

論文

장섬유강화 고분자 복합판의 압축성형에 있어서 점성계수 측정

이희균* · 조선희** · 김이곤*

Measurement of Viscosity during Compression Molding of Continuous Fiber Reinforced Polymeric Composites

Hee-Kyun Lee*, Seon-Hyung Jo** and E-Gon Kim*

ABSTRACT

A method for measuring a viscosity is presented during compression molding of continuous fiber-reinforced polymeric composites. The composites is treated as a Non-Newtonian power-law fluid. The parallel-plate plastometer is used and the viscosity is obtained from the relationship between the compression load and the thickness of the specimen. The effects of fiber content on the viscosity are rigorously discussed.

초 록

장섬유강화 고분자 복합재료의 압축성형중 점도의 측정방법이 제안되었다. 복합재료는 지수 법칙에 따르는 비뉴턴 유체로 간주되고, 평행판 가소도계가 사용되었으며, 점도는 압축하중과 시험편의 두께의 관계로부터 얻어졌다. 또 이 점성계수에 미치는 섬유함유율의 영향도 검토되었다.

1. 서 론

장섬유강화 열가소성 고분자 복합재는 주로 고온 압축성형법을 이용하여 부품을 성형하므로 두께의 변화가 있는 성형을 할 수 있으며, 저압성형과 대형제품 및 복잡한 형상의 가공이 가능하다. 그러나 재료의 유동에 의해 모재인 플라스틱과 강화재인 섬유와의 유동속도 차이에 의한 분리 및 배향이 발생하여 성형품은 불균질해지고 방향성을 갖는 결점도 갖고 있다. 특히 강화재인 장섬유 매트는 섬유끼리의 엉킴력이 크기 때문에 성형품의 끝부분까지 섬유가 유동하기 어려워 결국 기계적 특성이나 물성 등에 나쁜 영향을 미치게 된다.

이러한 강화재의 구조를 갖는 복합재를 열간에서 압축성형하는 경우의 유동특성을 파악하기 위

해서는 여러가지 성형공정 인자들의 변화에 대한 금형내에서의 충전상태, 강화재인 섬유의 배향 및 섬유함유율 분포 등의 예측 및 제어가 필요하다. 또한 보다 실제적인 유동상태를 알기 위해서는 복합재의 점도측정이 불가결하며 각종 성형조건 및 복합재의 섬유함유율과 점도의 관계를 명확히 확립하는 것은 최적 성형조건의 결정이나 뛰어난 성형품을 얻기 위해서 매우 중요하다.

지금까지 섬유강화 플라스틱 복합판의 점도측정은 단섬유의 경우이거나[1~3], 원판의 압축에 의한 고분자 용액의 점도 측정법[4]이 제안되어 있으나 이 방법은 일정 하중에서의 시간변화에 따라 두께를 측정하여 점도를 구하기 때문에 측정범위는 전단속도가 느린 범위로 한정된다. 그러나 전단속도가 느리면 플라스틱과 섬유의 분리가 매우 크게

* 국민대학교 공과대학 기계공학부

** 대우공업전문대학 금형설계과

되어[5], [6]점도측정이 곤란하게 되며, 압출에 의한 점도측정인 경우에는 섬유가 파손되는 결점을 갖고 있기 때문에 단섬유인 경우에는 적합하나, 장섬유로 보강된 복합판의 점도측정에는 부적합하다.

한편 Whiting-Jacobsen은 열경화성 수지를 대상으로 두께와 압축하중의 측정으로부터 점도를 측정하는 평행판 플라스토미터(Parallel plastometer)를 제안한 바 있다[7]. 그러나 장섬유로 강화된 복합판에 대해서 압축형중의 점성계수를 측정하고, 점도에 미치는 섬유함유율의 영향을 고찰한 예는 아직 없으므로 본 연구에서는 Whiting-Jacobsen이 제안한 평행판 플라스토미터를 이용하여 장섬유강화 열가소성 복합재의 점도를 측정하고, 이 점도와 섬유함유율과의 관계에 대하여 고찰한 내용을 보고한다.

2. 이 론

재료를 Fig. 1과 같은 평행판 사이에 끼우고 하중 F_c 를 가해서 초기두께 h_0 에서 h 까지 압축할 때 다음과 같은 가정을 세운다.

