

〈論 文〉

Thermoforming用 長纖維強化 複合材料의 成形工程에 관한 研究
分離·配向의 相關계수에 대하여

이동기* · 김정락** · 김상필** · 이우일*** · 김이곤****
(1992년 10월 5일 접수)

A Study on the Processing of Long Fiber-Reinforced
Composite Materials for Thermoforming
On the Correlation Coefficient between Separation and Orientation

Dong Gi Lee, Jeung Lark Kim, Sang Pil Kim, Woo Il Lee and E Gon Kim

Key Words : Long Fiber-Reinforced Composite Materials for Thermoforming (Thermoforming용 장섬유강화 복합재료), Correlation Coefficient between Separation and Orientation (분리·배향의 상관계수), Fiber Mat Structure (섬유매트 구조)

Abstract

A composite material is composed of a reinforcement and a matrix, which determine mechanical characteristics of the molded part. There is no doubt that the properties of a composite material depend not only on the characteristics of the matrix but also on the structure of glass fiber mat and a fiber type of reinforcement. Therefore it is very important to study the composites of reinforcement and the matrix, and to control the fiber type in the process of molding of composite materials. In this study, the specimen was made of a glass fiber mat of 6~7 mm thickness by scattering it in the air after cutting the glass fiber to uniform length of 50mm, and the structure of the glass fiber to uniform length of 50mm, and the structure of the glass fiber mat with needle punching makes change according to the type of needle and the number of times of stretching. First the sheet was made by means of a hot-press after accumulating a matrix and a glass fiber according to each mat structure of glass fiber. It was heated the manufactured sheet with the dry oven and molded it a secondary high temperature compression by a 30 ton oil-hydraulic press. A definition of a correlation coefficient is showed up during this period and find it out with the relation of the fiber-matrix separation and the fiber orientation. We studied effects of the glass fiber mat structures on the correlation coefficient.

기 호 설 명

\dot{h} : 압축속도

h : 성형후의 두께

h_o : 성형전의 두께

$H_D(K)$: 농도정보에 의한 섬유배향각분포

J : 배향함수

q_f : 성형후의 중량섬유함유율

q_{f_o} : 성형전의 중량섬유함유율

*정희원, 조선대학교 정밀기계공학과

**제일합섬(주) 기술연구소 제3연구실

***정희원, 서울대학교 기계공학과

****정희원, 국민대학교 기계설계학과

- Q_{fr} : 성형전후의 섬유함유율비(= q_f/q_{f0})
 $q(\theta)$: 섬유배향각분포
 R_{cr} : 압축비(= $1-h/h_0$)
 W : 금형의 폭
 Γ : 불균질도

1. 서 론

종래, 플라스틱 복합재료는 열경화성수지를 모재(matrix)로한 성형품이 대부분이었으나 재생문제, 폐기물처리 및 환경문제가 사회문제로 대두되어 소재자체를 보는 관점이 계속적으로 변화하고 있다. 최근, 각종 재료중에서도 이들 재료에 대응하는 재료로 열가소성수지를 모재로 하고 유리섬유로 강화한 섬유강화/고분자복합재료가 있다. 이 재료는 비중이 작기 때문에 구조 부품의 경량화에 유효하고 수지계의 복합재료이므로 내식성 및 생산성이 뛰어나며, 열가소성수지이므로 재생이용이 가능하며 최종처리로서의 소각도 용이하다. 또한, 한 방향강화등 필요한 방향으로 매트구조를 설계할 수 있어 효율이 좋은 재료를 만들 수 있기 때문에 산업분야에서 각종 부품소재로서 각광을 받고 있다.

섬유강화 고분자복합재료를 이용하여 각종 부품을 성형하기 위한 성형법 가운데 고온유동성형법은 소재를 용점이상 고온으로 가열해서 유동성을 높여 성형을 행하는 것으로, 재료는 금형내에서 유동하기 때문에 성형품의 두께에 상당한 변화를 줄 수 있다. 성형의 자유도가 크고 복잡한 형상의 부품성형이 가능하여 생산성도 높고 또한 생산비도 낮다. 따라서 유동성형품은 강판프레스 성형품에 대신해서 현재 자동차, 항공기의 준구조부재 및 각종 산업분야에서 부품소재로서 사용되고 있어 앞으로 이용범위는 더욱 더 넓어진다고 생각할 수 있다.

