

# 연속섬유강화 플라스틱 복합재의 압축성형에 있어서 확대/축소 점도비를 고려한 유동해석

김형철\* · 채경철\*\* · 조선희\*\*\* · 김이곤\*\*  
(1999년 1월 7일 접수)

## Flow Analysis with Ratio of Expansional/Contractional Viscosity during Compression Molding of Continuous Fiber-Reinforced Polymeric Composites

Hyeong-Chul Kim, Kyung-Chul Chae, Seon-Hyung Jo and E-Gon Kim

**Key Words:** Continuous Fiber Reinforced Polymeric Composites(연속섬유강화 고분자 복합재), Compression Molding(압축성형), Measurement of Expansional/Contractional Viscosity(확대/축소 점도 측정), Flow Analysis with Expansional/Contractional Viscosity(확대/축소 점도를 고려한 유동해석)

### Abstract

To obtain an excellent product and decide on optimum molding conditions, it is important to establish the relationship between molding conditions and viscosity. The composites is treated as a pseudoplastic fluid, and the expansional/contractional viscosity of the fiber-reinforced polymeric composites is measured using the parallel plastometer, and the model for flow state has been simulated with the viscosity. The effects of expansional slip parameter  $\alpha_e$  and expansional/contractional viscosity ratio  $\mu_r$  on the mold filling parameters are also discussed.

### 1. 서론

섬유를 강화재로 하고 플라스틱을 모재로 하는 섬유강화 플라스틱 복합재료는 비강도 및 비강성이 크기 때문에 항공기와 자동차의 경량화를 위하여 많이 이용되고 있으며, 일반적으로 모재인 플라스틱 용융점 전후의 온도로 가열하여 열간압축 성형을 한다. 모재의 점도가 열경화성 수지에 비하여 상당히 높은 열가소성 수지이고, 소재내부에 강화재인 섬유를 함유하고 있으므로 복잡한 유동특성을 나타낸다. 특히, 증공원형 상태의 복

합재를 압축성형 하는 경우에는 반경의 외측과 내측으로의 유동특성 즉, 점도가 상이하기 때문에 복합재를 고온에서 압축성형하는 경우, 유동 상태를 정확히 파악하기 위해서는 반경의 외측방향과 그 반대방향에 대한 재료의 유동저항을 나타내는 척도인 점도의 측정이 불가결하다.

섬유로 강화된 복합재료에 대한 점도측정에는 주로 섬유의 형태가 단섬유이거나,<sup>(1-3)</sup> 전단속도가 느린 범위에 한정되어 있는 원판압축에 의한 고분자수지의 점도측정법,<sup>(4)</sup> 압출법 등이 이용되었으나, 전단속도가 느리게 되면 점도측정중에 섬유와 모재와의 분리 및 배향이 발생되어 점도 측정이 곤란해지며,<sup>(5,6)</sup> 압출법을 이용하면 섬유가 파손되는 결점을 갖고 있기 때문에 단섬유인 경우에는 적합하나, 장섬유로 강화된 복합판의 점도측정에는 부적합하다.

한편, Whiting-Jacobsen<sup>(7)</sup>이 제안한 평행판 플라

\* 회원, 인천전문대학 기계설계과

\*\* 회원, 국민대학교 기계·자동차공학부

E-mail : egkim@kmu.kookmin.ca.kr

TEL : (02)910-4686 FAX : (02)910-4839

\*\*\* 회원, 동서올대대학 금형설계과

스토미터를 이용하면 시험편의 두께와 압축하중의 측정으로부터 점도를 측정하기 때문에 장섬유로 강화된 복합판의 점도측정에는 가장 적합한 방법이라 할 수 있다. 그래서 필자들은 이 방법을 이용하여 무배향 장섬유매트로 강화된 복합판의 점도에 미치는 섬유함유율과 각종 성형인자들의 영향을 고찰한 바 있다.<sup>(8)</sup>

복합재료의 압축성형 중에는 반드시 축소 및 확대 유동이 수반되므로 이들의 영향을 검토할 필요가 있다. 그러나 확대흐름과 축소흐름인 상태의 점도를 측정할 결과나 이 두가지 흐름상태를 고려한 유동해석은 거의 없기 때문에 본 연구에서는 확대/축소흐름의 저항을 나타내는 점도 측정방법을 제안하고 성형조건에 따른 점도의 영향 및 이 현상을 고려한 유동해석 결과에 대해서 고찰한 내용을 보고한다.

## 2. 점도 측정

### 2.1 확대 점도

연속섬유강화 고분자 복합판을 Fig. 1과 같은 평행판 사이에 끼우고 하중  $F_c$ 를 가해서 초기 두께  $h_0$ 에서  $h$ 까지 압축할 때 다음과 같은 가정을 세운다. 재료는 [1] 의소성 유체이며 [2] 비압축성이다 [3] 물체력 및 관성력은 무시한다 [4] 금형과 재료는 밀착해서 미끄러지지 않는다. 연속 방정식은 다음과 같이 정의 된다.

$$\dot{h}(\pi r^2 - \pi r_i^2) = 4\pi r \int_0^{h/2} v_r dz \quad (1)$$

여기서,  $\dot{h} = \frac{dh}{dt}$  로 압축 속도,  $v_r$ 은  $r$  방향 반경 속도이다. 그리고 운동량 방정식과 레오로지 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial r} \quad (2)$$

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

식 (3)에서  $K$ 는 구조 점도이고,  $n(0 < n < 1)$ 은 복합재의 구조 점도 지수이다.

식 (2)와 식 (3)으로부터 반경 속도  $v_r$ 을 구하면 다음과 같다.

$$v_r = \left( -\frac{1}{K} \frac{dP}{dr} \right)^{\frac{1}{n}} \frac{n}{n+1} \left( \frac{h}{2} \right)^{\frac{n+1}{n}} \times \left\{ 1 - \left( \frac{2z}{h} \right)^{\frac{n+1}{n}} \right\} \quad (4)$$

식 (4)를 연속 방정식에 대입하면 다음과 같다.

$$\dot{h}(\pi r^2 - \pi r_i^2) = 4\pi r \int_0^{h/2} \left( -\frac{1}{K} \frac{dP}{dr} \right)^{\frac{1}{n}} \frac{n}{n+1} \times \left( \frac{h}{2} \right)^{\frac{n+1}{n}} \left\{ 1 - \left( \frac{2z}{h} \right)^{\frac{n+1}{n}} \right\} dz \quad (5)$$

식 (5)를 정리하면 압력은 다음과 같이 표현된다.

$$P(r) = -A \cdot \int_{r_i}^r \left( \frac{r^2 - r_i^2}{r} \right)^n dr \quad (6)$$

여기서,  $A$ 는 다음과 같다.

$$A = -2K \left( \frac{2n+1}{n} \right)^n \frac{\dot{h}^n}{h^{2n+1}} \quad (7)$$

식 (6)을 Simpson's rule을 적용하면, 다음과 같이 결정된다.

