

비파괴적 방법에 의한 입자 강화 복합재료의 부피분율 평가: 와전류법

정현조
부산대학교 기계공학부

요 약 입자 보강 복합재료의 부피분율을 평가하기 위한 와전류 비파괴 방법을 제시하였다. 제안된 방법은 복합재의 미시구조를 설명할 수 있는 이론 모델과 와전류에 의한 전기전도도 측정을 필요로 한다. 측정된 전도도를 이론 예측값과 같게 두면 미지의 입자 부피분율이 계산된다. Mori-Tanaka 방법에 기초한 전도도 해석 모델이 소개되어 있다. 이러한 접근 방법을 SiC 입자 보강 Al 기지 (SiC_p/Al) 복합재에 적용하였다. 이 방법으로 보강재의 부피분율을 비교적 정확하게 결정할 수 있었다. 금속간 화합물이 부피분율 평가에 미치는 영향을 논하였으며, 또한 금속간 화합물의 전도도와 기하학적 성질이 보강 입자와 같은 경우, 이 두 상의 총 부피분율을 결정할 수 있는 방법을 제시하였다.

1. 서 론

금속복합재료의 거시적 성질은 그 미시구조에 의해 큰 영향을 받는다. 특히 입자 보강 복합재의 미시구조는 보강재의 부피분율과 기하학적 형상과 관련된다. 입자보강 복합재는 보통 분말야금이나 주조법으로 제조되는데, 제조과정에서 입자의 방향이 결정된다. 또한 미시구조의 다른 중요한 특성으로 입자의 공간적 분포가 포함될 수 있으며, 복합재 제품의 품질을 평가하기 위한 미시적 성질의 측정은 대단히 중요하므로 비파괴적 방법으로 이와 같은 입자 복합재료의 미시구조를 결정할 수 있다.

입자 보강 복합재료에서 비파괴적 방법의 사용은 전통적으로 복합재료의 성질과 비파괴평가 특성 사이의 상관관계를 구하는 것에 관심이 집중되었다^{1~4)}. 이러한 연구는 대개 실험적인 내용으로서 비파괴적 특성과 복합재 미시구조 사이의 관계에 대한 이론적인 연구는 거의 없었다. 비파괴적 방법이 미시구조

의 정량적 평가에 사용되기 위해서는 구성 재료의 성질과 결과적인 거시적 성질 사이의 수학적 관계식이 필요하며 이는 상의 성질, 부피분율은 물론 미시 기하학(모양, 방향 및 크기)으로부터 유효 성질의 계산을 가능하게 하는 복합재료 미시역학 이론을 사용하여 해결할 수 있다. 예를 들면 와전류에 의한 전기전도도의 측정과 미시역학 모델을 결합하므로써 미지의 보강재 부피분율을 결정할 수 있으며 측정치의 변화는 미시구조의 균일성에 관한 중요한 정보를 제공한다.

본 논문에서는 입자 보강 복합재에서 전기전도도의 측정값과 이에 상응하는 미시역학 모델 예측값 사이의 관계에 기초하여 보강재의 부피분율 결정을 위한 와전류 방법을 제시하였다. 제안된 방법을 실리콘카바이드 입자 (SiC_p) 보강 알루미늄 (Al) 복합재의 부피분율 계산에 적용하였다. 본 연구에 사용한 복합재는 분말야금으로 제조되었으며 2124, 6061 및 7091 Al 합금에 0-30 % 범위의 입자로 보강되어

있다. Mori-Tanaka 방법⁵⁾에 기초한 2상 복합재 모델을 적용하여 이방성 전도도를 미시역학적으로 설명하였으며, 본 연구에 사용된 SiC_p/Al 복합재의 이방성 탄성계수 예측에 성공적으로 사용되었다⁶⁾. 와전류법에 의해 예측한 입자의 부피분율은 실제 부피분율과 4% 이내의 좋은 일치율을 보였으며, 금속간 화합물과 같은 추가적인 상이 부피분을 결정에 미치는 영향에 대해서도 논의하였다. 기공의 영향은 본 연구에서 무시하였다. 참고문헌 7)에는 미시역학 모델과 초음파 속도 측정으로부터 입자 보강 복합재료의 부피분율을 결정할 수 있는 방법이 제시되어 있다.

2. 이론적 배경

보강입자와 같은 비균질물은 복합재의 거시적 성질에 영향을 미친다. 성질 변화의 정도는 구성 재료의 성질, 부피분율, 미시기하학 (모양, 방향 및 크기)에 좌우되므로 유효성질을 계산하기 위하여 미시역학 모델을 사용하면 편리하다. 정상 상태의 전기 전도도에서 복합재의 거시적 성질은 유효 전도도 텐서에 의해 표시된다. 탄성과 전도도 문제 사이에는 밀접한 유사성이 있으며⁸⁾, 전도도 예측을 위하여 탄성계수 예측에서 사용한 절차를 따르면 되지만, 전도 문제는 탄성 문제보다 훨씬 간단하다.

