

불균질입자강화 복합재료의 최적설계를 위한 손상메커니즘 해석

조영태*, 조의일†

(논문접수일 2003. 11. 1, 심사완료일 2004. 6. 18.)

Analysis of Damage Mechanism for Optimum Design in Discontinuously-Reinforced Composites

Young-Tae Cho*, Ue-Il Cho†

Abstract

In particle or short-fiber reinforced composites, cracking or debonding of the reinforcements cause a significant damage mode because the damaged reinforcements lose load carrying capacity. The average stress in the inhomogeneity represents its load carrying capacity, and the difference between the average stresses of the intact and broken inhomogeneities indicates the loss of load carrying capacity due to cracking damage. The composite in damage process contains intact and broken reinforcements in a matrix. An incremental constitutive relation of discontinuously-reinforced composites including the progressive cracking damage of the reinforcements have been developed based on the Eshelby's equivalent inclusion method and Mori-Tanaka's mean field concept. Influence of the cracking damage on the stress-strain response of the composites is demonstrated.

Key Words : Damage Mechanics(손상역학), Reinforcement Cracking(강화재 균열), Discontinuously-Reinforcement Composites(분산형 복합재), Broken Ellipsoidal Inhomogeneity(균열된 타원체 불균질물), Load Carrying Capacity(하중부하능력)

1. 서론

입자 또는 단섬유로 강화된 분산형 복합재료는 기계적

성질의 향상과 동시에 성형성, 가공성이 뛰어나 고성능 공업재료로서 널리 사용되어지고 있다. 그러나 변형 과정중에 강화재의 균열손상, 기지재와 강화재간의 계면박리 또는

* 조선대학교 항공조선공학부 (dgycho@chosun.ac.kr)

주소: 501-759 광주시 동구 서석동 375

† 여수대 응용공학부

기지재료의 균열이 진행되는 손상에 의해서, 기계적 특성에 큰 악영향을 미친다⁽¹⁻³⁾. 이들 손상모드는 소재의 기계적성질의 조합이나 기지재와 강화재의 계면강도에 의존하고, 분산형 복합재료에서는 강화재의 균열 및 박리손상이 주요 손상모드로 알려져 있다. 따라서, 복합재료의 응용분야를 넓히거나, 새로운 고성능 복합재료의 최적설계 및 개발을 위해서는 복합재료의 손상과정에 따른 마이크로메커니즘의 구축 및 이해가 매우 중요하다.

입자분산 복합재료의 박리손상에 관하여 Tohgo 등^(4,5)은 입자분산 복합재료에 있어서 인장시험, 파괴인성 시험을 실시하여 박리손상 과정을 밝히고, Eshelby의 등가개재물법⁽⁶⁾과 Mori-Tanaka의 평균응력장이론⁽⁷⁾을 기초로 하여, 박리손상과 기지재의 소성변형을 고려한 입자분산 복합재료에 대한 증분형 손상이론을 제안하였고, 복합재료의 응력-변형관계에 박리손상이 매우 큰 영향을 준다고 보고했다. 실제 복합재료, 특히 입자·단섬유강화 복합재료에 있어서는 강화재의 계면박리 뿐만 아니라 균열손상도 확인됨에 따라서, 균열손상에 관한 복합재료의 이론 구축이 요구되어지고 있다. 종래의 분산형 복합재료에 관한 많은 이론들^(4,5,8,9)은, 무한체내의 타원체 불균질물에 있어서 Eshelby의 해를 기초로 하여 구축되었다. 그러나, 균열손상이 있는 복합재료의 손상이론을 전개하려 할 때 균열된 타원체 개재물에 대한 해가 구하여져 있지 않은 관계로 강화재의 균열손상을 고려한 이론전개가 불가능하다.

본 연구는, 균열된 타원체 불균질물에 하중부하능력 개념을 도입하여⁽¹⁰⁾, 강화재의 균열손상 과정을 고려한 분산형 복합재료의 손상 이론을 계수 matrix, Mori-Tanaka의 평균응력장이론과 Eshelby의 등가개재물법을 기초로 정식화하고, 복합재료의 응력-변형관계에 미치는 강화재의 균열손상 영향의 해석 예를 보인다.

