

## 석회 산업의 온실가스 감축을 위한 원단위 산정 및 대응 방안 연구

권석제 · 조진상 · 김영진 · 김양수 · §서준형

한국석회석신소재연구소

### A Study on the Estimation of Emission Intensity and Response for Greenhouse Gas Reduction in the Lime Industry

Seok-je Kwon, Jin-sang Cho, Young-jin Kim, Yang-soo Kim and §Jun-hyung Seo

*Korea Institute of Limestone and Advanced Materials*

#### 요 약

석회 산업에서 발생하는 총 온실가스 중 약 75%가 공정배출에서 발생하며, 이는 소성공정에서 석회석의 탈탄산 반응에 의해 배출되는 비율이다. 또 석회석 소성 공정에서 다량의 화석연료를 사용하므로 소성공정에서의 온실가스 배출 원단위는 매우 높다. 향후 국내 배출권거래제를 포함한 온실가스 규제에 보다 정확하고 신속하게 대응하기 위해서는 석회 제조 공정별로 정확한 온실가스 배출원 규명 및 배출량 산정을 위한 체계를 정립할 필요가 있다. 이에 본 연구에서는 석회석 가공 업체들이 국내 온실가스 배출권거래제에 효과적으로 대응하기 위해 석회석 소성로 유형별 운전 방식, 투입원료 및 연료 차이 등을 현장 조사를 통해 파악하고 온실가스 배출량 원단위를 분석하였다. 분석결과, 유체로를 사용하는 경우 토중로 대비 효율이 향상되어 같은 양의 석회석을 사용하더라도 온실가스 배출량이 감소하는 효과를 확인하였다.

**주제어** : 석회 산업, 탄소중립, 온실가스 배출, 석회 소성로

#### Abstract

The lime industry accounts for about 75% of greenhouse gases generated from process emissions, and because large amounts of fossil fuels are used, the intensity of greenhouse gas emissions per unit of product production is quite high. In order to respond more accurately and quickly to greenhouse gas regulations, including the domestic emissions trading system, it is necessary to establish a system for accurately identifying greenhouse gas emission sources and calculating emissions for each lime manufacturing process. In this study, in order for limestone processing companies to effectively respond to the domestic greenhouse gas emissions trading system, the operation method, input raw materials, and fuel differences for each type of limestone kiln were identified through field surveys, and the greenhouse gas emission intensity was analyzed. As a result, it was confirmed that greenhouse gas emissions were reduced when using a Parallel flow regenerative kiln compared to an improved shaft kiln even when the same amount of limestone was used.

**Key words** : Limes Industry, Carbon Neutralization, Greenhouse Gas Emission, Lime Kiln

· Received : October 11, 2023 · Revised : October 20, 2023 · Accepted : October 21, 2023

§ Corresponding Author : Jun-hyung Seo (E-mail : [jjun4114@kilam.re.kr](mailto:jjun4114@kilam.re.kr))

Department of Research and Development, Korea Institute of Limestone and Advanced Materials, 18-1, Udeok-gil, Meapo-eup, Danyang-gun, Chungcheongbuk-do 27003, Korea

©The Korean Institute of Resources Recycling. All rights reserved. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

## 1. 서 론

국내 부존하고 있는 석회석은 2022년 기준 약 13,808 백만 톤으로 국내 비금속광물 생산량 중 80% 이상을 차지하고 있으며, 생산광산은 104곳에 이르고 있다<sup>1)</sup>. 석회 산업의 주요 제품은 석회석(원석)과 이를 가공한 생석회, 소석회 등이 있다. 석회석은 시멘트, 철강, 건축 등에 사용되고 있으며, 석회석의 가공을 통한 생석회, 소석회 제품 역시 철강, 환경, 제지, 식품 등 제품 유형별로 다양한 분야에서 널리 사용되고 있다<sup>2)</sup>.

온실가스 감축을 위해 국내에 도입된 온실가스 배출권 거래제도(Emission Trading System, ETS)는 2015년에 시작해 현재 3차 계획기간('21-25)이 진행 중이며, 현재 석회석 가공업체들은 생산비용 발생도와 무역집약도를 곱한 값이 0.002 이상이므로 무상할당 업종으로 분류되어 정부로부터 필요한 배출권의 상당 부분을 무상으로 할당 받고 있다<sup>3)</sup>. 하지만 향후 4차 계획기간('26-30)부터는 유상할당 업종으로 분류되어 기존 대비 정부로부터 무상으로 할당받는 배출권의 수량이 대폭 줄어들 가능성이 높을 것으로 판단된다. 그리고 정부에서는 할당 기업에게 배출권을 할당할 때 과거 온실가스 배출량을 기준으로 산정하는 Grandfathering(이하 GF) 방식보다 온실가스 배출효율을 기준으로 산정하는 Benchmark(이하 BM) 방식을 확대 적용할 계획이다. 「탄소중립·녹색성장 국가전략 및 제1차 국가기본계획」에 따르면 2021년 산업부문 기준 BM 할당 비율이 65%이고, 2030년까지 75%까지 점진적 확대할 것으로 보여 석회석 가공업체들의 대응 준비가 무엇보다 시급한 상황이다.

석회석 가공 업종은 대부분 온실가스 다배출 업체들로서 제3차 온실가스 배출권거래제 계획기간까지는 시멘트 업종에 포함되어 의무를 이행하고 있다. 그러나 석회석 가공 업종의 경우 큰 범주에서는 시멘트 업종(표준산업분류 KSIC 233)에 속하지만, 시멘트 제조업체들과는 온실가스 배출유형이나 감축 잠재량 등에서 차이가 있는 것이 사실이다. 이에 따라 석회석 가공 업종은 시멘트 업종에서 별도 업종으로 분리하거나 별도의 배출권 할당 또는 유상할당 예외 적용 등과 같은 차등화가 필요할 수도 있을 것으로 생각한다.

