

초음파를 이용한 입자강화 금속복합재료의 계면특성에 관한 이론적 연구

이 준 현

부산대학교 기계설계공학과

기계기술연구소 재료강도 및 비파괴평가실

요 약 초음파법은 종래의 금속재료는 물론 최근의 금속 복합재료등과 같은 신소재의 재료특성을 비파괴적으로 평가할 수 있는 일반적인 방법이다. 그러나 이와같은 재료들의 비파괴 특성 평가를 위해 초음파법을 적용시킬 경우 무엇보다도 재료 내부를 전파하는 탄성파의 전파특성에 대한 물리적 현상에 대한 이해가 필수적이다. 본 연구에서는 금속 복합재료의 제조공정에서 일반적으로 많이 발생하는 기지재와 강화재 사이의 계면 문제 및 기지재에 분포하는 강화재의 체적함유율의 변화등에 의한 유효 평면파의 다중 산란 특성을 SiC 입자강화 6061 알루미늄 복합재료에 대해 Lax의 준 결정 근사(quasi-crystalline approximation) 이론 및 소감 정리 (extinction theorem)를 기초로 하여 이론적으로 해석하였다. 그 결과 SiC 입자 강화재의 체적 함유율의 변화에 대한 유효 평면파의 위상속도 및 감쇠의 주파수 의존 특성과 금속복합재료에 있어서의 기지재와 강화재 사이의 계면층의 탄성특성에 대한 위상속도의 변화 특성이 명확하게 규명되었다.

1. 서 론

최근 항공기부품, 제트엔진, 자동차 부품 및 레저용품등의 산업분야에서 경량화, 고성능화가 요구됨에 따라 첨단소재의 개발이 시도되고 있으며, 특히 이 중에서 금속복합재료는 종래의 고분자 복합재료와 비교해 비 탄성율과 비 강도가 높으며, 피로강도, 내마모성등 우수한 재료특성으로 인하여 최근 그 실용화에 많은 연구가 진행되고 있다.

금속 복합재료는 강화재의 형태에 따라 장섬유 강화형, 단섬유 강화형, 입자 강화형으로 분류되며, 특히 이 중에서 단섬유 및 입자 강화형 복합재료는 장섬유 강화 복합재료에 비해 이방성이 적고, 압연

및 압출등의 2차가공이 용이하기 때문에 많은 관심이 모아지고 있다.

그러나 금속 복합재료는 그 제조공정에 있어서의 화학물 생성, 고용 확산반응등으로 인한 강화재와 기지재 사이의 계면층이 형성되는 경우가 많아 계면층의 특성에 대한 연구가 최근 중요한 연구과제로 대두되고 있다.

한편 복합재료 내부의 미세구조에 대한 재료특성을 비파괴적으로 모니터링하기 위해서는 종종 초음파법에 의한 탄성파가 유용하게 이용되고 있고 최근 이와 관련된 실험적인 연구결과들이 보고 되고 있다.^{1)~3)} 그러나 복합재료에 대하여 초음파법을 효율적으로 적용시키기 위해서는 무엇보다도 복합재

료 내부에서 일어나는 탄성파의 거동에 대한 물리적 현상의 이해가 필요하며 이를 위해서는 복합재료에 있어서의 탄성파의 전파특성에 대한 미시적인 관점에서의 이론적 해석이 필요하다.

복합재료 내부를 전파하는 탄성파에 관하여는 지금까지 소수의 이론적 연구가 보고되고 있지만, 이들 대부분은 저주파수 영역을 대상으로 하고 있고, 구해진 평면 탄성파의 유효 전파 속도는 비분산적으로 정적인 유효탄성 특성을 나타낸다. Varadan et al.⁴⁾은 임의의 유한한 진동수역에 대한 유효 전파 속도 및 감쇠를 계산 하였지만, 충분한 수치결과를 얻지 못하고 있다. 또 Shindo et al.⁵⁾은 불균질 계면층을 가지는 구형 개재물 모델에 대하여 Lax의 準結晶近似(quasi-crystalline approximation : QCA)⁶⁾ 및 Foldy의 이론⁷⁾을 이용하여 탄성파의 전파특성에 대한 해석을 행하였으나 여기에는 탄성파의 다중산란을 충분히 고려하지 않고 있으며 또 고밀도로 개재물이 분포하는 경우의 문제에는 적용할 수 없는 문제점이 남아있다.

따라서 본 연구에서는 금속 복합재료의 계면에 있어서의 초음파의 거동에 대한 물리적 현상을 이해하고, 복합재료 내부를 전파하는 탄성파에 대한 보다 실제적인 문제의 해를 얻기 위하여, 불균질 계면층을 가지는 입자 분산 강화형 금속복합재료의 탄성파 다중산란 이론을 전개해 복합재료 내부에 전파하는 평면 탄성파의 유효 전파 속도 및 감쇠를 임의의 유한 진동수 범위내에서 수치 계산을 행하여, 진동수 의존성 및 강화재의 체적 함유율 및 계면 특성의 영향들에 대하여 고찰한다.

또 본 해석에 있어서는 탄성기지(matrix)내부에 불규칙적으로 분포하는 탄성 구형 강화재 문제로 가정해, 팽창파 및 전단파로 구성되는 조화 평면파의 산란 변위 벡터장을 구하여 그 평균장을 생각하였다. 따라서 문제는 결국 평균장 계층 방정식으로 귀착되어 "Lax의 準結晶 近似(QCA)"를 이용하여 계층을 제한하였다.

