

< 논 문 >

섬유강화 열가소성 고분자 복합판의 압축성형에 있어서 평균분리계수에 관한 연구

강 건* · 조선행** · 이동기*** · 김이곤*

(1995년 1월 25일 접수)

A Study on Mean Coefficient of Separation during Compression Molding of Fiber-Reinforced Thermoplastics

K. Kang, S. H. Jo, D. G. Lee and E. G. Kim

Key Words : Fiber-Reinforced Thermoplastics(섬유강화 열가소성 고분자 복합판), Compression Molding(압축성형), Mean Coefficient of Separation(평균분리계수), Fiber Orientation(섬유배향)

Abstract

The properties of FRP(fiber-reinforced plastics) depend not only on the characteristics of the matrix but also on the structure of fiber mat and the fiber type of reinforcement. Therefore it is very important to study the characteristics of reinforcement and matrix. In this paper, a method is proposed which can be used to measure the mean coefficient of separation for the press molding of FRP, and the mean equivalent coefficient of separation is obtained from the separation coefficient. And the relationship between the mean equivalent coefficient of separation and the structure of fiber mat is discussed. The effects of correlation coefficient between separation and orientation on the mean equivalent coefficient are also presented.

기 호 설 명	
<p>B : 성형품 길이의 1/2</p> <p>C : 불균질도와 섬유의 배향함수와의 상관계수</p> <p>d_f : 섬유의 직경</p> <p>d_{fs} : 구에 상당하는 섬유직경</p> <p>f_f : 섬유끼리의 상호저항력</p> <p>h : 성형품의 두께</p> <p>h_0 : 복합재의 초기두께</p> <p>\dot{h} : 압축속도</p> <p>J : 섬유의 배향함수</p> <p>j_{sp} : 항력에 대한 수정계수</p>	<p>K : 분리계수</p> <p>K_{ave} : 평균분리계수</p> <p>K_c : 복합재의 구조점도</p> <p>\bar{l}_f : 평균섬유길이</p> <p>M : 상당분리계수</p> <p>M_{ave} : 평균 상당분리계수</p> <p>N : 섬유매트의 스트레칭수</p> <p>N_{f_i} : \bar{l}_f의 길이를 갖는 섬유의 개수</p> <p>n_c : 복합재의 구조점도지수</p> <p>n_m : 모재의 구조점도지수</p> <p>Q_{fr} : 복합재의 섬유함유율비</p> <p>$q(\theta)$: 섬유배향각 분포</p> <p>R_{cr} : 압축비</p> <p>v_{ave} : 재료의 평균속도</p>

*회원, 국민대학교 기계설계학과

**회원, 대우공업전문대학 급형설계과

***회원, 조선대학교 정밀기계공학과

- v_c : 복합재의 속도
- v_f : 섬유속의 속도
- v_m : 모재의 속도
- W : 금형의 폭
- W_f : 섬유의 중량
- Γ : 불균질도
- Γ_{exp} : 실험에 의한 불균질도
- Γ_{the} : 이론에 의한 불균질도
- γ_f : 섬유의 비중
- θ : 물체의 윤곽선 방향
- μ_m : 모재의 점성계수
- σ_L/σ_T : 인장강도의 비

1. 서 론

근래에 들어, 고분자 재료를 모재로 하는 섬유강화 열가소성 고분자 복합재료의 이용이 항공기 및 자동차 산업 등에서 확대되고 있다. 이는 금속재료에 비해 비강도, 비강성 및 내식성 등이 우수하며, 열경화성 수지에 비해 재생이용이 용이한 장점이 있기 때문이다.

이러한 섬유강화 복합재의 성형법 중에서 고온 프레스성형법은 소재를 용접까지 가열해서 성형하는 것으로, 이때 유동속도차에 의해 섬유와 모재는 분리가 발생하고, 변위차에 의한 섬유배향이 나타난다. 결과적으로 소재는 불균질해지고, 이방성이 되어 성형품의 기계적 특성에 영향을 미치게 된다. 이는 모재의 성질에 의해 영향을 받지만, 매트를 구성하는 섬유구조, 즉 니들핀칭의 유무 등에 의해서도 영향을 받는다. 따라서 소재개발과 제품의 최적설계를 위해 섬유길이, 함유량, 니들핀칭 등의 섬유구조에 영향을 미치는 인자와 압력, 압축속도, 금형온도 등 성형조건에 대해 섬유의 분리배향을 명확히 할 필요가 있다.

