진동장에서의 비뉴턴유체 유동의 특성

최성호 † · 신세현*

Characteristic of the non-Newtonian fluid flows with vibration

Sungho Choi, Sehyun Shin

Key Words : Non-Newtonian fluids(비뉴턴유체), Vibration(진동), Shear-thinning(전단담화성), Flow Resistance(유동저항)

Abstract

The present study investigated the effect of the transversal vibration on the flow characteristics for non-Newtonian fluids. The effect was tested by experiment and numerical analysis. For Newtonian fluids, both of experiment and numerical analysis results showed that mechanical vibration did not affect the flow rate. For non-Newtonian fluids, however, there was significant disagreement between experiment and numerical results. The numerical results showed a negligibly small effect of vibration on the flow rate whereas experimental results showed a significant flow rate increase associated with transversal vibration. The results implied that the increased flow rate was caused not only by imposed shear rates at the wall but also by the changes of rheological characteristics due to the transversal vibration.

기호설명

D : 모세관 튜브의 직경
L : 모세관 튜브의 길이
P : 압력
Q : 체적유량
V : 체적
v : 속도
t : 시간
$\dot{\gamma}$: 전단변형률
τ : 전단응력

† 경북대학교 대학원 기계공학과
E-mail : angelbelt@hanmail.net
TEL : (053) 954-5035 FAX : (053) 956-9914
* 회원, 경북대학교 기계공학과

1. 서론

비뉴턴성 유체의 응용이 화학공정 뿐만 아니라, 복합재, 페인트산업 등의 전통 산업 뿐만 아니라 유기 EL 등을 이용한 Display 제조공정에까지 널리 확대되어 이에 관한 연구의 필요성이 더욱 증대되고 있다. 특히, 생체 유체에 대한 관심과 더불어 비뉴턴성 유체의 유변학적 특성에 관한 기초연구에 대한 중요성은 더욱 강조되고 있다.[1]

최근에 비뉴턴성 유체의 점도에 관계되는 흥미로운 연구가 보고되었다. 물과 같은 뉴턴성 유체(Newtonian fluid)의 유동은 진동의 영향을 받지 않으나 전단담화(shear thinning)유체의 경우 유동방향으로 종진동(longitudinal vibration)을 가하면 유량이 증대됨이 Deshpande 등[2]에 의해 보고되었다. 사실, 이 연구보고서 이전에 유동방향으로 종진동과 비뉴턴 유체의 유동과의 관계에 대한 많은 연구 보고가 있었다.[3,4] 이러한 연구들은 유동방향으로 종진동을 가하면 비뉴턴성 유체의 유량이 증대됨을 보여준다. 또한 Seo 등[5]은 혈구 응집현상이 나타나지 않는 bovine blood 를 실험유체로 하여 기계적

진동장에서 혈액의 점도가 감소함을 보고한 바 있다.

전단담화성(shear-thinning) 유체의 경우 유동방향으로 종진동을 가할 경우 유량이 증대되는 원리 또는 메커니즘에 대해서는 아직 명확히 밝혀진 바 없지만, 최근 Deshpande 등[(2)]의 연구에 의하면 진동에 의해 벽 근처의 증가된 전단(extra shear)과 관련하여 전단담화성 유체의 점도가 감소된 것에 기인한 것으로 분석하였다. 그러나, 이 연구는 종진동에만 적용되며 본 연구에서 연구하고자 하는 횡진동의 경우에는 그러한 해석을 적용하기 어려울 것으로 예측된다. 특히, 진동상태에서의 유변학적 특성에 관한 이해는 여전히 부족한 실정이다.

따라서 본 연구의 목적은 유동방향에 횡진동(transversal vibration)을 가했을 때 전단담화성 유체의 유동 특성을 조사하고 관련된 유변학적 특성의 변화를 비교하여 횡진동의 영향을 실험 및 수치해석을 이용하여 고찰하고자 한다.