섬유강화 고분자복합재료를 고온압축성형하는 경우, 가장 큰 문제점은 성형시 유동속도차에 의한 섬유와 모재의 분리 및 변위에 의한 섬유의 배향이다. 이 분리·배향에 의하여 성형품은 불균질하게 되고 이방성이 되어, 성형품의 강도나 특성에 변화가 생긴다. 따라서 복합재료를 이용한 부품의 유동성형에 있어서는 분리·배향을 성형조건이나 재료와 관련시켜서 명확히 하고, 또 분리·배향을 제어하면 최적 성형조건을 결정할 수 있어 뛰어난 성형품을 얻을 수 있다.

복합재료는 강화재 및 모재로 구성되어 있으므로 이 두가지 성질에 의하여 소재의 기계적 특성이 달라진다. 복합재료의 성질은 모재의 성질에 의존하는 것은 당연하지만 강화재인 유리섬유매트의 구조, 섬유의 형태 즉, 섬유의 형상, 길이, 배향상태 및 얽힘상태 등에 의해서 물성이 변화한다. 그래서 강화재의 조직 및 모재의 조성에 대해서 연구하고, 또 복합재료 성형품의 성형에 있어서는 섬유의 형태를 제어하는 것이 매우 중요하다.

Hojo^{(1)~(4)}는 섬유의 분리를 표현할 수 있는 분리방정식을 유도하고 그때 분리계수를 제한 및 측정하였다. 矢口^{(5)~(6)}등은 섬유의 배향을 화상처리를 이용하여 측정하였으며, 필자등⁽⁷⁾은 장섬유의 경우는 유동장에 의존하는 것이 아니라 변위에 의존함을 밝혔다. 또 시판되고 있는 고분자 복합판을 사용하여 이 분리와 배향은 별개가 아니라 서로 불가분의 관계가 있으며, 양자는 상관관계가 있음을 발표하였다.⁽⁸⁾

본 연구에서는 우수한 섬유강화 고분자복합판의 제조 및 개량을 섬유구조의 분리·배향의 관점에서 연구한다. 유리섬유매트는 유리섬유를 50 mm의 길이로 균일하게 절단하여 공기중에서 분산시켜 6~7 mm두께로 만들고, 이 유리섬유매트를 바늘의 종류와 스트레칭 횟수에 따라 니들핀칭하여 유리섬유의 매트구조를 변화시킨다. 유리섬유의 매트구조 별로 모재와 적층시킨 다음 열압축프레스를 사용하여 1차로 시이트를 제작하고, 이 제작된 시이트를 가열로로 가열하여 2차 고온압축 프레스성형한다. 이때 섬유와 모재의 분리 및 배향의 상관관계를 나타내는 상관계수를 구하고, 이 계수에 미치는 매트 구조의 영향에 대한 실험결과를 보고한다.

2. 배향함수 및 불균질도

섬유의 배향은 성형품의 두께가 폭과 길이에 비하여 매우 얇기 때문에 섬유를 2차원집합체로서 취급한다. $x-y$ 평면상에 섬유가 분포하고 있는 경우, x 축과 이루는 섬유배향각 θ 는 $0 \leq \theta < \pi$ 의 범위에 있다. 따라서 섬유배향각분포를 표시하는 배향함수(J)와 섬유배향각분포 $q(\theta)$ 사이에는 다음과 같은 관계가 있다.⁽⁹⁾

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

여기서 J 는 2차원 배향각분포에 대한 배향함수이며, 섬유배향이 등방성인 경우 $J=0$, 한 방향으로만 배열되어 있는 경우는 $J=1$, $J=1$ 의 방향에 대해 90° 회전 되어있는 경우는 $J=-1$ 이다.

섬유강화 고분자복합재료의 고온유동성형에 있어서 섬유가 서로 강하게 엉켜져 섬유하나하나를 식별할 수 없는 경우, 섬유배향각분포는 연X-선 사진농도정보를 이용하여 다음 식에 의하여 구한다.⁽⁶⁾

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

여기서 n 은 $0 \leq \theta < \pi$ 의 분할수이며, $N_\theta(k)$ 는 $(2k-1)\pi/2n \leq \theta \leq (2k+1)\pi/2n$ 의 범위에 있는 물체의 운곽선방향 화소수이다. 이와 같이 식(2)로 측정된 $H_D(K)$ 로부터 최소자승법에 의하여 섬유의

배향함수 J 를 구한다. 본 실험의 계측에서 θ 의 범위는 10° 이고, 연X-선 사진농도정보를 이용하여 측정된 $H_D(k)$ 로부터 배향함수 J 를 구하면 성형품의 섬유의 배향정도를 알 수 있다.

