

FRP의 사출성형에 있어서 섬유배향상태와 섬유함유율분포에 관한 연구

김진우^{**}, 이동기^{**}

A Study on the Fiber Orientation and Fiber Content Ratio Distribution during the Injection Molding for FRP

J. W. Kim^{*+}, D. G. Lee^{**}

Abstract

Injection molding is a very important industrial process for the manufacturing of plastics objects. 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 weld-line in injection-molded products is assessed. And the effects of fiber content and injection mold-gate conditions on the fiber orientation are also discussed.

Key Words : Injection Molding(사출성형), Fiber Orientation Function(섬유배향함수), Fiber Content Ratio(섬유함유율비), Image Processing(화상처리), One-Gate(1점 게이트), Double-Gate(2점 게이트), Weld line(웰드라인)

1. 서론

FRP는 비강도(인장강도/밀도), 비강성(탄성률/밀도), 내열성 등의 기계적 성질이 수지 단일체에 비하여 우수하므로 고강도와 제품의 정밀성 및 경량화가 요구되는 공업제품에 널리 이용되고 있다.

또한, 고분자가 갖는 다양성과 경량성으로 인해 금속이나 요업재료의 특성을 능가하는 대체재료로서 각광받고 있으며 자동차, 항공, 선박, 군수 및 스포츠 산업에 이르기까지 그 용도가 폭 넓게 확대되고 있다.

FRP의 성형방법으로는 사출성형, 압축성형, 압출성형, 열성형 등과 같은 유동성형이 주로 이용되는데 특히, 사출성형은 플라스틱 재료를 공업제품에 이용하는데 있어서 다른 공정에 비하여 생산속도가 빠르고 마무리 가공이 거의 필요없기 때문에 매우 우수한 생산성을 보여주고 있어 그 활용도가 급증하고 있는 실정이다.

FRP를 이용한 사출성형품에서 금형 게이트 위치와 크기 및 게이트 수 등의 금형형상 요인에 따라 웰드라인의 발생은 피할 수 없는 현상이다. 이 웰드라인에서는 수지흐름의 직각방향으로 섬유가 배향되기 때문에 보강효과가 급격히 줄어들어 성형

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

품의 기계적 물성의 저하원인이 된다^(1,2).

웰드라인(weld line)의 발생을 피할 수 있는 방법으로는 성형온도, 유동속도, 압력 등의 성형변수 등을 조정하여 제어할 수 있으나 이는 생산속도 및 수축률 향상 등의 2차적인 문제점이 있어 근본적으로 해결하기 어렵다. 특히 웰드라인은 두께 이상의 다점 게이트(multi-gate)가 설치된 사출금형에서 게이트 수에 따라 다르기는 하지만 피할 수 없다. 따라서 섬유배향 상태를 제어하여 웰드라인부의 강도를 보강하기 위해서는 섬유배향에 관한 연구가 필수적이라고 할 수 있다.

Lee 등은⁽²⁾ 섬유강화 고분자 복합재로 사출성형품의 섬유배향상태에 대하여 고찰한 결과 섬유함유율과 금형온도의 영향보다는 금형 게이트 위치와 밀접한 관계가 있음을 밝혔고, Kim 등은⁽³⁾ 사출성형에 있어서 웰드라인의 생성을 약화시키기 위한 최적 사출조건을 설계하기 위하여 유동해석을 하였으며, 성형변수인 유동속도, 온도 및 압력 등이 웰드라인을 약화시키는 영향에 관하여 연구하였고, Kim 등은⁽⁴⁾ 사출성형에서 충전과정과 보압과정에 따른 성형유동해석을 실시하고 온도와 압력에 의한 유동패턴을 시험사출한 결과와 비교하였으며, 보압과정에서 보압이 사출성형에 미치는 영향에 관하여 연구하였다. 또한, Ha 등은⁽⁵⁾ PEI계 고분자 수지의 기계적 특성과 열적특성을 분석하여 탄자운반체가 요구하는 특성에 부합되는지를 평가하고, 사출 성형시의 사출조건을 제시하였다.

