

## 論文

장섬유강화 고분자 복합재료의 압축성형에 있어서 금형면의  
미끄럼 지배상수에 관한 연구

윤두현\* · 김형철\*\* · 조선형\*\*\* · 김이곤\*

A Study on the Slip parameter for Compression Molding of Long  
Fiber-Reinforced Polymeric Composites

D. H. Yoon\*, H. C. Kim\*\*, S. H. Jo\*\*\* and E. G. Kim\*

## ABSTRACT

It is important to grasp the flow state during compression molding of fiber reinforced polymeric composites, and the friction condition on the interface between the mold and the composites should be clarified. By using the slip parameter  $\alpha$  which measures the ratio of viscous resistance to friction resistance, the phenomenon of the friction can be well explained.

In this paper, the long fiber reinforced thermoplastics is assumed to be incompressible isotropic fluid, and the effects of fiber content and closure speed on the slip parameter  $\alpha$  are studied by hollow disk compression experiments.

## 초 록

섬유강화 고분자 복합재를 압축성형하는 경우의 정확한 유동상태를 알기 위해서는 금형과 재료계면에서 발생하는 마찰상태를 파악해야 한다. 성형중 재료의 점성과 마찰저항의 비를 알게되면 측정할 수 있는 미끄럼 지배상수  $\alpha$ 를 이용함으로써 마찰상태를 정확히 나타낼 수 있다. 그러므로 본 논문에서는 장섬유강화 고분자 복합재를 해석하는 경우 균질 등방성 유체라 가정하고, 중공원형 압축실험에 의하여 미끄럼 지배상수  $\alpha$ 에 미치는 복합재내의 섬유함유율과 압축속도의 영향에 대하여 고찰한 결과를 보고한다.

## 기 호 설 명

$r, \theta, z$	: 좌표축	$r_i$	: 내측반경
$E_r$	: 총에너지	$r_n$	: 중립면 반경
$E_i$	: 변형에너지	$r_o$	: 외측반경
$E_f$	: 마찰에너지	$R_{cr}$	: 압축비(1-h/h <sub>0</sub> )
$h$	: 성형품의 두께	$F$	: 압축성형 하중
$h_0$	: 복합재의 초기두께	$\mu$	: 점도
$\dot{h}$	: 압축속도	$v_r$	: r방향의 속도

\* 국민대학교 기계공학부, 정밀정형 및 금형가공연구센터

\*\* 인천전문대학 기계설계과

\*\*\* 대우공업전문대학 금형설계과

$v_\theta$	: $\theta$ 방향의 속도	$k_n$	: 유체마찰계수
$v_z$	: $z$ 방향의 속도	$\xi$	: 중립면 반경비
$\alpha$	: 미끄럼 지배상수	$\lambda$	: 내외 반경비
$\beta$	: 벌징변수	$\varepsilon$	: 변형율 속도
$\tau$	: 계면의 전단응력		

### 1. 서 론

장섬유로 강화된 플라스틱 복합재는 항공기나 자동차 등의 경량화 추세에 힘입어 날로 그 용도의 확대가 기대되고 있으며, 주로 재료를 고온에서 압축성형하여 부품으로 이용하고 있다. 이러한 섬유 강화 플라스틱 복합재를 고온에서 압축성형하는 경우에는, 가열된 금형내에 고온의 시험편이 놓여지고 펀치가 하강함으로써 압축성형이 이루어진다. 이 과정에서 금형과 복합재사이의 계면에서는 미끄럼이 발생되는데, 금형 내에서의 정확한 유동상태를 알기 위해서는 재료와 금형과의 접촉계면에 있어서의 마찰상태나 이것으로 인한 벌징(Bulging) 등 여러 가지 현상들을 정확히 파악하는 것이 필요하다.

금속 등의 고체재료에 대한 계면에서의 마찰을 구하는 방법은, 링형상의 시험편을 판두께 방향으로 압축하여 그 변형상태를 이론적으로 해석한 결과가 있다[1~6]. 그리고 섬유로 강화된 복합재의 압축성형에 있어서 금형과 재료사이의 마찰을 고려한 해석에 관한 연구로서 Barone & Caulk 등[7, 8]은 SMC재의 두께변화를 수반한 압축성형을 통하여 금형표면과 재료사이에는 미끄럼이 존재하며 이를 지배하는 상수로 유체마찰계수를 제안하였고, 이것을 이용하여 금형표면과 수지와와의 미끄럼을 고려한 지배방정식으로 유동해석을 하였으며, Barone과 Osswald[9]는 이러한 방정식을 이용하여 경계요소법으로 SMC재의 유동상태와 니트라 인 등에 관한 해석을 하였다. 또한 Hojo와 Kim [10] 및 장수학 등[11]은 중공원형 평판압축 실험을 통하여 미끄럼 상태를 지배하는 상수를 Barone 등이 구한 방법과는 별도로 구하였고, 박승희 등[12]은 벌징현상을 고려한 금형-재료계면의 미끄럼에 관한 연구를 하였으며, 조선형 등[13]은 이방성이 강한 한 방향 섬유강화 복합재에 대해 금형-재료계

면의 마찰을 고려한 유동해석을 하였다.