2. Eshelby의 등가개재물법

Eshelby의 등가개재물법은 기본적으로 무한체(Matrix) 내에 한개의 타원체 개재물이 존재할 경우이지만, 이를 더욱 확장시켜 Mori-Tanaka는 1973년에 무한체내에 있는 여러 개의 타원체 개재물을 고려하여 타원체 개재물의 상호간섭, 유한 경계의 영향을 고려한 평균응력장이론(Mean field theory)을 제안하고, Eshelby의 등가개재물법을 실용적으로 복합재료에 적용할 수 있도록 하였다.

2.1 Eshelby 해⁽⁶⁾

Fig. 1과 같이 탄성계수 C_{ijkl} 를 갖는 무한체와, 무한체(D) 내에 유한한 타원체 영역 Ω 가 있다고 하자. 여기서 타원체 영역 Ω 를 잘라내어 일정한 고유변형 ϵ_{ij}^* 을 가한 후, 무한체내의 처음위치로 원위치 시키고자 할 때에, 복합체에서 고유변형 ϵ_{ij}^* 가 가해진 타원체 영역 Ω 는, 매트릭스 영역 $D-\Omega$ 에 의해서 영역 Ω 의 주변이 구속되므로 자유롭게 ϵ_{ij}^* 만큼의 변형이 어렵기 때문에 영역 Ω 의 내부 및 근방에서 내부 응력 σ_{ij} 가 발생한다. Ω 의 내부 응력은 Hooke의 법칙을 만족하므로 다음 식으로 표현된다.

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} (\epsilon_{kl} - \epsilon_{kl}^*) \quad (1)$$

여기서, ϵ_{kl} 은 전체 변형률이다.

Eshelby에 의하면 타원체 영역내의 고유변형률 ϵ_{ij}^* 가 일정할 때, 타원체 영역 내의 전체 변형률과 응력도 일정하므로, ϵ_{ij} 와 개재물 Ω 내의 응력 σ_{ij} 는 다음과 같다.

$$\epsilon_{ij} = S_{ijkl} \epsilon_{kl}^* \quad (2)$$

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} (S_{klmn} - I_{klmn}) \epsilon_{mn}^* \quad (3)$$

여기서, S_{ijkl} 와 I_{klmn} 은 각각 4계(階)의 Eshelby 텐서 및 단위 텐서이다.

위에 기술한 식 (1), (2) 및 (3)을 기초로 하여, 무한체내 불균질물의 문제를 Eshelby의 해를 이용하여 무한체 내의 개재물 문제로 치환해서 해석하는 것이 가능하여, 이 방법을 Eshelby의 등가개재물법이라 한다.

2.2 Mori-Tanaka의 평균응력장이론⁽⁷⁾

Eshelby의 등가개재물법은 Fig. 1과 같이 무한평판내에 1개의 개재물 Ω 가 존재하는 경우에 대한 것이지만, Fig. 2와 같이 개재물 Ω 가 많을 경우 즉, 모재내에서 유한한 체적

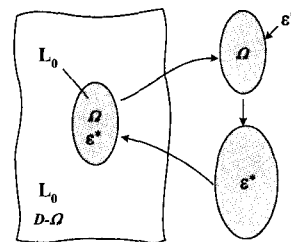


Fig. 1 Eshelby's solution

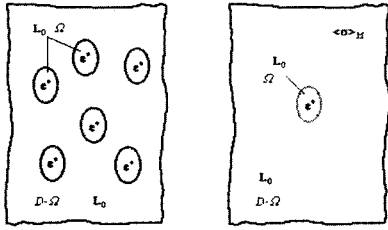


Fig. 2 Mori-Tanaka's mean field model

울의 개재물을 갖는 경우, 개재물과 개재물간의 상호간섭 및 개재물과 자유표면과의 상호간섭을 무시할 수 없게 된다. 이와 같은 경우에 대하여 Mori와 Tamaka는 평균응력장이론을 제안하고 등가개재물법을 확장하였다. 개재물의 영역을 Ω 라하고, Ω 를 제외한 모재의 영역을 $D-\Omega$ 라 한다. Ω , $D-\Omega$ 의 탄성계수는 모두 L_0 이고, Ω 의 영역이 고유프레인(ϵ^*)을 갖고있는 것으로 하면 작용 응력이 가해지지 않은 상태에서 고유프레인에 의해 내부응력이 발생한다. 따라서, 이 두 영역의 내부응력은 다음 식 (4)를 만족해야 한다.