모재와 섬유의 분리 및 섬유의 배향에 관한 지금까지의 연구를 보면, Hojo 등은 성형중의 섬유를 고체, 모재를 액체로 한 고·액혼상류 이론을 사용하여 섬유의 분리를 표현할 수 있는 분리방정식을 유도하고, 그때 분리계수를 제안하였으며 평판압축 성형에 대해 섬유함유율 분포를 계산하였다.⁽¹⁻³⁾ Yaguchi 등은 연 X선 사진을 이용하여 섬유를 가시화시킨 후 화상처리하여, 섬유배향각 분포를 측정하고 배향함수를 구하였다.⁽⁴⁾ 또 필자들은 섬유

의 분리와 배향은 성형중, 분리가 쉽게 발생하면 배향도 쉽게 된다는 서로의 상관관계가 있음을 밝혔고, 이러한 관계를 상관계수로 정의하였다.⁽⁵⁾ 그러나 분리의 정도를 나타내는 이 분리계수에 대한 측정 및 연구는 아직 없는 상태이다. 본 연구에서는 Hojo 등이 제안한 분리방정식에서 분리계수를 측정하는 방법을 제안하며, 이를 통해 측정된 분리계수와 속도와의 관계에서 상당분리계수를 구하였다. 또한 니들핀칭에 의한 섬유구조 변화가 분리계수에 미치는 영향들에 대하여 검토하였다.

2. 평균분리계수

고분자 복합재료의 성형중의 유동형태, 특히 섬유의 거동은 매우 복잡하므로, 이것을 단순화시켜 응용된 고분자는 액체, 섬유는 고체로 모델화한다. 고체-액체의 유동인 고·액혼상류로 취급해서 섬유의 속도를 구한다.

섬유를 구로 모델화시킨 섬유 한개의 속도 v_f 는 다음과 같다.⁽¹⁾

$$v_f = v_m - K \frac{\gamma_f d_{fs}^2}{\mu_m} \tag{1}$$

여기서, v_m , μ_m 은 각각 모재의 속도와 점성계수이고, γ_f 는 섬유의 비중, d_{fs} 는 섬유의 구에 대한 상당직경이다. K 는 섬유의 분리 정도를 나타내는 분리계수로서 다음과 같다.

$$K = \frac{f_f}{18 j_{sp} W_f} \tag{2}$$

여기서, f_f , W_f 는 각각 섬유의 상호저항력과 중량이고, j_{sp} 는 항력에 대한 수점계수이다. K 에 영향을 주는 인자로는 섬유함유율, 섬유구조, 섬유형태와 같은 재료요인, 성형속도, 성형온도와 같은 성형요인, 금형의 형상과 같은 기하학적 요인을 들 수 있다.

식 (1)에서 모재의 점성계수 μ_m 은 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\mu_m = C_{m0} \dot{\gamma}^{n_m-1} \exp\{-b(T - T_0)\} \tag{3}$$

여기서, $\dot{\gamma}$ 는 전단속도, n_m 은 구조점도지수, T 는 성형온도, C_{m0} , b , T_0 는 상수이다.

성형이 진행되는 동안 섬유와 모재는 분리를 수반하고 있으므로 섬유의 속도와 복합재의 속도는 다르나 여기서는 같다고 가정한다. 섬유로 인한 압

력구배는 복합재와 모재의 구배의 차로 표시할 수 있으며, 이것은 식 (2)에서 나타난 섬유와 상호저항력과 밀접한 관계가 있다. 그래서 이것으로부터 분리계수 K 를 속도의 항으로 표시하면 다음과 같다.⁽³⁾

$$K = Mv_c^{n_c} \tag{4}$$

여기서, 섬유의 v_c , n_c 는 복합재의 속도, 구조점도 지수이며, M 은 상당분리계수이다.

식 (1)에 있어서 섬유의 속도를 계산할 때 모재의 속도(복합재의 속도와 동일하다고 가정)를 구할 필요가 있다. Fig. 1에서 금형과 재료 사이에 미끄럼이 없다고 가정하고 두께방향(Fig. 1에서 z 축)에 따라서 그 두께방향으로의 평균속도를 구하고 x 좌표의 위치에 따라서 속도가 다르나 여기서는 중앙점의 위치의 속도(평균속도가 된다)를 사용한다. 그래서 이 속도를 사용해서 구한 분리계수를 평균분리계수(K_{ave}) 및 그에 상응하는 상당분리계수는 평균상당분리계수라고 부르기로 한다.

3. 평균분리계수의 산출

실제 섬유와 같은 물성을 가지는 가상섬유(imaginary fiber)⁽²⁾를 이용하여 평균분리계수를 다음과 같은 과정으로 구한다.

