

論文

섬유/입자 혼합 금속복합재료의 강화기구 해석

정성욱* · 이종해** · 정창규* · 송정일*** · 한경섭*

Strengthening Mechanism of Hybrid Short Fiber/Particle Reinforced Metal Matrix Composites

S. W. Jung*, J. H. Lee**, C. K. Jung*, J. I. Song*** and K. S. Han*

ABSTRACT

This paper presents an analytical method considering tensile strength enhancement in hybrid Al_2O_3 fiber/particle/aluminum composites(MMCs). The tensile strength and elastic modulus of the hybrid MMCs are even 20% higher than those of the fiber reinforced MMCs with same volume fraction of reinforcements. This phenomenon is explained by the cluster model which is newly proposed in this research, and the strengthening mechanisms by a cluster is analyzed using simple modified rule of mixtures. From the analysis, it is observed that cluster structure in hybrid MMCs increase the fiber efficiency factor for the tensile strength and the orientation factor for the elastic modulus. The present theory is then compared with experimental results which was performed using squeeze infiltrated hybrid MMCs made of hybrid Al_2O_3 short fiber/particle preform and AC8A alloy as base metal, and the agreement is found to be satisfactory.

초 록

본 연구는 섬유/입자 혼합금속복합재료의 강화기구를 분석하는 이론적 해석방법을 제시하였다. 혼합금속복합재료의 인장강도 및 탄성계수는 같은 보강재의 부피분율 가진 단섬유복합재료에 비해서 강도가 최대 20%까지 증가한다. 이러한 증가효과는 본 연구에서 새로이 제안된 클러스터 모델을 도입한 후 이에 따른 강화효과를 Modified Rule of Mixture을 적용하여 분석하였다. 해석결과 클러스터구조는 인장강도에 대해서 섬유의 효율을 탄성계수에 대해서는 배향인자를 증가시키는 것으로 나타났다. 이론적 해석 결과는 Al_2O_3 섬유/입자 예비성형체에 AC8A를 침투시켜 제조한 금속복합재료에 대한 실험결과와 비교되었으며 이를 통해 해석이론이 타당함을 확인하였다.

1. 서 론

단섬유 보강 복합재료는 우수한 기계적 성질과 제조의 용이성, 및 가공의 저렴함 등으로 인해 공업용 재료

로서 사용이 증가되고 있다. 그러나 섬유 보강재의 가공비용은 입자보강재에 비해서 고가이므로, 원가절감을 위해 입자형 보강재를 첨가한 섬유/입자 혼합 복합재료를 제조하기 위한 노력이 증가되고 있다.

*포항공과대학교 기계공학과
**대우중공업
***창원대학교 기계공학과

섬유 복합재료에 입자형 보강재가 첨가될 경우 복합재료의 탄성계수[1-3], 열팽창계수, 마모, 크립 등의 특성은 향상되나[4-5] 대부분의 경우 인장강도는 오히려 감소하는 경향을 보인다[2, 3, 6, 7]. 사출성형과 같이 예비성형체를 사용하지 않고 제조된 혼합복합재료에 있어서 이러한 강도 저하는 보편적인 현상이며 이는 hybrid effect에 의한 결과라고 보고되어 있다[8]. 이 효과는 섬유 복합재료에서 섬유의 부피분율을 일정하게 하고 입자형 보강재를 첨가할 때 강도저하가 일어나는 현상을 의미하는 것으로, 주된 원인은 첨가된 입자와 모재 사이에서 발생하는 균열이 섬유로 진행되어 결과적으로 섬유의 계면접착력을 떨어뜨리는 것으로 설명되기도 한다.

그러나 가압주조법에 의해 제조된 혼합 금속복합재료의 경우 입자의 첨가시 인장강도가 오히려 증가된다. 이러한 강도의 증가는 기존의 연구와는 구별되는 특징으로 기존의 해석방법으로는 그 현상의 설명이 곤란하다. 이 공법에 의한 복합재료는 사출성형법 등과는 달리 섬유/입자 예비성형체의 제조 공정을 거치게 되는데, 이 단계에서 형성되는 섬유/입자의 독특한 내부구조에 의해 추가의 강화효과가 발생하는 것으로 보여진다.

본 연구는 이러한 강화 효과를 예비성형체 제조시 생기는 섬유/입자 클러스터 구조에서 발생하는 것으로 가정하고 이에 따른 강화기구를 modified rule of mixture [8-11]를 사용하여 이론적으로 분석하였다.

2. 이 론

혼합금속복합재료는 예비성형체 제조 후 금속용탕을 침투시키는 방법으로 제조되며 용탕침투 후에도 예비성형체의 형상은 유지된다. 예비성형체 내에서 입자들은 섬유들의 교차지점에 모여 구형의 클러스터를 형성하는데 Fig.1은 이러한 특징을 보여준다. 클러스터는 각각의 섬유들을 연결시킴으로써 단섬유의 길이를 증가시키고 파괴기구에 영향을 미친다. 본 연구에서는 모든 보강입자들이 크기가 일정한 구형클러스터를 형성하는 것으로 가정하고 해석하였다. 해석내용으로는 섬유가 클러스터에 포함될 확률해석과 클러스터에 포함될 때 섬유에서 발생하는 강화효과 해석으로 이루어진다.

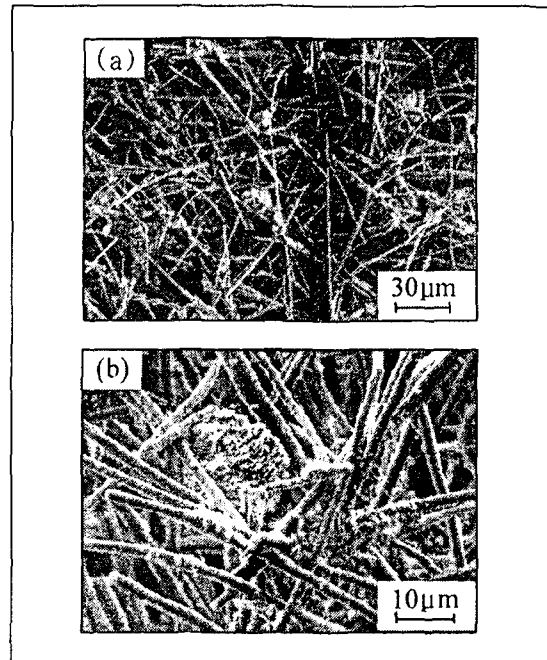


Fig.1. S.E.M. photograph of Al_2O_3 particle/fiber hybrid preform which shows the existence of cluster structure

2.1. 확률해석

단섬유는 클러스터에 포함되는 것과 그렇지 않은 것이 동시에 존재하므로 하나의 단섬유가 클러스터에 포함될 확률함수를 구할 필요가 있다. 먼저 클러스터 분포구조를 Fig.2(a) 같이 단순화시킨다. 중심이 고정된 섬유 하나를 생각하면 이 섬유가 배향에 따라 영향을 미치는 영역은 섬유의 길이의 절반($L/2$)의 반경(R)을 가진 구형영역이 된다.

