

톨루엔의 점성도에 대한 압력 의존성

金正林

한양대학교 화학과

(1998. 12. 23 접수)

Pressure Dependence of the Viscosity of Toluene

Jeong Rim Kim

Department of Chemistry, Hanyang University, Ansan 425-791, Korea

(Received Decemebr 23, 1998)

요 약. 여러 온도와 압력에서 톨루엔의 점성도를 공낙하법에 의하여 결정하고 톨루엔의 점성도에 대한 온도 및 압력 의존성을 연구하였다. 톨루엔의 점성 흐름에 관한 엇갈림 변형력으로부터 엇갈림 자유 에너지, 엇갈림 엔트로피, 엇갈림 엔탈피 등을 정의하여 압력 변화에 따르는 열역학적 성질의 변화를 고찰하였다. 실험적으로 결정된 엇갈림 자유 에너지, 엇갈림 엔트로피, 엇갈림 엔탈피 등을 온도 상승에 의한 톨루엔 분자들의 열운동 효과와 압력 증가에 의한 밀도 증가 및 분자의 입체 효과에 의하여 설명하였다.

ABSTRACT. Viscosities of toluene were experimentally determined by the falling-ball method at several temperatures and pressures to investigate the pressure and temperature dependence of the viscosity of toluene. With the shear stress of the viscous flow of toluene, the shear free energy, the shear entropy, and the shear enthalpy were defined to discuss the variations of the shear thermodynamic properties with pressure. The effect of temperature and pressure on the shear thermodynamic properties obtained experimentally can be explained by means of the molecular thermal agitation due to temperature increasing and the steric effect of the closed molecules of toluene due to pressure elevation.

서 론

유체의 운동량 전달 현상은 구성 분자들의 특성과 환경에 의하여 결정되므로 여러 온도와 압력에서 특정 유체의 점성도를 측정하면 그 유체의 특성과 환경적 요인을 이해할 수 있고, 산업 공정에서 중요하게 응용될 수가 있다. 벤젠 유도체들은 산업적으로 매우 중요하게 취급되는 유체이며, 톨루엔은 벤젠과 더불어 가장 흔하게 용제로 사용되고 있다.

액체 톨루엔의 운동량 전달 현상은 톨루엔 분자들 사이의 상호작용의 정도를 반영하게 되므로 액체 상태의 톨루엔의 점성도를 연구하는 일은 응축상의 분자간 상호작용을 이해하는 데 도움이 된다. 액체의 점성도에 관한 연구는 산업적으로나 과학적으로 중요하기 때문에 여러 연구자들에 의하여 이론적 연구와 실험적 연구가 많이 이루어 졌다.¹⁻⁹ 그렇지만 높은 압력에서 점성도를 측정하는 실험은 위험하고 아

직 높은 압력에서 안전하게 실험할 수 있는 측정 장치의 다양하게 개발되지 못하고 있기 때문에 유체의 점성도에 대한 압력 의존성에 관한 연구는 매우 드물다.¹⁰⁻¹⁵ 본 연구에서는 톨루엔의 정상 끓는점(110.8°C)보다 훨씬 낮은 온도 범위내에서 온도와 압력을 변화시키면서 점성도를 결정하는 실험을 하였고, 점성 흐름의 엇갈림 변형력으로부터 엇갈림 자유 에너지 G_{VS} 와 엇갈림 엔트로피 S_{VS} 및 엇갈림 엔탈피 H_{VS} 를 정의하여 여러 압력에서 톨루엔의 점성 흐름에 대한 열역학적 성질을 고찰하였다.