섬유매트구조 별로 제작된 시이트를 Fig. 1과 같이 평행판 사이에 끼우고 y방향의 흐름을 구속하여 초기두께 h_0 를 h 까지 고온압축 프레스성형한다. 성형중의 섬유를 고체, 모재를 액체로 한 고액혼상류는 성형이 진행됨에 따라 유동속도 차이에 의해서 분리가 생기며 이로 인하여 성형품은 불균질하게 된다. Fig. 2는 압축성형후의 성형품의 섬유함유율 분포를 나타낸 한 예이며, 분리가 심하면 심할 수록 성형품은 불균질하게 되어 그림에서 사선부분의 영역이 더 크게 된다. 섬유함유율 분포곡선($Q_{rr} = q_f/q_{fo}$)을 2차함수로하고, 최소자승법에 의해서 계수 C_1, C_2, C_3 를 구한 후 사선의 면적을 계산하여 불균질도(Γ)를 식(3)과 같이 정의한다.⁽²⁾

$$\Gamma = \text{사선의 면적} / B \quad (3)$$

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

3. 유리섬유매트의 제조

실험에 사용한 섬유강화 고분자복합판(모재: 폴리프로필렌 강화재: 유리섬유매트, 두께 h_0 : 3.8 mm)은 유리섬유매트의 구조를 변화시켜 모재와 적층시킨 다음 열압축프레스를 사용하여 제작하였다. 이때 유리섬유매트(제작: 한국화이버, 섬유번호:

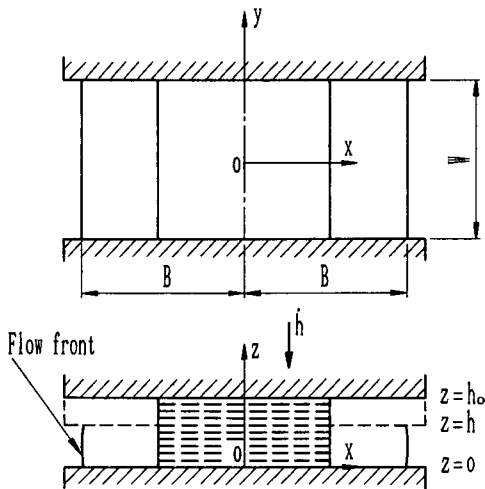


Fig. 1 Nomenclature for slab-shaped part compression molding

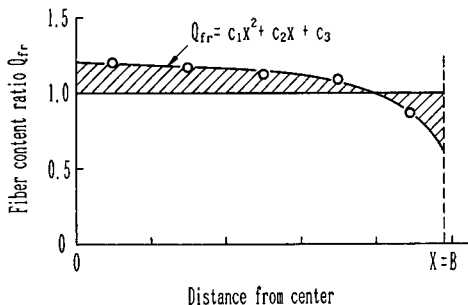


Fig. 2 Distribution of fiber content ratio

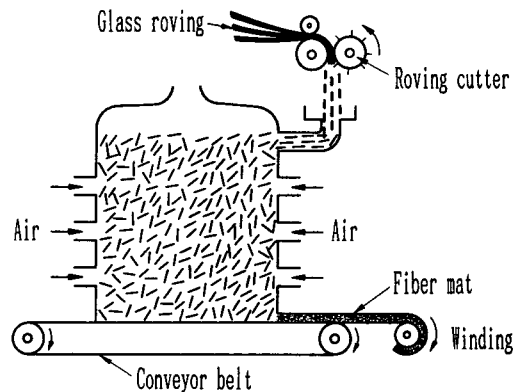


Fig. 3 Manufacturing mechanism of fiber mat

CM300)는 Fig. 3과 같이 강화재인 유리섬유를 로빙커터로서 50 mm 길이로 균일하게 절단하여 공기 중에서 분산시켜 6~7 mm 두께로 만들었다.

