

비뉴턴 액체의 w/o 에멀션에서 이산화탄소의 흡수

손세곤, 최병식, 손인조, 박대원, 박상욱
부산대학교 응용화학공학부

Gas Absorption of Carbon Dioxide in non-Newtonian w/o emulsion

Se-Gon Sohn, Byoung-Sik Choi, In-Joe Sohn, Dae-Won Park and Sang-Wook Park
Department of Chemical Engineering, Pusan National University, Pusan 609-735, Korea

서론

기체흡수는 분리공정에 관한 대표적인 단위조작으로서, 가스의 정제, 유해성분의 제거 등에 사용되며, 특히 액체에 흡수된 기체가 액상에서 반응하는 화학흡수는 유용한 물질을 합성하는 수단으로 널리 이용되고 있다. 따라서 기체 흡수는 그 사용 범위가 넓을 뿐만 아니라 1910년경부터 시작하여 오래전부터 많은 연구가 진행되어 왔다.

근래에 와서 비뉴턴 액체 또는 슬러리에 기체흡수가 일어날 경우의 흡수 메카니즘에 대한 해석은 수용액 또는 뉴턴액체에서의 흡수메카니즘에 대한 기존의 모델과 상이한 결과를 나타내었다.

Randade와 Ulbrecht[1]는 기-액 접촉 교반조에서 수용액에 폴리머 첨가가 기-액 물질전달에 미치는 영향에 대하여 실험하였으며, 같은 농도에서 PAA가 CMC보다 더 부피 물질전달계수 (volumetric mass transfer coefficient, $k_L \cdot a$)에 영향이 많음을 밝혔고, 경험식을 제시하였다. Suh[2] 등은 기포탑에서 수용액상으로 sucrose, xanthan, polyacrylamide 및 xanthan과 polyacrylamide를 혼합하여 제조한 점탄성 액체를 사용하여 이들의 첨가가 기-액 물질전달에 미치는 영향을 점도, pseudoplasticity 및 점탄성도등을 사용하여 살펴 보았으며, 탄성도를 나타내는 Weissenberg수가 낮은 영역에서 $k_L \cdot a$ 에 영향을 미친다고 하였다.

전보[3]에서 polybutene (PB)와 polyisobutylene (PIB) 벤젠용액의 비뉴턴액체의 유변학적 특성이 CO₂의 흡수속도에 미치는 영향을 검토한바 있으며 본 연구에서는 연속상이 비뉴턴 액체, 분산상이 물로 형성된 w/o 에멀션에 CO₂의 흡수에 관한 현상을 해석하였다.

결과 및 고찰

전단응력(Shear stress), τ 와 1차 법선응력차이(normal stress difference), N_1 는 전단속도 (shear rate), $\dot{\gamma}$ 의 함수로 다음과 같이 나타낸다[2].

$$\tau = K\dot{\gamma}^n \quad (1)$$

$$N_1 = A\dot{\gamma}^b \quad (2)$$

여기서 n , K , b , A 는 비뉴턴 점탄성액체의 물성인자이다.

점탄성도를 나타내는 특성시간 (characteristic time, λ)은 τ , N_1 및 $\dot{\gamma}$ 의 함수이며 식 (3)로부터 정해진다.

$$\lambda = \frac{A}{K} \dot{\gamma}^{b-n-1} \quad (3)$$

유체의 탄성도를 나타내는 무차원 수인 데보라수 (Deborah number, De)는 λ 와 교반 속도와의 관계로부터 정의 되어지며[2] 식 (4)과 같다.

$$De = N\lambda \quad (4)$$

레오미터(ARES, Reometrics, U.S.A.)을 사용하여 PIB와 PB가 용해된 벤젠용액을 연속상, 물을 분산상으로 구성된 w/o에멀션의 $\dot{\gamma}$ 에 따른 τ , N_1 을 측정하고, 측정값을 사용하여 식 (1), (2)로부터 비뉴턴 점탄성액체의 물성인자 n , K , b , A 를 산출하였다.

w/o에멀션에서 연속상이 벤젠, PB 30%의 벤젠용액 및 PB 30 wt%, PIB 1 wt%의 벤젠용액 각각에 대해 $\dot{\gamma}$ 변화에 대해 측정한 N_1 을 Fig. 1 에 플롯하였다. Fig. 1에서 알 수 있는 바와 같이 PIB첨가의 에멀션만이 점탄성 액체임을 알 수 있다.