이론 모델의 목적은 구성상의 미시구조 특성을 고려하므로써 보강 입자의 부피분을 계산에 이용하는 데 있다. 여기서는 2상 복합재료를 고려하며 전도도 텐서는 μ 로, 보강재의 부피분율은 v_p 로 나타낸다. 보강 입자는 타원체로서 모양이 모두 같으며 기지재와 완전하게 결합되어 있다고 가정한다. 좌표계는 고정 좌표를 x_1, x_2, x_3 로 표시하고 복합재 내의 입자의 국소 좌표는 x'_1, x'_2, x'_3 으로 나타낸다. 입자의 방향은 분포함수 $P(\phi, \varphi, \theta)$ 로 나타내며 ϕ, φ, θ 는 Euler 각이다.

2.1. 2상 복합재의 유효 전도도

등방성 구성재료로 만들어진 2상 복합재에서 타원체의 보강재는 방향성을 갖고 균일하게 분포되어 있다고 가정하자. 복합재의 대표체적요소는 경계에서 균일한 전기장의 강도 H^0 가 작용할 때 거시적 성질을 나타낸다. 복합재의 유효 전도도 텐서 $\bar{\mu} = \mu H^0$ 로 정의되며, \bar{q} 는 전류밀도의 체적평균을 나

타낸다. H^0 가 경계에 부과된 경우, 유효 전도도를 구하기 위해서는 비균질물이 받는 평균 강도를 H^0 의 향으로 구하면 된다. 이러한 목적을 위하여 물리적 집중계수(physical concentration factor)를 도입할 수 있으며 이 계수를 구하기 위하여 많은 근사 방법이 제안되었다. 예를 들면 Mori-Tanaka 방법⁵⁾에서 상호작용하는 개재물의 평균 강도는 H^0 와 다른 평균 기지 강도를 받는 무한한 기지재 속여 놓여 있는 단일 개재물로 근사화된다. Mori-Tanaka 방법과 정상상태 열전도에 대한 등가 개재물 원리⁹⁾를 사용하여 Jeong¹⁰⁾은 임의 방향 분포를 갖는 입자로 보강된 복합재료의 유효 전도도 식을 다음과 같이 얻었다.

$$\frac{\mu_{11}}{\mu_m} = 1 + \frac{v_p(\beta - 1)\langle t_{11} \rangle}{1 - v_p + v_p \langle t_{11} \rangle} \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\mu_{22}}{\mu_m} = 1 + \frac{v_p(\beta - 1)\langle t_{22} \rangle}{1 - v_p + v_p \langle t_{22} \rangle} \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{\mu_{33}}{\mu_m} = 1 + \frac{v_p(\beta - 1)\langle t_{33} \rangle}{1 - v_p + v_p \langle t_{33} \rangle} \dots\dots\dots (3)$$

여기서 μ_m 은 기지재의 전도도를 나타내며, β 는 보강재의 기지재에 대한 전도도 비율, v_p 는 보강재의 부피분율이다. $\langle \cdot \rangle$ 은 Euler 공간에서 가능한 모든 방향에 대한 방향평균을 나타낸다. $\langle t \rangle$ 는 다음식으로 정의되며

$$\langle t \rangle = \frac{\int_0^{\theta=\pi} \int_0^{\phi=2\pi} \int_0^{\varphi=2\pi} t P(\phi, \theta, \varphi) \sin \theta d\theta d\phi d\varphi}{\int_0^{\theta=\pi} \int_0^{\phi=2\pi} \int_0^{\varphi=2\pi} P(\phi, \theta, \varphi) \sin \theta d\theta d\phi d\varphi} \dots\dots\dots (4)$$

여기서 $P(\phi, \varphi, \theta)$ 는 보강 입자의 방향분포 함수이다. t 의 성분들은 식 (5)의 텐서 변환으로부터 구할 수 있으며,

$$t'_{ij} = m_{ki} m_{lj} t'_{kl} \dots\dots\dots (5)$$

여기서 m_{ij} 는 국소 좌표 x'_i 과 고정 좌표 x_j 사이의 방향 여현이다. t' 텐서의 성분은 다음과 같이 탄성문제에서와 유사한 형태를 갖는다⁶⁾.

$$t'_{ii} = [1 + s_{ii}(\beta - 1)]^{-1} \dots\dots\dots (6)$$

여기서 s_{ij} 는 탄성문제에서의 Eshelby 텐서 S_{ijkl} 와 유사한 성질을 갖는 2계 텐서이다. 등방성 지지재의 경우 s텐서는 타원체의 반경 a_1, a_2, a_3 ($a_1 > a_2 > a_3$)의 함수이다⁹⁾.

2.2. 평면 전도도

전도도 측정을 위하여 원형 와전류 탐촉자를 사용하였으므로 측정값은 한 평면내에서 여러 방향의 평균값이 된다. 실험 측정치와 상관관계를 구하기 위하여 이론 모델에서 세 대칭면 $x_1 - x_2, x_1 - x_3, x_2 - x_3$ 에서 각각의 평면 전도도는 한 평면을 정의하는 두 직교 방향의 산술평균으로부터 구하였다. 방향 평균량 $\langle t \rangle$ 가 횡방향 등방성이라고 가정하면 복합재료의 거시적 성질도 횡방향 등방성을 갖는다. x_3 방향을 등방성 대칭축으로 잡으면 $x_1 - x_2$ 면은 등방성 면이 되고, 횡방향 등방성 전도도는 다음과 같이 된다.

