

고압 석탄 가스화기용 액상 이산화탄소의 점성측정 방법비교에 관한 연구

김강욱¹ · 김창연¹ · 김학덕¹ · 송주현^{2†}
¹부산대학교 대학원, ²부산대학교 기계공학부

Comparison of Viscosity Measurement of a Liquid Carbon Dioxide Used for a High-Pressure Coal Gasifier

KANGWOOK KIM¹, CHANGYEON KIM¹, HAKDUCK KIM¹, JUHUN SONG^{2†}

¹Grad. School of Pusan National Univ.

²School of Mechanical Engineering, Pusan National University, Busandaehak-ro,
63beon-gil Geumjeong-gu, Busan, 46241, Korea

Abstract >> In this study, the viscosity of a liquid carbon dioxide (LCO₂) that can potentially be used in a wet feed coal gasifier was evaluated. A pressurized capillary viscometer was employed to obtain the viscosity data of LCO₂ using two different methods. During the first method, the measurements were conducted under quasi-steady and high pressure flow conditions where two-phase flow was greatly minimized. The viscosity of LCO₂ was determined using turbulent friction relationship. At the second flow condition where unsteady flow is induced, the viscosity of LCO₂ was measured using the half-time pressure decay data and was further compared with values calculated by the first method.

Key words : Coal gasifier(석탄 가스화기), Liquid carbon dioxide (LCO₂)(액상 이산화탄소), Viscosity(점성), Capillary viscometer(모세관 점도계), Half-time pressure decay(압력반감 시간), Turbulent friction relationship(난류 마찰관계식)

Nomenclature

p : pressure, N/m²
 g : gravity acceleration, m/s²
 d : capillary tube diameter, m
 z : elevational head, m
 V : average velocity at capillary exit, m/s

C : compressibility
 Vol : volume of upstream chamber, m³
 h : head loss, m
 h : current liquid height in upstream chamber, m
 r : half height (i.e., radius) of upstream chamber, m
 l : width of upstream chamber, m
 x : difference between half height and current liquid height (=r-h)
 f : friction factor
 L : capillary tube length, m
 Re : Reynolds number

[†]Corresponding author : jxs704@pusan.ac.kr

Received : 2015.11.10 in revised form : 2015.12.8 Accepted : 2015.12.30

Copyright © 2015 KHNES

- H₂O : liquid water
 LCO₂ : liquid carbon dioxide
 V : volume of upper chamber at initial state
 Q : volume flow rate, m³/s
 K : proportional constant

Greek characters

- ρ : density, kg/m³
 μ : viscosity, mPa·s

Subscripts

- 1 : top section(upstream chamber) of capillary viscometer
 2 : bottom section(capillary tube) of capillary viscometer
 f : friction
 w : wall
 D : Darcy
 c : capillary

1. 서 론

전 세계적으로 석탄 가스화기는 발전용 또는 고급 연료생산용으로 사용되고 있다. 이 과정은 기존 석탄화력 발전소의 연소과정에 비해 낮은 온실가스를 배출하는 것으로 알려져 있다. 석탄을 물로 운송하는 기존 습식 가스화기에서 저등급탄(LRC)을 사용할 경우 심각한 성능저하가 예상되고 있다. 건조 전 처리 장비가 설치되지 않은 한 석탄내의 수분으로 인해 석탄함유량이 줄어들고 따라서 석탄으로부터 전환되는 합성가스의 양이 줄어들 수 있다. 이 같은 문제점을 해결하는 방안으로 액상이산화탄소(LCO₂)와 LRC를 혼합하여 공급하는 기술을 들 수 있다. 기존 물에 비해 좀 더 효율적으로 석탄을 공급할 수 있을 것이다¹⁻³⁾.

이 같은 혜택은 물에 비해 LCO₂의 낮은 점성과 석탄표면으로의 향상된 습윤성 때문이다. 이 같은 습윤성향상은 석탄 기공에 물이 재침투 되는 것을 방지한다. 이 같은 경향은 LICADO (Liquid Carbon Dioxide) 공정에서 물과 회성분이 LCO₂-석탄 슬러리와 분리되어 지는 것을 통해 증명되었다. 실제로 LCO₂를 사용할 경우 낮은 점성으로 인해 압력강하가 덜 일어나서 유동손실이 줄어드는 장점이 있다. 이 같은 LCO₂-석탄 슬러리는 습식 가스화기의 노즐을 통해 분사되는 동안 물슬러리와 다른 분무특성과 후속 열분해 특성을 보일 것으로 예상 된다⁴⁾. 이 공급기술을 실제 현장에 적용시키기 위해서는 다양한 운전조건에서 순수 LCO₂ 뿐만 아니라 석탄 슬러리 혼합물의 유동특성을 파악할 수 있어야 한다.

