

섬유강화 플라스틱 복합판의 구조와 분리·배향에 관한 연구

이 동 기*, 조 광 현**

A Study on Structure and Separation · Orientation of Fiber-Reinforced Thermoplastic Sheet

Dong-Gi Lee*, Kwang-Hyun Cho**

ABSTRACT

Characteristics of fiber-reinforced thermoplastic sheet depend on the quantity and shape of fibers. During a molding process of composites, the fiber-matrix separation and fiber orientation are caused by the flow during the molding process. As a result, the product tends to be nonhomogeneous and anisotropic. Hence, it is very important to clarify the relations between separation-orientation and molding conditions. The correlation between the separation and the orientation have to be clarified for designing the fiber structure. In this paper, the degree of nonhomogeneity which is a measure of the separation is obtained using one-dimensional rectangular shaped part compression molding. And the orientation function is defined and measured by the image processing using soft X-rayed photograph and image scanner. Correlation between the degree of nonhomogeneity and the orientation function is discussed.

Key Words : Fiber-Reinforced Thermoplastic Sheet(섬유강화 플라스틱 복합판) Separation · Orientation (분리·배향), Degree of Nonhomogeneity(불균질도), Orientation Function(배향함수), Compression Molding(압축성형)

1. 서 론

현재, 섬유강화 플라스틱(Fiber-Reinforced Plastics : FRP로 약칭)에 이용되는 基地樹脂의 종류는 많지만 크게 나누어 열경화성수지(Thermosetting rein : TS로 약칭)와 열가소성수지(Thermoplastic rein : TP로 약칭)가 있고, 섬유강화 플라스틱 복합재료는 수지의 종류에 따라 섬유강화 열경화성 플라스틱 복합재료(FRTS)와 섬유강화 열가소성 플라스틱 복합재료(FRTP)로 분류된다. 종래, 플라스틱 복합재료는 열경

화성수지를 모재로 한 성형품이 대부분이었으나 재생문제, 폐기물처리 및 환경문제가 사회문제로 대두되고, 또 생산성이 좋지 않기 때문에 소재 자체를 보는 관점이 변화하고 있다. 최근, 각종 재료중에서도 이들 재료에 대응하는 재료로 열가소성수지를 모재로 하고 유리섬유로 강화한 섬유강화 플라스틱 복합재료가 있다. 이 재료는 비중이 작기 때문에 구조 부품의 경량화에 유효하고 수지계의 복합재료이므로 내식성 및 생산성이 뛰어나며, 열가소성수지이므로 재생이용이 가능하며 최종처리로서 소각도 용이하다. 또한, 한 방향강화등 필요한

* 조선대학교 공과대학 정밀기계공학과(정희원)

** 조선대학교 대학원 기계공학과

방향으로 매트구조를 설계할 수 있어 효율이 좋은 재료를 만들 수 있기 때문에 산업분야에서 각종 부품소재로서 연구의 대상이 되고 있다.

섬유강화 플라스틱 복합재료를 이용하여 각종 부품을 성형하기 위한 성형법은 합침성형과 유동성형으로 크게 구별된다. 전자는 섬유강화 열경화성 플라스틱 복합재료(FRTS)에, 후자는 섬유강화 열가소성 플라스틱 복합재료(FRTP), SMC 및 스펀퍼블사이트에 적용된다. 합침성형은 유동성형과 비교하면 섬유길이, 섬유함유량을 크게 할 수 있으므로 일반적으로 고강도, 고강성이지만 생산성, 작업환경, 부품의 치수 정밀도가 떨어진다. 생산성, 치수 정밀도의 면에서 보면 유동성형이 훨씬 뛰어나다. 이 유동성형은 재료가 금형내에서 유동하기 때문에 성형품의 두께에 상당한 변화를 줄 수가 있어서 성형의 자유도가 크고, 복잡한 형상의 부품성형이 가능하여 생산성도 높고, 또한 생산비도 낮은 특징이 있어 고온유동성형에 관한 연구가 활발히 행하여 지고 있다. 유동성형중에서 근래 가장 각광을 받는 것이 유리섬유를 강화재로 하고 열가소성수지를 모재로 한 섬유강화 플라스틱 복합판이다. 최근, 섬유강화 플라스틱 복합판은 고강도, 내식성이 뛰어나고 성형과정이 짧으며, 또 부품을 경량화 시킬 수 있어 항공기, 자동차 및 각종 산업분야에서 부품소재로서 각광을 받고 있다.

섬유강화 플라스틱 복합판은 강화재와 모재로 구성되어 있으므로 이 두가지 성질에 의하여 소재의 기계적 특성이 달라진다. 복합재료의 성질은 모재의 성질에 의존하는 것은 당연하지만 섬유의 형태, 매트 구조 등에 의해서 복합판의 물성이 변화한다. 그래서 강화재의 조직 및 모재의 조성에 대해서 연구하고, 복합재료 성형품의 성형에 있어서는 섬유의 형태를 제어하는 것이 중요하다. 섬유강화 플라스틱 복합판을 고온압축 성형(2차 가공)하는 경우 가장 큰 문제점은 성형시 재료의 유동 속도차에 의한 섬유와 모재의 분리 및 변위에 의한 섬유의 배향이 발생하여, 성형품이 불균질하게 되고 이방성이 되어 성형품의 강도나 특성에 변화가 생긴다. 따라서 이 분리·배향을 성형조건이나 재료와 관련시켜서 명확히 하고, 또 분리·배향을 제어하면 최적 성형조건을 결정할 수 있어 뛰어난 성형품을 얻을 수 있다.

