

SH 파의 균열 산란장 해석: 근사해와 엄밀해의 비교

SH Wave Scattering from Cracks: Comparisons of Approximate and Exact Solutions

정현조*[†], 박문철**, 송성진***, L. W. Schmerr, Jr.****

Hyunjo Jeong*[†], Moon-Cheol Park**, Sung-Jin Song*** and L. W. Schmerr, Jr.****

초 록 SH파의 균열 산란장 해석을 위하여 먼저 균열개구변위(COD)를 미지수로 하는 경계적분방정식(BIE)을 수립하였다. 폭 2a의 고립된 2차원 균열(slit)에 입사의 각도로 입사하는 시간조화 평면파에 대하여 COD를 주파수 ka의 함수로 구하였으며, 다른 연구 결과와 잘 일치함을 확인하였다. 초음파 비파괴평가에서 중요한 변수로 취급되는 원거리 산란음장을 두 가지 방법으로 구하였다. 펄스-에코 모드에서 Kirchhoff 근사법과 BIE-COD에 기초한 엄밀해의 결과를 입사각도와 주파수의 함수로 계산하고 서로 비교하였다. SH파가 균열면에 수직으로 입사/반사한 경우 산란음장은 최대가 되고, 두 방법은 정확히 일치하였다. 수직입사에서 멀어질수록 산란진폭은 모두 급격히 감소하며, Kirchhoff 근사법은 엄밀해와 차이를 보였다. 시간 영역의 원거리 산란진폭 거동을 구하기 위하여 대역폭을 갖는 중심주파수 10 MHz를 곱하고, 푸리에 역변환으로 시간영역 신호를 계산하였다. 경사 입사시에 시간영역의 진폭은 좌우 균열 선단에 의해 분리되며, 두 신호 사이의 시간 간격은 균열의 크기와 관련된다. 엄밀해와 비교할 때 Kirchhoff 근사법은 정확한 시간 간격을 제공하나, 동일한 크기의 균열 선단 신호를 제공하는 부정확함이 있다.

주요용어: SH 파, 경계적분방정식, 균열개구변위, 원거리 산란진폭, Kirchhoff 근사, 균열선단 거동

Abstract This paper describes a crack scattering model for SH wave based on the boundary integral equation (BIE) method, where the fundamental unknown is crack opening displacement (COD). When a time harmonic plane wave was incident on a 2-D isolated crack (slit) of width 2a, the COD distributions were numerically calculated as a function of ka. The calculated COD agreed well with results obtained with other methods. The far-field scattering amplitude, which completely characterizes the flaw response, was calculated in two ways. The Kirchhoff approximation and the BIE-COD exact formulation were compared in terms of incidence angle and frequency ka in a pulse-echo mode. Maximum response was obtained for both methods at the specular reflection direction. Away from the specular direction, the Kirchhoff approximation becomes less accurate. The time domain crack response was also calculated using a band-limited spectrum of center frequency 10 MHz. At oblique incidence to the crack both methods show the existence of an antisymmetric flash points occurring from the crack edge. The Kirchhoff approximation provides an exact time interval between flash points, although it unrealistically gives the same amplitude.

Keywords: SH wave, boundary integral equation (BIE), crack opening displacement (COD), far-field scattering amplitude, Kirchhoff approximation, crack edge response

1. 서 론

균열은 구조용 부재에서 발생할 수 있는 결함 중에서 가장 위험한 결함의 형태로 간주되고 있다. 따라서 초음파와 같은 비파괴평가 기법을 사용하여 균열의 초기 성장 단계에서 균열을 탐지하고 그 특성을 평가하기 위하여 많은 관심이 집중되고 있다. 그러나 균열의 정량적 평가를 위해서는 균열에 입사한 파의 산란 거동을 정확하게 이해하는 일이 필수적이다.

