

초음파 공명 분광법(RUS)을 이용한 SiC 입자강화 Al 기지복합재료의 탄성계수 해석

Analysis of Elastic Constants in SiC Particulate Reinforced Al Matrix Composites by Resonant Ultrasound Spectroscopy

정현규*, 정용무*, 주영상*, 홍순형**

Hyun-Kyu Jung*, Yong-Moo Cheong*, Young-Sang Joo* and Soon Hyung Hong**

초 록 SiC 입자강화 2124Al 금속복합재료의 강화재 부피분율에 따른 탄성 stiffness를 초음파 공명 스펙트로스코피(resonant ultrasound spectroscopy; RUS) 방법을 이용하여 측정하였다. RUS 방법은 한 개의 소형 시편으로 9개의 독립변수를 가진 사방정계(orthorhombic) 탄성계수를 간단한 실험으로 측정가능함을 보여주었다. SiC 강화재 부피분율 변화에 따른 탄성계수를 측정하였는데 이 경우 초기 추정 탄성계수를 구하기 위해서 부피분율에 따른 미세조직 사진으로부터 강화재의 형상(aspect ratio)과 방향을 고려한 유효 aspect ratio 개념을 도입하였고, Mori-Tanaka 이론식에 의한 계산결과를 이용하였다. 이로부터 계산된 공진주파수와 RUS의 측정 공진주파수 사이를 최소화함으로써 정확한 탄성계수를 측정하였다. 측정된 stiffness로부터 공학적 탄성계수인 Young's modulus를 계산하였으며, 계산된 Young's modulus와 압축방향으로 인장시험한 Young's modulus를 비교분석 하였다. SiC 입자의 부피분율이 증가함에 따라 탄성계수가 증가함을 나타내었고, 탄성 stiffness의 거동은 강화재가 많이 첨가될수록 횡등방성(transversely isotropic)이 강하게 나타났으며 이것은 압출공정에 의해 강화재 입자의 방향성 재배열에 기인한다. 한편 일정크기 시편에 있어서 기본 공진주파수가 강화재 부피분율에 따라 고주파수 영역으로 이동하는 현상이 관찰되었으며, 이로 부터 비파괴적으로 강화재 부피분율을 예측할 수 있는 가능성을 제시하였다.

주요용어 : 초음파 공명 분광법(RUS), 탄성계수, 금속복합재료(MMC)

Abstract The dynamic elastic properties of metal matrix composites were investigated by resonant ultrasound spectroscopy(RUS). The composites used in this study consisted of 2124 aluminum alloy reinforced with different concentrations of SiC particles. RUS can determine the nine independent elastic stiffness(C_{ij}) for the orthorhombic symmetry on a small specimen simultaneously. The elastic constants were determined as a function of the volume fraction. A concept of effective aspect ratio, which combine the aspect ratio and the orientation of reinforcement, was used to calculate the initial moduli from Mori-Tanaka theory for the input of RUS minimization code. Young's moduli can be obtained from the measured stiffnesses. The results show that the elastic stiffness increases with increment of the particle content. The behavior of elastic stiffness indicates that the particle redistribution induced by the extrusion process enlarges the transversely isotropic symmetry as the fraction of reinforced particles increase. This relationship could be used for determination of the volume fractions of reinforcement as a potential tool of nondestructive material characterization.

Keywords : resonant ultrasound spectroscopy, elastic constants, metal matrix composite

1. 서 론

금속복합재료(metal matrix composite: MMC)는 첨단 항공분야와 해양구조물의 주요 부품으로 그 용도가 증가하고 있으며 이를 위한 기계적 성질의 정확한 측정이 필요하다. 특히 항공기나 자동차 등 수송 구조물에 금속복합재료를 적용하기 위한 최근의 요구사항으로는 진동과 잡음을 감소시키는 능력이 우수하고 구조적으로 효율적인 재료를 필요로 하고 있다. 이러한 재료의 개발을 위한 기초 연구로서 금속복합재료의 동적 특성, 즉 동적 탄성계수(dynamic elastic modulus)와 기계적 감쇠(damping)를 측정하기 위한 기술을 개발해야 할 필요성이 요구되고 있다[1]. 금속복합재료의 동적 탄성계수 또는 동적 하중하에 재료의 stiffness는 매우 중요한 물성의 하나인데 원자간 포텐셜, 크리프 거동, 열 팽창, Debye 온도 및 2차 상전이 등의 기초 연구 분야와 파괴역학, buckling 거동 등을 규명하기 위한 기계 설계 분야에서 그 중요성이 증대되고 있다.