순수 LCO₂에 대한 실험적인 점성 데이터는 sub-cooled 영역에서 임계점까지 다양한 조건에 걸쳐 문헌에 잘 나타나 있다. Vesovic의 논문에서는 다양한 방식으로 측정된 점성값이 보고되고 있다⁵⁻⁶⁾. Wakeham과 공동연구자는 vibrating-wire viscometer를 사용하여 LCO₂점성을 측정하였고⁷⁻⁹⁾, Diller and Balli는 oscillating quartz viscometer를 사용하였다¹⁰⁾. 이에 반해, 모세관 점성측정 장비는 LCO₂ 점성을 측정하는데 많이 사용되지 않았다¹¹⁻¹²⁾. 압력차 유동을 줄 경우 압력이 적절히 제어되지 않으면, 모세관 안에서 버블형성이 일어나서 LCO₂점성 측정이 용이하지 않을 수 있다. 따라서 압력을 포화압력 이상으로 유지 하면서 중력차 유동을 유발하는 것이 정상상태이면서 cavitation flow를 억제하는 하나의 방법이 될 수 있다.

Maini et al.은 비정상 압력차 유동의 경우에 상부 챔버의 압력이 지수적으로 감소하는데, 압력반감 시간을 이용하여 기준유체 대비 점성값을 실험적으로 얻을 수 있었다. 그러나 이 경우는 대부분 낮은 압력차 범위와 이 압력범위에서 상변화가 일어나지 않는 유체에 대한 점성값들이 보고되고 있다¹³⁾. 따라서 이 기법을 통한

LCO₂유체에 대한 점성값 측정에 대한 연구는 보고된 적이 없다.

본 연구에서는 고압 모세관 점성측정 장비를 이용하여 두 가지 다른 방법으로 LCO₂ 점성을 측정하였다. 그 첫 번째로 준 정상상태 유동을 얻은 다음, LCO₂의 경우 난류 마찰계수와 유동속도를 측정하여 LCO₂의 점성을 도출할 수 있었다. 비정상 상태 유동이 일어나는 압력차 유동조건에서는 상부 챔버 내의 압력 반감시간을 이용하여 LCO₂의 점성을 측정하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 고압 모세관 점성측정 장비

Fig. 1은 본 실험에 사용된 고압 모세관 점성측정장비를 보여주고 있다. 본 장비는 액상 이산화탄소의 액화 및 유동을 위해 요구되는 고압조건을 견딜 수 있도록 특별히 설계 제작 되었다. 상하부 챔버와 중간 가시화 블록으로 구성되어 있으며, 특히 상부챔버는 가시화 창을 가지고 있다. 이를 통해 상부챔버 충전과정중의 상변화 거동과 중간블럭에 장착되는 모세관을 통한 유동 시 상부챔버에서 LCO₂체적변화를 가시화 할 수 있었다.

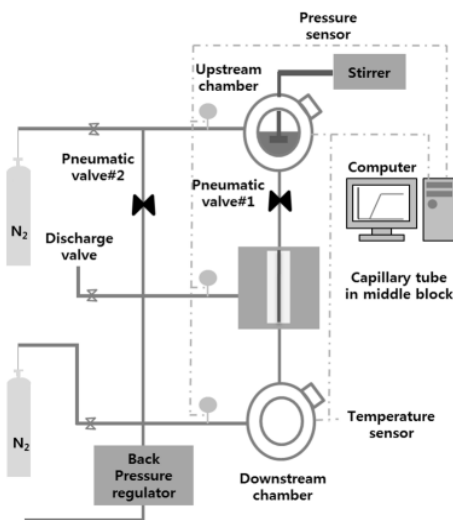


Fig. 1 Schematic of the experimental setup

가시화 창은 100 bar와 80°C의 온도까지 견딜 수 있게 설계되어 있으며, 100 bar이상의 압력이 가해질 경우 안전을 위해 릴리프 밸브가 자동적으로 압력을 제거하도록 제작하였다.

고체 드라이 아이스의 질량과 온도를 조절하여 LCO₂ 포화 혼합기를 만들 수 있었다. 질소가스를 추가적으로 충전함으로써 압력을 상승시켜 compressed liquid상태로 천이시킬 수 있었다. 필요시 챔버 온도를 조절할 수 있으며, 각 챔버의 온도와 압력을 측정할 수 있었다. 유동제어 장비가 두개의 밸브를 공압방식으로 개폐할 수 있도록 설계되었다.