그러나 복합재내에 함유되어 있는 섬유 함유율 등의 재료요인이나 압축속도나 압축비 등과 같은 성형조건이 미끄럼이나 이로 인한 벌징현상에 미치는 영향에 대해서 연구한 결과는 아직 없는 상태이므로 본 연구에서는 금형-재료계면의 미끄럼과 벌징변수에 미치는 섬유 함유율과 압축속도의 영향에 대해서 고찰할 내용을 보고한다.

### 2. 이 론

#### 2-1. 미끄럼 지배상수 및 벌징변수

Fig. 1과 같이 중공원형 평판에 하중  $F$ 를 가해서 압축한다. 그림에서 표시된  $r_i, r_o, r_n$  은 각각 내반경, 외반경, 중립면반경이며, 여기서 중립면 반경이란 성형후, 중공원형 안지름과 바깥지름의 사이에 지름의 변화가 생기지 않는 부분을 말한다. 성형중의 재료의 속도를 구할 때, 복합재료는 유체이며 비압축성이라 가정하고, 물체력 및 관성력을 무시하면 압축에 필요한 총에너지  $E_T$  는

$$E_T = E_i + E_f \dots\dots\dots (1)$$

여기서  $E_i$ 는 재료의 내부에서 변형에 필요한 에너지,  $E_f$ 는 재료와 금형과의 계면에서 행해지는 마찰 에너지이다.

$r, \theta, z$  방향의 속도는[4, 14]

$$\begin{aligned} v_r &= Ar(1 - \beta z^2) \{1 - (r_n/r)^2\} \\ v_\theta &= 0 \\ v_z &= -2Az(1 - \beta z^2/3) \dots\dots\dots (2) \end{aligned}$$

식 (2)에서  $A = \frac{\dot{h}}{2h\{1 - \beta(h^2/12)\}}$  이다.

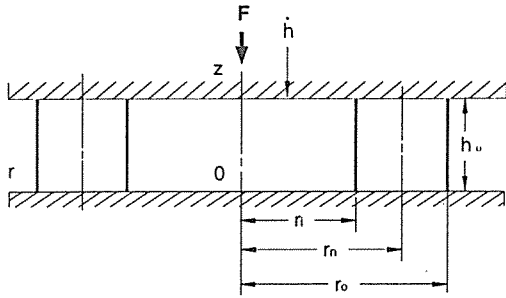


Fig. 1. Nomenclature for model of compression molding of circular hollow disk.

A에서  $\beta$ 는 벌징현상의 정도를 나타내는 벌징 매개변수로서,  $\beta$ 가 0인 경우는 재료가 벌징이 없는 경우이다. 한편,  $r, \theta, z$  방향의 변형률 속도는 식 (2)를 이용하면

$$\begin{aligned} \dot{\epsilon}_{rr} &= \frac{\partial v_r}{\partial r} = A(1 - \beta z^2)\{1 + (r_n/r)^2\} \\ \dot{\epsilon}_{\theta\theta} &= \frac{v_r}{r} = A(1 - \beta z^2)\{1 - (r_n/r)^2\} \\ \dot{\epsilon}_{zz} &= \frac{\partial v_z}{\partial z} = -2A(1 - \beta z^2) \dots \dots \dots (3) \\ \dot{\epsilon}_{rz} &= \frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial z} = -2A\beta zr\{1 - (r_n/r)^2\} \\ \dot{\epsilon}_{\theta z} &= \dot{\epsilon}_{r\theta} = 0 \end{aligned}$$

그리고 재료의 변형에너지  $E_i$ 는

$$E_i = \int 2\mu \dot{\epsilon}_{ij} \dot{\epsilon}_{ij} dv \dots \dots \dots (4)$$

이고,  $\mu$ 는 재료의 점도이다. 식 (3)을 식 (4)에 대입하고 축속유동인 경우의 적분구간과 확대구간인 경우에 대해서 각각 적분하면

$$\begin{aligned} E_i &= 8\pi\mu [A^2\{h/2 - (h^3/12)\beta + (h^2/160)\beta^2\} \\ &\quad \times \{(r_o^2 - r_i^2) + r_n^2(1/r_i^2 - 1/r_o^2)\} \\ &\quad + (2A^2\beta^2 h^3)/3\{(r_o^4 - r_i^4)/4 - r_n^2(r_o^2 - r_i^2) + r_n^4 \ln(r_o/r_i)\}] \dots \dots \dots (5) \end{aligned}$$

