creative commons

COMMONS DEED

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:

BY: **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

dCollection

석사학위논문

산업부문의 온실가스 배출계수 산정 방법에 대한 비교 연구

-시멘트산업을 중심으로-

세종대학교 대학원

지구환경과학과

정 재 학

산업부문의 온실가스 배출계수 산정 방법에 대한 비교 연구

-시멘트산업을 중심으로-

지도 전 의 찬 교수

이 논문을 석사학위 논문으로 제출 함

2006 년 12 월 일

세종대학교 대학원

지구환경과학과

정 재 학

석사학위논문

산업부문의 온실가스 배출계수 산정 방법에 대한 비교 연구

-시멘트산업을 중심으로-

세종대학교 대학원

지구환경과학과

정 재 학

정재학의 석사학위 논문을 인준함

심사위원장 배 위 섭 (인)

심사위원 김 기 현 (인)

심사위원 전 의 찬 (인)

세종대학교 대학원

2006 년 12 월

감사의 글

많은 꿈을 안고 시작했던 연구실 생활을 아쉽게 마감하면서 그동안 많은 것을 얻기만 하고 베풀지 못한 지난 2년의 삶을 되돌아봅니다.

학부과정 부터 오늘에 이르기까지 많은 관심과 사랑으로 학문의 길을 이끌어주신 전의찬 지도교수님께 깊은 감사를 드립니다.

심사위원장으로 저의 논문에 대한 관심과 조언을 아끼지 않으신 배위섭 교수님께 감사를 드리며, 많은 가르침을 주시고 아낌없는 지도를 해주신 김기현 교수님, 항상 웃으며 격려해주신 허진 교수님, 송지현 교수님, 건국대 김조천 교수님께 감사를 드립니다.

실험실의 든든한 버팀목이자 맏형인 재환형, 뒤늦게 실험실에 합류하여 많은 웃음과 충고를 해주신 명수정 박사님, 항상 후배들을 편안하게 대해준 종호형, 많은 것을 알려준 성호형, 실험실에 잘 적응하고 있는 PIW, 대학원 생활 동기로 때론 친구로 많은 도움을 주었던 석경, 지금은 다른 길을 걷고 있으며 항상 활발하며 나를 잘 챙겨준 호수, 묵묵하고 조용히 일하는 진수, 무엇이든 열심히 배우려는 시형, 실험하면서 싫은 소리 한번 안하는 정우에게 평소 하지 못했던 감사의 말을 전합니다.

열심히 한다며 많은 격려를 아끼지 않았던 규훈형, 여진누나, 한식형, 성혁이형, 문순, 윤정, 후배 태문, 신영, 상현, 과 조교로 우리를 즐겁게 해주던 상은, 대학원 생활에 힘이 되어준 건국대 기준형, 강남, 윤석, 현주, 중식, 기영, 보아에게도 고맙다는 인사를 전합니다.

멀리 COP 연수를 다녀와 친하게 지내며 관심과 격려를 보내준 연세대 성인, 미숙에게도 감사드립니다.

지치고 힘들 때마다 항상 내 옆에서 힘이 되어준 소중한 벗 선아에게도 깊은 감사드립니다.

매번 바쁘다고 만나지 못했던 재형이와 성범, 은애, 정환, 항상 재미난 이야기로 즐겁게 해주던 효범이와 형준, 친동생같은 상범이에게도 고마움을 전합니다.

끝으로 늦게까지 학업에 길을 잘 인도해주시며 조건없는 사랑을 주신 부모님, 저를 많이 걱정해주시던 누나와 매형, 사회에 일찍 첫 발을 내딛고 형에게 많은 지원을 아끼지 않은 동생 종학이에게도 고맙다는 말을 전합니다.

많은 분들이 저를 아껴주고 돌봐주어 지금의 제가 있는것 같습니다. 앞으로 제 위치에서 모든 일에 최선을 다하는 재학이가 될 수 있도록 더 많은 노력을 할 것입니다.

2006년 12월 늦은밤 정든 실험실에서...

목 차

감사의 글 ····· i
목 차 ····· iii
List of Tables ····· vi
List of Figures ····· viii

제 1 장 서 론 ····· 1
1.1 연구의 목적 ····· 1
1.2 연구의 범위 및 방법 ····· 2

제 2 장 이론적 고찰 ····· 5
2.1 시멘트 사업장의 현황 ····· 5
2.2 시멘트 제조 공정 ····· 5
2.2.1 시멘트 제조 세부공정 ····· 6
2.3 시멘트산업의 온실가스 배출 특성 ····· 11
2.3.1 배출량 산정방법 ····· 11
2.3.2 시멘트산업의 온실가스 배출량 산정 방법 ····· 13

제 3 장 연구 방법 ····· 16
3.1 연료채취 및 분석방법 ····· 16
3.1.1 연료채취방법 ····· 16

3.1.2 연료분석방법 ····· 17
3.1.3 연료분석의 정도관리 ····· 19
3.2 온실가스 채취 및 분석방법 ····· 23
3.2.1 온실가스 채취방법 ····· 23
3.2.2 온실가스 분석방법 ····· 24
3.2.3 온실가스분석의 정도관리 ····· 26
3.2.4 현장 분석 장비의 정도관리 ····· 31
3.3 배출계수 산정 방법 ····· 32
3.3.1 IPCC 방법 ····· 32
3.3.2 TMS 방법 ····· 33
3.3.3 CO_2 실측 방법 ····· 37

제 4장 결과 및 고찰 ····· 38
4.1 IPCC지침을 이용한 배출계수 산정 결과 ····· 38
4.1.1 연료분석을 이용한 연료배출계수 산정 결과 ····· 38
4.1.2 공정부문의 배출계수 산정 결과 ····· 40
4.2 TMS 방법을 이용한 배출계수 산정 결과 ····· 41
4.3 CO_2 실측 방법을 이용한 배출계수 산정 결과 ····· 42
4.4 배출계수 비교 ····· 43
4.4.1 연료별 배출계수 비교 ····· 43
4.4.2 물질수지분석의 배출계수 비교 ····· 45
4.4.3 배출계수 산정방법에 따른 비교 ····· 47
4.5 방법별 배출량 평가 ····· 48

제 5장 결론 ····· 50

참고문헌 ····· 52

Abstract ····· 57

List of Tables

Table 1. Greenhouse gas exhaust in mineral production process 2
Table 2. Reproducibility test of calorific analysis using Benzoic acid 20
Table 3. Results of replicability test using measure quantity of sample 22
Table 4. Analytical conditions of GC-FID. 26
Table 5. Test of reproducibility and Method Detection Limit 27
Table 6. A summary of dilution tactics for preparing CO_2 working standards 29
Table 7. Comparing the results of GC to the results of Potable analyzer 31
Table 8. Calculation worksheet of emission factor by fuel analyses 32
Table 9. F Factors for various fuels 35
Table 10. Calculation worksheet of emission factor by sample analyses 37
Table 11. Result of Heating value and Elemental analyses 38
Table 12. Result of Emission factor using fuel type analyses 39
Table 13. Result of industrial process analyses 41

Table 14. Results of CO_2 emission factor using TMS O_2 value 42

Table 15. Results of CO_2 emission factor using sample analyses 43

Table 16. Comparing workplace to IPCC form emission factor 44

Table 17. Comparing clinker base to cement base from emission factor 46

List of Figures

Figure 1. Reproducibility test of calorific value using Benzoic acid weight ····· 20
Figure 2. Result of replicability test using Sulfanilammide ····· 21
Figure 3. Result of replicability test using BBOT ····· 22
Figure 4. Greenhouse gas sampling diagram using Lung sampler ····· 24
Figure 5. Comparison of calibration curves for each tedlar bag obtained using three different CO_2 calibration ····· 30
Figure 6. Comparing emission factor form fuel type ····· 44
Figure 7. Comparing measurement to TMS from emission factor ····· 46
Figure 8. Comparing measurement to TMS from emission factor ····· 48
Figure 9. Comparing emissions from the method ····· 49

제 1 장 서 론

1.1 연구의 목적

2003년 현재 우리나라 온실가스 총 배출량은 이산화탄소로 환산시 582.2 백만 ton이며, 그중 이산화탄소의 배출량은 510.7 백만 ton으로 전체 배출량의 87.7 %를 차지하고 있다. 이중 에너지 부문에서의 온실가스 배출량이 481.4 백만 tCO_2로서 전체의 82.7 %를 차지하여(산업자원부 자원정책실, 2006) 에너지 부분에서 대부분의 온실가스가 배출되는 것을 알 수 있다.

이에 따라, 에너지부문의 온실가스 배출원에 대한 연구가 선진국을 중심으로 많이 진행되고 있으나(Hondo, 2005; Hartikainen et al., 2004; Kartha et al., 2004; Wijayatunga et al., 2004; Garcia and Zorraquino, 2002), 우리나라는 전의찬 등(2006)에 의한 연구가 있을 뿐 주요 선진국에 비해 이 분야의 연구가 미미한 실정이다(Shin et al., 2005). 우리나라의 경우 온실가스 배출통계를 산출할 때 Inter-government Panel on Climate Change(이하 IPCC) Guideline(1996)에 따라 Tier 1(simple method)을 기본적으로 적용하고, 일부 분야에서만 Tier 2 방법론을 적용하고 있다. 그런데 최근 발표된 IPCC Good practice guidance(2001) 에서는 각 국가의 고유값이 있는 경우에는 기본값에 앞서서 국가고유배출계수(Country-specific emission factor)를 적용하도록 권고하고 있으며, 이러한 고유값을 확보하는 방향으로 연구가 진행되고 있다(AGO, 2001; US EPA, 2000).

특히 시멘트산업의 경우 시멘트 생산 시 사용되는 에너지로 인한 온실가스 배출 뿐 아니라 주요 제품인 클링커 생산시의 탈탄산반응에 의해 다량의 온실가스가 발생된다(박필주, 2003). 따라서 우리나라도 온실가스 배출원에 대한 고유배출계수 마련이 시급한 실정이다.

본 연구에서는 시멘트산업에서 발생되는 온실가스의 배출계수 산정방법을 여러 지침서에서 제안하고 있는 방법으로 산정하고 우리나라의 실정에 반영할 수 있도록 관련 변수를 조사하였다.

본 연구에서 작성된 자료들은 시멘트산업에서 발생하는 온실가스 배출계수 설정 및 배출량을 산정하는 등 온실가스 배출량 산정에 기초자료로 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

1.2 연구의 범위 및 방법

연구대상으로는 충청북도 단양에 위치한 시멘트공장 2곳을 선정하였다. 시멘트산업은 생산 공정에서 다량의 이산화탄소(CO_2)가 배출되므로, 대상 온실가스는 이산화탄소로 한정하였다. 그 외 연료연소 과정에서 메탄(CH_4) 및 아산화질소(N_2O)가 발생되나 그 양은 미미한 수준이므로 본 연구에서는 제외하였다.

온실가스 배출계수 산정방법은 다양한 가이드라인(IPCC, WRI/WBCSD, EPA)을 통하여 여러 가지 산정방법이 알려져 있다.

본 연구에서는 연료분석과 원료의 물질수지에 기초한 IPCC의 Worksheet 방법(이하 '연료분석 및 물질수지 방법'), 이산화탄소의 농도분석과 배기가스 유량에 기초한 실측방법(이하 'CO_2 실측방법'), 그리고 Smokestack Tele-Monitoring System(이하 TMS) 측정자료(산소 농도 및 유량)에 의한 방법(이하 'TMS 방법')으로 이산화탄소 배출계수를 산정하고 산정된 배출계수를 상호 비교하였다.

