

섬유강화 고분자 복합재의 사출성형에 있어서 웰드라인부의 섬유배향측정

김혁* · 강명구* · 최유성* · 이동기** · 한길영** · 김이곤***

Measurement of the Fiber Orientation on Weld-Line Parts for Injection Molding of Fiber Reinforced Polymeric Composites

H. Kim, M. G. Kang, Y. S. Choi, D. G. Lee, G. Y. Han and E. G. Kim

Key Words : Fiber Reinforced Polymeric Composites(섬유강화 고분자 복합재), Injection Molding(사출 성형), Weld-Line Part(접합부), Mold Temperature(금형온도), Fiber Orientation Function(섬유배향함수), Image Processing(화상처리), Fiber Content Ratio(섬유함유율비)

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 parts in injection-molded products is assessed. And the effects of fiber content and injection molding conditions on the fiber orientation functions are also discussed

1. 서 론

사출성형은 강화재와 모재가 혼합된 펠렛을 스크류 혼련과정과 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 유동성형하는 경우의 문제점으로 점탄성이 있는 재료, 복잡한 금형, 급격한 온도구배 등의 조건에서 성형하기 때문에 최적 성형조건의 선정이 어려울 뿐만 아니라, 성형품에는 성형축, 웰드라인, 변형, 싱킹마크 등의 외관결함이 발생하는 문제점이 있다. 또한, 성형중 금형내 유동길이가 매우 길거나 금형의 측면에서 유동

이 저항을 받을 때 섬유배향이 발생하여 강도나 특성에 큰 변화가 생긴다.

즉 이 섬유배향은 섬유직경, 섬유길이, 섬유함유율에 따른 섬유상호간의 간섭력 등과 같은 재료요인과 사출 속도, 사출압력 및 금형온도 등과 같은 성형인자에 의해 발생한다. 성형된 제품은 섬유배향 때문에 불균질하고 이방성이 나타나 성형품의 기계적 성질 등에 큰 영향을 미친다^{1, 2, 3)}. 그러므로 섬유강화 고분자 복합재를 이용한 사출성형품에서 웰드라인의 발생은 피할 수 없는 현상이다. 이 웰드라인부에서는 수지 흐름의 직각방향으로 섬유가 배향되기 때문에 보강효과가 급격히 줄어들어 기계적 성질의 저하 원인이 된다⁴⁾. 그러므로 웰드라인부의 강도를 보강하기 위해서는 웰드라인의 연구가 필수적이라고 할 수 있다.

지금까지 사출성형에 있어서 기계적 성질에 미치는 성형인자 등의 영향을 고찰한 예를 살펴보면, Hubbauer는⁵⁾ ABS와 PVC의 웰드라인부에서 충격강도를 실험하였다. 그는 웰드라인이 있는 시편은 웰드라인이 없는 시편보다 충격강도가 절반으로 떨어진다고 하였다.

또한, Yokoi 등은⁶⁾ 트레이서 섬유를 이용하여 캐비

* 조선대학교 대학원 정밀기계공학과

** 조선대학교 공과대학 기계공학부

*** 국민대학교 공과대학 기계자동차공학부

터내 충전과정중 잠색유 배향상태를 가시적으로 연구하였다. Bell등은⁷⁾ 유리섬유가 웰드라인에서 임의의 방향으로 배향되어 있기 때문에 모재보다 강도가 떨어진다고 하였다. Hagerman은⁸⁾ double-gate 급형에 의하여 제작된 인장시험편을 사용하여 실험한 결과, 웰드라인의 강도저하는 흐름선단(flow front)에서 분산 및 기계적 혼합이 충분히 일어나지 않기 때문이라고 하였다. 그러나 사출성형에 있어서 웰드라인부 강도저하의 주된 원인이 되는 강화제인 섬유배향상태를 정량적으로 측정할 연구는 거의 없는 실정이다.

본 연구에서는 웰드라인이 있는 성형품을 성형하기 위해 double-gate를 갖는 급형을 제작하여 실험하였다. 이때 사출성형된 성형품 웰드라인부의 기계적 성질에 미치는 섬유길이, 섬유함유율, 급형온도, 급형폭 등의 사출성형조건이 섬유배향상태에 어떠한 영향을 주는가 보고한다. 이 사출성형된 성형품 웰드라인부의 섬유배향상태를 측정하기 위해서 성형품을 연 X-선 사진 촬영한 후, 이 사진을 이미지 스캐너에 인식하여 사진의 농도차를 이용한 화상처리에 의해 섬유배향분포를 측정하여 성형품 웰드라인의 섬유배향상태에 미치는 사출성형조건에 영향을 대해서 고찰하였다.

