

비파괴적 방법에 의한 입자 강화 복합재료의 부피분율 평가 : 초음파법

정현조
부산대학교 기계공학부

요 약 입자 보강 복합재료의 부피분율을 평가하기 위한 초음파 비파괴 방법을 제시하였다. 제안된 방법은 복합재의 미시구조를 설명할 수 있는 이론 모델과 초음파의 속도 측정을 필요로 한다. 측정된 속도를 이론 예측값과 같게 두면 미지의 입자 부피분율이 계산된다. Mori-Tanaka 방법에 기초한 탄성계수 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. 또한 금속간 화합물이 부피분율 평가에 미치는 영향을 논하였다. 이 방법은 입자 보강 금속기지 복합재의 생산현장에서 복합재의 품질 평가를 위하여 적용될 수 있다.

1. 서론

복합재료의 품질은 보강 입자상과 때로는 제조과정에서 발생하는 추가적인 상으로 구성된 미시구조에 의해 영향을 받는다. 미시구조의 여러 변수 가운데서 구성상의 부피분율은 복합재의 거시적 성질에 가장 큰 영향을 미친다. 따라서 구성상의 부피 분율 측정은 제품의 품질을 정확하게 평가하는데 있어서 가장 중요하다. 복합재 내부의 측정치의 변화를 통하여 여러 위치에서의 미시구조의 균일성에 관한 중요한 정보를 얻을 수 있다. 비파괴평가 기법은 구성상의 부피분율을 측정할 수 있는 실질적인 수단을 제공한다. 이러한 목적을 염두에 두고, 본 논문에서는 복합재 미시역학 모델과 초음파 속도 측정을 이용하여 입자로 보강된 복합재에서 입자의 부피분율을 결정하는 비파괴평가법을 다루었다.

입자 보강 복합재료에서 초음파 속도의 사용은 전통적으로 복합재료의 성질과 비파괴평가 특성 사이

의 상관관계를 구하는 것에 관심이 집중되었다^{1~3)}. 대부분의 이러한 연구는 실험적인 내용으로서 초음파 속도와 복합재 미시구조 사이의 관계에 대한 이론적인 연구는 거의 없었다. 비파괴적 방법이 미시구조의 정량적 평가에 사용되기 위해서는 구성 재료의 성질과 결과적인 거시적 성질 사이의 수학적 관계식이 필요하다. 이는 상의 성질, 부피분율 뿐만 아니라 미시기하학(모양, 방향 및 크기)으로부터 유효 성질 계산을 가능하게 하는 복합재료 미시역학의 도움으로 달성할 수 있다. 이것은 비파괴평가 데이터의 해석에서 전방문제(forward problem)로 알려져 있다. 역변환 문제(inverse problem)에서는 구하고자 하는 미시구조는 측정 비파괴평가 결과와 전방 미시구조 모델로부터 얻을 수 있다. 이러한 측면에서 초음파 측정 데이터를 이용한 몇가지 역변환 문제의 해법이 최근에 제시되었다. Reynolds와 Wilkinson⁴⁾은 일방향 보강 복합재의 섬유 및 기공 부피분율을 초음파 속도로부터 구하기 위하여 도해법을 제안하

였다. Gruber 등⁵⁾은 이 방법을 주사형으로 확장시켜 기공성 복합재의 성질 변화 지도를 작성하였다. Chu와 Rokhlin⁶⁾은 일반화된 자기일치법을 적용하여 다상 복합재에서 계면상의 유효 탄성계수를 결정하였다. Jeong과 Hsu⁷⁾는 2상 복합재에 대한 Mori-Tanaka 방법을 사용하여 기공성 세라믹 재료의 속도, 밀도 및 탄성계수를 평가하였다. Dunn과 Ledbetter⁸⁾는 단섬유 복합재에서 초음파의 속도와 미시역학 모델에 기초하여 섬유 방향분포함수 계수를 비파괴적 방법으로 측정하였다.