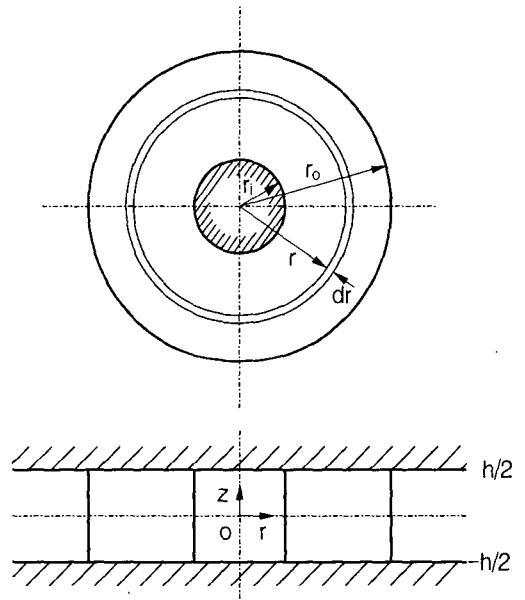


Fig. 1 Nomenclature for circular part compression molding (expansion flow)

$$P(r) = \frac{A}{12} (r-r_i) \left[ 4 \left( \frac{r^2 + 6r_i r - 7r_i^2}{4(r+3r_i)} \right)^n + 2 \left( \frac{r^2 + 2r_i r - 3r_i^2}{2(r+r_i)} \right)^n + 4 \left( \frac{9r^2 + 6r_i r - 15r_i^2}{4(3r+r_i)} \right)^n + \left( \frac{r^2 - r_i^2}{r} \right)^n \right] \quad (8)$$

따라서 압축 하중  $F_c$ 는 다음과 같다.

$$F_c = 2\pi \int_{r_i}^{r_o} r P(r) dr \quad (9)$$

식 (8)을 식 (9)에 대입하여 압력  $P$ 로부터 하중  $F_c$ 를 구하여 정리하면 다음과 같이 된다.

$$F_c = 2\pi \int_{r_i}^{r_o} \frac{A}{12} r (r-r_i) \left[ 4 \left( \frac{r^2 + 6r_i r - 7r_i^2}{4(r+3r_i)} \right)^n + 2 \left( \frac{r^2 + 2r_i r - 3r_i^2}{2(r+r_i)} \right)^n + 4 \left( \frac{9r^2 + 6r_i r - 15r_i^2}{4(3r+r_i)} \right)^n + \left( \frac{r^2 - r_i^2}{r} \right)^n \right] dr \quad (10)$$

$$F_c = \frac{\pi A}{6} [4B(r_o, r_i, n) + 2C(r_o, r_i, n) + 4D(r_o, r_i, n) + E(r_o, r_i, n)] \quad (11)$$

식 (11)에서 각각의 함수  $B, C, D, E$ 는 다음과 같다.

$$B(r_o, r_i, n) = \frac{(r_o - r_i)^2}{12} \times \left[ \left( \frac{r_o + 3r_i}{4} \right) \left\{ \frac{r_o^2 + 30r_i r_o - 31r_i^2}{16(r_o + 15r_i)} \right\}^n + \left( \frac{r_o + r_i}{2} \right) \left\{ \frac{r_o^2 + 14r_i r_o - 15r_i^2}{8(r_o + 7r_i)} \right\}^n + 3 \left( \frac{3r_o + r_i}{4} \right) \left\{ \frac{9r_o^2 + 78r_i r_o - 87r_i^2}{16(3r_o + 13r_i)} \right\}^n + r_o \left\{ \frac{r_o^2 + 6r_i r_o - 7r_i^2}{4(r_o + 3r_i)} \right\}^n \right] \quad (12)$$

$$C(r_o, r_i, n) = \frac{(r_o - r_i)^2}{12} \times \left[ \left( \frac{r_o + 3r_i}{4} \right) \left\{ \frac{r_o^2 + 14r_i r_o - 15r_i^2}{8(r_o + 7r_i)} \right\}^n + \left( \frac{r_o + r_i}{2} \right) \left\{ \frac{r_o^2 + 6r_i r_o - 7r_i^2}{4(r_o + 3r_i)} \right\}^n + 3 \left( \frac{3r_o + r_i}{4} \right) \left\{ \frac{9r_o^2 + 30r_i r_o - 39r_i^2}{8(3r_o + 5r_i)} \right\}^n + r_o \left\{ \frac{r_o^2 + 2r_i r_o - 3r_i^2}{2(r_o + r_i)} \right\}^n \right] \quad (13)$$

$$D(r_o, r_i, n) = \frac{(r_o - r_i)^2}{12} \times \left[ \left( \frac{r_o + 3r_i}{4} \right) \left\{ \frac{9r_o^2 + 78r_i r_o - 87r_i^2}{16(3r_o + 13r_i)} \right\}^n + \left( \frac{r_o + r_i}{2} \right) \left\{ \frac{9r_o^2 + 30r_i r_o - 39r_i^2}{8(3r_o + 5r_i)} \right\}^n + 3 \left( \frac{3r_o + r_i}{4} \right) \left\{ \frac{81r_o^2 + 126r_i r_o - 207r_i^2}{16(9r_o + 7r_i)} \right\}^n + r_o \left\{ \frac{9r_o^2 + 6r_i r_o - 15r_i^2}{4(3r_o + r_i)} \right\}^n \right] \quad (14)$$

$$E(r_o, r_i, n) = \frac{(r_o - r_i)^2}{12} \times \left[ \left( \frac{r_o + 3r_i}{4} \right) \left\{ \frac{r_o^2 + 6r_i r_o - 7r_i^2}{4(r_o + 3r_i)} \right\}^n + \left( \frac{r_o + r_i}{2} \right) \left\{ \frac{r_o^2 + 2r_i r_o - 3r_i^2}{2(r_o + r_i)} \right\}^n + 3 \left( \frac{3r_o + r_i}{4} \right) \left\{ \frac{9r_o^2 + 6r_i r_o - 15r_i^2}{4(3r_o + r_i)} \right\}^n + r_o \left\{ \frac{r_o^2 - r_i^2}{r_o} \right\}^n \right] \quad (15)$$

식 (11)에  $A$ 를 대입하여 정리하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$F_c = \frac{\pi K}{3} \left( \frac{2n+1}{n} \right)^n \frac{h^n}{h^{2n+1}} (4B+2C+4D+E) \quad (16)$$

한편,  $4B+2C+4D+E$ 는  $r_o^{n+3}$ 의 차수를 가지고 있고 체적 일정 조건에 의해  $(1/h)^{(n+3)/2}$ 의 차

수를 가지게 된다.