대표적으로 PB 20%, PIB의 농도를 파라미터로한 벤젠용액의 비뉴턴 점탄성액체의 물성인자, n , K , b , A 를 식(3)에 대입하여, λ 를 산출하고, Fig. 2에 $\dot{\gamma}$ 에 따른 λ 를 나타내었다. Fig. 2에서 알 수 있듯이 λ 는 $\dot{\gamma}$ 가 증가함에 따라 감소하였다. 또한 PIB 농도가 증가함에 따라 λ 가 증가한 것으로 보아 PIB의 첨가량이 증가함에 따라 탄성이 증가함을 알 수 있다.

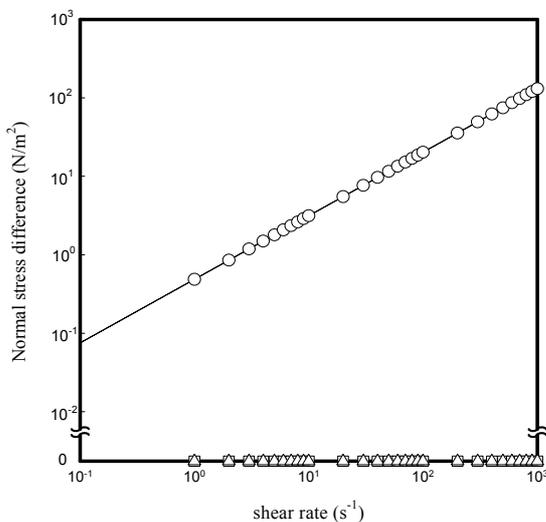


Fig. 1. Normal stress difference of H₂O/(PIB/PB/Bz) emulsion as a function of shear rate.
(Δ : Bz, \square : PB(30)/Bz, \circ : PIB(1)/PB(30)/Bz)

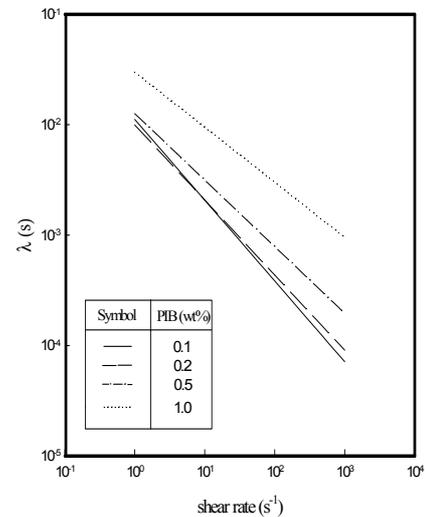


Fig. 2. Characteristic times of emulsion as a function of shear rate $\dot{\gamma}$ at 20wt%PB

탄성의 효과가 있는 PIB가 부피물질전달계수에 미치는 영향을 검토하기 위하여 임펠러의 크기와 교반속도를 파라미터로 하여 PB의 농도 30 wt%에서 PIB 농도변화에 대한 부피물질전달계수를 플롯하여 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3에서 알 수 있는 바와 같이 PIB의 농도가 증가함에 따라 k_{La} 는 감소하였으나 교반속도가 200과 300 rev/min인 경우 k_{La} 가 최대값을 나타내는 PIB의 농도가 존재하였으며, k_{La} 변화가 400 rev/min 만큼 크지 않았다.

비뉴턴 w/o에멀션에서 측정한 $k_L \cdot a$ 와 비뉴턴 액체의 물성과의 관계를 실험식으로 나타내기 위하여 무차원수인 Reynold수 (Re)와 Sherwood 수 (Sh)를 사용하였으며, 다음과 같이 정의된다.

$$\text{Sh} = k_{La} \frac{d^2}{D_L}, \quad \text{Re} = \frac{d^2 N \rho}{\eta}$$

여기서 d 는 기-액 접촉교반조의 직경, D_L 은 CO_2 의 비뉴턴 액체에서의 확산계수, N 은 교반속도, ρ 는 액체의 밀도, η 는 액체의 점도이다.

일반적으로 물질전달계수는 용액에서 용질의 확산계수, 용액의 점도, 밀도, 유체의 속도, 접촉방법(평판 또는 원통관에서 층류, 또는 난류, 고체입자 주위에서의 대류, 충전탑, 기포탑, 젖은 벽탑, 교반조)에 따라 영향을 받는다. 이러한 제반조건과 물질전달계수와의 상관관계를 다음과 같은 무차원군식으로 나타냈다[6].

$$\text{Sh} = a \text{Re}^b \text{Sc}^c \quad (5)$$

여기서 Sc 는 $\eta/\rho D_{AB}$ 로 정의된 무차원군이다. 이들 무차원군은 대수좌표에서 선형관계가 성립한다.

