

분산형 복합재료의 손상 매커니즘

Damage Mechanics in Particle or Short-Fiber Reinforced Composite

조영태*, 김홍건**

Cho, Young-tac and Kim, Hong-gun

* 전주대학교 공업기술종합연구소

** 전주대학교 기계공학과

Abstract

In particle or short-fiber reinforced composites, cracking of the reinforcements is a significant damage mode because the broken reinforcements lose load carrying capacity. This paper deals with the load carrying capacity of intact and broken ellipsoidal inhomogeneities embedded in an infinite body and a damage theory of particle or short-fiber reinforced composites. 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 particle or short-fiber reinforced composites including the progressive cracking damage of the reinforcements have been developed based on the Eshelby's equivalent inclusion method and Mori and Tanaka's mean field concept. Influence of the cracking damage on the stress-strain response of the composites is demonstrated.

Key Words : Damage mechanics, Reinforcement cracking, Particle or short-fiber reinforced composites, Load carrying capacity, Equivalent inclusion method, Mean field theory, Micromechanics

1. 서론

입자 또는 단섬유로 강화된 분산형 복합재료는 기계적 성질이 향상됨과 동시에 성형성, 가공성이 뛰어나 공업재료로서 널리 사용되어지고 있다. 그러나, 이들 복합재료는 변형 과정 중에 강화재의 균열(파괴)손상, 기지와 강화재간의 계면 박리 또는 기지의 균열 등의 손상이 진행되어, 기계적 특성에 큰 영향을 미친다⁽¹⁻⁴⁾. 이들 손상모드는 소재의 기계적성질의 조합이나 기지와 강화재의 계면강도에 의존하고, 분산형 복합재료에서는 강화재의 균열 및 박리손상이 주요 손상모드로 알려져 있다. 따라서, 복합재료의 응용분야를 넓히거나, 새로운 복합재료의 개발을 위해서는 복합재료의 손상과정에 따른 마이크로메커니즘이 매우 중요하다.

입자분산 복합재료의 박리손상에 관해서 Tohgo^(5, 6) 등은 입자분산 복합재료의 인장시험, 파

괴인성 시험을 실시하여 박리손상 과정을 밝혔고, Eshelby의 등가개재물법⁽⁷⁾과 Mori-Tanaka의 평균응력 이론⁽⁸⁾을 기초로 하여, 박리손상과 기지의 소성변형을 고려한 입자분산 복합재료에 대한 증분형 손상이론을 제안하였고, 복합재료의 응력-변형관계에 박리손상이 매우 큰 영향을 미친다고 보고했다. 실제의 복합재료, 특히 입자·단섬유강화 복합재료에 있어서 강화재의 계면박리 외에도 균열손상이 인정되어, 균열손상에 관한 복합재료의 이론 구축이 요구되어지고 있다. 종래의 분산형 복합재료에 관한 많은 이론들^(5, 6, 9-10)은, 무한체내의 타원체 불균질물에 있어서 Eshelby의 해를 기초로 하여 구축되었다. 그런데, 균열손상이 있는 복합재료의 손상이론을 전개하려면 균열된 타원체 개재물에 대한 해가 구하여져 있지 않은 관계로 강화재의 균열손상을 고려한 이론전개가 불가능하다.

본 연구는, 균열된 타원체 불균질물에 하중

부하 능력의 개념을 도입하여, 강화재의 균열순상 과정을 고려한 분산형 복합재료의 손상 이론을 구축하는데 있다. 균열된 불균질물의 하중부하 능력은, 균열순상에 의한 불균질물의 평균응력 저하를 나타내는 계수matrix와 균열 전 완전한 불균질물의 평균응력에 의해 기술할 수 있다. 무한체내의 완전한 타원체 개재물 및 균열된 타원체 개재물에 대한 유한요소해석 결과에 의해서 계수matrix의 성분을 불균질물의 형상계수(Aspect ratio)와 불균질물과 기지재의 탄성계수 비를 함수로 하여 구했다. 그리고, 분산형 복합재료의 강화재의 균열순상을 고려한 증분형 손상이론을 계수matrix, Mori-Tanaka의 평균응력 이론과 Eshelby의 등가개재물법을 기초로 정식화하고, 복합재료의 응력-변형관계에 미치는 강화재의 균열순상 영향의 해석 예를 보인다.

