

# 섬유강화 고분자 복합재료 사출성형품의 섬유배향상태

이동기\*, 심재기<sup>+</sup>, 김진우<sup>++</sup>  
(논문접수일 2004. 10. 21, 심사완료일 2004. 12. 14)

## Fiber Orientation Distribution of Injection Molded Product on the Fiber-Reinforced Polymeric Composites

Dong-Gi Lee\*, Jea-Ki Sim<sup>+</sup>, Jin-Woo Kim<sup>++</sup>

### Abstract

Injection molding is the most widely used process for the industrial forming of plastic articles. During an injection molding process of composites, the fiber-matrix separation and fiber orientation are caused by the flow of molten polymer/fiber mixture. As a result, the product tends to be nonhomogeneous and anisotropic. Hence, it is very important to clarify the relations between separation-orientation and injection molding conditions. So far, there is no research on the measurement of fiber orientation using image processing. In this study, the effects of fiber content ratio and molding condition on the fiber orientation-angle distributions are studied experimentally. Using the image processing method, the fiber orientation distribution of welding parts in injection-molded products is assessed. And the effects of fiber content and injection mold shapes on the fiber orientation in case of fiber reinforced polymeric composites are studied experimentally.

**Key Words :** Injection Molding(사출성형), Welding Part(접합부), Fiber Orientation Function(섬유배향함수), Mold Shape(금형형상), Image Processing(화상처리), Weld Line(웰드라인), One-Gate(1점 게이트), Double-Gate(2점 게이트)

## 1. 서론

사출성형은 강화재와 모재가 혼합된 필렛을 스크류 혼련 과정과 가열을 통해 수지를 용융상태로 만들어 제품을 생산하는 것으로서, 사출성형기의 실린더내에서 성형재료가

가소화 되는 용융과정, 가소화된 성형재료가 금형내로 유입되는 유동과정과 충전된 재료의 보압 및 사출된 재료의 냉각·고화 등의 일련의 공정으로 구성된다. 이 유동성형과정에서 섬유가 분산된 고액혼상류는 여러 가지 복잡한 형상의 금형내를 흐른다. 금형내에서 유동성형시 섬유와 모

\* 조선대학교 기전공학과 (dglee@chosun.ac.kr)

주소: 501-759 광주광역시 동구 서석동 375

+ 조선대학교 기전공학과

++ 조선대학교 대학원 정밀기계공학과

재와는 유동속도차에 의해 섬유배향 및 섬유와 모재의 분리 현상이 발생한다. 즉 이 분리와 배향은 섬유직경, 섬유길이, 섬유함유율에 따른 섬유상호간의 간섭력 등과 같은 재료요인과 사출속도, 압력 및 온도 등과 같은 성형인자에 의해 발생한다<sup>(1)</sup>.

사출성형된 제품은 배향과 분리현상 때문에 불균질하고 이방성이 나타나 성형품의 기계적 성질이나 제품의 특성 등에 큰 영향을 미친다. 이와 같이 섬유강화 고분자 복합재료 내에서의 섬유배향 상태가 강도, 강성등의 역학적 특성에 큰 영향을 끼치는 것은 잘 알려져 있다<sup>(2-5)</sup>.

따라서 점탄성적 성질을 가진 고분자 액체의 흐름 안에서 섬유의 거동은 섬유강화 고분자 복합재료의 금형 설계 및 최적성형조건을 결정하는데 매우 중요하다고 생각된다. 또한, 섬유강화 고분자 복합재료를 이용한 사출성형품에서 웰드라인의 발생은 피할 수 없는 현상이다. 이 웰드부에서는 수지흐름의 직각방향으로 섬유가 배향되기 때문에 보강효과가 급격히 줄어들어 기계적물성의 저하원인이 된다<sup>(6)</sup>. 그러므로 섬유강화 고분자 복합재료의 사출성형에서 웰드부의 강도를 보강하기 위해서는 웰드부의 연구가 필수적이라고 할 수 있다.

지금까지 사출성형에 있어서 성형인자와 섬유와의 관계를 고찰한 예를 살펴보면, Yaguchi 등은<sup>(7)</sup> 유리 섬유를 이용하여 캐비티내 충전과정 중 섬유의 배향상태를 가시적으로 연구하였다. Bell 등은<sup>(8)</sup> 유리섬유가 웰드라인에서 임의의 방향으로 배향되어 있기 때문에 모재보다 강도가 떨어진다고 하였다. Hagerman는<sup>(9)</sup> 2점 게이트(double-gate) 금형에 의하여 제작된 인장시험편을 사용하여 실험한 결과, 웰드라인의 강도저하는 흐름선단(flow front)에서 분산 및 기계적 혼합이 충분히 일어나지 않기 때문이라고 하였다.

