

동해-삼척지역 석회석의 물리화학적 특성이 탈황성능에 미치는 영향

서준형 · 백철승 · 권우택* · †조계홍 · 안지환**

한국석회석신소재연구소, *한국세라믹기술원, **한국지질자원연구원

Influence of Physicochemical Characteristic of Donghae-Samcheok Limestones on the Performance of Flue Gas Desulfurization (FGD)

Jun-Hyung Seo, Chul-Seoung Baek, Woo-Tech Kwon*, †Kye-Hong Cho and Ji-Whan Ahn**

Korea Institute of Limestone and Advanced Materials

**Korea Institute of Ceramic Engineering and Technology*

***Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources*

요 약

동해-삼척지역 석회석을 활용하여 습식배연탈황공정기술에 대한 적용성을 검토하기 위해 석회석의 물리화학적 특성이 탈황성능에 미치는 영향을 연구하였다. 실험은 ASTM 표준 시험방법인 염산적정법을 적용한 실험실 규모의 실험 장치를 이용하여 총중화능력을 측정하였다. 실험결과 총중화능력은 CaO 함량 등의 화학성분 보다 입자크기의 물리적 특성에 더 큰 영향이 있음을 알 수 있었으며, 입자크기가 미립화 될수록 총중화능력의 값은 높아지는 것으로 확인되었다.

주제어 : 배연탈황, 비산회, 석회석, 총중화능력

Abstract

It studies that effect of limestone of physicochemical characteristic on the performance of flue gas desulfurization (FGD) and application examination for technology of wet type FGD process and to utilize the limestone in Donghae-Samcheok. The experiment method was measured total neutralizing capability (TNC) using the lab scale experimental apparatus based on the HCl titration test. The results of TNC of limestone samples were more dependent on the physical characteristics including particle size rather than chemical compositions such as CaO content and particle size of limestone get smaller, TNC is increased.

Key words : flue gas desulfurization (FGD), fly ash, limestone, total neutralizing capability (TNC)

1. 서 론

국내에 부존하고 있는 석회석은 CaO 함량 40% 이상, 맥폭 25 m 이상, 그리고 연장 100 m 이상의 것을

기준으로 하였을 때 약 58억 5천만 톤으로 국내 비금속 광물 매장량 중 약 75%를 차지하고 있으며, 가채광량이 81억 톤에 이르고 있다.¹⁻²⁾ 석회석은 일반적으로 백운석이나 규산염 등이 불순물로써 함유되어 있으며,

· Received : September 9, 2015 · Revised : October 8, 2015 · Accepted : October 19, 2015

*Corresponding Author : Kye-Hong Cho (E-mail : khcho99@kilam.re.kr)

R & D Department, Korea Institute of Limestone and Advanced Materials, 18-1, Udeok-gil, Maepo-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.

Table 1. Standard of Limestone for flue gas desulfurization (SPS-KLIC-004-775, 2012)

Item	Chemical compositions (%)				Particle size
	CaCO ₃	MgCO ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	
Limestone for flue gas desulfurization	≥ 95	≤ 4	≤ 2	≤ 0.5	d ₉₀ = 45 μm

넓고 풍부한 분포와 더불어 다양한 물리, 화학적 특성을 가지고 있어 여러 분야에서 유용하게 활용되고 있다. 이러한 석회석의 용도는 건축, 토목, 농업용에서 제철 제강용, 화학공업용 등으로 확대되었고 최근에는 환경 분야를 중심으로 배연탈황용, 고기능성 석회제품 등의 개발이 활발히 이루어지고 있다.³⁾

1990년대 이후 국내 환경기준이 강화되면서 유해 대기오염물질이 다량 배출되는 국내 화력발전소는 H₂S, SO₂, SO₃와 같은 황산화물 배출 규제 기준을 충족하기 위해 다양한 저감기술을 적용하고 있다. 배연탈황기술이란 흡수, 흡착, 산화, 환원 등의 원리를 이용해 연소 후 배기가스 중에 포함되어 있는 SO_x를 제거하는 기술로 정의할 수 있으며, 일반적으로 흡수제를 이용한 탈황과정과 흡수제를 회수하는 공정으로 이루어진다. 실제 석탄 연소 후에는 fly ash가 다량 발생하고 이들과 함께 흡수제의 회수가 ESP나 filter에 의해 이루어진다. 이중에서도 filter를 이용하면 퇴적과 동시에 미반응 흡수제와 SO₂ 사이에 추가 반응이 일어나게 되므로 이 부분의 탈황공정도 중요하다.

