

산화성 분위기에서 석탄회분 슬래그의 고온 점도 측정

정 봉 진

수원대학교 환경공학과

High Temperature Viscosity Measurement of Coal Ash Slags in Oxidizing Atmosphere

Bong Jin Jung

Department of Environmental Engineering, The University of Suwon

요 약

석탄 연소로에 사용 적합한 석탄의 선정 및 조업조건의 설정에 도움을 주고, 석탄회분의 슬래깅 성향을 파악하기 위해서 갈탄 부터 역청탄에 이르는 4종의 시료를 사용하여 산화성 분위기에서 고온 회전 점도계를 사용하여 석탄회분 슬래그의 점도를 온도의 함수로서 측정하였다. 또한 석탄회분의 슬래깅 성향을 해석하기 위해서, 석탄회분 조성을 사용한 Base/Acid Ratio, Lignite Factor 및 Silica Ratio 등의 주요한 인자들이 슬래그 점도에 미치는 영향을 고찰하였다.

Abstract—The measurement of the viscosity of coal ash slag as a function of temperature was carried out using high temperature rotating bob viscometer in an oxidizing (air) atmosphere. A set of 4 coal ashes was prepared from coals ranging from lignite to bituminous in rank. This provides not only an evaluation of the suitability of coals for use and a guidance of operating condition but also an understanding of slagging propensity of coal ash slag in coal combustor. The general relationships between coal ash slag viscosity and major parameters such as Base/Acid Ratio, Lignite Factor and Silica Ratio etc. based on coal ash compositions were also found to describe the slagging propensity of coal ash slag.

1. 서 론

석탄회분 슬래그의 점도는 슬래그 조성 및 온도의 의존성이 높기 때문에 석탄을 사용하는 장치, 즉 싸이클론 연소기 및 슬래그 탭 보일러 등의 설계 및 성공적인 조업을 위해서 매우 중요한 변수가 될 뿐만 아니라, 이와 같은 장치에 사용하는 탄종의 적합성 여부 및 회분의 슬래깅 성향을 판별하는 중요한 선택의 기준을 제공하여 준다^{1,3)}.

석탄중에 함유된 mineral matter는 석탄이 연소될 때 다단계의 물리적 및 화학적 변화를 수반한 후에 미연소 잔유물인 회분으로 남게 된다. 일반적으로 석탄회분은 SiO_2 , Al_2O_3 , TiO_2 등의 산성 산화물과 Fe_2O_3 , CaO , MgO , Na_2O , K_2O 등의 염기성 산화물로 크게 대별되며, 고온에서 회분의 용융으로 인하여 stoker grates에서의 클링

커링(clinkering), 유동층 반응기에서의 회분 응집(agglomeration), 미분탄 연소로에서의 슬래깅 및 화올링 등의 제반 문제⁴⁾를 야기시켜 공정의 효율을 감소시키는 주요 원인이 되고 있을 뿐만 아니라, 궁극적으로 이와 같은 현상이 심화되면 조업을 중단해야 되고, 이로 인해서 막대한 경제적 손실을 초래하게 된다.

High-rank 석탄회분의 조성은 대개 SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 가 주종을 이루는 반면에, low-rank 석탄회분의 조성은 주 성분인 SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 이외에 CaO , Na_2O 등의 알칼리 성분이 high-rank 석탄회분에 존재하는 양보다 많아서 고온에서 매우 상이한 슬래그 거동을 보여 주고 있다. 슬래그 조성 및 점도사이의 관계는 용융물에서 용융물 형성의 주종을 이루는 aluminosilicate 중합체의 형성 및 분해에 기인하는 것으로 알려져 있다⁵⁾. 용융물에서 SiO_2 와 같은 산성 산화물은 anion을 끌어당겨 polymer

former로서 작용을 하여 용융물의 점도를 증가시키는 역할을 하지만, CaO 또는 Na₂O, K₂O 같은 염기성 산화물은 oxide ion을 제공하여 aluminosilicate 중합체 결합을 끊음으로서 polymer breaker로서 작용을 하여 용융물의 점도를 감소시키는 역할을 한다^{6,7)}.