이 영역 내에 존재하는 클러스터의 개수(n)는 입자의 부피분율(V_p)과 다음과 같은 관계를 가진다.

$$\frac{n \times \frac{4}{3} \pi r_c^3}{\frac{4}{3} \pi R^3} = \frac{n r_c^3}{R^3} = V_p \quad (1)$$

이때, r_c 는 클러스터의 반경이다. Fig.2(b)와 같이 섬유 하나가 섬유중심에서 l 거리에 위치하고 반경이 r_c 인 클러스터와 만날 확률은 다음 식으로부터 구해진다.

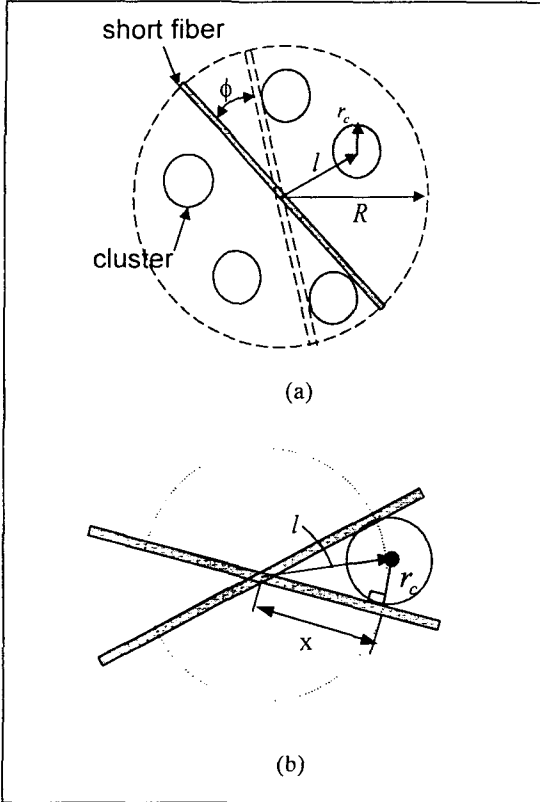


Fig.2. (a) Schematic diagram of short fiber and clusters distribution model and (b) of the conditions for a fiber to be included in a cluster

$$p(l, r_c) = 1, \quad 0 < l < r_c \quad (2)$$

$$p(l, r_c) = \frac{2\pi l^2 [1 - \cos \phi]}{4\pi r_c^2} = \frac{1 - \cos \phi}{2}, \quad r_c < l \quad (3)$$

여기서

$$\cos \phi = \sqrt{1 - \left(\frac{r_c}{l}\right)^2} \quad (4)$$

따라서 섬유 하나가 영역 내에서 한 개 이상의 클러스터들과 만나게 될 확률은 다음 적분식에서 구해진다.

$$p(c) = n \int_0^{r_c} \frac{4\pi l^2}{4\pi R^3} p(l, r_c) dl + n \int_{r_c}^R \frac{4\pi l^2}{4\pi R^3} p(l, r_c) dl \quad (5)$$

여기서, $\frac{4\pi l^2}{4\pi R^3}$ 은 클러스터의 중심이 섬유로의 중심으로부터 l 과 $l+dl$ 사이에서 위치할 확률이다. 식(1), (2), (3)과 (4)를 식(5)에 대입하여 계산하면 섬유 하나가 한 개 이상의 클러스터와 만날 확률은 다음과 같이 구해진다.

$$P(c) = \frac{V_p}{2} \left[\frac{R^3}{r_c^3} + 1 - \left(\sqrt{\frac{R^2}{r_c^2} - 1} \right)^3 \right] \quad (6)$$

이 섬유가 클러스터를 만나는 곳의 위치는 섬유의 길이방향의 좌표에 대해 고르게 분포하므로 Fig.2(b)에서 표시된 바와 같이 섬유 중심으로부터 x 위치 안에 클러스터가 존재할 확률은 다음과 같다.

$$P(x) = \frac{x}{L} p(c) \quad (7)$$

2.2. 강화기구

혼합복합재료에서 생기는 클러스터 구조는 두 개 이상의 섬유를 서로 연결해 주므로 섬유의 길이를 증가시키는 효과를 발생시킨다. 이 효과가 탄성계수 및 인장강도에 미치는 영향을 파악하기 위해서 다음의 modified rule of mixture [8-11]이 사용되었다.

$$E_c = x_1 x_2 V_f E_f + (1 - V_f) E_m \quad (8)$$

$$\sigma_{cu} = x_3 x_4 V_f \sigma_{fu} + (1 - V_f) \sigma_m \quad (9)$$

여기서 x_1 과 x_2 는 각각 탄성계수에 대한 배향인자(orientation factor)와 길이인자(length factor)이며 x_3 과 x_4 는 인장강도에 대한 배향 및 길이인자이다. 이러한 인자는 서로 영향을 주고 받으므로 $x_1 x_2$ 와 $x_3 x_4$ 를 각각 하나의 변수로 표시하고 이를 탄성계수에 대한 섬유의 효율(fiber efficiency factor for elastic modulus) [8,12]과 강도에 대한 효율(fiber efficiency factor for tensile strength) [8,10-13]이라고 정의된다. 식(8)에서 E_c , E_f , E_m 는 각각 복합재료, 섬유, 모재의 탄성계수를 식(9)에서 σ_{cu} , σ_{fu} , σ_m 은 복합재료, 섬유, 모재의 강도를 나타내며 V_f 는 보강섬유의 부피분율을 나타낸다. 클러스터 구조에 의한 강화 효과를 식(8), (9)로 나타내

면 탄성계수와 인장강도에 대한 길이인자 및 배향인자의 증가효과로 요약된다. 본 연구에서 길이인자는 이론을 도입하여 정량적으로 분석하였고 배향인자에 대해서는 분석된 길이인자를 기초로 정성적으로 설명하였다. 탄성계수와 인장강도에 대한 길이인자의 해석은 다음과 같다.