또한, 배연탈황기술은 흡수제의 제조방법에 따라 물, 알칼리 용액 등으로 배가스의 SO_x를 흡수시켜 제거하는 습식법과, 배기가스를 분말이나 pellet 형태의 촉매층을 통과시키거나 흡수제를 노내 또는 덕트에 주입하여 SO_x를 제거하는 건식법, 그리고 spray dryer absorber를 사용하여 슬러리 형태의 흡수제 액적을 분사하여 건조된 고체 생성물을 얻어내는 반건식법으로 나눌 수 있다. 이 중 국내 발전사용 배연탈황설비는 상업화된 상태로 기술적 완성도가 높고, 90% 이상의 탈황율을 보이고 있는 습식탈황공정이 대부분 이용되고 있다. 습식탈황공정 중 현재 가장 널리 보급된 공정은 석회석 또는 소석회 슬러리를 SO₂가 함유된 배연과 접촉시켜 SO₂를 흡수 제거하고, 부산물로 석고를 얻는 습식 석회석-석고 공정(wet limestone-gypsum process)이다.^{4,5)} 습식 석회석-석고 공정 설비에서 SO₂ 흡수제로 이용되는 배연탈황용 석회석은 산지, 광산에 따른 물리, 화학적 특성과 더불어 가스와 액의 접촉방법, 온도, pH 등에 따라서도 탈황공정의 효율, 운전비용 등에 영향을

미치게 되기 때문에 향후 공정 특성에 맞는 최적의 석회석을 선택할 수 있는 기술개발은 매우 중요하다.⁶⁻⁷⁾

본 연구에서는 국내 탈황용 석회석의 효율적인 활용 및 배연탈황공정에 대한 적용성을 검토하기 위해 탈황용 흡수제로 사용되고 있는 국내 4종의 석회석에 대한 물리화학적 특성평가를 진행하고, 배연탈황공정에서 ASTM에 표준화된 실험방법을 응용한 중중화능력 측정 실험 장치를 통해, 국내 탈황용 석회석의 물리화학적 특성 및 입자크기분포에 따른 탈황성능을 비교 분석하였다.

2. 이론적 배경

석회석은 탄산칼슘과 마그네슘 화합물 및 미량의 불활성분(inert fraction) 등으로 구성되어 있으며, 배연탈황공정에 사용되는 석회석의 중요한 특성은 일반적으로 화학조성(chemical composition), 분쇄성(grindability), 반응성(reactivity) 등으로 나눌 수 있다.⁸⁾ Table 1은 한국석회석가공업협동조합 표준인 배연탈황용 석회석(SPS-KLIC-004-775, 2012)⁹⁾의 규격을 나타낸 것으로, 배연탈황용 석회석의 화학조성은 통상 CaCO₃가 95% 이상의 순도를 요구하며, 분쇄성은 분쇄기에 따라 차이는 있으나, 일반적으로 요구되는 배연탈황용 석회석의 입도는 d₉₀ = 325 mesh (45 μm) 이상을 요구하고 있다.¹⁰⁾

석회석의 반응성은 석회석 슬러리를 이용하는 습식 배연탈황공정에서 가장 중요한 인자로 공정설계에 필수적이며 이것에 관한 많은 연구가 수행되었다. 그 중 해수(seawater)에서 calcite 용해에 관한 연구가 최초로 알려져 있으며, 이들은 제한된 범위의 석회석 종류의 입자크기와 교반속도의 영향에 관하여 실험하였다.¹¹⁾