Hojo⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾ 등은 섬유의 분리를 표현할 수 있는 분리방정식을 유도하여 그때 분리계수를 제안 및 측정하였고, 矢口⁽⁵⁾,⁽⁶⁾ 등은 섬유의 배향을 화상처리를 이용하여 측정하였다. 필자⁽⁷⁾,⁽⁸⁾는 화상처리에 의하여 섬유함유량

분포측정을 하였으며, 또 섬유의 배향에서 장섬유의 경우 유동장에 의존하는 것이 아니라 변위에 의존함을 밝혔다. 이때 분리의 척도는 불균질도, 배향은 배향함수를 사용하였고, 배향함수는 화상처리에 의해서 구하였다.

본 연구에서는 직사각형판의 1차원 흐름인 프레스성형에 있어서 x축 방향의 속도구배에 의한 유리섬유의 영김이 없는 쪼트 스트랜드(Chopped strand) 섬유배향 기초식을 유도하여 실험결과와 비교검토하고, 시판되고 있는 스펀퍼블 사이트를 사용하여 분리·배향에 대해 연구한다. 또 우수한 섬유강화 플라스틱 복합판의 제조 및 개량을 위해 프레스 성형시 유리섬유의 유동을 지배하는 인자인 유리섬유의 길이와 매트구조를 분리·배향의 관점에서 연구하기 위하여, 유리섬유의 길이와 매트구조를 변화시켜서 모재와 적층시킨 다음 열압축프레스를 사용하여 1차로 시이트를 제작하고, 이 제작된 시이트를 가열로로 가열하여 30톤 유압프레스로 2차 고온압축 성형한다. 이때, 모재와 섬유의 분리에 의해서 야기되는 성형품의 불균질성을 나타내는 불균질도와 섬유의 배향을 표시하는 배향함수와의 상관관계에 대한 실험결과를 보고한다.

2. 이 론

2.1 섬유의 분리방정식

복합재료의 성형중에 있어서 유동을 고체(섬유)와 액체(플라스틱) 2상인 하나의 유동으로 생각하고, 섬유는 구로 가정한다. 이때 섬유의 속도 V_f , 모재의 속도 V_m 인 한개의 섬유운동방정식은 2상 유동이론의 기초에 다음식과 같다⁽¹⁾.

$$\frac{W_f}{g} \frac{dV_f}{dt} = C_D \frac{\gamma_m}{2g} (V_m - V_f)^2 a_f + W_f \frac{\gamma_f - \gamma_m}{\gamma_m} \cos\theta - f_f \quad (1)$$

여기서 W_f 는 섬유의 중량, C_D 는 항력계수, γ_m 은 모재의 비중량, γ_f 는 섬유의 비중량, a_f 는 유동방향에 직각 방향의 투영단면적이다. 식(1)의 오른쪽 첫번째 항은 섬유와 모재의 속도차로 인한 항력을 나타내며, 두번째 항은 섬유의 중력과 부력이며, θ 는 중력과 유동방향 사이에 이루는 각이다. 또 세번째 항은 섬유의 형태,

량 및 성형조건 등의 영향을 받은 섬유유체의 마찰 또는 뒤엎힌 힘을 받는 상호 구속력을 나타낸다.

뉴턴 유체인 경우 항력계수는 $\alpha \text{Re}_f^{-\beta}$ 로 표시할 수 있다(구인 경우 $\alpha=24.0$, $\beta=1.0$ 원통인 경우 $\alpha=6.474$, $\beta=0.883$). 유동성형중의 섬유유체의 실제 항력계수 C_D 는 보정계수 j 를 주어

$$C_D = j \alpha \text{Re}_f^{-\beta} \quad (2)$$

로 표시되며, Reynolds수 Re_f 는 다음식과 같다.

$$\text{Re}_f = (V_m - V_f) d_f \rho_m / \mu_m \quad (3)$$

여기서 ρ_m , μ_m 은 모재의 밀도와 점도이고, d_f 는 원통형인 경우의 섬유지름이다. 구인 경우의 상당직경 d_{fs} 는 다음과 같다.

$$d_{fs} = \sqrt[3]{1.5 d_f^2 \bar{l}_f} \quad (4)$$

여기서 \bar{l}_f 는 섬유유체의 평균길이이다.

모재와 섬유유체의 분리과정에서 속도 V_c , V_f , V_m 은 변화하게 됨에 따라 V_m 과 V_c 는 같다고 가정한다. 또한, 중력과 부력의 항을 무시하고, Reynolds수($\text{Re}_f < 0.1$)가 작기 때문에 정상상태로 가정한다. 위와 같은 가정을 사용하여 섬유유체를 구로 가정하고, 식(1), (2), (3), (4)로부터 섬유유체의 속도 V_f 를 구하면 다음식과 같이 표시된다.

$$\begin{aligned} V_f &= V_c - \frac{f_f}{18 j_{sp} W_f} \frac{\gamma_f d_{fs}^2}{\mu_m} \\ &= V_c - K_{sp} \frac{\gamma_f d_{fs}^2}{\mu_m} \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 V_c 는 복합재료의 속도, K_{sp} 는 분리계수이다.

