

섬유강화 고분자 복합재료의 사출성형에 있어서 웰드부의 섬유배향에 미치는 금형형상의 영향

강명구*, 최유성, 김 혁(조선대학원 정밀기계공학과),
이동기, 한길영(조선대학교 기계공학부), 김이곤(국민대학교 기계자동차공학부)

The Effect of Mold Shapes on the Fiber Orientation of Welding Parts for Injection Molding of Fiber Reinforced Polymeric Composites

M. G. Kang, Y. S. Choi, H. Kim(Precision Mech. Eng. CSU),
D. G. Lee, G. Y. Han(Mech. Eng. Dept., CSU) and E. G. Kim(Mech. & Auto. Eng. Dept., KMU)

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 : Fiber Reinforced Polymeric Composites(섬유강화 고분자 복합재료), Injection Molding(사출성형), Welding Part(접합부), Fiber Orientation Function(섬유배향 함수), Mold Shape(금형형상), Image Processing(화상처리), Fiber Content(섬유함유율)

1. 서 론

사출성형은 강화재와 모재가 혼합된 필렛을 스크류 혼련과정과 가열을 통해 수지를 용융상태로 만들어 제품을 생산하는 것으로서, 사출성형기의 실린더 내에서 성형재료가 가소화되는 용융과정, 가소화된 성형재료가 금형내로 유입되는 유동과정과 충전된 재료의 보압 및 사출된 재료의 냉각·고화 등의 일련의 공정으로 구성된다. 이 유동성형과정에서 섬유가 분산된 고액혼합물은 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 불균질하

고 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^{1,2,3)}.

따라서 점탄성적 성질을 가진 고분자 액체의 흐름안에서 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 된다. 그러므로 웰드부의 강도를 보강하기 위해서는 웰드부의 연구가 필수적이라고 할 수 있다.

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. 본 연구에서는 웰드라인이 있는 성형품 성형을 위해 double-gate를 갖는 금형을 제작하여 실험하였다. 이때 사출성형된 성형품 웰드부의 기계적 성질에 미치는 금형형상과 같은 기하학적 조건과 사출압력 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 성형품의 섬유배향 상태에 미치는 금형형상의 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 있다⁴⁾.

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

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 경우 $J=-1$ 이라 하며, 섬유배향이 무배향(등방성)인 경우 섬유배향함수 값이 $J=0$ 이다.

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 계산한다⁵⁾.

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

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 처리하

여 모든 화소에 대하여 섬유배향각 θ 와 섬유수량 C를 구하였을 때 섬유배향각 분포 $H_D(k)$ 는 식(4)와 같이 나타낼 수 있다⁶⁾.

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

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 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 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 n 을 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 측정된 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 장섬유강화 플라스틱 컴파운드(long fiber-reinforced plastic compound: 이하 LFPC라고 한다.)이다. 이 LFPC의 섬유함유량은 50wt%이며, 섬유길이는 10mm이다. 여기서 LFPC는 S사에서 생산되는 제품이고 폴리프로필렌은 H사에서 생산되는 사출성형용 제품이다. 사용한 사출성형기는 스크류 직경이 $\phi 36\text{mm}$ 이고 형체력이 75 ton, 최대 사출중량은 103 g, 최대사출압력은 1400 kg/cm², 형체행정은 270 mm이다. 성형품 제작시 수지를 사출성형기 호퍼내에서 250°C로 예열을 한 후 사용하였다.

본 실험에서는 웰드라인 생성을 위해 Fig. 1과 같이 double-gate를 갖고 2개의 캐비티로 되어 있는 금

형을 제작하여 사용하였으며, 게이트의 직경은 8 mm 로 하여 사용하였다. 최종 성형품의 형상과 치수는 Fig. 1과 같으며, 이때 금형에서 제작된 사출성형품의 두께는 3 mm, 폭은 25.4 mm, 길이는 150 mm로 하여 인장시험편 형상으로 제작하였다. 이 성형품의 웰드부의 강도와 게이트에서 웰드부까지의 섬유배향 상태와 인장강도 측정영역은 Fig. 1과 같고, 기계적 물성치를 파악하기 위한 인장시험기는 영국 Hounsfield사 만능 재료시험기(용량 5 ton, cross head speed : 1.26 mm/min)를 사용하였다.