또 강화재의 체적 함유율이 낮고 강화입자사이의 거리가 멀어져 있는 경우에는, 입자사이의 상호작용은 무시되어져 정적인 유효 탄성 계수가 결정되어진다.

한편 본 연구에서의 수치계산은 최근 자동차, 항

공기 구조부품으로 사용이 기대되는 SiC 입자강화 알루미늄(Al 6061 T-6) 복합재료에 대하여 실시 하였으며, 이로부터 무차원화 되어진 진동수에 대한 평면 팽창파 및 전단파의 유효 전파 속도 및 감쇠의 변화 및 또 이에 대한 SiC 강화입자의 체적 함유율 및 계면층의 특성에 대한 영향을 규명하였다.

2. 문제 제시 및 기초식

Fig. 1과 같이, Lamé 정수 λ_2, μ_2 , 질량밀도 ρ_2 , 프와송 비 ν_2 의 탄성 기지재에 균일한 두께 h 의 얇은 불균질 계면층을 가지고 접합되어진 반경 a , 탄성 특성 $\lambda_1, \mu_1, \rho_1, \nu_1$ 의 구형 탄성 강화재가 불규칙 분포하는 복합재 모델을 설정하고, 직교 좌표 (x, y, z) 을 이용하여 j 번째의 구의 중심에 원점 $O_j(\xi_j, \eta_j, \zeta_j)$ 를 가지는 국소 직교 좌표 (X_j, Y_j, Z_j) 와 국소 구좌표 (r_j, θ_j, ϕ_j) 를 도입한다.

변화하는 물질특성 $\lambda(r), \mu(r), \rho(r), \nu(r)$ 을 가지는 계면층 ($h \ll a$)를 생각하면, Lamé 상수 $\lambda(r), \mu(r)$ 은

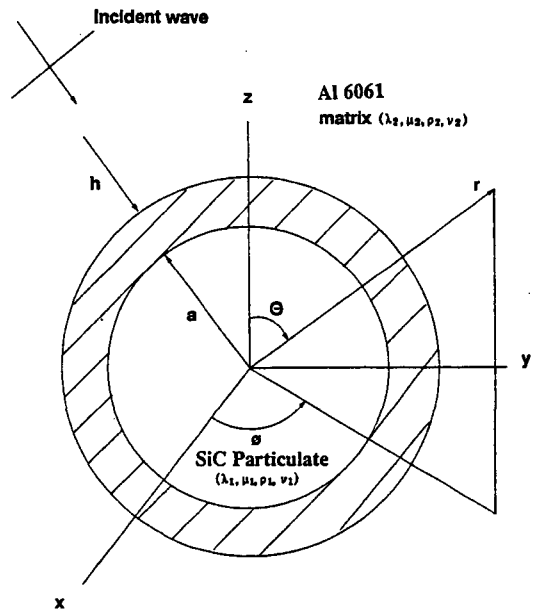


Fig. 1. SiC particulate with interface layer in SiC reinforced Al 6061 composite.

$$\begin{aligned} \lambda(r) + \mu(r) &= (\lambda_0 + \mu_0)f(r) \\ \mu(r) &= \mu_0g(r) \quad (a < r < a+h) \dots\dots\dots (1) \end{aligned}$$

여기서, $f(r)$, $g(r)$ 은 r 의 일반함수, λ_0 , μ_0 은 $r(a < r < a+h)$ 의 임의 값에 대한 계면재료의 Lamé 상수이다.

전파 하는 파의 파장 T_1 에 비해 계면층 두께 h 가 매우 작은 경우를 가정하면, h/T_1 의 최초의 1차파에 대해서 다음의 응력에 관한 연속 조건식이 성립한다.

$$\begin{aligned} \sigma_{rr}^+ &= \sigma_{rr}^- + \sigma_{rr}^i \\ \sigma_{r\theta}^+ &= \sigma_{r\theta}^- + \sigma_{r\theta}^i \quad (r=a) \dots\dots\dots (2) \\ \sigma_{r\phi}^+ &= \sigma_{r\phi}^- + \sigma_{r\phi}^i. \end{aligned}$$

여기서 (σ_{rr} , $\sigma_{r\theta}$, $\sigma_{r\phi}$)는 응력 tensor, 위 첨자 t, s, i 는 각각 통과파, 산란파, 입사파를 나타낸다. 또 변위 성분에 관한 조건식은 다음과 같이 나타내어지며

$$\begin{aligned} u_r^+ + u_r^- - u_r^i &= \frac{hK_{1i}}{\lambda_0 + 2\mu_0} \sigma_{rr}^i \\ u_\theta^+ + u_\theta^- - u_\theta^i &= \frac{hK_{2i}}{\mu_0} \sigma_{r\theta}^i \quad (r=a) \dots\dots\dots (3) \\ u_\phi^+ + u_\phi^- - u_\phi^i &= \frac{hK_{2i}}{\mu_0} \sigma_{r\phi}^i \end{aligned}$$

여기서, (u_r , u_θ , u_ϕ)는 r , θ , ϕ 방향의 변위 성분, K_{1i} , K_{2i} 는 다음과 같은 적분식으로 나타내어지는 함수이다.

$$\begin{aligned} K_{1i} &= \int_0^1 \frac{dx}{f(a+hx)} \dots\dots\dots (4) \\ K_{2i} &= \int_0^1 \frac{dx}{g(a+hx)} \end{aligned}$$

