

# 사출성형된 섬유강화 플라스틱 복합재의 뒤틀림에 관한 연구(이론과 실험 결과의 비교)

제충모<sup>\*</sup>, 조선형<sup>\*\*</sup>, 김이곤<sup>\*</sup>

## A Study on Warpage of Injection molded Fiber Reinforced Plastic Composites (Comparison between Theoretical and Experimental results)

C. M. Je<sup>\*</sup>, S. H. Jo<sup>\*\*</sup>, E. G. Kim<sup>\*</sup>

### Abstract

The injection molded part shrinks in the process of solidification by the amount of the coefficient of linear thermal expansion multiplied by the temperature difference between the room temperature and the temperature at which the solid structure is formed in the mold. And it is called warpage for this type of deformation that shrinkage are not uniform throughout the injection molded part. To predict warpage phenomena in the articles, the results obtained theoretically from the change of mold temperature, fiber content of composites have been compared with experimental results.

**Key Words** : Injection Molding, Warpage, Shrinkage, Long Fiber, Short Fiber, Mold Temperature, Fiber Content

### 1. 서론

사출성형된 섬유강화 플라스틱 복합재는 수지 단일체에 비하여 비강성, 비강도, 내열성 등의 기계적 강도와 생산성이 뛰어나기 때문에 고강도와 제품의 정밀성 및 경량화가 요구되는 자동차나 기타 산업용 부품 등의 보조부재로 널리 이용되고 있다. 이러한 섬유강화 플라스틱 복합재에 대한 사출성형 공정은 수지의 가소화 과정을 거쳐 캐비티내로의 충전, 보압, 냉각 및 이형과 같은 일련의 과정을 거침으로써 성형이 완료된다.

충전과정 동안에 용융 상태의 수지가 금형내부로 사출되는 동안 금형 내부의 압력은 서서히 증가하고, 냉각된 금형과 고온의 수지가 접촉함에 따라 냉각되는 비정상 상태의 유동을 하며, 이때 분수 유동과 분자 배향이 이루어진다. 또한, 높은 성형 압력이 밀도의 변화에 주도적으로 기여하고, 따라서 마지막까지 성형품이 일정하지

않은 수축을 하게되고, 이것은 또한 성형품에 변형을 유발시키는 원인이 된다. 즉, 불균일한 냉각 온도, 불균일한 분자의 정렬상태, 잔류응력 등이 요인이 되어 성형품은 원래의 모양과 비교하여 뒤틀린 형태를 가지게 되는데 이것을 워핑(Warping)이라고 한다.

사출성형에 있어서의 이러한 요인들을 고찰한 예를 살펴보면, Kamal과 Kenig<sup>(1)</sup>는 최초로 보압 과정에 대한 수학적 해석을 시도하였고, Kamal<sup>(2)</sup> 등은 이전의 연구를 더욱 발전시켜 압력에 대한 비선형 방정식을 구한 후 이를 선형화시켰고, 이를 통해 금형내의 압력에 대한 해석을 하였으며 이를 사각형 형상의 금형에 적용하였다. Wang<sup>(3)</sup> 등은 보압 및 냉각 과정을 함께 다룰수 있는 후충전 과정에 대한 모델을 유도하고, 전단율, 온도 및 압력이 점성에 미치는 영향에 관한 연구를 하여 수정된 Cross모형을 제시하였고, Kikuchi 와 Koyama<sup>(4,5)</sup>는 사출성형된 성형품에 대하여 뒤틀림, 이방성, 제품 두께 사이에서의 관계에 대해서 수치적으로 연구를 하였으며,

\* 국민대학교 기계·자동차 공학부

\*\* 동서울대학 금형설계과

Dupret 등은<sup>(6)</sup> 사출성형시 종전 동안의 이방성 효과를 수치적으로 나타내었다. Chi J. Yu, Sunderland 등은<sup>(7)</sup> 사출성형된 제품과 그 금형사이에서의 열접촉 저항을 얻기 위한 방법은 설명하였으며, Wang 등은<sup>(8)</sup> 수축과 뒤틀림을 예측하기 위하여 사출성형에 있어서 유체 유동과 열전달이 합쳐진 해석을 수행하였다. 그리고 Chang 등은<sup>(9)</sup> 사출성형된 제품들의 수축, 변형율과 Sink marks에 대한 실험 및 이론적인 해석을 하였다.

