

## 유리 제조 산업분야의 온실가스 배출량 산정식 개발에 관한 연구(I)

정진도 · 고병수\* · 김장우\*\* · 채수조\*\* · 구경완\*\*\* · 황승민\*\*\*\*

호서대학교 환경공학과, \*호서대학교 대학원 환경공학과(현 동우화인켐(주)),

\*\*호서대학교 디스플레이공학부, \*\*\*호서대학교 국방과학기술학과

\*\*\*\*호서대학교 벤처전문대학원

(2008년 7월 21일 접수; 2008년 11월 12일 수정; 2009년 4월 14일 채택)

## A Study on the Development of Equation from Calculation about Emissions of Greenhouse Gases in Glass Manufacturing Industries

Jin-Do Chung, Byong-Su Ko\*, Jang-Woo Kim\*\*, Soo-Joh Chae\*\*,  
Kyung-Wan Koo\*\*\* and Seung-Min Hwang\*\*\*\*

*Department of Environment Engineering, Hoseo University, Chungnam 336-795, Korea*

*\*A Graduate student at Department of Environment Engineering, Hoseo University, Chungnam 336-795, Korea*

*\*\*School of Display Engineering, Hoseo University, Chungnam 336-795, Korea*

*\*\*\*Department of Defense Science & Technology, Hoseo University, Chungnam 336-795, Korea*

*\*\*\*\*Graduate School of Venture, Hoseo University*

(Manuscript received 21 July, 2008; revised 12 November, 2008; accepted 14 April, 2009)

### Abstract

The aim of this study is investigated greenhouse gas emissions of glass industry, and when calculates greenhouse gas emission, using formula(Tier 3) advising in IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change) and using self designed formula(Tier 3+) authors of this study. Studied to propose calculation formula that can compare these two calculation results and apply to domestic. Formula of Tier 3 calculated to theoretical composition of carbonate material, And Formula of Tier 3+ calculated on the basis of chemical substance formation table that get from glass manufacture company(The S company). As a result, Dolomite, Soda ash, Limestone, Industrial Barium carbonate is calculated value of Tier 3+ lower than value of Tier 3, And Industrial Potassium carbonate, Industrial Strontium carbonate was calculated value of Tier 3 lower than value of Tier 3. This study finding, formula of Tier 3+ has higher confidence than formula of Tier 3 when consider revision about purity of injection raw material. And hereafter, When calculate greenhouse gas emissions about nonmetallic mineral industry, use of Tier 3+ is considered that should be encouraged.

**Key Words** : Glass industries, Greenhouse gases, Calculation formula, IPCC, Emission factor

### 1. 서론

인류는 화석연료의 사용으로 대량생산과 소비가 가능해졌고, 동시에 급격한 경제발전을 도모할 수

있었다. 그러나 무분별한 화석연료의 사용은 CO<sub>2</sub> 등과 같은 지구온난화의 원인인 온실가스 배출을 증가시켰고, 이것이 인류에게 미치는 악영향에 대하여 더 이상 묵과할 수 없는 상황에 도달했다. 따라서 온실가스로 인한 지구기후의 변화에 대하여 과학적인 논의가 활발히 진행되었고 기후변화협약에 관한 관심도 집중되기 시작하였다<sup>1,2)</sup>.

IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change : 기후변화협약에 관한 정부간 협의체)는 온실가스 배출원 중 많은 부분을 차지하고 있는 산업분야에 대하여 3가지(Tier 1,2,3)의 온실가스 배출량 산정식을 제안하고 있으며, 가능한 한 국가별 특성을 고려한 고유 온실가스 배출계수를 사용하여 신뢰도 높은 온실가스 배출량산정을 권장하고 있다<sup>3)</sup>.

Table 1과 Fig. 1에 우리나라의 에너지 다소비 업종(철강, 석유화학, 비금속광물산업 등)과 그 규모를 나타내었고 이 업종들은 2006년 기준 우리나라 전체 산업대비 에너지 소비 비중이 70.8%에 달한다. 이 업종들 가운데 유리산업은 3대 에너지 다소비 업종 중 비금속광물산업에 포함되어 있다.