준정상 상태 중력유동에서는 상부챔버와 하부챔버의 초기 압력이 모세관 유동 시에 변하지 않도록 설계되었다. 상하부 챔버를 연결하는 두개의 관에 설치된 두개의 공압밸브를 동시에 개방함으로써 준정상 상태 중력유동을 만들 수 있었다. 첫 번째 밸브는 모세관 유동을 유발시키는 목적으로 사용되고, 두 번째 밸브는 액체가 흘러 내린 만큼 하부챔버에서 압축된 가스를 다시 상부챔버로 보내는 역할을 하게 된다.

압력이 변하지 않는 준정상 중력유동의 경우에 벽면 마찰 효과를 주기 위해서 LCO₂는 모세관을 흐르도록 설계하였다. 길이는 250mm로 일정하며, 4개의 다른 직경(0.4, 0.6, 0.8, and 1.0mm)을 가지는 모세관을 사용하였다. 서로 다른 직경에 대한 데이터는 나중 결과 및 고찰부분에서 설명되듯이 유동이 층류영역인지를 결정하는데 사용될 수 있다. 모세관은 구리로 제작되었으며, 외부 직경 6mm를 가지는 스테인레스 스틸관에 의해 둘러싸여 있다. 챔버와 모세관 치수에 대한 자세한 사항은 Table 1에 잘 나타나 있다.

상부챔버의 체적이 다 없어지는데 걸리는 시간을 측정하기 위하여 영상이 촬영되었다. 고속 카메라를 사용하여 1/100s의 프레임 속도로 연속이미지가 획득되었다. 주어진 시간동안의 체적변화를 가지고 정상상태 속도를 구했고, 아래에 기술되듯이 이 같은 정보가 점성을 구하는데 사용되었다.

Table 1 Dimensions of high pressure capillary viscometer

parameters	description
upstream chamber shape	Cylinder
upstream chamber diameter/length	5 cm / 13.4 cm
upstream chamber volume	260 cm ³
capillary tube inner diameter	0.4/0.6/0.8/1.0 mm
capillary tube length	250 mm

2.2 준정상상태 방법에 의한 점성측정

점성은 아래 식 (1)에서 출구속도와 마찰 헤드손실을 알면 구할 수 있다. 본 식은 변형된 Poiseuille 식으로써 상부에 reservoir를 가지는 층류 관유동에 적합한 수식이다¹⁴⁾.

$$\mu = \frac{\rho g d^2 h_f}{32 V_2 z_2} \quad (1)$$

마찰 헤드손실은 아래 식 (2)로부터 계산된다. 이때 압력차이는 없고, 입구에서의 속도항은 출구에 비해 무시할 정도로 작다고 가정한다. 출구속도는 모세관 유동이 일어나는 정상상태 동안 체적변화를 관찰함으로써 결정된다. 시간에 따른 액체높이를 관찰하고 이를 식 (3)에 넣어서 액체 체적으로 바꾸어 주게 된다. 유동전의 초기 체적은 실린더의 절반이 채워졌을 때의 체적으로 볼 수 있다. 따라서 출구속도와 elevation head를 알면 마찰헤드 손실을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} h_f &= \frac{(p_1 - p_2)}{\rho g} + z_1 + z_2 + \left[\frac{V_1^2}{2g} - \frac{V_2^2}{2g} \right] \\ &= z_1 + z_2 - \frac{V_2^2}{2g} \end{aligned} \quad (2)$$

$$Vol = \frac{1}{2} \pi r^2 l - \int_0^x \sqrt{(r^2 - x^2)} dx \quad (3)$$

where $x = r - h$

층류영역에 존재하는 물의 경우와는 달리 같은 모세관 직경에서 LCO₂유체는 난류영역에서 유동이 일어날 가능성이 많고 나중의 결과 및 고찰부분에서 보듯이 점성을 구하기 위하여 식 (1)과 같은 층류관계식을 더 이상 쓸 수 없게 된다. 대신에 측정된 마찰 수두 손실(hf)을 가지고 난류 마찰계수 관계식을 사용하여 레이놀즈 수를 구하고, 최종적으로 점성을 구하고자 하였다¹⁴⁾.

2.3 압력반감시간 방법에 의한 점성측정

본 실험은 앞서 설명한 모세관 점도계에서 두개의 공압밸브를 개방하는 대신에 한 개의 공압밸브를 개방함으로써 유동을 유발하게 된다. 이 경우 아래챔버의 하류부분에 배압조절기를 설치하여 아래 챔버의 압력을 일정하게 유지하도록 하였다. 만약 배압조절기가 없다면, 모세관을 통한 액체상태 유동이 아래챔버를 채움으로써 압력이 증가하게 되는 것을 확인할 수 있었다.

