

국내 탈황용 석회석의 분쇄성 지수 평가 및 응용

서준형 · 백철승 · 조진상 · 안영준* · 안지환** · 조계홍[†]

한국석회석신소재연구소, *대성 MDI, **한국지질자원연구원

(2019년 2월 8일 접수, 2019년 3월 4일 수정, 2019년 3월 11일 채택)

Evaluation and application of grinding index of domestic desulfurization limestone

Jun Hyung Seo · Chul Seoung Baek · Jin Sang Cho · Young Jun Ahn* · Ji Whan Ahn** · Kye Hong Cho[†]

Korea Institute of Limestone and Advanced Materials, Danyang, Korea

*Daesung MDI, Yeongwol, Korea

**Korea Institute of Geoscience and mineral resources, Daejeon, Korea

(Received 26 February 2019, Revised 4 March 2019, Accepted 11 March 2019)

요 약

석탄 화력발전소의 배연탈황공정에서 탈황용 흡수제로 사용하는 석회석을 대상으로 본드의 분쇄일지수(BWI) 및 하드그로브지수(HGI) 측정 후 분쇄효율을 비교하였다. 측정결과, 국내 탈황용 석회석의 분쇄성지수는 HGI가 증가함에 따라 BWI가 감소하는 선형적인 반비례 관계를 확인할 수 있었으며, 석회석의 화학조성 및 채광위치에 따른 결정구조에 따라 분쇄효율의 차이가 발생하였다. 이에 따라, 석회석의 분쇄성을 측정할 경우 측정방법이 까다롭고 시간이 오래 걸리는 BWI 보다 간편하게 측정할 수 있는 HGI를 활용하여도 시료의 분쇄성 차이를 확인할 수 있을 것으로 사료되며, 분쇄 특성에 따른 석회석의 선택적 활용 시 탈황효율 또한 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

주요어 : 분쇄일지수, 하드그로브지수, 볼밀, 석회석, 탈황

Abstract - In the flue gas desulfurization process of the coal-fired power plant, the grinding efficiencies of the limestone as the sorbent for desulfurization were compared after BWI and HGI measurements. As a result, the grinding index of the domestic desulfurization limestone were linear inversely proportional relationship with decreasing BWI was observed with increasing HGI. There was a difference in grinding efficiency depending on the chemical composition and crystal structure. Therefore, it is considered that when grinding ability of limestone is measured, the grinding property of the sample can be confirmed even by using HGI which can be measured more easily than BWI which is difficult to measure and takes a long time. The desulfurization efficiency can be improved by selective utilization of limestone depending on the crushing characteristics.

Key words : Bond's Work Index, Hardgrove Grindability Index, Ball Mill, Limestone, Desulfurization

1. 서론

배연탈황(Flue Gas Desulfurization)은 소각 후 배

출된 배기가스 중에 포함된 황산화물을 흡수, 산화, 환원, 흡착 반응 등을 통해 제거하는 공정으로 일부 선진국에서 이미 개발, 확립되어 운용되고 있다. 이 중 가장 널리 보급된 공정은 석회석 또는 소석회 슬러리를 황산화물이 함유된 배출가스와 접촉시켜 SO₂ 등을 흡수 제거하고, 부산물로 석고를 얻는 습식 석회

[†]To whom corresponding should be addressed.

Tel : +82-043-422-2133 E-mail : khcho99@kilam.re.kr

석-석고 공정(wet limestone-gypsum process)이다⁽¹⁾. 이러한 공정에서 SO₂ 흡수제로 이용되는 탈황용 석회석은 화학조성(Chemical composition), 반응성(Reactivity), 분쇄성(Grindability) 등에 영향을 미치기 때문에 향후 공정 특성에 맞는 최적의 석회석을 선택하는 것은 매우 중요하다⁽²⁾. 이 중 석회석의 분쇄성은 석회석을 일정크기 이하로 분쇄하는데 필요한 동력을 나타내는 것으로, 분쇄기의 설계 및 최적운전 조건 확보를 위한 중요한 지표로 활용될 수 있다^(3,4).

석회석을 분쇄하는 과정에서 소요되는 에너지 사용량에 관한 연구와 관련하여 분쇄 에너지 해석에 대한 인자로 비표면적을 처음으로 활용한 연구자는 Rittinger(1867)이며 고체입자의 단위 일량(W)은 비표면적(ΔS)에 비례한다고 제안하였다. 그리고 Kick(1885)은 분쇄에너지는 체적의 감소분에 비례하는 것으로 제안하였으며, Bond(1952)는 리팅거의 법칙과 Kick의 법칙을 결합하여 분쇄특성을 비교할 수 있도록 하였다⁽⁵⁾.