그러나 유동성형 과정에서 섬유의 거동에 관한 연구는 대부분이 뉴턴유체의 경우일 뿐, 섬유강화 고분자 복합재료의 사출성형에 있어서 웰드부 강도저하의 주된 원인이 되는 강화재의 섬유배향에 미치는 금형게이트의 영향에 관한 연구는 거의 없는 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 웰드라인이 있는 성형품 성형을 위해 1점 게이트(one-gate : 웰드부 없음)와 2점 게이트(double-gate : 중앙에 웰드부가 있음)를 갖는 금형을 제작하여 게이트의 위치에 변화를 주어 실험하였다. 이때 성형된 성형품 웰드부에 미치는 금형게이트와 같은 기하학적 조건과 사출 온도 및 섬유함유율 등의 사출성형조건이 섬유배향 상태에 어떠한 영향을 주는가 보고한다. 이 사출성형된 성형품 웰드부의 섬유배향 상태를 측정하기 위해서 성형품을 연 X-

선 사진 촬영한 후, 이 사진을 이미지 스캐너에 인식하여 사진의 농도차를 이용한 화상처리에 의해 섬유배향분포를 측정하여 금형게이트 위치 변화에 따른 성형품의 섬유배향상태의 영향에 대해서 고찰하였다.

## 2. 섬유배향함수 및 섬유배향 측정법

### 2.1 섬유배향함수

섬유강화 고분자 복합재료는 폴리머로부터 열이 방출되어 응고되기 위한 시간이 필요하다. 성형품의 두께가 두꺼울수록 많은 시간을 필요로 하여 생산비용도 더 들게 되는 단점이 있어 제품의 강도를 유지할 수 있는 한도내에서 두께를 최소화해야 한다. 그러므로 성형된 섬유강화 고분자 복합판재의 두께는 폭, 길이와 비교하여 매우 얇기 때문에 섬유를 2차원 집합체로서 취급한다. 두께가 얇은 섬유강화 고분자 복합판재의 x-y평면상에 섬유가 분포하고 있는 경우 x축과 이루는 섬유배향각  $\theta$ 는  $0 \leq \theta \leq \pi$ 의 범위에 있다. 따라서, 섬유배향 분포상태의 척도를 나타내는 변수(이하 섬유배향함수 J라고 한다)와 섬유배향각 분포  $H_D(k)$ 사이에는 식 (1)과 같은 관계가 있다<sup>(10)</sup>.

$$H_D(k) = \frac{1}{\pi} \left[ \left( \frac{1-J}{1+J} \right) \cos^2 \theta + \left( \frac{1+J}{1-J} \right) \sin^2 \theta \right]^{-1} \quad (1)$$

여기서, J는 2차원적으로 섬유배향 분포상태를 나타내는 섬유배향함수이다. 섬유배향함수 J는 수지의 유동방향인 x축을  $0^\circ$ 로 하였을 때, 섬유가 유동방향으로 평행하게 유동할 경우 섬유배향함수  $J=1$ 이고, 유동방향과 직각방향으로 섬유가 유동하는 경우는  $J=-1$ 이다. 이와 같이 섬유배향함수 J값은 0에서 1사이에 있으나 0에 가까워지면 섬유의 배향상태가 무작위에 가깝게 됨을 나타낸다.

### 2.2 섬유배향측정법

화상처리하여 화소의 농도차로 섬유배향각을 계산할 때 Sobel 오퍼레이터를 이용하여 중심화상요소(이하 화소라고 한다)의 수평, 수직 양방향으로  $\Delta H$ ,  $\Delta V$ 를 계산한 후 섬유배향각  $\theta$ 는 식 (2)에 의해 계산한다<sup>(11)</sup>.

$$\theta = \tan^{-1}(\Delta V / \Delta H) + \pi / 2 \quad (2)$$

섬유배향각  $\theta$ 방향을 갖는 섬유수량 C를 측정할 때 식 (3)을 이용하여 화소의 농도값으로 계산한다.