한편 입사 평면파로서는 Z 방향으로 전파하는 팽창파 및 X 방향 전단파를 생각하면, 입사파의 변위 vector를 $ue^{-i\omega t}$ 라고 하면, 기지재 내부를 전파하는 입사파는

$$u^i e^{-i\omega t} = u_0 e^{ik_1 \zeta_j} e^{i(k_1 z - \omega t)} e_z + u_0 e^{ik_2 \zeta_j} e^{i(k_2 z - \omega t)} e_x \dots\dots (5)$$

여기서 i : 허수단위, ω : 평면파 원진동수, e_x , e_z : x , z 축방향의 단위 벡터, $u_0 \exp(ik_1 \zeta_j)$, $u_0 \exp(ik_2 \zeta_j)$: 입사 팽창파, 전단파의 진폭을 각각 나타낸다. k_1 및 k_2 는 기지재의 팽창파, 전단파의 파수(wave number)이며 다음식과 같이 진동수 및 전파속도와의 관계로서 주어진다.

$$k_1 = \frac{\omega}{C_1}, \quad k_2 = \frac{\omega}{C_2} \dots\dots\dots (6)$$

또 C_1 , C_2 는 기지재의 팽창파 및 전단파의 전파속도로써 다음식과 같이 재료의 탄성 특성들과의 관계로 주어진다.

$$\begin{aligned} C_1 &= \sqrt{\frac{\lambda_2 + 2\mu_2}{\rho_2}} \dots\dots\dots (7) \\ C_2 &= \sqrt{\frac{\mu_2}{\rho_2}} \end{aligned}$$

3. 기지재내의 N개의 구형 강화재들에 의한 다중산란

j 번째의 구형 강화입자의 중심 $O_j(\zeta_j, \eta_j, \zeta_j)$ 에 대하여 입사변위 벡-타 u^i 를 벡-타 파동함수⁸⁾로 전개하면

$$\begin{aligned} u^i &= u_0 e^{ik_1 \zeta_j} e^{ik_1 \zeta_j} e_z + u_0 e^{ik_2 \zeta_j} e^{ik_2 \zeta_j} e_x \\ &= u_0 \frac{e^{ik_1 \zeta_j}}{ik_1} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=-n}^n (2n+1) i^n [L_{jmn}^{(1)} \delta_{m0} \\ &+ u_0 \frac{e^{ik_2 \zeta_j}}{2i} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=-n}^n \frac{2n+1}{n(n+1)} i^n [|M_{jmn}^{(1)}| \delta_{m1} \\ &+ n(n+1) \delta_{m,-1}] \frac{1}{k_2} [|N_{jmn}^{(1)}| \delta_{m1-n} \delta_{m,-1}]] \dots\dots (8) \end{aligned}$$

여기서 δ_{m1} , $\delta_{m,-1}$ 은 Kronecker- δ 이다. 구 벡-터 파동함수 $|L_{jmn}^{(1)}|$, $|M_{jmn}^{(1)}|$, $|N_{jmn}^{(1)}|$ 은 $r=0$ 일때 $+ \zeta$ 으로 다음 식으로 주어진다.

$$\begin{aligned} |L_{jmn}^{(1)}| &= [\frac{\partial}{\partial r_j} j_n(k_1 r_j) P_n^m(\cos \theta_j) e_{rj} \\ &+ j_n(k_1 r_j) \frac{1}{r_j} \frac{\partial}{\partial \theta_j} P_n^m(\cos \theta_j) e_{\theta j} \\ &+ \frac{im}{r_j \sin \theta_j} j_n(k_1 r_j) P_n^m(\cos \theta_j) e_{\phi j}] e^{im\phi_j} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 M_{jmn}^{(1)} &= \left[\frac{im}{\sin\theta_j} j_n(k_2 r_j) P_n^m(\cos\theta_j) e_{\theta_j} \right. \\
 &\quad \left. - j_n(k_2 r_j) \frac{\partial}{\partial \theta_j} P_n^m(\cos\theta_j) e_{\phi_j} \right] e^{im\phi_j} \\
 N_{jmn}^{(1)} &= \left[\frac{n(n+1)}{r_j} j_n(k_2 r_j) P_n^m(\cos\theta_j) e_{r_j} \right. \\
 &\quad + \frac{1}{r_j} \frac{\partial}{\partial r_j} \{ r_j j_n(k_2 r_j) \} \frac{\partial}{\partial \theta_j} P_n^m(\cos\theta_j) e_{\theta_j} \\
 &\quad + \frac{im}{(r_j \sin\theta_j)} \frac{\partial}{\partial r_j} \{ r_j j_n(k_2 r_j) \} P_n^m(\cos\theta_j) e_{\phi_j} \left. \right] e^{im\phi_j} \\
 &\dots\dots\dots (9)
 \end{aligned}$$

여기서 $j_n(\)$ 은 n 차의 제1종 구 Bessel 함수, $P_n^m(\)$ 은 제1종 Legendre 배함수, $e_{r_j}, e_{\theta_j}, e_{\phi_j}$ 는 r_j, θ_j, ϕ_j 방향의 단위 벡터이다.

u_i^s 를 O_i 에 중심을 가지는 i 번째의 구형 강화입자에 의한 산란과 변위 벡터장, u_j^s 를 O_j 에 중심을 가지는 j 번째의 구형 강화입자의 통과과 변위 벡터장이라고 하면 u_i^s, u_j^s 는 다음식과 같은 탄성운동 방정식의 해가 된다.