분쇄 에너지 효율을 측정하는 방법은 Bond Work Index (이하, BWI)와 Hardgrove Grindability Index (이하, HGI)를 가장 많이 사용한다^(6,7). 실제 조업에서 BWI 및 HGI 측정은 각각의 시료에 대한 분쇄 후 일량 지수를 제안하고 실제 분쇄기 설계에 적용할 수 있도록 정비하는 동시에 공업용 분쇄기나 미분쇄기의 동력소요량을 계산하는데 활용되고 있다⁽⁸⁾. BWI와 HGI 연구의 경우 기존에는 미분쇄성 평가, 혼합물의 분쇄성 지수를 확인하는 연구가 수행되었으나 최근에는 분쇄 프로세스 설계와 시뮬레이션의 목적으로 연구되고 있다^(8,9). 하지만 분쇄성 지수는 채광 지역 및 방법, 화학 조성, 결정 구조 등에 따라 분쇄효율의 차이가 크게 발생하기 때문에 다양한 시료에 대한 분쇄 특성 연구를 지속적으로 수행할 필요가 있다.

이에, 본 연구의 목적은 국내 비금속 광물 생산량의 대부분을 차지하는 석회석 중 탈황용 품질규격을 충족하는 석회석을 대상으로 BWI 및 HGI를 측정하여 분쇄효율 및 각각의 상관관계를 검토하였다.

2. 시료 및 실험방법

2-1. 시료

국내 대규모 석회석 광상은 강원도 중부 및 충청북도 북부 지역에 부존하고 있으며, 산지 위치에 따라 다양한 결정 및 조직 등의 차이가 발생하는 것으로 보고되고 있다^(10,11). 이에 본 연구에서는 현재 가행중인 강원(A, B) 및 충북(C, D) 지역 광산에서 채취한 고품위석회석 4종을 본 실험에 사용하였다. 고품위석회석을 선택한 이유는 돌로마이트를 포함한 불순물을 최소화하는 효과와 함께 최근 습식 및 로내 탈황용 석회석의 수요처 규격도 CaCO₃ 기준 95% 이상을 요구하는 사례가 확인되어 해당 규격을 충족하는 석회석을 선택하였다. 분석에 사용된 강원 지역 석회석 2종(A, B)은 고생대 전기인 캄브리아기와 오르도비스기에 걸쳐 형성된 것으로 알려진 태백형 조선누층군 풍춘층 석회석이며, 충북지역 석회석 2종(C, D)은 고생대 후기인 석탄기와 페름기에 형성된 것으로 알려진 평안누층군 갑산층 석회석에 해당한다⁽¹²⁾.

Fig. 1은 세척 및 건조 후 탈황용 석회석 4종의 표면을 촬영한 사진이다. 풍춘층 석회석인 A, B 시료의 경우 회백색과 회색이 우세한 것으로 열수변질 작용에 의한 구성성분의 용탈과 CaO 함량 증가, 발광성이 유발되어 밝은 색조를 띠는 것으로 알려져 있다. 이에 비해 갑산층 석회석인 C, D 시료의 경우 진회색이 우세한 것으로 CaO 함량이 높고 비결정질에서 세립질까지 다양한 결정형태와 크기를 가진 것으로 알려져 있다⁽¹³⁾.

2-2. 물리화학적 특성평가

광산별로 채취된 석회석 원석은 표면의 이물질 제거하는 세척과정을 거친 후 110 °C에서 24 시간 동안 건조하였으며, 밀도분석은 가스밀도측정기(Accupyc 1340, Protech, Korea)를 활용하여 측정의 오차를 최소한으로 하기 위해 재현성 (3회 반복 측정) 평가 후 평균값으로 계산하였다. 석회석의 화학성분은 325 mesh (45 μ m) 이하로 미분쇄 및 건조 후 KS E



