

〈論 文〉

방향분포를 가진 다상 금속복합재료의 탄성 및 전도해석에 관한 연구

정 현 조*

(1995년 4월 1일 접수)

Elasticity and Conduction Analysis of Multi-Phase, Misoriented Metal Matrix Composites

Hyunjo Jeong

Key Words : Elasticity(탄성), Conduction(전도), Orientation-Dependent Average Fields(방향의존 평균장), Concentration Factor(집중계수), Stiffness(강성도), Conductivity(전도도), PRMMC(입자보강 금속복합재료), Anisotropy(이방성)

Abstract

The effective elasticity and conduction of composite materials containing arbitrarily oriented multiple phases has been analyzed using the concept of orientation-dependent average fields and concentration factors. The analysis provided closed form expressions for the effective stiffnesses and conductivities. Under the prescribed boundary conditions, the concentration factors were evaluated by the equivalent inclusion principle, through which the interaction between various phases is approximated by the Mori-Tanaka mean-field approximation. SiC particulate(SiC_p) reinforced aluminum(Al) matrix composites were fabricated and their elastic constants and electrical conductivities were measured together with a careful study of their microstructure. The measured properties showed a systematic anisotropy and this behavior could be attributed to the preferred orientation of SiC_p. The theoretical model developed was applied to the computation of the anisotropic properties of these composites. Both two-phase and three-phase composites were considered based on the microstructural information. The SiC_p was modeled as an ellipsoid with planar random orientation distribution in the extruded Al/SiC_p composites. The effect of extraneous phase such as intermetallic compounds was also investigated.

1. 서 론

금속복합재료(metal matrix composites, MMC)는 연성과 인성을 가진 금속의 성질에 고강도, 고강성의 세라믹 성질이 결합되어 얻어지므로 물리적, 기

계적 성질이 뛰어나며, 따라서 높은 비강성, 비강도 및 열적 안정성이 요구되는 항공, 자동차와 다른 구조용 재료에 적합한 대체 재료로 각광받고 있다. 보강제로는 C, Si와 같은 원소뿐만 아니라 탄화물(SiC, B₄C), 질화물(Si₃N₄), 산화물(MgO, Al₂O₃, SiO₂) 등이 널리 사용되고 있다. 또한 보강재는 섬유모양의 연속적인 형태와 입자(particulate) 또는 휘스커(whisker)와 같은 불연속적인 것이 있을

*정회원, 국방과학연구소

수 있다. MMC에 관한 초기 연구는 주로 연속 섬유보강 복합재를 대상으로 하였으나, 최근에는 불연속 형태로 보강된 MMC에 대하여 많은 연구가 수행되고 있다. 그 이유로는, 특히 입자보강 금속 복합재(PRMMC)의 경우, 가격의 저렴함, 표준 야금공정의 사용용이, 미시구조와 성질을 재생할 수 있는 제작공정의 개발 등을 들 수 있다.⁽¹⁾

PRMMC는 단일합금으로는 얻을 수 없는 물리적, 기계적 성질을 갖는 구조용 재료로 개발할 수 있다. 다양한 기지재와 보강재로부터 낮은 밀도와 열팽창계수 그리고 높은 탄성계수, 열전도도와 인장강도를 얻을 수 있다. PRMMC의 응용과 관련하여 중요한 것은 구성요소의 성질, 부피분율 및 미시 기하학(모양, 방향 및 크기)으로부터 복합재료의 유효(거시적) 성질을 예측하는 것이다. PRMMC의 거시적 성질을 예측하기 위한 이론적 모델 가운데 자기일치법(self-consistent method)^(2,3)과 보다 최근의 모리-타나카방법(Mori-Tanaka method)⁽⁴⁾과 같은 유효매질법을 들 수 있다. 자기일치법에서는 단일입자를 무한체의 유효매질 속에 둬으로써 입자 사이의 상호작용을 근사적으로 고려하게 된다. 이와 대조적으로 모리-타나카방법에서 입자의 상호작용 효과는 “평균장 근사”(mean field approximation)에 의해 고려된다. 이 방법은 여러 학자들⁽⁵⁻⁸⁾에 의해 연구되었으며, 복합재의 탄성계수와 전도도에 대하여 유명한 Hashin-Shtrikman 한계와의 관계⁽⁹⁻¹¹⁾가 밝혀졌다.

PRMMC의 미시구조는 일반적으로 대단히 복잡하다. 보강입자의 다양한 크기 및 형상, 제조공정으로 인한 입자의 방향 이방성과 불균일 분포 그리고 금속간 화합물 또는 기공과 같은 제3상의 출현 등이 그 원인이다. 이와 같은 미시구조의 특성은 재료의 거시적 성질에 큰 영향을 미치며, 금속복합재료의 품질을 결정한다. 따라서 각 제작단계와 최종 제품에 대하여 미시구조의 특성, 모델에 기초한 거시적 성질, 비파괴평가 특성 사이의 상관관계를 확립하여 제품의 공정제어에 적용함으로써 품질이 더 나은 금속복합재료를 생산할 수 있다.⁽¹²⁻¹⁸⁾

본 논문의 목적은 임의의 방향분포를 갖는 N 상으로 구성된 복합재료의 유효 성질을 이론적 해석 모델을 통하여 구하고 그 결과를 탄화규소 입자(SiC_p) 보강 알루미늄(Al) 복합 압출재의 이방성 탄성계수와 전기전도도 계산에 적용하기 위함이다. 먼저 유효 탄성계수에 관한 식을 유도하기 위하여

방향의존 평균장과 변형도 집중계수를 도입한다. 변형도 집중계수는 Eshelby의 등가 계재물원리(equivalent inclusion principle)⁽¹⁹⁾를 이용하여 평가하며, 여기에 Mori-Tanaka의 평균장 이론을 사용하여 계재물 사이의 상호작용이 근사적으로 고려된 유효 탄성계수식을 유도한다. 특히 변형도 집중계수를 도입함으로써 복합재의 유효 성질 계산에 필요한 eigenstrain을 구체적으로 구하지 않고 직접 폐쇄형의 강성도 식을 얻을 수 있다. 모델에서 보강재를 타원체로 취급하므로써 여러 가지 형상의 영향을 관찰할 수 있고, 방향 평균을 통하여 입자의 방향분포를 고려할 수 있다.

탄성문제와 전도문제 사이에는 강한 개념적 관계가 있다.⁽²⁰⁾ 이들 사이의 유사성에 기초하여 정상상태 전도문제를 통해 복합재료의 유효 전도도 식을 유도한다. 본 논문에서는 전기전도문제를 다루었지만 이는 수학적으로 유사한 열전도문제에도 동일하게 적용될 수 있다.

2. 이론적 배경

2.1 대표 체적요소

균질한 등방성 기지재에 N -1상($N-1$ phases)로 보강되어 있는 다상 복합재료를 생각하자. 이 복합재료의 대표 체적요소 V 를 Fig. 1(a)와 같이 선정하여 균질한 경계조건하에 둘 때 이 요소는 복합재료의 거시적 성질을 나타내게 된다. 구성요소의 부피분율은 $\sum_{r=1}^N \nu_r = 1$ 을 만족하며, 여기서, $\nu_r = V_r/V$ 이며 $r=1$ 은 기지재를 가리킨다. 각 상에 속한 많은 양의 입자는 균질 등방성으로 같은 크기를 가지며, 그 모양은 타원체로 나타낼 수 있고 기지재와 완전하게 결합되어 있다고 가정한다. 또한 각 상은 고유한 방향분포를 가지며, 공간적으로 균일하게 분포하고 있다고 가정한다. 등방성 강성도와 전도도는 각각 C_{ijkl} 과 k_{ij} 로 표시하며, 역수는 ()⁻¹로 나타낸다.

