

부분 손상을 입은 초음파 탐촉자의 펄스-에코 시험 모델

송 성 진

조선대학교 공과대학 기계설계공학과 및
수송기계부품 공장자동화 연구센터

요 약 초음파 탐상 시험에서 결함 신호는 1) 초음파 탐촉자에 의해 재료 내부로 송신된 입사파의 특성, 2) 입사파가 결함에 부딪혔을 때 생성되는 산란파(혹은 반사파)의 특성, 그리고 3) 이 산란파가 수신 초음파 탐촉자에 도달했을 때 초음파 탐촉자에 의한 산란파의 수신 특성 등 3대 요소에 의해 결정된다. 따라서 이 세 가지 요인 중 어느 하나라도 변화하면 결함 신호의 특성이 변화하게 되는데, 초음파 탐촉자는 부분 손상이나 열화에 의해 탐촉자의 특성이 변화할 수 있기 때문이다. 초음파 탐촉자의 특성을 정량적으로 평가하기 위해 가장 널리 사용되는 것이 대비 산란체를 이용한 펄스-에코 시험인데, 이 시험에 대한 이론적 모형은 그다지 많이 개발되지 않은 상태이며, 특히 부분 손상을 입은 탐촉자에 대한 펄스-에코 시험 모델은 아직 개발되지 않은 상태이다.

본 연구에서는 사용 도중 부분 손상을 입은 초음파 탐촉자의 특성 평가에 활용할 수 있도록 펄스-에코 시험에 대한 이론적 모델을 개발하였으며 실험을 통해 그 정확성을 검증하였다. 실험 결과, 본 연구에서 개발한 이론적 모델이 실험 결과와 매우 잘 일치함을 확인하였다. 따라서 본 연구를 통해 개발한 이 모델은 초음파 탐상 시험의 신뢰성에 가장 큰 영향을 미치는 핵심 요소 중의 하나인 초음파 탐촉자의 특성 평가, 예를 들어, 시간에 따른 열화 현상이나 예기치 않은 사고로 인한 부분 손상 등을 파악할 수 있는 이론적 대비 기준으로 충분히 활용될 수 있을 것으로 판단하며, 현재 이러한 관점에서의 활용을 위한 연구를 계속 수행 중에 있다.

1. 서 론

균열이나 기공 등 재료 및 기계 구조물 내부에 존재하는 결함은 구조물의 기계적 성질을 저하시키고, 때로는 예기치 않은 파괴를 일으키기도 하기 때문에, 제품의 품질과 구조물의 안전성 확보를 위해서 내부 결함의 검출과 그 영향 평가가 매우 중요한 과제 중의 하나이다. 이를 위해 다양한 비파괴 시험 방법이 사용되고 있는데, 이 중 초음파 탐상 시험은 방사선 투과 시험에 비해 안전하고 저렴하기 때문에 최근 그 적용 범위가 확대되고 있다.

초음파 탐상 시험에서는 초음파 탐촉자에서 발진

된 초음파가 재료 내부를 통과할 때 그 진행 경로에 존재하는 결함으로부터 반사 또는 산란되는 결함 신호를 이용하여 내부 결함에 대한 특성을 결정한다. 초음파 탐상 시험 중 가장 보편적으로 사용되고 있는 펄스-에코 시험은 결함 신호의 수신시 초음파 발진에 사용했던 탐촉자를 동일하게 사용하는 데, 이 펄스-에코 시험을 포함한 모든 초음파 탐상 시험에서 결함 신호의 특성은 1) 초음파 탐촉자에 의해 재료 내부로 송신된 입사파의 특성, 2) 입사파가 결함에 부딪혔을 때 생성되는 산란파(혹은 반사파)의 특성 그리고 3) 이 산란파가 수신 초음파 탐촉자에 도달했을 때 초음파 탐촉자에 의한 산란파

의 수신 특성 등 세 가지 요인에 의해 결정된다. 따라서 이 세가지 요인 중 어느 하나라도 변화하면 결합 신호의 특성이 변화하게 되고, 그 결과 결합에 대한 평가도 달라지기 때문에, 결합에 대한 정확한 평가를 위해서는 이 세가지 요인에 대한 정확한 이해가 필수적이다.

초음파 탐상 시험에서 많은 경우 초음파 탐촉자의 특성(입사파 발진 및 산란파 수신 등)이 문제가 되고 있다. 왜냐하면 동일한 결합이라도 초음파 탐촉자에 따라 결합 신호의 특성이 변화할뿐만 아니라, 또한 동일한 탐촉자라도 시간이 경과함에 따라 탐촉자의 특성이 변화(열화)하기 때문이다. 이러한 이유 때문에 초음파 탐촉자의 특성을 정량적으로 평가할 수 있는 여러 가지 방법들이 제시된 바 있는데 그 중에서 가장 널리 사용되는 방법 중 하나가 대비 시험법이다. 초음파 탐상 시험에 있어 가장 널리 사용되고 있는 대비 시험 중의 하나가 물 속에 있는 구나 원주 등 대비 산란체(reference scatterer)에 대한 펄스-에코 시험이다. 이 시험은 초음파 탐상 장치의 직선성 확인, 탐촉자 빔 형상 측정 등 다양한 목적으로 사용되고 있는데, 특히 탐촉자의 특성 검증에 매우 유용한 시험이다. 그러나 이 시험이 매우 널리 사용되고 있는 중요한 시험 중의 하나임에도 불구하고 이 시험에 대한 이론적 모형은 그다지 많이 개발되지 않은 상태이다. 왜냐하면 전술한 바대로 초음파 탐상 시험에 대한 이론적 모형을 구축하기 위해서는 초음파 탐촉자에 의해 생성된 입사파의 음장, 결합에 의한 산란파의 생성, 그리고 초음파 탐촉자에 의한 산란파의 수신 과정 등의 세 과정을 모두 포함하는 이론적 모형을 개발해야 하는데 이 세 과정을 모두 포함하는 해를 구한다는 것이 매우 어렵기 때문이다. 그래서 지금까지 많은 연구들이 수행되었음에도 불구하고 여러 가지 제약 조건을 가진 해들만이 얻어진 상태이다.

펄스-에코 시험의 이론적 모델 개발을 위한 첫 번째 문제의 경우, 즉 초음파 탐촉자에 의해 재료(대비 시험의 경우는 보통 물을 말함) 내부에 생성된 입사파의 음장을 구하는 문제(bounded beam solution)는 초음파 탐촉자를 평면 피스톤 발진자(planar piston source)로 간주하고 이에 대한 입사파 음장을 이론적으로 모형화한 연구 결과들이 많이 발표된 바 있

다.¹⁾⁻³⁾ 그리고 첫 번째 문제와 두 번째 문제를 함께 고려한 해로서는 Gaunaurd and Uberall⁴⁾이 피스톤 발진자의 중심축상에 위치한 산란체에 의해 생성된 산란파의 해를 구하기 위해 평면파 중첩법과 고주파 점근해(high frequency asymptotics)를 이용한 바 있다. 그리고 초음파 탐촉자에 의한 수신 과정을 포함한 세 가지 문제를 모두 고려한 해에 대한 연구는 초기에 Freedman⁵⁾⁻⁷⁾에 의해 수행된 바 있는데, Freedman은 탐촉자의 원거리 음장에 존재하는 산란체에 의한 펄스-에코 반응을 고주파 근사해를 이용해 구하였다. 그 이후 McLaren and Weight⁸⁾와 그 밖의 여러 연구자⁹⁾⁻¹²⁾들은 Freedman과 비슷한 방법을 이용하여 펄스-에코 반응을 구한 바 있으나, 그들의 연구에서 구한 모델은 결합의 형상이 점 산란체(point scatterer)라든지 결합의 위치가 초음파 빔의 중심축에 위치해야 한다는 등의 여러가지 제약을 갖는 모델들이다. 최근 Schmerr and Sedov¹³⁾, Sedov, Schmerr and Song¹⁴⁾이 초음파 빔의 중심축에 존재하는 평면 원형 결합에 대한 펄스-에코 시험 모델을 발표한 바 있는데, 이들 모델은 결합의 위치가 초음파 탐촉자의 원거리 음장뿐 아니라 근거리 음장내에 있을 때에도 적용이 가능한 모델로서 Song, Schmerr and Sedov¹⁵⁾는 이 모델을 이용하여 초음파 시험의 대비 기준으로 사용할 수 있는 이론적인 Distance-Gain-Size (DGS) Diagram을 구성하였다. 그러나 지금까지 발표된 펄스-에코 시험 모델들은 대부분 결합의 형상이 원형 평면 균열이나 구라든지, 혹은 결합의 크기가 점 산란체라든지, 또는 결합의 위치가 초음파 빔의 중심축상에 있어야 한다든지 하는 매우 강한 제약 조건을 가지고 있다.