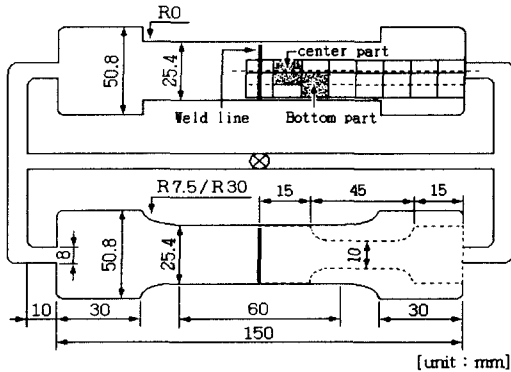


Fig. 1 Dimensions of injection mold and part for measuring fiber orientation

3.2 성형조건 및 섬유함유율 측정

사출성형 조건중 중요변수인 사출압은 60kg/cm², 보압은 30, 50, 70kg/cm²으로 변화를 주었으며, 사출온도는 250℃, 금형온도는 30℃이고, 냉각시간은 12 sec로 하였다. 성형품 내의 섬유함유율을 파악하기 위하여 전기로를 사용하여 시험편을 600℃에서 30분간 가열·연소하고, 연소전후의 무게를 정밀전자저울(1/10,000 g)로 측정하여 섬유함유율을 식(5)에 의하여 구하였다. 이때 섬유함유율 Q_{fr} 은^{1,3)}

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

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

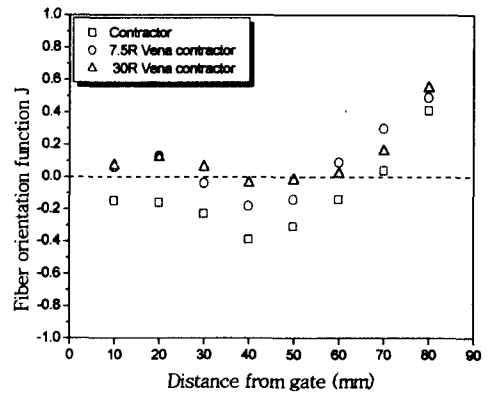
4. 실험결과 및 고찰

Fig. 2는 금형형상 변화에 따른 게이트로부터 유동거리에 따른 섬유배향상태를 정량적으로 나타낸 그림이다. 이 그림에서 웰드부와 게이트부 사이의 중심부에서 섬유는 유동방향으로 배향됨을 알 수 있고, 웰드부에서 수지의 유동방향과 거의 직각인 상태의 섬유배향을 나타내고 있다. 이는 double-gate에서 분사되는 수지의 충돌로 인해 웰드부에서는 수지

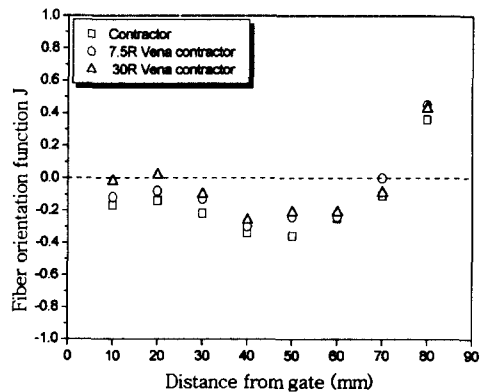
의 유동방향과 거의 직각인 상태로 섬유가 배향됨을 알 수 있다. 게이트부에서는 충전이 완료되어 가는 도중에 생기는 분수흐름과 같은 섬유배향이 이루어짐을 알 수 있다.

섬유배향함수 J에 미치는 금형형상의 영향에서 Fig. 2(a)의 금형내 센터부 수지의 흐름은 급속소관이 가장 빠르고 라운드가 큰 축소관이 가장 느림을 알 수 있다. 또한 Fig. 2(b)의 센터 아래부분에서는 금형 벽면과의 마찰로 인하여 유동속도가 감소하여 섬유배향함수가 센터부보다 낮게 나타남을 알 수 있다. 그러나 웰드부의 섬유배향상태는 재료가 유동시 축소관이 급속소관보다도 일정하게 유동하기 때문에 섬유배향함수 값이 커짐을 알 수 있다.

Fig. 3은 금형형상 변화에 따라서 게이트로부터 거리가 섬유함유율비에 어떠한 영향을 미치는가를 나타낸 그림이다. 이 그림에서 섬유함유율비는 게이트로부터 거리가 멀어질수록 증가함을 알 수 있다.