이에 본 연구에서는 석회석 가공 업체들이 국내 온실가스 배출권거래제에 효과적으로 대응하기 위해 석회석 소

성로 유형별 운전방식, 투입원료 및 연료 차이 등을 현장 조사를 통해 파악하고 온실가스 배출량 원단위(Emission intensity)를 분석하였다. 특히 다가오는 배출권거래제 제4차 기간에는 석회석 가공 업종 또한 유상할당이 예상됨에 따라 석회석 가공 업체들이 국내 온실가스 배출권거래제에 효과적으로 대응하기 위해 석회석 소성로 유형별 운전방식, 투입원료 및 연료 차이 등을 현장 조사를 통해 파악하고 온실가스 배출량 원단위를 분석하였다. 또한 사업장별 설문조사를 통해 석회 산업에서 탄소중립 또는 온실가스 감축 기술의 도입을 위해 필요한 사항을 조사하였고, 향후 석회 산업의 2030 국가온실가스감축목표(National Determined Contribution, NDC) 달성을 위해 석회석 가공업의 대응 방안과 정부나 지자체, 그 밖의 유관 기관에서 지원할 수 있는 사항에 대해 조사하였다.

## 2. 연구 배경

### 2.1. 석회 산업 공정 및 온실가스 발생

석회 산업 공정은 크게 채굴공정, 소성공정, 제품출하 단계로 구분할 수 있으며 채굴공정은 다시 채광공정, 운반공정, 선광공정으로 세분화하여 구분한다. 먼저 광산에서 석회석을 채굴하여 가공시설로 운반한 뒤 공업원료로 유용하게 이용될 수 있도록 선별 및 파쇄과정을 거치며, 생산된 석회석은 소성 과정을 거쳐 생석회, 소석회 등과 같은 제품으로 제조되어 납품 업체로 운송된다<sup>4)</sup>.

석회 산업에서 제조하는 제품은 크게 생석회(CaO)와 경소백운석(CaO·MgO)이 있고, 생산공정은 Fig. 1과 같다. 두 원료를 활용한 제품 제조공정은 유사하며, 원석을 소성로에서 약 900~1,000°C로 가열하여 탈탄산화하여 생산할 수 있다.

Fig. 2는 석회 산업의 온실가스 배출특성을 나타낸 것이다. 석회 산업의 온실가스 배출 특성은 탈탄산 반응에 의한 공정배출이 약 75%, 소성로 운전 시 연료에 의한 고정연소가 약 23%를 차지하고 있고, 직접배출로 분류한다<sup>5)</sup>. 그 외 외부전력을 사용하는 간접배출 및 이동연소에 의한 직접배출이 약 2%를 차지하고, 석회 산업에서 발생하는 온실가스 대부분은 소성공정에서 발생하고 있다. 외부전력 이용에 따른 온실가스 배출은 사업장 내 조명, 전기 이용 시설 등 다양한 부분에서 발생하며 전력량계로부터 사업장 전체 전기 사용량을 알 수 있다. 이동 연소에 의

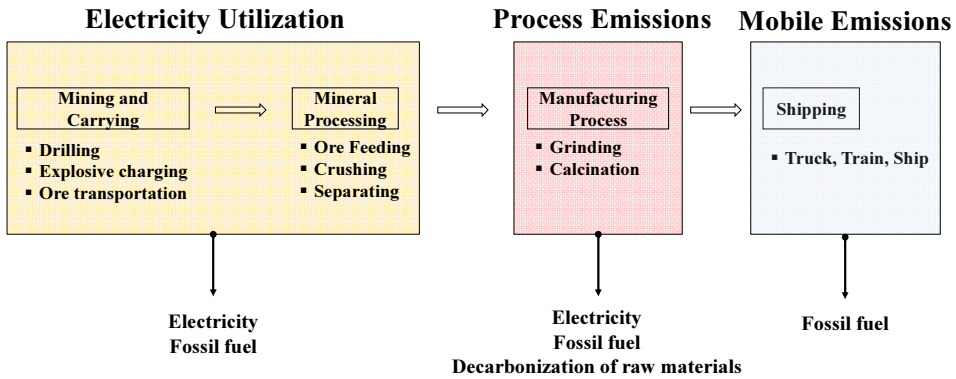


Fig. 1. Scheme of the quick lime and burned dolomite manufacturing process.

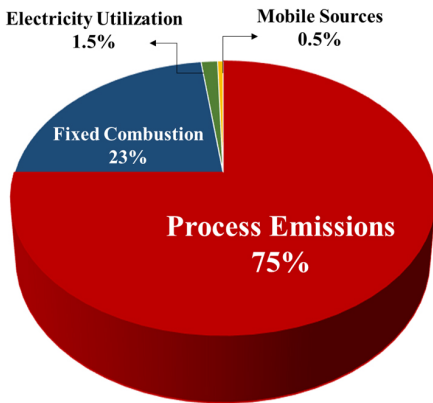
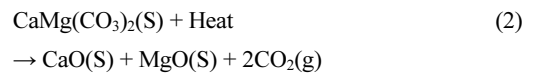
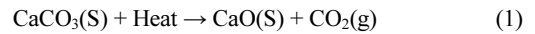


Fig. 2. Greenhouse gas emission ratio in the lime industry.

한 배출은 광산 내 로더, 굴삭기, 천공기 등의 비도로 차량 및 제품 출하 시 덤프트럭, BCT(Bulk cement trailer) 차량과 같은 상용차로부터 발생한다. 외부전력과 이동연소에 의한 배출은 총배출량의 약 2% 정도로 매우 작은 비중을 차지하는 반면에 화석연료(대표적으로 무연탄)를 사용하여 석회석을 소성하는 공정배출 및 고정연소에서 발생하는 온실가스는 대략 98% 이상의 비중을 차지한다. 즉 석회 산업의 제품생산 공정 중에서 고효율 전기 시설을 도입하거나 이동 연소 차량을 전기차 또는 수소차 등으로 교체하더라도 온실가스배출 저감 효과는 미미할 것으로 예상할 수 있다.

