

철강 산업의 산업공정부문 CO₂ 실측 배출계수 산정에 관한 연구

An Estimation of Plant Specific Emission Factors for CO₂ in Iron and Steel Industry

엄운성 · 홍지형 · 김정수¹⁾ · 김대곤 · 이수빈 · 송형도 · 이성호*

국립환경과학원 환경총량관리연구부 대기총량과,

¹⁾국립환경과학원 지구환경연구소

(2006년 8월 14일 접수, 2007년 2월 6일 채택)

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

Air Pollution Cap System Division, National Institute of Environmental Research

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

(Received 14 August 2006, accepted 6 February 2007)

Abstract

The development of domestic plant specific emission factors is very important to estimate reliable national emissions management. This study, for the reason, was carried out to obtain advances emission factor for Carbon Dioxide (CO₂) by source-specific emission tests from the iron and steel industry sector which is well known as one of the major sources of greenhouse gases (CO₂).

Emission factors estimated in this study were compared with those of IPCC for evaluation and they were found to be of similar level in the case of CO₂.

There was no good information available on CO₂ plant specific emission factors from the iron and steel industry in Korea so far.

The major emission sources of CO₂ examined from the iron and steel manufacturing processes were a hot blast stove, coke oven, sintering furnace, electric arc furnace, heating furnace, and so on.

In this study, the concentration of CO₂ from the hot blast stove process was the highest among all processes. The CO₂ emission factors for a ton of Steel and Iron products (using B-C oil) were estimated to be 0.315 CO₂ tonne (by Tier 3 method) and 4.89 CO₂ tonne. In addition, emission factor of CO₂ for heating furnace process was the highest among all process. Emission factors estimated in this study were compared with those of IPCC for evaluation and they were found to be of similar level in the case of CO₂.

Key words : Iron and steel industry, Plant specific emission factor, Greenhouse gas, CO₂ emissions

*Corresponding author.

Tel : +82-(0)32-560-7512, E-mail : seongho.lee@gmail.com

1. 서 론

지구 온난화를 유발하는 이른바 온실가스 저감을 위한 국제적인 대응책으로 1992년 브라질 리우에서 개최된 UN 환경개발회의에서 세계정상 등은 기후변화협약을 체결하였다. 특히 지난 1997년 12월 일본의 교토에서 개최된 기후변화협약 제3차 당사국총회를 통하여 교토의정서가 채택됨으로써 더욱 활발한 양상을 띠고 있으며, 2008~2012년간 국가전체의 배출총량을 1990년 수준보다 최소 5% 감축하는 목표를 정하고 있다. 국제적으로 통용되고 있는 국제 표준 CO₂ 배출량 산정지침은 크게 IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) Guidelines, WRI/WBCSD (World Resource Institute/World Business Council for Sustainable Development) Guidelines 및 ISO 14064 국제표준 및 국제경제포럼 (World Economic Forum, WEF)에서 개발한 지침으로 크게 구분할 수 있다(IPCC, 2006; 에너지관리공단, 2005; 환경부, 2005a; WRI/WBCSD, 2004; WRI/WBCSD, 2001; IPCC, 2001; 에너지관리공단, 1998; IPCC, 1996).

배출계수는 배출량 추정 및 예측, 대기오염방지시설의 설계, 배출량 저감계획의 수립 등에 매우 유용하게 이용될 뿐만 아니라, 배출특성을 간접적으로 파악할 수 있다. 이러한 이유로 U.S. EPA, 유럽연합 등 선진외국에서는 오래전부터 많은 비용과 인력을 동원하여 대기배출자료를 국가적으로 목록화하는 작업을 추진하여 왔으며, 국가 대기배출량을 일정한 형식과 산정방법에 의하여 체계적으로 관리하고 있다(환경부와 국립환경과학원, 2005b; EEA/CORINAIR, 2002; EPA, 2000). 그러나 국내의 경우 일반 대기오염물질의 경우는 그 체계가 잡혀가고 있으나 온실가스의 경우는 연구가 미진한 실정이다.

특히, 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories에는 현재 국내에서 적용하고 있는 Tier 1 Method(Default Emission factor를 이용한 CO₂ 배출량 산정방법, Top-Down) 보다는 Tier 2 or 3 Method(Specific Emission factor를 이용한 CO₂ 배출량 산정방법, Bottom-Up)를 우선하여 적용할 것을 권유하고 있다. 2006 IPCC Guidelines에서는 Tier 3 방법이(Plant Specific Emission) 가장 불확도가 적은 방법으로 제시하고 있다. 그러나 현재 국내의 산

업에서는 공정별 온실가스 배출량산정에 적용될 연료 및 원료의 탄소함량을 비롯한 관련된 자료인 국가고유값(Country-specific data)이 구축되지 않고 있다. 따라서 현시점에서 온실가스배출량 산정을 위한 기초 자료에 대한 조사가 시급한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 국내특성을 반영한 철강제조공정의 Tier 2, Tier 3 수준의 CO₂ 배출량 산정을 위한 국가 배출특성 고유 값 개발 및 시설별 배출계수(Plant-Level Emission Factor) 산정과 이를 위한 표준화검사법지침(Standard Operating Procedure, SOP)을 개발하고자 하였다.

2. 연구 방법

2.1 실측배출계수 산정 SOP

실측배출계수를 산정하기 위해서는 IPCC Guideline에서 제시하는 Tier 2, 3방법에 준하는 배출특성 고유 값과 현장조사를 통한 결과물이 적용되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 Tier 2, 3 방법의 배출계수 마련을 위한 체계적인 온실가스 배출계수산정과정에 대한 순차적 SOP가 개발되었으며, SOP에 포함된 내용은 아래의 그림 1과 같이 요약할 수 있다.

2.2 조사대상 표본사업장 선정

국내의 대표성을 부여할 수 있는 조사대상 사업장의 선정은 업종별로 분류되어 있는 2003년도 1~3종 대기배출업소를 기준으로 집계한 SODAM자료(Source Data Management)를 활용하였다. 조사대상 사업장은 철강산업의 특성을 고려하여 일관제철(Integrated steel mill)과 일반제강(Mini mill)으로 나누어 부문별로 각각 2, 3개 사업장을 선정하였고(국립환경연구원, 2004), 조사대상 사업장의 선정은 총 4단계로 단계별 선정방법은 아래와 같이 하였다.

① 1단계 : 제철, 제강업을 대상으로 SODAM에 등록된 사업장(1~3종) 파악.

② 2단계 : 선정된 사업장 중 연료사용량과 NO_x 배출량이 많은 사업장을 우선순위로 하여, 상위 50%에 해당하는 사업장을 우선순위로 선정. CO₂ 배출량은 실측을 한 결과가 없으므로 간접적으로 배출 특성이 유사한 NO_x의 배출량을 기초하여 대상사업장 선정.