2. 실험장치 및 실험방법

본 연구는 Shin 등[7]이 개발한 Pressure-scanning capillary viscometer(PSCV)에 가진기를 부착하여 고분자 Carbopol 수용액(l,000ppm)에 유동방향에 기계적 횡진동(transversal vibration)을 가해서 전단담화성 유체의 유동 및 유변학적 특성을 살펴보았다. Fig. 1 은 vacuum chamber, capillary tube, precision pressure transducer, 진동 발생부 그리고 컴퓨터 데이터 획득 장치로 구성된 PSCV 의 개략도이다. Vacuum chamber 의 초기 부피는 $4.363 \times 10^4 mm^3$, 모세관의 내경은 $\phi_c = 1.06mm$ 이고 모세관의 길이는 $L_c = 1.06mm$ 이다. 모세관의 내경과 길이는 시스템의 모세관 외의 부분손실보다 모세관의 마찰손실을 현저히 크게 하기 위해 설정한 값이다. $P(t)$ 를 측정하기 위해 $0.25 Pa$ 의 분해능을 가진 정밀 차압계(Validyne DP15TL)를 사용하였다. 측정된 압력은 A/D 데이터 처리 장치(NI DAS-16)을 통해 컴퓨터의 데이터 파일로 저장된다. 가진기는 function generator 를 통해 일정주파수를 발생시키고 이를 amplifier 를 통해 원하는 출력으로 증폭시켜 스피커를 통해 진동을 발생하게 하였다. 이때 모세관과 스피커를 서로 결합시켜 스피커에서 발생한 진동이 모세관에서도 동일하게 진동하게 하였다.

실험 이전에 대기압(P_A)과 vacuum chamber 의 전체 부피 (V_0)는 이미 알려져 있다. 상세한 실험 과정은 다음과 같다. 주사기의 피스톤을 조작하여

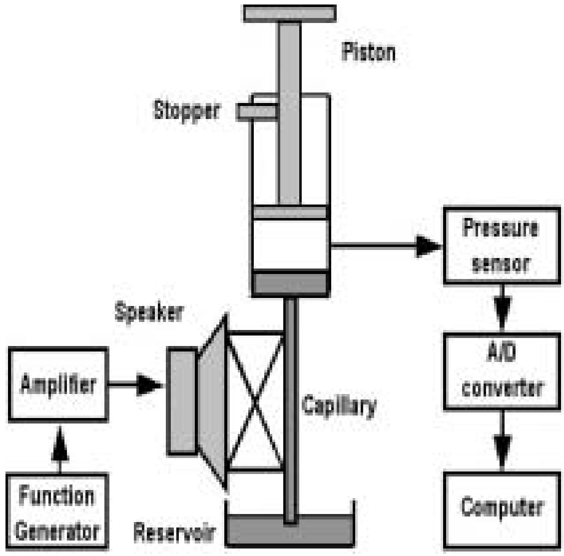

Fig. 1 Schematic of experimental apparatus

vacuum chamber 와 대기압과의 차압이 P_i = 8.6kPa 되도록 피스톤을 당긴다. 압력차가 일정차압이 되면 주사기의 피스톤을 stopper 로 고정시킨다. 시간이 t =0 에서, 데이터 획득 시스템을 준비시키고 vacuum chamber 와 모세관 사이의 밸브를 열어준다. 그러면 차압에 의해 유체가 모세관을 통해 vacuum chamber 로 이동하게 된다. 압력차가 일정 압력에 이르게 되면 더 이상 유체는 유동하지 않는다.

