

시멘트 산업부문 온실가스 (CO₂) 배출계수 산정 연구

A Study on the Estimation of Emission Factors for Greenhouse Gas (CO₂) in Cement Industry

송형도* · 홍지형 · 엄윤성 · 이수빈 · 김대곤 · 김정수¹⁾

국립환경과학원 환경총량관리연구부 대기총량과,

¹⁾국립환경과학원 지구환경연구소

(2006년 7월 11일 접수, 2007년 4월 11일 채택)

H.D Song*, J.H Hong, Y.S Um, S.B Lee, D.G Kim and J.S Kim¹⁾

Air Pollution Cap System Division, National Institute of Environmental Research

¹⁾*Global Environment Research Center, National Institute of Environmental Research*

(Received 11 July 2006, accepted 11 April 2007)

Abstract

The cement industry is one of the energy intensive industries such as petrochemical and steel industry. The energy efficiency of cement industry is high comparing to oversea's cement industries due to the enforcement of energy conservation policies. The purpose of this study is estimate emission factors for greenhouse gas (CO₂) in cement industry. The results of field study, quicklime contained quantity of five factories were 0.64~0.65. Measurement emission (15,382 ton/day) is 40% higher than process emission (8,929 ton/day) on the IPCC Guidelines (1996). Add to combustion emission on the lines of IPCC Guidelines (1996) is similar to the emission of this study. The emission factor of greenhouse gas (CO₂) were as follows the emission factor between 9.01E-01 ~ 2.15E-01 ton/ton for CO₂. The result of this study is higher than emission factor of IPCC (0.51) but it is similar to U.S. EPA's (0.952).

Key words : Emission factor, CO₂ emissions, Greenhouse gas, Cement industry, CO₂

1. 서 론

유엔기후변화협약(United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC)은 1992년 6월 브라질 리우환경회의에서 지구온난화에 따른 이상

기후현상을 예방하기 위한 목적으로 채택되었다. 1994년 3월에 50개국 이상이 가입함에 따라 발효되었으며 2001년 9월 7일까지 186개국이 가입하였고, 우리나라는 1993년 12월 47번째로 기후변화협약에 가입하였다. 특히 지난 1997년 12월 일본의 교토에서 개최된 기후변화협약 제3차 당사국총회(Conference of the Parties, COP)에서 CO₂, CH₄, N₂O, PFCs, HFCs, SF₆ 등 6가지 가스를 지정하여 Annex I 국가

*Corresponding author.

Tel : +82-(0)32-560-7513, E-mail : hdsong@me.go.kr

들의 온실가스 배출량 감축을 주요내용으로 하는 교토의정서(Kyoto Protocol)를 채택했다.

미국, 일본, EU 등 38개국(Annex B)은 2008~2012년까지 온실가스의 전체 배출량을 1990년 대비 평균 5.2% 감축키로 하고 배출권 거래제(Emission Trading, ET), 공동 이행(Joint Implementation, JI), 청정개발체제(Clean Development Mechanism, CDM) 등 3가지의 국제협력수단을 허용하고 있다. 따라서 이러한 국제적 환경에 대처하기 위해서는 국가 고유의 온실가스 배출특성값(배출계수, 탄소함량 등) 및 배출계수의 개발과 구축이 필수적이다. 우리나라의 경우 시멘트산업은 철강, 석유화학과 함께 대표적인 에너지 다소비산업으로서 온실가스 감축이 선행되어야 할 것이다. 오늘날 우리나라는 연간 5,500여만 톤을 생산하는 세계 유수의 시멘트 대국으로 성장하였으며(통계청), 시멘트 산업은 우리나라의 경제, 문명 발전의 원동력이 되어왔다. 그러나 시멘트 산업은 막대한 양의 석회석 채굴에 따른 산림자원 파괴와 생산과정에서 1,450°C 소성에 따른 에너지 고비용문제, CO₂ 배출, 석회석 분해에 따른 CaO+CO₂ 과다 발생 등으로 인해 지구 온난화 및 기후변화의 심각한 환경위해 산업으로 인식되고 있다(엄윤성 등, 2004; 에너지관리공단, 2004). 또한 2005년 2월 발표된 교토의정서에 의해 2013년부터는 우리나라 역시 온실가스감축의무 이행국으로 선정될 가능성이 높아 시멘트 산업도 심각한 어려움을 겪을 것으로 예상되고 있다.

본 연구는 시멘트 산업분야의 국내 특성을 반영한 산업 및 공정시설별 CO₂ 배출특성을 규명하고 배출계수를 체계적으로 개발하는 것을 목적으로 하였다. 이는 배출권거래제 및 대기오염방지설비의 설계, 오염저감계획의 수립 등 정책수립에 주요한 정보로 사용될 수 있으며, 뿐만 아니라 국제적으로도 국가간 기후변화협약과 생물다양성협약 등 각종 국제 환경협약, UNEP 및 OECD 등 환경관련 국제기구 및 주요 국가 간 환경협력 방안 및 대응모색에 유용한 정보로 사용될 것이다.

2. 연구방법 및 내용

2.1 조사대상 사업장 선정

조사대상 사업장 선정은 국립환경과학원의 대기배

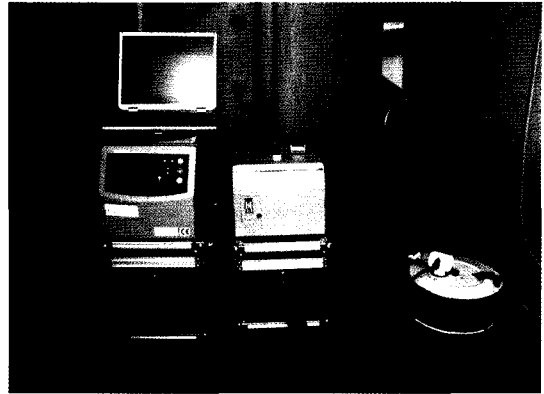


Fig. 1. CO₂ gas analyzer.