③ 3단계 : 업종 대표성 및 업종별 대기 배출특성

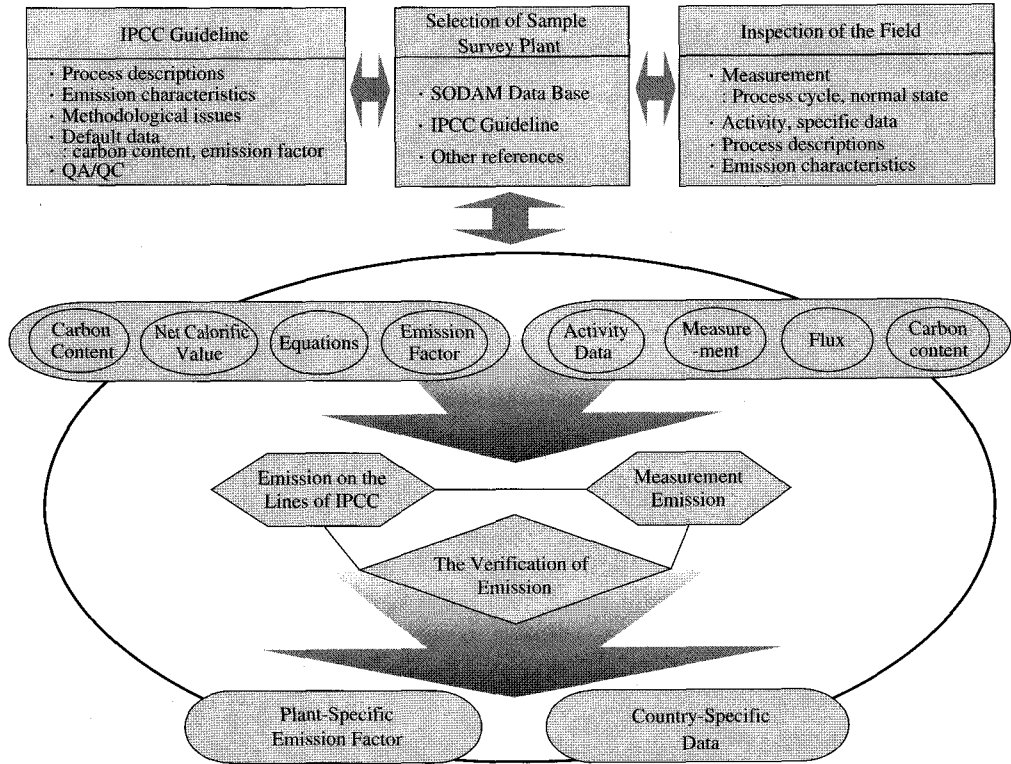


Fig. 1. Standard operating procedure for this study.

을 고려하여 일관제철 및 일반제강 사업장으로 구분.

④ 4단계 : 참고문헌, SODAM 및 사업장 개별 접촉을 통하여 해당업종, 단위공정 및 최종 생산제품을 검토하여 최종 5개 사업장 선정.

2.3 CO₂ 측정방법

철강산업부문 온실가스 배출계수 산정을 위하여, 대상 사업장의 측정가능 굴뚝에 대한 전수 조사를 기본으로 하였다. CO₂의 분석은 이동식 가스분석장치(Portable Gas Analyzer, PG-250)로 최종배출구(굴뚝)에 연결하여 실시간으로 확인하였다. 그림 2는 측정장비의 사진 및 제원을 나타내었다. 측정시간은 배출특성을 파악하고자 농도의 변화율이 일정한 시점까지 5초 간격으로 실시간 측정하여, 공정의 부하변동에 따른 단위시설의 제조공정 주기가 반영되도록 하였다. 측정물질은 시설의 운전상태와 측정결과의 유효성 판단을 위하여 CO₂를 비롯한 NO_x와 SO_x, CO, O₂로 하였다.

측정방법은 EPA Air Test method 3A와 국내대기오염공정시험방법으로 규정되어 있는 비분산 적외선 분석법(Non-dispersive Infrared, NDIR)을 이용하였다. 이 방법은 적외선이 반응관(Cell)을 통과하여 검출기에 도달하는 과정에서 특정 파장이 시료 중의 이산화탄소에 흡수된 후 검출되고, 그 차이로서 CO₂량을 측정하게 된다. 또한 파장은 4.26 μm으로 검출기전단의 필터로 제거되는 원리를 이용하는 방법이다.

또한, CO₂ 측정당시의 유량은 대기오염 공정시험방법과 EPA Air Test method 2에서 유량측정 방법으로 제시하고 있는 피토크(계수 0.84)를 이용하여 동압을 측정하고 굴뚝의 단면적을 곱하여 산정하였다. 유량의 적용은 굴뚝 단면적에 따라 다회간의 측정값으로 하였으며, 동압의 값이 흔들리지 않는 범위에서 10분 이상 측정된 값을 평균하여 적용하였다. 또, 유량 측정결과는 사업장의 유량측정 자료(TMS, 자가측정)를 이용하여 검증 후 적용하였다.

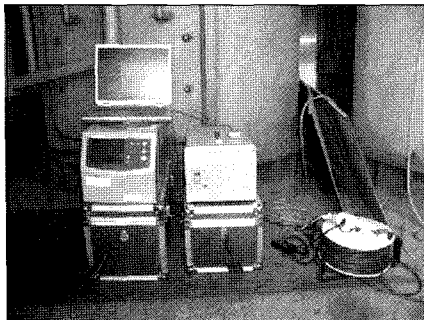
	Classification	CO ₂ gas analyzer
	Equipment	Portable gas analyzer PG-250 (HORIBA)
	Measurement items	0~20 vol% CO ₂
	Measurement matter	NO _x , SO ₂ , CO, CO ₂ , O ₂
	Principle	NDIR

Fig. 2. CO₂ gas analyzer.

2. 4 현장조사 및 자료 분석을 통한
배출특성 연구

2. 4. 1 사업장별 CO₂ 배출특성 현장조사

현장조사는 국내외 참고문헌의 분석을 통하여 조사대상 사업장에 따라 기초자료 조사양식을 만들어 각 대상 사업장에서 직접 작성하도록 하였으며, 현장 조사도 이에 준하여 진행하였다. CO₂ 배출원 조사표는 2006 IPCC Guidelines의 온난화가스 배출특성 자료와 배출원 종류에 따라 각 사업장별로 세부적으로 개발되었다. 주요 항목은 예상배출원과 배출원현황, 전체 및 단위공정도, 공정해석부분, 배출특성 고유값, 활동도, 측정대상 시설에 대한 상세정보, 사용연료 등으로 이루어져 있으며, 현장 실측 및 분석 자료는 검증절차를 거쳐 최종 배출계수 개발에 직접 이용하였다.

본 연구는 현장의 배출원별 실측을 통한 Tier 3 방식의 시설별 배출량을 Tier 1 방식의 배출량과 비교하여 검증하고, 배출계수 개발 시에 적용할 수 있는 활동도와 실측배출량도 비교하였다. 이러한 과정을 통하여 이론적 배출량에 적용되는 배출인자와 실측 배출량에 포함된 배출인자를 검증하였다.