석탄회분의 슬래그 점도를 온도의 함수로서 표시한 그래프는 다음과 같은 특징을 보여주고 있다⁷⁾. 슬래그가 용융상태를 유지하는 고온영역에서 용융상태의 슬래그는 뉴토니안 흐름의 특성을 보이며, 이때 log scale로 표시된 슬래그 점도는 온도가 감소함에 따라서 선형적으로 증가한다. 이후 슬래그가 뉴토니안 흐름 영역의 끝에 해당하는 온도에 도달하게 되면 온도를 조금만 감소시켜도 용융상태의 슬래그에 고체상태의 결정상(crystalline phase)이 형성되면서 슬래그의 점도가 급격히 상승한다. 이와같이 슬래그의 점도가 급격히 상승하는 점에서의 온도를 임계점도 온도(temperature of critical viscosity)로 규정하며, 임계점도 온도 이하에서 슬래그는 비뉴토니안 흐름의 특성을 보여준다.

본 연구에서는 3종의 low-rank 석탄 및 1종의 high-rank 석탄을 시료로 사용하여 석탄회분 슬래그의 점도를 온도의 함수로서 측정하여 석탄 연소소에 있어서, 석탄회분의 슬래깅 성향을 이해하는데 도움을 주고자 한다. 또한 석탄회분이 고온에서 용융되면서 연소로 벽과 대류표면에서의 응착에 커다란 영향을 미치기 때문에 회분거동을 예측하기 위해서, 실험실적으로 제조가 용이한 석탄회분 및 그 조성을 사용하여 Base/Acid Ratio, Lignite Factor, Silica Ratio 등의 주요한 인자들이 슬래그 점도에 미치는 영향을 알아보고자 한다.

2. 실험

2-1. 실험장치 및 방법

석탄회분 슬래그의 고온 점도측정을 위해서 문헌^{8,9)}에 보고되어 있는 기존의 장치를 참조하여 본 연구에 사용된 실험장치의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다.

Fig. 1에 나타난 바와 같이 본 장치의 주요 구성요소는 고온전기로, 슬래그 점도측정을 위한 고온 회전점도계(Haake RV-2 Rotovisco Unit), 실험장치 조절용 마이크로 프로세스 등으로 이루어져 있다.

회분을 용융시키기 위한 고온전기로는 최대 1650°C 까지 승온이 가능하며, 발열체는 Kanthal Super 33으로 이루어져 있다. 용융슬래그의 점도측정을 위한 고온 회전점도계는 점도계추(viscometer bob), 점도측정 헤드, 점도계 조절기 등으로 구성되어 있으며 측정된 데이터는 컴퓨터에 자동적으로 저장되도록 하였다. Fig. 2는 슬래그 점도 측정에 사용된 점도계추로서 티타늄봉을 가공하여 만든 점도계추의 본체는 직경이 12.5 mm 길이가 22.6 mm이고, 본체무게의 양쪽 끝은 30도 각도로 하였다. 점도계추의 상부는 직경이 5 mm이고 길이가 421 mm인 알루미늄 튜브와 연결되어 있고, 알루미늄 튜브의 상부는 직경이 3 mm이고 길이가 15 mm인 steel shaft에 연결되도록 하였다. 점도측정 헤드에 나사못으로 고정되어 있는 점도계추는 점도를 측정하는 동안에 슬래그의 표면에 잠겨 있도록 하였다. 회분을 용융시키는데 사용된 알루미늄 도가니는 내화벽돌을 이용하여 가공한 보호도가니속에 넣어서 알루미늄 도가니가 깨지거나 회분이 용융되어 넘칠경우 전기로 내부 및 발열체를 보호하고자 하였으며, 알루미늄 도가니 및 보호

