

상향식 공정분석을 통한 국내 유리산업의 온실가스 인벤토리 산정*

백천현¹ · 정용주^{2†} · 유종훈¹

¹동의대학교 산업경영공학과, ²부산외국어대학교 e-비즈니스학과

Greenhouse Gas Emission Inventory Calculation of Korean Glass Industry through the Bottom-up Production Process Analysis

Chunhyun Paik¹ · Yongjoo Chung^{2†} · Jonghoon Yoo¹

¹Department of Industrial Management Engineering, Dongeui University

²Department of e-Business, Busan University of Foreign Studies

■ Abstract ■

The glass production is classified into an energy intensive industry. This study develops a systematic procedure to derive Greenhouse Gas (GHG) emission inventory for the Korean glass industry. Based on the bottom-up approach in which the energy intensity in each production process is characterized, the EBs (energy balances) of glass production processes are derived. And the GHG emission is calculated for each of four types of glasses-flat glass, container glass, fiber glass, and LCD glass.

Keywords : Greenhouse Gas, Bottom-up Process Analysis, Glass Industry

논문접수일 : 2015년 01월 19일 논문게재확정일 : 2015년 02월 12일

논문수정일 : 2015년 02월 10일

* 이 논문은 2013학년도 동의대학교 교내연구비에 의해 연구되었음(과제번호 2013AA127).

† 교신저자, chungyj@bufs.ac.kr

1. 서론

기후 온난화에 대처하기 위해 온실가스(GHG, Greenhouse Gas) 배출량을 감축 하고자 하는 노력이 전 세계적으로 경주되고 있다. 교토기후협약에 의해 촉발되었던 온실가스 감축정책에 대한 동력은 주요 배출국인 미국과 중국이 제외되었던 태생적인 한계와 온실가스 감축의 중심축을 이룬 EU와 일본에서의 경제위기와 원자력발전소 사고로 인해 한 때 위축되었으나, 2011년 남아공 더반에서 개최된 유엔 기후변화협약 당사국 총회를 계기로 주요 배출국인 미국과 중국을 포함한 새로운 기후변화체계의 수립이 예상되고 있다. 한편 국내에서는 2009년 2020년 배출량을 배출전망치(BAU, Business As Usual) 대비 30% 감축을 국내의 선언하고 이를 달성하기 위한 제도적인 장치로 2015년 1월 온실가스 배출거래제의 본격적인 시행을 앞두고 있다[1].

국내에서 발표하는 BAU는 유리산업과 요업산업을 별도로 구분하고 있지 않으며, 2020년 유리·요업 산업의 BAU는 5.2백만 톤 CO₂e으로, 18개의 하위부문으로 이루어지는 산업부문에서 유리/요업 부문의 BAU는 약 1.2%를 차지한다. 이 같은 BAU는 해당 부문의 최종 에너지 소비를 근거로 산정된 것으로 판단된다. 유리·요업분야는 에너지다소비 대표업종에 속하지는 않지만 제조공정 및 생산되는 제품의 특성상 에너지다소비 분야로 인식되고 있다. 따라서 EU 및 미국 등 국외에서는 최종 에너지소비를 근거로 온실가스 배출을 산정하는 국내와는 다르게 온실가스 배출 산정을 위해 공정단위 분석체계를 구축하여 활용하고 있다[17, 18]. 이러한 공정별 에너지수요 및 온실가스 배출산정 체계는 온실가스 산정 결과의 불확도(uncertainty)를 줄이고 공정/감축기술의 비용분석 등을 가능케 하여 최적화 및 시뮬레이션 도구를 활용해 국가 온실가스 배출 및 감축을 시나리오를 통합적으로 평가할 수 있게 한다[2].

유리산업에 대한 온실가스 배출에 대한 연구로는 국내 문헌[4]이 있는데, 여기에서는 IPCC 가이

드라인[15, 16]에 근거한 온실가스 배출 산정절차 및 식을 소개하고 있다. 하지만 공정분석을 통해 국내 유리산업의 온실가스 배출량 산정에 대한 연구로는 본 연구가 최초인 것으로 조사되었다. 본 연구에서는 유리제품 생산공정 분석을 통한 주요 공정별 에너지 및 원료 사용량에 기반하여 공정별 온실가스 배출량 산정을 위한 절차를 수립하고 이를 국내 유리산업에 적용하여 유리산업에서 배출되는 온실가스 배출량을 산정한다.

제 1장 서론에 이어 제 2장에서는 공정분석에 기반한 온실가스 배출량 산정을 위한 일반적인 절차와 함께 유리제품 주요 생산 공정에 대해 소개한다. 제 3장에서는 국내 대표 유리제품 생산업체의 자료를 이용해 공정별 에너지원별 에너지 사용량과 함께 공정에서 사용되는 유리제품 원료의 가공과정에서 발생하는 공정배출량에 대한 분석결과를 제시한다. 마지막으로 제 4장에서는 본 연구의 의의와 함께 추후 연구 과제를 제시한다.

