

# 일방향 섬유강화 플라스틱 복합재의 점도에 미치는 성형인자의 영향

조선형\*, 안종윤\*\*, 윤성운\*\*

## Effect of Molding Parameters on Viscosity of Unidirectional Fiber Reinforced Plastic Composites

Seon-Hyung Jo\*, Jong-Youn Ann\*\*, Sung-Un Yoon\*\*

### Abstract

The Compression molding process is widely used in the automotive industry to produce parts that are large, thin, light-weight, strong and stiff. Compression molded parts are formed by squeezing a glass fiber reinforced polypropylene sheet, known as glass mat thermoplastic(GMT), between two heated cavity surfaces.

In this study, the anisotropic viscosity of the Unidirectional Fiber-Reinforced Plastic Composites is measured using the parallel plastometer and the composites is treated as an incompressible Newtonian fluid.

The effects of molding parameter and fiber contents ratio on longitudinal/transverse viscosity are also discussed.

**Key Words :** Unidirectional Fiber Reinforced Plastic Composites(일방향 섬유강화 플라스틱 복합재), Non Newtonian Fluid(비뉴턴 유체), Compression molding(압축성형), Viscosity(점도)

### 1. 서론

장섬유강화 고분자 복합재는 소재의 경량화 추세에 힘입어 용도의 확대가 날로 증가하고 있으며 이러한 소재 중에서 특정방향으로의 강도향상을 위해서 개발된 일방향 섬유강화 고분자 복합판은 고온 압축성형법을 이용하여 자동차의 범퍼비임 등의 구조재로서 사용되고 있으며, 이 소재가 지니고 있는 강도의 방향성이 요구되는 부품에 대한 용도의 확대가 기대되고 있다. 그러나 이 소재자체가

갖고 있는 유동특성의 이방성으로 말미암아 금형내에서의 유동거동도 일반적으로 사용되고 있는 무배향 섬유매트만으로 강화되어 있는 복합재와는 상이한 현상을 나타내게 된다.

이와같은 특성을 갖는 복합재를 고온에서 압축성형하는 경우의 유동특성을 정확히 파악하기 위해서는 복합재의 중앙부에 위치한 일방향 섬유층의 길이방향과 그 직각방향에 대한 재료의 유동저항을 나타내는 척도인 점도의 측정이 불가결하다.

\* 동서대학교 기계공학부

\*\* 조선대학교 공과대학 기계공학부

섬유로 강화된 복합재료에 대한 점도측정에는 주로 섬유  
의 형태가 단섬유이거나<sup>1,3)</sup>, 전단속도가 느린 범위에 한정  
되어 있는 원판압축에 의한 고분자 수지의 점도측정법<sup>4)</sup>,  
압출법 등이 이용되었으나, 전단속도가 느리게 되면 점도  
측정 중에 섬유와 모재와의 분리 및 배향이 발생되어 점도  
측정이 곤란해지며<sup>5,6)</sup>, 압출법을 이용하면 섬유가 파손되는  
결점을 갖고 있기 때문에 단섬유인 경우에는 적합하나, 강  
섬유로 강화된 복합판의 점도측정에는 부적합하다.

한편 Whiting-Jacobsen<sup>7)</sup>이 제안한 평행판 플라스틱미  
터를 이용하면 시험편의 두께와 압축하중의 측정으로부터  
점도를 측정하기 때문에 강섬유로 강화된 복합판의 점도  
측정에는 가장 적합한 방법이라고 할 수 있다. 그래서  
필자들은 무배향 장섬유매트로 강화된 복합판의 점도에  
미치는 섬유함유율과 각종 성형인자들의 영향을 고찰한  
바 있다.<sup>8)</sup>

그러므로 본 연구에서는 강도의 방향성을 부여한 일방  
향 섬유강화 고분자 복합재를 유동성형하는 경우에 대한  
체계적인 연구의 확립 및 이 소재의 개발차원에서 특정방  
향으로의 강도를 향상시킨 플라스틱 복합판의 유동저항  
을 나타내는 점성계수에 미치는 재료요인과 성형인자의  
영향에 대하여 고찰하였다.

