

경계요소법을 이용한 결함의 초음파 산란장 해석

정현조[†] · 김진호^{*} · 박문철^{**}

(2002년 5월 13일 접수, 2002년 9월 4일 심사완료)

Application of a Boundary Element Method to the Analysis of Ultrasonic Scattering by Flaws

Hyunjo Jeong, Jin-Ho Kim and Moon-Cheol Park

Key Words: Ultrasonic Testing(초음파 검사), Scattering Analysis(산란장 해석), Boundary Element Method(경계요소법), Void(기공), Crack(균열), Flaw Classification(결함 분류)

Abstract

Numerical modeling of a nondestructive testing system plays an important role in many aspects of quantitative nondestructive evaluation (QNDE). The ultimate goal of a model is to predict test results for a specific flaw in a material. Thus, in ultrasonic testing, a system model should include the transducer, its radiation pattern, the beam reflection and propagation, and scattering from defects. In this paper attention is focused on the scattering model and the scattered fields by defects are observed by an elastodynamic boundary element method. Flaw types addressed are void-like and crack-like flaws. When transverse ultrasonic waves are obliquely incident on the flaw, the angular distribution of far-field scattered displacements are calculated and presented in the form of A-scan mode. The component signals obtained from each scattering problem are identified and their differences are addressed. The numerical results are also compared with those obtained by high frequency approximate solutions.

1. 서론

최근에 우주항공 및 원자력 산업분야에 사용되고 있는 기기의 건진성을 확보하기 위하여 재료 내부

의 결함 탐지와 결함 특성 평가에 대한 보다 신뢰성 있는 정량적 초음파 비파괴 평가(QNDE)의 필요성이 증가하고 있다. 결함의 특성 평가 과정에서 결함의 형태와 크기에 대한 정량적인 정보를 얻는 일은 대단히 중요하며 부품의 잔여 수명을 구하기 위한 파괴역학 해석(fracture mechanics analysis)을 가능하게 한다. 정량적 비파괴 평가 기술에는 일반적으로 정량적 측정 기술, 적절한 모델에 의한 계산 해석기법, 통계적 처리법, 결함의 탐상 및 특성에 관한 규격 등이 포함되어야 하며, 측정의 모든 과정을 완전하게 정량적으로 묘사할 수 있어야 한다.

[†] 책임저자, 회원, 원광대학교 기계·시스템디자인공학부

E-mail : hjjeong@wonkwang.ac.kr

TEL : (063)850-6690 FAX : (063)850-6691

^{*} 부산대학교 대학원 기계설계공학과

^{**} 원광대학교 대학원 기계공학과

컴퓨터의 빠른 발달과 함께 결함에 대한 초음파의 동탄성 산란 모델은 많은 관심을 받아오고 있는데, 이는 실제 초음파 비파괴 평가 시스템을 효율적으로 시뮬레이션 할 수 있게 해주며, 실험으로 측정된 산란 응답의 이해와 평가에 큰 도움을 주기 때문이다.

동탄성 산란 문제에 있어서 측정응답을 폐쇄형의 해석적 정해로 구하기는 거의 불가능하며, 여러 가지 근사해법과 수치해석기법이 사용되고 있다. 근사해법은 "ka" (k 는 파수, a 는 결함의 크기)의 범위에 따라 나눌 수 있으며 모두 산란장의 변위를 계산해 준다. 높은 ka(또는 고주파수) 영역에서 기하학적 회절이론(geometrical theory of diffraction, GTD)⁽¹⁾과 Kirchhoff 근사⁽²⁾가 있으며, 낮은 ka 영역에서는 Born 근사⁽³⁾ 등이 있다. 이들 방법들은 모두 폐쇄형의 원거리 음장 변위를 제공한다. 그러나 이 근사 해법들은 결함의 형태가 복잡하거나 입사파의 파장이 결함의 크기와 동등차수인 중간 ka 범위에서 제한이 있다. 이에 따른 이론적 해석의 한계와 실험해석의 복잡성을 극복하기 위해 유한요소법과 경계요소법과 같은 수치해석기법이 많이 사용되고 있다.

본 논문에서는 산란 문제를 해석하는데 있어서 몇 가지 장점을 갖는 동탄성 경계요소법을 이용하여 결함에 따른 초음파의 산란 응답을 구하고, 결함 특성에 따른 산란파의 차이를 고찰하였다. 등방성 매질 내의 결함을 체적형 결함과 균열형 결함으로 크게 나누고, 각각 원주형 기공과 스트립형 균열로 선정하였다. 탐촉자로부터 펄스형의 수직횡파가 결함에 대하여 45° 방향으로 입사할 때, 결함으로부터의 산란장을 주파수 영역의 경계요소법으로 구하고 역푸리에 변환을 이용하여 시간영역의 신호로 표시하였다. 탐촉자의 빔 폭이 결함의 크기보다 훨씬 큰 경우에 입사 횡파는 결함의 전 영역에 대하여 국부적인 평면파로 가정할 수 있다.

