

석탄-물 혼합연료(CWM)의 유동 특성 및 배관에서의 압력 손실

노남선[†] · 김광호 · 김동찬

한국에너지기술연구소 연료기술연구팀
(1994년 8월 2일 접수, 1995년 1월 26일 채택)

Rheological Characteristics of Coal-Water Mixture Fuel and Pressure Losses in Pipe Flow

Nam-Sun Roh[†], Kwang-Ho Kim and Dong-Chan Kim

Fuel Technology Research Team, Korea Institute of Energy Research, Taejon 305-343, Korea
(Received 2 August 1994; accepted 26 January 1995)

요 약

석탄-물 혼합연료(CWM)의 유동 성질을 power law model을 도입하여 Haake 점도계로 분석해 본 결과 전단속도가 $0.1-512 \text{ s}^{-1}$ 인 범위에서 첨가제를 0.1 wt% 이상 혼합한 CWM연료는 모두 pseudoplastic으로 표시되는 비뉴턴 유체의 특성을 나타냈다. CWM의 온도, 석탄의 평균 입경, 첨가제로 사용되는 음이온성 계면활성제의 투입량이 감소할수록 CWM의 겔보기 점도는 증가하였고, 첨가제를 사용하지 않을 경우에 측정되는 yield stress는 석탄 성분의 농도와 석탄 입자의 크기에 따라 차이를 보였다. 석탄의 농도가 줄어들면 CWM은 $n=1$ 인 뉴턴 유체에 접근하였으며, 첨가제 사용량, 석탄의 평균 입경, 온도가 감소할수록 CWM의 비뉴턴 성질은 증가하였다. 또한 내경이 27.0 mm인 파이프로 구성된 test loop에서 측정된 압력 손실은 power law 상수로부터 유도된 관계식에 의해 계산된 수치와 거의 일치하며, 비뉴턴 유체에 적용되는 레이놀드 수(N_{Re}^*)-마찰 계수(f) 관계식을 사용하여 수평관을 통과하는 층류 상태의 CWM에 대한 압력 손실을 표시할 수 있었다.

Abstract—The rheological characteristics of coal-water mixture(CWM) fuel, based on the power law model, were investigated using the Haake rotational viscometer, which produced shear rates from 0.1 to 512 s^{-1} . Test results showed that all the slurries exhibited non-Newtonian properties of shear-thinning behavior, i.e., pseudoplastic or yield-pseudoplastic. The slurries became more viscous as the temperature, the mean particle size, and the amount of anionic surfactant were lowered. Furthermore, the yield stress measured in the case of no additive varied with the solid volume fraction and the coal particle size. The CWMs displayed a higher degree of pseudoplasticity with an increase in coal content and with a decrease in the mean size of the coal particles, the amount of additive, and the temperature. The pressure loss data obtained in the CWM test loop were coincided with the calculated values from the correlation based on the power law constants. Also, the generalized Reynolds number(N_{Re}^*)-friction factor(f) relationship could be applied to the laminar flow of CWM fuel.

1. 서 론

석탄-물 혼합연료(CWM : coal-water mixture)는 고체인 석탄을 슬러리 상태의 액체로 변형하여 연소시킴으로써 석탄이 가지고 있는 많은 문제점과 불편함을 해소시킬 수 있을 뿐 아니라 석탄의 가스화(gasification)나 액화(liquefaction) 기술에 비하여 경제성이 월등히 높고 대규모의 시설 투자비가 필요없이 비교적 단기간에 실용화할 수 있는 대체 에너지원으로 평가되고 있다[1, 2].

고-액 서스펜션(solid-liquid suspension)의 일종으로 취급할 수 있는 CWM연료의 특징이 액체 연료의 장점을 이용하는 데 있기 때문에 유동 특성(rheological characteristics)을 파악하는 것은 매우 중요한 단계가 된다. 고점도의 슬러리 연료인 CWM의 유동 특성은 배관에서의 압력 손실 뿐만 아니라 장기간 저장할 경우에 석탄 입자의 침전 현상과 밀접한 관계가 있다. 또한 전단속도(shear rate)가 5,000-30,000 s⁻¹인 범위에서의 유동 특성은 atomizer에서 분사되는 CWM 액적(droplet)의 크기에 직접적인 영향을 미쳐서 CWM연료의 연소효율 즉 탄소 전환 효율(carbon conversion efficiency)을 좌우하게 된다[3-5].

지금까지의 연구에 의하면 CWM의 유동 성질은 원료 석탄의 물리화학적 성질, 석탄의 탄화도, 석탄 입자의 크기 및 입도 분포, 첨가제 및 전해질의 종류와 사용량, pH, 슬러리 온도 등과 같은 여러 가지 인자들과 밀접한 관계가 있는 것으로 알려졌다[6-8]. 또한 CWM은 대부분의 경우 비뉴턴 성질(non-Newtonian property)을 나타내며 시간이 경과함에 따라 점도가 변하는 thixotropic이나 rheopectic의 특성을 보이는 경우도 많이 발견된다[9-11]. 그러나 석탄이 매우 복잡한 구조와 다양한 성분으로 구성되어 있고 CWM의 유동 특성에 영향을 미치는 많은 인자들이 서로 복잡하게 연관되어 있기 때문에 CWM연료의 유동 특성에 대한 해석이나 설명에는 아직까지도 미흡한 점이 많은 것으로 보고되고 있다.