## 2. 점도측정이론

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

재료는 (1) 지수법칙에 따르는 비뉴톤 유체이며 (2) 비  
압축성이다 (3) 물체력 및 관성력은 무시한다 (4) 평행판  
과 재료는 밀착해서 미끄러지지 않는다 (5) 시험편의 두  
께는 다른 치수에 비하여 얇기 때문에 1차원 문제로 취급  
한다. 이러한 가정하일 때

연속 방정식은

$$xWh\dot{h} = 2 \int_0^{h/2} Wv_x dt \quad (1)$$

여기서  $v_x$ 는 x방향의 속도,  $\dot{h} = \frac{dh}{dt}$  로 압축속도이다.

그리고 운동량 방정식으로 부터

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

재료가 n승 지수법칙에 따르는 비뉴톤 유체로 가정하였  
으므로 전단응력은

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

여기서 K는 구조점도이고,  $n_c (1 > n_c > 0)$ 는 복합재의  
구조점도지수이다.

식 (2)와 식 (3)으로 부터 속도  $v_x$ 는

$$-v_x = \left( -\frac{1}{k_c} \frac{dp_c}{dx} \right)^{\frac{1}{n_c}} \cdot \int_{z/2}^{\frac{h}{2}} z^{n_c} dz \quad (4)$$

이므로 식 (4)를 다시 쓰면

$$-v_x = \left( -\frac{1}{k_c} \frac{dp_c}{dx} \right)^{\frac{1}{n_c}} \cdot \left\{ -\frac{n_c}{n_c + 1} \left[ \frac{h^{\frac{1}{n_c} + 1}}{2} - z^{\frac{1}{n_c} + 1} \right] \right\} \quad (5)$$

그러므로

$$v_x = \frac{n_c \left( \frac{h}{2} \right)^{1+1/n_c}}{n_c + 1} \left( -\frac{1}{K} \frac{dp}{dx} \right)^{1/n_c} \left\{ 1 - \left( \frac{2z}{h} \right)^{1+1/n_c} \right\} \quad (6)$$

식 (1)과 식 (6)을 이용하여 압력 P를 구하면 다음과 같  
이 된다.

$$P = \frac{h^{n_c}}{h^{2n_c+1}} \left( \frac{2n_c + 1}{n_c} \right)^{n_c} \frac{2^{n_c+1} K}{n_c} + 1(B^{n_c+1} - x^{n_c+1}) + P_{aim} \quad (7)$$

식 (7)에서  $P_{aim}$ 은 대기압이므로 이후 무시한다. 이 압력  
P로부터 하중  $F_c$ 를 구하고, 양변에 대수를 취하면

$$\log F_c = \log \left\{ h^{n_c} \left( \frac{2n_c + 1}{n_c} \right)^{n_c} \frac{K}{n_c + 2} \left( \frac{1}{W} \right)^{n_c+1} V^{n_c+2} \right\} - 3(n_c + 1) \log h \quad (8)$$

여기서 W는 폭, V는 체적이다. 식 (8)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 (8)로 부  
터 구조점도 K를 구할 수 있다.

한편 점도  $\mu$  는

$$\mu = K \cdot \dot{\gamma}^{n-1} \quad (9)$$

일 때 복합재의 두께가 얇고 초기두께  $h_0$ 에서  $h$ 까지의 두께변화가 크지 않기 때문에, 두께방향의 속도구배는 일정한 것으로 가정할 수 있으므로<sup>(7)</sup>

$$\dot{\gamma} = -\frac{2v_x}{h} \quad (10)$$

여기서  $v_0$ 는  $z=0$ 에 있어서의  $v_x$ 이다. 식 (10)으로 부터 체적은  $V = 2WBh$ 이기 때문에

$$\frac{dB}{dh} = \frac{V}{2W} h^{-2} \quad (11)$$

평균속도  $\frac{v_0}{2}$  는

$$\frac{v_0}{2} = \frac{dB}{dt} = \frac{dB}{dh} \frac{dh}{dt} = \frac{V}{2W} h^{-2} \dot{h} \quad (12)$$

식 (12)를 식 (10)에 대입하면 전단속도는

$$\dot{\gamma} = 2 \frac{V}{W} h^{-3} \dot{h} \quad (13)$$

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

$$\bar{v}_m = \int_0^{h/2} v_m = \frac{\dot{h}}{h} x \quad (14)$$

가 된다.