체적형 결함과 균열형 결함에 대해 측정위치와 시간경과에 따른 초음파의 전파 및 산란거동을 고찰하였으며, 결함크기와 사용된 초음파의 파장에 대한 영향을 고려하였다. 특히 높은 ka에 대해서는 동탄성 근사 이론^(4,5)과 비교하여 경계요소법에 의한 초음파 산란장 해석의 타당성을 검증하였다. 마지막으로 기공과 균열에 의한 산란파의 특성으로부터 이들 결함의 분류가능성을

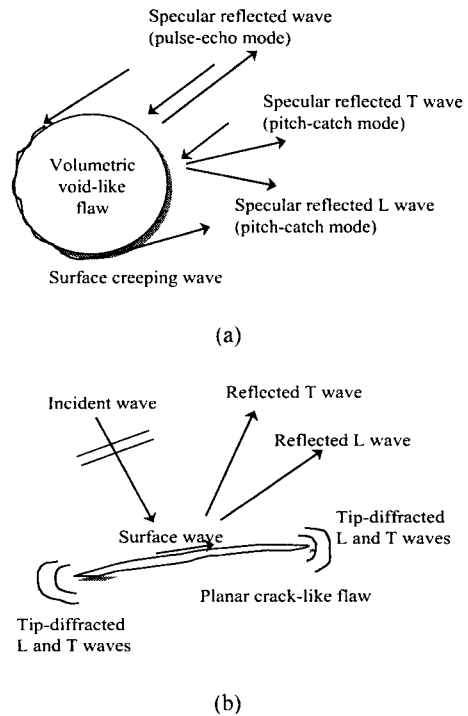


Fig. 1 Ultrasonic signals scattered from (a) a volumetric void-like flaw; (b) a planar crack-like flaw

제안하였다.

2. 결함신호 특성과 모델 설정

초음파가 특정한 결함에 입사할 때 결함과 상호작용에 의하여 일련의 연속된 산란파가 나타나며, 결함의 종류에 따라 서로 다른 특징이 나타날 수 있다. 부피를 갖는 기공형상의 결함과 부피를 무시할 수 있는 균열형상의 결함에 의한 산란파들을 Fig. 1에 나타내었다. 이 두 결함으로부터 산란되는 파들의 가장 큰 차이는 균열의 경우에 균열선단에서 회절된 파들이 기공의 경우에는 발생하지 않는다는 것이다.

Fig. 2와 같이 수직 횡파 T가 경사지게 입사하는 경우를 고려해보자. 매질내의 미지 결함이 기공과 같은 체적형 결함이라면 입사파가 처음 부딪치는 부위의 국부결함 형상은 고주파수 근사이

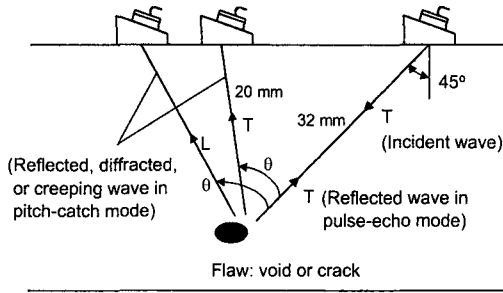


Fig. 2 Model problem for ultrasonic scattering analysis

론에 의하면 파면에 평행한 평면의 거울 반사체로 근사화될 수 있다. 따라서 $\theta=0^\circ$ 의 입사파 방향에서는 반사 T 파만 관찰될 것이다. 그러나 균열과 같이 선단을 갖는 결함의 경우에는 선단에서 회절된 L 파와 T 파가 도달 시간차이를 보이며 함께 관찰될 것이다. $\theta \neq 0^\circ$ 인 다른 방향에서는 두 결함의 경우 모두 L 파와 T 파가 함께 관찰될 것이다.

기공형 및 균열형 결함의 산란장 해석을 위한 모델은 다음과 같이 설정하였다. 2차원 결함으로 원주형 기공과 스트립형 균열을 다루었다. Fig. 2에서와 같이 45도로 경사지게 수직회파 T가 입사할 때 이들 결함으로부터 산란되는 파를 개구각 θ 의 함수로 구하였다.