다행히도 극히 최근에 Sedov, Schmerr and Song¹⁶⁾이 임의의 형상의 결합이 초음파 빔의 중심축에 존재하는 경우에 대한 펄스-에코 시험 모델을 개발한 바 있고, 그 이후 Song, Schmerr and Sedov¹⁷⁾가 임의의 형상의 결합이 임의의 위치에 존재하는 경우에 대한 모델을 발표하였다. 특히 이 후자의 모델은 결합의 형상과 물성에 대한 아무런 제약이 없고, 초음파 탐촉자로부터의 거리(원거리 음장 혹은 근거리 음장)나 상대적 위치(초음파 빔의 중심축상 혹은 축에서 벗어난 위치)에 대한 제약도 없는 매우 일반화된 모델이다. 특히 이 모델은 물

속에서 탐촉자의 근거리 음장에 위치해 있는 강체 구(rigid sphere)에 대한 펄스-에코 시험에 대한 실험 결과와 매우 잘 일치하고 있어, 초음파 탐촉자의 특성 평가를 위한 이론적 대비 기준으로 사용하기에 매우 적합한 모델로 평가받고 있다.

그러나 실제적인 초음파 탐상 실험에서는 원래 원형 단면을 갖는 탐촉자가 예기치 않은 손상으로 탐촉자의 일부가 파손되는 경우가 종종 있다. 이 경우에는 초음파 탐촉자는 외형상으로는 원형 단면으로 보이지만 성능상으로는 더이상 원형 단면을 갖지 않는다. 이 경우는 내구성 소모품인 초음파 탐촉자의 사용 도중 얼마든지 발생할 수 있는 실제적인 상황으로서, 탐촉자가 어떠한 손상을 입었는지를 확인해야 할 필요성이 실용적으로 매우 크지만, 불행히도 아직까지 이러한 목적에 쉽게 사용할 수 있는 이론적인 모델이 아직 개발되지 않고 있다. 따라서 본 연구에서는 사용 도중 부분 손상을 입은 초음파 탐촉자의 특성 평가에 활용할 수 있는 펄스-에코 시험 모델을 개발하고 그 정확성을 실험적 검증을 통해 입증하고자 한다.

2. 펄스-에코 시험 모델

이 절에서는 부분 손상을 입은 초음파 탐촉자의 펄스-에코 시험에 대한 이론적 모델을 수립코자 한다. 이 모델은 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 임의의 형상을 갖는 결함(산란체)이 유체(물) 속에서 부분 손상을 입은 초음파 탐촉자(손상을 받지 않은 표면에서는 일정한 발진 속도를 갖는 피스톤 발진자로서 가정)에 대해 임의의 위치(초음파 빔 축상 혹은 축 이외의 위치, 그리고 원거리 음장 혹은 근거리 음장)에 있는 경우의 펄스-에코 시험을 이론적으로 모형화한 것이다. 이 모델은 초음파 탐촉자로부터 발진된 입사파의 모델, 결함에 의해 산란되는 산란파의 모델 그리고 반사된 초음파 빔이 초음파 탐촉자에 의해 수신되는 전 과정을 포함하는 모델로서, 이전의 연구¹⁷⁾에서 채택한 과정과 동일한 과정을 통해 계산할 수 있다. 여기에서는 1) 산란체가 탐촉자의 표면을 탐촉자의 면에 수직인 법선을 따라 연장시킴으로써 얻어진 원주 내에 위치하는 경우(이하 “탐촉자 면 내에 위치한다”고 표현)와, 2) 산란체가 상

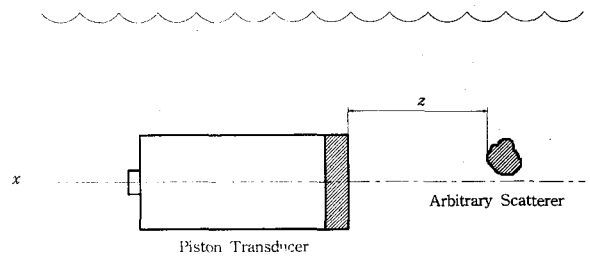


Fig. 1. Pulse-echo immersion configuration for transducer calibration.

기의 원주 밖에 위치하는 경우(이하 “탐촉자 면 외에 위치한다”고 표현)로 나누어 논의하고자 한다.

2. 1. 산란체가 탐촉자 면 내에 위치할 경우

부분 손상을 입은 초음파 탐촉자를 손상을 받지 않은 표면에서 일정한 속도 v_0 를 갖고 단일 주파수로 구동되는 피스톤 발진자로 모형화하면, 이 탐촉자에 의해 산란체가 위치하는 점 y 에 생성된 입사파의 음장은 Rayleigh-Sommerfeld 식에 의해 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$p(y) = -\frac{i\omega\rho_0v_0}{2\pi} \int_S \frac{e^{ikr}}{r} dS \dots\dots\dots (1)$$

여기에서 $p(y)$ 는 손상받지 않은 부분의 면적이 S 인 탐촉자에 의해 유체내에 발진된 입사파의 음장, $v_0(w)$ 는 탐촉자 표면 중 손상을 받지 않은 부위에서의 속도, w 는 각속도, k 는 파수(wave number), ρ_0 는 유체의 밀도이며, 유체내의 음장은 시간따라 $e^{-i\omega t}$ 로 변화한다고 가정하고 있다.

그런데, Fig. 2와 Fig. 3에 나타낸 대로 $r = \sqrt{\rho^2 + z^2}$ 이므로 탐촉자 표면에서 $dS = r dr d\phi = \rho d\rho d\phi$ 임을 이용하면 $z = z_0$ 인 위치에서 (1)식은 (2)식과 같이 표현된다.

$$p(y) = \rho_0 c_0 v_0 [e^{ikz_0} - \frac{1}{2\pi} \int_{\phi_i=0}^{2\pi} e^{ik\sqrt{\rho(\phi_i)^2 + z_0^2}} d\phi_i] \dots\dots\dots (2)$$

여기에서, c_0 는 유체 내에서의 음속이며, ϕ_i 는 탐촉자 표면의 한 점 x 에서 입사파가 산란체(점 y)

로 입사할 때, 점 y 를 탐촉자 표면에 투영하여 생성된 점 Q 와 점 x 를 연결하는 직선이 z 축과 이루는 각도를 말하며, $\bar{\rho}(\phi_i)$ 는 이 각도에서 점 Q 로부터 탐촉자 가장자리(손상을 입은 부위에서는 손상부)까지의 거리를 말한다. 식 (2)는 두 항으로 구성되어 있는데 첫번째 항은 탐촉자에서 결함까지 z 축과 평행하게 입사한 "직접파(direct wave)" 이고 두번째 항은 탐촉자의 가장자리에서 결함까지 z 축과 θ_i 라는 각도를 가지고 입사한 "가장자리파(edge wave)" 인데 θ_i 는 ϕ_i 의 함수로서 식 (3)으로 주어진다.

$$\theta_i(\phi_i) = \cos^{-1} \frac{z_0}{\sqrt{\bar{\rho}(\phi_i)^2 + z_0^2}} \dots \dots \dots (3)$$

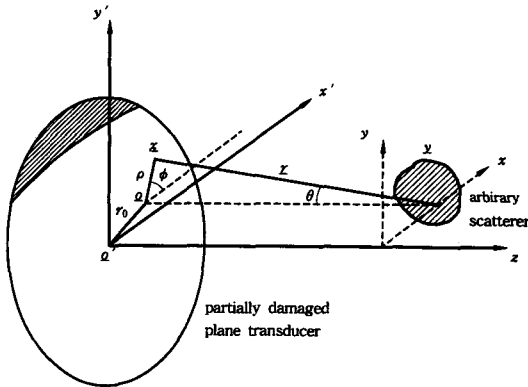


Fig. 2. Definition of points and distances for the scatterer and the transducer.