(a) Center part



(b) Bottom part

Fig. 2 Effect of distance from gate and fiber orientation function J for fiber content 50wt%

이는 게이트로부터 흘러나온 용융된 수지의 유동선단이 웰드라인에서 충돌되는 순간 일어나는 분수흐름으로 인하여 되돌아 올 때 섬유는 고체이고, 모재인 수지는 유체이므로 유동속도차에 의해서 유동선단에서 섬유가 남아있다고 생각된다.

Fig. 4는 사출된 성형품의 인장강도에 미치는 금형형상과 사출압력의 영향을 나타낸 그림이다. 이 그림에서 사출압력의 영향보다는 금형형상과 같은 기하학적인 요인에 큰 영향을 받음을 알 수 있다.

복합재의 섬유함유율이 50wt%인 재료는 점탄성 때문에 급축소관 모서리부에 재료가 남아 있어 벤츄리관 형상이 된다. 이러한 현상은 재료의 사출가압시 속도구배를 발생시키기 때문에 인장강도 값이 사출압력보다는 금형형상에 더 큰 영향을 미침을 알 수 있다.

그리고 사출된 성형품의 인장과단은 Fig. 3의 섬유함유율이 상대적으로 낮은 게이트 부근에서 파괴되는데 이는 섬유배향이 유동방향으로 배향되어 있

지 않을 뿐만 아니라, 하중의 대부분을 섬유가 받기 때문에 섬유함유율이 적은 부분에서 파괴됨을 알 수 있다.

5. 결론

섬유강화 고분자 복합재료의 사출성형에 있어서 웰드부의 섬유배향에 미치는 금형형상의 영향을 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 사출성형된 섬유강화 고분자 복합재의 섬유배향상태와 기계적 강도값은 사출압력과 같은 성형조건보다는 금형형상과 같은 기하학적인 요인에 큰 영향을 받음을 알 수 있었다.
2. 섬유강화 고분자 복합재는 점탄성 때문에 급축소관 모서리부에 재료가 남게 되어 벤츄리관 형상이 된다. 이러한 현상은 재료의 사출가압시 속도구배에 의해 섬유배향을 발생시킴을 알 수 있었다.

후 기

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

참고문헌

- 1 Hojo, H., Kim, E. G., Tamakawa, K. and Nagatsuka, C., "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, 1986.
- 2 Hojo, H., Kim, E. G., Yaguchi, H. and Onodera, T., "Simulation of Compression Molding with Matrix-Fibre-Reinforced Thermoplastics", Internat. Polymer Processing Vol. 3, Issue 1, pp.54-61, 1988.
- 3 박성준, 윤성운, 조선형, 김이곤, "사출성형된 섬유강화 플라스틱 복합재료의 섬유함유율 분포에 관한 연구", 한국복합재료학회지, 제10권, 제1호, pp.83-89, 1997.
- 4 山田國廣, 堀川 明, "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, 1984.
- 5 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, pp.460-472, 1978.
- 6 Yaguchi, H., Hojo, H., Lee, D. G. and Kim, E. G., "Measurement of Planar Orientation of Fibers for Reinforced Thermoplastics Using Image Processing", International Polymer Processing, Vol. X Issue 3, pp.262-269, 1995.

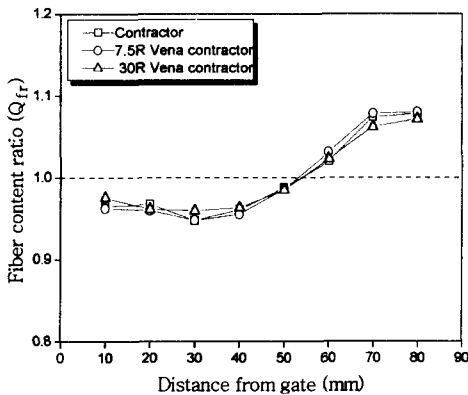


Fig. 3 Effect of distance from gate on fiber content ratio for fiber content 50wt%

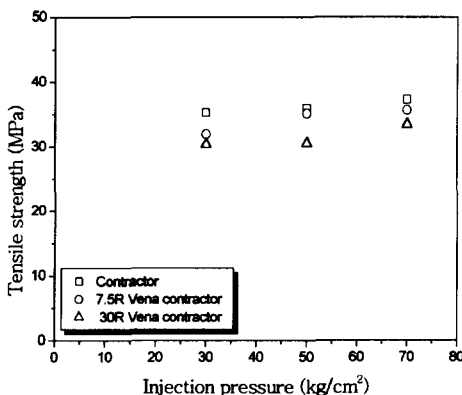


Fig. 4 Effect of mold shapes and injection pressure on tensile strength