Fig. 1. Photo images of domestic limestone samples

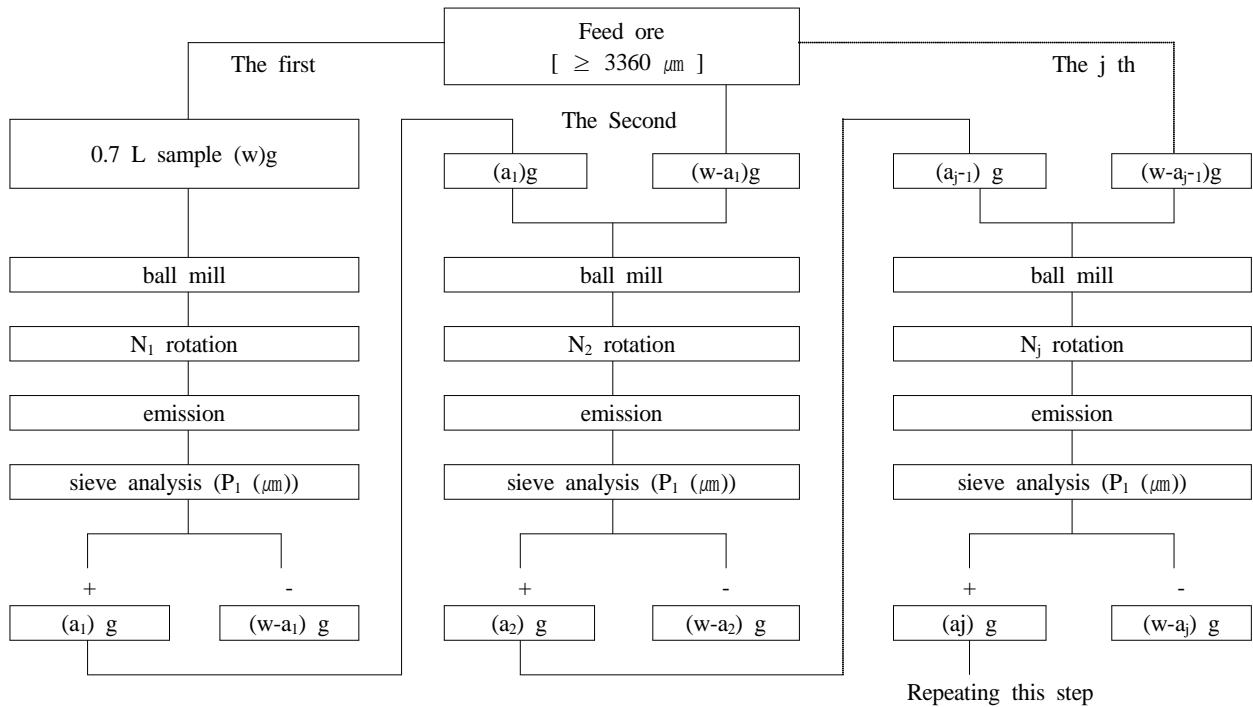


Fig. 2. Material balance in grinding operation (KATS, KS E 3600)



Fig. 3. Image of BWI machine

3075에 따라 X-선 형광분석(XRF, Primus 2, Rigaku, Japan) 장비를 통하여 측정하였다⁽¹⁴⁾.

2-3. BWI

BWI (W_i , kWh/ton)는 물체를 분쇄할 때 필요한 일량의 크기를 나타내는 지수이며, 1톤의 광석을 분쇄 후 100 μm 체를 통과하는 입자가 80% 이상일 때 필요한 일을 말한다. 분쇄일지수 실험은 KS E 3600에 준하여 Fig. 2와 같이 실험하였으며 실험에 활용되는 볼밀의 특징은 Fig. 3 및 Table 1과 같다⁽¹⁵⁾. 실

험방법은 첫 번째로 체가름법에 의한 분쇄시료의 입도분포 결과를 이용하여 Table 2와 같이 일지수 계산에 필요한 Q_o , F_{80} , R_F 값을 각각 결정하였다. 두 번째로는 밀의 안정회전수를 구하는데 이는 Bond가 제안한 순환율(cl)이 250%가 되는 밀의 회전수를 말한다. 여기서 순환율은 분쇄 생성물을 P_1 control sieve (여기서는 100 μm 를 P_1 control sieve로 채택함)로 체분리 하였을 때 잔류량 (Q_{cl})과 통과분 (Q_p)의 비율을 말하며, 분쇄능이 일정한 값을 유지하기 위해서는 순환율이 250%가 되도록 밀의 안정회전수를 예측할 필요가 있다. 순환율 250%에서의 분쇄능이 일정한 상태로 유지되고 있는 회수의 경우 평균 약 8회 분쇄 (A : 8회, B : 6회, C : 12회, D : 7회)시 순환율이 250%에 접근하는 것을 확인하였다. 세 번째로는 Fig. 2와 같이 순환율 250%에서 밀 회전 당 생성되는 분쇄생성물 양이 평균치의 3% 이내에 도달할 때까지 실험을 반복하였으며, 마지막 3개 시료의 평균값을 취해 분쇄능 (G_{bp})을 결정하였다. 탈황용 석회석 4종의 분쇄능 (G_{bp}) 평균치의 경우 A는 3.22 g/rev, B는 3.51 g/rev, C는 4.47 g/rev, D는 3.60 g/rev로 측정되었다. 마지막으로 안정된 분쇄조작으로부터 얻은 분쇄능을 사용하여 다음 식 (1)과 같은 방정식에 의해 분쇄일지수를 계산하였다.