PIB의 농도 0~1 wt%, PB의 농도 20, 30 wt%, 임펠러의 크기 0.05, 0.07m, 교반속도 200~400rev/min의 실험조건에서 측정된 k_{La} 를 사용하여 무차원군, Sh 와 Re 를 산출하였으며, Re 변화에 대한 Sh 을 대수좌표에 플롯하여 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4에서 알 수 있는 바와같이 벤젠에서는 선형관계, 그 외의 용액의 에멀션에서는 비선형관계를 나타내었다. 이는 PB, PIB용액으로 구성된 에멀션이 뉴턴액체의 거동과 상이한 특징을 지녔기 때문인 것으로 사료된다.

Fig. 4의 Re 에 대한 Sh 의 플롯에서 플롯의 편차를 줄이기 위하여 비점도항(η_A/η)^m을 Sh 에 결부시켰다. 비점도의 지수, m 은 뉴턴액체의 Re 에 대한 Sh 의 플롯에서 플롯의 편차가 가장 작을 때의 값을 사용하였으며 상관관계계수, 0.967에서 m 은 -2.397이었다. Fig. 5에 Re 와 비점도항, (η_A/η_0)^{-2.397}으로 보정한 Sh 과의 상관관계를 플롯하여 나타내었다. Fig. 5에서 알 수 있듯이 비점도항으로 보정함으로써 뉴턴액체에서 Sh 와 Re 의 관계는 선형적으로 나타났다. 직선으로부터 구한 기울기와 절편값을 사용하여 다음과 같은 상관관계식을 구할 수 있었다.

$$\frac{k_{La} D^2}{D_L} = 6.348 \times 10^{-9} \left(\frac{D^2 N \rho}{\eta} \right)^{2.536} \left(\frac{\eta}{\eta_0} \right)^{2.397} \quad (6)$$

Fig. 5에서 알 수 있는 바와 같이 비뉴턴액체에서 플롯은 뉴턴액체의 플롯보다 작게 나타났다. 따라서 비뉴턴액체에서 Re 변화에 대한 $\text{Sh}(\eta_A/\eta_0)^{-2.397}$ 의 플롯을 뉴턴액체에서 비점도항을 보정한 Sh 와 Re 의 상관관계식을 비뉴턴액체에 적용할 수 없었다. 이는 PIB의 첨가로 점탄성을 나타내는 비뉴턴액체의 유변학적 특성의 하나인 탄성의 특성에 의하여 D_L 이 증가함으로써 Sh 가 작아진 것으로 판단된다.

점탄성 비뉴턴액체의 유변학적 특성을 나타내는 De 를 사용하여 비뉴턴액체의 거동을 뉴턴액체의 거동에 결부시켰다. Fig. 6의 비점도항이 결부된 Sh 에 $(1+m_1 \text{De})^{m_2}$ 항을 결부시켜 Re 변화에 대해서 플롯하여 플롯의 상관관계계수가 최소가 되는 m_1 과 m_2 을 구하였다. 상관관계계수가 0.961인 경우 m_1 은 2461.3, m_2 는 0.274이었다. 이들 m_1 과 m_2 을 사용하여 De 가 결부된 Sh 를 Re 변화에 대해 플롯하여 Fig. 6에 나타내었다.

Fig. 6에서 알 수 있듯이 De 를 보정함으로써 뉴턴액체와 비뉴턴액체 모두가 선형을 만족하였고, 이로부터 다음과 같은 상관관계식을 구하였다.

$$\frac{k_{La} D^2}{D_L} = 6.348 \times 10^{-9} \left(\frac{D^2 N \rho}{\eta_A} \right)^{2.563} \left(\frac{\eta_A}{\eta_0} \right)^{2.397} (1 + 2461.3 \text{De})^{-0.274} \quad (7)$$

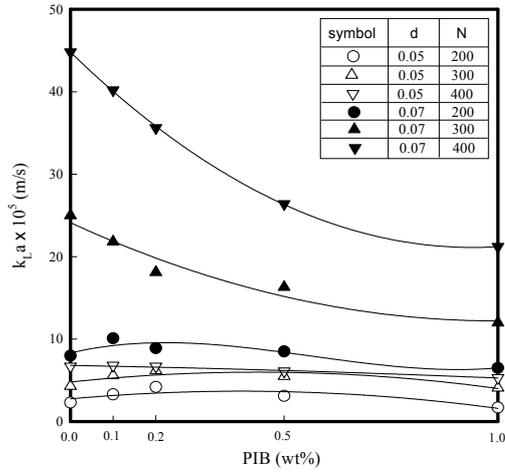


Fig. 3. Effect of PIB concentration on the volumetric mass transfer coefficient with impeller speed and size as parameters at PB of 30wt%.