2. 섬유배향함수 및 섬유배향각 측정법

2.1 섬유배향함수

국내외에서 사용되고 있는 대부분의 섬유강화 복합판재의 두께는 폭, 길이와 비교하여 매우 얇기 때문에 섬유를 2차원 집합체로서 취급하여 섬유배향각 분포상태를 측정한다. 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 있다⁹⁾.

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

여기서, J는 2차원적으로 섬유배향각 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 계산

한 후 섬유배향각 θ 는 식(2)에 의해 계산한다¹⁰⁾.

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

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

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

Fig. 1은 급형폭(W) 25.4 mm에서 사출성형된 성형품의 연 X-선 사진의 한 예이며, 그림에서 웰드라인부의 섬유배향은 급형의 형상과 크기에 의존한다. 특히 두 개의 유동이 만나는 웰드라인부는 꽃이나 분화구같은 형태로 섬유배향이 나타난다. 이는 double-gate에서 분사되는 수지의 충돌로 인해 웰드라인에서는 수지의 유동방향과 거의 직각인 상태로 섬유가 배향되고, 게이트부에서는 충전이 완료되어 가는 도중에 생기는 분수흐름의 효과라 생각한다. 그리고 웰드라인부와 게이트부 사이의 중심부에서 섬유는 유동방향으로 배향되었음을 볼 수 있다.



Fig. 1 Soft X-ray photography of products after injection molding

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 있다¹¹⁾.

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

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 율곽선 방향 화소수이다.

Fig. 2와 같이 사출성형된 성형품 웰드라인을 중심으로 대칭되므로 1/2 영역의 연 X-선 사진에 대해 섬유배향 분포상태를 측정하기 위하여 성형품의 중립면에서 x축을 따라서 각각 10 mm × 10 mm의 영역에 대해서 측정하였다. 이때 측정대상 10 mm × 10 mm의 영역을 80 × 80 화소로 분할하여 이미지 스캐너(GT-4000V, JAPAN, 해상도(resolution)는 400 × 400 화소, 1 화소는 1/8 mm × 1/8

mm, gray level : 256계조, 흑 : 0, 백 : 255)로 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.

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 화상의 모든 화소에 대하여 섬유배향각 분포 $H_D(k)$ 를 식(4)에 의해 측정 후, 식(1)에 의해 최소자승법으로 섬유배향함수 J값을 구한다. 최소자승법으로 구한 섬유배향함수 J값을 통하여 섬유배향상태를 정량적으로 알 수 있다⁹⁾.

3. 실험

3.1 시험편 및 실험방법

본 실험에서 사용된 재료는 섬유강화 고분자 복합재로서 모재는 폴리프로필렌(PP)이고, 강화재는 섬유강화 플라스틱 컴파운드 (fiber-reinforced plastic compound)이다. 섬유함유량은 27 wt%, 36 wt%, 50 wt%이며, 섬유길이(L)는 5 mm, 10 mm의 2종류이다. 강화재는 S사에서 생산되는 제품이고, 폴리프로필렌은 H사에서 생산되는 사출성형용 제품이다. 본 실험에 사용한 사출성형기는 스크류 직경이 $\phi 36$ mm이고 형체력이 75 ton, 최대 사출중량은 103 g, 최대사출압력은 1400 kg/cm^2 , 형체행정은 270 mm이다. 성형실험에서 수지를 사출성형기 호퍼내에서 250°C로 예열을 한 후 사용하였다.

Fig. 2는 사출성형에 사용된 금형형상의 개략도로서 double-gate(gate 직경 8 mm)를 갖는 2개의 캐비티로 되어 있는 금형을 웰드라인 생성을 위해 좌우측에서 유동이 가능하도록 한 것과 좌측부의 게이트를 막아서 웰드라인의 생성을 방지할 수 있도록 제작하였다.