이제 식 (2)에 나타낸 입사파가 결함에 의해 산란된 산란파를 구해야 하는데, 이 산란파는 식 (2)의 첫번째 항이 z 축과 평행하게 입사한 평면파, 즉 입사각 (θ_i, ϕ_i) 이 $(0, \cdot)$ 인 평면파를 나타내고 (여기에서 \cdot 은 Q 로부터 2π 사이에서의 임의의 값을 나타냄), 식 (2)의 두번째 항은 입사각 (θ_i, ϕ_i) 를 갖는 평면파가 중첩된 입사파를 나타낸다는 사실을 이용하면 쉽게 구할 수 있다. 단위 세기의 음압을 가진 평면파가 입사각 (θ_i, ϕ_i) 으로 입사하여 결함에 의해 산란각 (θ_{sc}, ϕ_{sc}) 를 가지고 산란된 경우, 결함의 원거리 음장에서의 산란파는 식 (4)와 같이 쓸 수 있다.

$$p^{SCATT}(y_s) = A(\theta_i, \phi_i; \theta_{sc}, \phi_{sc}) \frac{e^{ikr}}{r} \dots \dots \dots (4)$$

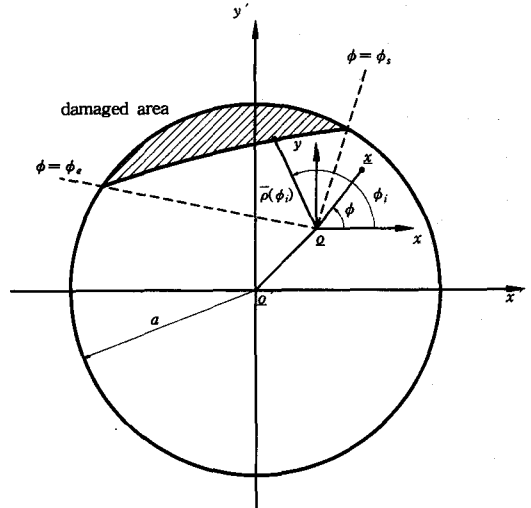


Fig. 3. Definition of points and distances associated with the scatterer projected to the plane of the transducer surface when the scatterer (denoted by o) is inside the cylinder formed by extending the undamaged transducer surface.

여기에서 $A(\theta_i, \phi_i; \theta_{sc}, \phi_{sc})$ 는 원거리 산란 세기 (far-field scattering amplitude)이다. 전술한 바대로 식 (2)의 입사파가 평면파의 중첩파이므로 식 (4)를 이용하면 식 (2)의 입사파가 z 축을 따라 z_0 만큼의 거리에서 위치한 결함으로부터 산란각 (θ_{sc}, ϕ_{sc}) 의 방향으로 산란될 때 결함의 원거리 음장에서의 산란파가 식 (5)와 같이 주어진다.

$$p^{SCATT}(y_s) = \rho_0 c_0 v_0 [e^{ikz_0} A(0, \cdot; \theta_{sc}, \phi_{sc}) \frac{e^{ikr}}{r} - \frac{1}{2\pi} \int_{\phi_i=0}^{2\pi} e^{ik\sqrt{\bar{\rho}(\phi_i)^2 + z_0^2}} A(\theta_i, \phi_i; \theta_{sc}, \phi_{sc}) \frac{e^{ikr}}{r} d\phi_i] \dots \dots \dots (5)$$

여기에서 한가지 주의해야 할 점은 식 (5)는 결함의 원거리 음장에서만 유효한 식이라는 점이다. 그러나 이 제한 조건은 실제적인 초음파 탐상 시험에서는 크게 문제가 되지 않는다. 왜냐하면 보통 초음파 탐촉자의 특성 평가를 위한 펄스-에코 시험의

경우에는 크기가 작은 산란체를 이용하기 때문에 대부분의 펄스-에코 시험에서 초음파 탐촉자와 결함(산란체) 사이의 거리는 과장의 몇 배보다 훨씬 큰 거리이며, 이 거리는 통상 결함의 원거리 음장보다는 길지만, 초음파 탐촉자에 대해서는 여전히 근거리 음장 내에 속하는 경우가 대부분이기 때문에, 식 (5)는 초음파 탐촉자의 근거리 음장에서도 여전히 적용할 수 있다.

이제 식 (5)로 표시되는 산란파를 초음파 탐촉자로 수신하는 경우를 고려하자. 초음파 탐촉자가 수신하는 음압은 초음파 탐촉자 표면(손상을 입지 않는 부위)에 도달한 산란파의 음압을 평균한 값이 될 것이며 이는 식 (6)으로 표시할 수 있다.

$$\langle p \rangle = \frac{1}{S} \int_S p^{SCATT}(\underline{y}_s) dS \dots \dots \dots (6)$$

이 식은 다시 탐촉자 표면에서 $dS = r dr d\phi_{sc}$ $= \rho d\rho d\phi_{sc}$ 인 관계를 이용하면 식 (7)과 같이 쓸 수 있다.

$$\langle p \rangle = \frac{\rho_0 c_0 v_0}{S} [I_1 + I_2] \dots \dots \dots (7)$$

여기에서,

$$I_1 = e^{ikz_0} \int_{\phi_{sc}=0}^{2\pi} \int_{r=z}^{\sqrt{\rho(\phi_{sc})^2+z^2}} A(0, \cdot; \theta_{sc}, \phi_{sc}) e^{ikr} dr d\phi_{sc}$$

$$I_2 = -\frac{1}{2\pi} \int_{\phi_i=0}^{2\pi} e^{ik\sqrt{\rho(\phi_i)^2+z_0^2}} \int_{\phi_{sc}=0}^{2\pi} \int_{r=z}^{\sqrt{\rho(\phi_{sc})^2+z^2}} A(\theta_i, \phi_i; \theta_{sc}, \phi_{sc}) e^{ikr} dr d\phi_{sc} d\phi_i$$

식 (7)의 I_1 과 I_2 의 r 에 대한 적분은 모두 식 (8)의 형태를 가지고 있는데,

$$I(\theta) = \int_{\theta=a}^b f(\theta) e^{i\lambda g(\theta)} d\theta \dots \dots \dots (8)$$

이 식은 적분 구간 내에서 $f(\theta)$ 가 서서히 변화하고, $g'(\theta) = 0$ 인 점이 없으며, $\lambda g(\theta) \gg 1$ 이면, 적분값을 점근선적으로(asymptotically) 식 (9)와 같이 계산할 수 있다.

$$I(\theta) \cong \frac{f(a)}{i\lambda g'(a)} e^{i\lambda g(a)} - \frac{f(b)}{i\lambda g'(b)} e^{i\lambda g(b)} \dots \dots (9)$$

식 (9)의 결과를 식 (7)에 적용하면, 식 (7)을 식 (10)으로 표시할 수 있다.

$$\begin{aligned} \langle p \rangle = & \frac{\rho_0 c_0 v_0}{S} \cdot \frac{1}{ik} [2\pi A(0, \cdot; \pi, \cdot) e^{ikz_0} e^{ikz} \\ & - \int_{\phi_{sc}=0}^{2\pi} A(0, \cdot; \theta_{sc}, \phi_{sc}) e^{ik\sqrt{\rho(\phi_{sc})^2+z^2}} d\phi_{sc} \\ & - \int_{\phi_i=0}^{2\pi} A(\theta_i, \phi_i; \pi, \cdot) e^{ik\sqrt{\rho(\phi_i)^2+z_0^2}} e^{ikz} d\phi_i \\ & + \frac{1}{2\pi} \int_{\phi_i=0}^{2\pi} A(\theta_i, \phi_i; \theta_{sc}, \phi_{sc}) e^{ik\sqrt{\rho(\phi_i)^2+z_0^2}} \\ & e^{ik\sqrt{\rho(\phi_{sc})^2+z^2}} d\phi_{sc} d\phi_i] \dots \dots \dots (10) \end{aligned}$$

여기에서,

$$\theta_{sc}(\phi_{sc}) = \pi - \frac{z_0}{\sqrt{\rho(\phi_{sc})^2+z_0^2}}$$

그런데, 초음파 탐촉자의 출력 전압이 초음파 탐촉자 표면의 속도에 비례한다고 가정하면, 초음파 탐촉자 표면의 평균 속도 $\langle v_z \rangle$ 는 $\langle p \rangle$ 와 식 (11)의 관계가 있으므로,

$$\langle v_z \rangle = \frac{1}{i\omega\rho_0} \frac{\partial \langle p \rangle}{\partial z} \dots \dots \dots (11)$$