'연료분석 및 물질수지 방법'은 연료의 열량 및 탄소 함량과 석회석의 순도 등을 고려하여 배출계수를 산정하였으며, 'CO_2 실측방법'은 굴뚝에서 배출되는 이산화탄소의 농도를 분석하고 유량을 측정하여 배출량을 산정하고 배출계수를 개발하였다. 'TMS 방법'은 측정항목인 산소농도를 EPA

에서 제시하고 있는 방법에 적용하여 배출계수를 산정하였다.

본 연구의 방법 및 절차는 다음과 같다.

1. 시멘트산업에서의 온실가스 배출계수 산정에 대한 기존 연구와 이론을 검토・정리하고, 시멘트산업의 온실가스 배출 특성 및 배출계수 산정 방법에 대해서 고찰한다.

2. 시료 채취방법 및 온실가스 분석방법의 정도관리를 실시한다.

3. 시멘트 사업장의 연료를 분석하고, 활동도를 적용하여 연료별 배출계수를 산정한다. 그리고 클링커의 분석결과를 조사하여 공정에서 배출되는 이산화탄소의 배출계수 및 배출량을 산정한다(‘연료분석 및 물질수지 방법’).

4. 사업장에서 채취하여 분석한 이산화탄소의 농도를 이용하여 배출계수를 산정한다(‘CO_2 실측방법’).

5. TMS 자료를 이용하여 배출계수를 산정한다(‘TMS 방법’).

6. 각 방법에 의한 배출계수 값을 비교하고 시멘트산업에 적합한 배출계수 산정방법을 제시한다.

제 2 장 이론적 고찰

2.1 시멘트 사업장의 현황

2003년 현재 국내에는 Table 1에서 보는 바와 같이 포틀랜드 시멘트 제조업체는 총 9개 사업장으로 해안 3개사, 내륙 4개 사업장으로 구분되며, 기타 고려시멘트와 유니온시멘트 등 2개 사업장이 사업활동을 펼치고 있다. 대표적인 포틀랜드 시멘트 제조업체는 쌍용, 동양, 성신양회, 한일, 라파즈한라, 현대 등 5개 사업장이며, 이들 5개사가 생산한 2004년도 시멘트 생산량은 45,985천 톤으로 전체 시멘트 생산량의 약 85 %를 차지하고 있다.

Table 1. Domestic manufacturing companies of portland cement in Korea

Portland cement manufacturing companies		
Shore	Inland	Others
Ssangyong cement	Hanil cement	Korea cement
Lafargehalla cement	Hyundai cement	Union cement
Dongyang cement	Asia cement	
	Sungsin cement	
3 company	4 company	2 company

* Korea Energy Management Corporation(2004), Energy Technique DB Construction

2.2 시멘트 제조 공정

시멘트 산업은 주원료인 석회석과 기타 점토질 광물 등을 혼합 분쇄하여 1,400 ℃ 이상의 고온에서 소성시켜 시멘트를 제조하는 산업이다. 석회질 원료와 점토질 원료를 분쇄 혼합하여, 킬른에서 소성하여 단단한 고상의 클링커를 만들고 냉각된 클링커를 석고($CaCO_4 \cdot 2H_2O$)와 혼합, 분쇄하면 시멘트가 만들어진다.

시멘트 제조공정은 크게 석회석 채광, 원료가공, 연료가공, 열처리 및 제품화 등 5개 공정으로 구분할 수 있다. 현재 가장 많이 생산, 사용하고 있는 시멘트는 포틀랜드 시멘트와 제철공정에서 생산된 부산물인 고로슬래그를 클링커와 혼합해서 만들어지는 슬래그시멘트로 구분한다. 슬래그시멘트는 혼합시멘트의 한 종류이지만 우리나라에서는 슬래그시멘트만 생산하고 있기 때문에 본 연구에서는 혼합시멘트 대신 슬래그시멘트로 통일하기로 한다.

이와 같은 시멘트 제조공정은 근본적으로 원료의 분쇄, 혼합, 소성과 반제품의 분쇄공정으로 세분되나, 지금까지 알려진 시멘트 제조공정은 원료의 분쇄와 처리방법에 따라 1) 건조상태의 원료(raw meal)를 이용하여 소성하여 제조하는 건식법, 2) 원료를 수분으로 pellet화하여 소성하여 제조하는 반건식법, 3) 슬러리 상태의 원료를 여과하여 반슬러리 상태로 소성하여 제조하는 반습식법, 4) 슬러리 상태의 원료를 소성하여 제조하는 습식법 등의 4가지로 구분된다.

시멘트 제조는 제품으로 보았을 때, 반제품인 클링커 제조공정과 완제품인 시멘트 제조공정으로 구분할 수 있으며, 제조공정은 원료 채광공정, 원료 분쇄공정, 소성공정 및 제품공정의 4개 공정으로 구분할 수 있다. 현재 생산되는 대표적인 시멘트인 Portland시멘트를 중심으로 시멘트 제조공정

을 기술하면 다음과 같다.

2.2.1 채광 공정

가. 석회석 채광

석회석의 채굴법에는 Slope Cut(경사면 공법), Glory hole(수직홀타입공법), Bench cut(벤취타입 공법)이 있는데, 우리나라에서는 1960년대 초반까지는 Glory-hole방법도 사용하였지만 1970년대 이후부터 현재까지 Bench cut 공법이 가장 일반적으로 사용되는 방법이다.

이 Bench cut 공법은 산을 계단식(Bench)으로 평면 채굴을 행하는 작업으로 안정성 및 중장비 투입이 용이하여 대규모 채굴이 가능하다. 채굴을 위하여 착암기로 계단면에 구멍을 뚫고 화약을 넣어 발파시키며, 발파된 석회석의 크기는 보통 400mm～1,000mm정도로서 대형 트럭으로 운반되어 분쇄공정으로 운반된다.

나. 석회석 분쇄

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

경우에 따라서는 1차 또는 2차 파쇄기 후단에 석회석 저장시설이 있기도 한데, 이는 석회석의 품질 조정 또는 석회석 재고 확보 차원에서 설치한다. 채광 위치에 따라 동일 광산에서도 석회석 품질은 변동이 심하므로 Premixing 시설을 사용하여 석회석을 쌓아두거나, Belt conveyor를 타고 곧바로 Raw mill용 Hopper에 직투입 된다.

2.2.2 원료가공 공정(원료 혼합 및 분쇄)

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 크레인을 이용하거나 직투입 시설에 의해 Hopper에 투입한다.

나. 조합원료 분쇄 및 저장

석회석 및 부원료를 각 배합비에 맞게 정확히 평량 조합하여 혼합한 후 Raw Mill에서 Kiln 폐열을 이용하여 건조함과 동시에 분쇄하며, 분쇄기에서 분쇄된 분말은 분급기(Separator)에서 미분과 조분으로 분리된다. 조분은 다시 Raw Mill로 보내어 재분쇄되는 공정을 가지며, 미분 원료는 원료 저장시설(Silo)로 이송 저장된다. 원료의 분말도 기준은 입도가 88 μm 이상으로 관리되며, 사용되는 Raw mill에는 보통 원통형의 Ball mill(Tube mill) 또는 Roller mill(Vertical mill)이 사용된다.

원료가공 공정에서는 주로 석회석과 부원료를 혼합, 분쇄, 건조한다. 이때 투입한 에너지는 분쇄용 전력이 대부분을 차지하며, 원료의 예열을 위하여 냉각기에서 회수한 여열도 이용한다.

2.2.3 소성공정

소성공정은 시멘트 제조공정의 가장 핵심적인 공정으로서, 소성공정에서는 예열기(Preheater)를 거친 원료가 소성로(Kiln)에서 1,350～1,450 ℃ 정도의 열에 의해 용융·소성된 후 냉각기(Cooler)에서 냉각되고 20～60 mm 정도의 구형의 고형물로 만들어져 나오는데, 이것을 시멘트 반제품인 클링커(Clinker)라 한다. 시멘트 제조시 소비되는 에너지의 대부분이 소성

공정에서 사용되는데 본 공정에서 사용되며 사용되는 에너지는 유연탄, B-C Oil, Pet coke, 전력, 대체연료(Alternative Fuel and Resources; AFR) 등이 있다.

가. 예열기

Preheater는 Cyclone이 수직방향으로 보통 4~5단 정도 세워 올린 형태로 이루어져 있는데, 원료는 최상단의 Cyclone 입구로 투입되고, 하단의 Cyclone들과 하소로(Calciner)를 거치면서 약 800~860 ℃까지 예열되어 소성로로 투입된다.

소성공정의 형식은 보통 이 Preheater의 형식에 의해 결정되며, 초기에는 Slurry 상태의 원료를 투입하는 Wet type에서 Suspension Preheater 형식을 거쳐 최근에는 calciner를 가진 New Suspension Preheater System으로 발전하였다.

나. 소성로(Kiln)

현재 원료를 소성하는데 사용되는 소성로는 대부분 Rotary kiln이 사용되고 있다. Rotary Kiln은 시멘트 생산능력에 따라 크기의 차이는 있지만, 일반적으로 2~6 m의 직경에 길이가 40~100 m나 되는 거대한 원통형 설비이며, 3~5도의 경사를 가지고 있고, 2~4 rpm의 속도로 회전한다.

예열기로 투입된 원료는 소성로를 통과하면서 1,350~1,400 ℃까지 계속 가열되어, 시멘트의 반제품인 클링커가 형성되고, 점진적으로 이동하여 소성로의 끝에 설치된 냉각기(Cooler)로 배출 된다.

소성로에는 원료를 소성하기 위하여 Burner가 설치되어 있으며, 연료로는 유연탄이나 B-C Oil, 기타 재활용 연료 등을 사용한다. 소성로 내부 가스 온도는 약 1,050~1,700 ℃이며, 원료는 보통 1,250~1,450 ℃에서 소성

되는데, 이 온도범위에서 거의 모든 광물반응 및 전이가 일어나게 된다. 일반적으로 이 공정에서 소비되는 열량은 소성로 형식별로 차이가 있으나 보통 650～750 kcal/Kg-clinker 인 것으로 알려지고 있다.

다. 냉각기(Cooler)

냉각기는 소성로에서 생성된 약 1,300～1,450 ℃정도의 클링커를 약 150 ℃정도로 냉각하는 설비로서, 에너지 관리측면에서 매우 중요한 설비이다. 냉각기는 물을 이용하는 수냉식과 공기를 이용하는 공냉식이 있으나, 국내 각 시멘트회사의 대부분은 공냉식(AQC: Air Quenching Cooler)을 채택하고 있다. 일반적으로 공냉식인 경우의 공기 공급량은 냉각기의 형태에 따라 상이하지만 보통 1.7～2.5 S㎥/Kg-clinker가 소요되는 것으로 알려지고 있다.

2.2.4 제품화공정

클링커 Silo에서 인출된 클링커는 석고 및 부재료(석회석, 회분, 슬래그, 기타 등)를 5 %정도 첨가하여 예비 분쇄설비에서 1차 분쇄된 후, 시멘트 분쇄기에서 고운 가루로 분쇄되어 최종 생산품인 시멘트로 만들어진다.

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 비표면

적으로 표시하고 있는데, 일반적으로 약 3,200~3,400 blaine(㎠/g)수준으로 생산하고 있다.

나. 포장 및 출하

Cement Mill에서 생산되어 Silo에 저장된 시멘트는 Silo 하부에서 인출되어 Packing System에 의해 Bag으로 포장 또는 Bulk Cement 상태로 출하하며, 일부는 클링커 상태로 출하하기도 한다.