2.2.1. 클러스터 구조가 탄성계수에 미치는 영향

식(8)은 섬유복합재료가 대한 식이며 이 재료에 보강 입자가 부피분율 V_p 만큼 첨가되면 식(8)은 다음과 같이 표현된다.

$$E_c = \kappa_1 \kappa_2 V_f E_f + \kappa_p V_p E_p + (1 - V_f - V_p) E_m \quad (10)$$

식(10)에서 보는 바와 같이 혼합 복합재료의 탄성계수는 섬유에 의한 보강효과와 입자에 대한 보강효과가 동시에 존재한다. 따라서 클러스터 구조에 의한 탄성계수 증가효과를 분석하기 위해서는 섬유와 입자 각각에 대한 보강효과를 파악해야 한다. 이를 위해 식(10)의 각 부분들을 다음과 같이 정의한다.

$$E_{cf} = \kappa_1 \kappa_2 V_f E_f \quad (11)$$

$$E_{cp} = \kappa_p V_p E_p \quad (12)$$

$$E_{cm} = (1 - V_f - V_p) E_m \quad (13)$$

식 (11), (12), (13)은 섬유, 입자, 모재가 혼합복합재료 전체 탄성계수에 분담하는 각각의 탄성계수들이다. 클러스터 구조는 식(11)의 섬유의 길이인자 κ_2 를 증가시킨다. 식(11)은 Christen and Waals의 3차원 탄성계수 해석[14]으로부터, 식(12)는 단순화된 Ashelby inclusion method[15]에 의해 값을 계산할 수 있다. 이러한 해석이론은 섬유 혹은 입자만 보강된 복합재료에 대해서 적용되는 식이므로 (11), (12)식을 아래와 같이 변형한다.

$$E_{cf} = [\kappa_1 \kappa_2 V_f E_f + (1 - V_f) E_m] - (1 - V_f) E_m = E_{ccw} - (1 - V_f) E_m \quad (14)$$

$$E_{cp} = [\kappa_p V_p E_p + (1 - V_p) E_m] - (1 - V_p) E_m = E_{ca} - (1 - V_p) E_m \quad (15)$$

식(14), (15)에서 대괄호 안에 각각의 해석이론을 적용하여 E_{ccw} (Christen and Waals의 식으로부터 얻는 탄성계수)와 E_{cp} (Ashelby방법에 의한 탄성계수) 각각 계산한다. 각각의 계산법은 다음과 같다.

첫째로 E_{cp} 를 구한다. 입자복합재료가 외부로부터 σ^A 의 응력을 받을 경우 입자 주위에 발생하는 응력 σ^p 는 다음과 같이 계산된다.

$$\sigma^p = \left(\frac{C_p}{S C_p + (1 - S) C_c} \right) \sigma^A \quad (16)$$

여기서 C_p 와 C_c 는 입자와 섬유에 대한 강성계수이며 S는 Eshelby tensor[13]를 나타낸다. 같은 방법으로 모재 주위에 발생하는 응력분포를 구하면 다음과 같다.

$$\sigma^m = \left(\frac{C_m}{S C_m + (1 - S) C_c} \right) \sigma^A \quad (17)$$

여기서 C_m 은 모재의 강성계수이다. 외부에 σ^A 의 응력이 작용하는 복합재료의 평형식은 다음과 같다

$$V_m \sigma^m + V_p \sigma^p = \sigma^A \quad (18)$$

(16), (17)을 (18)에 대입하면 다음과 같이 된다.

$$V_m \left(\frac{C_m}{S C_m + (1 - S) C_c} \right) + V_p \left(\frac{C_p}{S C_p + (1 - S) C_c} \right) = 1 \quad (19)$$

인장하중에서 C_p 와 C_m 은 탄성계수 (E_p 와 E_m)로 표현되며, 입자의 형상이 구형이고 포화충수를 1/3로 가정하면, S는 7/15로 나타내어지며 식은 다음과 같이 단순해진다.

$$8E_{ca}^2 + [(7 - 15V_p)E_p + (7 - 15V_m)E_m]E_{ca} - 7E_p E_m = 0 \quad (20)$$

식(21)로부터 E_{ca} 가 구해지면 식(15)에 적용하여 입자의 효과를 계산할 수 있다.

식(11)의 섬유의 효과를 계산하기 위해서는 배향인자와 길이인자를 동시에 파악해야 한다. 이 두 인자는 상호 독립변수가 아니므로 종합적으로 고려하는 것이 타당하다. 본 연구에서 사용된 혼합복합재료에서 섬유의 배향은 3차원 랜덤으로 가정할 수 있으며 이에 대한 $\kappa_1 \kappa_2$ 의 효과를 구하기 위해 Chirstensen and Waals의 식을 도입하였다. 이 식은 섬유가 부피분율

V_f 만큼 첨가된 일배향 섬유보강 복합재료에 대한 강성 계수들을 구하고 이를 기초로 각 방향에 대해 평균값을 취하는 방법으로 3차원 배향 탄성계수를 구한다. 먼저 일배향된 단섬유 복합재료의 경우를 생각하면 1방향 탄성계수 E_1 에 대해 $\kappa_1=1$ 이고 $\kappa_2 < 1$ 이며 다음과 같이 표현된다.

$$E_1 = \kappa_2 V_f E_f + (1 - V_f) E_m \quad (21)$$

Cox [16,17]식을 도입하여 길이인자를 구하면 다음과 같다.

$$\kappa_2 = 1 - \frac{\tanh(\beta L/2)}{\beta L/2} \quad (22)$$

여기서

$$\beta = \left[\frac{2\pi G_m}{E_f A_f \ln(R/r_f)} \right]^{1/2} = \left[\frac{E_m}{E_f (1 + V_m) r_f^2 \ln(R/r_f)} \right]^{1/2} \quad (23)$$

로 정의되며 G_m 과 ν_m 은 모재의 전단탄성계수와 포화송수이며, r_f 섬유의 반경, R 은 섬유의 중심에서 대표체적(representative volume element)의 반경이다. $\ln(R/r_f)$ 값은 Piggott[18]등에 의해 다음과 같은 관계가 있음이 밝혀졌다.

$$\ln\left(\frac{R}{r_f}\right) = \frac{1}{2} \ln\left(\frac{2\pi}{3^{1/2} V_f}\right) \quad (24)$$

클러스터 구조는 Fig.3과 같이 두 섬유를 연결시킴으로써 섬유의 길이를 증가시킨다. 섬유 하나에서 클러스터의 평균 위치는 섬유의 중심에서 $1/4L$ 지점이므로 클러스터 하나에 대해 증가되는 섬유의 길이는 $1/2L$ 이라고 할 수 있다. 따라서 식(5)의 확률함수를 도입하면 유효 섬유길이(effective fiber length)는 다음과 같이 나타내진다.