실험

실험장치 및 시약. 톨루엔의 점성도는 부피가 일정한 실린더속에서 공낙하 시간을 측정하여 결정되었다.⁹ 실린더는 스테인레스 강철(S30400, 밀도(20°C) 7.9 kg/dm³, 탄성률(20°C) 2.00 × 10⁵ N/mm², 인

Table 1. Comparison of the densities (g/cm^3) of water obtained with the Pressure Apparatus with those calculated from ref.16

T ($^{\circ}\text{C}$)	this work at 1000 bar	ref.16 at 1000 kg/cm^2
50.0	-	1.0266
51.5	1.0274	-
94.0	1.0046	-
95.0	-	1.0016

장강도 500~700 N/mm^2 , 평균 열팽창 계수($20\text{--}100^{\circ}\text{C}$) $1.60 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$]을 재료로 써서 내경 2.5 cm, 높이 35.0 cm인 원통형으로 제작하였는데, 두껍을 닫고 밀폐시킨 다음 고압 장치에 연결하였을 때 톨루엔이 차지하는 부피는 175.2 cm^3 이었다. 실험한 모든 온도와 압력에서 실린더의 부피는 일정하다고 가정하여 증류수의 밀도를 측정된 결과를 문헌¹⁶의 자료로부터 계산된 값과 비교해 보면 Table 1과 같다. 본 실험에서의 측정값은 밀폐된 실린더속에 포함된 증류수의 양이 180 g과 176 g일 때 압력이 1000bar 될 때까지 가열하면 온도가 각각 51.5°C 와 94.0°C 를 가리키는 데 증류수의 부피가 175.2 cm^3 라고 가정하여 결정되었다. Table 1에서 측정된 증류수의 밀도값들은 문헌¹⁶의 자료로부터 계산된 값들과 일치한다고 생각되므로 본 실험의 온도와 압력 범위에서는 실린더의 부피가 일정하다고 하였다. 실린더에 들어있는 톨루엔속에서 낙하하는 알루미늄 공은 밀도가 2.698 g/cm^3 이고 지름이 1.0 cm인 것을 사용하였는데, 알루미늄 공이 낙하하는 거리는 30 cm이다. 실험에 사용한 톨루엔은 Merck제 G.R.급으로서 측정된 정상 끓는점은 110.6°C 이고 굴절률은 $n_D^{20}=1.4691$ 이었는데, 이 값들은 문헌값¹⁷과 일치하므로 정제하지 않고 사용하였다.

점성도 측정. 실린더를 압력 장치에 연결하여 톨루엔을 밀어 넣으면서 공기를 제거시킨 후 밸브를 잠근 다음 실린더를 압력 장치에서 분리시켜서 완전히 밀폐시킨다. 전기 저항에 의하여 온도를 서서히 올리면 톨루엔의 온도와 압력이 동시에 상승하게 되는데, 실험 온도와 압력을 확인한 다음 실린더를 거꾸로 회전시켰을 때 알루미늄 공이 낙하하여 스위치에 닿아서 전구에 불이 켜질 때까지의 시간을 측정함으로써 톨루엔의 점성도를 결정하였다. 본 실험에서 측정된 톨루엔의 점성도 값들 중에서 비교 가능한 것을 상대 점성도 값($\log(\eta_P/\eta_1)$)으로 환산하여 문

Table 2. Comparison of relative viscosities of toluene obtained at 30°C with the pressure apparatus with those available in the literature

Pressure	this work (bar)			ref.18 (kg/cm^2)		
	1	500	1000	1	500	1000
$\log(\eta_P/\eta_1)$	0.000	0.144	0.260	0.000	0.145	0.274

헌값¹⁸과 함께 Table 2에 나타내었다.

Table 2에서 보는 바와 같이 본 실험에서 측정된 상대 점성도의 값은 문헌값과 일치한다고 볼 수 있다.

점성 흐름에 대한 열역학적 성질

정상 상태의 유체속에서 일정한 표면적 A 를 갖는 물체가 운동할 때 점성 저항력에 관한 Newton의 법칙으로부터 다음과 같은 엇갈림 변형력을 정의할 수 있다.¹⁹

$$\frac{F}{A} = -\eta \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)_{T,P} \quad (1)$$

여기서 F 는 점성 저항력이고 v 는 물체의 운동 속도, x 는 유동에 의한 운동량 전달 거리, η 는 유체의 점성도이다. 유체의 점성력은 이러한 엇갈림 변형력과 반대 방향으로 작용되고 유체속에서 운동하는 물체에 대한 점성력의 작용에 의하여 유체가 행한 일은 유체의 점성 저항에 기인된 자유 에너지(G)의 변화에 해당한다. 그러므로 유체의 점성 저항만을 고려한다면 유체의 자유 에너지 변화를 다음과 같이 나타낼 수가 있다.