공정배출은 석회 산업의 가장 큰 온실가스 배출원으로 시멘트 공정과 유사하게 소성공정에서 주요 탄산염 광물인 방해석(Calcite, CaCO<sub>3</sub>) 혹은 백운석(Dolomite, CaMg(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>) 등 원료의 탈탄산반응에 의해 온실가스를 배출하

는 것이다. 따라서 소성로에 순수한 방해석이나 백운석이 투입된다면, 탈탄산은 식 (1), (2)와 같은 반응을 통해 이론상 투입원료 대비 각각 약 44%, 47%의 이산화탄소를 배출하게 된다.



공정배출에 더하여 고정연소를 고려했을 때, 석회 제조업체들의 주요 생산품인 생석회 1톤 생산 시 온실가스 배출은 실제로 대략 1톤에 이르는 높은 배출 원단위를 가진 산업이라 예상할 수 있다. 참고로 국내 석회 산업 중 생석회 생산 분야에서는 2020년 총 온실가스 배출량의 약 0.7%의 비중을 차지하며, 산업공정 분야 내에서는 약 8.4%를 차지하고 있다<sup>(6,7)</sup>. 석회 산업은 원료에서 불가피하게 발생하는 온실가스의 비중이 높기 때문에 감축의 여지가 적고, 이산화탄소 포집·활용·저장(Carbon Capture and Storage, CCUS) 기술의 적용없이 현재는 획기적으로 감축할 방안이 없는 실정이다.

## 2.2. 온실가스 배출량 산정방법 및 감축 방안

온실가스가 가장 많이 발생되는 부분은 상기 언급한 바와 같이 소성공정에서 발생하는 이산화탄소 등의 배출이다. 소성공정에서의 온실가스 배출활동은 고정연소 및 공정배출로 구분하며, 고정연소는 고체연료와 기체연료 연소로 구분된다. 고정연소에는 무연탄, 유연탄 등이 사용

되고 기체연료에는 LNG, LPG 등이 사용되는데, 석회 산업의 고정연소는 대부분 석탄의 연소로부터 온실가스가 배출된다<sup>8)</sup>. 이러한 고정연소의 배출량 산정식 및 매개변수는 Table 1에 나타내었다. 연료(i) 연소에 따른 온실가스(j) 배출량( $E_{i,j}$ )은 연료(i)의 사용량( $Q_i$ , 측정값), 연료(i)의 열량계수( $EC_i$ , 연료의 순발열량), 연료(i)에 따른 온실가스(j)의 배출계수( $EF_{i,j}$ ), 연료(i)의 산화계수( $f_i$ ,  $CH_4$ , 및  $N_2O$ 는 미적용)로 산정할 수 있다. 다음 원료에서 발생하는 공정배출은 Table 2에 나타내었다. 온실가스를 산정하는 방법은 4가지 단계로 구분되며, 석회 생산시 공정에서 배출되는 온실가스 산정은 1996 IPCC G/L를 적용하여 석회석 및 백운석 소비량의 활동자료를 이용한 각각의 배출계수를 통해 Tier 1으로 산정하고 있다. IPCC에서 제시하고 있는 Tier 1은 원료인 석회석의 탄산염 광물 순도와 하소율에 대해서는 고려하지 않고, 100% 탄산염 광물로 가정했을 때 배출량을 의미하므로 실제 배출량보다 높은 원단위를 나타내지만, 현재 석회 산업의 대부분을 차지하는 중소기업 규모의 경우 Tier 1만 적용하고 있다. 일부 대기업 규모의 사업장은 Tier 2를 적용하는 경우도 있다.

석회 산업에는 온실가스가 발생하는 공정은 크게 원료 수급을 위한 광산의 채광 부문, 원료 가공을 위한 소성 부문, 제품 출하 부문으로 구분할 수 있으며, 부문별 온실가스 감축 방안은 Table 3과 같다. 먼저 공정개선은 고정연소 배출을 줄이는 방법의 하나로써 구형 토중로를 해체하고 고효율 유체로를 적용하면서 에너지 효율이 향상되어 연료 사용량을 줄이는 방법이다. 이 경우에는 저감효율은 향상되었지만 신식 설비 도입에 따른 비용이 추가되며, 강화된 대기환경보전법 또는 대기관리권역법을 새로이 적용받는 부담이 발생한다. 대기환경보전법보다 우선 적용되는 대기관리권역법의 경우 Table 4와 같이 2007년 1월 31일 이전 설치된 시설은 주요 대기오염물질인 질소산화물(Nitrogen oxide, 이하  $NO_x$ )의 배출농도가 140 ppm 이하이지만, 2015년 1월 1일 이후에 설치된 시설은 56 ppm 이하의 더 낮은 배출농도를 유지해야 한다. 이에 따라 대부분 중소 규모의 사업장으로 구성된 석회 가공 업종의 경우 소성로의 구조 변경을 통해 가스상 연료를 도입하는 것과 전기로 방식으로 변경하는 것도 고려하고 있다.

연료전환은 기존 석탄 등 화석연료를 대신해 가연성 폐기물을 활용하는 등의 방법으로 약 23만톤의 이산화탄소를 감축할 수 있는 것으로 보고되고 있다<sup>9,10)</sup>. 이러한 가연

성폐기물의 경우 석회석 소성로에 사용되는 주원료인 석탄류 대비 낮은 배출계수와 높은 발열량을 가지기 때문에 대체연료로 사용하여 온실가스를 저감할 수 있다<sup>11)</sup>. 그러나 국내에서 대다수 운영되는 석회석 소성로는 연료 발열량, 반응성 등이 중요한 요소이지만, 가연성 폐기물의 경우 연소 반응이 석탄류와 달리 매우 빠르며 사용 시 발생하는 바닥재가 혼입되어 최종 생선품인 생석회, 경소백운석 품질에 영향을 미칠 수도 있으므로 현재까지 완전한 대체는 어려운 문제점이 있다<sup>12)</sup>. 따라서 국내 석회 산업에서는 연료 전환 수단으로 현재 가동 중인 토중로의 구조 변경을 통해 LPG와 같은 가스상 연료를 혼소하는 것을 고려하고 있다.