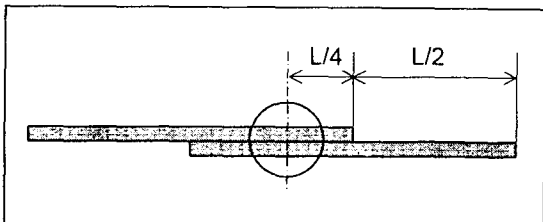


Fig.3. Schematic diagram of the increase of the fiber length factor by clusters structure

$$L_c = L + \frac{L}{2} p(c) \quad (25)$$

(25)를 (22)에 대입하면 클러스터 효과에 의한 길이 인자가 구해진다. 이를 기초로 얻어진 (21)의 E_1 값을 다시 3차원 배향 복합재료식[14]에 적용하면 다음의 탄성계수가 구해진다.

$$E_{ccw} = \frac{[E_1 + (4\nu_{12}^2 + 8\nu_{12} + 4)K_{23}][E_1 + (4\nu_{12}^2 - 4\nu_{12} + 1)K_{23} + 6(G_{12} + G_{23})]}{3[2E_1 + (8\nu_{12}^2 + 12\nu_{12} + 14)K_{23} + 4(G_{12} + G_{23})]} \quad (26)$$

식(26)을 식(14)에 적용하면 섬유에 의한 탄성계수 효과가 구해진다.

2.2.2. 클러스터 구조가 인장강도에 미치는 영향

식(10)의 탄성계수 해석에서와 마찬가지로 혼합복합재료의 강도에 대해 식(9)를 적용하면 다음과 같이 된다.

$$\sigma_{cu} = \kappa_3 \kappa_4 V_f \sigma_{fu} + \kappa_p V_p \sigma_p + (1 - V_f - V_p) \sigma_m \quad (27)$$

여기서 $\kappa_p V_p \sigma_p$ 는 입자에 의한 강화효과를 의미한다. 탄성계수에서의 효과와는 달리 입자의 첨가는 오히려 강도를 저하시키는 경우가 많으며, 이러한 강도효과는 입자/모재 사이의 계면접착력에 의해 크게 영향을 받는다[8]. 본 연구에서는 입자의 첨가에 의한 강도증가는 없는 것으로 가정하고 이론을 전개하였다. 이 때 $\kappa_p \sigma_p = \sigma_m$ 이 되고 식(27)은 다음과 같이 된다.

$$\sigma_c = \kappa_3 \kappa_4 V_f \sigma_{fu} + (1 - V_f) \sigma_m \quad (28)$$

강도에는 여러가지 인자들이 동시에 작용하고 있으므로 배향인자 κ_3 를 파악하여 강도값을 정확히 예측하기란 매우 어렵다. 본 연구에서 클러스터 구조에 의한 섬유의 길이인자 κ_4 에 대해서만 고려해 보기로 한다.

일방향 단섬유 보강 복합재료에 대해 생각하면 $\kappa_3 = 1$ 이 되고 $\kappa_4 < 1$ 이 된다. 만약 섬유의 길이가 L 이라면 Cox[16]의 식으로부터 다음과 같이 구해진다.

$$\kappa_4 = L/(2L_c) \text{ for } L < L_c \quad (29)$$

$$\kappa_4 = 1 - L_c/(2L) \text{ for } L > L_c \quad (30)$$

여기서, 임계길이 L_c 는 다음 식으로부터 구해진다.

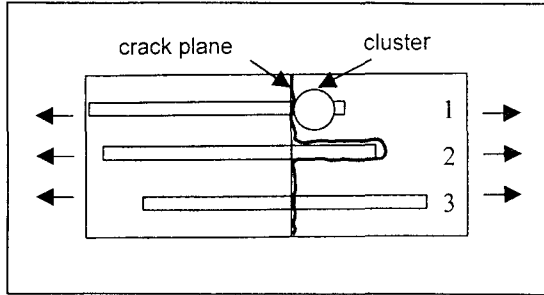


Fig.4. Schematic crack across and around fibers

$$L_c = r_f \sigma_{cu} / \tau_i \quad (31)$$

τ_i 와 r_f 는 섬유/모재 사이의 전단력과 보강섬유의 반경을 나타낸다. 클러스터에 의한 길이인자는 복합재료가 임의의 위치에서 파괴가 일어날 때 파단면에 있는 섬유가 받는 bridging force로부터 측정할 수 있다 [9]. 이러한 bridging force는 섬유의 길이 L 에 따라 뿔뿔히 또는 파단으로 파괴기구가 다르게 나타나므로 섬유의 길이에 따라 차례로 살펴보아야 한다.

첫째로, 보강섬유의 길이가 $L_c/4$ 보다 작을 경우를 생각한다. 이 경우, 규열면에 걸쳐있는 섬유들은 파단면을 기준으로 짧은 부분쪽에서 뿔뿔 현상이 발생한다. 그러나 이 섬유가 Fig.4의 섬유 1과 같이 클러스터에 포함되어 있으면 클러스터 파단면의 반대쪽에서 뿔뿔현상이 발생하며 평균응력은 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} \sigma_f &= \int_0^{L/2} \tau_i \frac{(2\pi r_f)x}{\pi r_f^2} (1-P(x)) \cdot \frac{dx}{L/2} + P(0 < x < \frac{L}{2}) \\ &\quad \cdot \int_{L/2}^L \tau_i \frac{(2\pi r_f)x}{\pi r_f^2} \frac{dx}{L/2} \\ &= \sigma_{fu} \frac{L}{2L_c} (1 + \frac{7}{6} p(c)) \end{aligned} \quad (32)$$

두번째로, 단섬유의 길이가 $L_c/2$ 보다 크고 L_c 작은 경우를 생각한다. 이 경우 파단면에 걸쳐진 섬유가 파단면을 기준으로 짧은 쪽에서 클러스터를 만나고 짧은 부분의 섬유의 길이가 $L-L_c/2$ 보다 작으면 섬유는 파괴된다. 그러나 이 부분이 $L-L_c/2$ 과 L 사이라면 반대쪽으로 뿔뿔현상이 일어나 평균응력식은 다음과 같이 된다.

$$\sigma_f = \int_0^{L/2} \tau_i \frac{(2\pi r_f)x}{\pi r_f^2} (1-P(x)) \cdot \frac{dx}{L/2} + P(L - \frac{L_c}{2}) \cdot \sigma_{fu}$$

$$\begin{aligned} &+ \{P(L) - P(L - \frac{L_c}{2})\} \cdot \int_{\frac{L}{2} + (L - \frac{L_c}{2})}^{\frac{L}{2} + \frac{L}{2}} \tau_i \frac{(2\pi r_f)x}{\pi r_f^2} \cdot \frac{dx}{L/2} \\ &= \sigma_{fu} \frac{L}{2L_c} \{1 + (\frac{2}{3} + \frac{1}{2})(3 - \frac{L_c}{L})(1 - \frac{L_c}{L})^2 p(c)\} \end{aligned} \quad (33)$$