많은 연구자들이 균열에 대한 탄성파의 산란 해석을 수행하였다. Mal[1,2]은 적분방정식을 사용하여 2차원 평면균열과 3차원 동전모양의 균열에 대한 P와 SV파의 산란을 다루었으며, 이후에 표면연결 균열에 입사한 SH파의 산란[3]을 다루었다. Tan[4]은 평면 2차원 균열에 대하여 균열개구변위(COD)와 그 도함수가 미지수로 등장하는 경계적분방정식(BIE) 모델을 개발하였으며, 수치해법으로 이들 값을 구하였다. Achenbach 등[5,6]은 동탄성 파선 이론을 적용하여 홈(slit)과 동전모양의 균열에 대한 고주파수 회절을 고려하였다. Visscher[7]는 축대칭 균열에 의한 P와 SV 파의 산란 해석을 위하여 최소자승 경계오차법을 개발하였다. 보다 최근에 Liu와 Chang[8]은 경계적분과 유한요소법을 결합시켜 표면 균열에 대한 SH파의 산란해석을 수행하였다.

Schmerr[9]는 경계적분방정식에 기초한 새로운 균열산란 모델을 제안하였으며, 이 방법은 대부분의 초음파 시험이 이루어지는 주파수 영역에서 산란문제의 엄밀해법을 제공한다. 이전에 제안된 균열 모델들과는 달리 이 모델에서는 균열을 체적 0의 결함으로 취급하며, 균열개구변위(COD)를 미지수로 두었다.

초음파가 결함과 만날 때 발생하는 산란파는 결함의 특성에 대한 정보를 포함하며, 산란음장 계산을 위하여 많은 근사해법이 제안되었다. 산란음장 계산의 대표적인 근사법인 Kirchhoff 근사법은 고주파수 근사이론으로서 산란체의 표면을 밝은 부분과 어두운 부분으로 나누고 밝은 면의 각 점을 거울과 같이 반사하는 무한 평면 반사체로 가정하며, 어두운 면에서는 전체 음장을 0으로 가정한다. 이는 COD를 미지수로 두는 엄밀한 적분방정식의 최저 차수 해이다[10]. 이 근사법은 체적형 및 균열형 결함의 원거리 산란진폭 계산에 폭넓게 사용되

고 있으며, 결함의 크기(flaw sizing)를 구하는데도 이용되고 있다[11].

본 논문에서는 2차원 균열에 대한 수평전단(SH) 파의 산란장 계산을 위하여 COD를 미지수로 두는 경계적분방정식을 유도하고 COD를 주파수의 함수로 구한다. 원거리 산란진폭을 구하기 위하여 Kirchhoff 근사법과 COD-BIE에 기초한 엄밀해법을 제시하고, 그 결과를 입사각과 주파수의 함수로 구하고 서로 비교한다. 마지막으로 시간 영역에서의 균열 신호를 관찰하고 Kirchhoff 근사법의 정확도를 살펴 본다.

2. 산란문제의 정식화

2.1. 경계적분방정식

Fig. 1과 같이 a, b에 선단이 위치한 고립된 균열(isolated crack)에 평면 SH 파가 경사지게 입사하는 경우를 고려한다. 균열을 하나의 선으로 가정하여 이를 따라 균열개구변위 Δw 를 허용하고, 입사파의 작용하에 균열면에 응력이 작용하지 않는다고 가정하면 균열로부터 산란된 파는 적분형태로 다음과 같이 표현할 수 있다 [9].

$$w^s(\mathbf{P}) = \int_a^b \frac{\partial G(\mathbf{P}, \mathbf{Q})}{\partial n'} \Delta w(\mathbf{Q}) dS_Q \quad (1)$$

여기서 w^s 는 산란파의 변위, G는 식 (2)로 주어지는 2차원 기본 해이며

$$G(\mathbf{P}, \mathbf{Q}) = \frac{i}{4} H_0^{(1)}[k|\mathbf{P}-\mathbf{Q}|] \quad (2)$$

k는 파수, H_0 는 Hankel 함수, \mathbf{P} 와 \mathbf{Q} 는 각각 균열 외부 매질과 균열면상의 점이며, 벡터 \mathbf{n}' 은 점 \mathbf{Q} 의 균열에 대한 단위 법선 벡터이다.