출원 및 배출량조사 프로그램(Source Data Management Program, SODAM)을 활용하였으며(국립환경연구원, 2004, 2002), 기후변화에 관한 정부간기구(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 등의 Guideline을 참고하였다. 조사대상 사업장의 선정은 총 4단계로 이루어지는데, 1단계에서는 SODAM에 등록된 해당업종 1~3종 사업장을 조사하였고, 2단계는 1단계에서 조사된 사업장 중 연료사용이 많은 상위 50% 사업장을 우선대상으로 하여 그 중 NO_x 배출량을 고려하여 선정하였다. 3단계는 업종 대표성 및 업종별 대기 배출특성을 고려하여 배출시설 및 방지시설현황을 고려하여 실질적인 조사대상 표본사업장을 선정하였다. 마지막으로 4단계에서는 사업장 방문을 통하여 단위공정 및 최종 생산물을 분석하여 5개 사업장을 최종 선정하였다.

2.2 CO₂ 측정기기 및 분석방법

조사대상 배출원에서 배출되는 온난화 가스 중 CO₂는 실측을 하였고, 사업장의 측정대상 굴뚝에 대하여 전수 조사를 실시하였다. 측정 시간은 공정의 부하 변동에 따른 배출특성을 파악하고자 측정 농도의 변화율이 일정해질 때까지 5초 간격으로 실시간 측정하였으며, 단위시설의 공정주기가 반영되도록 하였다.

그림 1은 Portable Gas Analyzer(P.G-250(HORIBA))장비로서 측정범위는 0~20 vol%, 측정항목은 CO₂, NO_x, SO₂, CO, O₂이다. CO₂ 측정은 최종 배출구(굴뚝)에서 직접 실측하였으며, CO, NO_x 등은 기

타 물질은 공정상황을 판단하기 위하여 함께 분석하였다. 측정방법은 EPA Test method 3A 및 대기공정 시험방법의 NDIR (Non-dispersive Infrared) 방법을 이용하였다.

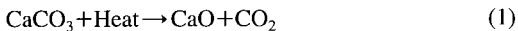
이 측정방법은 적외선이 Cell (반응관)을 통과하여 검출기에 도달하는 과정에서 특정 파장이 시료 중의 이산화탄소에 흡수된 후 검출되고, 그 차이로서 이산화탄소량을 측정하게 되며, 또한 4.26 μm 파장의 빛은 검출기전단에 설치된 filter에서 제거되는 원리를 이용하는 방법이다.

2.3 현장조사 및 배출량 분석 방법

사업장 현장조사는 시멘트 제조공정에 대한 CO₂ 배출원 조사표를 이용하여 공정분석, 원료 및 부원료 사용현황, 제품 생산현황, CO₂ 배출기여 인자 등을 조사하였다. 배출원 조사표는 일반정보, CO₂ 예상 배출원, CO₂ 배출원 현황, 공정해석, 활동도, 배출특성 값, 배출시설 상세정보, 연료연소 부분으로 구성되어 있다. 특히 공정별 CO₂ 배출특성 및 배출인자에 대한 상세 정보는 현장조사 및 배출원 조사표를 이용하여 최종 구축되었으며, 이 부분은 향후 국내 산업특성을 반영한 배출계수를 산정할 경우 필수적인 자료로 활용될 수 있다.

배출량 분석은 실측 배출량 및 IPCC에서 제시하고 있는 산정지침에 따른 이론적 배출량을 비교하며 수행하였다. 실측 배출량은 CO₂ 실측 평균 농도와 TMS 유량을 통하여 산정하였고, IPCC의 이론적 배출량 산정 방법은 가이드라인에서 제시된 산정식과 사업장현장 조사시 획득한 활동도를 이용하여 산정하였으며, 구체적인 배출량 산정식은 다음과 같다 (IEA, 1999; IPCC, 1996).

CO₂는 소성공정에서 시멘트의 중간 생산품인 크링커 생산 중에 주로 발생된다. 즉 소성시설에서 석회석(CaCO₃)이 가열되면, 식(1)과 같이 생석회(CaO)가 생성되며 이 과정 중에서 CO₂가 배출된다.



IPCC 가이드라인 산업부문에서 시멘트산업에 대한 배출량 산정식은 크링커 생산량(활동도)과 크링커내 생석회 함량으로 나타나며, 생석회 함량을 알 수 없는 경우 기본 값으로 주어진 0.646을 적용하도록 권고하고 있다(식(2)). 배출계수 단위는 [CO₂ 배출량

(tonnes)/크링커 생산량(tonne)]이다.

$$EF_{\text{Clinker}} = 0.646 (\text{Fraction CaO}_{\text{Clinker}}) \times 0.785 \quad (2)$$

여기서, EF_{Clinker}: 크링커배출계수, Fraction CaO_{Clinker}: 크링커생석회함량이다. 특히, 2001년에 보고된 IPCC 보고서(IPCC, 2001)에서는 소성시설 내 CO₂ 배출량 산정시, 기존의 배출량에 시멘트 킬른 먼지(Cement Kiln Dust, CKD)를 고려하였는데, 식(3)에 이를 고려한 배출량 산정식을 나타내었다. CKD 보정계수에 대한 자료가 없는 경우 IPCC에서 추천하는 계수(1.02)를 적용하면 된다(IPCC, 2001, 1996).

$$\text{CO}_2 \text{ emission} = EF_{\text{Clinker}} \times \text{Clinker product} \times \text{Factor}_{\text{CKD}} (1.02) \quad (3)$$

여기서, CO₂ emission: CO₂ 배출량, Clinker product: 크링커생산량, Factor_{CKD} (1.02): 킬른먼지계수이다.