최종적으로 $z=0$ 에 위치한 탐촉자에 대한 $\langle v_z \rangle$ 는 식 (12)와 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \langle v_z \rangle = & -\frac{i2\pi v_0}{kS} [A(0, \cdot; \pi, \cdot) e^{2ikz_0} \\ & - \frac{1}{2\pi} \int_{\phi_{sc}=0}^{2\pi} \frac{z_0}{\sqrt{\rho(\phi_{sc})^2+z_0^2}} A(0, \cdot; \theta_{sc}, \phi_{sc}) \\ & e^{ik(z_0+\sqrt{\rho(\phi_{sc})^2+z_0^2})} d\phi_{sc} \\ & - \frac{1}{2\pi} \int_{\phi_i=0}^{2\pi} A(\theta_i, \phi_i; \pi, \cdot) e^{ik(\sqrt{\rho(\phi_i)^2+z_0^2}+z_0)} d\phi_i \\ & + \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{\phi_i=0}^{2\pi} \int_{\phi_{sc}=0}^{2\pi} \frac{z_0}{\sqrt{\rho(\phi_{sc})^2+z_0^2}} A(\theta_i, \phi_i; \\ & \theta_{sc}, \phi_{sc}) e^{ik(\sqrt{\rho(\phi_i)^2+z_0^2}+\sqrt{\rho(\phi_{sc})^2+z_0^2})} d\phi_{sc} d\phi_i] \dots (12) \end{aligned}$$

식 (12)의 식은 모두 4개의 항으로 되어 있는데, 각 항들은 종전의 연구 13)-17)에서 지적한 바대로 "ray-like" 해석이 가능하다. 즉 첫번째 항은 탐촉자로부터 직접파가 입사되어, 결함에서 다시 직접파로 산란되어 되돌아온 파를 나타내고 있으며, 둘째 항은 탐촉자로부터 입사된 직접파가 가장자리파로 되돌아온 파를, 세번째 항은 탐촉자로부터 입사된 가장자리파가 직접파로 산란되어 되돌아온 파를, 그리고 맨 마지막 네번째 항은 탐촉자로부터 입사된 가장자리파가 결함에서 다시 가장자리파로 산란되어 되돌아온 파를 나타내고 있다.

2. 2. 산란체가 탐촉자 면 외에 위치할 경우

산란체가 부분 손상을 입은 탐촉자의 손상을 입지 않은 면 외에 위치하는 경우도 면 내에 위치하는 경우와 동일한 과정을 거쳐 펄스-에코 반응을 계산할 수 있다. 탐촉자에 의해 산란체가 위치하는 점 y 에 생성된 입사파의 음장은 역시 Rayleigh-Sommerfeld 식 (식 (1))에 의해 구할 수 있으나, Fig. 4에 나타낸 바와 같이, 산란체가 탐촉자의 밖에 있으므로 식 (2)에 대응하는 적분이 식 (13)과 같이 주어진다

$$p(y) = \rho_0 c_0 v_0 \left[\frac{1}{2\pi} \int_{\phi_1}^{\phi_2} e^{ik\sqrt{\rho_1(\phi_i)^2 + z_0^2}} d\phi_i - \frac{1}{2\pi} \int_{\phi_1}^{\phi_2} e^{ik\sqrt{\rho_2(\phi_i)^2 + z_0^2}} d\phi_i \right] \dots (13)$$

여기에서, $\rho_1(\phi_i)$ 와 $\rho_2(\phi_i)$ 은 각각 결함의 위치 y 를 탐촉자가 포함된 $x'y'$ 평면상에 투영했을 때의 위치 Q 로부터 $\phi = \phi_i$ 의 각도에서 위치한 탐촉자의 가장 가까운 가장자리와 가장 먼 가장자리까지의 거리를 나타낸다. 식 (2)와 식 (13)을 비교해 보면, 식 (13)에서는 직접파는 나타나지 않고 두 개의 가장자리파에 의해 입사파의 음압이 결정됨을 알 수 있다. 즉, 식 (13)의 첫번째 항은 결함내에서 가장 가까운 탐촉자의 가장자리에서 입사각 (θ_1^i, ϕ_i) 으로 결함에 입사한 평면파들이 중첩이며, 두번째 항은 결함에서 가장 먼 탐촉자의 가장자리에서 입사각 (θ_2^i, ϕ_i) 으로 결함에 입사한 평면파들의 중첩된 파로 볼 수 있다. 여기에서, θ_1^i 과 θ_2^i 은 각각 다음과 같다.

$$\theta_1^i(\phi_i) = \cos^{-1} \frac{z_0}{\sqrt{\rho_1(\phi_i)^2 + z_0^2}} \dots (14-a)$$

$$\theta_2^i(\phi_i) = \cos^{-1} \frac{z_0}{\sqrt{\rho_2(\phi_i)^2 + z_0^2}} \dots (14-b)$$

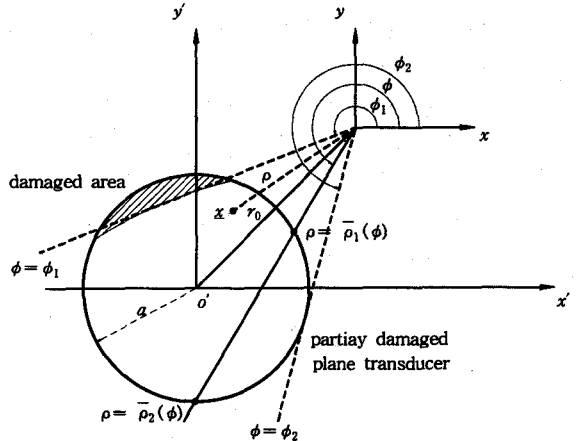


Fig. 4. Definition of points and distances associated with the scatterer projected to the plane of the transducer surface when the scatterer (denoted by O) is outside the cylinder formed by extending the undamaged transducer surface.

식 (13)에 의해 주어진 입사파가 결함에 의해 산란되어 발생한 산란파도 산란체가 탐촉자 면 내에 있는 경우와 같이 결함의 원거리 음장에서 평면파의 원거리 음장 산란 세기를 이용하여 구할 수 있다. 식 (4)로부터 식 (7)을 유도하는데 적용했던 방법을 동일하게 사용하면 $z = z_0$ 에 위치한 결함으로부터 산란된 산란파가 결함의 원거리 음장에 위치한 탐촉자로 수신한 음압을 탐촉자 표면에서 평균한 값을 식 (15)와 같이 구할 수 있다.

$$\langle p \rangle = \frac{\rho_0 c_0 v_0}{S} [I_3 + I_4] \dots (15)$$

여기에서,

$$I_3 = \frac{1}{2\pi} \int_{\phi_1}^{\phi_2} e^{ik\sqrt{\rho_1(\phi_i)^2 + z_0^2}} \int_{\theta_{sc} = \phi_1}^{\phi_2} \int_{r = \sqrt{\rho_1(\phi_{sc})^2 + z^2}}^{\sqrt{\rho_2(\phi_{sc})^2 + z^2}}$$

$$A(\theta_1^i(\phi_i), \phi_i; \theta_{sc}, \phi_{sc}) e^{ikr} dr d\phi_{sc} d\phi_i$$

$$I_4 = -\frac{1}{2\pi} \int_{\phi_i = \phi_1}^{\phi_2} e^{ik\sqrt{\rho_2(\phi_i)^2 + z_0^2}} \int_{\phi_{sc} = \phi_1}^{\phi_2} \int_{r = \sqrt{\rho_1(\phi_{sc})^2 + z^2}}^{\sqrt{\rho_2(\phi_{sc})^2 + z^2}} A(\theta_i^2(\phi_i), \phi_i; \theta_{sc}, \phi_{sc}) e^{ikr} dr d\phi_{sc} d\phi_i$$

식 (15)에서 나타난 I_3 과 I_4 도 역시 식 (8)의 형태이므로 식 (9)의 점근전적 적분치를 사용해서 근사적으로 계산할 수 있다. 이 값을 이용하여 식 (15)를 계산하고, 식 (11)의 관계식을 적용하면 $z=0$ 에 위치한 초음파 탐촉자 표면에서의 평균 속도 $\langle v_z \rangle$ 를 식 (16)과 같이 계산할 수 있다.

$$\langle v_z \rangle = -\frac{i2\pi v_0}{kS} \cdot \frac{1}{(2\pi)^2} \left[\int_{\phi_i = \phi_1}^{\phi_2} \int_{\phi_{sc} = \phi_1}^{\phi_2} \{J_1 + J_2 + J_3 + J_4\} d\phi_{sc} d\phi_i \right] \dots\dots\dots (16)$$