2.3 시멘트산업의 온실가스 배출 특성

시멘트산업은 연료뿐 아니라 생산공정에서도 이산화탄소를 다량 배출하는 에너지 다 소비업종으로서, 장차 기후변화협약에 따라 온실가스 배출저감 의무를 지게 될 경우 큰 타격을 받을 수 있는 산업분야이다.

시멘트사업장의 예열기 및 킬른에서 사용되는 석탄, 석유코크스, B-C Oil, 천연가스 등 다양한 화석연료와 대체연료로 사용되는 폐기물의 연소과정에서 다량의 이산화탄소가 배출된다.

또한 원료인 석회석에 열을 가하면 식 (1)과 같이 하소(Calcination)라고 하는 탈탄산과정이 일어나며, 여기서 석회석이 석회(lime)와 이산화탄소로 분해되어 대기 중으로 배출된다.

$$CaCO_3 + heat \rightarrow CaO + CO_2 \qquad (1)$$

그리고, 이 밖에 부분적으로 소성된 시멘트 킬른먼지(Cement Kiln Dust; CKD) 또는 완전히 소성된 부산먼지(Bypass Dust)와 같은 폐원료에서도 이산화탄소가 발생된다.

일반적으로 시멘트 1톤 생산 시, 연료연소에 의한 이산화탄소는 약

300 Kg, 원료의 탈탄산 반응에 의한 이산화탄소는 약 500 Kg으로서, 생산 공정에서의 이산화탄소 배출량이 연료연소 과정에서의 배출량보다 40 % 정도 더 많은 것으로 알려져 있다.

시멘트 산업에서의 발생 온실가스로는 이산화탄소 외에도, 메탄, 아산화질소 등이 배출되지만, 고온에서의 연소와 긴 반응시간 등의 이유로 이산화탄소 이외의 온실가스는 소량 배출된다(UNFCCC, 2006).

제 3 장 연구 방법

3.1 연료채취 및 분석방법

3.1.1 연료채취방법

연료채취방법은 연료의 종류에 따라 석탄과 석유로 나눌 수 있다. 시멘트 사업장은 주로 유연탄을 사용하므로 석탄의 시료채취방법을 살펴보았다.

가. 입하탄의 시료채취 방법

① 선박이 부두에 접안하여 작업이 시작되면 Sampling House 내의 시료채취기를 작동한다.

② 시료채취설비의 용기 8개가 완전히 채워지면 시료를 시료보관통에 모아 시건장치를 하여 보관한다.

③ 1/2 LOT의 작업이 끝나면 바닥을 깨끗이 청소후 시료 전량을 쏟아 골고루 혼합하고 원추사분법을 이용하여 최종 5 Kg정도를 시료조제실로 운반한다.

나. 소비탄의 시료채취방법

① 매 Shift별로 상탄시 Coal Center에서 탄종을 확인 후 운전되는 Conveyor Belt를 확인하여 기기(시료채취기)를 작동시킨다.

② 15분 간격으로 1회 작동시키며 1회에 약 5 Kg을 채취한다.

③ 한 호기의 상탄이 종료되면 운전된 Belt의 시료채취기에 모인 시료를 바닥에 쏟아서 먼저 수분 측정용 시료를 2단 Sampling 및 층별 Sampling 방법으로 신속하게 채취하여 비닐봉지(합계가

약 1 Kg)에 수분이 증발하지 않도록 봉인하여 보관한다.

④ 나머지 시료를 원추 사분법에 의해 축분하고 최종 축분은 “인크리멘트” 축분 방법으로 각 Belt 별로 1 Kg 정도 Sampling한다.

⑤ 다시 Coal Center에 호기별 상탄량과 Belt별 상탄량을 구분 확인 후 채취된 시료채취용기 2개를 한 장소에 모아서 Belt별 상탄량 비율에 의하여 한 봉지로 만든다.

⑥ 다음 호기 상탄이 시작되면 탄종을 먼저 확인하고 전호기와 다른 탄종의 탄이 상탄되면 Belt에 있는 잔여탄이 상탄된 후 기기를 작동시켜 같은 방법으로 채취 및 축분하여 조제실로 운반한다.

⑦ 상탄이 모두 끝나면 호기별 탄이 섞이지 않도록 채취시료봉지의 표기가 정확한지 확인한다.

3.1.2 연료분석 방법

가. 열량분석

연료의 열량을 분석하기 위하여, 연료를 연연식(然硏式) B형 열량계 또는 연연식 자동 열량계로 시료를 연소시켜 그 동안의 온도 상승을 측정하고 시료 1 g에 대한 발열량으로 환산하게 된다. 에너지원들의 발열량분석 결과는 고위발열량 및 저위발열량으로 나누어진다. 고위발열량의 경우 연료가 연소될 때 생성되는 발열량으로 연소가스 중의 수증기 및 응축잠열까지 포함한 발열량이다. 반대로 연료 중의 수분이나 수소의 연소에 의해 생성된 수분의 증발잠열을 제외한 열량을 저위발열량이라고 한다.

석탄의 발열량분석 기준은 인수식(As Received basis), 기건식(Air Dried basis), 건식(Dry basis)등 크게 3가지로 구분되는데, 이것은 석탄이

다른 연료와 달리 수분과 회분을 다량 포함하고 있기 때문이다. 따라서 열량분석 후 열량을 표시하는 경우에는 분석기준(basis)을 반드시 기재하여야한다(KS E 3707, 2001; KS M 2057, 1997).

본 연구에서 시료의 열량을 분석하기 위한 방법으로 독일 IKA사에서 제작한 IKA-C2000 basic 자동열량계를 사용하여 표준 분석방법인 Iso-peribolic 25 ℃ Mode를 이용하여 시료의 발열량을 분석하였다. 발열량분석을 위한 준비절차로 사업장에서 보내온 소비탄 시료를 107 ± 2 ℃에서 1시간 동안 가열, 건조하여 총수분을 제거한 후 열량분석을 실시하였다.

나. 원소분석

석탄류 및 유류와 같은 화석연료의 연소과정에서 발생되는 배출가스 중 이산화탄소의 배출량은 연료 중 탄소의 함량에 의존하게 되며(US EPA, 2004), 원소분석은 온실가스의 배출량을 추정할 수 있는 기초과정으로 수행되어야한다.

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

석탄의 탄소함량을 측정하는 방법에는 자동원소분석기(Automatic Elemental Analyzer)를 이용하는 방법이 가장 많이 사용되고 있다. 일반적인 자동 원소분석기는 연료 중 질소(Nitrogen), 탄소(Carbon), 수소(Hydrogen), 황(Sulfer) 등의 기본 성분을 동시에 분석할 수 있다.

본 연구에서는 석탄의 탄소와 수소함량을 분석하기 위해 자동원소분석기(Thermo Finnigan-Flash EA 1112, USA)를 이용하였으며, 원소분석을 하기위하여 시료를 전처리한 후 Container에 약 2 mg 주입한 다음 Autosampler에 주입하여 분석하였다. 원소분석기에 사용한 컬럼은 길이 2 m의 ParaQ-X 컬럼을 사용하였으며, 운반가스, 산소, Reference가스의 유량은 각각 140, 240, 100 mL/min으로 설정하였고, Furnace 온도와 오븐의 온도는 각각 900, 70 ℃로 설정하여 분석을 실시하였다.

3.1.3 연료분석의 정도관리

가. 열량분석의 정도관리

본 연구에서는 발열량분석에 대한 신뢰도를 높이기 위한 검증실험으로 일정량의 표준시료를 반복 분석하여 얼마나 동일한 열량값이 검출되는가를 분석하는 재현성 평가와 시료의 주입량을 달리하여 발열량을 분석하고 분석한 값과 시료량을 이용하여 직선성을 평가하였다.

일정량의 표준시료(Benzoic acid; SD: ± 5 cal/g)를 5회 분석하여 재현성 실험을 진행한 결과 RSE 0.008로서 매우 우수한 재현성을 보였다. 분석결과는 Table 2에 나타내었다.

또한 동일한 분석 방법으로 시료의 무게에 따라 발열량이 변하는지를 살펴보았다. 열량분석기의 주입량은 0.7 ~ 1.0 g이므로 각각 0.4998, 1.004, 1.5001 g씩 주입하여 분석한 후 산정한 발열량의 결과는 Fig. 1에 나타내었다.

Table 2. Reproducibility test of calorific analysis using Benzoic acid

Times	Mass of benzoic acid (g)	Calorific value (cal/g)
1	0.9998	6,316
2	0.9994	6,315
3	1.0002	6,317
4	0.9993	6,315
5	0.9989	6,314
Mean		6,315
SD		1.14
RSD(%)		0.018
SE		0.5
RSE(%)		0.008

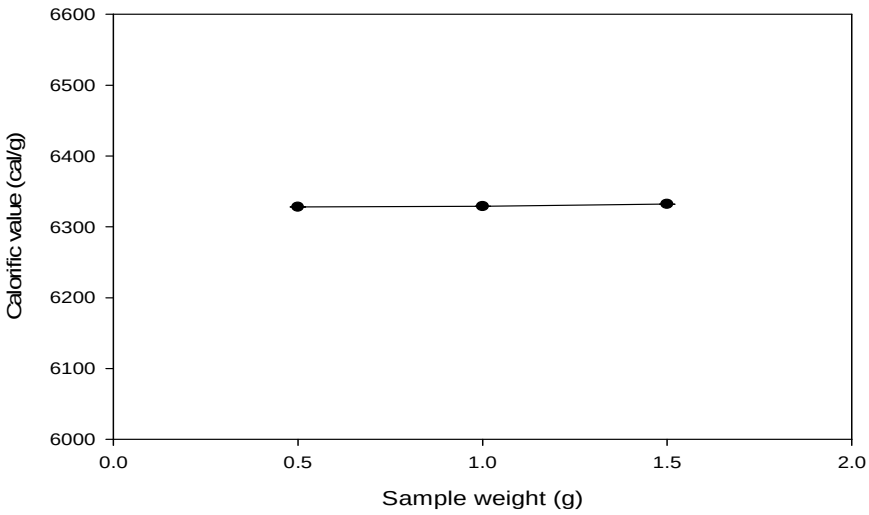

Figure 1. Reproducibility test of calorific value by sample weight

나. 원소분석의 정도관리

연료의 주요 구성성분 중 탄소(C)와 수소(H)의 분석 신뢰도를 높이기 위한 검증실험을 실시하였다. 사용한 원소분석기는 표준시료명과 표준시료에 함유된 각 원소의 함량을 입력한 후 분석결과를 이용하여 보정하며, 미지시료의 분석 결과는 표준시료의 보정한 값을 기준으로 산정하게 된다.

본 연구에서는 두 종류의 표준시료(Sulfanilammide standard, BBOT)를 사용하여 재현성 실험을 진행하였다. 그리고 현장에서 채취해온 시료를 반복 분석하여 재현성 실험을 실시하였다.

Sulfanilammide standard 시료의 분석결과는 Fig. 2에 나타냈으며, BBOT의 분석결과는 Fig. 3에 나타내었다. 그리고, 현장에서 채취한 연료 중 임의로 4개를 선택한 후, 동일 조건으로 각각 3회씩 반복 분석하여, 분석 재현성을 살펴보았다.

그 결과, Table 3에서 보듯이 탄소의 상대표준편차는 0.08 ~ 2.71 %, 수소의 상대표준편차는 0.32 ~ 5.96 %로 우수한 재현성을 나타냈다.