재료는 [1] 지수법칙에 따르는 비뉴턴 유체이며 [2] 비압축성이다 [3] 물체력 및 관성력은 무시한다 [4] 평행판과 재료는 밀착해서 미끄러지지 않는다 [5] 시험편의 두께는 다른 치수에 비하여 얇기 때문에 1차원 문제로 취급한다. 이러한 가정하일 때 연속 방정식은

$$x W \dot{h} = 2 \int_0^{h/2} W v_x dt \quad (1)$$

여기에서 v_x 는 x 방향의 속도, $\dot{h} = \frac{dh}{dt}$ 로 압축속도이다. 그리고 운동량 방정식으로 부터

$$\frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial x} \quad (2)$$

재료가 n 승 지수법칙에 따르는 비뉴턴 유체로 가정하였으므로 전단응력은

$$\tau_{zx} = K \left(-\frac{\partial v_x}{\partial z} \right)^n \quad (3)$$

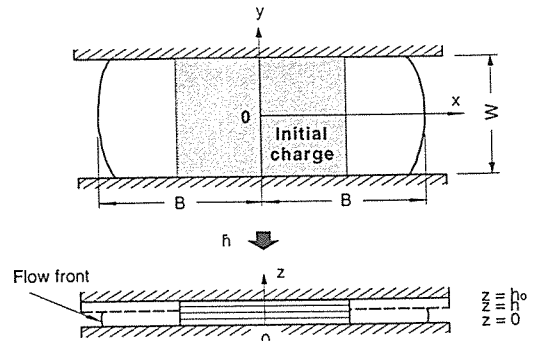


Fig. 1. Nomenclature for slab-shaped part press molding.

여기에서 K 는 구조점도이고, n_c ($1 > n_c > 0$)는 복합재의 구조점도지수이다.

식 (2)와 식 (3)으로 부터 속도 v_x 는

$$v_x = \frac{n_c \left(\frac{h}{2} \right)^{1+1/n_c}}{n_c + 1} \left(-\frac{1}{K} \frac{dp}{dx} \right)^{1/n_c} \left\{ 1 - \left(\frac{2z}{h} \right)^{1+1/n_c} \right\} \quad (4)$$

식 (1)과 식 (4)를 이용하여 압력 P 를 구하면 다음과 같이 된다.

$$P = \frac{\dot{h}^{n_c}}{h^{2n_c+1}} \left(\frac{2n_c+1}{n_c} \right)^{n_c} \frac{2^{n_c+1} K}{n_c+1} (B^{n_c+1} - x^{n_c+1}) + P_{atm} \quad (5)$$

식 (5)에서 P_{atm} 은 대기압이므로 이후 무시한다. 이 압력 P 로 부터 하중 F_c 를 구하고, 양변에 대수를 취하면

$$\log F_c = \log \left\{ \dot{h}^{n_c} \left(\frac{2n_c+1}{n_c} \right)^{n_c} \frac{K}{n_c+2} \left(\frac{1}{W} \right)^{n_c+1} V^{n_c+2} \right\} - 3(n_c+1) \log h \quad (6)$$

여기에서 W 는 폭, V 는 체적이다. 식 (6)에서 $\log F_c$

와 $\log h$ 를 그림으로 그리면 기울기 $3(n_c+1)$ 인 직선을 얻는다. 이 그림으로부터 구조점도 지수 n_c 가 구해지고 식 (6)으로부터 구조점도 K 를 구할 수 있다.

한편 점도 μ 는

$$\mu = K \cdot \dot{\gamma}^{n_c-1} \quad (7)$$

일 때 복합재의 두께가 얇고 초기두께 h_0 에서 h 까지의 두께변화가 크지 않기 때문에, 두께방향의 속도구배는 일정한 것으로 가정할 수 있으므로[7]

$$\dot{\gamma} = -\frac{2v_0}{h} \quad (8)$$

여기서 v_0 는 $z = 0$ 에 있어서의 v_x 이다. 식 (8)로부터 체적은 $V = 2WBh$ 이기 때문에

$$\frac{dB}{dh} = \frac{V}{2W} h^{-2} \quad (9)$$

평균속도 $\frac{v_0}{2}$ 는

$$\frac{v_0}{2} = \frac{dB}{dt} = \frac{dB}{dh} \frac{dh}{dt} = \frac{V}{2W} h^{-2} \dot{h} \quad (10)$$