Fig. 1(b)에서 전형적인 타원체 입자의 국소 좌표계는 x'_1, x'_2, x'_3 로, 고정좌표계는 x_1, x_2, x_3 로 표시한다. x'_1, x'_2, x'_3 에서 타원체의 크기는 각각 a_1, a_2, a_3 로 주어진다. 복합재 내에서 비균질물의 방향은 각 상에 대하여 정의된 방향분포함수 $\rho(\phi, \theta, \varphi)$ 에 의해 묘사되며, (ϕ, θ, φ) 은 Euler angle이다. m_{ij} 를 i -axis와 j -axis 사이의 direction cosine으로 정의하면, 이들 성분은 Fig. 1(b)로부터 다음

과 같이 표시된다.

$$[m] = \begin{bmatrix} \sin\theta\cos\phi & \sin\theta\sin\phi & \cos\theta \\ -\cos\theta\cos\phi\cos\varphi - \sin\phi\sin\varphi & -\cos\theta\sin\phi\cos\varphi + \cos\phi\sin\varphi & \sin\theta\cos\varphi \\ -\cos\theta\cos\phi\sin\varphi + \sin\phi\cos\varphi & -\cos\theta\sin\phi\sin\varphi - \cos\phi\cos\varphi & \sin\theta\sin\varphi \end{bmatrix} \quad (1)$$

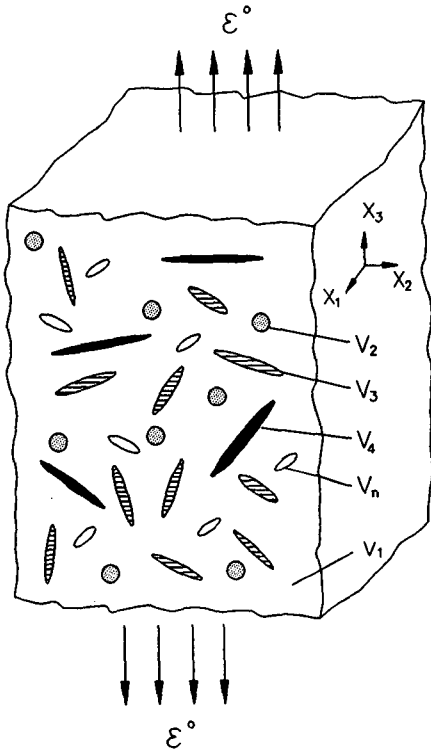


Fig. 1 (a) A representative volume element for analyzing the elasticity problem of a composite medium composed of matrix and N-1 phases

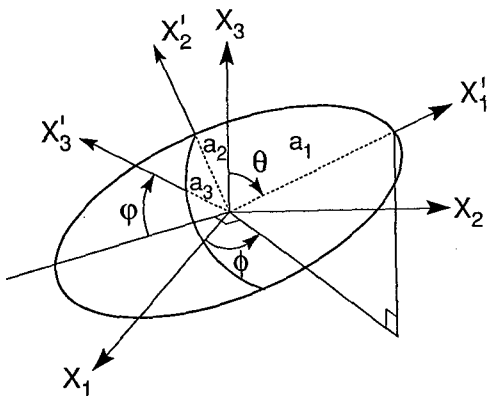


Fig.1 (b) The coordinate system for specifying a general state of the orientation of an ellipsoidal inclusion

2.2 유효 탄성계수 및 전도도

2.2.1 방향의존 평균장

체적요소 V 에 다음과 같은 균일한 변위 또는 강도(intensity) 경계조건을 적용시킨다. (Fig. 1(a) 참조)

$$\begin{aligned} u(S) &= \epsilon^0 x \\ \phi(S) &= -H^0 x \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, u 와 ϕ 는 체적 V 의 경계 S 에 부과한 변위벡터와 포텐셜벡터, ϵ^0 와 H^0 는 균일한 변형도와 강도를 나타낸다.

복합재료의 거시적 성질을 계산하기 위하여 변형도와 강도에 대한 전체장(overall fields)과 국부장(local fields) 개념을 이용하면 편리하다. 체적요소는 기지재와 N-1 상으로 구성되어 있으므로, 요소 전체의 체적평균(volume average)은 구성체의 체적평균으로부터 구할 수 있다. 각 상이 방향분포를 갖는 경우 방향평균(orientational average)에 의해 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\begin{aligned} \bar{\epsilon} &= \sum_{r=1}^N \nu_r \langle \epsilon_r \rangle \\ \bar{H} &= \sum_{r=1}^N \nu_r \langle H_r \rangle \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, overbar ($\bar{\quad}$)은 통상적인 체적평균을 나타내며, $\langle \quad \rangle$ 은 해당 양의 방향평균으로서 다음과 같이 정의된다.

$$\langle \epsilon \rangle = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^\pi \int_0^\pi \epsilon \rho(\theta, \phi, \varphi) \sin\theta d\theta d\phi d\varphi}{\int_0^{2\pi} \int_0^\pi \int_0^\pi \rho(\theta, \phi, \varphi) \sin\theta d\theta d\phi d\varphi} \quad (4)$$

H 에 대한 방향평균도 마찬가지로 정의할 수 있다. 더우기 ϵ 과 H 는 텐서변환에 의해 ϵ' 과 H' 으로부터 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \epsilon_{ij} &= m_{ki} m_{lj} \epsilon'_{kl} \\ H_i &= m_{ji} H'_j \end{aligned} \quad (5)$$

응력과 전류밀도에 대한 체적평균도 같은 방법으로 표시할 수 있다.

$$\begin{aligned} \bar{\sigma} &= \sum_{r=1}^N \nu_r \langle \sigma_r \rangle \\ \bar{q} &= \sum_{r=1}^N \nu_r \langle q_r \rangle \end{aligned} \quad (6)$$

2.2.2 유효 탄성계수 및 전도도

각 상에 속한 입자의 응력-변형도와 전류밀도-강도 관계를 알면, 각 상 전체에 대한 평균 응력-변형도와 평균 전류밀도-강도는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\langle \sigma_r \rangle = C_r \langle \epsilon_r \rangle \quad \langle q_r \rangle = k_r \langle H_r \rangle \quad (7)$$

각 상에 작용하는 평균 변형도와 강도를 구하기 위하여 다음과 같이 평균 변형도 집중계수와 평균 강도 집중계수를 도입한다.

$$\begin{aligned} \langle \epsilon_r \rangle &= \langle A_r \rangle \epsilon_0 \\ \langle H_r \rangle &= \langle a_r \rangle H_0 \end{aligned} \quad (8)$$

복합재의 유효 강성도 및 전도도 텐서는 다음과 같이 정의되므로

$$\begin{aligned} \bar{\sigma} &= C \epsilon_0 \\ \bar{q} &= k H_0 \end{aligned} \quad (9)$$

식(6), (8) 및 (9)으로부터

$$\begin{aligned} C &= \sum_{r=1}^N \nu_r C_r \langle A_r \rangle \\ k &= \sum_{r=1}^N \nu_r k_r \langle a_r \rangle \end{aligned} \quad (10)$$

또한 식(3)와 (8)으로부터 다음의 관계식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \sum \nu_r \langle A_r \rangle &= I \\ \sum \nu_r \langle a_r \rangle &= i \end{aligned} \quad (11)$$

여기서, I 는 4계 단위텐서, i 는 2계 단위텐서(벡터)를 나타낸다. 식(11)을 (10)에 사용하면, 유효 강성도와 전도도에 관한 식을 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\begin{aligned} C &= C_1 + \sum_{r=2}^N \nu_r (C_r - C_1) \langle A_r \rangle \\ k &= k_1 + \sum_{r=2}^N \nu_r (k_r - k_1) \langle a_r \rangle \end{aligned} \quad (12)$$

식(12)에서 복합재료의 유효 강성도와 전도도는 각 상에 대한 평균 변형도와 강도 집중 계수를 알면 구할 수 있다. 이 계수들은 다음 절에 설명한 바와 같이 Mori-Tanaka의 평균장 이론으로부터 근사적으로 구할 수 있다.