미국이나 일본 등의 선진국에서는 반응공정 과정에서의 흡착효율 및 탈황공정에 적합한 석회석을 제공하기 위한 다양한 연구를 진행해오고 있는데, 미국은 1970년대 초 환경부(EPA)가 배연탈황공정에서 석회석의 반응성 및 용해속도(dissolution rate) 측정에 관한 연구를 지속적으로 수행하고 있으며,¹²⁾ 일본은 미쓰비시중공업(MHI)을 비롯한 대학 및 연구소 등이 각 기업이 보유

하고 있는 흡수탑 설계모델과 국내외 시장에서 수주한 배연탈황공정에 적용할 석회석 특성을 측정하기 위한 실험을 수행하고 있다.¹³⁾ 국내의 경우, 이우석¹⁴⁾, 최원길¹⁵⁾ 등이 국내산 석회석을 대상으로 pH-stat 방법을 통해 용해반응에 미치는 영향을 연구하여 용해속도는 석회석의 종류에 관계없이 입자의 크기가 작은 것이 가장 빠른 용해도를 보이며 동일한 입자크기를 가질 경우 3%의 MgO가 포함된 석회석이 순수한 석회석보다 두 배가량 용해속도가 빠르다고 발표하였다. 그러나 국내의 경우 배연탈황공정에 적용하기 위한 석회석의 반응성에 대한 평가는 정확하게 이루어지지 않은 상태에서 다량의 석회석이 화력발전소용 배연탈황설비를 중심으로 한 습식 석회석-석고형 탈황공정에 이용되고 있으며,¹⁶⁾ 이러한 석회석의 반응성에 대한 평가가 정확히 이루어지지 않으면 탈황효율의 유지, scale의 생성, 반응제 이용률 등 전반적인 운전성능을 보장하기 어렵다.¹⁷⁾

석회석의 반응성을 측정하는 방법은 total neutralizing capability (TNC) 실험법과 같은 습식법과 열침칭반응기를 이용하는 건식법으로 나뉘어진다. 그러나, 건식법의 경우 표준화된 규정이 없다. 이외에도 염산과 달리 황산을 이용하여 시간에 따른 용액의 pH 변화를 측정하여 석회석 입자와 산(acid)의 반응 속도를 결정하는 free-drift 방법과, 석회석 슬러리에 산을 연속적으로 공급하여 pH를 일정하게 유지하는 pH-stat 방법 등이 있다. 그러나 황산을 이용한 탈황효율 측정법의 경우 기공폐색(pore plugging)으로 인해 변수가 증가하는 단점이 있어 ASTM에서 제시된 염산을 이용한 중화능력 측정과 병행되어야 한다.

본 연구에서 적용하는 염산적정법은 배연탈황용 석회내에 용해된 Ca의 총중화능력 시험으로 ASTM C 1318-95에 표준화된 시험방법¹⁸⁾이며, pH 9 내외의 석회석 용액을 염산을 활용하여 pH 6 ± 0.4 에서 중화유지함으로써 총중화능력을 측정하는 방법이다. 염산용액 내에서 진행되는 총중화능력에 대한 물질수지식은 다음과 같다.

$$\% \text{TNC}(as \text{CaO}) = \frac{A \times B \times C_1}{W} \quad (1)$$

여기서, A : ml HCl consumed after 30 min

B : normality HCl

C₁ : chemical factor = 2.804 (mequi of CaO/10)

W : sample weight, g

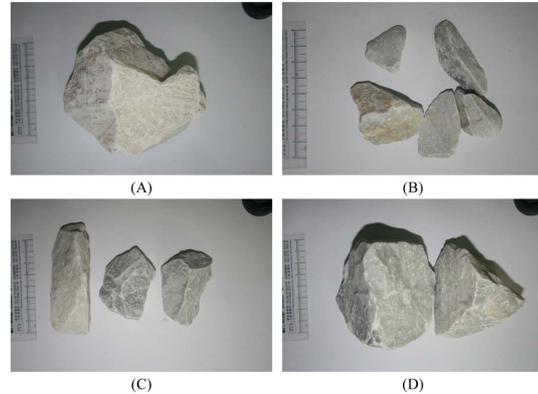


Fig. 1. Photographs of limestone samples ; (A) DS1 (B) DS2 (C) DS3 (D) JD.