재료와 계면에는 얇은 유체막이 존재하며, 이 유체막의 전단에 의해서 마찰력이 발생한다고 가정

한다. 그러면 유체막에서의 전단응력은

$$\tau = k_H v_r \dots \dots \dots (6)$$

여기서  $k_H$ 는 상수로서 유체마찰계수로 정의하며,  $v_r$ 은 반경방향의 속도이며, 금형과 재료가 맞닿는 계면(s)에서의 마찰에너지  $E_f$ 는 다음과 같다.

$$E_f = \int \tau v_r ds \dots \dots \dots (7)$$

식 (7)을 식 (4)와 같은 적분구간으로 계산하면

$$\begin{aligned} E_f &= 4\pi k_H A^2 \{1 - (\beta h^2)/4\}^2 \{(r_o^4 - r_i^4)/4 \\ &\quad - r_n^2(r_o^2 - r_i^2) + r_n^4 \ln(r_o/r_i)\} \dots \dots \dots (8) \end{aligned}$$

따라서 압축에 필요한 총에너지  $E_T$ 는

$$\begin{aligned} E_T &= 8\pi\mu [A^2\{h/2 - (h^3/12)\beta + (h^2/160)\beta^2\} \{3(r_o^2 - r_i^2) \\ &\quad + r_n^2(1/r_i^2 - 1/r_o^2)\} + \{(\beta^2 h^3)/3\} \times \{(r_o^4 - r_i^4)/ \\ &\quad 4 - r_n^2(r_o^2 - r_i^2) + r_n^4 \ln(r_o/r_i)\}] + 4k_H A^2 \{1 - (\beta h^2)/4\} \\ &\quad \times \{(r_o^4 - r_i^4)/4 - r_n^2(r_o^2 - r_i^2) + r_n^4 \ln(r_o/r_i)\} \dots \dots (9) \end{aligned}$$

그리고, 총에너지  $E_T$ 를  $r_n$ 에 관해서 편미분하여 정리하면 중립면 반경비  $\xi$ 는

$$\xi^2 = \frac{\{(2/3)\alpha D + B\}(1 - \lambda^2)}{\{2\alpha C(\lambda^2 - 1)\} - \{(4/3)\alpha D + 2B\} \ln \lambda} \dots (10)$$

여기서

$\lambda$ 는 내외반경비( $r_i/r_o$ ),  $\xi$ 는 중립면반경비( $r_n/r_o$ ) 이고,  $\alpha = \mu h/k_H r_o^2$ ,  $B = \{1 - (\beta h^2)/4\}^2$ ,  $C = 1 - (h^2/80)\beta + (h^4/80)\beta^2$ ,  $D = r_o^2 \beta^2 h^2$ 이다. 여기서  $\beta=0$ 인 경우 식 (10)은 벌징을 고려하지 않는 경우와 일치한다[7].

총에너지  $E_T$ 를  $\beta$ 에 관해서 편미분하면 벌징 매개변수  $\beta$ 는

$$\beta = \frac{(1/3)\alpha E + K}{(h^2/20)\alpha E + \{(8/3)\alpha r_o^2 + (h^2/4)\}K} \dots \dots (11)$$

여기서  $K = (1/4)(1 - \lambda^4) - \xi^2(1 - \lambda^2) - \xi^4 \ln \lambda$ ,  $E = 3(1 - \lambda^2) + \xi^4(\lambda^2 - 1)$ 이다.

따라서, 식 (10)에 식 (11)을 대입하여  $\alpha$ 에 관한

식으로 변환한 후, Gauss-Jordan법을 이용하면  $\alpha$ 와  $\beta$ 를 구할 수 있다.

### 2-2. 중립면의 위치결정[8]

Fig. 2와 같이, 재료를 두께  $h$ 에서  $\Delta h$ 만큼 압축 후의 외반경 및 내반경을 각각  $r_o', r_i'$ 라고 하면 체적 일정의 조건에서

$$\pi(r_o'^2 - r_i'^2)(h - \Delta h) = \pi(r_o^2 - r_i^2)\Delta h \quad (12)$$

$$\pi(r_i'^2 - r_i^2)(h - \Delta h) = \pi(r_i^2 - r_n^2)\Delta h \quad (13)$$

$$\frac{r_i'^2 - r_i^2}{r_o'^2 - r_o^2} = \frac{r_i^2 - r_n^2}{r_o^2 - r_n^2} = \frac{\xi^2 - \lambda^2}{1 - \xi^2} \quad (14)$$

식 (14)로부터

$$\xi^2 = \frac{G + \lambda^2}{1 + G} \quad (15)$$

여기서,  $G = (r_i'^2 - r_i^2)/(r_o'^2 - r_o^2)$ 이며, 식 (14)에서 성형 전후의 내·외반경을 측정하여 중립면의 반경  $r_n$ 을 계산한다.