이 같은 비정상 압력유동의 경우에 상부챔버 압력이 시간에 따라 지수적으로 감소하는 경향을 가진다. 따라서 점성을 측정하는 방법으로는 상부챔버 내의 압력이 반으로 줄어드는 시간을 측정하여 기준 점성대비 점성의 변화를 측정할 수 있다¹⁵⁾. 점성측정에 사용된 원리는 모세관을 통한 체적유량은 상부챔버를 채우고 있는 유체의 체적변화와 동일하다는 사실을 이용한다. 상부챔버를 채우고 있는 유체의 체적변화는 상부 챔버 체적, 상부체적 내 가스압력 변화, 그리고 압축성 계수에 결정된다.

$$Q = -CV \frac{dP_u}{dt} \quad (4)$$

모세관을 통한 체적유량은 층류의 경우 Hagan Poiseuille law를 따른다고 가정하고, 난류의 경우에는 아래와 같은 난류 유동관계식을 따른다고 가정한다.

$$Q = \frac{(P_u - P_d)^{0.57}}{\left(0.241 \cdot L \cdot \mu^{\frac{1}{4}} \cdot d^{-4.75}\right)^{0.57}} \quad (5)$$

상기 두개 식을 같이 두고 적분을 수행하면 다음과 같은 식을 얻게 되고,

$$\left(\frac{P_u - P_d}{P_{u0} - P_d}\right)^{0.43} \cdot \frac{1}{0.43} = \frac{1}{CV \left(0.241 \cdot L \cdot \mu^{\frac{1}{4}} \cdot d^{-4.75}\right)^{0.57}} \Delta t$$

압력이 반으로 줄어드는데 걸리는 시간을 구할 수 있다.

$$\left(\frac{1}{2}\right)^{0.43} \cdot \frac{1}{0.43} = \frac{1}{CV \left(0.241 \cdot L \cdot \mu^{\frac{1}{4}} \cdot d^{-4.75}\right)^{0.57}} \Delta t_{\frac{1}{2}}$$

$$\mu = K \Delta t_{\frac{1}{2}}^{7.02}$$

where $K =$

$$\frac{1}{\left[\left(\frac{1}{2}\right)^{0.43} \cdot \frac{1}{0.43} CV \left(0.241 L \cdot d^{-4.75}\right)^{0.57}\right]^{0.1425}}$$

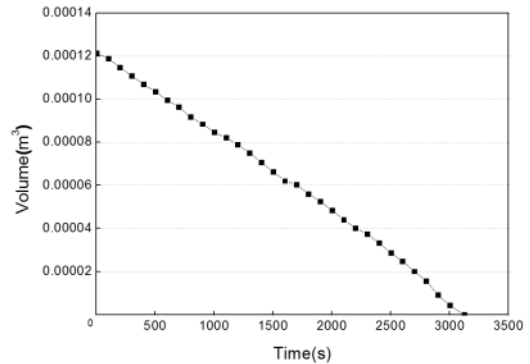
K값은 초기체적, 모세관길이와 직경을 포함하고 있으므로 두 유체에서 차이가 없다고 볼 수 있다. 따라서 물과 LCO₂ 유동사이에서 K값이 일정하다고 가정하면, 물과 LCO₂ 점성비는 아래 식 (6)과 같이 반감시간의 함수로 표시될 수 있다¹³⁾. 이를 통해 난류의 경우 층류 유동일 때 점성이 반감시간에 선형적으로 비례하는 것과 다르다는 사실을 확인할 수 있다.

$$\frac{\mu_{H_2O}}{\mu_{LCO_2}} \approx \left(\frac{\Delta t_{\frac{1}{2}, H_2O}}{\Delta t_{\frac{1}{2}, LCO_2}}\right)^{7.02} \quad (6)$$

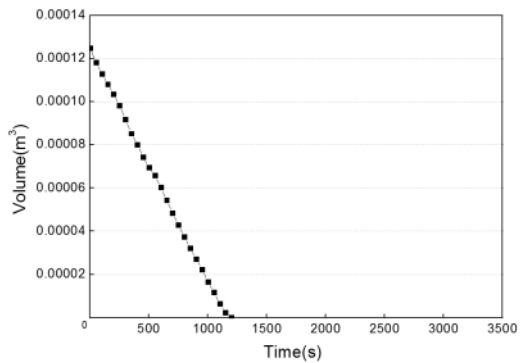
3. 결과 및 고찰

3.1 LCO₂의 점성측정

Fig. 2는 두개의 밸브에 의해 유동이 일어난 후 시간에 따른 상부챔버의 체적변화를 보여주고 있다. H₂O and LCO₂ 유동이 비교되고 있다. LCO₂의 경우에는 포화온도 22°C, 65 bar압력조건에 있는 포화혼합기가 사용되었다. 이 같은 체적변화를 가지고 체적유량 측 속도를 측정할 수 있었다. 유동초기에 입구효과 때문에 유동이 가속되다가 정상상태에 도달하며, 나중 유동말기에 출구효과 때문에 정상상태에서 벗어날 수 있다. Fig. 2에서 보듯이 두 유체 모두 선형의 기울기, 즉 일정한 속도를 가지는 영역이 대부분을 차지하고 있음을 볼 수