채광 및 제품출하 단계에서는 설비 및 운용효율 개선을 통해 외부전력 사용량을 줄이고, 이동연소에서 필요한 화석연료의 사용을 신재생에너지 도입을 통해 줄이는 방안이 있다. 다만 해당 단계의 경우 앞서 언급한 것처럼 석회 산업에서 발생하는 온실가스 비중의 약 2%에 불과하여 온실가스 배출량 감축에 미치는 영향은 매우 적을 것으로 보인다.

마지막으로 석회 산업에 적용할 수 있는 저감기술은 이산화탄소 포집·이용·저장 기술(Carbon Capture and utilization, Storage, 이하 CCUS)이 있으며 배출량에서 큰 비율을 차지하는 공정배출 및 고정연소 모두에 적용되는 방법이다. 유럽 시멘트 협회의 자료에 따르면 CCUS 기술은 가장 효과적인 온실가스 저감 방법으로 전망하고 있지만 현실적으로 단기간에 적용하기에는 어려운 상황이기 때문에 중장기적인 목표를 가지고 지속적인 연구개발이 수반되어야 한다. 한편, 시멘트 산업의 경우 2022년에 발표한 관계부처합동 「탄소중립 녹색성장 기술 혁신 전략」에서 원료전환 기술개발이 100대 핵심기술에 선정되어 정부 사업 및 지자체 지원 등을 통해 2030 탄소중립을 준비하고 있다.

따라서 석회 산업의 온실가스 감축을 위한 중장기적 목표를 설정하고, 탄소중립에 대응을 위해 설문조사를 시행하였다. 설문조사는 생석회 및 경소백운석을 제조하는 사업장을 대상으로 실행하였다. 설문 내용은 석회 산업의 사업장별로 적합하다고 판단하는 감축 기술에 대한 선호도를 조사했으며, 석회 산업에 적용하기에 적합한 대표적인 감축 기술을 알기 위함이다. 조사 결과는 Fig. 3과 같고, 업체별로 선호하는 감축 방법에 따른 우선순위를 알아보고, 응답한 순위별로 가장 높은 비율을 차지하는

**Table 1.** Estimation formula for greenhouse gas emissions from stationary combustion (2006 IPCC Guideline)

Greenhouse gas emissions calculation formula	
Solid fuel combustion	Gas fuel combustion
$E_{i,j} = Q_i \times EC_i \times EF_{i,j} \times f_i \times 10^{-6}$	$E_{i,j} = Q_i \times EC_i \times EF_i \times f_i \times 10^{-6}$
<p><math>E_{i,j}</math> : Greenhouse gas emissions from fuel combustion (tGHC)</p> <p><math>Q_i</math> : Fuel usage (measured, ton-fuel)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Tier 1 (Measurement uncertainty within <math>\pm 7.5\%</math>)</li> <li>- Tier 2 (Measurement uncertainty within <math>\pm 5.0\%</math>)</li> <li>- Tier 3 (Measurement uncertainty within <math>\pm 2.5\%</math>)</li> </ul> <p><math>EC_i</math> : Heat coefficient of fuel (MJ/kg-fuel)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Tier 1 (2006 IPCC Guideline)</li> <li>- Tier 2 (National specific heat generation value)                             <ul style="list-style-type: none"> <li>* Anthracite for fuel (20.5 TJ/Gg)</li> <li>* Imported anthracite (23.7 TJ/Gg)</li> </ul> </li> <li>- Tier 3 (Measurement uncertainty within <math>\pm 2.5\%</math>)                             <ul style="list-style-type: none"> <li>* Developed by the operator or using data provided by the fuel supplier</li> </ul> </li> </ul> <p><math>EF_{i,j}</math> : Greenhouse gas emission coefficient according to fuel (kgGHG/TJ-fuel)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Tier 1 (2006 IPCC Guideline)                             <ul style="list-style-type: none"> <li>* Anthracite for fuel : 94,600 kgGHG/TJ</li> <li>* Imported anthracite : 98,300 kgGHG/TJ</li> </ul> </li> <li>- Tier 2 (National specific emission coefficient)                             <ul style="list-style-type: none"> <li>* Anthracite for fuel : 95,100 kgGHG/TJ</li> <li>* Imported anthracite : 100,400 kgGHG/TJ</li> </ul> </li> <li>- Tier 3 (Developed by the operator or using data provided by the fuel supplier)</li> </ul> <p><math>f_i</math> : Oxidation coefficient of fuel (Not applied CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Tier 1 (Default: 1.0)</li> <li>- Tier 2 (Power generation: 0.99, Etc: 0.98)</li> <li>- Tier 3 (Developed by the operator)</li> </ul>	<p><math>E_{i,j}</math> : Greenhouse gas emissions from fuel combustion (tGHC)</p> <p><math>Q_i</math> : Fuel usage (measured, m<sup>3</sup>-fuel)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Tier 1 (Measurement uncertainty within <math>\pm 7.5\%</math>)</li> <li>- Tier 2 (Measurement uncertainty within <math>\pm 5.0\%</math>)</li> <li>- Tier 3 (Measurement uncertainty within <math>\pm 2.5\%</math>)</li> </ul> <p><math>EC_i</math> : Heat coefficient of fuel (MJ/m<sup>3</sup>-fuel)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Tier 1 (2006 IPCC Guideline)</li> <li>- Tier 2 (National specific heat generation value)                             <ul style="list-style-type: none"> <li>* Natural gas (LNG) : 49.4 TJ/Gg</li> <li>* City gas (LPG) : 38.9 MJ/m<sup>3</sup></li> <li>* City gas (LPG) : 58.4 MJ/m<sup>3</sup></li> </ul> </li> <li>- Tier 3 (Developed by the operator or using data provided by the fuel supplier)</li> </ul> <p><math>EF_{i,j}</math> : Greenhouse gas emission coefficient according to fuel (kgGHG/TJ-fuel)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Tier 1 (2006 IPCC Guideline)                             <ul style="list-style-type: none"> <li>* Natural &amp; City gas (LNG) : 56,100 kgGHC/TJ</li> <li>* City gas (LPG) : 63,100 kgGHC/TJ</li> </ul> </li> <li>- Tier 2 (National specific heat generation value)                             <ul style="list-style-type: none"> <li>* Natural &amp; City gas (LNG) : 56,100 kgGHC/TJ</li> <li>* City gas (LPG) : 64,000 kgGHC/TJ</li> </ul> </li> <li>- Tier 3 (Developed by the operator or using data provided by the fuel supplier)</li> </ul> <p><math>f_i</math> : Oxidation coefficient of fuel (Not applied CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Tier 1 (Default: 1.0)</li> <li>- Tier 2, 3 (Default: 0.995)</li> </ul>