식 (1)로부터 점 P에서 법선 벡터 n의 평면에 작용하는 산란파의 응력을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\mu \frac{\partial w^s(\mathbf{P})}{\partial n} = \mu \int_a^b \frac{\partial^2 G(\mathbf{P}, \mathbf{Q})}{\partial n \partial n'} \Delta w(\mathbf{Q}) dS_Q \quad (3)$$

여기서 μ 는 전단탄성계수이다. 균열개구변위 Δw 에 대한 적분방정식을 얻기 위하여 점 P가 균열경계에 접근할 때 식 (3)의 극한을 취하고, 균열면에

서의 응력자유 조건을 이용하면, 즉

$$\mu \frac{\partial w^s}{\partial n} = -\mu \frac{\partial w^{inc}}{\partial n} \quad (4)$$

다음 식을 얻을 수 있다.

$$-\frac{\partial w^{inc}(\mathbf{P})}{\partial n} = \int_a^b \frac{\partial^2 G(\mathbf{P}, \mathbf{Q})}{\partial n \partial n'} \Delta w(\mathbf{Q}) dS_Q \quad (5)$$

위 식에서 w^{inc} 는 입사파의 변위로서 알고 있는 값이며, 점 \mathbf{P} , \mathbf{Q} 는 모두 경계에 위치한다. 그러나 이 방법은 $\partial^2 G / \partial n \partial n'$ 가 점 \mathbf{P} 가 \mathbf{Q} 근처에서 강한 특이점이 되어 적분이 발산하므로 적용할 수 없다. 점 \mathbf{P} 가 경계에 있지 않을 때 다음과 같은 수렴형의 식을 구할 수 있다[9].

$$\int_a^b \frac{\partial^2 G(\mathbf{P}, \mathbf{Q})}{\partial n \partial n'} dS_Q = \hat{\mathbf{z}} \cdot [\mathbf{n} \times \nabla G(\mathbf{P}, \mathbf{Q})] \Big|_a^b + k^2 \int_a^b \mathbf{n} \cdot \mathbf{n}' G(\mathbf{P}, \mathbf{Q}) dS_Q \quad (6)$$

여기서 $\hat{\mathbf{z}}$ 는 z축 방향의 단위벡터이다. 위 식은 식 (6)의 좌변에서 G를 x, y 도함수로 전개하고 G가 Helmholtz 식을 만족함을 이용하면 얻을 수 있다. 이제 식 (6)에 $\Delta w(\mathbf{P})$ 를 곱하고 이를 식 (3)에서 뺀다. 이 결과 식에서 점 P가 경계에 접근할 때의 극한을 취하면 다음 식이 구해지며

$$-\frac{\partial w^{inc}(\mathbf{P})}{\partial n} = \int_a^b \frac{\partial^2 G}{\partial n \partial n'} [\Delta w(\mathbf{Q}) - \Delta w(\mathbf{P})] dS_Q + \Delta w(\mathbf{P}) \left\{ \hat{\mathbf{z}} \cdot [\mathbf{n} \times \nabla G] \Big|_a^b + k^2 \int_a^b \mathbf{n} \cdot \mathbf{n}' G dS_Q \right\} \quad (7)$$

이제 모든 항은 수렴한다.

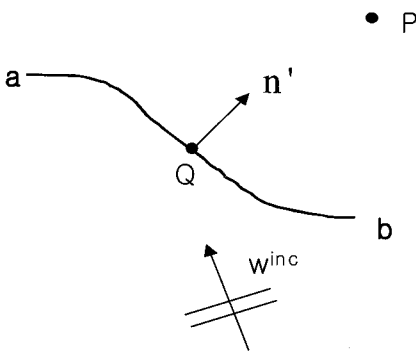


Fig. 1 Crack scattering geometry

2.2. 균열개구변위

Fig. 2와 같이 x축을 따라 놓인 폭 2a의 고립형 균열(isolated slit)을 고려하자. 이 균열 형상에 대하여 균열면을 n개의 요소로 나누고 각 요소에서 균열개구변위 Δw 가 일정하다고 가정하면 식 (7)을 더욱 간단하게 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$-\frac{\partial w^{inc}(x, 0)}{\partial y} = \sum_{i=1}^n \Delta w_i \left\{ \frac{\partial G(k|x-x'|)}{\partial x'} \Big|_{x'=x_i}^{x'=x_{i+1}} + k^2 \int_{x_i}^{x_{i+1}} G(k|x-x'|) dx' \right\} \quad (8)$$