복합판의 제조공정은 Fig. 4에 나타냈으며, 유리섬유의 매트구조를 만들 때 니들펀칭 조건은 Table 1과 같다. Fig. 5는 니들펀칭할 때 사용하는 공구인 바늘의 형상과 각부 명칭을 나타낸 한 예이다. Table 1에서 니들타이프의 숫자는 Fig. 6의 니들게이지 값이다. 즉, Fig. 5의 프랭크 생크*인터

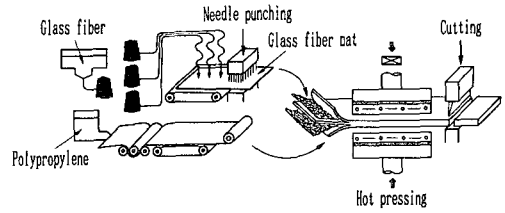
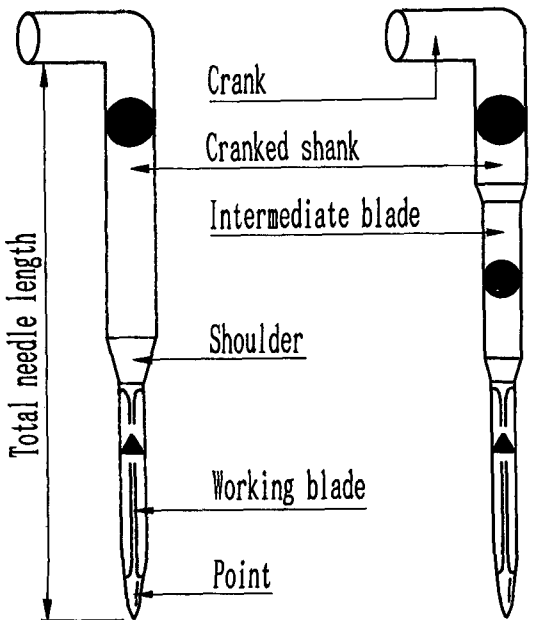


Fig. 4 Schematic illustration of manufacturing process for fiber composites

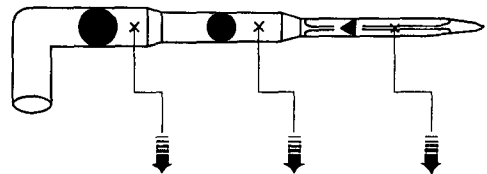
Table 1 Experimental materials and conditions of needle punching

No.	Layers	Needle type	Fiber length	Stretching	Deep	Bulk density
1	2	15*18*32*3 in.	50 mm	100	14 mm	0.096 g/cm ³
2	2	15*18*25*3 in.	50 mm	21	14 mm	0.076 g/cm ³
3	3	15 *13*3 in.	50 mm	21	14 mm	0.101 g/cm ³
4	3	15 *18*3.5 in.	50 mm	20	14 mm	0.111 g/cm ³
5	3	15 *18*3.5 in.	50 mm	11	14 mm	0.130 g/cm ³



(a) Single reduced (b) Double reduced

Fig. 5 Needle shape and designations



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. 6 Needle gauge to nominal dimensions

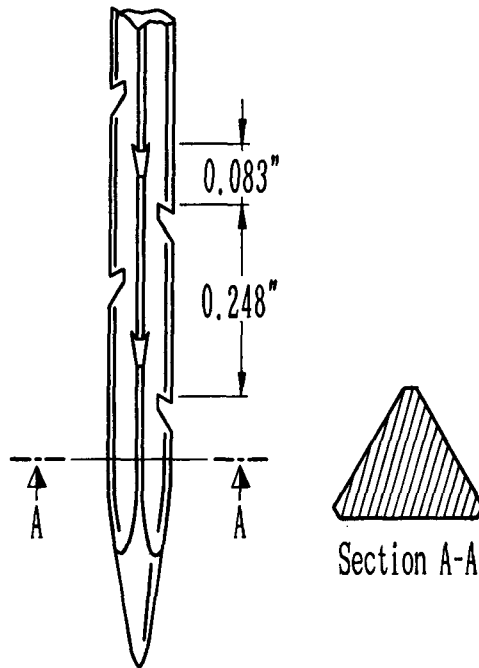


Fig. 7 Needle barb distances

Table 2 Fiber content by weight and tensile strength

Specimen No.	Fiber content by weight	Tensile strength
Specimen 1	38 wt%	3.41 kg/mm ²
Specimen 2	37 wt%	5.62 kg/mm ²
Specimen 3	37 wt%	7.55 kg/mm ²
Specimen 4	45 wt%	6.88 kg/mm ²
Specimen 5	43 wt%	8.02 kg/mm ²

미디에트 블레이드*워킹 블레이드*총 니들 길이를 나타낸다. 스트레칭은 유리섬유매트 1평방센티(1 cm²)의 니들펀칭 횟수, 디이프는 니들펀칭의 깊이를 나타낸다. 또 스트레칭값은 니들펀칭 횟수이므로 유리섬유매트의 제조 생산속도와도 관계가 있다. 스트레칭값이 클수록 유리섬유매트의 생산속도가 낮고, 스트레칭값이 작을수록 생산속도가 빠르다.