$$W_i = \frac{44.5}{P_1^{0.23} \times G_{bp}^{0.82} \times \left(\frac{10}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{10}{\sqrt{F_{80}}} \right)} \times 1.10 \quad (1)$$

Table 1. Characteristics of laboratory ball mill using BWI tests

Ball Mill	Diameter, D (mm)	305				
	Length, L (mm)	305				
	speed (rpm)	70				
Ball	Diameter, d (mm)	36.5	30.2	25.4	19.1	15.9
	Nominal size	(1 _{7/16})	(1 _{3/16})	(1)	(3/4)	(6/8)
	Number of ball	43	67	10	71	94
	Total mass (kg)	19.5				

Table 2. The measured results for Q_0 , F_{80} and R_F of work index

	Limestone samples			
	A	B	C	D
Q_0 (g)	1345	1340	1300	1310
F_{80} (μm)	880	890	930	880
R_F	0.950	0.957	0.820	0.790

**Fig. 4.** Image of HGI machine

여기서 P_1 은 분쇄 시험의 체가름에 사용한 체의 눈 간격 (μm), G_{bp} 는 시험용 볼 밀 1회전 당 망 아래 생성량 (g), P_{80} 은 P_1 망 아래의 80% 입도 (μm), F_{80} 은 시료의 80% 입도 (μm)이다.

2-4. HGI

국내 KS 표준의 경우 석회석의 분쇄특성을 평가하는 기준은 BWI를 사용하고 있으나 측정방법이 까다롭고 시간이 오래 걸리는 단점이 있다⁽¹⁶⁾. 따라서 석탄 화력발전소에서 석탄의 분쇄도를 측정하는데 주로 사용하는 HGI를 추가로 측정하였으며 BWI 값과 비교하여 상관관계를 검토하였다. HGI는 일정량의 시료를 정해진 볼밀에 넣고 분쇄하여 얻은 생성물을 특정의 표준체에서 체가름 후 통과하는 확률(%)로 표시하는 방법으로, 분쇄기의 능력과 소비전력을 경험적으로 추정하는데 사용된다. HGI 실험은 미국재료시험학회(American society for testing and materials, ASTM)의 표준 규격(ASTM D 409)에 준하여 실험하였으며, 실험에 활용된 HGI 측정 장치(SDHG60A, Sundry, China) 및 특징은 Fig. 4 및 Table 3과 같다⁽¹⁷⁾. 실험방법은 먼저 석회석 4종을 기건식(Air Dried Basis)으로 건조 후 ASTM D 4749에 준하여 120 ~ 230 mesh (0.63 ~ 1.25 mm) 구간으로 분급하였다⁽¹⁸⁾. 분급된 시료는 50 g을 채취하여 HGI 장치에 넣고 미분쇄를 수행하였으며, 분쇄 후 얻어진 생성물은 200 mesh (74 μm) 체에서 5분 동안 체 분리하여 식 (2)에 의해 계산하였다. 여기서 D_{74} 는 74 μm 체를 통과한 생성물의 질량(g)이다.

$$HGI = 13 + 6.93 D_{74} \quad (2)$$

Table 3. Characteristics of laboratory ball mill using HGI tests

HGI Tester	model	SDHG60A [maker : Sundy (by China)]
Spindle rpm	r/min	20 ± 1
Working Revolution	cycle	60
Grinding Bowl Capacity	g	50
Ball Diameter	mm	25.4
Vertical Pressure of Grinding	N	284 ± 2
Feed Size	mm	0.63 ~ 1.25