따라서  $4B+2C+4D+E$ 를  $Q(1/h)^{(n+3)/2}$  라고 놓으면 하중  $F_c$ 는 다음과 같다.

$$F_c = \frac{\pi K}{3} \left(\frac{2n+1}{n}\right)^n \dot{h}^n (1/h)^{(5n+5)/2} Q \tag{17}$$

식 (17)에서 양변에 Log를 취하면, 다음과 같은 형태를 가지게 된다.

$$\log F_c = \log \left\{ \frac{\pi K}{3} \left(\frac{2n+1}{n}\right)^n \dot{h}^n Q \right\} - 2.5(n+1) \log h \tag{18}$$

식 (18)에서  $\log F_c$ 와  $\log h$ 를 축으로 하는 그래프를 그리면 기울기가  $2.5(n+1)$ 인 직선을 얻는다. 이로부터 구조 점도 지수  $n$ 이 구해지고 구조 점도  $K$ 를 구할 수 있다.

한편, 확대 점도  $\mu_e$ 는 아래 식과 같다.

$$\mu_e = K \dot{\gamma}^{n-1} \tag{19}$$

식 (19)에서 전단 속도  $\dot{\gamma}$ 는 다음과 같다.

$$\dot{\gamma} = 4 \left( \frac{V}{\pi h} - r_i^2 \right)^{1/2} \left( \frac{1}{h} \right)^2 \dot{h} \tag{20}$$

여기서,  $V$ 는 체적을 의미한다.

2.2 축소 점도

Fig. 2은 축소 흐름을 나타낸 그림이다. 이 그림에서 확대 점도 이론에서와 같은 가정하에 축소 점도 이론을 정리하면 연속 방정식은 다음과 같다.

$$\dot{h}(\pi r_o^2 - \pi r^2) = 4\pi r \int_0^{h/2} v_r dz \tag{21}$$

식 (4)를 연속 방정식(21)에 대입하면 압력은 다음과 같다.

$$P(r) = -A \cdot \int_r^{r_o} \left( \frac{r_o^2 - r^2}{r} \right)^n dr \tag{22}$$

여기에서,  $A$ 는 다음과 같다.

$$A = -2K \left( \frac{2n+1}{n} \right)^n \frac{\dot{h}^n}{h^{2n+1}} \tag{23}$$

식 (22)를 Simpson's rule을 적용하여 다시 정리하면 다음과 같이 된다.

$$P(r) = \frac{A}{12} (r_o - r) \left[ \left( \frac{r_o^2 - r^2}{r} \right)^n + 4 \left( \frac{15r_o^2 - 6r_o r - 9r^2}{4(3r + r_o)} \right)^n + 2 \left( \frac{3r_o^2 - 2r_o r - r^2}{2(r + r_o)} \right)^n + 4 \left( \frac{7r_o^2 - 6r_o r - r^2}{4(r + 3r_o)} \right)^n \right] \tag{24}$$

압축하중  $F_c$ 를 구하면 다음과 같다.

$$F_c = 2\pi \int_{r_i}^{r_o} \frac{A}{12} r (r_o - r) \left[ \left( \frac{r_o^2 - r^2}{r} \right)^n + 4 \left( \frac{15r_o^2 - 6r_o r - 9r^2}{4(3r + r_o)} \right)^n + 2 \left( \frac{3r_o^2 - 2r_o r - r^2}{2(r + r_o)} \right)^n + 4 \left( \frac{7r_o^2 - 6r_o r - r^2}{4(r + 3r_o)} \right)^n \right] dr \tag{25}$$

$$F_c = \frac{\pi A}{6} [ B(r_i, r_o, n) + 4C(r_i, r_o, n) + 2D(r_i, r_o, n) + 4E(r_i, r_o, n) ] \tag{26}$$

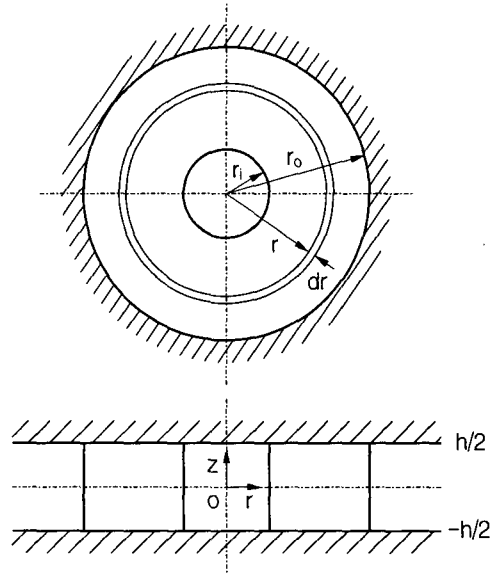


Fig. 2 Nonmenclature for circular part compression molding (contraction flow)

식 (26)에서 각각의 함수 B, C, D, E는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 B(r_i, r_o, n) = & \frac{(r_o - r_i)^2}{12} \left[ r_i \left\{ \frac{r_o^2 - r_i^2}{r_i} \right\}^n \right. \\
 & + 3 \left( \frac{r_o + 3r_i}{4} \right) \left\{ \frac{15r_o^2 - 6r_o r_i - 9r_i^2}{4(r_o + 3r_i)} \right\}^n \\
 & + \left( \frac{r_o + r_i}{2} \right) \left\{ \frac{3r_o^2 - 2r_o r_i - r_i^2}{2(r_o + r_i)} \right\}^n \\
 & \left. + \left( \frac{3r_o + r_i}{4} \right) \left\{ \frac{7r_o^2 - 6r_o r_i - r_i^2}{4(3r_o + r_i)} \right\}^n \right] \quad (27)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 C(r_i, r_o, n) = & \frac{(r_o - r_i)^2}{12} \left[ r_i \left\{ \frac{15r_o^2 - 6r_o r_i - 9r_i^2}{4(r_o + 3r_i)} \right\}^n \right. \\
 & + 3 \left( \frac{r_o + 3r_i}{4} \right) \left\{ \frac{207r_o^2 - 126r_o r_i - 81r_i^2}{16(7r_o + 9r_i)} \right\}^n \\
 & + \left( \frac{r_o + r_i}{2} \right) \left\{ \frac{39r_o^2 - 30r_o r_i - 9r_i^2}{8(5r_o + 3r_i)} \right\}^n \\
 & \left. + \left( \frac{3r_o + r_i}{4} \right) \left\{ \frac{87r_o^2 - 78r_o r_i - 9R^2}{16(13r_o + 3r_i)} \right\}^n \right] \quad (28)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 D(r_i, r_o, n) = & \frac{(r_o - r_i)^2}{12} \left[ r_i \left\{ \frac{3r_o^2 - 2r_o r_i - r_i^2}{2(r_o + r_i)} \right\}^n \right. \\
 & + 3 \left( \frac{r_o + 3r_i}{4} \right) \left\{ \frac{39r_o^2 - 30r_o r_i - 9r_i^2}{8(5r_o + 3r_i)} \right\}^n \\
 & + \left( \frac{r_o + r_i}{2} \right) \left\{ \frac{7r_o^2 - 6r_o r_i - r_i^2}{4(3r_o + r_i)} \right\}^n \\
 & \left. + \left( \frac{3r_o + r_i}{4} \right) \left\{ \frac{15r_o^2 - 14r_o r_i - r_i^2}{8(7r_o + r_i)} \right\}^n \right] \quad (29)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 E(r_i, r_o, n) = & \frac{(r_o - r_i)^2}{12} \left[ r_i \left\{ \frac{7r_o^2 - 6r_o r_i - r_i^2}{4(3r_o + r_i)} \right\}^n \right. \\
 & + 3 \left( \frac{r_o + 3r_i}{4} \right) \left\{ \frac{87r_o^2 - 78r_o r_i - 9r_i^2}{16(13r_o + 3r_i)} \right\}^n
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + \left( \frac{r_o + r_i}{2} \right) \left\{ \frac{15r_o^2 - 14r_o r_i - r_i^2}{8(7r_o + R)} \right\}^n \\
 & + \left( \frac{3r_o + r_i}{4} \right) \left\{ \frac{31r_o^2 - 30r_o r_i - r_i^2}{16(15r_o + r_i)} \right\}^n \quad (30)
 \end{aligned}$$