- ① 소재치수에 맞게 가상섬유를 일정 간격으로 배열한다.
- ② 식 (1)을 사용하여 속도에 시간 Δt 를 곱해서 가상섬유 개개에 대해서 이동거리를 계산한다. 이

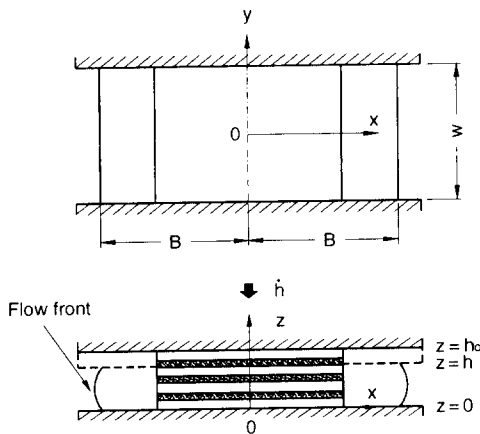


Fig. 1 Nomenclature for slab-shaped part compression molding

때 처음의 K_{ave} 는 가정한다.

③ 유동 방향만을 고려하여 유동 중심을 따라 i 개의 요소($10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$)를 분할하고, 섬유의 수를 계산한다.

④ 식 (5)를 이용하여 섬유함유율 분포(Q_{fr})를 계산한다.

$$Q_{fr} = \frac{\text{가정된 } K_{ave} \text{에 대한 } i\text{번째 요소의 섬유개수}}{K_{ave}=0 \text{에 대한 } i\text{번째 요소의 섬유개수}} \tag{5}$$

⑤ 실험에 의해 측정된 불균질도 Γ_{exp} 와 가정된 K_{ave} 에 대해서 식 (5)에서 구한 섬유함유율 분포를 사용하여 불균질도 Γ_{the} 를 구하고, 실험치와 동등한 값이 될 때까지 반복하여 K_{ave} 를 구한다.

위의 과정을 전산처리과정으로 나타내면 Fig. 2와 같다.

본 연구에서는 Fig. 1과 같이 1차원 모델을 사용하고, 가상섬유는 x 방향으로 2000개를 배열하였다. 다음은 계산에 이용된 수치들이다.⁽³⁾

$$n_c = 0.22, \quad n_m = 0.36$$

$$C_{m0} = 16.2 \times 10^4 \text{ dyne} \cdot \text{s}^{nm} / \text{cm}^2$$

$$b = 0.01487$$

평균섬유길이 \bar{l}_f 는 Hull의 정의를 사용하여 다음과 같이 구할 수 있다.⁽⁶⁾

$$\bar{l}_f = \frac{\sum N_{fi} l_i}{\sum N_{fi}} \tag{6}$$

여기서, N_{fi} 는 l_i 의 길이를 갖는 섬유의 개수이다. $60\text{ mm} \times 75\text{ mm}$ 의 시험편에 대해 평균섬유길이는 30.4 mm 이다. 섬유 필라멘트 하나의 직경은 $23\text{ }\mu\text{m}$, 필라멘트수는 60개로서 섬유직경 d_f 는 $\sqrt{60} \times 23\text{ }\mu\text{m} = 0.178\text{ mm}$ 이다.

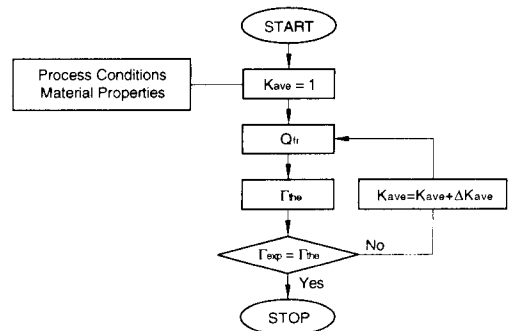


Fig. 2 Flow diagram for calculation of mean coefficient of separation

이론화된 구에 대한 상당직경 $d_{rs}(=\sqrt[3]{1.5d_f^2 l_f})$ 는 1.13 mm이다.

4. 실험

실험에 사용된 소재는 유리섬유를 강화재로, 폴리프로필렌을 모재로 하는 복합판(FRTP)을 대상으로 하였다. 유리섬유매트는 단위면적당 니들펀칭 횟수에 해당하는 스트레칭수(N)에 따른 5가지 섬유구조로서, 여기에 폴리프로필렌을 함침시켜 시험편을 제작⁽⁴⁾하여 압축비, 압축속도를 달리하여 실험을 수행하였고, 인장강도를 측정하였다.