2. 공정분석에 의한 배출량 산출 절차 및 유리 생산공정

2.1 공정분석에 의한 배출량 산정절차

온실가스 배출원은 크게 고정연소 배출, 공정배출 및 이동연소 배출로 구분된다. 본 연구에서는 이동연소 배출을 제외한 두 가지 배출원만을 대상으로 한다. 고정연소 배출은 공정과 관련된 활동에 수반되는 에너지연소에 의해 발생하는 온실가스(CO₂e)배출을 의미한다.

공정단위 분석체계에서는 특정 산업분야의 제품 한 단위(예 : 톤(ton))를 생산하는데 관계되는 공정을 단계별로 구분하고, 각 공정에 투입되는 물질(material) 및 에너지의 종류 및 양이 구해진다. 공정 j 에서 에너지 i 의 투입량은 A_{ij} (toe/ton)가 되며 여기에 에너지 i 의 온실가스 배출계수 e_i (tCO₂e/toe)를 곱하면 공정 j 에서 에너지 i 에 의한 연료연소(fuel combustion) 배출량(tCO₂e/ton)이 구해진다. 따라서

공정 j 에서 발생하는 총 연소 배출량은 $\sum_i A_{ij}e_i$ 가 된다. 한편 공정배출(process emission)은 에너지연소가 공정에 투입된 원료물질이 변환되는 과정에서 수반되는 화학작용에 의한 배출을 의미하며, 공정배출을 유발하는 원료물질의 종류 및 양에 의해 결정된다. 유리부문에서는 이러한 공정배출을 유발하는 원료물질이 사용되는 경우가 많아 온실가스 배출량 산정 시 공정배출이 고려되어야 한다.

<그림 1>은 연소 배출량 산정과 관련된 공정별 에너지원별 배분구조를 보여주고 있다. 표에서와 같이 모든 공정과 에너지 각각에 대해 A_{ij} 가 주어지면, 제품 1톤 생산에 소요되는 총 에너지량과 이때의 연소 배출량은 각각 $\sum_i \sum_j A_{ij}$ 와 $\sum_i e_i \sum_j A_{ij}$ 이 된다. 따라서 연간 제품생산량을 $d(\text{ton})$ 라고 하면, 공정별 에너지 소모량, 에너지종류별 에너지 소모량, 총 에너지 에너지 소모량 그리고 온실가스 총 배출량 등은 다음의 식에 의해 구해질 수 있다.

$$\text{연간 에너지 } i \text{의 소모량} = d \sum_j A_{ij} \text{ (toe/yr)}$$

$$\text{연간 공정 } j \text{의 에너지 소모량} = d \sum_i A_{ij} \text{ (toe/yr)}$$

$$\text{총 에너지 연간 소모량} = d \sum_i \sum_j A_{ij} \text{ (toe/yr)}$$

$$\text{연간 온실가스 총 배출량} = d \left(\sum_i e_i \sum_j A_{ij} \right) + \text{공정배출량 (tCO}_2\text{e/yr)}$$

공정 에너지 \	1	...	j	...	K	부분합
1						$\sum_j A_{1j}$
...	
i			A_{ij}			$\sum_j A_{ij}$
...	
L						$\sum_j A_{Lj}$
부분합	$\sum_i A_{i1}$...	$\sum_i A_{ij}$...	$\sum_i A_{iK}$	$\sum_i \sum_j A_{ij}$

<그림 1> 연소 배출 산정을 위한 공정별 에너지원별 배분구조

특정 산업부문의 에너지 소모량 또는 온실가스

배출량 산정은 해당 산업에 속한 제품 모두에 대해 제품별 해당 값들을 합산하여 구할 수 있다. 위와 같이 특정 산업에 공정단위 분석을 적용하기 위해서는 산업에 속한 제품군의 분류/선정 그리고 제품별 생산량 그리고 공정별 에너지원별 에너지수요 (A_{ij})가 주어져야 한다. 그러나 국내 유리산업분야의 경우 온실가스 산정을 위한 제반 자료(특히, A_{ij})에 대한 연구가 극히 미진한 상태이다. 본 연구에서는 국가에너지총조사, 각종 통계자료 및 관련 협회 자료[3, 5-11] 등을 통해 수집된 자료를 바탕으로 국내 유리산업분야의 온실가스 배출량 산정을 위한 공정단위 분석을 수행한다.

2.2 유리제품 및 생산공정

한국표준산업분류 기준에 의하면 유리산업은 비금속광물 제조업에 속한다. 비금속광물제조업에는 「시멘트, 석회, 플라스틱 및 그 제품 제조업」, 「유리 및 유리제품 제조업」 등이 포함된다. <표 1>은 한국표준산업분류에 따른 「유리 및 유리제품 제조업」 분야에 대한 보다 구체적인 분류체계를 보여준다. 본 연구에서는 설명의 편의를 위해 「유리 및 유리제품 제조업」을 간단히 유리산업으로 지칭하기로 한다.

