

<연구논문>

## 석탄-물 혼합연료의 제조와 유변학적 특성화

김동호 · 김도현<sup>†</sup>

한국과학기술원 화학공학과  
(1998년 4월 13일)

### Preparation and Rheological Characterization of Coal-Water Mixture

Dong-Ho Kim and Do-Hyun Kim<sup>†</sup>

Department of Chemical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology,  
Kusong-dong, Yusong-gu, Taejon 305-701, Korea  
(Received April 13, 1998)

#### 요 약

아역청탄을 이용하여 제조된 CWM(Coal-Water Mixture) 연료의 유변학적 특성을 측정함으로써 음이온 계면활성제 Temol-N, 안정제 Xanthan 및 전해질 등의 첨가제에 대한 성능을 평가하고 최적첨가조성을 결정하였다. 계면활성제의 흡착으로 인해 석탄입자는 음전하를 띠게 되었고 표면에 전기 이중층이 생성되었다. 전기 이중층의 전기적 반발력이 입자의 응집을 막았고, CWM 슬러리의 점도를 감소시켰다. 또한 Xanthan과 NaOH의 첨가로 인해 분산안정성 및 침강안정성이 향상되는 것을 관찰하였다. CWM에서 석탄입자가 차지하는 부피비를 무게비로 전환하여 표현하고, 분산계에서 입자의 부피비에 따른 점도변화를 예측하는 실험식인 Krieger-Dougherty식과 Frankel-Acrivos식에 적용하였다. 점도 실험값을 가지고 식의 변수들을 결정해 본 결과, CWM이 나타내는 점도의 석탄함량에 따른 변화를 위 식들이 비교적 정확히 나타내 주는 것을 확인하였다.

**Abstract**—The effects of additives such as Temol-N surfactant, Xanthan and electrolyte on the rheological properties of CWM made of subbituminous coal were investigated to determine the optimum composition for the phase stability. The surface of coal particles became negatively charged by the adsorption of surfactant and electric double layer was formed on the surface. Repulsive force by the electric double layer prevented the aggregation of particles and reduced the slurry viscosity. The addition of Xanthan and sodium hydroxide was shown to improve the suspension and sedimentation stability of CWM. Weight fraction of coal particles in CWM was converted to the volume fraction by defining the appropriate parameters and the results were applied to the semi-empirical expressions proposed by Krieger-Dougherty and Frankel-Acrivos. By fitting experimental data, parameters of these equations could be determined and these equations were found to be appropriate for representing the solid weight fraction-viscosity relationship for concentrated CWM slurry.

**Keywords:** Coal-Water Mixture, Suspension, Rheological Properties, Krieger-Dougherty Equation, Frankel-Acrivos Equation

#### 1. 서 론

고체인 석탄을 슬러리 형태의 액체 상태로 전환시켜 연소시키는 석탄활용기술로 석탄-물 혼합연료는 기존의 석탄을 사용할 때에 발생하는 문제점들을 해소하고 석유와 같은 액체 연료가 갖는 장점을 살린 대체에너지원이다.

고-액 서스펜션(solid-liquid suspension)의 일종인 CWM연료는 60~70 wt% 정도의 분쇄탄과 물, 그리고 연료의 침강 안정성을 향상시키고 점도를 낮추기 위해서 약 1.0 wt% 이하의 비율로 투입되는 화학첨가제로 구성되어 있다. 석탄은 보통 74  $\mu\text{m}$  통과량이 약 75 wt% 이상 되도록 분쇄되고, CWM연료의 유동성을 향상시키기 위한 첨가제로는 주로 물에 녹는 계면활성제가 많이 사용된다. CWM연료의 특징이 석탄을 물과 혼합

하여 취급하고 연소하는데 있어서 액체연료와 같은 장점을 이용하는 데 있으므로, CWM연료의 유변특성(rheological characteristics)은 CWM연료의 제조측면에서 뿐만 아니라, 저장과 수송 및 연소 등의 모든 과정에 있어서 파악해야 할 중요한 요소이다[1-3].

지금까지의 연구결과에 의하면 석탄 입자와 물의 2상으로 구성된 고농도 분산계의 하나인 CWM의 유변학적 성질은 원료 석탄의 물리화학적 성질, 석탄분의 농도, 석탄 입자의 크기 및 입도 분포, 첨가제(계면활성제, 안정제, 전해질)의 종류 및 사용량, pH, 슬러리 온도 등과 같은 여러 가지 인자들과 밀접한 관계가 있는 것으로 알려졌다[4~10]. 장기간 저장 시에 석탄 입자의 침전을 방지하고 배관에서의 압력손실을 줄이며 분무기에서 미세한 액적으로 분무화(atomization)시키기 위해서 CWM은 항복응력(yield stress)를 가지면서 pseudoplastic 특성을 가지는 것이 가장 좋다고 보고되고 있다[2~4].