본 논문에서는 입자 보강 복합재에서 보강재의 부피분율 결정을 위한 비파괴적 접근 방법을 제시하고 있다. 제안된 방법은 측정된 초음파 속도와 이에 상응하는 미시역학 모델 예측 사이의 연결위에 기초하고 있다. 전체적인 접근방법은 (i) 유효속도 예측을 위한 전방 모델의 개발 (ii) 초음파 속도의 측정 (iii) 부피분율의 계산으로 구성되어 있다. 입자 보강 복합재의 미시역학 모델은 미시구조의 복잡성으로 인하여 연속 섬유 복합재보다 더 어렵다. 특히 보강재의 모양, 형상비 및 방향 분포를 정확히 알아야 한다. 제조과정중에 발생할 수 있는 금속간 화합물과 기공과 같은 다른 상으로 인하여 문제는 더욱 복잡해진다. 이러한 목적을 위하여 최근에 개발된 입의 방향분포를 갖는 입자 보강 복합재의 유효 강성도 식⁹⁾을 사용하였다. 문제의 접근법을 소개한 다음 이미 미시구조 분석을 완전히 끝낸 실리콘 카바이드 보강 알루미늄 복합재(SiC_p/Al)의 부피분율 계산에 적용한다. 초음파의 속도는 투과법으로 측정하였다. 사용 주파수 $f=5\text{ MHz}$, 입자 반지름 $a=5\mu\text{m}$, 종파속도 = 7000m/sec 라고 하면 무차원수 'ka=0.022'로서 장파장 한계내에 있다고 볼 수 있다. 따라서 속도 분산을 무시하고 입자 보강으로 인한 속도 및 탄성계수의 변화를 파수 $k \rightarrow 0$ 인 정적 한계에서 구하였다. 부피분율 평가 결과를 제시하고 부피분율 결정에 미치는 금속간 화합물의 영향에 대하여 논하였다. 참고문헌 10)에는 미시역학 모델과 와전류 방법에 의한 전도도 측정으로부터 입자 보강 복합재료의 부피분율을 평가할 수 있는 방법을 제시하였다.

2. 이론적 배경

여기서는 2상 복합재료를 고려하며 기지재와 보

강입자에 관련된 양은 각각 첨자 "(1)"과 "(2)"로 표시한다. 이론 모델의 목적은 구성상의 미시구조 특성을 고려하므로써 보강 입자의 부피분율 계산에 이용하는 것이다. 부피분율을 v 로 나타내면 $v^{(1)} + v^{(2)} = 1$ 이다. 밀도는 ρ 로, 등방성 강성도 텐서는 C 로 나타내며 그 역수는 C^{-1} 이다. 보강입자는 타원체로서 모양이 모두 같으며 기지재와 완전하게 결합되어 있다고 가정한다. Fig. 1에서와 같이 좌표계는 고정 좌표를 x_1, x_2, x_3 로 표시하고, 복합재내의 입자의 국소 좌표는 x'_1, x'_2, x'_3 으로 나타낸다. 입자의 방향은 분포함수 $P(\theta, \phi, \theta)$ 로 나타내며, 여기서 θ, ϕ, θ 는 Euler 각이다.

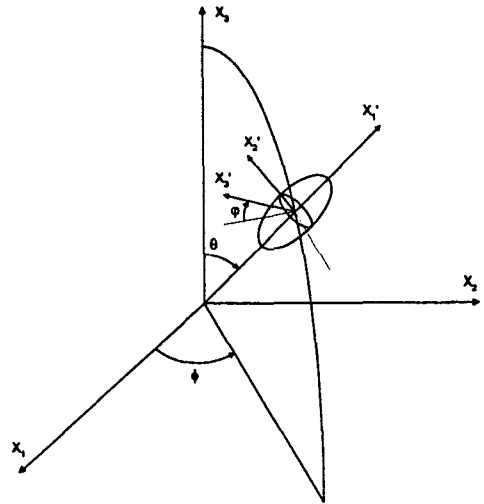


Fig. 1. Coordinate convention for an ellipsoidal inclusion and illustration of Euler angles

2.1. 2상 복합재의 유효성질

2상 복합재의 유효 속도를 계산하기 위하여 유효 강성도와 밀도를 먼저 구할 필요가 있다. 복합재의 대표 체적 요소는 균일 경계조건, $u(S) = \epsilon^0 x$,에서 거시적 성질을 대표할 수 있도록 선택한다. 여기서 u 와 ϵ^0 는 변위와 균일한 변형율을 나타내며, S 는 외부 경계이다. 복합재의 유효 강성도 텐서 C 는 $\bar{\sigma} = C \epsilon^0$ 로 정의되며, $\bar{\sigma}$ 는 응력의 체적 평균을 나타낸다. 복합재의 유효 강성도는 기계적 집중계수 (mechanical concentration factor)¹¹⁾를 도입함으로써 구할 수 있다. 이 계수는 강화 입자내의 평균 변형

틀과 경계에서의 균일 변형을 사이의 관계를 나타낸다. 즉 $\bar{\epsilon}^{(2)} = \bar{A}^{(2)} \epsilon^0$ 로서 계수 $\bar{A}^{(2)}$ 는 구성상의 탄성 계수, 보강 입자의 모양과 방향 등에 의존한다. 이 계수를 구하기 위하여 많은 근사 방법이 제안되었다. 예를 들면 Mori-Tanaka 방법¹²⁾에서 상호 작용하는 개재물의 평균응력은 평균 변형을 $\bar{\epsilon}^{(1)}$ 을 받는 무한 기지재 속에 놓여 있는 단일 개재물로 근사화된다. 이러한 접근 방법을 사용하여 Jeong 등⁹⁾은 입의 방향 분포를 갖는 입자로 구성된 복합재료의 유효 강성도 텐서식을 다음과 같이 얻었다.