$$C = (|\Delta H| + |\Delta V|) / 2 \quad (3)$$

사출성형된 성형품의 연 X-선 사진으로부터 얻어진 농도 정보를 수치 데이터로 읽어 컴퓨터로 처리하여 모든 화소에 대하여 섬유배향각  $\theta$ 와 섬유수량  $C$ 를 구하였을 때 섬유배향각 분포  $H_D(k)$ 는 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다<sup>(7)</sup>.

$$H_D(k) = \frac{N_\theta(k)}{\sum_{i=0}^{n-1} N_\theta(i)}, \quad k=0,1,\dots,n-1 \quad (4)$$

여기서  $n$ 은  $0 \leq \theta \leq \pi$ 의 분할수이며,  $N_\theta(k)$ 는  $(2k-1)\pi/2n \leq \theta \leq (2k+1)\pi/2n$ 의 범위에 있는 섬유의 운곽선방향 화소 수이다.

사출성형된 성형품의 연 X-선 사진으로부터 얻어진 농도 정보를 이용하여 섬유배향각을 구하기 위하여 화소 각각의 섬유배향각  $\theta$ 를 식 (2)로 계산하여 구한다. 이와 같이 각 화소의 섬유배향각을 구한 후 전 화상의 모든 화소에 대하여 섬유배향각 분포  $H_D(k)$ 를 식 (4)에 의해 측정할 후, 식 (1)에 의해 최소자승법으로 섬유배향함수  $J$ 값을 구한다. 최소자승법으로 구한 섬유배향함수  $J$ 값을 통하여 섬유배향상태의 정량적인 척도를 알 수 있다.

### 3. 실험

본 실험에서 사용된 재료는 국내의 시판중인 (주)삼박 (sambak, co.)에서 생산되는 섬유강화 플라스틱 컴파운드 (long fiber-reinforced plastic compound)로서 모재는 폴리프로필렌(polypropylene : 이하 PP라 약칭한다.)이고, 강화재는 유리섬유이다. 이때의 섬유함유율은 30wt%, 40wt%,

50wt%로 Table 1에 나타난 특성과 같이 유리섬유와 폴리프로필렌이 첨가된 펠릿(pellet) 형태로 시판되는 사출성형용 제품으로 섬유길이는 10mm 이다.

사용한 사출성형기는 스크류 직경이  $\Phi 36\text{mm}$ 이고 형체력이 75ton, 최대 사출중량은 103g, 최대사출압력은  $1400\text{kg/cm}^2$ , 형체형정은 270mm이다. 성형품 제작시 수지를 사출성형기 호퍼내에서  $250^\circ\text{C}$ 로 예열을 한 후 사용하였다.

본 실험에서는 게이트의 위치에 따른 웰드라인부에서의 섬유배향상태를 파악하기 위하여 게이트의 위치를 금형의 중앙부 측면에 주어진 경우와 양단에 편심되게 주어진 경우, 성형용 금형의 러너 일부에 절환 밸브를 부착하여 웰드라인을 제거한 경우로 구분하여 실험하였다. 사용한 시험편의 형상은 Fig. 1과 같이 1점 게이트와 2점 게이트를 갖는 2개의 캐비티(cavity)로 된 금형을 제작하여 사용하였으며, 게이트의 직경은 3mm로 하여 사용하였다. 성형된 사출성형시험편의 두께는 3mm, 폭은 25.4mm, 길이는 150mm로 하였다. 또한, 사출성형시 유동을 좌우하는 금형온도는 성형품의 최대 인장강도를 나타내고 일반적인 제품성형 온도인  $50^\circ\text{C}$ 와 웰드라인의 생성을 약화시키기 위한  $70^\circ\text{C}$ 로 변화를 주어 실험하였다.

편심된 게이트로부터의 유동상태와 벽면 마찰에 따른 섬유배향함수를 측정하기 위하여 성형품을 연 X-선 촬영한 후  $10\text{mm} \times 10\text{mm}$  단위로 상단 금형부와 중앙부, 하단 금형부로 각각 구분하여 Fig. 1에 표시한 부분에서 섬유배향각 분포를 측정하였다.