이러한 탄성계수 측정은 일반적인 재료시험법으로 응력-변위 관계에서 구하는 방법과 비파괴적인 측정법이 있다. 복합재료나 집합조직(texture)을 갖는 금속과 같은 이방성 재료에 대해서 재료시험법으로 탄성계수를 구하려면 방향에 따른 다양한 시편이 필요하며 판형, 원통형 등과 같이 가공 형태에 따라 모든 방향으로의 시편을 제작하기 어려운 경우가 발생할 수 있다. 또한 등방성 재료일지라도 재료의 조성, 가공, 열처리 등과 같이 다양한 재료 변수에 대해 재료시험으로 탄성계수를 구하기 위해서는 상당한 노력과 시간이 필요하다. 이러한 단점을 해결하기 위하여 다양한 비파괴적인 측정법이 개발되고 있으며 초음파(탄성파)를 이용하는 방법이 그 중에 하나이다. 초음파를 이용한 탄성계수의 측정은 주로 초음파 속도법에 의해 수행되었는데, 최근에 미국의 Los Alamos 연구소를 중심으로 개발된 초음파 공명 분광법(resonant ultrasound spectroscopy: RUS)은 다른 초음파 방법에 비해서 보다 정밀하고 편리한 방법으로 소개되었다.

RUS 측정방법은 시편의 형태와 질량에 따른 정규 모우드의 탄성 진동 주파수를 측정하고 이를 컴퓨터로 계산하여 한꺼번에 재료의 모든 탄성계수(최대 21개)를 측정할 수 있는 기술이다[2]. 공진 주파수에서 탄성계수 값을 추출하기 위해서는 먼저 초기 추정 탄성계수와 시편 형태 및 무게 등의 기본 값을 사용하여 고유 주파수를 계산하는 문제를 풀어야 하며, 계산된 추정 공

명 주파수를 기초로 실제 측정된 공명 주파수에서 해당 시편의 정확한 탄성계수를 찾기 위한 역 알고리즘(inversion algorithm)을 이용해야 한다. 최근에 컴퓨터의 성능이 발전함에 따라 이러한 계산이 가능하게 되었으며 RUS를 이용하는 다양한 응용분야가 개발되고 있다. 현재까지 RUS 측정 및 계산을 위해서는 장방형, 구형 또는 원통형 시편이 필요하며 시편 크기는 수백 μm , 무게는 100 μg 정도로 작은 것으로부터 수 cm, 수 kg 까지 적용할 수 있다.

RUS 기술은 단결정 재료[3], 금속간 화합물[4] 뿐 아니라 boron fiber 강화 Al 금속복합재료[5]에 대해 탄성계수를 측정하는데 사용되었다. 최근에 Dunn 등의 연구[6]에 의하면 방향분포합수를 고려하여 유효 탄성계수를 결정하였고 SiC short fiber 강화 Al MMC의 횡등방성 탄성특성을 조사하였다. 입자강화 금속복합재료에 대한 연구로는 Jeong 등[7]에 의해 수행되었으며 Mori-Tanaka 모델에 의한 유효 탄성계수 계산과 초음파속도법에 의해 탄성계수를 측정하였다. 본 연구에서는 RUS 측정 기술을 이용하여 SiC 입자강화 2124Al 금속복합재료에 대해 강화재의 부피분율에 따라 동적 탄성 탄성계수(C_{ij})를 측정하였으며 이를 인장시험과 연관지어 입자 강화 금속복합재료의 동적 탄성 특성을 규명코자 하였다.

2. 금속복합재료의 탄성계수 이론

RUS를 사용하여 보다 정확한 탄성계수를 측정하기 위해서는 초기 탄성계수 자료를 문헌에서 참조하거나 예측 모델에 의한 계산값으로 추정할 수 있고, 추가로 시편의 크기, 질량(밀도) 자료를 사용한다. 문헌에 의한 탄성계수 측정은 이미 시도한 바 있으며[8], 본 논문에서는 금속복합재료에 대한 유효 탄성계수를 계산하여 추정 탄성계수로서 사용하고자 한다. 유효 탄성계수를 계산하는데는 몇가지 주요한 모델이 있고, 그 내용을 간단히 기술하면 다음과 같다.

2.1. Rule of Mixture (ROM) Bounds[9]

본 모델에서는 복합재료의 탄성계수에 대한 2개의 경계가 존재한다. ROM의 상한값은 복합재료가 동일 변형을 받고 있다고 가정하고 유효 Young's modulus(E)는 다음 식으로 주어진다.

$$E = (1 - c)E_m + cE_r \dots\dots\dots (1)$$

여기서 c 는 강화재의 부피분율이고, 첨자 r 과 m 은 강화재(reinforcement)와 기지(matrix)를 각각 나타낸다. ROM의 하한값은 복합재료가 동일 응력을 받는다고 가정하고 다음 식으로 표현된다. 이때 이것을 compliance의 ROM이라고도 한다.

$$\frac{1}{E} = \frac{(1 - c)}{E_m} + \frac{c}{E_r} \dots\dots\dots (2)$$

이 경계값들은 실제값과 너무 많이 떨어져서 정확하게 사용코자 할 때는 문제가 있지만 그럼에도 불구하고 개략적 특성을 파악코자 할 때는 단순한 성질 때문에 유용하게 사용할 수 있다.