그러나 플라스틱 복합재내에 함유되어 있는 섬유 길이, 섬유함유율과 같은 재료요인 및 사출성형 인자 변화에 대한 성형품의 뒤틀림에 관한 연구는 거의 없는 실정이므로, 본 연구에서는 금형온도, 섬유함유율 등을 변화시켜 사출성형한 후 복합재의 수축과 뒤틀림에 미치는 이들의 영향에 대해 실험과 이론적으로 고찰한 내용을 보고한다.

## 2. 이 론

충전시 유동영역에서의 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial z} (\eta \frac{\partial u}{\partial z}) - \frac{\partial p}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial z} (\eta \frac{\partial v}{\partial z}) - \frac{\partial p}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \rho C_p (T) \left( \frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) \\ = \frac{\partial}{\partial z} (k(T) \frac{\partial T}{\partial z}) + \eta \dot{\gamma}^2 \end{aligned} \quad (4)$$

$$\dot{\gamma} = \sqrt{\left( \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial z} \right)^2} \quad (5)$$

금형내 온도 분포  $T_m$ 에 대한 지배방정식과 경계조건은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} (\rho C_p)_m \frac{\partial T_m}{\partial t} \\ = k_m \left[ \frac{\partial^2 T_m}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 T_m}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 T_m}{\partial Z^2} \right] \end{aligned} \quad (6)$$

for  $X \in \Omega$

여기서  $\Omega$ 는 금형영역,  $m$ 은 금형이고  $X, Y, Z$ 는 전체 직각 좌표계,  $J$ 는 순간 열속,  $h_c$ 는 금형과 냉각재 사이에서의 열전달 계수이다.

금형 냉각에 대한 수치적인 실험을 하기 전

에, 사출성형에 적용하기 위하여 지배방정식 및 경계조건은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial^2 T_{m,s}}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 T_{m,s}}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 T_{m,s}}{\partial Z^2} = 0 \quad \text{for } X \in \Omega \quad (7)$$

$$\begin{aligned} -k_m \frac{\partial T_{m,s}}{\partial n} = \bar{J} = \frac{1}{t_f + t_p + t_0} \\ \left\{ \int_0^{t_f + t_p + t_0} J(t) dt \right\} \end{aligned} \quad (8)$$

$$k_m \frac{\partial T_{m,s}}{\partial n} = h_c (T_{m,s} - T_c) \quad (9)$$

$$\text{여기에서 } h_c = 0.023 \frac{k_c}{D} Re^{0.8} Pr^{0.4}$$

$$Re = \text{Reynolds number}$$

$$Pr = \text{Prandtl number}$$

수지의 배향 방향에 평행하거나 수직인 방향의 수축을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} S^{\parallel} = a_1 M_{sh} + a_2 M_c + a_3 M_m \\ + a_4 M^{\parallel}_o + a_5 \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} S^{\perp} = a_6 M_{sh} + a_7 M_c + a_8 M_m \\ + a_9 M^{\perp}_o + a_{10} \end{aligned} \quad (11)$$

여기에서  $a_i$  ( $i = 1, 2, 3, \dots, 10$ )는 상수들이고,  $M_{sh}$ 는 체적수축,  $M_c$ 는 결정성 성분정도,  $M_m$ 은 금형 억제 효과 정도 그리고  $M^{\parallel}_o$ 와  $M^{\perp}_o$ 는 수지의 배향 방향에 평행하거나 수직인 방향의 배향효과 정도이다.

수축 총량은 다음 식과 같이 세 변수의 합으로 표현된다.

$$S = S_a + S_o + S_T \quad (12)$$

여기서  $S$ 는 수축 총량이고,  $S_a$ 는 면적수축 ( $1 - \sqrt{(1 - S^{\parallel})(1 - S^{\perp})}$ ),  $S_o$ 는 배향효과 ( $S^{\parallel} - S^{\perp}$ )이고  $S_T$ 는 불균일한 냉각 효과이다.