2. 4. 2 실측기준 시설별 CO₂ 배출계수
(plant specific emission factor)의 산정

배출계수는 신뢰성을 확보하기 위해 사업장 현장 조사를 중심으로 산정하였으며, 해당 사업장별 굴뚝으로 배출되는 CO₂와 주요 대기오염물질의 실측농도, TMS자료, 직접 실측한 유량과 실측당시 활동도 자료 등을 모두 기초하여 산정하였다. 산정된 배출계수는 신뢰도 확보를 위해 그림 3에서 보는 바와 같

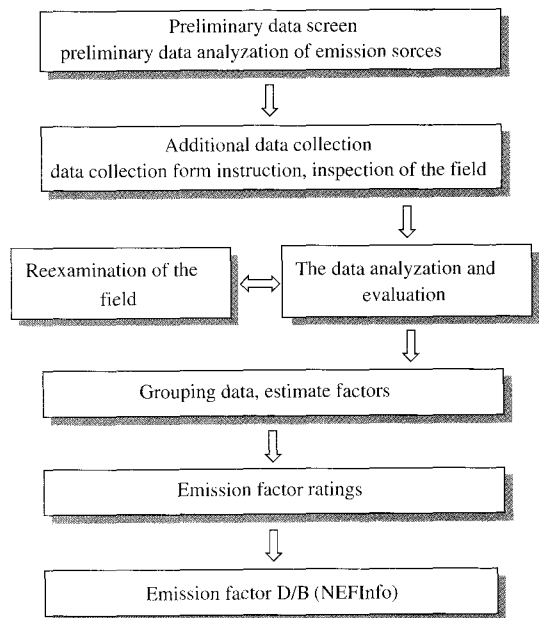


Fig. 3. Methodology for estimation emission factors in iron and steel industry.

이 등급평가의 절차를 수행하였다.

본 연구에서는 산정된 배출계수를 미국 환경청의 AP-42에서 제시한 평가방법을 토대로 등급을 산정하여 자료의 신뢰성을 평가하였다(U.S. EPA, 2000). 자료 등급은 4단계(A~D)로 이루어지며 검증된 시험방법 사용여부와 측정횟수로 정해지며, 배출계수 등급은 먼저 평가한 자료등급과 업종별 전체 대상사업장(1~3종) 수에 대하여 본 연구에서 조사한 사업장 수가 차지하는 비율을 고려하여 A(70% 이상), B

(50% 이상), C (30% 이상), D (10% 이상), E (10% 미만), F (자료등급 D등급으로 산정) 5등급으로 분류된다 (환경부와 국립환경과학원, 2005b). 특히, 사업장의 대기배출특성 (생산제품, 배출시설 혹은 방지시설)이 유일하거나 그 수가 소수여서 특성화되어있는 경우는 계수의 등급이 상위등급으로 평가 할 수 있다.

아래 식 (1)은 배출계수 산정을 위한 계산식이며, 일일 유량 및 활동도 자료는 현장조사를 통하여 분석한 사업장의 조업 시간 (연간 및 일간)을 적용하여 일일 기준으로 환산하였다.

$$E = M \times V \times 10^{-9}, \quad EF = E/A \quad (1)$$

여기서, E : 실측동안의 CO₂ 평균 배출량 (ton)

M : 실측동안의 CO₂ 평균 농도 (mg/Nm³)

V : 실측동안의 유량 (Nm³/day)

EF : 배출계수 (CO₂ ton/활동도 ton)

A : 활동도 (제품, 원료 및 연료 등, ton/day)

따라서 철강부문의 자료등급은 CO₂ 실측을 2006 IPCC Guideline에서 기준방법으로 하고 있는 US EPA Method 3 & 3A의 방법인 NDIR로 연속측정하였고, 단위시설의 제조 사이클을 확인하여 공정특성이 반영된 바 A등급으로 분류되고, 배출계수 등급은 업종별 대상 사업장 (1, 2, 3종) 수에 대하여 본 연구에서 조사한 사업장 수가 차지하는 비율과 배출시설의 특성을 고려하여 B 등급으로 분류하였다. 또한 본 연구에서 개발한 배출원별 배출계수는 IPCC에 해당 자료가 있는 경우 함께 나타내어 비교가 가능하도록 하였다. 최종 배출계수는 기 제안된 대기배출원 체계 (허정숙 등, 2002)에 맞추어 체계적으로 구축된다.

3. 결과 및 고찰

3.1 조사대상시설의 CO₂ 배출특성

철강제조 사업장은 일관제철과 일반제강 공정으로 구분할 수 있다. 일관제철은 한 사업장에 선철 (고로) 제조공정, 제강공정 (전로 및 전기로), 압연공정 (가열로)이 함께 있는 경우로, 철광석 및 원료탄이 장입된 고로에서 용해되어 출탕된 용선이 전로에 장입되고 최종 강 제품을 만드는 일련의 공정들이 함께 있는 것을 의미하며, 일반제강의 경우 고로공정이 없이 스크랩 (고철)을 전기로 (전기 아크로)에 장입·용해하

여 최종 강 제품을 만드는 것을 말한다 (한국철강신문, 2001).

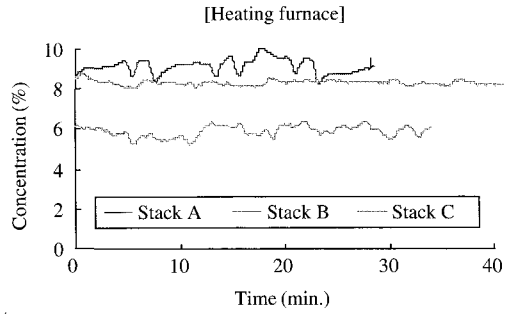
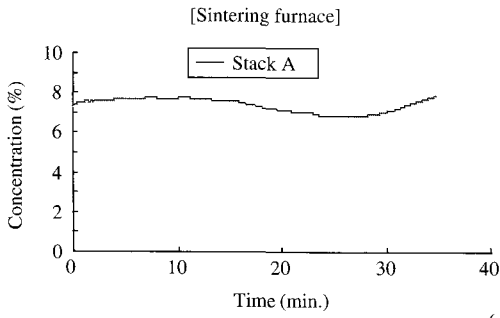
따라서, 철강제조 공정은 선철을 제조하는 제선공정과 중간 생산물인 광괴, 슬래브, 블룸 및 비렛 등을 생산하는 제강공정 및 압연공정으로 구분할 수 있다. 이러한 단위공정은 다시 많은 세부공정으로 나누어져 있다.

철강산업의 주요 배출원은 고로, 소결로, 코크스로, 석회 소성로, 전기로, 용선로 등 용융시설이 대표적이며, 이들 로는 이산화탄소 뿐 아니라 일반대기오염물질의 주요 배출원 이기도 하다 (석광설 등, 2004; 환경부, 2001).

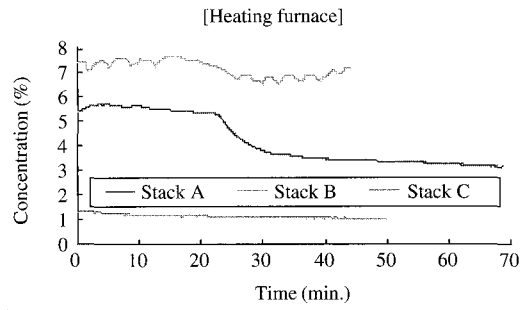
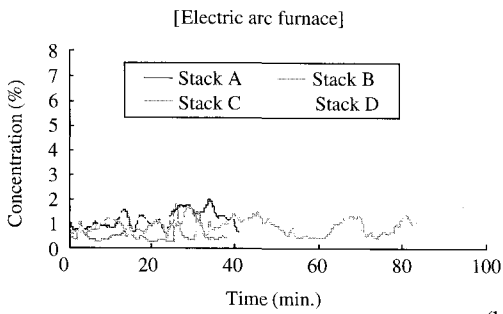
CO₂ 배출특성은 원료탄을 제조하는 코크스로, 철광석의 전처리 단계인 소결로 및 석회 소성로에서 원료 중 탄소성분에 의해 발생하는 이산화탄소로 나타난다. 또한 이들 배출원에서 생산된 제품은 고로에 원료로써 재투입 되며 연소에 의해 다시 대기 중으로 배출 된다. 따라서 연료연소에 의한 배출량과 1차 제품생산 및 완제품생산 등의 과정에서 다양한 배출 형태가 연결되어 공정 중 발생량을 연료연소에 의한 발생량과 구분하는 것이 쉽지 않다.