2.2. Hashin-Shtrikman (H-S) Model[10]

본 모델은 복합재료에서 강화재의 형상이 지배적인 요소가 아닌 거시적 등방성과 준균일성에 근거하고 있다. 초기에는 강화재가 고루 분산되어 있는 균일하고 등방성인 기지 재료를 가정한다. Strain 에너지(U_p)를 계산하고 Eshelby 모델의 응력편광텐서(p)에 대해 미분하면 경계값을 얻을 수 있다. 기지의 stiffness가 강화재의 stiffness보다 크나 작으냐에 따라 체적 탄성계수인 K 와 전단 탄성계수인 G 의 상한값과 하한값이 다음과 같이 계산된다.

$$K_u = K_r + \frac{1 - c}{1/(K_m - K_r) + 3c/(3K_r + 4G_r)} \dots\dots\dots (3)$$

$$K_l = K_m + \frac{c}{1/(K_r - K_m) + 3(1 - c)/(3K_m + 4G_m)} \dots\dots\dots (4)$$

$$G_u = G_r + \frac{1 - c}{1/(G_m - G_r) + 6c(K_r + 2G_r)/5G_r(3K_r + 4G_r)} \dots\dots\dots (5)$$

$$G_l = G_m + \frac{c}{1/(G_r - G_m) + 6(1 - c)(K_m + 2G_m)/5G_m(3K_m + 4G_m)} \dots\dots\dots (6)$$

여기서 아래첨자 u 와 l 는 상한값과 하한값을 각각 나타내며 m 과 r 는 각각 기지(matrix)와 강화재(reinforcement)를 나타내고 다음 절에도 동일하게 적용된다. Young's modulus(E)의 상한값과 하한값은 K 와 G 를 구한 다음 다음식을 이용하여 계산할 수 있다.

$$E = 9KG / (3K + G) \dots\dots\dots (7)$$

2.3. Mori-Tanaka Model

본 모델은 복합재료의 유효탄성계수를 계산하는데 유용하며, Eshelby의 등가 재재물 원리와 Mori-Tanaka 기지에서의 평균 응력 개념과 밀접하게 관련되어 있다. 즉 재재물의 상호작용 효과는 평균장 근사에 의해 영향을 받는다고 가정한다. 관계식을 좀 간단히 표현하기 위하여 2상 복합재료로 간주하고 재재물은 이방성을 가진 타원형 입자(ellipsoidal particle)로 고려하였다.

복합재료의 유효 탄성계수를 변형률 집중계수(strain concentration factor) 개념을 이용하여 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$C = C_m + \nu_r(C_r - C_m)A \dots\dots\dots (8)$$

여기서 C 는 elastic stiffness tensor, ν 는 부피분율을 나타낸다.

변형률 집중계수(A)는 강화재의 평균 변형률($\bar{\epsilon}$)과 복합재료 표면에 가해진 균일 변형률(ϵ^0)를 연관시켜 주는 것으로 $\bar{\epsilon}_r = A \epsilon^0$ 관계를 나타내고, 구성재료의 탄성계수, 재재물의 모양과 방향 등에 의존한다. 그러므로 엄밀히 표현하면 방위 의존성을 나타내는 방위분포함수(orientation distribution function: ODF)로서 텐서의 방위평균을 나타내어야한다. 수많은 강화재에 의한 변형률 집중계수를 기지내의 강화재 한 개가 존재할 시의 변형률 집중계수로 다시 표현하면 다음과 같다.

$$A = A^{dil} [\nu_m I + \nu_r A^{dil}]^{-1} \dots\dots\dots (9)$$

여기서 $A^{dil} = [I + SC_m^{-1}(C_r - C_m)]^{-1}$ 이고 $S = S(C_p, shape)$ 는 초기 탄성계수(C_p)와 aspect ratio로 표현되는 형상의 함수인 Eshelby 텐서이다.

2.4. RUS 원리

고체의 자유진동에 대한 해는 긴 역사에도 불구하고 완벽한 해석적인 해를 구하는 방법이 아직 존재하지 않는다. 비해석적 해를 구하는 방법으로써 유한요소법과 에너지 최소화법이 있는데 이 가운데 RUS는 후자를 사용하여 해를 구하는 방법이다[11].

탄성고체에 대한 기계적 Lagrange 해는 물체의 자유진동 즉 자유 표면 경계 조건을 가진 탄성 방정식의 해로서 다음 식으로 표현된다.

$$\rho \omega^2 u_i + \sum_{j,k,l} C_{ijkl} \frac{\partial^2 u_k}{\partial x_j \partial x_l} = 0 \dots\dots\dots (10)$$

$$\sum_{j,k,l} n_j C_{ijkl} \frac{\partial u_k}{\partial x_l} = \sum_j n_j \sigma_{ij} = 0 \dots\dots\dots (11)$$

여기서 ρ 는 밀도, ω 는 각주파수, u_i 는 변위, C_{ijkl} 은 탄성계수, n_j 는 단위 법선벡터, 그리고 σ_{ij} 는 응력이다. 위 식에서 주어진 물체의 고유주파수를 구하기 위해서는 그 에너지가 최소화되는 주파수를 구해야 하는데 Rayleigh-Ritz 방법을 적용하여 진동하는 물체의 고유주파수(eigenfrequency)를 계산하는 알고리즘이 Damarest[12]에 의해 개발되었다. 이외에도 RUS 방법이 실용화 되기까지는 eigenvalue eigenvector 문제에 대한 복잡한 계산을 단순화하기 위한 대칭성을 도입하였고, 여러 가지 구체적인 사례[13]를 통해 RUS를 이해할 수 있다.