식 (26)에 A를 대입하여 정리하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$F_c = \frac{\pi K}{3} \left( \frac{2n+1}{n} \right)^n \frac{h^n}{h^{2n+1}} (B+4C+2D+4E) \quad (31)$$

식 (31)에서 B+4C+2D+4E 또한 확대 이론에서와 동일한 방법으로 하면 하중  $F_c$ 는 다음과 같은 형태를 가지게 된다.

$$F_c = \frac{\pi K}{3} \left( \frac{2n+1}{n} \right)^n h^n (1/h)^{(5n+5)/2} Q \quad (32)$$

윗 식을 양변에 Log를 취하면, 다음과 같은 형태를 가지게 된다.

$$\begin{aligned}
 \log F_c = & \log \left\{ \frac{\pi K}{3} \left( \frac{2n+1}{n} \right)^n h^n Q \right\} \\
 & - 2.5(n+1) \log h \quad (33)
 \end{aligned}$$

식 (33)으로부터 구조 점도 지수  $n$ 이 구해지고, 구조 점도  $K$ 를 구할수 있다.

축소 점도  $\mu_c$ 와 전단 속도  $\dot{\gamma}$ 는 다음과 같다.

$$\mu_c = K \dot{\gamma}^{n-1} \quad (34)$$

$$\dot{\gamma} = 4 \left( r_o^2 - \frac{V}{\pi h} \right)^{1/2} \left( \frac{1}{h} \right)^2 h \quad (35)$$

### 3. 유동 해석

섬유 강화 고분자 복합판의 임의의 2차원 평판 압축 성형에 대해서 고려할 때 연속 방정식은 다음과 같다.

$$u_{,x} + v_{,y} + w_{,z} = 0 \quad (36)$$

$h$ 가 압축 속도일 때 금형 표면에서의 속도 성분은  $\dot{z} = \dot{w} = \pm \dot{h}/2$  이므로, 연속 방정식을 다시 쓰면 다음과 같이 된다.

$$u_{,x} + v_{,y} + \dot{h}/h = 0 \quad (37)$$

운동량 방정식은

$$-\sigma_{xx,x} - \tau_{yx,y} = 0 \quad (38a)$$

$$-\tau_{xy,x} - \sigma_{yy,y} = 0 \quad (38b)$$

이며, 점성을 고려한 뉴턴 유체의 구성 방정식은

$$\sigma_{ij} = -p\delta_{ij} + \lambda \frac{\partial v_k}{\partial x_k} \delta_{ij} + \mu \left( \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \quad (39)$$

로 표현할 수 있다. 재료의 비압축성을 고려하면 다음과 같은 구성 방정식을 얻는다.

$$\sigma_{ij} = -p\delta_{ij} + \mu \left( \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \quad (40)$$

식 (40)을 운동량 방정식에 대입하면 다음과 같다.

$$-p_{,x} + \mu \{ 2u_{,xx} + (u_{,yy} + v_{,yx}) \} = 0 \quad (41a)$$

$$-p_{,y} + \mu \{ (u_{,xy} + v_{,xx}) + 2v_{,yy} \} = 0 \quad (41b)$$

식 (37)과 식 (41a), (41b)를 이용하여 해석 대상에 대한 경계 조건을 대입하면 완전한 해를 구할 수 있는데, 계산 과정의 간략화를 위해서 각각 무차원화된 특성값을 정의하면 다음과 같다.

$$\bar{x} = \frac{x}{L}, \quad \bar{y} = \frac{y}{L}, \quad \bar{u} = \frac{dx}{dt}, \quad \bar{v} = \frac{dy}{dt},$$

$$\bar{t} = \log\left(\frac{h_0}{h(t)}\right), \quad \frac{d\bar{t}}{dt} = -\frac{\dot{h}}{h},$$

$$\bar{P} = -\frac{ph}{2k_H h L^2}, \quad \alpha = \frac{\mu}{2k_H h L^2} \quad (42)$$

식 (42)에서  $k_H$ 는 유체 마찰 계수이며, 연속 방정식 및 운동량 방정식을 무차원화된 구성 방정식으로 표현하면 다음과 같이 된다.

$$\bar{u}_{,\bar{x}} + \bar{v}_{,\bar{y}} - 1 = 0 \quad (43)$$

$$-\bar{P}_{,\bar{x}} - \alpha \{ 2\bar{u}_{,\bar{x}\bar{x}} + (\bar{u}_{,\bar{y}\bar{y}} + \bar{v}_{,\bar{y}\bar{x}}) \} + \bar{u} = 0 \quad (44a)$$

$$-\bar{P}_{,\bar{y}} - \alpha \{ (\bar{u}_{,\bar{x}\bar{y}} + \bar{v}_{,\bar{x}\bar{x}}) + 2\bar{v}_{,\bar{y}\bar{y}} \} + \bar{v} = 0 \quad (44b)$$

금형-재료 계면의 미끄럼을 지배하는 무차원 상수  $\alpha$ 는 속도장에 의해서 결정되어지며, 그 범위는 0에서  $\infty$  사이에 있다. 마찰이 큰 ( $k_H = \infty$ ) 경우에는 미끄럼이 없고 ( $\alpha = 0$ ), 마찰이 적은 경우 ( $k_H = 0$ )에는 모두 미끄러져 ( $\alpha = \infty$ ) 유동 선단은 초기 충전 상태의 형상을 유지하면서 움직인다.