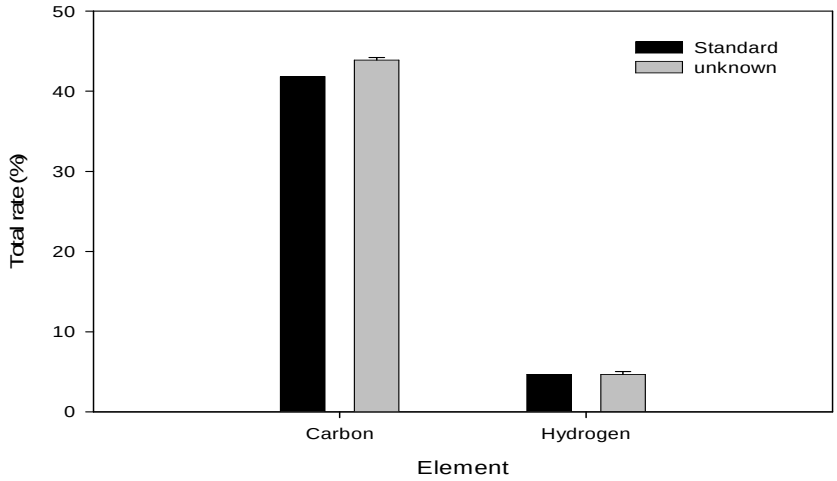

Figure 2. Result of replication test using Sulfanilammide standard

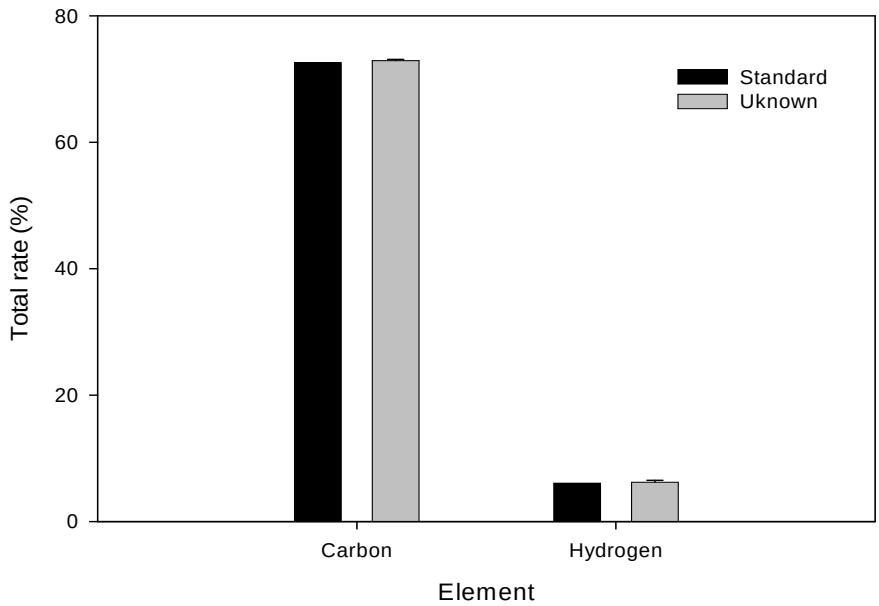

Figure 3. Result of replication test using BBOT standard

Table 3. Replicability test results of fuel samples

Fuel sample	Element	1	2 (%)	3	Mean	SD	RSD(%)
A	Carbon	70.46	69.17	69.30	69.64	0.710	1.02
	Hydrogen	4.13	4.05	3.98	4.05	0.074	1.83
B	Carbon	56.00	54.06	54.81	54.96	0.978	1.78
	Hydrogen	4.85	4.63	4.56	4.68	0.153	3.27
C	Carbon	51.24	53.46	53.91	52.87	1.432	2.71
	Hydrogen	3.84	4.28	4.26	4.13	0.246	5.96
D	Carbon	84.40	84.35	84.26	84.34	0.071	0.08
	Hydrogen	11.69	11.74	11.66	11.70	0.037	0.32

3.2 온실가스 채취 및 분석방법

3.2.1 온실가스 채취방법

실측에 의해서 이산화탄소의 배출계수를 산정하기 위해서는 배출가스의 유량, 온도, 가스시료의 분석 등 현장조사에서 조사하고 가스시료를 채취하여야 한다. 온실가스의 시료채취 시 배출가스 온도, 대기 온도, 유속, 압력 등은 우리나라 공정시험법에 준하거나 이와 동등한 방법으로 측정하였다(US EPA, 2000; 환경부, 2004; Wight G. D., 1994).

온실가스 배출시설의 배출가스 온도는 일반적으로 약 100 ℃이상의 고온으로 배출되어지므로, 시료채취관 혹은 시료채취용 배관 등은 고온 및 유속에 견딜 수 있는 재질이어야 한다. 또한 온실가스 시료에 수분이 포함되지 않도록 배출가스 포집장치 앞에 실리카겔을 담은 흡습병을 설치하고 시료를 채취하였다(Fig 4).

본 연구에서는 고온과 높은 배출가스 유속에도 견딜 수 있는 스테인레스 스틸의 재질인 시료채취관을 사용하였다. 시료채취관은 우리나라 공정시험법(내경 7 mm)에 준하여 제작하였으며, 길이는 기본적으로 2.5 m의 크기로 제작하였으나, 굴뚝 내벽이 두껍거나 내경이 큰 경우에는 2개의 채취관을 연결하여 사용할 수 있도록 하였다. 또한, 채취관 및 도관의 부식이나 수분응축으로 인한 여과재의 막힘을 방지하기 위해 채취관 전체를 전기 가열방식으로 약 120 ℃까지 가열하여 시료를 채취하였다.

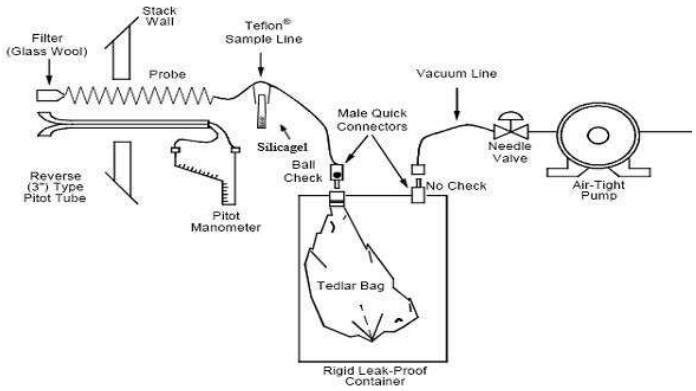

Figure 4. Diagram of greenhouse gas sampling system using lung sampler

3.2.2 온실가스 분석방법

온실가스의 분석방법은 비분산형 적외선 분석기(NDIR: Non-Dispersive Infra Red) 또는 가스크로마토그래피(GC: Gas Chromatography) 방법 등이 이용되고 있다. 본 연구에서는 NDIR 분석기를 사용하여 현장에서 농도를 측정하였고, 채취한 시료는 실험실에서 GC를 이용하여 분석하였다.

가. 현장 분석장비를 이용한 측정

NDIR방식의 현장 분석장비인 Hand-held carbon dioxide meter GM70 모델과 GMP 221 probe를 이용하여 현장에서 CO_2의 농도를 측정하였다.

나. GC를 이용한 분석

온실가스의 분석에 대표적으로 이용되고 있는 GC방식의 검출기에는 불꽃이온화검출기(Flame Ionization Detector; FID)와 전자포획검출기

(Electron Capture Detector; ECD)가 있다. 이산화탄소 및 메탄의 분석에는 불꽃이온화검출기를 사용하며, 아산화질소의 분석에는 전자포획검출기를 사용한다.

본 연구에서 주 분석대상인 이산화탄소는 그 자체로는 GC/FID에서 좋은 감도를 기대하기 어렵다. 따라서 Methanizer등과 연계하여 이산화탄소를 메탄으로 환원시켜 주는 방식으로 ppm_v 수준에서 정량적으로 분석하는 방법들이 1960년대 이후 널리 도입되고 있다(김경렬, 1999). 본 연구에서는 GC/FID와 Methanizer방법을 결합하는 방식으로 분석하였다. Methanizer는 고온조건에서 Nickel 촉매를 이용하여 수소와 반응시켜 이산화탄소를 메탄으로 환원시켜주는 기능을 한다. 특히 온도가 350 ℃ 이상에서는 환원율이 100 %로 정량적인 경향을 보인다(김경렬, 1999). 분석대상 시료 성분의 분리를 위해 Porapak-Q칼럼(1.8 m 길이의 Stainless steel, 3.175 mm 외경, Restek사 제작)을 사용하였다. 오븐온도를 80 ℃로 유지하고, 운반기체의 유량을 30 ml/min의 조건을 유지하면서, 이산화탄소를 분리, 분석하였다. 자세한 분석조건은 Table 4에 제시하였다.

Table 4. Analysis conditions of GC-FID for CO_2

Objective gas		CO_2
Column		Porapack Q 80/100
Detector		FID (DS-6200, Donam INC)
Carrier gas		N_2 (99.999%)
Flow rate (mL/min)	Carrier(N_2)	30
	H_2	30
	Air	300
Temperature conditions (℃)	Oven	80
	Injector	100
	Methanizer	350
	Detector	250

3.2.3 온실가스 분석의 정도관리

가. 재현성 및 검출한계

온실가스 분석의 정도관리를 위하여 본 연구의 주요 분석 대상인 이산화탄소의 재현성 및 검출한계를 비교하였다. Table 5를 살펴보면, 이산화탄소의 원시료(Primary Standard: PS)를 각각 5배씩 희석한 작업용 표준시료(Working Standard: WS)를 이용하여 실험을 진행하였다. WS 500 ㎕를 GC에 주입할 경우, 주입되는 총량은 3.68 μmol에 해당한다. 이렇게 동일한 WS를 각 3회씩 반복 분석하는 방식으로 재현성을 평가하였다. 또한, 검출한계(MDL)를 추정하기 위해, 최소농도의 표준시료를 7회 반복 분석한 농도의 표준편차에 3을 곱한 값으로 계산하였다(최여진 등, 2005). 그 결과 0.61 μg 수준에서 검출한계 값이 결정되었다. 재현성 실험의 경우, 3

회 반복 분석하여 RSE값을 이용하여 정밀도를 산출한 결과를 Table 5에 제시하였다.

Table 5. Reproducibility tests and Method Detection Limit(MDL)

(1) CO_2 and CH_4 working standard

Classification	CO_2 Concentration	
	%	mmol[1)]
Primary standard	90	18.40
Working standard[3)]	18	3.68

1) Total analysis amount in CO_2

2) Primary standard and N_2(99.999 %) mixing(CO_2 : 5 times dilution)

(2) Results of reproducibility test

Injection volume1)		Result of reproducibility test			Statistical data		
		1	2	3	Mean	SE	RSE(%)
CO_2	3.68 mmol	4.02	3.89	3.85	3.92	0.0506	2.02

1) Result of reproducibility test is 500 ㎕ injection volume working standard using GC-FID by step 1

(3) MDL

Classification		1	2	3	4	5	6	7	Mean	SD	MDL	
											ng	ppm
CO_2	Peak Area	6,730	7,760	6,510	6,070	6,400	6,180	8,160	-	-	-	
	Mass(ng)	1.70	1.96	1.65	1.53	1.62	1.56	2.06	1.73	0.20	0.61	5.70

나. 시료 유실율 실험

백샘플링 방식의 시료채취와 관련한 오차의 특성을 규명하기 위하여, 10 L 용량의 동일한 테들러 백(SKC corp., US)을 이용하여 백과 백간에 시료를 이송하였다. 이러한 실험은 이들 성분의 현장농도 수준대(이산화탄소 = %)에서 백간에 단순히 시료를 이동한 데 따른 유실율을 평가하는 방식으로 진행하였다. 이를 위하여, 90 % 농도의 이산화탄소 원시료(Rigas corp., Korea) Cylinder에서 10L 테들러 백으로 원시료를 이송하였다. 그리고 이 원시료를 가스밀폐주사기(500 ㎕, Hamilton사 제작)내부에서 적정수준으로 희석한 후 GC에 주입하는 방식으로 가장 기본이 되는 주검량선을 확보하였다. 실제 원시료 (50 ㎕)와 질소 (450 ㎕)를 혼합한 최초 주입점에서 이산화탄소의 총량은 1.84 mmol에 해당한다(주입 부피량 500 ㎕). 이 점 외에 5개 농도를 추가하여서 검량선을 완성하였다. 원시료의 희석을 위해 질소(99.999 %)를 사용하였다. 검량선의 농도범위는 Table 6에 제시한 바와 같이, 최소 9 %에서 최고 18 %의 농도대에서 조사하였다. 실제 테들러 백으로 시료를 채취하거나 보관하는데 따른 문제점을 확인하기 위해 10 L 용량의 테들러 백(TB)에 담긴 원시료를 다음과 같이 작은 크기의 테들러 백으로 연속하여 옮겨주었다. 편의상 10 L 백을 TB1, 5 L 백을 TB2, 1 L 백을 TB3으로 명명하였다. 그리고 TB1→ TB2→ TB3로 각각의 시료를 이송시킨후, 3개의 테들러 백으로부터 확보하는 검량선들 간의 감도변화율을 기준으로 시료의 유실율을 평가하고자 하였다.

