

산란 초음파의 주파수 특성을 이용한 단일 섬유 복합재료의 인터페이스 평가법 개발

Development of a Method for Characterizing Single-Fiber Composite Interphase from Frequency-Domain Characteristics of Ultrasonic Scattered Waves

김웅기*, 임현준**

Woong-Ki Kim* and Hyunjune Yim**

초 록 본 연구에서는 산란 초음파의 주파수 특성을 이용하여 단일 섬유 복합재료내 인터페이스의 물리적 성질을 측정하는 방법을 제안하고, 그 가능성을 이론적으로 고찰하였다. 그 결과, 주파수 영역에서 나타나는 산과 골의 위치 및 크기가 인터페이스의 성질에 의해 상당한 영향을 받음을 보임으로써 이 방법의 타당성을 확인하였다. 산란 초음파의 주파수 거동은 산란체의 공명과 관련되어 있지만, 공명 피크가 음향파의 경우만큼 두드러지지 않아 기존의 음향 공명산란이론을 바로 적용할 수 없었다. 산란 초음파의 주파수 특성으로부터 인터페이스의 성질을 구하는 역문제의 해법으로서 신경회로망을 구성하였으며, 이를 사용하면 대부분의 경우 인터페이스의 성질을 상당히 정확하게 추정할 수 있었다.

주요용어 : 복합재료, 인터페이스, 초음파검사, 물성치 평가, 탄성파 산란, 신경회로망, 공명산란

Abstract A method is proposed to characterize single-fiber composite interphases from the frequency-domain characteristics of scattered ultrasonic waves, and its feasibility is investigated theoretically. It has been shown that the locations and magnitudes of the peaks and valleys in the frequency domain are affected significantly by the interphase properties, which may indicate the effectiveness of the proposed method. Although the frequency-domain behavior is basically associated with the resonance of the fiber-interphase system, it is not dominantly affected by the scatterer's resonance unlike that in the case of acoustic wave scattering. Therefore, the conventional acoustic resonant scattering theory is not directly applicable to the characterization of composite interphases. In order to solve the inverse problem of predicting the interphase properties from the frequency-domain characteristics of the ultrasonic scattered waves, an artificial neural network has been constructed. This approach has demonstrated reasonable accuracy in most cases considered in this study.

Keywords : composite material, interphase, ultrasonic testing, material characterization, elastic wave scattering, artificial neural network, resonant scattering

1. 서 론

섬유 강화 복합재료에서는 섬유 표면의 처리나 코팅

등으로 인하여 섬유와 기지 사이에 두께가 유한한 새로운 물질층인 인터페이스(interphase)가 발생하는 경우가 많다. 실험과 이론적 연구[1-3]를 통하여 이러한

인터페이스의 물리적 또는 기계적 성질(즉, 탄성계수, 포아송비, 밀도, 두께)이 복합재료 전체의 성질에 지대한 영향을 미친다는 것이 밝혀졌다. 이에 따라, 최근 들어 인터페이스의 물성치를 측정하려는 노력이 많이 경주되고 있으나, 두께가 수 마이크로에 불과한 인터페이스의 물성치를 측정하는 것은 용이한 일이 아니다.

미소량의 검출과 분석에 흔히 사용되는 물리-화학적 기법들(NMR, ISS, PAS 등)을 이용하여 인터페이스를 분석함으로써 어느 정도의 성과를 거두었으나(4), 이러한 방법으로는 탄성계수와 같은 기계적 성질은 측정할 수 없다. Williams 등(5)은 인터페이스의 기계적 성질을 측정하기 위하여, 한 쌍의 주사전자현미경으로 인터페이스 근처의 변위를 측정하고 이를 이론적 모델로부터의 계산치와 비교함으로써 인터페이스의 두께와 물성치를 유추하는 기법을 개발하였다. 이와 유사한 방법으로서 Wang 등(6)은 SIEM(speckle interferometry with electron microscopy)기법을 적용하여 복합재료내의 변위를 측정하고, 유한요소 모델로부터 계산된 이론적 변위값과 비교하여 인터페이스의 유효 탄성계수를 추정하는 기법을 개발하였다. 또, 초음파를 이용한 기법을 개발하기 위한 기초 연구로서, Huang 등(7)은 인터페이스를 스프링으로 모델링한 초음파 산란 모델을 개발하고 그 계산 결과를 실험치와 비교하여 저주파 영역에서는 이러한 모델이 사용될 수 있음을 보였다. Yim 등(8)은 인터페이스를 균질한 유한 두께의 물질층으로 모델링하여 초음파의 산란 현상을 해석할 수 있는 이론적 모델을 개발하고 그 신뢰성을 확인하였다. 또, Yim 등(9)은 개발된 모델을 사용하여 매개변수 연구를 수행함으로써 산란 초음파를 이용한 인터페이스의 성질 측정이 가능함을 보였다. 최근, Lavrentyev 등(10)은 인터페이스에 비해 기하학적으로 훨씬 간단한 문제인 평면 적층 매질의 문제에서 초음파 주파수법(ultrasonic spectroscopy)을 이용하여 내부층의 두께와 물성치를 추정하는 방법을 개발하였다.

본 연구에서는 Yim 등의 연구(8,9)의 계속 연구로서 산란 초음파의 주파수 특성을 이용하여 인터페이스의 기계적 성질을 추정하는 방법을 제안하고, 그 타당성을 이론적으로 검증하고자 한다. 본 연구와 기존의 연구(8,9) 사이의 가장 큰 차이점은 기존의 연구에서는 고정된 단일 주파수에 대해 변위장과 응력장이 계산된 반면, 본 연구에서는 주파수가 변함에 따른 파동장의 변화를 연구의 대상으로 한다는 점이다. 실제로 초음파

비파괴검사에 사용되는 모든 탐촉자는 많은 주파수 성분을 발생시키므로, 본 연구와 같은 주파수 의존성에 관한 연구가 반드시 필요하다.