<sup>†</sup>Corresponding author

많은 경우 분산액에 포함된 분산질(분산입자)은 그 크기가 분산매 분자에 비하여 매우 크다. 보통의 분산액은 낮은 전단 속도하에서는 비교적 높은 점도를 가지고 있고 전단속도가 증가할수록 점도가 낮아지는 shear-thinning 현상을 보이다가 높은 전단속도에서는 일정한 점도값을 보인다[11]. 이와 같이 ‘큰’ 입자를 포함하는 계의 동력학에서는 높은 전단속도 하에서 미시적 관점의 브라운 운동 및 전기수력학적 힘에 의한 입자들간의 상호작용이 무시되고 점성력이 분산액의 흐름거동을 지배한다. CWM, COM(Coal-Oil Mixture)과 같은 석탄 슬러리 연료에서도 이와 같은 분산액의 점도변화가 관찰되며[12], 특히 파이프를 이용한 수송과정에서 받게 되는 전단속도하에서 CWM이 가지는 점도를 예측하는 것은 매우 중요한 일이라 할 수 있다.

본 연구에서는 아역청탄을 이용하여 CWM을 제조하고 유변물성의 측정실험을 통하여 각 첨가제의 최적조성을 결정하는 한편, 분산계 유변학에서 분산입자의 부피비에 따른 점도변화를 예측하는 실험식을 적용함으로써 고농도 분산계인 CWM이 가지는 점도가 석탄의 함량에 따라 변하는 거동을 파악하고자 한다.

## 2. 실험

### 2.1. CWM의 제조

아역청탄의 일종인 중국산 Datong탄을 불밀을 이용해 12시간 이상 분쇄하고 체질하여 Fig. 1과 같은 입도분포를 지닌 석탄입자를 얻었다. 구형의 입자형상을 지닌 석탄입자는 최대 입자크기가 200  $\mu\text{m}$  이하이고 평균입자크기는 약 35  $\mu\text{m}$  정도로 CWM제조에 적당한 크기로 분쇄되었음을 알 수 있었다.

CWM의 점도조절을 위해 첨가되는 계면활성제로는 NSF(Naphthalene Sulfonic Formaline condensate)계 음이온 계면활성제인 Temol-N을 사용하였다. 석탄입자의 분산안정성 및 침강안정성을 향상하기 위해 첨가되는 안정제로는 Xanthan을 사용하였고, 전해질로는 NaOH를 사용하였다.

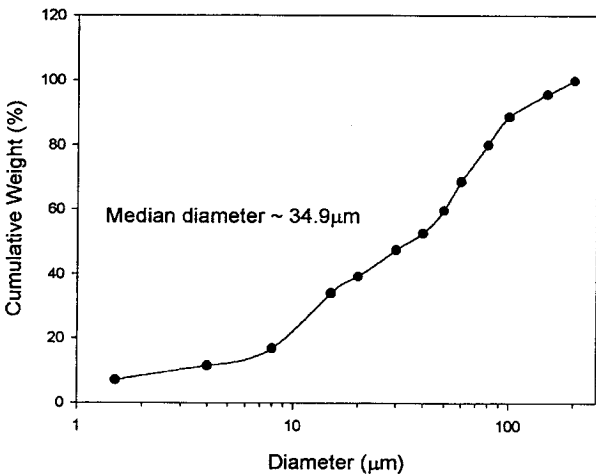


Fig. 1. Particle size distribution of coal particles.

계면활성제, 안정제 및 전해질 등의 첨가제를 증류수에 녹인 후 미분쇄된 석탄입자를 분산시켜 CWM을 제조하고 25°C에서 3일 동안 교반한 후에 유변물성을 측정하였다.

### 2.2. 유변물성의 측정

CWM의 유변물성은 ARES(Advanced Rheometric Expansion System, Rheometric Scientific) 장비를 사용하여 측정하였다.

CWM의 유동성을 파악하기 위한 점단점도 측정은 Couette type( $2R_i=32\text{ mm}$ ,  $2R_o=34\text{ mm}$ ,  $H=34\text{ mm}$ )을 이용하여  $0.1\text{ s}^{-1}$  이상의 전단속도범위에서 실험을 수행하였다. 그러나, CWM의 유변학적 동특성( $G'$ ,  $G''$ ,  $\eta^*$ )과 안정성을 측정하기 위한 실험에서는 석탄입자의 침강으로 인한 측정상의 오류가 심각할 수 있어서 다른 geometry를 사용하였다. CWM에서는 100  $\mu\text{m}$  이상의 큰 입자가 존재할 수 있기 때문에 Cone and Plate type을 사용하는 것이 불가능하므로, Parallel-Plate type( $2R=50\text{ mm}$ )의 rheometer를 이용하였으며 plate 사이의 간격은 1 mm로 조절하여 사용하였다.