특히 일관제철 공정 중 코크스로, 고로 및 전로에서 발생하는 부생가스는 각각 코크스오븐가스 (cokes oven gas, COG), 고로가스 (blast furnace gas, BFG), 전로가스 (Linz Donawitz Converter Gas, LDG)라고 부르며, 중앙관리 시스템에서 회수하여 일관제철 공정 중 주요시설에 연료로써 재공급된다. 따라서 코크스로, 고로 및 전로 시설에서 직접적으로 대기 중으로 배출되는 배기가스는 없고, 측정공이 없어 실측할 수 없는 경우가 대부분이다. 그러나 이러한 시설의 배기가스는 연료 재순환에 의하여 다른 배출시설에서 연료연소에 의하여 배출될 것으로 판단되며, 이러한 이유로 일관제철의 경우 가열로 및 전기로를 제외하고, 공정특성에 의한 CO₂ 배출보다는 이들 공정부생가스에 의하여 배출특성이 특징지어질 것으로 판단된다.

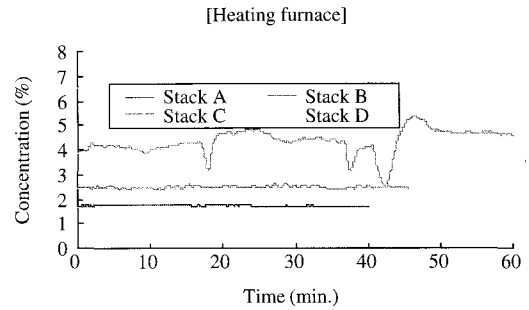
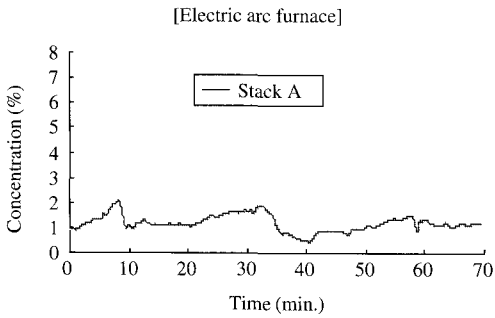
한편, 일반제강 공정은 고로공정이 없기에 일관제철공정에서 발생하는 형태의 부생가스는 없으며, 주요 배출시설은 전기로 및 가열로 등이 해당된다. 일반제강 공정의 배출특성은 환원제의 사용, 전기로의 전극봉 사용량과 부원료 투입량, 화석연료사용 등에 의해서 CO₂가 발생하는 것으로 조사되었다.



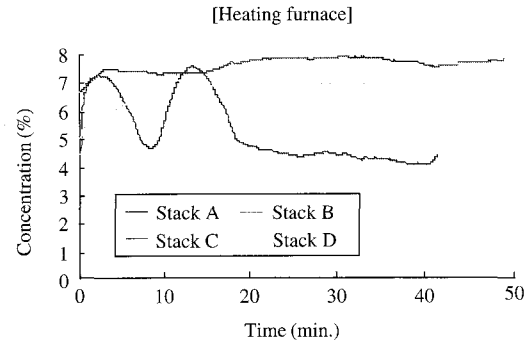
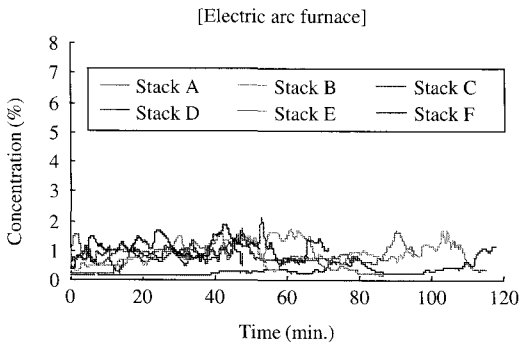
(a) A factory



(b) B factory

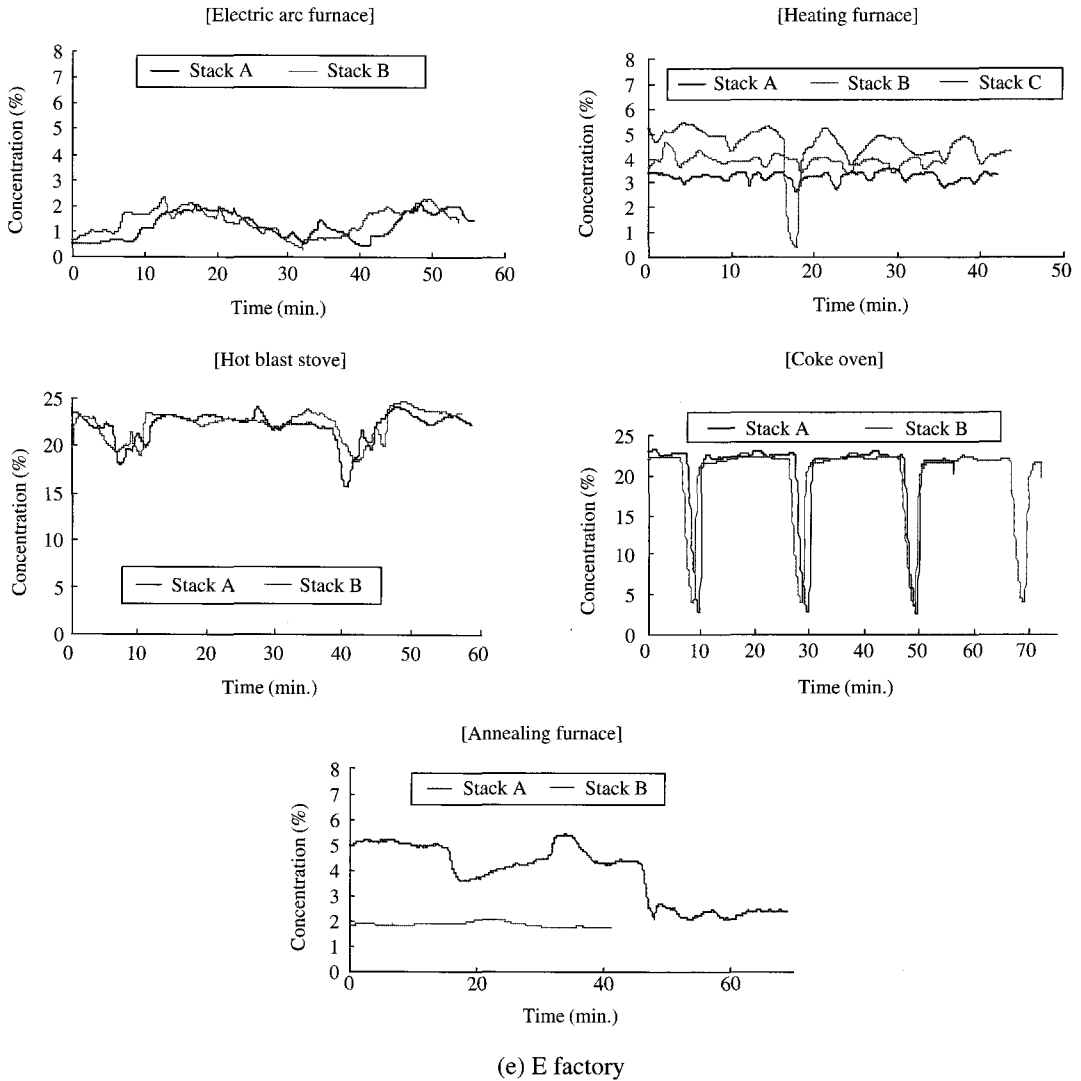


(c) C factory



(d) D factory

Fig. 4. CO₂ concentrations of the iron and steel manufacturing processes in factories.



