

섬유강화 복합재료 사출성형품의 섬유배향상태

이정주⁺, 김진우⁺, 김 혁⁺⁺,한길영⁺⁺,심재기⁺⁺,이동기⁺⁺

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

J. J. Lee^{*+}, J. W. Kim⁺, H. Kim⁺⁺, G. Y. Han⁺⁺, J. K. Sim⁺⁺, D. G. Lee⁺⁺

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(섬유배향 함수), Mold Shape(금형 형상), Image Processing(화상처리)

1. 서 론

사출성형은 강화재와 모재가 혼합된 필렛을 스크류 혼련과 정과 가열을 통해 수지를 용융상태로 만들어 제품을 생산하는 것으로서, 사출성형기의 실린더내에서 성형재료가 가소화되는 용융과정, 가소화된 성형재료가 금형내로 유입되는 유동과정과 충전된 재료의 보압 및 사출된 재료의 냉각·고화 등의 일련의 공정으로 구성된다. 이 유동성형과정에서 섬유가 분산

된 고액혼상류는 여러 가지 복잡한 형상의 금형내를 흐른다. 금형내에서 유동성형시 섬유와 모재와는 유동속도차에 의해 섬유배향 및 섬유와 모재의 분리현상이 발생한다. 즉 이 분리와 배향은 섬유직경, 섬유길이, 섬유함유율에 따른 섬유상호간의 간섭력 등과 같은 재료요인과 사출속도, 압력 및 온도 등과 같은 성형인자에 의해 발생한다.

성형된 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^{1,2)}.

* 발표자, 조선대학교 대학원 정밀기계공학과
주소: 501-759 광주시 동구 서석동 375

+ 조선대학교 대학원 정밀기계공학과

++ 조선대학교 기계공학부

따라서 점탄성적 성질을 가진 고분자 액체의 흐름 안에서 섬유의 거동은 섬유강화 고분자 복합재료의 유동성형장치 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 된다³⁾. 그러므로 웰드부의 강도를 보강하기 위해서는 웰드부의 연구가 필수적이라고 할 수 있다.

지금까지 사출성형에 있어서 성형인자와 섬유와의 관계를 고찰한 예를 살펴보면, Yokoi 등은⁴⁾ 트레이서 섬유를 이용하여 캐비티내 충전과중중 장섬유의 배향상태를 가시적으로 연구하였다. Bell 등은⁵⁾ 유리섬유가 웰드라인에서 임의의 방향으로 배향되어 있기 때문에 모재보다 강도가 떨어진다고 하였다. Hagerman는⁶⁾ double-gate 금형에 의하여 제작된 인장 시험편을 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, 사출성형에 있어서 웰드부 강도저하의 주된 원인이 되는 강화재가 섬유배향상태에 미치는 금형형상의 영향에 관한 연구는 거의 없는 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 웰드라인이 있는 성형품 성형을 위해 one-gate와 double-gate를 갖는 금형을 제작하여 gate의 위치에 변화를 주어 실험하였다. 이때 성형된 성형품 웰드부에 미치는 금형형상과 같은 기하학적 조건과 사출온도 및 섬유함유율 등의 사출성형조건이 섬유배향 상태에 어떠한 영향을 주는가 보고한다. 이 사출성형된 성형품 웰드부의 섬유배향상태를 측정하기 위해서 성형품을 연 X-선 사진 촬영한 후, 이 사진을 이미지 스캐너에 인식하여 사진의 농도차를 이용한 화상처리에 의해 섬유배향분포를 측정하여 금형형상에 따른 성형품의 섬유배향상태의 영향에 대해서 고찰하였다.

2. 섬유배향함수 및 섬유배향각 측정법

2.1 섬유배향함수

두께가 얇은 섬유강화 고분자 복합판재의 x-y평면상에 섬유가 분포하고 있는 경우 x축과 이루는 섬유배향각 θ 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 있다⁷⁾.

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

여기서, J는 2차원적으로 섬유배향 분포상태를 나타내는 섬유배향함수이다. 섬유배향함수 J는 수지의 유동방향인 x축을 0° 로 하였을 때, 섬유가 유동방향으로 평행하게 유동할 경우 배향함수 J=1이고, 유동방향과 직각방향으로 섬유가 유동하는 경우를 J=-1이라 하며, 섬유배향이 무배향(등방성)인 경우 섬유배향함수 값이 J=0이다.