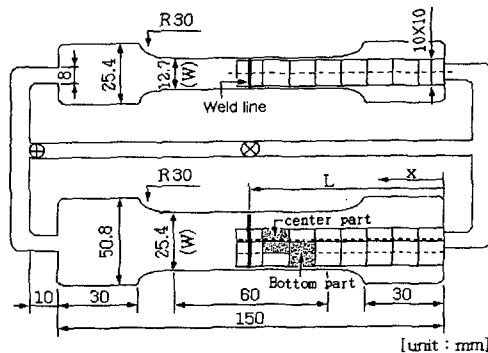


Fig. 2 Dimensions of injection mold and part for measuring fiber orientation function J and fiber content ratio Q_{fr}

금형에서 제작된 사출성형품의 최종형상과 치수에서 두께(t)는 4 mm, 폭(W)은 12.7 mm, 25.4 mm의 2종류, 길이(2L)는 150 mm로 하였으며 인장시험편 형상으로 제작하였다. 성형품의 기계적 물성치를 파악하기 위한 인장시험기는 영국 Houndsfield사 만능재료시험기(용량 5 ton, cross head speed : 1.26 mm/min)를 사용하였다.

3.2 성형조건 및 섬유함유율 측정

사출성형 조건중 사출압과 보압은 동일하게 60 kg/cm^2 로 주었으며, 사출온도는 250°C, 금형온도는 봉히터와 열전대를 사용하여 30°C, 60°C, 100°C 3종류로 변화를 주었고, 냉각시간은 12 sec로 하였다. 또한, 성형품 섬유함유량을 계산하기 위하여 웰드라인부를 중심으로 Fig. 2의 우측부와 같은 영역에 대해서 전기로를 사용하여 600°C에서 30분간 가열·연소하고, 연소전후의 무게를 정밀전자저울($1/10,000 \text{ g}$)로 측정하여 섬유함유율 Q_{fr} 을 식(5)에 의하여 구하였다¹¹⁾.

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

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

4. 실험결과 및 고찰

Fig. 3은 성형품의 섬유함유율이 36 wt%이고, 섬유길이가 10 mm인 경우 금형온도변화에 따른 게이트로부터 웰드라인까지의 섬유배향상태를 정량적으로 나타낸 그림이다. 이 그림에서 금형온도가 높을수록 사출시 복합재의 유동속도가 빠르게 되므로 섬유배향이 금형온도가 낮은 경우보다 더 잘 배향됨을 알 수 있고, 시험편의 네킹부에서 급축소관의 형상이 되어 섬유가 방향성을 가지게 되었고 이후는 안정된 상태를 유지하여 웰드부에서 분수흐름에 의한 섬유배향이 일어남을 알 수 있다. 이는 게이트에서 나온 복합재가 금형벽면을 따라 흐르다 네킹부에서 급축소관 형상이 되므로 중앙부에서 유동속도차에 의해서 섬유배향이 발생함을 알 수 있다. 또한, 웰드라인에서는 양쪽 게이트로부터 분사된 수지의 충돌과 이로인한 섬유의 상호 간섭력으로 인하여 섬유의 방향성이 수지의 유동방향과 직각인 형태로 배향됨을 알 수 있다.

Fig. 4는 섬유함유율이 50 wt%이고 섬유길이가 10 mm이며 성형품의 폭(W)이 25.4 mm인 경우 게이트로부터 웰드라인까지의 섬유배향상태를 중앙부와 하단부로 나누어서 비교한 그림이다. 이 그림에서 섬유함유율이 Fig. 3에 비해 상대적으로 많기 때문에 중앙부의 섬유흐름과 하단부의 섬유 흐름이 상당한 차이를 나타냄을 알 수 있다. 이는 중앙부의 수지유동은 게이트로부터 분수흐름의 형태로 일정하나, 하단부의 유동은 벽면과의 마

찰로 인하여 유동속도가 느려지고 분수흐름에 의해 되 돌아오는 수지와의 충돌로 인하여 섬유가 방향성을 갖 게 되는 것을 알 수 있다.