(a)



(b)

Fig. 2 Volume changes of tested fluid (a) H₂O and (b) LCO₂ charged in the upstream chamber at a fixed temperature of 22°C

있고, 준 정상상태에 도달했다고 판단해 볼 수 있다. 이 같은 영역에서 준정상상태 속도가 결정될 수 있다. Fig. 3은 LCO₂유동시의 상부, 하부챔버의 압력변화를 보여주고 있다. 압력이 변동되지 않는 결과는 모세관 유동 시에 LCO₂의 증발이 일어나지 않음을 확인해 주고 있다.

LCO₂와 H₂O사이에는 점성의 차이가 크며, 예를 들면 22°C온도조건에서 LCO₂가 물에 비해 10배 이상 적은 점성을 가진다고 알려져 있다¹¹⁾. 이러한 차이 때문에 하나의 고정된 유동조건에서 두 유체 모두에 대한 점성을 얻기가 쉽지 않을 수 있다. 예를 들면, 한 개의 고정된 모세관 직경을 사용할 경우 물유동일 경우는 층류영역일 수 있으나, LCO₂유동의 경우는 낮은 점성으로 인해 층류가 아닌 난류영역일 수 있다. 두 유체모두 층류영역에서 점성을 측정하고자 하는 경우 최적의 모세관 직경을 발견하여야 할 것 이다. 이를 위해서 Darcy 마찰계수 변화가 레이놀즈 수에 따라 측정되었다. 그리고 이 같은 실험데이터를 층류영역을 나타내는 이론 관계식($f_d = \frac{64}{Re_d}$)과 비교하여 유동영역을 살펴보고 각 유동영역에 맞는 관계식을 도출하고자 하였다. 이 경우 모세관 길이는 고정시킨 상태에서 모세관 직경을 변화시켜 가면서 속도와 레이놀즈수를 변화시킬 수 있었다. 모세관 점성 측정장비와 사용된 직경에 관한 정보는 Table 1에 나타나 있으며, Fig. 4에서 모세관 직경의 차

이를 볼 수 있다. 체적유량과 속도는 앞에서 설명한 방법을 통해 결정하였고 마찰헤드손실은 식 (2)에서 유체 초기높이와 속도를 가지고 계산할 수 있다. 최종적으로 Darcy 마찰계수는 아래 식 (7)의 Darcy-Weisbach equation을 사용하여 계산할 수 있다.

$$f_d = \frac{h_f \cdot d}{\left(\frac{1}{2g} \cdot V^2 \cdot L\right)} \tag{7}$$

Fig. 5는 두 가지 다른 유체의 경우 실험적으로 측정 한 레이놀즈 수에 따른 Darcy 마찰계수의 변화를 보여 주고 있다. 이론적으로 계산된 선형 층류관계식이 실선으로 동시에 표시되어 있다. H₂O의 실험치는 1000미만의 레이놀즈 수에서 선형관계식에 잘 근사됨을 볼 수 있다. 이는 서로 다른 직경을 가지더라도 H₂O의 경우에는 층류조건을 잘 유지하고 있음을 보여주고 있다. 그러나 LCO₂의 경우에는 대부분의 레이놀즈 수 조건에서 선형성으로부터 벗어나는 것을 알 수 있다. 이때 레이놀즈수는 H₂O의 경우보다 훨씬 더 크며, Darcy 마찰계수

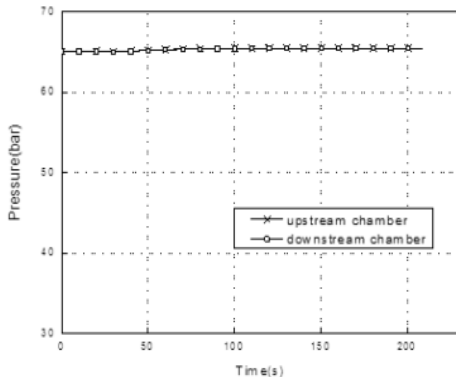


Fig. 3 Temporal variations of pressures at the upstream and downstream chambers during capillary flow of the LCO₂.