$$\frac{\mu_{1-2}}{\mu_m} = \frac{1}{2} \left(\frac{\mu_{11}}{\mu_m} + \frac{\mu_{22}}{\mu_m} \right) = \frac{\mu_{11}}{\mu_m} \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$\frac{\mu_{1-3}}{\mu_m} = \frac{\mu_{2-3}}{\mu_m} = \frac{1}{2} \left(\frac{\mu_{11}}{\mu_m} + \frac{\mu_{33}}{\mu_m} \right) \quad \dots\dots\dots (8)$$

2.3. 부피분율의 계산

식 (7)과 (8)은 부피분을 계산의 기초가 되며, 복합재의 거시적 전도도를 구성 상의 성질, 부피분율, 미시구조 특성과 연관시킨다. 주어진 복합재에 대하여 구성상의 성질은 핸드북이나 직접 측정으로부터 구할 수 있고 기하학적 특성과 관련된 매개변수는 미시구조 분석을 통하여 결정할 수 있으며, 미시역학 이론으로 모델링할 수 있다. 결과적으로 식 (7), (8)은 복합재의 전도도와 미지의 입자 부피분율 v_p 를 관계시키므로, 하나의 전도도 측정값을 식의 왼쪽에 대입하고 미지수 v_p 에 대하여 풀면 된다. 본 연구에서는 압출면에서의 평면 전도도 측정 값 μ_{1-2} 를 사용하였다.

3. 시편 및 실험

3.1. 시편

실험에 사용된 시편은 2124, 6061 및 7091 Al 합금에 0-30%의 SiC 입자 (SiC_p)로 보강된 금속 복합재료로서 분말 야금과 압출 공정으로 제조되었다⁴⁾. 두께 약 12mm로 압출된 복합재는 지지재가 2124 Al인 경우 T4, 6061 및 7091 Al은 T6로 열처리하였다. 이들 재료는 직교 이방성으로 가정하였고, 세 개의 대칭축은 압출 방향을 x_1 압출면내의 x_1 과 직각 방향을 x_2 , 두께방향을 x_3 로 선택하였다. 따라서 $x_1 - x_2$ 면은 압출면이며 $x_1 - x_3, x_2 - x_3$ 면은 압출면에 수직인 면이 된다. 주사전자현미경 (SEM)을 이용하여 세 대칭면에서 미시 구조 특성을 분석하였으며⁴⁾, SiC_p 의 크기, 형상비 및 방향 분포를 구하였다. 시험에 사용한 시편은 부피분율과 함께 Table 1에 수록하였다.

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

Base Alloy	Billet Number	Volume fraction of SiC_p (%)	Primary Intermetallic	Volume fraction of intermetallics (%)	Porosity (%)
2124	PE-2600	0	CuAl ₂	7.4±2.1	0
2124	PE-3025	20	CuAl ₂	7.6	0
2124	PE-2404	25	CuAl ₂	4.4±2.8	0
2124	PE-2229	25	CuAl ₂	10.0±3.9	0
2124	PE-2488	30	CuAl ₂	6.7±3.7	1.4±1.8
6061	PE-2045	0	Mg ₂ Si	5.2±2.2	0
6061	PE-2047	20	Mg ₂ Si	15.5±4.8	0
6061	PE-2099	25	Mg ₂ Si	2.9±2.2	0
6061	PE-2731	30	Mg ₂ Si	1.2±2.1	2.6±2.3
7091	PE-2730	0	MgZn ₂	6.9±2.6	0
7091	PE-2711	10	MgZn ₂	6.9±2.8	0.5±0.9
7091	PE-2712	20	MgZn ₂	4.4±2.6	0
7091	PE-2713	30	MgZn ₂	3.2±1.1	4.2±2.8
7091	PE-2665	30	MgZn ₂	6.9±2.8	1.6±1.4

SiC_p 의 평균 크기는 2-4 μm , 평균 형상비는 2.6-3.2 였다. 참고문헌 4)에 의하면 $x_1 - x_2$ 면(압출면)에서 SiC_p 의 모양은 비교적 등근데 반하여 $x_1 - x_3$ 면과 $x_2 - x_3$ 면에서는 더 좁고 길게 늘어난 모양을 보였다. 더욱이 SiC_p 의 방향은 $x_1 - x_2$ 면에서 거의 랜덤하며 아주 적은 양의 SiC_p 가 압출 방향 (x_1)으로

향하고 있었다. 그러나, $x_1 - x_3$ 면에서는 많은 양의 SiC_p 가 압출 방향으로 향하는 우선적인 방향 분포를 보였으며, $x_2 - x_3$ 면에서는 많은 양의 SiC_p 가 면내 횡방향(x_2)으로 향하고 있음이 관찰되었다. $x_2 - x_3$ 면에서의 SiC_p 의 크기와 형상비는 모두 $x_1 - x_3$ 면에서와 유사한 경향을 보였다. 따라서 거시적으로 대부분의 SiC_p 는 압출면에 누워 있으며 압출면 내에서는 거의 랜덤한 방향성을 갖는 형태의 평면적 배열이 지배적임을 가정할 수 있다.