### 3. 실험

실험에 사용된 복합판은 실험실에서 제작한 것 (모재 : 폴리프로필렌, 강화재 : 장섬유메트, 섬유함유율 : 20wt%, 30wt%, 40wt%, 50wt%)으로 장섬유가 서로 강하게 엉켜져 있다. 시험편의 치수 및 실험조건은 각각의 섬유함유율별로 외경은 140mm이고, 내경은 각각 40mm, 60mm, 100mm로 하였다. 시험편을 가열용 전기로(온도 : 200°C)에서 약 25분간 가열하여 Fig. 3과 같은 금

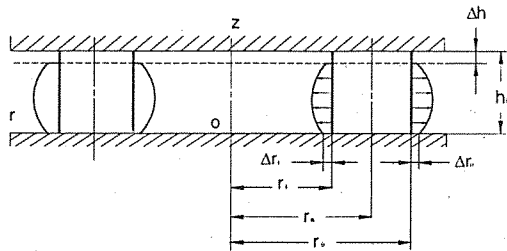


Fig. 2. Experimental determination of neutral radius  $r_n$ .

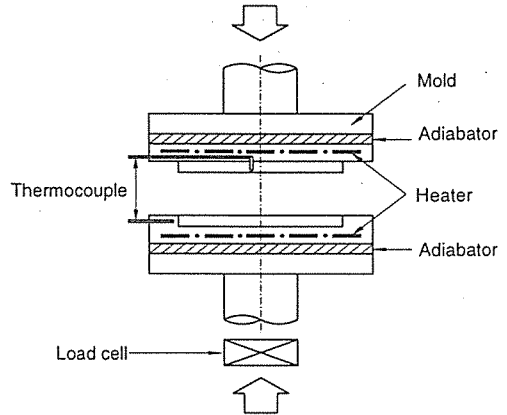


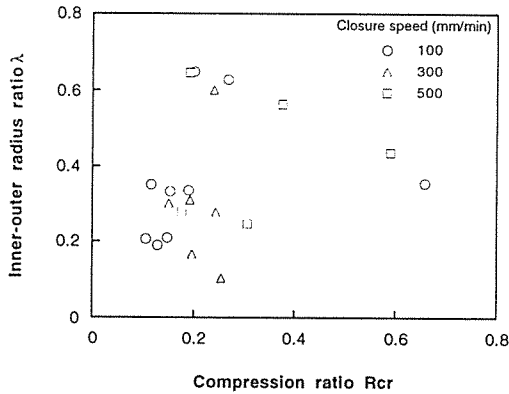
Fig. 3. Schematic diagram of the experimental apparatus.

형에 충전하여 성형하였다. 압축장치는 만능인장 압축 시험기(Shinkoh제, TOM/5000X형, 최대 Cross head speed 1300mm/min)를 사용하였으며, 금형의 온도조절을 위하여 열전대를 부착하였다. 압축속도는 100, 300, 500mm/min이며, 압축시 성형품의 중공부분에서 생기는 압력을 제거하기 위하여 펀치부분의 중앙에 직경 4mm인 에어벤트(Air vent)를 설치하였다.

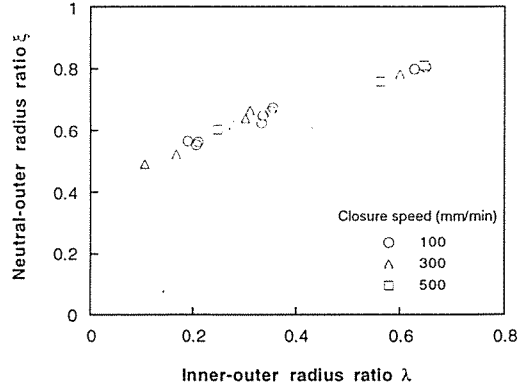
### 4. 결과 및 고찰

Fig. 4는 내외 반경비  $\lambda$ 에 미치는 압축비  $R_c$ 의 영향을 나타낸 그림이다. 이 그림에서 압축비가 증가할수록 내외 반경비  $\lambda$ 가 감소하는 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다. 이것은 두께가 얇게 되면 원형시험편의 외측과 내측으로의 형상변화가 많게 되기 때문이며, 이러한 현상은 성형품내의 섬유함유율이나 압축속도에는 큰 영향이 없음을 알 수 있다. 중립면 반경비  $\xi$ 에 미치는 내외 반경비  $\lambda$ 의 영향을 Fig. 5에 나타내었다. 내외 반경비가 증가할수록 중립면 외반경비  $\xi$ 가 증가하는 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다. 동일한 외경인 경우, 중립면 반경이 감소할 때  $\xi$ 가 감소하므로  $\lambda$ 도 감소하는 경향을 나타낸다. 이러한 현상은 성형품 내의 섬유함유율이나 압축속도에는 큰 영향이 없음을 알 수 있다.

