

국내 석회생산 산업공정부문 온실가스 배출계수 개발

이정우*[†] · 김명현* · 이준우* · 안성규**

^{*}(주)KECM 목표관리팀, ^{**}세종대학교 대학원 기후변화협동과정 박사과정 학생

Development of GHG Emission Factors for Lime Production Industry Processes in Korea

Lee, Jeongwoo*[†] · Kim, Myunghyun* · Lee, Junwoo* and An, Sungkyu**

^{*}Traget Management Scheme Team, Korea Energy Carbon Management, Seoul, Republic of Korea

^{**}Ph.D. Student, Cooperative Course for Climate Change, Sejong Univ, Republic of Korea

ABSTRACT

Comparing greenhouse gas (GHG) emissions, 2016 showed an increase of about 7.7% over that recorded in 2010, and an increase of nearly 1.5% over emissions in 2015. In this study, we investigate the domestic lime classification system in Korea, which is used to calculate emissions according to the type of lime, originally proposed by the IPCC. Based on the results of our investigation, we validate the domestic lime classification system and develop a worksheet through which emission factors according to type can be calculated. Based on our results, the high-calcium lime GHG emission difference is about 1%, the dolomitic lime GHG emission exhibits a difference of about 1%, and the hydraulic lime GHG emission shows a difference of about 13%.

Key words: Greenhouse Gas, Climate Change, Lime, Production Industry Process, GHG Emission

1. 서 론

1990년 대비 약 160.2% 증가하였고, 2010년 대비 약 1.1% 증가하였다. 이 중 석회 생산에 배출되는 온실가스 배출량은 2016년 약 3,483 Gg CO₂eq로 1990년 대비 약 92.5% 증가하였고, 2015년 대비 약 1.5% 증가하였다(GIR, 2018).

생석회의 경우 비료용, 제지용, 토질 안정처리용, 건조제, 경소생석회, 제강 및 합금 환원용, 소결용, 건축재료 등에 사용된다. 소석회의 경우 폐수처리용, 연탄용, 피혁용, 소독용, 식품제조용, 건축용 등으로 사용된다. 경소백운석의 경우 제강 및 유리, 비료, 골재용 등으로 사용된다(Zhang et al., 2013; Yusuf, 2013; H. S. Kim, 2011). 국내 석회는 주로 철강의 제철 환원에서 사용되고 있으며, 일부

저급 석회의 경우 농업 등에 사용된다(Osada, You, et al., 1995; Monshi, Ahmad, Masoud Kasiri Asgarani, 1999; Hsieh, Li-Heng, Whiteman JA, 1989).

석회는 탄산염인 CaO 및 CaO·MgO를 포함하고 있는 광물로 주로 석회석 및 백운석을 소성하여 생산한다. 석회는 석회석인 CaCO₃와 백운석인 CaMg (CO₃)₂에서 열이 가열되면 CO₂를 배출하고 최종적으로 탄산염을 생산한다(GHG Protocol). 따라서 석회 생산시 배출되는 온실가스 공정 배출은 탄산염광물 소성시 발생한다(Lackner et al., 1995; IPCC, 2006).

EU를 비롯한 외국의 경우 광물의 질이 좋아 CaO를 제외한 이물질이 적게 함유되어 있어 고품위 석회를 주로 생산하며, IPCC에서도 고칼슘석회, 고토석회, 수경성석회로

[†]Corresponding author : leejwsky@gmail.com (06779, 16-22, Gangnam-daero 18-gil, Seocho-gu, Seoul, Republic of Korea, Tel. +82-31-896-9246)

ORCID 이정우 0000-0002-1736-6186
이준우 0000-0003-2811-5814

김명현 0000-0002-0466-3771
안성규 0000-0003-3433-7560

구분되어 제시하고 있다(IPCC, 2006). 하지만 국내 석회의 경우 원석의 질이 낮고, 사용처별 원하는 CaO 및 각 기타 성분이 상이함으로 발주처에 따라 다양한 종류의 석회를 생산한다(Kim, 1992; Noh and Choi, 2002).