3. 실험방법

3.1. 시료

석회석 시료는 총 4종으로 동해-삼척 지역 석회석 광산 3개소 (DS1, DS2, DS3)와 비교군으로 제천-단양 지역 석회석 광산 1개소 (JD)의 석회석을 사용하였다. Fig. 1은 4개 광산에서 채광된 원석을 대상으로 세척과정을 통해 표면의 오염물을 최대한 제거한 후 촬영을 수행한 것이다. DS1, DS2 시료는 채광지가 인접하여 상아색에 가까운 백색과 회색의 석회석이 혼재되어 있으며, DS3 시료의 경우 다른 시료와 달리 과거부터 로 내탈황용 석회석으로 사용되고 있는 시료로, 타 시료 대비 색상의 균질성이 낮아 CaO 품위가 상대적으로 낮을 것으로 판단되었다. JD 시료는 제천-단양 지역의 생석회 제조용 고품위 석회석으로 사진 상으로는 확인하기 어려우나 타 시료에 비해 마찰에 의한 분말 발생량이 많음을 확인하였으며, 동해-삼척지역 석회석 시료에 비해 분화도가 높은 특성을 나타내고 있다.

4. 실험장치 및 방법

석회석의 화학분석은 XRF(Primus 2, Rigaku, Japan)를 이용하였으며, 밀도(Accupyc 1340, Pro-Tech, Korea)는 재현성을 위해 무게(weight) : 부피(volume) 비로 3회 반복 측정된 평균값에 의해 계산되었다. 열중량분석은 열중량-시차주사열분석기(STA 449C Jupiter, NETZSCH, Germany)를 이용하였으며, 질소가스 환경에서 시료를 넣고 분당 10°C 승온 조건으로 1,000°C까지 상승시켜

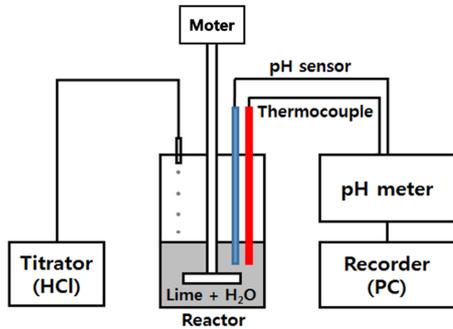


Fig. 2. Schematic diagram of the TNC measuring apparatus.

측정하였다.

석회석의 총중화능력을 측정하기 위한 실험은 ASTM C1318-95법에 따른 염산적정법을 이용하였으며 Fig. 2와 같이 반응기, 산 공급 장치, pH 및 온도 측정 장치, 교반기, 기록 장치로 구성된 실험실 규모 회분식 장치를 이용하였다. 실험에 사용되는 석회석 시료는 해머밀(Hammer mill, Netzsch, Germany)을 활용하여 1차 분쇄 후 KS A 0507¹⁸⁾에 따라 총 3개 구간의 입도 0.045 mm under, 0.045 - 0.1 mm, 0.1 - 1.0 mm로 분리한 뒤 입자크기에 따른 TNC 실험을 진행하였다. ASTM C1318-95법에 사용된 염산은 1 N로 제조하였으며, 석회(1.402 g) + 증류수(50 mL)를 교반하면서 수동 적정장치를 통해 30분 동안 pH 6 ± 0.4가 될 때까지 적정 후 투입된 염산 양으로 TNC를 평가하였다. 이러한 액-고 중화반응 측정 실험은 용해반응조의 구조, 수용액상의 산 공급 장치, pH 측정 장치 및 기타 실험실 내 온도, 습도 등의 영향요인을 최소화하기 위해 온도 20 ± 2 °C, 습도 50% 내외로 유지한 실험실에서 실험재 현성을 위해 각 시료에 대하여 5회 측정실험 후 평균값을 데이터로 활용하였다. 적정장치(Si Analysis Titoline Series)의 뷰렛은 20 mL 용량에 ±0.5% 오차를 가지며 pH Meter(Eurotron 6000 Series, Korea)를 이용하여 pH