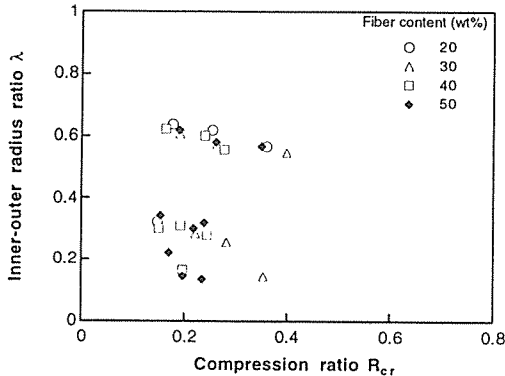
Fig. 6과 Fig. 7은 식 (11)의 벌징변수  $\beta$ 에 미치



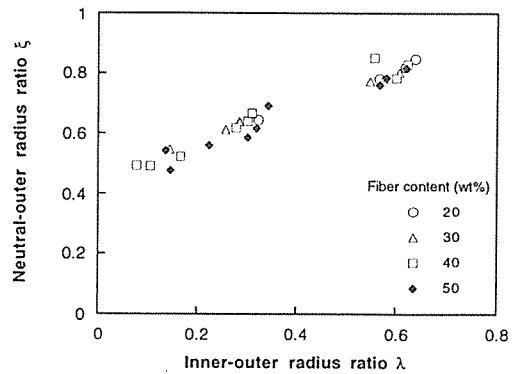
(a) Effect of closure speed (40 wt%)



(a) Effect of closure speed (40 wt%)



(b) Effect of fiber content (300 mm/min)



(b) Effect of fiber content (300 mm/min)

Fig. 4. Relationship between inner-outer radius ratio  $\lambda$  and compression ratio  $R_{cr}$ .

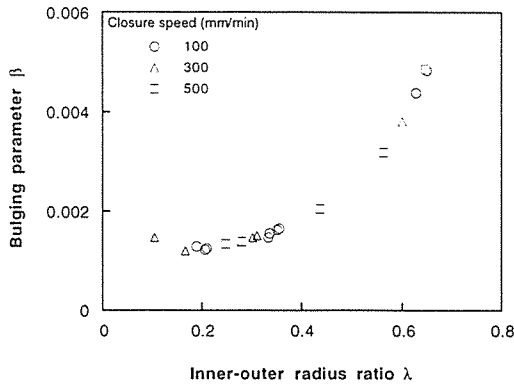
Fig. 5. Relationship between inner-outer radius ratio  $\lambda$  and neutral-outer radius ratio  $\xi$ .

는 내외 반경비  $\lambda$  및 중립면 반경비  $\xi$ 의 영향을 나타낸 그림이다. 이 그림에서 내외 반경비  $\lambda$  및 중립면 반경비  $\xi$ 가 증가하면 벌장변수  $\beta$ 가 증가하며, 압축속도나 섬유함유율에 영향을 받지 않는다.

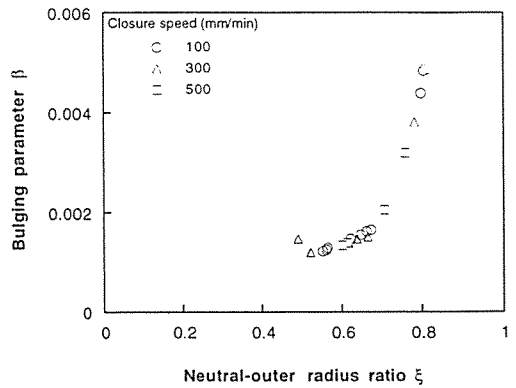
미끄럼 지배상수  $\alpha$ 에 미치는 시험편의 내외반경비  $\lambda$ 와 중립면 반경비  $\xi$ 의 영향을 Fig. 8과 Fig. 9에 나타내었다. 동일한 내반경  $r_i$ 인 경우  $\alpha$ 가 증가하면 미끄럼이 큰 상태가 되므로  $r_o$ 가 커지게 되어,  $\lambda$ 는 감소하는 결과를 초래하기 때문에 시험편의 내외반경비  $\lambda$ 가 증가하면 미끄럼 지배상수  $\alpha$ 는 감소한다.

또한 미끄럼 지배상수  $\alpha$ 가 커짐에 따라서 중립면 반경  $r_n$ 이 감소하게 되므로  $\xi$ 도 감소하게 되며, 동일한 시험편에 대해서 내외 반경비  $\lambda$ 의 변화가 중립면 반경비  $\xi$ 의 변화보다 큰 범위에 있기 때문에 기울기가 더 급한 경향을 나타내고 있다. 이 그림으로 부터 미끄럼 지배상수  $\alpha$ 의 범위는 대략 0.01~0.02사이에 있음을 알 수 있다.