따라서, 본 연구의 목적은 인터페이스를 갖는 단일 섬유로부터 산란되는 초음파의 주파수 특성으로부터 인터페이스의 성질을 구하는 비파괴평가법의 가능성을 이론적으로 검토하고, 그 구체적인 기법을 제시하는 것이다. 이를 위하여, 우선 인터페이스의 성질을 변화시키면서 초음파 산란장을 주파수의 함수로 계산한다. 이렇게 계산된 산란 초음파의 주파수 특성이 인터페이스의 성질 변화에 따라 어떠한 영향을 받는지를 고찰함으로써 본 연구에서 제안되는 비파괴평가법의 타당성을 검토한다. 마지막으로, 산란 초음파의 주파수 특성으로부터 인터페이스의 성질을 추정하는 역문제를 풀기 위한 방법을 연구한다.

2. 산란 초음파의 주파수 특성 계산 및 고찰

2.1. 계산 모델

본 논문에서는 강화섬유 복합재료내에서 발생하는 초음파 산란장을 주파수 영역에서 해석하기 위하여 Fig. 1의 모델(8)을 사용한다. Fig. 1은 평면변형을 상대하의 단일 섬유 복합재료를 나타낸 것으로, 기지, 인터페이스 및 강화섬유 영역으로 구분된다. Fig. 1의 E_q, ν_q, ρ_q 는 각 영역의 탄성계수, 포아송비, 밀도를 의미하고, 하첨자는 해당 매질을 명시한다. Fig. 1과 같이 평면 조화파 $u_0 e^{i(\alpha_m x - \omega t)}$ (여기서, u_0 는 변위 벡터, ω 는 주파수, α_m 은 기지에서 P파의 파동수)가 기지를

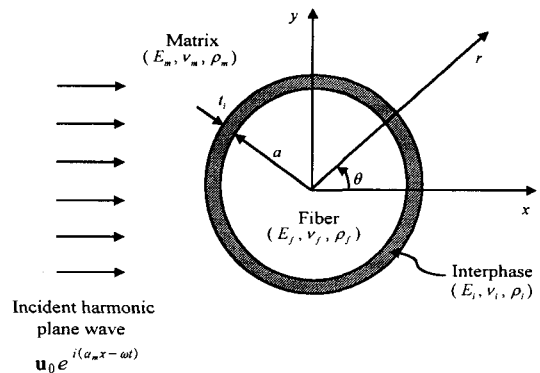


Fig. 1 Two-dimensional model for scattering of ultrasonic wave from fiber-interphase

전파하다가 인터페이스와 강화섬유에 의해 산란되는 정상상태 산란현상은 잘 알려진 바와 같이 각 매질에서의 변위포텐셜을 직교함수의 합으로 전개하는 직교함수 전개법을 이용하여 해석할 수 있다[8].

본 논문에서 제안하는 인터페이스 평가법은 Fig. 1과 같은 문제에서 발생하는 산란파의 주파수 특성으로부터 인터페이스의 성질을 추정하는 것이다. 이 기법의 개발과 검증을 위하여, 먼저 Fig. 1의 산란모델에서 입사파가 종파 또는 횡파인 두 경우 각각에 대하여, 입사파의 주파수 ω 를 변화시키면서 기지내 특정 위치에서 산란파의 응력을 계산하고 그 주파수 특성을 구한다. 또한, 인터페이스가 초음파의 산란에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 인터페이스의 성질을 바꾸어 가면서 주파수 특성의 변화를 고찰한다. 인터페이스의 기계적 성질은 보통 탄성계수 E_i , 포아송비 ν_i , 밀도 ρ_i , 두께 t_i 로 표현되지만, 탄성파의 산란에 있어서는 인터페이스내 종파와 횡파의 속도(c_{pi}, c_{si}), 전단탄성계수(μ_i), 두께(t_i)의 네 가지 파라미터(parameters)가 보다 직접적인 영향을 미친다. 따라서, 본 논문에서는 이들 네 파라

미터를 인터페이스의 성질 파라미터로 선정하여, 이들을 변화시키면서 산란파 응력장의 주파수 특성을 분석한다. 이들 인터페이스 파라미터들과 인터페이스의 기계적 물성치들과의 관계는 식 (1)~(3)과 같다.

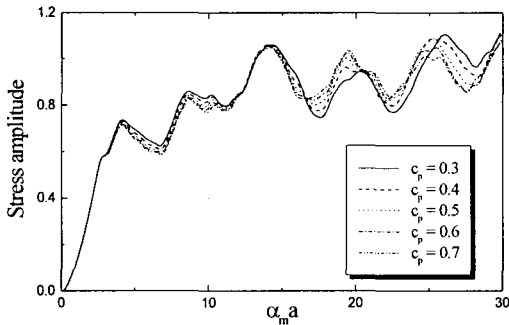
$$c_{pi} = \sqrt{\frac{E_i(1-\nu_i)}{\rho_i(1+\nu_i)(1-2\nu_i)}} \dots\dots\dots (1)$$

$$c_{si} = \sqrt{\frac{E_i}{2\rho_i(1+\nu_i)}} \dots\dots\dots (2)$$

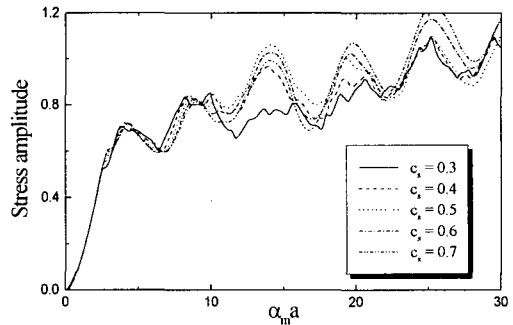
$$\mu_i = \frac{E_i}{2(1+\nu_i)} \dots\dots\dots (3)$$

2.2. 주파수 특성 및 인터페이스의 영향

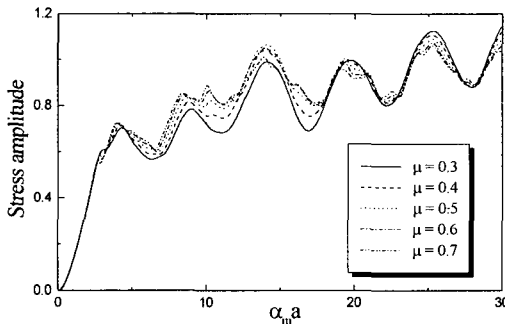
본 논문의 계산을 위한 기지재와 강화섬유의 물성치는 각각 에폭시(epoxy)와 유리섬유(glass fiber)의 값을 사용하며, 각 재료의 물성치는 식 (4), (5)와 같고 유리섬유의 반경은 $a = 5 \mu m$ 로 한다.