$$(\lambda_2 + 2\mu_2) \nabla_i \nabla_i \cdot u_i^s - \mu_2 \nabla_i \times \nabla_i \times u_i^s = \rho_2 \frac{\partial^2 u_i^s}{\partial t^2} \dots\dots (10)$$

$$(\lambda_1 + 2\mu_1) \nabla_j \nabla_j \cdot u_j^s - \mu_1 \nabla_j \times \nabla_j \times u_j^s = \rho_1 \frac{\partial^2 u_j^s}{\partial t^2} \dots\dots (11)$$

여기서 ∇_i, ∇_j 는 다음식과 같이 주어지는 Hamilton 연산자이다.

$$\begin{aligned}
 \nabla_i &= e_{r_i} \frac{\partial}{\partial r_i} + e_{\theta_i} \frac{1}{r_i} \frac{\partial}{\partial \theta_i} + e_{\phi_i} \frac{1}{r_i \sin\theta_i} \frac{\partial}{\partial \phi_i} \\
 \nabla_j &= e_{r_j} \frac{\partial}{\partial r_j} + e_{\theta_j} \frac{1}{r_j} \frac{\partial}{\partial \theta_j} + e_{\phi_j} \frac{1}{r_j \sin\theta_j} \frac{\partial}{\partial \phi_j} \dots\dots\dots (12)
 \end{aligned}$$

기지체 내부의 총변위 벡터장 u 는 다음과 같다.

$$u^s = u^i + \sum_{i=1}^N u_i^s \dots\dots\dots (13)$$

식(10)의 해 u_i^s 는 무한히 먼 곳에 있어서의 방출파의 조건을, 식(11)의 해 u_j^s 는 j 번째의 구형 강화입자에 있어서의 유한성의 조건을 만족하면

$$u_i^s = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=-n}^n [A_{imn} \mathbb{L}_{imn}^{(3)} + B_{imn} \mathbb{M}_{imn}^{(3)} + C_{imn} \mathbb{N}_{imn}^{(3)}] \dots (14)$$

$$u_j^s = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=-n}^n [A'_{jmn} \mathbb{L}'_{jmn}{}^{(1)} + B'_{jmn} \mathbb{M}'_{jmn}{}^{(1)} + C'_{jmn} \mathbb{N}'_{jmn}{}^{(1)}] \dots (15)$$

여기서, $A_{imn}, B_{imn}, C_{imn}, A'_{jmn}, B'_{jmn}, C'_{jmn}$ '는 경계조건식에 의해 구해지는 미지계수이다. 한편 (14)식에 있어서의 $\mathbb{L}_{imn}^{(3)}, \mathbb{M}_{imn}^{(3)}, \mathbb{N}_{imn}^{(3)}$ 은 식(9)의 $\mathbb{L}_{jmn}^{(1)}, \mathbb{M}_{jmn}^{(1)}, \mathbb{N}_{jmn}^{(1)}$ 에 있어서의 j 를 i 로, $j_n(\)$ 을 n 차의 제1종 구 Hankel 함수 $h_n^{(1)}(\)$ 로 치환해 구하면

$$\begin{aligned}
 \mathbb{L}_{imn}^{(3)} &= \left[\frac{\partial}{\partial r_i} h_n^{(1)}(k_1 r_i) P_n^m(\cos\theta_i) e_{r_i} \right. \\
 &\quad + h_n^{(1)}(k_1 r_i) \frac{1}{r_i} \frac{\partial}{\partial \theta_i} P_n^m(\cos\theta_i) e_{\theta_i} \\
 &\quad + \frac{im}{r_i \sin\theta_i} h_n^{(1)}(k_1 r_i) P_n^m(\cos\theta_i) e_{\phi_i} \left. \right] e^{im\phi_i}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \mathbb{M}_{imn}^{(3)} &= \left[\frac{im}{\sin\theta_i} h_n^{(1)}(k_2 r_i) P_n^m(\cos\theta_i) e_{\theta_i} \right. \\
 &\quad \left. - h_n^{(1)}(k_2 r_i) \frac{\partial}{\partial \theta_i} P_n^m(\cos\theta_i) e_{\phi_i} \right] e^{im\phi_i}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \mathbb{N}_{imn}^{(3)} &= \left[\frac{n(n+1)}{r_i} h_n^{(1)}(k_2 r_i) P_n^m(\cos\theta_i) e_{r_i} \right. \\
 &\quad + \frac{1}{r_i} \frac{\partial}{\partial r_i} \{ r_i h_n^{(1)}(k_2 r_i) \} \frac{\partial}{\partial \theta_i} P_n^m(\cos\theta_i) e_{\theta_i} \\
 &\quad + \frac{im}{r_i \sin\theta_i} \frac{\partial}{\partial r_i} \{ r_i h_n^{(1)}(k_2 r_i) \} P_n^m(\cos\theta_i) e_{\phi_i} \left. \right] e^{im\phi_i} \\
 &\dots\dots\dots (16)
 \end{aligned}$$