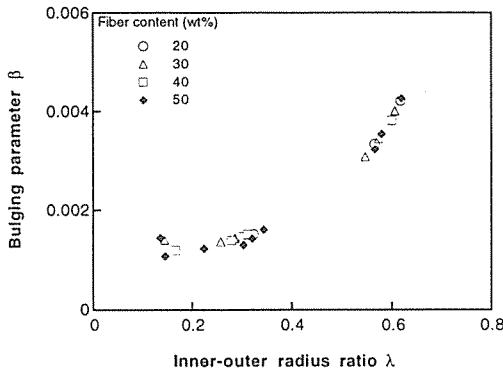
Fig. 10은 점도와 유체마찰계수와의 비  $k_H/\mu$ 에 미치는 내외 반경비  $\lambda$ 의 영향을 나타낸 그림이다. 여기에서  $k_H/\mu$ 는 미끄럼 지배상수  $\alpha$ 에서 유체마찰계수와 점도와의 비, 즉 마찰과 점성과의 비로서



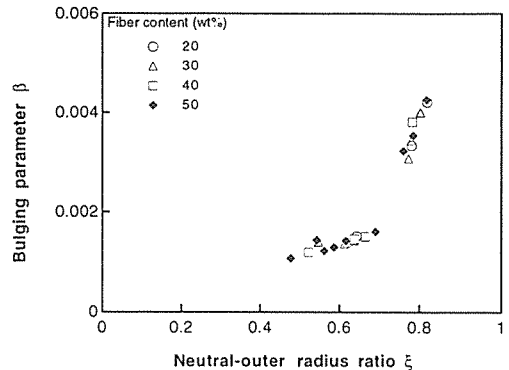
(a) Effect of closure speed (40 wt%)



(a) Effect of closure speed (40 wt%)



(b) Effect of fiber content (300 mm/min)



(b) Effect of fiber content (300 mm/min)

Fig. 6. Bulging parameter  $\beta$  as a function of liner-outer radius ratio  $\lambda$ .

Fig. 7. Bulging parameter  $\beta$  as a function of neutral-outer radius ratio  $\xi$ .

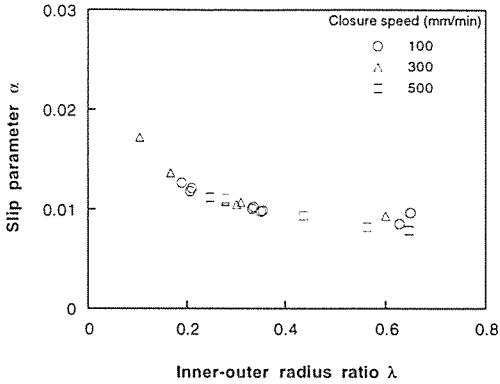
접도의 값이 일정한 경우 성형품의 내외 반경비  $\lambda$  를 이용하여 유체마찰계수  $k_H$ 의 값을 정량적으로 구할 수 있는 그림이다. 이 그림에서도 Fig. 8과 마찬가지로  $\lambda$ 가 증가하면  $k_H/\mu$ 는 감소하는 경향을 나타내고 있는데, 동일한 내반경  $r_i$ 인 경우  $k_H/\mu$ 가 증가하면 미끄럼이 커지는 상태가 되므로  $r_o$ 가 커지고, 따라서  $\lambda$ 가 적어지기 때문이며 시험편의 섬유함유율, 압축속도의 변화에는 큰 영향을 받고 있지 않음을 알 수 있다.

Fig. 11은 Fig. 8, Fig. 9에서 구한 금형-재료계면의 미끄럼 지배상수  $\alpha$ 값의 검증을 위하여 이론

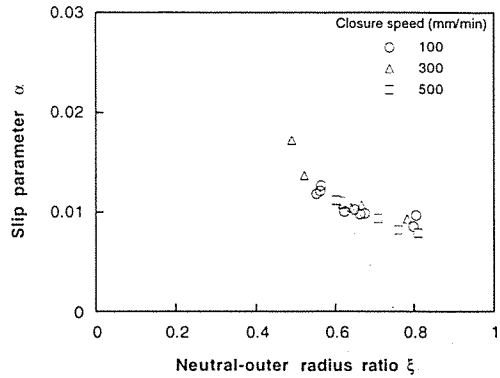
해석 결과와 실험치를 비교하였다. 유동해석에 있어서  $\alpha$ 는 0, 1, 10, 100인 경우로 선택하였고, 압축비는 0.117, 0.343으로서 실험치와 비교하였을 때 미끄럼 지배상수  $\alpha$ 가 거의 0에 접근함을 알 수 있다.