2.2.3 변형도 집중계수

이제 Fig. 1(a)과 같은 체적요소의 경계에서 균일한 변형도 ϵ^0 에相当하는 변위가 작용하는 경우를

생각하자. 요소내에 단일 비균질물이 존재하는 경우, 비균질물 주위의 기지재는 근사적으로 이와 동일한 응력 및 변형도를 받는 것으로 간주할 수 있다. 그러나, 많은 양의 비균질물이 존재하면 기지재의 평균장은 교란을 받게 된다. 또한 비균질물들은 이러한 상태의 기지재에 놓여 있으므로 추가적인 교란의 영향을 받는다. 여기서, 구하고자 하는 것은 각 상의 비균질물에 작용하는(방향) 평균장을 요소의 경계에서 가해진 변형도의 함수로 구하는 것이다.

Mori-Tanaka 평균장 이론에서 각 상의 비균질물들은 기지재의 평균장과 동일한 ϵ_1 (또는 σ_1)이 무한 경계에 작용하는 기지재 내에 놓여 있는 단일 비균질물(inhomogeneous inclusion)로 간주한다. Eshelby의 단일 계재물에 대한 해⁽¹⁹⁾로부터 계재물이 타원체인 경우 이러한 단일 비균질물에 작용하는 국부장은 균일하다.

요소의 경계에서 균일한 변형도 ϵ^0 에相当하는 변위가 작용할 때, 기지재에 작용하는 평균 변형도를 ϵ_1 으로 표시하면 r 상의 비균질물에는 ϵ_1 에 추가로 교란 변형도 ϵ_r^{pt} 가 작용하게 된다. 즉,

$$\epsilon'_r = \epsilon'_1 + \epsilon_r^{pt} \quad (13)$$

또 r 상의 비균질물에 작용하는 응력은 응력-변형도관계와 Eshelby의 등가 계재물원리(equivalent inclusion principle)로부터 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\begin{aligned} \sigma'_r &= C_r \epsilon'_r \\ &= C_1 (\epsilon'_r - \epsilon_r^{pt}) \end{aligned} \quad (14)$$

여기서, ϵ_r^{pt} 는 transformation strain(또는 eigen-strain)으로서 교란 변형도와 다음의 관계를 가진다.

$$\epsilon_r^{pt} = S_r \epsilon_r^{*} \quad (15)$$

여기서, S 는 Eshelby tensor⁽²¹⁾로서, 등방성 기지재의 경우 비균질물의 형상과 기지재의 성질에 좌우된다.

식(14)으로부터 다음의 관계를 구할 수 있으며, 여기서, $()^{-1}$ 은 역수를 뜻한다.

$$\epsilon_r^{*} = -(C_1)^{-1} (C_r - C_1) \epsilon'_r \quad (16)$$

식(16)을 식(13)에 대입하고 식(15)을 사용하면

$$\epsilon'_r = T'_r \epsilon'_1 \quad (17)$$

여기서,

$$T'_r = [I + S_r(C_r - C_1)]^{-1} \quad (18)$$

비균질물의 평균응력은 식 (17)의 양변에 방향평균을 취하므로써 구할 수 있다.

$$\langle \epsilon_r \rangle = \langle T_r \rangle \epsilon_1 \quad (19)$$

텐서변환을 이용하여 고정좌표계의 텐서 T 는 국소좌표계의 T' 으로부터 구할 수 있다. 즉,

$$T_{ijkl} = m_{mi} m_{nj} m_{ok} m_{pl} T'_{mnop} \quad (20)$$

또한 방향평균 $\langle T \rangle$ 는 식(4)의 정의로부터 구할 수 있다. T' 은 일반적으로 비대칭이며 아래의 성질을 갖는다.

$$T'_{ijkl} = T'_{jikl} = T'_{ijlk} \quad (21)$$

요소의 경계에 ϵ^0 에 상당하는 변위가 작용하는 경우, $\epsilon^0 = \sum_{r=1}^N \nu_r \langle \epsilon_r \rangle$ 이므로 기지재의 평균 변형도는

$$\epsilon_1 = \left(\sum_{r=1}^N \nu_r \langle T_r \rangle \right)^{-1} \epsilon^0 \quad (22)$$

식(22)를 식(19)에 대입하면, 비균질물의 평균 변형도는 다음과 같이 주어지므로

$$\langle \epsilon_r \rangle = \langle T_r \rangle \left[\sum_{r=1}^N \nu_r \langle T_r \rangle \right]^{-1} \epsilon^0 \quad (23)$$

평균 변형도 집중계수는 다음과 같이 얻어진다.

$$\langle A_r \rangle = \langle T_r \rangle \left[\sum_{r=1}^N \nu_r \langle T_r \rangle \right]^{-1} \quad (24)$$

식(12)와 (24)로부터 M-T 방법에 의한 유효 강성도는

$$C = C_1 + \left[\sum_{r=2}^N \nu_r (C_r - C_1) \langle T_r \rangle \right] \left[\nu_1 I + \sum_{r=2}^N \nu_r \langle T_r \rangle \right]^{-1} \quad (25)$$

2.2.4 평균 강도집중계수

탄성문제에서의 유사하게 전도문제에 대한 경계조건으로 요소의 경계에서 균일한 강도 H^0 에 상당하는 포텐셜이 작용할 때, 기지재에 작용하는 평균 강도를 H_1 으로 표시하면 r 상의 비균질물에는 H_1 에 추가로 교란강도 $H^{p'}$ 가 작용하게 된다. 즉,

$$H'_r = H_1 + H^{p'} \quad (26)$$

따라서 r 상의 비균질물에 작용하는 전류 밀도는 전

류밀도-강도관계와 정상상태 전도도문제에 대한 Eshelby의 등가 계재물원리⁽²²⁾로부터

$$q'_r = k_r H'_r = k_1 (H'_r - H^{p'}) \quad (27)$$

여기서, $H^{p'}$ 는 eigenintensity로서 교란 변형도와 다음의 관계를 가지며, s 는 Eshelby tensor로서 등방성 기지재의 경우 타원체 비균질물의 형상비의 함수이다.⁽²²⁾

$$H^{p'} = s_r H^{p'} \quad (28)$$

식(27)으로부터 다음의 관계를 구할 수 있으며, 여기서 ()⁻¹은 역수를 뜻한다.

$$H^{p'} = -(k_1)^{-1} (k_r - k_1) H'_r \quad (29)$$

식(29)을 식(26)에 대입하고 식(28)을 사용하면

$$H'_r = t'_r H_1 \quad (30)$$

여기서

$$t'_r = [i + s_r (k_1)^{-1} (k_r - k_1)]^{-1} \quad (31)$$

비균질물의 평균 강도는 식(30)의 양변에 방향 평균을 취하므로써 구할 수 있다.

$$\langle H_r \rangle = \langle t_r \rangle H_1 \quad (32)$$

텐서변환을 이용하여 고정 좌표계의 텐서 t 는 국소좌표계의 t' 으로부터 구할 수 있다. 즉,

$$t_{ij} = m_{ki} m_{lj} t'_{kl} \quad (33)$$

또한 방향평균 $\langle t \rangle$ 는 식(4)의 정의로부터 구할 수 있다. t' 은 일반적으로 비대칭성을 갖는다.