식 (10)을 식 (8)에 대입하면 전단속도는

$$\dot{\gamma} = 2 \frac{V}{W} h^{-3} \dot{h} \quad (11)$$

그리고 식 (1), (2), (3)을 이용하여 모재인 플라스틱의 속도 v_m 을 구해서 모재의 평균속도 \bar{v}_m 를 구하면

$$\bar{v}_m = \int_0^{h/2} v_m = \frac{\dot{h}}{h} x \quad (12)$$

가 된다.

3. 실험

점도측정을 하기위한 시험편은 실험실에서 제작

한 것(모재 : 폴리프로필렌, 강화재 : 장섬유 유리매트, 섬유함유율 : 0wt%, 10wt%, 20wt%, 30wt%, 40wt%)으로 장섬유가 서로 강하게 엉켜져 있다. 복합판의 초기두께는 3.8mm이다. 이러한 복합판을 70mm(폭)×50mm(길이)의 직사각형으로 절단하여 시험편으로 하였다. 시험편을 가열용 전기로(온도 : 200℃)에서 약 20분간 가열하여 Fig. 1과 같은 캐비티를 갖는 금형에 충전하고 폭 방향은 구속을 하여, 길이방향으로만 유동이 되도록 성형하였다. 압축장치는 만능인장압축 시험기(일본 Shin-koh제, TOM/5000X형 만능인장압축시험기, 최대 Crosshead speed 최대1300mm/min)를 사용하였으며, 금형에는 히터와 열전대를 부착하여 소요온도(200℃)를 유지시켰다. 압축속도는 0.1, 1, 10, 100mm/min의 4종류로 하였으며 각각의 속도에 대하여 압축비를 변화시켜 압축성형 하였다. 압축 실험에 사용한 장치의 개략도를 Fig. 2에 나타내었다.

Fig. 2와 같이 X-Y레코더를 이용하여 각 성형조건에 따른 하중값을 구하였고, 압축된 성형품의 이형온도는 50℃이하로 하였다. 그리고 금형의 냉각 시간 동안 다이알 게이지를 장착하여 금형의 처짐을 측정한다 후 최종 성형품의 두께에 대하여 정확한 두께의 측정을 하였으며, 압축된 시험편의 두께는 성형품의 면적을 측정해서 체적일정 조건으로 부터 구하였다. Fig. 3에는 각각의 섬유함유율별로

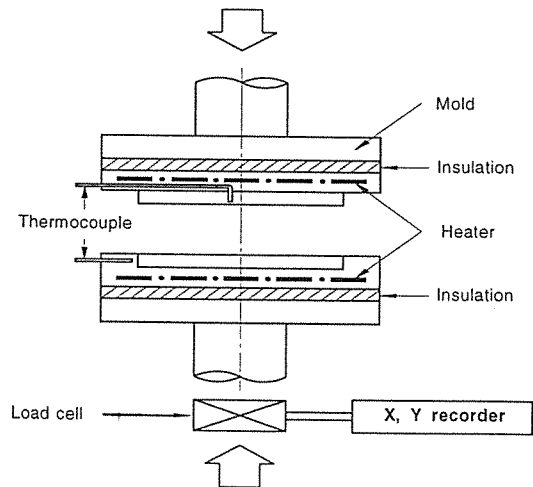
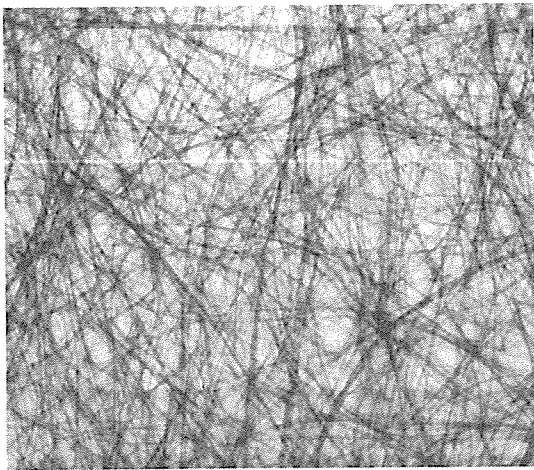


Fig. 2. Schematic diagram of the experimental apparatus.