**Table 2.** Greenhouse gas emission calculation method according to Tier (2006 IPCC Guideline)

Group	Description
Tier 1	$E_i = Q_i \times EF_i$
Tier 2	$E_i = Q_i \times r_i \times EF_i$
Tier 3	$E_i = (EF_i \times Q_i \times r_i \times F_i) - Q_{LKD} \times EF_{LKD} \times (1 - F_{LKD})$
Tier 4	Continuous Emission Monitoring (CEM)
Nomenclature	<p><math>E_i</math> : emission of CO<sub>2</sub> from lime production based on carbonate(i) inputs (tCO<sub>2</sub>) (In case of Tier 1 and 2, Emissions of CO<sub>2</sub> from lime production)</p> <p><math>EF_i</math> : emission factor for calcination pure carbonate(i) (tCO<sub>2</sub>/ton) (In case of Tier 1 and 2, Emission factor for lime(i), ton CO<sub>2</sub>/ton lime)</p> <p><math>Q_i</math> : weight or mass of carbonate i consumed, tonnes (In case of Tier 1 and 2, lime production of type 1, tonnes)</p> <p><math>r_i</math> : purity of lime(i) (decimals between 0 to 1)</p> <p><math>F_i</math> : fraction calcination achieved for carbonate i, (decimals between 0 to 1)</p> <p><math>Q_{LKD}</math> : weight or mass of LKD, tonnes</p> <p><math>EF_{LKD}</math> : emission factor of LKD emitted for lime production (tCO<sub>2</sub>/ton)</p> <p><math>F_{LKD}</math> : fraction calcination achieved for LKD (decimals between 0 to 1)</p>

**Table 3.** Measures to reduce greenhouse gases in the lime industry process

Group		Classification	Detail
Mining process	Mobile combustion	Facility improvement	• Minimize the occurrence of mobile combustion through the installation of crushing facilities and conveyors in the mine
		Increase operation efficiency	• Introduction of large trucks • Fuel conversion of commercial vehicles • Flattening or paving and adjusting the slope of the mine shaft and ramp way
	Electricity use	Electric light management	• Reduce illuminance to minimum safe level • Use of high-efficiency light
		Facility improvement	• Replacement of electric stabilizer in lighting equipment • Improving fossil fuel process into electricity facilities • Replacement of old equipment
		Alternative energy	• Application of solar, wind power generation and ESS to power facilities
Calcination process	Increase energy efficiency	Application of new kilns	• Introduction of high-efficiency kiln like a parallel flow regenerative kiln
		Utilization of waste heat	• Preheating and drying of raw materials in a kiln using waste heat
	Fuel conversion	Renewable energy	• Combination of renewable energy such as hydrogen, syngas and waste derived fuel
		Application of gas fuels	• Introduction of gaseous fuels such as LPG, LNG, etc. • Introduction of gaseous fuels through structural change of old kilns
	Introduction of CCUS technology	Gas separation/capture	• Application of membrane, absorption and adsorption method
		Pure oxygen combustion	• Skip a gas separation process through emission of high concentration of carbon dioxide
Product shipment	Mobile combustion	Renewable energy vehicles	• Fuel conversion of commercial vehicles such as application of fuel cell

**Table 4.** Nitrogen oxide emission standards for the lime industry

Emitting facilities		Facility classification	NOx standard concentration (ppm)	
			Initial year	Final year
Process combustion facility	Firing facility among lime/plaster and product manufacturing facilities	Before January 31, 2007	≤ 140	≤ 100
		From February 1, 2007 to December 31, 2014	≤ 120	≤ 80
		After January 1, 2015	≤ 56	≤ 40

기술에 대해 해당 순위를 대표하는 기술로 선정하였다. 결과는 구형 소성로를 개선하여 가스상(LPG, LNG 등)으로 대체하는 연료전환을 1순위(42%)로 고려하고 있는 것으로 나타났으며, 이외에도 온실가스 분리·포집 기술 중 흡수법(2순위, 약 50%), 흡착법(3순위, 약 42%), 분리막법(4순위, 약 58%) 등으로 나타났다. 이러한 수요조사 결과의 경우 흡수법과 흡착법이 많이 알려져 있기 때문에 많은 기업이 고려대상으로 의사를 표한 것으로 보여지나, 분리막법의 경우에도 이산화탄소 처리비용이 흡수법의 약 75% 수준으로 보고된 사례가 있어 향후 온실가스 감축으로 고려할만한 기술로 판단되었다<sup>13)</sup>.