여기에서,

$$J_1 = \frac{z_0}{\sqrt{\rho_1(\phi_{sc})^2 + z_0^2}} A(\theta_i^1(\phi_i), \phi_i; \theta_{sc}^1(\phi_{sc}), \phi_{sc}) e^{ik\sqrt{\rho_1(\phi_i)^2 + z_0^2}} e^{ik\sqrt{\rho_1(\phi_{sc})^2 + z_0^2}}$$

$$J_2 = -\frac{z_0}{\sqrt{\rho_2(\phi_{sc})^2 + z_0^2}} A(\theta_i^1(\phi_i), \phi_i; \theta_{sc}^2(\phi_{sc}), \phi_{sc}) e^{ik\sqrt{\rho_1(\phi_i)^2 + z_0^2}} e^{ik\sqrt{\rho_2(\phi_{sc})^2 + z_0^2}}$$

$$J_3 = -\frac{z_0}{\sqrt{\rho_1(\phi_{sc})^2 + z_0^2}} A(\theta_i^2(\phi_i), \phi_i; \theta_{sc}^1(\phi_{sc}), \phi_{sc}) e^{ik\sqrt{\rho_2(\phi_i)^2 + z_0^2}} e^{ik\sqrt{\rho_1(\phi_{sc})^2 + z_0^2}}$$

$$J_4 = \frac{z_0}{\sqrt{\rho_2(\phi_{sc})^2 + z_0^2}} A(\theta_i^2(\phi_i), \phi_i; \theta_{sc}^2(\phi_{sc}), \phi_{sc}) e^{ik\sqrt{\rho_2(\phi_i)^2 + z_0^2}} e^{ik\sqrt{\rho_2(\phi_{sc})^2 + z_0^2}}$$

$$\text{단, } \theta_{sc}^1(\phi_{sc}) = \pi - \cos^{-1} \frac{z_0^2}{\sqrt{\rho_1(\phi_{sc})^2 + z_0^2}}$$

$$\theta_{sc}^2(\phi_{sc}) = \pi - \cos^{-1} \frac{z_0^2}{\sqrt{\rho_2(\phi_{sc})^2 + z_0^2}}$$

식 (16)은 식 (12)와 마찬가지로 모두 4 개의 항으로 표시되어 있는데, 이들 항도 모두 "ray-like" 해석이 가능하다. 즉, J_1 은 결함으로부터 가장 가까이 위치한 탐촉자의 가장자리(최단 가장자리)에서 입사된 가장자리파가 결함에서 산란된 후 결함으로부터 가장 먼 탐촉자의 가장자리(최장 가장자리)로 되돌아온 가장자리파를 나타내며, J_2 는 탐촉자의 최단 가장자리에서 입사된 가장자리파가 산란 후 탐촉자의 최장 가장자리로 되돌아온 가장자리파를, J_3 는 탐촉자의 최장 가장자리에서 입사된 가장자리파가 산란 후 탐촉자의 최단 가장자리로 되돌아온 가장자리파를, 그리고 마지막으로 J_4 는 탐촉자의 최장 가장자리에서 입사된 가장자리파가 산란 후 탐촉자의 최장 가장자리로 다시 돌아온 가장자리파로 해석할 수 있다.

식 (12)와 식 (16)이 본 연구에서 유도한 부분 손상을 입은 초음파 탐촉자의 펄스-에코 시험에 대한 이론적 모델이다. 이 식들에는 단일 적분 혹은 이중 적분들이 포함되어있기 때문에 일반적인 경우에 대한 최종 결과의 계산을 위해서는 수치적 적분이 필요하다. 그러나 이 수치적분들은 많은 경우에 비교적 간단히 계산할 수 있으며, 다음 절에 소개할 실험과의 대비에서 알 수 있듯이 매우 높은 정확성을 보여주고 있다.

2. 3. 산란체가 탐촉자의 중심축에 위치할 경우

산란체가 탐촉자의 중심축(여기에서 중심축이란 탐촉자가 성능상으로 부분 손상을 받았지만 외형상으로는 원형 단면을 유지하고 있을 때, 이 원형 단면의 중심축을 말함)에 위치하고 있는 경우의 펄스-에코 시험 모델은 산란체가 탐촉자 면 내에 위치하는 경우의 한 특별한 경우로서 식 (12)로부터 쉽게 구할 수 있다. 다만 이 경우에 식 (12)의 $\bar{\rho}(\phi_i)$ 과 $\bar{\rho}(\phi_{sc})$ 는 Fig. 5에 보인 바 대로 손상을 입은 영역을 $0 \leq \phi \leq 2\beta$ 에 위치시켰을 때 식 (17)과 같이 주어진다.

$$\bar{\rho}(\phi_a) = \begin{pmatrix} a_B(\phi_a) & , & 0 \leq \phi_a \leq 2\beta \\ a & , & 2\beta \leq \phi_a \leq 2\pi \end{pmatrix} \dots\dots\dots (17)$$

여기에서, $a = i, sc$ 이고, $a_B(\phi_a)$ 는 탐촉자 중심

에서 손상 부위까지의 거리(반지름)를 나타낸다.

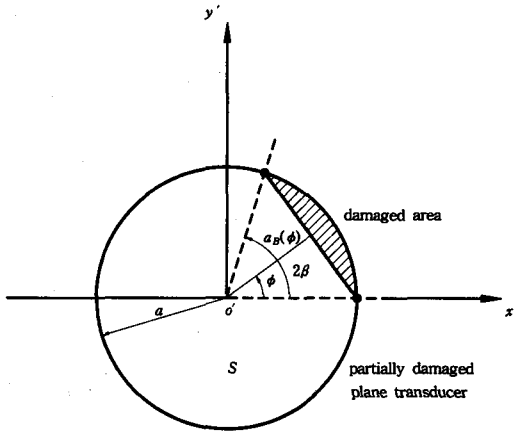


Fig. 5. Definition of points and distances associated with the scatterer projected to the plane of the transducer surface when the scatterer is on-axis of the transducer.

그리고, 만약 탐촉자가 손상을 입지 않았을 경우, 즉 $2\beta \rightarrow 0$ 이면, 식 (12)의 $\bar{\rho}(\phi_i)$ 과 $\bar{\rho}(\phi_{sc})$ 가 항상 a (탐촉자의 반지름)이 되어 식 (12)는 식 (18)과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \langle v_z \rangle = & -\frac{izv_0}{ka^2} [A(0, \cdot; \pi, \cdot) e^{2ikz_0} \\ & - \cos \alpha A(0, \cdot; \pi - \alpha, \cdot) e^{ik(z_0 + \sqrt{a^2 + z_0^2})} \\ & - A(\alpha, \cdot; \pi, \cdot) e^{ik(z_0 + \sqrt{a^2 + z_0^2})} \\ & + \cos \alpha e^{2ik\sqrt{a^2 + z_0^2}} \cdot \frac{1}{2\pi} \int_{\phi_x=0}^{2\pi} \\ & A(\alpha, \cdot; \pi - \alpha, \phi_{sc}) d\phi_{sc} \dots \dots \dots (18) \end{aligned}$$

여기에서, $\alpha = \cos^{-1} \frac{z_0}{\sqrt{a^2 + z_0^2}}$ 이다

이 식은 이전의 연구^{16), 17)}에서 얻은 결과와 일치한다. 따라서 본 연구에서 개발한 펄스-에코 시험 모델을 이전의 연구들에서 취급했던 원형 단면을 갖는 초음파 탐촉자의 펄스-에코 시험 모델을 부분손상을 받은 탐촉자까지 그 적용 범위를 확대시킨 매우 일반적인 것이라 할 수 있다.

3. 실험과의 비교

본 연구에서 유도한 부분 손상을 입은 초음파 탐촉자의 펄스-에코 시험 모델의 정확성을 평가하기 위해서는 실험적 검증이 필요하다. 이 절에서는 부분 손상을 입은 초음파 탐촉자를 이용하여 펄스-에코 방식으로 측정된 산란체로부터 반사된 초음파 신호(이하 결합 신호)와 앞에서 유도한 이론적 모형을 비교코자 한다.