본 연구에서는 석탄 성분의 농도, 석탄의 평균 입경, 계면활성제의 첨가량, 온도 등에 따른 CWM연료의 유동 특성을 살펴보았다. 0.1-512 s⁻¹까지의 전단속도 범위에서 CWM연료의 flow curve는 회전식 점도계의 일종인 Haake 점도계를 이용하여 얻어졌으며 비뉴턴 성질은 항복응력(yield stress)을 가진 지수 모델(power law model)을 사용하여 나타냈다. 배관에서의 압력 손실 실험은 내경이 27.0 mm이고 길이가 12 m인 파이프로 구성된 test loop를 이용하였다. 측정된 압력 손실과 지수 모델로부터 계산된 수치를 비교하여 관계식의 적용

Table 1. Analyses of coal used in the tests

Item	Unit	Value
Proximate analysis		
Moisture	wt%	3.00
Volatile matter		35.70
Fixed carbon		50.00
Ash		11.30
Ultimate analysis*		
Carbon	wt%	69.99
Hydrogen		4.46
Nitrogen		1.01
Sulphur		0.53
Ash		11.65
Oxygen(by difference)		12.36
Gross heating value	KJ/Kg	28990
True density	Kg/m ³	1413

*moisture-free basis

범위와 타당성을 검토하였고, CWM에 대한 압력 손실-흐름 속도 관계를 비뉴턴 유체에 적용되는 레이놀드 수-마찰계수의 형태로 변환시켜서 CWM의 펌핑 및 수송 설비의 설계에 필요한 기초 자료로 활용하고자 하였다.

2. 실험

2-1. CWM연료의 제조

CWM연료의 제조에 사용된 석탄은 휘발분 함량이 35.7 wt%인 역청탄의 일종인 남아프리카탄이다. 공업분석 및 원소분석, 발열량, 밀도 등의 물성을 Table 1에 나타내었다.

CWM연료는 직경이 0.45 m, 길이가 0.90 m인 연속식의 wet ball mill을 사용하여 제조되었다. Hammer crusher에서 직경이 3 mm 이하로 분쇄된 석탄은 정량 펌프에 의해 주입되는 물과 함께 screw feeder를 이용하여 ball mill 내로 공급된다. 투입된 석탄과 물은 ball에 의해서 분쇄되고 혼합되어 최종적으로 석탄 농도가 50.0 wt% 이상인 슬러리 연료가 제조된다.

슬러리의 점도를 감소시켜서 석탄 성분의 농도를 높이는 데 사용되는 첨가제의 일종인 분산제(dispersing agent) 혹은 유동화제(fluidizing agent)로는 sodium naphthalene sulfonate의 formaldehyde condensate인 CWM1002가 채택되었다. CWM1002는 음이온성 계면활성제(anionic type surfactant)의 일종으로서 동남화학공업(주)에서 제조되었으며, CWM 중의 석탄 농도를 최대 11.0 wt%까지 높일 수 있는 효과가 있다[2]. 본 실험에서는 특별한 언급이 없는 한 CWM연료를 제조할 때에 분산제로 CWM1002와 전해질로서 NaOH를 사용

하였으며, 첨가량은 슬러리 기준으로 각각 0.4 wt%와 0.1 wt%이다.

2-2. 물성 측정

석탄의 농도는 CWM을 oven에서 105°C로 2시간 정도 건조시킨 후 무게 감량을 측정하여 계산하였다. 석탄의 농도로부터 부피 분율, ϕ 는 다음 식으로 계산할 수 있다 [12, 13].

$$\phi = \frac{V_s}{(V_s + V_w - V_{sw})} = \frac{C_{wt}/\rho_c}{C_{wt}/\rho_c + [100 - C_{wt}(1 + \alpha)]/\rho_w} \quad (1)$$

여기서 V_s 는 고체 석탄의 부피, V_w 는 CWM 중의 물의 부피, V_{sw} 는 석탄에 의해 흡수된 물의 부피를 표시하며, C_{wt} 는 석탄의 wt%, ρ_c 는 석탄의 겉보기 밀도, ρ_w 는 물의 밀도, 그리고 α 는 석탄의 평형 함수율(equilibrium moisture content)을 각각 나타낸다.

석탄의 입도 분포는 38 μ m(400 mesh) 이상의 범위에서는 wet sieving 방법을 이용하였고, 38 μ m 이하의 입자는 Coulter Counter(model: TAI and PCAI)를 사용하여 측정하였다. 두가지 방법으로 얻어진 측정값은 서로 합하여 석탄의 평균 입도를 MMD(mass median diameter)로 표시하였다.

2-3. 유동 특성 실험

CWM연료의 유동 특성은 Haake 점도계(model: RV 12)를 이용하여 측정하였다. Haake 점도계는 실린더 형태의 rotor가 stator의 안 쪽에서 회전하는 Searle type의 회전식 점도계이며, CWM연료의 경우에는 상 분리(phase separation)와 rotor 표면에서의 미끄럼 현상(slip effect)을 방지하기 위하여 rotor와 stator의 표면이 모두 요철 처리된 MVIP sensor system을 이용하였다 [14]. Rotor는 programmer에 의해서 일정한 비율로 회전 속도를 조절할 수 있으며 본 실험에서는 전단속도를 2분 동안에 512 s⁻¹까지 상승시키면서 슬러리의 점도를 측정하였다.

Haake 점도계로부터 얻어진 CWM연료의 flow curve는 다음의 지수모델을 적용하여 비뉴턴 특성을 해석하였다.

$$\tau = \tau_0 + K\dot{\gamma}^n \quad (2)$$

여기서 τ_0 는 항복응력이고, K와 n은 각각 flow consistency index와 flow behavior index로 호칭되는 상수들이다. 식 (2)로부터 전단속도에 대한 전단응력의 비로 정의되는 겉보기 점도, η 는 다음 식으로 표시된다.

$$\eta = \tau/\dot{\gamma} = \frac{\tau_0}{\dot{\gamma}} + K\dot{\gamma}^{n-1} \quad (3)$$

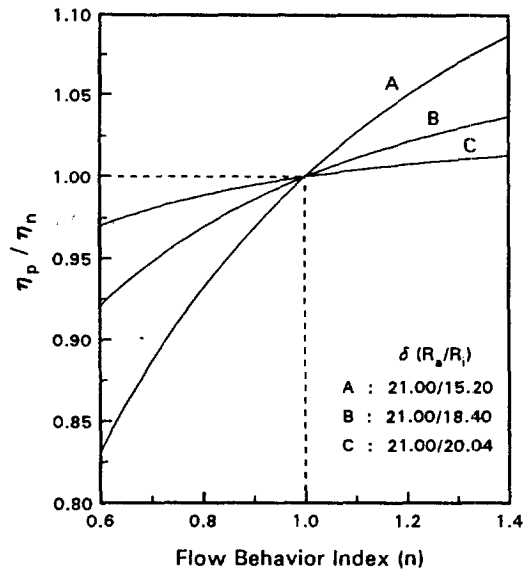


Fig. 1. Correction factors for the calculation of apparent viscosity of the power law fluid.