(e) E factory
Fig. 4. Continued.

3.2 CO₂ 실측 농도

CO₂ 실측은 기본적으로 공정 특성이 반영되도록 단위시설 공정주기이상 실시간 연속 측정하였으며, 그림 4는 사업장 측정시설별 실측 농도로 그래프에서 보는 바와 같이 실측 농도는 각각의 공정 및 운전상황에 따라 일정하기도 하지만 시간적인 구간별 특정상황이 반복되기도 한다. 따라서 NO_x, CO, O₂ 등의 분석결과는 측정시의 공정상태를 대표해 줄 수

있는 지표로 사용이 가능하고, 이 값을 기초하여 공정상황의 판단이 가능하다. 즉, 배출농도의 값이 일정한 구간의 연속성을 파악하고, NO_x 및 CO, O₂의 배출농도 값은 현장생산관리자의 확인을 거쳐 공정의 이상정도가 확인된 공정별 평균값은 공정의 배출량을 산정하는데 적용할 수 있게 된다.

본연구의 현장조사에서 얻어진 CO₂ 분석결과를 그림 4에서 보는 바와 같이 공정에 따라 발생하는

Table 1. Theoretical CO₂ emission data calculation of each stacks on the lines of IPCC Tier 1 method.

Factory	Stacks (Emission source)	Activity		Carbon emission factors* (^d)kg-C/ton, (^e)kg-C/Sm ³ , (^f)kg-C/kL)	Operating time		CO ₂ Emission (ton/day)
		Fuel	The amount of consumption (^a)ton/day, (^b)m ³ /day)		Day (hr/day)	Year (day/yr)	
A	Sintering furnace	Coke	188.02 ^{a)}	845.45 ^{d)}	23.8	365	1,409.37
		Anthracite coal	161.84 ^{a)}	845.45 ^{d)}			
		COG	9,520.00 ^{b)}	0.87 ^{e)}			
	Heating furnace	COG	143,400.00 ^{b)}	0.87 ^{e)}	23.9	355	712.83
		BFG	90,342.00 ^{b)}	0.75 ^{e)}			
		LNG	4,302.00 ^{b)}	0.44 ^{e)}			
B	Heating furnace	LNG	325.00 ^{b)}	828.55 ^{d)}	24	341	987.35
		LNG	600.00 ^{b)}	828.55 ^{d)}	24	351	1,822.80
		LNG	1,550.00 ^{b)}	828.55 ^{d)}	24	340	4,708.90
C	Heating furnace, Annealing furnace	B-C oil	1.75 ^{a)}	865.91 ^{f)}	19	234	6.80
		Kerosene	0.48 ^{a)}	706.91 ^{f)}			
	Heating furnace	B-C oil	7.23 ^{a)}	865.91 ^{f)}	23	358	22.98
		B-C oil	9.91 ^{a)}	865.91 ^{f)}	23	358	31.49
		Kerosene	0.01 ^{a)}	706.91 ^{f)}	23	351	167.51
		B-C oil	52.76 ^{a)}	865.91 ^{f)}			
D	Heating furnace	LNG	1,453.50 ^{b)}	828.55 ^{d)}	24	345	4,415.73
		LNG	313.50 ^{b)}	828.55 ^{d)}	24	345	952.41
		LNG	313.50 ^{b)}	828.55 ^{d)}	24	345	952.41
		LNG	741.00 ^{b)}	828.55 ^{d)}	24	345	2,251.16
E	Heating furnace	COG	248,694.00 ^{b)}	0.23 ^{e)}	22.9	354	206.08
		COG	247,608.00 ^{b)}	0.23 ^{e)}	22.8	353	205.18
		COG	248,694.00 ^{b)}	0.23 ^{e)}	22.9	359	206.08
	Annealing furnace	COG	122,042.70 ^{b)}	0.23 ^{e)}	23.4	353	101.13
		COG	6,423.30 ^{b)}	0.23 ^{e)}	23.4	353	5.32
	Coke oven	COG	125,355.50 ^{b)}	0.23 ^{e)}	23.9	365	103.88
		BFG	3,049,640.00 ^{b)}	0.39 ^{e)}	23.9	365	4,383.35
	Hot blast stove	COG	162,108.00 ^{b)}	0.23 ^{e)}	23.7	365	5,005.60
		BFG	3,389,100.00 ^{b)}	0.39 ^{e)}			
		COG	150,021.00 ^{b)}	0.23 ^{e)}	23.7	365	5,370.30
BFG		3,649,800.00 ^{b)}	0.39 ^{e)}				

* KEMCO 1998.10. Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.

Table 2. Theoretical CO₂ emission data calculation of each stacks on the lines of IPCC-Industrial processes (Tier 1).

Factory	Stacks (Emission source)	CaCO ₃		MgCO ₃		Electrode		Operating time		CO ₂ emission (ton/day)
		Consumption (ton/day)	Emission factor (kgC/ton)	Consumption (ton/day)	Emission factor (kgC/ton)	C content (fraction)	Consumption (kg/day)	Day (hour/day)	Year (day/year)	
B	EAF ^{a)}	2.80	120.00	2.80	130.00	0.99	66,000	24	315	242.12
C		79.77	120.00	79.77	130.00	0.99	3,500	22	341	85.83
D		4.20	120.00	4.20	130.00	0.99	79,200	21	345	291.36
E		0.00	120.00	0.00	130.00	0.99	5,900	23.6	231	21.42

a. EAF : Electric arc furnace

특성이 다른 것이 확인되었다. 특히, 전기로와 코크스로의 경우 Batch Type으로 스크랩 장입부터 용해가 완료되는 시간(약 30~40분)의 공정이 주기적으로 진행되는 것으로 확인되었다. 또한 전기로를 제외한 대부분의 다른 시설에서는 주기적인 연속공정이 진행되므로 시간에 따른 실측농도 값의 변화대역은 크게 나타나지 않았다.

3.3 IPCC Tier 1 방식과 Tier 3 방식에 의한 CO₂ 배출량 비교

배출량은 2001 IPCC Good Practice의 철강부문 산정지침 및 배출계수(Default 값)에 따른 대상시설별 이론적 배출총량(Tier 1)과 본 연구에서 수행한 실측에 의한 배출총량(Tier 3)을 비교하였다.

Tier 1 방식의 배출량 산정의 경우, 표 1, 2에서 보는 바와 같이 에너지와 산업공정부분으로 나누어 IPCC의 연료별 탄소배출계수(default carbon emission

factor)와 사용량, 탄산칼슘/탄산마그네슘의 탄소배출계수와 사용량, 전극봉의 탄소함량과 사용량으로 해당시설별 일일 배출량을 산정하였다. Tier 3 방식의 실측에 의한 경우는 표 3에서 보는 바와 같이 CO₂ 농도, 유량 및 가동 일수를 통하여 배출량을 산정하였다.