요소의 경계에 H^0 에 상당하는 포텐셜이 작용하는 경우, $H^0 = \sum_{r=1}^N \nu_r \langle H_r \rangle$ 이므로 기지재의 평균 강도는

$$H_1 = \left[\sum_{r=1}^N \nu_r \langle t_r \rangle \right]^{-1} H^0 \quad (34)$$

식(34)를 식(32)에 대입하면, 비균질물의 평균 강도는 다음과 같이 주어지므로

$$\langle H_r \rangle = \langle t_r \rangle \left[\sum_{r=1}^N \nu_r \langle t_r \rangle \right]^{-1} H^0 \quad (35)$$

평균강도 집중계수는 다음과 같이 얻어진다.

$$\langle a_r \rangle = \langle t_r \rangle \left[\sum_{r=1}^N \nu_r \langle t_r \rangle \right]^{-1} \quad (36)$$

식(12)와 (36)로부터 M-T 방법에 의한 유효 전도도는

$$k = k_1 + \left[\sum_{r=2}^N \nu_r \langle k_r - k_1 \rangle \langle t_r \rangle \right] \left[\nu_1 + \sum_{r=2}^N \nu_r \langle t_r \rangle \right]^{-1} \quad (37)$$

3. 입자보강 금속복합재료에의 적용

3.1 시편

실험에 사용된 시편은 2124Al 합금에 0~30%의 SiC 입자(SiC_p)로 보강된 금속복합재료로서 분말야금과 압출공정으로 제조되었다. (Table 1 참조) 두께 약 1.2cm로 압출된 복합재는 T4 열처리 하였다. 이들 재료는 직교이방성으로 가정하였고, 세개의 대칭축은 압출방향을 x₁, 압출면내의 x₁과 직각방향을 x₂, 두께방향을 x₃로 선택하였다. 따라서 x₁-x₂면은 압출면이며 x₁-x₃, x₂-x₃면은 압출면에 수직인 면이 된다. 주사전자현미경(SEM)을 이용하여 세 대칭면에서 미시구조 특성을 분석하였다. 미시구조 분석에서는 SiC_p, 금속간 화합물 및 기공의 부피분율 평가에 초점을 맞추었다. 또한 SiC_p의 크기, 형상비 및 방향 분포를 구하였다.

3.2 초음파 시험

직교이방성 재료에 대한 평면 탄성파의 전파특성에 기초하여 수침, 투과방식으로 수직 및 경사면 입사법을 이용하여 초음파의 위상속도를 측정하고 9개의 독립강성도 성분 C_{ij}를 구하였다.⁽²³⁾ 수침, 경사면 입사시험시의 굴절과 가능한 에너지 이탈을 고려하여, 길이×폭×두께=4.0 cm×1.5 cm×1.2 cm 크기의 직육면체 시편 두개씩을 각 면이 재료의 대칭면과 평행하도록 절단하였다. 시편의 표면은 연마하여 5 μm 이내로 서로 평행하도록 하였으며 시편의 밀도는 Archimedes의 방법으로 구하였다. 사용한 탐촉자는 중심주파수 5 MHz, 직경이 0.63 cm였다.

3.3 전기전도도 측정

와전류시험방법으로 시편의 전기전도도를 측정하기 위하여 Notec NDT-16 eddyscope와 10 kHz (SP-10A) 탐촉자를 사용하였다. 압출 복합재료부터 시편을 절단하여 평행육면체 형태로 가공하고, 각 면은 압출면과 이에 수직인 두 면과 나란하게 하였다. 주어진 기지 Al 합금과 SiC_p 부피분율의 복합재료부터 각각 2~3개의 시편을 준비하였다.⁽¹⁵⁾

와전류 코일의 원형 대칭성때문에 시편의 표면 근방에서 측정되는 전도도는 그 측정면내의 각 방향의 평균 값으로서 평면 전도도를 나타낸다. x₁-x₂, x₁-x₃ 및 x₂-x₃ 세 면에서 평면 전도도를 측정하였다. 각 면에서 3~5회 반복 측정하여 평균치와 표준편차를 구하였다. 표준편차는 0.5% IACS 이하로 나타났다.

4. 실험결과

4.1 미시구조의 특성

Fig. 2는 x₁-x₂ 및 x₂-x₃면에서 2124 Al/30% SiC_p 압출 복합재의 전형적인 미시구조를 보여주고 있다. 각 시편에서 SiC_p의 평균 크기는 2~4 μm, 평균 형상비는 2.6~3.4였다.

Fig. 2(a)를 살펴보면 x₁-x₂면(압출면)에서 SiC_p의 모양은 비교적 둥근데 반하여 x₂-x₃면에서는 더 좁고 길게 늘어난 모양을 보여주고 있다. [Fig. 2(b)] 더우기, x₁-x₂면에서 SiC_p의 방향은 거의 랜덤하며 아주 적은 양의 SiC_p가 압출방향으로 향하고 있는 것처럼 보인다. 그러나, x₂-x₃면에서는 많은 양의 SiC_p가 면내 횡방향(x₂)으로의 특정방향분포를 보이고 있다. x₁-x₃면에서의 SiC_p의 크기와 형상비는 모두 x₂-x₃면에서와 유사한 경향을 보였다. 그러

Table 1 Microstructural features of SiC_p reinforced Al metal matrix composite extrusions

Base alloy	Billet number	SiC _p (%)	Intermetallics (%)	Porosity (%)
2124	PE-2600	0	7.4	0
2124	PE-3025	20	7.6	0
2124	PE-2404	25	4.4	0
2124	PE-2229	25	10.0	0
2124	PE-2488	30	6.7	1.4

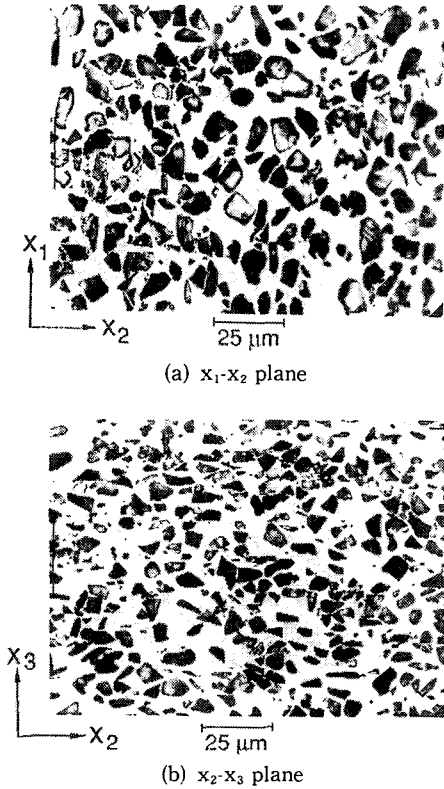


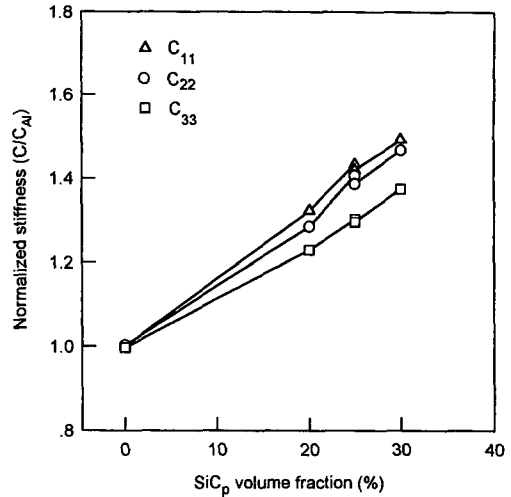
Fig. 2 Photomicrographs of 30% SiC_p/2124 Al composite