뉴턴 유체(Newtonian fluid)에 대한 환상류(annular flow)의 속도 분포로부터 rotor 외벽에서의 전단속도, $\dot{\gamma}_{wn}$ 는 다음의 식으로 구해진다[14, 15].

$$\dot{\gamma}_{wn} = \frac{2\omega\delta^2}{(\delta^2 - 1)} = \frac{\pi N\delta^2}{15(\delta^2 - 1)} \quad (4)$$

여기서 ω 는 rotor의 각속도이고, δ 는 rotor 반경(R_r)에 대한 stator 반경(R_s)의 비, N은 rotor의 회전 속도를 나타낸다. 또한 비뉴턴 유체의 유동 성질(rheological behavior)을 지수모델로 나타낼 경우에는 rotor 표면에서의 전단속도, $\dot{\gamma}_{wp}$ 가 다음의 수식으로 표시되므로 [16]

$$\dot{\gamma}_{wp} = \frac{\pi N}{15n(1 - \delta^{-2/n})} \quad (5)$$

뉴턴 유체의 겉보기 점도, η_n 에 대한 지수 모델을 적용한 비뉴턴 유체의 겉보기 점도, η_b 의 비로 정의되는 보정 계수, C_{pn} 은 다음과 같다.

$$C_{pn} = \frac{\eta_b}{\eta_n} = \frac{n\delta^2(1 - \delta^{-2/n})}{(\delta^2 - 1)} \quad (6)$$

Fig. 1은 stator의 반경이 21.00 mm인 MV 계통의 sensor system을 사용할 경우에 대한 보정 계수를 보인 것으로서 rotor의 반경이 20.04 mm인 MVIP를 이용할 경우 n이 0.6-1.4 범위일 때 보정 계수는 거의 1에 가까운

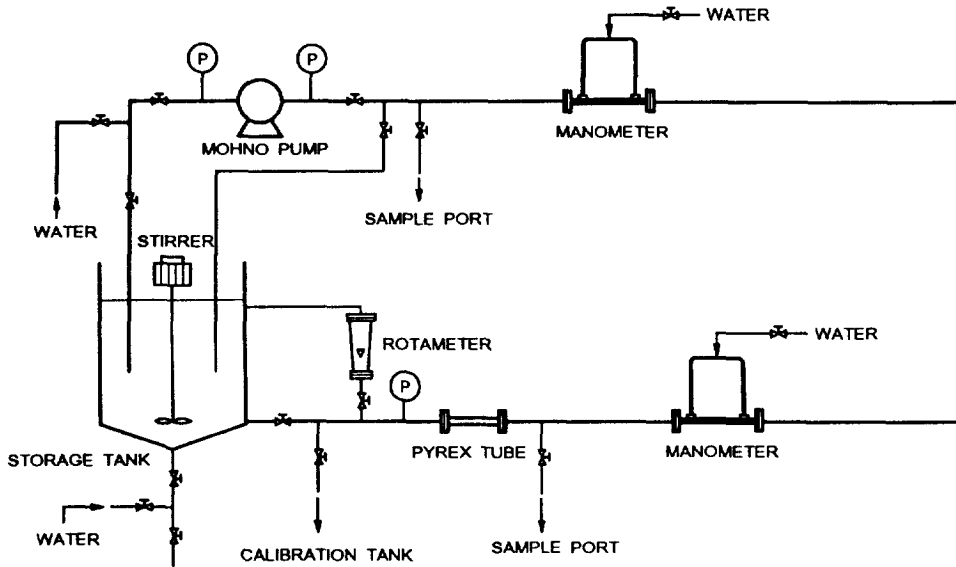


Fig. 2. Schematic diagram of experimental apparatus used for the pressure losses in pipe.

값(0.9699-1.0133)을 나타내고 있다. 따라서 본 실험에서는 비뉴턴 유체에 대한 보정 계수를 적용하지 않고 점도계에서 측정된 전단속도와 전단응력을 그대로 이용하여 겔보기 점도를 계산하였다.

2-4. 입력 손실 실험

파이프를 통과하는 CWM연료의 압력 손실 측정은 Fig. 2에 나타난 실험 장치를 이용하였다. 장치는 탱크에 저장된 CWM이 펌프에 의해서 내경이 27.0 mm이고 총 길이가 약 12 m인 파이프를 순환하도록 구성되었다. 입력 손실은 tap간의 거리가 300 mm인 inverted type의 마노미터를 이용했고, 최대 용량이 3.5 m³/hr인 Mohno 펌프(model: 2NE-20A)를 사용하여 평균 유속을 0.25-1.7 m/sec 범위로 변화시키면서 압력 손실을 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3-1. CWM연료의 유동 특성

3-1-1. 석탄 농도의 영향

석탄 성분의 농도, 즉 석탄 입자의 부피 분율은 첨가제 종류, 석탄의 입도 분포 등과 함께 CWM의 유동 특성에 직접적인 영향을 미치는 것으로 알려졌다[13, 17, 18].

Fig. 3은 부피 분율에 따른 CWM의 겔보기 점도와 n 및 K값의 변화를 보인 것으로서 항복응력은 측정되지 않았고 모든 범위에서 n<1인 pseudoplastic의 경향을

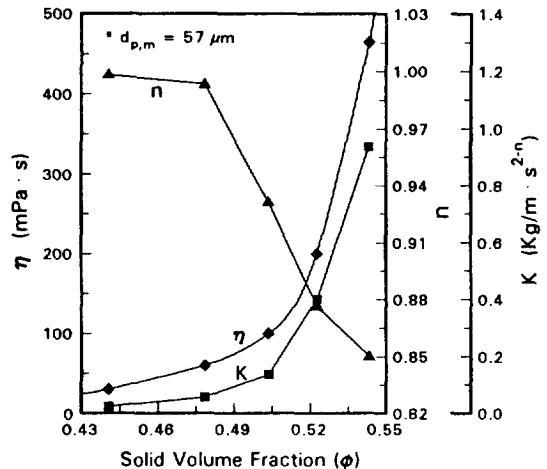


Fig. 3. Effects of solid volume fraction in CWM on the apparent viscosity and power law model constants.