한편, 연속 및 운동량 방정식에 대한 가중잔차 방정식은 다음과 같다.

$$\int_s \Psi (\bar{u}_{,\bar{x}} + \bar{v}_{,\bar{y}} - 1) d\bar{x}d\bar{y} = 0 \quad (45)$$

$$-\int_s \Phi_{,\bar{x}} \bar{P} d\bar{x}d\bar{y} - 2\alpha \int_s \Phi_{,\bar{x}} \bar{u}_{,\bar{x}} - \alpha \int_s \Phi_{,\bar{y}} \bar{u}_{,\bar{y}} d\bar{x}d\bar{y} - \alpha \int_s \Phi_{,\bar{y}} \bar{v}_{,\bar{y}} d\bar{x}d\bar{y} \quad (46a)$$

$$-\int_s \Phi \bar{u} d\bar{x}d\bar{y} = 0$$

$$-\int_s \Phi_{,\bar{y}} \bar{P} d\bar{y}d\bar{y} - \alpha \int_s \Phi_{,\bar{x}} \bar{u}_{,\bar{y}} d\bar{x}d\bar{y} - \alpha \int_s \Phi_{,\bar{x}} \bar{v}_{,\bar{x}} d\bar{x}d\bar{y} - 2\alpha \int_s \Phi_{,\bar{y}} \bar{v}_{,\bar{y}} \quad (46b)$$

$$-\int_s \Phi \bar{v} d\bar{x}d\bar{y} = 0$$

여기서,  $\Psi$ 는 압력의 형상 함수이고,  $\Phi$ 는 속도  $u, v$ 의 형상 함수이다.

그리고 압력과 속도에 대한 보간 함수  $\Psi$  및 가중 함수  $\Phi$ 를 연속 방정식과 운동량 방정식에 각각 대입 정리하여 이산화 방정식을 구하면 다음과 같다.

$$\int_s (\Psi_\lambda \Phi_{\beta,\bar{x}}) d\bar{x}d\bar{y} \bar{u}_\beta + \int_s (\Psi_\lambda \Phi_{\beta,\bar{y}}) d\bar{x}d\bar{y} \bar{v}_\beta - \int_s (\Psi_\lambda) d\bar{x}d\bar{y} = 0 \quad (47)$$

$$\left[ \left\{ -2\alpha \int_s \Phi_{a,\bar{x}} \Phi_{\beta,\bar{x}} d\bar{x}d\bar{y} - \alpha \int_s \Phi_{a,\bar{y}} \Phi_{\beta,\bar{y}} d\bar{x}d\bar{y} - \int_s \Phi_a \Phi_\beta d\bar{x}d\bar{y} \right\} \bar{u}_\beta - \left\{ \alpha \int_s \Phi_{a,\bar{y}} \Phi_{\beta,\bar{x}} d\bar{x}d\bar{y} \right\} \bar{v}_\beta - \left\{ \int_s \Phi_{a,\bar{x}} \Psi_\lambda d\bar{x}d\bar{y} \right\} \bar{P}_\lambda \right] = 0 \quad (48a)$$

$$\left[ - \left\{ \alpha \int_s \Phi_{a,\bar{x}} \Phi_{\beta,\bar{y}} d\bar{x}d\bar{y} \right\} \bar{u}_\beta - \left\{ \alpha \int_s \Phi_{a,\bar{x}} \Phi_{\beta,\bar{x}} d\bar{x}d\bar{y} + 2\alpha \int_s \Phi_{a,\bar{y}} \Phi_{\beta,\bar{y}} d\bar{x}d\bar{y} + \int_s \Phi_a \Phi_\beta d\bar{x}d\bar{y} \right\} \bar{v}_\beta - \left\{ \int_s \Phi_{a,\bar{y}} \Psi_\lambda d\bar{x}d\bar{y} \right\} \bar{P}_\lambda \right] = 0 \quad (48b)$$

식 (47), (48a), (48b)의 유한 요소 방정식에 경계 조건식을 대입하여 해를 구하면 유속과 압력을 구할 수 있다.<sup>(9)</sup>

단, 여기에서 유속과 압력 분포를 구한 후 확대 흐름인 경우에는 확대 점도( $\mu_e$ )를 고려한 확대 미끄럼 지배 상수( $\alpha_e$ )를 적용시키고, 축소인

경우에는 축소 점도( $\mu_c$ )를 고려한 축소 미끄럼 지배 상수( $\alpha_c$ )를 적용시켜 유동 선단 등에 미치는 이 두 파라미터의 영향을 고찰하였다.

#### 4. 실험

본 실험에 사용된 재료는 모재가 폴리프로필렌, 강화재가 유리 장섬유 매트로 구성된 연속 섬유 강화 열가소성 복합판으로 섬유 함유율은 40wt%이고, 유리 섬유가 강하게 엉켜있으며 두께는 3.8mm, 섬유 및 플라스틱의 밀도는 각각 2.55g/cm<sup>3</sup>, 0.9g/cm<sup>3</sup>이다.

소재는 시판되고있는 일본 이데미쯔 석유 회사 제품인 X-sheet P4038을 사용하였다.

시험편의 치수 및 실험 조건은 외경 160mm, 내경 100mm로 가공하였고, 시험편을 전기 오븐(온도200℃)에서 약 20분간 예열한 후 금형에 충전하여 확대 및 축소 성형을 하였으며, 확대 점

도 측정은 내경이 100mm로 구속된 금형을 사용하였고, 축소 점도 측정은 외경이 160mm로 구속된 금형을 장착하여 각각 압축비의 변화를 주면서 1mm/min, 10mm/min, 100mm/min의 압축 속도로 실험하였다.

실험에 사용한 압축 장치는 만능 인장 압축 시험기(일본 Shinkoh 제품 TOM/ 5000X형, 최대 cross head speed 1300mm/min)에 Fig. 3과 같이 금형을 설치하여 사용하였고, 금형에는 온도 조절을 위하여 히터와 열전대를 부착하여 금형 온도 200℃로 유지하면서 성형하였다. 또한 성형 후 압축 시편은 금형 온도가 50℃가 될때 까지 냉각시킨 후 꺼내었으며, 압축시 성형품의 증공 부분에서 생기는 압력을 제거하기 위하여 축소 점도 측정 금형의 상형에는 중앙에 직경 5mm 정도의 에어 벤트를 설치하여 실험하였다. 압축 하중을 측정하기 위하여 압축 하중 전용 로드 셀과 하중 측정 전용 인디케이터를 사용하여 압축 하중을 측정하였고, 압축된 시험편의 두께는 성형품의 투영 면적을 계산하여 체적 일정 조건으로부터 구하였다.

#### 5. 결과 및 고찰

Fig. 4 (a), (b)는 증공 원형 평판의 바깥지름과 안지름을 각각 구속하고 소정의 두께로 압축한 후 이 때의 하중을 측정하여 성형품의 두께와 압축 하중의 관계를 나타낸 그림이다. 이 두 그림에서 동일 조건인 경우 압축 속도가 빠르면 대체적으로 압축 하중은 증가하고 있으며, 축소 흐름인 경우가 확대 흐름인 경우보다도 큰 값을 나타내고 있음을 알 수 있다. 이러한 현상은 압축 속도가 빠를 수록 복합재의 압축에 필요한 힘이 많이 필요로 하기 때문이며, 확대 흐름인 경우보다는 축소 흐름인 경우가 더 많은 유동 저항을 받기 때문에 당연히 더 큰 하중값을 나타내고 있음을 알 수 있다.

이 그림으로부터 복합재의 구조 점도 지수  $n$ 을 구한 다음 복합재의 구조 점도  $K$ 를 구하였다.