Fig. 2는 실험에 사용한 사출 성형품의 연 X-선 사진으로 Fig. 2(a)는 게이트의 위치를 금형 중앙부 측면에 주어진 경우이고, Fig. 2(b)는 양단에 편심되게 주어진 경우, Fig. 2(c)는 성형용금형의 러너 일부에 절환 밸브를 부착하여 웰드라

Table 1 Characteristics of long fiber thermo-plastics compound

Reinforcement	Matrix	Coupling agent for matrix resin
- Type : E-glass - Filament diameter : $17\ \mu\text{m}$ - Shape by maker : Roving cake - No. of filament in a yarn : about 2000 - Tex : 2400	- Polypropylene : H. & B. copolymer	- MA-g-PP

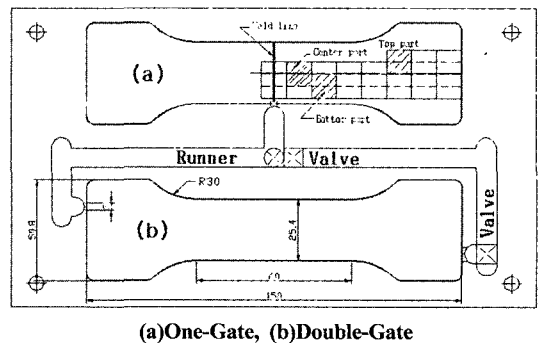
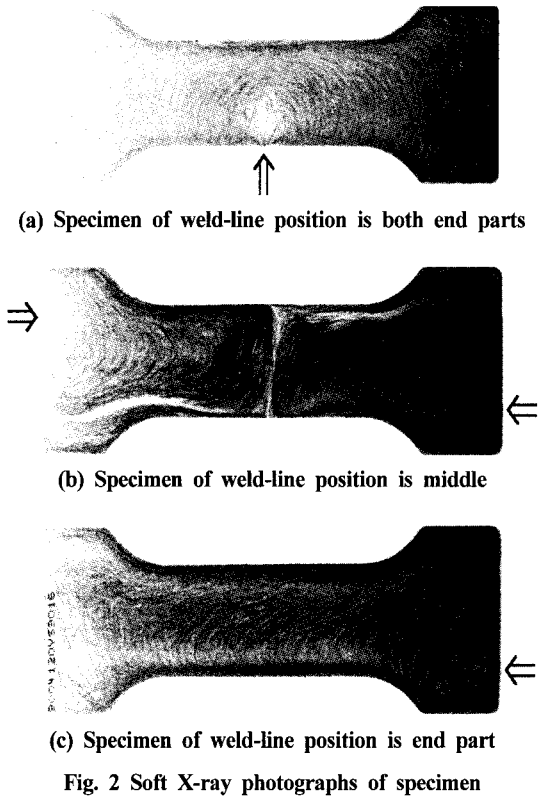


Fig. 1 Dimensions of injection mold and part for measuring fiber orientation



인을 제거한 경우로 구분하여 실험하였다.

Fig. 1과 같이 사출성형된 성형품 웰드부를 중심으로 1/2영역의 연 X-선 사진에 대해 섬유배향 분포상태를 측정하기 위하여 성형품의 중립면에서 x축을 따라서 각각 10mm×10mm 측정하였다. 이때 측정대상 10mm×10mm의 영역을 80×80 화소로 분할하여 이미지 스캐너로 각 화소의 농도정보를 측정하고, 얻어진 농도정보를 컴퓨터로 이치화(binary) 처리하여, 이치화의 Threshold값보다도 농도가 높은 화소를 섬유로 하였다. 본 실험의 계측에서 Threshold값은 0이고, 섬유배향 주축은 유동방향인 x축을 0°로 하고 시계방향을 정(+), 반시계방향을 부(-)로 하여 전체 섬유에 대해 측정하였고,  $0 \leq \theta < \pi$ 의 분할수 n을 18등분해서 섬유배향각  $\theta$ 의 측정범위는 10°이다.

사출성형된 성형품의 연 X-선 사진농도로서 섬유배향각 분포측정에 이용한 이미지 스캐너는 일본 세이코 엡스제 GT-4000V이며, 해상도(resolution)는 400×400 화소, 1화소는 1/8mm×1/8mm, 농도계조 8비트(gray level : 256계조, 흑 : 0, 백 : 255)이다. 연 X-선 사진 촬영시 사용한 필름

은 일본 후지사 제품(MI-NC의료용 X-ray필름, 180mm×240mm)을 사용하였다. 본 실험에서 사용한 연 X-선 촬영장치는 Fig. 3과 같고, 연 X-선 현상조건은 Table 2와 같다.

섬유함유량에 따라 단위 면적당 섬유 함유량의 차가 나타나므로 이를 구분하기 위하여 동일 조건으로 촬영하였다. 화상 입력부의 이미지 스캐너 측정영역은 10mm×10mm의 영역을 게이트를 기준으로 하여 끝단부까지 화상처리하였으며, 섬유배향각  $\theta$ 는 시험편의 x축을 기준으로 시계방향과 반시계방향의 전섬유에 대해서 측정하였다. 또한 본 연구에서 사용한 시험편의 기호규약을 Table 3에 나타내었다.