유량을 얻기 위한 자세한 설명은 기존 연구에서 찾을 수 있다.[(6)] 간략히 설명하자면 다음과 같다. 시간 t 의 vacuum chamber 의 압력 $P(t)$ 와 부피 $V(t)$ 는 $P_i V_i = P(t)V(t)$ 로 일정하다. 여기에서 하첨자 i 는 실험의 초기 상태를 표현한 것이고, $P(t)$ 는 단위시간마다 측정된 압력을 컴퓨터 파일에 저장한 값이다. Vacuum chamber 에 채워진 혈액의 부피는 $v(t) = V_i - V(t)$ 로 계산되어지고 시간 t 에 따른 유량은 다음으로 얻는다.

$$Q(t) = \frac{dv(t)}{dt} = -\frac{dV(t)}{dt} = -\frac{d}{dt}\left(\frac{P_i V_i}{P(t)}\right) \qquad (1)$$

실험유체로 뉴턴성 유체는 증류수를 사용하였고, 비뉴턴 유체로는 Carbopol 1000wppm 수용액을 사용하였다.

3. 수치 해석

본 연구의 수치적 해석은 모세관을 통해 흐르는 유동방향에 횡진동(transversal vibration)을 가해주어 해석하였다. 모세관 튜브 내 유동은 층류, 비압축성, 등온조건으로 가정하였다. 연속방정식을 지배방정식으로 하였다.(7)

$$\nabla v = 0 \tag{2}$$

여기서 v 는 유체속도이고, 운동방정식은 아래와 같다.

$$\rho \frac{Dv}{\partial t} = -\nabla p + [\nabla \eta \dot{\gamma}] + \rho g \tag{3}$$

여기서 p 는 유체의 압력, t 는 시간, η 는 겉보기 점도함수, ρ 는 유체의 밀도, g 는 중력가속도이다. 비뉴턴 유체(non-Newtonian fluid)에 대한 겉보기 점도함수는 아래의 power-law 함수를 사용 하였다.

$$\eta = K \cdot \dot{\gamma}^{n-1} \tag{4}$$

여기서 K 값은 the flow consistency index 이고 n 값은 flow behavior index 이다.

모세관을 통해 흐르는 유동에 가해지는 정현파 횡진동(sinusoidal transversal vibration)의 형태는 아래와 같다.

$$x = A\sin(\omega t) \tag{5}$$

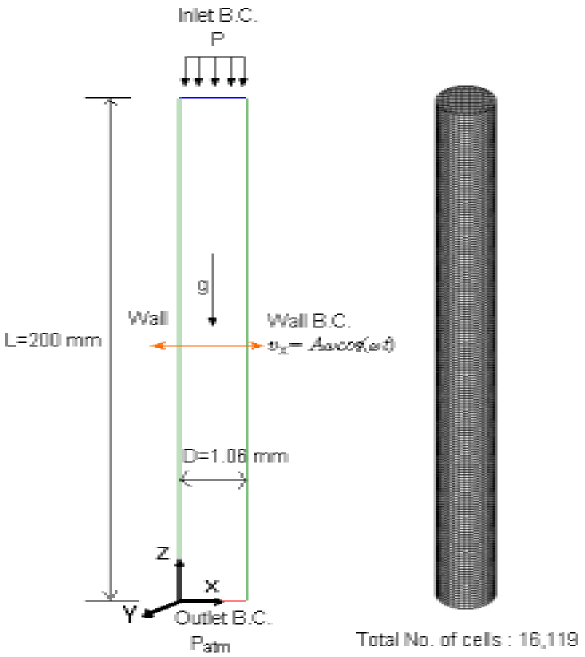

Fig. 2 Schematic of a numerical model

여기서 $\omega = 2\pi f$ 는 진동의 각 진동수(angular frequency)이다. 따라서, 벽에서의 경계조건은 아래와 같다.

$$v_x = A\omega\cos(\omega t)\,,\ \ v_y = 0\,,\ \ v_z = 0 \tag{6}$$

정상 (steady) 유동과 비정상(unsteady) 유동 모두 벽에서 점착조건(no-slip condition)을 적용하였다.

Fig. 2 는 본 연구 모델의 경계조건 및 3 차원 격자(grid) 형상을 보여준다. 주목할 점은 유동방향에 횡진동(transversal vibration) 상태에서는 축 대칭(axisymmetric)이 아니라는 점이다.