(apparent viscosity: measured at 128 s⁻¹)

나타내고 있다. 또한 부피 분율이 증가할수록 n은 1보다 작아지며, 겔보기 점도와 K는 급격히 증가하게 된다. 즉 석탄의 농도가 높아지면 비뉴턴 유체의 성질을 더 강하게 나타내고 농도가 낮아지면 n=1인 뉴턴 유체에 접근하게 되어 일정한 농도 이하에서는 완전한 뉴턴 성질을 보이게 된다.

첨가제를 전혀 섞지 않을 경우 CWM은 항복응력을

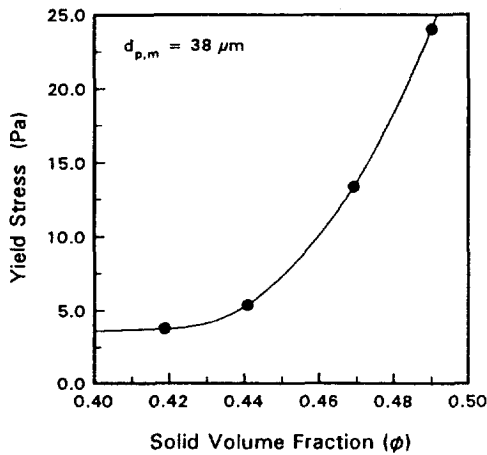


Fig. 4. Yield stress dependence on the solid volume fraction in CWM(no additive).

가진 pseudoplastic의 특성을 나타냈으며, 항복응력은 Fig. 4에서 알 수 있듯이 석탄 입자의 부피 분율이 커짐에 따라 증가하는 경향을 보였다. 석탄 농도, 석탄 입자의 크기, 서스펜션의 pH, 저장 시간 등에 따른 CWM연료의 항복응력 변화나 CWM의 침강 안정성(sedimentation stability)과 항복응력의 관계 등에 대해서는 몇 개의 논문[11, 12, 19]이 소개된 바 있으나 항복응력의 정확한 측정법이나 발생 원인 등의 본질적인 문제에 관해서는 아직까지 확실한 결론에 도달하지 못한 것으로 판단된다.

3-1-2. 첨가제의 영향

CWM의 점도를 낮추어 고농도의 슬러리를 제조하는 여러 가지 방법 중에서 가장 흔히 쓰이는 방법이 첨가제를 섞는 것이며, 주로 물에 녹는 계면활성제(water soluble surfactant) 종류의 분산제가 CWM 제조용 첨가제로 많이 사용된다[20, 21]. 실험에 이용된 CWM 1002와 같은 음이온성 계면활성제는 석탄 입자의 표면에 친유성의 알킬기를 흡착시켜서 석탄 입자가 음전하를 띄게 한다. 석탄 입자의 표면에는 다시 counter-cation에 의해서 전기 이중층(electrical double layer)이 형성되고 이 전기 이중층의 반발력으로 석탄 입자들의 뭉침(aggregation)이 억제되어 슬러리의 점도가 감소되는 것으로 알려져 있다[22-24].

Fig. 5는 CWM1002의 첨가량을 변화시킬 때 석탄 농도가 50.0 wt%인 CWM의 겔보기 점도 및 비뉴턴 성질을 보인 것이다. 첨가제를 사용하지 않은 경우와 0.05 wt% 혼합했을 때에는 항복응력이 측정되었고 그 이상의 비율로 첨가제를 사용하는 경우에는 항복응력이 나타나지 않았다. 겔보기 점도는 첨가제의 양이 증가할수록

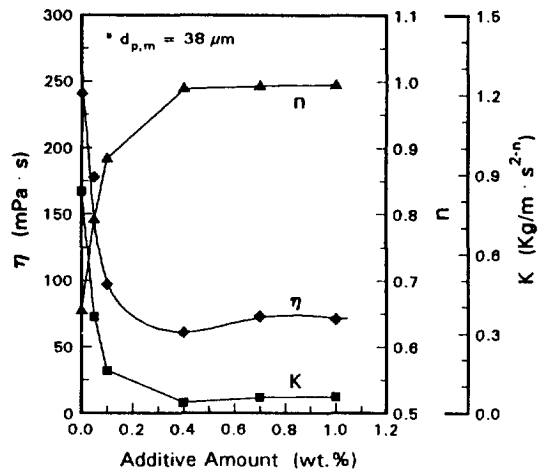


Fig. 5. Effects of anionic surfactant on the apparent viscosity and the non-Newtonian behavior of CWM. (coal loading: 50.0 wt%, apparent viscosity: measured at 128 s⁻¹)

급격히 감소하여 점도가 최소값을 보이는 0.4 wt% 이상의 범위에서는 거의 뉴턴 유체에 접근하게 됨을 알 수 있다. 또한 첨가제로 CWM1002를 사용하면 그림에서 볼 수 있듯이 CWM의 점도를 최대 1/3 정도까지 줄일 수 있으므로 성능이 우수한 첨가제의 선택은 고농도 CWM연료의 제조에 매우 중요한 조건이 된다.

Fig. 5에 나타난 것처럼 일정량 이상의 계면활성제를 첨가했을 때 CWM의 점도가 다시 증가하거나 거의 일정한 값을 유지하는 현상은 다른 문헌에서도 보고된 바 있으며[22, 25, 26], Tadros[22]는 석탄 입자에 흡착되지 않은 과잉의 계면활성제 이온이 수용액에서 micelle을 형성하여 micelle의 소수성 부위(hydrophobic tail)와 석탄 입자간의 상호작용에 의해서 점도가 증가하는 것으로 앞에서 언급한 현상을 설명하였다.