4.1 유리섬유매트

유리섬유매트(한국화이버, CM300)는 유리섬유를 50 mm 길이로, 로빙커터를 사용하여 균일하게 절단하고 공기중에 분산시켜 만든 후 니들펀칭을 통해 섬유구조를 변화시키게 된다. 스트레칭은 유리섬유매트 1평방센티의 니들펀칭 회수이고, 스트레칭값이 클수록 유리섬유매트의 생산속도가 낮고, 스트레칭값이 작을수록 생산속도가 빠르다. 이 값이 클수록 펀칭할때 유리섬유를 많이 절단하므로 일차로 제작된 시이트의 경우 인장강도 값이 적고 이 값이 적을수록 인장강도 값이 증가함을 알 수 있다. 다음 이 섬유매트를 가지고, 폴리프로필렌을 함침시켜 시험편을 제작하였다. Table 1은 유리섬유매트의 스트레칭수, 섬유중량 함유율, 인장강도를 보여주었으며, 여기서, 인장강도는 10개의 시험편을 채취해서 실험한 평균 값이다.

4.2 불균질도 및 배향함수 측정

섬유의 분리·배향을 측정하기 위하여 복합판을 60 mm(폭)×75 mm(길이)×3.8 mm(두께)의 직사

각형판으로 절단하여 시험편으로 하였다.

금형캐비티의 치수는 60 mm×400 mm이고, 성형온도는 190℃, 압축속도는 2.15 cm/sec, 8.97 cm/sec 두 종류로 하였다. 가압장치는 30 t 유압프레스로, 금형에는 열전대를 부착시키고 가열은 봉 및 판히터를 사용하였다.

성형에 있어서 재료의 유동은, Fig. 1과 같이 폭방향(y 축 방향)을 구속하여 길이 방향(x 축 방향)으로만 되게 하였다. 불균질도를 구하기 위한 연소 시험편은 시험편의 중립면에서 x 축을 따라 10 mm×10 mm를 채취하여 전기로에서 620℃, 30분간 가열 연소시켜 폴리프로필렌을 제거하고, 연소 전후의 무게를 측정하여 섬유함유율 분포를 구하였다. 이때 섬유함유율 분포곡선($Q_{rr}=q_r/q_{r0}$)을 포물선으로 가정하고 최소사승법을 이용하여 계수 C_0 , C_1 을 찾는다. Fig. 3과 같이 사선의 면적을 계산하여 불균질도(Γ)를 구하였다.

$$\Gamma = \frac{\text{사선의 면적}}{B} \tag{7}$$

여기서, 성형품이 분리가 심하게 나타날수록 사선의 영역은 증가하고 불균질도는 커지게 된다. 압축속도 $h=2.15$ cm/sec, 압축비 $R_{cr}=0.645$ 인 경우의 실험치와 이 실험치를 2차함수($Q_{rr}=C_1x^2+C_0$)로 표시한 것이 실선이다. 식 (7)을 사용하여 불균질도를 구하면 0.112이며, 이때 평균분리계수를 구하면 $K=30.0$ 이다.

섬유배향함수를 측정하기 위하여 연 X선 촬영을 하고, 이미지 스캐너를 이용하여 성형품의 중심에서 평균속도에 해당되는 $B/2$ 인 점을 기준으로, 50 mm×50 mm의 영역을 화상처리함으로써 섬유배향 각 분포($q(\theta)$)를 다음 식으로부터 측정하였다.⁽⁵⁾

Table 1 Structure of glass fiber mat

Specimen	Stretching	wt%	Tensile strength(kg _f /mm ²)
1	100	38	3.41
2	21	37	5.62
3	21	37	7.55
4	20	45	6.88
5	11	43	8.02

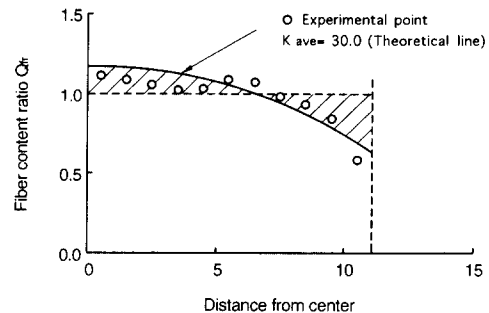


Fig. 3 Example of fiber content ratio($h=2.15$ cm/sec, $R_{cr}=0.645$, $\Gamma_{exp}=0.112$)

$$q(\theta) = \frac{1}{\pi} \left[\left(\frac{1-J}{1+J} \right) \cos^2 \theta + \left(\frac{1+J}{1-J} \right) \sin^2 \theta \right]^{-1} \quad (8)$$

여기서, θ 는 사진의 농도를 이용한 물체의 윤곽선 방향이고, J 는 2차원 배향각 분포에 대한 배향함수로서, 0부터 1 사이의 값을 가진다. 등방성인 경우 $J=0$, 유동방향에 대해 $J=1$, 유동방향의 직각방향에 대해 $J=-1$ 의 값이다.