Table 6. Summary of dilution tactics for preparing CO_2 working standards

	CO_2 primary standard[1)] (㎕)	N_2 mixing volume (㎕)	CO_2 working standard concentration (%)	CO_2 working standard amount[2)] (umol)	Peak area Statistical data (Mean±SD, Min~Max)		
					TB1	TB2	TB3
CO_2 Working Standard	50	450	9.00	1.84	219,550±800 (218,690～220,280)	218,400±480 (217,980～218,921)	216,450±460 (216,070～216,960)
	60	440	10.80	2.21	260,370±2,370 (257,680～262,180)	254,340±2,520 (252,190～257,120)	268,680±458 (268,190～269,100)
	70	430	12.60	2.58	326,700±740 (325,870～327,300)	312,370±14,270 (295,960～321860)	324,250±5150 (320,820～330,1710)
	80	420	14.40	2.95	383,720±650 (382,980～384,190)	375,700±3,710 (371,840～379,250)	366,650±6,080 (359,710～371,060)
	90	410	16.20	3.31	427,160±6,330 (420,080～432,280)	420,360±650 (419,850～421,090)	409,010±8,660 (402,170～418,750)
	100	400	18.00	3.68	487,540±4,100 (482,975～490,890)	461,450±1,640 (459,970～463,210)	447,720±5,290 (441,720～451,730)

1) 90% concentration using CO_2 primary standard gas

2) 500㎕ injection volume of CO_2 total amount

앞에서 언급한 것과 같이 2단계로 테들러 백들 간에 시료를 이송시킨 후, 이러한 이송에 따른 시료의 유실율을 평가할 수 있는 검량선들의 경향성을 평가하였다. Fig. 5에 제시된 검량선에서 이산화탄소의 검량기울기는 모두 강제적으로 좌표축의 0점을 통과시킨 것이다. 그러나 대부분의 회귀곡선에서 상관계수가 0.9이상으로 검량 결과는 양호한 편으로 나타났다.

Fig. 5에 제시한 이산화탄소의 검량선들을 비교하면, 다음과 같은 경향성을 볼 수 있다. 최초에 원시료를 받은 TB1을 기준으로 TB2와 TB3의 기울기를 비교한 결과는 다음과 같다. 가장 먼저 TB2의 기울기와 비교한 결과, 약 97 %의 회수율을 보였다. 그리고 TB3의 기울기와 비교하면 96 %의 회수율이 나타났다. 결론적으로 이산화탄소의 경우, 테들러 백으로 측정 및 분석 시 테들러 백에 의한 유실율이 약 2 % 정도 발생할 수 있음을 알 수 있다.

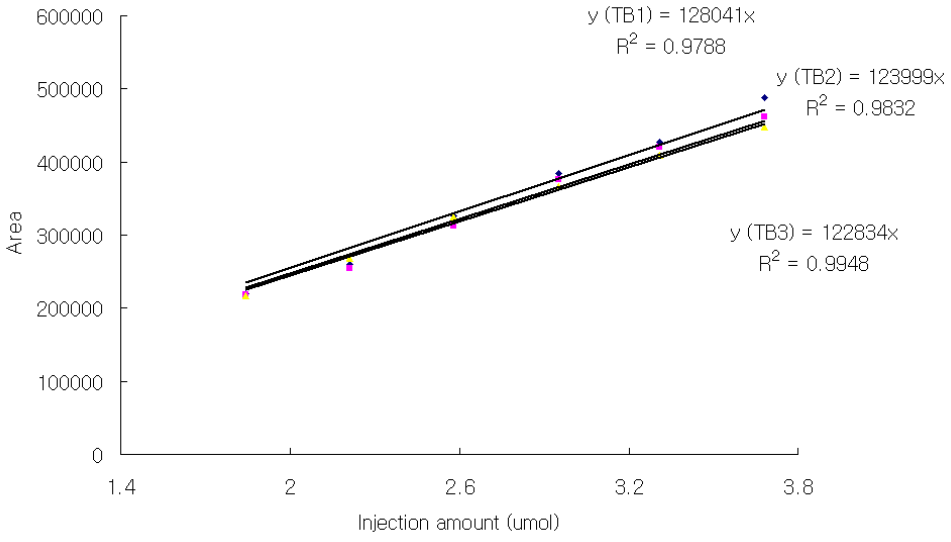

Figure 5. Sensitivity analysis using calibration curves

3.2.4 현장 분석장비의 정도관리

현장 분석장비의 정도관리를 위하여 동일한 표준시료를 제조하여 GC와 비교하는 방법으로 정도관리를 실시하였다. 동일한 이산화탄소 표준시료를 약 10 % 및 15 %로 제조하여 GC 및 현장 분석장비로 분석을 하였으며, 미지시료를 제조하여 분석 값을 살펴보았다. 그 결과 Table 7에서 보는 바와 같이 RSE값이 0.20 ~ 1.29 %로 낮은 오차율을 나타냈으며 GC와 유사하게 분석되었음을 알 수 있었다.

Table 7. Comparison of the results of GC with the results of portable analyzer

Test ID	Concentration (%)		Statistical data		
	Portable analyzer	GC-FID	SD	SE	RSE(%)
Test 1	9.70	10.00	0.21	0.12	1.23
Test 2	9.75	10.00	0.17	0.10	1.02
Test 3	15.01	14.95	0.04	0.03	0.17
Test 4	15.02	14.95	0.05	0.03	0.20
Test 5	10.13	10.39	0.18	0.13	1.29

3.3 배출계수 산정 방법

3.3.1 IPCC 방법

가. 연료연소 과정의 배출계수

연료연소 과정에서 배출되는 이산화탄소의 배출계수는 IPCC에서 제시한 연료분석 결과와 Worksheet를 이용한 산정방법(Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenghouse Gas Inventories : Workbook)을 이용하여 산정하였다.

Worksheet는 Table 8에서 보는 바와 같으며, 1단계에서는 연료의 함량을 분석한 원소분석 결과 및 수분함량을 적용하고 건식상태의 연료분석 결과를 인수식 상태로 전환하여 준다. 2단계에서는 연료의 발열량분석 결과를 인수식 저위발열량으로 계산하여 각 연료의 탄소 배출계수 및 이산화탄소 배출계수를 산정한다.

Table 8. Calculation worksheets for emission factors of fuel analyses

Step 1						
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×((100-②)÷100)					

Step 2				
Item	Gross Calorific Value (as received basis)	Net heating value (as received basis)	Carbon Emission Factor	CO_2 Emission Factor
Sub-item	B	C	D	E
Unit	(kcal/Kg)	TJ/ton	ton C/TJ	ton CO_2/TJ
Calculation		([B-{6×(9×④+③)}]×4.18)×10^{-6}	(A÷100)÷C	D×44÷12

나. 생산공정에서의 배출계수

생산공정에서의 이산화탄소는 석회석을 가열하여 화학적으로 분해하는 과정인 하소과정에서 주로 배출된다. 클링커 생산과정에서는 하소과정 외에 시멘트 킬른먼지 혹은 완전히 소성된 부산먼지와 같은 폐원료에서 이산화탄소가 발생한다. 그러나 본 연구 대상시설에서는 시멘트 킬른먼지 혹은 부산먼지를 킬른에 재투입하여 100 % 재활용하고 있으므로, 킬른먼지 및 부산먼지로부터의 온실가스 배출량은 없는 것으로 하였다.

하소과정의 이산화탄소 배출계수는 클링커의 석회분율과 단위 석회당 배출되는 이산화탄소의 질량을 반영한 계수의 곱으로서 식 (2)와 같이 산정할 수 있다.

$$EF_{clinker} = Fraction\,CaO \times \frac{44.01\,g/mole\,CO_2}{56.08\,g/mole\,CaO} \qquad (2)$$

3.3.2 CO_2 실측방법

굴뚝의 배기가스 시료를 채취하여 CO_2의 농도를 분석하고, 이를 이용하여 배출계수를 산정하는 과정은 Table 9와 같다. 1단계는 현장조사에서 채취한 시료의 CO_2 배출농도를 부피농도에서 질량농도로 전환하고 측정당시의 배기가스의 유량을 입력하는 단계이다. 2단계에서는 앞에서 구한 유량 및 농도를 적용하여 이산화탄소의 배출량을 산정하고, 각 사업장의 클링커 생산량을 활동도로 하여 이산화탄소 배출계수를 산정하게 된다. 이렇게 산정한 이산화탄소 배출계수는 연료연소부문과 공정부문의 배출계수를 모두 포함한 계수이다.

Table 9. Calculation worksheets for emission factors by flue gas analysis

Step 1			
Item	Volume Concentration	Mass Concentration	Flow Rate
Sub-Item	A	B	C
Unit	%	mg/Sm^3	Sm^3/hr
Calculation		$A \times 10^4 \times (44 \div 22.4)$	

Step 2			
Item	Total CO_2 Emission	Clinker production	CO_2 Emission factor
Sub-Item	D	E	F
Unit	ton CO_2/year	ton Clinker/year	ton CO_2/ton Clinker
Calculation	$B \times C \times 24 \times 365 \div 10^9$		$D \times E$

3.3.3 TMS 방법

US EPA Method 3B와 Method 19에 의하면, 연료의 계수 및 산소의 농도를 이용하여 배기가스 중의 이산화탄소 농도를 계산할 수 있다. 이 방법은 주로 연속측정방법(Continuour Emission Monitoring, CEM)에 적용되는 것으로, CEM은 미국의 대기오염물질 배출감시시스템으로 우리나라의 TMS(Tele-monitoring System)와 거의 같다.