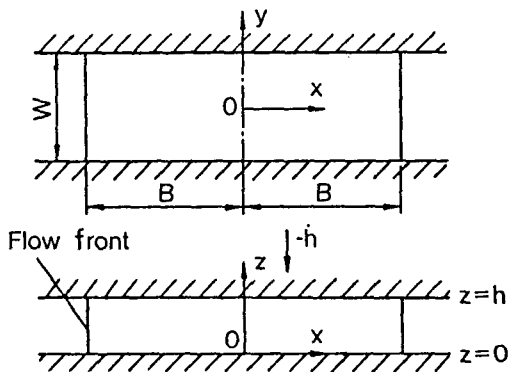


Fig.1 Nomenclature for slab-shaped part compression molding

Fig.1과 같이 1차원 직사각형판의 압축유동(x, y방향에 비해서 z방향의 속도는 무시)에서 분리계수와 x방향의 평균속도의 관계에 대해서 고찰한다. 복합재료의 속도와 모재의 속도가 같다고 가정하여 x방향의 평균속도 \bar{V}_m 을 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \bar{V}_m &= \frac{2}{h} \int_0^{h/2} V_m dz \\ &= \frac{\dot{h}}{h} x \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 \dot{h} 는 프레스의 압축속도이고, h 는 성형후의 두께이다.

평균속도구배는

$$\begin{aligned} \bar{\gamma} &= \frac{2}{h} \int_0^{h/2} \dot{\gamma} dz \\ &= 2 C \frac{\dot{h}}{h^2} x \end{aligned} \quad (7)$$

여기서 γ 는 속도구배이고, $C = (2n_m + 1)/(n_m + 1)$, n_m 은 플라스틱의 구조점도 지수이다.

복합재료가 의소성 유체이기 때문에 식(7)을 사용해서 점도 μ_m 을 의소성 모델로 표현하면

$$\begin{aligned} \mu_m &= K_m \bar{\gamma}^{n_m-1} \\ &= K_m \left(2 C \frac{\dot{h}}{h^2} x \right)^{n_m-1} \end{aligned} \quad (8)$$

여기서 K_m 은 플라스틱의 구조점도이다.

성형중 섬유유체의 속도 V_f 는 식(5), (6) 및 (8)로부터

$$V_f = \frac{\dot{h}}{h} x - \frac{K_{sp} \gamma_f d_{fs}^2}{K_m} \left(2 C \frac{\dot{h}}{h^2} x \right)^{1-n_m} \quad (9)$$

2.2 섬유유체의 배향식

재료를 Fig.1과 같이 평행판 사이에 끼우고 y방향의 흐름을 구속하여 압축성형하므로 x축 방향의 속도구배만 고려한다. Fig.2와 같이 흐름의 가운데에 놓인 길이 L 인 섬유유체는 x축 방향의 속도차에 의해서 회전한다. 섬유유체의 각속도 $\dot{\theta}$ 는

$$\dot{\theta} = \left[\frac{V_{fa} - V_{fb}}{L} \right] \sin \theta \quad (10)$$

여기서 V_{fa} 및 V_{fb} 는 섬유양단의 속도이며 다음식과 같다.

$$\begin{aligned} V_{fa} &= \frac{dV_f}{dx} \left(x + \frac{L}{2} \cos \theta \right) \\ V_{fb} &= \frac{dV_f}{dx} \left(x - \frac{L}{2} \cos \theta \right) \end{aligned} \quad (11)$$

여기서 dV_f/dx 는 x축 방향의 속도구배이다.

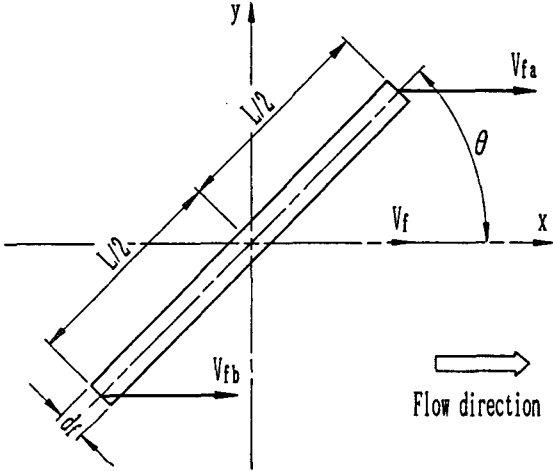


Fig. 2 Flow direction of fiber

섬유의 양단에 있어서 속도차는 다음과 같다.

$$V_{fa} - V_{fb} = \frac{dV_f}{dx} L \cos \theta \quad (12)$$

식(10), (12)로부터 섬유의 각속도 $\dot{\theta}$ 는

$$\dot{\theta} = \frac{dV_f}{dx} \cos \theta \sin \theta \quad (13)$$

또 성형품의 중심으로부터 거리 x의 위치에 있는 섬유의 분리가 생기는 경우, 속도구배는 식(9)를 x로 미분하면 다음식과 같다.

$$\frac{dV_f}{dx} = \frac{\dot{h}}{h} - \frac{K_{sp} \gamma_f d_{fs}^2}{K_m} (1 - n_m) \left(2 C \frac{\dot{h}}{h^2} x \right)^{-n_m} \quad (14)$$

식(14)를 식(13)에 대입하여 사각형평판 압축성형품의 섬유각속도 $\dot{\theta}$ 를 구하면 다음식과 같다.

$$\dot{\theta} = \left[\frac{\dot{h}}{h} - \frac{K_{sp} \gamma_f d_{fs}^2}{K_m} (1 - n_m) \right]$$

$$\left(2 C \frac{\dot{h}}{h^2} x \right)^{-n_m} \cos \theta \sin \theta \quad (15)$$