<표 1> 한국표준산업분류에 따른 유리산업 분류

소분류	세분류	세세분류
유리 및 유리제품 제조업 (유리)	판유리제조업	판유리제조업
	산업용유리 및 판유리 가공품 제조업	유리섬유 및 광학용 유리제조업
		판유리 가공품 제조업
		기타 산업용 유리제품제조업
	기타 유리제품 제조업	가정용 유리제품 제조업
		포장용 유리용기 제조업
기타 유리제품 제조업		

유리산업에서 생산되는 제품군은 매우 다양하다. 본 연구에서는 유리산업을 대표할 수 있는 유리제

품을 판유리(flat glass), 병유리(container glass), 유리섬유(fiber glass) 그리고 LCD 유리 등 4가지로 구분하였다. 이 같은 구분은 이들의 에너지수요가 유리산업에 차지하는 비중, 생산량자료, 공정, 그리고 에너지수요 자료 등의 획득 가능 여부와 EU 및 미국 등의 선진국 사례를 참조하여 이루어졌다[12, 13, 17].

판유리의 경우 한국표준산업분류에서와 같이 판유리제조 및 판유리가공으로 다시 구분되며 판유리가공은 복층유리, 접합유리, 강화유리, 자동차 유리 등 다양한 제품으로 세분화된다. 그런데 제품의 생산량자료 이용가능 여부, 공정의 의미 있는 차이 등을 고려할 때, 판유리제품을 보다 세분화하는 것은 분석의 어려움만 가중시키는 결과를 초래한다. 한편, 유리섬유는 장섬유와 단섬유로 나뉘지는데, 생산량자료의 구분이 가능하고 공정분석 역시 구분할 수 있으므로 유리섬유를 장섬유와 단섬유로 구분하는 것은 타당한 것으로 판단된다.

LCD 유리는 국내 기업이 세계적인 시장지배력을 가지고 있는 분야로 다른 선진국과는 다르게 국내 유리산업의 에너지수요에 적지 않은 비중을 차지하고 있다.

유리제품의 종류는 매우 다양하고 이들의 공정 또한 제품별로 다소 차이가 있다. 하지만 일반적인 유리제품의 공정을 단순화하면 <그림 2>와 같이 크게 4가지 단계로 구분할 수 있다[12, 14]. 먼저, 혼합(mixing)공정은 제품의 원료가 되는 물질들을 혼합하여 용해로(furnace)에 공급하는 공정이다. 다음으

로 용해(melting)는 용해로에 투입된 유리원료를 1400~1500℃ 이상의 온도에서 가열하여 균질한 유리물을 만드는 과정으로, 미용해물 또는 기포 등을 제거하는 청징(refining)도 용해공정에 포함된다. 용해공정은 유리제품의 생산과정 중 에너지가 가장 많이 소요되는 과정으로 온실가스 배출 산정 및 감축에 가장 주목해야 할 공정이다. 또한 용해공정에 탄산염을 포함하고 있는 유리원료가 사용되는 경우 에너지 연소에 의한 연소 배출뿐만 아니라 공정배출 역시 발생한다. 용해공정에 이은 공정이 성형(forming)이다. 이 단계의 세부공정은 유리제품의 종류에 따라 다소 차이를 보인다. 판유리(또는 LCD 유리)제품에서는 용해된 유리물을 주석조(tin bath)에 유입시켜 원하는 두께 및 사이즈의 유리형태를 만드는 과정이 성형공정에서 이루어진다. 병유리 제품에서는 노전(forehearth)에서 유리물을 일정 중량으로 적당한 유리 덩어리를 만들고, 이를 유리병 성형기에 투입하여 특정 모양의 유리병을 만든다. 유리섬유 제품의 성형공정에서는 용해된 유리물을 원심법이나 분무법을 이용해 섬유화 작업이 이루어진다.

유리제품의 성형공정 이후의 모든 공정을 총칭하여 후성형(post forming)이라고 한다. 후성형에서 이루어지는 주요 공정으로 서냉(annealing)이 있다. 서냉로(annealing lehr)에서 이루어지는 공정으로, 성형과정에서 급랭된 유리를 약 700도 정도로 유지되어 있는 로(furnace)안에 넣고 아주 천천히 온도를 낮추는데, 이 과정을 거친 유리는 투명성을 유지하면서 강한 강도를 가지게 된다. 후성형 공정에는

<표 2> 국내 유리제품 생산량

(단위 : 천톤)

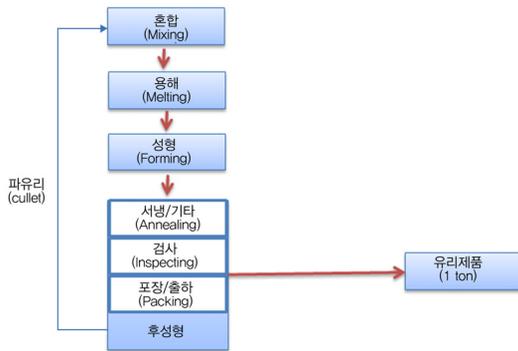
유리제품 구분	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	
판유리	1,350	1,300	1,280	1,300	1,365	1,354	1,129	1,361	
병유리	790	810	824	782	757	709	662	642	
유리섬유	장섬유	135	153	172	175	162	138	105	125
	단섬유	82	90	98	109	114	95	95	85
LCD 유리	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	85	111	148	177	

주) 제품생산량은 자료 수집기관에 따라 다소 차이가 있을 수 있음.