2.4 배출계수 산정방법

배출계수는 각 생산 공정별 배출시설 및 방지시설의 오염물질 배출량을 알 수 있는 기본인자이므로 배출량 산정에 분모가 될 수 있는 원료투입량, 제품생산량, 연료사용량을 공정별로 파악하고 이를 각 공정별 배출시설의 활동도로 고려하여 산정하였다. 식(4)는 배출계수 산정 식을 나타낸 것이다.

$$E = M \times V \times 10^{-9}, EF = E/A \quad (4)$$

여기서, E: 오염물질의 평균 배출량[ton], M: 오염물질의 평균 실측농도[mg Nm⁻³], V: 실측당시 유량[Nm³/day], EF: 배출계수[CO₂ ton/활동도 ton], A: 실측당시 활동도[제품, 원료 및 연료 등, ton/day]이다. 산업공정별 배출계수자료는 산업시설에서 배출되는 오염물질의 배출량을 산정하고 이를 이용하여 대기오염 예측 및 오염 발생원을 효과적으로 관리하는데 다방면으로 사용할 수 있는 유용한 자료이다. 배출계수를 폭 넓게 사용하기 위해서는 복잡한 산업공정의 배출시설을 표준화하여 배출특성을 살릴 수 있도록 해야 한다. 그러나 계수의 범용적인 사용을 위하여 산업공정으로 일반화하면 각 공정별 배출원의 배출특성을 살리지 못하여 현실적인 배출량을 산정할 수 없으며, 각각의 개별 배출시설의 공정특성을 살려 세분화하면 계수가 특정한 배출시설에만 적용되어 일반적인 사용이 어렵다. 또한 현대산업기술의

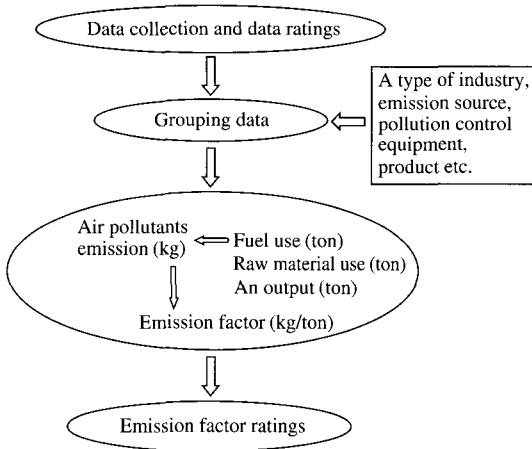


Fig. 2. The process of the determination for emission factors and emission rates.

급속적인 발달은 제조공정의 배출시설의 변화로 이어지므로 실질적인 배출량을 추정하기 위해서는 배출계수의 수정·보완 연구를 통한 질적 향상이 무엇보다 중요하다고 할 수 있다. 이를 위하여 미국 EPA의 AP-42(U.S. EPA, 2000, 1997)에서 제시한 신뢰도 평가방법에 준하여 계수의 등급을 부여하였다. 평가는 자료 및 배출계수 등급 평가를 이용한다. 자료등급은 A~D등급의 총 4단계로 나누어지는데, A등급이 가장 큰 신뢰도를 가지고 D등급이 가장 낮은 신뢰도를 갖는다. 즉, 방법의 신뢰성(대기오염공정시험 방법)이 높고, 측정횟수가 많을수록 더 높은 등급을 부여받게 된다. 배출계수 등급 부여의 경우는 A~F 등급의 총 6등급으로 구성되어 자료등급과 마찬가지로 A등급이 가장 큰 신뢰도를 갖는다. 배출계수 산정에 쓰인 자료등급을 기본으로 하여 SODAM에 등록되어 있는 시멘트 제조업의 전체 대상사업장(1~3종)수에 대하여 본 연구에서 조사한 사업장 수가 차지하는 비율이 높을수록 더 높은 등급을 부여받게 된다. 그림 2는 본 연구에서 사용된 배출계수 등급부여 과정을 나타낸 것이다.

시멘트 산업의 경우 자료등급은 대기공정시험방법을 이용하여 측정하였으며, 실시간 측정으로 공정주기를 포함하고 있으므로 A등급으로 주어지며, 계수 등급의 경우 자료 등급이 A등급이고, 국내 대형 시멘트업체 5곳을 선정하였으며, 배출시설이 킬른형식

으로 대표성을 유지하므로 최종 A등급이 부여되었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 사업장 실측농도

CO₂ 실측은 기본적으로 소성시설의 굴뚝 전체를 대상으로 공정 특성이 반영되도록 농도의 변화율이 거의 없을 때까지 실시간 연속 측정하였으며, 그림 3에 실측 농도를 나타내었다.

일반적으로 소성시설의 경우 연속식 공정으로 공정변화가 거의 없으므로 실측 농도 값의 경우도 변화가 거의 없이 일정한 패턴을 가짐을 확인할 수 있었다. 그림 3의 실측 그래프에서 순간 피크가 나타나는 농도값에 대해서는 CO, O₂ 등 기타 물질들과의 분석 및 검증을 통하여 공정상황을 판단하고, 유효한 데이터로서 가치가 있는지를 판단하여 최종 배출계수 산정시에 적용하였다. 그림 3의 실측농도를 살펴본 결과 5개 사업장 19개 소성시설 스택의 CO₂ 농도가 17~20%의 농도 값으로 일정한 패턴을 나타내었으나, A사업장에서는 7개의 스택 중 2개의 스택(3호기, 5호기)이 비교적 높은 농도변동이 나타남을 알 수 있었다. B사업장에서는 9개의 스택 중 대부분이 비슷한 농도였으며, 농도변동이 일정함을 알 수 있었다. 하지만 5호기, 8호기는 다른 스택에 비해 낮은 농도로 일정한 패턴을 보였다. C, D, E사업장의 각각의 스택은 비교적 일정한 농도변동을 알 수 있었다.