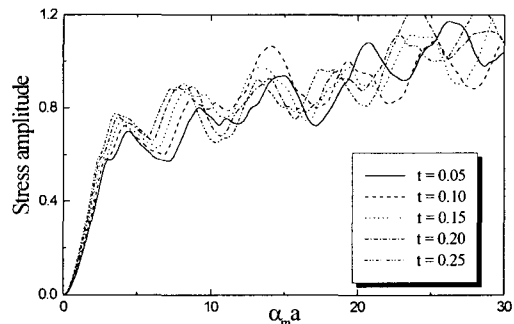
(a) For various c_p



(b) For various c_s



(c) For various μ



(d) For various t

Fig. 2 Normalized radial stress amplitude at $r = 20a, \theta = 0^\circ$ due to scattered P wave

$$E_m = 4.5 \times 10^9 \text{ N/m}^2, \nu_m = 0.39, \rho_m = 1250 \text{ kg/m}^3 \dots (4)$$

$$E_f = 7.6 \times 10^{10} \text{ N/m}^2, \nu_f = 0.20, \rho_f = 2560 \text{ kg/m}^3 \dots (5)$$

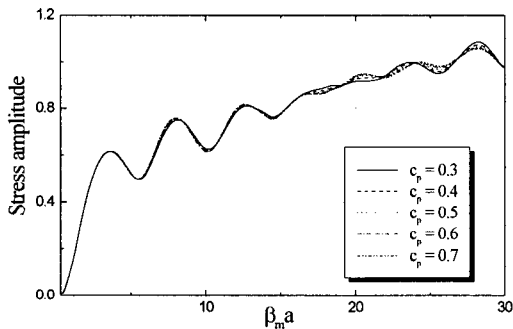
인터페이스의 성질을 변화시키면서 Fig. 1의 한 점 ($r = 20a, \theta = 0^\circ$)에서 산란파의 응력의 진폭을 주파수의 함수로 계산한 결과가 Fig. 2와 3에 나타나 있다. 각 그림에 표시된 인터페이스 파라미터 c_p, c_s, μ, t 는 식 (6)과 같이 무차원화된 파라미터이다.

$$c_p = \frac{c_{pi} - c_{pm}}{c_{pf} - c_{pm}}, c_s = \frac{c_{si} - c_{sm}}{c_{sf} - c_{sm}}, \mu = \frac{\mu_i - \mu_m}{\mu_f - \mu_m}, t = \frac{t_i}{a} \dots (6)$$

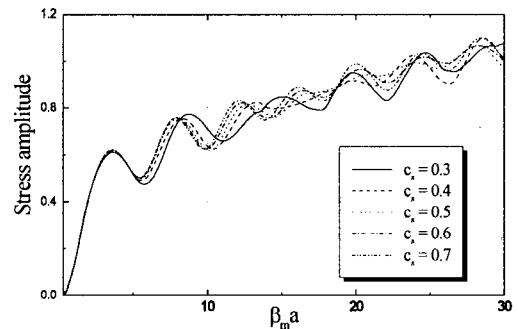
Fig. 2는 입사 종파에 의해 발생하는 산란 종파의 수직응력(σ_r)의 진폭을 인터페이스 파라미터를 하나씩 변화시키면서 나타낸 것이다. Fig. 3은 입사 횡파의 경우, 발생하는 산란 횡파의 전단응력(σ_θ)의 진폭에 대한 결과이다. 각 그래프의 종축은 입사파의 응력으로 정규화된 무차원 응력 진폭이며, 횡축은 기지내에서의 종파 또는 횡파의 파동수 α_m, β_m 과 강화섬유의 반경 a 를 곱

한 무차원 주파수이다.

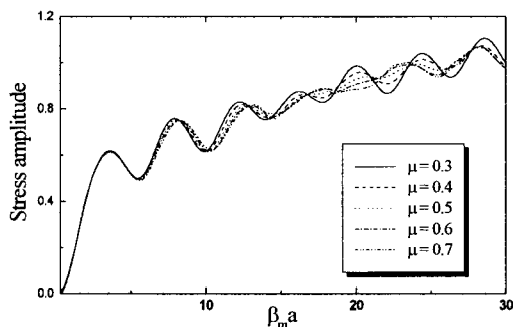
입사파의 모드에 관계없이, Fig. 2와 3의 곡선들은 저주파수 영역에서는 별 차이가 없거나 규칙성이 있는 미소한 차이만 보이나, 주파수가 증가함에 따라 매우 복잡한 양상으로 큰 차이를 보인다. Fig. 2와 3으로부터 주목할 첫 번째 사항은 모든 경우에 있어 산 (peaks)과 골(dips)이 번갈아 나타나는 양상을 보인다는 것이다. 두 번째는 Fig. 2(b)에서 횡파의 속도가 매우 작은 경우(즉, $c_s = 0.3$ 인 경우)의 곡선이 다른 경우들과 크게 다른 거동을 보이는 것이다. 본 연구에서는 가능한 경우들을 최대한 고려하기 위하여 인터페이스 파라미터를 변화시키는 범위를 매우 넓게 설정하였고, $c_s = 0.3$ 은 이러한 범위의 끝 부분으로서 실제로는 존재하기 어려운 경우에 해당된다. 또, Fig. 3(a)의 곡선들은 대부분의 주파수 영역에서 거의 차이가 없다는 점도 주목할 만하다. 인터페이스 파라미터들의 변화에 따른 산란 초음파의 변화 정도를 비교해 보면, 입사파의 모드에 관계없이 c_p 의 변화에 따른 산란파의 변화가 가장 적고, t 의 변화에 따른 산란파의 변화가 가장