그러나 유동성형 과정에서 섬유의 거동에 관한 연구는 대부분이 뉴턴유체의 경우일 뿐, 사출성형에 있어서 강도저하의 주된 원인이 되는 강화재의 섬유배향상태와 섬유함유율분포에 관한 연구는 거의 없는 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 사출성형에 있어서 1점 게이트(one-gate)와 2점 게이트(double-gate) 금형형상 요인이 섬유배향상태와 섬유함유율분포에 어떠한 영향을 주는가에 대해서 고찰하였다.

2. 이론

2.1 섬유배향함수

FRP 사출성형품의 두께는 폭, 길이와 비교하여 매우 얇기 때문에 섬유를 2차원 집합체로서 취급하면, 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 있다⁽⁶⁾.

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

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

Fig. 1은 식 (1)의 섬유배향함수 J값 변화에 따른 섬유배향각 Θ 와 상대 섬유길이와의 관계를 나타낸 그림이다.

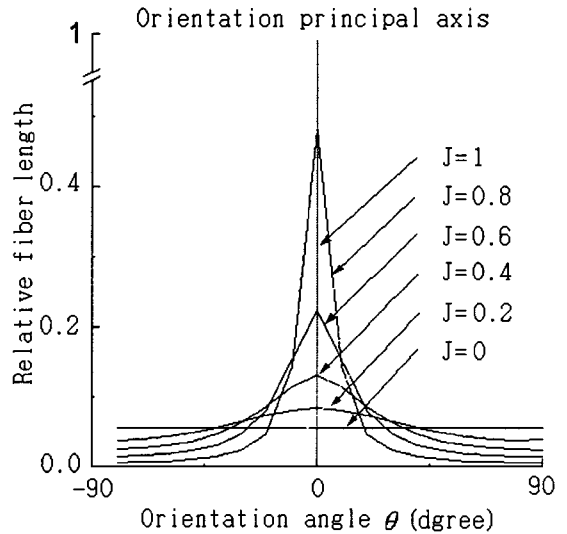


Fig. 1 Distributions of relative fiber length according to the fiber orientation angle

2.2 섬유배향각 및 분포

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 계산한다⁽⁷⁾.

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

섬유배향각 Θ 방향을 갖는 섬유수량 C를 측정할 때 식(3)를 이용하여 화소의 농도값으로 계산한다⁽⁷⁾.

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

사출성형된 성형품의 연 X-선 사진으로부터 얻어진 농도정

보를 수치 데이터로 읽어 컴퓨터로 처리하여 모든 화소에 대하여 섬유배향각 θ 와 섬유수량 C 를 구하였을 때 섬유배향각 분포 $H_D(k)$ 는 식(4)와 같이 나타낼 수 있다⁽⁸⁾.

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

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 윤택선방향 화소수이다.

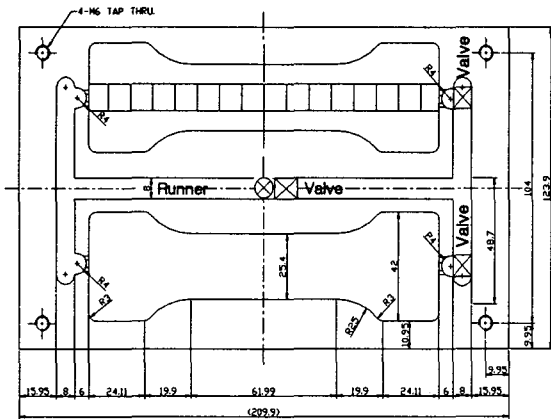


Fig. 2 Dimensions of injection mold and parts for measuring fiber orientation function J and fiber content ratio Q_{fr}