## 3. 실험

실험에 사용된 재료는 모재가 폴리프로필렌이고 강화재로는 장.단섬유 강화 열가소성 플라스틱 복합재이다. 섬유 함유량은 장섬유인 경우 30wt%, 50wt%를, 단섬유인 경우 20wt%, 30wt%를 사용하였다.

사출 성형된 성형품은 영국 Rank-Taylor

Habson사의 Form Talysurf Series 2를 이용하여 측정된 데이터를 분석하였고, 성형품의 크기는  $200\text{mm} \times 60\text{mm} \times 3\text{mm}$ 이고 측정부분은 가운데를 중심으로  $100\text{mm} \times 40\text{mm}$ 의 영역에 대해서 표면 waviness를 해석하였다.

#### 4. 결과 및 고찰

Fig. 1은 사출성형된 성형품을 나타낸 것으로 크기는  $200\text{mm} \times 60\text{mm} \times 3\text{mm}$ 이고 Fig. 2는 가운데를 중심으로  $100\text{mm} \times 40\text{mm}$ 의 영역에 대해서 측정된 영역을 나타내었다.

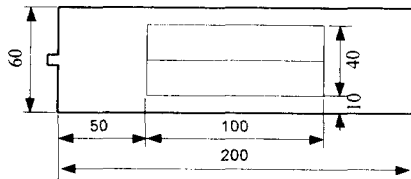


Fig. 1 Specimen injection molded part

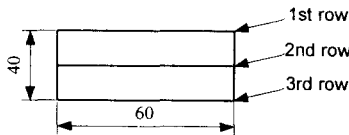


Fig. 2 Measurement zone of the molded part

Fig. 3의 (a), (b)는 섬유 길이 10mm, 금형온도가  $30^\circ\text{C}$ 인 경우 성형품의 길이방향의 뒤틀림을 측정하여 상용해석 프로그램인 MOLD FLOW를 이용한 해석결과와 비교하여 나타낸 것이다.

이 그림에서 성형품의 뒤틀림 정도는 이론해석결과와 실험결과가 거의 일치하고 있음을 알 수 있다. 그리고 이론해석과 실험결과가 마찬가지로 섬유 함유율이 많을수록 뒤틀림이 줄어 드는 것을 알 수 있었다.

Fig. 4의 (a), (b)는 Fig. 3의 (a), (b)와는 달리 금형온도가  $50^\circ\text{C}$ 인 경우 실험결과와 이론해석결과를 비교한 것이다. 이 그림에서도 Fig. 3과 마찬가지로 섬유 함유율이 많을수록 뒤틀림이 줄어 드는 것을 알 수 있다. 그리고 Fig. 3의 (a), (b)와 Fig. 4의 (a), (b)를 비교해 보면, Fig. 4의 (a), (b)가 더 많이 뒤틀려 있음을 알 수 있는데, 이것으로 섬유 함유율과 마찬가지로 금형 온도가 성형품의 뒤틀림에 영향을 미친다는 것을 알 수 있었다.

Fig. 5의 (a), (b)는 섬유 길이 3mm, 금형 온도가  $30^\circ\text{C}$ 인 경우에 성형품의 길이방향의 뒤틀림을 측정된 결과이다. 이 그림에서 (a)의

20wt%가 (b)의 30wt%보다 조금 더 뒤틀려 있음을 알 수 있는데, 앞의 Fig.3과 Fig. 4보다 섬유 함유율의 영향을 덜 받고 있음을 알 수 있다.

Fig. 6의 (a), (b) 역시 (a)의 20wt%보다 (b)의 30wt%가 조금 덜 뒤틀려 있음을 알 수 있으며, Fig. 5의 (a), (b)에 비해 조금 더 뒤틀려 있음을 알 수 있었다. 그리고 Fig. 5와 마찬가지로 Fig.3과 Fig. 4보다 섬유 함유율의 영향을 덜 받고 있음을 알 수 있었다.