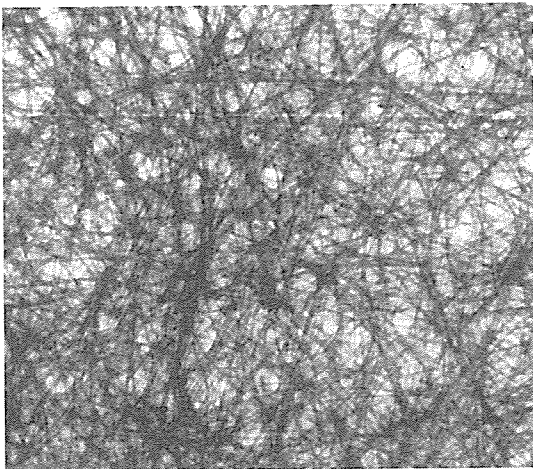
제작된 복합판(10wt%, 20wt%, 40%)의 연 X선 사진을 나타내었다.

4. 결과 및 고찰

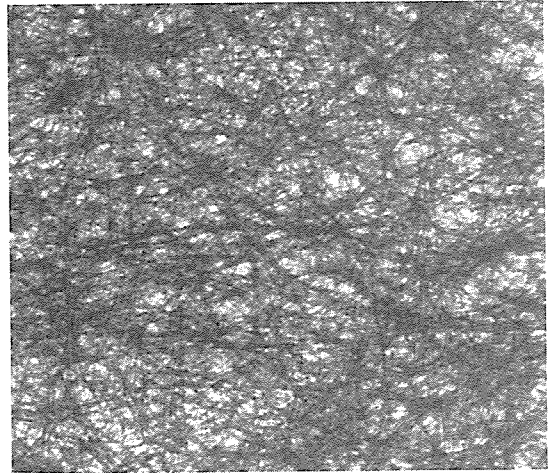
Fig. 4의 (a)~(e)는 복합재를 소정의 두께로 압축한 후 이때의 하중과 두께를 측정하고 대수를 취하여 성형품의 두께와 압축하중과를 섬유함유율별로 나타낸 그림이다. 이들 그림에서 동일한 섬유함유율인 경우 압축속도가 빠르면 대체적으로 압축



(a) 10wt%



(b) 20wt%



(c) 40wt%

Fig. 3. Continued.

하중은 증가하고 있으며, 섬유함유율이 증가할수록 복합재의 압축하중은 큰 값을 나타냄을 알 수 있다. 이러한 현상에 대한 압축속도의 영향을 살펴보면 압축속도가 빠를수록 복합재의 유동에 필요한 힘이 크기 때문이며, 복합재내의 고체상태인 섬유부분이 즉 섬유함유율이 많을수록 하중은 크게 나타난다. 이들 그림의 기울기로부터 복합재의 구조점도지수 n_c 를 구하였으며, 이 n_c 로부터 식 (6)을 이용하여 복합재의 구조점도 K 를 구하였다.