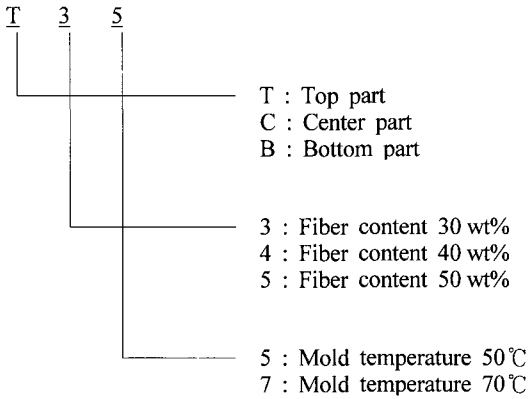


**Fig. 3 Soft X-ray photographing device**

**Table 2 Condition of photographing and developing for soft x-ray**

V	A	D	S.S	F.S	D.T	S.T
35	40	25	18	18	29	34
V : Voltage(kVp)				A : Electric current(mAs)		
D : Developer(sec)			S.S : Stopping solution(sec)			
D.T : Dry time(sec)			S.T : Solution temperature(°C)			

Table 3 Definition of the specimen numbers

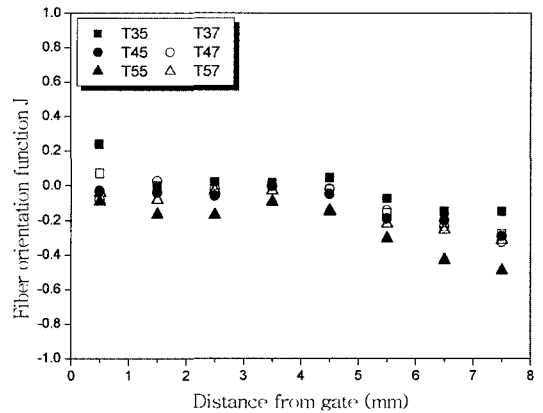


#### 4. 결과 및 고찰

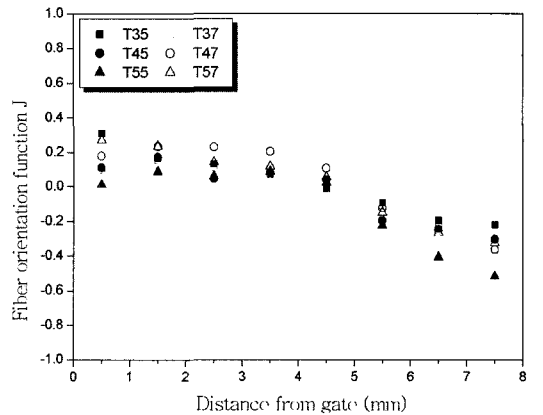
Figs. 4~6은 섬유함유율이 각각 30wt%, 40wt%, 50wt% 인 경우에 게이트로부터 유동거리에 따른 성형시험편 각 부분의 섬유배향상태를 나타낸 그림이다. 웰드라인의 형성에 차이를 두기 위하여 Fig. 1과 같이 게이트의 위치를 변화시켜 실험하였다. 이때, 고분자 재료에 강화재인 유리섬유를 충전한 재료에서는 섬유가 유동방향으로 늘어서는 섬유배향상태를 Fig. 2에 나타냈다. 이와 같은 성형시험편의 상단부, 중앙부, 하단부의 섬유배향상태를 게이트로부터 유동거리에 따라 Figs. 4~6에 나타내었다.

Fig. 4는 게이트의 위치를 Fig. 1(a)와 같이 중앙부 측면에 주어 재료의 유동이 금형 중앙부에서 양쪽 끝부분으로 충전되게 하여 사출가압한 성형품의 각 부분에 나타나는 섬유배향상태를 나타낸 그림이다. 이 그림에서 게이트로부터 분사된 섬유가 금형 상단부, 중앙부 및 하단부 순으로 섬유배향함수 값이 증가됨을 알 수 있다. 이는 금형 중앙부의 측면 게이트에서 섬유강화 고분자 복합재료가 고액 혼상류로 분사되어 게이트 반대쪽인 금형 상단부 벽면과 접촉으로 인한 마찰저항 때문에 섬유배향이 잘되지 않고, 금형상단부에서 하단부로 갈수록 마찰저항의 영향이 적어지므로 섬유배향이 잘 됨을 알 수 있다. 또한, 금형온도와 섬유함유율의 영향보다는 금형벽면과의 마찰저항이 섬유배향과 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다.