### 5. 결 론

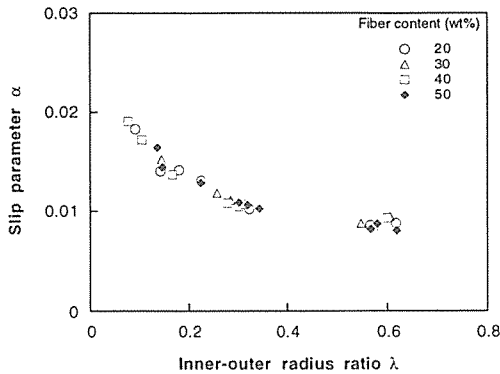
복합재료를 압축성형하는 경우 금형-재료계면의 미끄럼 지배상수와 벌징변수에 미치는 섬유함유율과 압축속도의 영향에 대해서 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.



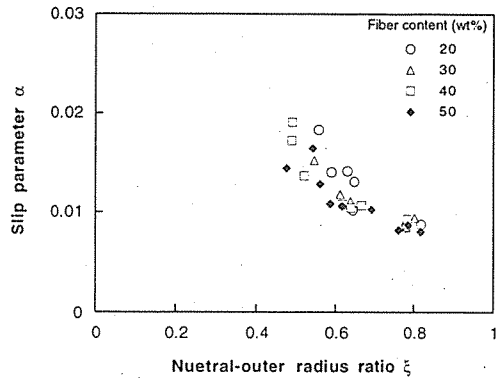
(a) Effect of closure speed (40 wt%)



(a) Effect of closure speed (40 wt%)



(b) Effect of fiber content (300 mm/min)



(b) Effect of fiber content (300 mm/min)

Fig. 8. Slip parameter  $\alpha$  as a function of inner-outer radius ratio  $\lambda$ .Fig. 9. Slip parameter  $\alpha$  as a function of neutral-outer radius ratio  $\xi$ .

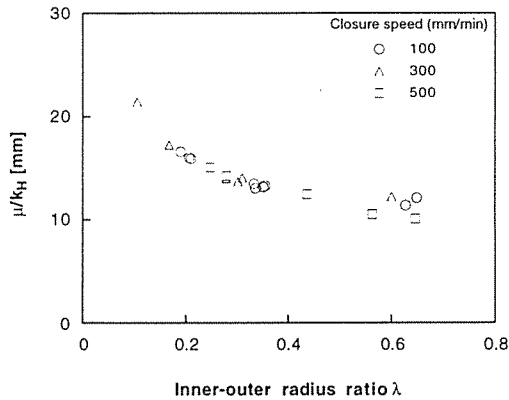
1. 압축속도, 섬유함유율은 미끄럼 지배상수 및 벌정변수에 큰 영향을 미치지 않는다.
2. 내외 반경비  $\lambda$ 가 증가할때 중립면 반경비  $\xi$ 도 증가하였다.
3. 내외 반경비  $\lambda$ 와 중립면 반경비  $\xi$ 가 증가하면 미끄럼지배상수  $\alpha$ 는 감소하는 경향을 나타내지만 벌정변수  $\beta$ 의 변화 값은 크지 않았다.
4. 복합재내의 마찰과 점성과의 비  $k_H/\mu$ 는 내외반경비  $\lambda$ 가 증가하면 감소한다.
5. 금형-재료계면의 미끄럼 지배상수의 값은 0~1 사이에 있음을 알 수 있다.

## 후 기

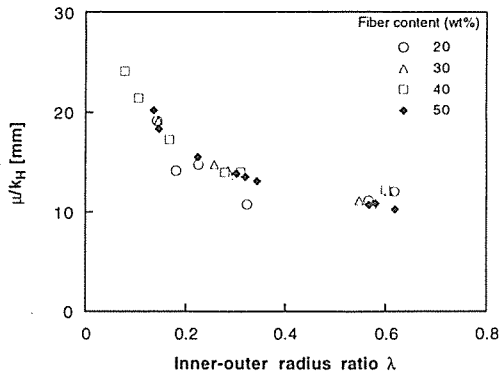
본 연구는 정밀정형 및 금형가공 연구센터의 지원에 의하여 연구되었으며 연구비 지원에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

1. S. Fukui, T. Ohi, H. Kudo, I. Takita, and J. Seino, "Some Aspects of Friction in Metal-strip Drawing", *Intern. J. Mech. Sci.*, Vol. 4,



(a) Effect of closure speed (40 wt%)



(b) Effect of fiber content (300 mm/min)

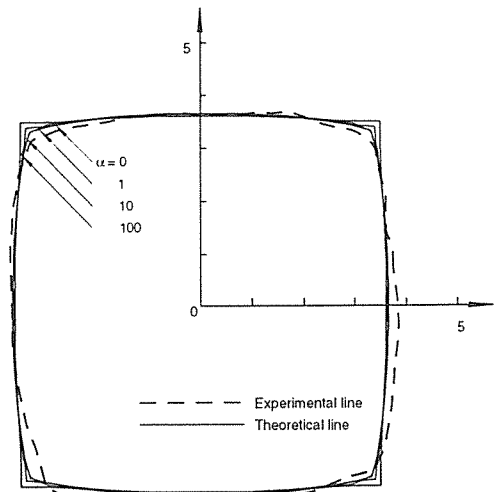
Fig. 10. Effects of inner-outer radius ratio  $\lambda$  on  $\mu/k_H$ .