### 3. 실험

일방향 섬유강화 복합재는 모재가 폴리프로필렌이고, 강화재의 배치상태는 두께방향으로 양의측에는 무배향 섬유매트, 중앙부에는 일방향으로만 섬유가 배향되어 있는 구조이며, 섬유함유율은 40wt%, 50wt% 두 종류이다. 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 성

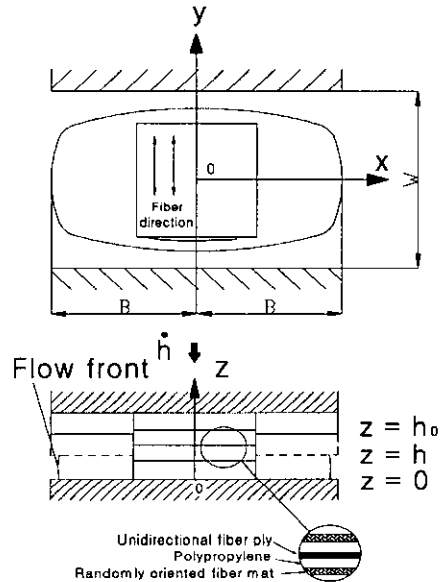


Fig. 1 Nomenclature for slab-shaped part press molding

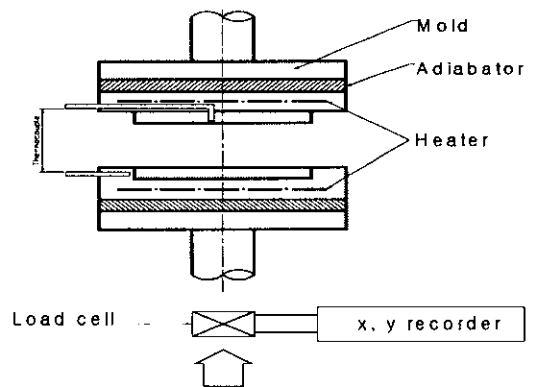


Fig. 2 Schematic diagram of the experimental apparatus

형하였다. 압축장치는 만능인장압축 시험기를 사용하였으며, 금형에는 히터와 열전대를 부착하여 소요온도(200℃)를 유지시켰다.

압축속도는 0.1, 1, 10, 100mm/min의 4종류로 하였으며 각각의 속도에 대하여 압축비를 변화시켜 압축성형하였다. 압축실험에 사용한 장치의 개략도를 Fig. 2에 나타내었다. 압축된 시험편의 두께는 성형품의 면적을 측정해서 체적일정 조건으로부터 구하였다.

### 4. 결과 및 고찰

Fig. 3의 (a)~(d)는 복합재내의 일방향 섬유층 길이방향과 가로방향에 대해서 소정의 두께로 압축한 후 이때의 하중과 두께를 측정하고 대수를 취하여 일방향 섬유층의 길이방향과 가로방향에 대해서 비교하면 당연히 길이방향의 하중이 가로방향보다도 더 큰 값을 나타내고 있음을 알 수 있다.