2. 균열된 타원체 불균질물의 하중부하 능력

외력을 받는 무한체내 타원체 불균질물의 하중부하 능력(Load carrying capacity)은 불균질물의 평균응력으로 표현할 수 있다. 하중부하 능력은 기지와 불균질물의 재료계수에 의존하며, 작용하중에 비해 불균질물의 평균응력이 클 경우 불균질물의 하중부하 능력이 크다고 말할 수 있다. 반면에, 불균질물의 균열 혹은 박리순상에 의한 응력 완화로 평균응력이 저하할 경우 불균질물의 하중부하 능력은 저하했음을 의미하고, 타원체공동(Ellipsoidal void)과 같이 응력이 0일 경우 공동의 하중부하 능력은 0이라 할 수 있다.

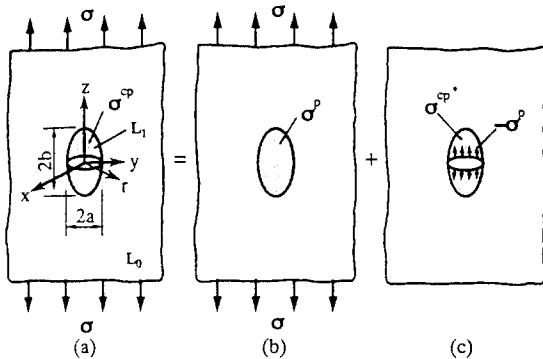


Fig. 1 Principle of superposition for a broken ellipsoidal inhomogeneity in an infinite body.

Fig.1과 같이 무한체내의 타원체불균질물이 무한거리에서 응력 σ 가 작용할 경우를 생각하자. 무한체(기지) 및 불균질물의 탄성계수를 L_0 , L_1 라 하면, Fig.1(b)와 같은 완전한 타원체 불균질물내의 응력 σ^p 는 Eshelby의 등가개재물법(Eshelby's equivalent inclusion method)에 의해 식(1)로 나타내어지고, 타원체 불균질물내의 응력은 일정한 분포를 보인다⁽⁷⁾.

$$\sigma^p = L_0(S-D)[(L_1-L_0)S+L_0]^{-1}L_1(S-D)L_0^{-1}\sigma \quad (1)$$

여기서, S 는 에셀비의 텐서(Eshelby's tensor)로서 타원체 불균질물의 형상계수 및 기지의 프아송비를 함수로 하여 표현된다.

Fig.1(a)처럼, 타원체 불균질물이 z 축 방향 중앙 단면부(xy 면)에서 균열된 불균질물을 생각하자. 균열된 불균질물내의 응력은 매우 복잡한 분포를 보인다. Fig.1은 탄성해석에 이용한 무한체내의 균열된 타원체 불균질물의 중첩원리를 나타낸다. 균열된 타원체 불균질물의 응력상태 σ^{cp} 는 완전한 불균질물이 원거리에서 작용응력 σ 를 받을 경우의 σ^p 와 불균질물이 균열 면에서 내력 $-\sigma^c$ 를 받을 경우의 σ^{cp*} 와의 합으로 표현된다. 따라서, 균열된 불균질물내의 평균응력은

$$\bar{\sigma}^{cp} = \sigma^p + \bar{\sigma}^{cp*} \quad (2)$$

로 표현할 수 있다. 또한 $\bar{\sigma}^{cp*}$ 는 완전한 불균질물내의 응력 σ^p 의 함수로서 표현할 수 있으므로 위의 식(2)는