#### 5. 결론

본 연구에서는 섬유강화 플라스틱 복합재를 장섬유(long fiber)와 단섬유(short fiber)로 나누어서 사출성형된 성형품에 중요한 영향을 미치는 수축과 뒤틀림에 관하여 각각 금형 온도와 섬유 함유율을 변화시켜 최종 성형품에 미치는 영향에 대해서 이론과 실험 결과를 비교 분석한 결과, 금형 온도가 낮을 수록 섬유 함유율이 많을수록 성형품에 미치는 영향이 줄어 드는 것을 알 수 있었다.

그리고 이론과 실험 결과와의 차이를 줄이기 위하여, 앞으로 냉각 및 보압 해석 대한 연구가 보다 많이 이루어져야 한다고 생각한다.

#### 후 기

본 연구는 정밀정형 및 금형가공 연구센터에 지원에 의하여 연구되었으며, 연구 지원에 감사드립니다.

#### 참고문헌

- (1) Kamal, M.R. and Kenig, S., "The Injection Molding of Thermoplastic, Part 1 :Theoretical Models", Polym. Eng. Sci., Vol. 12, pp. 294-301(1972)
- (2) Kamal, M.R., Kuo. Y. and Doan, P.H., "The Injection Molding Behavior of Thermoplastic in Thin Rectangular Cavities", Polym. Eng. Sci., Vol. 15, pp. 863-868(1975)
- (3) Wang, K.K. et al, "Integration of CAD/CAM FOR Injection-Molded Plastic Part", Progress Reports No. 12(1986)
- (4) Hiroyuki Kikuchi and Kiyohito Koyama, "Warping, Anisotropy, and Part Thickness", Poly. Eng. Sci. vol. 36, pp. 1326-1335(1996)
- (5) Hiroyuki Kikuchi and Kiyohito Koyama,

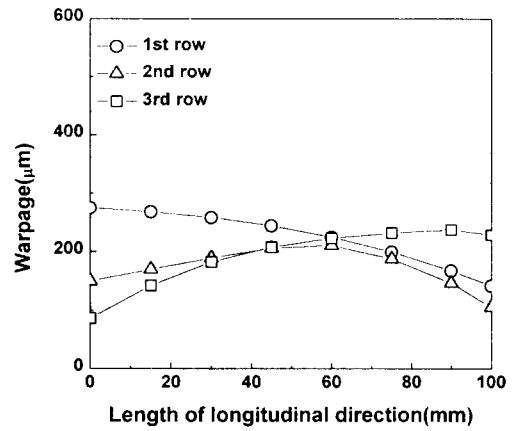
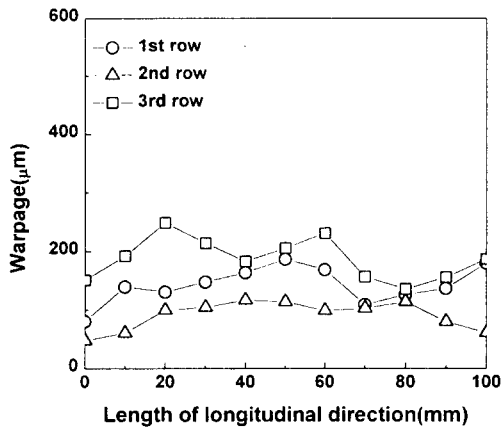
"The Relation Between Thickness and Warpage in a Disk Injection Molded From Fiber Reinforced PA66", Poly. Eng. Sci, vol. 36, pp. 1317-1325(1996)

(6) F. Dupret and L. Vanderschuren, "Calculation of the Temperature Field in Injection Molding", AIChE Journal, vol. 34, pp. 1959-1972(1988)