한국의 경우 현재 석회 생산시 공정에서 배출되는 온실가스 산정은 1996 IPCC G/L를 적용하여 석회석 및 백운석 소비량의 활동자료를 이용한 각각의 배출계수를 통해 산정하고 있다(GIR, 2013). 하지만 post-2012 회의에 결정에 따라 2020년부터 2006 IPCC G/L을 사용할 경우 현재 한국 수준에서 Tier1(총 석회사용량) 또는 Tier2(유형별 석회사용량) 수준을 고려하여 적용가능성을 검토해야 한다(Bodansky and Daniel, 2007).

2006 IPCC에서 제시하고 있는 Tier1 수준은 총 석회 사용량으로 활동자료의 수집 또는 국가통계자료를 통해 쉽게 산정이 가능하나 Tier2 수준의 유형별 석회 사용량 기반으로 국내 석회 분류체계가 IPCC에서 제시한 분류체계와 상이하여 이를 이용시 정확한 배출량 산정이 어렵다.

또한, 국내 석회 생산시 배출되는 공정 온실가스 배출부분은 지속적으로 증가하고 있으며, 이에 2006 IPCC G/L을 적용할 수 있는 인벤토리를 개발하여야 한다. 본 연구에서 국내 석회 분류체계를 조사하여 IPCC에서 제안하고 있는 석회의 유형별 배출량을 산정하기 위해 국내 석회생산 분류체계를 정립과 유형별 배출계수를 산정할 수 있는 Work-sheet를 개발하고 배출량을 산정하여 IPCC의 분류체계의 온실가스 배출량과 비교하고자 한다.

2. 연구방법

2.1 국내외 석회 기준

Table 1. Lime classification system

Mineral Content		IPCC G/L	UNI EU 459-1	KS L 9501	SPS-KLIC 002-773
CaO(%)	MgO(%)				
0.93~1.00	-	Quick Lime	CL90	Quick Lime special	Quick Lime special
0.90~0.93	-	Hydraulic Lime		Quick Lime first	Quick Lime first
0.85~0.90	-	Hydraulic Lime	CL80	Quick Lime second	Quick Lime second
0.80~0.85	-	Hydraulic Lime		Quick Lime second	-
0.725	-	-	CL70	Slaked Lime special	-
0.70~0.725	-	-		Slaked Lime first	-
0.65~0.70	-	-	-	Slaked Lime second	-
0.55~0.57	0.38~0.41	Dolomitic Lime	DL85	-	Light Burned Dolomite first
0.50~0.55	0.30~0.38	-	DL80	-	Light Burned Dolomite first
0.45~0.50	0.25~0.30	-	-	-	Light Burned Dolomite second

국내 석회생산시 공정상 발생하는 온실가스를 산정하기 위해 우선적으로 국내외 및 국제적 석회의 분류체계를 확인 조사하였다. 이 중 대표적인 2006 IPCC G/L 및 EU, Koera Stard, SPS 등의 규격을 정리하여 Table 1에 제시하였다.

IPCC의 경우 생석회, 고토석회, 수경성석회로 구분되며, 석회별 CaO 및 CaO·MgO 함유량을 제시하였다(IPCC, 2006). UNI EN 459-1 Building Lime - Part 1: Definitions, Specifications and Conformity Criteria의 경우 CL90, CL80, CL71, DL85, DL80 등으로 제시하였으며, CaO 및 MgO의 함유를 제시하였다(British Standards Institution, 2010). KS L 9501:2009 공업용 석회(industrial lime)의 경우 생석회 특급, 1급, 2급으로, 소석회 특급, 1급, 2급으로 제시하였으며, CaO 함유량을 제시하였다(Korean Agency for Technology and Standards, 2014). SPS-KLIC 002-773:2012 제강용 생석회 및 경소백운석(Quick lime and light burned dolomite for steel manufacture)의 경우 석회의 주사용처인 제철사의 업체에 맞춤 생산품이 필요하여 협회를 통해 현실성이 반영된 석회 분류체계를 추가하였으며, 2012년에 정식적으로 한국의 공인을 받은 규격이다(Korean Limestone Industry Cooperation, 2015). 이 규격은 생석회의 분류를 더 세분화하였으며, KS에 누락되어 있지만 사용되고 있는 경소백운석 1급, 2급의 규격을 추가하였다.