초음파 탐상 시험에서 결합 신호는 오실로스코프 스크린상에 시간에 따른 연속적인 전압의 변화인 $V(t)$ 로 측정한다. 이 $V(t)$ 를 적당한 표본 시간 (sampling time) 간격으로 샘플링하여 디지털 데이터로 변환시킨 후 고속 푸리에 변환(Fast Fourier Transform: FFT)을 이용하여 푸리에 변환을 시키면 주파수에 따른 전압의 변화인 $V(w)$ 를 얻을 수 있다. 여기에서 앞에서 언급한 바와 같이 초음파 탐촉자의 출력 전압이 초음파 탐촉자 표면의 속도에 비례하며, 또한 초음파 탐상 시스템이 선형 시스템이라 가정하면 $V(w)$ 는 식 (19)와 같이 주어진다.

$$V(w) = \beta(w) \left[\frac{\langle v_z \rangle}{v_0} \right] \dots \dots \dots (19)$$

여기에서 $\beta(w)$ 는 초음파 탐상 시스템의 효율 인자 (system efficiency factor)¹⁸⁾로 알려진 실제 측정 데이터와 이론적 모형간의 비례계수이고, $\langle v_z \rangle$ 는 식 (12)와 (16)에 나타난 이론적 모형이다. 따라서 식 (12)와 (16)의 이론적 모델을 실험과 비교하기 위해서는 식 (19)의 효율 인자를 먼저 결정해야 한다. 이 효율 인자는 보통 별도의 대비 실험을 통해서 결정하는데, 이 대비 실험이란 초음파 탐상 시스템 조정 장치를 식 (19)의 결합 신호 측정 실험과 동일하게 설정함으로써 $\beta(w)$ 를 동일하게 하고, 무한 평면 반사체나 구 또는 평저공 등의 대비 산란체로부터 측정된 식 (20)의 대비 신호 $V_r(w)$ 로부터 결정한다.

$$V_r(w) = \beta(w) \left[\frac{\langle v_z \rangle_r}{v_0} \right] \dots \dots \dots (20)$$

여기에서 $\langle V_z \rangle_r$ 은 대비 산란체의 초음파 탐상 시험에 대한 모형이다. $\beta(w)$ 의 결정을 위해서

Song, Schmerr and Sedov는 무한 평면 반사체를 이용한 별도의 대비 실험을 실시한 바 있으며,¹⁵⁾ 그 이후 보다 간편하게 원거리 음장에 위치한 구(이는 결합 신호 측정에 사용한 구와 동일한 구임)를 이용한 대비 시험을 실시한 바 있다.¹⁷⁾ 최근에 Schmerr, Song and Zhang¹⁹⁾ 이 $\beta(w)$ 의 결정을 위한 여러 가지 기법을 비교하였다. 이러한 방법을 통해 식 (20)의 $\beta(w)$ 가 결정되면 식 (20)과 식 (19)를 결합한 식 (21)에 의해 이론식과 실험값을 비교할 수 있다.

$$\frac{\langle v_z \rangle}{v_0} = \left[\frac{V(w)}{V_r(w)} \right] \cdot \left[\frac{\langle v_z \rangle_r}{v_0} \right] \dots\dots\dots (21)$$

식 (21)에서 $\frac{V(w)}{V_r(w)}$ 는 deconvolution 과정이지만, $V_r(w)$ 의 값이 작지 않은 주파수 영역(예를 들어 탐촉자의 중심 주파수 영역)에서는 간단한 복소수 나눗셈에 의해서도 큰 오류없이 계산할 수 있다.

이제 지금부터는 식 (21)을 사용하여, 본 연구에서 유도한 식 (12)와 (16)의 정확성을 검증하고자 한다. 검증 실험에서는 물 속에서 원거리 음장의 거리(N)가 5.35 inch(13.6 cm)인 정상적인 원형 초음파 탐촉자(0.5 inch 지름을 갖는 5MHz 수침형 탐촉자)의 단면중 일부($r_B = 0.5a$)를 Fig. 6에 나타낸 바와 같이 알루미늄 은박지로 가림으로써 부분 손상을 받은 효과를 나타내도록 했으며, 지름 0.25 inch인 강구를 물속에 넣고 이 탐촉자를 이용하여 펄스-에코 시험 방식으로 결합 신호를 채취하였다.

그리고 식 (19)와 식 (20)의 효율 인자 $\beta(w)$ 를 결정하기 위한 대비 시험으로는 수침 거리(water path) 6 inch(15.2 cm)인 지점의 탐촉자 빔의 중심축상에 동일 강구를 위치시킨 후, 부분 손상을 입은 탐촉자를 이용한 펄스-에코 대비 시험을 사용하였다. 여기에서 탐촉자의 중심축이란 부분 손상을 받지 않은 탐촉자, 즉, 외형상으로 온전한 원형 단면을 갖는 탐촉자의 중심축을 말한다. 실용적 관점에서 본다면 탐촉자의 중심축을 이렇게 정의하는 것이 타당하다. 왜냐하면, 부분 손상을 입었는지, 혹은 어디가 얼마만큼 부분 손상을 입었는지 알지 못하는 경우에도 이 중심축은 쉽게 정의하여 사용할 수가 있기 때문이다.

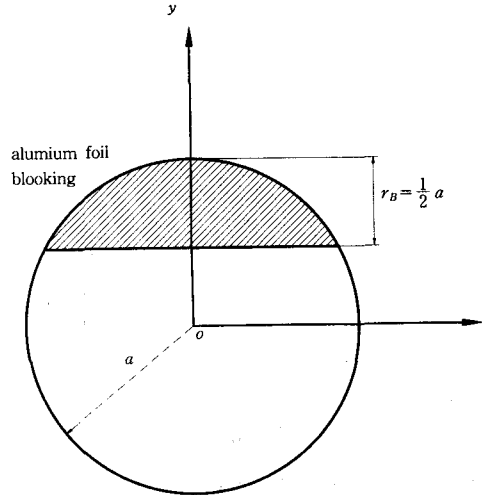


Fig. 6. Simulated partially damaged circulation plane transducer by partial blocking of the transducer surface using the aluminum foil with 4 sheets of paper tissue inserted.

식 (12)와 (16)에 의해 산란체의 펄스-에코 반응을 계산하기 위해서는 식에서 사용하고 있는 원거리 음장 산란 세기 $A(\theta_i, \phi_i; \theta_{sc}, \phi_{sc})$ 를 계산해야 한다. 이 검증 실험에서는 직경 0.25 inch인 강구를 산란체로 선택하였는데, 이 강구의 크기는 초음파의 파장 보다 충분히 크기 때문에, 이전의 연구^{16), 17)}에서 사용한 바 있는 고주파 근사해를 이용하면 원거리 음장 산란 세기를 비교적 간단하게 계산할 수 있다. 반지름이 b 인 구에 대해 Fig. 7에 보인 바대로 입사각 (θ_i, ϕ_i) 로 입사한 단위 세기 평면파의 산란각 (θ_{sc}, ϕ_{sc}) 에서의 원거리 음장 산란 세기 A 를 Kirchhoff 근사법을 이용하여 계산하면 식 (22)와 같이 됨을 알 수 있다.

$$A(\theta_i, \phi_i; \theta_{sc}, \phi_{sc}) = \frac{Rb}{2} \exp \left[-ikb \left(2 + 2 \cos \theta_i \cos \theta_{sc} + 2 \sin \theta_i \sin \theta_{sc} \cos(\phi_i - \phi_{sc}) \right)^{\frac{1}{2}} \right] \dots\dots\dots (22)$$

여기에서 R 은 강구에 대해 Fig. 7에 나타낸대로 \underline{e}_i 방향으로 입사하여 \underline{e}_s 방향으로 반사한 입사파의 반사계수로서 식 (23)로 정의할 수 있다.

$$R = R(\underline{e}_i \cdot \underline{n}_s) = \frac{\rho_2 c_2 (\underline{e}_i \cdot \underline{e}_s) - \rho_1 c_1 (\underline{e}_2 \cdot \underline{n}_s)}{\rho_2 c_2 (\underline{e}_i \cdot \underline{n}_s) + \rho_1 c_1 (\underline{e}_2 \cdot \underline{n}_s)} \dots\dots\dots (23)$$

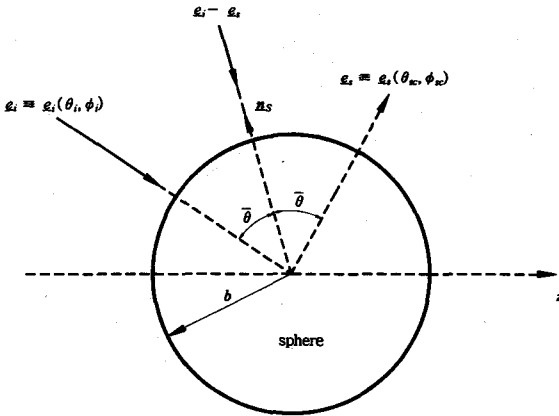


Fig. 7. Definition of directions for the spherical scatterer.