나, x_1 - x_3 면에서 대부분의 SiC_p는 x_1 방향으로 향하고 있음이 관찰되었다. 따라서 거시적으로 대부분의 SiC_p는 압출면상에 누워 있으며 압출면 내에서는 거의 랜덤한 방향성을 갖는 형태의 평면적 배열이 지배적임을 가정할 수 있다. 이와 같은 SiC_p의 비등방적 방향분포 특성은 영상분석을 통해서 또한 확인되었다.⁽¹⁶⁾

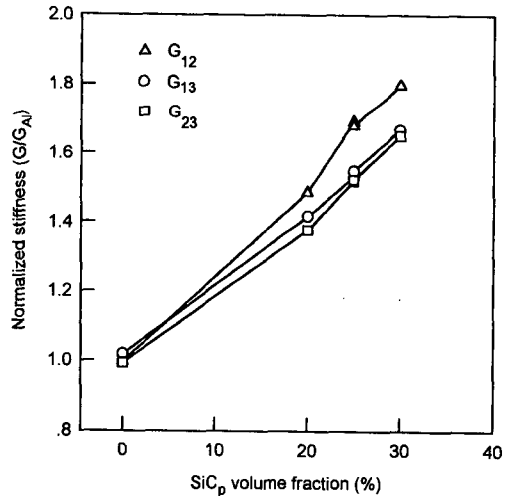
기저 Al 합금을 포함하여 모든 복합재에는 금속간 화합물(intermetallic compounds)이 포함되어 있었다.⁽¹⁵⁾ 금속간 화합물의 부피분율은 약 4.4~10%로 광범위하게 나타났다. SEM 분석에서 금속간 화합물의 주성분은 CuAl₂로 밝혀졌다. 기공은 30% SiC_p 보강 시편에서 관찰되었으며 그 양은 약 1.4%였다. (Table 1 참조)

4.2 초음파시험

초음파의 속도측정으로부터 구한 탄성계수의 측정결과를 Fig. 3에 도시하였다. 각 시편의 탄성계수는 보강되지 않은 시편(기본 Al 합금)의 탄성계



(a) Components C₁₁, C₂₂ and C₃₃



(b) G₁₂, G₁₃ and G₂₃

Fig. 3 The observed anisotropy of stiffnesses

수 값으로 나누어 주었다. Fig. 3에 보인 바와 같이, SiC_p의 탄성계수는 기본 Al 합금보다 더 크므로, SiC_p 부피분율이 증가할수록 유효 탄성계수도 증가하고 있다. 각 성분에 대하여 더 자세히 살펴 보면 압출방향으로의 강성성분 C₁₁이 가장 큰 값을 가지며 두께방향성분 C₃₃가 가장 낮다. SiC_p 부피분율이 증가할수록 C₁₁ ≈ C₂₂의 경향을 보이고 있다. [Fig. 3(a)] 따라서 Young 상수 E₁₁, E₂₂ 및 E₃₃도 이와 유사한 비등방적 거동을 보였다. 이러한 경향은 전단탄성계수에서도 나타나고 있다. (전단강성 C_{ii}, i=4, 5, 6는 전단계수와 C₄₄=G₂₃, C₅₅=

G_{13} , $C_{66}=G_{12}$ 의 관계를 가진다) 따라서 압출면에서의 전단계수 G_{12} 가 가장 크며, 다른 수직한 두 면에서는 이보다 작으며 $G_{13} \approx G_{23}$ 이다. [Fig. 3(b)]

이와 반대로 보강되지 않은 시편에서의 탄성계수는 서로 거의 같은 값을 가진다. SiC_p 보강 복합재료에서 이와 같은 탄성계수의 이방성은 미구조의 분석에서 살펴 본 것처럼 SiC_p 의 특정방향분포에 기인하며, 방향 분포의 이방성과 잘 일치한다.

금속간 화합물이 탄성계수에 미치는 영향은 동일한 양의 SiC_p 로 보강되었으나, 금속간 화합물의 양이 서로 다른 PE-2404와 PE-2229 시편을 통해 살펴볼 수 있다. PE-2229 시편이 PE-2404보다 약 2배 이상 높은 금속간 화합물을 함유하고 있으나, 두 시편의 탄성계수 값은 거의 같다. 따라서 금속간 화합물이 탄성계수에 미치는 영향은 크지 않은 것으로 보인다.

4.3 와전류시험

와전류시험으로부터 측정된 전도도에 대한 결과가 Fig. 4에 나와 있다. 각 시편의 전도도는 보강되지 않은 시편(기본 Al 합금)의 전도도 값으로 나누어 주었다. SiC_p 의 전기전도도는 기본 Al 합금보다 훨씬 작기 때문에 SiC_p 의 양이 증가할수록 복합재의 전도도는 감소하고 있다. x_1-x_2 면에서의 전도도 k_{1-2} 가 x_1-x_3 및 x_2-x_3 면에서의 전도도 k_{1-3} , k_{2-3} 보다 더 크다. 또한 x_1-x_3 면과 x_2-x_3 면에서 전도도의 크기는 비슷하다. 따라서 압출 복합재는 이방

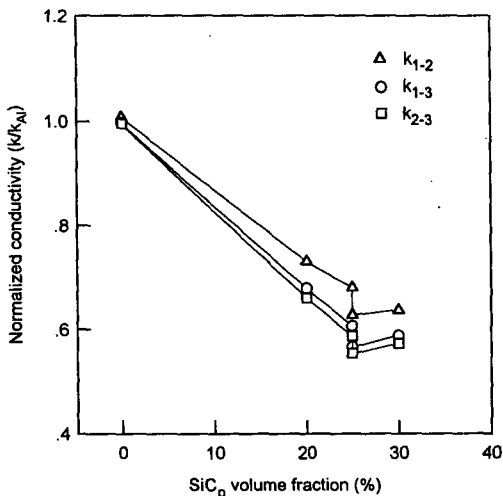


Fig. 4 The observed anisotropy of electrical conductivities on the three symmetry planes

성 전도도 거동을 보이고 있다. 즉, 압출면(x_1-x_2 면)에서의 전도도는 다른 수직한 면(x_1-x_3 및 x_2-x_3 면)에서의 전도도보다 더 크다. 이러한 전도도의 이방성은 탄성계수에서 관찰된 이방성과 유사하다. 또한 SiC_p 가 보강되지 않은 기본 합금(즉, 2124 Al/0% SiC_p)의 경우 전도도의 이방성은 최소임을 알 수 있다.

탄성계수에서와 같이 이방성 전도도도 SiC_p 의 비등방적 방향분포와 연관시킬 수 있다. x_1-x_2 면과 x_2-x_3 (또는 x_1-x_3)면 사이의 상이한 SiC_p 방향분포는 이들 면에서 다른 전도도를 유발시키고 있다. 더우기 x_2-x_3 면과 x_1-x_3 면 사이의 비슷한 SiC_p 방향분포로 인하여 이들 면에서 전도도는 비슷한 값을 보이고 있다.

금속간 화합물이 전도도에 미치는 영향은 PE-2404와 PE-2229 시편을 통해 살펴볼 수 있다. PE-2229 시편이 PE-2404보다 약 2배 이상 높은 금속간 화합물을 함유하고 있으며, 전도도 값의 최대 차이는 약 8%로서 PE-2229가 더 낮다. 따라서 탄성계수의 경우와는 달리 금속간 화합물이 전도도에 큰 영향을 미치는 것으로 보인다.