$$K \langle \sigma \rangle_I + (1-f) \langle \sigma \rangle_M = 0 \quad (4)$$

여기서 f 는개재물 Ω 의 체적율, $\langle \sigma \rangle_I$ 는 Ω 내부의 평균응력이고, $\langle \sigma \rangle_M$ 은 $D-\Omega$ 의 평균응력이다. 많은 개재물을 포함하고있는 상태에서, 다시 1개의 개재물을 가할 때 다수의 개재물중의 1개이므로 f 체적율에는 영향을 미치지 않지만 더해진 1개의 개재물이 다수의 개재물로부터 받는 영향은 매우 크다.

3. 복합재료의 증분형 손상이론

Fig. 3은 균열손상 과정에 있는 복합재료의 미시조직을 모식적으로 나타낸 것으로, 고성능 복합재료의 최적설계 및

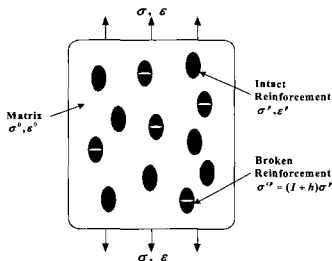


Fig. 3 Microstructure of composite in damage process

개발에 유효한 강화재 손상과정의 증분형 손상이론을 정식화하기 위해서는, 균열된 타원체 불균질물의 하중부하-능력 개념, Mori-Tanaka의 평균장 이론을 이용하고 Eshelby의 등가개재물법을 토대로 강화재의 균열손상과정을 기술 가능 하도록 증분형 손상이론의 정식화한다.

3.1 정식화

Fig. 4는 손상과정에 있는 입자강화 복합재료의 증분 변형 전 · 후의 상태를 나타낸다. Fig. 4(a)는 증분변형전의 상태로서 완전한 강화재의 체적율을 f_p , 손상된 강화재의 체적율을 f_d 라 하고, 그 다음 단계의 증분변형중에 손상되는 강화재의 체적율을 df_p 라 하면, Fig. 4(b)에 나타낸 변형된 후의 복합재료의 상태는, 완전한 강화재의 체적율 f_p-df_p 및 손상된 강화재의 체적율은 f_d+df_p 로 쓸 수 있다.

완전한 강화재내의 응력증분 $d\sigma^p$ 는, Mori-Tanaka의 평균응력장 이론을 이용한 Eshelby의 등가개재물법을 기초로 다음 식으로 주어진다.

$$\begin{aligned} d\sigma^p &= d\sigma + d\tilde{\sigma} + d\sigma_1^{pt} = L_1(d\epsilon_0 + d\tilde{\epsilon} + d\epsilon_1^{pt}) \\ &= L_0(d\epsilon_0 + d\tilde{\epsilon} + d\epsilon_1^{pt} - d\epsilon_1^*) \end{aligned} \quad (5)$$

균열된 강화재의 평균응력은 다음 식이 된다.

$$\begin{aligned} kd\sigma^p &= d\sigma + d\tilde{\sigma} + d\sigma_2^{pt} = kL_1(d\epsilon_0 + d\tilde{\epsilon} + d\epsilon_1^{pt}) \\ &= L_0(d\epsilon_0 + d\tilde{\epsilon} + d\epsilon_2^{pt} - d\epsilon_2^*) \end{aligned} \quad (6)$$