## 3. 실험결과 및 토의

### 3.1. CWM 첨가제의 최적함량

#### 3.1.1. 계면활성제

석탄입자를 무게비로 47.4 wt% 포함한 CWM시료들에 대하여 25°C의 동일한 온도하에서 전단점도를 측정하는 실험을 수행하여 Temol-N 계면활성제의 최적함량을 조사하였다. Fig. 2에 나타난 바와 같이 Temol-N의 첨가량을 0.3 wt%까지 증가시킬수록 CWM의 점도가 계속적으로 감소하는 양상이 확인되었으나, 그 이상의 양을 첨가할 때는 더 이상 점도가 감소하지 않는 것을 확인할 수 있었다. 이와 같이 일정량 이상의 계면활성제를 첨가했을 때 CWM의 점도가 다시 증가하거나 거의 일정한 값을 유지하는 현상은 포화 현상과 관계가 있는데 [2], 석탄 입자의 표면적은 한정되어 있기 때문에 표면에 흡착되는 양보다 더 많은 계면활성제를 투입하면 석탄 입자에 흡

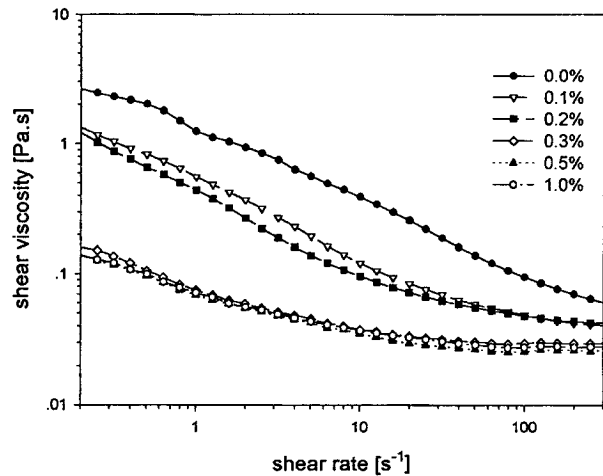


Fig. 2. Effects of Temol-N on the shear viscosity of CWM.

착되지 않은 과잉의 계면활성제 이온이 수용액에서 micelle을 형성하여 micelle의 소수성 부위(hydrophobic tail)와 석탄 입자 간의 상호작용에 의해서 점도가 증가하는 것으로 이해된다.

계면활성제를 첨가하지 않은 단순 석탄-물 슬러리에 비하여 Temol-N을 0.3 wt% 이상 첨가한 CWM의 점도는 낮은 전단속도영역에서는 1/10 정도의 뛰어난 감소현상을 보였다. 한편, 전단속도가 100 s<sup>-1</sup> 이상인 비교적 높은 전단속도영역에서는 점도의 감소폭이 크지 않았다. 이는 낮은 전단속도 영역에서는 응집이 상대적으로 많이 되던 입자들이 전단속도가 커지는 경우에 강한 흐름에 의하여 응집이 줄어들고 점도가 감소하게 되므로, 흐름에 의한 대류가 지배적인 전단영역에서는 계면활성제의 입자분산작용에 의한 점도감소기능이 상대적으로 약하게 나타나기 때문이다.

3.1.2. 안정제 및 전해질

본 연구에서는 Xanthan을 첨가하여 CWM의 유변학적 특성을 관찰함으로써 유동성과 안정성을 고려한 최적첨가량을 결정하였다.

Temol-N을 0.3 wt% 첨가한 CWM시료에 Xanthan을 소량 첨가한 후, 동일한 실험조건에서 dynamic time sweep 실험을 수행하였다. Fig. 3에서 보면 Xanthan을 전혀 첨가하지 않은 시료는 시간이 지날수록 석탄입자의 침전으로 인해 동점도(complex viscosity)가 감소하는 것을 확인할 수 있으며, Xanthan을 약 0.03 wt% 이상 첨가하였을 때 분산안정성이 유지되는 것을 알 수 있다.