본 연구의 수치적 해석은 SIMPLE-C algorithm 에 기반을 둔 상용 소프트웨어인 CFD-ACE (CFD Research Corporation)를 이용하여 해석하였다.

진동상태에서의 모세관 튜브 내에서의 유동을 2 가지 단계에 따라서 해석하였다. 먼저 진동을 가하지 않은 정상유동(steady flow)을 해석하였고, 수렴된 정상상태의 속도장(velocity field)을 진동을 가하는 비정상유동(unsteady flow) 해석의 초기조건으로 사용하였다. 이러한 과정은 벽 경계조건에서보다 부드러운 과도(smooth transition)와 수치적 과정에서의 수렴을 확실히 하기 위함이었다. 비정상유동의 해석은 $\omega t = \pi/2$ 에서 $\omega t = 6\pi$ 까지의 구간을 등간격으로 200 등분하여 cosine wave 형태로 모세관 튜브(capillary tube)를 통해 흐르는 유동의 유동방향에 횡 진동(transversal vibration)을 주어 해석하였다. Fig. 3 은 수치결과로부터 얻은 정현파 모양의 유량과 벽에서의 유체 속도를 보여준다.

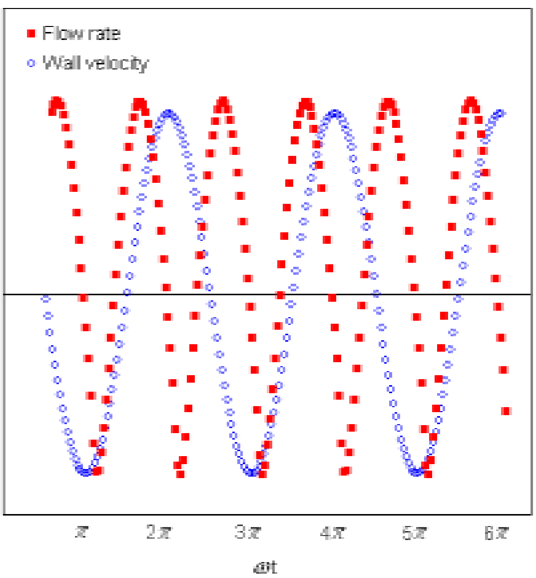

Fig. 3 Transients flow rate and fluid velocity at the wall

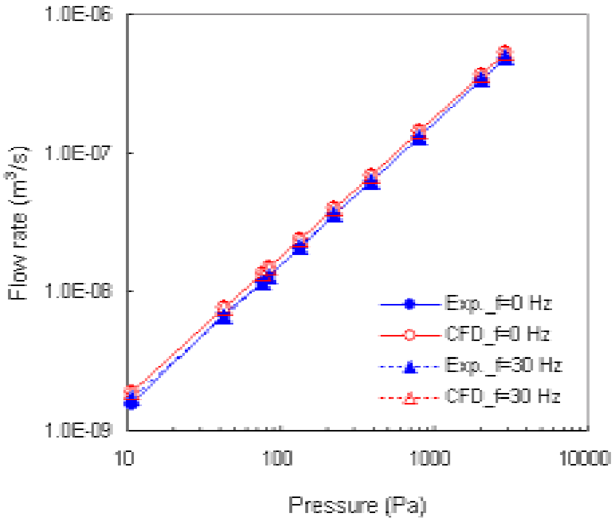

Fig. 4 Flow rate vs. pressure for water

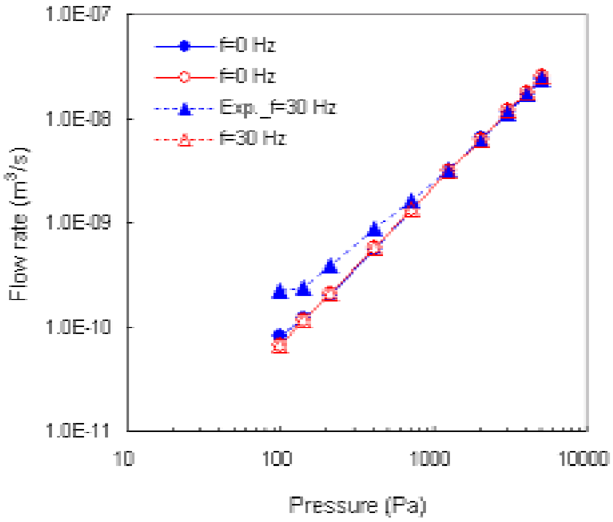

Fig. 5 Effect of vibration frequency on flow rate between Experiment and numerical analysis

4. 실험 및 수치 해석 결과