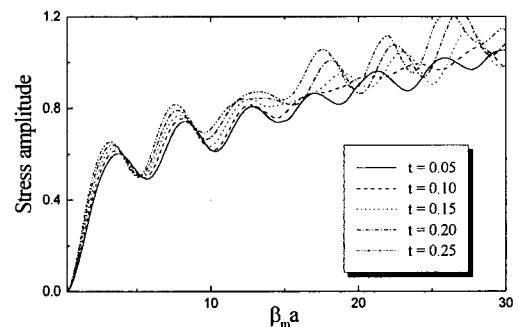
(a) For various c_p



(b) For various c_s



(c) For various μ



(d) For various t

Fig. 3 Normalized shear stress amplitude at $r = 20a, \theta = 0^\circ$ due to scattered SV wave

큰 것을 알 수 있다. 이는 산란체의 물성치보다 그 크기가 산란현상에 더 큰 영향을 미친다는 것을 의미한다.

Fig. 2와 3에서 얻을 수 있는 가장 중요한 결론은 인터페이스의 성질 변화에 따라 산란 초음파의 주파수 특성, 즉 산파 골의 위치 및 크기가 상당한 변화를 보이므로, 본 연구에서 제안된 기법이 인터페이스의 성질 측정에 유용하게 사용될 수 있을 것이라는 점이다. 이제, 본 연구의 기법을 이용하여 효과적으로 인터페이스의 성질을 추정하는 방법에 관해 논의한다.

3. 공명산란이론의 적용 가능성 고찰

3.1. 공명산란이론

산란 초음파의 주파수 특성으로부터 인터페이스의 성질을 추정하는 역문제의 해법으로서, 먼저 초음파의 산란 현상에 대한 물리적 이해에 기초한 방법을 시도하였다. 2절에서 관찰된 산란 초음파 응력장의 주파수 거동에서 산파 골이 반복되는 현상은 산란체의 공명현상과 연관이 있으므로, 이 현상을 공명산란이론을 이용하여 해석해 보고자 하였다. 음향파의 산란에 대하여 주로 연구되어 온 음향 공명산란이론(11, 12)에 따르면, 산란체의 형상에 기인하는 배경신호(background)를 알고 있다면 산란신호로부터 산란체의 물성에만 의존하는 공명신호를 분리할 수 있게 되어 산란체의 성질을 쉽게 추정할 수 있다. 본 연구에서도 이러한 이론을 적용할 수 있는지를 검토해 보았다.

탄성파에 대한 공명산란이론은 음향 공명산란이론만큼 잘 정립되어 있지 않으므로, 본 논문에서는 먼저 음

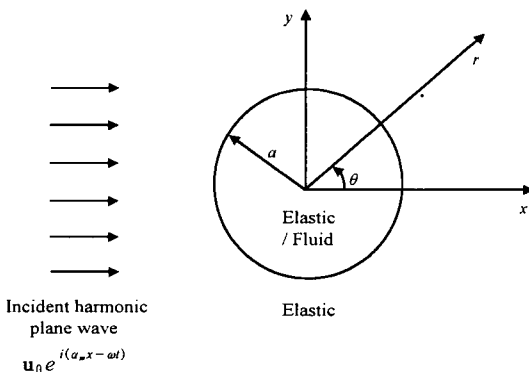


Fig. 4 Simple problems of elastic wave scattering from cylinder

향 공명산란이론의 개념을 탄성파의 경우에도 적용할 수 있는지를 살펴보기 위하여 Fig. 1의 산란문제보다 간단한 문제를 고려하였다. 즉, Fig. 4와 같이 기지와 강화섬유(탄성 산란체)만으로 구성된 모델의 문제(이하 탄성체-탄성체 산란문제)를 고려하고, 이를 강화섬유 영역이 유체(유체 산란체)로 바뀌어(이하 유체-탄성체 산란문제) 음향 공명산란이론이 잘 적용되는 경우와 비교하였다.

3.2. 탄성체-탄성체 및 유체-탄성체 산란 문제의 비교

Fig. 4의 산란문제들도 Fig. 1의 산란문제와 동일한 방법(8)으로 해석될 수 있으며, 탄성 산란체와 유체 산란체의 문제에 있어서 산란체와 기지간의 경계에서 만족되어야 하는 경계조건(변위와 응력벡터의 연속조건)의 식을 행렬로 표현하면 각각 식 (7) 및 (8)과 같이 나타난다.

$$\begin{bmatrix} \epsilon_{11m}^{(3)}(\alpha_m a) & \epsilon_{22m}^{(3)}(\beta_m a) & -\epsilon_{11f}^{(3)}(\alpha_f a) \\ \epsilon_{81m}^{(3)}(\alpha_m a) & \epsilon_{82m}^{(3)}(\beta_m a) & -\epsilon_{81f}^{(3)}(\alpha_f a) \\ \mu_m \epsilon_{11m}^{(3)}(\alpha_m a) & \mu_m \epsilon_{12m}^{(3)}(\beta_m a) & -\mu_f \epsilon_{11f}^{(3)}(\alpha_f a) \\ \mu_m \epsilon_{41m}^{(3)}(\alpha_m a) & \mu_m \epsilon_{42m}^{(3)}(\beta_m a) & -\mu_f \epsilon_{41f}^{(3)}(\alpha_f a) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_n \\ b_n \\ c_n \\ d_n \end{bmatrix} = \epsilon_n i^n \begin{bmatrix} \epsilon_{11m}^{(1)}(\alpha_m a) \\ \epsilon_{81m}^{(1)}(\alpha_m a) \\ \mu_m \epsilon_{11m}^{(1)}(\alpha_m a) \\ \mu_m \epsilon_{41m}^{(1)}(\alpha_m a) \end{bmatrix} \dots \dots \dots (7)$$