이러한 결과는 점탄성을 지닌 CWM의 유변학적 동특성을 알아보는 dynamic frequency sweep 실험을 통해서도 확인된다. 고분자 배합체(polymer blend)의 미세구조형상(morphology)을 관찰하기 위해 자주 이용되는 logG'-logG'' plot을 CWM의 실험 결과에 적용해 보면, Xanthan이 0.03 wt% 이상 첨가된 CWM 시료들은 동일한 직선 상에 놓이게 되는 것을 Fig. 4에서와 같이 확인할 수 있다. 즉, 석탄입자의 침전에 의한 CWM의 분산상의 구조변화가 나타나지 않는다는 것을 알 수 있다. 그러나,

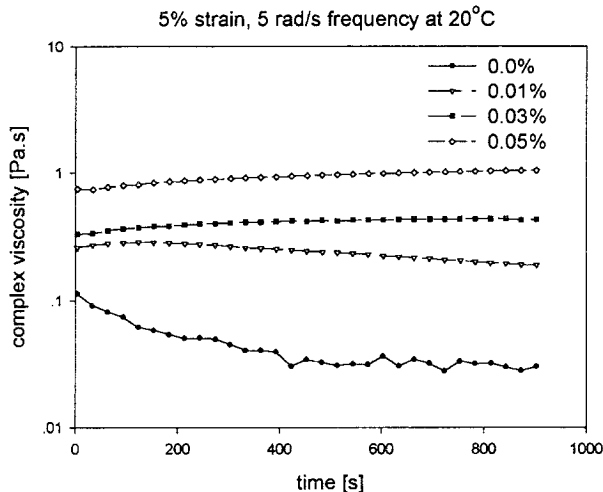


Fig. 3. Effects of Xanthan on the stability of CWM.

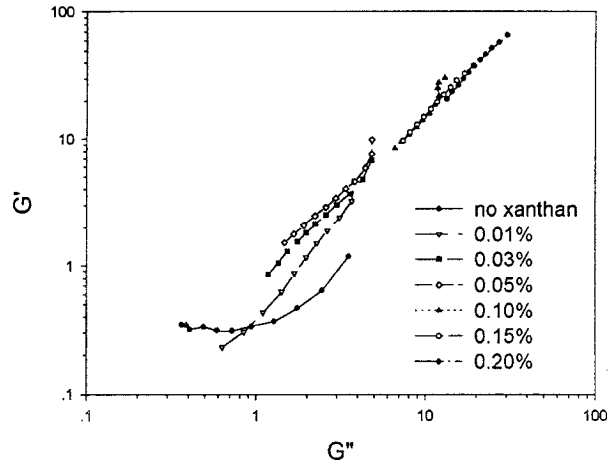


Fig. 4. Effects of Xanthan on the viscoelastic properties of CWM.

안정화가 이루어지지 않은 시료에서는 frequency가 증가할수록 탄성(G')의 변화보다 점성(G'')의 증가양상이 두드러지는 것을 관찰할 수 있는데, 이는 분산상의 안정이 이루어져 있지 않은 CWM분산액이 frequency가 증가할수록 미세구조가 파괴되고 석탄입자들의 재분산이 이루어지기 때문으로 판단된다. 한편, 분자량이 큰 고분자인 Xanthan의 첨가로 인해 CWM의 점도가 급격히 증가하는 것을 Fig. 5의 전단점도 측정결과로부터 알 수 있다.

이상의 결과로부터 CWM에서 안정제로 사용되는 Xanthan의 최적 첨가량을 약 0.03 wt% 정도로 결정하는 것이 타당하다고 판단된다.

계면활성제 분자들의 표면흡착으로 인한 전기적 반발력에 의해서 분산되는 CWM은 분산 매개체인 물의 이온 강도에 직접적인 영향을 받는 것으로 알려져 있는데[2,7], 본 연구에서는 NaOH를 첨가하여 전해질이 CWM의 유동성에 미치는 영향을 알아보았다. 앞의 결과로부터 결정된 계면활성제와 안정제의 최적첨가조성(Temol-N 0.3 wt%, Xanthan 0.03 wt%)에서 NaOH를 0.1 wt%, 0.2 wt% 첨가한 후, CWM의 전단점도와 동

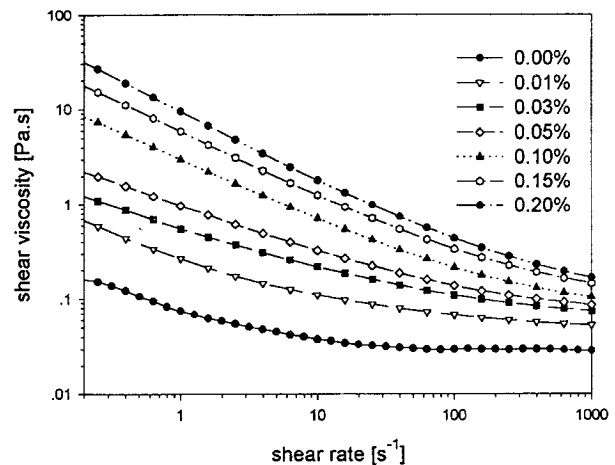


Fig. 5. Effects of Xanthan on the viscosity of CWM.