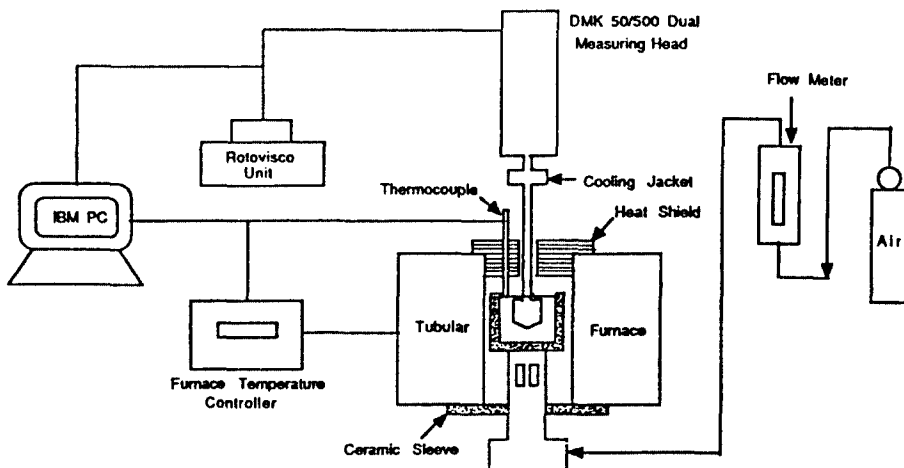


Fig. 1. Overall schematic diagram of the experimental apparatus for viscosity measurement of coal ash slags.

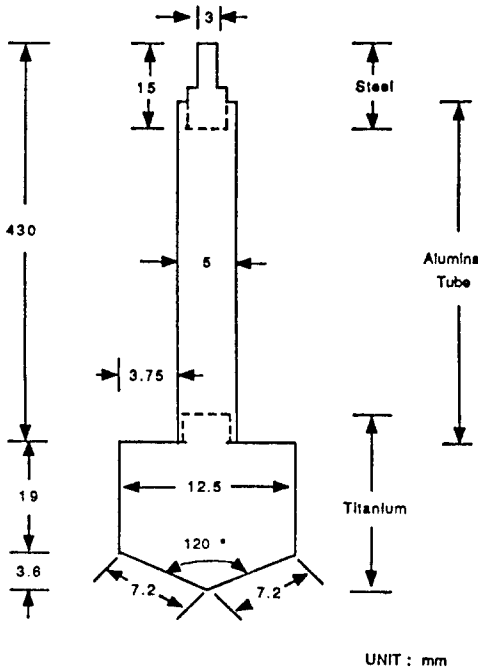


Fig. 2. Viscometer bob.

도가니 사이의 공간은 유리섬유로 채워서 알루미나 도가니를 고정시켰다.

슬래그 점도측정은 산화성 분위기에서 점도계추를 64 rpm으로 회전시키면서 수행하였다. 산화성 분위기 조성을 위해서 공기는 분당 350 cm³씩 고온전기로 하부로부터 알루미나 튜브를 통하여 공급하였다. 이때 용융된 슬래그의 온도측정을 위한 B형 thermocouple은 알루미나 도가니의 내벽을 따라서 용융된 슬래그의 표면 직상부에 위치하게 하여 점도측정시 점도계추에 영향을 미치지 않도록 하였다. 슬래그의 점도를 측정하기 전에 원하는 온도에서 일정한 점도를 얻기 위해서 약 30분간 슬래그를 고정시킨 후에 점도를 측정하였다. 슬래그의 점도측정은 점도계 추가 64 rpm으로 회전하는 조건하에서 점도계에서 슬래그의 torque 수치를 얻을 수 있는 가장 높은 온도에서 부터 시작하여, 다음 측정이 이루어지는 온도에 도달할 때 까지 분당 0.6°C씩 서서히 감소 되도록 하였다. 이와 같이 온도를 서서히 감소시키는 절차는 용융된 슬래그의 점도가 너무 높아서 신뢰성 있는 데이터를 확보하기가 어려운 온도에 도달할 때까지 반복적으로 수행되었다.

각 시료의 슬래그 점도 측정이 끝난 후에 고정화된 슬래그 샘플은 Energy-dispersive X-ray fluorescence spectrometry(Kevex)를 이용하여 슬래그의 화학조성을 분석하였다.

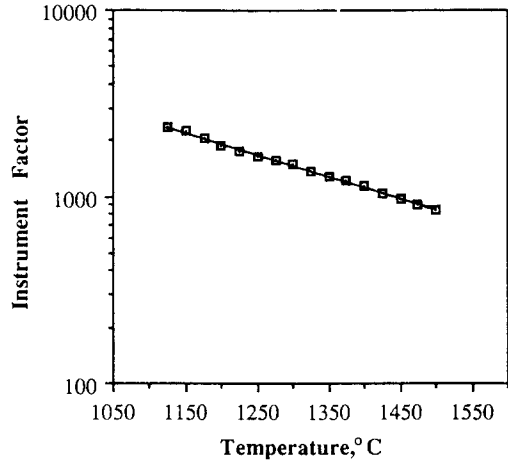


Fig. 3. Determination of instrument factor for viscosity of coal ash slag.