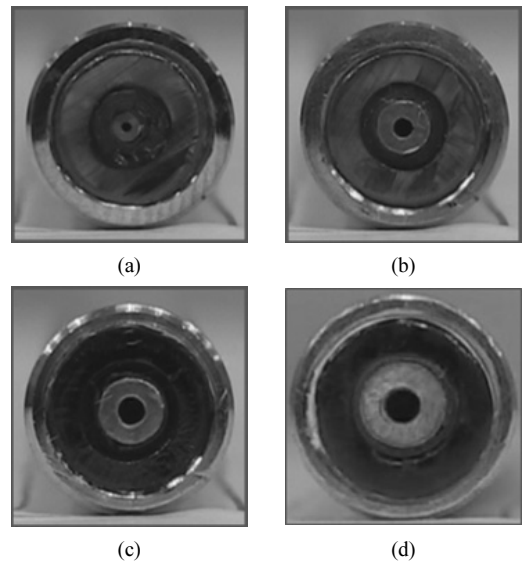


Fig. 4 Photographs of the capillary tubes used for determining optimum flow conditions: (a) d=0.4, (b) =0.6, (c) d=0.8, and (d) d=1 mm

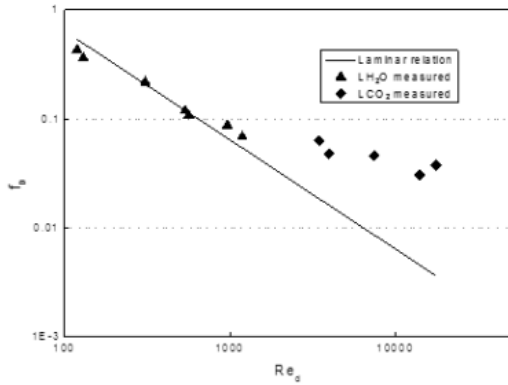


Fig. 5 The variation of friction factor with Reynolds number

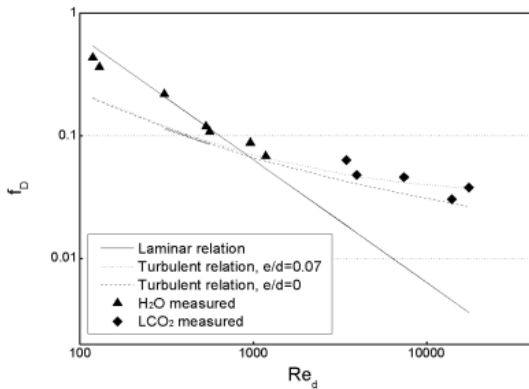


Fig. 6 Regression fitting of turbulent friction relations against the experimental data of LCO₂

는 레이놀즈 수에 의해 많이 변하지 않는 것을 볼 수 있다. 추가적인 모세관 직경의 감소와 길이의 증가가 LCO₂ 데이터를 층류조건으로 이동시켜 줄 수 있을 것으로 기대되나 현재 장비의 실험적인 한계 때문에 이 같은 시도는 이루어 지지 않았다. 예를 들면, 긴 모세관을 설치하는 것은 공간적인 제약과 안전문제 때문에 대대적인 개조 없이는 불가능하였다.

그러므로 난류영역에 위치하고 있는 LCO₂의 점성을 측정하기 위해서, 다른 방법을 개발하였다. 난류 유동관계식($f_D - Re$)을 사용하는 것으로 이 관계식은 LCO₂ 실험데이터에 regression 기법을 적용하여 결정하였다. 아래 식 (8)에 있는 난류 유동관계식의 보정상수($\frac{\epsilon}{d}$)를 data fitting을 통해 결정하였으며^{14,16)}, 이 계

수는 모세관의 거칠기를 나타내는 척도로 볼 수 있다.

$$f_d^{-1/2} = -1.8 \log \left[\frac{6.9}{Re_d} + \left(\frac{\epsilon}{d} \right)^{1.11} \right] \quad (8)$$

Fig. 6은 상기 regression 분석 결과를 보여주고 있다. 보정상수($\frac{\epsilon}{d}$) 0.07을 사용할 때 난류영역에 있는 실험 데이터에 가장 근접한 fitting 결과를 보여주고 있다. 주어진 마찰계수로부터 레이놀즈 수가 계산되고, 점성이 레이놀즈수의 정의로부터 구할 수 있다. 이렇게 난류관계식을 가지고 계산한 LCO₂ 점성이 층류관계식을 가지고 계산한 점성과 비교되어 Table 2에 나타나 있다. 식 (1)과 식 (2)를 가지고 층류관계식을 사용할 경우는 평균 0.402mPa·s이며, 난류관계식을 사용할 경우 평균 0.073mPa·s로서 다른 참고문헌에 있는 실험치 (0.063mPa·s)와 근사해 짐을 알 수 있다⁷⁾. 이 경우 실험오차는 평균치의 ±10%임을 확인할 수 있었다. 따라서 LCO₂의 경우는 H₂O의 경우에 사용한 것과는 다른 $f_D - Re$ 관계식을 사용하여야 함을 확인할 수 있었다. Table 3에서 보듯이 이렇게 측정된 LCO₂ 점성은 H₂O보다 평균 13배 적음도 확인할 수 있었다.