'TMS 방법'은 식 (3)에서 보는 바와 같은 연료종류별 단위열량당 연소가스량(Fd)과 식 (4)와 같은 단위열량당 이산화탄소 배출량(Fc), 그리고 배기가스 중의 산소 농도를 이용하여 연소 과정중 이산화탄소 배출량을 산정하는 방법이다.

$$F_d = \frac{K(K_{hd}\%H + K_c\%C + K_s\%S + K_n\%N - K_o\%O)}{GCV} \qquad (3)$$

$$F_c = \frac{K(K_{cc}\%C)}{GCV} \qquad (4)$$

F_d = A factor representing a ratio of the volume of dry flue gases generated to the caloric value of the fuel combusted, dscf/mmBtu

F_c = A factor representing a ratio of the volume of CO_2 generated to the caloric value of the fuel combusted, scf CO_2/mm Btu

K = Conversion factor, 10^{-5}(KJ/J)

GCV = Gross calorific value of the fuel consistent with the minute analysis, kJ/Kg(Btu/lb)

K_c = (9.57 scm/Kg) %

K_{cc} = (2.0 scm/Kg) %

K_{hd} = (22.7 scm/Kg) %

Ks = (3.54 scm/Kg) %

Kn = (0.86 scm/Kg) %

Ko = (2.85 scm/Kg) %

%H = Concentration of Hydrogen from an ultimate analysis of fuel, weight percent

%C = Concentration of Carbon from an ultimate analysis of fuel, weight percent

%S = Concentration of Sulfur an ultimate analysis of fuel, weight percent

%N = Concentration of nitrogen from an ultimate analysis of fuel, weight percent

%O = Concentration of Oxygen an ultimate analysis of fuel, weight percent

연료종류별 단위열량당 연소가스량(Fd)과 단위열량당 이산화탄소의 건식 가스량(Fc)에 대하여 미국 EPA에서 제시한 값은 Table 10과 같다.

Table 10. F Factors for various fuels

Fuel Type[1)]	Fd dscf/MMBtu	Fc scf/MMBtu
Anthracite	10,100	1,970
Bituminous	9,780	1,800
Lignite	9,860	1,910
Oil[2)]	9,190	1,420
Natural Gas	8,710	1,040
Propane	8,710	1,190
Butane	8,710	1,250
Wood	9,240	1,830
Wood Bark	9,600	1,920
Municipal	9,570	1,820

1) As classified according to ASTM D 388.

2) Crude, residual, or distillate.

* EPA CFR Promulgated Test Methods 19, p 1144

F Factor를 이용한 연료계수(Fo)는 식 (5) 와 같으며 가스조성으로 구하는 방법은 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_o = \frac{0.209 F_d}{F_c} \qquad (5)$$

$$F_o = \frac{20.9 - \%O_2}{\%CO_2} \qquad (6)$$

여기서, % O_2 = Percent O_2 by volume, dry basis.

% CO_2 = Percent CO_2 by volume, dry basis.

20.9 = Percent O_2 by volume in ambient air.

식 (5)와 식 (6)을 이용하여, 배기가스 중의 CO_2 농도를 산정할 수 있는 식 (7)을 유도할 수 있다.

$$\%CO_2 = \frac{\frac{F_c}{F_d} \times (20.9 - \%O_2)}{0.209} \qquad (7)$$

식 (7)을 이용하여 TMS에서 측정한 O_2 농도로부터 CO_2의 농도를 산정할 수 있다.

제 4장 결과 및 고찰

4.1 IPCC지침을 이용한 배출계수 산정

IPCC에서는 온실가스 배출량을 연료소비와 생산 공정으로 구분하여 산정하고 있다. 연료소비에 의한 이산화탄소 배출량은 연료분석 결과를 이용하여 산정하며, 생산 공정에서의 이산화탄소 배출량은 물질수지를 이용하여 배출량을 산정한다.

4.1.1 연료연소 과정의 배출계수 산정

연료연소 과정의 이산화탄소 배출계수는 연료분석 결과를 이용하여 산정한다. 대상 사업장에서 사용하는 연료의 원소분석 및 열량분석 결과는 Table 11에서 보는 바와 같다. 열량분석 결과, 가장 많이 사용하는 유연탄의 경우, 건식 순발열량 기준으로 5,810 kcal/Kg(A 사업장)과 5,630 kcal/Kg(B 사업장)의 발열량을 보였다. 그 밖의 화석연료로는 B-C Oil이 9,700 kcal/Kg으로 가장 높은 값을 나타냈으며, 무연탄이 4,760 kcal/Kg으로 가장 낮은 값을 나타냈다. 대체연료는 폐타이어가 7,000 kcal/Kg으로 가장 높은 값을 나타냈고, Waste Oil이 4,230 kcal/Kg으로 가장 낮은 값을 나타냈으며, RDF의 발열량은 6,770 kcal/Kg으로 분석되었다.

Table 11. Heating value and carbon content of fuels in cement industry

Site	Fuel type	Net heating value kcal/Kg	Carbon content %
A	Bituminous coal	5,810	62.26
	B-C Oil	9,700	82.77
	RDF	6,770	55.40
	Waste Oil	4,230	70.00
B	Bituminous coal	5,630	59.40
	Anthracite	4,760	58.02
	Pet coke	8,090	78.13
	Waste tire	7,000	80.00

연료분석 결과를 이용하여 연료별 온실가스 배출계수를 산정한 결과는 Table 12에서 보는 바와 같다. 가장 많이 사용하는 유연탄의 배출계수는 96.5 ton CO_2/TJ 으로 나타났고, 무연탄은 109.4 ton CO_2/TJ, B-C Oil은 80.2 ton CO_2/TJ, Pet coke는 86.4 ton CO_2/TJ이였다. 대체연료 중 폐타이어는 90.4 ton CO_2/TJ, RDF는 91.0 ton CO_2/TJ, Waste Oil은 77.0 ton CO_2/TJ로 나타났다.

Table 12. Emission factors from results of fuel analysis

Site	Fuel type	Emission factor		CO_2 Emissions
		ton C/TJ	ton CO_2/TJ	ton CO_2/yr
A	Bituminous coal	26.2	96.0	1,252,481
	B-C Oil	21.9	80.2	14,241
	RDF	24.8	91.0	161,551
	Waste Oil	21.0	77.0	34,538
B	Bituminous coal	26.5	97.1	797,488
	Anthracite	29.8	109.4	40,737
	Pet coke	23.6	86.4	249
	Waste tire	24.7	90.4	106,619

산정된 탄소 배출계수를 선행연구와 비교하여 살펴보면, 유연탄의 경우 IPCC에서 제시한 25.8 ton C/TJ(Default Value)과 유사하게 산정되었으며, B-C Oil의 경우는 IPCC 기본값보다 8 % 높게 산정되었다.

무연탄 배출계수의 경우 IPCC에서 제시한 값보다 10 % 높은 29.8 ton C/TJ로 분석되었는데, 이것은 국내 무연탄의 발열량이 수입 무연탄보다 30 % 낮은 수준에 기인한 것으로 추정된다.

이산화탄소 배출계수를 선행연구와 비교하면, 폐타이어의 경우 WRI/WBCSD에서 제시한 85 ton CO_2/TJ과 비교하여 6 % 큰 값을 나타냈으며, Waste Oil은 4 % 큰 값을 나타냄을 알 수 있었다.

각 연료별 이산화탄소의 배출량을 산정한 결과, A 사업장의 경우 유연탄에 의한 이산화탄소 배출량이 1,252,481 ton/yr로서 가장 많은 량을 나타내었고, RDF 161,551 ton/yr, Waste Oil 34,538 ton/yr, B-C Oil 14,241 ton/yr의 순서로 나타났다. B 사업장의 경우에도 유연탄의 배출량이 797,488 ton/yr로 가장 큰 배출량을 나타내었으며, 폐타이어, 무연탄, pet coke의 순서로 나타났다.

4.1.2 공정부문의 배출계수 산정

공정부문의 배출계수는 물질수지법을 이용하여 산정하였으며, 그 결과는 Table 13과 같다. 공정부문에서 생산된 클링커의 평균 CaO 분율은 각 사의 2005년 평균자료를 사용하였다.

공정부문의 이산화탄소 배출계수는 A 사업장의 경우 501 Kg CO_2/ton clinker, B 사업장의 경우 490 Kg CO_2/ton clinker로서, IPCC에서 제시하는 510 Kg CO_2/ton clinker와 다소 차이가 나타났다. 이것은 대상 사업장의 클링커 CaO 함량이 62.41~63.91 %로서 IPCC에서 적용한 클링커 CaO 평균함량 64.6 %와 1~3 %의 차이를 보이기 때문이다.

물질수지법에 의한 배출계수는 평균값을 기준으로 2 % ~ 4 %의 표준편차를 보였다.

Table 13. Emission factors from industrial process

Site	CaO fraction %	Mole fraction of CO_2 per CaO	CO_2 Emission factor Kg CO_2/ton clinker	Clinker production ton/yr	CO_2 Emission ton CO_2/yr
A-1	63.79	0.785	501	699,570	350,210
A-2	63.91	0.785	502	682,930	342,520
B-1	62.46	0.785	490	1,035,870	507,750
B-2	62.41	0.785	490	1,265,720	619,920

4.2 CO_2 실측방법을 이용한 배출계수 산정

현장조사에서 채취한 배기가스 시료를 분석하여 배출계수를 산정한 결과는 Table 14에서 보는 것과 같다. 배출구에서 채취한 시료는 공정 및 연소 과정에서 배출되는 가스를 모두 포집한 시료이므로, 연료연소와 생산공정에서의 이산화탄소 배출을 모두 고려한 배출계수라 할 수 있다.

각 사업장별로 이산화탄소의 농도는 17 ~ 20 %로 검출되었으며, 각 사업장의 클링커 생산량을 활동도로 하여 배출계수를 산정하였다. 산정결과 배출계수는 662 ~ 1,058 Kg CO_2/ton clinker 로 산정되었으며, 평균값인 852 Kg CO_2/ton clinker를 기준으로 - 23 %~ 20 %의 차이가 나타남을 알 수 있었다.

Table 14. CO_2 emission factor by stack sample analyses using GC-FID

Site	CO_2 Concentration %	Flow rate m^3/hr	Clinker production ton/yr	CO_2 Emission factor Kg CO_2/ton clinker
A-1	18.82	228,700	699,570	1,058
A-2	17.59	149,500	682,930	662
B-1	19.69	220,630	1,035,870	722
B-2	20.94	339,120	1,265,720	965

4.3 TMS 방법을 이용한 배출계수 산정

TMS의 산소농도를 사용하여 배출계수를 산정한 결과는 Table 16과 같다. EPA Method 3B와 19에서 제공하는 F-factor값은 대체연료에 대한 정보를 제공하지 않으므로 실제 시멘트공정에서 가장 많이 사용하는 유연탄의 F factor 값을 사용하여 배출농도를 산출하였다. TMS의 산소농도는 현장에서 시료를 채취한 시점의 농도들의 평균값을 사용하였다.

'TMS 방법'에 의한 이산화탄소 배출계수는 Table 15에서 보는 바와 같이 288~545 Kg CO_2/ton clinker로 나타났으며, 배출계수 평균값은 439 Kg CO_2/ton clinker였다.

'TMS 방법'에 의한 배출계수는 평균값을 기준으로 - 7 %~44 %의 큰 차이를 나타냈다.

Table 15. CO_2 emission factors using O_2 concentration of TMS

Site	O_2 Concentration	CO_2 Concentration	Flow rate	Clinker production	CO_2 Emission factor
	%	%	m^3/hr	ton/yr	Kg CO_2/ton clinker
A-1	9.90	9.69	228,700	699,570	545
A-2	12.26	7.61	149,500	682,930	288
B-1	8.53	10.89	220,630	1,035,870	399
B-2	8.03	11.33	339,120	1,265,720	522

4.4 배출계수 비교

4.4.1 연료별 배출계수 비교

본 연구에서 산정한 연료별 배출계수를 화석연료의 경우 IPCC 기본값과 비교하였고, 대체연료는 WRI/WBCSD의 기본값과 비교하였다(Fig. 6).