$$\bar{\sigma}^{cp} = k\sigma^p \quad (3)$$

로 쓸 수 있다. 여기서, k 는 균열순상이 일어나기 전의 불균질물의 평균응력에 대한 균열된 불균질물의 평균응력비를 나타내는 계수이다. 따라서 평균응력 성분을 다음과 같이 벡터로 표현하면

$$\sigma^p = [\sigma_x^p, \sigma_y^p, \sigma_z^p, \tau_{yz}^p, \tau_{zx}^p, \tau_{xy}^p] \quad (4)$$

$$\bar{\sigma}^{cp} = [\bar{\sigma}_x^{cp}, \bar{\sigma}_y^{cp}, \bar{\sigma}_z^{cp}, \bar{\tau}_{yz}^{cp}, \bar{\tau}_{zx}^{cp}, \bar{\tau}_{xy}^{cp}] \quad (5)$$

$$\sigma^{cp*} = [\sigma_x^{cp*}, \sigma_y^{cp*}, \sigma_z^{cp*}, \tau_{yz}^{cp*}, \tau_{zx}^{cp*}, \tau_{xy}^{cp*}] \quad (6)$$

Fig.1(c)의 불균질물의 평균응력 성분은, 균열 면에 작용하는 내부응력 $-\sigma_z^c$ 에 의한 $\bar{\sigma}_z^{cp*}$, $\bar{\sigma}_x^{cp*}$,

$\bar{\sigma}_y^{cp*}$ 와 전단응력 $-\tau_{yz}^c$ 에 의한 $\bar{\tau}_{zx}^{cp*}$ 그리고

τ_{xy}^c 에 의해 $\bar{\tau}_{xy}^{cp*}$ 가 발생하므로, k 는 다음 식

(7)과 같이 표현된다.

$$k = \begin{pmatrix} 1 & 0 & h_{13} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & h_{13} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1+h_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1+h_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1+h_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (7)$$

xy면상의 타원체 불균질물의 주축치수가 동일할 때는 다음 식이 성립한다.

$$h_{13} = h_{13}, h_{44} = h_{55} \quad (8)$$

결국, h_{33} , h_{13} , h_{44} 의 3개의 계수 성분 값이 결정되면, Eshelby의 등가개재물법에 의해 구해지는 완전한 타원체 불균질물의 평균응력과 계수 matrix k 에 의해 균열된 후의 타원체 불균질물의 평균응력, 즉 하중부하능력을 구할 수 있다. 이들 3개의 미지의 성분 중에서 h_{33} , h_{13} 은 단축 인장응력하의 해석에 의해, h_{44} 는 단순 전단응력하의 해석에 의해 결정된다⁽¹¹⁾.

3. 하중부하능력 비

단축인장응력하, 단순전단응력하에 있는 완전한 타원체 불균질물 및 균열된 타원체 불균질물에 있어서, 축대칭 유한요소해석법과 3차원 유한요소해석법에 의해 3개의 계수성분 h_{33} , h_{13} , h_{44} 를 불균질물의 종횡비와 탄성계수의 조합에 의한 함수로서 구한 결과를 Fig. 2, 3, 4에 나타낸다. Fig. 2의 우측 y축은 인장응력하의 완전한 타원체 불균질물의 하중부하능력비 $\sigma_z^{cp} / \sigma_z^p$ 이고, Fig. 4의 우측 y축은 단순 전단응력하의 완전한 타원체 불균질물의 하중부하능력비 $\tau_{yz}^{cp} / \tau_{yz}^p$ 이다. Fig. 2에서 알 수 있듯이 하중부하능력비는 항상 1보다 작고, 불균질물은 균열 손상에 의해 하중부하능력을 상실하며, 그 정도는 불균질물의 종횡비 및 기지재와 불균질물의 탄성계수의 조합에 의존한다.