이 가로방향의 유동저항보다는 길이방향의 유동저항이 큰 것은 섬유가 놓여져 있는 방향으로 일종의 모세관 유동과 같은 현상이 발생하기 때문이라고 생각한다. 또한 압축속도와 섬유함유율의 영향을 살펴보면 압축속도가 빠르면 빠를수록 복합재의 유동에 많은 힘이 필요하기 때문에 복합재의 압축하중은 큰 값을 나타내고, 섬유함유율이 40wt%보다는 50wt%인 경우가 고체부분인 섬유가 더 많기 때문에 큰 값을 나타내고 있음을 알 수 있다. 이들 그림의 기울기로부터 복합재의 구조점도지수  $n_c$ 를 구하였으며, 이  $n_c$ 로부터 식 (8)을 이용하여 복합재의 구조점도  $K$ 를 구하였다.

Fig. 4의 (a)~(d)는 압축하중에 미치는 복합재의 전단속도  $\dot{\gamma}$ 의 영향을 나타낸 그림이다. 이 그림에서 전단속도가 빠르면 압축하중이 증가하며, 압축하중은 일방향 섬유층의 가로방향보다는 길이방향이 더 큰 값을 나타냄을 알 수 있다. 이 이유로서 복합재의 전단속도는 압축속도와 두께 및 성형품의 체적의 함수로 주어지기 때문에 압축속도가 빠르면 Fig. 3과 같이 큰 압축하중이 필요로 하게 되며, 체적일정 조건이기 때문에 주로 성형품의 두께와 압축속도의 영향을 지배적으로 받기 때문에 전단속도가 빠르면 압축하중은 증가하는 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다. 섬유함유율의 영향도 Fig. 3과 마찬가지로 40wt%보다는 50wt%인 경우가 고체부분인 섬유가 더 많기 때문에 큰 값을 나타내고 있음을 알 수 있다.

Fig. 5 (a)~(d)는 일방향 섬유강화 복합재의 유동저항계수인 구조점도  $K$ 에 미치는 성형품의 압축비  $Rcr(Rcr=1-h/h_0)$ 과의 관계를 나타낸 그림이다. 이 그림에서  $Rcr$ 이 증가하면 구조점도  $K$ 는 감소함을 알 수 있는데, 이것은 식 (9)와 식 (13)에서  $\dot{\gamma}$ 는 체적과 압축속도에 비례하고 금형의 폭과  $h^{1/2}$ 에 반비례함을 알 수 있다. 또한  $\dot{\gamma}$ 가 커진