3. 동탄성 경계요소법

동탄성문제에 있어서 경계요소법(BEM)의 시간조화 공식화는 산란문제를 다루는 데 있어서 몇 가지 특징을 가진다. 이러한 특징으로는 무한 매질에 대한 방사조건(radiation condition)의 만족, 문제 차원의 감소, 재사용 가능한 행렬, 결함에 의해 발생된 신호를 계산하는데 있어서 직접적인 방법, 계산시간의 절약 등을 들 수 있다. 특히 무한 매질에 대한 인공적인 경계 영역을 도입할 필요가 없다는 것이 큰 장점이다. BEM은 경계적분방정식(BIE)을 계산하기 위한 방법으로 폭넓게 응용되고 있다.⁽⁶⁾

3.1 경계적분방정식

경계적분방정식(boundary integral equation)은 Green의 상호일치(Green's reciprocal identity)를 탄성파동의 편미분방정식에 적용함으로써 유도될 수 있다.⁽⁶⁾ 이 원리는 시간조화 파동방정식에 대해 부피(영역) 적분을 표면(경계) 적분으로 바꾸어 준다. 차원에 있어서 이러한 감소는 유한요소법이나 유한차분법과 같은 영역형 방법에 비해 큰 장점을 지닌다.

본 논문에서 사용한 주파수 영역의 해법은 원하는 결과가 시간영역 파형이라면 푸리에 변환(Fourier transform)에 의해 많은 주파수 범위에서의 해를 필요로 하기 때문에 다소 간접적인 방법이라 여겨질 수 있다. 그럼에도 불구하고, 시간영역의 해법에 비해 더 간단하고 공식화가 수월하며, 지속시간이 긴 시간과형을 얻고자 할 때 계산 시간의 절약 등 많은 이점이 있다.

무한 매질 내의 결함에 의한 산란해석과 같은 내부 문제를 다룰 때, 전체 변위장 u 는 입사파에 의한 입사장 u^I 와 결함에 의한 산란장 u^S 의 합으로 나타낼 수 있다.

$$u = u^I + u^S \tag{1}$$

경계적분방정식은 복소수 변위 벡터 \vec{u} 와 트랙션 벡터 \vec{t} 와 그들의 변위, 표면력 기본해(무한 매질에서의 Green 함수) \vec{U} , \vec{T} 와 관계되어 다음과 같이 주어진다.⁽⁷⁾

$$\vec{c}(\vec{p})\vec{u}(\vec{q}) = \int_S [\kappa(\vec{q})\vec{U}(\vec{p}, \vec{q}) - \vec{u}(\vec{q})\vec{T}(\vec{p}, \vec{q})]dS(\vec{q}) + \vec{u}^I(\vec{p}) \tag{2}$$

여기서 q 는 결함경계 S 에 있어서의 점이며, 점 p 가 경계위치로 취해질 때 \vec{c} 는 점 p 에서의 표면형상에 의존하며, 경계가 평탄할 때 값은 1/2이다. 기본해 \vec{U} 와 \vec{T} 는 점 p 와 q 사이의 거리와 주파수와 관계있는 함수이다. 주파수 영역에서 2차원 동탄성문제의 변위와 트랙션의 기본해는 다음과 같이 텐서 형태로 표현된다.

$$U_{lk} = \frac{1}{2\pi\rho c_2^2} (\Psi\delta_{lk} - X_{r,l}r_{,k}) \quad (3)$$

$$T_{lk} = \frac{1}{2\pi} [(\frac{d\Psi}{dr} - \frac{X}{r})(\delta_{lk}\frac{\partial r}{\partial n} + r_{,k}n_l) - \frac{2X}{r}(n_kr_{,l} - 2r_{,l}r_{,k}\frac{\partial r}{\partial n}) - 2\frac{dX}{dr}r_{,l}r_{,k}\frac{\partial r}{\partial n} + (\frac{c_1^2}{c_2^2} - 2)(\frac{d\Psi}{dr} - \frac{dX}{dr} - \frac{X}{r})r_{,l}n_k] \quad (4)$$

$$\Psi = K_0(\frac{i\omega r}{c_2}) + \frac{c_2}{i\omega r} [(K_1(\frac{i\omega r}{c_2}) - \frac{c_2}{c_1}K_1(\frac{i\omega r}{c_1})] \quad (5)$$

$$X = K_2(\frac{i\omega r}{c_2}) - \frac{c_2^2}{c_1^2}K_2(\frac{i\omega r}{c_1}) \quad (6)$$

여기서 ρ , c_1 , c_2 는 각각 밀도, 종파속도, 횡파속도이며, r 은 두 점 p , q 사이의 거리, ω 는 각주파수를 나타낸다. K_0 , K_1 , K_2 는 각각 0 차, 1차, 2차 제 2종의 수정된 Bessel 함수이다.