3-1-3. 석탄 입자 크기의 영향

Fig. 6은 석탄 농도가 일정한 경우에 석탄의 평균 입경에 대한 CWM의 겔보기 점도와 지수 모델의 상수를 나타낸 그림이다. 평균 입경이 작아질수록 점도와 K값은 현저히 증가하고 n은 감소하는 경향을 보인다. 이러한 경향이 나타나는 것은 입자의 크기가 작아지면 공극률(porosity)이 증가하게 되는 분체의 일반적인 특성에 의해서[27] 공극을 채우는 데 더 많은 양의 물이 필요하기 때문이다.

CWM1002를 첨가하지 않은 경우에 측정되는 항복응력은 Fig. 7에서와 같이 석탄 입자의 크기가 증가함에 따라 거의 선형적으로 감소하는 양상을 보였으며 이러한 경향은 Turian 등[19]의 실험결과와 일치한다.

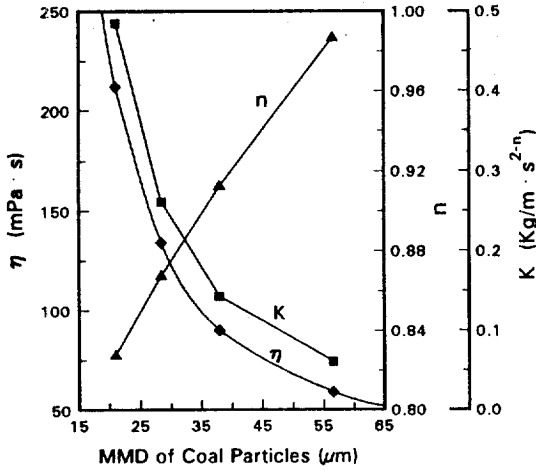


Fig. 6. Effects of MMD of coal particles on the apparent viscosity and non-Newtonian property of CWM. (coal loading: 55.5 wt%, apparent viscosity: measured at 128 s⁻¹)

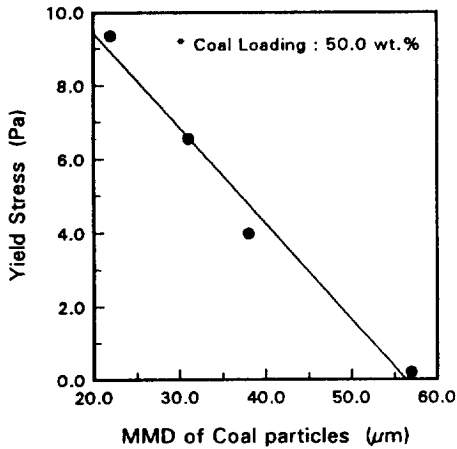


Fig. 7. Yield stress dependence on the MMD of coal particles in CWM(no additive).

3-1-4. 온도의 영향

지수 모델의 두 상수 n과 K에 대한 CWM 온도의 영향을 Fig. 8에 나타냈다. 슬러리 온도를 15°C에서 60°C까지 높이면 점도는 약 40% 정도 감소하고 온도 상승에 따라 비뉴턴 성질의 정도를 나타내는 n값은 약간 증가하였다.

Fig. 9는 온도에 의한 물과 CWM의 걸보기 점도 변화를 반대수 그래프에 절대온도의 역수에 따라 나타낸 것으로서 온도 상승에 따른 CWM의 점도 감소 경향이 물의 점도 감소 형태와 매우 유사함을 볼 수 있다. 이는

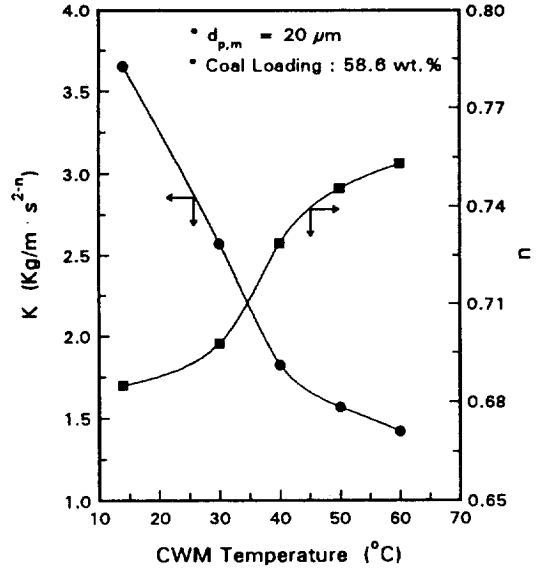


Fig. 8. Variations of power law constants of CWM with the preheating temperature.

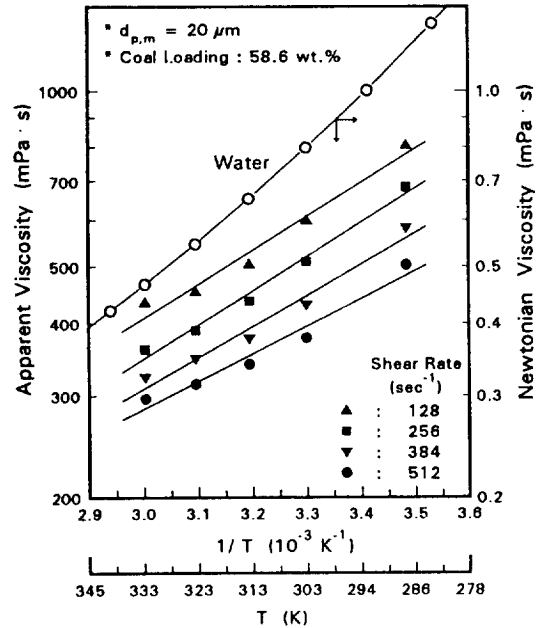


Fig. 9. Effects of temperature change on the apparent viscosity of CWM.

온도에 따른 CWM연료의 유동 성질이 석탄 입자의 유동 매체(suspending medium)인 물에 의해 좌우됨을 의미하는 것이며, 이러한 특성은 다수의 연구자들에 의해 확인된 바 있다[5, 28].