### 3. 연구방법

#### 3.1. 석회석 소성로 유형 조사

국내 석회석 가공업체들의 온실가스 배출활동을 분석하기 위해서는 업체별로 다양한 유형의 소성로를 보유하고 있기 때문에 소성로 유형에 따른 효율과 사용연료, 감축기술 적용 방안 등의 차이가 있다. 석회 생산 공정의 소성로는 크게 토중로, 유체로, 회전로로 구분되고 있으나, 가공업체별 설계 방식, 연료 종류, 국외 기술로 도입된 기술에 따라 다양하게 분류가 되기 때문에 명확하게 정의된 기준은 없다<sup>14)</sup>. 석회석 소성업체를 대상으로 한 설문조사

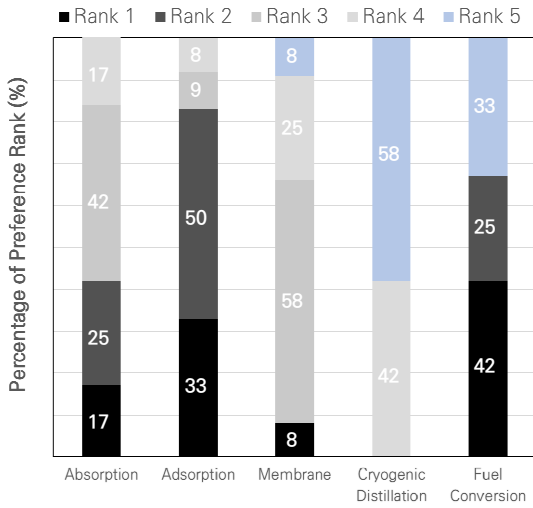


Fig. 3. The lime industry's preference rank for greenhouse gas reduction technologies by question investigation.

로부터 토중로의 경우 50~80톤/일 규모로 고체연료(석탄)를 주로 사용하며, 유체로 및 회전로의 경우 200~300톤/일 규모로 고체(석탄) 및 기체(LNG, 부생가스 등) 연료를 사용하는 것을 알 수 있었다. 또 국내 석회 가공업체 중 중소기업의 경우 토중로를 다수 보유하고 있고 중견/대기업의 경우 상대적으로 효율이 높은 유형의 유체로를 보유하고 있다. 2022년 기준 국내 석회 가공업체의 총 석회 소성로는 141기로 토중로가 108기, 유체로가 24기, 회전로가 9기를 보유하고 있으며 대부분 고체연료(석탄)를 사용하는 토중로가 전체 75% 이상을 차지하고 있는 것으로 확인되었다. 상기 제시된 바와 같이 토중로는 고체연료를 사용하는 반면 유체로는 설계 방식에 따라 원단위가 낮은 기체연료를 사용할 수 있으므로 소성로별 생산되는 제품의 온실가스 원단위도 차이가 발생할 수 있으며 온실가스를 감축할 수 있는 여건도 다른 것이 현실이다.

3.2. 소성로 유형별 온실가스 배출 원단위 분석

앞서 언급한 것과 같이 소성로의 온실가스배출량을 산정할 때 Tier 1만 적용하는 경우 원단위의 정확성이 떨어진다. 이에 따라 원료의 순도와 하소율을 고려하는 Tier 2, Tier 3를 적용해야 실제 배출량에 더욱 근접한 값을 도출할 수 있지만, 원료와 제품의 하소율 등의 품질 변동성이 있으므로 상위 등급의 산정방법의 적용이 어려운 상황이다. 그럼에도 국내 배출권거래제 제4차 기간과 탄소국경조정제

도(Carbon Border Adjustment Mechanism, CBAM) 또는 탄소세(Carbon Tax) 등에 대비하기 위해서, 산정등급을 보다 세분화하는 등의 방법으로 상위 등급의 산정방법을 적용하여 원단위를 줄이는 것이 필요하다고 여겨진다.

현재까지 업종이나 업체의 온실가스 배출 관련 추이를 분석하기 위한 가장 명확한 방법은 원단위 추이를 확인하는 것이다. 온실가스배출 원단위란 단위 생산량 당 온실가스 배출량 혹은 에너지 사용량으로 분석 대상의 직접적인 온실가스 감축 노력 외에 공정 효율성 등이 간접적으로 반영되는 방법이다. 즉, 온실가스 원단위는 실제 사업장에서 석회석 소성로별 활동자료(Q<sub>i</sub>)를 수집하고 산정등급 Tier 1을 활용하여 산정한 온실가스배출량(E<sub>i</sub>)을 다시 활동자료(Q<sub>i</sub>)로 나누어준 값으로써 석회석 톤당 배출되는 온실가스의 양을 알 수 있는 자료이다. 이에 본 연구에서는 석회석 가공업체를 선별하여 Table 5와 같이 서로 다른 소성로의 사용 연료 및 공정배출량을 비교해 보았다. 일반적으로 토중로와 같은 수직로(Shaft kiln)보다 유체로(Parallel flow regenerative kiln, PFRK) 형태의 소성로가 효율이 높은 것으로 알려졌다<sup>15)</sup>.

A사는 유체로인 신식로에 해당하며 연료로 수입 무연탄과 연료용 유연탄, LNG를 사용하여 CaO 95% 이상의 생석회를 생산하고 있다. 해당 소성로의 경우 토중로 대비 고체연료뿐만 기체 연료를 사용하므로 석회 제품을 비교적 낮은 원단위로 생산할 수 있다는 장점이 있다. B사도 마찬가지로 신식 유체로를 사용하며 고체연료 외 액체연료를 사용하여 원단위를 낮춘 특징이 있다. 하지만 원단위는 A사보다 큰 것으로 나타나는데, 이는 연료의 배출계수를 고려했을 때 같은 발열량 대비 액체상 연료가 가스상 연료에 비해 배출계수가 크기 때문으로 여겨지며, 배출계수가 높은 무연탄의 사용량을 줄이고, 그 보다 낮은 배출계수를 가진 연료유의 사용량을 늘리는 등 공정 최적화를 통해 보완할 수 있을 것으로 생각된다. C사와 D사는 석회 소성업 초반부터 사용되었던 구형 토중로이다. 해당 소성로는 현재 고체연료만 사용 가능하며, 유체로에 비해 대체로 효율이 낮아 원단위가 높은 특징이 있다.