Table 4. Chemical components of the limestone samples

Limestone samples	Chemical analysis (wt.%)					Density (g/cm ³)
	CaCO ₃	MgCO ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	
A	96.50	3.03	0.66	0.19	0.17	2.75
B	96.93	1.99	0.95	0.59	0.29	2.76
C	99.66	1.61	0.08	0.04	0.06	2.76
D	99.05	0.86	0.27	0.06	0.14	2.73

3. 실험결과 및 고찰

3-1. 물리화학적 특성

Table 4는 XRF를 활용한 석회석 4종의 물리화학적 특성 결과를 나타낸 것이다. 석회석의 화학조성 분석은 불순물인 MgCO₃, SiO₂ 등의 함량 변화에 따라 탈황용 석회석으로 활용하는데 큰 영향을 미칠 수 있으므로 이러한 것을 규명하기 위해 반드시 필요하다. 화학분석결과 (A)-(D) 석회석 4종 모두 CaCO₃ 품위가 95% 이상, MgCO₃ 품위가 1% 미만으로 고품위석회석에 해당하였으며, 이는 국내 석탄 화력발전소의 배연탈황용 석회석을 사용하게 규정되어 있는 기준 (CaCO₃ ≥ 95%, MgCO₃ ≤ 4%, SiO₂ ≤ 2%)을 충족하는 것으로 확인되었다⁽¹⁹⁾. 석회석 4종의 밀도는 평균 2.75 g/cm³ 내외로 측정되었다.

3-2. 분쇄성 지수 (BWI, HGI)

Table 5는 BWI 및 HGI 실험을 비교한 것이다⁽²⁰⁻²¹⁾. BWI는 HGI에 비해 설정 및 실험과정이 복잡하여 분쇄를 수행하는데 필요한 시간이 오래 걸리는 단점이 있으며, 질량크기 및 범위의 경우 BWI보다 HGI가 작다. 그리고 실험 1회당 시료 사용량의 경우 HGI는 질량비 (50 g)로 계산되지만, BWI는 부피비 (700 mL)로 계산하여 측정하기 때문에 실험간

다소 오차가 발생할 수 있으며, BWI를 결정하기 위해서는 HGI 테스트에 필요한 크기의 약 20배의 분량이 필요하다. 그러나 지수로 계산되는 HGI에 비해 BWI는 톤당 에너지 소비량 (kWh/ton)으로 계산되기 때문에 분쇄기 운전관리, 동력 소요량 등을 설계하는 산업체 등에서 실제적으로 사용되고 있으며, HGI보다 큰 체적 (700 mL)과 넓은 범위의 입도 (3.36 mm 이하)를 기반으로 하기 때문에 다양한 크기의 물질에 대한 분쇄 효율을 확인할 수 있는 장점이 있다.

분쇄성은 HGI가 클수록 BWI가 작을수록 더 좋을 것을 의미하며, 먼저 식 (1)에 의해 탈황용 석회석의 BWI를 계산한 결과는 Table 6과 같다. BWI 결과, 강원지역 석회석의 경우 A는 15.78 kWh/ton, B는 15.19 kWh/ton으로 평균 15.5 kWh/ton (P₁ = 100 μm)로 계산되었으며, 충북지역 석회석의 경우 C는 10.79 kWh/ton, D는 11.41 kWh/ton로 평균 11.1 kWh/ton (P₁ = 100 μm)로 계산되었다. 강원지역 석회석의 경우 충북지역 석회석에 비해 다소 높은 일지수 값을 나타내었는데, 이는 충북지역 석회석에 비해 낮은 CaCO₃ 및 높은 SiO₂ 함량과 같은 화학조성과 석회석 산지에 따른 지질학적 특성의 영향으로 사료된다. 한편, Bond(1955)가 석회석을 활용한 분쇄 테스트에서 경험적으로 결정된 일지수는 12.5 kW/ton으로 보고되고 있으며⁽²²⁾, Jung(2003)의 경우 석회석의 분쇄일지수는 14 kWh/ton 으로 보고하였

Table 5. Comparison of HGI & BWI test conditions

	HGI (ASTM D 409-08)	BWI (KS E 3600)
Mill comparison	Laboratory ball mill	Laboratory ball mill
Target particle size	0.75 mm	Any size below 3.36 mm
Particle size range	0.6 ~ 1.18 mm	< 3.36 mm
Mass constriction	50 g (mass)	700 mL (volume)
Output	HGI index	kWh/ton