Fig. 6은 바늘의 규격을 나타내며, 바늘의 길이는 3인치와 3.5인치를 사용하였으며, 여기서 게이지값이 클수록 바늘의 굵기가 작음을 의미한다. Fig. 7은 니들펀칭할 때 바늘의 몸체중 핵심부분 형상을 나타내었다. 이 그림에서와 같이 공구의 몸

체중 삼각형단면 모서리 부분에는 각각 2개씩 총 6개의 홈이 있어 유리섬유매트를 니들펀칭할 때 수평으로 놓여있는 유리섬유를 수직으로 꿰매고 절단하여 섬유를 서로 강하게 엉키게 한다. Table 2에서 스트레칭값이 클수록 니들펀칭할 때 유리섬유를 많이 절단하므로 일차로 제작된 시이트의 경우 인장강도값이 적고 스테레칭값이 적을 수록 인장강도값이 증가함을 알 수 있다.

4. 실험

섬유의 분리·배향을 측정하기 위하여 유리섬유매트의 구조 별로 제작된 5종류의 복합판을 60 mm

(폭)×75 mm(길이)×3.8 mm(두께)의 직사각형판으로 절단하여 시험편으로 하였다. 또 금형캐비티의 치수는 60 mm×400 mm이고, 성형온도는 200°C 및 압축속도는 21.5 mm/sec, 89.7 mm/sec이다. 가압장치는 30톤 유압프레스를 사용하였으며 금형에는 열전대를 부착시키고 가열은 봉 및 판히터를 사용하였다.⁽¹⁰⁾ 압축성형에 있어서 재료의 흐름을 Fig. 1과 같이 폭방향을 구속하여 길이 방향으로만 되게 하였다. 불균질도를 구하기 위한 시험편의 연소는 Fig. 1과 같이 시험편의 중립면에서 x 축을 따라서 가로 10 mm×세로 10 mm를 채취하여 전기로에서 폴리프로필렌을 620°C에서 30분간 가열 연소하고, 연소전후의 무게를 천평으로 측정하여 섬유함유율 분포를 구하였다. 이 섬유함유율 분포로부터 식(3)에 의하여 분리의 척도인 불균질도(I)를 구하였다.

화상처리에 이용한 이미지스캐너는 일본 세이코 업스제 GT-4000 V이며 해상도는 400×400화소, 1화소 1/8 mm×1/8 mm, 농도계조 256계조(gray level: 흑=0, 白=255)이다. 그리고 연X-선 발생 장치는 미국 베니트 CM205(의료용)이며, 필름은 일본 후지사 제품(MI-NC의료용 X-레이 필름, 180 mm×240 mm)이다. 또 섬유배향함수 J 를 측정하기 위하여 성형품의 중립면에서 길이 $B/2$ 인 점(평균속도에 해당되는 점)을 기준으로 하여 50 mm×50 mm의 영역을 화상처리함으로써 배향함수 J 를 측정하였다. 그리고 2차가공한 성형품의 유동 방향의 인장강도 σ_L 과 유동방향의 직각방향 σ_T 의 비를 구하기 위하여 σ_L 은 성형품 총 길이의 1/2인 점을 기준으로 가로축을 따라서 10 mm를, σ_T 는 성형품의 길이 $B/2$ 인 점을 기준으로 세로축 폭 10 mm를 각각 채취하여 압축비 별로 인장시험하였다.