셋째로, 섬유의 길이가 L_c 보다 길 경우를 생각한다. 이때는 파단면에 걸친 섬유의 길이에 따라서 두 종류의 파괴기구를 가진다. 파단면에서 짧은 부분의 섬유가 $L_c/2$ 보다 작으면, 클러스터를 포함하는 않는 섬유는 뿔뿔이 일어나며 클러스터를 포함하는 섬유는 파괴된다. 이러한 조건의 섬유의 비율은 L_c/L 이다. 만약 짧은 부분의 섬유가 $L_c/2$ 보다 클 경우 클러스터의 포함유무에 관계없이 섬유들은 파괴되며 해당 섬유의 비율은 $1 - L_c/L$ 이다.

$$\begin{aligned} \sigma_f &= \frac{L_c}{L} \left[\int_0^{L/2} \tau_i \frac{(2\pi r_f)x}{\pi r_f^2} (1-P(x)) \cdot \frac{dx}{L/2} \right. \\ &\quad \left. + P(L_c/2) \cdot \sigma_{fu} \right] + \frac{L-L_c}{L} \cdot \sigma_{fu} \\ &= \sigma_{fu} \left[1 - \frac{L_c}{2L} + \frac{1}{3} \frac{L_c}{L} p(c) \right] \end{aligned} \quad (34)$$

식(32), (33), (34)식으로부터 강도에 대한 길이 인자는 다음과 같이 요약되며

$$x_4 = \frac{L}{2L_c} (1 + \frac{7}{6} p(c)) \text{ for } L < \frac{L_c}{2} \quad (35)$$

$$\begin{aligned} x_4 &= \frac{L}{2L_c} \{1 + (\frac{2}{3} + \frac{1}{2})(3 - \frac{L_c}{L})(1 - \frac{L_c}{L})^2 p(c)\} \\ &\text{for } \frac{L_c}{2} < L < L_c \end{aligned} \quad (36)$$

$$x_4 = \{1 - \frac{L_c}{2L} + \frac{1}{3} \frac{L_c}{L} p(c)\} \text{ for } L_c < L \quad (37)$$

식(35), (36), (37)의 식에서 만약 클러스터가 존재하지 않는다면 확률 $p(c)=0$ 가 되고 식(29)와 (30)과 같이 된다. 이 결과는 본 수식의 유도과정에서 타당함을 의미한다.

Table 1. Specifications of reinforcements and matrix of MMCs

Materials	Diameter (μm)	Length (μm)	Tensile Strength (MPa)	Young's Modulus (GPa)
Al ₂ O ₃ fiber	3.0	150	2010	310
Al ₂ O ₃ Particle	1.0	1.0	—	380
AC8A	—	—	275	73

Table 2. Composition of MMCs specimens

No.	Material type	Matrix (%)	V _f (%)	V _p (%)
1	Fiber MMCs	85	15	—
2	—	80	20	—
3	Hybrid MMCs	85	10	5
4	—	80	10	10

3. 실험

실험에 사용된 혼합 금속복합재료는 영국 ICI사에서 제조된 Al₂O₃ 섬유와 Al₂O₃ 입자를 보강재료로, AC8A 알루미늄을 모재로 사용하여 제조되었으며 이들의 기계적 성질 및 사양은 Table.1 표시되어 있다. AC8A는 내열성, 내마모성이 우수하고 열팽창계수가 낮아 자동차 및 디젤기관의 피스톤, 실린더 등에 사용되는 재료이다.

실험에 사용된 예비성형체는 보강재와 무기바인더를 수용액 상태로 교반기에서 혼합한 후 진공압 추출법으로 물을 제거하고 초음파 건조기에서 건조시킨 후 1000℃ 고온에서 소결시켜 제조하였다. Fig.1의 SEM 사진에서 보이는 바와 같이 예비성형체에서 섬유는 골고루 분산되어 양호한 제조상태를 보이며 보강입자들은 덩어리지지 클러스터를 형성하는 모습이 확인된다.

금속복합재료는 780℃로 과열된 알루미늄용탕을 가압해서 예비성형체에 침투시키는 가압주조법을 이용하여 제조하였다. 본 연구를 위해 제조된 각각 복합재료의 조성은 Table.2에 표시되어 있다.

인장실험은 상온에서 MTS(810 Material Test System, 10 ton)를 사용하여 수행하였다. 1mm/min의 속도에서 변위제어로 수행되었으며, 연실물은 gage length가 10mm인 extensometer를 사용하여 측정하였다. 각각 종류의 복합재료에 대해 3-4개의 반복형 시험편으로 수행되었다.

4. 결과 및 고찰

식(6)에 따라 섬유 하나가 클러스터를 만날 확률을 나타내면 Fig.5와 같다. 가로축은 표준화 된 클러스터의 크기로 $R=L/2$ 이므로 r_c/R 은 $2r_c/L$ 에 해당한다. r_c/R 값이 커질수록 섬유 하나가 클러스터를 만날 확률은 점차로 줄어들며, r_c/R 이 0.2이하로 작아질수록 이 확률은 급격히 증가하게 된다. 이러한 결과는 클러스터의 크기가 작아질수록 한 개의 클러스터가 섬유를 만날 확률은 줄어드는 반면 식(1)에 따라 전체 개수는 급격히 증가하기 때문이다. 그러나 크기가 무한히 작은 클러스터는 섬유를 포함할 수 없으므로 크기에는 하한값이 존재한다. Fig.5에서 r_c/R 값은 0.1에서 1까지 표