δ_{lk} 는 Kronecker 델타, $r_{,l} = \partial r / \partial x_l$ 이다. 식 (2)는 주어진 경계조건과 입사장에 의해 결함표면에서의 진체장을 구하는 데 이용된다.

3.2 대수방정식

경계적분방정식은 결함표면을 N 개의 요소로 나누어 줌으로써 대수방정식으로 나타낼 수 있다. 여기서는 상수요소(constant element)를 사용하며, 이 경우에 변위와 트렉션은 상수가 되므로 적분기호 밖으로 나오게 되고 식 (2)는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\vec{c}u = \sum_{j=1}^N [\int_{S_j} \vec{U} dS] \vec{f} - \sum_{j=1}^N [\int_{S_j} \vec{T} dS] \vec{u} + \vec{u} \quad (7)$$

식 (7)에서 상수요소를 사용하면 기하학적 표면 형상과 변수는 각 요소에 대한 절점값으로 일정하게 된다. 적분은 4점-Gauss 적분을 이용하였으며, 이는 상수요소에 대해서 충분히 정확한 값을 준다. 재료성질 변화, 표면 법선 및 \vec{c} 값의 변화와 더불어 경계면의 변위와 트렉션은 식 (7)을 선

형대수방정식의 형태로 이끈다.

경계조건과 입사장을 고려하여 식 (7)을 재배열하면 다음과 같이 표현된다.

$$\vec{A} \vec{X} = \vec{F} \quad (8)$$

여기서 \vec{A} 는 기하학적 형상, 주파수, 재료 성질에 의존하는 계수행렬이며, \vec{X} 는 경계조건이 주어지면 구해질 변위와 트렉션의 절점값으로 구성된다. 우변의 \vec{F} 는 각 절점에서 입사장과 주어진 경계조건에 의한 절점 값을 포함하는 벡터이다. 이러한 형태는 결합의 검출 가능성을 높이기 위하여 가능한 한 많은 입사장과 결합의 방향에 대한 문제를 다룰 때 단지 \vec{F} 벡터만 고려하면 되므로 매우 편리하다.

3.3 경계요소 모델링

Fig. 2는 결합 검출을 위한 집축식 초음파 검사 의 한 예를 보여 준다. 결합에 대한 입사파는 탐촉자에서 발생된 종파가 매질의 경계면에서 모드 변환되어 45°의 굴절각을 갖는 수직 횡파로 가정한다. 또 결합의 크기가 탐촉자에 비하여 아주 작은 경우에 입사파는 탐촉자의 빔 특성을 고려할 필요 없이 폭이 무한대의 평면파로 가정할 수 있다. 본 논문에서는 결함으로부터의 산란장을 구하는 것이 목적이므로 Fig. 3과 같이 결함의 경계만을 요소로 나누었다.

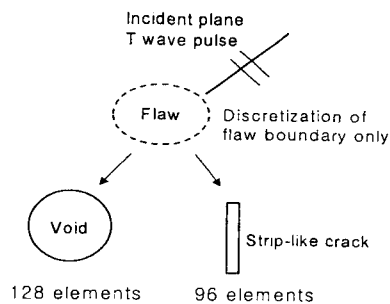


Fig. 3 Incident field model by plane wave and scattering model by boundary element

매질은 종파속도 $c_1 = 5900$ m/s, 횡파속도 $c_2 = 3200$ m/s, 프와송 비 $\nu = 0.29$ 인 등방성 매질을 선택하였다. 원주형 기공의 크기는 반지름 $a = 0.51$ mm, 스트립형 균열의 높이와 폭은 각각 $h = 0.51$ mm, $w = 0.51 \times 10^{-2}$ mm 이다.

2-D 경계요소법에서 사용한 요소의 개수는 원주형 기공에 대해 128개의 상수 요소, 스트립형 균열에 대해 96개의 상수 요소를 사용하였다. Fig. 2에서 탐촉자 표면으로부터 결합까지의 거리는 32 mm 이며, 탐촉자 빔의 중심이 결합의 중심을 통과한다고 가정하였다.