$$\begin{bmatrix} \epsilon_{11m}^{(3)}(\alpha_m a) & \epsilon_{12m}^{(3)}(\beta_m a) & -\overline{\epsilon_{11m}^{(1)}}(\alpha_f a) \\ \epsilon_{21m}^{(3)}(\alpha_m a) & \epsilon_{42m}^{(3)}(\beta_m a) & 0 \\ \epsilon_{71m}^{(3)}(\alpha_m a) & \epsilon_{72m}^{(3)}(\beta_m a) & -\epsilon_{71f}^{(1)}(\alpha_f a) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_n \\ b_n \\ c_n \end{bmatrix} = \epsilon_n i^n \begin{bmatrix} \epsilon_{11m}^{(1)}(\alpha_m a) \\ \epsilon_{41m}^{(1)}(\alpha_m a) \\ \epsilon_{71m}^{(1)}(\alpha_m a) \end{bmatrix} \dots \dots \dots (8)$$

식 (7)과 (8)은 n 의 모든 정수값 $n = 0, 1, 2, \dots$ 에 대해 성립하고, 미지의 계수 a_n, b_n 은 각각 기지내 산란 종파 및 산란 횡파의 산란계수(scattering coefficient)를 나타내며, c_n, d_n 은 각각 산란체 내부의 굴절 종파 및 굴절 횡파(유체 산란체의 경우 굴절 횡파는 존재하지 않음)의 계수를 나타낸다. 또, 식 (7)과 (8)

의 $\epsilon_{ij}^{(n)}$ 는 베셀함수들의 함수로서 참고문헌(8)에 정의되어 있고, α_q, β_q 는 각각 매질 q (f: fiber; m: matrix)에서의 종파 및 횡파의 파동수이며, μ_q 는 매질 q 에서의 전단탄성계수이고, $\epsilon_0 = 1, \epsilon_n = 2 (n \neq 0), i = \sqrt{-1}$ 이다. 이들 미지의 계수들이 구해지면, Fig. 4의 임의의 점에서 변위 및 응력을 계산할 수 있다. 먼저, 음향 공명산란이론이 잘 적용되는 유체-탄성체 산란문제에 대한 기존의 연구결과를 살펴보고, 본 논문의 문제와 유사한 탄성체-탄성체 산란문제도 유사한 거동을 보이는지를 검토해 본다.

3.2.1. 유체-탄성체 산란 문제

Pao 등(13)은 유체-탄성체 산란문제에서 산란 종파의 수직응력을 주파수의 함수로 계산하여, 산란 종파가 주파수 영역에서 매우 뾰족한 산파 골을 보이는 것을 관찰하였다. 또한, 이와 같은 산이나 골 모양의 급격한 변화가 발생하는 (실수) 주파수 값들과 식 (8)의 3×3 행렬의 행렬식(determinant)이 0이 되는 복소 공진주파수 값의 실수부가 거의 일치하는 것도 확인하였다(13). 이러한 현상은 식 (8)에서 산란 종파와 횡파의 계수, 즉 a_n, b_n 의 주파수 거동으로부터 관찰할 수 있다. 예로서, $n=1$ 일때의 산란계수, 즉 a_1 및 b_1 의 실수부와 허수부를 주파수의 함수로 계산한 결과가 Fig. 5에 나타나있다. a_1 과 b_1 모두 그 실수부와 허수부가 특정 주파수 값들 근처에서 매우 급격하게 변하는 것을 볼 수 있고, 특히 이러한 특정 주파수 값들이 a_1 과 b_1 에 있어서 같음을 알 수 있다. 이는, 이 주파수 값들이 식 (8)의 행렬로부터 구해지는 복소 공진주파수의 실수부로서, a_1 과 b_1 에 있어서 같기 때문이다(13).

음향 공명산란이론(11)에 의하면, 무한 매질내에서 산란체가 가지는 복소 공진주파수의 허수부는 산란체로부터 주위 매질로 에너지가 재방사(reradiation)되는 현상에 기인하는 것으로 설명된다. 유체-탄성체 산란 문제에 있어서는, 산란체와 주위 매질간의 특성임피던스(characteristic impedance) 차이가 크므로 에너지의 재방사가 적어서, 복소 공진주파수의 허수부 값이 매우 작게 나타난다(13). 또, 공진주파수의 허수부의 크기가 클수록 Fig. 5와 같은 산란계수의 주파수 거동에서 산파 골 모양의 변화가 완만하게 나타나고, 반대로 허수부의 크기가 작을수록 이러한 변화가 급격해진다(13). 극단적인 예로서, 공진주파수가 실수가 되면

(즉, 허수부가 0이면), 그 주파수에서 $\pm\infty$ 로 발산하는 거동을 보이게 될 것이다.