$$dG = VdP - SdT + \eta Adv \quad (2)$$

여기서 G , V , P , S , T 는 모두 일반적으로 쓰이는 열역학 성질들이다. 이에 따라 유체의 엇갈림 자유 에너지(shear free energy)를 다음과 같이 정의한다.

$$G_{VS} = \frac{1}{A} \left(\frac{\partial G}{\partial v} \right)_{T,P} = \eta \quad (3)$$

이와 마찬가지로 엇갈림 엔트로피(shear entropy)와 엇갈림 엔탈피(shear enthalpy)를 각각 다음과 같이 정의할 수가 있다.

$$S_{VS} = \frac{1}{A} \left(\frac{\partial S}{\partial v} \right)_{T,P} = - \left(\frac{\partial \eta}{\partial T} \right)_P \quad (4)$$

$$H_{VTS} = \frac{1}{A} \left(\frac{\partial H}{\partial v} \right)_{T,P} = \left[\frac{\partial(\eta/T)}{\partial(1/T)} \right]_P \quad (5)$$

일정한 압력에서 온도 변화에 따르는 점성도 변화를 측정함으로써 점성 흐름에 대한 열역학적 성질을 고찰할 수가 있다.

결과 및 고찰

특정 온도와 압력으로 유지되고 있는 톨루엔속에서 알루미늄 공(지름 1.0 cm, 밀도 2.698 g/cm³)이 일정한 거리(30 cm)를 낙하하는 시간을 측정하여 결정된 점성도 η 는 바로 식(3)으로 정의한 엇갈림 자유 에너지 G_{VTS} 와 같고, 본 연구에서는 점성도의 단위로써 cp 를 쓰고 있는데, η 와 G_{VTS} 사이의 물리적 관계는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} 1cp &= 10^{-2} \text{ poise} = 10^{-2} \times 10^{-1} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \\ &= 10^{-3} (\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}) \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s} = 10^{-3} \text{ J} \cdot (\text{m}^3)^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \end{aligned} \quad (6)$$

식 (3)의 정의에 따라 엇갈림 자유 에너지 G_{VTS} 는 단위 면적당 속도 변화에 대한 자유 에너지 변화를 의미하는 것이고 점성도와 같은 차원을 갖는 물리적 양이다.

본 연구에서 결정된 톨루엔의 점성도 자료를 Table 3에 종합하였다. 일정한 압력하에서는 온도 상승에 따라 점성도가 감소하고 있는데, 이러한 사실은 높은 온도에서 액체의 밀도가 감소하고, 구성 분자들 사이의 상호작용이 약화되어 분자들 사이에 운동량 전달이 불리해 진 결과이다. 그리고 밀도가 작아진 톨루엔속에서는 운동하는 알루미늄 공의 속도

를 변화시키기가 수월해 지기 때문에 운동을 하는데 다른 자유 에너지 변화(G_{VTS}) 양은 작아 지는 현상을 나타낸 것이라고 생각된다. 이와는 반대로 일정 온도에서는 압력이 증가함에 따라 톨루엔의 밀도는 증가하게 되어 그속에서 운동하는 알루미늄 공의 속도를 변화시키는 데에는 더 많은 일을 필요로 하게 되므로 엇갈림 자유 에너지는 증가하게 된다. Table 3에서 보여 주는 사실은 톨루엔의 밀도가 감소할 경우에 분자들 사이의 충돌 빈도가 줄어들기 때문에 충돌에 의한 운동량 전달이 불리해 지며 톨루엔의 밀도가 증가하면 그 반대로 분자간 충돌에 의한 운동량 전달이 유리해 진다는 것을 암시해 주고 있는데, 액체속에서 분자들 사이의 충돌 빈도에 영향을 미치는 요인은 분자의 운동 속도보다 분자간 상호작용이 더 우세하다는 사실을 반영한 것이다. 일정한 온도에서 압력의 증가에 따른 톨루엔의 점성도 변화를 Fig. 1에 나타내었다.