3.2 배출량 분석

본 연구에서는 실측에 의한 CO₂ 배출량과 IPCC 가이드라인에서 제시하는 배출량 산정식에 따른 이론적 배출량을 함께 분석함으로써 산업장별 이론적 배출량과 실측 배출량을 비교하고, 이를 통하여 최종 산정된 실측 배출계수의 국내 적용가능성을 검증하고자 하였다. 표 1은 실측배출량과 배출량 계산시 사용된 농도, 유량 등을 나타낸 것이고, 표 2는 IPCC 산정 지침에 따른 산업공정부문의 이론적 배출량과 사용된 배출계수, 활동도를 나타낸 것이다.

IPCC 지침에 따른 산업공정부문 시멘트의 CO₂ 이론적 배출량은 석회석이 생석회로 소성될 때 발생하는 공정배출인 경우 사업장 자료인 크리커 중 생석

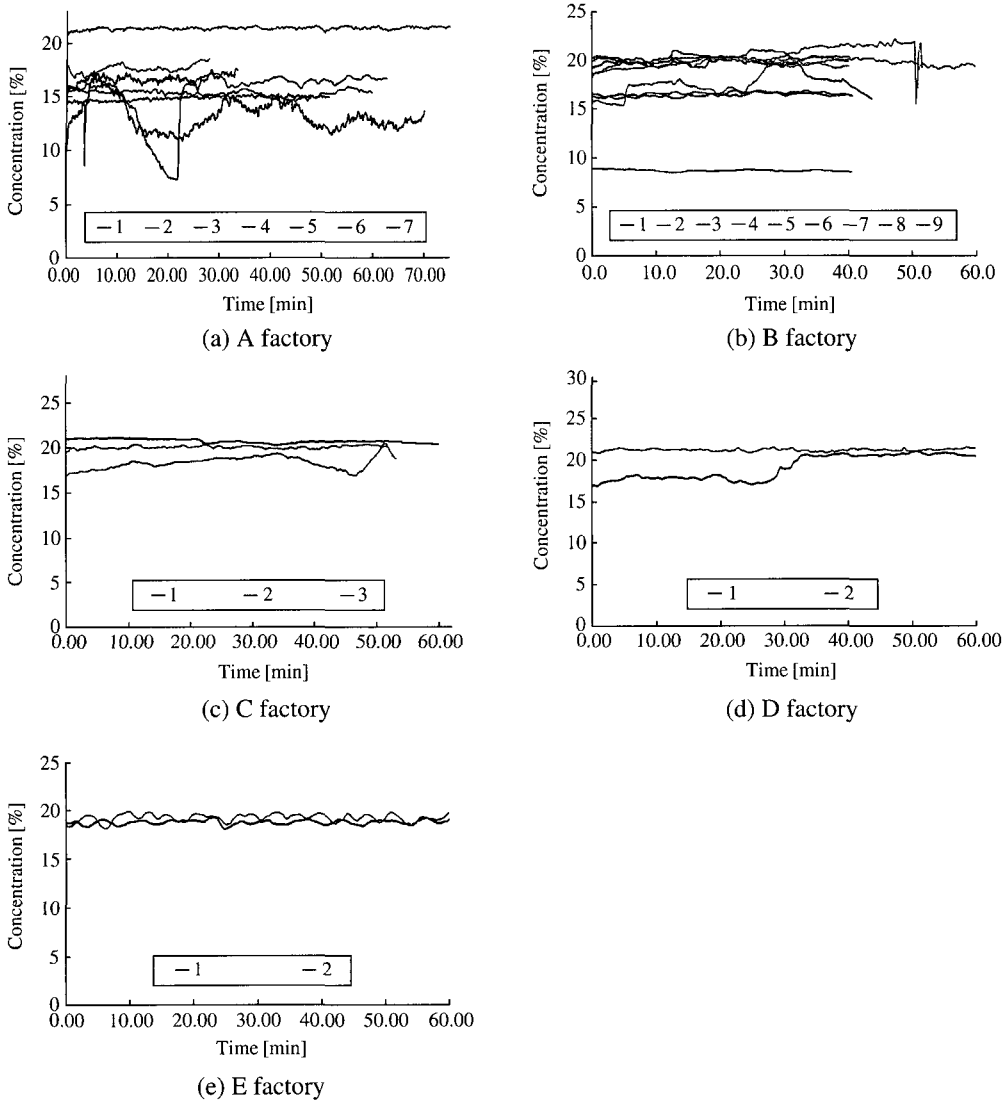


Fig. 3. CO₂ concentration of cement kiln.

회합량, CO₂ 변환율과 실측할 당시의 활동도(크링커 생산량)를 산정식에 적용하여 산정하였다. 현장조사 시 획득한 사업장의 생석회 함량은 0.64~0.65(0.64)로 IPCC에서 제시한 값과 거의 유사하였다. 또한, 공정 배출량 외에 킬른 내부에서 연료연소(폐기물 연료연소)를 통하여 소성반응하여 최종 연소 크링커를 생산하게 되는데, 이때 발생하는 CO₂ 양을 추가로 산정하였다. 이 부분의 배출량은 연료로 사용되는 폐기물 종류별 탄소함량과 투입량을 가지고 산정하였다.

표 3에서 배출량 산정시 이용한 폐기물별 탄소함량을 제시하였고, 표 4는 시멘트산업의 각 사업장별 폐기물연료의 성상별 구성비와 사용량을 나타내었다. 국내의 경우 연료대체용으로 페타이어칩과 같은 폐기물을 잘게 분쇄하여 사용하는 경우가 많은 것으로 조사되었다.

IPCC 산정지침에 따른 산업공정부문과 에너지부문의 사업장별 이론적 CO₂ 배출총량을 각각 계산하여 그림 4에 나타내었다. 공정배출량은 주원료인 석

Table 1. Actual emissions calculated by each stack in the field.