3.2 LCO₂ 점성측정 방법비교

본 실험은 비정상 유동을 만들어 상부챔버 압력이 시간에 따라 지수적으로 감소하는 경향을 가지게 되는데, 상부챔버 내의 압력이 반으로 줄어드는 시간을 측정하여 기준 점성대비 점성의 변화를 측정하고자 하였다. 본 실험은 길이 250mm이며 직경 0.4mm를 가지는 모세관을 동일하게 사용하였다. Fig. 7은 물의 경우 3가지 다른 압력차조건에서 half-time pressure decay test 결과를 보여주고 있다. 어떤 압력조건에서도 거의 동일한 half-time pressure decay를 가지는 것을 알 수 있고 Table 4에서 보듯이 6.96sec 정도임을 알 수 있다. 이를 통해 물은 어떠한 압력조건에서도 점성이 일정함을 확인할 수 있다.

Table 2 Comparison of LCO₂ viscosities calculated by laminar and turbulent relationship in present work and previous work⁷⁾

capillary tube diameter (mm)	laminar relationship (mPa·s)	turbulent relationship (mPa·s)	previous work ⁷⁾ (mPa·s)
0.4	0.188	0.072	0.063
0.6	0.338	0.085	0.063
0.8	0.423	0.065	0.063
1	0.659	0.072	0.063
average	0.402	0.073	0.063

Table 3 Relative viscosities for water/LCO₂ at quasi steady state flow condition

Water (mPa·s)	LCO ₂ (mPa·s)	Relative viscosity	Measurement error (%)
0.944	0.073	12.9	±10

만면 Fig. 8은 LCO₂의 경우 half-time pressure decay test 결과를 보여주고 있다. 아래 챔버가 포화압력 이하인 65/40과 75/50bar 조건의 경우에는 모세관 내부 및 출구에서 버블 형성으로 인한 flash boiling이 발생하여 압력차 선도에서 급격한 기울기 변화가 나타나고 있다. Flashing point가 발생한 이후에는 상부챔버의 압력이 급하게 떨어지는 경향을 보이는데, 이는 vapor flow가 cavitation flow 등 다른 유동영역으로 발달했기 때문으로 판단된다. 따라서 이 조건에서 half-time pressure decay을 구할 수 없다. 그러나 85/60bar 압력조건은 기울기변화 없이 지속적으로 압력이 반감되므로, half pressure decay time을 얻을 수 있다. Table 4는 이 조건에서 half-time pressure decay은 4.81sec임을 보여주고 있다. 본 결과는 LCO₂가 특정 온도에서의 포화 압력이 상이 형성되어야 상변화가 억제되어 이를 통해 유효한 점성데이터를 얻을 수 있음을 보여 주고 있다.

측정된 물과 LCO₂에 대한 압력반감시간을 식 (6)에 넣으면 LCO₂점성대비 물의 점성이 13 배정도 차이가 남을 알 수 있다. 점성비의 실험오차는 평균치의 ±4.5% 임을 확인할 수 있었다. 이 같은 오차를 고려해 볼 때 상기 결과는 앞서 준정상 중력유동 조건에서 측정한 물과 LCO₂에 대한 점성비 결과와 비슷하다고 볼 수 있다.

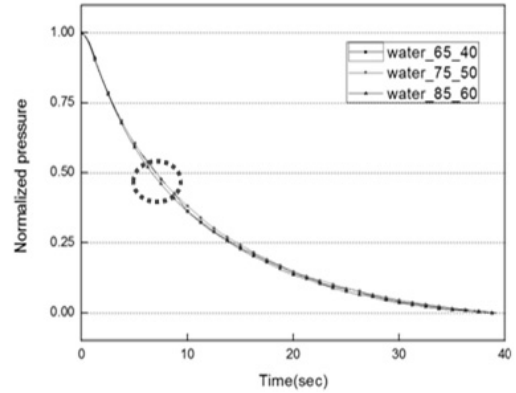


Fig. 7 Comparison of half-life pressure decay for water at different pressure conditions

Table 4 Half-life pressure decay time and relative viscosities for water/LCO₂ at one fixed pressure condition

Pressure	Half-life pressure decay time		Relative Viscosity	Measurement error (%)
	Water	LCO ₂		
85-60 bar	6.96 sec	4.81 sec	13.4	±4.5

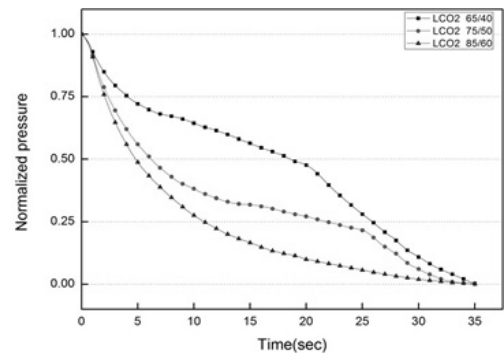


Fig. 8 Comparison of half-life pressure decay for LCO₂ at different pressure conditions