기지 Al 합금을 포함하여 모든 복합재에는 금속간 화합물 (intermetallic compounds)이 포함되어 있었다⁴⁾. 금속간 화합물의 부피분율은 약 1.2 - 15.5%로 광범위하게 나타났다. SEM 분석에서 금속간 화합물은 Al, Si, Mn, Fe, Cu, Cr, Mg, Co, Zn, Ti, Zr 등의 여러 원소들의 조합으로 구성되어 있는 것으로 밝혀졌다. 기공은 30% SiC_p 보강 복합재 시편에서 관찰되었으며 그 양은 약 0.5 - 4.2% 였다. 금속간 화합물과 기공의 양은 모두 "point counting method"¹¹⁾로 측정하였다. 다른 시편에 비하여 20% SiC_p /6061 시편은 비정상적으로 많은 양의 금속간 화합물을 함유하고 있음이 밝혀졌다. Table 1에는 금속간 화합물의 조성과 부피분율, 기공의 부피분율이 수록되어 있다. Table 1의 CuAl_2 , Mg_2Si 및 MgZn_2 는 각각 2124, 6061 및 7091 Al 계열의 복합재 시편에서 확인된 금속간 화합물의 주요 성분이다.

3.2. 와전류에 의한 전도도 측정

3개의 대칭면($x_1 - x_2$, $x_1 - x_3$, $x_2 - x_3$)에서 와전류 시험법을 사용하여 SiC_p /Al 복합재의 전기 전도도를 측정하였다. 시편의 최소 크기는 40 mm × 15 mm × 12 mm 였다. 와전류 측정에는 Nortec NDT - 16 에디스코프와 10 kHz 프로브가 사용되었다. 에디스코프의 출력 전압과 % IACS (International Annealed Copper Standard) 단위로 표시되는 전도도 사이의 관계를 구하기 위하여 먼저 12 - 46 %IACS 범위의 표준시편을 사용하여 교정곡선을 만들었다. 출력 전압은 에디스코프 뒷면의 출력 단자에 멀티미터를 연결하여 측정하였다.

와전류 코일의 원형 대칭성으로 인하여 측정된 전도도는 한 평면내의 여러 방향의 전도도를 평균한 평면 전도도가 된다. 따라서 측정된 전기 전도도는 $x_1 - x_2$, $x_1 - x_3$, $x_2 - x_3$ 에서의 평면 전도도이다. 각

평면에서 3-5회 반복 측정하여 평균과 표준편차를 구하였으며 표준편차는 0.5 % IACS 이하였다.

7091 Al 복합재의 전도도 측정 결과를 Fig. 1에 도시하였다. 평면 전도도 값은 기본 합금의 전도도 μ_m 으로 나누어 주므로써 무차원 형태 (μ_{1-2}/μ_m , μ_{1-3}/μ_m , μ_{2-3}/μ_m)로 표시하였다. μ_m 은 기본 합금에서 세 방향의 전도도 평균값이다. SiC_p 부피분율이 증가할수록 각 평면에서의 전도도 비는 감소하고 있다. Fig. 1에서 주목할 것은 압출면($x_1 - x_2$)과 다른 두면 사이의 이방성이다. 그러나 $x_1 - x_3$ 와 $x_2 - x_3$ 두 면에서의 전도도 값은 아주 비슷하다. 압출면과 다른 두 면 사이의 이방성 전도도는 SiC_p 의 이방성 방향분포와 관련이 있다. $x_1 - x_2$ 면과 $x_1 - x_3$ (또는 $x_2 - x_3$) 면에서의 SiC_p 의 상이한 방향분포는 이들 면에서 서로 다른 전도도를 야기시킨다. 더욱이 $x_1 - x_3$ 면과 $x_2 - x_3$ 면에서의 SiC_p 의 유사한 방향분포는 이들 두 면에서 비슷한 전도도를 갖게 한다. 이와 비슷한 이방성이 2124 Al과 6061 Al 복합재에서도 관찰되었다. 기본 합금에서 전도도 이방성은 최소이다.

이제 금속간 화합물이 전도도에 미치는 영향을 관찰해 보자. Table 1에서와 같이 2124 Al의 25% SiC_p 보강 시편에서 PE-2229의 금속간 화합물 양은 PE-2404의 약 2.5배 이다. 따라서 Fig. 2(a)-(c)에 표시한 것과 같이 PE-2229가 세 평면에서 모두 더 낮은 전도도 값을 보여주고 있다. 7091 Al에서 30%

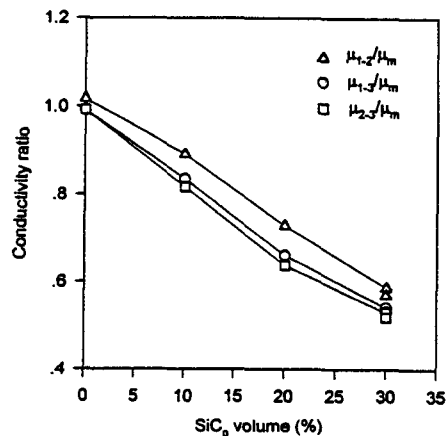


Fig. 1. Eddy current measurement results illustrating the anisotropic conductive behavior in the 7091 Al/ SiC_p composite system

SiC_p 보강 시편에서 PE-2665의 금속간 화합물 양은 PE-2713보다 2배 높으나, 기공의 영향 때문에 이 시편들은 아주 근사한 전도도 값을 갖는다 (Fig. 2 참조). 6061 Al 복합재 시편에서 20% SiC_p 보강 PE-2047 시편은 같은 계열의 다른 시편에 비하여 비정상적으로 많은 양의 금속간 화합물을 함유하고 있다. 결과적으로 이 시편은 6061 계열의 25% 보강 양에서 예상되는 전도도보다 훨씬 낮은 전도도를 보이고 있다 (Fig. 2 참조). 이 결과는 금속간 화합물이 전기 전도도에 영향을 미치며, 참고문헌 7)의 Fig. 3(b)와 비교해 보면 초음파 속도에 미치는 영향보다 훨씬 더 크다.