LCD 유리 : 두께 0.5mm, 밀도 2.54g/cm³ 가정. 국내 생산량은 최대 생산업체의 국내 시장점유율 70% 가정.

n.a. : not available.

검사/절단 등 유리제품의 상품화를 위해 필요한 일반적인 마무리 절차뿐만 아니라 제품의 특성에 따라 별도의 공정들이 포함될 수 있다. 한편, 유리제품의 경우 파유리(cullet)를 재활용함으로써 소요되는 에너지 및 온실가스 공정배출의 양을 감소시킬 수 있는데 요구되는 제품의 특성(품질)에 따라 사용 가능한 파유리비율이 제한될 수 있다.



<그림 2> 유리제품의 일반적인 제조공정

<표 3> 유리제품 종류별 성형 및 후성형 공정의 차이

구 분	성형	후 성형
판유리	주석조에서의 유리물 성형	서냉, 절단, 검사, 포장 (가공)
병유리	성형	서냉, 검사, 포장
유리섬유	섬유화 +성형	양생(curing), 검사, 포장

3. 국내 유리산업의 온실가스 배출량

3.1 유리제품별 공정별 에너지원별 Energy Balance

특정 제품 기본 단위(1톤)를 생산하는데 공정별 에너지원별로 소요되는 에너지의 양(toe/ton)(<그림 1>의 A_{ij})을 EB(Energy Balance)라고 한다. 본 연구에서는 먼저, 유리제품에 대한 국외 EB 자료를 조사하였다. 국외(미국)의 자료에는 유리제품 각각의 EB가 정기적으로 분석되고 있다[14]. 그러나

제품별로 공정별 EB(<그림 1>의 $\sum_i A_{ij}$)자료는 대부분 주어지지 않지만, 각 공정에서 사용되는 구체적인 에너지(또는 연료) 종류(즉, A_{ij})에 대한 자료는 대부분 미비한 상태다. 사실, 특정 공정에 요구되는 에너지 발열을 위해 사용되는 연료 종류는 나라 또는 기업의 기술 특성, 에너지 가격 등에 따라 달라질 수 있다. 국내 온실가스 배출량 산정에 국내 산업의 특성이 반영되지 않은 국외 EB 자료를 그대로 사용하는 것은 불확도가 높은 산정결과를 초래한다. 하지만 국내 유리산업의 경우 그동안 제품별 EB(즉, 제품 1단위 생산에 소요되는 총 에너지 수요; $\sum_i \sum_j A_{ij}$)조차도 신뢰성있는 자료가 확보되어 있지 않은 상태다. 본 연구에서는 신뢰성이 있는 유리제품별 EB를 획득하기 위해 국내 유리제품별 대표기업들의 에너지사용 자료를 분석하였다. 제품별로 대표기업 한 개 또는 복수 개의 기업 자료를 조사하였다(<표 4> 참조).

<표 4> 국내 유리제품별 EB 분석을 위한 대상업체 수

구 분	조사업체 수	시장점유율 (2007년 기준)
판유리	1	43%
병유리	4	73%
유리섬유(단섬유)	2	31%
LCD 유리	1	70%

<표 5>는 유리제품별로 <표 4>에 주어진 대표기업의 에너지사용 자료를 분석하여 산출된 제품별 EB(에너지수요; $\sum_i \sum_j A_{ij}$)이다. 이를 외국사례와 비교하면, 판유리의 경우는 제품 1단위를 생산하는데 소요되는 에너지는 외국에 비해 작은 것으로 나타났다. 그러나 병유리와 유리섬유의 경우는 외국에 비해 다소 높은 에너지가 소요되었다. LCD 유리는 외국 사례를 찾을 수 없었다.

한편, 조사기업들의 자료에는 에너지사용 현황이 공정별로 세분화되어 있지 않아 제품별 EB를 공정별로 명확히 배분하여 공정별 EB($\sum_i A_{ij}$)를 구하기에는 어려움이 있다. 다만, 유리제품 생산공정

〈표 5〉 국내 유리제품별 EB

(단위 : toe/제품 1 ton; 순발열량 기준)

구 분	2007	2008	2009	2010	국외(미국)
판유리	0.2104	0.2080	0.2206	0.2209	0.2742
병유리	0.1962	0.2020	0.2087	0.2194	0.1792
유리섬유	0.4841	0.4961	0.5060	0.4349	0.3069
LCD 유리	2.2097	1.4278	1.1106	1.0788	n.a.

주) LCD 유리의 2007 EB는 브라운관 유리 생산이 반영된 것으로 불확도가 큼.
유리섬유의 경우 단섬유 업체 조사결과임.