그림 5는 고로공정이 있는 일관제철공정(Integrated steel mill)과 고로공정이 없는 일반제강공정(Mini mill)을 갖는 사업장별 해당시설에서 배출되는 IPCC에서 제시한 연료별 배출계수 및 default 값(Tier 1)과 실측(Tier 3)을 이용한 CO₂ 배출 총량을 비교한 그림이다.

현장조사결과, 실측대상 CO₂ 주요배출시설은 일관제철인 경우 소결로, 코크스 오븐로, 열풍로, 전기로, 가열로, 소둔로 등이며 일반제강공정은 전기로, 가열로로 나타났다.

배출량 비교 결과 가열로 및 전기로를 제외하고 대부분의 시설은 차이는 있으나 대체로 유사한 수준

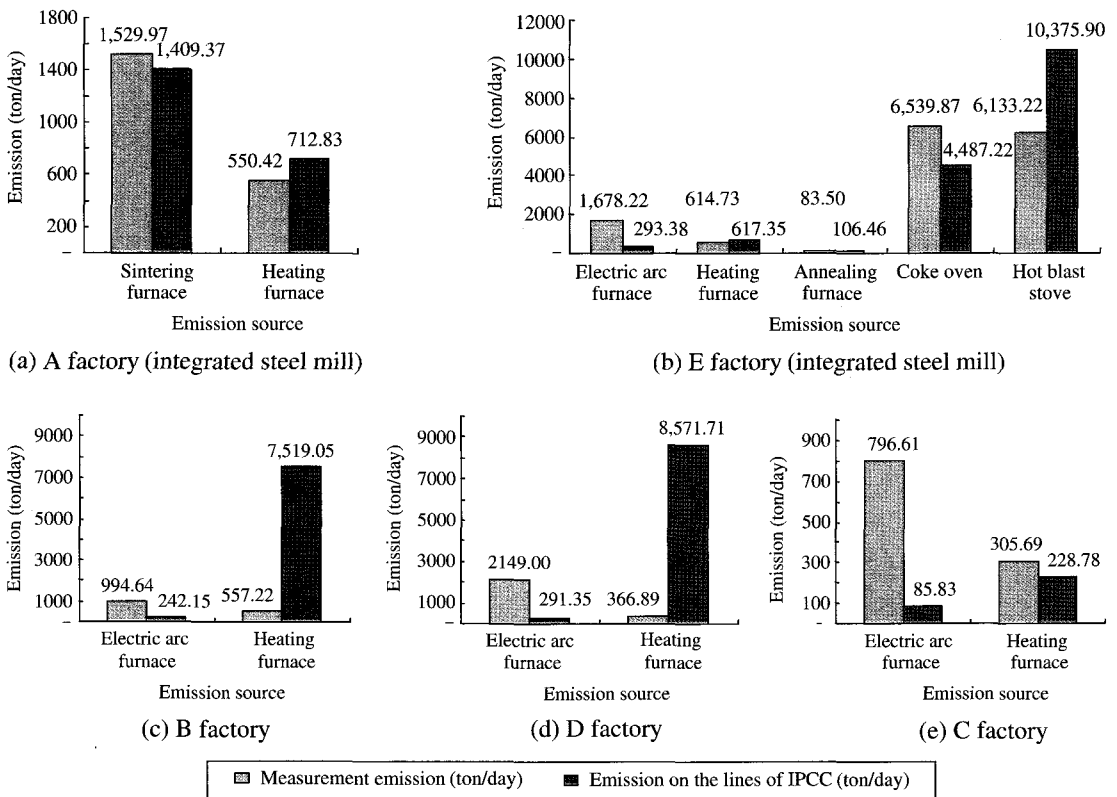


Fig. 5. Comparison of emissions for measured concentration and mini mill default (IPCC 1996).

의 값을 가지는 것으로 나타났으며, 전기로는 실측 배출량이 Tier 1 방식보다 더 많게 산정되었으며 가열로의 경우는 그 반대인 것으로 나타났다.

가열로 및 전기로를 제외한 대부분 시설은 제조시설에서 직접 대기 중으로 배출되는 폐가스는 없으며, 이러한 가스는 중앙 시스템에서 다시 회수하여 간접 가열을 위한 연료로써 재사용된다. 따라서 연료종류

에 의해 좌우되는 일반적인 연소 배출특성을 따르기 때문에 Tier 1과 Tier 3에 의한 배출량이 유사하게 나타난 것으로 판단된다.

또한, 일부 차이가 나는 이유는 Tier 1 방식에 의한 배출량산정은 선행된 국외연구결과를 기초한 배출계수를 그대로 사용하기 때문에, 전형적인 화석연료와는 달리 각국의 제조공정 특성에 따라 차이가 나는

Table 3. Actual CO₂ emission data calculation of each stacks in the field (Tier 3).

Factory	Stacks (Emission source)	CO ₂ ^a concentration (%)	Flux (Sm ³ /hour)	Operating time		CO ₂ emission (ton/day)
				Day (hour/day)	Year (day/year)	
A	Sintering furnace	7.29	448,926	23.8	365	1,530.0
	Heating furnace	9.15	128,136	23.9	355	550.4
B	Electric arc furnace	1.06	848,480	22	315	388.7
		0.83	760,961	24	315	297.8
		0.45	365,187	24	314	77.5
		1.09	449,079	24	314	230.8
	Heating furnace	4.11	13,098	24	341	25.4
		1.10	2,200	24	351	1.1
		7.12	158,107	24	340	530.7
C	Electric arc furnace	1.15	1,602,946	22	341	796.6
	Heating furnace, Annealing furnace	1.69	15,000	19	234	9.5
	Heating furnace	4.32	22,000	23	358	42.9
		2.45	46,000	23	358	50.9
		7.11	63,000	23	351	202.4
	D	Electric arc furnace	0.85	791,849	22	345
0.83			867,435	22	345	311.1
0.82			1,028,137	22	345	364.3
1.01			911,291	22	345	397.7
1.18			1,539,490	22	345	785.0
Heating furnace		6.88	68,148	24	345	221.0
		7.66	14,974	24	345	54.1
		4.16	6,726	24	345	13.2
		8.87	18,797	24	345	78.6
E	Electric arc furnace	1.23	1,334,136	23.6	305	760.7
		1.40	1,413,726	23.6	157	917.5
	Heating furnace	3.24	129,054	22.9	354	188.1
		3.91	116,304	22.8	353	203.7
		4.55	108,948	22.9	359	223.0
	Annealing furnace	3.83	44,904	23.4	353	79.1
		1.89	5,118	23.4	353	4.4
	Coke oven	20.08	265,200	23.9	365	2,500.0
		19.64	438,150	23.9	365	4,039.9
	Hot blast stove	21.82	284,364	23.7	365	2,888.6
		22.10	315,372	23.7	365	3,244.7

a: average

CH₄, CO₂, CO, H₂, N₂, 탄화수소, 저위발열량 등 공정 부생연료의 조성성분 및 연소특성이 고려되지 않는다. 따라서 Tier 3 방식을 이용한 배출량은 Tier 1 방식에 의한 배출량과는 차이가 발생할 수 있다.