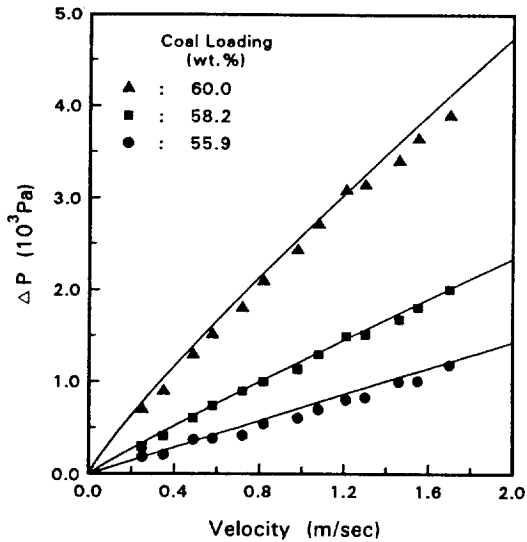


Fig. 10. Pressure loss dependence on the flow velocity of CWM.
(solid line: calculated by eq. (8), $d_{p,m}=57 \mu\text{m}$)

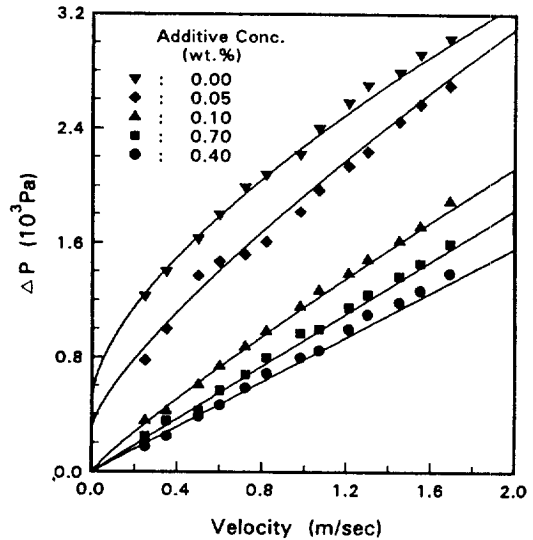


Fig. 11. Pressure loss dependence on the flow velocity of CWM.
(solid line: calculated by eq. (8), coal loading: 50.0 wt%, $d_{p,m}=38 \mu\text{m}$)

한편 Fig. 9를 살펴보면 일정한 전단속도에서 CWM의 걸보기 점도와 절대온도의 역수와의 관계는 직선으로 나타나므로 CWM의 걸보기 점도와 온도와의 관계는 액체의 점도와 온도에 대한 상관식 중에서 널리 사용되는 다음의 Guzman-Andrade equation[29]으로 표시할 수 있음을 알 수 있다.

$$\eta = A_1 \exp(A_2/T) \quad (7)$$

여기서 T는 절대온도이고 A_1 과 A_2 는 상수이다.

3-2. 배관에서의 압력 손실

식 (2)와 같은 지수 모델로 표시되는 yield-pseudoplastic fluid가 내경이 D이고 길이가 L인 파이프를 통해 이동될 경우 평균 유속, V와 압력 손실, ΔP 의 관계는 다음의 식으로 나타낼 수 있다[15].

$$\frac{2V}{D} = \frac{\left(\frac{1}{K}\right)^{1/n}}{\left(\frac{D\Delta P}{4L}\right)^{1/n}} \left(\frac{D\Delta P}{4L} - \tau_y\right)^{n-1/n} \times \left[\frac{\left(\frac{D\Delta P}{4L} - \tau_y\right)^2}{1+3n} + \frac{2\tau_y\left(\frac{D\Delta P}{4L} - \tau_y\right)}{1+2n} - \frac{\tau_y^2}{1+n} \right] \quad (8)$$

식 (8)은 $n=1$ 인 Bingham fluid의 경우에는 Bucki-

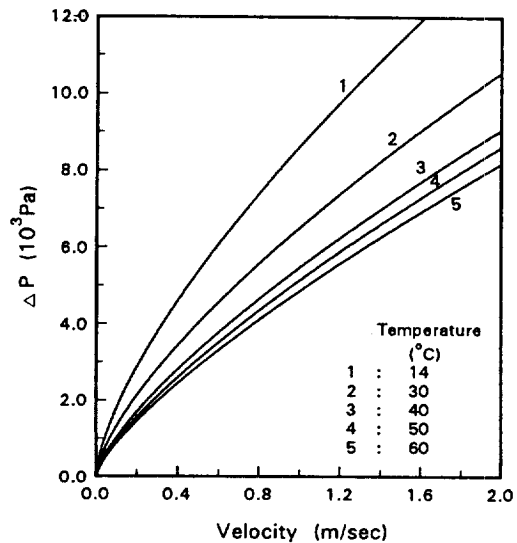


Fig. 12. Estimation of pressure losses with the temperature of CWM.
(coal loading: 58.6 wt%, $d_{p,m}=20 \mu\text{m}$)

ingham equation으로, $n=1$ 이고 $\tau_y=0$ 인 뉴턴 유체에서는 Hagen-Poiseuille equation으로 각각 간단히 변형되어진다. 따라서 CWM연료와 같이 비뉴턴 성질을 가진 pseudo-homogeneous suspension의 총류 흐름은 지수 모델의 두 상수인 n , K와 yield value, τ_y 가 구해지면

식 (8)에 의해서 수평관에서의 압력 손실을 계산할 수 있다.

Fig. 3과 5에 나타난 n, K값과 flow curve에 표시된 항복응력을 식 (8)에 대입하여 계산된 수치와 배관에서 측정된 실험값을 Fig. 10과 11에 각각 유속의 함수로 나타내었다. 그림에서 실선으로 표시된 계산치와 측정치가 비교적 잘 일치함을 알 수 있다. Fig. 12는 온도에 대한 CWM의 유동 특성 변화(Fig. 8과 9)를 근거로 식 (8)을 이용하여 유속에 따른 압력 손실을 계산한 결과로서 CWM의 온도를 높이면 배관에서의 압력 손실도 상당히 줄일 수 있음을 보여준다.