Fig. 5는 섬유함유율이 50 wt%이고 섬유길이가 10 mm인 경우 웰드라인의 유무에 따른 게이트로부터 웰드 라인까지의 섬유함유율 분포를 나타낸 그림이다. 이 그림에서 웰드라인과 관계없이 게이트로부터 거리가 멀어 질수록 섬유함유율이 증가함을 알 수 있다. 이는 게이트 로부터 흘러나온 용융된 재료가 유동선단에서 고체인 섬유와 액체인 수지가 웰드라인이나 시험편의 끝부분에서 유동속도차에 의해 액체인 수지는 금형벽면을 타고 되돌아오고 고체인 섬유는 상호간섭력에 의해 남아 있 기 때문이다⁴⁾.

또한, 섬유함유율비 값은 게이트로부터의 거리가 짧은 웰드라인이 있는 성형품의 경우가 더 커짐을 볼 수 있다. 이는 Fig. 1에서와 같이 성형품 중심부 웰드라인

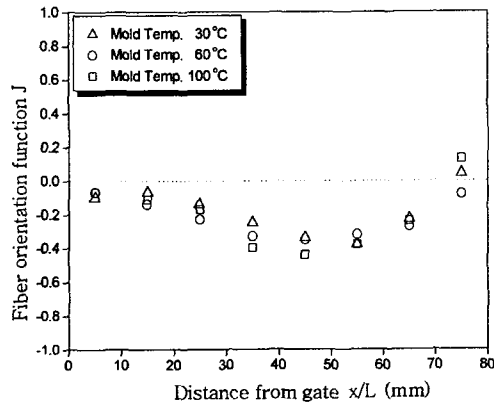


Fig. 3 Relationship between relative length (x/L) from gate and fiber orientation function J for fiber content 36wt%

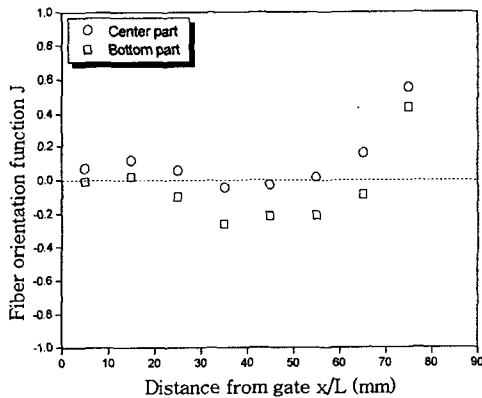


Fig. 4 Relationship between relative length (x/L) from gate and fiber orientation function J for fiber content 50wt%

부근에서 충돌된 섬유는 상호간섭력에 의해 분리되어 분화구형태로 섬유가 뭉쳐있고, 수지는 분수흐름에 의한 반발력으로 되돌아가기 때문에 섬유함유량이 웰드라인 영역에서 높게 나타남을 알 수 있다.

Fig. 6은 사출성형된 웰드라인이 있는 성형품의 인장 강도에 미치는 금형온도의 영향을 섬유길이 변화에 따라 나타낸 그림이다. 이 그림에서 금형온도가 높을수록 사출가압시 속도구배가 크게 발생하여 게이트에서 분사 되는 수지가 웰드라인에서 상호 충돌하여 수지의 유동 방향과 90° 회전상태(역배향)로 섬유배향을 발생시키기 때문에 인장강도 값이 낮아지는 것을 알 수 있다.

또한, 인장강도 값은 섬유길이 5 mm가 10 mm인 경우보다 대체로 높게 나타났다. 이는 웰드라인에서 섬유 길이가 상대적으로 작은 5 mm가 10 mm보다 중앙부와 벽면을 타고 흐르는 수지의 마찰로 인한 섬유배향의 영향을 덜 받아 섬유유동에 의해 나타나는 섬유간의 간섭력이 감소하므로 섬유길이 5 mm의 경우가 보다 안정적인 인장강도 값을 나타냄을 알 수 있다.