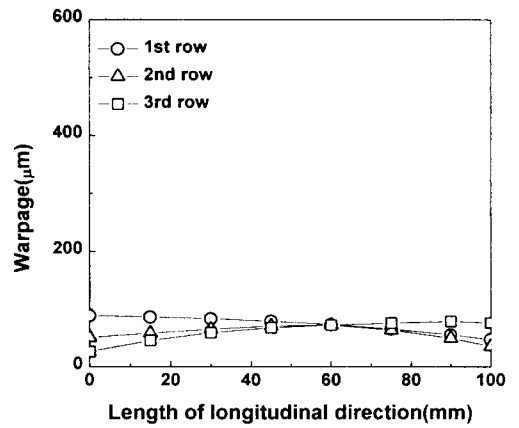
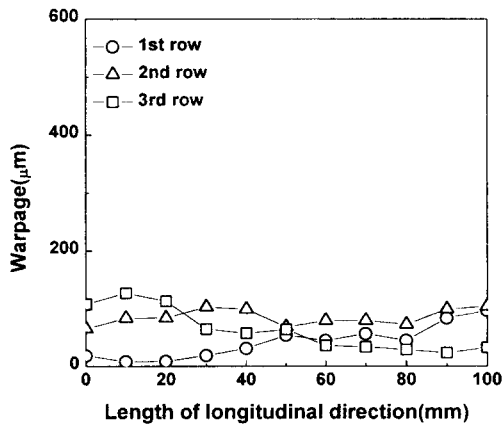
(7) CHI J. YU, J. E. Sunderland, and C. POLI, "Thermal Contact Resistance in injection Molding", Poly. Eng. Sci, vol. 30, pp. 1599-1606(1990)

(8) H. H. Chiang, K. Himasekhar and N. Santhanam, K. K. Wang, "Integrated Simulation of Fluid Flow and Heat Transfer in Injection Molding for the Prediction of Shrinkage and Warpage", J. Eng. Mat. Tec, vol. 115, pp. 37-47(1993)

(9) R. Y. Chang and B. D. Tsaur, "Experimental and Theoretical Studies of Shrinkage, and Sink Marks of Crystalline Polymer Injection Molded Parts", Poly. Eng. Sci. vol. 35, pp. 1222-1230(1995)



(a) 30wt%

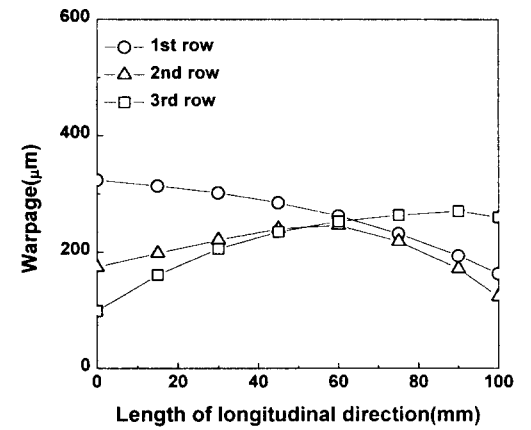
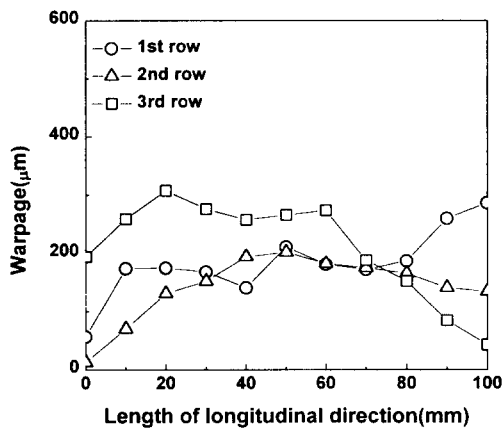