$$C = C^{(1)} + v^{(2)}(C^{(2)} - C^{(1)})\langle T \rangle [v^{(1)}I + v^{(2)}\langle T \rangle]^{-1}, \dots\dots\dots (1)$$

여기서 I는 일차 텐서이고, $\langle \cdot \rangle$ 는 방향 의존 양의 방향 평균을 나타낸다. $\langle T \rangle$ 는 강화 입자의 평균 변형률과 기지의 평균 변형률 사이의 관계를 나타낸다.

$$\langle \epsilon^{(2)} \rangle = \langle T \rangle \bar{\epsilon}^{(1)}. \dots\dots\dots (2)$$

$\langle T \rangle$ 는 다음 식으로 정의되며

$$\langle T \rangle = \frac{\int_0^{\theta=\pi} \int_0^{\phi=2\pi} \int_0^{\varphi=2\pi} T P(\phi, \theta, \varphi) \sin \theta d\theta d\phi d\varphi}{\int_0^{\theta=\pi} \int_0^{\phi=2\pi} \int_0^{\varphi=2\pi} P(\phi, \theta, \varphi) \sin \theta d\theta d\phi d\varphi}, \dots\dots\dots (3)$$

여기서 $P(\phi, \theta, \varphi)$ 는 강화 입자의 방향분포함수를 나타낸다. 텐서 T의 성분은 변환식에 의하여 다음 식으로 구할 수 있으며

$$T_{ijkl} = m_{mi} m_{nj} m_{ok} m_{pl} T'_{mnop}, \dots\dots\dots (4)$$

여기서 m_{ij} 는 국소 좌표 x'_i 과 (1)고정 좌표 x_j 사이의 방향 여현이다(Fig.1 참조). T'은 다음 식으로 주어지며

$$T' = [I + S(C^{(1)})^{-1}(C^{(2)} - C^{(1)})]^{-1}, \dots\dots\dots (5)$$

S는 Eshelby 텐서¹³⁾로서 기지재가 등방성인 경우 기지재의 Poisson비와 입자의 형상비에 좌우 된다.

강성도 식 (1)은 4계 텐서의 내적과 역변환을 포함하고 있는데 이러한 텐서식의 계산은 Walpole¹⁴⁾의

방법을 적용하면 쉽게 해결할 수 있다. 방향 평균 양 $\langle T \rangle$ 가 횡방향 등방성이면 복합재의 거시적 성질도 횡방향 등방성이 되므로 x_3 축을 등방성 대칭 축으로 잡으면 유효강성도 성분 C_{33} 는 다음 식으로 주어지며

$$C_{33} = C_{33}^{(1)} + \{v^{(2)}[\Delta C_{33} \langle T_{3333} \rangle + 2 \Delta C_{13} \langle T_{1313} \rangle] \times [v^{(1)} + v^{(2)} \langle T_{II}^{22} \rangle] - 2(v^{(2)})^2[\Delta C_{13} \langle T_{II}^{22} \rangle + \Delta C_{33} \langle T_{3311} \rangle] \langle T_{1133} \rangle\} / \{[v^{(1)} + v^{(2)} \langle T_{II}^{22} \rangle][v^{(1)} + v^{(2)} \langle T_{3333} \rangle] - 2(v^{(2)})^2 \langle T_{3311} \rangle \langle T_{1133} \rangle\}, \dots\dots\dots (6)$$

여기서

$$\Delta C_{33} = C_{33}^{(2)} - C_{33}^{(1)}, \Delta C_{13} = C_{13}^{(2)} - C_{13}^{(1)},$$

$$v^{(1)} = 1 - v^{(2)},$$

$$\langle T_{II}^{22} \rangle = \langle T_{1111} \rangle + \langle T_{1122} \rangle.$$

다른 강성도 성분도 비슷한 방법으로 구할 수 있다. 복합재의 유효 밀도는 다음의 혼합법칙으로 구할 수 있다.

$$\rho = \rho^{(1)}(1 - v^{(2)}) + \rho^{(2)} v^{(2)}. \dots\dots\dots (7)$$

이제 복합재의 강성도와 밀도를 구하였으므로, x_3 방향의 종파 속도는 다음 식으로 주어진다.

$$V_{33} = \sqrt{C_{33}/\rho}. \dots\dots\dots (8)$$

V_{33} 에서 처음 첨자와 두 번째 첨자는 각각 전파 방향과 입자의 운동 방향을 나타낸다.