변화량을 측정하였다. 석회석이 포함된 액-고 용액에 염산을 투입하는 주기는 초기에는 10초당 0.2 mL로 투입하였으며 pH 6에 도달한 이후에는 pH 6.04 이상으로 측정값이 증가할 때 0.1-0.2 mL를 추가 투입하여 30분간 유지하였다.

5. 실험결과

5.1. 석회석의 물리화학적 특성

석회석의 화학조성 분석은 석회석의 불순물인 SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, MgO 등의 함량 변화에 따라 반응기 성능에 크게 영향을 미칠 수 있으므로 이러한 영향을 규명하기 위해 반드시 필요하다. Table 2는 XRF와 밀도측정기를 사용하여 석회석 시료를 분석한 결과를 나타낸 것이다.

화학분석결과 DS1, DS2, JD 시료의 경우 CaO 품위가 54% 이상으로 고품위석회석에 해당하였으며 3개 시료의 MgO 경우에도 비슷한 함량을 나타내어 MgCO₃로 환산하였을 때 1% 내외의 적은 함량을 보였다. 그러나 DS3 시료는 MgO 성분이 MgCO₃로 환산하였을 때 약 8%로 로내탈황용 석회석 품질에는 충족하지만 Table 1에 제시되었던 배연탈황용 석회석 품질 기준의 MgCO₃ 함량 4% 보다 상대적으로 높아 습식 탈황공정에는 적합하지 않는 석회석으로 확인되었으며, 2003년 지질학적으로 조사된 20종의 석회석 조사보고서의 광물학적 분석결과와도 일치하였다.²⁰⁾ 국내 4종 석회석의 밀도는 연구결과와 유사한 2.75 g/cm³ 내외임을 확인하였다.

Fig. 3은 시료의 열중량분석 TG-DSC 결과를 나타낸 것이다. 일반적으로 TG-DSC 분석 시 석회석은 400-550°C에서 Ca(OH)₂의 분해가 이루어지고 600-900°C 사이에서 CaCO₃의 탈탄산화반응이 이루어진다. 백운석의 경우에는 470-600°C의 구간에서 산화마그네슘과 이산화탄소로 분해되어 800°C 내외에서 탈탄산화반응이

Table 2. Physicochemical characteristic of the limestone samples

Samples	Chemical compositions (wt. %)					Density (g/cm ³)
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	
DS1	0.946	0.591	0.290	54.314	0.493	2.756
DS2	0.367	0.191	0.220	54.404	0.946	2.755
DS3	0.198	0.117	0.275	50.846	3.802	2.760
JD	1.775	0.110	0.208	54.168	0.654	2.760