4. 모델의 정확도 검증

부피분율 계산의 신뢰도는 이론 모델의 정확성에 달려 있다. 그러므로 부피분율 계산 결과를 제시하기 전에 모델로부터 계산한 전도도를 실험 결과와 비교하였다. Al 기지 합금과 SiC_p의 전도도 값의 범위와 기지에 대한 입자의 전도도 비 β의 범위가 Table 2에 수록되어 있다. SiC_p의 전도도는 Marshall 등¹²⁾의 저항 데이터로부터 얻었다. Al 기본 합금의 전도도는 비보강 (0% SiC_p) Al 합금에서 측정한 데이터이다. Table 2에서와 같이 전도도 비 β는 광범위한 값을 갖는다. β의 변화가 이론 전도도 비에 미치는 영향을 평가한 결과 아주 작은 (1% 이하) 것으로 나타났으며, 이론 계산에서 β=0.0026을 사용하였다.

복합재료의 미시구조분석을 통하여 SiC_p 외에 금속간 화합물과 기공이 함유되어 있음이 밝혀졌다. 기공은 30% SiC_p 보강 시편에서만 존재하고 그 양이 크지 않으므로 모델 예측에서 기공의 영향은 고려하지 않았다. 금속간 화합물은 15.5%의 높은 양을 함유한 6061 Al/20% SiC_p 시편을 제외하고 모든 계열의 비보강 시편과 보강 시편에서 비교적 고르게 존재한다. 따라서 전도도의 예측을 위하여 모든 복합재를 Al 기본 합금과 SiC_p로 구성된 2상 모델로 취급하였다. 모델 계산시에 사용한 입력 데이터는 Table 2에 나와 있다.

모델에서 보강 입자의 모양은 일반적인 타원체로 가정하였다. 미시구조 분석에 기초하여 SiC_p의 상대적 크기는 (a₁, a₂, a₃)=(3, 1, 0.5)로 취하였으며, a₁, a₂, a₃는 타원체의 중심에 고정된 세축방향의 반경

이다. SiC_p 입자의 방향 분포는 방향 분포 함수 (orientation distribution function) P(φ, θ, ϕ)에 의해 규정된다. 먼저 타원체 SiC_p 입자들의 장축이 압출면(x₁-x₂)에 대하여 평행함 (즉, 압출면 위에 누어 있음)을 가정하면 θ=π/2이다⁷⁾. 다음으로 각도 φ와 ϕ에 대하여 모두 랜덤한 방향성을 취하면 P(φ, ϕ)=constant가 된다. 이와 같은 방향분포함수의 사용으로 복합재의 거시적 성질은 압출면이 등방성 면인 횡방성 등방성 (transversely isotropic)이 된다.

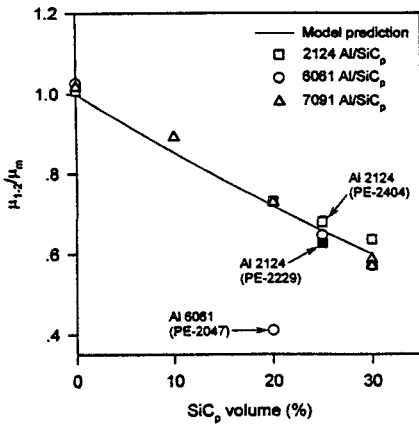
Table 2. Conductivities and conductivity ratios used in the theoretical calculations

Material	Conductivity (% IACS)	Conductivity ratio β
Al Alloys	33 - 50	
SiC _p	1.82×10 ⁻⁶ - 0.086	
CuAl ₂	22.7	3.64×10 ⁻⁸ - 0.0026
Mg ₂ Si	0.0045	
MgZn ₂	11.09	

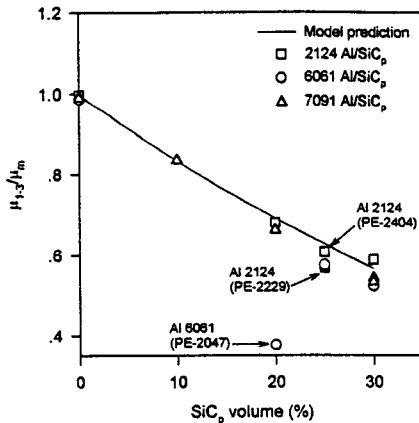
Fig. 2에 세 계열의 복합재 시편에 대하여 2상 모델에 의해 계산한 평면 전도도 비와 실험 값을 비교하였다. 실험에서 구한 각 계열 시편의 평면 전도도 값은 해당 기본 Al 합금의 전도도 값으로 나누어 주므로써 무차원화 시켰다. 모델 예측에서 SiC_p에 대한 횡방향 등방성 방향 분포의 가정으로 인하여 결과적인 전도도도 μ₁₋₃/μ_m=μ₂₋₃/μ_m 로서 횡방향 등방성을 나타내고 있다.