화상처리에 이용한 이미지 스캐너는 400×400 화소, 농도계조 256계조의 일본 세이코 에스 GT-4000V이고, 연 X선 발생기는 미국 베니트 CM205(의료용)이며, 필름은 일본 후지사 MI-NC(의료용)를 사용하였다.

5. 결과 및 고찰

Fig. 4는 유리섬유매트 구조의 변화에 따른 섬유 불균질도(Γ)와 압축비($R_{cr}=1-h/h_0$)와의 관계를 보여주고 있다. 이때 압축속도는 2.15 cm/sec이며 금형온도는 190°C이다. 전체적으로, 압축비가 크면 클수록 섬유·모재간의 분리가 심해져 불균질도는 커지는 것을 볼 수 있다. 또한 스트레칭수(N)가 클수록 전체적인 기울기는 상승하여 시편 1이 가장 크다. 이러한 현상의 원인으로서는, 니들 펀칭 공정을 거친 장섬유 매트는 섬유 사이를 부풀게하여 수지의 함침상태를 양호하게는 하지만 섬유끼리의 강한 엉킴력이 발생되어 모재와의 유동속도 차이가 크게 된다. 이러한 유동속도의 큰 차이로 말미암아 압축성형된 성형품의 불균질함의 척도인 불균질도 Γ 는 당연히 크게 나타남을 알 수 있다.

압축성형중 성형품내 섬유의 배향정도를 나타내는 섬유배향함수(J)와 압축비(R_{cr})와의 관계를 Fig.

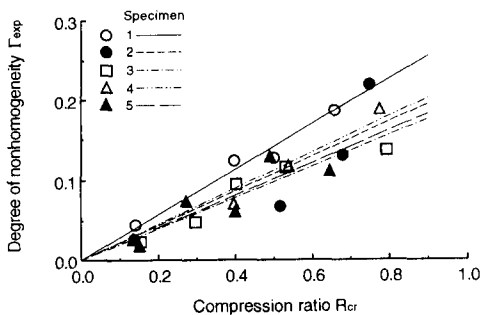


Fig. 4 Relationship between compression ratio R_{cr} and degree of nonhomogeneity Γ_{exp}

5에 나타내었다. 이 그림에서 압축비가 증가하면 섬유의 배향함수가 증가하고 있음을 알 수 있는데, 이것은 성형품의 변형량이 커지면 유동장이 넓어지는 결과를 초래하기 때문에 당연히 유동장안에 놓여있는 섬유의 운동량도 증가하므로 섬유의 배향함수도 커지는 현상이 발생된다. 그리고 이들 결과에 미치는 스트레칭수의 영향을 살펴보면 스트레칭수가 큰 시편 1의 경우는 섬유끼리의 상호간섭력이 가장 크므로 섬유배향을 저해하게 된다. 즉, Fig. 4의 결과와 마찬가지로 수지의 유동방향으로 섬유가 배향할 수 있는 여지가 적음을 나타내고 있다.

Fig. 6은 Fig. 4와 Fig. 5에서 나타낸 성형품의 불균질도(Γ)와 배향함수(J)와의 상관관계를 나타낸 그림이다. Fig. 4와 Fig. 5의 결과와 같이 스트레칭수가 크면 복합재의 섬유구조가 서로 강하게 엉켜져 있어 성형품의 분리의 척도인 불균질도(Γ)는 증가하나 섬유의 배향은 잘 되지 않게 되고, 스트레칭수가 작으면 섬유구조가 서로 엉켜져 있지 않아 섬유의 배향은 잘 되나 성형품의 불균질도(Γ)는 작게 된다. 배향함수(J)가 크면 불균질도(Γ)는 상승