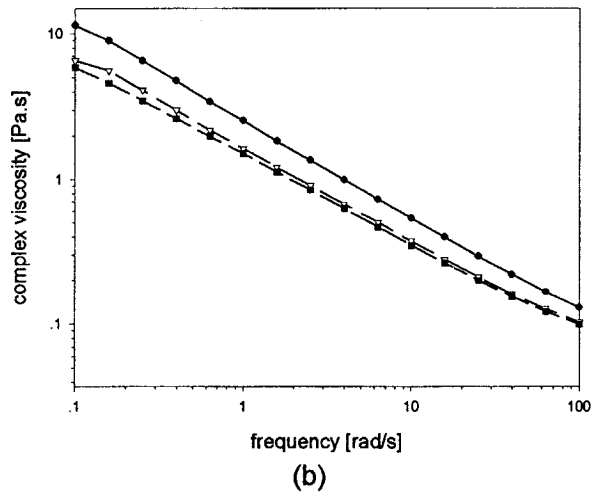
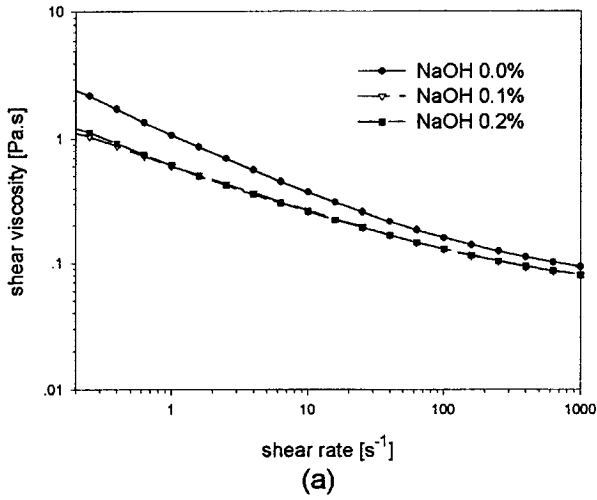


Fig. 6. Effects of NaOH on the viscosity of CWM. (a) steady-shear test, (b) dynamic frequency test.

점도를 측정하였다.

OH-이온을 가지고 있는 전해질의 첨가로 인하여 계면활성제 분자들의 흡착에 의해서 음전하를 띠고 있는 석탄 입자들 사이의 전기적 반발력이 커지고 석탄입자의 분산력이 강화된다. 이로 인해 Fig. 6에서와 같이 CWM의 점도가 감소하는 것을 알 수 있으며, NaOH의 최적첨가량은 약 0.1 wt%가 된다는 사실을 알 수 있다.

### 3.2. 석탄농도에 따른 CWM의 점도변화

유변물성 측정을 통해 결정된 각 첨가제의 최적조성에서 석탄의 함량이 다른 CWM을 제조하여 석탄농도가 슬러리의 유동성에 미치는 영향을 조사하였다.

Fig. 7은 석탄의 여러 가지 농도에서 CWM의 점도를 전단속도에 따라 측정한 것으로, 석탄의 농도가 증가할수록 점도가 급격히 증가한다.

일반적으로 분산계유변학에서는 분산입자가 차지하는 부피비에 따른 점도관계식을 사용하게 되는데, 매우 혼탁한 슬러리

유변학, 제 10 권 제 3 호, 1998

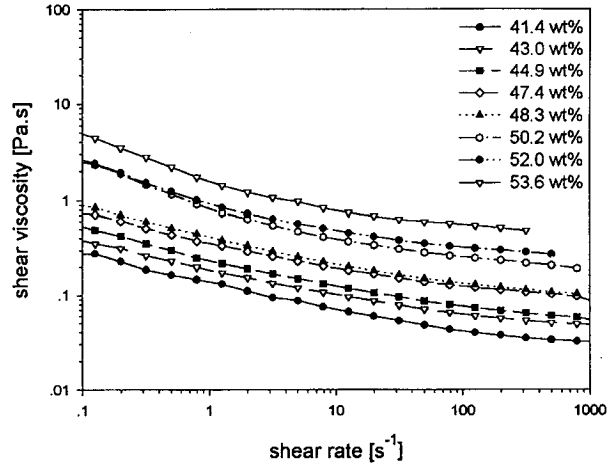


Fig. 7. Effects of coal concentration in CWM on the shear viscosity.