이 비교에서 알 수 있듯이 20% SiC_p/6061 Al 시편을 제외하면 이론 예측과 실험 결과는 6% 이내로 서로 잘 일치하고 있다. 20% SiC_p/6061 Al 시편의 경우 이론 예측값과 실험 값은 큰 차이를 보이는데, 그 이유는 이 시편이 기본 Al 합금에 비하여 지나치게 높은 금속간 화합물을 포함하고 있으며 현재의 2상 모델은 금속간 화합물을 고려하지 않았기 때문이다.

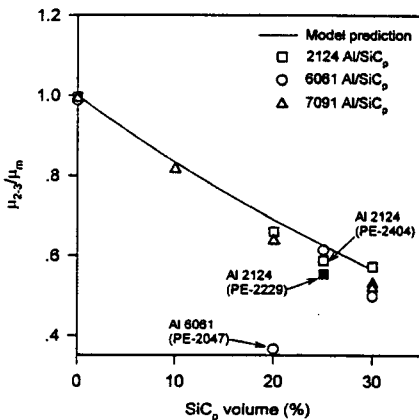
대부분의 금속복합재료 응용에서 보강재의 부피분율은 40% 이하인데, 이 범위내에서 모델 예측 결과는 적은 양 (10% 이하)의 금속간화합물의 존재에도 불구하고 상당히 좋다. Fig. 2의 데이터 비교는 복합재의 금속간 화합물 양이 같은 계열의 기본 Al



(a) on the $x_1 - x_2$ plane



(b) on the $x_1 - x_3$ plane



(c) on the $x_2 - x_3$ plane

Fig. 2. Comparison of the predicted and measured conductivity ratios

합금과 비교하여 크게 다르지 않으면 SiC_p 부피분율을 계산하기 위하여 현재의 2상 복합재 모델을 사용할 수 있음을 나타낸다.

5. 부피분율의 결정

보강재의 부피분율을 결정하기 위하여 모델의 정확도 검증에서 사용한 Al 기지재와 SiC_p 의 전도도, 입자의 형상비 및 입자의 방향분포를 식 (7), (8)의 오른쪽에 사용하였다. 앞에서도 언급한 것 처럼 왼쪽의 평면 전도도 비는 실험에서 측정된 값이다. 각 면에서 측정된 평면 전도도 비를 예측한 전도도 비와 같게 둬으로써 각 식으로부터 미지의 보강재 부피분율 v_p 를 계산할 수 있다.

$x_1 - x_2$ 면에서의 평면 전도도를 사용하여 계산한 SiC_p 의 부피분율과 실제 부피분율의 비교를 Fig. 3에 나타내었다. 그림 테두리의 아래 왼쪽에서 위 오른쪽으로 그은 대각선은 계산값과 측정값의 정확한 일치율을 나타내는 선이다. 또한 이 그림의 대각선을 중심으로 4%의 오차 범위가 표시되어 있다. Fig. 3의 오차 범위에서 표시된 것 처럼 여기서 제안한 방법으로 결정한 보강재의 부피분율은 실제 부피분율과 비교적 잘 일치한다. 와전류 방법의 정확도는 동일한 복합재 시편에 대한 초음파 방법⁷⁾의 2% 보다 약간 떨어지는데, 그 이유는 와전류가 초음파보다 금속간 화합물에 더 민감한 영향을 받기 때문인 것으로 보인다.

데이터의 비교를 통하여 알 수 있듯이 복합재 시편에 포함된 금속간 화합물의 양이 동일 계열의 기본 Al 합금의 금속간 화합물의 양과 크게 다르지 않으면 여기서 제안한 부피분율 결정법은 비교적 좋은 결과를 가져다 준다. 20% SiC_p /6061 Al 시편 (PE-2047)을 제외하면 모든 복합재 시편과 해당 Al 기본 합금에 함유된 금속간 화합물 양의 차이는 4% 이하이다. 이 경우 2상 복합재 모델로 입자의 부피분율을 비교적 정확하게 결정할 수 있다.

20% SiC_p /6061 Al (PE-2047) 시편의 부피분율 결정 결과는 좋지 않다. 그 주된 이유는 이 시편이 비정상적으로 많은 양의 금속간화합물을 함유하고 있으며 현재의 2상 모델은 그 영향을 고려하지 않았기 때문이다. 그러나, 여기서 제안한 방법은 원리상 금속간 화합물의 양까지 결정할 수 있도록 확장시킬 수 있다. 그와 같은 방법은 보강 입자와 금속간 화

합물의 2종류의 미지 부피분율을 결정하기 위하여 2개의 비파괴적 측정값을 필요로 한다. 또한 이 방법을 적용하기 위해서는 금속간 화합물이 전도도에 미치는 영향을 설명할 수 있는 3상 복합재 모델을 필요로 한다^{10,13)}.