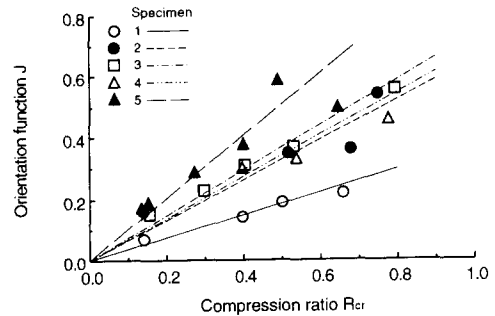


Fig. 5 Relationship between compression ratio R_{cr} and orientation function J

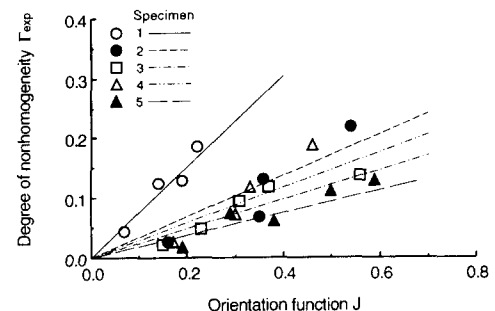


Fig. 6 Correlation between orientation function J and degree of nonhomogeneity Γ_{exp}

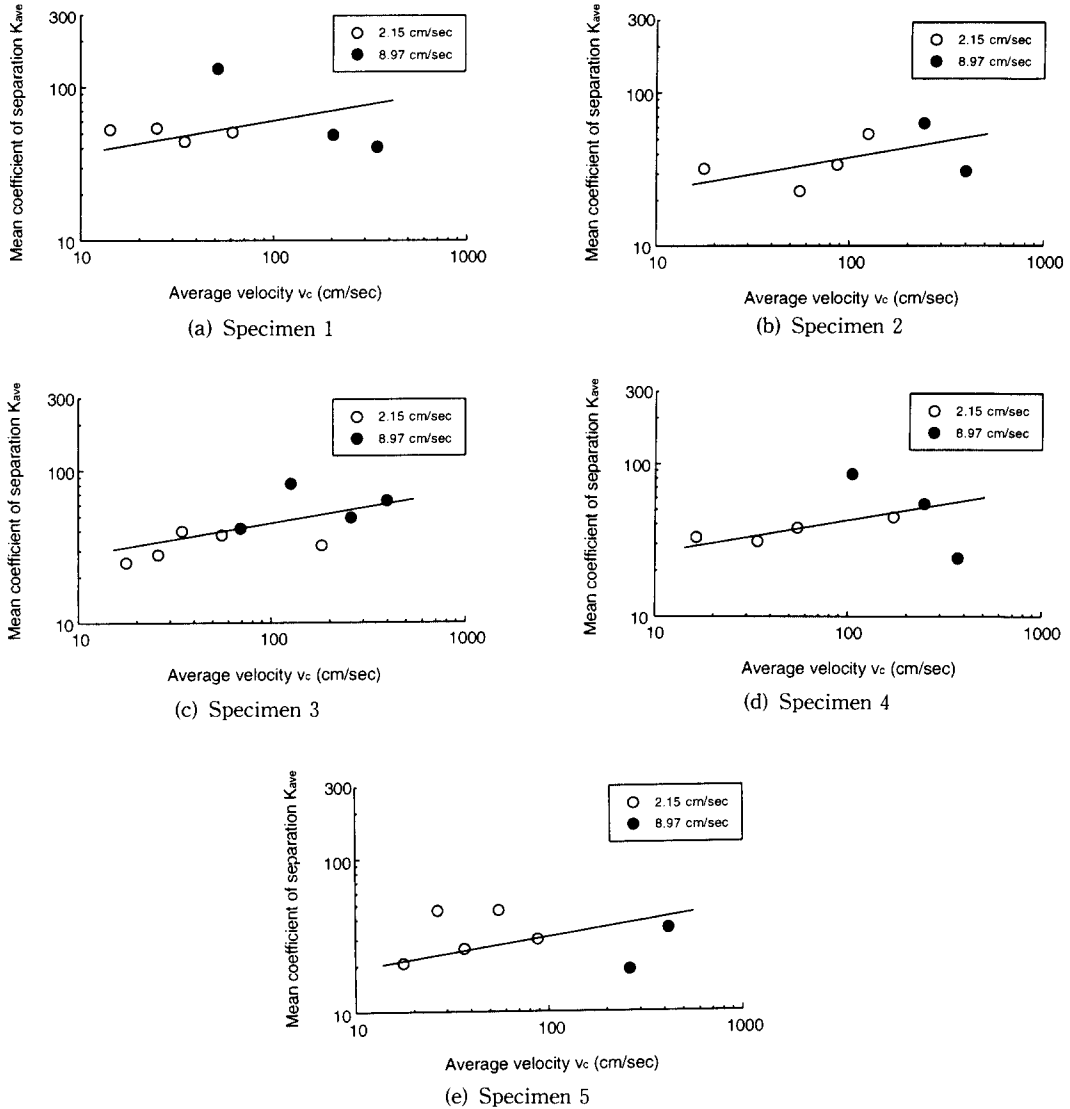


Fig. 7 Effect of average velocity v_c on mean coefficient of separation K_{ave}

하여 양자간에는 서로 불가분의 관계가 있으므로 여기서, $\Gamma = C \cdot J$ 로서 이 기울기를 상관계수(C)라 한다.⁽⁴⁾ 이 상관계수 C 는 분리배향의 관점에서 재료의 특성을 나타내는 값이며, C 가 크면 분리는 쉽게되나 배향은 잘 되지 않고, C 가 작으면 그 반대의 현상을 나타낸다.

Fig. 7의 (a)~(e)는 각 시편에 대한 평균분리계수 (K_{ave})와 평균속도(v_c)와의 관계를 나타내고 있다. 압축속도는 두 종류로 2.15 cm/sec, 9.97 cm/sec 이다. 여기서, 기울기는 복합재료의 구조점도지수

n_c 를 나타내며⁽⁷⁾ 식 (4)를 사용하여 평균상당 분리계수(M_{ave})를 구하였다. 평균속도는 압축비(R_{cr})와 압축속도에 밀접한 관계를 갖고 있으며, 또 압축비(R_{cr})와 압축속도가 클수록 성형품의 불균질도(Γ)가 증가하며 따라서 평균상당분리계수가 크다는 것은 분리가 더 심하게 나타남을 의미한다. 따라서 스트레칭수가 큰 시편 1이 가장 크다. 그리고 위의 실험결과들에서 데이터의 스캐터링은 복합재 자체가 초기에 지니고 있는 불균일성의 결과라고 볼 수 있다.