4. 증분형 손상이론

균열된 타원체 불균질물의 하중부하능력의 개념과 Mori-Tanaka의 평균장 이론을 이용하고 Eshelby의 등가개재물법을 토대로, 강화재의 균열 손상을 고려한 증분형 손상이론의 정식화는 다음과 같은 가정하에서 실시한다.

(1) 강화재의 균열손상은, 강화재내의 응력과

강화재 강도의 통계적 특성에 의해 지배된다.

(2) 균열손상 과정중 균열된 강화재의 응력은 완화되고, 하중부하능력은 균열된 강화재의 평균 응력에 의해 기술된다.

(3) 복합재료의 손상 진행은 손상되지 않은 완전한 강화재의 체적을 감소와 균열손상을 입은 강화재의 체적을 증가로 표현된다.

따라서, 손상과정중의 복합재료는 기지재내에 완전한 강화재, 균열 손상된 강화재 및 균열 손상이 진행중인 강화재를 포함하는 것이 된다.

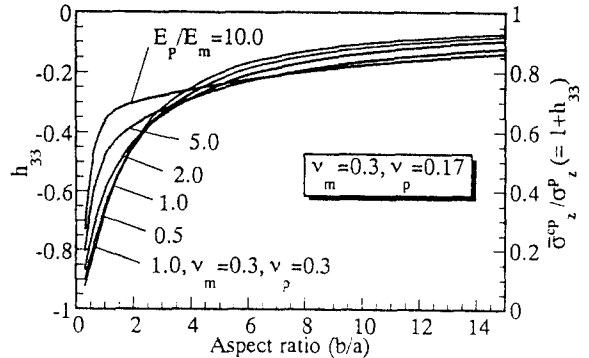


Fig. 2 Coefficient (h_{33}) and load carrying capacity ratio on tensile stress as a function of an aspect ratio.

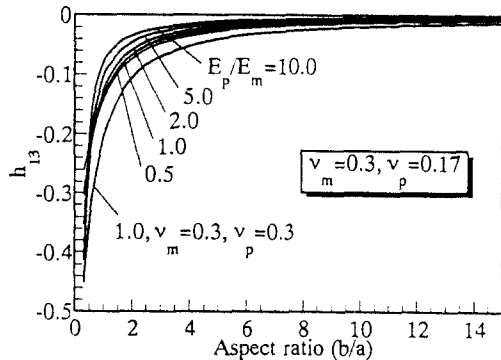


Fig. 3 Coefficient (h_{13}) as a function of an aspect ratio.

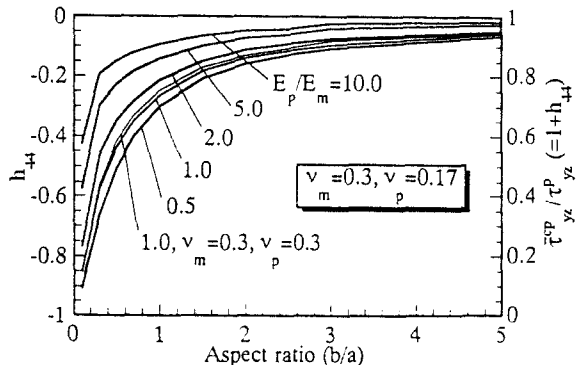


Fig. 4 Coefficient (h_{44}) and load carrying capacity ratio on shear stress as a function of an aspect ratio.

복합재료에 있어서 완전한 강화재 및 균열된 강화재와 기지에 대한 응력-변형은 각각 첨자 p , d 와 0 를 붙여 표시하고, 복합재료의 응력-변형은 첨자를 붙이지 않은 기호로 표시한다.

4.1 정식화

Fig.5는 손상과정에 있는 복합재료의 증분변형 전·후의 상태를 나타낸다. Fig.5(a)는 증분변형전의 상태로 완전한 강화재의 체적율을 f_p , 손상된 강화재의 체적율을 f_d 라 한다. 그리고, 그 다음 단계의 증분변형중에 손상되는 강화재의 체적율을 df_p 라 하면, Fig.6(b)에 나타난 변형된 후의 복합재료의 상태는, 완전한 강화재의 체적율 $f_p - df_p$ 및 손상된 강화재의 체적율은 $f_p + df_p$ 로 나타낸다.