2.2 석회 활동자료 수집

국내의 경우 KS L 9501 및 SPS-KLIC 002-773의 기준으로 생석회, 경소백운석, 소석회 등을 생산하고 있으며,

2016년 기준 한국에는 20개 업체들이 존재하고 있다. 이중 주요 생산하는 업체를 중심으로 설문한 결과 8업체에서 국내 석회 종류별 '18년 생산량을 조사하였으며, 자세한 내용은 Table 2에 제시하였다.

생석회의 경우 총 7업체수이며 약 161,827 4ton이며, 경소백운석의 경우 총 3업체수 약 223,234 ton, 소석회의 경우 1업체의 약 64,005 ton이다.

Table 2. Survey results of lime production

Division	Investigation Companies (ea)	Lime Production (ton/yr)
Quick Lime special(A)	3	407,285
Quick Lime first(B)	5	523,139
Quick Lime second(C)	6	687,850
Light Burned Dolomite first(A)	2	160,769
Light Burned Dolomite second (B)	2	62,465
Slaked Lime special(A)	1	-
Slaked Lime first(B)	1	38,403
Slaked Lime second(C)	1	25,602

2.3 석회 생산 공정 배출계수 산정 방법

석회의 생산 공정 배출계수 산정 방법은 화학양론에 따라 산정하게 되어 있으며, 2006 IPCC Volume 3 Industrial Processes and Product Use의 Lime Product 부분에 제시되어 있다(IPCC, 2006). Guidelines에 제시된 석회 유형별 산업공정 배출량 산정은 1단계로 탄산염에서 CO₂로 변화되는 화학량 비율을 통해 석회 1 ton에서 배출되는 CO₂량을 산정한다. 생석회의 분자량은 56.08, 경소백운석의 분자량은 48.19, 소석회의 분자량은 74.09으로 CO₂ 분자량인 44.01을 나눈 값으로 각각 비율로 산정한다.

$$EF_i = \sum(Q_i \times r_i) \quad (1)$$

EF_i : 탄산염(i) 배출계수(ton CO₂/ton lime)

Q_i : 소비된 탄산염(i)의 이산화탄소 변환 화학량 비율 (ton CO₂/ton lime)

r_i : 소비된 탄산염(i)의 CaO, MgO 비율(%)

2단계는 각 등급별 석회의 CaO 및 MgO 평균 비율을 이용하여 최종적인 배출계수를 개발한다. 본 연구에서 배

출계수 개발 시 각 등급은 한국의 분류체계에 따라 생석회 A, B, C, 경소백운석 A, B, 소석회 A, B, C로 구분하여 개발하였으며, 배출계수는 upper와 lower를 산정하여 최종적으로 평균값을 적용하였다.

국내 석회의 상세 등급별 파악된 생산량을 통해 각 개발한 배출계수를 이용하여 배출량을 산정하였다. IPCC와 비교를 위해 최종적으로 산정한 배출량을 IPCC에서 제시한 Tier2 수준의 생석회, 경소백운석, 수경성석회 3그룹으로 분류하여 최종 온실가스 배출량을 비교하였다.

3. 연구결과 및 고찰

3.1 국내 석회 산업공정 배출계수 및 배출량 Work-sheet 개발

Guidelines에 제시된 Tier2 수준의 석회 유형별 산정방법을 이용하여 1단계 탄산염(CaO 및 CaO·MgO)에서 CO₂로 변화되는 화학량 비율을 산정하고 2단계에서 각 석회별 탄산염 비율을 이용하여 배출계수를 개발하고 3단계에서 각 석회 유형별 배출량을 산정하여, 최종적으로 총 배출량을 산정한다. 이와 같은 산정 과정을 쉽게 진행하기 위해 Table 3의 work sheet를 개발하였다.