Factory	Stack	CO ₂ Concentration [%]	Flux [m ³ /hour]	Operating time		Emissions [ton/day]
				Day [hour/day]	Year [day/year]	
A	1	13.21	378,216	23.2	306	2276.9
	2	17.52	580,238	23.2	306	4632.7
	3	15.27	349,109	23.6	326	2471.3
	4	21.36	624,587	23.54	310	6168.9
	5	14.84	498,655	23.44	285	3407.2
	6	16.60	561,334	23.75	320	4347.1
	7	15.21	494,873	23.38	345	3456.8
B	1	19.77	61,431	24	237	572.5
	2	19.84	97,798	24	237	914.7
	3	20.31	239,536	24	327	2293.5
	4	19.17	120,440	24	323	1088.5
	5	9.22	99,316	24	323	431.7
	6	16.44	252,291	24	330	1955.3
	7	16.49	198,439	24	329	1542.6
	8	8.71	70,439	24	329	289.2
	9	19.62	798,506	24	337	7385.7
C	1	20.00	512,097	24	226	4828.3
	2	18.26	337,160	24	240	2902.4
	3	20.67	328,973	24	240	3205.7
D	1	18.74	783,550	24	330	6922.3
	2	19.22	764,151	24	330	6923.9
E	1	19.26	552,950	24	300	5021.8
	2	21.19	613,244	24	300	6125.5

Table 2. Theoretical emissions of IPCC calculated activity data for each stack.

Factory	Stack	Clinker production [ton/day]	Fraction CaO _{Clinker} [%/100]	M W* ratio of CO ₂ /CaO [%/100]	Emission [ton/day]
A	1	6,062.9	64	79	3065.4
	2	2,518.9	64	79	1273.6
	3	5,896.4	64	79	2981.2
	4	3,328.6	64	79	1682.9
	5	4,084.3	64	79	2065.0
	6	4,397.0	64	79	2223.1
B	1	2,910.0	64	79	1471.3
	2	1,682.0	64	79	850.4
	3	2,717.2	64	79	1373.8
	4	2,722.0	64	79	1376.2
	5	6,928.0	64	79	3502.8
C	1	6,127.0	64	79	3058.5
	2	9,138.0	64	79	4573.0
D	1	6,023.0	64	79	3026.0
	2	6,024.0	64	79	3026.5
E	1	8,800.0	65	79	4490.2
	2	8,690.0	65	79	4434.1

*MW: molecular weight

Table 3. Carbon contents of waste component.

Carbon contents (waste)		
Waste component	Carbon content (%) (CCW _i × FCF _i)	CO ₂ Emission factor (ton CO ₂ /ton)
Waste plastics ^a	64	2.35
Waste synthetic fiber ^a	38	1.39
Waste highly polymerized compound ^a	64	2.35
Waste leather ^a	51	1.87
Waste synthetic rubber ^a	63	2.34
Waste oil ^b	60	2.20
Waste solvent ^b	64	2.35
Refined oil ^b	86	3.15
The others	28	1.03

^aKorea Energy Economics Institute, 2004

^bActual survey data in the filed

회석이 소성시설에서 생석회로 전환되면서 발생하는 CO₂ 배출량이며, 연소에 의한 배출량은 화석연료의 연소 및 폐기물 소각에 의해서 배출되는 양이다. 시멘트 사업장에서는 폐기물의 재활용 및 우수한 열량 공급원으로써 고무칩 및 페타이어와 화석연료를 사용하기 때문에 전체 배출량에 대한 이 부분의 배출량 기여도를 판단할 필요가 있다. 실측에 의한 CO₂ 배출량의 경우 모든 배출인자가 포함되기 때문에 IPCC 산정지침에 따른 배출량과의 정확한 비교 및 검증용 위하여 산업공정 및 에너지부문의 배출량을 구분하여 분석하였다. 그 결과 연소에 의한 배출량의 경우 총배출량의 30~40%로 무시할 수 없는 양이 배출되는 것으로 나타났다.

Table 4. Component ratio and consumption of waste fuel.

Factory	Stack	Fuel	Consumption [ton/day]	Emission factor	Unit	Emission [ton/day]
A	1	B-C	3.18	3175	kg-CO ₂ /kL	10.1
		Bituminous coal	692.79	2562	kg-CO ₂ /ton	1774.9
	2	Coke	30.50	236.73	kg-CO ₂ /ton	7.2
		Waste synthetic rubber	73.81	2.34	ton-CO ₂ /ton	172.7
		RPF	10.07	2.2	ton-CO ₂ /ton	22.2
	3	B-C	4.25	3175	kg-CO ₂ /kL	13.5
		Bituminous coal	271.25	2562	kg-CO ₂ /ton	694.9
		Coke	12.32	236.73	kg-CO ₂ /ton	2.9
		Waste synthetic rubber	72.69	2.34	ton-CO ₂ /ton	170.0
	4	B-C	2.07	3175	kg-CO ₂ /kL	6.6
		Bituminous coal	408.88	2562	kg-CO ₂ /ton	1047.6
		Coke	30.28	236.73	kg-CO ₂ /ton	7.2
Waste synthetic rubber		75.01	2.34	ton-CO ₂ /ton	175.5	
Recycling oil		14.88	2.2	ton-CO ₂ /kL	32.7	
5	B-C	2.40	3175	kg-CO ₂ /kL	7.6	
	Bituminous coal	406.83	2562	kg-CO ₂ /ton	1042.3	
	Coke	30.35	236.73	kg-CO ₂ /ton	7.2	
	Waste synthetic rubber	79.19	2.34	ton-CO ₂ /ton	185.3	
	Recycling oil	12.02	2.2	ton-CO ₂ /kL	26.4	
	Plastic	0.91	2.35	ton-CO ₂ /ton	2.1	
6	B-C	1.40	3175	kg-CO ₂ /kL	4.4	
	Bituminous coal	397.96	2562	kg-CO ₂ /ton	1019.6	
	Coke	30.82	236.73	kg-CO ₂ /ton	7.3	
	Waste synthetic rubber	71.24	2.34	ton-CO ₂ /ton	166.7	
	Recycling oil	66.72	2.2	ton-CO ₂ /kL	146.7	
7	B-C	0.88	3175	kg-CO ₂ /kL	2.8	
	Bituminous coal	397.45	2562	kg-CO ₂ /ton	1018.3	
	Coke	30.26	236.73	kg-CO ₂ /ton	7.2	
	Waste synthetic rubber	74.75	2.34	ton-CO ₂ /ton	174.9	
	Recycling oil	67.32	2.2	ton-CO ₂ /kL	148.1	
Sub total						8104.9