유연탄의 경우 IPCC 배출계수와 유사한 값을 나타냈으나, 무연탄의 경우 약 10 %의 차이를 보였다. 이것은 앞서 설명한 바와 같이 국내 무연탄과 수입 무연탄의 발열량 차이에 주로 기인하는 것으로 분석된다.

대체연료의 배출계수는 모두 WRI/WBCSD 기본값보다 크게 나타났다. 이것은 폐기물의 특성상 국가별 조성 차이와 시료의 보관방법에 따른 열량 차이가 있기 때문인 것으로 추정된다.

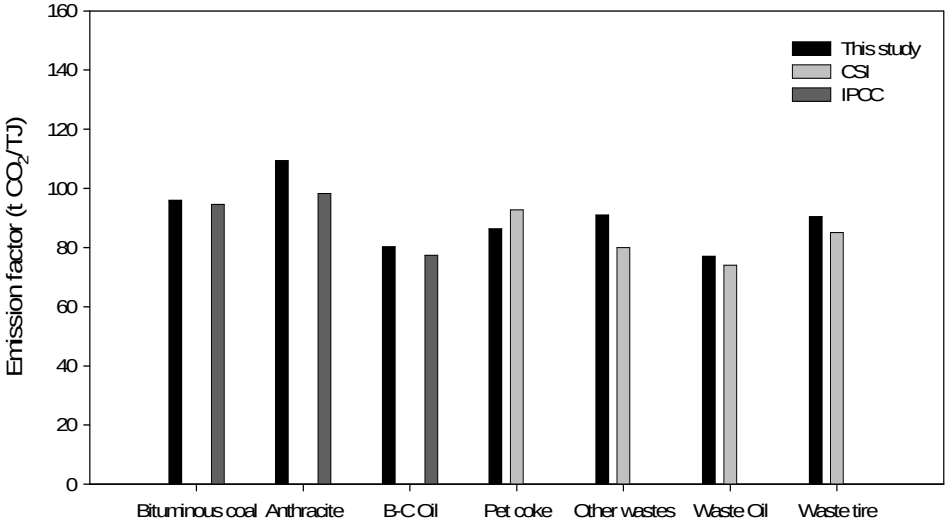

Figure 6. Comparison of emission factors of different fuel types

또한 Table 16에 대체연료를 혼합하여 사용하는 A 사업장과 B 사업장의 배출계수를 WRI/WBCSD에서 제시하는 '화석연료와 폐기물'의 혼합 배출계수와 비교하였다. 그 결과, A 사업장의 경우 약 3 %의 차이를 나타냈으나, B 사업장은 동일하게 산정되었다. 따라서 각 사업장별 특성이 반영된 배출계수를 산정하게 되면 보다 정확한 온실가스 배출량을 산정할 수 있다는 것을 알 수 있다.

Table 16. Comparison of emission factors of actually used fuels at these companies with WRI/WBCSD emission factor

Fuel type	A company	B company	WRI/WBCSD
	ton CO_2/TJ	ton CO_2/TJ	ton CO_2/TJ
Fossil fuel + Alternative fuel	94	96	96

4.4.2 연료연소에 의한 배출계수 비교

연료연소 과정에서 배출되는 이산화탄소의 배출계수를 연료분석 방법과 CO_2 실측에 의한 방법으로 산정하고 비교하였다(Fig. 7).

연료분석 방법에 의한 이산화탄소 배출계수를 CO_2 실측에 의한 배출계수와 비교하기 위해서는, 실측에 의한 배출량에서 생산공정에서의 배출량을 제외해 주어야 한다. 따라서 'CO_2 실측방법'에 의한 배출계수에서 클링커의 CaO 함량을 이용하여 산정한 배출계수 값을 제외하여 연료연소에 의한 배출계수를 산정하였다.

'CO_2 실측방법'에 의한 배출계수 124 ton CO_2/TJ로서 연료분석 방법에 의한 배출계수는 95 ton CO_2/TJ보다 약 30 % 크게 산정되었다. 또, 연료분석 방법의 배출계수 표준편차는 1.1로 비교적 낮게 나타났으나, CO_2 실측방법에 의한 배출계수 표준편차는 9.6으로 연료분석 방법에 비해 높은 표준편차값을 나타내었다.

연료분석 방법의 경우 WRI/WBCSD가 제시한 혼합연료 기본값과 비교하면 약 1 % 낮게 산정되었으나, 'CO_2 실측방법'의 경우 WRI/WBCSD의 값보다 23 % 높게 산정되었다.

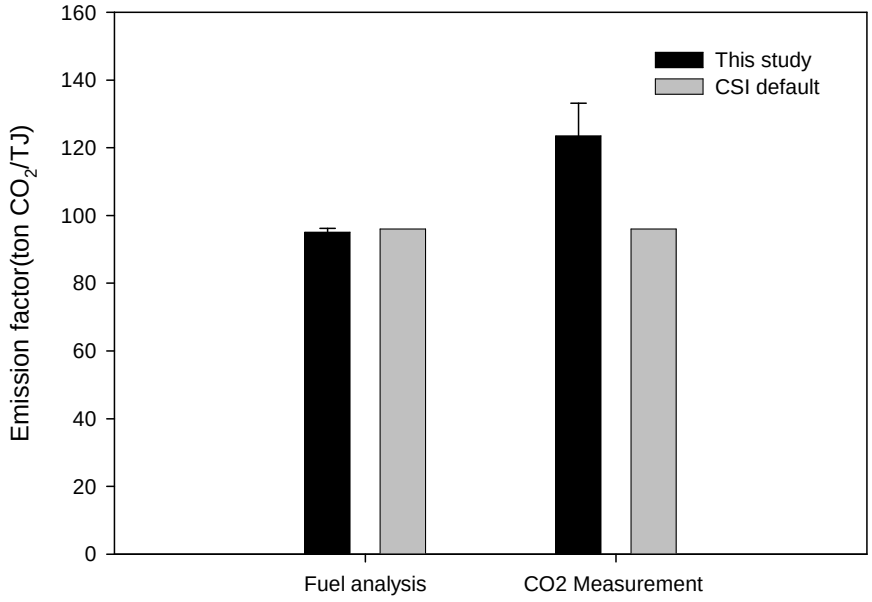

Figure 7. Comparison of emission factors by fuel analysis and CO_2 measurement

4.4.3 배출계수 산정방법에 따른 비교

먼저, 클링커 1 ton 생산에 필요한 열량과 클링커 1 ton 생산 시 발생하는 이산화탄소 량을 고려하여 '연료분석 및 물질수지 방법'에 의한 이산화탄소 배출계수를 구하였는데, 그 값은 771 Kg CO_2/ton clinker였다.

이 값을 'CO_2 실측방법'에 의한 배출계수는 852 Kg CO_2/ton clinker 및 'TMS 방법'에 의한 배출계수 438 Kg CO_2/ton clinker와 비교하고, Fig. 8에 나타내었다. Fig. 8에서 보는 바와 같이 '연료분석 및 물질수지 방법'의 배출계수와 비교하여, 'CO_2 실측방법'의 경우에는 약 11 % 크게 나타났으며, 'TMS 방법'의 경우에는 43 % 작은 값을 나타냈다.

또, 각 방법별 상대표준편차를 살펴보면 '연료분석 및 물질수지 방법'의

경우 1.8 %로 가장 낮은 차이를 보였으며, ‘CO_2 실측방법’의 상대표준편차는 22.3 %, ‘TMS 방법’의 표준편차는 27.3 %로서, ‘TMS 방법’의 상대표준편차가 가장 컸다.

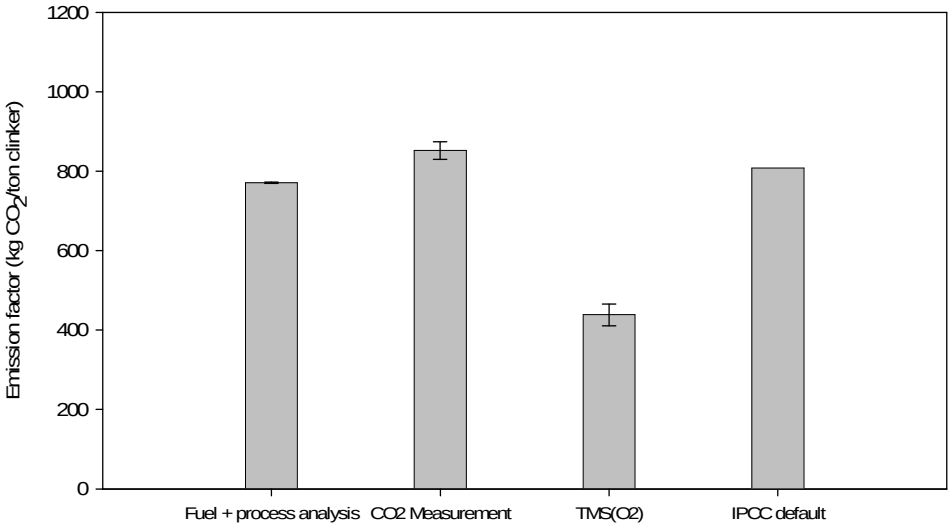

Figure 8. Comparison of emission factors by each method and IPCC

4.5 방법별 배출량 평가

산정된 배출계수에 각 사업장의 2004년도 클링커 생산량을 적용하여 배출량을 산정하였다(Fig. 9).

산정 결과, A 사업장의 경우 ‘연료분석 및 물질수지 방법’에 의한 배출량은 5,270,650 ton/yr, ‘CO_2 실측방법’에 의한 배출량은 5,715,670 ton/yr, 그리고 ‘TMS 방법’에 의한 배출량은 2,761,910 ton/yr로 산정되었다. B 사업장의 경우는 각각 4,056,320 ton/yr(‘연료분석 및 물질수지 방법’), 4,389,810

ton/yr(‘CO_2 실측방법’), 2,397,730 ton/yr(‘TMS 방법’)으로 산정되었다.

A, B 사업장의 경우 ′CO_2 실측방법′에 의한 배출량을 ‘연료분석 및 물질수지 방법’에 의한 배출량과 비교하면 약 7 % 크게 나타났다. 이것은 ‘CO_2 실측방법’에서 조사한 배출가스의 유량의 불확실성에 기인하는 것으로 추정된다. ‘TMS 방법’에 의한 배출량은 ‘연료분석 및 물질수지 방법’과 비교하여 약 45 % 낮게 산정되었는데, 이것은 시멘트산업의 경우 생산공정에서 다량의 이산화탄소가 배출되기 때문이다. 따라서 ‘TMS 방법’은 시멘트산업의 배출계수 개발 및 배출량 산정에 적용하기 곤란한 방법으로 사료된다.