3.2 한국 석회분류별 배출계수

본 연구에서 개발한 Work-sheet를 따라 한국의 석회 종류별, 등급별 CaO 및 CaO·MgO 함유량과 배출계수를 산정하였다(Table 4).

각 유형별 석회 기준에 제시된 CaO 및 CaO·MgO의 lower과 upper이용하여 배출계수의 범위로 산정하였다. 생석회 특급은 0.73 ~ 0.77 ton CO₂/ton lime으로 배출계수가 산정되었으며, 생석회의 1급은 0.71 ~ 0.73 ton CO₂/ton lime으로 산정되었다. 생석회 1-1급의 경우 0.67 ~ 0.71 ton CO₂/ton lime으로 배출계수가 산정되었으며, 생석회 2급의 경우 0.63 ~ 0.67 ton CO₂/ton lime으로 배출계수가 산정되었다. 경소백운석 1급의 경우 0.46 ~ 0.52 ton CO₂/ton lime으로 배출계수가 산정되었으며, 경소백운석 2급의 경우 0.41 ~ 0.46으로 산정되었다. 소석회 특급의 경우 0.43 ~ 0.48 ton CO₂/ton lime으로 배출계수가 산정되었으며, 소석회 1급과 2급은 0.42 ~ 0.43 ton CO₂/ton lime과 0.39 ~ 0.42 ton CO₂/ton lime으로 산정되었다.

Table 3. Development of calculating lime emission factor work-sheet

Step 1	CaO or CaO·MgO formula weight	CO ₂ formula weight	Stoichiometric ratio
	ton CaO or ton CaO·MgO	ton CO ₂	ton CO ₂ per ton CaO or CaO·MgO
	A	B	C
	-	-	A/B
Quick Lime	56.077	44.009	0.785
Light Burnt Dolomite	48.191	44.009	0.913
Slaked Lime	74.092	44.009	0.594
Step 2	CaO content	MgO content	Emission factor
	%	%	ton CO ₂ /ton lime
	D	E	F
	-	-	(C X D) + (C X E)
Quick Lime A		-	
Quick Lime B		-	
Quick Lime C		-	
Light Burnt Dolomite A			
Light Burnt Dolomite B			
Slaked Lime A		-	
Slaked Lime B		-	
Slaked Lime C		-	
Step 3	Type of lime production	Type of lime production emission	Total GHG emission
	ton lime	ton CO ₂	ton CO ₂
	G	H	I
	-	F X G	-
Quick Lime A			
Quick Lime B			
Quick Lime C			
Light Burnt Dolomite A			
Light Burnt Dolomite B			
Slaked Lime A			
Slaked Lime B			
Slaked Lime C			

Table 4. Estimation of Lime Emission Factors in Korea

Division	Stoichiometric Ratio	CaO or CaO·MgO (%)		Emission factor (ton CO ₂ /tonlime)	
		lower	upper	lower	upper
Quick Lime A	0.785	0.93	0.98	0.73	0.77
Quick Lime B		0.90	0.93	0.71	0.73
Quick Lime C		0.80	0.90	0.63	0.71
Light Burnt Dolomite A	0.913	0.80	0.85*	0.73	0.78
Light Burnt Dolomite B		0.70	0.80	0.64	0.73
Slaked Lime A	0.594	0.725	0.80	0.43	0.48
Slaked Lime B		0.7	0.725	0.42	0.43
Slaked Lime C		0.65	0.7	0.39	0.42

3.3 한국의 배출계수를 이용한 배출량 산정 및 IPCC와 비교

본 연구에서 산정한 한국의 석회 유형별 배출계수와 IPCC와 비교를 위해 산정된 CaO 및 CaO·MgO, Emission factor 범위의 평균값을 Default value로 산정하였다(Table 5).