Fig. 5 (a), (b)는 Fig. 4에서 구한 복합재의 구조 점도 지수  $n$ 을 이용하여 구한 복합재의 확대 점도 및 축소 점도에 미치는 전단속도  $\dot{\gamma}$ 의 영향을 나타낸 것이다. 이들 그림에서 압축 속도가 빠르면 낮은 점도값을 나타내고 있는 것은 축

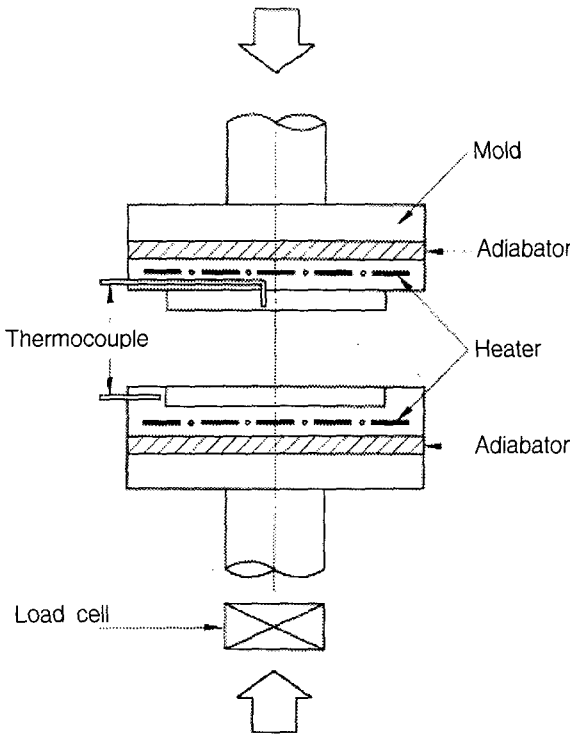
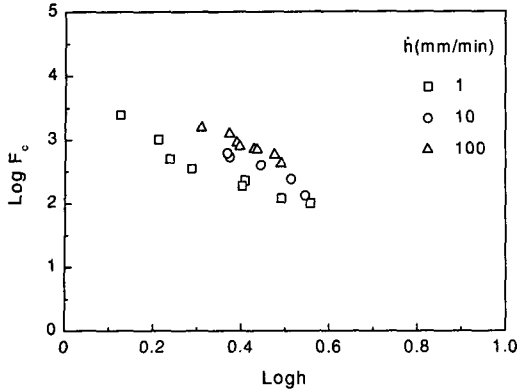
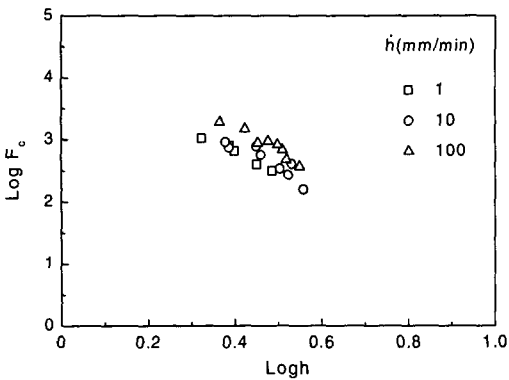


Fig. 3 Schematic diagram of experimental apparatus



(a) Expansion flow

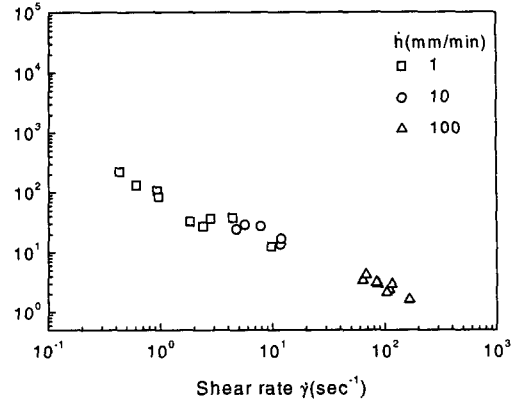


(b) Contraction flow

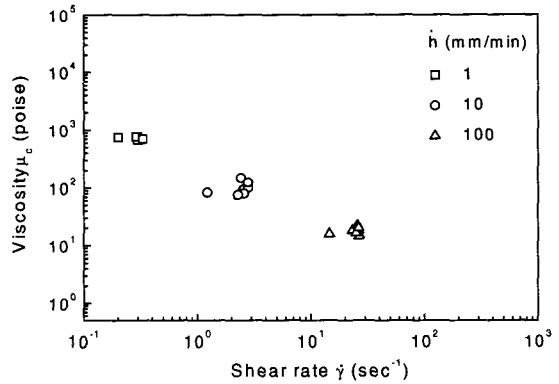
Fig. 4 Relationship between Log  $F_c$  and Log  $h$

소나 확대 흐름인 경우 모두 같은 경향을 나타내고 있으나, 동일한 압축 속도인 경우에는 확대보다는 축소인 경우가 더 높은 점도를 나타내고 있음을 알 수 있다. 그리고 축소/확대 점도비  $\mu_r (= \mu_c/\mu_e)$ 이 약 2.0임을 알 수 있었다.

Fig. 6 (a)~(f)와 Fig. 7 (a)~(f)는 각각 점도비  $\mu_r$ 과 확대 미끄럼 지배 상수  $\alpha_e$ 의 변화에 따른 유동선단의 모양을 나타낸 그림이다. Fig. 6은 외경 160mm, 내경 100mm인 중공원판을 105개의 1차 절점과 168개의 삼각형요소로 분할하였으며, Fig. 7은 한변의 길이가 160mm인 정사각형 중앙에 지름 100mm의 구멍이 있는 형상으로서 Fig. 6과 마찬가지로 105개의 1차 절점과 168개의 삼각형요소로 분할하여 압축성형 해석을 하였다. 이때의 압축속도는 22mm/sec이며 기하학적인 대칭



(a) Expansion flow



(b) Contraction flow

Fig. 5 Viscosity  $\mu$  as a function of shear rate  $\dot{\gamma}$  for various closure speed  $\dot{h}$

성을 고려하여 전체의 1/4만 해석대상으로 하였다.

Fig. 6 (a)~(f)는 점도비  $\mu_r$ 과 확대 미끄럼 지배 상수  $\alpha_e$ 의 변화에 따른 외측형이 원형인 유동선단의 모양을 나타낸 그림이다. 여기에서 유동선단을 구하기 위한 유한 요소 해석에 있어서는 Fig. 5에서 밝힌  $\mu_c > \mu_e$ 의 조건을 이용하여 점도비  $\mu_r$ 은 0.01, 0.1, 1, 5, 10, 100으로 하였다.