상태이고 석탄입자가 물을 흡수하는 CWM계에서는 입자가 차지하는 부피비를 결정하고 최대 충전부피를 측정하는 것이 매우 곤란하다. 지금까지 CWM에 관한 연구에서는 식 (1)과 같이 표현된 석탄의 부피비를 이용한 석탄농도영향을 분석하였으나[2, 7], 실제로는 석탄의 water-holding capacity를 의미하는  $\beta$ 값을 결정하거나 석탄의 진밀도  $\rho_t$ 를 정확하게 측정하는 것이 어렵다.

$$\phi = \frac{\frac{C_{wt}}{\rho_t} + \beta \frac{C_{wt}}{\rho_w}}{\frac{C_{wt}}{\rho_t} + \frac{(100 - C_{wt})}{\rho_w}} \quad (1)$$

이 식에서  $C_w$ 는 석탄성분의 wt%,  $\beta$ 는 석탄의 water-holding capacity이고,  $\rho_w$ 는 물의 밀도,  $\rho_t$ 는 석탄의 진밀도를 나타낸다.

따라서 본 연구에서는 석탄이 차지하는 부피비를 측정이 가능한 무게비로 바꾸어 표현하는 방법을 통해 석탄의 농도에 따른 점도변화 연구에 활용하였다.

CWM의 전체부피는 다음과 같이 석탄과 물이 차지하는 각각의 부피로 나누어 표현할 수 있다.

$$V = \frac{W_w - \beta W_c}{\rho_w} + \alpha \frac{W_c}{\rho_c} \quad (2)$$

여기서,  $W_c$ 와  $W_w$ 는 석탄과 물의 질량을,  $\rho_c$ 와  $\rho_w$ 는 석탄과 물의 밀도를 나타내고,  $\alpha$ 는 석탄입자가 물에 분산되면서 겉보기 부피가 증가하는 것을 특징짓는 particle swelling factor이며  $\beta$ 는 석탄입자의 water holding capacity를 의미한다.

식 (2)를 석탄과 물 각각의 질량에 관해 다시 정리하고 특성 변수  $k$ 를 써서 표현하면 다음과 같다.

$$V = W_w + k W_c, \quad k = \left( \frac{\alpha}{\rho_c} - \frac{\beta}{\rho_w} \right) \quad (3)$$

따라서, CWM에서 석탄이 차지하는 부피비는 석탄의 무게비를 알게 되면 다음의 식(4)과 같이 표현될 수 있으며 비교적 간단한 실험을 통해  $k$ 값과 석탄의 최대 충전무게비가 결정되면,

점도관계식에서 필요한 변수인  $\phi/\phi_m$ 를 식 (5)과 같이 석탄의 무게비로 표현할 수 있게 된다.

$$\phi = \frac{(\alpha/\rho_c)w_c}{w_w + kw_c} = \frac{(\alpha/\rho_c)w_c}{1 + (k-1)w_c} \quad (4)$$

$$\frac{\phi}{\phi_m} = \frac{w_c}{1 + (k-1)w_c} \times \frac{1 + (k-1)w_{cm}}{w_{cm}} \quad (5)$$

여기서,  $\phi$ 와  $w_c$ 은 석탄의 부피비와 무게비를 나타내고,  $\phi_m$ 과  $w_{cm}$ 은 최대충진 부피와 무게비를 의미한다.

CWM 100 ml을 이루는 석탄과 물의 질량을 측정하는 실험을 반복 수행한 결과, Fig. 8에서와 같이  $k$ 값이 약 0.707로 나타났다. 또한, CWM을 약 10분간 여과하여 얻은 슬러리 중에 포함된 석탄의 질량을 측정함으로써 석탄의 최대 충진 무게비 ( $w_{cm}=0.567$ )를 결정하였다.

Krieger와 Dougherty[13]는 분산입자가 존재하지 않은 상태에서의 분산상이 가지는 고유점도를 식 (6)과 같이 나타내고, 분산입자의 존재로 인한 crowding factor를 감안하여 식 (7)과 같은 점도관계식을 유도하였다.

$$[\eta]_0 = \lim_{\phi \rightarrow 0} \left( \frac{\eta - \mu}{\phi \mu} \right) \quad (6)$$

$$\eta_r^\infty = \left( 1 - \frac{\phi}{\phi_m} \right)^{-[\eta]_0 \phi_m} \quad (7)$$

여기서,  $\phi$ 와  $\phi_m$ 은 입자가 차지하는 부피와 최대충진 부피를 나타내며  $\eta$ 와  $\mu$ 는 각각 분산액과 분산매의 점도를 의미한다.