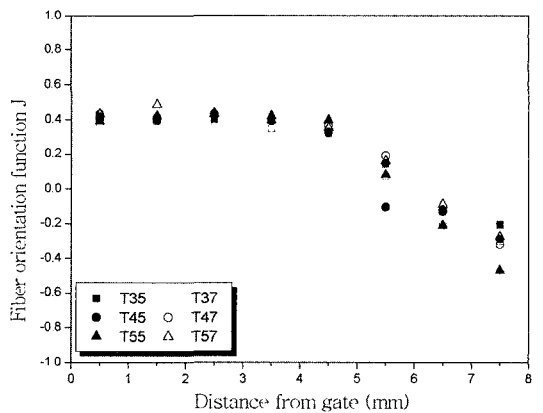
그리고, 섬유배향함수는 성형재료인 고액혼상류가 금형 게이트로부터 금형 우측 끝부분에 분사되어 이로 인한 분수 현상이 나타나 유동거리 1/2부분부터 섬유배향함수가 급격히 증가하였다.



(a) Measurement of top part



(b) Measurement of center part



(c) Measurement of lower part

Fig. 4 Effect of distance from gate and fiber orientation function J(Weld-line position is both end parts)

Fig. 5는 2점 게이트(double-gate)에서 분사된 재료가 중앙부에 웰드라인을 형성하여 나타나는 섬유배향상태를 나타낸 그림이다. 이때 게이트의 위치를 편심시켜 재료의 충전위치 변화에 따른 섬유배향상태를 측정하였다.

Fig. 5(a)는 중앙에 웰드라인이 생성된 성형품 우측부분 금형 상단부의 섬유배향상태, Fig. 5(b)는 금형 중앙부의 섬유배향상태, Fig. 5(c)는 금형 하단부의 섬유배향상태를 나타낸 그림이다. 유동되는 섬유가 편심된 게이트에서 분사된 후 금형 하단부 벽면 마찰저항의 영향으로 섬유배향함수 J 값이 하단부, 중앙부, 상단부 순으로 증가함을 알 수 있다.

금형 우측 하단 게이트에서 분사된 고액혼상류는 필렛부와 충돌로 인하여 섬유배향함수 값이 Fig. 5(c)와같이 급격히 변화하는 것을 알 수 있고, Fig. 5(a), (b)는 금형 필렛부와 떨어져 있어 섬유배향함수 값이 급격한 변화가 없음을 알 수 있다. 또한, 게이트에서 분사되어진 섬유는 웰드라인부(유동거리의 3/4부분)에서 섬유배향상태가 역배향(90° 회전)으로 나타남을 알 수 있다.

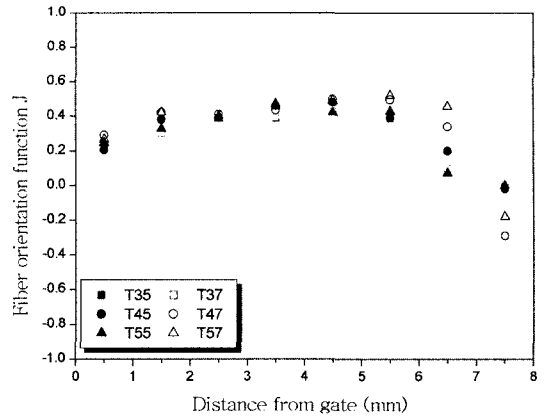
또한 성형품의 섬유배향상태는 섬유함유율에는 큰 영향을 미치지 않으나, 금형온도 50℃인 경우가 70℃인 경우보다 안정적으로 나타났는데 이는 금형온도 상승으로 인하여 사출가압시 속도구배가 크기 때문이다.

그리고, 게이트에서 분사되어진 섬유의 충전 경로에 의해 섬유배향상태가 달라짐을 Fig. 2(b)에 나타낸 연 X-선 사진으로 알 수 있다. 그러나 이와 같은 경우는 단순히 웰드라인 제거의 측면에서는 좋은 방안이나 성형품의 기계적 특성에는 상하부분의 섬유배향상태가 달라짐으로 인하여 이방성 재료가 되어 성형품의 기계적 특성을 감소시킨다.