Fig. 4 는 PSCV 에서 측정한 물의 유량을 나타낸다. 닫힌 원 심벌(solid circle symbols)과 열린 원 심벌(open circle symbols)은 비진동(*f*=0 *Hz*) 상태에서의 실험 결과들과 수치적 결과들을 각각 나타낸다. 닫힌 삼각 심벌(Solid triangle symbols)과 열린 삼각 심벌(open triangle symbols)은 진동(*f* =30 *Hz*) 상태에서의 실험 결과들과 수치적 결과들을 각각 나타낸다. 실험과 수치적 해석 결과 모두는 진동의 유무에 상관없이 유량이 거의 변하지 않음 을 보여준다. 이러한 결과는 뉴턴 유체의 점도는 진동에 독립적이라는 선행 연구들[2,3]과 잘 일치한다.

Fig. 5 는 비뉴턴성 유체인 Carbopol 수용액 유동에 횡진동을 가한 경우의 실험과 수치적 해석 결과의 비교를 보여준다. 닫힌 원 심벌(solid circle symbols)과 열린 원 심벌(open circle symbols)은 비진동(*f* =0 *Hz*) 상태에서의 실험 결과들과 수치적 결과들을 각각 나타낸다. 닫힌 삼각 심벌(Solid triangle symbols)과 열린 삼각 심벌(open triangle symbols)은 진동(*f* =30 *Hz*) 상태에서의 실험 결과들과 수치적 결과들을 각각 나타낸다. 높은 압력 영역에서는 수치적 결과들이 실험 결과들과 잘 일치 한다. 그러나 낮은 압력 영역에서는 실험과 수치해석 결과가 잘 일치 하지 않음을 알 수 있다. 즉, 실험의 경우 낮은 압력 범위에서는 이에 따른 유량이 작은 경우인데 진동의 영향으로 유량이 진동이 없는 경우에 비하여 상당히 증가한 결과인 반면, 수치해석 결과에는 진동이 유량에 미치는

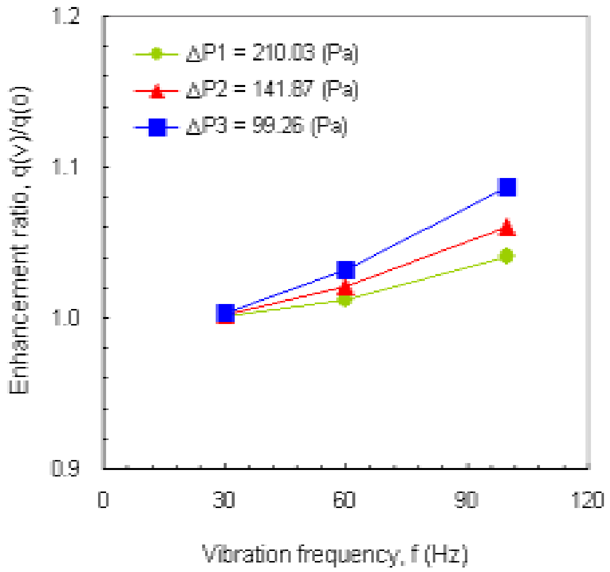

Fig. 6 Effect of vibration frequency on flow enhancement ratio

영향이 log-log 그래프에서는 거의 나타나지 않았다. 이는 수치해석에서 고려할 수 있는 영향, 즉 진동으로 인해 새로이 발생되는 extra-shear 의 영향만으로는 실험 결과와는 상당한 차이가 있다는 것을 보여주는 것이다. 다시 말해서, 실험으로부터 얻은 유량 증가는 진동으로 인해 발생된 extra-shear 영향이 주요인이 아니라는 점이다.