국내 유리산업의 하위 업종들을 Fig. 2에 나타내었고 이 업종들 가운데 판유리와 유리섬유, 용기유리 및 디스플레이 유리 기판의 수요는 계속 증가하는 추세이다. 유리 제조 산업은 용융공정과 서냉공정에서 화석에너지를 주 연료로 사용함으로써 온실가스가 발생되고, 용융공정상에서는 투입원료에 포

함된 탄산염광물의 열분해로 CO<sub>2</sub>가 발생된다. 유리 사용 수요의 점진적인 증가에 따라 생산량도 증가하고 있으며, 그로 인한 온실가스 배출도 증가추세에 있다고 볼 수 있다. 그럼에도 불구하고 비금속광물산업의 온실가스 배출 및 감축에 관한 연구는 시멘트 산업에만 편중되어 있고 유리 제조 산업에 대한 연구는 미진한 실정이다<sup>4)</sup>.

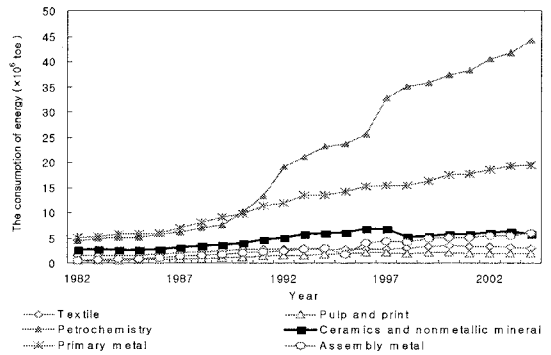


Fig. 1. The consumption of energy by domestic industry sectors<sup>4)</sup>.

따라서 본 연구는 유리산업의 온실가스 배출량 산정에 관한 연구에 일환으로써 국내 유리산업을 대상으로 온실가스 배출공정을 규명하고, IPCC의 산정식(Tier 3)에서 고려되지 못하여 발생하는 오차 부분을 자체 개발한 수정식(Tier 3+)에서 보완하여 온실가스 발생량을 산정하였다.

Table 1. High level energy consumption list of domestic industry sectors<sup>3,5)</sup>

Category of industry	Products by category
Pulp, print	Paper and paper products
	Printing and publishing
Petrochemistry	Petroleum and coal mining products
	Industrial compound product
	medicine and cosmetic products
	Miscellaneous chemical products
	Rubber products
	Plastic products
Ceramics and nonmetallic mineral	Glass and glass products
	Pottery and porcelain products
	Miscellaneous Ceramics and nonmetallic mineral products
Primary metal	Iron and steel products
	Nonferrous metal products

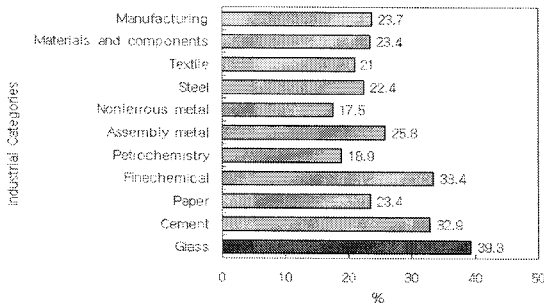


Fig. 2. Divisions of domestic nonmetallic mineral industry.

## 2. 이론적 배경

### 2.1. 대상 영역 설정

사업장내 온실가스 배출원은 크게 직접 배출원과 간접 배출원으로 대분되어지며, 직접 배출원은 기업이 소유하고 통제하는 온실가스 발생원에 의한 배출을 의미하며, 이는 제품의 제조에 필요한 에너지(열, 스팀, 전력) 생산을 위해 사용된 연료의 연소에 의한 고정연소와 운송수단에 사용된 연료에 의한 이동연소, 공정상 화학반응의 부산물에 의한 공정배출과 중간생성물의 파이프라인을 통한 운반 또는 에어컨 등의 냉매장치에서 발생하는 탈루배출로 구분할 수 있다. 또한 간접 배출원은 기업에서 사용을 위해 구입한 전력 및 스팀을 생산할 때 발생하는 온실가스의 배출을 말한다<sup>3)</sup>.