IPCC에서는 고칼슘석회, 고토석회(경소백운석), 수경성석회(소석회)으로 분류하고 있으며, 각각의 CaO or CaO·MgO 및 배출계수를 2006 Guideline에 제시하였다. IPCC에서 제시한 고칼슘석회에는 한국의 생석회 특급과 유사하며, 배출계수는 0.01차이로 유사하다. 고토석회의 경우 한국의 생산되는 경소백운석과 유사하며, 총 2개의 등급으로 분류되어 경소백운석 1급 보다는 0.02 높고, 경소백운석 2급 보다는 0.09 낮다. IPCC에서 제시한 수경성석회의 경우 CaO의 범위가 매우 넓으며, 한국의 생석회 1급, 생석회 2급, 소석회 특급, 소석회 1급, 소석회 2급 등이 포함되어 비교가 적절하지 않다.

국내 석회 유형별 생산량을 IPCC Tier2 수준의 default value와 본 연구에서 개발된 배출계수를 적용하여 배출량을 산정하였다. 고칼슘석회의 경우 IPCC 배출계수를 적용한 배출량은 305,464 ton, This study 배출계수를 적용한 배출량은 309,537 ton으로 약 1% 차이로 국내의 생석회 특급과 차이가 크게 발생하지 않았다. 고토석회의 경우 IPCC 배출계수를 적용한 배출량은 171,890 ton, This study 배출계수를 적용한 배출량은 169,484 ton으로 약 1% 차이가 발생하였다. 수경성석회의 경우 IPCC 배출계수를 적용한 배출량은 752,246 ton, This study 배출계수를 적용한 배출량은 863,890 ton으로 약 13%로 큰 차이가 발생하였다.

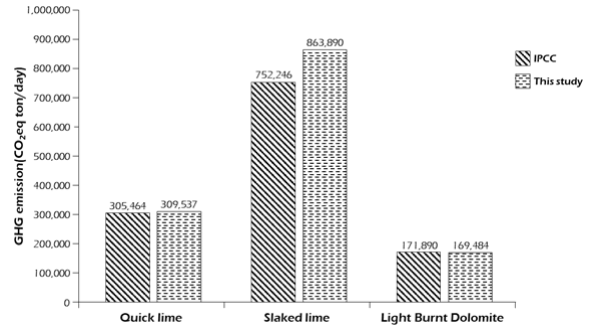


Fig. 1. Comparison of greenhouse gas emission in lime production by lime classification

4. 결론

한국의 경우 국외에 비해 광석의 질이 많이 낮아 저품위 등급까지의 석회로 개발한다. IPCC에서는 총 3가지로 석회를 구분하여 배출량을 산정하고 있지만, 한국의 경우 석회의 용도 및 성상에 맞게 8가지로 상세히 구분되고 있다.

본 연구에서 CaO 및 MgO의 성상의 기반으로 한국의 석회 유형별 배출계수를 산정하기 위한 Work-sheet를 개발하였다. Quicklime의 CaO 및 MgO 함유량은 IPCC 0.95이며, 한국은 0.97로 0.02정도 차이가 발생한다. Light Burnt Dolomite의 CaO 및 MgO 함유량은 IPCC 0.85이며, 한국은 평균 0.81 수준으로 0.04정도 차이가 발생한다. Slaked lime의 CaO 및 MgO 함유량은 IPCC 0.75이며, 한국은 평균 0.78 수준으로 0.03정도 차이가 발생한다. 한국은 Quicklime를 제외한 Light Burnt Dolomite의 경우 2가지, Slaked lime의 경우 5가지로 분류되어 각 석회별 생산되는 CaO 및 MgO의 함유량에 따라 기본 분류로 산정시 전체 온실가스 배출량에 영향을 미칠 것이다.

이에 석회 유형별 배출량을 IPCC의 분류체계와 비교한 결과, Quicklime 및 Light Burnt Dolomite의 경우 IPCC 분류체계와 약 1% 차이로 국내의 분류와 큰 차이를 보이지 않았다. 하지만 Slaked lime의 경우 IPCC 분류체계와 약 13% 차이로 다소 큰 차이를 확인할 수 있었다. 이는 IPCC에서 제시한 Slaked lime를 광물 성상의 범위가 넓으며, IPCC의 분류기준 외에도 한국에서 생산되는 저품위 광물 사용으로 인해 차이가 발생한 것으로 사료된다.