2-2. 고온 회전점도계의 보정

고온 회전점도계의 보정을 위해서 석탄회분 슬래그의 점도측정을 위한 온도 범위에서 점도가 잘 측정되어 있는 NBS(National Bureau of Standards) glass viscosity standard No. 711를 사용하여 슬래그 점도 측정에 필요한 Instrument 인자를 결정하였다. 슬래그 점도측정에 사용되는 시료도가니 및 점도계추의 재질 및 크기 등에 의해서 측정된 점도값이 달라질 수 있기 때문에, 이와같은 제반요소들의 영향을 모두 고려한 Instrument 인자는 점도와 아래와 같은 관계식을 형성하고 있다.

$$\text{점도} = \frac{(\text{Instrument 인자} \times \text{Torque 수치})}{\text{점도계 회전속도}} \quad (1)$$

표준유리의 점도를 이용하여 점도계의 Instrument 인자를 결정하기 위해서 점도계추는 64 rpm으로 회전시켰으며, 이때 torque 수치는 Haake RV-2 Rotovisco unit에서 측정하였으며, 식 (1)로 부터 얻어진 결과를 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3에 나타난 바와 같이 온도가 감소함에 따라서 Instrument 인자의 로그값은 선형적으로 증가하였다.

2-3. 석탄시료

석탄회분 슬래그의 점도측정을 위하여 Beulah(North Dakota) 갈탄, Eagle Butte(Wyoming) 준역청탄, Robinson (Montana) 준역청탄, Elk Creek(West Virginia) 역청탄 등 4가지 시료¹⁰⁾가 사용되었다. Table 1은 본 실험에 사용된 석탄시료의 공업분석 및 원소분석치를 보여주고 있으며, 각 시료는 60 메쉬(250 μm) 이하로 분쇄되어 ASTM 질차¹¹⁾에 따라서 750°C에서 석탄회분화 하였다.

Table 1. Proximate and ultimate analyses of coal samples.

	Beulah lignite	EagleButte subbituminous	Robinson subbituminous	Elk Creek bituminous
Proximate(wt.%)				
Moisture	30.0	25.9	21.1	0.9
Volatilmatter	31.0	32.9	29.1	30.2
Fixed carbon	33.0	35.8	41.2	62.8
Ash	6.0	5.4	8.6	6.1
Ultimate(dry, ash-free, wt.%)				
Carbon	48.6	54.0	58.8	86.2
Hydrogen	3.2	6.3	5.9	5.2
Nitrogen	0.7	0.6	1.0	1.7
Sulfur	0.7	0.4	0.9	0.7
Oxygen(by diff.)	46.8	38.7	33.4	6.2

Table 2. Ash and slag compositions of coal samples.

Component	Beulah lignite		Eagle Butte subbituminous		Robinson subbituminous		Elk Creek bituminous	
	Ash	Slag	Ash	Slag	Ash	Slag	Ash	Slag
SiO ₂	27.6	21.3	28.5	26.1	34.9	31.4	56.7	49.0
Al ₂ O ₃	15.8	28.6	15.5	27.5	15.6	30.9	30.1	29.4
TiO ₂	0.7	18.6	0.8	7.3	0.6	3.2	1.7	13.0
Fe ₂ O ₃	10.8	1.7	10.2	4.5	11.7	10.9	6.7	4.2
CaO	19.8	20.1	22.7	25.3	16.4	16.8	1.1	0.8
MgO	5.4	5.0	5.6	5.5	2.7	2.5	0.9	1.2
Na ₂ O	5.5	4.5	3.9	3.5	4.4	4.1	0.5	0.5
K ₂ O	0.1	0.1	0.1	0.2	0.1	0.1	2.0	1.8
SO ₃	14.3	0.1	12.7	0.1	13.6	0.1	0.3	0.1

Table 2는 Energy-dispersive X-ray fluorescence spectroscopy(KeveX)에 의해서 분석된 석탄시료의 ASTM 회분 조성을 보여주고 있으며 각 회분은 알루미늄이나 도가니에서 슬래그 제조시 투입이 용이하도록 직경이 10 mm, 길이가 10 mm인 pellet으로 압축성형을 하였으며, 이때 시료의 무게는 약 1.2 g 정도이었다. 회분 pellet는 고온 전기로내에서 예열된 고순도 알루미늄 도가니(25×50 mm)에 한번에 1~2개씩 일정한 시간 간격으로 긴 알루미늄 튜브를 이용하여 투입하였으며, 이때 총 투입량은 약 70-80 g 정도이었다.