2.3 섬유함유율비

FRP 재료의 사출성형시 강화재인 유리섬유를 고체, 모재인 PP를 액체로한 비뉴턴유체는 섬유와 PP의 유동속도차에 의하여 분리가 생기며, 이로 인하여 사출성형품 내의 섬유함유율분포가 불균질하게 된다. 이 FRP 사출성형품의 섬유함유량을 계산하기 위하여 웰드라인부를 중심으로 Fig. 2의 중앙부 메시(mesh) 영역에 대해서 전기로를 사용하여 600℃에서 30분간 가열·연소하고, 연소전후의 무게를 정밀전자저울(1/10,000 g)로 측정하여 섬유함유율 Q_{fr} 을 식(5)에 의하여 구하였다⁽⁸⁾.

$$Q_f = \frac{q_f}{q_{f0}} \quad (5)$$

여기서 q_{f0} 는 연소전 시험편(PP + fiber)의 무게, q_f 는 연소후 시험편(fiber)의 무게이다.

또한, 섬유함유율비 Q_{fr} 은 식(6)에 의하여 구한다.

$$Q_{fr} = \frac{Q_f}{Q_{f0}} \quad (6)$$

여기서 Q_{f0} 는 FRP 재료의 사출성형전 섬유함유율(50 wt%)이다.

3. 실험

3.1 조건 및 방법

FRP 재료는 국내에서 시판중인 (주)삼박(sambak, co.) 제품의 섬유강화 플라스틱 컴파운드(fiber reinforced plastic compound)로서 모재는 폴리프로필렌(polypropylene:이하 PP라 약칭한다.)이고, 강화제는 유리섬유이다. 이때의 섬유함유율은 50 wt%로 Table 1에 나타낸 특성과 같이 유리섬유와 폴리프로필렌이 첨가된 펠릿(pellet) 형태로 시판되는 사출성형용 제품으로 섬유길이는 10 mm이다.

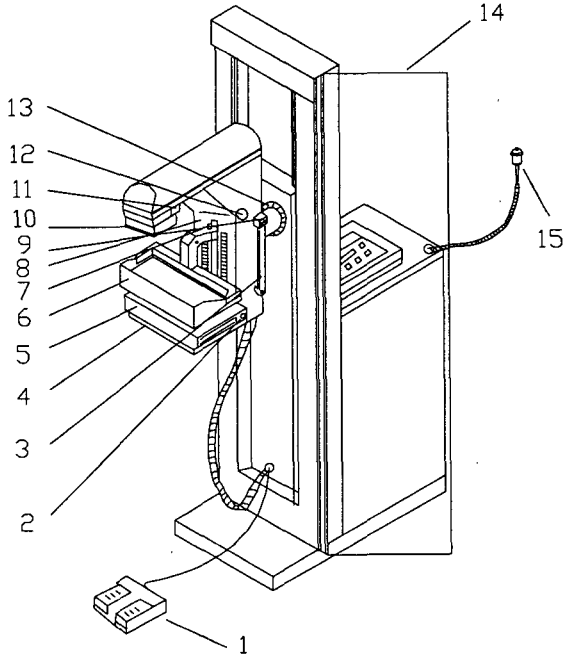
사출성형기는 LG기계의 IDE75ENII를 사용하였고, 이 사출기의 스크류 직경은 $\Phi 36$ mm이고 형체력이 75 ton, 최대 사출중량은 103 g, 초대사출압력은 1400 kg/cm², 형체형정은 270 mm이다. 성형품 제작시 수지를 사출 성형기 호퍼내에서 25 0℃로 예열을 한 후 사용하였다. 사출성형 조건 중 사출압과 보압은 동일하게 60 kg/cm²으로 주었으며, 금형온도는 봉히터와 열전대를 사용하여 30℃로 주었고, 냉각시간은 12 sec로 하였다.