여기에서 ρ_1 은 물의 밀도, c_1 은 물 속에서 종파의 속도, 그리고 ρ_2 는 강구의 밀도, c_2 는 강구내에서 종파의 속도를 나타내며, \underline{n}_s 와 $(\underline{e}_2 \cdot \underline{n}_s)$ 는 각각 다음과 같다.

$$\underline{n}_s = - \frac{(\underline{e}_i + \underline{e}_s)}{|\underline{e}_i + \underline{e}_s|} \dots\dots\dots (23.a)$$

$$\underline{e}_2 \cdot \underline{n}_s = - [1 - \frac{c_1^2}{c_2^2} (\underline{e}_i \cdot \underline{n}_s)^2]^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots (23.b)$$

식 (23)의 반사계수를 계산할 때, 강구는 동일한 밀도와 음속을 갖는 등가 유체 매질로 가정하였는데, 실용적 관점에서 물 속에 있는 강구(steel sphere)는 강체구(rigid sphere)로 간주할 수 있기 때문에 모든 $(\underline{e}_i \cdot \underline{n}_s)$ 에 대해 $R(\underline{e}_i \cdot \underline{n}_s) \approx 1$ 로 볼 수 있다. 따라서 식 (22)에서 $3R \approx 1$ 로 취한 원거리 음장 산란 세기 $A(\theta_i, \phi_i; \theta_s, \phi_s)$ 를 이용하면 실험과 이론의 비교를 위한 이론적 모델을 계산할 수 있다.

Fig. 8은 지름 0.25 inch의 강구를 지름 0.5 inch인 초음파 탐촉자의 중심축에 위치시킨 후 수침 거리 (H)를 1.9 inch ($H/N=0.35$)부터 5.35 inch ($H/N=1.0$)까지 변화시키면서 측정한 펄스-에코 반응을 이론과 비교한 결과를 나타내었다. Fig. 8에서 "unblocked" 라고 표시한 실험 데이터는 정상적인 원형 탐촉자에 대한 실험 결과이며, "1/4 blocked"

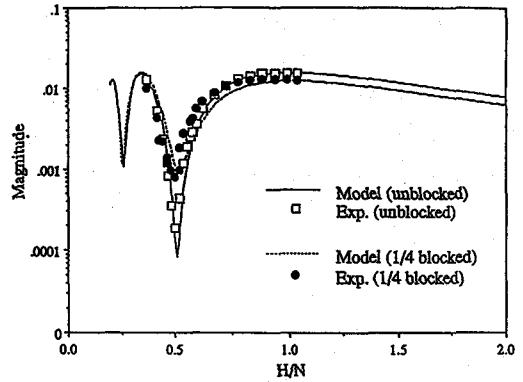


Fig. 8. Experimental and theoretical on-axis responses of a 1/4 inch diameter rigid sphere interrogated by a 5 MHz, 1/2 inch diameter transducer. Model (unblocked) and Exp. (unblocked): theoretical and experimental responses for the unblocked (i.e., circular) transducer, respectively. Model (1/4 blocked) and Exp. (1/4 blocked): theoretical and experimental responses for the transducer with 1/4 blocked by aluminum foil.

라고 표시한 실험 데이터는 Fig. 6에 나타낸 바대로 알루미늄 은박지로 가린 부분의 중심깊이 R_B 가 초음파 탐촉자 지름의 1/4인 경우에 대한 실험 결과이다. 이 결과를 보면 "unblocked"인 경우뿐만 아니라, "1/4 blocked"인 경우에 대해서도 실험 결과가 이론식의 계산 결과와 매우 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 특히 부분 손상을 입은 탐촉자의 경우 $H/N = 0.5$ 인 지점에서의 깊은 골(deep null)이 약 10배 이상 둔화되어 있음을 알 수 있는데, 이론식이 이 변화를 잘 표현하고 있다.

Fig. 9는 동일 강구를 수침 거리 $H=6.8$ cm ($H/N=0.5$)인 위치에 놓은 후 정상적인 원형 초음파 탐촉자를 서로 직각인 두 방향(Fig. 9에서 각각 x-axis, y-axis로 표시함)으로 주사시킨 결과를 나타내었다. Fig. 9에 나타낸 바대로 펄스-에코 반응이 초음파 탐촉자의 중심축 ($r/a=0.0$)을 중심으로 좌우 대칭을 유지하고 있으며, 실험 데이터와 이론식이 매우 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

그리고 Fig. 10과 Fig. 11은 동일 강구를 Fig. 9와 동일한 수침 거리 ($H/N=0.5$)에 놓은 상태에서, 알루미늄 은박지로 초음파 탐촉자 면을 가짐으

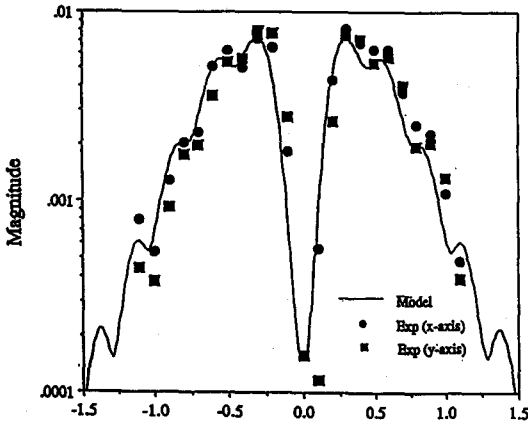


Fig. 9. Experimental and theoretical responses of a 1/4 inch diameter sphere scanned radially across a 5 MHz, 1/2 inch diameter transducer (without aluminum foil blocking) at one half a near field distance. Measurements were taken along two orthogonal radial lines labelled the x - and y -axis.

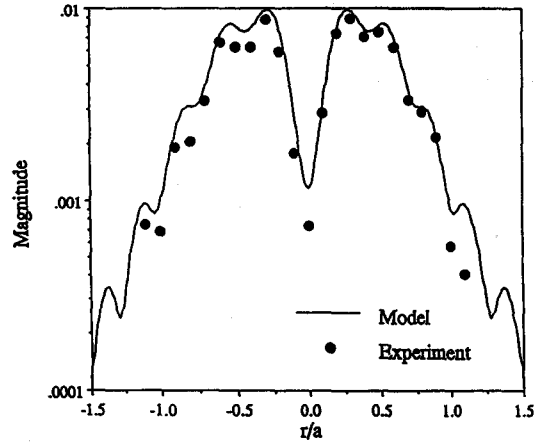


Fig. 10. Experimental and theoretical responses of a 1/4 inch diameter sphere scanned radially across a 5 MHz, 1/2 inch diameter transducer (with 1/4 blocked by aluminum foil) at one half a near field distance. Measurements were taken along x -axis which is parallel to the border line of the aluminum foil blocking.

로써 부분 손상의 효과를 준 (Fig. 8 에서 “1/4 blocked” 로 표시한) 탐촉자를 이용하여 서로 직각인 두 방향으로 주사시킨 실험 결과를 나타내고 있다. Fig. 10 은 주사방향이 알루미늄 은박지의 가장자리선과 평행한 방향으로 (Fig. 6 에 나타낸 x 축을 따라) 주사한 경우에 대한 실험 결과인데, 펄스-에코 반응이 초음파 탐촉자의 중심축을 중심으로 대칭임을 볼 수 있다. 이러한 현상은 초음파 탐촉자의 표면에 가한 부분 손상이 y 축에 대칭이기 때문에 나타난 결과로서, 이론과도 매우 잘 일치하고 있다. Fig. 10의 결과를 Fig. 9의 정상적인 탐촉자의 경우와 비교한다면 초음파 탐촉자 중심축상의 깊은 골 (deep null)이 10배이상 완화되어 있음을 알 수 있는데, 그 이유는 부분손상에 의해 초음파 탐촉자의 대칭성이 깨져 중심축상에서의 상쇄 간섭(destructive interference)이 약화되었기 때문이다. 또한 Fig. 11 은 알루미늄 은박지를 가로질러 (Fig. 6에서 y 축으로 표시한 방향을 따라) 주사했을 때의 실험 결과이다. 이 경우 부분 손상이 더 이상 주사축을 따라 좌우 대칭이 아니기 때문에 펄스-에코 반응도 역시 좌우 대칭이 아니며, 부분 손상을 받은 쪽에서의 펄스-에코 반응이 상대적으로 약화되어

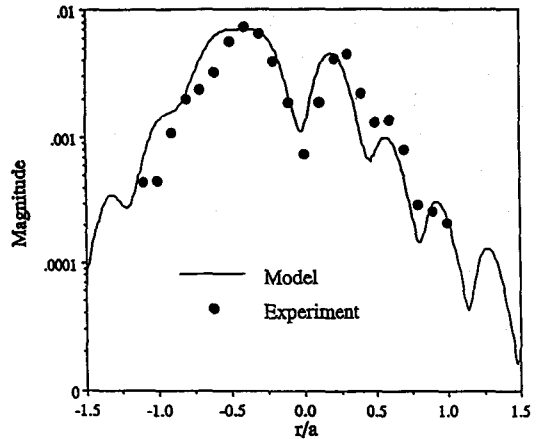


Fig. 11. Experimental and theoretical responses of a 1/4 inch diameter sphere scanned radially across a 5 MHz, 1/2 inch diameter transducer (with 1/4 blocked by aluminum foil) at one half a near field distance. Measurements were taken along y -axis which is perpendicular to the border line of the aluminum foil blocking.