Table 6. The measured results of BWI ($P_1 = 100\mu\text{m}$)

	Limestone samples			
	A	B	C	D
BWI (kWh/ton)	15.78	14.18	10.79	11.41

Table 7. The measured results of HGI

	Limestone samples											
	A			B			C			D		
	1st	2nd	Avg	1st	2nd	Avg	1st	2nd	Avg	1st	2nd	Avg
D_{74} mass (oversize) (g)	39.19	39.21	39.20	34.98	34.97	34.98	32.95	32.95	32.95	33.81	33.78	33.79
D_{74} mass (undersize) (g)	10.81	10.79	10.80	15.02	15.03	15.02	17.05	17.05	17.05	16.19	16.22	16.20
HGI	88			117			131			125		

Table 8. Study on correlation coefficient between BWI and HGI

Researcher	Species	Correlation coefficient
McIntyre and Plitt (1980)	Limestone and Coal	$BWI = 1622 / (HGI)^{1.08}$
Hower (1992)	Carbonates	$BWI = 14.56 - 0.10(HGI)$
Park (1997)	Limestone	$BWI = 16.78 - 0.08(HGI)$

다⁽²³⁾. 따라서 분쇄일지수의 측정결과를 비교해 볼 때 본 연구에서 측정된 분쇄일지수 값은 절대치 간에 다소 차이는 발생하였으나 비교적 신뢰할 수 있는 결과로 확인되었다.

탈황용 석회석의 HGI는 재현성을 검토하기 위해 2회 반복 측정 후 식 (2)에 대입하여 평균값으로 계산하였으며 측정결과는 Table 7과 같다. HGI 값은 강원지역 석회석의 경우 평균 103 (A : 88, B : 117), 충북지역 석회석의 경우 평균 128 (C : 125, D : 131)로 확인되어 채광 위치별로 25 정도의 결과 차이를 확인하였다. 한편, Agus(1971)의 경우 탄산염광물의 HGI는 107 ~ 121로 보고하였으며, Park(1999)의 경

우 국내 석회석의 HGI는 약 85 ~ 160의 범위로 보고하였다⁽²⁴⁻²⁵⁾. 이를 통해 본 연구에서 측정된 HGI (88 ~ 131)는 비교적 신뢰할 수 있는 결과로 확인되었으며, HGI의 경우에도 BWI 값과 동일하게 석회석의 화학성분 및 채광위치에 따라 분쇄성에 영향을 받는 것으로 확인되었다.

BWI와 HGI는 분쇄 가능성을 측정하는 대표적인 방법으로써 두 가지 측정 결과가 서로 연관될 수 있고 이와 관련된 상관관계식을 나타내는 연구는 Table 8과 같다. McIntyre 및 Plitt(1980)은 석회석을 포함하여 다양한 물질에 대한 분쇄 실험 후 BWI 값이 8.5 kWh/ton 이상인 물질 결과 값과 HGI와의 상관

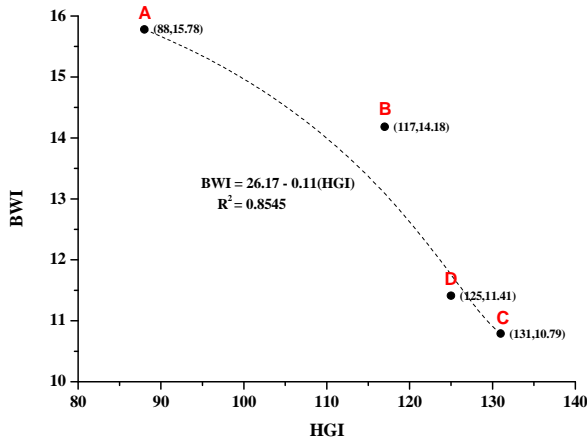


Fig. 5. Relationship between BWI and HGI test

관계를 제시하였다⁽²⁶⁾. Hower(1992) 등은 탄산염을 대상으로 분쇄 실험을 실시하여 HGI 결과 값으로부터 BWI 값을 계산하기 위한 공식을 제안하였으며⁽²⁷⁾, Park(1999) 등은 국내 석회석의 분쇄성 및 반응성을 측정하여 HGI만을 측정함으로써 BWI 값으로 환산하는 것이 가능한 것으로 보고하였다⁽²⁵⁾. 이렇게 HGI에서 계산하여 얻은 BWI 값은 선형적인 반비례 관계를 가지지만 지정된 상관계수 값과는 정확히 일치하지 않았는데, 이러한 이유는 BWI의 경우는 상대적으로 큰 입자가 분쇄되는 반면 HGI는 미세 입자 시료를 분쇄하기 때문으로 보고되고 있다⁽²⁸⁾.