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

$$d\sigma^p = d\sigma + d'\sigma + d\sigma_1^M \quad (9)$$

$$= L_1(d\epsilon_0 + d'\epsilon + d\epsilon_1^M) - L_0(d\epsilon_0 + d'\epsilon + d\epsilon_1^M - d\epsilon_1^*)$$

균열된 강화재의 평균응력은 식(3)에 의해 주어지 다음 식이 된다.

$$kd\sigma^d = d\sigma + d'\sigma + d\sigma_2^M \quad (10)$$

$$= kL_1(d\epsilon_0 + d'\epsilon + d\epsilon_2^M) - L_0(d\epsilon_0 + d'\epsilon + d\epsilon_2^M - d\epsilon_2^*)$$

또한, 균열과정에 있는 강화재에 대해서는, 증분 변형간의 강화재의 응력 σ^d 는, $k\sigma^p$ 가 될 때까지 완화되므로 다음 식이 얻어진다.

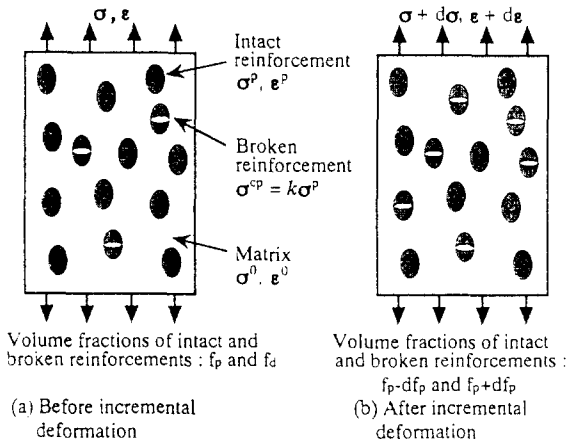


Fig.5 The states of composite undergoing damage process before and after incremental deformation.

$$(1-k)\sigma^d = d\sigma + d'\sigma + \sigma_3^M \quad (11)$$

$$L_0(d\epsilon_0 + d'\epsilon + d\epsilon_3^M - \epsilon_3^*)$$

윗식에서 고차의 미소 항을 무시하면

$$(1-k)\sigma^d = \sigma_3^M = L_0(\epsilon_3^M - \epsilon_3^*) \quad (12)$$

가 된다. 이들 식에서 L_1 , L_0 는 각각 강화재와 기지재의 탄성계수이다. $d\sigma$, $d'\sigma$ 는 작용응력 증분과 Mori-Tanaka의 평균장개념을 기초로한 평균장응력의 증분이고, $d\epsilon_0$ 및 $d'\epsilon$ 는 각각 다음 식과 같은 관계가 성립된다.

$$d\sigma = L_0 d\epsilon_0, \quad d'\sigma = L_0 d'\epsilon \quad (13)$$

$d\sigma_1^M$, $d\sigma_2^M$, σ_3^M 및 $d\epsilon_1^M$, $d\epsilon_2^M$, ϵ_3^M 은 각각 손상되지 않은 완전한 강화재, 균열 손상이 일어난 강화재, 균열과정중에 있는 강화재의 응력과 변형의 변동 분이다. $d\epsilon_1^*$, $d\epsilon_2^*$, ϵ_3^* 은 Eshelby의 등가변환변형(Eshelby's equivalent transformation strain)이다. 변동변형은 다음 식처럼 변환변동과 관계되어진다.

$$d\epsilon_1^M = S d\epsilon_1^*, \quad d\epsilon_2^M = S d\epsilon_2^*, \quad \epsilon_3^M = S \epsilon_3^* \quad (14)$$