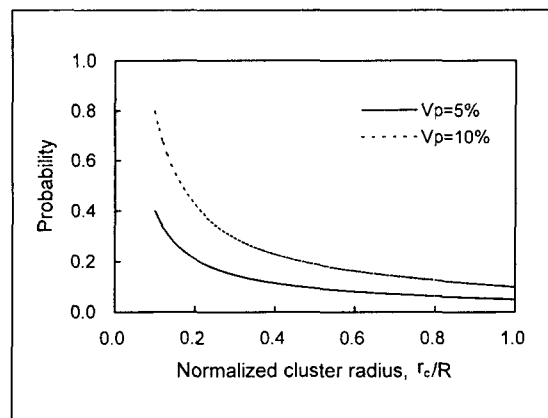


Fig.5. Probability distribution of a fiber to be included in clusters

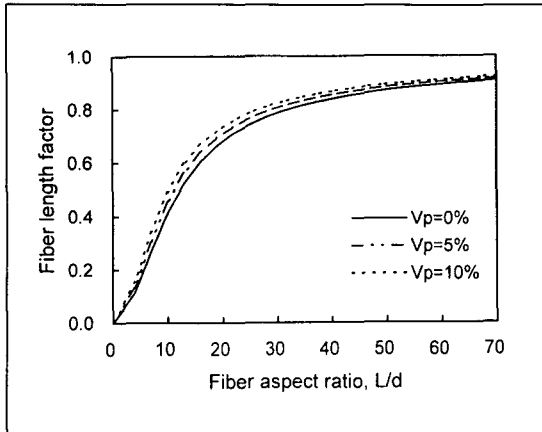


Fig.6. Fiber length factor for elastic modulus as a function of the L/d and particle volume fraction, V_p

시하였는데 최소값 0.1은 클러스터의 지름이 섬유 지름의 5배에 해당하는 값이다. $r_c/R=1$ 은 클러스터의 직경이 섬유의 지름과 같을 때 얻어진다. 이 값은 섬유들의 교차지점에서 생성되는 클러스터의 직경이 섬유의 길이보다 길지 않을 것으로 예상되기 때문이다. Fig.1의 SEM 사진들로부터 측정되는 클러스터의 직경은 $10\mu\text{m}$ 에서 $20\mu\text{m}$ 사이 값이며 평균에 해당하는 $15\mu\text{m}$ 를 직경으로 가정하고 해석을 진행시켰다. 이 값은 $r_c/R=0.2$ 에 해당한다.

Fig.6은 섬유의 종횡비에 따른 탄성계수에 대한 길이인자의 값들을 보여준다. 본 연구에서 사용되는 섬유의 종횡비 $L/d=50$ 이며 이 때 길이인자의 증가는 $V_p=5\%$ 혼합복합재료에서 1.4%, $V_p=10\%$ 에서 2.6%로 산출된다. 이를 기초로 E_f 를 계산하면 각각 0.4%와 0.8%만큼 탄성계수가 증가하며, 이를 대입하여 혼합복합재료의 탄성계수 E_c 를 계산하면 탄성계수 증가량이 0.1%이하의 미미한 효과를 주는 것으로 나온다. 따라서 혼합복합재료에서 클러스터 구조에 의한 길이인자의 변화는 탄성계수에 영향을 미치지 않는다고 할 수 있다.

Fig.7은 혼합복합재료를 구성하는 섬유, 입자, 모재가 탄성계수에 미치는 영향을 계산하고 각각의 성분별로 나타내었다. 이 해석은 각각의 성분들이 섬유/입자간의 클러스터 구조와 같은 간섭효과를 배제하고 계산된 값들이다. Fig.7의 가로축은 재료의 종류를 나타내는 것으로 F는 섬유의 부피분율을 P는 입자의 부피분율을 의미한다. 이 결과는 같은 보강재 부피분율에 대해서 혼합복합재료가 섬유복합재료보다 더 높은 탄성

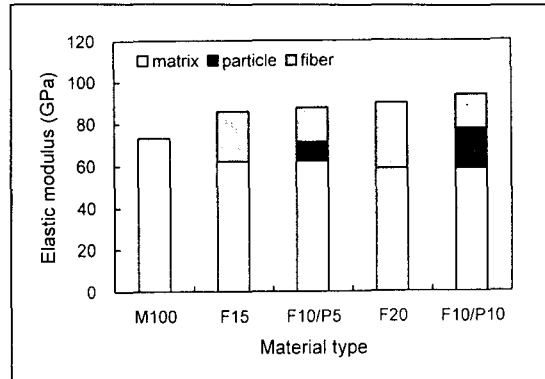


Fig.7. The effects of the each reinforcement on the elastic modulus of hybrid composites

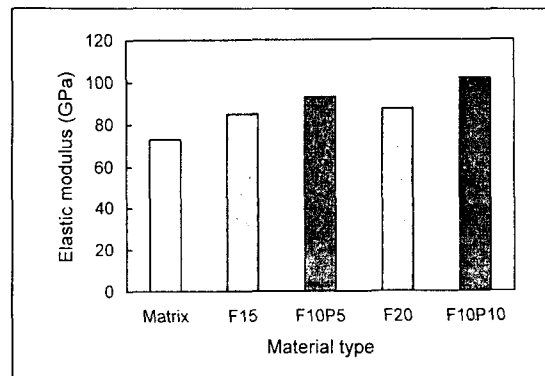


Fig.8. Elastic modulus of each material from tensile test

계수를 가짐을 보여주고 있다. 이러한 원인은 입자의 탄성계수가 섬유보다 20%정도 높으므로 입자의 보강효과가 섬유의 보강효과보다 더 크기 때문이다. 섬유 10%와 입자 10%씩 혼합된 복합재료에서 대해서 각각의 탄성계수 성분을 서로 비교하면 이러한 특징은 명확해진다.

Fig.7의 이론적 해석결과를 Fig.8의 실험결과와 비교할 때 섬유복합재료의 경우 두 이론과 실험은 잘 일치하고 있으나 혼합복합재료의 경우 실험값이 더 높게 나오고 있다. 실험과 이론의 이러한 차이는 이론에 있어서 섬유/입자간의 간섭효과를 고려하지 않았기 때문이며 이 차이만큼이 섬유/입자의 간섭효과임을 알 수 있다. 이러한 현상에 대해 클러스터 구조를 적용하면 앞서 살펴본 바와 같이 이 구조가 섬유의 길이인자에 영향을 주지 않더라도 Bending Rigidity를 발생시켜 섬유의 배향인자에 영향을 주기 때문인 것으로 설명할 수 있다.