3.2.2. 탄성체-탄성체 산란 문제

유체-탄성체 산란문제에서의 공명현상이 탄성체-탄성체 산란문제에서도 나타나지는지를 고찰하기 위해, 먼저 Fig. 2와 3에 보인 산란파의 주파수 거동과 참고문헌(13)에 나타난 유체-탄성체 문제의 결과를 비교해 보았다. 그 결과, 탄성체-탄성체 산란문제에서는 유체-탄성체 문제에서 관찰되는 공진주파수 근처에서의 급격한 변화를 볼 수 없었다. 이를 구체적으로 살펴보기 위하여, 탄성체-탄성체 문제에서 $n=1$ 일 때의 산란 종파 및 산란 횡파의 계수, 즉 a_1 및 b_1 을 주파수의 함수로 계산한 결과가 Fig. 6에 나타나있다. Fig. 5와 비교해

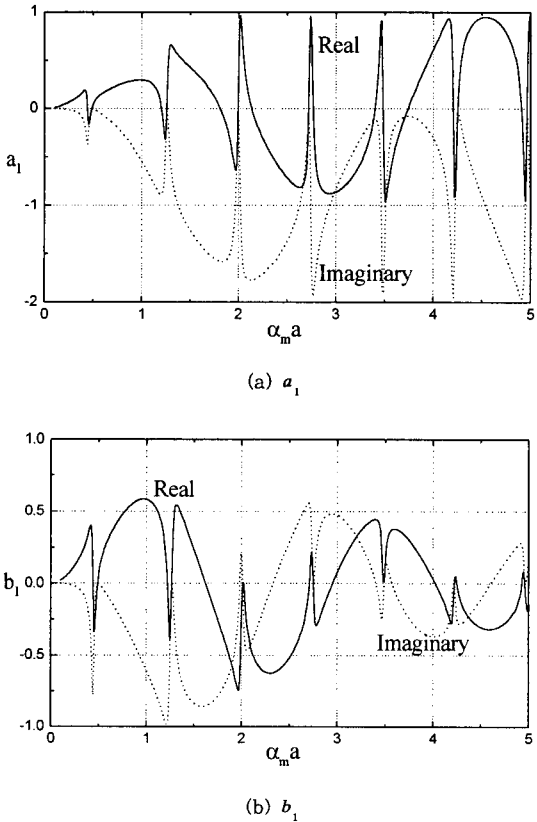


Fig. 5 Scattering coefficients a_1 and b_1 for scattered P and SV waves, respectively, in case of fluid scatterer, versus dimensionless frequency $\alpha_m a$

보면, Fig. 6에서 나타난 산과 골은 그 형상이 매우 완만하며 같은 주파수 범위내(예를 들면 $0 \leq \alpha_m a \leq 5$)에서의 개수도 현저하게 적은 것을 알 수 있다. 즉, Fig. 6에서는 공명현상에 의해 전형적으로 나타나는 뾰족하고 잦은 산과 골을 볼 수 없으므로, 탄성체-탄성체 문제에 있어서는 산란체의 공명이 산란현상에 지배적인 영향을 미치지 않는 것으로 생각된다.

Fig. 6에서 주목할 또 하나의 사실은 Fig. 5와는 달리 a_1 과 b_1 에서 산과 골이 나타나는 주파수 값들이 서로 다르다는 점이다. 이는, a_1 과 b_1 의 분모가 모두 식 (7)의 4×4 행렬의 행렬식을 상기할 때, 이 행렬식이 0이 되는 공진주파수 근처에서 산과 골이 나타나는 것이 아님을 의미하고, 따라서 a_1 과 b_1 의 거동은 산란체의 공명현상으로부터 별로 영향을 받지 않고 있다고 할 수 있다. 이러한 결과의 수학적 이유는 식 (7)의 4×4

행렬의 행렬식이 0이 되는 복소 공진주파수의 허수부가 매우 큰 값을 가지게 되어, 주파수가 실수값만을 가지면서 변화하는 Fig. 6의 결과에서는 산란계수의 분모가 0에 가까워짐으로써 산란계수가 급격하게 변화하는 현상이 거의 발생하지 않기 때문이다. 또한, 탄성체-탄성체 산란문제에서 공진주파수의 허수부가 커지는 물리적 이유는 유체-탄성체 문제에 비해 산란체와 주변 매질사이의 특성 임피던스 차이가 매우 작아서 에너지의 재방사가 많이 일어나기 때문으로 설명할 수 있다.

요약하면, 본 논문의 문제와 유사한 탄성체-탄성체 산란문제를 음향 공명산란이론이 잘 적용되는 유체-탄성체 산란문제와 비교해 본 결과, 탄성체-탄성체 문제에서는 유체-탄성체 문제와 달리 공명현상이 지배적인 영향을 미치지 못하는 것을 알 수 있었다. 따라서, 음향 공명산란이론의 개념을 그대로 탄성체-탄성체 산란문제에 적용할 수 없고, 산란체의 공명신호를 분리하여 인터페이스의 성질을 추정하는 방법은 탄성체-탄성체 산란문제에 대한 일반적인 공명산란이론이 정립되어야 가능해질 것이다.

4. 신경회로망의 적용

산란 초음파의 주파수 특성으로부터 인터페이스의 성질을 유추할 수 있는 수치적 방법으로서 신경회로망을 구성해 보았다. 신경회로망이란 기지의 정보를 반복 학습하여 이들 정보간의 상호 관계를 수치적으로 정립한 후, 이들 정보중 일부가 입력될 때 나머지 정보를 추정해 주는 알고리즘[14,15]이다. 본 논문에서는 신경회로망 구성을 위한 소프트웨어로서 Neural Fusion사의 NNMODEL V1.43[16]을 사용하였으며, 2절에서 계산된 결과를 학습 데이터로 이용하였다. 신경회로망을 구성하기 위한 학습 과정에서 사용한 데이터의 종류는 인터페이스 파라미터 c_p, c_s, μ, t (4개)와, 입사 종파 및 횡파의 주파수가 $\alpha_m a, \beta_m a = 5.0, 6.0, 7.0, 8.0, \dots, 15.0$ 일 때 계산된 전방 산란파의 응력의 진폭 (22개)으로서 총 26가지이다. 학습에 사용된 인터페이스 파라미터들은 Table 1에 보인 값들의 조합, 즉 총 $625 (=5^4)$ 경우이다. 이러한 학습을 통하여 구성된 신경회로망의 입력 값은 위의 특정 주파수에서의 산란파 응력의 진폭 값들이고 출력 값은 인터페이스 파라미터들이다. 즉, 산란파 응력의 진폭 값들을 알 때, 4개의 인터페이스 파라미터를 추정할 수 있도록 신경회로망을 구성한 것이다.