2.2. 부피분율의 계산

식 (8)은 부피분율 계산의 기초가 되며 복합재의 거시적 성질을 구성상의 탄성적 성질, 부피분율, 미시구조 특성과 연관시킨다. 주어진 복합재에 대하여 구성상의 성질은 핸드북 값을 사용하거나 직접 측정하므로써 구할 수 있다. 기하학적 특성과 관련된 매개변수는 미시구조 분석을 통하여 결정할 수 있으

며, 미시역학 이론으로 모델링할 수 있다. 결과적으로 식 (8)은 복합재의 속도와 미지의 입자 부피분율 $v^{(2)}$ 를 관계시킨다. 부피분율 계산 방법은 따라서 하나의 속도 측정을 필요로 하며 본 연구에서는 두께방향으로 측정된 종파 속도 값 V_{33} 를 사용하였다.

3. 시편 및 실험

실험에 사용된 시편은 2124, 6061 및 7091 Al 합금에 0-30%의 SiC 입자 (SiC_p)로 보강된 금속 복합재료로서 분말 야금과 압출 공정으로 제조되었다¹⁵⁾. 두께 약 12mm로 압출된 복합재는 기지재가 2124 Al인 경우 T4, 6061 및 7091 Al은 T6 열처리를 하였다. 이들 재료는 직교 이방성으로 가정하고, 세 개의 대칭축은 압출 방향을 x_1 , 압출면내의 x_1 과 직각 방향을 x_2 , 두께 방향을 x_3 로 선택하였다. 따라서 $x_1 - x_2$ 면은 압출면이며, $x_1 - x_3$, $x_2 - x_3$ 면은 압출면에 수직한 두 면이 된다. 주사전자 현미경 (SEM)을 이용하여 세 대칭면에서 미시 구조 특성을 분석하였다¹⁵⁾. 미시구조 분석을 통하여 SiC_p의 크기, 형상비 및 방향 분포를 구하였다. 시험에 사용된 시편을 보강재의 부피분율과 함께 Table 1에 수록하였다.

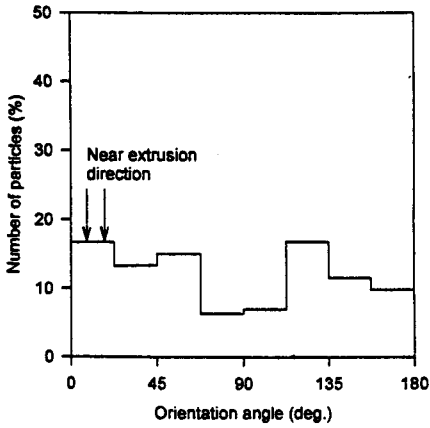
SiC_p의 평균 크기는 2-4 μm , 평균 형상비는 2.6-3.2였다. 참고문헌 15)에 의하면 $x_1 - x_2$ 면(압출면)에서 SiC_p의 모양은 비교적 등근데 반하여 $x_1 - x_3$ 면과 $x_2 - x_3$ 면에서는 더 좁고 길게 늘어난 모양을 보였다. SiC_p 방향분포에 대한 정량적 정보는 세 대칭면의 금속조직 사진에 대한 영상분석으로 얻었다. 30% SiC_p/7091 Al 시편에서 SiC_p의 방향분포를 Fig. 2에 보여주고 있다. Fig. 2(a)에서 보는 바와 같이 $x_1 - x_2$ 면에서 SiC_p의 방향은 특정한 방향성이 없고 다만 아주 적은 양의 SiC_p가 압출 방향(x_1)으로 향하고 있다. 그러나 $x_1 - x_3$ 면에서 많은 양의 SiC_p가 압출 방향으로 향하고 있음을 알 수 있다. 또 $x_2 - x_3$ 면에서는 많은 양의 SiC_p가 면내 횡방향(x_2)으로 향하는 우선적인 방향 분포를 보이고 있다. 따라서 거시적으로 대부분의 SiC_p는 압출면에 누워 있으며 압출면내에서는 거의 랜덤한 방향성을 갖는 형태의 평면적 배열이 지배적임을 가정할 수 있다.