< Experimental results >

(b) 50wt%

< Theoretical results >

**Fig. 3 Comparison between experimental and theoretical results for long fiber and 30°C.**

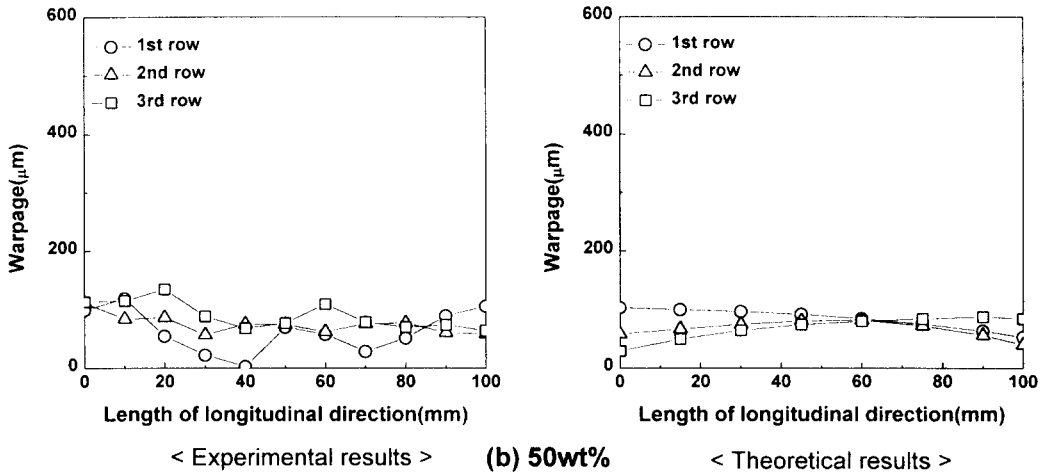


< Experimental results >

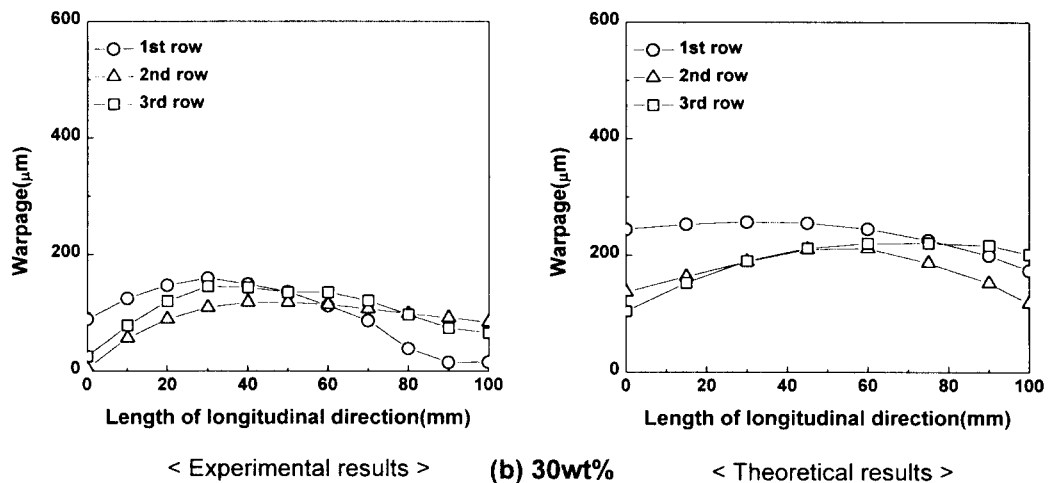
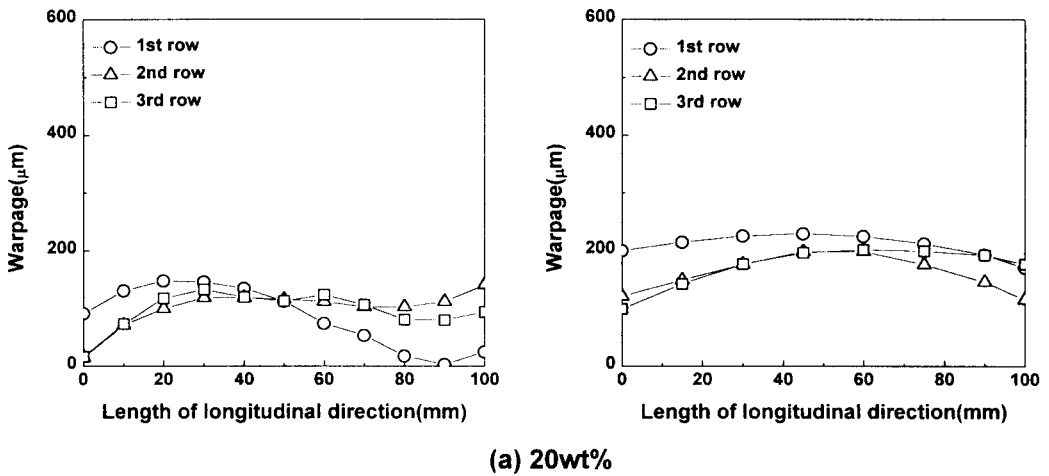
(a) 30wt%