측정된 공명주파수로부터 정확한 탄성계수를 구하기 위해서는 다음과 같이 figure of merit를 정의한다 (14).

$$F = \sum_{i=1}^N \omega_i (f_i - g_i)^2 \dots\dots\dots (12)$$

여기서 g_i 와 f_i 는 i 번째 측정주파수와 계산주파수, N 은 측정된 주파수의 총 갯수이며 ω_i 는 측정주파수 g_i 에 있어서 신뢰도를 반영하는 가중치이다. Lavenberg Marquardt 방법[11]을 사용하여 다차원 탄성계수 공간에서 F 의 최소값을 결정해야 하는데 탄성계수 C_{ij} 의 정밀도는 최소값 근방의 표면 F 의 형상을 고려하여 추정하며 되도록 많은 갯수의 공명주파수를 측정함으로써 정확한 탄성계수를 최소자승법으로 구할 수 있다. 여기서 정확한 탄성계수를 구하기 위해서는 탄성계수 추정값(초기값)을 가능한 한 실제 값과 비슷하게 선정하여야 반복 계산시에 빠르게 참값에 수렴할 수 있으며 계산 공명주파수를 측정주파수에 정확히 대응하여 시편의 탄성계수를 결정할 수 있다.

3. 실험방법

3.1. 금속복합재료의 제조

본 연구에서는 connecting rod, piston head, cylinder liner 등 고온용 자동차 부품으로 특히 경량화를 목적으로 사용되는 SiC 입자 강화 2124Al 합금 기지 금속복합재료를 대상으로 하였다. SiC_p/2124Al 금속복합재료를 평균입자크기 20 μ m 인 atomized 2124Al 기지분말과 8 μ m 인 SiC_p 강화재의 부피분율을 10%, 20%, 30%로 변화시키며 분말공정법에 의해 제조하였다. 기지와 강화재에 대한 물성치는 Table 1에 정리하였다. 강화재와 기지분말의 균일한 혼합을 위하여 습식혼합법을 사용하여 혼합후 충분히 건조한 뒤 vacuum hot press장비를 이용하여 성형하였다. 혼합 분말을 Al 캔에 충전하여 성형온도인 570 $^{\circ}$ C까지 가열한 뒤 진공에서 탈가스 처리를 실시한 후 90MPa의 응력으로 10분간 성형하였으며 성형된 금속복합재료 billet의 미세 조직 균일화 및 치밀화를 위하여 고온 압출 처리를 행하였다. 압출 온도는 액상이 생성되는 온도와 비슷한 500 $^{\circ}$ C이며, 25:1의 압출비로 압출하였다. 압출된 금속복합재료를 사용하여 인장 시편을 제조하였다.

Table 1 Physical properties of Al matrix and SiC reinforcement

	2124 Al	SiC powder
Composition	Al-4.4Cu-1.5Mg-0.6Mn	Polycrystal SiC
UTS	490MPa	21GPa
YS	400MPa	
Young's modulus	72GPa	440GPa
Elongation	10%	
Poisson's ratio	0.33	0.15
Density	2.77g/cm ³	3.2g/cm ³
Melting point	683 $^{\circ}$ C	2690 $^{\circ}$ C
CTE(coefficient of thermal expansion)	23 $\times 10^{-6}$ /K	4.5 $\times 10^{-6}$ /K

3.2. 금속복합재료의 탄성계수 측정

봉재로 압출된 금속복합재료로부터 시료를 절단하여 조성마다 3개씩 2mm \times 2.5mm \times 3mm 크기의 장방형 시편을 방전가공(EDM) 하였다(Fig. 1 참조). 가공된 시편의 모서리와 꼭지점의 sharpness를 유지하

고 맞면의 평행을 유지하도록 사포로 조심스럽게 연마 가공하였다. 가공된 시편은 Sortorius 장비를 이용하여 1/10000g 까지 무게를 측정하였고, 크기 측정은 1/100mm 정밀도를 가진 vernier caliper를 사용하여 결과를 얻었다. 또한 강화재의 분포와 형상 등을 확인하기 위하여 960 배율의 광학현미경 조직사진을 Fig. 2와 같이 얻었다.

일반적인 RUS 측정에서는 Fig. 3의 실험장치 구성에서 보듯이 장방형 시편의 양쪽 모서리에 초음파 센서가 접촉하고 있으며 한쪽 모서리에 접촉한 초음파 센서에서 가진하고 다른 한쪽 초음파 센서에서 신호를 수신하고 있다. 이와 같은 배치는 가능한 한 자유진동 조건을 만족하기 위하여 탄성적으로 가장 약하게 결합하기 위함이다. 본 시스템은 탄성적이므로 항상 정규 모드로 진동하는 것이 탐지되며 초음파 센서는 일반적인 압전 디스크로 센서 자체 공명주파수와 시편의 공명주파수가 간섭받지 않도록 다이아몬드 실린더에 접합하여 시험 주파수 범위를 방해하지 않도록 하고 있다. 주파수를 변화시키면 연속적인 주파수 스펙트럼이 기록되고 공명 주파수 f_n 에서 피크가 나타나며 (이로부터 탄성계수가

결정된다) 피크 폭(Δf , full width half maximum: FWHM)으로부터 Q-factor($Q^{-1} = \Delta f / f_n$)가 결정되며 Q 값은 각 공명주파수에서 탄성에너지의 dissipation 특성을 제공한다.