중 에너지가 가장 많이 소모되는 용해공정에서 사용되는 에너지원 중 전력을 제외한 에너지의 종류 및 사용량에 대한 정보는 부분적으로 파악이 가능하였다. 따라서 본 연구에서는 표본기업들의 에너지 사용 자료에 대한 분석결과와 더불어 관련 기관 및 단체의 전문가 의견을 바탕으로 공정별 에너지원별 EB(즉, A_{ij})를 유리제품별로 도출하였다. <표 6>

~<표 8>은 판유리, 병유리, 유리섬유 제품의 2007년~2010년 동안의 공정별 에너지원별 EB의 변화를 보여준다. 이렇게 연도별로 공정별 EB에서 차이가 나는 것은 연도별 제품 생산량과 생산 공정 환경 및 에너지 사용효율 등의 변화에 기인하는 것으로 판단되며, 생산공정 또는 에너지혼합(mix)의 변화에 따른 원인은 없는 것으로 파악되었다.

〈표 6〉 판유리제품의 공정별 에너지원별 EB

(단위 : toe/ton; 순발열량)

연도	에너지	혼합	용해	성형	후성형	합
2007	중유	-	0.1881	-	-	0.1881
	도시가스	-	0.0010	0.0006	0.0006	0.0022
	전력	0.0016	0.0070	0.0046	0.0058	0.0190
	기타	-	-	-	0.0010	0.0010
	합	0.0016	0.1960	0.0053	0.0074	0.2104
2008	중유	-	0.1872	-	-	0.1872
	도시가스	-	0.0010	0.0007	0.0007	0.0023
	전력	0.0015	0.0066	0.0044	0.0055	0.0179
	기타	-	-	-	0.0006	0.0006
	합	0.0015	0.1948	0.0050	0.0067	0.2080
2009	중유	-	0.1962	-	-	0.1962
	도시가스	-	0.0007	0.0005	0.0005	0.0017
	전력	0.0018	0.0079	0.0053	0.0066	0.0216
	기타	-	-	-	0.0010	0.0010
	합	0.0018	0.2048	0.0058	0.0081	0.2206
2010	중유	-	0.1992	-	-	0.1992
	도시가스	-	0.0005	0.0003	0.0003	0.0012
	전력	0.0017	0.0072	0.0048	0.0060	0.0197
	기타	-	-	-	0.0009	0.0009
	합	0.0017	0.2069	0.0051	0.0072	0.2209

〈표 7〉 병유리제품의 공정별 에너지원별 EB

(단위 : toe/ton; 순발열량)

연도	에너지	혼합	용해	성형	후성형	합
2007	중유	-	0.1132	-	-	0.1132
	도시가스	-	0.0030	0.0331	0.0070	0.0431
	전력	0.0038	0.0162	0.0162	0.0029	0.0389
	기타	-	-	-	0.0009	0.0009
	합	0.0038	0.1324	0.0492	0.0108	0.1962
2008	중유	-	0.1189	-	-	0.1189
	도시가스	-	0.0027	0.0329	0.0070	0.0426
	전력	0.0038	0.0164	0.0164	0.0029	0.0396
	기타	-	-	-	0.0009	0.0009
	합	0.0038	0.1380	0.0494	0.0108	0.2020
2009	중유	-	0.1226	-	-	0.1226
	도시가스	-	0.0029	0.0345	0.0073	0.0447
	전력	0.0039	0.0169	0.0169	0.0030	0.0408
	기타	-	-	-	0.0005	0.0005
	합	0.0039	0.1425	0.0514	0.0108	0.2087
2010	중유	-	0.1292	-	-	0.1292
	도시가스	-	0.0022	0.0356	0.0075	0.0454
	전력	0.0043	0.0184	0.0184	0.0032	0.0442
	기타	-	-	-	0.0005	0.0005
	합	0.0043	0.1498	0.0539	0.0113	0.2194

〈표 8〉 연도별 유리섬유제품의 공정별 에너지원별 EB

(단위 : toe/ton; 순발열량)

연도	에너지	혼합	용해	성형	후성형	합
2007	중유	-	0.2300	-	-	0.2300
	도시가스	-	-	0.1175	0.0314	0.1489
	전력	0.0026	0.0390	0.0561	0.0075	0.1051
	기타	-	-	-	-	-
	합	0.0026	0.2690	0.1736	0.0389	0.4841
2008	중유	-	0.2363	-	-	0.2363
	도시가스	-	-	0.1078	0.0449	0.1527
	전력	0.0026	0.0409	0.0561	0.0075	0.1071
	기타	-	-	-	-	-
	합	0.0026	0.2772	0.1639	0.0524	0.4961
2009	중유	-	0.1944	-	-	0.1944
	도시가스	-	0.0407	0.0961	0.0535	0.1903
	전력	0.0026	0.0550	0.0561	0.0075	0.1212
	기타	-	-	-	-	-
	합	0.0026	0.2902	0.1522	0.0610	0.5060
2010	중유	-	0.1381	-	-	0.1381
	도시가스	-	0.0605	0.0720	0.0511	0.1836
	전력	0.0026	0.0470	0.0561	0.0075	0.1132
	기타	-	-	-	0.0005	0.0005
	합	0.0026	0.2456	0.1281	0.0586	0.4349

〈표 9〉 LCD 유리제품의 공정별 에너지원별 EB

(단위 : toe/ton; 순발열량)