2.2 섬유배향분포 측정법

화상처리하여 화소의 농도차로 섬유배향각을 계산할 때 Sobel 오퍼레이터를 이용하여 중심화상요소(이하 화소라고 한다)의 수평, 수직 양방향으로 ΔH , ΔV 를 계산한 후 섬유배향각 θ 는 식(2)에 의해 계산한다⁸⁾.

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

섬유배향각 θ 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 농도정보를 수치 데이터로 읽어 컴퓨터로 처리하여 모든 화소에 대하여 섬유배향각 θ 와 섬유수량 C를 구하였을 때 섬유배향각 분포 $H_D(k)$ 는 식(4)와 같이 나타낼 수 있다⁹⁾.

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

여기서 n은 $0 \leq \theta \leq \pi$ 의 분할수이며, $N_\theta(k)$ 는 $(2k-1)\pi / 2n \leq \theta \leq (2k+1)\pi / 2n$ 의 범위에 있는 섬유의 윤곽선방향 화소수이다.

사출성형된 성형품 웰드부를 중심으로 1/2영역의 연 X-선 사진에 대해 섬유배향 분포상태를 측정하기 위하여 성형품의 중립면에서 x축을 따라서 각각 $10\text{mm} \times 10\text{mm}$ 측정하였다. 이때 측정대상 $10\text{mm} \times 10\text{mm}$ 의 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 계속에서 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 θ 의 측정범위는 10°이다.

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

3. 실험

3.1 시험편 및 실험방법

본 실험에서 사용된 재료는 섬유강화 고분자 복합재료로서 모재는 폴리프로필렌(PP)이고, 강화재는 섬유강화 플라스틱 컴파운드 (fiber-reinforced plastic compound)이다. 섬유강화 복합재료의 섬유함유량은 30wt%, 40wt%, 50wt%이며, 섬유 길이는 10mm이다. 사용한 사출성형기는 스크류 직경이 $\phi 36\text{mm}$ 이고 형체력이 75 ton, 최대 사출중량은 103 g, 최대사출압력은 1400 kg/cm², 형체행정은 270 mm이다. 성형품 제작 시 수지를 사출성형기 호퍼내에서 250°C로 예열을 한 후 사용하였다.

본 실험에서는 게이트의 위치에 따른 웰드라인부에서의 섬유배향상태를 파악하기 위하여 게이트의 위치를 금형의 중앙에 주어진 경우와 양단에 편심되게 주어진 경우, 웰드라인을 제거하기 위해 끝부분에 스크랩을 만들어 제거한 경우로 구분하여 실험하였다. 사용한 시험편의 형상은 Fig. 1과 같이 one-gate와 double-gate를 갖는 2개의 캐비티로 된 금형을 제작하여 사용하였으며, 게이트의 직경은 3 mm로 하여 사용하였다. 최종 성형품의 형상은 Fig. 1과 같다. 성형된 사출성형 시험편의 두께는 3 mm, 폭은 25.4 mm, 길이는 150 mm로 하였다. 또한, 사출성형시 유동을 좌우하는 금형온도는 성형품의 최대 인장강도를 나타내고 일반적인 제품성형 온도인 50°C와 웰드라인의 생성을 약화시키기 위한 70°C로 변화를 주어 실험하였다.

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

측정하였다. 실험에 사용한 사출 성형품의 연 X-선 사진을 Fig. 2 (a)~(c)에 예로써 나타내었다.