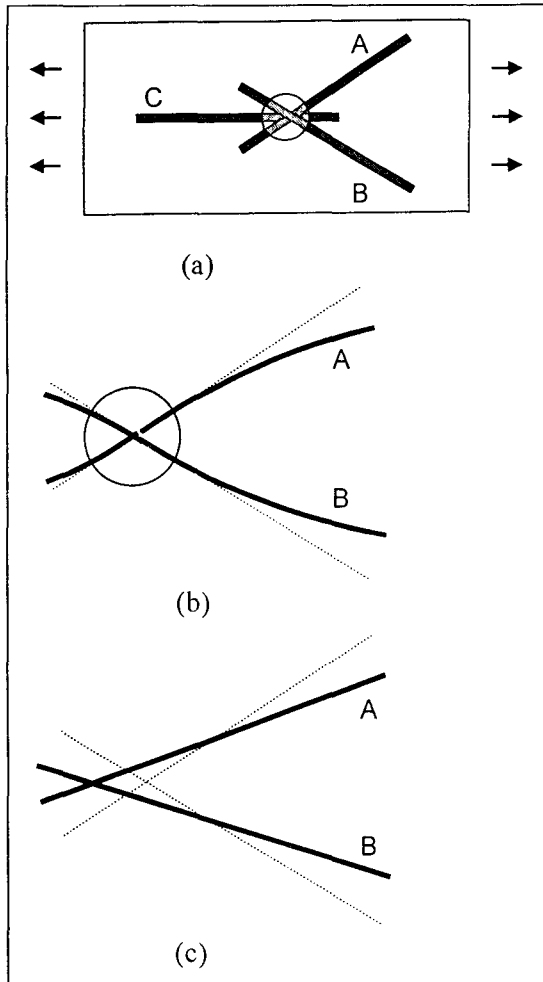


Fig.9. Schematic diagram of fiber deflection during tensile loading (a) hybrid composite under tensile loading (b) with cluster structure and (c) without cluster structure

Bending Rigidity에 의한 추가의 강화효과는 Fig.9에서부터 설명하기로 한다. Fig.9 (a)와 같이 인장하중을 받는 클러스터 구조의 혼합복합재료를 생각하자. 클러스터는 각 방향으로 대칭인 섬유들을 연결시켜주므로 인장하중시 클러스터의 중심이 변형의 중심이 된다. 이 때 A, B와 같이 하중과 평행하지 않는 섬유들은 클러스터의 결합에 의해 굽힘 모멘트를 받아 Fig.9(b)와 같은 형태로 변형된다. 그러나 클러스터가 없는 섬유들의 경우 이러한 굽힘 모멘트를 받지 않으므로 Fig.9(c)와 같이 서로 다른 형태로 변형된다. 하중 방향의 변형은 Fig.9(b)가 Fig.9(c)보다 적으므로 클러

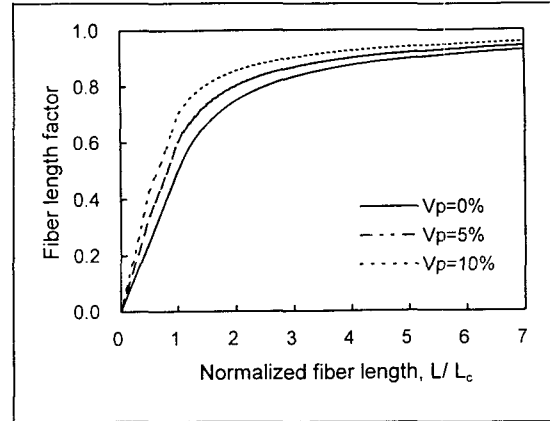


Fig.10. Fiber length factor for tensile strength as a function of the L/L_c and particle volume fraction, V_p

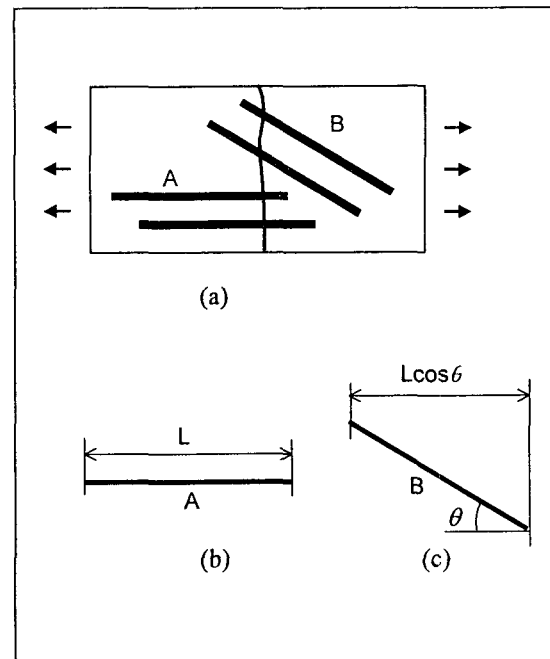


Fig.11. Schematic diagram of fracture by tensile stress in (a) hybrid composite; Effective fiber length crossing the crack plane for (b) parallel fiber and (c) inclined fiber

스터 구조가 배향인자를 변화시키며 이로 인해 추가의 탄성계수증가효과를 발생시키고 있음을 알 수 있다.

Fig.10은 섬유의 길이비 L/L_c 에 따른 인장강도에 대한 섬유의 길이인자 값들을 보여준다. 클러스터구조에 의한 길이인자는 L/L_c 가 커질수록 줄어들며 입자의

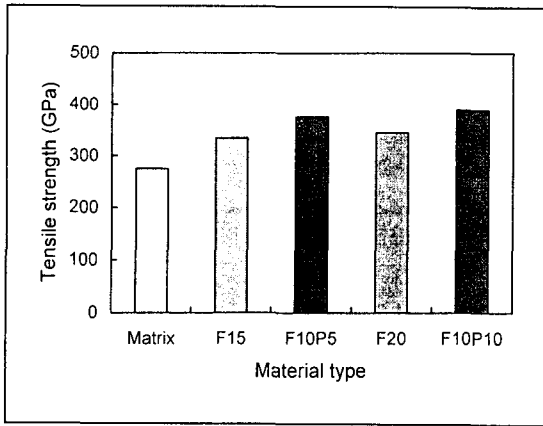


Fig.12. Tensile strength of each material from tensile test

첨가량이 많을수록 증가함을 알 수 있다 그래프는 L/L_c 의 구간에 따라 세 종류의 곡선으로 이루어져 있는데 각각 0에서 0.5, 0.5에서 1 그리고 1이상의 구간이다. 각 구간의 교점에서 곡선이 연속으로 나오고 있으므로 해석의 결과가 타당함을 확인할 수 있다.

연구에 사용된 혼합복합재료에 대해서 임계길이(L_c)를 구하면 $L_c=21.9\mu\text{m}$ 로 계산되며 이 값을 적용할 때 $L/L_c=6.85$ 이 된다. 임계길이는 식(31)에서 복합재료 파단시 섬유의 표면에 걸리는 전단응력 τ 는 섬유와 모재가 완전결합(perfect bonding)이라 가정할 때 얻어지는 $\tau_r=1/2\sigma_{\mu}$ 의 관계를 대입한 결과이다. $L/L_c=6.85$ 에서 길이인자의 증가는 입자의 부피분율 5%와 10% 대해 각각 1.6%와 3.2%의 증가를 가져온다. 이러한 길이인자의 증가는 탄성계수해석에서와 마찬가지로 섬유의 배향인자가 동시에 고려되는 혼합복합재료의 인장강도에 대해서는 매우 작은 역할을 할 것으로 예상된다. 그러나 실제의 복합재료의 파단시 섬유와 모재가 완전한 결합이라 보기 어려우므로 L/L_c 는 6.85보다 더 작은 값을 가질 것으로 예측할 수 있다.