압력 변화에 의한 점성도의 변화 모습을 자세히 분석해 보면 온도가 낮을 때와 높을 때 약간 차이가 있다. 온도가 낮을 때에는 낮은 압력 범위에서 압력에 따라 점성도가 크게 증가하나 높은 압력 범위에서는 증가율이 둔화되고, 반면에 온도가 높을 때에는 1~300 bar의 범위와 800 bar 이상의 압력 범위에서 압력 증가에 따른 점성도 증가율이 작고 400~800 bar의 범위에서 증가율이 크다. 온도가 낮을 경우에는 압력의 증가가 톨루엔의 밀도 증가에 크게 기여하게 되므로 분자간 상호작용이 크게 강화되어 운동량 전달이 압력 변화에 예민해 지는 반면 온도가 높을 경우에는 분자의 증가된 열운동으로 인하

Table 3. Viscosities (cp) of toluene at several temperatures and pressures

Pressure (bar)	Temperature (°C)					
	20	30	40	50	60	70
1	0.5980	0.5307	0.4800	0.4240	0.3884	0.3490
100	0.6362	0.5543	0.4920	0.4392	0.3965	0.3625
200	0.6864	0.5916	0.5197	0.4631	0.4220	0.3862
300	0.7388	0.6341	0.5557	0.4953	0.4498	0.4121
400	0.7923	0.6805	0.5965	0.5318	0.4834	0.4412
500	0.8458	0.7309	0.6401	0.5707	0.5186	0.4751
600	0.9044	0.7833	0.6903	0.6146	0.5555	0.5101
700	0.9656	0.8381	0.7399	0.6594	0.5960	0.5434
800	1.0144	0.8885	0.7860	0.7042	0.6342	0.5728
900	1.0500	0.9316	0.8298	0.7401	0.6653	0.6056
1000	1.0853	0.9651	0.8634	0.7697	0.6932	0.6270

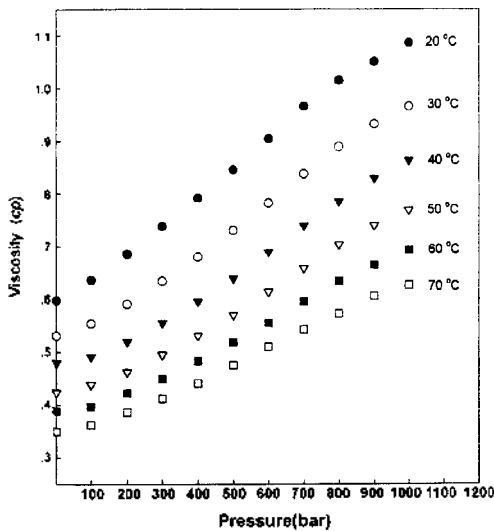


Fig. 1. Viscosity isotherms of toluene with pressure.

여 약간의 압력 증가는 톨루엔의 밀도를 크게 증가시키지 못하므로 분자간 상호작용의 변화가 현저하게 나타나지 못한다. 그리고 온도가 상승하는 것은 분자들의 열운동 상태가 활발해지는 요인이고, 압력이 증가하는 것은 분자들 사이의 간격을 좁혀서 열운동을 억제하는 요인이므로 온도와 압력이 동시에 증가할 경우는 서로 상반되는 요인들이 증가하면서 더 우세한 요인에 의하여 결정적인 영향을 받게 될 것이다. 따라서 50~70°C의 온도 범위와 400~800 bar 범위의 압력에서는 분자들의 열운동 효과보다 분자간 상호작용의 효과가 더 크다는 사실을 알 수가 있다. 한편 1000 bar 부근의 높은 압력에서는 서로 가까워진 분자들 사이의 반발 효과 때문에