여기서, S 는 타원체 개재물에 대한 Eshelby's tensor이다. 따라서 강화재의 응력변동분 $d\sigma_1^M$, $d\sigma_2^M$, σ_3^M 은 다음 식이 된다.

$$d\sigma_1^M = L_0(S - I) d\epsilon_1^* \quad (15)$$

$$d\sigma_2^M = L_0(S - I) d\epsilon_2^*$$

$$\sigma_3^M = L_0(S - I) \epsilon_3^*$$

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

$$d\sigma = (f_d - df_d)d\sigma^d + f_d kd\sigma^p - df_p(1-k)\sigma^p \quad (16)$$

$$+ (1 - f_p - f_d)(d\sigma + d'\sigma)$$

로 표현되고, 이식에서 고차의 미소 항을 무시하고, 식(9), 식(10)과 식(12)를 대입하면 평균응력증분 $d\sigma$ 는

$$d\sigma = f_p d\sigma_1^M - f_d d\sigma_2^M - df_p \sigma_3^M \quad (17)$$

로 표현된다. 또한, 식(13), 식(15)을 윗식에 대입하면, 평균변형증분 $d'\epsilon$ 은 다음과 같이 얻어진다.

$$d'\epsilon = (S - I)(f_p d\epsilon_1^* - f_d d\epsilon_2^* - df_p \epsilon_3^*) \quad (18)$$

복합재료의 거시적 변형증분 $d\epsilon$ 은,

$$d\epsilon = (f_d - df_d)(d\epsilon_0 + d'\epsilon + d\epsilon_1^M) + f_d(d\epsilon_0 + d'\epsilon + d\epsilon_2^M) \quad (19)$$

$$+ df_p(d\epsilon_0 + d'\epsilon + \epsilon_3^M) + (1 - f_p - f_d)(d\epsilon_0 + d'\epsilon)$$

로 표현되고, 식(14), 식(18)을 고려해 고차의 미

소 항을 무시하면 뒷식은 다음 식이 된다.

$$d\epsilon = d\epsilon_0 + f_p d\epsilon_1^* + f_d d\epsilon_2^* + df_p \epsilon_3^* \quad (20)$$

이상의 식으로부터 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.

$$d\epsilon = (I + f_d A_1^{-1} B_1 + f_d A_2^{-1} B_2) L_0^{-1} d\sigma + [(I - S)^{-1} + f_p A_1^{-1} B_1 + f_d A_2^{-1} B_2] L_0^{-1} (I - k) \sigma^0 df_p \quad (21)$$

여기서,

$$A_1 = (L_1 - L_0)^{-1} [L_0 + (L_1 - L_0)S + (L_1 - L_0)(I - S)f_d] - f_d [L_0 + (kL_1 - L_0)f_d]^{-1} [kL_1 S + (kL_1 - L_0)(I - S)f_d] \quad (22)$$

$$B_1 = f_d [L_0 + (kL_1 - L_0)f_d]^{-1} + (kL_1 - L_0) - I \quad (23)$$

$$A_2 = [L_0 + (L_1 - L_0)S + (L_1 - L_0)(I - S)f_d]^{-1} (L_1 - L_0)(I - S)f_d - [kL_1 S + (kL_1 - L_0)(I - S)f_p]^{-1} [L_0 + (kL_1 - L_0)f_d](I - S) \quad (24)$$

$$B_2 = [kL_1 S + (kL_1 - L_0)(I - S)f_p]^{-1} + (kL_1 - L_0) - [L_0 + (L_1 - L_0)S + (L_1 - L_0)(I - S)f_p]^{-1} (L_1 - L_0) \quad (25)$$

식(21)에 나타난 복합재료의 변형증분은, 응력증분에 의한 변형증분과 균열손상에 의한 변형증분의 합으로 주어진다. 기지, 완전한 강화재 및 손상된 강화재에 있어서의 평균응력 증분 $d\sigma^0$, $d\sigma^d$ 와 $d\sigma^d$ 는 각각 다음 식으로 구해진다.