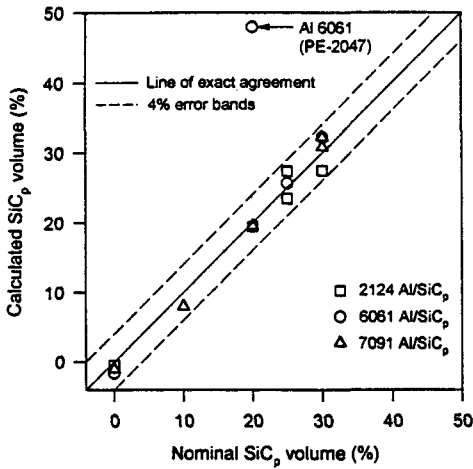


Fig. 3. Comparison of measured and calculated SiC_p volume fractions

6. 총 부피분율의 결정

여기서 사용된 2상 복합재 모델은 SiC_p와 금속간 화합물의 전도도 값이 아주 가까운 경우 이 두상의 총 부피분율 결정에 적용될 수 있다. Table 2에서 보듯이 이러한 경우는 6061 Al 계열의 시편에서 일어난다. 이 계열에 함유된 금속간 화합물의 주요 성분인 Mg₂Si와 SiC_p의 전도도 값은 Al 기본 합금의 전도도에 비하여 무시할 정도로 낮다. 금속간 화합물의 형상과 방향분포가 모두 SiC_p와 동일하다고 가정하면 3상 복합재 (순수 Al 합금, SiC_p 및 금속간 화합물)는 SiC_p와 금속간 화합물을 하나의 상으로 취급하므로써 2상 복합재로 된다. 이 경우 유효 전도도는 식 (1)-(3)에서 β ≈ 0로 두면 다음 식으로 된다.

$$\frac{\mu_{11}}{\mu_0} = 1 - \frac{v_t \langle t_{11} \rangle}{1 - v_t + v_t \langle t_{11} \rangle} \dots\dots\dots (9)$$

$$\frac{\mu_{22}}{\mu_0} = 1 - \frac{v_t \langle t_{22} \rangle}{1 - v_t + v_t \langle t_{22} \rangle} \dots\dots\dots (10)$$

$$\frac{\mu_{33}}{\mu_0} = 1 - \frac{v_t \langle t_{33} \rangle}{1 - v_t + v_t \langle t_{33} \rangle} \dots\dots\dots (11)$$

여기서는 μ₀는 금속간 화합물을 포함하지 않는 순수 Al 합금의 전도도이며, v_t는 (SiC_p + 금속간 화합물)의 총 부피분율을 나타내며 <t_{ii}>는 다음 식으로 주어진다.

$$\langle t_{ii} \rangle = \frac{1}{1 - \langle s_{ii} \rangle} \dots\dots\dots (12)$$

금속간 화합물의 방향분포를 4절에서의 SiC_p 입자와 같이 평면내 랜덤 분포로 가정하면 결과적인 복합재의 성질은 x₁ - x₂ 면을 등방성 면으로 하는 횡방향 등방성이 된다. 모델 계산에 사용된 순수 Al 합금의 전도도 (μ₀)는 0% SiC_p 시편 (PE-2045)에서 측정된 전도도를 이룬 예측식 [식 (9)-(11)]에 대입하고 μ₀에 대하여 풀어서 구하였다. 각 계열의 시편에서 확인된 금속간 화합물의 주요 성분에 대한 전도도 값은 Table 2에 나와 있다. 이 값은 Touloukian¹⁴⁾와 Schröder¹⁵⁾의 데이터로부터 얻었다.

6061 Al/SiC_p 복합재의 총 부피분율에 대한 계산값과 실제값을 Fig. 4에 비교하였다. 계산값과 예측값의 정확한 일치치를 나타내는 대각선을 중심으로 4%의 오차 범위가 표시되어 있다. PE-2047 시편을 제외하면 모두 4% 오차 범위내에 포함되므로 이 두 값은 서로 잘 일치함을 알 수 있다. 20% SiC_p/6061

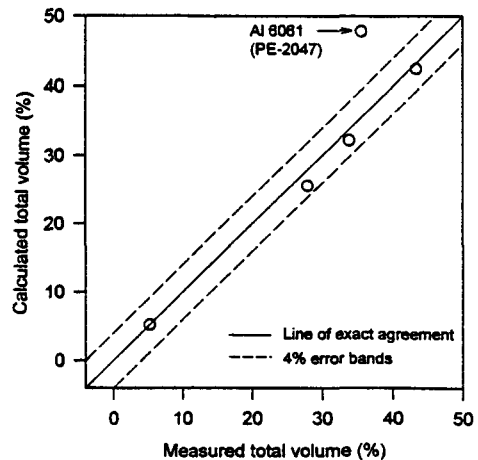


Fig. 4. Comparison of measured and calculated total (SiC_p+intermetallic compounds) Volume fractions

Al 시편 (PE-2047)은 총 부피분율의 표시에 의하여 그 계산값이 많이 개선되었음에도 불구하고 실험치와 아직도 많은 차이를 보이고 있다. 이에 대한 가능한 이유는 아마도 이 복합재의 기지재가 여기서는 확인되지 않은 다른 비정상적인 화학 조성을 포함할 수 있다는 것이다.