Fig. 2에서 탐촉자 표면으로부터 균일한 변위를 가진 모드 변환된 수직횡파가 발생, 입사한다고 가정한다. 펄스 형태의 입사파 변위를 다음과 같이 cosine 함수를 사용하거나낼 수 있으며, 이 때 f 는 탐촉자의 중심주파수이다. 여기서는 중심주파수 10 MHz의 펄스가 사용되었으며, 이 경우에 시간영역 신호와 그 주파수 스펙트럼은 Fig. 4와 같다.

$$V(t) = \begin{cases} (1 - \cos(2\pi ft/3)) \cos(2\pi ft), & 0 \leq t \leq 3.0/f \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (10)$$

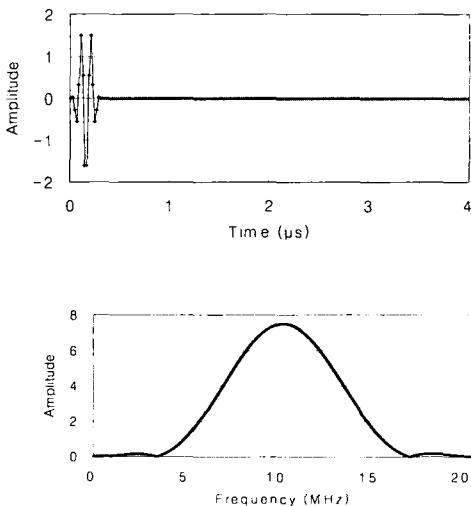


Fig. 4 Time domain waveforms of input signal and its frequency spectrum

한편 식 (8)에 의한 대수방정식의 해는 주어진 입사파에 대해 경계에서의 전체 변위와 트랙션 값을 제공하므로, 이를 이용하여 매질 내부의 임의 위치에서의 산란장을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\vec{u}^s = \vec{u} - \vec{u}^i \quad (10)$$

$$\vec{u}^s(\vec{p}_0, \omega) = \sum_{j=1}^N \left[\int_{S_j} \vec{U}(\vec{p}_0, \vec{q}, \omega) dS(\vec{q}) \right] \vec{t}(\vec{q}, \omega) - \sum_{j=1}^N \left[\int_{S_j} \vec{T}(\vec{p}_0, \vec{q}, \omega) dS(\vec{q}) \right] \vec{u}^i(\vec{q}, \omega) \quad (11)$$

여기서 p_0 는 매질내부의 임의 위치에서의 점이며, q 는 결합경계에서의 점이다. 매질내의 관찰점 p_0 는 Fig. 2의 입사파와 이루는 각 θ 에 대해 $0^\circ \sim 120^\circ$ 범위, 결합 중심으로부터 반경 20 mm 위치에서 관찰하였다. 구해진 주파수 영역의 해는 역푸리에 변환에 의해 시간영역으로 표시하였다.

4. 산란장 해석 결과

4.1 기공에 의한 산란

등방성 매질 내에 기공이 존재하는 경우에 초음파 산란에 대해 먼저 고려하였다. 원주형 기공의 반지름 $a = 0.51$ mm 이므로 이 경우에 횡파 파수 k_T 를 고려한 무차원수 $k_T a = 10$ 이 된다. Fig. 5는 원주형 기공에 대해 개구각 θ 의 함수로 구한 산란 종파 및 횡파의 시간 영역 신호를 보여준다.

관찰된 신호는 크게 3 가지로 구분할 수 있으며, 관찰점에 도달하는 시간을 계산하므로써 산란파의 특성을 확인할 수 있다. 결합으로부터 32 mm 떨어진 탐촉자로부터 T 파가 입사되고, 측정점의 위치는 결합으로부터 20 mm 이므로 산란된 종파와 횡파의 도달 시간은 다음과 같이 정확히 계산할 수 있다. 기공의 반지름을 무시하면, 종파의 도달시간은 $0.032/3200 + 0.02/5900 \approx 13 \mu s$, 횡파는 $(0.032 + 0.02)/3200 \approx 16 \mu s$ 가 된다. 즉, 약 $13 \mu s$ 에서 수신된 신호는 기공표면에서 모드