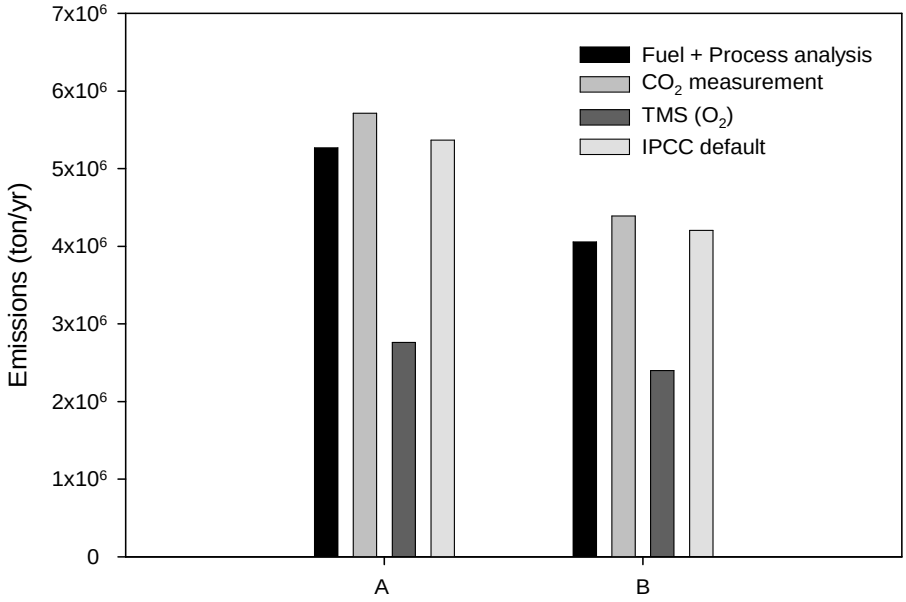

Figure 9. Comparison of emissions by each method

제 5장 결론

우리나라는 현재까지 온실가스 배출계수에 대한 연구가 일천하여 주로 IPCC 기본값에 의존하여 온실가스 배출량을 산정하고 있다. 따라서 본 연구에서는 시멘트산업의 배출계수 산정에 보다 적합한 방법을 찾기 위하여 여러가지 방법으로 우리나라 시멘트산업의 온실가스 배출계수를 산정하고 비교・평가하였다.

연료분석 결과를 이용하여 연료별 온실가스 배출계수를 산정한 결과 사용량이 가장 많은 유연탄은 96.5 ton CO_2/TJ로 나타났다. 그리고 무연탄은 109.4 ton CO_2/TJ로 화석연료중 가장 높은 배출계수로 산정되었으며, Pet coke, B-C Oil의 순으로 산정되었다. 대체연료의 경우 RDF가 91.0 ton CO_2/TJ로 가장 높게 산정되었으며, 폐타이어, Waste Oil로 산정되었다. 또한 공정부문의 온실가스 배출계수는 평균 496 Kg CO_2/ton clinker로 산정되었다.

각 방법별 배출계수를 살펴보면, '연료분석 및 물질수지 방법'에 의한 이산화탄소 배출계수는 770 Kg CO_2/ton clinker이었으며, CO_2 실측방법에 의한 배출계수는 이보다 11 % 큰 852 Kg CO_2/ton clinker, 'TMS 방법'에 의한 배출계수는 43 % 438 Kg CO_2/ton clinker로 산정되었다. 상대표준편차는 '연료분석 및 물질수지 방법'이 1.8 %로 가장 낮게 나타났으며, 'CO_2 실측방법'은 22.3 %, 'TMS 방법'은 27.3 %으로 나타났다.

'연료분석 및 물질수지 방법'에서 산정한 온실가스 배출계수는 상대표준편차도 낮게 나타났고 선행연구와 비교하여 가장 유사한 값을 나타냈다.

시멘트산업은 화석연료 이외에 많은 종류의 폐기물을 대체연료로 사용하고 있으므로, 각 사업장에서 사용하는 대체연료의 발열량분석 및 원소분석을 실시하여 배출계수를 산정하고, 클링커내의 평균 CaO 함량을 적용하

여 배출계수를 산정하는 것이 각 국가의 특성을 반영한 고유의 배출계수를 산정하는 방법이라고 생각된다.

'CO_2 실측방법'은 불확도의 요소가 온실가스의 농도 및 배출가스의 유량이다. 또한 배출되는 온실가스 농도가 매 시간별 다르게 나타나는 것을 확인할 수 있었고, 배출되는 유량도 불안정하게 조사 되었다. 국립환경과학원에서 고시한 환경측정기기의 형식승인 정도검사에는 약 80 %의 상대정확도를 가진 측정기기를 승인해 주고 있는 실정이다. 따라서 농도측정의 오차 및 유량의 불확실성을 해소하는 것이 선결과제라 판단된다.

'TMS 방법'을 이용하여 배출계수를 산정하는 것은 선행 연구 및 '연료분석 및 물질수지 방법'과 비교하여 큰 오차를 나타내는 것으로 분석되었다. 'TMS 방법'에 의한 배출계수 값이 다른 방법들에 비해 낮고 상대표준편차가 다른 방법보다 높게 나타나는 것은 CO_2 농도 측정 및 유량 측정의 불안정성과 함께 생산공정에서 다량의 이산화탄소가 배출되는 공정의 특성이 고려되지 않기 때문으로 추정된다. 따라서 시멘트산업에서 배출계수 및 배출량을 산정하는 방법으로는 적합하지 않은것으로 사료된다.

시멘트산업은 공정의 특성상 연소와 공정에서 다량의 이산화탄소가 배출되는 산업이다. 국내 시멘트 산업체들이 기후변화협약의 시급성을 저감하고 배출계수를 산정하는 방법들을 개발한다면 장차의 기후변화협상에서 유리한 위치를 차지할 수 있을 것으로 생각된다.

참고문헌

산업자원부 자원정책실(2006) 자원에너지 주요통계, 53~56

산업자원부(2006) 온실가스 국가배출계수 마련을 위한 기반연구

에너지관리공단(2005) 국내 석탄류 시료채취 및 분석실험

에너지관리공단(2005) 에너지부문 온실가스 배출 감축 잠재력 시범분석

에너지경제연구원(2004) 산업공정부문 온실가스 배출 전망

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

박필주, 이건모(2003) 전과정평가를 이용한 포틀랜드 시멘트 제조공정의 지구온난화에 미치는 영향평가, 대한환경공학회지, Vol. 25, No.6, 688~693.

전의찬, 사재환, 이성호, 정재학, 김기현, 배위섭(2006) 에너지사용시설의 온실가스 배출 특성 연구 -유연탄 화력발전소의 이산화탄소를 중심으로-, 한국대기환경학회지, Vol. 22, No.1, 107 ~ 116.

정재학, 임호수, 김기현, 배위섭, 전의찬(2006) 온실가스 기기분석의 정도관리를 위한 고려사항 연구 -CH_4과 CO_2를 중심으로-, 한국대기환경학회지, Vol. 22, No. 5, 712 ~ 718.

조균형, 최두성(2003) 건축산업의 에너지 및 환경부하 산출방법론에 관한 비교연구, 대한건축학회논문집, Vol. 19, No. 6, 155 ~ 162

최여진, 전의찬, 김기현(2005) 반월공단의 대기배출시설을 대상으로 한 악취성 황화합물의 측정과 배출특성에 대한 연구, 한국대기환경학회지, Vol.21, No.5, 515 - 524.

포스코(2003) 환경보고서, A Journey to the new world

한국산업규격(1997) 원유 및 석유제품-발열량 시험 방법 및 계산에 의한 추정 방법 KS M 2057

한국전력공사(1993) 주요 제품별 전력원단위 조사연구

한국표준협회(2001) 석탄류 및 코크스류의 발열량 측정 방법 KS E 3707

환경부(1993) 대기오염 배출 계수(I)

환경부(2004) 대기오염공정시험법

환경부(2002) 화학물질의 배출량조사 및 산정계수에 관한 규정

환경부(2006) 온실가스 배출량 산정지침 -석유화학, 시멘트, 제지펄프 업종-

KISTI(2002) 한국 시멘트산업의 당면 문제점에 대한 해결 방향

AGO (2001) Technical guidelines(Generator efficiency standards) version 1.2, Australian Greenhouse Office, 14-33

CCL (2003) ERC measurement and validation protocol- Whitecourt wood-waste burning power station whitecourt, Alberta, 10-12

Garcia, I., Zorraquino, J.V.M. (2002) Energy and environmental opimization in thermoeletrical generating processes- application of a carbon dioxide capture system, Energy 27, 607-623.

Hartikainen, T., Lehtonen, J., Mikkonen, R. (2004) Reduction of greenhouse-gas emissions by utilization of superconductivity in electric-power generation, Applied energy, 78, 151-158.

Hondo, H. (2005) Life cycle GHG emission analysis of power generation systems: Japanese case, Energy 30, 2042-2056.

IPCC (1996) Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories

IPCC (2001) Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories

Kartha, S., Lazarus, M., Bosi, M. (2004) Baseline recommendations for greenhouse gas mitigation projects in the electric power sector, Energy Policy, 32, 545-566.

Shin H.C., Park, J.W., Kim, H.S., Shin, E.S. (2005) Environmental and economic assessment of landfill gas electricity generation in Korea using LEAP model, Energy Policy, 33, 1261-1270.

US EPA(2000) Carbon dioxide emissions from the generation of electric power in the united states

US EPA (2000) CFR Promulgated Test Methods 1, 2, 3, 18

US EPA (2000) CFR Promulgated Test Methods 3B - Gas analysis for the determination of emission rate correction factor or excess air

US EPA (2000) Method 19 - SO_2 Removal & PM, SO_2, NOx Rates from Electric Utility Steam Generators

US EPA(2002) Greenhouse gas(GHG) verification guideline series-Natural gas-fired microturbine electrical generators, 2-31

US EPA(2004) Environmental Technology verification report, Swine waste electric power and heat porduction-martin machinery internal combustion engine, pp s-5

US EPA (Tuesday, May 18th, 2004) web site; http://www.epa.gov/ttn/emc/promgate.html

Wight G..D. (1994) Fundamentals of Air sampling, Lewis Publishers, 135-184

Wijayatunga, P.D.C., Fernando, W.J.L.S, Shestha, R.M. (2004) Impact of distributed and independent power generation on greenhouse gas emission: Sri Lanka, Energy Conversion and Management 45, 3193-3206.

WBCSD(2001) Calculating CO_2 process emissions from Cement Production(Cement-based Methodology)

WBCSD(2005) CO_2 Accounting and Reporting Standard for the Cement Industry

Abstract

Comparison of Emission Factor Estimation Methods for Greenhouse Gas
-Focusing on Cement Industry-

Jeong, Jae-Hak

Department of Earth & Environmental Sciences

The Graduate School of Sejong University

Cement manufacturers have a big impact on global warming because they produce great CO_2 emissions from clinker production and fuel combustion. In Korea, GHG emission is calculated mainly by default emission factors proposed by IPCC. Since these emission factors do not consider the specific characteristics of Korea, studies on more accurate estimation of GHG emission is necessary.

This study attempted to develop emission factors from each method in determining CO_2 emissions in Cement Manufactures. Then, it compared the mothods with other ones developed by other organizations and evaluated if this method could be applied in Korea to discover the suitable method for Korean situation. The other methods covered in this study are methods developed by IPCC and WRI/WBCSD.

It was found that the emission factors of various fuels in cement industry. Specifically, the bituminous coal emission factor of this study

was 96.5 ton CO_2/TJ, which is similar with the value of IPCC default value. In case of waste tire, the emission factor was 90.4 ton CO_2/TJ, which is 6 % higher the value of WRI/WBCSD.

The results of mass balance method for cement process was 496 Kg CO_2/ton clinker and the difference was about 3~6 %, compared with the default values of IPCC (510 Kg CO_2/ton clinker) and WRI/WBCSD (525 Kg CO_2/ton clinker). For the production of 1 ton-clinker, the emission factor of 'CO_2 measurement method' was 852 Kg CO_2/ton clinker, which is 7 % higher than that of 'fuel analysis and mass balance method'(770 Kg CO_2/ton clinker). On the other hand, the emission factor of 'TMS method' was 438 Kg CO_2/ton clinker, which is 45 % lower than that of 'Fuel analysis and mass balance method'. The relative standard deviation of 'CO_2 measurement method' was 22.3 and that of 'Fuel analysis and mass balance method' was the lowest, 1.8, and that of 'TMS method' was the highest variation, 27.3.

Consequently, 'Fuel analysis and mass balance method' seems to be the most optimal emission factor estimation method in the cement industry based on its lowest error.