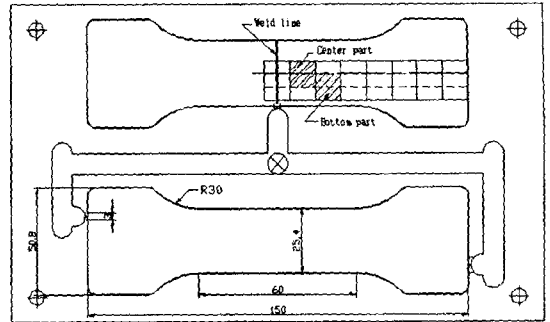


Fig. 1 Dimensions of injection mold and part for measuring fiber orientation



(a) Specimen of weld-line position is middle



(b) Specimen of weld-line position is both end parts



(c) Specimen of weld-line position is end part

Fig. 2 Soft X-ray photographs of specimen

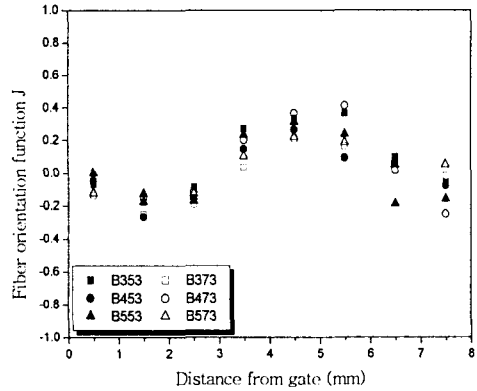
4. 결과 및 고찰

Figs. 3~5는 섬유함유율이 각각 30wt%, 40wt%, 50wt%인 경우에 유동거리에 따른 성형시험편 각 부분의 섬유배향상태를 나타낸 그림이다. 웰드라인의 형성에 차이를 두기 위하여 gate의 위치를 변화시켜 성형시험편의 상단부, 중앙부,

하단부의 섬유배향상태를 유동거리에 따라 나타내었다.

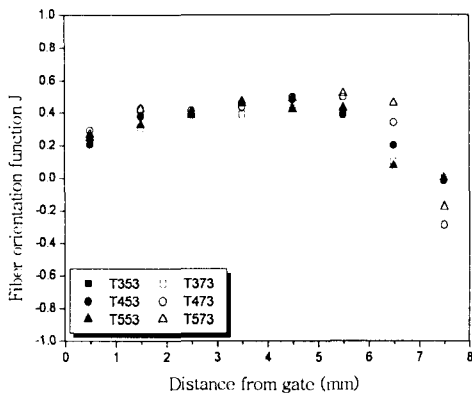
Fig. 3은 double-gate에서 분사된 재료가 중앙부에 웰드라인을 형성하여 나타나는 섬유배향상태를 나타내었다. 이때 게이트의 위치를 편심되게 제작하여 재료의 충전위치 변화에 따른 섬유배향상태를 측정하였다.

Fig. 3 (a)는 중앙에 웰드라인이 생성된 경우에 상단부의 섬유배향상태를 나타낸 그림이다. 유동되는 섬유가 편심된 게이트에서 분사된 후 금형 상단부에 충전되는 시간이 필요하므로 게이트에서부터 섬유배향함수 J값이 중앙부와 하단부에 비하여 증가함을 알 수 있다. Fig. 3 (b)는 중앙부의 섬유배향상태를 나타낸 그림으로 웰드라인부에 이르기 전까지는 아주 일정한 상태로 유지됨을 볼 수 있었다. 이는 게이트에서 분사된 섬유가 벽면과의 마찰없이 일정하게 유동되었음을 알 수 있다. Fig. 3 (c)는 하단부의 섬유배향상태를 나타낸 그림이다. 이 그림에서 섬유배향상태가 필렛부에 이르기 전에 급격히 변함을 볼 수 있다. 이는 게이트에서 분사되어진 섬유가

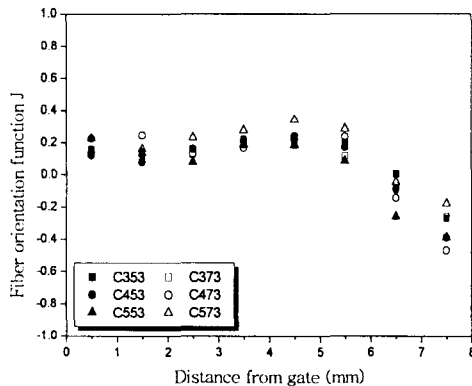


(c) Measurement of lower portion

Fig. 3 Effect of distance from gate and fiber orientation function J (Weld-line position is middle)



(a) Measurement of top portion



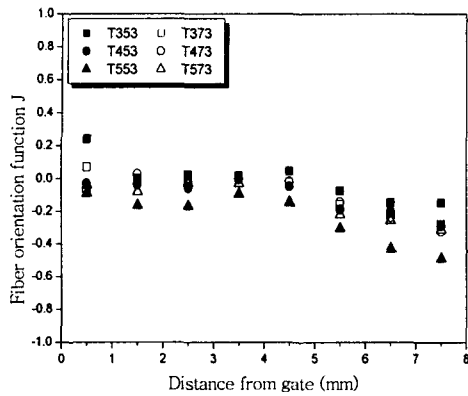
(b) Measurement of center portion

상단 금형부에 충전되는 부분과 필렛부분과의 마찰로 인하여 섬유배향상태가 역배향(90° 회전)상태가 되나 충전이 완료 후에는 일정한 상태로 유지됨을 알 수 있다.