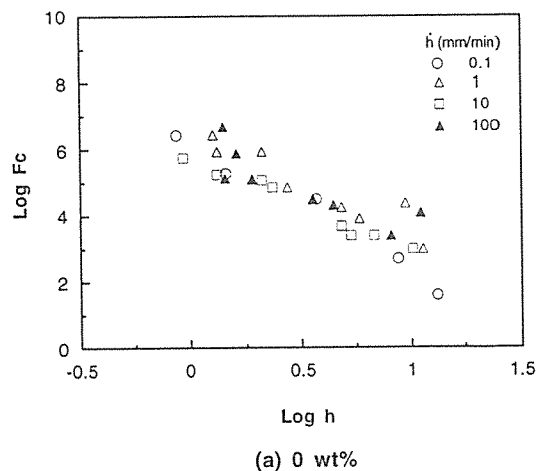
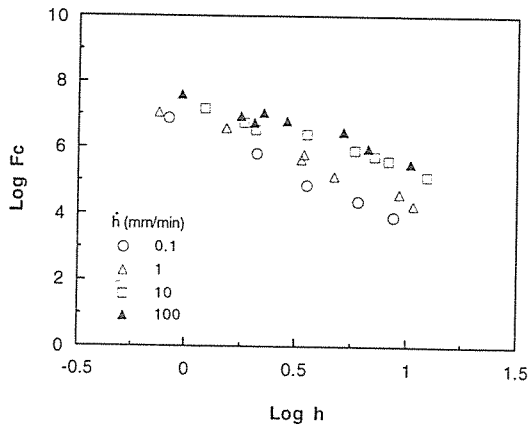
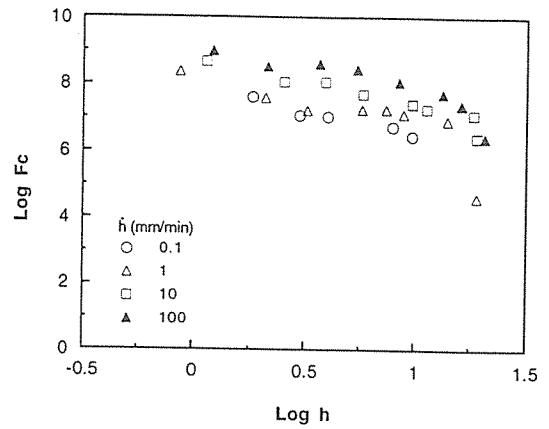


Fig. 4. Relationship between Log F_c and Log h .

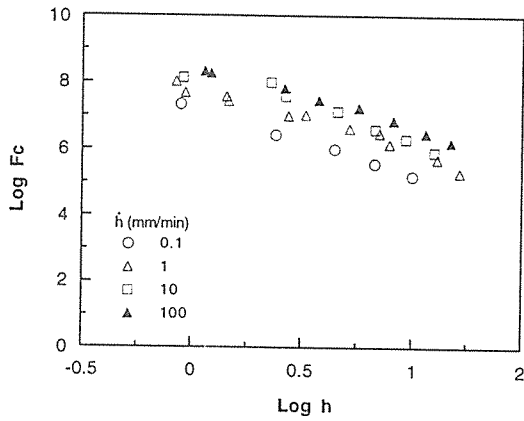
Fig. 3. Soft X-ray photographs of continuous fiber reinforced polymeric composites.



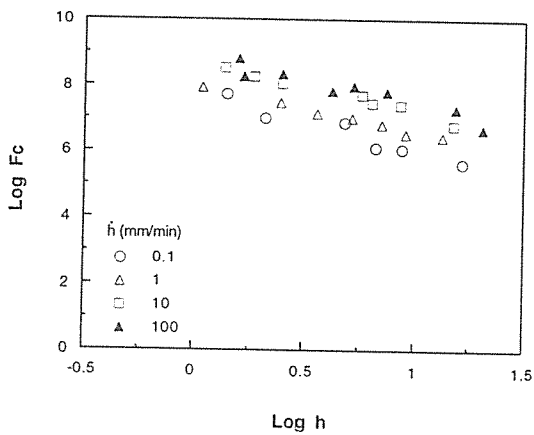
(b) 10wt%



(e) 40wt%



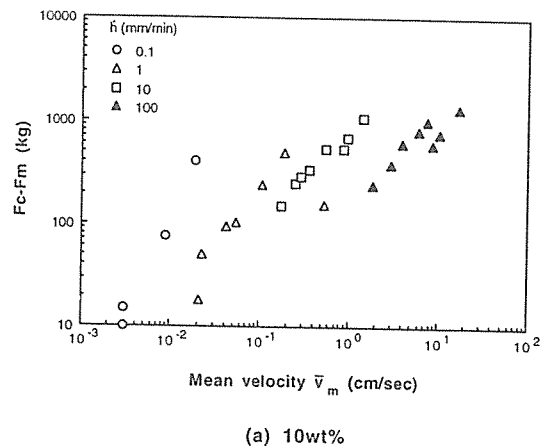
(c) 20wt%



(d) 30wt%

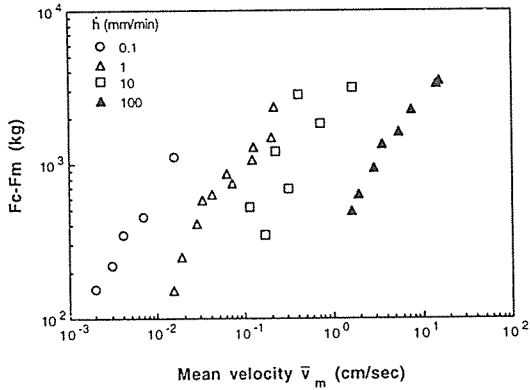
Fig. 4. Continued.