또한, 균열과정에 있는 강화재에 대해서는, 증분변형 과정

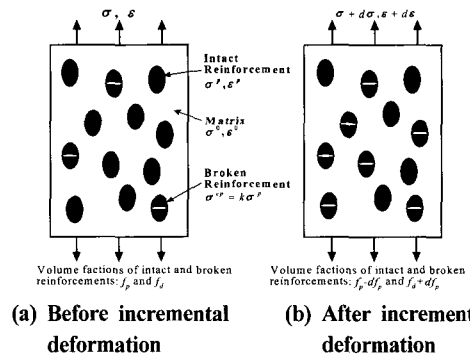


Fig. 4 The states of composite undergoing damage process before and after incremental deformation (df_p is volume fraction of the particles broken in the incremental deformation)

의 강화재 응력 σ^p 는, $k\sigma^p$ 가 될 때까지 완화되므로 다음 식이 얻어진다. 여기서, k 는 균열된 강화재의 평균응력을 손상전의 응력에 대한 비율로서 나타내는 계수이다.

$$-(I-k)\sigma^p = d\sigma + d\tilde{\sigma} + \sigma_3^{pt} \\ = L_0(d\epsilon_0 + d\tilde{\epsilon} + \epsilon_3^{pt} - \epsilon_3^*) \quad (7)$$

위의 식에서 고차의 미소항을 무시하면

$$-(I-k)\sigma^p = \sigma_3^{pt} = L_0(\epsilon_3^{pt} - \epsilon_3^*) \quad (8)$$

가 된다. 여기서 L_1 , L_0 는 각각 강화재와 모재의 탄성계수이다. $d\sigma$, $d\tilde{\sigma}$ 는 작용응력 증분과 Mori-Tanaka의 평균장개념을 기초로 하는 평균장 응력의 증분이고, $d\epsilon_0$ 및 $d\tilde{\epsilon}$ 는 각각 다음 식과 같은 관계가 성립된다.

$$d\sigma = L_0 d\epsilon_0, \quad d\tilde{\sigma} = L_0 d\tilde{\epsilon} \quad (9)$$

$d\sigma_1^{pt}$, $d\sigma_2^{pt}$, σ_3^{pt} 및 $d\epsilon_1^{pt}$, $d\epsilon_2^{pt}$, ϵ_3^{pt} 는 각각 손상되지 않은 완전한 강화재, 균열 손상이 일어난 강화재, 균열과정중에 있는 강화재의 응력 및 변형의 변동분이다. 변동변형 $d\epsilon_1^*$, $d\epsilon_2^*$, ϵ_3^* 는 Eshelby의 등가변환 변형(Eshelby's equivalent transformation strain)이다. 변동변형 $d\epsilon_1^*$, $d\epsilon_2^*$, ϵ_3^* 는 다음 식처럼 변환변형 $d\epsilon_1^{pt}$, $d\epsilon_2^{pt}$, ϵ_3^{pt} 과 관계되어진다.

$$d\epsilon_1^{pt} = Sd\epsilon_1^*, \quad d\epsilon_2^{pt} = Sd\epsilon_2^*, \quad \epsilon_3^{pt} = S\epsilon_3^* \quad (10)$$

S 는 타원체 개재물에 대한 Eshelby's tensor로 강화재의 종횡비(b/a)와 기지재의 포아송비로 표현된다. 따라서 강화재의 응력변동분 $d\sigma_1^{pt}$, $d\sigma_2^{pt}$, σ_3^{pt} 는 다음 식이 된다.

$$d\sigma_1^{pt} = L_0(S-I)d\epsilon_1^* \\ d\sigma_2^{pt} = L_0(S-I)d\epsilon_2^* \\ \sigma_3^{pt} = L_0(S-I)\epsilon_3^* \quad (11)$$

여기서, I 는 4계 단위 텐서(Unit tensor)이다. 작용(거시적) 응력증분 $d\sigma$ 는

$$d\sigma = (f_d - df_d)d\sigma^p + f_d k d\sigma^p - df_p(I-k)\sigma^p \\ + (1 - f_p - f_d)(d\sigma + d\tilde{\sigma}) \quad (12)$$