5. 모델 예측 및 고찰

5.1 탄성계수 및 전기전도도 계산

Al/ SiC_p 복합재의 유효 탄성계수 및 전도도 예측을 위하여 3절에서 제시한 다상 복합재료 모델을 적용할 때, 각 상의 성질 뿐만 아니라, 기하학적 특성(부피분율, 모양 및 방향분포)에 대한 지식이 필요하다. 복합재료의 미구조분석을 통하여 SiC_p 외에 금속간 화합물과 기공이 함유되어 있음이 밝혀졌다. 기공은 30% SiC_p 보강 복합재 시편에서만 존재하고 그 양이 크지 않으므로 모델 예측에서 기공의 영향은 고려하지 않는다. 금속간 화합물은 비보강시편과 보강시편에서 비교적 고르게 존재한다. 그러나, 앞 절의 실험결과를 통하여 살펴 본 바와 같이 금속간 화합물이 탄성계수에는 거의 영향을 미치지 않는 것으로 나타났으며, 전기전도도에는 상당한 영향을 미치는 것으로 나타났다. 따라서 탄성계수의 예측을 위하여 Al 기본 합금과 SiC_p 로 구성된 2상 모델을, 전도도 예측을 위하여 2상 모델과 여기에 금속간 화합물이 제 3상으로 추가된 3상 모델을 각각 고려하기로 한다.

N상에 대한 탄성계수 식(25)는 2상 복합재에 대

하여 다음과 같이 된다.

$$C = C_1 + \nu_2(C_2 - C_1)\langle T_2 \rangle [\nu_1 I + \nu_2 \langle T_2 \rangle]^{-1} \quad (38)$$

또한 전도도 식(37)은 2상 복합재와 3상 복합재에 대하여 다음 식으로 각각 표시할 수 있다.

$$k = k_1 \left(1 + \frac{\nu_2 \left(\frac{k_2}{k_1} - 1 \right) \langle t_2 \rangle}{\nu_1 + \nu_2 \langle t_2 \rangle} \right) \quad (39)$$

$$k = k_1 \left(1 + \frac{\nu_2 \left(\frac{k_2}{k_1} - 1 \right) \langle t_2 \rangle + \nu_3 \left(\frac{k_3}{k_1} - 1 \right) \langle t_3 \rangle}{\nu_1 + \nu_2 \langle t_2 \rangle + \nu_3 \langle t_3 \rangle} \right) \quad (40)$$

여기서, 아래첨자 1, 2 및 3은 Al 기본합금, SiC_p 및 금속간 화합물을 각각 나타낸다.

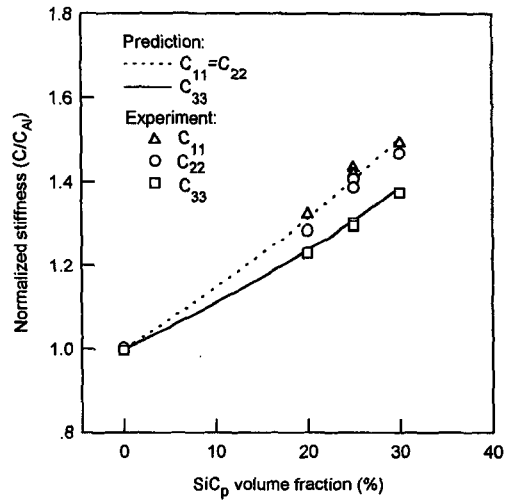
계산에 사용한 기본 Al 합금, SiC_p 및 금속간 화합물에 대한 탄성계수와 전도도 값이 Table 1에 수록되어 있다. Al 기본합금의 탄성계수 값은 초음파 속도로부터 구한 비모강 시편에 대한 평균값이며, SiC_p의 탄성계수는 참고문헌⁽²⁴⁾로부터 취하였다. Table 1의 CuAl₂는 2124 Al 계열의 복합재 시편에서 확인한 금속간 화합물의 주요 성분이다. 복합재 구성요소의 전도도 값은 참고문헌으로부터 취하였다.⁽²⁵⁻²⁷⁾

모델에서 각 상의 모양은 타원체로 대표되는데, 탄성문제에서 Eshelby tensor S는 등방성 지지재의 Poisson비와 타원체의 세 축상의 크기 a₁, a₂, a₃의 함수로 주어진다.⁽²¹⁾ 전도도 문제에서 텐서 s는 타원체의 크기 a₁, a₂, a₃만의 함수이다.⁽²²⁾

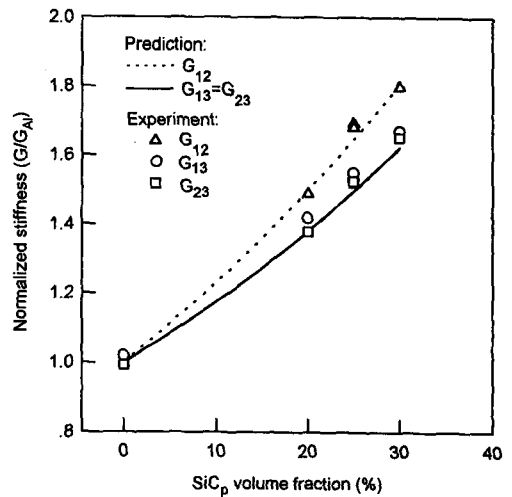
타원체 입자의 방향분포를 묘사하기 위해 3개의 각 (φ, θ, φ)가 필요하며, 각 상에 속한 입자들이 각도 범위 0 < φ < α, 0 < θ < β와 0 < φ < γ 사이에 위치할 확률은 방향분포함수(orientation distribution function) ρ_r(φ, θ, φ)에 의해 규정된다. 또한 ODF로 방향평균을 취하므로써 유효 <T_r>와 <t_r>가 구해진다. 미시구조 분석에 기초하여 SiC_p와 금속간 화합물은 (a₁, a₂, a₃) = (3, 1.5, 0.5)의 타원체로 가정하였다. SiC_p의 ODF를 근사적으로 구하기 위하여 먼저 타원체 SiC_p의 장축 x'₁는 압출면(x₁-x₂) 위에 누어 있다고 가정한다. (즉, [m] 매트릭스에서 θ = π/2) 각도 φ는 장축 x'₁축의 x₁축에 대한 방향을 정의하며, 각도 φ는 x'₂-x'₃면의 x₃축에 대한 회전을 나타낸다. 각도 φ와 φ에 대한 방향분포는 모두 랜덤으로 가정하였다. 마찬가지로 금속간 화합물에 대한 방향분포를 정의할 수 있다.

이러한 ODF의 선택으로 ρ₂(φ, φ) = ρ₃(φ, φ) = constant이며, 복합재의 거시적 성질은 압출면이 등방성 면인 횡방향 등방성(transversely isotropic)이 된다. 식(4)의 적분구간은 0 < φ, φ < 2π이다.