5. 결과 및 고찰

섬유의 배향함수와 불균질도를 구하기 위하여 Fig. 1과 같이 유압프레스에 매트구조 별로 제작된 섬유강화 고분자복합판을 넣고 1차원 평판압축시험을 하였다. 이 성형품의 섬유배향함수는 성형품을 연X-선 촬영하여 얻은 사진으로 화상처리하여 그리고 불균질도는 폴리프로필렌을 연소하여 섬유함유율분포로부터 구하였다. Fig. 8은 유리섬유의 매트구조 변화에 따른 섬유의 배향함수와 압축비(R_{cr}

$=1-h/h_0$)의 관계이다. 압축속도는 21.5 mm/sec이며 블랭크와 금형의 온도는 각각 200°C이다. Fig. 8에서 알 수 있듯이 압축비가 크면 클수록 성형품의 변형량이 커지므로 섬유배향함수 J 는 커짐을 알 수 있다. 유리섬유매트 1평방센티(1cm²)의 니들펀칭 횟수를 나타내는 스트레칭값이 가장 큰

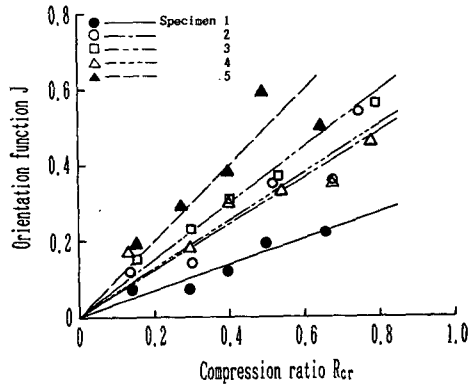


Fig. 8 Effect of compression ratio R_{cr} on fiber orientation function J

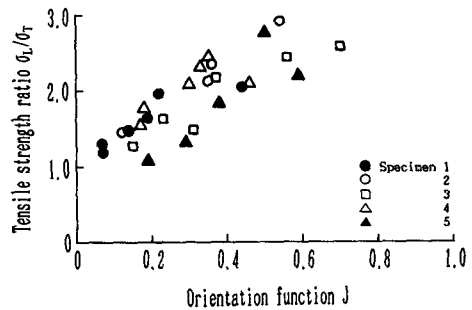


Fig. 9 Effect of fiber orientation function J on tensile strength ratio σ_L/σ_T

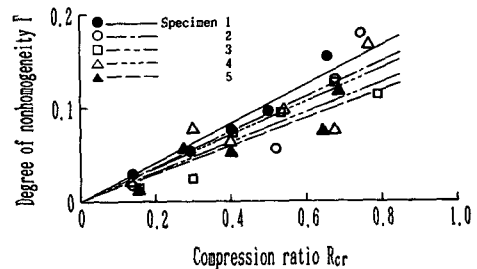


Fig. 10 Effect of compression ratio R_{cr} on degree of nonhomogeneity I

시험편 1이 섬유끼리 강하게 엉켜 배향함수 J 값이 적고, 스트레칭값이 작은 시험편 5는 배향함수 J 값이 커짐을 알 수 있다. 여기서 섬유배향함수 J 는 니들펀칭 횟수와 압축비에 의존함을 알 수 있다. Fig. 9는 섬유배향함수와 성형품의 인장강도비의 관계이다. 앞의 실험조건에서 폭방향은 구속하여 고온압축성형 하였기 때문에 섬유는 길이방향으로만 모재와 같이 흐르므로 σ_L 이 σ_L 보다 크게되어 배향함수가 증가할수록 인장강도비가 증가함을 알 수 있다.

Fig. 10은 프레스의 압축속도 21.5 mm/sec인 경우 성형품의 불균질도와 압축비와의 관계이다. 이 그림에 나타나 있는 바와 같이 유리섬유매트를 니들펀칭 할 때 바늘의 굵기가 가늘고 스트레칭값이 클수록 섬유가 서로 강하게 엉키기 때문에, 시험편 1의 경우는 압축비가 증가할수록 모재와 강화재는

분리가 잘 되어 성형품의 불균질도 Γ 값이 증가함을 알 수 있다. 또 시험편 2, 3, 4, 5의 경우는 스트레칭값이 작을 수록 섬유가 서로 강하게 엉키지 않기 때문에, 압축비가 증가할수록 섬유배향이 잘 되어 성형품의 불균질도 Γ 값이 시험편 1보다 작음