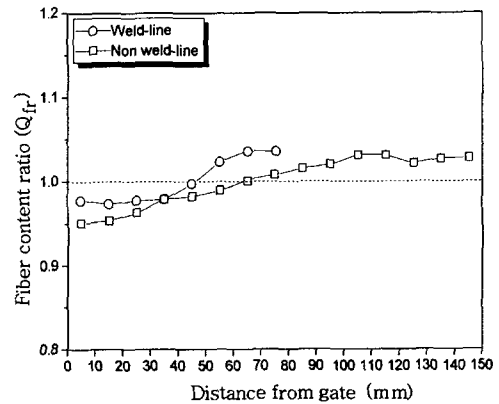


Fig. 5 Effect of distance from gate on fiber content ratio for fiber content 50wt%

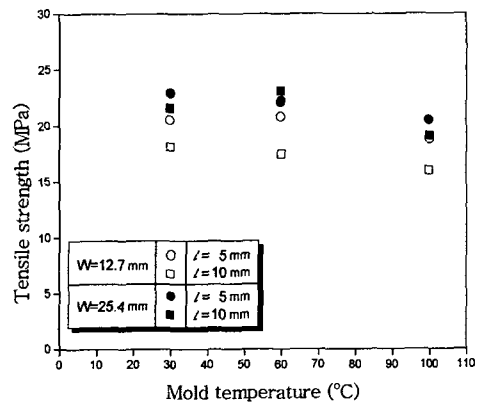


Fig. 6 Effect of injection molding temperature and fiber length on tensile strength

Fig. 7(a)는 웰드라인이 없는 사출성형품을 제작하여 인장실험한 후 파단부위를 나타낸 그림이며, Fig. 7(b)는 웰드라인이 있는 사출성형품을 게이트에서 웰드라인까지 2차가공하여 제작한 시험편을 인장실험한 후 파단부위를 나타낸 그림이다. 그리고 Table 1은 웰드라인이 없는 시험편과 웰드라인이 있는 시험편의 인장실험한 결과이다.

웰드라인이 없는 경우는 Fig. 7(a)와 같이 시험편의 거의 대부분이 충진이 완료되는 끝단부에서 분수흐름에 의해 섬유배향이 발생하여 섬유의 보강효과를 감소시킬 수 있다. 웰드라인이 있는 경우는 Fig. 1과 같이 게이트로부터 분사되는 수지의 충들로 인하여 섬유배향이 수지 유동방향에 90° 회전(역배향)되어 강도저하를 일으키는 것을 알 수 있다.

또한, Fig. 7(b)에서 알 수 있는 바와 같이 게이트와 웰드라인 사이를 인장실험하면 파단면이 Fig. 3과 Fig. 4에 나타난 섬유배향함수 J값이 급격히 증가하는 영역과 일치함을 알 수 있다. 이는 시험편에 인장하중이 가해질 경우 복합재의 특성상 하중의 대부분을 유리섬유가 받아야 한다. 그러나 하중의 방향에 수직으로 섬유배향이 이루어져 섬유는 하중을 받지 않고 수지가 하중의 대부분을 받기 때문에 인장강도 값이 낮게 나타남을 알 수 있다.

Table 1에서와 같이 시편폭(W)이 25.4 mm는 12.7 mm보다 인장강도 값이 낮게 나타났다. 시험편의 폭(W)이 상대적으로 큰 25.4 mm의 경우는 인장실험시 그림부분에서 파괴가 되어 정확한 강도측정이 어려우므로 Fig. 7(b)와 같이 중앙부만을 2차 가공하여 인장실험하면 시험편 폭(W)이 12.7 mm인 경우와 거의 유사한 강도값을 가짐을 알 수 있다. 그러므로 웰드라인 생성을 방지한 시험편은 웰드라인이 있는 시험편과 비교하면 약 3~4배 정도 인장강도 값이 높게 나타남을 알 수 있다.

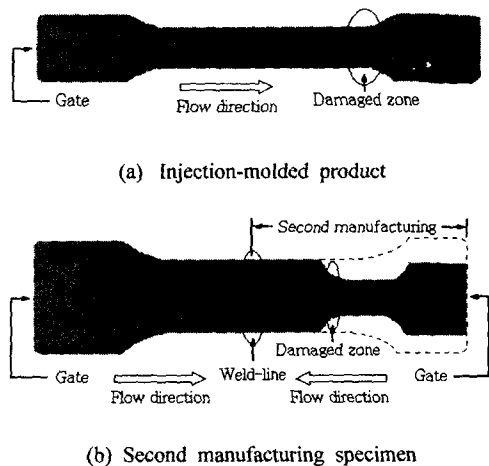


Fig. 7 Schematic view of failure due to tensile strength

Table. 1 Mechanical properties of injection molding composites

Specimen	W = 25.4 mm	W = 12.7 mm
Weld-line	* 26.22MPa ** 28.07MPa	* 17.63MPa
Non weld-line	* 70.36MPa ** 99.60MPa	* 92.98MPa