Fig. 5 (a)~(d)에는 성형품의 압축성형 하중에서 복합재내의 섬유만이 차지하는 하중(F_c - F_m)에 미치는 평균속도의 영향을 각각의 섬유함유율과 성형속도별로 나타낸 그림이다. 이 그림에서 성형중의 복합재료는 섬유와 용융수지와와의 합으로 볼 수 있으며, 이때 섬유는 수지내에 부유하고 있는 고체로 간주할 수 있다. 즉 복합재의 유동은 2상 유동으로 볼 수 있고 복합재의 점도는 용융수지의 점도와 섬유의 저항(점도)으로 나누어서 생각할 수 있으며

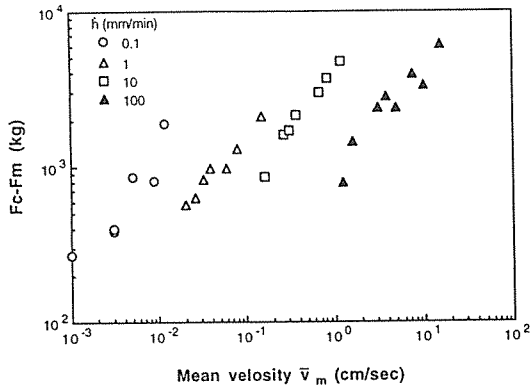


(a) 10wt%

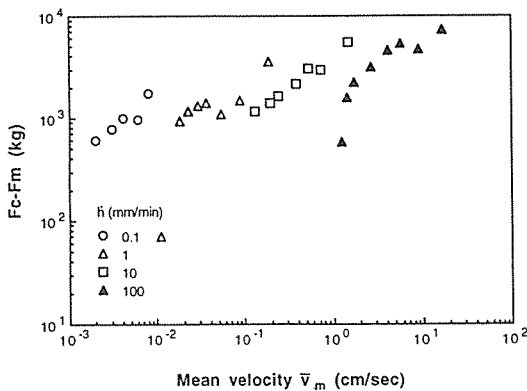
Fig. 5. Effect of mean velocity \bar{v}_m on F_c - F_m .



(b) 20wt%



(c) 30wt%

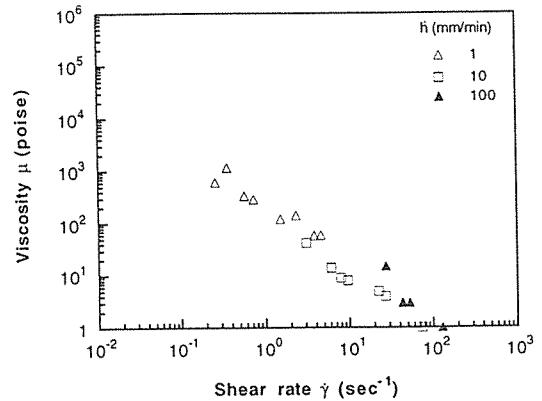


(d) 40wt%

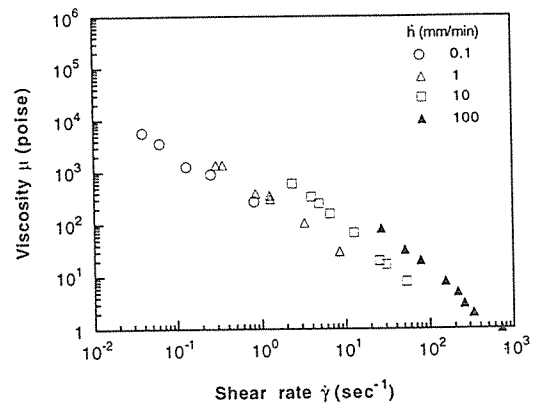
Fig. 5. Continued.