그러나, log-log 그래프형태의 Fig. 5 에서는 진동이 유량에 미치는 영향이 잘 나타나있지 않지만,

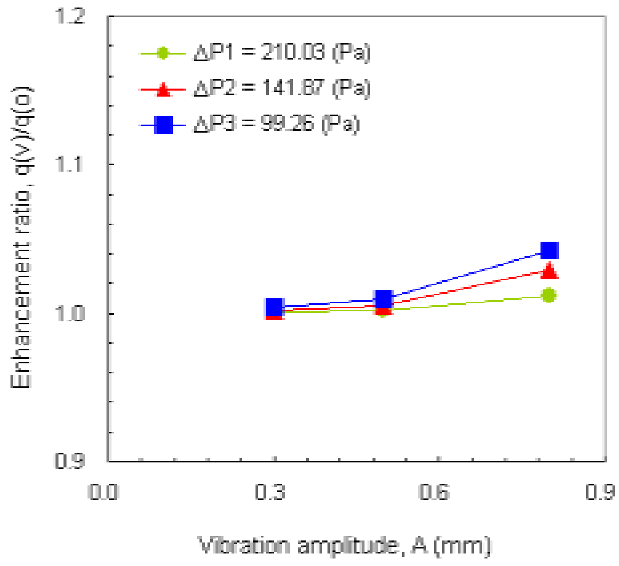

Fig. 7 Effect of vibration amplitude on flow enhancement ratio

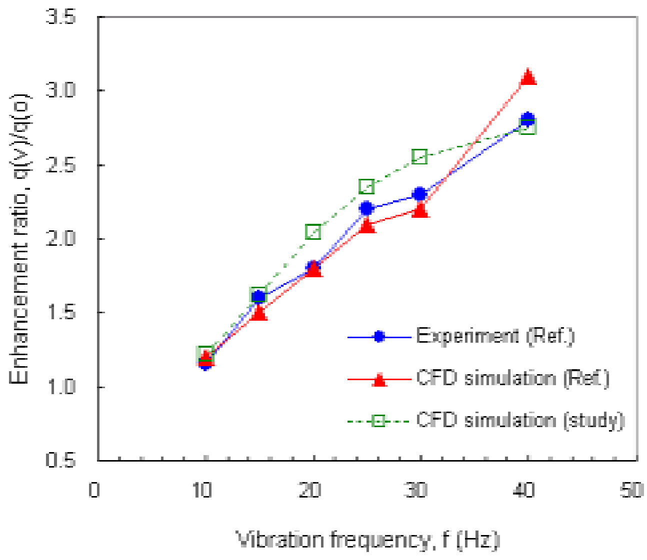

Fig. 8 Effect of longitudinal vibration frequency on flow enhancement ratio: 0.70 wt% CMC solution

이를 일반 그래프로 나타내면 양상은 달리 나타난다. 이를 위해 Fig. 6 에서는 서로 다른 3 개의 압력조건에서 진동 주파수의 변화에 따른 유량 증가율에 대한 수치 해석 결과를 도시하였다. 이 그림에서는 주파수가 증가 함에 따라 유량이 최대 10 % 정도 증가하는 현상이 나타났다. 유량 증가율은 낮은 압력 조건일수록 크게 나타난다. 이와 같이 진동에 따른 유량 증가의 수치 해석 결과는 Desphande[2] 가 제안한 extra-shear 의 영향에 기인한 것이다.