Fig. 8은 압축성형된 성형품의 인장강도에 미치는 무배향 섬유매트의 스트레칭수의 영향을 나타낸 그림이다. 이 그림에서 스트레칭수가 많을수록 유동성형중에 섬유의 불균질도가 증가하기 때문에, 즉 성형품내의 섬유분포가 균일하지 못하므로 인장강도는 저하하게 됨을 알 수 있다.

Fig. 9는 복합재의 평균상당분리계수에 미치는 스트레칭수의 영향을 나타낸 그림으로서 스트레칭수가 클수록 평균상당분리계수는 증가하고 있다. 이는 앞서의 결과에서 볼 수 있듯이 스트레칭수가 많으면 섬유·모재간의 구속력이 커져 불균질도가 증가하고 이로 인하여 평균상당분리계수가 증가하고 있음을 알 수 있다. Fig. 10은 평균상당분리계수와 인장강도와의 관계를 나타낸 그림이다. Fig. 10에서 평균상당분리계수는 재료의 인장강도값이 증가함에 따라서 감소하고 있는 경향을 나타내고 있다. 평균상당분리계수가 큰 값을 나타내는 재료는 스트레칭수가 많은 경우이므로 당연히 인장강도도 작은 값을 나타내고 있음을 알 수 있다.

Fig. 11은 압축성형된 고분자 복합재료를 분리

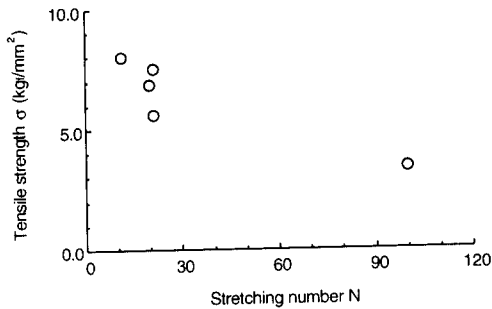


Fig. 8 Tensile strength σ as function of stretching number N

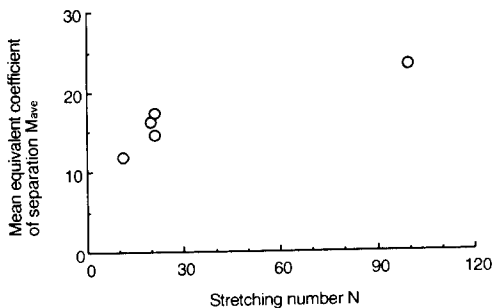


Fig. 9 Relationship between stretching number N and mean equivalent coefficient of separation M_{ave}