한편, Frankel과 Acrivos[14]는 입자들 사이의 간격이 입자의 크기보다 작은 매우 밀집된 상태에서는 dissipation 에너지가 입자의 상대속도에 따른 lubrication 힘으로 지배된다고 가정하고,  $\delta$ 를 변수로 하는 상대점도식을 다음과 같이 나타내었다.

$$\eta_r^\infty = 1 + C \left( \frac{\delta}{\delta+1} \right) \left\{ \frac{3+4.5\delta+\delta^2}{\delta+1} - 3 \left( \frac{\delta}{\delta+1} \right) \ln(\delta+1) \right\} \quad (8)$$

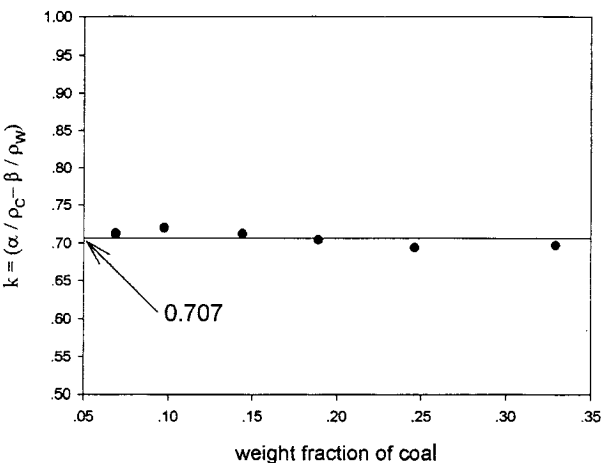


Fig. 8. Determination of  $k$  parameter.

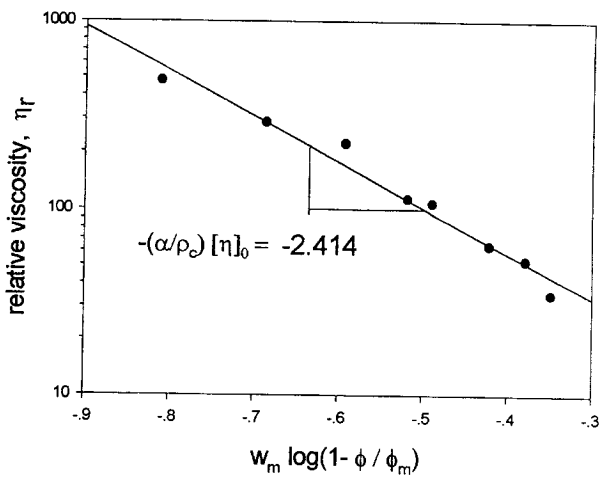


Fig. 9. Parameter fitting of Krieger-Dougherty equation.

$$\delta = \frac{(\phi/\phi_m)^{1/3}}{1 - (\phi/\phi_m)^{1/3}} \quad (9)$$

여기서,  $\delta$ 는 입자사이의 간격을 특징짓는 변수이고, 실험을 통해 결정되는 계수  $C$ 는  $O(1)$  정도의 값을 가진다.

앞의 실험 결과와 CWM이 315 s<sup>-1</sup>의 전단속도에서 나타내는 점도측정값을 위 식들에 적용하여 Fig. 9과 10에서와 같이 각 모델식의 parameter를 결정하였다.

Krieger-Dougherty 모델을 적용한 결과를 살펴볼 때 식 (7)를 다음과 같이 변형한 식 (10)의 직선의 기울기에서 얻어지는  $(\alpha/\rho_c) [\eta]_0$ 값이 약 2.4로 나타나는데, 석탄의  $\alpha$ (particle swelling factor)값이 1보다 크고 밀도( $\rho_c$ )가 1보다 작은 값을 가질 것이라는 사실을 고려해 볼 때  $[\eta]_0$ (intrinsic viscosity)가 Einstein relation의 이론치 2.5보다 작은 값으로 결정되어진다는 사실을 알 수 있다. 또한, regression결과를 가지고 석탄함량이 0인 조건에서의 상대점도를 추정해보면 약 6.3이라는 큰 값이 나타나는 것을 확인할 수 있다.

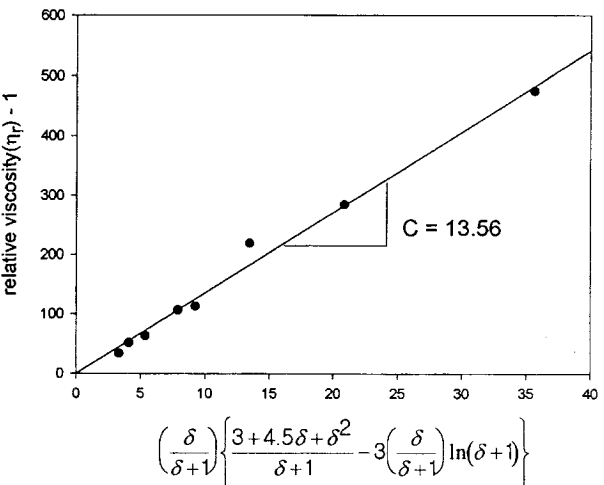


Fig. 10. Parameter fitting of Frankel-Acrivos equation.