마찬가지로 Fig. 7 에서는 서로 다른 3 개의 압력조건에서 진폭 (amplitude)의 변화가 유량에 미치는 영향에 대한 수치 해석 결과를 보여준다. 진폭변위가 증가 함에 따라 유량이 최대 10 % 정도 증가하는 현상이 나타났다. 또한, 유량 증가율은 낮은 압력 조건일수록 크게 나타난다. 진폭변위가 변할 때 가진 주파수는 f =30 Hz 로 일정하게 유지하였다.

위에서 얻은 결과들을 분석해보면, 여러 가지의 압력 조건에서 가진 주파수와 진폭의 증가에 따라 실험적으로는 매우 큰 유량증가를 얻었지만, 수치해석적으로는 최대 10% 증가만을 관찰할 수 있었다. 이는 앞서 언급한 바와 같이, 횡진동의 영향에 따른 유동 방향의 extra-shear 가 크게 발생하지 않았기 때문인 것으로 분석된다. 그래서, 본 연구에서는 추가로 종진동의 경우에 대하여 몇 가지 수치 해석을 하여 이를 기존의 실험 결과[2]와 비교하였다.

Fig. 8 은 유동방향에 종진동 조건에서의 수치해석 결과가 기존의 실험 및 수치해석 결과[2]와 잘 일치함을 보여주고 있다. 이 결과를 횡진동의 경우와 비교 분석하기 위하여 벽에서의 전단(shear)의 변화를 조사하였다. Fig. 9 는 본 연구 모델에 유동방향에 종진동과 횡진동 상태에서 벽에서의 평균 전단률(mean wall shear rate)을 보여준다. 종진동은 벽 근처에서 진동으로 인해 상당한 전단률 증가를 일으키는 것에 반해, 횡진동은 상대적으로 증가율이 매우 작다는 것을 알 수 있다.

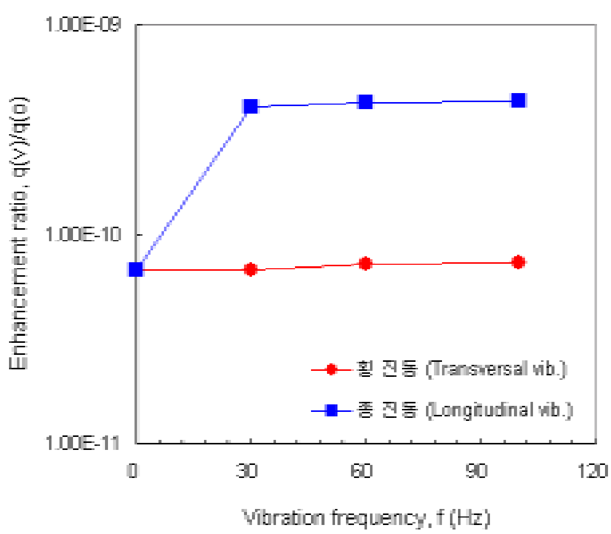

Fig. 9 Mean wall shear rate of the transversal and longitudinal vibrations

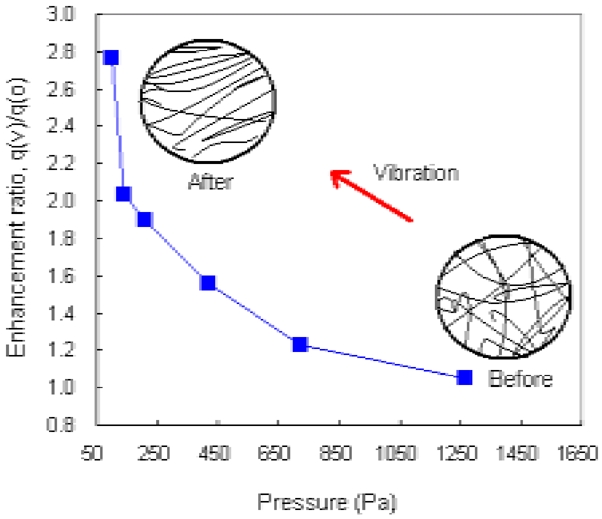

Fig. 10 Experimental flow rate versus driving pressure with conceptual sketch of shear-thinning polymer solution structure