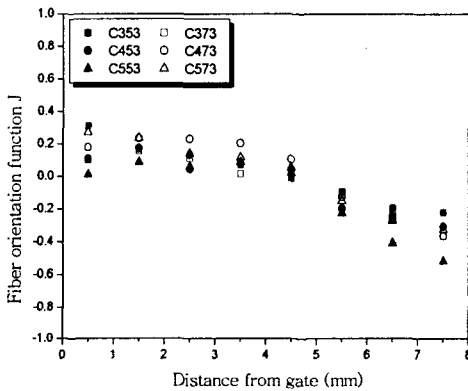
또한 금형온도에 의한 성형품의 섬유배향상태는 50℃ 경우에서 70℃ 경우보다 보다 안정적으로 나타났는데 이는 금형 온도 상승으로 인하여 사출가압시 속도구배가 크게 나타난 결과라 생각된다.

Fig. 4는 게이트의 위치를 Fig. 1과 같이 중앙에 주어 재료의 유동이 금형 중앙부에서 양쪽 끝부분으로 충전되게 하여 사출가압한 성형품의 각 부분에 나타나는 섬유배향상태를 나타낸 그림이다. 이 그림에서 게이트로부터 분사된 섬유가 금형 상단부와 중앙부에 유동된 경우는 하단 금형부보다 섬유배향상태가 더 불규칙하게 나타났다. 이는 하단 금형부의 경우는 게이트의 위치가 중앙에 위치하여 분사된 섬유가 유동을 하기 위해서는 하단 벽면부를 따라 유동하여야 하는 구조를 가지고 있으므로, 섬유함유율의 영향보다는 금형벽면과의 마찰에 의하여 섬유배향이 이루어지므로 섬유함유율과 관계없이 거의 유사하게 나타났다.

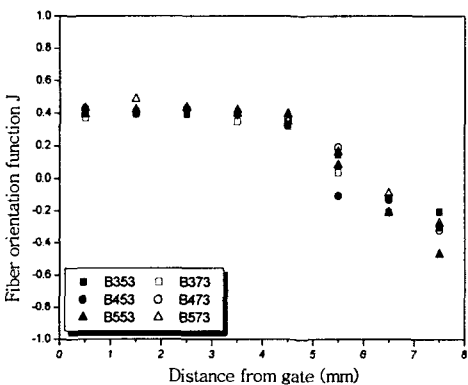
또한 상단부와 중앙부를 비교하여도 유동보다는 Fig. 2 (b)에 나타낸 연 X-선 사진과 같이 분사되어진 섬유의 충전 경로에 의해 섬유배향의 정도가 이루어졌음을 알 수 있다. 그러나 이와 같은 경우는 단순히 웰드라인 제거의 측면에서는 좋은 방안이나 성형품의 기계적 특성에는 상하부분의 섬유배향상태가 달라짐으로 인하여 이방성 재료가 되어 성형품 자체의 특성을 감소시키는 결과를 가져올 것이라 사료된다.