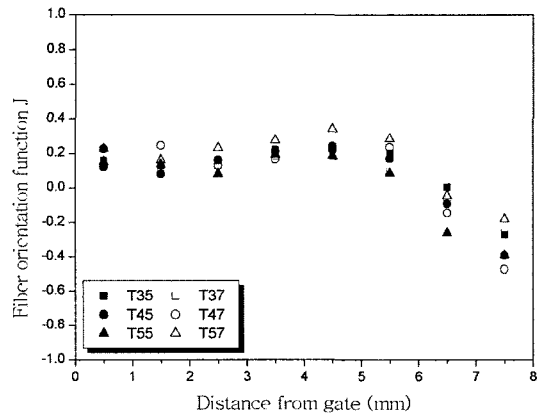
Fig. 6은 금형 한쪽 부분의 러너를 막아 재료의 유동이 1점게이트(one-gate)에서 충전시킨 성형품의 섬유배향 상태를 각 부분별로 나타낸 그림이다. 앞에서 언급한 바와 같이 유동되는 섬유가 편심된 게이트에서 분사된 후 금형 하단부 벽면 마찰저항의 영향으로 섬유배향함수 J 값이 하단부, 중앙부, 상단부 순으로 증가함을 알 수 있다.

또한, 섬유가 충전되어지는 필렛부분에서 특히 섬유배향상태가 불균질해짐을 알 수 있었다. 이는 필렛부분에서 유동속도차에 의하여 섬유가 충전된 경우에는 정체현상이 모재가 충전된 경우에는 공동현상이 발생하기 때문이다.

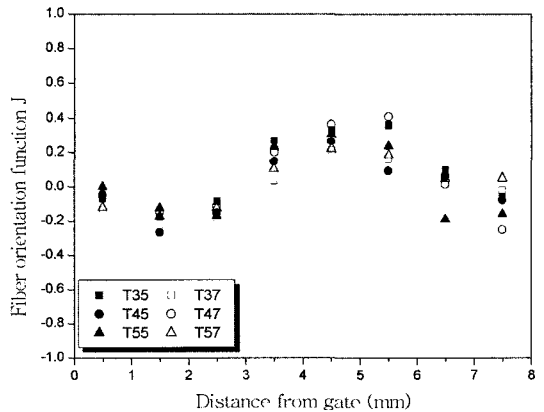
사출성형에 있어서 유리섬유의 배향은 금형온도나 섬유함유율의 영향보다는 금형 게이트 위치와 밀접한 관계가 있고, Fig. 2의 연 X-선 사진으로도 확인할 수 있다.



(a) Measurement of top part

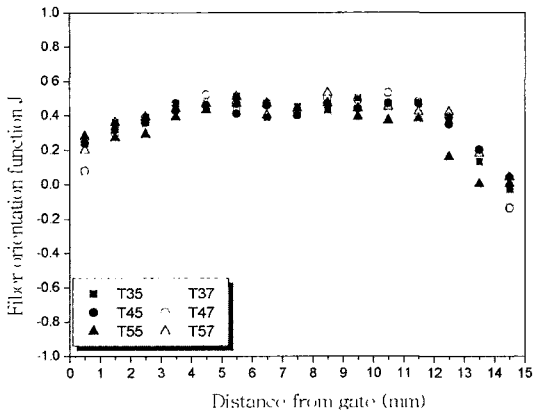


(b) Measurement of center part

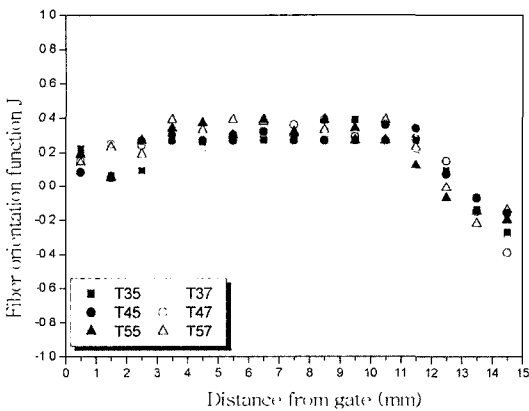


(c) Measurement of lower part

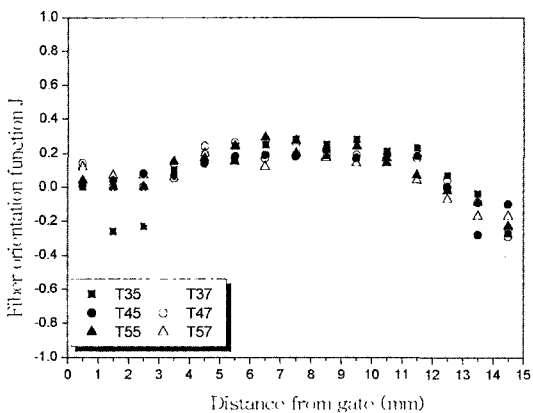
Fig. 5 Effect of distance from gate and fiber orientation function J(Weld-line position is middle)