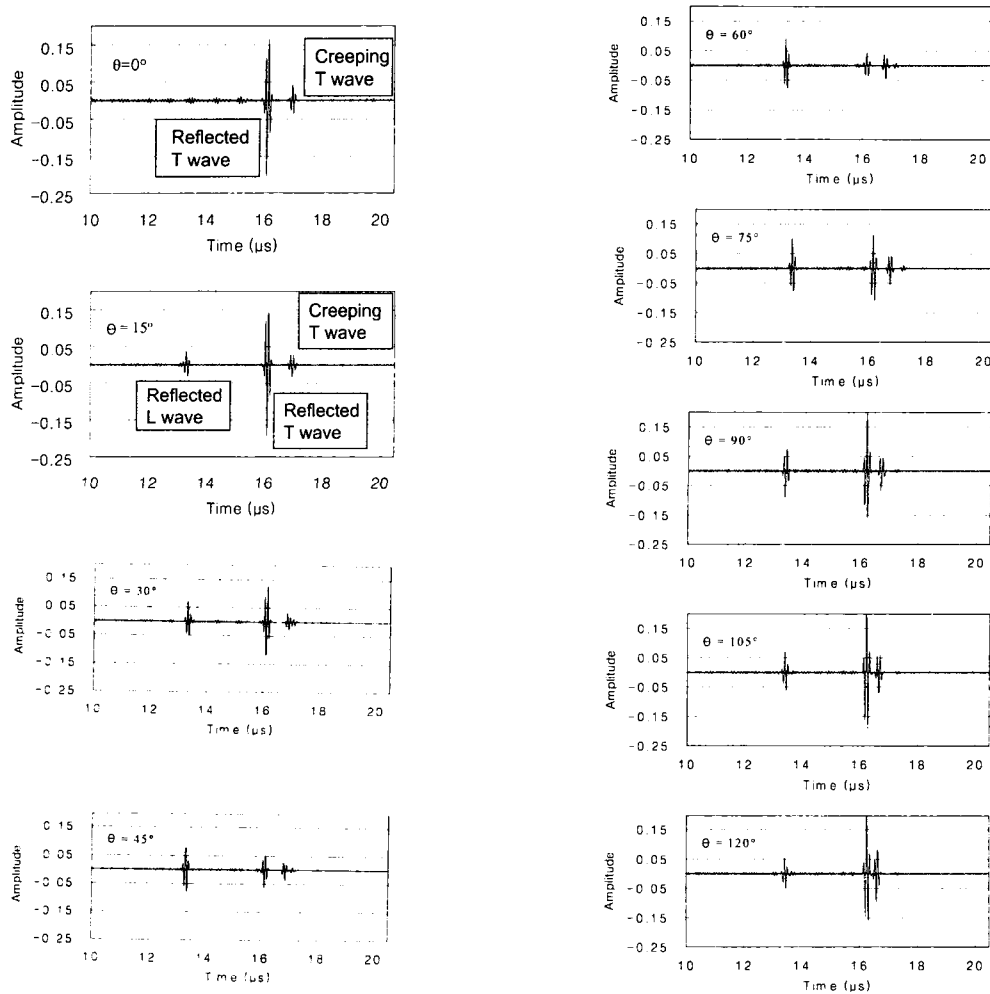


Fig. 5 Scattered signals from a circular void

변환되어 반사된 종파이며, 약 $16 \mu\text{s}$ 의 신호는 기공표면에서 반사된 횡파임을 알 수 있다. 횡파에 뒤이어 측정위치에 따라 도달시간이 조금씩 변화하며 나타나는 신호는 기공표면을 따라 전파하는 잠행성(creeping) 횡파임을 알 수 있다. 잠행성 종파는 크기가 상대적으로 미약하여 거의 관찰되지 않는다.

$\theta = 0^\circ$ 인 펄스-에코 모드(pulse-echo mode)에서는 전반사된 횡파만 존재하고, 모드 변환된 종파는 관찰되지 않는다. $\theta \neq 0^\circ$ 인 피치-캐치 모드(pitch-catch mode)에서는 θ 의 증가에 따라 모드 변환된 종파는 증가하였다가 다시감소한다. 이와 반대로 반사된 횡파는 감소하는 경향을 보

인다. θ 의 값이 큰 경우에 잠행성 파의 성분은 시간적으로 반사 횡파 신호에 가까워지며 크기에 있어서도 의미있는 값을 가지게 됨을 볼 수 있다. 이상과 같이 Fig. 1(a)에서 개념적으로 설명한 기공으로부터의 초음파 산란 현상을 산란 모델링을 통하여 보다 정확하게 구할 수 있음을 알 수 있다.

4.2 스트립형 균열에 의한 산란

스트립형상에 의한 불완전한 균열 선단 모델에도 불구하고 4가지의 구분되는 산란파의 응답을 관찰할 수 있다. Fig. 6은 스트립형 균열에 대해 개구각 θ 의 함수로 구한 산란 종파와 횡파의 시간 영역 신호를 보여준다. 측정위치에 따른 도