Table 4. Continued.

Factory	Stack	Fuel	Consumption [ton/day]	Emission factor	Unit	Emission [ton/day]	
B	1	Bituminous coal	408.90	2562	kg-CO ₂ /ton	1047.6	
		Waste oil (coke)	13.50	2.2	ton-CO ₂ /kL	29.7	
		Waste oil (B-C)	2.10	2.2	ton-CO ₂ /kL	4.6	
		Waste oil (bituminous coal)	4.40	2.2	ton-CO ₂ /kL	9.7	
	2	Bituminous coal	297.20	2562	kg-CO ₂ /ton	761.4	
		Waste oil (coke)	10.60	2.2	ton-CO ₂ /kL	23.3	
		Waste oil (B-C)	0.40	2.2	ton-CO ₂ /kL	0.9	
	3	Bituminous coal	380.60	2562	kg-CO ₂ /ton	975.1	
		Waste oil (coke)	13.00	2.2	ton-CO ₂ /kL	28.6	
		Waste oil (B-C)	0.60	2.2	ton-CO ₂ /kL	1.3	
		Waste synthetic rubber Rubber	11.70 0.50	2.34 2.35	ton-CO ₂ /ton	27.0 1.1	
	4	Bituminous coal	383.30	2562	kg-CO ₂ /ton	982.0	
		Waste oil (coke)	12.80	2.2	ton-CO ₂ /kL	28.1	
		Waste oil (B-C)	0.60	2.2	ton-CO ₂ /kL	1.3	
		Waste synthetic rubber Rubber	13.30 3.10	2.34 2.35	ton-CO ₂ /ton	31.1 7.3	
	5	Bituminous coal	785.50	2562	kg-CO ₂ /ton	2012.5	
		Waste oil (coke)	54.20	2.2	ton-CO ₂ /kL	119.2	
		Waste oil (B-C)	0.80	3175	kg-CO ₂ /kL	2.5	
		Waste synthetic rubber Rubber	38.70 4.50	2.34 2.35	ton-CO ₂ /ton	90.5 10.6	
	Sub total						6195.4
C	1	Waste plastics	29.76	2.35	ton-CO ₂ /ton	69.9	
		Waste synthetic rubber	12.72	2.34	ton-CO ₂ /ton	29.7	
		Bituminous coal	512.35	2562	kg-CO ₂ /ton	1312.6	
		B-C	2.46	3175	kg-CO ₂ /kL	7.8	
		Exchange fuel	87.00	2.2	ton-CO ₂ /kL	191.4	
	2	Waste plastics	29.76	2.35	ton-CO ₂ /ton	69.9	
		Waste synthetic rubber	12.72	2.34	ton-CO ₂ /ton	29.7	
		RPF	15.12	2.2	ton-CO ₂ /ton	33.3	
		Bituminous coal	892.85	2562	kg-CO ₂ /ton	2287.5	
		B-C	5.00	3175	kg-CO ₂ /kL	15.9	
	Exchange fuel	33.39	2.2	ton-CO ₂ /kL	73.4		
	Sub total						4121.1
	D	1	Bituminous coal	565.40	2562	kg-CO ₂ /ton	1448.6
			Waste rubber	28.00	2.34	ton-CO ₂ /ton	65.5
Plastics			37.00	2.35	ton-CO ₂ /ton	86.9	
2		Bituminous coal	563.20	2562	kg-CO ₂ /ton	1442.9	
		Waste rubber	25.00	2.34	ton-CO ₂ /ton	58.5	
		Plastics	40.00	2.35	ton-CO ₂ /ton	94.0	
Sub total						3196.4	
E	1	Bituminous coal	362.00	2562	kg-CO ₂ /ton	927.4	
		Waste rubber	44.64	2.34	ton-CO ₂ /ton	104.4	
		Waste synthetic rubber	29.76	2.34	ton-CO ₂ /ton	69.6	
		Soft plastics	49.20	2.35	ton-CO ₂ /ton	115.6	
	2	Bituminous coal	385.00	2562	kg-CO ₂ /ton	986.4	
		Waste rubber	36.72	2.34	ton-CO ₂ /ton	85.8	
		Waste synthetic rubber	24.48	2.34	ton-CO ₂ /ton	57.3	
		Soft plastics	49.20	2.35	ton-CO ₂ /ton	115.6	
	Sub total						2462.1

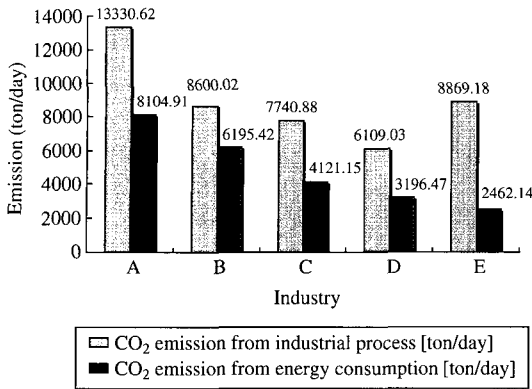


Fig. 4. Comparison of emissions (IPCC Guideline) for process and energy.