위 두 그림으로부터 종진동의 경우에는 extra-shear 가 유량 증가의 주요인으로 작용하였음을 확인할 수 있는 반면, 횡진동의 경우에는 진동으로 인한 extra-shear 가 매우 미미하며 이로 인한 유량 증가의 폭은 매우 작다는 것을 알 수 있었다. 따라서, 실험에서는 횡진동의 경우에도 유량 증가가 낮은 압력에서는 크게 나타난 점을 감안해보면, 이는 수치해석이 실제 유동 특성을 잘 나타내지 못하고 있다는 점을 발견하게 된다. 따라서, Shin 과 Lee[8]가 제안한 바와 같이, 진동의 의하여 전단담화성 고분자 수용액에 유변학적 특성 변화에 대한 접근이 필요할 것으로 보인다.

Fig. 10 은 유동방향에 진폭변위 0.3 mm, 가진 주파수 f =30 Hz 의 횡진동 상태에서의 구동 압력에 따른 유량 증가비를 나타내는 실험 결과를 전단담화성 유체의 유변학적 구조적 변화를 개념적으로 나타내 보았다. 즉, 전단담화성 고분자 수용액 유동에 횡진동을 가해주면 polymer chain 들의 엉켜있던 구조가 진동의 영향에 의해 일렬로 배열하게 되면서 점도가 작아 지게 되어 유량 증가를 일으킨 것으로 보는 것이다. 이는 현재까지의 연구에서 실험과 수치해석의 차이로부터 얻어진 결과를 토대로 추정하는 것에 불과하지만 개념적으로 충분히 가능하며 이에 따른 추후 연구가 필요한 것으로 보인다.

5. 결론

본 연구에서는 전단담화 유체의 유동방향에 횡진동을 가했을 때 가진 주파수와 진폭변위의 증가가 유량을 증대시키고 압력이 낮아지면 유량 증가비가 증대됨을 알았다. 또한, 전단담화 유체의 유동에 진동을 가할 경우, 횡진동은 종진동과는 달리 벽에서 전단률의 높은 증가는 유발하지 않고, 유변학적 특성 변화에 기인한 유량 증가를 유도하는 것으로 조심스럽게 결론내릴 수 있다. 여기까지의 결과로 미루어 진동이 비뉴턴성 유체의 유변학적 특성에 미치는 영향에 관련된 더 많은 연구가 이루어져야 할 것으로 본다.

후기

본 연구는 한국학술진흥재단 (KRF-2002-002-D00032)의 지원으로 수행하였으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

(1) Johnson P.C., Bishop J.J., Popel S. and Intaglietta M., 1999, “Effects of red cell aggregation on the venous microcirculation,”

(2) Deshpande N.S. and Barigou M., 2001, **“**Vibrational flow of non-Newtonian fluids,” *Chem. Eng. Sci.* 56**,** 3845 .

(3) Goshawk J.A. and Walters K., 1994, “The effect of oscillation on the drainage of an elastico-viscous liquid,” *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* 54, 449.

(4) Phan-Thien N. and Dudek, J.,1982, **“**Pulsating flow revisited ,” *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* 11 521.

(5) Suh S., Yoo S., Kim D.I. and Lee B., 1998, “Effect of Physical Vibration in Blood Viscosity,” *J. Korean Vascular Surgery Society.* 14, 1.

(6) Shin S. and Ku Y. H., 2002, “Blood Viscosity Measurements Using a Pressure-Scanning Capillary Viscometer,” *Int. J. KSME*, in press.

(7) Bird. R.B., Amstrong R.C. and Hassager O., 1987, *Dynamics of Polymeric Liquids*, Vol.1, Wiley, New York.

(8) Shin S. and Lee J.H., 2003, “Characteristics of Shear-Thinning Fluid Viscosity under Traversal Vibration, Jap. J. Applied Physics, in press.