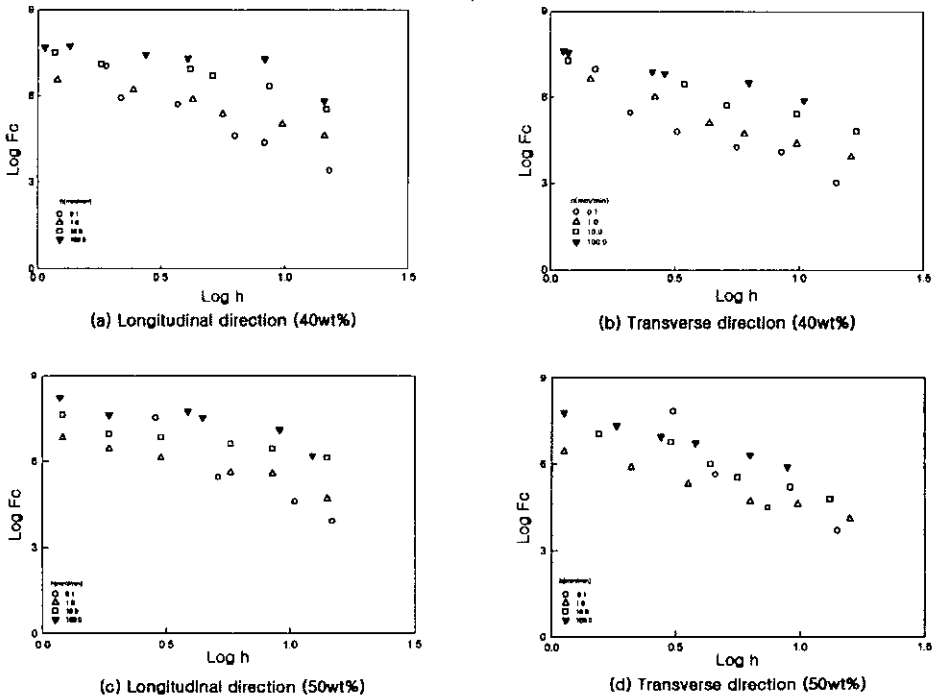


Fig. 3 Relationship between Log Fc and Log h

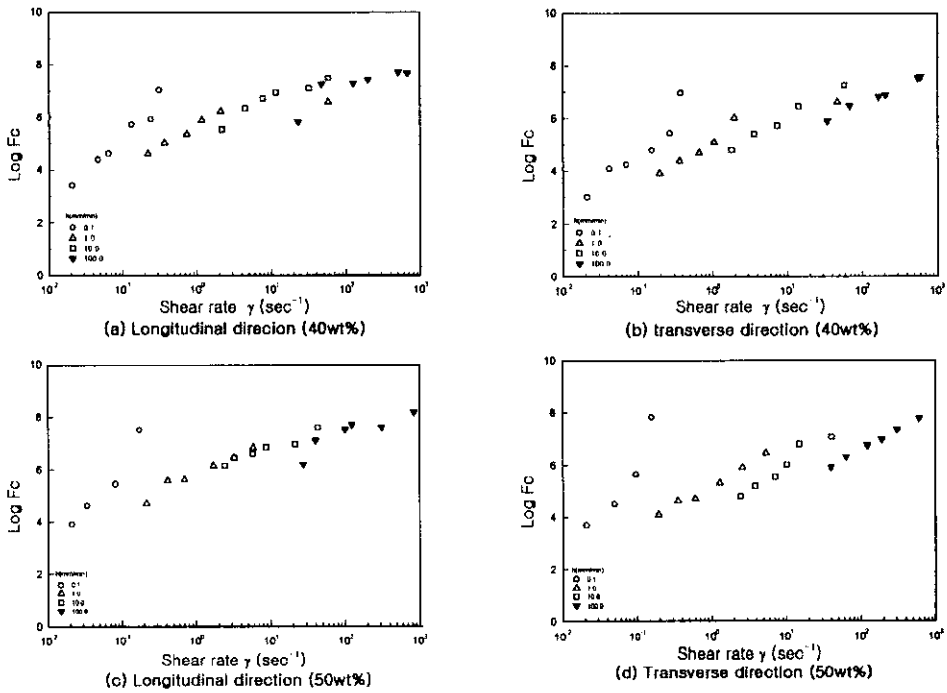


Fig. 4 Effect of shear rate  $\dot{\gamma}$  on compression load  $F_c$

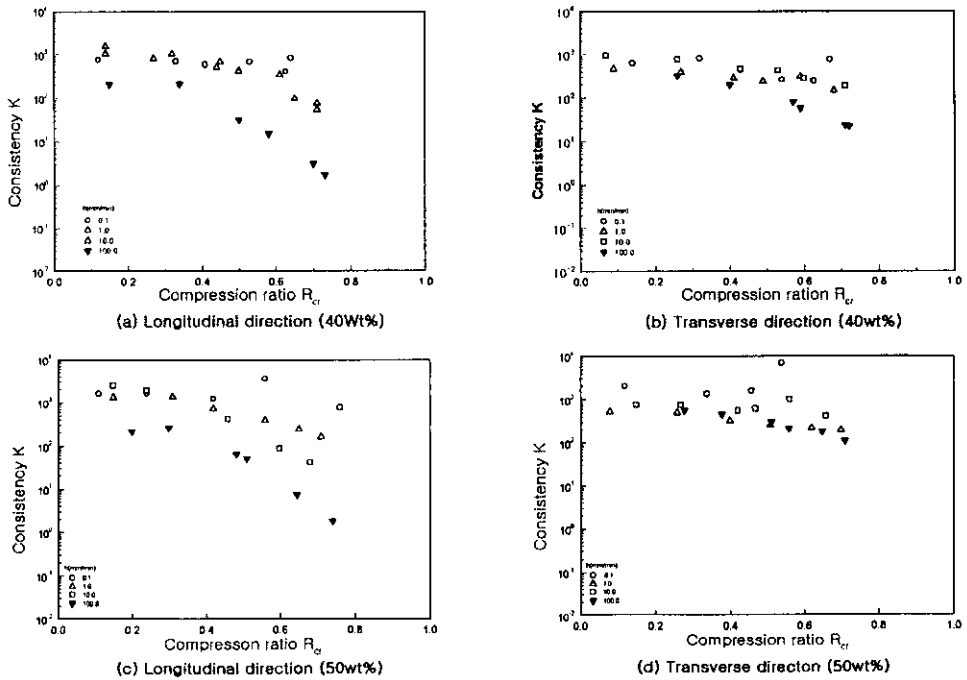


Fig. 5 Relationship between consistency  $K$  and compression ratio  $R_{cr}$

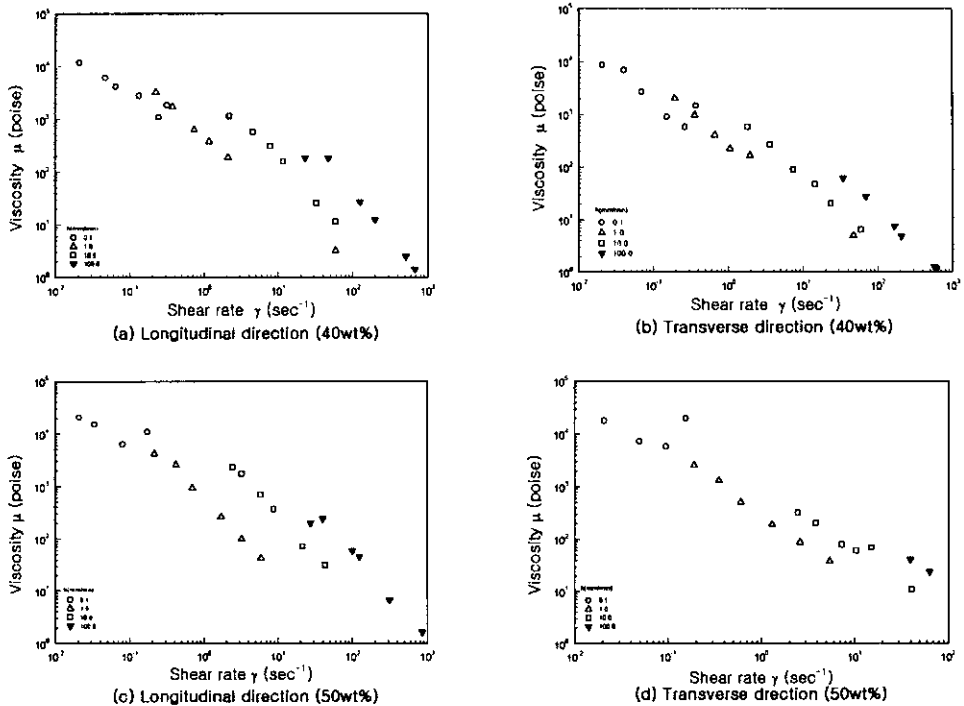


Fig. 6 Composites viscosity  $\mu$  as a function of shear rate  $\dot{\gamma}$  ( $\text{sec}^{-1}$ )

다는 것은 압축속도가 빠르거나  $h^{1/3}$ 이 작아진다는 것을 의미하기 때문에  $\text{Re}_c$ 이 커지면  $h^{1/3}$ 이 작아지므로 해서  $\dot{\gamma}$ 가 커지며 또 이 값이 커지면 동일한 점도일 때  $K$ 는 작아지는 것을 의미하고 있다. 또한 일방향 섬유층의 길이 방향이 가로방향 보다 또 40wt%보다는 50wt%가 큰  $K$  값을 나타내고 있는 것을 알 수 있는데, 이것은 복합재내 일방향 섬유층의 길이방향이 가로방향보다 또 섬유함유율이 높을수록 유동저항이 크게 작용하고 있다는 것을 정량적으로 알 수 있다.