경계 조건식 (2), (3)을 고려해 j 번째의 구형 강화입자에 관하여 미지계수 $A_{jmn}, B_{jmn}, C_{jmn}$ 을 구하면

$$IA \begin{bmatrix} A_{jmn} \\ C_{jmn} \end{bmatrix} = -IB \begin{bmatrix} \Phi_{jmn} \\ X_{jmn} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (17)$$

$$\begin{aligned}
 & \left[\frac{h}{a} k_{22} \{ (n-1) h_n^{(1)}(k_2 a) - k_2 a h_{n+1}^{(1)}(k_2 a) \} - h_n^{(1)}(k_2 a) \right. \\
 & \left. + \frac{\mu_2}{\mu_1} j_n(k_2 a) \frac{(n-1) h_n^{(1)}(k_2 a) - k_2 a h_{n+1}^{(1)}(k_2 a)}{(n-1) j_n(k_2 a) - k_2 a j_{n+1}(k_2 a)} \right] B_{jmn} \\
 & = - \left[\frac{h}{a} k_{22} \{ (n-1) j_n(k_2 a) - k_2 a j_{n+1}(k_2 a) \} - j_n(k_2 a) \right. \\
 & \left. + \frac{\mu_2}{\mu_1} j_n(k_2 a) \frac{(n-1) j_n(k_2 a) - k_2 a j_{n+1}(k_2 a)}{(n-1) j_n(k_2 a) - k_2 a j_{n+1}(k_2 a)} \right] \Phi_{jmn}
 \end{aligned}$$

여기서

$$\begin{aligned}
 IA &= \frac{2h}{a} K_i L_{ns} - M_{ns} + \frac{\mu_2}{\mu_1} M_{nt} L_{nt}^{-1} L_{ns} \\
 IB &= \frac{2h}{a} K_i L_{ns} - M_{ns} + \frac{\mu_2}{\mu_1} M_{nt} L_{nt}^{-1} L_{ns} \dots\dots\dots (18)
 \end{aligned}$$

따라서 식(17)로 부터

$$\begin{bmatrix} A_{jmn} \\ C_{jmn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i(k_1 a)^3 P_n & i(k_1 a)^3 Q_n \\ i(k_2 a)^3 R_n & i(k_2 a)^3 S_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_{jmn} \\ X_{jmn} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (19)$$

$$B_{jmn} = i(k_2 a)^3 T_n \Phi_{jmn} \dots\dots\dots (21)$$

위의 식 (19), (20)에서의 P_n, Q_n, R_n, S_n, T_n 은

$$\begin{bmatrix} i(K_1 a)^3 P_n & i(K_1 a)^3 Q_n \\ i(K_2 a)^3 R_n & i(K_2 a)^3 S_n \end{bmatrix} = -|A^{-1}|B \dots\dots\dots (21)$$

P_n, Q_n, R_n, S_n, T_n 값은 입사파의 무차원 진동수 $k_1 a, k_2 a$ 와 기지재 및 강화재의 탄성특성에 의존하고 있지만 구형 강화재의 위치에는 독립되는 값이다. 실제로 이들 계수들의 표시식은 일반적으로 매우 복잡하지만 극히 작은 구형 강화재 및 저진동수의 경우에 있어서 ($k_2 a \ll k_1 a \ll 1$) 구 Bessel 함수를 $k_2 a$ 에 관하여 전개하면

$$P_0 = \frac{1}{3} \frac{3\lambda_2 + 2\mu_2 - (3\lambda_1 + 2\mu_1)}{4\mu_2 + 3\lambda_1 + 2\mu_1}, \quad Q_0 = R_0 = S_0 = 0$$

$$2P_1 = \sqrt{\frac{\mu_2}{\lambda_2 + 2\mu_2}} \quad Q_1 = 2\sqrt{\frac{\lambda_2 + 2\mu_2}{\mu_2}} \quad R_1 = S_1 = \frac{2}{9} \left(\frac{\rho_1}{\rho_2} - 1 \right)$$

$$P_2 = \frac{1}{3} \frac{\mu_2}{\lambda_2 + 2\mu_2} \quad Q_2 = 2R_2 = \frac{2}{3} \frac{\mu_2}{\lambda_2 + 2\mu_2} \quad S_2 = \frac{4}{3} \frac{\mu_2(\mu_1 - \mu_2)}{4\mu_2(\mu_1 - \mu_2) + 3(\lambda_2 + 2\mu_2)(2\mu_1 + 3\mu_2)}$$

$$P_n = Q_n = R_n = S_n = 0 \quad n \geq 3, \quad T_n = 0 \quad n \geq 0 \dots\dots\dots (22)$$

여기서 ($k_2 a$) 차수 이상의 항은 무시하였다.

4. 수치해석 결과 및 고찰

복합재료의 유효 팽창파 및 전단파의 속도 (phase velocity) C_1, C_2 는 다음과 같이 주어진다. 즉,

$$C_1 = \frac{\omega}{ReK_1}, \quad C_2 = \frac{\omega}{ReK_2}$$

여기서 K_1, K_2 는 유효 팽창파, 전단파의 유효파수.

따라서 위의 유효 팽창파, 전단파의 속도를 이용하면 복합재료의 평균탄성특성을 결정할 수 있다.

즉, 유효질량밀도 ρ 는 강화재의 체적율 V_f 를 고려하면 혼합법칙(rule of mixture)에 의하여 다음식과 같이 주어진다.

$$\rho = V_f \rho_1 + (1 - V_f) \rho_2$$

유효 Lamé 정수를 λ, μ 라고 하면

$$C_1 = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \quad C_2 = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$$

위의 식에 의해

$$\lambda = (C_1^2 - 2C_2^2) (V_f \rho_1 + (1 - V_f) \rho_2) \\ \mu = C_2^2 [V_f \rho_1 + (1 - V_f) \rho_2]$$

또 유효 프와송 비 ν 는

$$\nu = \frac{2 - \left(\frac{C_1}{C_2}\right)^2}{2 \left[1 - \left(\frac{C_1}{C_2}\right)^2\right]}$$

한편 수치해석의 대상 재료로서는 앞에서 언급한 바와 같이 SiC-Al6061 T-6 복합재료를 이용 하였으며 그 탄성특성을 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Elastic properties of SiCp/Al 6061 composite.