Fig. 5는 본 연구에서 국내 탈황용 석회석의 BWI와 HGI 측정 후 각각의 상관관계를 나타낸 것이다. McIntyre 및 Plitt (1980), Hower(1992), Park(1999)이 기존 연구에서 제시하였던 석회석의 BWI 및 HGI와의 상관관계 식과는 정확히 일치하지는 않았지만 HGI가 증가함에 따라 BWI가 감소하는 선형적 반비례 관계를 확인할 수 있었으며, BWI와 HGI 값의 결정계수(Coefficient of Determination, R²) 값을 산출한 결과 0.85로 측정되었다⁽²⁵⁻²⁷⁾. 그리고 비선형 회귀 분석을 사용하여 BWI가 10 kW/ton 이상으로 측정된 탈황용 석회석 결과와 HGI의 상관관계식을 다음 식 (3)과 같이 추산할 수 있었다.

$$BWI = 26.17 - 0.11(HGI) \quad (3)$$

이러한 결과를 통해 석회석의 분쇄성을 측정할 경우 측정방법이 까다롭고 시간이 오래 걸리는 BWI보다 간편하게 측정할 수 있는 HGI를 활용하여도 시료의 분쇄성 차이를 확인할 수 있을 것으로 사료된다.

4. 결론

국내 탈황용 석회석을 대상으로 BWI 및 HGI를 측정 후 분쇄 효율을 비교 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 국내 탈황용 석회석의 BWI는 약 10.8 - 15.8 kWh/ton (P₁ = 100 μ m), HGI는 88 - 131로 확인되었으며, 기존 연구와 비교해 볼 때 비교적 신뢰할 수 있는 결과로 추정되었다.

2) 국내 탈황용 석회석의 BWI 및 HGI 측정결과, 충북지역 석회석의 피분쇄성이 강원지역 석회석보다 우수한 것을 확인할 수 있었으며, 이를 통해 CaO, SiO₂와 같은 화학성분 외에 석회석의 산지에 따른 지질학적 특성도 분쇄성에 영향을 미치는 것으로 확인되었다.

3) 국내 탈황용 석회석의 BWI와 HGI 값은 HGI가 증가함에 따라 BWI가 감소하는 선형적인 반비례 관계를 확인할 수 있었으며, 석회석의 분쇄성을 측정할 경우 측정방법이 까다롭고 시간이 오래 걸리는 BWI보다 간편하게 측정할 수 있는 HGI를 활용하여도 시료의 분쇄성 차이를 확인할 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 2015년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다. (NO. 201410101880)

Nomenclatures

- cl : circulation ratio, Q_{cl}/Q_p [-]
- D₇₄ : weight of undersize of 74 μ m sieve [g]
- F₈₀ : size of a sieve aperture permitting the passage of 80% of the feed [μ m]
- G_{bp} : grindability [g/rev]
- HGI : Hardgrove grindability index [-]
- P₁ : opening of control sieve [μ m]
- P₈₀ : size of a sieve aperture permitting the passage of 80% of P₁ pass product [μ m]
- Q_{cl} : weight of the circulating load [g]
- Q_O : weight of a mill charge [g]
- Q_p : weight of undersize of P₁ sieve [g]
- R_F : ratio of oversize of P₁ sieve to feed [-]
- W_i : Bond's work index [kWh/ton]