로 표현되고, 이식에서 고차의 미소항을 무시하고, 식 (5), 식 (6)와 식 (8)을 뒷식에 대입하면 평균응력 증분 $d\tilde{\sigma}$ 는

$$d\tilde{\sigma} = -f_p d\sigma_1^{pt} - f_d d\sigma_2^{pt} - df_p \sigma_3^{pt} \quad (13)$$

로 표현된다. 또한, 식 (9), 식 (11)을 뒷식에 대입하면, 평균변형증분 $d\tilde{\epsilon}$ 은 다음과 같이 얻어진다.

$$d\tilde{\epsilon} = -(S-I)(f_p d\epsilon_1^* - f_d d\epsilon_2^* - df_p \epsilon_3^*) \quad (14)$$

복합재료의 거시적 변형증분 $d\epsilon$ 은,

$$d\epsilon = (f_d - df_d)(d\epsilon_0 + d\tilde{\epsilon} + d\epsilon_1^{pt}) \\ + f_d(d\epsilon_0 + d\tilde{\epsilon} + d\epsilon_2^{pt}) + df_p(d\epsilon_0 + d\tilde{\epsilon} + \epsilon_3^{pt}) \\ + (1 - f_p - f_d)(d\epsilon_0 + d\tilde{\epsilon}) \quad (15)$$

로 표현되고, 식 (10), 식 (14)을 고려해 고차의 미소항을 무시하면 위 식은 다음 식으로 나타내어진다.

$$d\epsilon = d\epsilon_0 + f_p d\epsilon_1^* + f_d d\epsilon_2^* + df_p \epsilon_3^* \quad (16)$$

이상의 식들로부터 Eshelby의 등가변환변형 $d\epsilon_1^*$, $d\epsilon_2^*$, ϵ_3^* 는 작용응력증분 $d\sigma$ 및 df_p 의 함수로서 기술할 수 있다. 최종적으로 복합재료의 변형 $d\epsilon$ -응력 $d\sigma$ 증분 관계는 다음 식과 같이 얻어진다.

$$d\epsilon = (I + f_d A_1^{-1} B_1 + f_d A_2^{-1} B_2) L_0^{-1} d\sigma \\ + [(I - S)^{-1} + f_p A_1^{-1} B_1 + f_d A_2^{-1} B_2] \\ L_0^{-1} (I - k) \sigma^p df_p \quad (17)$$

여기서,

$$A_1 = (L_1 - L_0)^{-1} [L_0 + (L_1 - L_0)S + (L_1 - L_0)(I - S)f_d] \\ - f_d [L_0 + (kL_1 - L_0)f_d]^{-1} [kL_1 S + (kL_1 - L_0)(I - S)f_d] \quad (18)$$

$$B_1 = f_d [L_0 + (kL_1 - L_0)f_d]^{-1} + (kL_1 - L_0) - I \quad (19)$$

$$A_2 = [L_0 + (L_1 - L_0)S + (L_1 - L_0)(I - S)f_d]^{-1} (L_1 - L_0) \\ \times (I - S) f_d - [kL_1 S + (kL_1 - L_0)(I - S)f_p]^{-1} \\ \times [L_0 + (kL_1 - L_0)f_d](I - S) \quad (20)$$

$$B_2 = [kL_1 S + (kL_1 - L_0)(I - S) f_p]^{-1} + (kL_1 - L_0) \\ - [L_0 + (L_1 - L_0)S + (L_1 - L_0)(I - S) f_p]^{-1} (L_1 - L_0) \quad (21)$$

식 (14)에 나타난 복합재료의 변형증분은, 응력증분에 의

한 변형증분과 균열손상에 의한 변형증분의 합으로 주어진다. 기지재, 완전한 강화재 및 손상된 강화재에 있어서의 평균응력 증분 $d\sigma^b$, $d\sigma^p$ 와 $d\sigma^d$ 는 각각 다음 식으로 구해진다.