4. 결과 및 고찰

4. 1. 추정 탄성계수 계산

초음파 공명 분광법으로 탄성계수를 측정할 경우 가장 중요한 점은 초기 추정 탄성계수를 사용해서 예측한 공명주파수와 측정주파수간에 모드 대응이 완벽하게 이루어져야 하므로 실제 탄성계수에 근접한 값은 다른 방법으로 구해서 적용해야한다. 금속복합재료에 대한 추정 탄성계수 자료는 서론에 언급한 연구논문 등에서 비슷한 자료를 적용해 보았으나 비교적 큰 오차가 발생되어 신뢰성 있는 탄성계수를 구할 수 없었다. 이것은 시편에 대한 내용이 다르고 측정방법도 다르기 때문이다. 본 논문에서는 Mori-Tanaka(MT) 모델을 이용하여 유효탄성계수를 수치해석적으로 계산하였다. 이 때 컴퓨터 계산은 Gavazzi와 Lagoudas[15]의 프로그램을

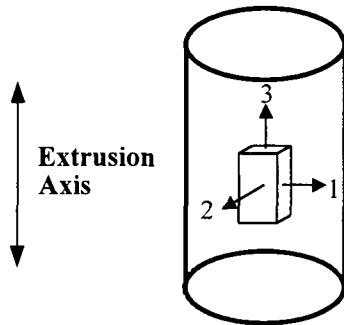


Fig. 1 Specimen geometry and designated coordinate system

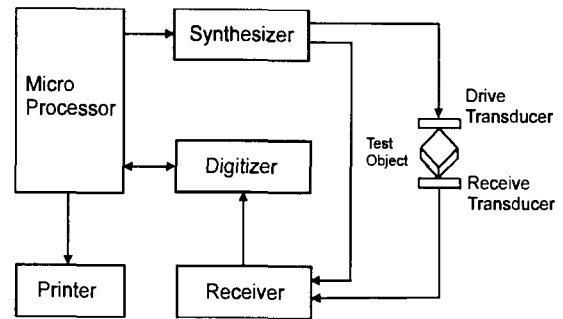


Fig. 3 Block diagram for RUS experiment

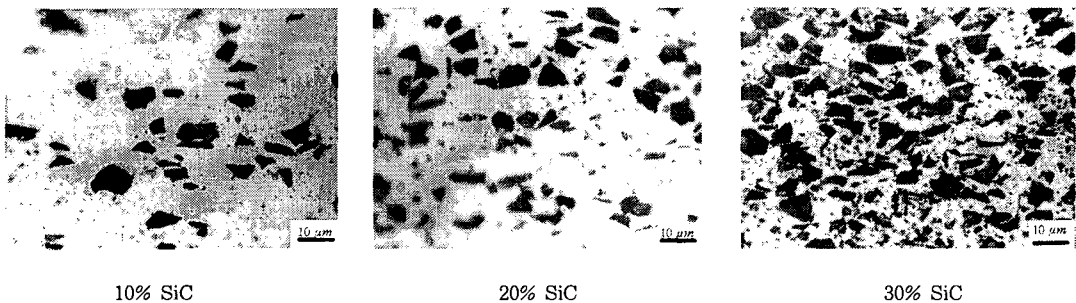


Fig. 2 Microstructures of 10%, 20%, 30% SiC volume fraction of MMC specimen

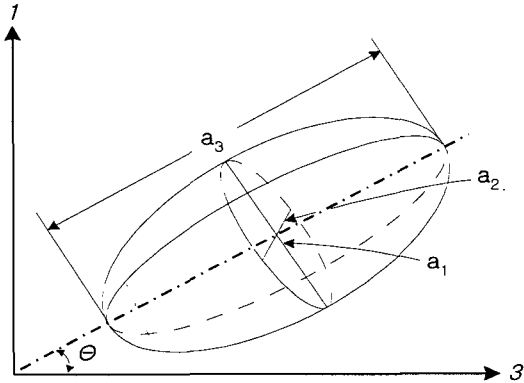


Fig. 4 Schematic drawing for average aspect ratio and orientation of SiC particulate

사용하였다. 입력 자료중 강화재 형상 모델에 있어서 본 실험에 사용한 SiC 입자는 Fig. 2에 나타난대로 불규칙한 형상이지만 MMC의 거동을 기술하는데 있어서는 Fig. 4와 같이 타원형으로 가정할 수 있다[16]. 이에 따라 조직사진에 대한 image 분석결과에 의해 평균 aspect ratio와 평균 방향성을 결정하고 이 두가지를 동시에 고려한 유효 aspect ratio를 입력값으로 MT 모델에 의한 유효 탄성계수를 계산하여 Table 2에 정리하였다.