2.3 섬유배향함수 및 불균질도

섬유의 배향은 성형품의 두께가 폭과 길이에 비하여 매우 얇기 때문에 섬유를 2차원 집합체로서 취급한다. x-y평면상에 섬유가 분포하고 있는 경우, x축과 이루는 섬유배향각 θ 는 $0 \leq \theta \leq \pi$ 의 범위에 있다. 따라서 섬유배향각분포를 표시하는 배향함수 J와 섬유배향각분포 q (θ 사이에는 다음과 같은 관계가 있다⁽⁹⁾).

$$q(\theta) = \frac{1}{\pi} \left[\left(\frac{1-J}{1+J} \right) \cos^2 \theta + \left(\frac{1+J}{1-J} \right) \sin^2 \theta \right]^{-1} \quad (16)$$

여기서 J는 2차원 배향각분포에 대한 배향함수이며, 배향이 등방성인 경우 $J=0$, x축 방향으로 평행하게 배열되어 있는 경우는 $J=1$, y축 방향으로 평행하게 배열되어 있는 경우는 $J=-1$ 이다.

섬유강화 플라스틱 복합판의 고온유동성형에 있어서 섬유가 서로 강하게 엉켜져 섬유 하나하나를 식별할 수 없는 경우, 섬유배향각분포는 성형품의 연X-선 사진농도정보를 이용하여 다음식에 의하여 구한다⁽⁸⁾.

$$H_D(K) = \frac{N_\theta(k)}{\sum_{i=0}^{n-1} N_\theta(i)}, \quad k = 0, 1, 2, 3, \dots, n-1 \quad (17)$$

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 물체의 윤곽선방향 화소수이다. 이와 같이 식(17)로 측정된 $H_D(k)$ 로부터 최소자승법에 의하여 섬유의 배향함수 J를 구하면 성형품의 섬유배향정도를 알 수 있다. 본 실험의 계측에서 θ 의 범위는 10° 이다.

Fig. 3은 압축성형후 성형품의 섬유함유율 분포를 나타낸 한 예이며, 분리가 심하면 심할 수록 성형품은 불균질하게 되어 그림에서 사선부분의 영역이 더 크게 된다. 섬유함유율 분포곡선($Q_{fr} = q_f/q_{f0}$, q_f 는 성형전후의 섬유함유율)을 2차함수로 하고, 최소자승법에 의해서 계수 C_1, C_2, C_3 를 구한 후 사선의 면적을 계산하여 불균질도(Γ)를 다음식과 같이 정의한다⁽²⁾.

$$\Gamma = \text{사선의 면적} / B \quad (18)$$

여기서 Γ 는 무차원 수이며, 0에서 1의 사이에 있으나 0에 가까워지면 성형품은 균질에 가깝게 된다.

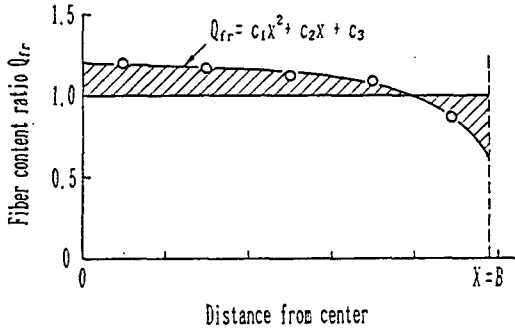


Fig. 3 Example of fiber content ratio

3. 실험

직사각형판의 분리·배향을 측정하기 위하여 두께 0.5mm의 폴리프로필렌 시이트를 60mm(폭)×60mm(길이)로 절단해서 10장 적층하여 시험편으로 하였다. 이때 Fig.4와 같이 적층할 때 시험편의 중간층 9개소에 길이 13mm(스트랜드 직경 0.17mm)인 섬유를 서로 교차하도록 놓았다. 섬유와 x축과 이루는 각도 θ_0 는 30°, 45°, 60°이고 압축비($R_{cr} = 1 - h/h_0$, h : 성형후의 두께, h_0 : 성형전의 두께)는 0.3, 0.5, 0.7이다. 또 성형조건은 금형온도, 재료온도 모두 180°C, 압축속도는 20mm/min이다.

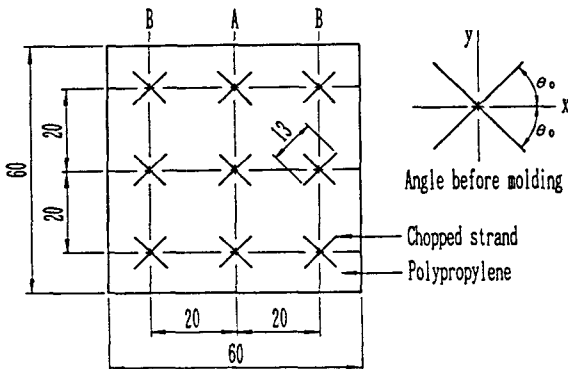


Fig. 4 Specimen for one-dimensional square shaped

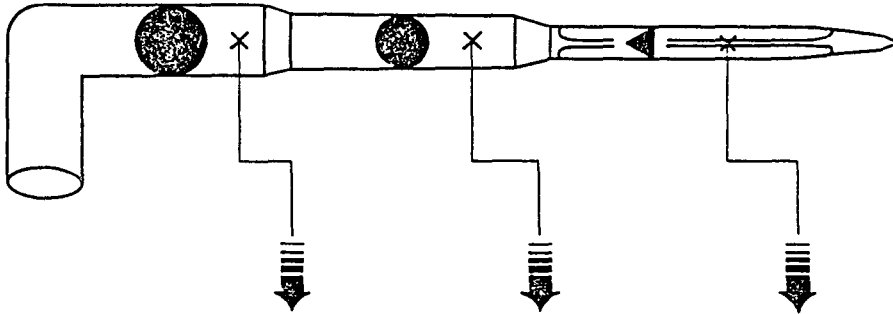
시판되고 있는 스템퍼블 시이트(모재: 폴리프로필렌, 강화재: 유리섬유 매트, 섬유함유율: 25wt%, 40wt%, 두께 h_0 : 3.8mm)는 日本 出光石油化学(株) 제품이며, 장섬유는 서로 강하게 엉켜져 있다. 그리고 섬유 및 플라스틱의 밀도는 각각 2.55g/cm³, 0.9g/cm³이다. 압축속도는 14.4mm/sec, 금형의 온도는 200°C이다.