$$d\sigma^b = L_0(I-S)[(I-S)^{-1} + f_p A_1^{-1} B_1 + f_d A_2^{-1} B_2] L_0^{-1} \times [d\sigma + (I-k)\sigma^p df_p] \quad (22)$$

$$d\sigma^p = L_0(I-S)[(I-S)^{-1} - (1-f_p)A_1^{-1}B_1 + f_d A_2^{-1}B_2] L_0^{-1} \times [d\sigma + (I-k)\sigma^p df_p] \quad (23)$$

$$d\sigma^d = kd\sigma^p \quad (24)$$

3.2 강화재에 있어서 균열손상의 누적율 평가

복합재료내의 강화재의 크기는 동일하고, 강도 특성은 강화재내의 최대응력에 관한 Weibull 분포에 지배받는 것으로 가정하면 복합재료내의 강화재 체적율에 대한 균열된 강화재의 체적비율은 다음 식으로 표현되며, 강화재의 손상체적율에 대한 Weibull 분포는 Fig. 5와 같이된다.

$$P_v(\sigma_{max}^p) = 1 - \exp[-(\frac{\sigma_{max}^p}{S_0})^m] \quad (25)$$

여기서, σ_{max}^p 는 강화재의 최대 인장응력, S_0 , m 은 각각 척도계수와 형상계수이다. 강화재의 평균강도 $\bar{\sigma}_{max}^p$ 는 Gamma함수, $\Gamma(\cdot)$ 를 이용하여 다음 식으로 주어진다.

$$\bar{\sigma}_{max}^p = S_0 \Gamma(1 + \frac{1}{m}) \quad (26)$$

강화재의 초기체적율이 f_{p0} 로 주어진다면 손상된 강화재의 누적체적율은 $f_{p0} \cdot P_v$ 가 된다. 따라서 증분변형중에 균열이 일어나는 강화재의 체적율 df_p 는 초기체적율 f_{p0} 를 이용하면

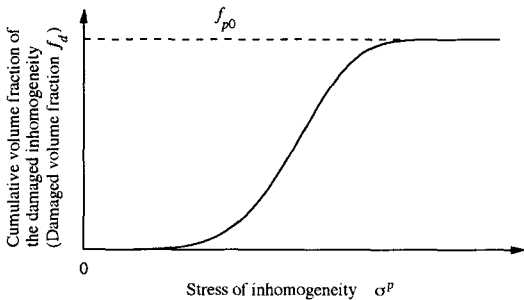


Fig. 5 Cumulative volume fraction of damaged particles as a function of stress of particle

다음 식으로 주어진다.

$$df_p = f_{p0} \frac{dP_v}{d\sigma_{max}^p} d\sigma_{max}^p \quad (27)$$

4. 해석 결과 및 고찰

3.1절에서 구축된 증분이론을 기초로 강화재 균열손상의 진행을 고려한 분산형 복합재료의 단축 인장응력하에서 응력-변형관계의 탄성해석을 실시하였다. 해석에 이용된 강화재와 기지재의 영계수 및 포아송비는 각각 $E_1 = 2500\sigma_0$, $\nu_1 = 0.17$, $E_2 = 500\sigma_0$, $\nu_2 = 0.3$ 이다.

여기서, σ_0 는 기지재의 항복응력이다. 또한 강화재의 균열손상 특성은, (25)식 Weibull 분포의 지배를 받으며, 형상계수 $m=5.0$, 평균강도 $\bar{\sigma}_{max}^p = 3.0 \sigma_0$ 로 하고, 복합재료에 포함된 강화재의 초기체적율 f_{p0} 는 20%이다.

Fig. 6은 강화재의 종횡비가 1.0인 경우의 거시적 응력(복합재료의 응력 σ_z), 강화재 및 기지재의 미시적응력(σ_z^p , σ_z^b), 완전한 강화재 및 균열된 강화재의 체적율(f_p , f_d)과 복합재료의 거시적 변형 ϵ_z 와의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 손상이 일어나지 않은 완전한 복합재료에 대한 응력-변형관계는 가는 실선으로 나타났다. 완전한 복합재료의 응력-변형관계는 예상대로 선형이 된다. 복합재료의 거시적 응력-변형관계에 비해서 강화재에서 높은 미시적응력이, 기지재에서는 낮은 미시적응력이 발생하는 것을 알았다. 손상을 수반하는 복합재료에 대한 응력-변형관계는 강화재의 균열