본 연구에서는 사업장의 생산 활동과 직접 관련이 있는 직접배출원 중 공정배출을 중심으로 연구하였고, 이는 공정배출에 의한 온실가스 발생량이 현저히 높기 때문이다.

### 2.2. 국제 산정방법론

IPCC에서는 3가지 산정방법론을 제안하고 있으며 각 방법론의 다음과 같다.

Tier 1은 사용된 연료의 형태와 그에 따른 배출계수를 사용하여 산정하는 방법이고, Tier 2는 일반적으로 알려진 연료의 형태 및 연소의 형태에 의한 대표적인 배출계수를 사용하여 산정하는 방법이다. Tier 3는 Tier 2를 토대로 산정과정에 대한 변수들을 구체적으로 고려하는 방법으로써 주로 측정에서 얻어지는 데이터를 이용하여 산정하는 방법이다.

## 3. 배출량 산정방법

### 3.1. 유리 제조 공정도

유리 제조 공정은 제조되는 유리 종류에 따라 투입되는 원료나 각 공정의 공법은 차이를 보이나 Fig. 3과 같이 전형적인 단계를 보인다.

원료물질 투입된 후 일반적으로 용융, 성형, 서냉, 검사, 포장의 공정을 거친다. 용융공정은 각각의 필요한 유리 원료를 평량하여 약 1600℃정도에서 용융시켜 유리 내부의 기포와 불순물을 제거하는 단계이며 화석에너지를 주 연료로 사용하고 이 때 온실가스가 발생된다. 성형공정은 용융공정에서 용융된 유리물을 생산하고자 하는 제품의 형태로 가공하는 단계이다. 또한 서냉(Annealing)공정은 유리내의 응력을 제거하고, 유리가 급격한 온도의 하락으로 인해 깨지거나 뒤틀리지 않도록 서서히 식혀주는 역할을 하고 검사공정은 서냉공정을 통과한 유리제품에 대하여 합격 또는 불합격 등을 판정하며 불합격된 유리는 파유리(Cullet) 시설로 보내져 초기의 용융공정으로 재투입되며 이 투입원료에 포함된 탄산염광물의 열분해로 CO<sub>2</sub>가 발생된다. 이후 유리는 포장공정으로 옮겨져 제품으로써 출하하게 된다.

### 3.2. 공정배출원의 배출량 산정

공정배출원은 주 배출원과 부 배출원으로 분류할 수 있고 데이터 보유형태에 따라 Fig. 4의 알고리즘에 의해 산정방식을 선택할 수 있다.

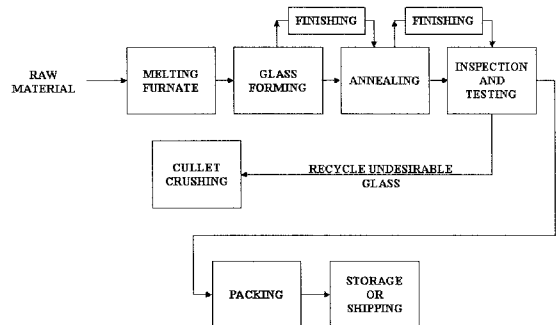


Fig. 3. General process of glass manufacture<sup>6)</sup>.

주 배출원은 원료물질에 포함된 탄산염이 용융되면서 열적 분해가 이루어지며 이때, CO<sub>2</sub>의 형태로 방출되는 배출원을 의미하며, 주요 기인 물질은 Dolomite, Soda ash, Limestone, Barium carbonate,