따라서, 국내 석회 온실가스 공정 배출의 정확한 인벤토리 구축을 위해서는 기존 IPCC 분류체계에 초점에 맞추기

Table 5. Comparison of carbonate and emission factors by IPCC and Korean lime

Division	Default value for Cao or CaO·MgO		Emission factor	
	IPCC	This study	IPCC	This study
Quick Lime A	0.95	0.97	0.75	0.76
Quick Lime B		0.92		0.72
Quick Lime C		0.85		0.67
Light Burnt Dolomite A	0.75	0.76	0.59	0.45
Light Burnt Dolomite B		0.71		0.42
Light Burnt Dolomite C		0.68		0.40
Slaked Lime B	0.85	0.87	0.77	0.79
Slaked Lime C		0.75		0.68

보다는 국내 석회별 CaO 및 CaO·MgO을 중심으로 구분되어 연구가 지속되어야 하며, 분류에 맞는 생산량 데이터 구축도 필요하다.

이와 같이 한국의 석회 기준에 맞는 데이터 구축 및 배출계수 연구가 지속될 경우 정확한 국내 온실가스 인벤토리의 질을 향상시킬 수 있으며, 사업장의 경우 Tier3 또는 PS 방식의 배출량을 산정이 가능할 것이다.

사사

본 연구는 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 기후변화 대응 환경기술개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다(과제번호 : 20180013000002).

References

- Bodansky, Daniel. 2007. International sectoral agreements in a post-2012 climate framework. Pew Center on Global Climate Change Working Paper.
- British Standards Institution. 2010. BS EN 459-1:2010, Building Lime Part 1: Definitions, specifications and conformity criteria.
- Greenhouse Gas Inventory & Research Center of Korea(GIR). 2018. National Inventory Report in Korea.
- Hsieh, Li-Heng, and Whiteman JA. 1989. Effect of oxygen potential on mineral formation in lime-fluxed iron ore sinter. *ISIJ International*. 29(8), pp.625-634.
- Hyung-Seok, Kim. Necessity of Refining Domestic Limestone. 2011. *Journal of the Korean Institute of Resources Recycling*. 20(4), pp.6
- Intergovernmental Panel on Climate Change(IPCC). 1996. 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories(Volume 2).
- Intergovernmental Panel on Climate Change(IPCC). 2006. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories(Volume 3) Chapter 2.
- Jin-Hwan, Noh, and Jin-Bum, Choi. 2002. The concept of limestone decency and quality and its evaluation method. *Minerals and Industry*. 15(1), pp.2-3
- Korean Agency for Technology and Standards. 2014. KS L 9501 : 2009. Industrial Lime.
- Korean Limestone Industry Cooperation. 2015. SPS-KLIC-002-773 : 2015. Quick lime and light burned dolomite for steel manufacture.
- Lackner, Klaus S., et al. 1995. Carbon dioxide disposal in carbonate minerals. *Energy*. 20(11), pp.1153-1170.
- Monshi, Ahmad, and Masoud Kasiri Asgarani. 1999. Producing Portland cement from iron and steel slags and limestone. *Cement and Concrete Research*. 29(9), pp.1373-1377.
- Osada, You, et al. 1995. Pilot-scale test on electron beam treatment of municipal solid waste flue gas with spraying slaked-lime slurry. *Radiation Physics and Chemistry*. 45(6), pp.1021-1027.
- Youn-Wook, Kim. 1992. The distribution and utilization status of limestone resources in Korea. *Minerals and Industry*. 5(2), pp.3-4
- Yusuf, Muhammad Salisu. 2013. Production of Lime Using Limestone Obtained from Jakura in Kogi State.
- Zhang, Jishi, Qinqing Wang, and Jianguo Jiang. 2013. Lime mud from paper-making process addition to food waste synergistically enhances hydrogen fermentation performance. *international journal of hydrogen energy*. 38(6), pp.2738-2745.