상기 소성로별 실제 온실가스 배출량과 원단위를 분석한 값은 Table 6와 같다. 이때 분석값은 고정연소와 공정배출만 고려하여 원단위 분석을 진행하였으며 소성로에 투입되는 전력은 매우 소량이므로 간접배출량은 제외하였다. Tier 1을 이용한 소성로별 원단위는 LNG 및 석탄을

**Table 5.** Characteristics of type of lime kiln

Company		A	B	C	D
Type of lime kiln		Parallel Flow Regenerative Kiln	Parallel Flow Regenerative Kiln	Improved shaft kiln	Improved shaft kiln
Fixed combustion emission	Solid fuel	Imported anthracite, Anthracite for fuel	Imported anthracite, Petroleum coke	Imported anthracite	Imported anthracite
	Liquid fuel	-	Kerosene	-	-
	Gas fuel	LNG	-	-	-
Process emissions (lime production)		Quicklime	Quicklime	Quicklime	Quicklime
Image					

**Table 6.** Results of greenhouse gas emission intensity by lime kiln type

Company	A	B	C	D
Amount of activity data (Output, ton)	102,452	153,072	44,574	72,165
Total GHG emissions (tCO <sub>2</sub> -eq)	100,928	153,769	45,811	73,603
(1) GHG intensity (Emissions/Activity)	0.9851	1.0045	1.0277	1.0199
(2) GHG intensity for purity application (tonCO <sub>2</sub> /t)	0.9851	0.9964	0.9978	1.0199
Content of carbonate minerals (%)	100	99.2	97.05	100

사용하는 유체로는 0.9851 tonCO<sub>2</sub>/t, 등유 및 석탄을 사용하는 유체로는 1.0045 tonCO<sub>2</sub>/t, 석탄만을 사용하는 토중로는 1.0277 tonCO<sub>2</sub>/t 및 1.0199 tonCO<sub>2</sub>/t으로 나타났다. 이 결과는 진보된 방식의 소성로를 사용하는 경우 효율이 소폭 향상되어 같은 양의 석회석을 사용하더라도 온실가스 배출량이 감소할 수 있다는 것을 의미한다. 여기서 석회석 원광의 순도를 반영하는 Tier 2 산정방법과 석회킬른먼지(Lime Kiln Dust, LKD)의 발생량(Q<sub>LKD</sub>)과 순도(F<sub>i</sub>), 하소율(F<sub>LKD</sub>)을 적용하는 Tier 3 산정방법을 적용할 경우 정밀도가 향상되기 때문에 온실가스 배출량은 더욱 감소할 것으로 보인다. Tier 2에 해당하는 각 소성로에 투입되는 원료 중 탄산염 광물의 순도를 반영했을 때, B, C의 경우 약 0.8-2.9% 감소했고 나머지 업체들은 원료가 전량 탄산염 광물로 구성되어 변화는 없었다. 다만 순도

나 하소율 등의 값을 적용하기 위해서는 대표성 있는 시료를 채취해야 하며, 이를 위해 사업장별 품질관리와 시료 채취 방법에 대한 규격화 등이 필요하다. 실제 Lee(2020) 등은 IPCC에서 분류하는 생석회(고칼슘석회), 경소백운석(고토석회), 소석회(수경성석회)와 국내 석회의 상세 등급별 파악된 생산량을 통해 개발한 배출계수를 이용하여 온실가스 배출량을 비교 평가하였다. 평가결과 품위에 따른 온실가스 배출량 차이가 나는 것을 확인할 수 있었으며, 국내 석회 기준에 맞는 데이터 구축 및 배출계수 연구가 지속되어야 정확한 온실가스 배출량 산정도 가능할 수 있을 것으로 보고하였다<sup>16)</sup>.

국내 석회석 소성업체는 대부분 중소기업으로 기술적, 경제적 문제로 배출 원단위가 좋지 않은 토중로를 운영하는 업체들이 대다수이다. 이에 온실가스 감축의 필요성을



인지하면서도 영리활동에 치우칠 수 밖에 없는 상황이다. 따라서 온실가스 배출권거래제 제4차 기간 도입 시 BM 할당 방식으로의 전환, 순도 측정의 의무화 등으로 석회업체 대부분이 손해를 볼 수 있기 때문에 국내 석회 기준에 맞는 데이터 구축 및 배출계수 산정이 무엇보다도 필요하다. 그리고 정부나 지자체에서도 시멘트 산업뿐만 아니라 석회 산업에서의 석회석 품질관리와 관련된 규격의 제정, 연료 전환을 위한 소성로 개선 및 석회 산업에 적합한 CCUS 기술 실증, 저감기술의 경제성이나 소요 부지면적 평가 등의 추진을 위한 지원이 무엇보다도 필요한 것으로 보인다.

#### 4. 결 론

석회 산업은 온실가스 배출권거래제 제3차 할당 계획 상 배출량 기준 할당방식(GF)을 적용 중이나 4기부터 배출효율 기준 할당방식(BM)으로 변경될 가능성이 높고 정부에서도 생석회 생산시설의 BM 할당방식의 고도화 방안을 마련 중이다. 현재까지 연구에 따르면 업종 평균 배출효율로 볼 수 있는 BM 계수 산정 시 제품생산량에 순도 보정이 반드시 필요하다는 입장이나 관련된 규격 및 배출량 산정식 적용 등의 방안이 없어 관련 준비 및 대응이 무엇보다 시급한 상황이다.