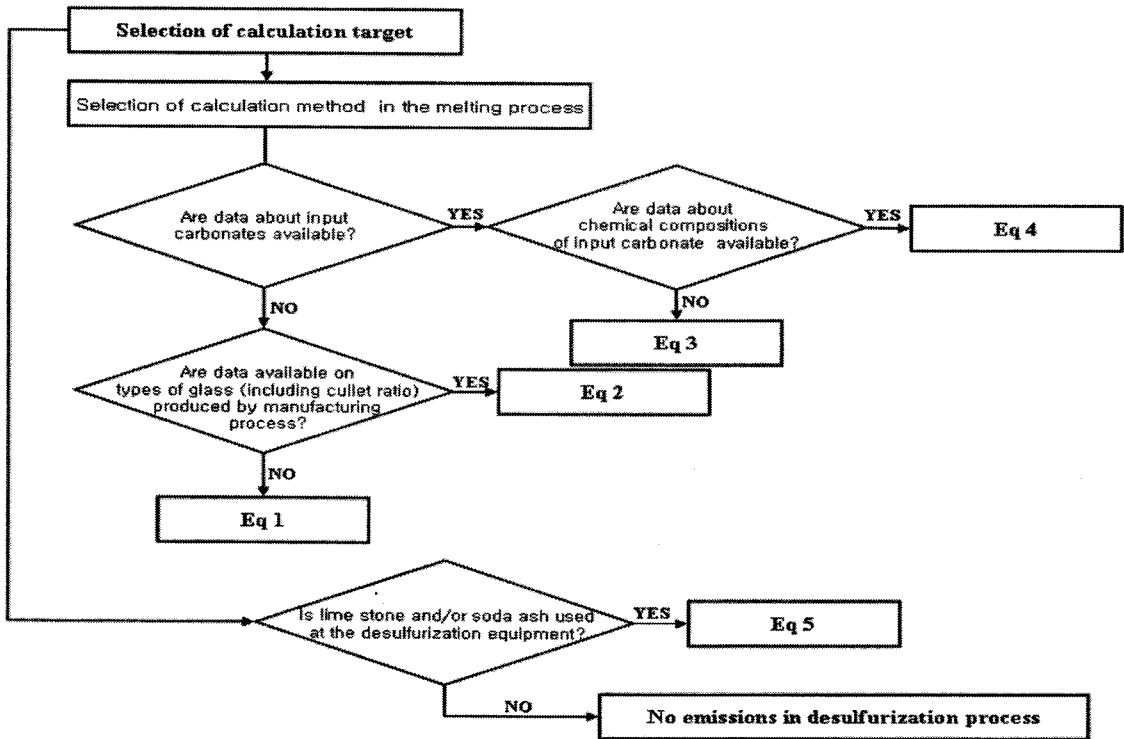
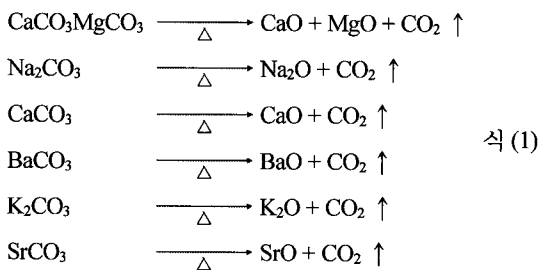


Fig. 4. Algorithm to calculate process emissions.<sup>3)</sup>

Potassium carbonate, Strontium carbonate 등이 있다. 식 (1)은 기인 물질별 CO<sub>2</sub>가 방출되는 과정을 나타낸 열분해식이다. Table 2와 같이 국제지침의 산정식(Tier 1,2,3)과 자체개발한 수정식(Tier 3+)을 이용하여 배출량을 산정할 수 있다.

부 배출원은 대표적인 탈황공법인 석회석 세정법(Limestone scrubbing)<sup>7)</sup>과 알칼리 세정법(Alkali scrubbing)<sup>7)</sup>에서 사용되는 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>나 CaCO<sub>3</sub>로부터 CO<sub>2</sub>가 방출되는 배출원을 말하며, 이들은 Table 2와 같이 배출량을 산정할 수 있다.



Tier 1은 유리의 종류 또는 투입원료의 자료와 무관하게 IPCC에서 권고하는 배출계수 0.167 tonnes CO<sub>2</sub>/tonne glass에 유리 생산량과 재투입되는 파유리(Cullet)를 고려하여 산정하는 방식으로 배출량(t CO<sub>2</sub>e/yr) = (유리 생산량 × 배출계수) × (1- Cullet 투입비율)의 식으로 나타내고 산정된 양은 신뢰도가 낮아, 국내 유리 제조 산업에는 사용을 지양해야 할 것으로 사료된다.