여기서 제안한 방법은 SiC_p/Al 복합재 제품의 품질 평가를 위한 직접적인 접근 방법을 제시하고 있으며, 생산 현장에서 적용할 수 있다. 예를 들면, 제품내의 몇개 위치에서 와전류 검사를 실시하여 제안된 방법으로 구성재료의 부피분율을 결정하면 미시구조의 균일성에 관한 중요한 정보를 얻을 수 있을 것이다.

7. 결론

압출 금속 복합재료에서 보강재의 부피분율을 정량적으로 결정하기 위한 비파괴평가법에 대하여 기술하였다. 이 방법은 이론적인 전도도 모델과 와전류 방법에 의한 전도도 측정을 필요로 한다. 이 방법을 SiC_p 보강 Al 복합재료에 적용하였으며 보강재의 부피분율을 4% 이내로 정확하게 결정할 수 있었다. 동일한 복합재 시편에 대한 초음파 결과⁷⁾와 비교할 때, 그 정확도가 조금 낮은 이유는 전도도가 금속간 화합물에 더 민감하게 영향을 받기 때문이다. 또한 보강 입자와 금속간 화합물의 전도도 값이 아주 가까울 때 제안된 2상 복합재 모델로써 이 두상의 총 부피분율을 결정할 수 있었다. 제안된 방법은 압출된 SiC_p/Al 복합재 제품의 품질을 평가하기 위한 직접적인 접근 방법을 제공하며 생산현장에서 채택할 수 있다.

참고 문헌

- 1) W. G. Clark, Jr. and J. N. Iyer, *Materials Evaluation*, Vol. 47(1989), pp. 460-465
- 2) P. K. Liaw, R. E. Shannon and W. G. Clark, Jr., *Fundamental Relationships between Microstructure and Mechanical Properties of Metal Matrix Composites*, pp. 581-615, ed. P. K. Liaw and M. N. Gungor, TMS-AIME, Warrendale, PA, (1990)
- 3) P. K. Liaw, R. E. Shannon, W. G. Clark, Jr. and W. C. Harrigan, Jr., *Cyclic Deformation, Fracture, and Nondestructive Evaluation of Advanced Materials*, ASTM STP 1157, pp. 251-277, ed. M. R. Mitchell and O. Buck, American Society for Testing and Materials, PA, (1992)
- 4) H. Jeong, D. K. Hsu, R. E. Shannon and P. K. Liaw, *Metallurgical and Materials Transactions*, Vol. 25A(1994), pp. 799-809
- 5) T. Mori and K. Tanaka, *Acta Metallurgica*, Vol. 21(1973), pp. 571-574
- 6) H. Jeong, D. K. Hsu, R. E. Shannon and P. K. Liaw, *Metallurgical and Materials Transactions*, Vol. 25A(1994), pp. 811-819
- 7) 정현조, *비파괴검사학회지*, Vol. 18, No.2(1998), pp. 103-111
- 8) Z. Hashin, *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 50(1983), pp. 481-505
- 9) H. Hatta, H. and M. Taya, *International Journal of Engineering Science*, Vol. 24(1986), pp. 1159-1172
- 10) 정현조, *대한기계학회논문집*, 제 19권 제 9호 (1995), pp. 2181-2193
- 11) J. E. Hilliard and J. W. Cahn, *Transactions of the Metallurgical Society of AIME*, Vol. 221(1961), pp. 344-352
- 12) R. C. Marshall, J. W. Faust, Jr. and C. E. Ryan, ed., *Silicon Carbide 1973*, pp. 673, University of South Carolina Press, Columbia, SC, (1974)
- 13) R. Pitchumani, P. K. Liaw, S. C. Yao, D. K. Hsu and H. Jeong, *Journal of Composite Materials*, Vol. 28(1994), pp. 1742-1769
- 14) Y. S. Touloukian, ed., *Thermophysical Property of High Temperature Solid Materials*, Vol. 6, Part 1: Intermetallics, The MacMillan Company, New York, (1967)
- 15) K. Schröder, ed., *CRC Handbook of Electrical Resistivities of Binary Metallic Alloys*, CRC Press Inc., Boca Raton, FL, (1983)

Nondestructive Determination of Reinforcement Volume Fractions in Particulate Composites : Eddy Current Method

Hyunjo Jeong

School of Mechanical Engineering, Pusan National University, Pusan 609-735

Abstract A nondestructive evaluation technique was developed for the quantitative determination of the reinforcement volume fractions in particulate reinforced metal matrix composites. The proposed technique employed a composite micromechanics which accounts for the microstructure of the composite medium together with the measurement of anisotropic electrical conductivity. When the measured conductivity was coupled with the theoretically predicted conductivity, the unknown reinforcement volume fraction was calculated. An analytical model based on the Mori-Tanaka method was described which relates the NDE signatures to the composite microstructure. The volume fractions were calculated using eddy current measurements made on a wide range of silicon carbide particulate (SiC_p) reinforced aluminum (Al) matrix composites. The calculated SiC_p volume fractions were in good agreement with the measured volume fractions in the range of 0-30%. The technique was also found to be effective in estimating the total volume percentage of reinforcement and intermetallic compound formed during the processing stage.