분자간 충돌의 기회가 예상하는 것보다 적어 진다는 사실을 나타내고 있다. 액체속에서는 분자들 사이의 충돌 빈도가 주로 분자간 상호작용에 의하여 영향을 받기 때문에 온도가 상승함에 따라 분자간 상호작용이 약화되어 엇갈림 자유 에너지(점성도)가 감소하게 되므로 식 (4)의 정의에 따라 엇갈림 엔트로피는 양의 값을 갖는다. 여러 온도와 압력에서 톨루엔의 점성도 자료로부터 얻어진 엇갈림 엔트로피 S_{VIS} 를 Table 4에 종합하였다. 일정한 압력하에서는 온도가 상승함에 따라 엇갈림 엔트로피가 감소하였다. 높은 온도에서는 톨루엔의 밀도가 감소하고 분자들의 배열 상태가 더욱 다양해져서 엔트로피가 증가된 상태에 있게 된다. 그러한 상태에 있는 톨루엔속에서 운동하는 물체로부터 전달된 운동량은 이미 무질서해진 분자들의 배열 상태를 효과적으로 변화시키지 못할 것이다. 식 (4)의 정의에 따르면 일정한 표면적을 가진 알루미늄 공이 높은 온도의 톨루엔 분자들에 의해서 운동량을 상실할 때 그것에 기인된 톨루엔의 엔트로피 변화가 작기 때문에 온도가 상승함에 따라 엇갈림 엔트로피가 감소한다고 생각할 수 있다. 일정한 온도에서 압력이 증가할 때 톨루엔의 엇갈림 엔트로피 변화를 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2에서 압력 증가에 따른 톨루엔의 엇갈림 엔트로피 변화는 20~30°C, 40~50°C, 60~70°C의 3가지 유형으로 구분할 수가 있다. 낮은 온도(20°C)에서는 낮은 압력 범위에서 압력 증가에 의한 톨루엔의 엇갈림 엔트로피 증가가 큰 반면에 높은 압력(600 bar 이상) 범위에서는 이미 가까워진 분자들 사이의 입체 효과 때문에 운동하는 물체

Table 4. Shear entropies ($\mu\text{p}\cdot\text{K}^{-1}$) of toluene at several temperatures and pressures

Pressure (bar)	Temperature (°C)					
	20	30	40	50	60	70
1	70.53	60.95	52.26	45.00	38.80	33.58
100	89.29	71.72	57.06	46.58	38.45	32.20
200	105.9	81.63	62.07	48.97	39.18	31.95
300	119.6	90.46	67.25	52.13	40.99	32.89
400	130.0	97.98	72.54	56.03	43.88	35.06
500	136.5	103.9	77.79	60.58	47.82	38.49
600	139.1	108.1	82.81	65.65	52.71	43.09
700	138.1	110.4	87.35	70.95	58.26	48.56
800	134.9	111.4	91.21	76.04	63.89	54.27
900	131.7	111.8	94.28	80.33	68.74	59.22
1000	131.6	113.1	96.60	83.08	71.65	62.09

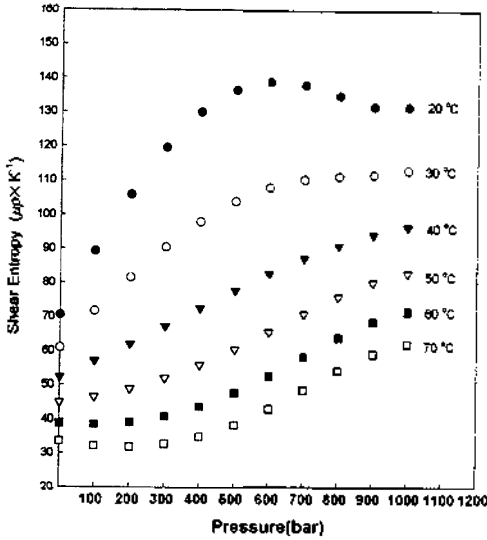


Fig. 2. Shear entropy isotherms of toluene with pressure.