강화재의 형상과 방향성을 고려한 유효 탄성계수와 초음파 공명 분광법에 의한 탄성계수간에는 차이가 난다. 이것은 MT 이론에 의한 유효 탄성계수는 복합재료 구성재료의 탄성계수, 포아송비, 대칭성, 부피분율과 특히 강화재의 형상을 고려하였지만, 실제로는 재료의 미세구조적인 변수, 예컨대 강화재의 크기, 분포, 계면, 전위 등을 고려하지 않은 상태에서 계산한 것이므로 실제와 차이가 있을 수 있다. 반면에 초음파 공명 분광법으로 구한 탄성계수는 유효 탄성계수를 초기 추정

값으로 간주하고 실제 공명주파수와 비교평가를 반복하여 탄성계수를 구하는 방식으로 실제 시편의 모든 상황이 반영된 참값이라 볼 수 있다.

4. 2. RUS를 이용한 탄성계수 결정

각 시편에 있어서 설치 조건(방향, 위치 등)이 변해도 주파수 이동의 큰 변화없이 거의 일정하게 진동 스펙트럼이 나타났으며 공명 피크의 중심 주파수를 확인할 수 있었다. 각 부피분율에 따른 대표적인 스펙트럼을 Fig. 5에 나타내었고 강화재의 부피 분율이 증가함에 따라 고주파수 방향으로 공명 피크가 이동하며 신호 진폭이 감소함을 발견할 수 있었다. 여기서 주파수 이동은 탄성계수와 관련되고 진폭 변화는 재료의 damping과 관련된다. 특히 시편형상과 진동형태에 의해 결정되는 처음 공명주파수(공명모드 k=4)에서 공명주파수 증가 현상이 뚜렷하기 때문에 동일 시편 형상인 경우 본 모드를 이용하면 강화재의 부피분율에 대한 예측이 가능함을 보여주고 있다.

RUS 장비를 이용하여 본 시편에 대해 처음 30개의 공명주파수를 선택할 경우 대략 400kHz에서 1.6MHz 사이에 존재하며 이를 정밀 측정하여 Migliori 등[14]이 개발한 RPR 코드를 사용하여 탄성계수 계산에 이용한다. 계산결과를 살펴보면 초기 30개의 계산주파수와 측정된 공명주파수 및 공명모드(k), 계산치와 측정치간의 오차, 각 공명주파수의 특정모드와의 의존성, 탄성계수 텐서값, 그리고 전체적인 평균오차(root mean square, RMS error) 및 탄성계수 값에 수렴하기 위한 반복횟수 등을 알 수 있다. 일반적으로 평균 오차가 0.2% 이내이면 대단히 정밀한 결과로 볼 수 있다. 본 시편의 대칭성을 사방정계와 횡등방성으로 가정하여 측정하였으며 그 결과를 Table 3에 정리하였다.

본 금속복합재료의 특성을 탄성계수의 변화 측면에서

Table 2 Initial elastic stiffnesses from Mori-Tanaka's theory in SiC_p/2124Al MMCs

Elastic Stiffness Constants, C _{ij} (GPa)										
	C ₁₁	C ₂₂	C ₃₃	C ₂₃	C ₁₃	C ₁₂	C ₄₄	C ₅₅	C ₆₆	Aspect ratio
										a ₁ : a ₂ : a ₃
10% volume	117.4	118.1	125.3	55.83	55.73	55.91	32.35	31.83	30.91	0.71:0.81:1.63
20% volume	131	130.6	140	59.95	60.01	59.49	38.34	38.68	35.66	1.0:0.96:1.66
30% volume	146.4	146.7	154.4	64.84	64.81	63.3	46.6	46.35	41.61	1.02:1.04:1.47

분석해 보면 Table 3에서 입자 강화재 함량이 증가할수록 압출방향 탄성계수인 C_{33} 는 횡방향 탄성계수 C_{11} 와 C_{22} 에 비해 증가폭이 큰 것을 확인할 수 있는데, 이것은 시편 제조시 압출 방향으로 입자 강화재가 방향성 배열이 되었음을 알 수 있다. 본 시편의 대칭성을 살펴보면 사방정계로 가정한 계산결과와 횡등방성 계산결과가 거의 동일하게 나타나므로 봉형 시편 가공시 예측할 수 있는 횡등방성 대칭성이 확인되었다. 그러므로 이후의 모든 계산과 설명은 횡등방성 대칭으로 전개코자 한다. 전단 탄성계수(C_{44} , C_{66})와 off-diagonal 탄성계수는 완만한 증가를 보이고 있다. 이것 또한 시편 제조시 강화재 함량이 많을수록 압출 공정에 의한 강화재의 방향성 분포가 큰 것으로 판단된다.