Metzner와 Reed[30]는 비뉴턴 유체에 대하여 아래와 같이 generalized Reynolds number를 제안하였다.

$$N_{Re}^* = \frac{D^{n'} V^{2-n'} \rho}{8^{n'-1} K'} \quad (9)$$

여기서 n'와 K'는 다음의 관계식을 만족시키는 계수이다.

$$\frac{D\Delta P}{4L} = K' \left(\frac{8V}{D} \right)^{n'} \quad (10)$$

레이놀드 수가 식 (9)와 같이 정의되면 모든 time-independent fluid의 층류 흐름에 대한 레이놀드 수-마찰 계수의 관계는 다음의 간단한 식으로 표현될 수 있다.

$$f = \frac{16}{N_{Re}^*} \quad (11)$$

또한 파이프 벽면에서의 전단속도는 아래와 같이 표시되고

$$\gamma_w = \frac{8V}{D} \left(\frac{1+3n'}{4n'} \right) \quad (12)$$

지수 모델이 적용되는 비뉴턴 유체의 경우는 n, K와 n', K' 사이의 관계를 다음과 같이 나타낼 수 있다[31].

$$n' = n = \frac{d \ln(D\Delta P/4L)}{d \ln(8V/D)}; K' = K \left(\frac{3n+1}{4n} \right)^n \quad (13)$$

따라서 n값이 대개 0.7-1.0 범위인 CWM연료가 압력 손실 실험에서의 최대 범위인 V=1.7 m/s의 속도로 D=27.0 mm인 파이프를 통과할 경우 벽면에서의 전단속도는 504-558 s⁻¹이다. 이는 CWM의 점도를 측정하기 위해 Haake 점도계에서 사용한 최대 전단속도인 512 s⁻¹과 비슷한 수치이다. CWM과 같이 전단속도에 따라 점도가 변화하는 비뉴턴 유체에서는 유동 성질과 이에 따른 유체의 흐름 특성에 대한 해석이 전단속도가 일치하는 범위에서 유효하므로 위와 같은 전단속도 범위의

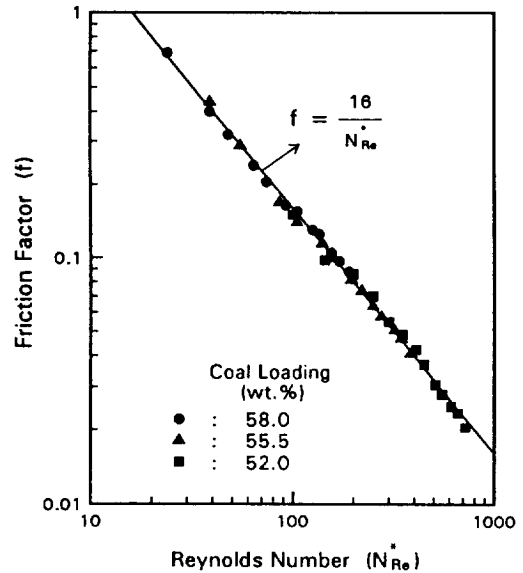


Fig. 13. Friction factor-Reynolds number relationship for the CWM flow.

(d_{p,m}=20 μm, CWM1002: 0.4 wt%, NaOH: 0.1 wt%)

일치는 본 실험에서 얻어진 계산 결과에 대한 타당성을 뒷받침해 주고 있다.

Fig. 13은 압력 손실 실험에서 측정된 데이터를 N_{Re}*-f의 관계로 변화시켜서 대수 그래프에 나타낸 것으로 N_{Re}*가 10-1000인 범위에서 식 (11)에 표시된 상관 관계가 잘 적용됨을 보여주고 있다.

4. 결 론

석탄-물 혼합연료(CWM)의 비뉴턴 성질을 지수 모델을 도입하여 Haake 점도계로 분석해 보고 내경이 27.0 mm인 파이프를 구성된 test loop에서 압력 손실을 측정하여 계산값과 비교한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 전단속도가 0.1-512 s⁻¹인 범위에서 음이온성 계면활성제를 0.1 wt% 이상 혼합한 CWM연료는 모두 pseudoplastic의 특성을 보였으며, 온도, 석탄의 평균 입경, 음이온성 계면활성제의 투입량이 증가할수록 CWM의 겔보기 점도는 감소하였다.

(2) CWM의 점도는 첨가제로서 음이온성 계면활성제를 0.4 wt% 정도 사용할 때 최소값을 보이고, 첨가제를 사용하지 않을 경우에 측정되는 항복응력은 석탄 성분의 농도가 증가하면 커지고 석탄 입자의 평균 입경이 증가함에 따라 선형적으로 감소하는 경향을 보였다.

(3) 석탄의 농도가 줄어들면 CWM은 $n=1$ 인 뉴턴 유체에 접근하였으며, 첨가제의 사용량, 석탄의 평균 입경, 슬러리 온도가 감소할수록 CWM의 비뉴턴 성질은 증가하였다.

(4) 배관에서 측정된 압력 손실은 CWM의 flow curve에서 구해진 지수 모델의 상수와 항복응력으로부터 유도된 관계식에 의해 정확히 계산될 수 있다.

(5) 비뉴턴 유체에 적용되는 레이놀드 수(N^*_{Rc})-마찰 계수(f) 관계식을 이용하여 수평관을 통과하는 층류 상태의 CWM에 대한 압력 손실을 나타내면 $f=16/N^*_{Rc}$ 의 관계가 성립하였다.

사용기호

A_1	: constant [-]
A_2	: constant [-]
C_{μ}	: ratio of apparent viscosity of power law fluid to that of Newtonian fluid, η_p/η_n [-]
C_{wt}	: weight percent of coal in CWM [wt%]
D	: inside diameter of pipe [m]
$d_{p,m}$: mass median diameter of coal particles in CWM [μm]
f	: friction factor [-]
K	: flow consistency index or power law coefficient [$\text{Kg}/\text{m} \cdot \text{s}^{2-n}$]
K'	: Metzner-Reed modified power law coefficient defined by eq. (13) [$\text{Kg}/\text{m} \cdot \text{s}^{2-n}$]
L	: pipe length [m]
N	: rotational speed of the rotor [min^{-1}]
N^*_{Rc}	: Metzner-Reed Reynolds number defined by eq. (9) [-]
n	: flow behavior index or power law exponent [-]
n'	: Metzner-Reed modified power law exponent defined by eq. (13) [-]
ΔP	: pressure loss in horizontal pipe [Pa]
R_o	: radius of the stationary outer cylinder called cup [m]
R_i	: radius of the rotating inner cylinder called rotor [m]
T	: absolute temperature [K]
V	: cross-sectional average velocity [m/sec]
V_s	: volume of coal particles [m^3]
V_w	: volume of total water in the CWM [m^3]
V_{sw}	: volume of water absorbed by coal [m^3]
α	: equilibrium moisture content of the coal [$\text{Kg}/\text{Kg dry coal}$]
γ	: shear rate [s^{-1}]
γ_{wn}	: shear rate at the rotor surface for Newtonian