Fig. 6 (a)~(d)는 Fig. 3에서 구한 복합재의 구조점도지수  $n_c$ 를 이용, 식 (8), (9), (13)에서 구한 구조점도  $K$ , 전단속도  $\dot{\gamma}$ 를 사용하여, 일방향 섬유층의 길이방향과 가로방향에 따른 복합재의 점도  $\mu$ 와 전단속도  $\dot{\gamma}$ 와의 관계를 나타낸 그림이다. Fig. 6에서 복합재의 점도  $\mu$ 는 압축속도의 영향을 지배적으로 받아 변화하고 있음을 알 수 있다. 또한 이 그림에서 압축속도별로 기울기가 다른 것은 플라스틱 복합재가 갖고 있는 점탄성 효과가 원인이라고 생각하며, 섬유층의 방향이 동일하고 섬유함유율이 같은 복합재의 점도를 측정함에 있어서, 압축속도별로 다른 기

울기를 이용하여 같은 섬유함유율을 지니고 있는 복합재의 점도를 가름하는 것은 복합재료가 지니고 있는 원래의 불균일성을 무시하는 결과를 초래할 수도 있다.

그러므로 섬유배향상태와 섬유함유율이 같은 경우인 복합재에 대해서 각각의 압축속도별로 측정된 점도  $\mu$ 와 전단속도  $\dot{\gamma}$ 와의 상호관계를 plotting하고 이 전체의 데이터를 일차원 Fitting한 후 여기에서 계산된 구조점도지수  $n_c$ 를 이용하여 일방향 섬유층의 길이방향과 가로방향에 대한 점도로 이용하였다.

Fig. 7 (a)~(d)는 복합재의 유동저항을 나타내는 유동저항계수인 구조점도  $K$ 에 미치는 섬유함유율의 영향을 나타낸 그림으로서  $K$ 의 계산에 있어서는 동일한 섬유함유율과 섬유배향상태인 경우는 점도와 전단속도와의 그림에서 그 기울기를 동일하게 한 후 구조점도  $K$ 를 계산하였다. 이들 그림에서 섬유함유율이 50wt%이고, 일방향 섬유층의 길이방향인 경우의 점도가 상승하므로 당연히 구조점도  $K$ 는 증가하고 있음을 알 수 있으며, 이것은 복합재내의 섬유함유율이 증가하면 그 만큼 유동저항도 커지게 된다는 것과 일방향 섬유층의 길이방향과 가로방향에 대