로[8], 동일 속도에서 섬유함유율이 많을 수록 이 하중은 증가함을 알 수 있다.

Fig. 6 (a)~(e)는 Fig. 4에서 구한 복합재의 구조 점도지수 n_c 를 이용, 식 (6), (7), (11)에서 구한 구조 점도 K , 전단속도 $\dot{\gamma}$ 를 사용하여 각각의 섬유함유율에 따른 복합재의 점도 μ 와 전단속도 $\dot{\gamma}$ 와의 관계를 나타낸 그림이다. Fig. 6 (a)~(e)에서 복합재의 점도 μ 는 섬유함유율과 압축속도의 영향을 동시에 받아 변화하고 있음을 알 수 있으며, 이러한 현상은 Fig. 4의 결과로부터 초래된다고 할 수 있다. 또한 이 그림들에서 압축속도별로 기울기가 다른 것은 플라스틱 복합재가 갖고 있는 점탄성효과가 원인이라고 생각하며, 섬유함유율이 동일한 복합

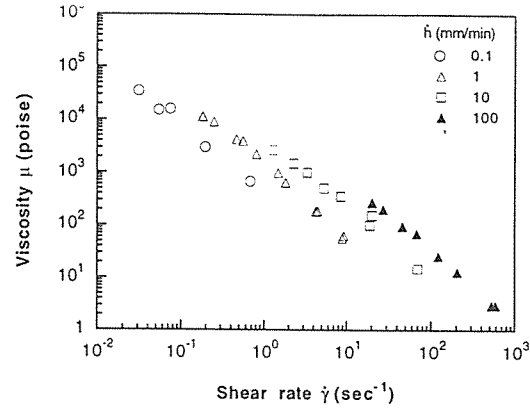


(a) 0wt%

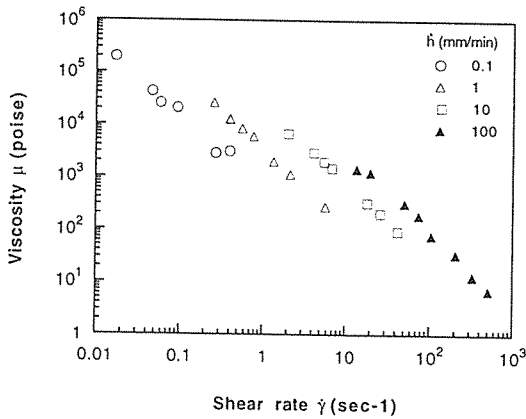


(b) 10wt%

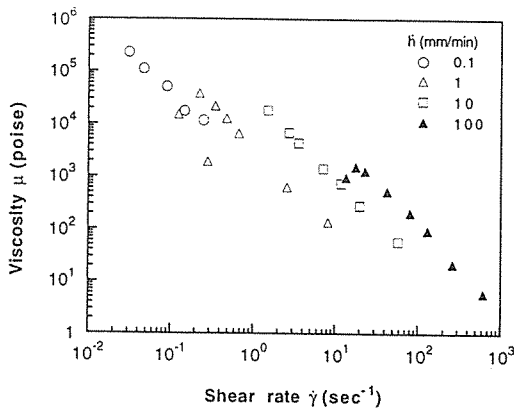
Fig. 6. Effect of shear rate $\dot{\gamma}$ on viscosity μ .



(c) 20wt%



(d) 30wt%



(e) 40wt%

Fig. 6. Continued.

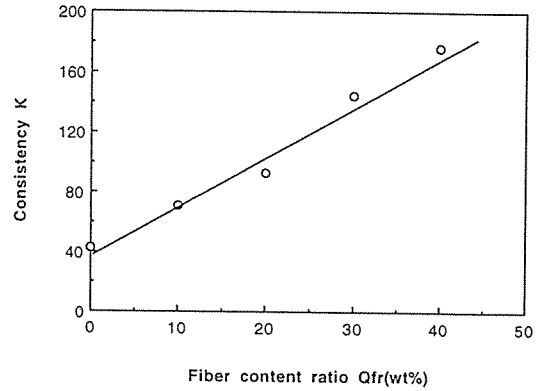


Fig. 7. Effect of fiber content ratio Qfr on consistency K.