또한 석탄회분 슬래그의 점도측정을 위하여 사용된 각 시료의 회분조성을 이용하여 석탄회분의 슬래깅 성

향을 이해하는데 관련된 주요한 인자인 Base/Acid Ratio, Lignite Factor, Silica Ratio 등의 수치를 Table 3에 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 석탄회분 슬래그의 고온점도 측정

산화성 분위기에서 4가지 석탄회분 시료를 용융시켜 얻은 슬래그에 대해서 온도를 서서히 냉각시켜 가면서 각 슬래그의 온도의 함수로서 점도변화를 측정하였다. Fig. 4는 Beulah 갈탄 및 Robinson 준역청탄 회분 슬래그의 온도 냉각에 따른 점도변화를 보여주고 있다. Fig.

Table 3. Parameters for analyzing slagging propensity on coal ash samples.

	Beulah lignite	Eagle Butte subbituminous	Robinson subbituminous	Elk Creek bituminous
Base/Acid Ratio*	0.943	0.949	0.691	0.127
Lignite Factor**	2.333	2.774	1.632	0.299
Silica Ratio***	43.396	42.537	53.120	86.697

*Base/Acid Ratio = $(\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{MgO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) / (\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2)$.

**Lignite Factor = $(\text{CaO} + \text{MgO}) / (\text{Fe}_2\text{O}_3)$.

***Silica Ratio = $100 \text{ SiO}_2 / (\text{SiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{MgO})$, where " Fe_2O_3 " = $\text{Fe}_2\text{O}_3 + 1.11\text{FeO} + 1.43\text{Fe}$.

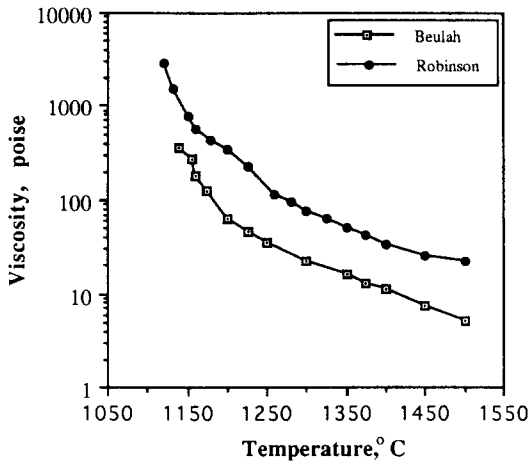


Fig. 4. Viscosity/temperature curves of Beulah lignite and Robinson subbituminous coal ash slags.

4에서 보는 바와 같이 Beulah 갈탄은 대략 1200°C 이상의 온도에서 용융상태의 슬래그가 뉴토니안 거동을 나타내며, 1200°C 부근까지 로그로 표시된 슬래그의 점도가 온도가 감소함에 따라서 약 60 poise까지 선형적으로 증가하다가 1200°C 이하 부근에서 슬래그 온도가 조금만 감소하여도 슬래그의 점도가 급상승하는 경향을 보여주고 있음을 알 수가 있고, 이때부터 슬래그는 비뉴토니안 거동을 나타내기 시작한다. 이와 같은 현상은 1200°C 이하 부근에서 부터 용융된 슬래그에 고체상태의 결정상이 형성되기 때문이며, Beulah 갈탄의 경우 슬래그에 결정상이 형성되기 시작하는 온도인 임계점온도가 1200°C 부근임을 알 수가 있다. 임계점온도는 연소계에서 슬래깅 성향을 평가하는데 있어서 매우 중요한 의미를 가지고 있으며, 임계점온도가 높을수록 슬래깅 성향이 감소함을 알 수가 있다. Robinson 준역청탄은 1240°C 이상에서 슬래그가 뉴토니안 거동을 나타내었으며, 1240°C 부근까지 온도가 감소함에 따라서 슬래그의 점도가 약 105 poise까지 선형적으로 증가하였고, 이때 임계점온도는 1240°C 부근임을 알 수가