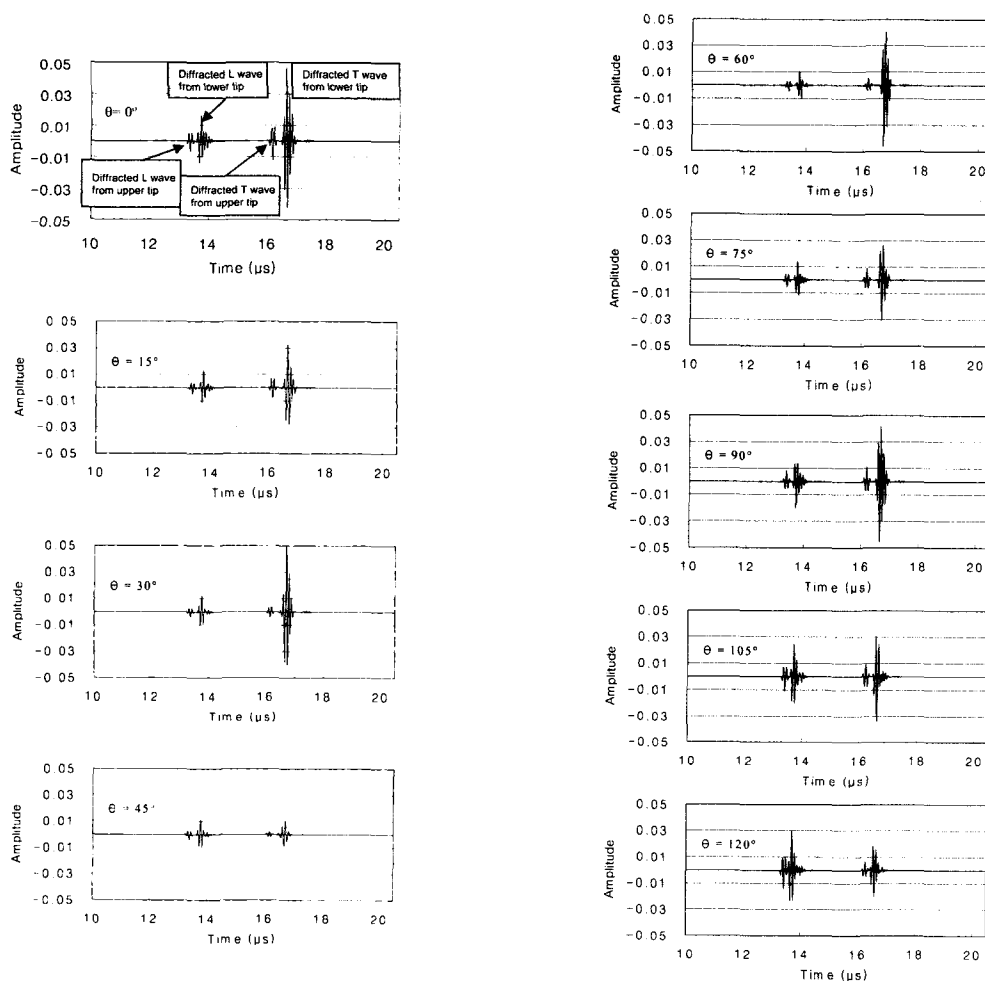


Fig. 6 Scattered signals from a strip-like crack

달시간을 고려할 때, 위 균열 선단으로부터 회절된 종파가 약 13 μs 에서 제일 먼저 관찰된다. 뒤이어 아래 균열선단에서 회절된 종파가 나타나며, 균열표면을 따라 진파한 표면파가 균열선단에서 매질 속으로 산란되면서 발생하는 종파가 시간적으로 거의 중첩되어 나타난다. 이는 아래 균열선단에서 산란된 파가 더 크게 보이는 주된 이유이다. 마찬가지로 횡파에 대해서도 위 균열 선단에 의해 회절된 횡파가 약 16 μs 에서 관찰되며, 뒤이어 아래 선단에서 회절된 횡파 및 표면파에 의해 발생하는 횡파가 중첩되어 관찰된다.

시간적으로 가장 먼저 도달하는 위 균열선단으로부터의 회절파를 주목하면, 회절된 종파의 크기는 개구각 θ 가 증가함에 따라 감소하였다

가 다시 증가한다. 이러한 경향을 기공에 의한 반사파와 비교할 때, 균열 선단으로부터의 회절파의 진폭은 미약하지만 기공의 경우와는 좋은 대조를 이룬다.

4.3 동탄성 근사이론과의 비교

경계요소법으로 구한 각 결함의 산란 해석 결과를 고주파수 영역에서 유효한 동탄성 근사이론 결과⁽⁵⁾와 비교하였다. 먼저 $\theta=0^\circ$ 에서의 산란 횡파 T 의 진폭에 대한 임의의 개구각 $\theta(\neq 0^\circ)$ 에서의 산란 종파 L 의 진폭비 $T_{\theta=0^\circ}/L_\theta$ 를 구하였다. 두 방법에 의해 구한 결과를 개구각 θ 의 함수로 Fig. 7에 비교하였다.