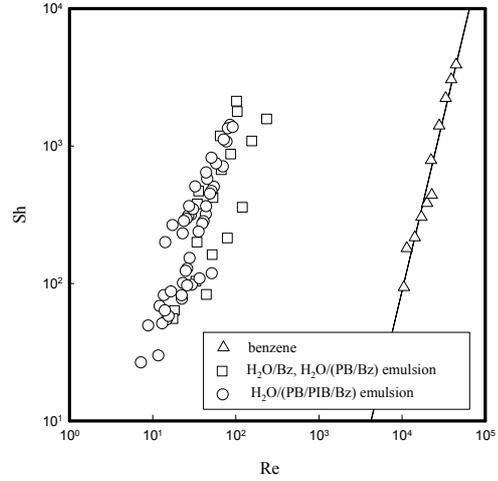


Fig. 4. Dimensionless correlation of volumetric mass transfer coefficient of CO₂ in Bz, H₂O/Bz, H₂O/PB-Bz and H₂O/(PIB/PB/Bz) emulsion.

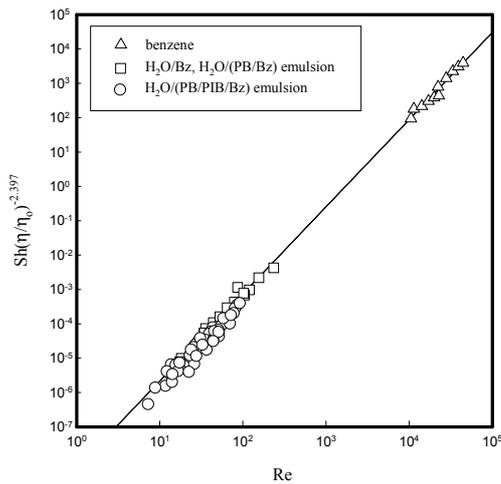


Fig. 5. Dimensionless correlation of volumetric mass transfer coefficient of CO₂ in Bz, H₂O/Bz, H₂O/(PB/Bz) and H₂O/(PIB/PB/Bz) emulsion with corrected specific viscosity.

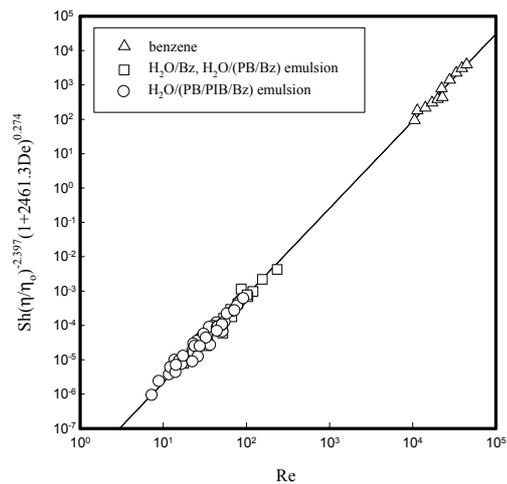


Fig. 6. Dimensionless correlation of volumetric mass transfer coefficient of CO₂ in Bz, H₂O/Bz, H₂O/(PB/Bz), H₂O/(PIB/PB/Bz) emulsion incorporating Deborah number.

3. 참고문헌

1. V. R. Ranade and J. J. Ulbrecht, *AIChE. J.* **24** (5), 796-803 (1978).
2. I.-S. Suh, A. Schumpe, W.-D. Deckwer and W.-M. Kulicke, *Can. J. Chem. Eng.*, **69**, 506-512 (1991).
3. 손세곤, 손인조, 박대원, 박상욱, “비뉴턴 액체에서 이산화탄소의 흡수. I. 점탄성액체의 영향”, 한국화학공학회, 춘계논문발표회, 화학공학의 이론과 응용, **8**(1), 613-616(2002).