기지 Al 합금을 포함하여 모든 복합재에는 금속간 화합물 (intermetallic compounds)이 포함되어 있

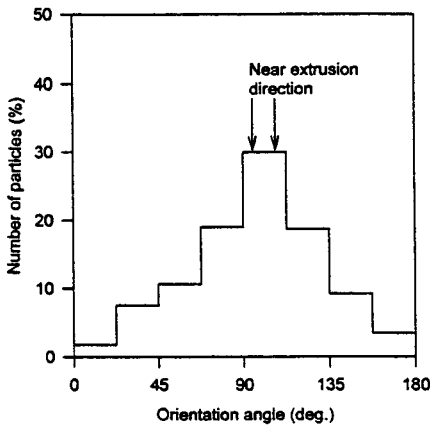
었다¹⁵⁾. 금속간 화합물의 부피분율은 약 1.2 - 15.5%로 광범위하게 나타났다. SEM 분석에서 금속간 화합물은 여러 원소들의 조합으로 구성되어 있는 것으로 밝혀졌다. 기공은 30% SiC_p 보강 복합재 시편에서 관찰되었으며 그 양은 약 0.5 - 4.2%였다. 금속간 화합물과 기공의 양은 모두 "point counting method"¹⁶⁾로 측정하였다. 다른 시편에 비하여 20% SiC_p/6061 시편은 비정상적으로 많은 양의 금속간 화합물을 함유하고 있다. Table 1에는 금속간 화합물의 조성과 부피분율, 기공의 부피분율이 수록되어 있다. Table 1의 CuAl₂, Mg₂Si 및 MgZn₂는 각각 2124, 6061 및 7091 Al 계열의 복합재 시편에서 확인된 금속간 화합물의 주요 성분이다.

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

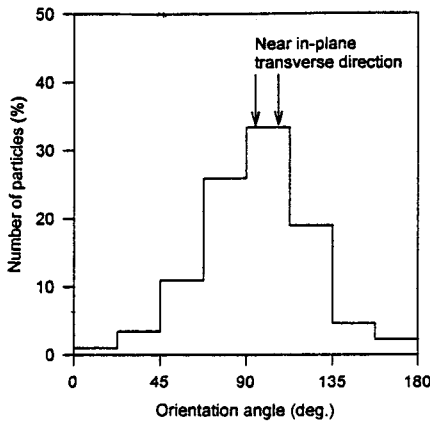
Base Alloy	Billet Number	Volume fraction of SiC _p (%)	Primary Intermetallic	Volume fraction of intermetallics (%)	Porosity (%)
2124	PE-2600	0	CuAl ₂	7.4±2.1	0
2124	PE-3025	20	CuAl ₂	7.6	0
2124	PE-2404	25	CuAl ₂	4.4±2.8	0
2124	PE-2229	25	CuAl ₂	10.0±3.9	0
2124	PE-2488	30	CuAl ₂	6.7±3.7	1.4±1.8
6061	PE-2045	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



(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. Distribution of SiC_p orientation angle in the 30% SiC_p / 7091 A1 composite

3.2. 초음파 속도 측정

직교 이방성 재료에 대한 평면 탄성파의 전파 특성에 기초하여 수침, 투과 방식으로 수직 입사를 사용하여 시편의 종파 속도를 측정하였다¹⁵⁾. 각 계열의 Al 합금 및 복합재료부터 크기가 $(x_1, x_2, x_3) = (40, 15, 12\text{mm})$ 와 $(x_1, x_2, x_3) = (15, 40, 12\text{mm})$ 의 시편 2 개씩을 절단하여 사용하였다. 탐촉자는 중심 주파수 5MHz (Panametrics V-310), 직경이 6.3mm이며, 송신 탐촉자는 Panametrics 5052PR 펄서-리시버로 구동하였다. 속도 분산의 영향을 조사하기 위하여 위상 스펙트로스코피 방법으로 0.5MHz-30 MHz ($ka \approx 0.002 - 0.132$) 범위에서 위상속도를 측정 한 결과 속도 변화는 0.5% 이내였으므로, 분산의 영향을 무시하고 주행시간 측정으로 속도를 구하였다. 주행시간은 LeCroy 9400 디지털 오실로스코프에서 1ns의 정확도로 측정하였다. 속도 V_{33} 측정을 위하여 수침 시험에서 종파를 시편의 x_3 방향으로 전파 시키고 빔 노정에 시편이 있을 때와 없을 때의 시간차 Δt 를 측정하여 속도 $V_L = (1/V_w - \Delta t/d)^{-1}$ 로부터 계산하였으며, 여기서 d는 시편의 두께, V_w 는 물에서의 종파 속도이다. V_{11}, V_{22} 도 전파 방향만 달리 하여 같은 방법으로 측정하였다.

속도 측정 결과는 Fig. 3에 도시하였다. SiC_p 의 탄성계수는 기본 Al 합금보다 더 크므로, SiC_p 부피분율이 증가할수록 유효 속도도 증가하고 있다. 각 성분에 대하여 더 자세히 살펴보면 압축 방향 (x_1)의 속도 성분 V_{11} 이 가장 큰 값을 가지며 두께 방향 (x_3) 성분 V_{33} 가 가장 낮다. SiC_p 부피분율이 증가할수록 $V_{11} \approx V_{22}$ 의 경향을 보이고 있다. 평면내 속도와 두께 방향 속도 사이의 이방성은 SiC_p 의 특정 방향 분포에 기인하며, 방향 분포의 이방성과 잘 일치한다. 기본 합금에서 속도 이방성은 최소이다.