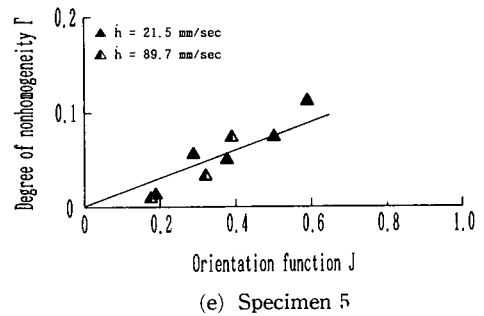
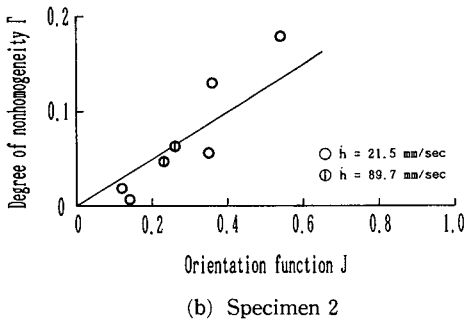
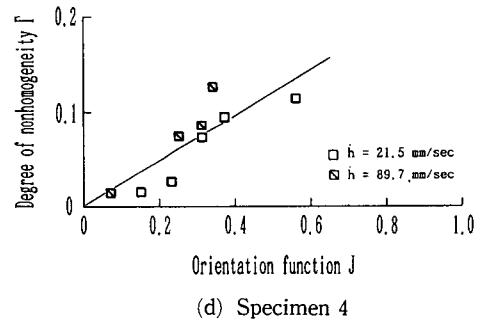
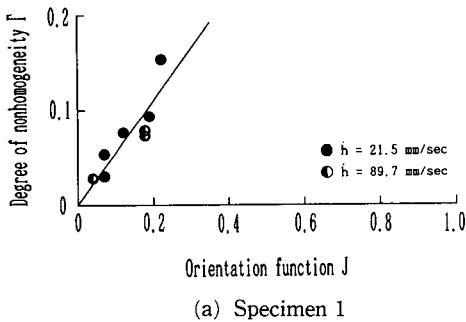
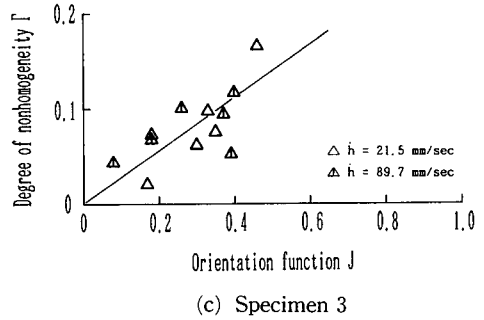


Fig. 11 Relationship between orientation function J and degree of nonhomogeneity Γ

Table 3 Correlation coefficient(C) of test specimen

Specimen No.	1	2	3	4	5	Stampable sheet
Value of C	0.55	0.25	0.24	0.28	0.15	0.86

을 알 수 있다. 즉 시험편의 불균질도는 니들펀칭의 횡수가 많고 압축비가 클수록 성형품내의 섬유와 모재와의 분리로 인하여 커진다.

Fig. 11은 프레스의 압축속도(21.5 mm/sec, 89.7 mm/sec)와 니들펀칭 조건에 따른 섬유의 배향함수 J 와 성형품의 불균질도 Γ 와의 상관관계이다. 이 그림으로부터 성형품의 불균질도 Γ 와 섬유배향함수 J 는 식(4)와 같이 1차함수로 표시할 수 있으며, Γ 와 J 는 프레스의 압축속도에 영향을 받지 않고 니들펀칭 횡수에 관계가 있음을 알 수 있다.

$$\Gamma = C \cdot J \quad (4)$$

여기서, 기울기 C 를 분리·배향의 상관계수라고 부르기로 한다. 이 C 의 값은 분리·배향의 관점에서 재료의 특성을 나타내는 값이며, C 가 크면 분리는 쉽게 되나 배향은 잘되지 않고, C 가 작으면 그 반대의 현상을 나타낸다. 유리섬유매트 구조 변화에 따른 상관계수 C 를 최소자승법에 의하여 구하고, 그 결과를 Table 3에 나타내었다. 국내에서 시판되고 있는 스텝퍼블시이트(일본 이데미쯔석유화학주식회사 제품, 섬유함유율 40 wt%)의 경우 상관계수 C 는 0.86이다⁽⁸⁾. 여기서 분리·배향의 상관계수 C 는 유리섬유매트를 니들펀칭할 때 스트레칭값에 크게 영향을 받음을 알 수 있다. 스트레칭값이 크면 유리섬유가 서로 강하게 엉켜있어 유리섬유가 유동하기 힘들게 되므로 성형가공성이 불량하게 되어서 C 의 값이 크며, 스트레칭값이 작으면 그 반대이다. Fig. 12는 상관계수에 미치는 스트레칭값의 영향을 나타낸 반-로그 그림이다. 이