유리섬유의 길이(섬유길이: 6mm, 30mm) 변화에 따른 분리와 배향의 상관관계에 대한 실험을 하기 위해서 시이트는 섬유의 길이 별로 모재와 적층시킨 다음 열압축프레스를 사용하여 제작하였다. 이때 모재는 폴리프로필렌, 강화재는 유리섬유를 사용하였으며, 섬유함유율은 20wt%, 40wt%, 두께 h_0 는 3.8mm이다. 성형온도는 200°C, 압축속도는 21.5mm/sec이다.

유리섬유의 매트구조 변화에 따른 분리와 배향의 상관관계에 대한 실험을 하기 위해서 사용한 섬유강화 플라스틱 복합판(모재: 폴리프로필렌, 강화재: 유리섬유 매트, 두께 h_0 : 3.8mm)은 유리섬유의 매트구조를 변화시켜 모재와 적층시킨 다음 열압축프레스를 사용하여 제작하였다. 이때 유리섬유 매트(제작: 한국화이버, 섬유번호: CM300)는 유리섬유를 로빙커터로서 50mm의 길이로 균일하게 절단하여 공기중에서 분산시켜 6~7mm 두께로 만들고, 이 유리섬유 매트를 Table 1 조건에 따라 니들 편칭하여 유리섬유의 매트구조를 변화시켰다. 압축속도는 21.5mm/sec, 블랭크와 금형의 온도는 각각 200°C이다.

Table 1의 니들타이프 숫자는 Fig.5에서 니들게이지 값, 스트레칭은 유리섬유 매트 1平方센티(1cm²)의 니들 편칭 횟수를 나타낸다. 여기서 게이지값이 클수록 바늘의 굵기가 작음을 의미한다. 니들의 길이는 3인치와 3.5인치를 사용하였으며, Fig.6은 니들 편칭할 때 니들의 몸체중 핵심부분 형상을 나타내었다. 이 그림에서와 같이 공구의 몸체중 삼각형 단면 모서리 부분에는 각각 2개씩 총 6개의 홈이 있어 유리섬유 매트를 니들 편칭할 때 수평으로 놓여 있는 유리섬유를 수직으로 깨고 절단하여 섬유를 서로 강하게 엉키게 한다. 이와 같이 만든 유리섬유의 매트구조 별로 모재와 적층시킨 다음 열압축프레스를 사용하여 시이트를 제작하였다.

섬유의 분리·배향을 측정하기 위하여 스템퍼블 시이트, 강화재 길이 별로 제작된 시이트, 유리섬유의 매트구조 별로 제작된 시이트는 각각 60mm(폭)×75mm(길이)×3.8mm(두께)의 직사각형판으로 절단하여 시험편으로



Gauge	(inch)	(inch)	(inch)
9	0.140		
11	0.110	0.110	
12	0.105		
13	0.093		0.093
14	0.080	0.077	0.077
15	0.072	0.069	0.069
16	0.064	0.059	0.059
17		0.053	0.053
18		0.047	0.047
19			0.043
20			0.037
22			0.035
23			0.033
25			0.031
28			0.030
30			0.028
32			0.026
34			0.024
36			0.022
38			0.020
40			0.018
42			0.016

Fig. 5 Needle gauge to nominal dimensions

Table 1 Conditions of needle punching and fiber content by weight

Specimen No.	Layers	Needle type	Stretching	Fiber content by weight
Specimen 1	2	15*18*32*3 in.	100	38wt%
Specimen 2	3	15*18*3.5 in.	11	43wt%

로 하였다.

금형캐비티의 치수는 60mm×400mm이고, 가압장치는 30톤 유압프레스를 사용하였으며 금형에는 열전대를 부착시키고 가열은 봉 및 관히터를 사용하였다(10). 압축 성형에 있어서 재료의 흐름은 Fig. 1과 같이 폭방향을 구속하여 길이방향으로만 되게 하였다.

화상처리에 이용한 이미즈캐너는 일본 세이코 엡슨 제 GT-4000V이며 해상도는 400×400화소, 1화소 1/8mm×1/8mm, 농도계조 256계조(gray level : 흑=0, 백=255)이다. 그리고 연X-선 발생장치는 미국 베니트 CM(205(의료용)이며, 필름은 일본 후지사 제품(MI-NC의의료용 X-레이 필름, 180mm×240mm)이다.