전기로 및 가열로의 경우는 그림 5에서 보는 바와 같이 연료종류보다 제조기술과 공정특성에 의해 더 크게 변화하는 배출특성을 보였다. 전기로는 Tier 3 방식에 의한 배출량이 Tier 1 방식에 의한 배출량보다 더 많이 나타났는데, 그 이유는 원료로 스크랩을 사용함에 따른 것이다. 즉, Tier 1 방식의 배출량은 공정부생가스와 전극봉 사용량에 따른 배출량만 고려되고, Tier 3 방식은 전기로에 장입되는 스크랩(고철) 표면의 각종 유기용제와 페인트, 코팅제 등에 의한 CO₂ 배출량이 증가하게 된다. 따라서 기초 배출계수를 이용하는 Tier 1 방식과 제조공정의 운전특성이 적용되는 Tier 3 방식에 의한 배출량 차이가 크게 산정될 수 있다.

개방형 시설(open furnace)인 가열시설의 경우는 강의 형태를 물리적으로 변화시켜주기 위하여 여러 개의 버너가 일렬로 정렬되어 직접 제품을 가열해주는 시설로서 간접가열방식의 일반연소시설과는 그 차이가 상당히 크며, 이러한 시설에 대해서 공정특성이 부여되지 않은 연료별 배출계수를 적용한 Tier 1 방식의 배출량적용은 단순히 연료 종류만 배출인자로 고려되기 때문에 배출량 차이가 크게 나타난 것으로 판단된다.

앞에서 말한 바와 같이 IPCC Guideline에서는 통계자료가 불충분하게 구축되어 있는 경우를 제외하고는 Tier 2, 3 방식을 우선순위로 적용할 것을 우선 권고하고 있으며, 특히 플랜트별 실측 배출량의 경우 공정특성이 반영됨으로 기타 방법에 비해서 가장 정확한 배출량 산정이 가능한 것으로 제시하고 있다(IPCC, 2006). 본 연구의 결과, 가열로와 전기로의 경

우는 공정부생가스가 직접연소시설로 연소에 의한 CO₂가 발생한다. 따라서 Tier 1 방식의 단순연료별 배출계수를 적용할 때 보다 Tier 3 방식을 이용한 플랜트별 배출계수를 적용하는 것이 공정특성에 따른 오차를 줄일 수 있다.

3. 4 CO₂ 배출계수

국가 배출량 추정은 국내 산업 특성을 반영한 배출특성 값(시설별 배출계수, 탄소함량 등) 및 활동도의 구축이 선행되어야만 Tier 2, 3 수준의 정확하고 신뢰도가 있는 배출량 산정이 가능하게 된다.

따라서 각 나라의 배출특성 값은 현재 국가 통계자료의 구축정도와 무관할 수 없으며, 또한 미국 EPA, 유럽 CORINAIR 등에서 제시하고 있는 산업공정부분에 대한 일반 대기오염물질에 대한 배출계수 목록을 보게 되면 대부분 기술타입별 목록화가 되어있다(EPA, 2000; EEA/CORINAIR, 2002).

본 절에서는 Tier 2 수준의 배출량 산정 시에 적용할 수 있는 공정부생가스별 탄소함량, 저위발열량 등 배출특성 고유 값과 Tier 3 수준에 적용할 수 있는 시설별 배출계수 산정결과를 나타내었다.

연료 및 원료에 대한 탄소함량 및 저위발열량 등 국가 배출특성 고유 값은 현장검증을 통하여 산정하였다. 연료의 경우는 전형적인 화석연료를 제외한 공정부생가스를 대상으로 COG, BFG, LDG 가스에 대한 탄소함량 분석치, 저위발열량 등을 이용하여 이론적으로 산정하였다. 연료의 전극봉 및 원료의 경우 탄소함량은 전극봉의 경우 99%, 선철은 4.5%, 강제품은 0.26%, 철광석의 경우는 거의 없는 것으로 조사되었으며, 특히 전기로 부문의 경우 표 4에서 보는 바와 같이 원료인 스크랩 자체가 강 제품이 산화된 것이므로 제품인 제강 제품과 비교하여 탄소함량의 차이가 없는 것으로 조사되었다.

Table 4. Country-specific data for the iron and steel manufacturing process (fuel combustion sector).

Fuel	Country-specific data										CO ₂ emission factor (kg-C/GJ)	
	The chemical analysis (%)						Mass of Carbon in the fuel (kg-C/kNm ³)	Lower calorific value (kcal/Nm ³)	TOE unit (TOE/kNm ³)	Convert to GJ (GJ/TOE)	This study	IPCC
	CO ₂	CO	CH ₄	H ₂	N ₂	C-H						
COG	3	8	27	56	2	3	0.22	4,400	0.44	41.868	0.012	0.013
BFG	21	22	0	3	54	0	0.23	750	0.075	41.868	0.073	0.066
LDG	18	64	0	2	16	0	0.44	2,000	0.2	41.868	0.052	-

Table 5. Plant-specific emission factors for the iron and steel manufacturing process (technology type).

Process	Emission source	Emission (ton/day)	Activity (m ³ /day, ton/day)	Emission factor			
				This study ^a	Rating	IPCC	Unit
Integrated steel mill	Heating furnace [HF]	550.42	238,044.00	2.31E-03	B	-	CO ₂ ton/COG, BFG, LDG (m ³)
		188.09	248,694.00	8.23E-04 ± 7.02E-05	B	COG: 0.003	CO ₂ ton/COG (m ³)
		203.66	247,608.00	(7.56E-04 ~ 8.97E-04)			
		222.98	248,694.00				
	Sintering furnace	1,529.97	9,520.00	1.61E-01	B	BFG: 0.002	CO ₂ ton/COG (m ³)
		79.05	122,042.00	6.70E-04 ± 3.15E-05	B		CO ₂ ton/COG (m ³)
	Annealing furnace [AF]	4.45	6,423.00	(6.48E-04 ~ 6.92E-04)			
		2,888.57	3,551,208.00	8.33E-04 ± 2.86E-05	B	B-C oil: 3.175	CO ₂ ton/COG, BFG (m ³)
	Hot blast stove	3,244.65	3,799,821.00	(8.13E-04 ~ 8.54E-04)			
		4,039.87	3,049,640.00	1.32E-03	B	LNG: 3.038	CO ₂ ton/BFG (m ³)
	Coke oven	2,500.00	125,355.50	1.99E-02	B		CO ₂ ton/ COG (m ³)
		1,678.22	5,333.60	3.15E-01	B		CO ₂ ton/ steel products (ton)
Electric arc furnace	42.94	7.24	4.89E+00 ± 1.06E+00	B		CO ₂ ton/B-C oil (ton)	
	50.92	9.92	(3.84E+00 ~ 5.93E+00)				
Heating furnace	202.37	52.76					
	366.90	2,821.50	1.71E-01 ± 6.72E-02	B		CO ₂ ton/LNG (ton)	
HF, AF	557.21	2,475.00	(1.30E-01 ~ 2.25E-01)				
	9.46	2.23	4.24E+00	B		CO ₂ ton/B-C oil (ton)	
Electric arc furnace	311.13	1,998.43	7.38E-02 ± 9.69E-02	B	0.001 ~ 0.0015	CO ₂ ton/steel products (ton)	
	364.33	2,452.35	(1.05E-02 ~ 2.52E-01)				
	397.75	2,025.05					
	785.03	3,528.05					
	308.23	28,404.54					
	388.66	36,929.32					
	297.75	25,779.79					
	796.61	3,167.16					
	290.86	1,505.84					

a. geometric average ± std.