재의 점도를 측정함에 있어서 압축속도별로 다른 기울기를 이용하여, 동일한 섬유함유율을 지니고 있는 복합재의 점도를 가름하는 것은, 복합재료가 지니고 있는 원래의 불균일성을 무시하는 결과를 초래할 수도 있기 때문에, 동일한 wt%인 경우의 복합재에 대해서 각각의 압축속도별로 측정된 점도 μ 와 전단속도 $\dot{\gamma}$ 와의 상호관계를 plotting하고 이 전체의 데이터를 일차원 fitting한 후 여기에서 계산된 구조점도지수 n_c 를 이용하여, 한 wt%에 대한 점도로 이용하였다.

Fig. 7은 복합재의 유동저항을 나타내는 유동저항계수인 구조점도지수 K에 미치는 섬유함유율의 영향을 나타낸 그림으로서 K의 계산에 있어서는, 동일한 섬유함유율인 경우는 점도와 전단속도와의 그림에서 그 기울기(n_c)를 동일하게 한 후 구조점도계수 K를 계산하였다. 이들 그림에서 섬유함유율이 증가할 수록 점도가 상승하므로 당연히 구조점도지수 K는 증가하고 있음을 알 수 있으며, 이것은 복합재내의 섬유함유율이 증가하면 그만큼 유동저항도 커지게 된다는 것을 정량적으로 알 수 있다.

5. 결 론

장섬유강화 고분자 복합판의 압축성형중의 점도를 의소성유체로 가정하여 각종 성형조건에서의 점도를 측정한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 장섬유강화 고분자 복합판의 압축성형에 있어서 동일한 섬유함유율인 경우 압축속도가 빠르면 압축하중은 증가하고 있으며, 섬유함유율이 증가할 수록 복합재의 압축하중은 큰 값을 나타내고 있음을 알 수 있다.
2. 장섬유강화 고분자 복합재내의 섬유함유율이 증가할 수록 점도가 상승하므로 구조점도지수 K가 증가한다.

후 기

본 연구는 정밀정형 및 금형가공 연구센터의 지원에 의하여 연구되었으며, 한국과학재단(KOSF)의 연구비 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 1) R. O. Maschmeyer and C. T. Hill, 1977, "Rheology of Concentrated Suspensions of Fibers in Tube Flow. II. An Exploratory study", *Trans. of the Society of Rheology*, 21-2, pp. 183~194.
- 2) Lech Czarnecki and J. L. White, 1980, "Shear Flow Rheological Properties, Fiber Damage, and Mastication Characteristic of Aramid-, Glass-, and Cellulose-Fiber-Reinforced Polystyrene Melts", *J. of Applied Polymer Science*, Vol. 25, pp.1217~1244.
- 3) R. J. Crowson and M. J. Folkes, 1980, "Rheology of Short Fiber-Reinforced Thermoplastics and its Application to Injection Molding", *Polymer Engineering and Science*, Vol. 20, No. 14, pp.934~940.
- 4) G. J. Dienes and H. F. Klemm, 1946, "Theory and Application of the Parallel Plate Plastometer", *J. of Applied Physics*, Vol. 17, pp. 458~471.
- 5) 北條英典, 金二坤, 玉川規一, 1984, "長纖維強化プラスチック複合板の押出加工 (第1報, プラスチックと強化材の分離に関する理論的考察)", 第35回日本塑性加工聯合講演會論文集, No. 331, pp. 433~436.
- 6) 北條英典, 金二坤, 玉川規一, 1984, "長纖維強化プラスチック複合板の押出加工 (第2報, プラスチックと強化材の分離に関する實驗)", 第35回日本塑性加工聯合講演會論文集, No. 332, pp.437~440.
- 7) R. Whiting and P. H. Jacobsen, 1979, "The Evaluation of Non-Newtonian Viscosity Using a Modified Parallel-Plate Plastometer", *J. of Material Science*, Vol. 14, pp.307~311.
- 8) Hojo, H., Kim, E. G., Yaguchi, H. and Onodera, T., 1988, "Simulation of Compression Molding with Matrix-Fiber Separation and Fiber Orientation for Long Fiber-Reinforced Thermoplastics", *Intern. Polymer Processing*, Vol. 3, pp.54~61.