와전류방법으로 측정된 전도도는 평면 전도도이므로 식(39)와 (40)으로부터 x₁-x₂, x₁-x₃ 및 x₂-x₃면에 대한 평면 전도도를 계산할 필요가 있다. 여기서 평면 전도도는 한 면을 정의하는 서로 수직인 두 방향의 전도도의 산술평균으로 정의하였다. 예를 들면, x₁-x₂면에서의 전도도 k₁₋₂는 k₁₁과 k₂₂의



(b) G₁₂, G₁₃ and G₂₃



(a) C₁₁, C₂₂ and C₃₃

Fig. 5 Comparison of predicted stiffnesses and ultrasonic measurement results

Table 2 Stiffnesses and conductivities used in the theoretical calculations

Material	C_{11} (GPa)	C_{44} (GPa)	Conductivity (%IACS)
2124 Al alloy	113.5	27.3	34
SiC_p	491.5	196	0.086
CuAl_2	-	-	22.7

산술 평균이다. 따라서 3개의 평면 전도도는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$k_{1-2} = \frac{1}{2}(k_{11} + k_{22}) \quad (41)$$

$$k_{1-3} = k_{2-3} = \frac{1}{2}(k_{11} + k_{33}) \quad (42)$$

5.2 탄성계수 비교

Fig. 5에 모델에 의해 계산한 탄성계수의 값과 초음파시험에서 측정된 값을 비교하여 도시하였다. 계산과 실험에서 구한 각 시편의 탄성계수 값은 Table 2의 기본 Al 합금의 탄성계수 값으로 나누어 주므로써 무차원화시켰다. 모델 예측에서 SiC_p 에 대한 횡방향 등방성 방향분포의 가정으로 인하여 결과적인 복합재료의 유효 탄성계수도 $C_{11} = C_{22}$, $G_{13} = G_{23}$ 로서 횡방향 등방성을 나타내고 있다. 이들 그림에서와 같이 모든 시편에서 예측치와 실험치는 5% 이내로 잘 일치하고 있다.

5.3 전도도 비교

5.3.1 2상 모델

Fig. 6에 2상 모델에 의해 이론적으로 계산한 평면 전도도 값을 실험값과 비교하였다. 계산과 실험에서 구한 각 시편의 전도도 값은 Table 2의 기본 Al 합금의 전도도 값으로 나누어 주므로써 무차원화 시켰다. Fig. 6로부터 2상 모델은 각 시편에서 이방성 전도도 거동을 비교적 잘 나타내고 있으며, 실험값과는 약 9% 이내로 일치함을 알 수 있다. 예측값과 실험값 사이에 이와 같이 큰 차이가 발생하는 이유는 먼저 2상 모델에서는 금속간 화합물의 영향을 고려하지 않았기 때문이다. 실험결과에서 확인된 바와 같이 금속간 화합물은 전도도에 큰 영향을 미치며 다음의 3상 모델에 의한 결과 비교에서와 같이 금속간 화합물의 영향을 고려하므로써 더 향상된 결과를 얻을 수 있다. 다음으로 각 시편

에서 SiC_p 와 금속간 화합물 이외의 확인되지 않은 요소들이 복합재의 전도도에 미치는 영향을 들 수 있다. 이러한 경향은 30% SiC_p 보강 시편인 PE-

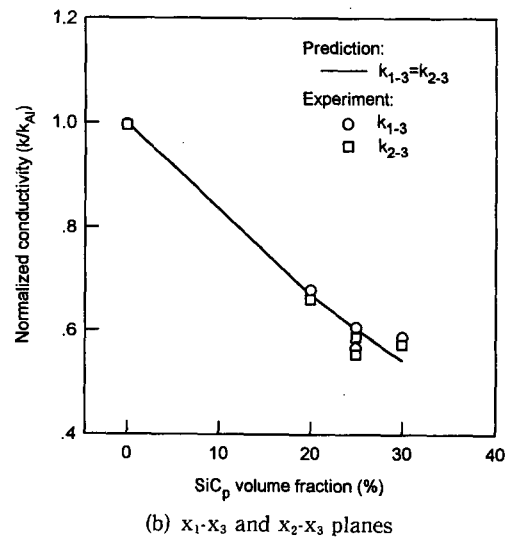
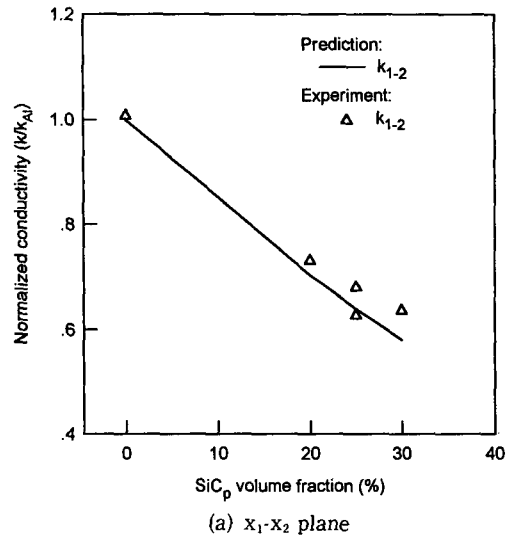


Fig. 6 Comparison of planar conductivities of 2 phase model and eddy current measurements

2488에서 가장 현저하다. 이 시편은 비보강 시편과 비슷한 양의 금속간 화합물을 함유하고 있으며, 더 두기 기공까지 내재하는 데도 비교적 높은 값의 전도도가 측정되었다.

5.3.2 3상 모델

금속간 화합물이 전도도에 미치는 영향을 평가하기 위하여 3상 모델을 적용하였다. 복합재 시편에 대하여 앞에서 언급한 절차에 따라 x_1-x_2 , x_1-x_3 및 x_2-x_3 면에 대한 유효 전도도를 계산하고 그 결과를

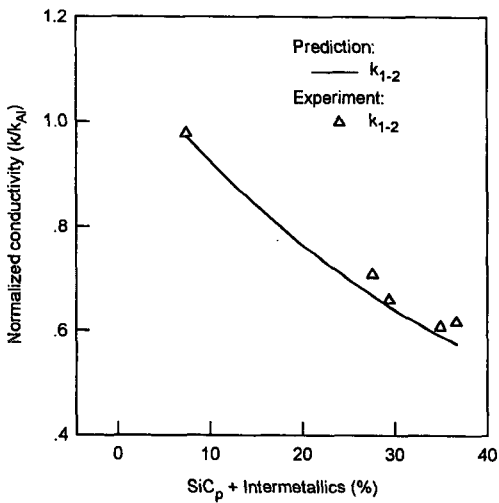
SiC_p 와 금속간 화합물의 합인 함수로 Fig. 7에 도시하였다. 2상 모델과 비교할 때 3상 모델에 의한 예측값은 실험결과와 전반적으로 더 잘 일치함을 알 수 있다. 일반적으로 금속간 화합물의 영향은 금속간 화합물과 기지 Al 합금의 전도도 비가 1에서 멀어질수록 그리고 금속간 화합물의 양이 큰 경우에 더 뚜렷함을 알 수 있다. 결론적으로 이러한 결과는 3상 해석 모델이 SiC_p 보강재 외에 금속간 화합물과 같은 상의 영향을 설명하는데 효과적임을 시사해 주고 있다.