Table 1. Characteristics of fiber thermoplastics compound

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

본 실험에서는 Fig. 2와 같이 1점 게이트와 웰드라인 생성을 위해 2점 게이트를 갖는 2개의 캐비티로 되어 있는 금형을 제작하여 사용하였으며, 게이트의 직경은 8 mm로 하여 사용하였다. 이때 금형에서 제작된 FRP 사출성형품의 최종 형상은 두께는 4 mm, 폭은 25.4 mm, 길이는 150 mm로 하였다. FRP

사출성형품의 연 X-선 촬영장치는 Fig. 3에 나타내었다. 이 연 X-선 현상조건은 Table 2와 같다.



- | | |
|---------------------------|------------------------|
| 1. Lock foot switch | 2. Bucky fixing knob |
| 3. Patient handle | 4. Photo-detector ADJ. |
| 5. Bucky device | 6. Compression plate |
| 7. COM. Plate Fixing knob | 8. Compression scale |
| 9. Rotation lock | 10. Diaphragm insert |
| 11. Field light switch | 12. Compression knob |
| 13. Rotation screen | 14. Protection screen |
| 15. Exposure hand switch | |

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) |

3.2 섬유배향상태 측정

Fig. 4는 FRP 사출성형품의 연 X-선 사진의 한 예이다. 2점 게이트에서 분사되는 수지의 충돌로 인해 웰드라인에서는 수지의 유동방향과 거의 직각인 상태로 섬유가 배향되고, 게이트 부에서는 충전이 완료되어 가는 도중에 생기는 분수흐름의 효과라 생각한다. 그리고 웰드라인부와 게이트부 사이의 중심부에서 섬유는 유동방향으로 배향되었음을 볼 수 있다.

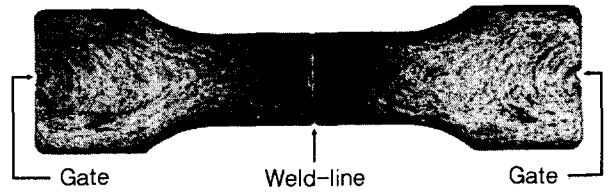


Fig. 4 Soft X-ray photography of products after injection molding

FRP 사출성형품의 금형 게이트에서 웰드라인부까지의 섬유 배향상태와 섬유함율분포의 측정영역은 Fig. 2에 나타난 부분과 같이 10 mm × 10 mm 단위로 측정하였다. 이때 섬유배향상태 측정 영역을 80×80화소로 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 θ 의 측정범위는 10°이다.

FRP 사출성형품의 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.

4. 실험결과 및 고찰

Fig. 2에서 웰드라인이 있는 경우와 없는 경우를 실험하기 위해 밸브로 조절하여 FRP 사출성형품을 제작하였고, 이 성형

품 길이(L)에 대한 금형게이트로부터 유동거리(x)에 따른 섬유 배향상태를 Fig. 5에 나타냈다. 웰드라인이 있는 경우와 없는 경우 모두 섬유배향상태는 큰 노즐에서 작은 노즐로 흐를 때 등방성에서 이방성으로 배향됨을 알 수 있다.

비뉴턴유체인 FRP 재료는 사출성형 유동과정에서 고체인 섬유와 액체인 PP가 유동속도차에 의해 분리와 배향이 발생한다. 즉, 2점 게이트의 경우는 웰드라인부에서, 1점게이트에서는 게이트 맞은편 끝부분 벽면에서 액체인 수지는 금형벽면을 타고 되돌아오고 고체인 섬유는 상호간섭력에 의해 분수흐름과 같은 섬유배향상태가 나타남을 알 수 있고, Fig. 4에서 가시적으로 관찰할 수 있다.

웰드라인이 있는 경우는 금형게이트로부터 분사되는 수지의 충돌로 인하여 섬유배향이 수지 유동방향에 90° 회전(역배향)되어 배향됨을 알 수 있다. 또한, 웰드라인이 없는 경우는 게이트 맞은편 끝부분에서 분수흐름에 의해 섬유배향이 발생함을 알 수 있다.