4.3. Young's modulus 비교분석

Young's modulus는 탄성계수와 역행렬 관계인 compliance(S_{ij})로부터 $E_{ii} = 1/S_{ii}$ 관계식에 의해 계산할 수 있다. Shear modulus는 $G_{23} = C_{44}$, $G_{13} = C_{55}$, $G_{12} = C_{66}$ 관계에 의해 결정되어진다. 특히, 인장시험에 의한 Young's modulus(E_{11})과 RUS 실험에 의한 값이 차이가 나는 이유는 정적 측정법과 동적 측정법의 측정 속도에 의한 것으로 판단되며, 또한 인장시험 결과는 ROM의 하한값에 근접하고 있음을 알 수 있고, RUS 실험결과는 변형을 에너지에 근거한 Hashin-Shtrikman의 bound에 잘 근사하고 있음을 보여줌

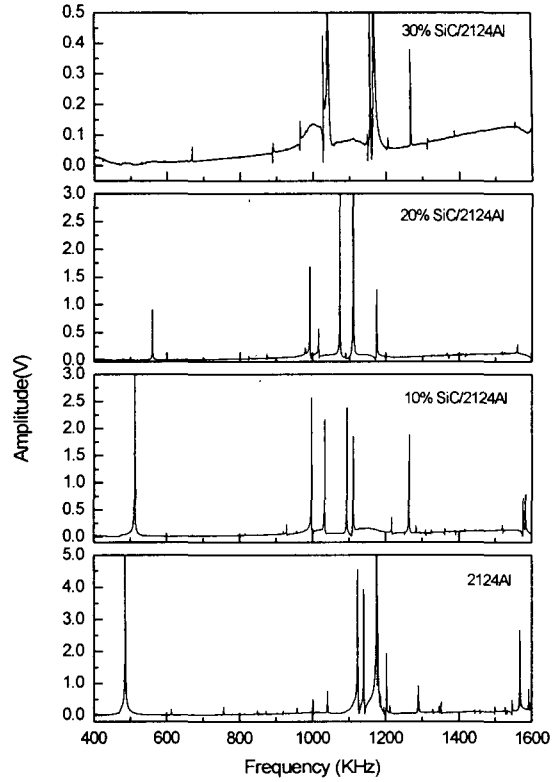


Fig. 5 Resonant spectra in 2124 Al and 10%, 20%, 30% SiC particulate reinforced MMC

Table 3 Test results of elastic stiffnesses in SiC_p/2124Al MMCs

		Elastic Stiffness Constants, C _{ij} (GPa)									
		C ₁₁	C ₂₂	C ₃₃	C ₂₃	C ₁₃	C ₁₂	C ₄₄	C ₅₅	C ₆₆	RMS Error%
10% volume	O	130.	127.	131.	62.81	64.99	63.31	34.32	34.21	33.18	0.18
	T	129.		132.	64.34		64.05	34.38		32.67	0.207
20% volume	O	139.	141.	146.	62.08	58.43	64.49	40.66	41.01	38.82	0.18
	T	145.		151.	66.42		68.06	40.66		38.9	0.15
30% volume	O	167.	168.	175.	68.89	67.25	70.79	51.39	51.41	48.75	0.12
	T	169.3		175.	69.09		7152	51.29		48.89	0.11

O : Orthorhombic T : Transversely Isotropic

으로 입자강화형 MMC는 외부 하중에 대해 기지와 강화재가 동일 변형을 조건 보다는 동일 응력 조건을 나타내고 있다고 판단된다. 강화재 함량이 증가함에 따라 측정값의 차이가 더 커지는 것도 이와 같은 이유이다. E_{22} 와 E_{33} 에 대하여도 강화재 부피분을 증가에 따라 혼합칙(rule of mixture: ROM)과 Hashin-Shtrikman bounds와 함께 비교하여 Fig. 6에 나타냈다. Young's modulus도 탄성계수와 마찬가지로 강화재 함량에 따라 횡등방성 거동을 강하게 보이고 있다.

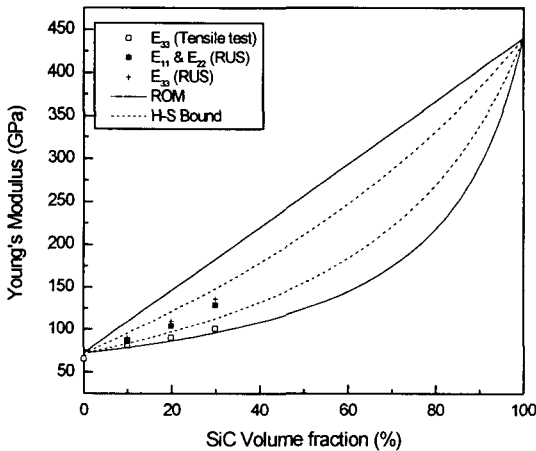


Fig. 6 Plot of Young's modulus versus SiC volume fraction for the Sic particulate composites