Tier 2는 유리제품의 종류별 배출계수를 사용하여 산정 하는 방법으로 배출량(t CO<sub>2</sub>e/yr) = ∑{(유리 생산량 × 배출계수) × (1- Cullet 투입비율)}의 식으로 나타내며 Table 3와 같이 IPCC에서 제시한 파유리(Cullet)의 투입범위에 따른 배출계수의 적용을 권하고 있으나, 이 방법은 파유리(Cullet) 투입범위 밖의 경우는 고려되지 않았고, 투입원료의 종류에 따라 동일 제품이라도 CO<sub>2</sub> 발생량이 변하므로 신뢰성 있는 온실가스 산정에는 무리가 따른다고 판단된다.

**Table 2.** Formula for calculation of process emissions

Tier 1	Emission(t CO <sub>2</sub> e/yr <sup>*</sup> ) = (amount of glass production×emission factor) × (1-Cullet injection ratio) .....(Eq. 1)
Tier 2	Emission(t CO <sub>2</sub> e/yr) = ∑{(amount of glass production × emission factor) × (1-Cullet injectionratio)} .....(Eq. 2)
Main Tier 3	Emission(t CO <sub>2</sub> e/yr) = ∑(injection of carbonate material × emission factor×calcine ratio) .....(Eq. 3) emission factor = molecular weight of CO <sub>2</sub> / molecular weight of carbonate material .....(Eq. 3-1)
Tier 3+	Emission(t CO <sub>2</sub> e/yr) = ∑[injection of carbonate material × {∑(ratio of alkali & alkaline earth metal oxide in carbonate material × emission factor)}]. .....(Eq. 4) emission factor = molecular weight of CO <sub>2</sub> / molecular weight of alkali & alkaline earth metal oxide .....(Eq. 4-1)
Sub emission	Emission(t CO <sub>2</sub> e/yr) = consumption of Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> or CaCO <sub>3</sub> (t/yr) × (molecular weight of CO <sub>2</sub> /Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> or molecular weight of CaCO <sub>3</sub> ) × (purity of Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> or CaCO <sub>3</sub> (%) / 100 .....(Eq. 5)

※ t Co2e/yr : ton CO<sub>2</sub> emission / year

**Table 3.** Default emission factors and cullet ratios for glass manufacture<sup>8)</sup>

Glass Type	CO <sub>2</sub> Emission Factor	Cullet Ratio
	(kg CO <sub>2</sub> /kg glass melted)	%
Float	0.21	10% - 25%
Container (Flint)	0.21	30% - 60%
Container (Amber/Green)	0.21	30% - 80%
Fiberglass (E-glass)	0.19	0% - 15%
Fiberglass (Insulation)	0.25	10% - 50%
Specialty (TV Panel)	0.18	20% - 75%
Specialty (TV Funnel)	0.13	20% - 70%
Specialty (Tableware)	0.10	20% - 60%
Specialty (Lab/Pharma)	0.03	30% - 75%
Specialty (Lighting)	0.20	40% - 70%

Tier 3는 IPCC에서 권고하는 산정방법 중 신뢰도가 가장 높은 방법이라 할 수 있으며 배출량(t CO<sub>2</sub>e/yr) = ∑(각 탄산염물질 투입량 × 하소비율)의 식으로 나타내고 배출계수는 CO<sub>2</sub>의 분자량 / 각 탄산염 물질의 분자량으로 나타낸다. 이 식에 나타내어진 하소비율은 어떤 물질을 고온으로 가열하여 그 휘발성분의 일부 또는 전부를 제거하는 조작으로써 이를 백분율로 표시한 것을 의미한다. 이 방법은 원료 중 탄산염물질을 구별하여 각각 탄산염물질의 양과 배출계수 및 하소비율을 적용하여 얻어

진 각 물질의 값을 더하여 산정한다. 탄산염 물질의 하소비율 자료가 없을 때는 비율을 100%로 적용하여 산정한다. 이러한 Tier 3는 탄산염물질에 포함된 불순물과 천연광물의 물성 조성비 차이에 대한 고려가 없어 이로 인한 오차가 발생할 수 있다<sup>3)</sup>.