또한 섬유의 배향이 길이인자에 미치는 영향을 Fig.11를 통해 살펴보면 섬유의 랜덤 배향은 섬유의 유효길이 L/L_c 를 줄임으로써 길이인자를 증가시키고 이에 따라 혼합복합재료의 인장강도를 증가시킨다고 할 수 있다. Fig.11(a)와 같이 혼합복합재료에서 섬유들이 인장하중을 받는 경우 파단면을 관통하는 섬유의 유효길이(effective length)는 Fig.11(b)와 같은 평행한 섬유보다 Fig.11(c)와 같이 기울어진 섬유가 더 짧아진다. 이러한 관계를 Fig.10의 그래프에 대해 생각하면 L/L_c 가 6.8보다 낮은 구간으로 이동되므로 클러스터

구조에 의한 길이인자의 증가량은 더욱 커짐을 알 수 있다.

Fig.12는 재료에 따른 인장강도를 나타내며 혼합복합재료가 섬유복합재료보다 크게 나타나 이러한 클러스터 효과의 존재를 입증하고 있다. 탄성계수 해석에서와 달리 인장강도에 참가하는 인자들은 무수히 많으므로 혼합법칙으로 강성을 정확히 예측하기란 매우 어렵다. 따라서 이론적 해석은 혼합법칙을 적용한 길이인자와 파괴기구에 대해서만 살펴보았다. 해석결과와 실험을 직접적으로 비교할 수는 없었으나 혼합복합재료의 강성의 증가를 설명하는데는 충분하다 사려된다.

5. 결 론

이상에서 혼합법칙을 적용하여 섬유/입자 혼합금속복합재료의 강화효과를 클러스터 모델을 도입하여 살펴본바와 같으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 혼합금속복합재료의 클러스터 구조는 강도와 탄성계수에서 추가의 강화효과를 발생시킨다. 이러한 클러스터 구조는 예비성형체의 제조단계에서 생성된다.

2. 클러스터 구조에 의한 강화기구를 혼합법칙을 적용하여 설명하면, 탄성계수에 있어서 배향인자를 증가시키며, 인장강도의 경우 길이인자와 배향인자가 결합된 형태로 추가의 강화효과를 발생시킨다.

3. 클러스터 구조에 의한 강화효과는 첨가되는 입자의 부피분율과 클러스터의 크기, 섬유의 길이와 관련이 있다. 입자의 부피분율이 증가하고, 섬유의 길이와 클러스터의 크기가 감소할수록 클러스터 강화효과는 커진다.

후 기

본 연구는 1998년도 학술진흥재단의 신소재분야 지원과제비로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Bigg, D.M., "Mechanical properties of particulate filled polymers", Poly. Compos., Vol.8, 1987, pp.115-122
2. Pukanszky, B, Rockenbauer, A and Maurer, F.H.J., "Effect of nulleation,filler anisotropy and

- orientation on the properties of PP composites", *Composites*, Vol.15, 1994, pp.205-214
3. Levita, G., Marchetti, A. and Lazzeri, A., "Fracture of ultrafine calcium carbonate/polypropylene composites", *Polym. Compos.*, Vol.10, 1989, pp.39-43
 4. Feltham, S.J. and Yates, B., "Thermal expansion of particulate reinforced composites", *J. Mater. Sci.*, Vol.17, 1982, pp.2309-2323
 5. Richardson, M.O.W, *Polymer Engineering Composites*, Applied Science, London, 1977
 6. Friedrich, K. and Karsch, U.A., "Failure processes in particulate filled polypropylene", *Fiber Sci. Tech.*, Vol.18, 1983, pp.37-52
 7. Chacko, V.P., Farris, R.J. and Karasz, F.E., "Tensile properties of CaCO₃-filled polyethylenes", *J. Appl. Polym. Sci.*, Vol.28, 1983, pp.2701-2713
 8. Fu, S.Y. and Lauke, B., "Characterization of tensile behavior of hybrid short glass fiber/calcite particle/ABS composites", *Composites Part A*, Vol. 29A, 1998, pp.575-583
 9. Fu, S.Y. and Lauke, B., "Effects of fiber length and fiber orientation distributions on the tensile strength of short-fiber-reinforced polymers", *Compos. Sci. Tech.*, Vol. 56, 1996, pp.1179-1190
 10. Piggott, M.R., "Short fiber polymer composites: a fracture-based theory of fiber reinforcement", *J. Compos. Mater.*, Vol.28, No.7, 1994, pp.588-606
 11. Piggott, M.R., "Toughness in obliquely-stressed fibrous composites", *J. Mech. Phys. Solids*, Vol.22, 1974, pp.457-468
 12. Joshi, M., Maiti, S.N. and Karasz, A., "Influence of fiber length, fiber orientation and interfacial adhesion on poly(butylene terephthalate)/polyethylene alloys reinforced with short glass fibers", Vol.15, 1994, pp.349-358
 13. Gupta, V.B., Mittal, R.K. and Sharma, P.K., "Some studies on glass fiber reinforced polypropylene. Part II: mechanical properties and their dependence on fiber length, interfacial adhesion and fiber dispersion", *Polym. Compos.*, Vol.10, 1989, pp.16-27
 14. Christensen, R.M. and Waals, F.M., "Effective stiffness of randomly oriented fiber composites", *J. Compos. Mater.* Vol.1.3, No.2, 1968, pp.352-358
 15. Corbin, S.F. and Wilkinson, D.S., "The influence of particle distribution on the mechanical response of a particulate metal matrix composite", *Acta metall. mater.*, Vol.42, No.4, 1994, pp.1211-1318
 16. Cox, H.L., "The elasticity and strength of paper and other fibrous materials", *British J. Applied Phys.* Vol.3, 1952, pp.72-79
 17. Jayaraman, K. and Kortschot, M.T., "Correction to the Fukuda-Kawata Young's modulus theory and the Fukuda-Chou strength theory for short fiber-reinforced composite materials", *J. Mater. Sci.* Vol.31, 1996, pp.2059-2064
 18. Piggott, M.R., *Load-Bearing Fiber Composites*, Pergamon Press. New York, 1980, Chapter 5.