결함의 크기를 고려할 때 경계요소법은

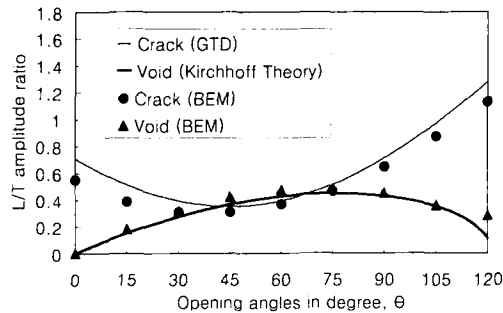


Fig. 7 Comparison of the L/T amplitude ratio between elastodynamic theories and boundary element analysis

$k_T a = 10$ 인 고주파수 영역으로 간주할 수 있다. 근사이론에서 2차원 원주형 기공과 반무한 균열이 사용되었으며, 각각 Kirchhoff 근사와 기하학적 회절이론(GTD)이 적용되었다.⁽⁵⁾ 10 MHz의 단일 주파수를 가진 무한한 평면 조화파의 수직 횡파가 입사하는 경우를 고려하였다.

스트립형 균열 설정으로 인하여 경계요소법에 의한 해석 결과는 $T_{\theta=0} / L_{\theta}$ 진폭비의 다소 작은 값을 제공하지만, 개구각 θ 의 전 범위에 걸쳐 GTD 이론과 전체적으로 유사한 경향을 보인다. 기공의 경우에는 θ 가 클 때 Kirchhoff 근사해는 다소 정확도가 감소함을 볼 수 있다. θ 가 작거나 큰 경우에 두 종류의 결함에 대한 $T_{\theta=0} / L_{\theta}$ 진폭비는 큰 차이를 보인다. 이는 이러한 각도에서 진폭비를 이용하여 기공 결함과 균열 결함을 분류할 수 있음을 시사한다. 이러한 현상은 체적형 결함의 반사파 특성과 균열형 결함의 회절파 특성이 다르기 때문에 나타나는 것이다.

5. 결론

정량적 초음파 비파괴 평가를 위한 시스템 모델링의 여러 가지 요소중 본 논문에서는 결함으로부터의 산란장 해석 모델을 다루었다. 결함으로부터의 산란해석을 위하여 동탄성 경계요소법을 정식화 하였으며, 원주형 기공과 스트립형 균열에 대한 산란장을 각각 계산하였다. 산란 해석 결과는 시간 영역에서의 파형으로 표시하였으며,

각 결함에 의해 산란되는 파의 구성요소를 식별하고 결함의 특성으로 인하여 발생하는 산란파의 특성에 대해 고찰하였다. 경계요소법에 의한 결함의 산란 해석 결과를 고주파수 근사 이론과 비교하였으며, 그 타당성을 확인하였다. 기공 결함과 균열형 결함의 산란특성의 차이로 인하여 개구각 θ 의 함수로 관찰한 반사파의 비 $T_{\theta=0} / L_{\theta}$ 도 서로 다른 거동을 보였다. 특히 θ 가 작거나 큰 경우에 이들 결함에 대한 진폭비는 큰 차이를 보이므로, 이러한 각도에서의 진폭비는 체적형 결함과 균열형 결함을 식별하는데 활용될 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 한국과학재단의 목적기초연구(과제번호: 2000-2-30400-013-3)지원으로 수행되었음.

참고문헌

- (1) Achenbach, J. D., Gantesen, A. K., and McMaken, H., 1982, "Ray Methods for Waves in Elastic Solids," Pitman Publishing, Boston.
- (2) Coffey, J. M., and Chapman, R. K., 1983, "Application of Elastic Scattering Theory for Smooth Flat Cracks to the Quantitative Prediction of Ultrasonic Defect Detection and Sizing," *Nuclear Energy*, Vol. 22, pp. 319~333.
- (3) Gubernatis, J. E, Domany, E., Krumhansl, J. A., and Huberman, M., 1977, "The Born Approximation in the Theory of the Scattering of Elastic Waves by Flaws," *Journal of Applied Physics*, Vol. 48, pp. 2812~2818.
- (4) Chiou, C. P., Schmerr, L. W., 1991, "Quasi pulse-echo Ultrasonic Technique For Flaw Classification," *Ultrasonics* Vol. 29, pp. 471~481.
- (5) Jeong, H. and Kim, J.-H., 2000, "Analysis of Scattered Fields Using High Frequency Approximations 2000," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Engineering*, Vol. 20, No. 2, pp. 102~109.
- (6) Dominguez, J., 1993, "Boundary Elements in Dynamics," Computational Mechanics Publications,

- Southampton, UK.
- (7) Schafbuch, P. J., Rizzo, F. J., Thompson, R. B., 1990, "Application of the Boundary Element Method to Elastic Wave Scattering by Irregular Defects," *Journal of Nondestructive Evaluation*, Vol. 9, pp. 113~127.