	ρ (Kg/m ³)	E(GPa)	μ (GPa)	ν
Al 6061 T-6	2660	70.0	259.0	0.34
SiC particulate	3181	616.0	188.0	0.17

또 해석에 있어서의 불균질 계면층의 특성에 대하여는 아래의 (I)과 같이 계면층의 탄성특성이 강화재로부터 기지재에 선형적으로 변화하는 경우와 (II)와 같이 계면층이 강화재와 기지재의 평균 탄성특성을 가지는 경우의 2종류를 생각하였다.

$$(I) \quad f(r) = \frac{\lambda_1 + 2\mu_1}{\lambda_0 + 2\mu_0} + \frac{\lambda_2 + 2\mu_2(\lambda_1 + 2\mu_1)}{\lambda_0 + 2\mu_0} \frac{r-a}{h}$$

$$g(r) = \frac{\mu_1}{\mu_2} + \frac{\mu_2 - \mu_1}{\mu_0} \frac{r-a}{h}$$

(II) $f(r) = g(r) = 1$

식(4)로 부터 (I), (II)의 K_{1i} , K_{2i} 를 구하면

(I) $K_{1i} = \frac{\lambda_0 + 2\mu_0}{\lambda_2 + 2\mu_2 - (\lambda_1 + 2\mu_1)} \ln \left[1 + \frac{\lambda_2 + 2\mu_2 - (\lambda_1 + 2\mu_1)}{\lambda_1 + 2\mu_1} \right]$

$$K_{2i} = \frac{\mu_0}{\mu_2 - \mu_1} \ln \left(1 + \frac{\mu_2 - \mu_1}{\mu_1} \right)$$

(II) $K_{1i} = K_{2i} = 1$

또 (II)의 탄성특성은 다음값을 이용하였다.

$$\lambda_0 + 2\mu_0 = \frac{1}{2} [\lambda_1 + 2\mu_1 + (\lambda_2 + 2\mu_2)]$$

$$\mu_0 = \frac{1}{2} (\mu_1 + \mu_2)$$

한편 앞의 식(17), (19)와 같이 식의 전개과정에서 나타나는 X_{mn} , Y_{mn} , Z_{mn} 에 관한 계수행렬 M의 복

수 행렬식 $\det M$ 은 Gauss 소거법을 이용하여 계산하였다. 그리고 식 $\det M=0$ 의 근은 Muller 법을 이용하여 복소평면내에서 구하였다. Muller 법에 있어서의 초기치는 주어지는 저 진동수역의 해를 고려해서 결정하였으며, 무차원 파수 k_{2a} 를 조금씩 증대시키면서 고 진동수역의 해를 구하였다. K의 실수부는 유효파 위상속도를 결정하고 K의 허수부는 유효파의 진폭감쇠 $\text{Im}(k_1/K_1)$, $\text{Im}(k_2/K_2)$ 를 결정한다.

Fig. 2와 Fig. 3은 SiC 입자강화 복합재료에 있어서의 무차원 파수(normalized wavenumber) k_{2a} 에 대한 유효 평면 팽창파(P파) 및 전단파(S파)의 위상속도의 의존성을 SiC 입자 강화재의 체적 함유율의 변화에 따라 도식화 한것으로 P파 및 S파의 속도는 SiC 입자 강화재의 체적 함유율이 증가함에 따라 모두 증가하고 있다. 또 k_{2a} 의 변화에 따른 유효 평면파의 위상속도 변화는 강화재의 체적 함유율의 변화와 관계없이 P파, S파 모두 감소하는 경향을 보이고 있으며 그 감소 비율은 P파에 비해 S파가 다소 현저함을 알수 있다. 이와 같은 결과는 입자 강화 금속 복합재료에 대한 실험결과^{9), 10)}와도 정성적으로 잘 일치한다.

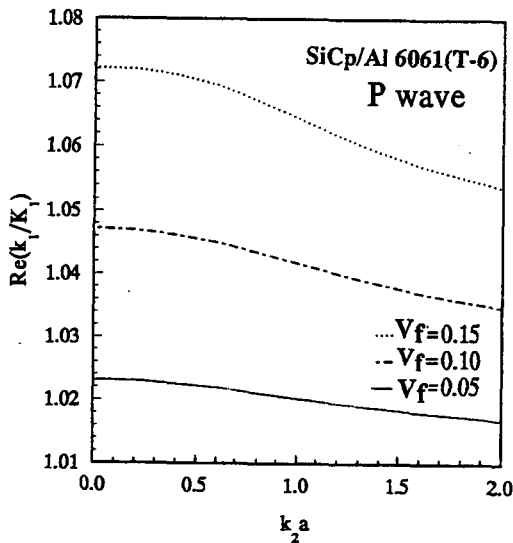


Fig. 2. The variation of phase velocity of P wave with the volume fraction of SiCp as a function of normalized wave number