$$d\sigma^0 = L_0(I - S)[(I - S)^{-1} + f_p A_1^{-1} B_1 + f_d A_2^{-1} B_2] L_0^{-1} [d\sigma + (I - k)\sigma^0 df_p] \quad (26)$$

$$d\sigma^d = L_0(I - S)[(I - S)^{-1} - (I - f_p)A_1^{-1} B_1 + f_d A_2^{-1} B_2] L_0^{-1} [d\sigma + (I - k)\sigma^0 df_p] \quad (27)$$

$$d\sigma^d = k d\sigma^0 \quad (28)$$

4.2 강화재에 있어서 균열손상의 누적률 평가

복합재료내의 강화재의 크기는 동일하고, 강도 특성은 강화재내의 최대응력에 관한 Weibull 분포에 지배받는 것으로 가정하면 복합재료내의 강화재 체적율에 대한 균열된 강화재의 체적비율은 다음 식으로 표현된다.

$$P_v \sigma_{\max}^p = 1 - \exp\left[-\left(\frac{\sigma_{\max}^p}{S_0}\right)^m\right] \quad (29)$$

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.

$$\sigma_{\max}^p = S_0 \Gamma\left(1 + \frac{1}{m}\right) \quad (30)$$

강화재의 초기체적율이 f_{p0} 로 주어진다면 손상된 강화재의 누적체적율은 $f_{p0}P_v$ 가 된다. 따라서 증분변형중에 균열이 일어나는 강화재의 체적율 df_p 는 초기체적율 f_{p0} 를 써서 다음 식으로 주어진다.

$$df_p = f_{p0} \frac{dP_v}{d\sigma_{\max}^p} d\sigma_{\max}^p \quad (31)$$

5. 해석 결과와 고찰

증분이론을 기초로 강화재 균열손상의 진행을 고려한 분산계 복합재료의 단축 인장응력하에서 응력-변형관계의 탄성해석을 실시하였다. 해석에 이용된 강화재와 기지재의 영율과 프아송비는 각각 다음과 같다.

$$E_1 = 2500\sigma_0, \nu_1 = 0.17 \quad (32)$$

$$E_2 = 500\sigma_0, \nu_2 = 0.3 \quad (33)$$

여기서, σ_0 는 기지재의 참조응력이다. 또한 강화재의 균열손상 특성은, (29)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 중형비가 1.0인 경우의 거시적 응력(복합재료의 응력 σ_2), 강화재 및 기지의 미시적응력(σ_2^p , σ_2^d), 완전한 강화재 및 균열된 강화재의 체적율(f_p , f_d)과 복합재료의 거시적 변형 ϵ_2 와의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 손상이 일어나지 않은 완전한 복합재료에 대한 응력-변형관계는 파선으로 나타냈다. 당연히 완전한 복합재료의 응력-변형관계는 선형이 된다. 복합재료의 거시적 응력-변형관계에 비해서 강화재에서 높은 미시적응력이, 기지에서는 낮은 미시적응력이 발생하는 것을 알았다. 손상을 수반하는 복합재료에 대한 응력-변형관계는 강화재의 균열손상이 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 박리 손상등의 여러 손상형태를 수반하는 복합재료의

변형거동을 기술하는 것이 가능하다. Fig.7은 종횡비가 1.0인 구상입자로 강화된 복합재료의 응력-변형관계에 미치는 k matrix의 영향을 나타냈다. k 가 단위 matrix 일 때는 하중부하능력의 저하가 전혀 없으므로 완전한 복합재료를 기술하는 것이 되고, k 가 0 matrix 일 경우는 강화재가 하중부하능력을 완전히 잃는 것을 의미하며, 강화재와 기지재와의 계면 박리손상을 기술하는 이론이 된다. 강화재의 종횡비가 1.0인 경우, Tohgo-Chou에 의해 제안된 박리손상을 고려한 입자강화 복합재료에 있어서의 증분형 손상이론과 일치한다. Fig.7로부터 분산형 복합재료의 손상중에서 박리손상이 가장 낮은 응력-변형관계를 나타내는 것을 알 수 있었다.