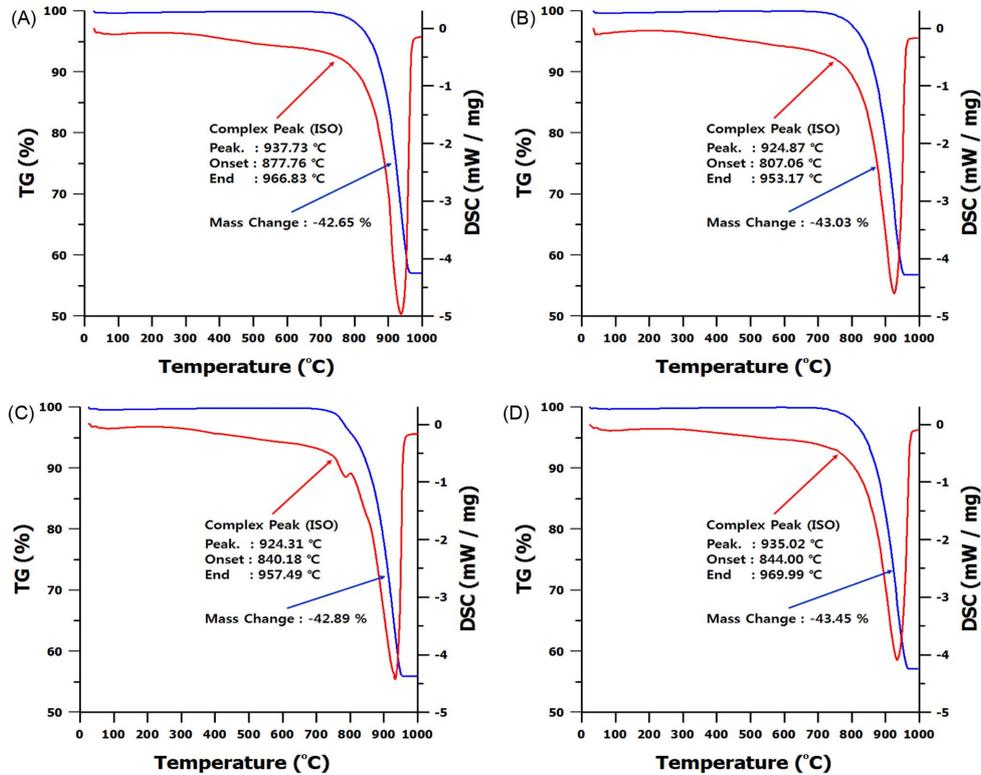


Fig. 3. TG-DSC analysis result of limestone samples ; (A) DS1 (B) DS2 (C) DS3 (D) JD.

이루어진다. TG-DSC에 표시된 온도구간별 중량 감소는 탈탄산화에 의한 것으로 판단할 수 있다. TG-DSC 분석 결과 4종의 시료 모두 700°C에서 열분해속도가 증가하기 시작하였다. 800-850°C 구간에서는 가장 활발히 탈탄산이 시작되며, 940-960°C에서 탈탄산이 종료되는 것으로 확인하였다. 중량감소의 경우에는 42-43%로 4종의 석회석 모두 유사한 결과를 나타내었다. 한편, 지리적으로 인접한 석회석일지라도 열분해 특성의 차이를 확인하였는데, DS2, DS3 시료의 경우 DS1, JD 시료에 비해 상대적으로 낮은 온도에서 탈탄산화가 종료됨을 확인할 수 있었다.

5.2. 총중화능력 분석

석회석의 TNC는 30분간 pH 6 ± 0.4가 되는 시점을 기준으로 하여 첨가된 염산량으로 결정하였으며, 실험 변수에 의한 영향을 측정하고자 기준선 확보를 위해 시약급 탄산칼슘 (CaCO₃, Aldrich)을 추가로 사용하여 TNC를 평가하였다. 실험결과로부터 평균치의 편차는

± 0.5% 내의 신뢰도를 확인할 수 있었다. 또한, 시약급 탄산칼슘 및 석회석의 초기 pH는 약 9-10 정도로 약 알칼리성을 나타내었다.

Table 3은 석회석의 입자크기에 따른 TNC 값을 나타낸 것으로 적정장치를 활용하여 30분간 pH 6 ± 0.4를 유지하는데 소요되는 염산첨가량 및 TNC 값은 입자크기와 반비례하는 경향을 보였으며 CaO 함량 등의 화학적 조성에 따른 TNC 값의 변화는 경향성을 보이지는 않는 것으로 확인되었다. 또한, 시약급 탄산칼슘과 비교했을 때 ± 0.5% 범위 내로 큰 차이는 나타나지 않음을 확인하였다. 한편, 석회석 입자가 클수록 염산주입 시 pH 변화가 급격하게 감소하였는데 이 같은 현상은 약산성인 H₂CO₃ 및 HCO₃⁻ 등의 급격한 생성에 의한 것으로 판단되며, 염산 주입량이 지속적으로 증가함에 도 불구하고 pH는 알칼리성을 유지하려고 하는 산중화능력을 나타내었는데, 이는 H₂CO₃ 및 HCO₃⁻ 등이 buffer 역할을 하여 pH 감소가 둔화되었기 때문으로 판단된다.²¹⁾ 따라서, TNC의 경우 석회석의 CaO 함량 등