6. 결 론

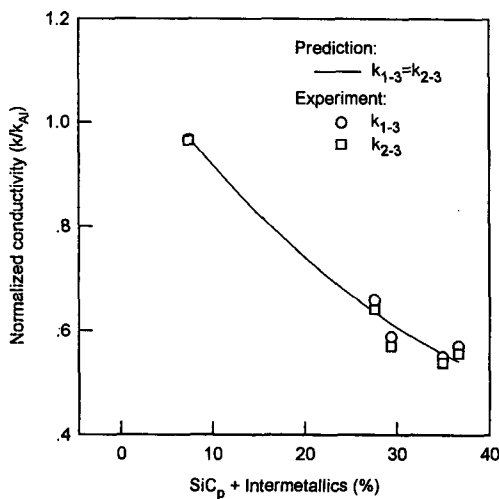
방향분포를 갖는 다상 복합재료의 탄성 및 전도 문제 해석을 위하여 방향의존 평균장과 집중계수의 개념을 사용하였다. 식의 유도과정에서 변형도집중계수와 강도집중계수를 정의하므로써 eigenstrain나 eigenintensity의 계산없이 복합재의 유효 강성도와 전도도 계산을 위한 폐쇄형의 텐서식을 개발하였다. 변형도 및 강도집중계수는 주어진 경계조건 하에서 Mori-Tanaka의 평균장 이론과 Eshelby의 등가 계재물원리를 사용하여 근사적으로 구하였다. 개발한 식은 압출공정으로 제조된 SiC_p 보강 Al 복합재료의 이방성 탄성계수와 전도도 예측에 적용하였다. 초음파속도와 와전류방법으로 각각 측정된 복합재료의 탄성계수와 전기전도도는 체계적인 이방성을 보였다. 이러한 유효 성질의 이방성은 SiC_p 의 특정방향분포와 관계가 있는 것으로 나타났다. 미시구조 분석에 기초하여 Al 합금과 SiC_p 로 구성된 2상 모델과 여기에 금속간 화합물이 추가된 3상 모델에 의한 예측값을 실험값과 비교하였다. SiC_p 의 형상을 타원체로 가정하고 압출면내에서 평면방향분포를 고려하므로써 예측값은 거시적 이방성을 잘 나타내 주었다. 금속간 화합물은 복합재의 유효 전도도에 큰 영향을 미쳤으며, 따라서 3상 모델에 의한 전도도 예측값은 2상 모델보다 실험값과 더 잘 일치하였다.

참고문헌

(1) Ibrahim, I. A., Mohamed, F. A. and Lavernia, E. J., 1991, "Particulate Reinforced Metal Matrix Composites-A Review," *Journal of Materials Science*, Vol. 26, pp. 1137~1156.



(a) x_1-x_2 plane



(b) x_1-x_3 and x_2-x_3 planes

Fig. 7 Comparison of planar conductivities of 3-phase model and eddy current measurements

- (2) Hill, R., 1965, "A Self-Consistent Mechanics of Composite Materials," *J. Mech. Phys. Solids*, Vol. 13, pp. 213~222.
- (3) Hashin, Z., 1968, "Assesment of the Self Consistent Scheme Approximation: Conductivity of Particulate Composites," *J. Composite Materials*, Vol. 2, pp. 284~300.
- (4) Mori, T. and Tanaka, K., 1973, "Average Stress in Matrix and Average Energy of Materials with Misfitting Inclusions," *Acta Metall.*, Vol. 21, pp. 571~574.
- (5) Takao, Y., Chou, T. W. and Taya, M., 1982, "Effective Longitudinal Young's Modulus of Misoriented Short Fiber Composites," *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 49, pp. 536~540.
- (6) Tandon, G. P. and Weng, G. J., 1986, "Average Stress in the Matrix and Effective Moduli of Randomly-Oriented Composites," *Composites Science and Technology*, Vol. 27, pp. 111~132.
- (7) Hatta, H. and Taya, M., 1985, "Effective Thermal Conductivity of a Misoriented Short Fiber Composite," *Journal of Applied Physics*, Vol. 58(7), pp. 2478~2486.
- (8) Dunn, M. L., Taya, M., Hatta, H., Takei, T. and Nakajima, Y., 1993, "Thermal Conductivity of Hybrid Short Fiber Composites," *Journal of Composite Materials*, Vol. 27(15), pp. 1493~1519.
- (9) Weng, G. J., 1984, "Some Elastic Properties of Reinforced Solids, with Special Reference to Isotropic Ones Containing Spherical Inclusions," *Int. J. Engng. Sci.*, Vol. 22, pp. 845~856.
- (10) Norris, A. N., 1989, "An Examination of the Mori-Tanaka Effective Medium Approximation for Multiphase Composites," *ASME J. Appl. Mech.*, Vol. 56, pp. 83~88.
- (11) Zhao, Y. H., G. P., and Weng, G. J., 1990, "Effective Elastic Moduli of Ribbon-Reinforced Composites," *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 57, pp. 158~167.
- (12) Liaw, P., Shannon, R. E. and Clark, W. G., Jr., 1990, *In Fundamental Relationships between Microstructure and Mechanical Properties of Metal Matrix Composites*, Liaw, P. K. and Gungor, M. N., eds., TMS-AIME, Warrendale, PA, pp. 581~615.
- (13) Liaw, P. K., Shannon, R. E., Clark, W. G., Jr., W. C., Jr., Jeong, H. and Hsu, D. K., 1992, "Determining Material Properties of Metal-Matrix Composites by NDE," *JOM*, Vol. 44, October, pp. 36~40.
- (14) Liaw, P. K., Shannon, R. E., Clark, W. G., Jr. and Harrigan, W. C., Jr., 1992, "Nondestructive Characterization for Metal-Matrix Composite Fabrication," in *Cycle Deformation, Fracture, and Nondestructive Examination of Advanced Materials*, ASTM STP 1157, M. R. Mitchell and O. Buck, eds., ASTM, Philadelphia, PA, pp. 251~277.
- (15) 정현조, 1994, "입자보강 금속복합재료의 미세구조와 비파괴 평가 특성에 관한 연구," 한국복합재료학회지, 제7권, 제1호, pp. 35~47.
- (16) Jeong, H., Hsu, D. K., Shannon, R. E. and Liaw, P. K., 1994, "Characterization of Anisotropic Elastic Constants of Silicon-Carbide Particulate Reinforced Aluminum Metal Matrix Composites: Part I. Experiment," *Metallurgical and Materials Transactions A.*, Vol. 25A, pp. 799~809.
- (17) Liaw, P. K., Pitchumani, R., Hsu, D. K., Jeong, H. and Yao, S. C., 1994, "Nondestructive Eddy Current Evaluation of Anisotropic Conductivities of Silicon Carbide Reinforced Aluminum Metal-Matrix Composite Extrusions," *ASME J. Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 116, pp. 647~656.
- (18) Pitchumani, R., Liaw, P. K., Yao, S. C., Hsu, D. K. and Jeong, H., 1994, "An Eddy Current Technique for the Measurement of Constituent Volume Fractions in a Three-Phase Metal-Matrix Composite," *J. Composite Materials*, Vol. 28, No. 18, pp. 1742~1769.
- (19) Eshelby, J. D., 1957, "The Determination of the Elastic Field of an Ellipsoidal Inclusion, and Related Problems," *Proc. Roy. Soc. London*, Vol. A241, pp. 376~396.
- (20) Hashin, Z., 1983, "Analysis of Composite Materials-A Survey," *J. Appl. Mech.*, Vol. 50, pp. 481~505.

- (21) Mura, T., 1988, *Micromechanics of Defects in Solids*, 2nd ed., Martinus Nijhoff Publishers, The Netherlands, pp. 79~84.
- (22) Hatta, H. and Taya, M., 1986, "Equivalent Inclusion Method for Steady State Heat Conduction in Composites," *International Journal of Engineering Science*, Vol. 24(7), pp. 1159~1172.
- (23) 정현조, 1994, "초음파의 에너지속도와 위상 속도의 주행시간 동시성과 이방성 재료의 탄성계수 결정," 한국정밀공학회지, 제11권, 제2호, pp. 95~103.
- (24) Schreiber, E. and Soga, N., 1966, "Elastic Constants of Silicon Carbide" *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol. 49, p. 342.
- (25) Marshall, R. C., Faust, Jr., J. W. and Ryan, C, E., eds., 1974, *Silicon Carbide 1973*, Columbia, SC, University of South Carolina Press, p. 673.
- (26) Schroder, K., ed., 1983, *CRC Handbook of Electrical Resistivity of Binary Metallic Alloys*, CRC Press, Inc., Boca Raton, FL.
- (27) Touloukian, Y. S., ed., *Thermophysical Properties of High Temperature Solid Materials*, Vol. 6, Part 1: Intermetallics, The MacMillan Company, New York.