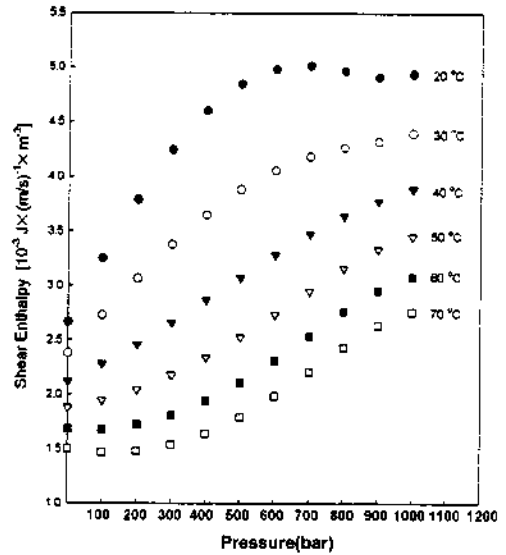


Fig. 3. Shear enthalpy isotherms of toluene with pressure.

의 운동량 전달에 기인된 엔트로피 변화가 작아져서 엇갈림 엔트로피가 감소한다. 온도가 더 상승하면(40°C) 높은 압력 범위에서도 톨루엔 분자들의 활발한 열운동에 의하여 분자의 입체 효과가 상쇄될 것이다. 그러나 더 높은 온도(70°C)에서는 낮은 압력 범위에서 압력이 약간 증가하더라도 톨루엔 분자들의 높은 열운동 상태를 효과적으로 억제하지 못하고 오히려 분자들 사이의 반발 효과가 더 증가하므로 엇갈림 엔트로피는 약간 감소하는데, 분자의 열운동 상태를 억제시킬 수 있을 정도의 높은 압력에서는 압력 증가에 따라 엇갈림 엔트로피가 증가하게 되고 압력이 더욱 높아지면 분자들이 훨씬

더 가까워져서 다시 입체 효과가 나타나게 된다. 본 연구에서 메틸기에 의한 톨루엔 분자들 사이의 입체 효과는 20°C에서는 500 bar 이상, 70°C에서는 1000 bar 이상의 압력 범위에서 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 정상 상태의 액체는 그 속에서 운동하는 물체에 점성 저항력을 미칠 때 일을 함으로써 엔트로피 변화는 물론 엔탈피 변화를 수반한다. 식 (5)에 의하여 정의된 톨루엔의 엇갈림 엔탈피 자료를 Table 5에 종합하였다. 압력이 일정할 때 톨루엔의 엇갈림 엔탈피는 온도 상승에 따라 감소하고 있는데, 이러한 현상은 Table 4의 엇갈림 엔트로피

Table 5. Shear enthalpies [$10^{-3} \text{ J} \cdot (\text{m/s})^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$] of toluene at several temperatures and pressures

Pressure (bar)	Temperature (°C)					
	20	30	40	50	60	70
1	2.666	2.378	2.117	1.878	1.681	1.501
100	3.254	2.728	2.279	1.945	1.677	1.467
200	3.790	3.066	2.463	2.046	1.727	1.483
300	4.246	3.377	2.662	2.180	1.815	1.541
400	4.603	3.651	2.868	2.342	1.945	1.644
500	4.848	3.881	3.076	2.529	2.112	1.796
600	4.982	4.059	3.283	2.736	2.312	1.989
700	5.015	4.185	3.475	2.952	2.537	2.210
800	4.970	4.265	3.642	3.161	2.763	2.435
900	4.912	4.322	3.782	3.336	2.955	2.638
1000	4.943	4.395	3.888	3.455	3.080	2.758