섬유의 배향함수와 불균질도를 구하기 위하여 유압프레스에 섬유강화 플라스틱 복합판을 넣고 1차원 평판압축시험을 하였다. 불균질도를 구하기 위한 시험편의 연소는 시험편의 중립면에서 x축을 따라서 가로 10mm×세로 10mm를 채취하여 전기로에서 폴리프로필렌을 620℃에서 30분간 가열 연소하고, 연소전후의 무게를 천평으로 측정하여 섬유함유율 분포를 구하였다. 이 섬유함유율 분포로부터 식(18)에 의하여 분리의 척도인 불균질도 Γ 를 구하였다. 또, 섬유배향함수 J 를 측정하기 위하여 성형품의 길이 B/2인 점(평균속도에 해당되는 점)을 기준으로 하여 50mm×50mm의 영역을 화상처리함으로써 배향함수 J 를 측정하였다.

4. 결과 및 고찰

Fig. 4의 시험편을 고온압축 프레스성형한 후 A부분의 섬유배향상태를 Fig. 5에 B부분의 섬유배향상태를 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 7, 8은 섬유와 x축과 이루는 각도 θ_0 와 압축비 Rcr를 변화시켜 압축성형한 후 측정된 섬유배향각 θ 의 실험결과이다. 이 그림에서 곡선은 식(15)를 이용해 분리되는 생기지 않는 것으로 하여 분리계수 $K_{sp}=0$ 으로 계산한 결과이다. Fig. 7에서 성형품의 중심부분에 있는 섬유①의 배향각도 θ 는 이론치와 잘 일치함을 알 수 있다. 이것은 직사각형판의 중심에서

y축 방향의 속도구배는 매우 작고, x축 방향의 속도구배의 영향만을 받기 때문이다. 또, 금형벽 부근에 놓인 섬유②, ③의 배향각도 θ 도 이론치와 잘 일치하고 있다. 금형벽 부근에서는 벽의 영향으로 속도가 늦게된다.

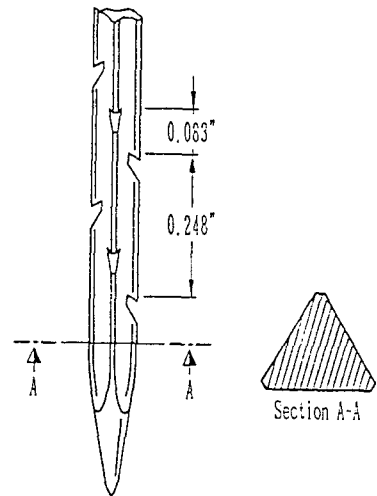


Fig. 6 Needle barb distances

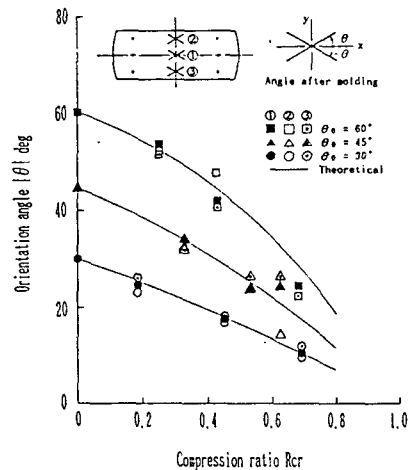


Fig. 7 Relationship between compression ratio and orientation angle(A part)

Fig. 8에서 섬유(1)의 배향각도 θ 는 이론치 보다도 크고, 섬유(2)의 배향각도 θ 는 이론치 보다도 작다. 이것은 y축방향 속도구배의 영향이다. 섬유(1)은 x축 방향의 속도구배에 의해 + θ 방향으로 회전하고, y축 방향의 속도구배에 의해 - θ 방향으로도 회전한다. 그 때문에 섬유의 회전하는 각도는 x축 방향의 속도구배만을 고려해서 계산한 결과보다 작게 되고, 회전하는 각도는 이론치 보다도 작게 된다. 섬유(2)는 x방향의 속도구배 보다 - θ 방향으로 회전한다. 더우기 y축 방향의 속도구배에 의해서도 - θ 방향으로 회전한다. 그 결과 섬유가 회전하는 각도는 계산결과 보다도 크게 되고, 회전하는 각도는 이론치 보다도 크게 된다. 또 압축비가 크게 되면 흐름선단의 재료속도가 빠르게 되기 때문에 y축 방향의 속도구배가 크게 된다. 따라서 y축 방향의 속도구배에 의해서 회전하는 각도가 크게 되어 이론치와의 차가 크게 된다. 압축비가 크게 된 경우, 섬유(3)의 배향각도 θ 가 이론치에 비해서 크다. 흐름선단에서는 재료가 중앙부분으로부터 금형벽쪽으로 흐르기 때문에 배향각도 θ 가 이론치 보다도 크게 된다.

이 그림에서 알 수 있는 바와 같이 직사각형판 압축의 흐름에 있어서 섬유의 배향은 x축 방향의 속도구배와 y축 방향의 속도구배 양쪽에 의해서 생기고, 중앙부 부근에서는 x축 방향의 속도구배 영향이 크고, 금형벽 부근 및 흐름의 선단에서는 y방향의 속도구배 영향이 크다고 생각할 수 있다.