있는 것을 알 수 있다. 이 경우에도 Fig. 11에서 볼 수 있는 것처럼 이론과 실험이 매우 잘 일치하고 있음을 볼 수 있다.

이상의 결과에서 볼 수 있는 바와 같이 본 연구

에서 개발한 펄스-에코 시험 모델은 초음파 탐촉자가 건전한(정상적인) 경우나 부분 손상을 받은 경우에도 모두 잘 적용됨을 알 수 있다. 이것은 이 모델이 초음파 탐촉자로부터의 초음파의 발진과 결합으로부터의 산란, 그리고 초음파 탐촉자에 의한 수신 과정에 대한 물리적 현상을 잘 표현하고 있음을 의미한다. 따라서 이 모델은 초음파 탐촉자의 평가와 교정을 위한 이론적 대비 기준으로 충분히 활용될 수 있을 것으로 생각하며, 이 모델을 초음파 탐촉자의 특성 평가에의 활용을 위한 연구를 현재 수행 중이다.

4. 결 론

본 연구에서는 부분 손상을 입은 초음파 탐촉자의 펄스-에코 반응을 예측할 수 있는 이론적 모델을 개발하였다. 이 모델은 초음파 탐촉자를 부분 손상을 받지 않은 부분에서 균일한 속도를 갖는 평면 피스톤 발진자로 가정하였으며, 임의의 형상과 재질을 갖는 산란체의 원거리 음장 산란 세기를 알 수 있는 경우에 적용이 가능한 매우 일반적인 모델이다. 또한 이 모델은 산란체의 위치에 대해서도 매우 폭 넓은 적용이 가능하다. 즉, 산란체가 탐촉자의 중심축상뿐만 아니라 중심축에서 벗어난 위치에 있어도 적용이 가능하며, 또한 산란체가 탐촉자의 원거리 음장뿐만 아니라 근거리 음장에서 있는 경우에도 적용이 가능하다. 모델의 정확성을 실험을 통하여 확인한 결과, 이 이론적 모델이 실험 결과와 잘 일치하고 있음을 알 수 있었다. 따라서 본 연구를 통해 개발된 이 모델은 초음파 탐상 시험의 신뢰성에 가장 큰 영향을 미치는 핵심 요소 중의 하나인 초음파 탐촉자의 특성 평가, 예를 들어, 시간에 따른 열화 현상이나 예기치 않은 사고로 인한 부분 손상 등을 파악할 수 있는 이론적 대비 기준으로 충분히 활용될 수 있을 것으로 생각하며, 현재 이러한 측면에서의 활용에 대한 연구를 수행 중에 있다.

후 기

본 연구는 '95년도 한국과학재단의 연구비 지원(과제번호 951-1009-047-1)에 의해 연구가 수행되

었음을 밝히며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 1) G. S. Kino, *Acoustic Waves: Devices, Imaging and Analog Signal Processing*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, (1987)
- 2) G. R. Harris, "Review of Transient Field Theory for a Baffled Planar Piston," *Journal of Acoustical Society of America*, Vol. 70(1981), pp. 10-20
- 3) D. A. Hutchins and G. Hayward, "Radiated Fields of Ultrasonic Transducers," *Physical Acoustics: Ultrasonic Measurements Methods*, Eds. R.N. Thurston and A.D. Pierce, Academic Press, N.Y., Vol. 19(1990), pp. 1-80
- 4) G. C. Gaunard and H. Uberall, "Acoustics of Finite Beams," *Journal of Acoustical Society of America*, Vol. 63(1978), pp. 5-16
- 5) A. Freedman, "A Mechanism of Acoustic Echo Formation," *Acoustica*, Vol. 12 (1962), pp. 10-21
- 6) A. Freedman, "The High Frequency Echo Structure of Some Simple Body Shapes," *Acoustica*, Vol. 12(1962), pp. 61-70
- 7) A. Freedman, "The Use of Linear System Theory in Acoustic Radiation and Scattering Analysis," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 52(1977), pp. 256-276
- 8) S. McLaren and J. P. Weight, "Transmit-Receive Mode Responses from Finite Sized Targets in Fluid Media," *Journal of Acoustical Society of America*, Vol. 82 (1987), pp. 2102-2112
- 9) A. Lhemery and R. Raillon, "Theoretical and Experimental Measurements of Echo-Responses from Angled Targets," in *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Eds. D.O. Thompson and D.E. Chimenti, Plenum Press, NY, Vol. 11A (1992), pp. 81-88
- 10) D. De Vadder, R. Raillon and A. Lhemery, "A Geometrical Interpretation of the Echo Formation of Short Pulses on Simple-Shaped Targets," in *Review of Progress in Quantitative*

- Nondestructive Evaluation, Eds. D.O. Thompson and D.E. Chimenti, Plenum Press, NY, Vol. 11A (1992), pp. 1067-1074
- 11) M. Ueda and E. Morimatsu, "Analysis of Echo from a Sphere Which Includes the Directivity of a Transmitter and a Receiver," *Journal of Acoustical Society of America*, Vol. 87 (1990), pp. 1903-1910
 - 12) T. Li and M. Ueda, "Analysis of Echo from a Cylinder That Includes the Directivity of a Transmitter and a Receiver," *Journal of Acoustical Society of America*, Vol. 87 (1990), pp. 1880-1884
 - 13) L. W. Schmerr and A. Sedov, "The Flat-Bottom Hole: an Ultrasonic Scattering Model" *Research in Nondestructive Evaluation*, Vol. 1 (1989), pp. 181-196
 - 14) A. Sedov, L. W. Schmerr and S. J. Song, "Ultrasonic Scattering of a Flat-Bottom Hole in Immersion Testing: an Analytical Model," *Journal of Acoustical Society of America*, Vol. 92 (1992), pp. 478-486
 - 15) S. J. Song, L. W. Schmerr and A. Sedov, "DGS Diagram and Frequency Response Curves for a Flat-Bottom Hole: a Model Based Approach," *Research in Nondestructive Evaluation*, Vol. 1 (1989), pp. 181-196
 - 16) A. Sedov, L. W. Schmerr and S. J. Song, "A Bounded Beam Solution for the Pulse-Echo Transducer Response of an Arbitrary on-axis Scatterer in a Fluid," *Wave Motion*, Vol. 19 (1994), pp. 159-169
 - 17) S. J. Song, L. W. Schmerr and A. Sedov, "A Frequency Domain Ultrasonic Model for the Pulse-Echo Transducer Response of an Arbitrary Scatterer in a Fluid," *Research in Nondestructive Evaluation*, Vol. 5 (1993), pp. 111-122
 - 18) R. B. Thompson and T. A. Gray, "A Model Relating Ultrasonic Scattering Measurements Through Liquid-Solid Interfaces to Medium Scattering Amplitudes," *Journal of Acoustical Society of America*, Vol. 74 (1983), pp. 1279-1290
 - 19) L. W. Schmerr, S. J. Song and H. Zhang, "Model-Based Calibration of Ultrasonic System Response for Quantitative Measurements," in *Nondestructive Characterization of Materials VI*, Eds. R. E. Green, K. J. Kozaczek and C. O. Ruud, Plenum Press, NY, (1994), pp. 111-118

A Pulse-Echo Testing Model for Partially Damaged Ultrasonic Transducers

Sung-Jin Song

Department of Mechanical Design Engineering and
Factory Automation Research Center for Parts of Vehicles
Chosun University

Abstract In ultrasonic testing, flaw signal from which quantitative information on flaws is determined is influenced by 3 factors : (1) the incident wavefield produced by the transducer, (2) the scattered waves produced by flaws, and (3) the reception of the scattered waves back at the transducer. So even small changes in transducer performance due to aging or unexpected damages can produce the changes in the characteristics of flaw signal and finally the changes in the quantitative information on flaws. Thus a reliable calibration method of transducer performance is desired. Recently, theoretical models for ultrasonic testing have been employed as reference standards for the calibration of transducers which are considered as circular planar piston sources in the most of cases. But this simplification cannot be applied to partially damaged transducer which has lost their symmetry in performance, even not in appearance. Unfortunately there has been no reliable practical model which can be used for the calibration of partially damaged transducers. Here a pulse-echo testing model for partially damaged ultrasonic transducers was developed with experimental verification. The experimental responses agree very well with the theoretical prediction. So we expect that this model can be served as a theoretical reference standards for transducer calibration.

(Received : May 15, 1996)