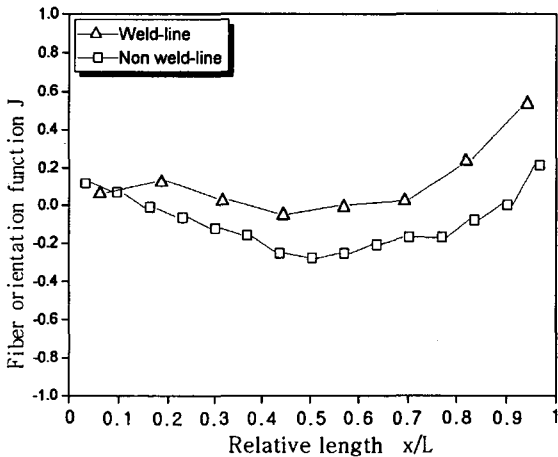


Fig. 5 Relationship between relative length (x/L) from gate and fiber orientation function J

Fig. 6은 FRP 사출성형품의 길이(L)에 대한 금형게이트로부터 유동거리(x)에 따른 섬유함유율분포를 나타낸 그림이다. 이 그림에서 금형 게이트로부터 거리가 멀어질수록 섬유함유율이 증가함을 알 수 있고, 2점 게이트의 경우는 1점 게이트와 비교하여 금형게이트로부터 유동거리(x)가 짧기 때문에 섬유함유율이 크게 나타났다. 이는 게이트로부터 흘러나온 용융된 재료 (PP+fiber)가 유동선단에서 고체인 섬유와 액체인 수지가 웰드라인(2점 게이트)이나 게이트 맞은편 끝부분 벽면부분(1점 게

이트)에서 유동속도차에 의해 액체인 수지는 금형벽면을 타고 되돌아오고 고체인 섬유는 상호간섭력에 의해 남아 있기 때문이다.

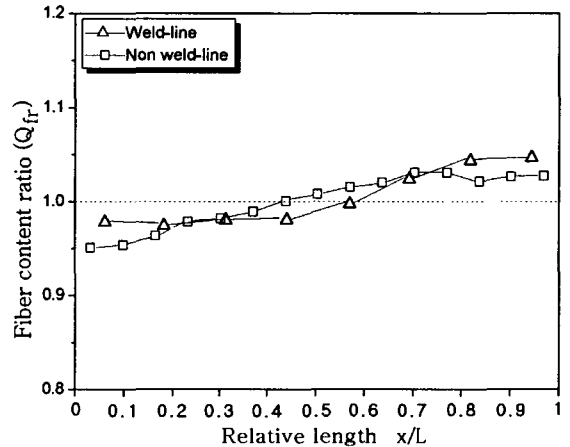
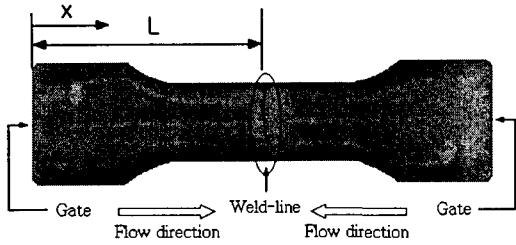


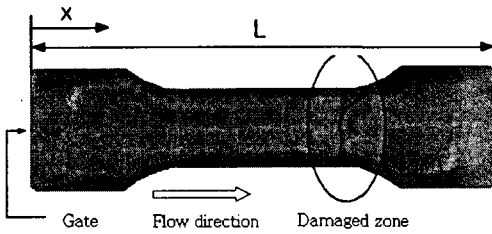
Fig. 6 Relationship between relative length (x/L) from gate and fiber content ratio Q_{fr}