석회 가공업의 온실가스 배출 추이를 분석하기 위해 업체 소성로 유형별 온실가스 원단위를 분석하였다. 분석 결과 유체로(신식로)를 사용하는 경우 토중로 대비 효율이 향상되어 같은 양의 석회석을 사용하더라도 온실가스 배출량이 감소하는 효과를 확인했다. 또한, 석회석 원광의 순도를 반영하는 Tier 2 산정방법으로부터 약 0.8%의 원단위 감소를 확인했으며, 이에 따라 석회킬른먼지(Lime Kiln Dust, LKD)의 발생량( $Q_{LKD}$ )과 순도( $F_i$ ), 하소율( $F_{LKD}$ )을 적용하는 Tier 3 산정방법을 적용할 경우 온실가스 배출량은 더욱 감소할 것으로 보인다.

그러나 국내 석회석 소성업체는 대부분 중소기업으로 기술적, 경제적 문제로 배출 원단위가 좋지 않은 토중로를 운영하는 업체들이 대다수이며 온실가스 감축의 필요성을 인지하면서도 영리활동에 치우칠 수 밖에 없는 현실이기 때문에 국내 석회 기준에 맞는 데이터 구축 및 배출계수 산정이 무엇보다도 필요하며, 정부나 지자체에서도 시멘트 산업뿐만 아니라 석회 산업에서의 석회석 품질관리와 관련된 규격의 제정, 연료전환을 위한 소성로 개선

및 석회 산업에 적합한 CCUS 기술 실증, 저감기술의 경제성이나 소요 부지면적 평가 등의 추진을 위한 지원이 무엇보다도 필요할 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

본 연구는 한국광해광업공단 기술연구사업 ‘국내 석회석 광산 탄소배출량 산정기준 마련 및 저감기술 적용방안 연구(2022-10)’의 일환으로 수행되었습니다.

#### References

1. Kim, Y. J., You, O. J., Lee, H. S., et al., 2023 : Yearbook of minerals statics, pp.24-201, 2023 Edition, Daejeon, Republic of Korea.
2. EuLA, 2022 : CO<sub>2</sub> innovation in the lime sector 3.0, 2022 Edition, European Lime Association (EuLA), Brussels, Belgium. pp.6-13.
3. GIR, 2022 : National Greenhouse Gas Inventory Report of Korea (in Korean), pp.114-117, GIR Report 11-1480906-000001-10, Green House Gas Inventory and Research Center, Cheongju, Republic of Korea.
4. Kim, H. S., 2011 : Necessity of Refining Domestic Limestone, Resources Recycling, 20(4), pp.3-22.
5. Kwon, S. J., Seo, J. H., Kim, Y. J., et al., 2022 : Corresponding strategies of the limestone industry according to the national greenhouse gas reduction regulation, Journal of the KSMER, 59(6), pp.707-716.
6. Yuli, S., Zhu, L. and Dabo, G., 2015 : CO<sub>2</sub> Emissions from China's lime industry, Applied Energy, 166, pp.245-252.
7. GIR, 2022 : National Greenhouse Gas Inventory Report of Korea (in Korean), pp.382-427, GIR Report 11-1480906-000002-10, Green House Gas Inventory and Research Center(GIR), Cheongju, Republic of Korea.
8. Ko, J. M., 2002 : Calcination technology of limestone (in Korean), Proceedings of The Mineralogical Society of Korea Conference, pp.103-117, The Mineralogical Society of Korea, 1 Oct 2002, printed in Daejeon, Republic of Korea.
9. Kwon, W. T., 2021 : Carbon neutrality and the technology for the application of waste synthetic resin in the cement industry, Korean Recycled Construction Resources Institute, 16(3), pp.45-50.
10. Min, T. B., Choi, H. K., Kim, H. C., et al., 2019 : Use of alternative fuels in cement manufacturing, Korean Recycled Construction Resources Institute, 14(1), pp.17-21.
11. Chatziaras, N., Psomopoulos, C. S., Themelis, N. J., 2014 : Proceedings of the 12th International Conference on

Protection and Restoration of the Environment, pp.521-529, Desalination and Water Treatment, 29 Jun 2014, Skiatho Island, Greece.

12. Bynton, R. S., 1966 : Chemistry and technology of lime and limestone, pp.276-281, 2nd Edition, Wiley & Sons, United State of America.

13. KRICT, 2020 : White paper on carbon dioxide transition technology (in Korean), pp.31-84, 1, Korea Research Institute of Chemical Technology (KRICT), Daejeon, Republic of Korea.

14. KLIME, 2011 : Limestone (in Korean), 16, 2nd Edition, Korea Limestone Industry Cooperation (KLIME), Seoul, Republic of Korea.

15. EuLa, 2014 : A Competitive and efficient lime industry cornerstone for a sustainable Europe, pp.27-40, European

Lime Association (EuLA), Brussels, Belgium.

16. Lee, J. W., Kim, M. H., Lee, J. W., et al., 2020 : Development of GHG emission factors for lime production industry processes in Korea, Journal of Climate Change Research, 11(5-2), pp.501-506.

---

**권석제**

- 한양대학교 자원환경공학과 공학석사
  - 현재 한국석회석신소재연구소 연구개발부 연구원
  - 당 학회지 제32권 2호 참조
- 

---

**조진상**

- 강원대학교 지역기반공학과 공학박사
  - 현재 한국석회석신소재연구소 연구개발부 책임연구원
  - 당 학회지 제32권 2호 참조
- 

---

**김영진**

- 강원대학교 에너지자원공학과 공학박사
  - 현재 한국석회석신소재연구소 연구개발부 선임연구원
  - 당 학회지 제32권 2호 참조
- 

---

**김양수**

- 조선대학교 에너지자원공학과 공학석사
  - 현재 한국석회석신소재연구소 연구개발부 연구원
  - 당 학회지 제32권 2호 참조
- 

---

**서준형**

- 광운대학교 화학공학과 박사
  - 현재 한국석회석신소재연구소 연구개발부 선임연구원
  - 당 학회지 제32권 2호 참조
-