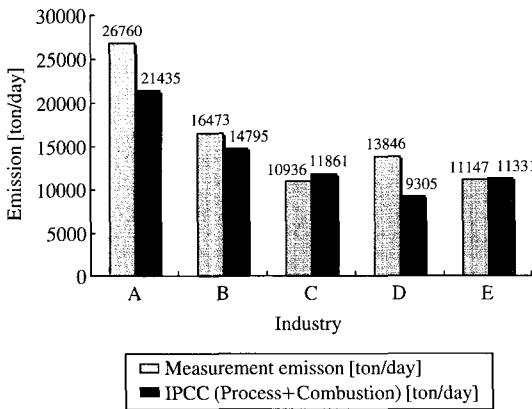


Fig. 5. Comparison of emissions for measured concentration and IPCC methodology.

실측에 의한 배출량과 IPCC 지침에 따른 이론적 배출량(산업공정과 에너지부문을 그림 5에 비교하여 나타내었다.

그림 5에서 보면 실측배출량과 IPCC 지침에 따른 배출량의 차이가 A사업장은 5,325 ton/day, D사업장은 약 4,606 ton/day로 차이를 보였으나 그 외 사업장은 실측값으로 산정한 배출량과의 차이는 거의 없는 것으로 나타났다. 그러나 연소에 의한 배출량을 고려하지 않고 IPCC 산정지침에 따른 공정 배출량만을 산정하여 비교하였을 경우, 실측에 의한 배출량이 IPCC에 따른 배출량보다 약 40% 정도 더 큰 것으로 나타났다.

최종적으로, 연소에 의한 배출량 및 공정 배출량을 고려한 IPCC에 따른 배출량과 실측에 의한 배출량을 비교한 결과 약간의 차이는 있었지만, 대체적으로 유사하게 나타났다. 차이가 나는 부분은 IPCC의 배출량 산정식의 경우, 활동도인 크링커 생산량과 배출계수로 판단할 수 있는 크링커 내 생성회 함량, 이산화탄소 및 탄소의 몰비로 나타나기 때문에, 이것은 이상적인 연소상태에서만 정확한 배출량이 될 것으로 판단된다. 또한 실제 소성시설에는 석회석 뿐 아니라 소비자의 요구에 따라 시멘트의 물성 및 특성을 맞추기 위하여, 점토 혹은 슬래그 등 기타 부원료가 첨가되는 경우가 많고 이것은 원료의 탄소함량의 변화와 연소조건을 불안정하게 만들 수 있으며, 결과적으로 이러한 조건변화에 따라 이산화탄소의 배출량이 영향을 받는 것으로 판단된다.

요약하면, IPCC의 산업공정 중 배출량 산정식에는 연료사용에 관한 항이 없기 때문에 실측 배출량과 차이가 났으며, 그 항을 보정해 줌으로써 유사한 배출량으로 최종 산정되었다.

3.3 배출계수 산정

국가 배출량 추정은 국내 산업 특성을 반영한 배출특성 값 및 활동도의 구축이 선행되어야만 정확하고 신뢰성 있는 배출량 산정이 가능하게 된다. 제조공정 및 시설별 세부적이고 구체적인 배출계수를 적용하게 되면 IPCC 가이드라인에서 권고하고 있는 Tier 2 수준의 정확한 배출량 산정이 가능하게 된다.

그러나 실제로 배출특성 값을 세부적으로 산정했다고 하더라도, 국가 통계자료가 이러한 분류까지 자세하게 구축이 되지 않는다면 정확한 국가 배출량 산정은 어려워질 것이다. 따라서 각 나라의 배출특성 값은 현재 국가 통계자료의 구축정도와 무관할 수 없으며, 이러한 이유로 미국 EPA, 유럽연합의 대기배출 목록집(CORE INventory of AIR emissions, CORINAIR) 등에서 제시하고 있는 일반 대기오염물질에 대한 배출계수를 보게 되면 대부분 원료 및 제품생산량을 활동도로 사용하고 있음을 쉽게 판단할 수 있다(U.S. EPA, 2000, 2000a; EEA, 1999b; IPCC, 1996).

배출계수의 정확도 및 신뢰도는 해당 시설에 대한 대표성 부여정도(측정횟수 및 대상 사업장 수 등)와 배출량 및 활동도 자료의 정확성에 따라 달라진다. 따라서 계수 개발시에 필요한 측정 지점별 배출량과

활동도의 상관관계는 매우 중요하며 이러한 평가를 위하여 회귀식을 이용, 배출계수 산정에 필요한 두 자료를 평가하였다(그림 6). 그림 6에서 보면 굴뚝별 실측 배출량과 활동도(크링커 생산량)는 선형적인 관계를 갖는 것으로 나타났으며, R²값이 0.7로써 비교적 신뢰도가 높은 것으로 나타났다. 따라서 배출계수 산정에 직접 이용된 배출량 및 활동도는 우수한 신뢰도를 갖는 것으로 판단되며 최종 산정된 배출계수의 신뢰도 또한 향상될 것으로 판단된다.

본 연구의 실측을 통한 기술형태별 배출계수는 Tier 2 수준의 배출량을 산정할 수 있게 해주고, Tier 1 수준의 배출량보다 더 자세하고 정확한 것이 특징이며 국제적인 추세도 Tier 2 수준의 배출량을 권고하고 있다. 특히 이러한 배출계수는 고정연소, 공정배출원 등 모든 배출인자가 포함된 값이라는 특징이 있다.