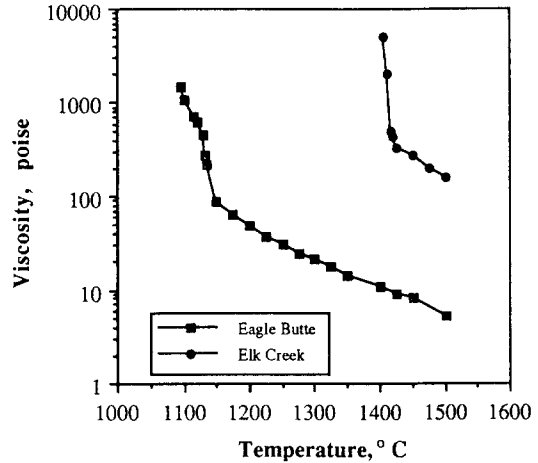


Fig. 5. Viscosity/temperature curves of Eagle Butte subbituminous and Elk Creek bituminous coal ash slags.

있다.

Fig. 5는 Eagle Butte 준역청탄 및 Elk Creek 역청탄 회분 슬래그의 온도냉각에 따른 점도변화를 나타내는 그림으로서, Fig. 4의 경우와 유사한 경향을 보여주고 있다. Fig. 5에서 보는 바와 같이 Eagle Butte 준역청탄은 1150°C 이상의 온도에서 슬래그가 뉴토니안 거동을 나타내었으며, 슬래그의 점도가 온도가 냉각됨에 따라서 약 85 poise까지 선형적으로 증가하였고, 이때 임계점온도는 1150°C 부근임을 알 수가 있다. Elk Creek 역청탄은 슬래그가 뉴토니안 거동을 나타내는 온도가 1425°C 이상으로 앞의 3가지 시료 테스트 결과와 비교하여 볼때 약 185~275°C 정도 높고, 이때 슬래그의 점도는 온도가 1425°C 부근까지 감소함에 따라서 약 310 poise까지 선형적으로 증가하였으며, 임계점온도는 1425°C 부근으로 나타났다. 이상의 결과로부터 회분중에 SiO_2 , Al_2O_3 등의 산성산화물 함량이 low-rank 석탄회분에서 보다 많이 존재하는 high-rank 석탄회분의 슬래그 점도가 같은 온도에서 훨씬 높음을 알 수가 있고, 연

소계에서 슬래깅 성향이 감소됨을 알 수가 있다.

3-2. Base/Acid Ratio 변화에 의한 점도 특성

Fig. 6는 일정한 온도에서 Table 3에 표시된 바와 같이 석탄회분 조성의 Base/Acid Ratio의 함수로서 슬래그의 점도변화를 보여주고 있다. 석탄회분중에 함유된 염기성 및 산성산화물 양의 상대적인 비를 나타내는 Base/Acid Ratio는 슬래그의 점도와 밀접한 관계를 가지고 있기 때문에 연소로 등에서 회분의 용융특성 및 슬래깅 성향을 평가하는데 있어서 광범위하게 사용되고 있다.

Fig. 6에서 보는 바와 같이 슬래그 점도측정에 사용된 4가지 시료에 대해서 일정한 온도에서 Base/Acid Ratio 값이 증가할수록 슬래그 점도가 감소하는 경향을 보여 연소계에서 회분의 슬래깅 성향 및 융착가능성이 높아 짐을 알 수가 있다.

3-3. Lignite Factor 변화에 의한 점도 특성

Fig. 7는 일정한 온도에서 Table 3에 표시된 바와 같이 석탄회분 조성의 Lignite Factor의 함수로서 슬래그의 점도변화를 보여주고 있다. 석탄의 회분조성 중에서 $(CaO+MgO)/Fe_2O_3$ 로 표시되는 Lignite Factor는 슬래그의 점도측정에 있어서 Base/Acid ratio가 슬래그 중합체의 결합을 끊어서 슬래그 점도를 감소시키는 fluxing 효과를 제대로 나타내지 못하기 때문에 회분중에 함유된 염기성 산화물의 fluxing 효과를 보기 위해서 사용된다. 슬래그 점도측정에 사용된 4가지 시료에 대해서 일정한 온도에서 Lignite Factor 값이 증가할수록 슬래그 점도가 감소하는 경향을 보여 회분중에 함유된 염기성 산화물

에서 특히 CaO의 fluxing 효과가 큼을 알 수가 있고, 이와 같은 현상은 Schobert 등¹²⁾의 결과와도 잘 일치한다.