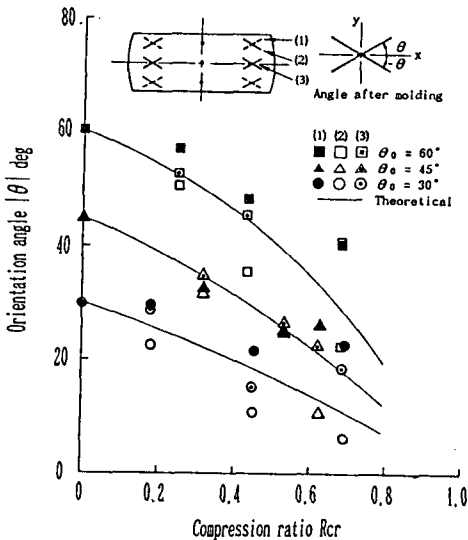


Fig. 8 Relationship between compression ratio and orientation angle(B part)

Fig. 9는 스템퍼블 시이트의 섬유함유율이 25wt%, 40wt%인 경우, 섬유의 배향함수 J와 성형품의 불균질도 Γ 와의 상관관계도이다. 불균질도가 증가하면 배향함수도 증가함을 알 수 있다. 만일, 복합재의 섬유구조가 서로 강하게 엉켜져 있다면 성형품의 분리의 척도인 불균질도는 증가하나 섬유의 배향은 잘 되지 않게 되고, 또 섬유구조가 서로 엉켜 있지 않으면 섬유의 배향은 잘 되나 성형품의 불균질도는 작게 된다.

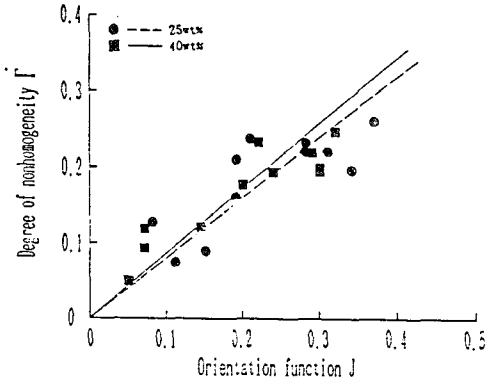


Fig. 9 Relationship between orientation function J and degree of nonhomogeneity Γ (Stampable sheet)

Fig. 10은 섬유의 길이와 함유량 변화에 따른 배향함수 J와 불균질도 Γ 와의 상관관계도이다. 이 그림에서 알 수 있듯이 시험편의 불균질도는 섬유길이가 길어 질수록 성형시 성형품내의 섬유와 모재와의 유동속도차가 커지므로 불균질도가 증가함을 알 수 있다. 이 그림으로부터 섬유길이가 길고 섬유함유량이 많으면 섬유상호간의 간섭이 커져 불균질도가 증가하고, 또 배향함수가 증가하면 불균질도가 증가함을 알 수 있다.

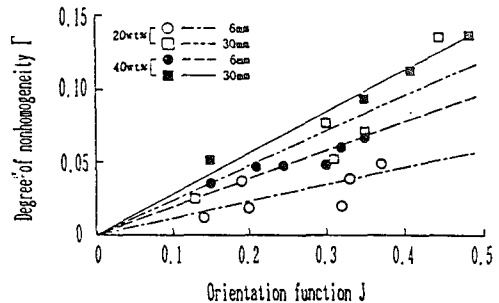


Fig. 10 Relationship between orientation function J and degree of nonhomogeneity Γ (Fiber length L=6mm, 30mm)

Fig. 11은 유리섬유의 매트구조 변화에 따른 섬유의 배향함수 J와 성형품의 불균질도 Γ 와의 상관관계도이다. 유리섬유매트 1平方센티(1cm²)의 니들펀칭 횟수를 나타내는 스트레칭값이 큰 시험편 1이 섬유끼리 강하게 엉켜 섬유배향이 잘 되지 않으므로 배향함수 J값이 적고, 스트레칭값이 작은 시험편 2는 배향함수 J값이 커짐을 알 수 있다. 여기서 섬유배향함수 J는 니들펀칭 횟수에 의존함을 알 수 있다.

유리섬유매트를 니들펀칭할 때 니들의 굵기가 가늘고 스트레칭값이 클수록 섬유가 서로 강하게 엉키기 때문에 고온압축 프레스 성형시 시험편 1의 경우, 모재와 강화재는 분리가 잘 되어 성형품의 불균질도 Γ 값이 증가함을 알 수 있다. 또 시험편 2의 경우는 스트레칭값이 작을수록 섬유가 서로 엉키지 않기 때문에, 섬유배향이 잘 되어 성형품의 불균질도 Γ 값이 시험편 1보다 작음을 알 수 있다. 즉 시험편의 불균질도는 니들펀칭의 회수가 많으면 성형품내의 섬유와 모재와의 분리로 인하여 커진다. 여기서, 분리·배향의 상관관계를 나타내는 기울기는 유리섬유매트를 니들펀칭할 때 스트레칭값에 크게 영향을 받음을 알 수 있다. 스트레칭값이 크면 섬유가 서로 강하게 엉켜 있기 때문에 기울기의 값이 크며, 스트레칭값이 작으면 그 반대이다. Fig. 9-11의 각 실험값들은 많은 편차가 있는데 이것은 복합재료 자체가 갖고 있는 불균질성 때문이다.