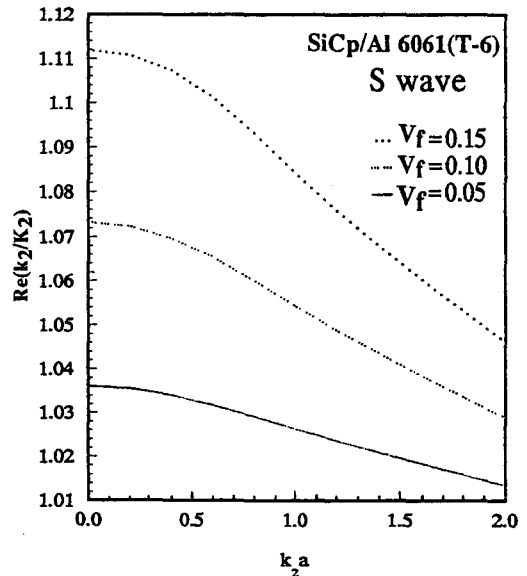


Fig. 3. The variation of phase velocity of S wave with the volume fraction of SiCp as a function of normalized wave number

Fig. 4와 Fig. 5는 유효 평면 팽창과 및 전단파감쇠의 k_2a 에 대한 의존성을 SiCp 입자 강화재의 체적 함유율의 변화로 나타낸 것으로 해석 결과에서 보여주는 바와 같이 팽창과 및 전단파의 진폭감쇠는

k_2a 가 증가함에 따라 모두 증가함을 알수 있으며 또 SiC 입자 강화재의 체적 함유율이 증가함에 따라 유효 평면파의 진폭감쇠도 증가하는 경향을 보이고 있다.

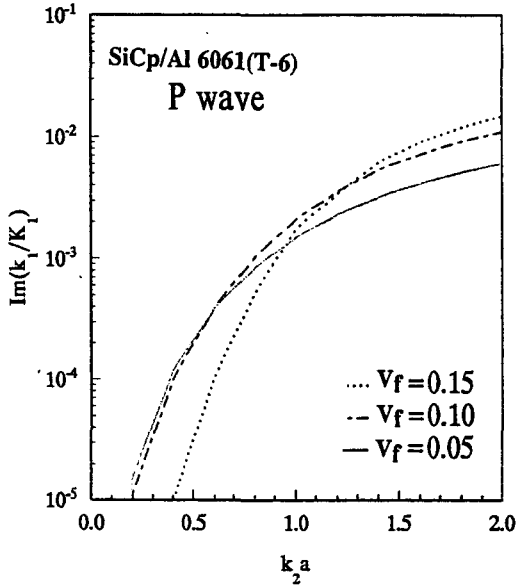


Fig. 4. The variation of amplitude attenuation of P wave with the volume fraction of SiCp as a function of normalized wave number

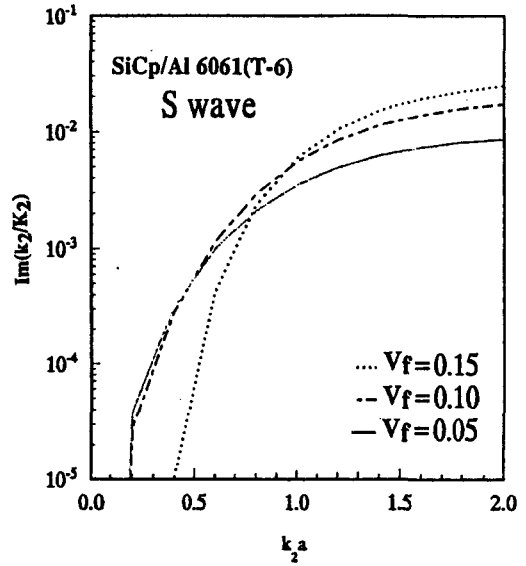


Fig. 5. The variation of amplitude attenuation of S wave with the volume fraction of SiCp as a function of normalized wave number

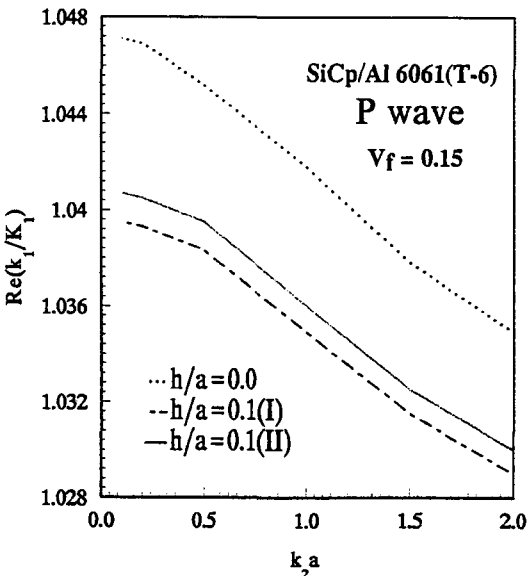


Fig. 6. Effect of interface condition on the variation of phase velocity of P wave

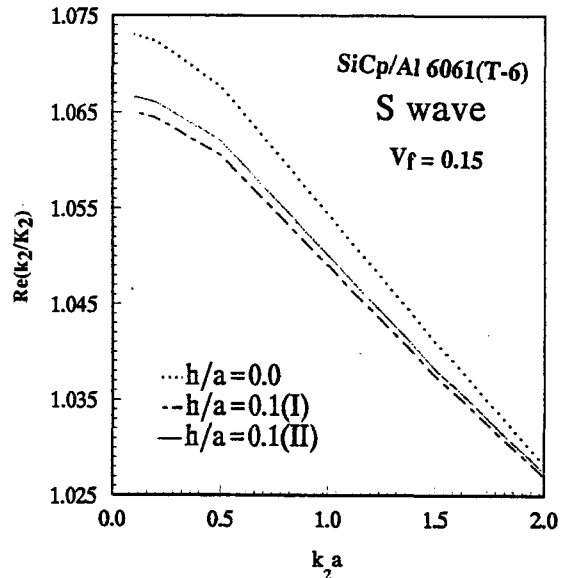


Fig. 7. Effect of interface condition on the variation of phase velocity of S wave