복합재료내에 존재하는 금속간 화합물이 초음파 속도에 미치는 영향을 관찰해 보았다. Table 1에서 처럼 2124 Al의 25% SiC_p 보강 시편에서 PE-2229 시편의 금속간 화합물 양은 PE-2404의 약 2.5배 이다. 그러나 이들 시편의 속도값은 아주 근사하다 (Fig. 3(a) 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 계열에서 예상되는 속도보다 높은 속도를 보이고 있다

(Fig. 3(b) 참조). 이 결과는 금속간 화합물이 초음파 속도에 영향을 미침을 가리킨다. 그러나, 복합재 시편에 포함된 금속간 화합물의 양이 같은 계열의 기본 합금에 함유된 금속간 화합물의 양과 크게 다르지 않으면 그 영향은 무시할 수 있다.

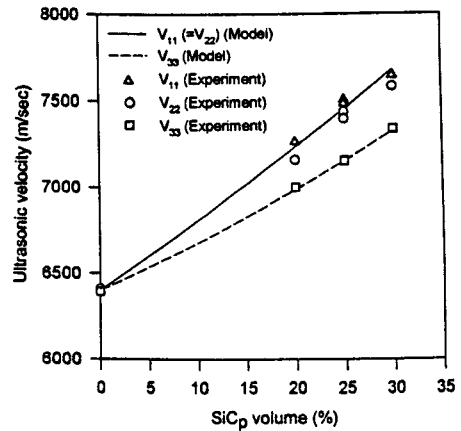
4. 모델의 정확도 검증

부피분율 평가의 신뢰도는 이론 모델의 정확성에 달려 있다. 그러므로 부피분율 계산 결과를 제시하기 전에 모델로부터 계산한 속도를 실험 결과와 비교하였다. 복합재료의 미시구조분석을 통하여 SiC_p 외에 금속간 화합물과 기공이 함유되어 있음을 알았다. 기공은 30% SiC_p 보강 복합재 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 탄성 계수의 예측을 위하여 Al 기본 합금과 SiC_p로 구성된 2상 모델을 고려하였다. 모델 계산시에 사용한 입력 데이터는 Table 2에 나와 있다.

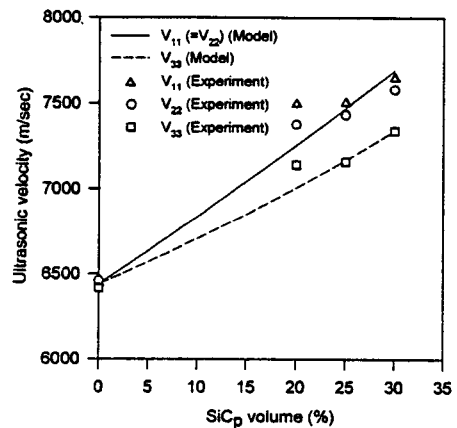
모델에서 각 상의 모양은 타원체로 대표되는데, 탄성 문제에서 Eshelby 텐서 S는 등방성 지지재의 Poisson 비와 형상비의 함수로 주어진다. 미시구조 분석에 기초하여 SiC_p의 상대적 크기는 (a₁, a₂, a₃) = (3, 1, 0.5)로 취하였으며, a₁, a₂, a₃는 타원체 세축 방향의 반경이다. SiC_p 입자의 방향 분포는 방향 분포 함수 (orientation distribution function) P(ϕ , θ , φ)에 의해 규정된다. 먼저 타원체 SiC_p 입자들의 장축이 압출면(x₁-x₂)에 대하여 평행함 (즉, 압출면 위에 누워 있음)을 가정하면 $\theta = \pi/2$ 이다(Fig. 1 참조). 다음으로 각도 ϕ 와 φ 에 대하여 모두 랜덤한

Table 2. Properties of constituents used in the theoretical calculations

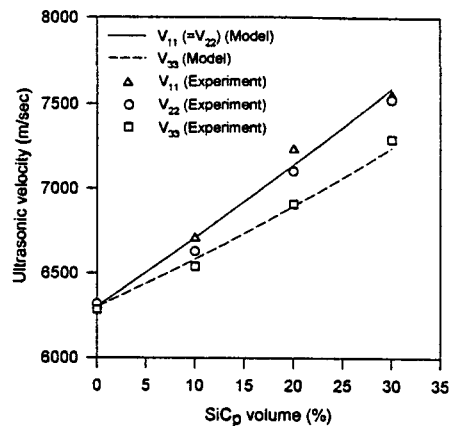
Material	ρ (g/cm ³)	C ₁₁ (GPa)	C ₄₄ (GPa)
Al 2124	2.77	113.5	27.3
Al 6061	2.71	112.4	26.3
Al 7091	2.84	112.8	26.8
SiC _p	3.21	491.5	196



(a) 2124 Al/SiC_p



(b) 6061 Al/SiC_p



(c) 7091 Al/SiC_p

Fig. 3. Comparison of measured and predicted velocities

방향성을 취하면 $P(\phi, \varphi) = \text{constant}$ 가 된다. 이와 같은 방향분포함수의 사용으로 복합재의 거시적 성질은 압출면이 등방성 면인 횡방향 등방성(transversely isotropic)이 된다.