Fig. 9-11로부터 성형품의 불균질도 Γ 와 섬유배향함수 J는 다음과 같이 1次函數로 표시하였다.

$$\Gamma = C \cdot J \quad (19)$$

여기서, 기울기 C를 分離·配向의 상관관계를 나타내는 相關關係라 한다. 이 C의 값은 分離·配向의 관점에서 材料와 特性을 나타내는 값이며, C가 크면 분리는 쉽게 되나 배향은 잘 되지 않고, C가 작으면 그 반대의 현상을 나타낸다. 스템퍼블 시이트, 섬유의 길이와 매트구조 변화에 따른 상관계수 C를 최소자승법으로 구하여, 그 결과를 Table 2에 나타내었다. 불균질

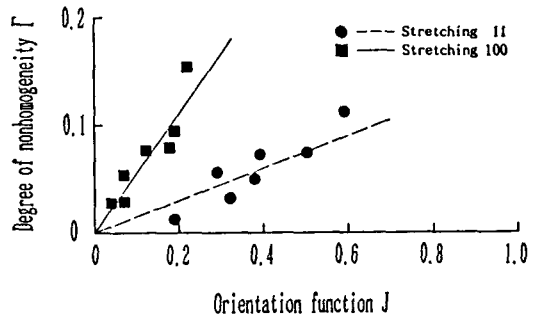


Fig. 11 Relationship between orientation function J and degree of nonhomogeneity Γ (Stretching number = 11, 100)

도가 크다는 의미는 모재인 폴리프로필렌만 섬유 사이를 흘러나가는 것이고, 불균질도가 작다는 의미는 모재와 섬유가 서로 같이 유동하는 것을 말한다. 그러므로 섬유강화 플라스틱 복합판의 압축성형에 있어서 모재와 섬유의 분리 및 섬유의 배향은 별개가 아니라 서로 不可分의 관계가 있으며, 배향함수와 불균질도의 상관관계도로부터 복합재의 섬유구조의 설계에 지침을 줄 수 있다고 생각된다.

5. 결 론

섬유강화 플라스틱 복합판을 고온압축성형할 때 발생하는 섬유의 분리와 배향으로부터 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 중심축상에서는 y축 방향의 속도구배의 영향은 거의 없이 x축 방향의 속도구배만으로 배향하고, 금형벽 부근에서는 금형벽에 의해서 y축 방향의 속도구배가 생겨 섬유의 배향에 영향을 미치지만, 그 경향은 흐름선단으로 될수록 크다.
- (2) 섬유배향함수 J는 섬유길이에 영향을 받으며, 섬유 길이가 길고 섬유함유량이 많으면 섬유상호간의 간

Table 2 Correlation coefficient(C) of test specimen

Specimen	Stampable sheet		Fiber length (20wt%)		Fiber length (40wt%)		Stretching	
	25wt%	40wt%	6mm	30mm	6mm	30mm	11	100
Value of C	0.80	0.86	0.11	0.24	0.19	0.28	0.15	0.55

섭 때문에 불균질도가 증가한다.

- (3) 니들펀칭의 횡수를 나타내는 스트레칭값이 크면 복합재의 섬유구조가 서로 강하게 엉켜져 있어 성형품의 분리의 척도인 불균질도는 증가하나 섬유의 배향은 잘 되지 않게 되고, 스트레칭값이 작으면 그 반대이다.
- (4) 섬유강화 플라스틱 복합판을 고온압축성형할 때, 반드시 분리와 배향이 발생하며 이 분리를 표시하는 불균질도와 배향의 정도를 나타내는 배향함수는 상관관계가 있으며, 불균질도가 증가하면 배향함수도 증가한다.

참고문헌

1. Hojo, H., Kim, E.G., Tamaka, K., Nagatsukawa, C., "Separation of Matrix and Fibers during Molding of Long Fiber-Reinforced Thermoplastics", Proceedings of the Third Japan-U.S. Conference on Composite Materials, Tokyo, pp.605~612, 1986.
2. Hojo, H., Kim, E.G., Tamakawa, K., "The Fiber Content Distribution of Compression Molded Long Fiber-Reinforced Thermoplastic Products", International Polymer Processing, Vol. 1, Issue 2, pp.60~65, 1987.
3. Hojo, H., Kim, S.H., Baek, N.J., Kim, E.G., "Prediction of Fiber Content Distribution in Compression Molded Fiber-Reinforced Thermoplastics", Proceedings of the 5th Annual Meeting of the Polymer Processing Society, Kyoto, Japan, 12~20, 1989.
4. Hojo, H., Kim, E.G., Yajuchi, H., Onodera, T., "Simulation of Compression Molding with Matrix-Fiber Separation and Fiber Orientation for Long Fiber-Reinforced Thermoplastics", International Polymer Processing, Vol. 3, Issue 1, pp.54~61, 1988.
5. 矢口 仁, 北條英典, 鬼海英夫, 玉川規一, 越本勝, "纖維充てん複合材料成形品の纖維配向角分布の表示とその簡易測定", 第39回 日本塑性加工連合講演會 論文集, No. 232, 1988.
6. 矢口 仁, 北條英典, 鬼海英夫, 玉川規一, 越本勝, "長纖維 集合體の纖維影濃 度情報を用いた纖維配向角分布の測定", 第39回 日本塑性加工連合講演會 論文集, No. 233, 1988.
7. 이동기, 矢口 仁, 조선형, 김이곤, "晝像處理에 의한 纖維強化 高分子複合板의 纖維含有量 分布測定", 大韓機械學會 論文集, 第15券 第4號, pp.1177~1183, 1991.
8. 조선형, 이동기, 김이곤, "長纖維強化 高分子複合板의 프레스成形에 있어서 晝像處理에 의한 纖維의 配向에 관한 研究", 大韓機械學會 論文集, 第15券 第3號, pp.834~842, 1991.
9. 山田國廣, 堀川 明, "2次元纖維集合體の確率幾何", 纖維學論文集, 37, 12, pp.51~64, 1984.
10. 장수학, 김석호, 백남주, 김이곤, "纖維強化 高分子複合板의 壓縮成形에 있어서 金型-材料界面의 미끄러움을 고려한 流動解析", 大韓機械學會 論文集, 第15券 第1號, pp.163~168, 1991.