연도	에너지	혼합	용해	성형	후성형	합
2007	중유	-	0.3726	0.0798	-	0.4523
	도시가스	-	0.3195	0.1782	0.1782	0.6758
	전력	0.0026	1.0621	0.0075	0.0093	1.0815
	기타	-	-	-	-	-
	합	0.0026	1.7541	0.2654	0.1875	2.2097
2008	중유	-	-	0.0176	-	0.0176
	도시가스	-	0.2085	0.1450	0.1450	0.4985
	전력	0.0026	0.8923	0.0075	0.0093	0.9117
	기타	-	-	-	-	-
	합	0.0026	1.1008	0.1700	0.1543	1.4278
2009	중유	-	-	-	-	-
	도시가스	-	0.1577	0.1166	0.1166	0.3910
	전력	0.0026	0.7002	0.0075	0.0093	0.7196
	기타	-	-	-	-	-
	합	0.0026	0.8579	0.1241	0.1260	1.1106
2010	중유	-	-	-	-	-
	도시가스	-	0.1620	0.1010	0.1010	0.3640
	전력	0.0026	0.6953	0.0075	0.0093	0.7147
	기타	-	-	-	-	-
	합	0.0026	0.8573	0.1085	0.1104	1.0788

〈표 9〉에 주어진 LCD 유리의 경우는 참고할만한 국내의 자료가 부족함에 따라 용해공정의 도시가스 및 중유사용량은 전문가의 의견을 활용하였고, 성형 및 후성형의 연료사용량은 판유리와 동일하다고 가정하였다. 또한 혼합, 성형, 후성형의 전력 사용량 역시 판유리와 동일하다고 가정하였으며 용해과정의 전력사용량은 전체 사용량에서 (혼합+성형+후성형) 전력사용량을 차감하여 결정하였다. 분석대상인 LCD 유리업체의 경우 2008년까지 LCD 유리와 브라운관유리를 함께 생산하였으므로 위에서 주어진 2007~2008년 EB 자료에는 이 상황이 반영된 자료임에 유의한다.

공정별 에너지원별 EB의 도출은 제품별 EB에 비해서 비교적 많은 불확실성을 내포하고 있는 것이 사실이다. 국내 LCD 유리산업의 경우를 보더라도 특정 LCD 유리업체는 용해공정에 (도시가스+전력)을 에너지원으로 사용하고 있지만 또 다른 LCD 유리업체는 다른 에너지혼합(예 : (중유+전력))을 사용할 수도 있다. 보다 신뢰성 있는 공정별 에너지원별

EB 분석을 위해서는 선정된 표본기업(사업장)의 에너지배합이 해당 제품을 제조하는 다른 기업들의 에너지배합을 대표할 수 있도록 보다 체계적인 조사가 추후에 필요할 것으로 판단된다.

3.2 유리제품별 온실가스 배출량

고정연소 배출은 다시 직접배출과 간접배출로 구분할 수 있는데, 직접배출은 생산과정 중에 전력을 제외한 화석에너지의 사용으로 발생하는 것을 의미하며 간접배출은 전력사용에 의한 배출을 나타낸다. 전력은 화석에너지와는 달리 사용 시점에는 온실가스를 배출하지 않지만 전력을 생산하는 과정에서 배출되는 특성이 있으며, 국내 전력 생산의 방식의 변화에 따라 전력 사용 단위당 온실가스 배출계수가 연도별로 달라질 수 있다. 미래에 발생할 연소 배출량 산정은 해당 산업의 미래 에너지사용량 및 에너지배합에 대한 예측이 수반되어야 한다. 아래에서는 유리제품 대표 기업들의 에너

〈표 10〉 유리제품별 단위당 고정연소 온실가스배출계수

(단위 : tCO₂e/ton)

유리제품	연소 배출원	2007	2008	2009	2010
판유리	총배출(직접+간접)	0.7264	0.7160	0.7667	0.7645
	간접배출(전력)	0.1129	0.1064	0.1284	0.1183
병유리	총배출	0.6989	0.7196	0.7429	0.7886
	간접배출	0.2311	0.2351	0.2420	0.2651
유리섬유	총배출	1.7127	1.7533	1.7905	1.5524
	간접배출	0.6239	0.6353	0.7191	0.6781
LCD 유리	총배출	9.4549	6.6334	5.1852	5.1353
	간접배출	6.4170	5.4097	4.2698	4.2829

지 사용행태에 대한 분석을 통해 유리제품의 고정연소 배출량을 산정한다.

〈표 10〉에서 보면, 유리제품별 단위당 고정연소 온실가스 배출량은 각 제품의 EB와 사용되는 에너지배합에 따라 결정됨을 알 수 있다. 에너지배합에 따른 온실가스 배출량을 LCD 유리와 판유리를 예로서 비교하면(2010년 기준), 이들 간에 제품당 EB는 4.9배 차이가 나지만 고정연소 배출은 6.7배가 나는데 이는 배출계수가 상대적으로 높은 전력의 사용 비중이 LCD 유리가 판유리에 비해 높기 때문이다. 실제로, 병유리 업체 중 일부는 용해공정에 사용되는 중유 에너지를 도시가스로 변경을 계획하고 있는데, 이러한 에너지배합의 변경은 해당 업체의 제품 단위당 EB의 변화 없이 두 에너지간의 온실가스 배출계수간의 차이만큼 온실가스 감축효과를 기대할 수 있다. 이 같이 〈표 10〉에 주어진 제품단위 당 온실가스 배출계수를 이용해 새로운 연료(에너지)절감 기술의 도입 또는 에너지배합의 변경에 따른 온실가스 배출량 감축 효과를 가늠할 수 있다.