이 그림에서 동일한 확대 미끄럼 지배 상수  $\alpha_e$ 인 경우  $\mu_r$ 이 커진다는 의미는 축소 흐름의 점도가 증가하는 것을 의미하고, 확대 미끄럼 지배 상수  $\alpha_e$ 와 점도비  $\mu_r$ 이 증가하면, 외측 유동선단은 바깥쪽으로 많은 변화를 수반하지만, 내측은 축소 점도  $\mu_c$ 의 값이 크기 때문에 거의 유



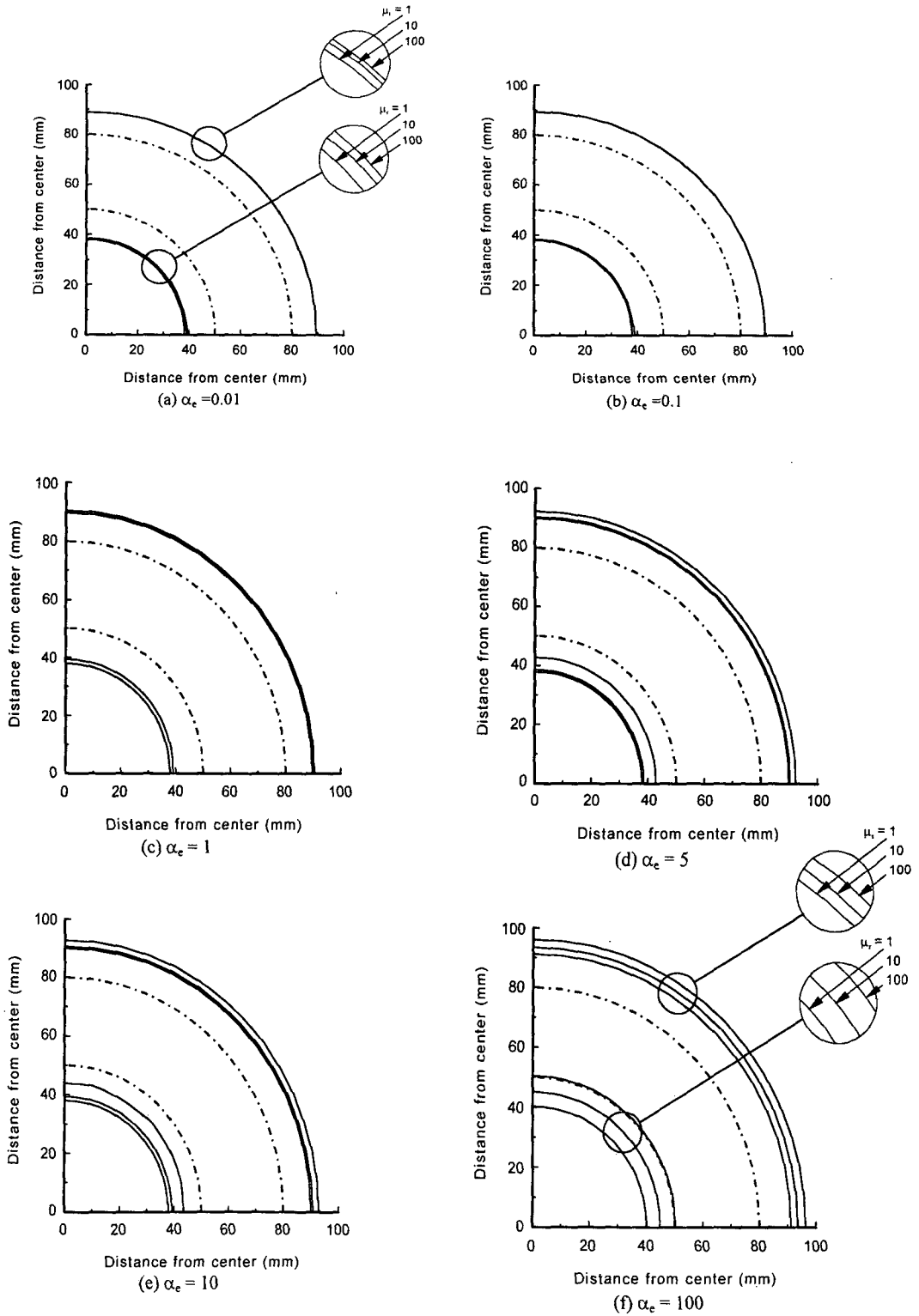


Fig. 6 Effects of slip parameter  $\alpha_e$  on shape of flow front in case of circular shape( $R_{cr} = 0.52$ )