(a) Measurement of top part



(b) Measurement of center part



(c) Measurement of lower part

Fig. 6 Effect of distance from gate and fiber orientation function J(Weld-line position is end part)

## 5. 결 론

섬유강화 고분자 복합재료 사출성형품의 섬유배향상태에 대하여 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 섬유함유율과 금형온도의 영향보다는 금형 게이트 위치와 밀접한 관계가 있고, 중앙에서 양끝단으로 유동되는 경우는 금형벽면과의 마찰에 의하여 섬유배향이 이루어지므로 웰드라인 제거의 측면에서는 좋은 방법이나 유동방향과 직각방향으로 섬유의 역배향이 이루어져 성형품의 특성을 감소시키는 결과를 가져온다.
- (2) 게이트에서 멀어질수록 모재와 강화재의 유동속도차에 의하여 모재의 유동은 빠르고 유리섬유의 유동은 느려지는 섬유배향이 발생하고, 유동의 끝부분에서 분수흐름의 영향으로 유동방향과 직각인 상태로 섬유가 배향되어 웰드라인 생성과 같은 효과를 나타내었다.
- (3) 사출성형품 중앙부의 유동은 게이트로부터 일정한 흐름을 이루나, 중앙부 측면 및 편심된 게이트 쪽 유동은 벽면과의 마찰로 인하여 유동속도가 느려지고 분수흐름에 의해 되돌아오는 수지와외의 충돌로 인하여 섬유배향상태의 변화가 심하게 나타남을 알 수 있다.

## 후 기

이 논문은 2000년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었음.

## 참 고 문 헌

- (1) Giveler, R. C., Crocket, M. J., and Pipes, R. B., J. 1983, Composite Materials, pp. 17~330.
- (2) Kim, H. G., 1997, "An Investigation of the Thermoelastic Behavior in Short Fiber Reinforced Composite Materials," *Journal of Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 6, No. 3, pp. 89~95.
- (3) Hong Gun Kim, Chang Yong Choi, 2003, "A Study on the Tensile Strength of Glass Woven Fiber Reinforced PET Composites," *Journal of Korean Society of Machine*, Vol. 12, No. 1, pp. 45~49.
- (4) Hojo, H., Kim, E. G., Tamakawa, K. and Nagatsuka, C., 1986, "Separation of Matrix and Fibers during Molding of Long Fiber-Reinforced Thermoplastics," *Proce-*

- ssing of 3rd Japan\_U.S. Conference on Composite Materials, Tokyo, pp. 605~612..
- (5) Hojo, H., Kim, E. G., Yaguchi, H. and Onodera, T., 1988, "Simulation of Compression Molding with Matrix-Fibre-Reinforced Thermoplastics," *Internat. Polymer Processing* Vol. 3, Issue 1, pp. 54~61.
- (6) Lawrence, E., Nielsen, 1994, "Mechanical properties of polymers and composites," Marcel Dekker, inc, pp. 475~483.
- (7) Yaguchi, H., Hojo, H., Lee, D. G., and Kim, E. G., 1995, "Measurement of Planar Orientation of Fibers for Reinforced Thermoplastics Using Image Processing", *International Polymer Processing*, Vol. X Issue 3, pp.262~269.
- (8) Bell, G. R., Cook, D. C. and Rogers, D. D., 1979, *Plastic. Eng.*, No. 35, pp. 18.
- (9) Hagerman, E., 1973, *Plast. Eng.*, pp. 67.
- (10) Yamada, K., and Horikawa, A., 1984, "Stochastic Geometry of Two-Dimensional Fiber Assemblies", *Textile Machinery Soc. of Japan*, Vol. 37 No. 12, pp.51~64.
- (11) Tamura, H., Mori, S. and Yamawaki, T., 1978, "Textural Features Corresponding to Visual Perception," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol. SMC-8 No. 6, pp. 460~472.