제품 생산공정에 소모되는 에너지양 및 종류에 의해 결정되는 고정연소 배출과는 다르게, 공정배출은 제품 생산공정(특히, 용해)에 투입되는 원료의 종류(특성)에 의해 결정된다. 유리제품의 제조에서 발생하는 공정배출은 소다회, 탄산석회 등 탄산염(carbonate)을 포함한 원료를 용해하는 과정에서 발생하므로 유리제품별로 탄산염을 포함한 원료물질의 배합비율에 의해 영향을 받는다. 또한 유리제품의 생산은 유리원료뿐만 아니라 일정량의 파유리(cullet)를

재활용하여 생산하기 때문에 공정배출량 산정시 제품별 파유리비율을 구분하여 고려해야 한다.

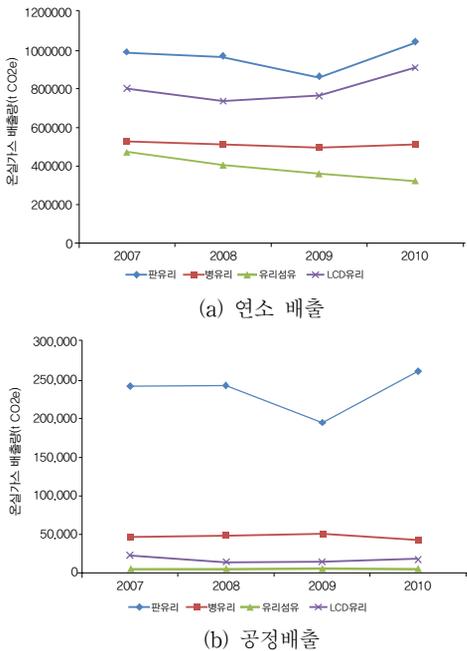
IPCC 가이드라인에서 권고하고 있는 공정배출 산출방법은 크게 두 가지로 구분된다[15]. 먼저, 가장 정교한(불확도가 낮은) 것으로 유리제품별 제품단위를 생산하는데 투입되는 원료(특히, 탄산염 포함 원료)의 양에 원료별 배출계수와 원료의 소성비율을 곱하여 공정배출을 구하는 방법이 있다. 이 방법이 이용되기 위해서는 제품별 투입원료의 양 및 배합 비율 등에 대한 자료가 확보되어야 한다. 또 다른 방법이 유리제품별 생산량에 제품별 공정배출계수와 여기에 (1-파유리비율)을 곱하여 구하는 방법이다. 이 방법에는 제품 생산에 투입되는 원료의 종류 및 배합비율에 대한 정보 대신에 제품별 공정배출계수의 결정이 필요하다. 만약 자체의 공정배출 계수가 없으면 IPCC 가이드라인에서 주어진 배출계수를 이용할 수 있다. 〈표 11〉은 유리제품별 대표기업의 분석 자료에 나타난 제품 단위당(ton) 공정배출(tCO₂e/ton)을 보여준다. 명세서에 제시된 공정배출의 산정이 위에서 언급된 방법 중 어느 방법에 의한 것인지는 파악할 수 없었다.

〈표 11〉 유리제품별 제품단위당 공정배출량

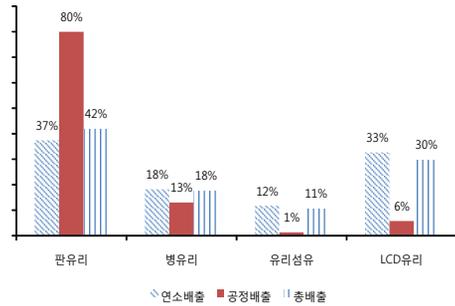
(단위 : tCO₂e/ton)

유리제품	제품 단위당 공정배출량			
	2007	2008	2009	2010
판유리	0.1778	0.1795	0.1724	0.1917
병유리	0.0606	0.0675	0.0762	0.0658
유리섬유	0.0206	0.0181	0.0260	0.0203
LCD 유리	0.2550	0.1229	0.1015	0.1064

<표 11>에 제시된 유리제품 제품 단위당 공정배출량에 각 제품의 연도별 제품 생산량을 곱하면 제품별 총 공정배출량을 산출할 수 있다. <그림 3>과 <표 12>는 이렇게 산출된 유리제품별 공정배출량과 앞서 제시된 연소 배출량 산정결과를 함께 보여준다. 연도별로 다소 차이는 있으나 유리산업에서 연소 배출이 총배출에서 차지하는 비율은 약 89%인 것으로 나타났다.