5개 사업장을 대상으로 시멘트 제조공정 중 CO₂ 배출시설별 배출계수는 표 5와 같이 사업장의 현장 실측자료를 토대로 산정되었다. 국외 배출계수의 경우 직접적으로 배출계수를 제시한 경우는 그대로 나타내었고, 탄소함량 및 배출량 산정식으로 나타난 경우는 본 연구에서 개발된 국내의 탄소함량을 산정식

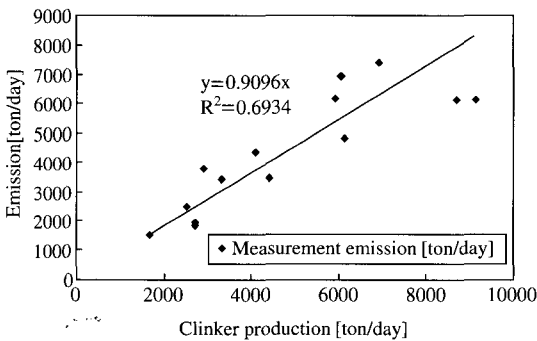


Fig. 6. Regression coefficient for measured concentration.

에 대입하여 배출계수를 추정하여 나타내었다.

시멘트 부문 배출계수의 경우, 크링커 1톤 생산량 당 0.901톤의 CO₂가 배출되는 것으로 산정되었다. IPCC 및 미국 EPA의 경우는 크링커 동일 생산량 당 각각 0.51 및 0.952톤의 CO₂가 배출되는 것으로 나타났으며, 본 연구에서 산정된 배출계수가 IPCC보다는 높으나 미국 EPA 값과는 유사한 값을 갖는 것으로 나타났다. 이러한 차이가 나는 이유는 IPCC 배출계수의 경우 클링커 내 생석회 분율 및 생석회와 이산화탄소 몰비를 통하여 추정된 산업공정 부문만이 고려된 배출계수이기 때문이다. 또한 미국 EPA 값의 경우는 본 연구와 마찬가지로 Tier 2 수준의 기술형태별 배출계수로써 연료 및 산업공정부문의 배출이 모두 포함되었기 때문인 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 우리나라 시멘트 산업부문의 배출원 분류체계에 맞추어 국내특성을 반영한 산업 및 공정시설별 CO₂ 배출특성 및 배출계수를 개발하기 위해 대표적인 사업장 5개를 선정하여 배출특성을 파악함과 동시에 배출계수를 산정하였고, 이를 미국 EPA의 배출계수와 비교·평가하였다.

조사대상 사업장의 현장조사결과, 사업장의 생석회 함량이 0.64~0.65로 IPCC에서 제시한 값과 유사하였고, 5개 사업장에서 조사된 연소에 의한 배출량을 고려하지 않은 IPCC 산정치침에 따른 공정 배출량(평균 8,929 ton/day)보다 실측에 의한 배출량(평균 15,382 ton/day)이 약 40% 정도 더 큰 것으로 나타났다. 이를 검증하기 위해 연소에 의한 배출량까지 고려하여 배출량을 산정한 결과 IPCC 산정치침에 따른 배출량(연소+공정)이 13,745 ton/day로 유사한 값으로 나타났다.

연소와 고정을 고려한 배출계수는 크링커 1톤 생

Table 5. Emission factor of CO₂ in cement industry.

Process	Emit equipment	Prevention equipment	Emission factor [CO ₂ ton/Clinker production (ton)]		
			This study	Level	IPCC
Clinker process	Rotary kiln	Unestablished	9.01E-01 ± 2.15E-01 (5.71E-01 ~ 1.30E+00)	A	0.51 ※ EPA: 0.952

산량 당 0.901톤의 CO₂가 배출되는 것으로 산정되었는데 이는 미국 EPA의 배출계수 0.952톤-CO₂/톤-크링커와 유사한 값이었다.

본 연구에서 개발된 CO₂ 배출계수는 교토협약에 따라 가까운 장래에 온실가스 의무감축국으로 포함될 가능성이 있어 이에 대한 국가적인 전략개발이 마련되어야 하며, 온실가스감축에 대비한 대책 마련 시 기초적인 자료로 활용될 것으로 사료된다. 또한 배출량의 신뢰성을 고려하면 실측에 의한 방법론으로 일원화하는 것이 바람직하나 세분화된 업종과 시설별로 대표성 있는 배출계수를 지속적으로 개발할 수 있는 연구기반을 마련하는 것이 필요하다.

감사의 글

본 연구는 차세대 핵심환경기술개발사업 중 “환경 부문 온실가스 inventory 작성 및 배출계수 개발 연구”의 일환으로 수행되었습니다. 연구비를 지원하여 주신 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

엄윤성, 이은정, 김대곤, 이대균, 방선애, 이석조, 홍지

형 (2004) 시멘트 및 석회산업에서의 대기오염물질 배출특성과 배출계수 산정에 관한 연구. 한국대기환경학회 2004년 춘계학술대회는문집, 361-362.

에너지관리공단 (2004) 기후변화협약 제3차 국가보고서 작성을 위한 기반구축연구(제1차년도)-폐기물부문 온실가스 배출통계체계 개선 및 보완 방안 연구.

환경부, 국립환경연구원 (2004) 대기배출원조사자료(Source Data Management, SODAM).

환경부, 국립환경연구원 (2002) 산업공정과 대기오염물질 배출계수(I).

European Environment Agency (1999b) Atmospheric Emission Inventory Guidebook.

IPCC (2001) Good practice and uncertainty management in national greenhouse gas inventories.

IPCC (1996) Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Reference Manual (Volume 3).

IEA (International Energy Agency) (1999) Greenhouse gas and climate change.

U.S. Environmental Protection Agency (1997) Procedures for preparing emission factor documents, 4-25.

U.S. Environmental Protection Agency (2000) Compilation Air Pollutant Emission Factors, Volume 1, Stationary Point and Area Sources, Fifth Edition.

U.S. Environmental Protection Agency (2000a) Compilation Air Pollutant Emission Factors, Volume 1, Stationary Point and Area Sources, Fifth Edition.