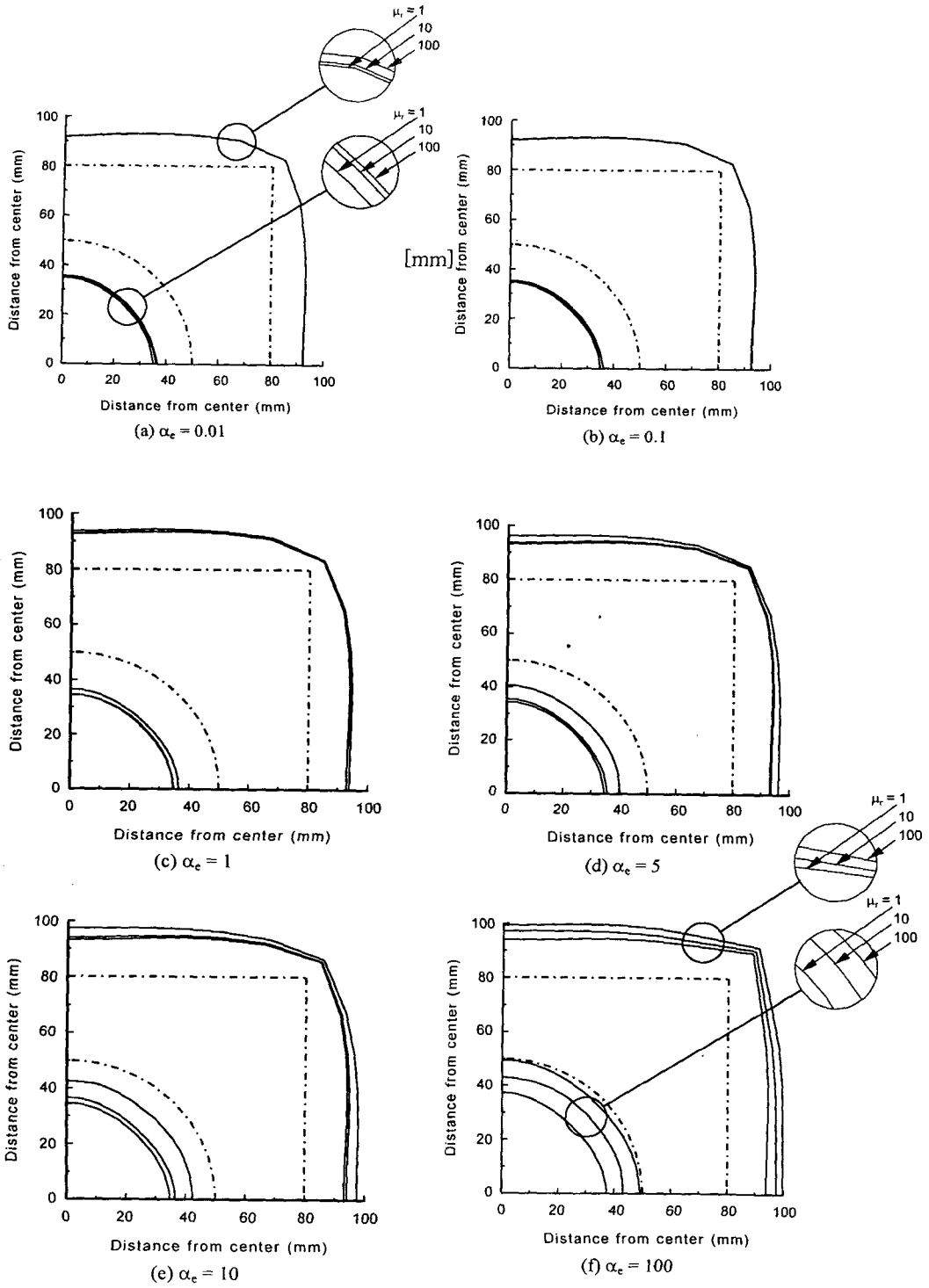
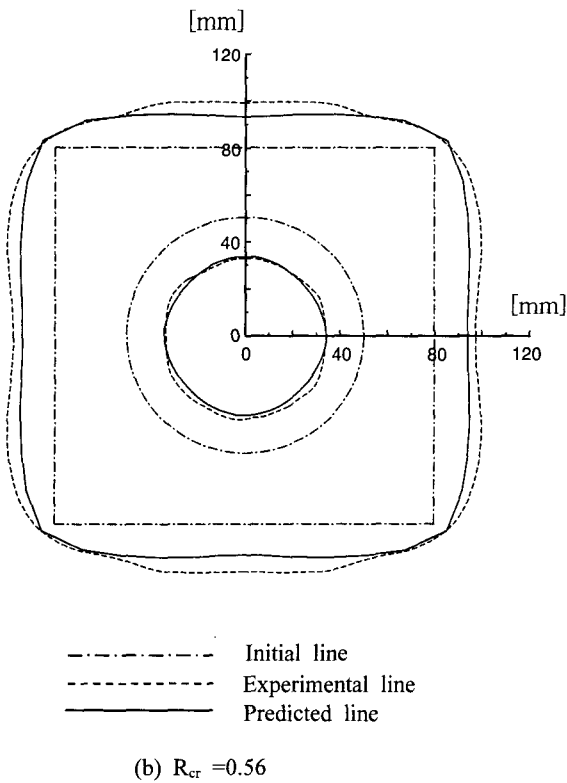
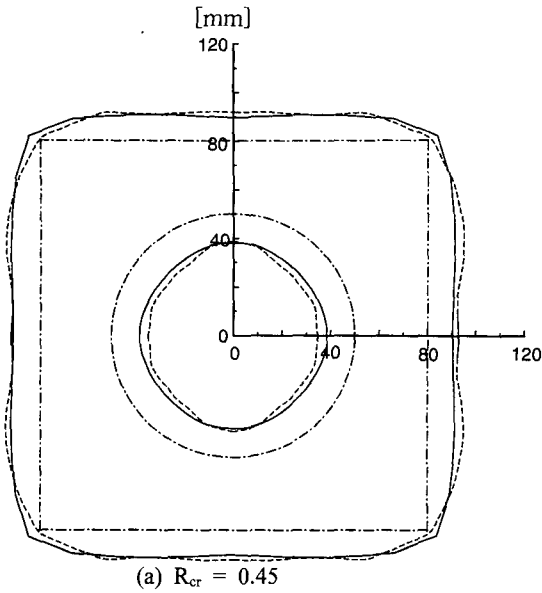


Fig. 7 Effects of slip parameter  $\alpha_e$  on shape of flow front in case of square shape ( $R_{cr} = 0.52$ )



- - - - - Initial line  
 - · - · - Experimental line  
 ——— Predicted line

Fig. 8 Comparison between analytical and experimental result for flow front in case of square shape

동 선단의 모양이 변화하지 않고 있음을 알 수 있다.

Fig. 7 (a)~(f)는 Fig. 6에서와 동일한 조건으로 외측형이 사각형인 유동 선단의 모양을 나타낸 그림이다. 여기에서도 Fig. 6에서와 동일한 결과를 보이고 있음을 알 수 있다.

Fig. 8은 Fig. 7의 조건으로 유한요소해석한 결과와 실험결과를 비교한 것이며, 그림이다. 여기서  $\alpha_e$ 는 필자들이 중공원형 평판의 압축실험을 통하여  $\alpha_e$ 의 범위가 0.01~0.02 사이에 있음을 밝힌바 있다.<sup>(10)</sup> 그래서 해석시  $\alpha_e$ 는 0.015를 사용하였고, 축소/확대 점도비  $\mu_r$ 은 Fig. 5를 통해서 얻은 2.0을 사용하였다. 확대와 축소 흐름이 동시에 발생하게 하여 유동 해석을 하였다. 압축비  $R_{cr}=0.45, 0.56$ 에 따라 실험한 결과와 유동해석을 통해 얻은 유동 선단을 비교하였을 때 유동 선단의 형상이 비교적 일치함을 알 수 있었다.

### 6. 결론

본 연구에서는 확대/축소 흐름의 저항을 나타내는 점도의 측정방법을 제안하고, 이 점도에 미치는 여러 가지 성형조건에 영향을 고찰하였으며, 확대/축소 점도비 및 미끄럼 지배상수의 변화를 고려하여 유동해석 결과, 실험과 잘 일치하여 본 해석모델의 타당함을 입증할 수 있었다. 앞으로 해결해야 할 과제로서는 확대와 축소 유동상태를 동시에 기술할 수 있는 지배방정식의 도출이 필요하며, 온도변화에 따른 점도의 변화까지 고려한 해석모델의 개발이 필요하여 현재 연구 중에 있다.

### 후 기

본 연구는 정밀정형 및 금형가공 연구센터의 지원에 의하여 연구되었으며 연구비 지원에 감사드립니다.

### 참고문헌

(1) Maschmeyer, R. O., and Hill, C. T., 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 White, J. L., 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) Crowson, R. J., and Folkes, M. J., 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) Dienes, G. J., and Klemm, H. F., 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) Whiting, R., and Jacobsen, P. H., 1979, "The Evaluation of Non-Newtonian Viscosity Using a Modified Parallel-Plate Plastometer," *J. of Material Science*, Vol. 14, pp. 307~311.
- (8) 이회균, 조선형, 김이곤, 1997, "장섬유강화 고분자 복합판의 압축성형에 있어서 점성계수 측정," 한국복합재료학회지, 제10권, 제2호, pp. 79~86.
- (9) 조선형, 임영호, 김이곤, 1996, "섬유강화 고분자 복합재료의 압축성형에 있어서 이방성을 고려한 유동해석," 한국복합재료학회지, 제9권, 제1호, pp. 1~9.
- (10) 윤두현, 김형철, 조선형, 김이곤, 1997, "장섬유강화 고분자 복합재료의 압축성형에 있어서 금형면의 미끄럼 지배상수에 관한 연구," 한국복합재료학회지, 제10권, 제4호, pp. 50~58.