각 공정에 대한 시설별 CO₂ 배출계수는 사업장의 현장 실측자료를 토대로 산정되었고, 연구방법의 배출계수 산정식에 나타나 있는 것처럼 유량과 농도를 통한 배출량과 활동도가 중요한 인자임을 확인할 수 있으며 이를 배출계수와 함께 표 5에 나타내었다. 참고로 해당 배출원에 대한 IPCC Guidelines의 배출계수도 함께 나타내었다(IPCC, 1996).

철강부분의 경우 일관제철과 일반 제강공정은 부생가스의 활용 등 그 차이가 크기 때문에 구분하여 배출계수를 산정하였다. 일관제철의 경우 CO₂ 배출량은 전기로에서 강(steel) 제품 1ton 생산량 당 0.315 ton을 배출하는 것으로 가장 크게 나타났으며, 반면 COG 가스를 사용하는 소둔로에서 연료 1m³ 사용량 당 0.0006 ton을 배출하는 것으로 가장 작게 산정되었다.

고로공정이 없는 일반 제강공정의 경우 전기로에서 강(steel) 제품 1ton 생산량 당 CO₂ 0.0738 ton을 배출하는 것으로 가장 작게 산정되었고, B-C유를 사용하는 가열로에서 연료 1ton 사용량 당 4.89 ton이 배출하는 것으로 가장 크게 나타났다.

IPCC와 본 연구의 실측에 의한 배출계수는 기본적으로 전자의 경우 배출원에 상관없이 적용되는 Tier 1 수준의 연료별 배출계수이고 본 연구는 Tier 3 수준의 기술형태별 배출계수이므로, 대체적으로 IPCC에서 제시하는 배출계수가 본 연구 결과의 중간 값을 가지는 것으로 나타났다. 시설별 배출계수와 IPCC의 연료별 배출계수를 비교해 볼 때 동일 연료라 하더라도 시설별로 배출량이 차이가 남을 판단할 수 있었다. 이러한 사실은 연료에 의한 배출특성이 큰 영향을 미치지만, 공정시설의 종류에 의해서도 배출량이 변화될 수 있다는 점을 시사하며, 결과적으로 공정특성을 반영한 시설별 실측 배출계수가 더욱 정확한 배출량산정에 기여할 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 국내 철강산업의 특성을 반영한 Tier 2, Tier 3 수준의 배출량을 산정하기 위한 기술형태별 CO₂ 배출계수와 국가 고유 값을 개발하고자 하였다. 이를 위하여 조사대상 표본사업장 5개 업소를 선정하여 IPCC Guidelines을 참고로, 배출특성 분석,

배출특성 값 도출 및 배출계수를 최종 산정하고자 하였고, IPCC에서 제시하는 배출계수(Default Emission Factor)를 함께 비교, 평가하였다.

철강산업에 대한 CO₂ 배출특성은 일관제철의 경우 COG, LDG, BFG 등의 부생가스를 이용하여 연소를 통해 열원을 공급하고 있었으며, 주요 배출인자로 판단되었다. 전기로 및 가열로의 경우는 전극봉의 탄소함량 및 시설형식 등 공정특성에 의한 특징이 두드러졌다.

Tier 1 수준과 실측 배출량 비교는 전기로 및 가열로를 제외하고 대체적으로 유사한 수준의 값을 보였으나, 국내 산업특성에 따른 연료 조성의 차이로 인하여 일부 차이가 나타남을 확인할 수 있었다.

최종 개발된 배출계수는 일관제철에서 전기로가 강(steel) 제품 1ton 생산량 당 CO₂ 0.315 ton을 배출하여 가장 크게 산정되었고, 일반 제강공정에서 B-C 사용 가열로가 연료 1ton 사용량 당 4.89 ton으로 가장 크게 산정되었다.

이러한 연구결과를 종합하면 연소에 의해 CO₂가 배출되더라도 공정부생가스와 같은 공정특성과 밀접한 관계가 있는 경우 외국지침의 자료를 사용하게 되면 배출량 오차가 발생할 것으로 판단되었다. 특히 공정특성이 직접 CO₂ 배출에 큰 영향을 끼치는 전기로 및 가열로와 같은 시설은 기술형태별 배출계수를 적용하여 Tier 3 수준의 배출량으로 산정하는 것이 더 정확한 산정을 위해 중요한 것으로 판단되었으며, 같은 연료를 사용하는 시설의 경우라도 제조방식 등 공정특성에 따라 배출량 차이가 남을 확인할 수 있었다.

본 연구에서 개발한 Tier 3 방식의 CO₂ 배출량 산정에 적용할 국가 배출특성 고유 값은 현재 온실가스배출량 산정에 필요한 기초 자료의 통계구축이 개선되어야 적용이 용이한 상태이다. 하지만 향후 국가 배출량의 해상도를 높이기 위해 산업공정별 CO₂ 발생량에 대한 연구가 계속되어야 할 것으로 판단되며, 더불어 배출계수에 적용이 가능한 활동도 자료의 사용도 구축되어야 할 부분이다.

감사의 글

본 연구는 차세대 핵심환경기술개발사업 중 “환경

부문 온실가스 배출량 inventory 작성 및 배출계수 개발”의 일환으로 수행되었습니다. 연구비를 지원하여 주신 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 국립환경연구원 (2004) 대기배출원조사자료 (Source Data Management, SODAM).
- 석광설, 방선애, 홍지형, 이석조, 김대근, 이대균, 허정숙, 이은정 (2004) 철강산업 용용로의 대기오염물질 배출계수 산정 연구, 한국대기환경학회지, 20(4), 571-578.
- 에너지관리공단(1998) 온실가스 배출량 산출 지침, 1-14.
- 에너지관리공단(2005) 업종별 기업 온실가스 배출량 산출 지침 및 양식개발 용역 보고서, 7-9, 20-23, 47-49, 53-62.
- 한국철강신문(2001) 중급철강지식, 14-20.
- 허정숙, 이덕길, 홍지형, 석광설, 이대균, 엄윤성 (2002) 새로운 대기오염물질 배출원 분류체계에 관한 제언, 한국대기환경학회지, 18(3), 231-245.
- 환경부(2001) 대기오염물질 배출사업장에서의 이산화탄소 배출량 산정, 68-70.
- 환경부(2005a) 배출권거래제 시범사업 기반구축을 위한 연구, 13-33.
- 환경부, 국립환경연구원(2005b) 대기 Inventory 작성과 배출계수 개발 및 오염배출량 산정연구, 7-78, 450-505.
- European Environment Agency, CORINAIR (2002) Emission Inventory Guidebook, 3rd Edition. Background 1-2, 6-12.
- International Panel on Climate Change (1996) Greenhouse Gas Inventory Reference Manual (Revised), v.3. 2.27-2.32.
- International Panel on Climate Change (1996) Greenhouse Gas Inventory Workbook (Revised), 2, 2.25-2.29.
- International Panel on Climate Change (2001) Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories, 3.10-3.30.
- International Panel on Climate Change (2006) 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, 4.8-4.31.
- U.S. Environmental Protection Agency (2000) Compilation Air Pollutant Emission Factors, AP-42, Volume 1: Stationary Point and Area Sources, Fifth Edition, 1-10.
- World Resources Institute/World Business Council for Sustainable Development (2001) The Greenhouse Gas Protocol-a Corporate Accounting and Reporting Standard, 2-43.
- World Resources Institute/World Business Council for Sustainable Development (2004) The Greenhouse Gas Protocol-a Corporate Accounting and Reporting Standard (revised edition), 2-23.