3-4. Silica Ratio 변화에 의한 점도 특성

Fig. 8는 일정한 온도에서 Table 3에 표시된 바와 같이 석탄회분 조성의 Silica Ratio의 함수로서 슬래그의 점도변화를 보여주고 있다. 슬래그 점도측정에 사용된 4가지 시료에 대해서 일정한 온도에서 Silica Ratio가 증가할수록 슬래그의 점도가 증가함을 알 수가 있다. 이와 같은 현상은 슬래그에서 특히 SiO₂가 중합체 형성체로서 작용을 하여 슬래그의 점도를 증가시키기 때문이며,

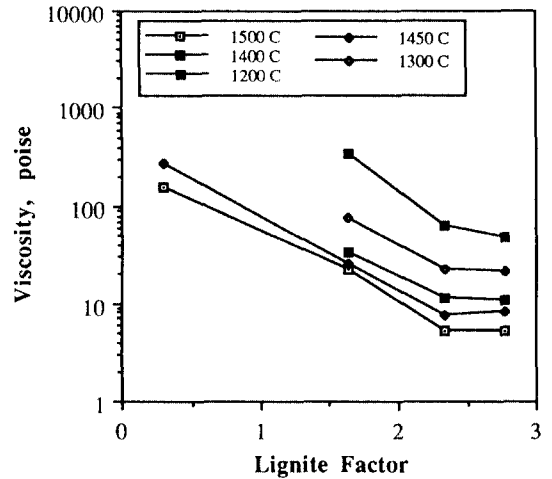


Fig. 7. Viscosity as a function of Lignite Factor at constant temperature.

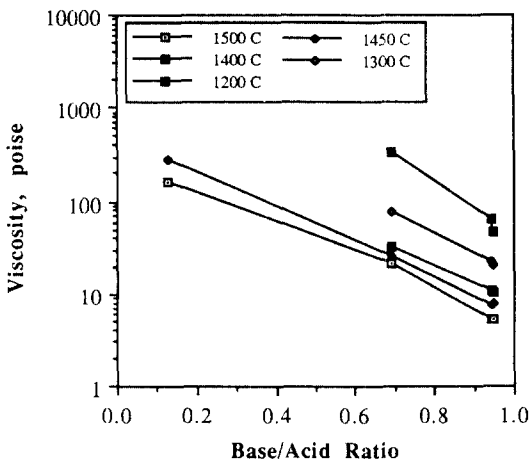


Fig. 6. Viscosity as a function of Base/Acid ratio at constant temperature.

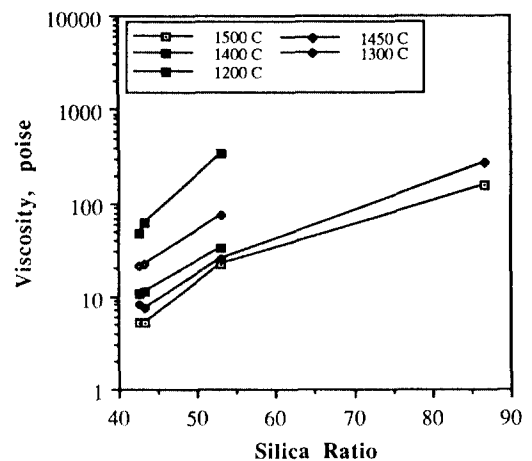


Fig. 8. Viscosity as a function of Silica Ratio at constant temperature.

Silica Ratio 값이 유사한 Beulah 갈탄 및 Eagle Butte 준역청탄의 경우는 뉴토니안 영역에서 슬래그의 점도 및 온도 특성이 유사함을 보이고 있다.