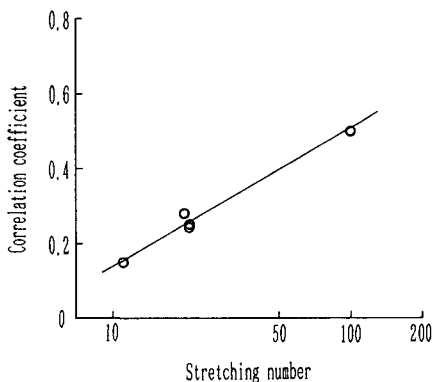


Fig. 12 Effect of stretching number on correlation coefficient

그림에 나타난 바와 같이 스트레칭값이 증가할수록 섬유가 서로 강하게 엉키므로, 섬유와 모재의 분리 및 배향의 상관관계를 나타내는 상관계수가 증가함을 알 수 있다. 그러므로 섬유강화 고분자복합판의 압축성형에 있어서 매트구조에 따른 섬유의 분리·배향의 상관계수로부터 복합재의 섬유구조의 최적 설계에 지침을 줄 수 있다고 생각된다.

6. 결 론

니들펀칭의 횡수를 나타내는 스트레칭값이 크면 복합재의 섬유구조가 서로 강하게 엉켜져 있어 성형품의 분리의 척도인 불균질도는 증가하나 섬유의 배향은 잘 되지 않게 되고, 또 스트레칭값이 작으면 섬유구조가 서로 엉켜 있지 않아 섬유의 배향은 잘되나 성형품의 불균질도는 작게 된다.

배향함수가 크면 불균질도가 상승하고 양자는 1차함수로 표시할 수 있으며 이때 기울기(상관계수)는 복합재료의 특성을 나타낸다. 이 상관계수의 값은 복합재료의 설계에 있어서 분리·배향의 관점에서 기본지침을 줄 수 있다.

후 기

본 연구는 교육부의 91년도 첨단공학(신소재분야) 학술연구 지원으로 수행된 내용의 일부이며, 관계자 여러분께 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

- (1) Hojo, H., Kim, E.G., Tamakawa, K. and Nagatsuka, C., 1986, "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.
- (2) Hojo, H., Kim, E.G. and Tamakawa, K., 1987, "The Fibre Content Distribution of Compression Molded Long Fibre-Reinforced Thermoplastic Products," International Polymer Processing, Vol. 1, Issue 2, pp. 60~65.
- (3) Hojo, H., Kim, S.H., Baek, B.J. and Kim, E.G., 1989, "Prediction of Fibre Content Distribution in Compression Molded Fibre-Reinforced Ther-

- moplastics," Proceedings of the 5th Annual Meeting of the Polymer Processing Society, Kyoto, Japan, 12-20.
- (4) Hojo, H., Kim, E.G., Yajuchi, H. and Onodera, T., 1988, "Simulation of Compression Molding with Matrix-Fibre Separation and Fibre Orientation for Long Fibre-Reinforced Thermoplastics," International Polymer Processing, Vol. 3, Issue 1, pp. 54~61.
- (5) 矢口 仁, 北條英典, 鬼海英夫, 玉川規一, 越本勝, 1988, "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.
- (6) 矢口 仁, 北條英典, 鬼海英夫, 玉川規一, 越本勝, 1988, "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.
- (7) 조선형, 이동기, 김이곤, 1991, "長纖維強化 高分子複合板의 프레스成形에 있어서 畫像處理에 의한 纖維의 配向에 관한 研究," 大韓機械學會論文集, 第15卷 第3號, pp. 834~842.
- (8) 이동기, 유정훈, 김이곤, 1993, "長纖維強化 高分子複合板의 壓縮成形에 있어서 纖維의 分離와 配向의 相關關係에 관한 研究," 大韓機械學會論文集, 第17卷 第1號, pp. 62~68.
- (9) 山田國廣, 堀川 明, 1984, "2次元纖維集合體の 確率幾何," 纖維學論文集. 37, 12, pp. 51~64.
- (10) 장수학, 김석호, 백남주, 김이곤, 1991, "纖維強化 高分子複合板의 壓縮成形에 있어서 金型-材料界面의 미끄럼을 고려한 流動解析," 大韓機械學會論文集, 第15卷 第1號, pp. 163~168.