Fig. 6과 Fig. 7은 유효 평면파의 위상속도에 대한 계면층의 영향을 검토하기 위하여 $h/a=0.1$, 체적 함유율 $V_f=15\%$ 의 재료조건에 있어서의 해석 결과를 도식화 한 것이다. 해석 결과에서 알 수 있는바와 같이 금속 복합재료의 제조공정에서 발생하는 기지재와 강화재 사이의 계면층은 유효 평면파 P파, S파의 위상속도를 감소시킴을 알 수 있으며 특히 그 영향은 계면층의 탄성특성에 따라 상이함을 알 수 있다. 즉, 유효 평면파의 위상속도의 감소에 대한 계면층의 영향은 그 탄성특성이 기지재와 강화재의 평균 탄성 특성을 가지는 (II)의 경우 보다도, 강화재로부터 기지재에 선형적으로 변화하는 경우(I)가 현저함을 알 수 있다.

5. 결 론

초음파를 이용한 입자 강화 금속 복합재료의 계면 특성에 대하여 탄성과 다중산란 특성을 이론적으로 해석하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. SiC 입자 강화 Al6061 복합재료에 있어서의 유효 P파 및 S파의 위상속도는 k_2a 가 증가함에 따라 점차적으로 감소하는 경향을 보이고 있으며 그 감소 비율은 S파가 P파에 비교해 다소 현저함을 알 수 있다. 또 SiC 입자 강화재의 체적 함유율이 증가함에 따라 P파, S파의 위상속도도 증가하며 이와같은 경향은 입자 강화 금속 복합재료에 실험결과와도 정성적으로 일치한다.

2. $0 \leq k_2a \leq 2.0$ 의 주파수영역에 있어서 SiC 입자 강화 알루미늄 복합재료는 k_2a 가 증가함에 따라 P파, S파의 진폭감쇠는 모두 증가한다. 또 SiC 입자 강화재의 체적 함유율이 증가함에 따라 유효평면파의 진폭감쇠도 증가하는 경향을 보이고 있다.

3. 금속 복합재료에 있어서 기지재와 강화재 사이의 계면층의 형성은 P파 및 S파의 위상속도를 감소시킨다. 또 유효 평면파 위상속도의 감소에 대한 계면층의 영향은 그 탄성특성이 기지재와 강화재의 평균 탄성특성을 가지는 경우보다도 강화재로부터 기지재에 선형적으로 변화하는 경우가 더욱 현저하다.

참 고 문 헌

- 1) D.K. Mak, S.H.J. Lo and R.Dos Santos, Proc. the 5th International Sympo. on Nondestructive Characterization of Materials(Karuizawa, Japan), pp. 837-846(1991)
- 2) G. Mott and P.K. Liaw, Metallurgical Transaction A, V19A, pp. 2233-2246(1988).
- 3) J.H. Lee and Y.C. Park, J. of Japanese Society for Strength and Fracture of Materials, Vol. 27, No. 3. pp. 1-12(1993).
- 4) V.K. Varadan, Y.Ma and V.V. Varadan, J. Acoustical Society of America., 77, p. 375(1985).
- 5) Y. Shindo, S.K. Datta and H.M. Ledbetter, Trans. JSME(A), pp. 259(1988).
- 6) M. Lax., Rev. Mod. Phys., 23, pp. 287 (1951).
- 7) L.L. Foldy., Phys. Rev., 67, pp. 107(1945).
- 8) J.A. Stratton., Electromagnetic Theory, pp. 401, McGraw-Hill(1941).
- 9) J.H. Lee and Y.C. Park, Proc. the 7th APCNDT (Shanghai, China), pp. 268-279(1993).
- 10) J.H. Lee and Y.C. Park, Proc. International Sympo. on NDT & Stress-Strain Measurement(Tokyo, Japan), pp. 127-135(1992).

A Theoretical Study on Interface Characteristics of SiC Particulate Reinforced Metal Matrix Composite Using Ultrasonics

Joon-Hyun Lee

Dept. of Mechanical Design Engineering &
Research Institute of Mechanical Technology,
Pusan National University

Abstract It is well recognized recently that ultrasonic technique is one of the most widely used methods of nondestructive evaluation to characterize material properties of nonconventional engineering materials. Therefore it is very important to understand physical phenomenon on propagation behavior of elastic wave in these materials, which is directly associated with ultrasonic signals in the test. In this study, the theoretical analysis on multi-scattering of harmonic elastic wave due to the particulate with interface between matrix and fiber in metal matrix composites(MMCs) was done on the basis of Lax's quasi-crystalline approximation and extinction theorem. SiC particulate (SiCp) reinforced Al6061-T6 composite material was chosen for this analysis. From this analysis, frequency dependences of phase velocity and amplitude attenuation of effective plane wave due to the change of volume fraction of SiC particulate were clearly found. It was also shown that the interface condition between matrix and fiber in MMCs gives a direct effect on the variation of phase velocity of plane wave in MMCs.

(Received : October 16, 1993)