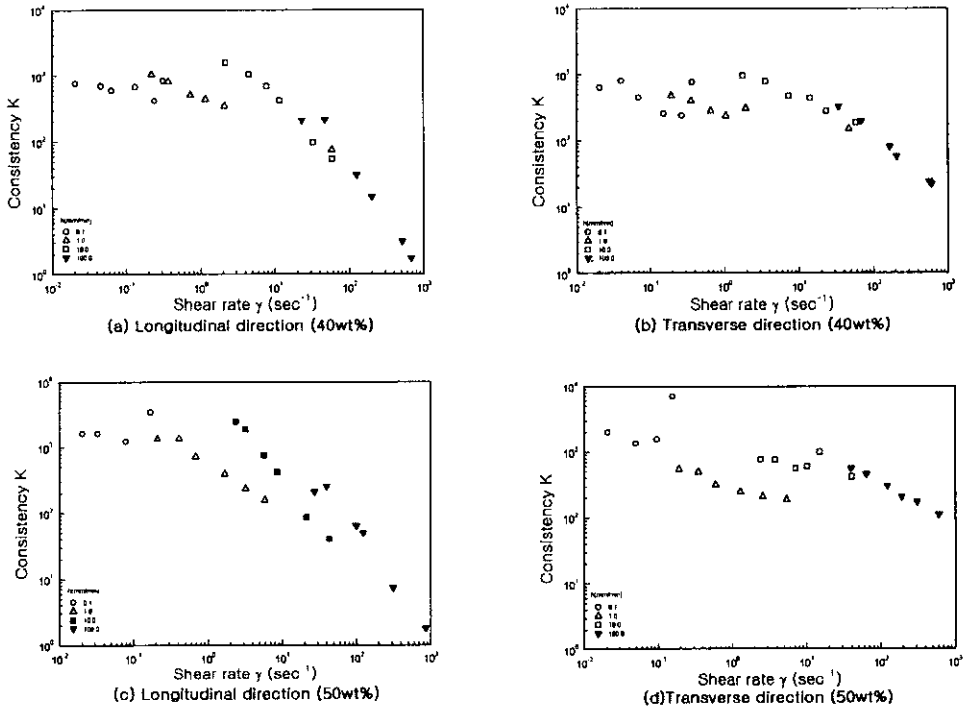


Fig. 7 Composites consistency K as a function of shear rate  $\dot{\gamma}$  ( $\text{sec}^{-1}$ )

한 수지의 유동특성이 상이하다는 것을 정량적으로 알 수 있다.

### 5. 결론

특정방향으로의 강도 향상을 위하여 개발된 일방향 섬유 강화 플라스틱 복합판의 점도를 측정 한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 일방향 섬유층의 길이방향에 대한 유동저항은 가로 방향보다 크기 때문에 압축하중이 크며, 압축속도가 빠르고 섬유함유율이 많을수록 압축하중은 크게 작용한다.
- (2) 복합재의 전단속도와 평균속도가 빠르고 섬유함유율이 높으면 압축하중은 증가한다.
- (3) 일방향 섬유 강화 복합재의 점도 및 구조점도는 복합재의 중앙부에 위치한 길이방향이 큰 값을 나타내고 있으며, 섬유함유율이 높은 복합재인 경우의 유동저항이 크게 나타나고 있음을 알 수 있다.

### 후 기

본 연구는 동서울대학 산업기술연구소의 지원에 의해 수행된 논문임.

### 참 고 문 헌

- (1) R. O. Maschmeyer and C. T. Hill, "Rheology of Concentrated Suspensions of Fibers in Tube Flow. II. An Exploratory study", Trans. of the Society of Rheology, 21-2, pp. 183~194, 1977.
- (2) Lech Czarnecki and J. L. White, "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, 1980.
- (3) R. J. Crowson and M. J. Folkes, "Rheology of Short Fiber-Reinforced Thermoplastics and its Applica

- tion to Injection Molding", Polymer Engineering and Science, Vol. 20, No. 14, pp. 934~940, 1980.
- (4) G. J. Dienes and H. F. Klemm, "Theory and Application of the Parallel Plate Plastometer", J. of Applied Physics, Vol. 17, pp. 458~471, 1946.
- (5) 北條英典, 金二坤, 玉川規一, "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, 1984.
- (6) 北條英典, 金二坤, 玉川規一, "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, 1984.
- (7) R. Whiting and P. H. Jacobsen, "The Evaluation of Non-Newtonian Viscosity Using a Modified Parallel-Plate Plastometer", J. of Material Science, Vol. 14, pp. 307~311, 1979.
- (8) Hojo, H., Kim, E. G., Yaguchi, H. and Onodera, T., "Simulation of Compression Molding with Matrix-Fiber Separation and Fiber Orientation for Long Fiber Separation and Fiber Orientation for Long Fiber-Reinforced Thermoplastics", Intern. Polymer Processing, Vol. 3, pp. 54~61, 1988.
- (9) 조선형, 이희균, 김이곤, "장섬유강화 고분자 복합판의 압축성형에 있어서 점성계수 측정", 한국복합재료학회지, 10권, 2호, pp. 79~86, 1997.