3-5. ASTM 회분 및 슬래그 조성의 차이

4가지 종류의 석탄회분으로부터 생성된 각각의 용융 슬래그의 점도를 측정된 후에 얻어진 고화된 슬래그의 화학조성을 Table 2에 나타내었다. Table 2에 나타난 바와 같이 석탄회분중에 함유된 Al_2O_3 및 TiO_2 의 함량보다 슬래그에 포함되어 있는 Al_2O_3 및 TiO_2 의 함량이 많이 존재함을 알 수가 있다. 이와 같은 주된 요인은 알루미늄이나 도가니와 티타늄 점도계추의 부분적인 용융에 의해서 Al_2O_3 및 TiO_2 가 슬래그속에 부분적으로 용해되었기 때문이다. 특히 1350°C 이상에서 티타늄 점도계추의 부분적인 용융이 심화되어 폴리브렘과 백금추에 비해서 상대적으로 값이 저렴함에도 불구하고 티타늄으로 점도계추를 사용하는 것이 적합지 않을수도 있음을 알 수가 있었다. 석탄회분 슬래그의 점도 거동에 있어서 용해된 티타늄 산화물의 효과는 아직 잘 알려져 있지 않으며, 특히 규소계 용융물에서 티타늄의 거동은 매우 복잡하다. 그러나, 일반적으로 Ti는 규소계 용융물의 구조를 중합시키는 효과가 크기 때문에 용융물에서 티타늄의 첨가는 슬래그의 점도를 증가시키는 효과를 나타내는 것으로 알려져 있다¹³⁾.

또한 석탄회분중에 함유된 SO_3 성분이 고화된 슬래그에 거의 존재하지 않는 것은 회분중에 함유된 황화합물이 약 980°C 이상에서 분해되어 슬래그 용융시 거의 대부분 휘발되었기 때문이다.

4. 결 론

연소계에서 석탄회분의 슬래그 성향을 파악하기 위해서 갈탄부터 역청탄에 이르는 4종의 석탄 시료를 사용하여 석탄회분 슬래그의 점도를 온도의 함수로서 측정하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 석탄회분 슬래그의 로그로 표시된 점도는 뉴토니안 영역에서 온도가 감소함에 따라서 선형적으로 증가하다가, 용융된 슬래그에 고체상태의 결정상이 형성되기 시작하는 임계점도온도 이하에서 슬래그의 점도가

급상승하는 경향을 보였다.

2) 뉴토니안 영역에서 용융된 슬래그는 동일한 온도에서 high-rank 석탄회분 슬래그보다 low-rank 석탄회분 슬래그가 낮은 점도를 나타내어 연소계에서 슬래그 성향이 더 큼을 알 수가 있다.

3) 석탄회분 조성을 사용한 Base/Acid Ratio 및 Lignite Factor가 증가할수록, 그리고 Silica Ratio가 감소할수록 뉴토니안 영역에서 동일한 온도하에 슬래그의 점도가 감소하는 경향을 보였다.

참고문헌

1. Reid, W.T. and Cohen, P.: Trans. ASME, **66**, 83 (1944).
2. Hoy, H.R., Roberts, A.G. and Wilkens, D.M.: J. Inst. Gas Engrs., **5**, 444 (1965).
3. Watt, J.D. and Fereday, F.: J. Inst. Fuel, **42**, 99 (1969).
4. Reid, W.T.: "Chemistry of Coal Utilization", Elliot; M.A., Ed., John Wiley, New York, Chapter 21, 1389 (1981).
5. Vorres, K.S.: ACS Div. Fuel Chem. Preprints, **22**(4), 118 (1977).
6. Urbain, G., Cambier, F., Deletter, M. and Anseau, M.R.: Trans. J. Br. Ceram. Soc., **80**, 139 (1981).
7. Raask, F.: "Mineral Impurities in Coal Combustion", Hemisphere Publishing Company, New York (1985).
8. Schobert, H.H., Streeter, R.C. and Diehl, E.K.: Fuel, **64**(11), 1611 (1985).
9. Streeter, R.C., Diehl, E.K. and Schobert, H.H.: ACS Symposium Series No. 264, Schobert, H.H., Ed.; Washington, Chapter 12, 195 (1984).
10. Jung, B.: Ph. D. Dissertation, The Pennsylvania State University, Univ. Park, PA (1990).
11. ASME 1978 Annual Book of the American Society for Testing and Materials, Part 26, ASTM Standard D 1857, ASTM, PA, **273**, (1978).
12. Schobert, H.H. and Witthoef, C.: Fuel Proc. Tech., **5**, 157 (1981).
13. Mysen, B.O.: "Structure and Properties of Silicate Melts", Elsevier, Amsterdam, Chapter 5 (1988).