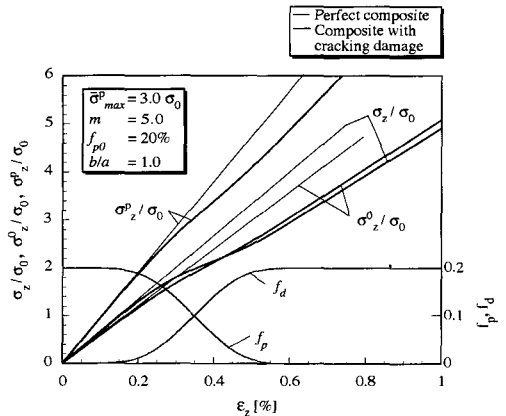


Fig. 6 Stress-Strain relations of perfect composite and composite with progressive cracking damage

손상이 증가함에 따라서 완전한 복합재료의 선형관계로부터 점점 멀어지고, 강화재가 모두 균열손상이 일어나면 다시 선형 응력-변형관계가 된다. 본 연구의 증분형 손상이론은 계수matrix k 를 변화시킴으로서 강화재의 균열손상 또는 박리손상 등의 여러 손상형태를 수반하는 복합재료의 변형거동을 기술하는 것이 가능하다. 박리손상을 수반하는 복합재료의 해석은 계수매트릭스 $k=0$ 으로 설정함으로써 해석이 가능하다.

Fig. 7은 손상이 발생한 복합재료의 응력-변형관계에 미치는 강화재의 종횡비($b/a=0.5, 1.0, 3.0$ and 10.0)의 영향을 나타낸 것으로서 종횡비가 작은 강화재일 경우는 균열손상이 일어나기 어렵지만, 강화재는 균열손상에 의해 상당한 하중부하능력을 잃게되므로 응력-변형관계에 미치는 손상의 영향은 크고, 강화재의 종횡비가 클수록 균열손상은 발생하기 쉬우나 균열 후에도 큰 하중부하능력을 유지함으로써 응력-변형관계에 미치는 영향은 작다. Fig. 8은 종횡비가 1.0인 구상입자로 강화된 복합재료의 응력-변형관계에 미치는 k -matrix의 영향을 나타냈다. k 가 단위 matrix일 때는 하중부하능력의 저하가 전혀 없으므로 완전한 복합재료를 기술하는 것이 되고, k 가 0 matrix일 경우는 강화재가 하중부하능력을 완전히 잃는 것을 의미하며, 강화재와 기지재와의 계면 박리손상을 기술하는 이론이 된다. $k=k_{cracking}$ 는 강화재에 손상이 일어난 경우로서 k 는 개재물의 종횡비, 강화재 및 모재의 재료정수에 따라 변하며 $k=0$ 와 비교해보면 모든 강화재가 손상이 일어나도 어느 정도의 하중부하능력을 갖고 있음을 알 수 있다. 강화재의 종횡비가 1.0인 경우, Tohgo-Chou⁽⁴⁾에 의해 제안된 박리손상을 고려한 입자강화 복합재료에 있어서의 증분형 손상이론과 일치한다. Fig. 8로부터 분산형 복합재료의 손상 중에서 박리손상이 가장 낮은 응력-변형관계를 나타내는 것을 알 수 있었다.

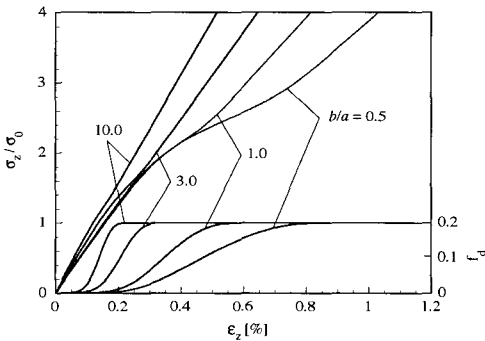


Fig. 7 Influence of an aspect ratio of reinforcements on the stress-strain relations of the elastic composites with progressive cracking damage