(a) Measurement of top portion



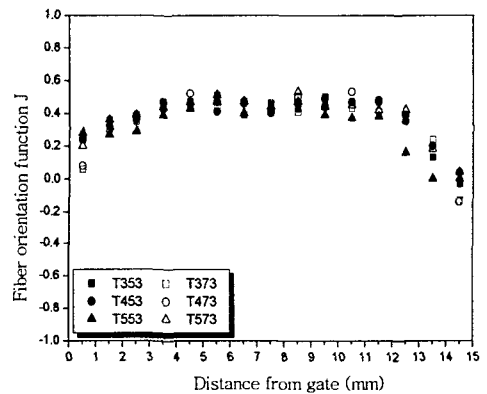
(b) Measurement of center portion



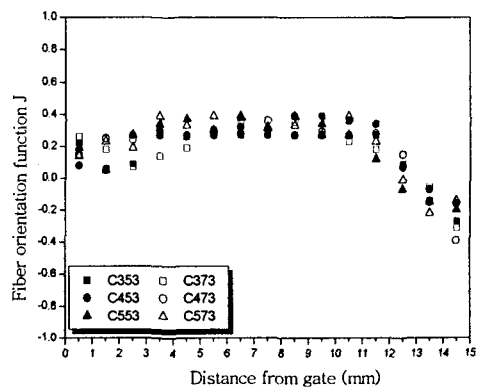
(c) Measurement of lower portion

Fig. 5는 한쪽 부분의 러너를 막아 재료의 유동이 one-gate 형상으로 충전되게 하였고, 끝부분에 스크랩을 주어 이를 제거한 후 나타나는 섬유배향 상태를 각 부분별로 나타낸 그림이다. 이 그림에서 금형온도나 섬유함유율과 관계없이 섬유의 유동이 거의 모든 부분에서 유사한 경향으로 나타났다. 이는 앞서서도 언급한 바와 같이 편심된 게이트에서의 분사되어진 섬유가 상단 금형부에 충전되어진 후에는 동일한 유동과정을 갖기 때문이다.

따라서 상단 금형부와 중앙부, 하단 금형부의 섬유배향 함수값은 Fig. 2 (c)의 연 X-선 사진에 나타난 바와 같이 섬유배향 함수값이 하단 금형부에서 중앙부와 상단 금형부에 이를 수록 섬유의 유동이 발생하여 섬유배향 함수값이 상승함을 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.



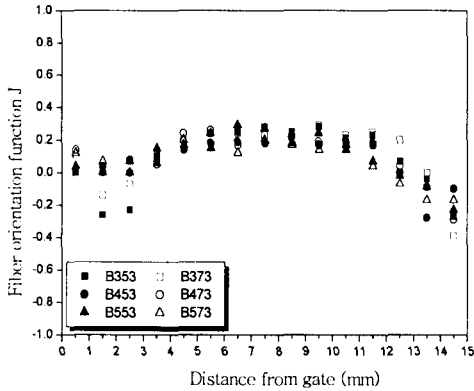
(a) Measurement of top portion



(b) Measurement of center portion

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

참고 문헌



(c) Measurement of lower portion

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

5. 결 론

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

1. 사출성형품 중앙부의 유동은 게이트로부터 일정한 흐름을 이루나, 하단부의 유동은 벽면과의 마찰로 인하여 유동속도가 느려지고 분수흐름에 의해 되돌아오는 수지와와의 충돌로 인하여 섬유배향상태의 변화가 심하게 나타남을 알 수 있다.
2. 게이트에서 멀어질수록 모재와 강화재의 유동속도차에 의하여 모재의 유동은 빠르고 유리섬유의 유동은 느려지는 분리 배향이 발생하고, 유동의 끝부분에서 분수흐름의 영향으로 유동방향과 직각인 상태로 배향되어 웰드라인 생성과 같은 효과를 나타내었다. 또한 금형의 양쪽 게이트를 편심시켜 분사할 경우가 분리 및 배향이 가장 심하게 나타남을 알 수 있었다.
3. 중앙에서 양끝단으로 유동되는 경우는 하단 벽면부를 따라서 유동되어야 하는 구조를 가지고 있으므로, 섬유함유율의 영향보다는 금형벽면과의 마찰에 의하여 섬유배향이 이루어지므로 웰드라인 제거의 측면에서는 좋은 방법이나 유동방향과 직각방향으로 섬유의 역배향이 이루어져 성형품의 특성을 감소시키는 결과를 가져온다.

- (1) Hojo, H., Kim, E. G., Tamakawa, K. and Nagatsuka, C., 1986, "Separation of Matrix and Fibers during Molding of Long Fiber-Reinforced Thermoplastics", Processing of 3rd Japan-U.S. Conference on Composite Materials, Tokyo, pp.605-612.
- (2) 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.
- (3) Lawrence, E., Nielsen, 1994, "Mechanical properties of polymers and composites", Marcel Dekker, inc, pp.475-483.
- (4) 横井秀後, 村田泰彦, 1995, "ガラスイート金型とよる 纖維配向過程の可視化解析", プラスチック成形加工學會誌, 第7卷 第9號, pp.600-607.
- (5) Bell, G. R., Cook, D. C. and Rogers, D. D., 1979, Plastic. Eng., No. 35, pp.18.
- (6) Hagerman, E., 1973, Plast. Eng., pp.67.
- (7) 山田國廣, 堀川 明, 1984, "2次元纖維集合體の確率幾何", 纖維機械學會誌, Vol. 37 No. 12, pp.51-64.
- (8) 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.
- (9) 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.