< Theoretical results >

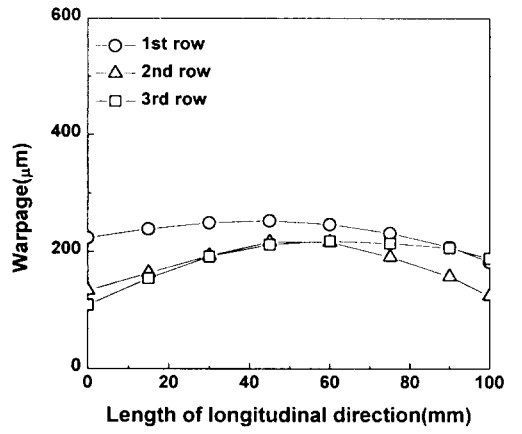
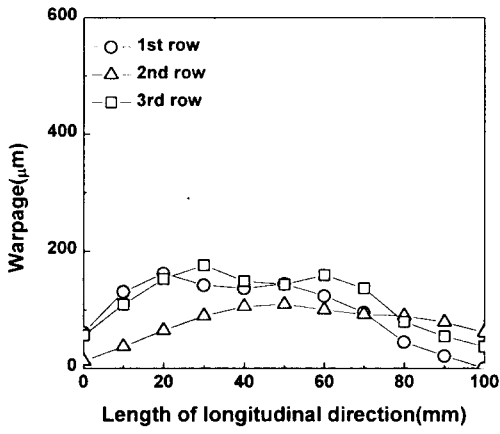
(Continued)



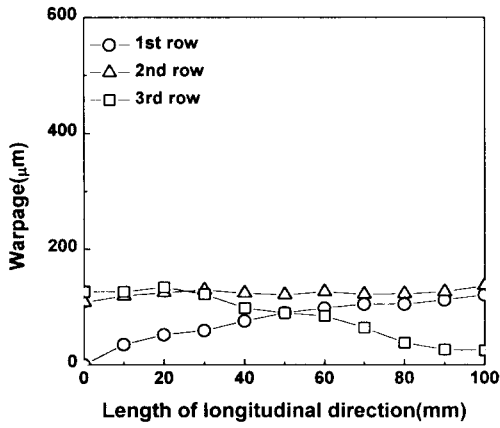
**Fig. 4 Comparison between experimental and theoretical results  
for long fiber and 50 °C.**



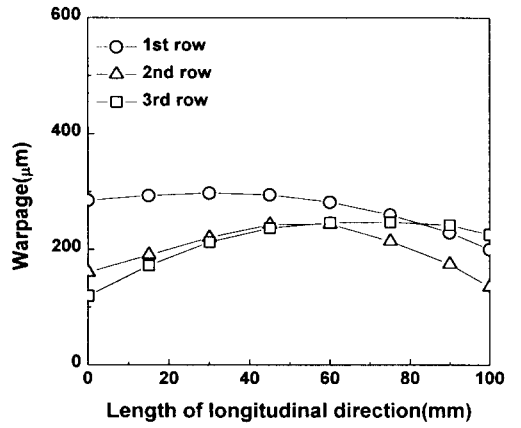
**Fig. 5 Comparison between experimental and theoretical results  
for short fiber and 30 °C.**



(a) 20wt%



< Experimental results >



< Theoretical results >

(b) 30wt%

Fig. 6 Comparison between experimental and theoretical results for short fiber and 50°C.