Fig. 7(a)는 웰드라인이 있는 FRP 사출성형품을 인장시험한 시편의 파단부위를 나타낸 그림이며, Fig. 7(b)는 웰드라인이 없는 FRP 사출성형품의 파단부위를 나타낸 그림이다. 2점 게이트의 경우는 웰드라인부에서 파단되고, 1점 게이트의 경우는 성형품 길이(L)에 대한 금형게이트로부터 유동거리(x) 약 0.8인 영역에서 파단되었다. 이는 Fig. 5에 나타난 섬유배향함수 J 값이 급격히 증가하는 영역과 일치함을 알 수 있다. FRP 사출성형 시험편에 인장하중이 가해질 경우 복합재의 특성상 하중의 대부분을 유리섬유가 받아야 하나 하중방향에 수직으로 섬유배향이 이루어져 섬유는 하중을 받지 않고 수지가 하중의 대부분을 받기 때문에 인장강도 값이 낮게 나타나 보강효과가 떨어짐을 알 수 있다.

Table 3은 웰드라인이 없는 시험편과 웰드라인이 있는 시험편의 인장시험한 결과이다. 웰드라인 생성을 방지한 시험편은 웰드라인이 있는 시험편과 비교하면 약 3배 정도 인장강도 값이 높게 나타남을 알 수 있다.



(a) Weld line specimen



(b) Non weld line specimen

Fig. 7 Schematic view of failure due to tensile strength

Table. 3 Mechanical properties of injection molding composites

Type	Tensile stress(σ)
Weld line Specimen	26 MPa
Non Weld line Specimen	70 MPa

5. 결 론

FRP 사출성형에 있어서 금형 게이트가 섬유배향상태와 섬유함유율분포에 어떠한 영향을 미치는가를 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

1. 웰드라인이 있는 경우는 금형게이트로부터 분사되는 수지의 충들로 인하여 섬유배향이 수지 유동방향에 90° 회전(역배향)되고, 웰드라인이 없는 경우는 게이트 맞은편 끝부분에서 분수흐름과 같은 섬유배향이 발생함을 알 수 있다.

2. 금형 게이트로부터 흘러나온 용융된 재료는 유동속도차에 의해 게이트로부터 거리가 멀어질수록 섬유함유율이 증가하고, 금형게이트로부터 유동거리가 짧은 경우가 섬유함유율이 더 높게 나타남을 알 수 있다.

3. FRP 사출성형시 2점 게이트에서 분사되는 수지와 섬유는 웰드라인 영역에서 상호 충돌하여 유동방향에 대해서는 90°회전(역배향) 되므로 섬유의 보강효과를 감소시켜 인장강도 값이 낮아짐을 알 수 있다.

참 고 문 헌

- (1) Lawrence, E., Nielsen, 1994 "Mechanical properties of polymers and composites", Marcel Dekker, inc, pp.475-483
- (2) Lee, D. G., Sim, J. K., Kim, J. W., 2005, "Fiber Orientation Distribution of Injection Molded Product on the Fiber-Reinforced Polymeric Composites", Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers, Vol. 14, No. 1, pp. 73~80.
- (3) Kim, H. P., Kim, Y. J., 2001, "Flow Analysis for an Effective Weld Line Control in Injection Molding", Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers, Vol. 10, No. 2, pp. 64~72.
- (4) Kim, H. P., Kim, Y. J., 2002, "A Study on the Effects of Filling and Packing Phases on Injection Molding Process", Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers, Vol. 11, No. 4, pp. 44~53.
- (5) Ha, Y. W., Chong, T. H., Lee, B. J., 2002, "Injection Moulding of Polyetherimide Axi-Symmetric Elements", Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers, Vol. 11, No. 6, pp. 68~74.
- (6) Yamada, K., Horikawa, A., 1984, "Stochastic Geometry of Two-Dimensional Fiber Assemblies", Textile Machinery Soc. of Japan, Vol.37 No.12, pp.51~64.
- (7) 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.
- (8) 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.