References

1. Srivastava, R. K., Jozewicz, W., 2001, Flue Gas Desulfurization : The State of the Art, Journal of the Air and Waste Management Association, Vol 51, No. 12, pp. 1676-1688
2. Angel, I., Javier, R., Immaculada, O., 1990, Thermal Dehydration of Calcium Hydroxide. 1. Kinetic Model and Parameters, Journal of Industrial and Engineering Chemistry, Vol. 29, No. 8, pp. 1599-1606
3. Lee, H., Cho, H. C., 2002, Determination of the Breakage Parameters on the Nonmetallic Minerals, Journal of Korean Society of Mineral and Energy Resources, Vol. 39, No. 4, pp. 248-256
4. Cho, H. C., Jeong, S., 2005, A Characteristic Study of Ball Mill and Centrifugal Mill using Discrete Element Method, Journal of Korean Society of Mineral and Energy Resources, Vol. 42, No. 4, pp. 393-402.
5. Bond, F. C., 1961, Crushing and Grinding Calculations ; Part 1. British Chemical Engineering, Vol. 6, No. 6, pp. 378-385
6. Bond, F. C., 1952, The Third theory of comminution, Transactions of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers, Vol. 193, No. 4, pp. 484-494
7. The British Standards Institution., 1995, Methods for Analysis and testing of coal and coke, Determination of Hardgrove grindability index of hard coal (BS 1016-112), England
8. Kong, B. S., Kim, Y. H., 2015, Grinding and equipment for limestone, Mineral science and industry, Vol. 18, No. 2, pp. 52-62
9. Han, S. S. et al., 2018, Simulation of Grinding/Classification Circuit in Domestic Gold ore Processing Plant Using Energy-based Grinding Model and Mathematical Classification Model, Journal of Korean Society of Mineral and Energy Engineers, Vol. 55, No. 1, pp. 8-19.
10. Noh, J. H., Lee, N. K., 2007, Applied-mineralogical Study on the Grinding Effects and Powder Properties of High- Ca Limestone, Journal of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers, Vol. 44, No. 3, pp. 191-207
11. Cho, J. S. et al., 2010, The Effect on Calcination and Hydration Properties of Different Grade Limestone in Danyang Area, Journal of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers, Vol. 47, No. 4, pp 487-495
12. Geological Investigation Corps of Teabaeksan Regian in Korea (GICTR), 1962, Geological Investigation Report of Taebaeksan Regian, Journal of the Geological Society of Korea, p. 107
13. Korea Institute of Geoscience and mineral resources(KIGAM), 2016, MEGO Geologic Information System, mego.kigam.re.kr
14. Korea Industrial Standards Commission (KISC), 2002, Method for X-ray fluorescence spectrometric analysis of limestone and dolomite (KS E 3075), Korea
15. Korea Agency for Technology and Standards (KATS), 2011, Testing method of grinding work index (KS E 3600), Korea
16. Cuhadaroglu, A. D. et al., 2013, Characterization of the Grinding Behavior of Binary Mixtures of Clinker and Colemanite, Particulate Science and Technology, Vol. 31, No. 6, pp. 596-602
17. American society for testing and materials (ASTM), 2008, Standard Test Method for Grindability of Coal by the Hardgrove-Machine Method (ASTM D 409), USA
18. American society for testing and materials (ASTM), 1987, Standard Test Method for Performing the Sieve Analysis of Coal and Designating Coal Size (ASTM D 4749), USA
19. Korea Limestone Industry Cooperation (KLIC), 2015, Limestone for flue gas desulfurization (SPS-KLIC-004-775), Korea
20. Ohliger, A., Forster, M., Kneer, R., 2013, Torrefaction of beechwood: a parametric study including heat of reaction and grindability, Fuel, Vol. 104, pp. 607-613
21. Raimie, H. H. et al., 2013, Physicochemical characterization of torrefied biomass, Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, Vol. 103, pp. 21-30
22. Bond, F. C., 1955, How Does Rock Break?, The Scientific Monthly, Vol. 81, No. 4, pp. 196-198.
23. Jung, M. Y., 2003, Development Trend of Mineral Powder Manufacturing Technology, Mineral science and industry, Vol. 16, No. 2, pp. 24-35
24. Agus, F., Waters, P. L., 1971, Determination of the grindability of coals, shales and other minerals by a modified Hardgrove-machine method, Fuel, Vol. 50, No. 4, pp. 405-431
25. Park, S. S., Kim, K. H. and Park, S. Y., 1997, Grindability and Reactivity of Limestones for

- Flue Gas Desulfurization, Applied Chemistry, Vol. 1, No. 2, pp. 465-4680
26. McIntyre, A., Plitt, L. R., 1980, Interrelationship between Bond and Hardgrove grindabilities. Canadian Institute of Mining and Metallurgy, Vol. 73, No. 818, pp. 149 - 155
 27. Hower, J. C., Barton, L. S., Moshier, S. O., 1992, Application of the Hardgrove grindability index in carbonate characterization, Minerals and Metallurgical Processing, Vol. 9, No. 3, pp. 146-150
 28. Frantisek, T., 2008, Contribution to determination of coal grindability using Hardgrove method, GeoScience Engineering, Vol. LIV, No. 1, pp. 27-32