Fig. 3에 세 계열의 복합재 시편에 대하여 모델에 의해 계산한 속도와 초음파 시험에서 측정된 값을 비교하여 도시하였다. 모델 예측에서 SiC_p 에 대한 횡방향 등방성 방향 분포의 가정으로 인하여 결과적인 복합재료의 속도도 $V_{11} = V_{22}$ 로서 횡방향 등방성을 나타내고 있다. 이들 그림에서와 같이 6061 Al/20% SiC_p 시편을 제외하고 모든 계열의 시편에서 예측치와 실험치는 3% 이내로 잘 일치하고 있다. 6061 Al/20% SiC_p 의 경우 해당 기본 Al 합금에 비하여 지나치게 높은 약 15.5%의 금속간 화합물이 포함되어 있다. 금속간 화합물은 아주 단단하고 강성이 높은 것으로 알려져 있으므로 금속간 화합물의 존재는 재료의 속도를 증가시킬 것이다. 현재의 2상 모델은 금속간 화합물을 고려하지 않았기 때문에, 예측치와 실험치 사이에 큰 차이가 발생하였다.

대부분의 금속복합재료 응용에서 보강재의 부피분율은 40% 이하인데, 이 범위내에서 모델 예측 결과는 적은 양 (10% 이하)의 금속간화합물의 존재에도 불구하고 실험 결과와 잘 일치한다. Fig. 3의 데이터 비교는 복합재의 금속간 화합물 양이 해당 Al 기본 합금에 비하여 지나치게 높지 않을 때 SiC_p 부피분율을 계산하기 위하여 현재의 2상 복합재 모델이 사용될 수 있음을 나타낸다.

5. 부피분율의 결정

보강재의 부피분율을 결정하기 위하여 식 (8)의 왼쪽에는 실험에서 측정된 초음파 속도값 V_{33} 를, 오른쪽에는 모델에 의한 예측 식 (6), (7)을 사용한다. 모델의 정확도 검증에서 사용한 Al 기지재와 SiC_p 의 밀도 및 탄성계수, 입자의 형상비와 방향분포를 식 (8)의 오른쪽에 대입한 다음 식(8)을 미지의 보강재 부피분율 $v^{(2)}$ 에 대하여 푼다.

계산한 SiC_p 의 부피분율과 실제 부피분율을 Fig. 4에 서로 비교하였다. 그림 테두리의 아래 왼쪽에서 위 오른쪽으로 그은 대각선은 계산값과 측정값의 정확한 일치를 나타내는 선이다. 또한 이 그림의 대각선을 중심으로 2%의 오차 범위가 표시되어 있다.

Fig. 4의 오차 범위에서 표시된 것처럼 여기서 제안한 방법으로 결정한 보강재의 부피분율은 실제 부피분율과 아주 잘 일치한다. 현재 사용된 초음파 방법의 정확도는 동일한 복합재 시편에 대하여 적용한 와전류 방법¹⁰⁾의 오차 범위 4% 보다 더 향상된 값을 보이고 있다. 그 이유는 초음파 속도가 와전류 방법으로 측정된 전기 전도도보다 금속간 화합물의 영향을 덜 받기 때문인 것으로 생각된다.

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 화합물의 2종류의 미지 부피분율을 결정하기 위하여 2개의 비파괴적 측정을 필요로 하며, 보강 입자와 금속간 화합물이 초음파 속도에 미치는 영향을 설명할 수 있는 3상 복합재 모델 (Al 합금 + SiC_p + 금속간 화합물)을 필요로 한다. 본 연구에서는 대부분의 복합재 시편에서 금속간 화합물의 양이 해당 Al 기본 합금의 시편과 비교할 때 4% 이내로 근소한 차이를 보이므로 2상 모델만을 고려하였다.

이상에서 제시한 절차는 초음파 속도와 미시역학 모델을 이용하여 복합재 강화 입자의 부피분율을 정량적으로 평가할 수 있음을 보여준다. 이 방법은 기지재와 보강재 부피분율이 광범위하게 조합된 다른 복합재 시스템에도 적용 가능하다. 이 방법은 압출