* Injection-molded product
** Second manufacturing specimen

5. 결론

섬유강화 고분자 복합재의 사출성형에 있어서 웰드라인부의 섬유배향을 측정하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 사출성형시 더블 게이트에서 분사되는 수지와 섬유는 웰드라인 영역에서 상호 충돌하여 분수흐름의 형상으로 섬유가 배향되고, 이때 금형온도가 높을수록 유동속도 또한 빠르게 되므로 유동방향에 대해 90°회전을 이루는 배향상태가 되어 섬유의 보강효과를 감소시켜 인장강도 값이 낮아짐을 알 수 있었다.

2. 사출성형품 중앙부의 유동은 게이트로부터 분수흐름의 형태를 이루나, 하단부의 유동은 벽면과의 마찰로 인하여 유동속도가 느려지고 분수흐름에 의해 되돌아오는 수지와의 충돌로 인하여 섬유배향함수 J값이 크게 됨을 알 수 있었다.

3. 웰드라인 유무에 관계없이 섬유와 수지의 속도차에 의해 게이트로부터 거리가 멀어질수록 섬유함유율이 증가하나, 특히 웰드라인 영역에서 충돌된 섬유는 상호 간섭력에 의해 분리되어 분화구형태로 남아있고 수지는 분수흐름에 의한 반발력으로 되돌아가 섬유함유율의 차가 더욱 커짐을 알 수 있었다.

4. 웰드라인이 없는 시험편을 인장실험한 경우는 게이트 반대부분에서 파단되었고, 웰드라인이 있는 시험편을 게이트에서 웰드라인까지 2차 가공하여 인장실험한 경우도 게이트보다는 웰드라인 영역에서 파괴되었는데, 이 부분에서는 섬유함유량은 많으나 섬유배향은 유동방향에 대해 90° 방향(역배향)으로 섬유가 배향되어 인장강도 값이 감소됨을 알 수 있었다.

후 기

본 연구에 사용된 시험장비는 산업자원부 지정 (사) 부품산업테크노센터에서 제공한 것임.

참고문헌

1. 임태건, 윤성운, 조선행, 김이곤, "사출성형된 장섬유강화 플라스틱 복합재료의 화학처리방법을

- 이용한 섬유배향의 측정”, 대한기계학회논문집(A), 제22권 제10호, 1998, pp.1821-1832.
2. Hojo, H., Kim, E. G., Tamakawa, K. and Nagatsuka, C., “Separation of Matrix and Fibers during Molding of Long Fiber-Reinforced Thermoplastics”, Proceedings of 3rd Japan_U.S. Conference on Composite Materials, Tokyo, 1986, pp.605-612.
 3. Hojo, H., Kim, E. G., Yaguchi, H. and Onodera, T., “Simulation of Compression Molding with Matrix-Fibre-Reinforced Thermoplastics”, International Polymer Processing Vol. 3, Issue 1, 1988, pp.54-61.
 4. Hull, D., An Introduction to Composite Material, Cambridge Univ., 1981, pp.77-78.
 5. Hubbauer, P., Plast. Eng., 1973, pp.37.
 6. 横井秀後, 村田泰彦, “ガラスシ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, 1995, pp.600-607.
 7. Bell, G. R., Cook, D. C. and Rogers, D. D., Plastic Eng., No. 35, 1979, pp.18.
 8. Hagerman, E., Plast. Eng., 1973, pp.67.
 9. 이상동, 김혁, 이동기, 한길영, 김이곤, “섬유배향각 분포측정에 있어서 농도법의 정밀도에 미치는 섬유중량비와 면적비의 영향”, 대한기계학회논문집 A권, 제22권 제4호, 1998, pp.953-959
 10. Tamura, H., Mori, S. and Yamawaki, T., “Textural Features Corresponding to Visual Perception”, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. SMC-8 No. 6, 1978, pp.460-472.
 11. Yaguchi, H., Hojo, H., Lee, D. G., Kim, E. G., “Measurement of Planar Orientation of Fibers for Reinforced Thermoplastics Using Image Processing” Intern. Polymer Processing, Vol. X Issue 3, 1995, pp.262-269.