Table 3. Effect of range of particle size in limestone samples on amount of 1N HCl and TNC for ASTM C1318-95

samples	Amount of 1N HCl (mL)			TNC (% as CaO)		
	0.045 mm under	0.045 - 0.1 mm	0.1 - 1.0 mm	0.045 mm under	0.045 - 0.1 mm	0.1 - 1.0 mm
CaCO ₃ (Reagent)	2.94			5.88		
DS1	2.84	2.48	1.74	5.68	4.96	3.47
DS2	2.95	2.67	2.00	5.90	5.35	3.99
DS3	3.06	2.35	1.75	6.10	4.70	3.49
JD	3.23	2.72	2.08	6.46	5.45	4.16

의 화학적 조성의 영향보다는 입자크기의 물리적 특성에 보다 많은 영향이 있음을 알 수 있었다.

동해-삼척지역과 제천-단양지역 석회석의 TNC를 비교한 결과, 제천-단양지역 석회석의 TNC 값이 더 높은 것을 확인하였는데, 이는 제천-단양 지역의 석회석이 동해-삼척지역 석회석에 비해 마찰에 의한 분말 발생량이 많은 영향으로 사료되며, 이에 따른 탈황성능 또한 우수한 것으로 사료된다. 그러나, 석회석 4종 시료의 TNC 결과 값의 경우 큰 차이가 발견되지 않는 것으로 보아 추후 Mg의 용해성 및 pH-stat에 대한 연구도 병행되어야 될 것으로 사료된다.

6. 결 론

동해-삼척지역 석회석을 활용하여 습식배연탈황공정 기술에 대한 적용성을 검토하기 위해 석회석의 물리화학적 특성이 탈황성능에 미치는 영향을 비교분석하였다. 시료는 국내 석회석 4종을 대상으로 실시하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 본 연구에서 사용된 탈황용 석회석의 TNC는 CaO 함량 등의 화학성분 보다는 입자크기 등의 물리적 특성에 더 큰 영향이 있음을 알 수 있었으며, 입자크기가 미립화 될수록 총중화능력의 값은 높아지는 것으로 확인되었다. 또한, 석회석 입자가 클수록 염산 주입시 pH 변화가 급격하게 감소되었으며, 염산 주입량이 지속적으로 증가함에도 불구하고 pH는 약알칼리성을 유지하려고 하는 산중화능력을 나타내었다.

(2) 동해-삼척지역 석회석과 제천-단양지역 석회석의 총중화능력 결과 제천-단양지역 석회석의 총중화능력이 더 높은 값을 나타내었는데 이는 마찰에 의한 분말 발생량이 많고 분화도가 높은 특성으로 사료된다.

(3) 석회석의 입자크기 등의 물리적 특성을 개선시킨

다면, 배연탈황공정의 성능을 보다 향상시킬 수 있을 것으로 판단되며, 추후 Mg의 용해성 및 pH-stat 법에 대한 연구도 병행해야 될 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 2015년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20141010101880)

References

1. The Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 2009: www.kigam.re.kr.
2. Cho, J. S, 2014: *Mineral Phase and Microstructure Behaviors on Burning Condition of Domestic Low-grade Limestone*, J. of the Korean Ceramic Society, Vol. 51, No. 2, pp 88-96.
3. Kim, J. A, 2006: *The Effect of Hydration Condition and Formation Age of Limestone on the Synthesis Characteristics of Aragonite Precipitated Calcium Carbonate*, Thesis of Inha University, Korea, pp 1-64.
4. M. Waqif et al., 1992: *Comparative study of SO₂ adsorption on metal oxides*, J. of the Chemical Society, Faraday Transactions, Vol. 88, No. 19, pp 2931-2936.
5. Jung, I. C, 2002: *The Skills and Flue Gas Desulfurization System of Coal-Fired Power Plant*, Environmental Hi-technology, Vol 7, pp 28-43.
6. Angel Irabien et al., 1990: *Thermal Dehydration of Calcium Hydroxide. 1. Kinetic Model and Parameters*, J. of Industrial and Engineering Chemistry, Vol. 29, pp 1599-1606.
7. Park, S. S et al., 1997: *Grindability and Reactivity of Limestones for Flue Gas Desulfurization*, J. of Applied Chemistry, Vol. 1, No. 2, pp 465-468.

