연구, 에너지경제연구원

노동운(2005) 산업부문 온실가스 감축 및 에너지절약 잠재량 추정 -시멘트산업-, 에너지경제연구원

유동현(2004) 산업공정부문 온실가스 배출전망, 에너지경제연구원

유동현(1995) 시멘트산업의 이산화탄소 저감방안, 에너지경제연구원

일본 경단련(2005) 자발적 활동 계획에 대한 Follow-up 결과 보고서

한국건설기술연구원(1996) 시멘트 공장에서 의 재생연료 사용효과 연구

강현주(2000) 고품 폐기물 소각재를 이용한 alinite 시멘트의 합성,  
Korean Ceramic Society.

KYOTO PROTOCOL(1997) KYOTO PROTOCOL TO THE UNITED  
NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE

UNFCCC(2006), Emission reduction through partial substitution of  
fossil fuels with alternative fuels in cement manufacture

CSI(2005) CO<sub>2</sub> Accounting and Reporting Standard for the Cement  
industry, WBCSD

ICF (1999), Climate Wise - Cement Industry Reporting Plan and  
Workbook. Version 1.2, April 1999. Prepared by ICF Consulting for  
U.S. EPA.

IPCC(1996), Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse  
Gas Inventories Workbook.

IPCC (1997), Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse  
Gas Inventories, Greenhouse Gas Inventory Reference Manual.

IPCC (2000), Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories. Available on-line at:  
<http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/gp/report.htm>

US EPA (1999), Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks: 1990 - 1997. EPA 236-R-99-003.

WBCSD(2005) A Corporate Accounting and Reporting Standard

Martin Schneider(2006), Climate Change - and CO2 reduction a Challenge for the cement industry, VDZ, Dusseldorf, Germany

## Abstract

### Development of GHG Emission Factors for Alternative Fuels with Assessment of Emission Reduction in Cement Industry

Yoon Seok Kyung

Department of Earth & Environmental Sciences

The Graduate School of Sejong University

This study developed emission factors for alternative fuels used in cement industries in Korea and also estimated reduction in emissions of GHG by the use of alternative fuel.

Emission factors for GHG of waste tire, waste plastic, waste oil, RDF were estimated to be about 89, 78, 77, 95 ton CO<sub>2</sub>/TJ respectively. In comparison with previous studies, there was some difference, but most of the results gave similar values. The calorific value was also estimated and elemental analysis for energy source was implemented in order to estimate the exact emission factors and the reduction of GHG emissions by the use of alternative fuel. In the case of 'A' company, CO<sub>2</sub> emission from alternative fuels was about 4 % lower than that of bituminous coal only. Also in case of 'B' company, CO<sub>2</sub> emission from alternative fuels was about 1.4 % lower than that of only bituminous coal. Also, when applying the rule of

Germany and Japan, it was found that emission reductions of both company were about 4.3 %, 6.3 %, respectively.

These results of this study can be used as fundamental data in determining the emission reduction and consequently can be greatly helpful to Korean sityation in negotiation of United Nations Framework Convention on Climate Change.