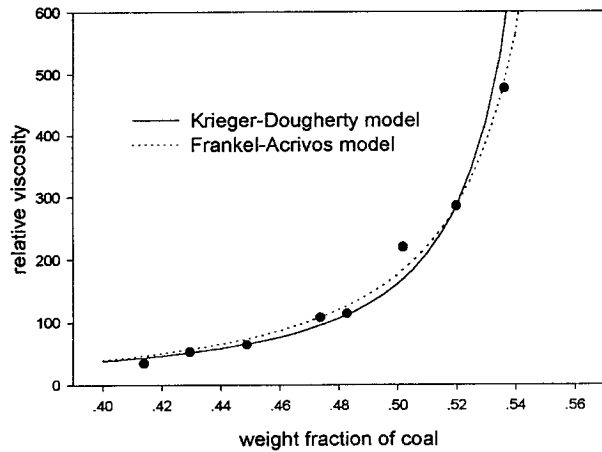


Fig. 11. Variation of CWM viscosity with the coal concentration: 20°C, 315 s<sup>-1</sup>.

$$\log(\eta_r^\infty) = -\left(\frac{\alpha}{\rho_c}\right) [\eta]_0 w_m \log(1 - \phi/\phi_m) \quad (10)$$

한편, Frankel-Acrivos 모델에서는 이론적으로 C값은 O(1) 정도의 값을 가지게 되는 반면 CWM에 대한 실험결과에서는 약 13.56의 다소 큰 값으로 나타났다.

그러나 두 가지 모델이 고농도 분산계인 CWM의 관심대상이 되는 석탄함량에서 석탄농도에 따른 CWM의 점도변화를 Fig. 11에서와 같이 비교적 정확히 표현해 준다고 할 수 있다.

#### 4. 결 론

아역청탄을 이용하여 CWM연료를 제조하고, 유변학적 물성을 측정함으로써 계면활성제, 안정제 및 전해질 등의 첨가제들이 CWM의 유동성과 안정성에 미치는 영향을 파악하였으며, 각각의 최적조성은 Temol-N 0.3 wt%, Xanthan 0.03 wt%, NaOH 0.1 wt%로 결정하였다.

석탄입자가 CWM에서 차지하는 부피비를 무게비로 바꾸어 표현하고 Krieger-Dougherty식과 Frankel-Acrivos식에 적

용하여, 고농도 분산계인 CWM이 높은 전단속도영역에서 가지는 점도가 석탄의 농도에 따라 변화하는 양상을 파악할 수 있었다.

#### 감사의 글

이 연구는 에너지자원기술개발지원센터의 '97 대체에너지 기술개발사업에서 연구비를 지원받았으며 이에 감사를 드립니다.

#### 참고문헌

1. S. Lee, "Alternative Fuels", Taylor & Francis, 1996, Ch. 6.
2. N.S. Roh, Ph. D. Thesis, Dept. of Chemical Engineering, KAIST (1996).
3. G. Papachristodoulou and O. Trass, *Powder Technology*, **40**, 353 (1984).
4. N.S. Roh, D.H. Shin, D.C. Kim and J.D. Kim, *Fuel*, **74**, 1220 (1995).
5. E. Carniani, E. Donati, D. Ercolani, E. Ferroni, and G. Gabrielli, Proc. of the 14th Int. Conf. on Coal & Slurry Technology, Clearwater, Fla., April 24-27, 553 (1989).
6. Y.I. Cho and U.S. Choi, *Trans. ASME; Journal of Energy Resources Technology*, **112**, 36 (1990).
7. R. Kaji, Y. Muranaka, H. Miyadera and Y. Hishinuma, *AIChE J.*, **33**, 11 (1987).
8. J. Nishino, K. Kiyama and M. Seki, *J. Chem. Eng. Japan*, **22**, 162 (1989).
9. T. Saeki, H. Usui and M. Ogawa, *J. Chem. Eng. Japan*, **27**, 773 (1994).
10. J. Yamauchi, K. Terad, T. Sato and T. Okaya, *J. Appl. Polym. Sci.*, **55**, 1553 (1995).
11. R.F. Probstein, "Physicochemical hydrodynamics", 2ed., John Wiley & Sons, 1994, p. 277.
12. T. Dabak and O. Yucel, *Rheol. Acta*, **25**, 527 (1986).
13. I.M. Krieger, *Adv. Colloid Interface Sci.*, **3**, 111 (1972).
14. N.A. Frankel and A. Acrivos, *Chem. Eng. Sci.*, **22**, 847 (1967).