<그림 3> 연도별 유리제품의 연소 배출 및 공정배출의 양(2007~2010)



<그림 4> 유리산업의 제품군의 연소 배출, 공정배출 및 총배출별 비중(2010년 기준)

4. 결 론

본 연구에서는 유리산업의 제품별 공정 분석을 통해 제품별 에너지원별 EB와 온실가스 배출량을 유리제품별로 산정하였다. 도출된 유리제품별 공정별 EB는 국내 유리산업에 대한 최초 연구 조사결과로서 의의가 있다. 하지만 유리산업의 관련 국내 연구 및 자료가 극히 미비하여 공정별 에너지원별로 보다 신뢰성이 있는 EB 산출을 위해서는 보다 심층적인 자료의 수집과 분석을 통한 지속적인 조사/연구가 추후에 진행되어야 할 것으로 판단된다. 상향식분석을 위한 핵심자료는 에너지 소비 핵심 공정별 사용되는 에너지의 종류와 에너지 사용량이 된다. 이와 같은 자료는 공식적으로 발표되지 않기 때문에 관련 협회에서 제공되는 자료 또는 국

<표 12> 유리제품별 연소 배출 및 공정배출 양

(단위 : tCO₂e)

유리제품	배출종류	2007	2008	2009	2010
판유리	연소 배출	991,550	969,483	865,633	1,040,473
	공정배출	242,653	243,104	194,631	260,845
병유리	연소 배출	529,061	510,168	491,793	506,296
	공정배출	45,892	47,853	50,454	42,247
유리섬유	연소 배출	472,710	408,508	358,097	326,008
	공정배출	5,697	4,223	5,203	4,266
LCD 유리	연소 배출	801,986	737,509	765,663	908,109
	공정배출	21,630	13,669	14,990	18,811
합	연소 배출	2,795,307	2,625,669	2,481,185	2,780,886
	공정배출	315,872	308,850	265,277	326,168
	연소+공정배출	3,111,179	2,934,517	2,746,464	3,107,055

외 자료를 참고하거나 본 연구에서와 같이 대표 기업에 대한 직접 조사를 필요로 한다. 또한 본 연구 결과를 중장기 BAU 및 감축량 그리고 감축기술을 도출하기 위해서는 다음과 같은 사항에 대한 보완 및 연구가 필요하다. 첫째, 상향식분석에서는 제품별 중장기 수요 자료의 확보가 필요하다. 본 연구에서 다루는 제품들의 수요 자료는 과거자료에 국한되며 중장기 미래수요 자료의 확보는 불가능하였다. 과거자료를 이용한 수요예측의 모형의 개발 등 계량적 방법과 더불어 관련 산업 전문가들의 자문에 의한 정성적인 방법 등을 통한 제품별 최종수요의 도출이 요구된다. 둘째, 온실가스 감축 대안기술들을 비교함에 있어 온실가스(또는 에너지)절감 효과와 기술 선택에 따른 비용을 평가가 필요하다. 따라서 대안 신기술의 경우 도입비용 요소와 더불어 공정별 EB에 미치는 영향이 구체적으로 분석되어야 한다.

참 고 문 헌

- [1] 백천현, 김후곤, 김영진, 정용주, “상향식 모형을 이용한 국내 조선업의 온실가스 배출분석”, 『한국경영과학회지』, 제31권, 제1호(2014), pp.41-48.
- [2] 신희성, 홍종철, 강희정, “CO₂ 배출량 저감을 고려한 국내 에너지공급 시스템분석 : 시장분배 모형(MARKAL)의 응용”, 『한국경영과학회지』, 제18권, 제1호(1993), pp.79-95.
- [3] 에너지경제연구원, 『에너지통계연보』, 2007~2010.
- [4] 정진도, 고병수, 김장우, 채수조, 구경완, 황승민, “유리제조 산업분야의 온실가스 배출량 산정식 개발에 관한 연구(I)”, 『한국환경과학회지』, 제18권, 제5호(2009), pp. 509-515.
- [5] 지식경제부, 『2008년도 에너지총조사 보고서』, 2009.
- [6] 통계청(<http://www.index.go.kr>).
- [7] 한국과학기술정보원, 『LCD 유리원판』, 2009.
- [8] 한국세라믹기술원, 『스마트유리 산업경쟁력 조사』, 2010.
- [9] 한국유리공업협동조합(<http://www.glasskorea.org>).
- [10] 한국판유리산업협회(<http://www.flatglass.or.kr>).
- [11] 한국판유리산업협회, 『판유리산업에 대한 산업경쟁력 조사』, 2000.
- [12] European Commission, *Best available techniques reference document for the manufacture of glass*, 2011.
- [13] Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research, *Methodology for the free allocation of emission allowances in the EU ETS post 2012, Sector report for the glass industry*, 2009.
- [14] Glass Manufacturing Industry Council, *Glass Melting Technologies : A technical and Economic Assessment*, 2004.
- [15] IPCC(1996), *Revised Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*, IPCC, Switzerland, 1996.
- [16] IPCC, *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*, IPCC, Switzerland, 2006.
- [17] Schmitz, A., J. Kaminski, B. M. Scalet, and A. Soria, *Energy consumption and CO₂ emissions of the European glass industry*, Energy Policy Vol.39(2011).
- [18] U.S. Department of Energy office of industrial technologies, *Energy and Environmental Profiles of the U.S. Glass Industry*, 2002.