4. 결 론

본 연구에서는 습식가스화기에 물대신 사용할 수 있는 액상 이산화탄소(LCO₂)의 점성을 두 가지 다른 방법으로 고압 모세관 점성측정 장비를 이용하여 평가하였다. 준정상 중력유동의 경우에는 난류 마찰계수와 레이놀즈수 관계식을 이용하여 난류영역에서 LCO₂의 점성을 측정하였다 이와 달리 비정상 압력유동의 경우에

는 모세관 유동과정에서 발생하는 상부 챔버의 압력이 반감되는 시간을 측정하여 CO_2 의 점성을 측정하고 상기 결과와 비교하였다. 특히 비정상 압력유동의 경우 상하부 챔버 둘 다 포화압력 이상의 조건에서 CO_2 가 유동한다면 물에 비해 13배 정도 낮은 점성결과가 나타남을 확인하였다. 두 실험에서 점성비의 실험오차는 평균치의 ± 10 와 4.5%로서 이같은 오차를 고려해 볼 때 비정상 압력유동조건의 점성비는 앞서 준정상 중력유동 조건에서 측정한 물과 CO_2 에 대한 점성비 결과와 비슷하다고 볼 수 있다.

후 기

This work was supported by a National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MEST) (No. 2010-0019543). Some of the results are the outcome of another program (No. 2012R1A1A2002669), also supported by the NRF. Finally, the authors thank the Korea government (MKE) for financial support from the man power program (No. 20144010200780).

References

1. J. Dooher, J. Phillips. Program on technology innovation: advanced concepts in slurry-fed low-rank coal gasification liquid CO_2 /coal slurries and hot water drying, EPRI report, Dooher Institute, 2006.
2. C. Botero The phase inversion-based coal- CO_2 slurry (PHICCOS) feeding system: design, coupled multiscale analysis, and technoeconomic assessment, Ph.D. dissertation, MIT, 2014.
3. C. Botero, R.P. Field, H.J. Herzog, A.F. Ghoniem, Coal- CO_2 slurry feed for pressurized gasifiers: slurry preparation system characterization and economics. Energy Procedia 37, 2013, pp. 2212-2214.
4. C.Y. Kim, H.D. Kim, J.H. Song. Spray characteristics of a coal slurry with liquid carbon dioxide, Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society 126, 2015, pp. 357-362.
5. V. Vesovic, W.A. Wakeham, G.A. Olchowy, J.V. Sengers, J.T.R. Watson, J.J. Millat, Phys. Chem. Ref. Data 19, 1990, p. 763.
6. NIST database, Thermophysical properties of fluid systems. available online, <http://webbook.nist.gov/chemistry/fluid/>
7. A. Padua, W.A. Wakeham, and J. Wilhelm, The viscosity of liquid carbon dioxide, International Journal of Thermophysics 15, 1994, p. 1.
8. A. Fenghour, W.A. Wakeham, V. Vesovic, The viscosity of carbon dioxide, J. Phys. Chem. Ref. Data 27, 1998, pp. 31-44.
9. P.S. Van der Gulik, M.E. Kharraz, The viscosity of liquid carbon dioxide, International Journal of Thermophysics 16, 1995, p. 1.
10. D.E. Diller, M.J. Bali, Shear viscosity coefficients of compressed gaseous and liquid carbon dioxide at temperatures between 220 and 320 K and at pressures to 30 MPa. International Journal of Thermophysics 6, 1985, pp. 619-629.
11. A. Michels, A. Botzen, W. Schuurman, Physica 23, 1957, p. 95.
12. S.A. Ulybin, W.I. Makarushkin, Proceedings of the 7th Symposium on Thermophysical Properties, edited by A. Cezairliyan (American Society of Mechanical Engineers, New York; 1977, p. 678.
13. B.B. Maini, S.L. Kokal, A novel transient pulse viscometer for fluid viscosities at high pressures and elevated temperatures, Review of Scientific Instruments 62, 1991, pp. 2742-2747.
14. F.M. White. Fluid mechanics, Second edition, McGraw Hill; 2001.
15. S.L. Kokal, B. Habibi, and B.B. Maini, Novel capillary pulse viscometer for non-Newtonian fluids, Review of Scientific Instruments 67, 1996, pp. 3149-3157.
16. S.E. Haaland, Simple and explicit formulas for the friction factor in turbulent pipe flow, J. Fluids Eng., 1983, pp. 89-90.