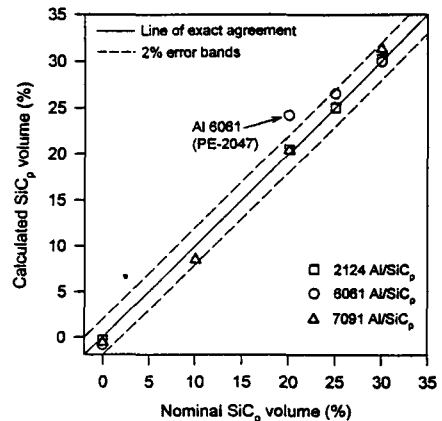


Fig. 4. Comparison of calculated and nominal reinforcement volume fractions

된 입자 보강 복합재료의 품질을 평가할 수 있는 직접적 접근 방법을 제시하며, 생산 현장에서도 적용할 수 있다. 예를 들면 복합재 제품의 여러 위치에서 초음파 검사를 실시하여 제안된 방법으로 부피분율을 결정하면 복합재내의 위치 변화에 따른 미시구조의 불균일성에 관한 중요한 정보를 얻을 수 있다.

6. 결론

압출 금속 복합재료에서 보강재의 부피분율을 정량적으로 결정하기 위한 비파괴평가법을 기술하였다. 이 방법은 종합적인 이론 모델과 초음파 속도 측정을 필요로 한다. 이 방법을 SiC_p/Al 복합재료에 적용하였으며 보강재의 부피분율을 비교적 정확하게 결정할 수 있었다. 이 방법은 생산 현장에서 입자보강 복합재의 품질 평가를 위한 수단으로 채택될 수 있다. 예를 들어 제품의 여러 위치에서 초음파 검사를 실시하고 제안된 방법으로 부피분율을 결정하면 복합재의 여러 위치에서 미시구조의 불균일성에 관한 중요한 정보를 얻을 수 있을 것이다. 동일한 복합재 시편에 대하여 와전류 평가 결과¹⁰⁾와 비교할 때 초음파에 의한 부피분율 평가 결과가 더 좋은 이유는 속도가 금속간 화합물의 영향을 덜 받기 때문이다.

참고문헌

- 1) P. K. Rohatgi, S. Raman, B. S. Majumdar and A. Banerjee, *Materials Science and Engineering*, Vol. A123(1990), pp. 89-97
- 2) P. K. Liaw, R. E. Shannon and W. G. Clark, Jr., *Fundamental Relationships between Microstructure and Mechanical Properties of Metal Matrix Composites*, P. K. Liaw and M. N. Gungor, eds., pp. 581-615, TMS-AIME, Warrendale, PA, (1990)
- 3) 정현조, 한국복합재료학회지, 제 7 권 제 1 호 (1994), pp. 35-47
- 4) W. N. Reynolds and S. J. Wilkinson, S. J., *Ultrasonics*, Vol. 16(1978), pp. 159-163
- 5) J. J. Gruber, J. M. Smith and R. H. Brockelman, *Materials Evaluation*, Vol. 46(1988), pp. 90-96
- 6) Y. C. Chu and S. I. Rokhlin, *Journal of Applied Physics*, Vol. 76(1996), pp. 4121-4129
- 7) H. Jeong and D. K. Hsu, *NDT&E International*, Vol. 29(1996), pp. 95-101
- 8) M. L. Dunn and H. Ledbetter, *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 99(1996), pp. 283-291
- 9) H. Jeong, D. K. Hsu, R. E. Shannon and P. K. Liaw, *Metallurgical and Materials Transactions*, Vol. 25A(1994), pp. 811-819
- 10) 정현조, 비파괴검사학회지, Vol. 18, No. 2 (1998), pp. 112-120
- 11) R. Hill, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 12(1964), pp. 199-212
- 12) 정현조, 대한기계학회논문집, 제 19 권 제 9 호 (1995), pp. 2181-2193
- 13) T. Mura, *Micromechanics of Defects in Solids*, 2nd ed., pp. 74-84, Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht, The Netherlands, (1987)
- 14) L. J. Walpole, *Advances in Applied Mechanics*. Vol. 21, C. S. Yih, ed., pp. 169-242, Academic Press, New York, (1981)
- 15) H. Jeong, D. K. Hsu, R. E. Shannon and P. K. Liaw, *Metallurgical and Materials Transactions*, Vol. 25A(1994), pp. 799-810
- 16) J. E. Hilliard and J. W. Cahn, *Transactions of the Metallurgical Society of AIME*, Vol. 221(1961), pp. 344-352

Nondestructive Determination of Reinforcement Volume Fractions in Particulate Composites : Ultrasonic Method

Hyunjo Jeong

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

Abstract A nondestructive ultrasonic technique is presented for estimating the reinforcement volume fractions of particulate composites. The proposed technique employs a theoretical model which accounts for composite microstructures, together with a measurement of ultrasonic velocity to determine the reinforcement volume fractions. The approach is used for a wide range of SiC particulate reinforced Al matrix (SiC_p/Al) composites. The method is considered to be reliable in determining the reinforcement volume fractions. The technique could be adopted in a production unit for the quality assessment of the metal matrix particulate composite extrusions.