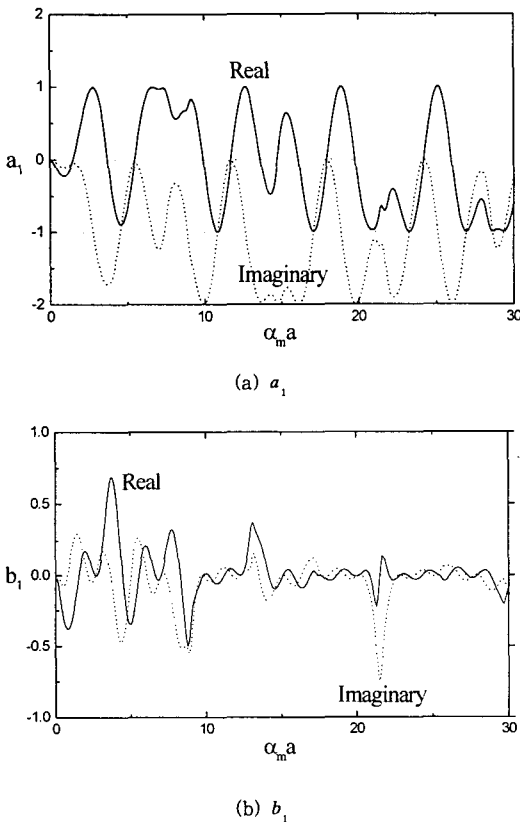


Fig. 6 Scattering coefficients a_1 and b_1 for scattered P and SV waves, respectively, in case of elastic scatterer, versus dimensionless frequency $\alpha_m a$

Table 1 Parameter values used for the training of neural network

	c_p	c_s	μ	t
Values	0.3	0.3	0.3	0.05
	0.4	0.4	0.4	0.10
	0.5	0.5	0.5	0.15
	0.6	0.6	0.6	0.20
	0.7	0.7	0.7	0.25

구성된 신경회로망을 평가하기 위해, 인터페이스 파라미터 값이 서로 다른 256가지 경우에 대하여 신경회로망으로 이들 파라미터들을 예측해 보았다. 이 256 경우에 있어서의 c_p, c_s, μ, t 의 예측 오차 중 일부를 Table 2에 나타내었다. Table 2를 살펴보면, 구성된 신경회로망은 대체로 10% 오차 범위 이내에서 각 파라미터를 잘 예측하고 있는 것을 알 수 있다. 그러나, 몇몇 특별한 경우(특히 c_s 와 μ 가 0.35인 경우)에는 큰 오차를 보인다. 그 이유를 신경회로망의 학습의 관점에서 찾아보면, Fig. 2(b)의 $c_s = 0.3$ 인 경우에 나타나는 특

이한 주파수 거동이 신경회로망의 학습에 혼동을 주어 이 값 근처에서 큰 오차가 발생한 것으로 생각된다. 그러나, 앞에서 언급하였듯이 본 연구에서 고려하는 인터페이스 파라미터의 범위는 가능한 모든 경우를 고려하기 위해 매우 넓게 설정한 것이므로, 이러한 범위의 끝(0.3근처나 0.7근처)부분은 실제로 존재하기 힘든 경우에 해당되어, 위의 큰 예측 오차는 실제로는 그다지 큰 문제가 되지 않을 것이다.

Table 2에서 주목할 점은 인터페이스 두께가 파라미터들 중에서 가장 정확하게 예측되어, 대부분의 경우 예측 오차가 5% 이내가 된다는 점이다. 이는 2절의 고찰에서 지적한 바와 같이 주파수 특성이 인터페이스의 두께에 의하여 가장 크게 영향을 받는다는 사실로 설명될 수 있다. 그 외의 오차는 Fig. 2와 3에서 볼 수 있듯이 인터페이스 파라미터들의 미세한 차이(5% 정도)에 의해서는 주파수 특성이 크게 변하지 않기 때문으로 생각된다. 결과적으로, 인터페이스가 있는 단일 섬유 복합재료에서 특정 주파수에서의 산란파 능력의 진폭을

Table 2 Results of prediction by neural network

Case No.	Correct values				Prediction errors(%)			
	c_p	c_s	μ	t	c_p	c_s	μ	t
1	0.350	0.350	0.350	0.0750	1.23	11.3	30.0	6.47
16	0.650	0.650	0.350	0.0750	11.4	14.9	48.6	0.120
24	0.650	0.450	0.450	0.0750	1.06	0.530	7.53	6.91
39	0.550	0.450	0.550	0.0750	5.08	3.75	11.2	4.81
51	0.550	0.350	0.650	0.0750	21.3	5.24	5.45	0.960
59	0.550	0.550	0.650	0.0750	3.61	6.16	3.49	3.21
69	0.350	0.450	0.350	0.125	8.48	9.60	22.5	4.14
86	0.450	0.450	0.450	0.125	0.600	4.58	10.7	3.16
97	0.350	0.350	0.550	0.125	11.8	11.4	22.5	2.71
119	0.550	0.450	0.650	0.125	2.42	0.54	3.63	1.01
136	0.650	0.450	0.350	0.175	0.390	1.43	11.6	2.33
147	0.550	0.350	0.450	0.175	15.6	19.7	32.4	0.620
163	0.550	0.350	0.550	0.175	14.1	20.1	23.4	0.550
175	0.550	0.650	0.550	0.175	1.35	2.28	3.54	1.85
190	0.450	0.650	0.650	0.175	2.05	1.59	2.04	0.07
204	0.650	0.550	0.350	0.225	2.78	5.50	21.7	0.28
218	0.450	0.550	0.450	0.225	11.2	3.50	15.7	1.28
231	0.550	0.450	0.550	0.225	4.80	5.28	9.81	2.49
237	0.350	0.650	0.550	0.225	1.56	5.17	11.5	0.58
253	0.350	0.650	0.650	0.225	5.37	3.14	5.52	0.53