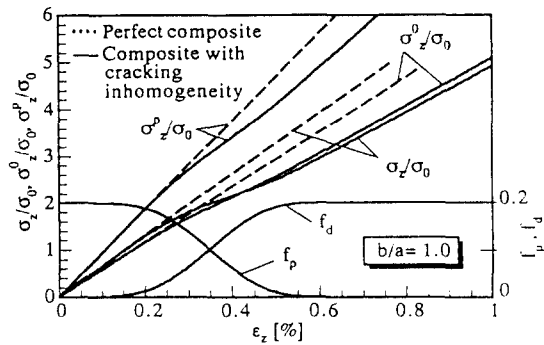


Fig.6 Stress-strain relations of perfect composite and composite with progressive cracking damage.

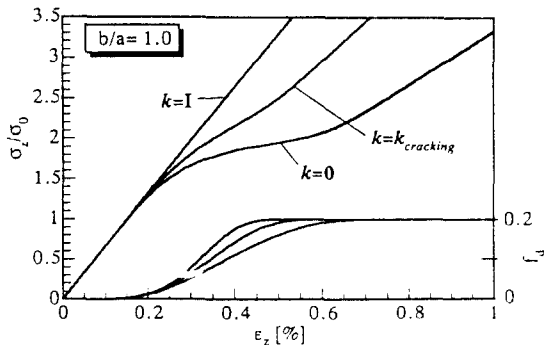


Fig.7 Influence of k -matrix on the stress-strain relations.

참 고 문 헌

1. Loretto, M. H. and Konitzer, D.G., The Effect of Matrix Reinforcement Reaction on Fracture in Ti-6Al-4V-Base Composites, Metall. Trans. A, Vol.21 A, pp.1579-1587, 1990.
2. Llorca, J., Martin, A., Ruiz, J. and Elices, M., Particulate Fracture during Deformation of a Spray Formed Metal-Matrix Composite, Metall. Trans. A, Vol. 24A, pp.1575-1588, 1993.
3. Whitehouse, A. F. and Clyne, T. W., Cavity Formation during Tensile Straining of Particulate and Short Fiber Metal Matrix Composite, Acta Metall. Mater., Vol.41, No.6, pp.1701-1711, 1993.
4. Tohgo, K., Mochizuki, K., Takahashi, H. and Ishii, H., 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, 1996.
5. Tohgo, K. and Chou, T. W., Incremental Theory of Particulate-Reinforced Composites Including Debonding Damage, JSME Int. J., Ser. A, Vol.39, No.3, pp.389-397, 1996.
6. Tohgo, K. and Weng, G. J., Progressive Damage Mechanics in Particle-Reinforced Metal-Matrix Composites under High Triaxial Tension, ASME J. Eng. Mat. Tech., Vol.116, pp.414-420, 1994.
7. Eshelby, J. D., The Determination of the Elastic Field of an Ellipsoidal Inclusion, and Related Problems, Proceedings of the Royal Society, London, Vol. A241, pp. 376-396, 1957.
8. Mori, T. and Tanaka, K., Average Stress in Matrix and Average Elastic Energy of Materials with Misfitting Inclusions, Acta Metall., Vol.21, pp.571-574, 1973.
9. Mura, T., Micromechanics of Defects in Solids, Martinus Nijhoff, The Hague, 1982.
10. Arsenault, R. J. and Taya, M., Thermal Residual Stress in Metal Matrix Composite, Acta Metall., Vol.35, pp. 651-659, 1987.
11. Cho, Y.-T., Tohgo, K. and Ishii, H., Load Carrying Capacity of a Broken Ellipsoidal Inhomogeneity, Acta Mater., Vol.45, No.11, pp. 4787-4795, 1997.