배향의 관점에서 평가할 때 재료의 특성을 나타내는 값인 상관계수 C에 미치는 인장강도의 영향을 나타낸 그림이다. 여기에서 인장강도가 작은 재료는 분리의 정도가 큰 경우이므로 상관계수도 당연히 큰 값을 나타내고 있다. 그리고 Fig. 12에는 이 상관계수와 평균상당분리계수의 관계를 나타내었다. 이 그림에서도 복합재의 상관계수 C가 증가함에 따라서, 즉 열간에서 압축성형된 복합재내의 강

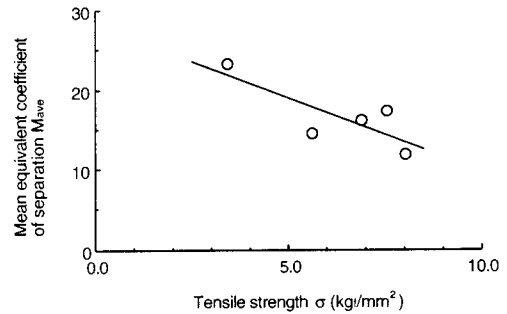


Fig. 10 Relationship between tensile strength σ and mean equivalent coefficient of separation M_{ave}

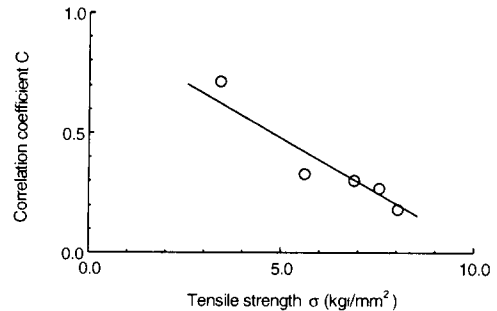


Fig. 11 Correlation coefficient C as function of tensile strength σ

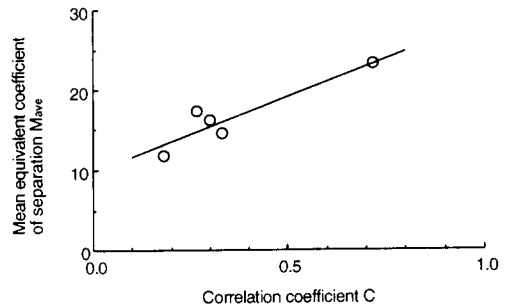


Fig. 12 Relationship between correlation coefficient C and mean equivalent coefficient of separation M_{ave}

화재의 구조중에서 니들핀칭의 회수를 나타내는 스트레칭 값이 많을수록 섬유상호간의 간섭력이 증대하므로 모재인 플라스틱의 유동과 더불어 섬유의 유동성이 저하하는 결과를 초래하게 된다. 이 결과로 말미암아 성형품의 불균질함의 척도인 불균질도가 증가하게 되고 섬유의 배향함수도 증가하기 때문에 상관계수 C 가 커지게 되고 이에 따라서 평균상당 분리계수의 값도 증가하고 있음을 알 수 있다.

7. 결 론

섬유강화 열가소성 고분자 복합재료내의 강화재인 무배향 섬유매트의 구조를 변화시켜 열간에서 압축성형한 실험결과와 고찰을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 유리섬유매트 구조에 변화를 주는 스트레칭수가 커짐에 따라 복합재내의 섬유상호간의 간섭력 증가로 인하여 평균상당 분리계수는 증가하였다.

(2) 압축성형된 고분자 복합재의 분리배향의 특성을 나타내는 상관계수 C 가 증가함에 따라 불균질함의 척도인 불균질도와 섬유의 배향함수가 커지므로 평균상당분리계수도 증가하였다.

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, E. G., Yaguchi, 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.

(4) Yaguchi, H., Hojo, H., Lee, D. G. and Kim, E. G., 1995, "Measurement of Planar Fiber Orientation of Fibers for Reinforced Thermoplastics Using Image Processing," *International Polymer Processing*, Vol. 10, Issue 3, pp. 262~269.

(5) 이동기, 김정락, 김상필, 이우일, 김이곤, 1993, "Thermoforming용 장섬유강화 복합재료의 성형공정에 관한 연구," 대한기계학회논문집, 제17권, 제5호, pp. 1106~1114.

(6) Hull, D., 1982, "An Introduction to Composite Materials," Cambridge University Press.

(7) Hojo, H., Kim, S. H., Baek, N. J. and Kim, E. G., 1989, "Prediction of Fibre Content Distribution in Compression Molded Fibre-Reinforced Thermoplastics," *Proceedings of the 5th Annual Meeting of PPS*, Kyoto, K12-20.