의 양상과 일치한다. 압력과 부피가 일정한 계의 엔탈피 변화는 바로 내부 에너지의 변화와 같고 온도가 상승하면 계의 엔탈피도 증가할 것이다. 그러므로 Table 5의 결과는 높은 온도에서 엔탈피가 이미 증가된 상태에 있는 톨루엔은 점성 저항에 기인된 엔탈피 변화가 작다는 사실을 암시하고 있다. 그리고 낮은 온도 영역에서의 엇갈림 엔탈피 감소는 높은 온도 영역에서보다 크고, 특히 400~600 bar의 압력하에서는 온도 상승에 따른 엇갈림 엔탈피 감소가 다른 압력에서보다도 현저하게 크다는 것을 알 수 있다. 온도가 일정할 때의 압력 증가에 따른 톨루엔의 엇갈림 엔탈피 변화 모습을 Fig. 3에 나타내었다. 낮은 온도 영역에서는 압력 증가에 따라 엇갈림 엔탈피가 비교적 크게 증가하지만 500 bar 이상으로 압력이 증가하면 엇갈림 엔탈피 증가가 현저하게 둔화되며, 높은 온도 영역에서는 압력 증가에 따른 엇갈림 엔탈피 증가가 크지 않다는 것을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 엇갈림 엔트로피의 변화 양상과 비슷한데, 이러한 사실은 압력 증가에 따르는 엇갈림 자유 에너지 변화 양상(Fig. 1)을 반영한 것이다. 결국 톨루엔의 엇갈림 엔탈피도 엇갈림 엔트로피에 대하여 고찰한 바와 같이 분자의 열운동과 입체 효과에 의하여 조절되는 분자간 상호작용 현상을 그대로 반영한다는 것을 알 수 있다. 유체의 점성 흐름에 대하여 열역학적 성질을 조사하는 연구는 아직 많지 않으나 이러한 연구가 지속적으로 이루어 진다면 유체의 분자간 상호작용 현상을 이해하는 데 기여할 수 있는 또 하나의 분야가 개척될 수 있을 것으로 기대한다.

본 연구는 1997년도 한양대학교 학술연구비의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드린다.

인용문헌

1. Archibald, E. H.; Ure, W. *J. Chem. Soc.* **1927**, 610.
2. Jobling, A.; Lawrence, A. S. C. *Proc. Roy. Soc. (London)* **1951**, A206, 257.
3. Brush, S. G. *Chem. Rev.* **1962**, 62, 513.
4. Miller, A. A. *J. Phys. Chem.* **1963**, 67, 1031.
5. Barlow, A. J.; Lamb, J.; Matheson, A. J. *Proc. Roy. Soc. (London)*, **1966**, A292, 322.
6. Kim, W. S.; Chair, T. S.; Pak, H. S. *Bull. Korean Chem Soc.* **1988**, 9, 213.
7. Kim, W. S.; Chair, T. S.; Pak, H. S. *Bull. Korean Chem Soc.* **1989**, 10, 372.
8. Chair, T. S.; Kim, W. S.; Pak, H. S.; Jhon, M. S. *Korean J. of Chem. Eng.* **1989**, 6, 121.
9. Kim, J. R.; Kyong, J. B.; Lew, M. H. *J. Korean Chem. Soc.* **1993**, 37, 1003.
10. Bridgman, P. W. *Proc. Nat. Acad. Sci.* **1925**, 11, 608.
11. Bridgman, P. W. *Proc. Am. Acad. Arts Sci.* **1926**, 61, 101.
12. Bridgman, P. W.; Conant, J. B. *Proc. Nat. Acad. Sci.* **1929**, 15, 680.
13. Bridgman, P. W. *J. Appl. Phys.* **1946**, 17, 225.
14. Griest, E. M.; Webb, W.; Schiessler, R. W. *J. Chem. Phys.* **1958**, 29, 711.
15. Lowitz, D. A.; Spencer, J. W.; Webb, W.; Schiessler, R. W. *J. Chem. Phys.* **1959**, 30, 73.
16. Bridgman, P. W. *Collected Experimental Papers*; Harvard Univ. Press: U. S. A., 1964; Vol. IV, pp 89-2465.
17. *CRC Handbook of Chemistry and Physics*; 76th Ed; Lide, D. R. Editor-in Chief; CRC Press: 1995-1996.
18. Bridgman, P. W. *Collected Experimental Papers*; Harvard Univ. Press: U. S. A., 1964; Vol. IV, pp 65-2067.
19. Brodkey, R. S.; Hershey, H. C. *Transport Phenomena*; McGraw-Hill Book Co.: Singapore, 1988; p 23.