Tier 3+는 불순물과 천연광물의 물성 조성비 차이를 고려하여 산정한 방법으로써 배출량(t CO<sub>2</sub>e/yr) = ∑(각 탄산염 물질 투입량 × {∑(각 탄산염물질의 화학조성 중 알칼리토금속 산화물의 각 비율 × 배출계수)의 식으로 나타내고 배출계수는 CO<sub>2</sub>의 분자량 / 각 알칼리 금속 및 토금속 산화물의 분자량으로 나타낸다. Tier 3+는 Tier 3의 단점을 보완한 산정식이며 이 방법은 원료로 사용되는 탄산염물질이 100% 동일 물성으로 구성되어 있지 않고 소량의 불순물이 함유되어 있으므로 순수한 물질로 규정할 수 없다는 판단 하에 고안된 산정식이다. 본 연구에서 고안한 산정식 Tier 3+는 기업에서 요망하는 유리의 성분을 얻는데 사용되는 투입원료의 화학물질 조성표를 토대로 산정하며, 이는 알칼리 및 알칼리토금속의 산화물이 탄산염물질만의 열분해에 의해 생성된다는 가정 하에 식 (1)로부터 계산된 CO<sub>2</sub>의 화학 양론적 발생량을 고려하여 이루어진 것이다<sup>3)</sup>.

**Table 4.** Chemical compositions of carbonate materials in the glass manufacture(S-company)<sup>3)</sup> [unit : wt%\*]

Raw materials	SiO <sub>2</sub>	AlO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	MgO	CaO	BaO	SrO	Ignition loss
Dolomite	0.01	0.04	-	-	22.33	29.95	-	-	47.67
Soda ash	-	-	57.89	-	-	-	-	-	42.11
Limestone	-	0.07	-	-	0.75	53.84	-	-	45.34
Industrial Barium carbonate	-	-	-	-	-	0	75.40	1.15	23.45
Industrial Potassium carbonate	-	-	0.26	67.95	-	-	-	-	31.79
Industrial Strontium carbonate	-	-	-	-	-	-	7.93	68.03	24.04

\* wt% : mass percentage

**Table 5.** Calculation result of emissions CO<sub>2</sub> per raw materials<sup>3)</sup>

Raw materials	Calculation result	
	Tier 3	Tier 3+
Dolomite	0.477	0.479
Soda ash	0.415	0.411
Limestone	0.440	0.431
Industrial Barium carbonate	0.223	0.221
Industrial Potassium carbonate	0.318	0.319
Industrial Strontium carbonate	0.298	0.312

#### 4. 결과 및 고찰

본 연구에서는 유리산업에서만 배출되는 공정배출원에 대하여 IPCC에서 제안하고 있는 산정식 중 가장 신뢰성이 높은 Tier 3산정식과 자체 개발한 수정식(Tier 3+)을 이용하여 각각 산정하고 비교하였다.

Tier 3에 의한 배출량 산정은 표준물질의 이론적인 조성으로 가정하여 산출하였다. Tier 3+에 의한 배출량 산정은 현재 가동 운영 중에 있는 유리 제조 회사(S社)로부터 실제 투입되는 원료의 화학물질 조성표를 토대로 산정하였으며, 산정에 사용된 화학물질 조성표는 Table 4와 같다. 또한 알칼리 금속 및 토금속의 산화물이 탄산염물질만의 열분해에 의해 생성된다는 가정 하에 산정하였다. Table 5는 Tier 3와 Tier 3+의 두 방법을 각각 이용하였을 때 얻어진 산정량을 비교한 것으로써 두 식에 공통으로 고려하는 탄산염물질 투입량을 1로 하고, 산정량과 배출계수의 비교를 위하여 질량단위는 생략하였

다. 그 결과 Table 5의 값들을 얻을 수 있고 Tier 3보다 Tier 3+의 값이 더욱더 국내 유리산업분야의 온실가스 배출량산정에 적합한 값을 보여주고 있는 것을 알 수 있으며 향후 유리산업분야뿐만이 아니라 탄산염광물이 사용되어지는 타 금속광물산업에도 Tier 3+의 값을 이용하여야 할 것으로 판단된다.