1962, pp.297~314.

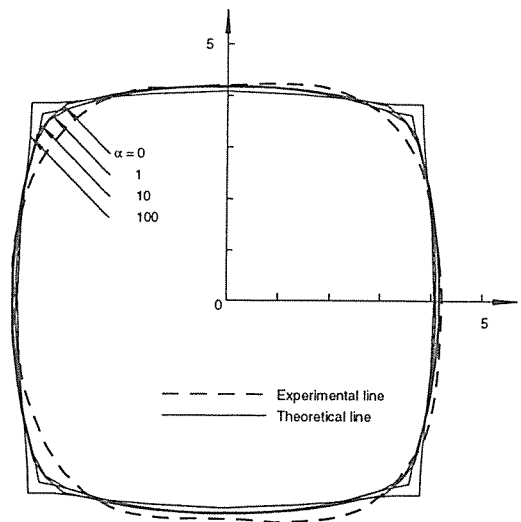
2. A. T. Male and M. G. Cockroft, "A Method for the Determination of the Coefficient of Friction of Metals under Conditions of Bulk Plastic Deformation", *J. Inst. Metals*, Vol. 92, 1964, pp.38~46.

3. Betzalel Avitzur, "Metal Forming Processes and Analysis", *McGraw-Hill Book Company*, 1968.

4. Lee, C. H and Altan, T., "Influence of Flow Stress and Friction upon Metal Flow in



(a) Rcr = 0.117



(b) Rcr = 0.343

Fig. 11. Comparison between theoretical and experimental results for various slip parameter  $\alpha$ .

Upset Forging of Rings and Cylinders", *ASME J. Eng. Ind.*, Vol. 94, 1972, p.782.

5. Saul, G., Altan, T., and Depierre, V., "A New Method for the Determination of Material Flow Stress Values under Metalworking



Conditions", in *Metal Forming : Interrelation between Theory and Practice*(ed. A.L. Hoffmann), 1971, p.293.

6. Douglas, J. R. and Altan, T., "Flow Stress Determination for Metals at Forging Rates Temperatures", *ASME J. ENG. land.*, Vol. 97, 1975, p.66.

7. Barone, M. R. and Caulk, D. A., "A Model for the Flow of a Chopped Fiber Reinforced Polymer Compound in Compression Molding", *J. Applied Mechanics*, Vol. 53, 1986, pp.361~371.

8. Barone, M. R. and Caulk, D. A., "Kinematics of Flow in Sheet Molding Compound", *Polymer Composites*, Vol. 6, 1985, pp.105~109.

9. Barone, M. R. and Osswald, T. A., "A Boundary Element Analysis of Flow Sheet Molding Compound", *Polymer Composites*, Vol. 9, 1988, pp.158~163.

10. Hojo, H., Kim, E. G., Onodera, T., Yaguchi, H., Kim, S. H., Koshimoto, M., "Position of Neutral Surface during Hollow Disk Compression

pression Molding of Long Fibre-Reinforced Thermoplastics", *Int. Polym. Process.* Vol. 4, 1989, pp.179~182.

11. 장수학, 김석호, 백남주, 김이곤, "섬유강화 고분자 복합판의 압축성형에 있어서 금형-재료 계면의 미끄럼을 고려한 유동해석", *대한기계학회 논문집*, 제15권, 제1호, 1991, pp.163~168.

12. 박승희, 이동기, 김이곤, "장섬유강화 고분자 복합판의 압축성형에 있어서 벌징을 고려한 금형-재료 계면의 미끄럼에 관한 연구", *대한기계학회 논문집*, 제17권, 제4호, 1993, pp.740~745.

13. 조선형, 임영호, 김이곤, "섬유강화 고분자 복합재료의 압축성형에 있어서 이방성을 고려한 유동해석", *한국복합재료학회지*, 제9권, 제1호, 1996, pp.1~9.

14. Kobayashi, S. and Thomsen, E. G., "Upper and Lower-Bound Solutions to Axisymmetric Compression and Extrusion Problems", *Intern. J. Mech. Sci.*, Vol. 7, 1965, pp. 127.