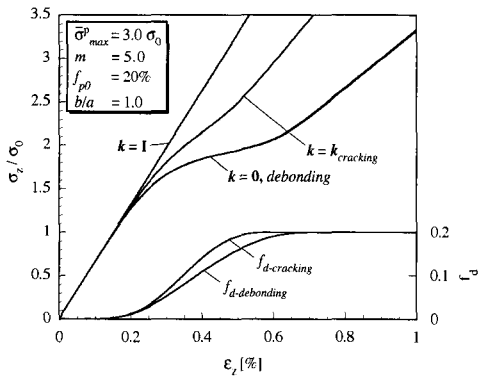


Fig. 8 Influence of k -matrix on the stress-strain relations of the elastic composite

5. 결론

Eshelby의 등가개재물법과 Mori-Tanaka의 평균응력장 이론을 바탕으로 균열손상과정의 불균질물을 포함하는 분산형 복합재료의 증분형 손상이론을 구축하였으며, 이를 바탕으로 하여 수치해석을 실시한 결과, 불균질 강화재의 균열손상 또는 박리손상은 복합재료를 약화시키고, 강화재의 종횡비가 클수록 손상이 일어나기 쉽게 되지만 하중부하능력을 어느 정도 유지함으로써 응력-변형 관계에 미치는 영향이 작음을 알 수 있었다.

분산형 복합재료의 응용 혹은 새로운 분산형 복합재료의 개발할 경우에 있어서 강화재의 균열손상 또는 박리손상을 고려하는 것은 매우 중요하고, 그 해석에 있어서 매우 유효하다 할 수 있다.

후기

본 연구는 여수대학교 2002년도 학술연구지원비에 의하여 연구되었음.

참고문헌

- (1) Loretto, M. H., and Konitzer, D. G., 1990, "The Effect of Matrix Reinforcement Reaction on Fracture

- in Ti-6Al-4V-Base Composites," *Metall. and Mater. Trans. A*, Vol. 21 A, pp. 1579~1587.
- (2) Llorca, J., Martin, A., Ruiz, J., and Elices, M., 1993, "Particulate Fracture during Deformation of a Spray Formed Metal-Matrix Composite," *Metall. and Mater. Trans. A*, Vol. 24A, pp. 1575~1588.
- (3) Tohgo, K., Mochizuki, K., Takahashi, H., and Ishii, H., 1996, "Application of Incremental Damage Theory to Glass Particle Reinforced Nylon 66 Composites," *Localized Damage IV, Computer-Aided Assessment and Control, Computational Mechanics Publications*, pp. 351~358.
- (4) Tohgo, K., and Chou, T. W., 1996, "Incremental Theory of Particulate-Reinforced Composites Including Debonding Damage," *JSME Int. J., Ser. A*, Vol. 39, No. 3, pp. 389~397.
- (5) Tohgo, K., and Weng, G. J., 1994, "Progressive Damage Mechanics in Particle-Reinforced Metal-Matrix Composites under High Triaxial Tension," *ASME J. Eng. Mat. Tech.*, Vol. 116, pp. 414~420.
- (6) Eshelby, J. D., 1957, "The Determination of the Elastic Field of an Ellipsoidal Inclusion, and Related Problems," *Proceedings of the Royal Society, London*, Vol. A241, pp. 376~396.
- (7) Mori, T., and Tanaka, K., 1973, "Average Stress in Matrix and Average Elastic Energy of Materials with Misfitting Inclusions," *Acta Metall.*, Vol. 21, pp. 571~574.
- (8) Mura, T., 1982, *Micromechanics of Defects in Solids*, Martinus Nijhoff, The Hague.
- (9) Arsenault, R. J., and Taya, M., 1987, "Thermal Residual Stress in Metal Matrix Composite," *Acta Metall.*, Vol. 35, pp. 651~659.
- (10) Cho, Y.-T., Thogo, K., and Ishii, H., 1997, "Load Carrying Capacity of a Broken Ellipsoidal Inhomogeneity," *Acta Mater.*, Vol. 45, No. 11, pp. 4787~4795.