#### 5. 결 론

본 연구에서는 국내 유리산업을 대상으로 온실가스가 배출되는 공정을 규명하고 유리 제조 산업의 공정배출원인 용융공정에 대하여 IPCC에서 권장하는 산정식(Tier 3)과 자체 개발한 수정식(Tier 3+)을 이용해 각각 산정하여 국내실정에 적합한 신뢰성 있는 산정식을 제안하고자 연구하였다. 연구결과는 다음과 같다.

1) 국내 유리 산업의 유리 제조 공정을 조사한 결과, 공정마다 공법의 차이는 있으나 제조 공정의 흐름은 국내의 경우 유사하였고 직접배출원(고정연소, 공정배출, 이동연소, 탈루배출)은 모두 같았으며, 유리 제조 공정으로부터 발생가능한 온실가스는 CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O로 조사되었다. 또한, 공정배출은 유리제조시 용융촉진과 유리안정화를 위해 사용되는 알칼리 산화물 및 알칼리토금속산화물을 얻기 위해 투입되는 탄산염물질이 열분해하면서 발생된다.

2) Tier 3와 Tier 3+의 두 산정식을 비교해보면, Tier 3는 단순히 탄산염물질이 하소된 비율과 불순물이나 기타 광물질의 포함을 고려하지 않고 얻어진 배출계수를 이용하여 온실가스 배출량을 산정한 것이고 Tier 3+는 불순물이나 기타 광물질의 포함을

고려하여 얻어진 배출계수와 실제 기업에서 보유하고 있는 탄산염물질의 화학조성 중 알칼리 및 알칼리토금속 산화물의 각 비율을 고려하여 산정한 것이다. 이것은 원료로 투입되는 탄산염물질의 순도에 대한 보정을 고려하므로 신뢰성이 높다고 이론상 판단할 수 있다. 따라서 유리 제조 산업의 공정배출원으로부터 발생하는 온실가스 배출량을 산정할 때는 본 연구에서 고안한 Tier 3+의 방법을 사용하는 것이 가장 타당하다고 사료되고, 이는 유리 제조 산업뿐만 아니라 탄산염광물이 사용되어지는 타 금속광물산업의 온실가스 발생량 연구에도 큰 도움이 될 것으로 기대된다.

### 감사의 글

본 연구는 2007년도 호서대학교 교내연구비의 지원(2007-0389)으로 수행되었습니다. 관계자 여러분께 감사의 말씀을 드립니다.

### 참고 문헌

- 1) Lim J. G., Kang Y. Y., 2000, Domestic industrial structure of Climate Change and international comparative power effect of Climatic Change, Korea Institute of Energy Research, 1(5).
- 2) Song H. D., Hong J. H., Um Y. S., Lee S. B., Kim D. G., Kim J. S., 2007, A study on the estimation of emission factors for greenhouse gas(CO<sub>2</sub>) in cement industry, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 23(2), 158-168.
- 3) Ko B. S., 2007, A study on the estimation of calculation guideline about emissions of greenhouse gases in glass manufacturing industries, Department of Environment Engineering, Hoseo University, Asan.
- 4) Song H. D., Hong J. H., Um Y. S., Lee S. B., Kim D. G., Kim J. S., 2006, A study on the estimation of emission factors for greenhouse gas(CO<sub>2</sub>) in cement industry, Proceeding of the 43rd meeting of KOSAE, Korean Society for Atmospheric Environment, 89.
- 5) Yoo D. H., 2005, Economic performance analysis of energy saving committed funds, Korea Energy Economics Institute, 32-75.
- 6) U.S. Environmental Protection Agency, 2002, Greenhouse Gases and Global Warming Potential Values, EPA.
- 7) Kenneth W., Cecil F. W., Wayne T. D., 1998, Air Pollution Its Origin and Control, Pearson Education, Inc..
- 8) Intergovernmental Panel on Climate Change, 2006, 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, IPCC, 3.

1) Lim J. G., Kang Y. Y., 2000, Domestic industrial structure of Climate Change and international com-