8. Park. S. S et al., 2010: *Reactivity and Criteria for Selection of Standard of Limestone for Flue Gas Desulfurization*, J. of Korea Society of Waste Management, pp 125-127.
9. Korea Limestone Industry Cooperation, 2012: *Limestone for flue gas desulfurization (SPS-KLIC-004-775)*, Korea, www.klime.org.
10. Lyoo. P. J, 1996: *The Foundation and Recent Trends of Grinding and Separation Techniques*, Lime, Vol. 1, No. 3, Korea Limestone Industry Cooperation, pp 6-12.
11. Morse. J. W and Berner, R. A, 1972: *Dissolution kinetics of calcium carbonate in seawater: II. A kinetic origin for Isocline*, American Journal of Science, Vol. 272, pp 840-851.
12. R. D. Letterman, 1995: *Calcium carbonate dissolution rate in limestone contactor*, United States Environmental Protection Agency, 600, SR-95, 068.
13. N. Ukawa et al., 1993: *Effects of particle size distribution on limestone dissolution in wet FGD process applications*, J. of Environmental Progress, Vol.12, No.3, pp 238-242.
14. Lee. W. S et al., 1996: *A study on Dissolution Rates of Domestic Limestones in Wet FGD Processes*, J. of the Korean Institute of Chemical Engineers, Vol. 34, No. 6, pp 700-705.
15. Choi, W. K. 2002: *Effects of Physicochemical Properties of Domestic Limestones on the Dissolution Rates in Flue Gas Desulfurization Process*, J. of Korean Institute of Chemical Engineers, Vol. 40, No. 3, pp 404-409.
16. Jung. J. H. et al., 2003: *Preparation and Reaction Characteristics of Domestic Limestone Absorbent for Flue Gas Desulfurization/Denitrification*, J. of Korean Society of Environmental Engineers, Vol. 25, No. 9, pp 1177-1183.
17. Choi, W. K et al.. 1995: *An Experimental Study on the Reactivities of Domestic Limestones in Wet Flue Gas Desulfurization Process*, J. of Korean Society of Environmental Engineers, pp 391-394.
18. ASTM International, 2009: *Standard Test Method for Determination of Total Neutralizing Capability and Dissolved Calcium and Magnesium Oxide in Lime for Flue Gas Desulfurization (FGD) (ASTM C 1318-95)*, USA, www.astm.org.
19. Korean Agency for Technology and Standards, 2007; *Testing sieving – General requirements (KS A 0507)*, Korea, www.kats.go.kr.
20. Korea Resources Corporation, 2003: *Precision Survey Report; limestone*, Exploration of Mineral Resources Department, pp 145-149.
21. Choi. W. H et al., 2006: *Acid Neutralization Capacity and Fluoride Removal Capacity of Calcite for Treating Hydrogenfluoric Wastewater*, J. of Korean Society of Civil Engineers, No. 10, pp 1234-1237.

서 준 형



- 현재 한국석회석신소재연구소 연구개발실 연구원
- 당 학회지 제24권 5호 참조

백 철 승



- 현재 한국석회석신소재연구소 연구개발실 연구원
- 당 학회지 제24권 5호 참조

권 우 택

- 현재 세라믹기술원 에너지환경소재본부 책임연구원
- 당 학회지 제22권 2호 참조

조 계 홍

- 현재 한국석회석신소재연구소 책임연구원
- 당 학회지 제19권 3호 참조

안 지 환

- 현재 한국지질자원연구원 책임연구원
 - 당 학회지 제10권 4호 참조
-