	fluids [s^{-1}]
γ_{wp}	: shear rate at the rotor surface for the non-Newtonian fluids based on the power law model [s^{-1}]
δ	: ratio of radius of the outer cylinder to that of rotor, R_o/R_i [-]
η	: apparent viscosity [$\text{mPa} \cdot \text{s}$]
η_n	: apparent viscosity of Newtonian fluid [$\text{mPa} \cdot \text{s}$]
η_p	: apparent viscosity of power law fluid [$\text{mPa} \cdot \text{s}$]
ρ_c	: apparent density of the coal [Kg/m^3]
ρ_w	: density of the water [Kg/m^3]
τ	: shear stress [Pa]
τ_y	: yield stress [Pa]
τ_w	: shear stress at the wall [Pa]
ϕ	: solid volume fraction [-]
ω	: angular velocity of the rotor [s^{-1}]

참고문헌

1. 김동찬 외: "CWM의 연소효율 증대를 위한 버너 및 분무기술 개발 연구(IV)", 한국에너지기술연구소 연구보고서, KRC-90G-T20(1991).
2. 김동찬 외: "석탄-물 혼합연료의 기술개발 연구", 한국전력공사 기술연구원 연구보고서, KRC-85G-J04(1990).
3. Papachristodoulou, G. and Trass, O.: *Can. J. Chem. Eng.*, **65**, 177(1987).
4. Kang, S. W.: Ph.D. Thesis, Dept. of Mechanical Engineering, M. I. T., Cambridge, Mass.(1988).
5. Ohene, F., Bowman, K., Williams, A., Obonna, B. and Dooher, J. P.: *Proc. Am. Chem. Soc., Div. of Fuel Chemistry*, **36**, 129(1991).
6. Olen, K. R.: ASME Paper No. 84-JPGC-FU-D, p. 7 (1984).
7. Handerson, C. B., Scheffee, R. S. and McHale, E. T.: *Energy Progress*, **3**, 69(1983).
8. Boger, D. V., Leong, Y. K., Mainwaring, D. E. and Christie, G. B.: *Proc. 3rd Eur. Conf. on Coal Liquid Mixtures*, Malmö, Sweden, October, 1(1987).
9. Woskoboenko, F., Siemon, S. R. and Creasy D. E.: *Fuel*, **66**, 1299(1987).
10. Usui, H. and Sano, Y.: *J. Chem. Eng. Japan*, **18**, 519(1985).
11. Szymanski, J. K. and Mansour, N. A.: *Fuel Sci. Technol. Int.*, **5**, 63(1987).
12. Morgan, M. E., Heaton, H. L. and Scheffee, R. S.: *Proc. 7th Int. Symp. on Coal Slurry Combustion and Technology*, New Orleans, Louisiana, May, 104(1985).

13. Sengun, M. Z. and Probstein, R. F.: *Rheol. Acta*, **28**, 382(1989).
14. Schramm, G.: "Introduction to Practical Viscometry", Gebrüder HAAKE GmbH, West Germany (1981).
15. Govier, G. W. and Aziz, K.: "The Flow of Complex Mixtures in Pipes", Robert E. Krieger Publishing Co., Inc., New York(1972).
16. Skelland, A. H. P.: "Non-Newtonian Flow and Heat Transfer", John Wiley & Sons, Inc., New York (1967).
17. Kaji, R., Muranaka, Y., Miyadera, H. and Hishinuma, Y.: *AIChE J.*, **33**, 11(1987).
18. Tsai, S. C. and Knell, E. W.: *Fuel*, **65**, 566(1986).
19. Turian, R. M., Fakhreddine, M. K., Avramidis, K. S. and Sung, D. J.: *Fuel*, **72**, 1305(1993).
20. Krishna, C. R. and Sapienza, R. S.: Proc. 2nd Eur. Conf. on Coal Liquid Mixtures, London, September, 115(1984).
21. Stover, N. S. H., Thambimuthu, K. V. and Todd, A.: Proc. 15th Int. Conf. on Coal & Slurry Technologies, Clearwater, Florida, April, 397(1989).
22. Tadros, T. F.: Proc. 2nd Eur. Conf. on Coal Liquid Mixtures, London, September, 1(1985).
23. Dinger, D. R. and Funk, J. E.: Proc. 4th Int. Symp. on Coal Slurry Combustion, Orlando, Florida, May (1982).
24. Hiemenz, P. C.: "Principles of Colloid and Surface Chemistry", 2nd ed., Marcel Dekker, Inc., New York(1986).
25. Morrison, J. L., Miller, B. G. and Scaroni, A. W.: Proc. 18th Int. Tech. Conf. on Coal Utilization & Fuel Systems, Clearwater, Florida, April, 361(1993).
26. Hara, S., Arai, H., Sugawara, H., Ukigai, T., Yoshida, E. and Ogawa, J.: Proc. 17th Int. Conf. on Coal Utilization & Slurry Technologies, Clearwater, Florida, April, 71(1992).
27. Zhaoxiang, H., Yifeng, W., Yizhen, W., Zhangjie, L. and Wenhui, Z.: Proc. 5th Int. Symp. on Coal Slurry Combustion and Technology, Tampa, Florida, June, 1000(1983).
28. Usui, H., Yamasaki, Y. and Sano, Y.: *J. Chem. Eng. Japan*, **20**, 65(1987).
29. Andrade, E. N. da C.: *Nature*, **125**, 309(1930).
30. Metzner, A. B. and Reed, J. C.: *AIChE J.*, **1**, 434 (1955).
31. Metzner, A. B.: *Ind. Eng. Chem.*, **49**, 1429(1957).