측정하면, 신경회로망을 이용하여 인터페이스의 성질을 상당히 정확하게 추정할 수 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 산란 초음파의 주파수 특성을 이용하여 인터페이스의 기계적 성질과 두께를 측정하는 방법을 제안하고, 그 타당성을 이론적으로 검증하였다. 이를 위하여, 인터페이스내의 종파와 횡파의 속도, 전단 탄성계수, 두께를 인터페이스의 성질 파라미터로 선정하고, 이들을 변화시키면서 산란파를 계산하여, 그 주파수 특성의 변화를 고찰하였다. 그 결과, 인터페이스 성질의 변화에 따라 이들 산란파의 주파수 특성이 매우 복잡한 양상으로 변함을 확인하였고, 이로써 이러한 인터페이스 평가법의 타당성이 검증되었다.

또한, 산란파의 주파수 거동으로부터 산란체의 공명 신호를 분리하여 해석함으로써 인터페이스의 성질을 추정할 수 있는 가능성을 검토하기 위하여, 음향 공명산란이론이 잘 적용되는 유체 산란체의 문제와 본 논문과 같은 탄성 산란체의 문제를 비교해 보았다. 그 결과, 유체 산란체의 경우에는 산란파가 매우 뚜렷한 공명 성분을 함유하고 있지만, 탄성 산란체의 경우에는 공명 성분이 뚜렷하게 나타나지 않음을 알 수 있었다. 따라서, 음향 공명산란이론을 본 논문의 문제에 그대로 적용할 수 없고, 이는 탄성 산란체 문제에 대한 일반적인 공명산란이론이 정립되어야 가능해질 것이라는 결론을 얻었다.

산란 초음파의 주파수 특성으로부터 역으로 인터페이스의 성질을 예측하는 수치적 기법으로서 신경회로망을 구성해 보았다. 구성된 신경회로망을 평가한 결과, 고려한 대부분의 경우에서 인터페이스의 성질을 상당히 정확하게 추정할 수 있었다. 또한, 주파수 특성이 인터페이스의 두께에 의하여 가장 크게 영향을 받으므로, 역으로 신경회로망을 통하여 인터페이스 두께가 가장 정확히 예측됨을 관찰하였다. 결론적으로, 산란 초음파의 응력 진폭을 몇몇 주파수 값에 대해 측정할 수 있으면, 신경회로망을 사용하여 역으로 인터페이스의 성질을 상당히 정확하게 예측할 수 있음을 알 수 있었다. 본 논문에서 제안하고 해석한 기법을 실제 문제에 적용될 수 있도록 보완하면, 인터페이스의 성질을 정확하게 추정할 수 있는 비파괴평가법을 개발할 수 있을 것이며, 이는 복합재료 분야의 연구에 크게 기여할 것이다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 핵심전문 연구비(961-1003-026-2) 지원으로 수행되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- [1] B. D. Agarwal and R. K. Bansal, "Effect of an interfacial layer on the properties of fibrous composites: A theoretical analysis", *Fibre Science and Technology*, Vol. 12, pp. 149-158, (1979)
- [2] A. M. Wass, "Effect of interphase on compressive strength of unidirectional composites", *Journal of Applied Mechanics*, ASME, Vol. 59, pp. S183-S188, (1992)
- [3] S. Subramanian, J. J. Lesko and K. L. Reifsnider, "Characterization of the fiber-matrix interphase and its influence on mechanical properties of unidirectional composites", *Journal of Composite Materials*, Vol. 30, No. 3, pp. 309-332, (1996)
- [4] J. D. H. Hughes, "The carbon fibre/epoxy interface - a review", *Composites Science and Technology*, Vol. 41, pp. 13-45, (1991)
- [5] J. G. Williams, M. E. Donnellan, M. R. James and W. L. Morris, "Elastic modulus of the interphase in organic matrix composites", *Materials Research Society Symposium Proceedings*, Vol. 170, pp. 285-290, (1990)
- [6] Q. Wang and F.-P. Chiang, "Experimental characterization of interphase mechanical properties of composites", *Composites, Part B*, Vol. 27B, pp. 123-128, (1996)
- [7] W. Huang, S. Brisuda and S. I. Rokhlin, "Ultrasonic wave scattering from fiber-matrix interphase", *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 97, No. 2, pp. 807-817, (1995)
- [8] H. Yim, and J. H. Williams Jr.,

- "Formulation and its energy balance verification for ultrasonic non-destructive characterization of single fibre interphase", *Ultrasonics*, Vol. 33, No. 5, pp. 377-387, (1995)
- [9] H. Yim, and J. H. Williams Jr., "Database generation and parametric study for ultrasonic non-destructive characterization of single fibre interphase", *Ultrasonics*, Vol. 33, No. 5, pp. 389-401, (1995)
- [10] A. I. Lavrentyev and S. I. Rokhlin, "Determination of elastic moduli, density, attenuation, and thickness of a layer using ultrasonic spectroscopy at two angles", *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 102, No. 6, pp. 3467-3477, (1997)
- [11] H. Uberall, "Acoustic resonant scattering", Gordon and Breach Science Publishers, Philadelphia, (1993)
- [12] M. Choi, "New formulation of the resonance scattering theory", *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 101, No. 6, pp. 2491-2495, (1997)
- [13] Y. H. Pao, and C. C. Mow, "Theory of normal modes and ultrasonic spectral analysis of the scattering of waves in solids", *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 59, No. 5, pp. 1046-1056, (1976)
- [14] S. S. Haykin, *Neural networks : a comprehensive foundation*, pp. 138-185, Macmillan Publishing Company, New York, (1994)
- [15] J. E. Dayhoff, *Neural network architectures : an introduction*, pp. 58-79, Van Nostrand Reinhold, New York, (1990)
- [16] Internet URL: <http://www.neuralfusion.com>