5. 결 론

- 1) 초음파 공명 분광법(RUS)을 이용하여 금속복합재료(MMC)의 탄성계수 (C_{ij})를 정밀하게 측정할 수 있는 가능성을 보여주었으며, 동 탄성계수 측정 방법 중 가장 보편적인 초음파 속도측정 방법에 비해서 1개의 소형시편으로부터 한꺼번에 9개까지의 탄성계수를 측정할 수 있는 편리성이 입증되었다.
- 2) 이론적 공명주파수를 예측하기 위한 초기 추정 탄성계수를 얻기 위하여 강화재의 형상과 방향성을 고려한 유효 aspect ratio를 도입하여 Mori-Tanaka 이론에 의한 유효 탄성계수를 계산하였고, 이것을 이용한 RUS 실험결과는 Hashin-Shtrikman 경계 조건을 잘 만족함을 보여주었다.
- 3) SiC 입자 강화재의 함량이 10%, 20%, 30%로 증가함에 따라 금속복합재료의 탄성계수(C_{ij})는 선형

적으로 증가하였고, 탄성계수의 이방성은 부피분율에 따라 점차적으로 압출방향으로 횡등방성 거동이 강하게 나타남을 알 수 있었다. 이것은 압출 공정시 강화재가 많이 첨가될수록 강화재의 방향성 분포 (particle redistribution)가 비교적 크게 발생됨을 미세 조직사진으로부터 확인할 수 있었다.

- 4) 일정크기 시편에 있어서 특정 공진주파수가 강화재 부피분율에 따라 고주파수 영역으로 이동하는 현상이 관찰되었으며, 이로부터 비파괴적으로 강화재 부피분율을 예측할 수 있는 가능성을 볼 수 있다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발 사업중 원자력 구조 건전성 기술개발 과제의 일환으로 수행된 것으로 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] A. Wolfenden and J. M. Wolla, "Dynamic mechanical properties", MMC: Mechanism and Properties, pp. 287-328, (1991)
- [2] J. D. Maynard, "The use of piezoelectric film and ultrasound resonance to determine the complete elastic tensor in one measurement", J. Acoust. Soc. Am. 91 (3), pp. 1754-1762, (1992)
- [3] P. S. Spool, J. D. Maynard, M. J. Pan, D. J. Green, J. R. Hellmann and T. Tanaka, "Elastic constants and crystal anisotropy of titanium diboride", Appl. Phys. Lett. Vol. 70, No. 15, pp. 1959-1961, 14 April 1997
- [4] F. Chu, T. E. Mitchell, B. Majumdar, D. Miracle, T. K. Nandy and D. Banerjee, "Elastic properties of the O phase in Ti-Al-Nb alloys", Intermetallics 5, pp. 147-156, (1997)
- [5] H. Ledbetter, C. Fortunko and P. Heyliger, "Orthotropic elastic constants of a boron-aluminum fiber-reinforced composite: An acoustic resonance spec-

- troscopy study", *J. Appl. Phys.* 78(3), pp. 1542-1546, (1995)
- [6] M. L. Dunn, H. Ledbetter, P. R. Heyliger and C. S. Choi, "Elastic constants of textured short-fiber composites", *J. Mech. Phys. Solids*, Vol. 44, NO. 9, pp. 1509-1541, (1996)
- [7] H. Jeong, D. Hsu, R. Shannon and P. Liaw, "Characterization of anisotropic elastic constants of silicone-carbide particulate reinforced aluminum metal matrix composites: Part I. Experiment", *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 25A, pp. 799-809, April (1994)
- [8] 정현규, 정용무, 주영상, "초음파 공명 분광법을 이용한 SiC/2124Al 금속복합재료의 강화재 부피 분율에 따른 동적탄성특성", *한국비파괴검사학회, '98 춘계학술발표회 논문집*, pp. 26-38, (1998)
- [9] M. Orrhede, R. Tolani and K. Salama, "Elastic constants and thermal expansion of aluminium-SiC metal-matrix composites", *Res. Nondestructive Evaluation*, Vol. 8, pp. 23-37, (1996)
- [10] Z. Hashin and T. Shtrikman, "A variational approach to the elastic behavior of multi phase materials", *J. Mech. Phys. Solids*, Vol. 11, pp. 127-140, (1963)
- [11] A. Migliori and J. Sarrao, *Resonant Ultrasound Spectroscopy*, John Wiley & Sons, Inc., (1997)
- [12] H. H. Demarst Jr., "Cube-resonance method to determine the elastic constants of solids", *J. Acoust. Soc. Am*, 49, pp. 768-775, (1971)
- [13] I. Ohno, "Free vibration of a rectangular parallelepiped crystal and its application to determination of elastic constants of orthorhombic crystals", *J. Phys. Earth*, 24, pp. 355-379, (1976)
- [14] A. Migliori, J. L. Sarrao, W. M. Visscher, T. M. Bell, Ming Lei, Z. Fisk and R. G. Leisure, "Resonance ultrasound spectroscopic techniques for measurement of the elastic moduli of solids", *Physica B* 183, pp. 1-24, (1993)
- [15] A. C. Gavazzi and D. C. Lagoudas, "On the numerical evaluation of Eshelby's tensor and its application to elastoplastic fibrous composites", *Compu. Mech.*, Vol. 7, pp. 13-19, (1990)
- [16] P.J. Withers, A.N. Smith, T.W. Clane, and W.M. Stobbs, *Fundamental relationships between microstructures and mechanical properties of metal matrix composites*, The Minerals, Metals and Materials Society, pp. 225-234, (1990)