여기서 Δw_i 은 i 번째 요소 (x_i, x_{i+1})의 도심 \hat{x}_i 의 균열개구변위이다. Fig. 2에서와 같이 x축에 대하여 각도로 입사한 시간조화 평면파 $w^{inc} = w^L = e^{ikxe}$ 에 대하여

$$\frac{\partial w^{inc}(x, 0)}{\partial y} = ik \sin \theta e^{ikx \cos \theta} \quad (9)$$

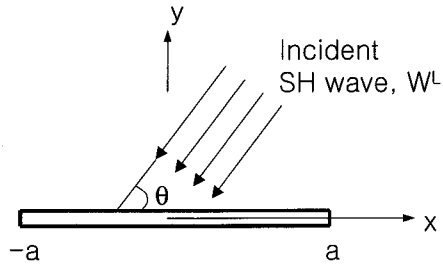


Fig. 2 Plane SH waves incident on an isolated crack

위 식을 식 (8)에 대입하고 각 요소의 도심에서 식을 만족시키면 n개의 미지수 Δw_i 에 대한 다음의 연립방정식을 얻는다.

$$\sum_{i=1}^n A_{mi} \Delta w_i = f_m \quad (m = 1, 2, \dots, n) \quad (10)$$

여기서

$$A_{mi} = k H_1^{(1)}(k|\hat{x}_m - x_{i+1}|) \text{sgn}(\hat{x}_m - x_{i+1}) - k H_1^{(1)}(k|\hat{x}_m - x_i|) \text{sgn}(\hat{x}_m - x_i) + k^2 \int_{x_i}^{x_{i+1}} H_0^{(1)}(k|\hat{x}_m - x|) dx \quad (11)$$

$$\text{sgn}(\xi) = +1, \quad \xi > 0$$

$$-1, \quad \xi < 0$$

$$f_m = -4k \sin \theta e^{ikx_m \cos \theta}$$

$m \neq i$ 의 경우 A_{mi} 에 대한 적분 식은 Simpson 법칙과 같은 적분 공식을 이용하여 구할 수 있으며, $m = i$ 의 경우 앞의 적분은 Struve 함수가 되므로 수치 해법으로 정확하게 구할 수 있다.

입사각이 90° , 45° 로 평면파가 균열에 입사한 경우 식 (11)의 결과를 Fig. 3, 4에 도시하였다. 여러 가지의 무차원 주파수 ka 의 함수로 구하였고, 모든 경우에 균열길이 $2a$ 는 50개의 균일한 요소로 나누었다. COD는 정적($ka=0$) COD Δw_{st} 로 나누어서 정규화시켰으며, 고립 균열의 경우 Δw_{st} 는 다음 식으로 주어진다($t_0 =$ 입사파의 응력진폭).

$$\Delta w_{st} = \frac{4t_0}{\mu} \sin \theta \tag{12}$$

이 결과로부터 최저 ka 값에서 COD 분포는 정적 COD 곡선과 유사하며, 높은 주파수에서는 균열면에 대하여 진동하는 모습을 보인다. 이들 결과는 Mal[1,3]의 결과와 아주 잘 일치한다. $\theta = 90^\circ$ 의 경우 입사파와 반사파는 합쳐져서 균열면에 수직으로 입사하는 하나의 파로 된다. 따라서 이 경우의 결과는 고립된 균열에 대한 Mal[1]의 결과와 직접 비교될 수 있다.

3. 원거리 산란진폭

균열면의 COD 분포를 계산하였으므로 이제 식 (1), (3)을 이용하여 균열 주변 매질에서 산란 변위 또는 응력을 구할 수 있으므로 산란 문제를 완전하게 풀 수 있다. 특히 초음파 비파괴평가에서 중요한 원거리 산란진폭(far-field scattering amplitude)을 직접 구할 수 있다. 여기서는 Kirchhoff 근사법과 BIE-COD에 기초한 엄밀해의 두 가지 방법으로 원거리 산란진폭을 구한다.

3.1. 원거리 산란음장 - Kirchhoff 근사해

원거리 산란음장은 입사파의 방향 (e_i) 과 산란파 (e_s)의 방향에 의존하며, 여기서는 Fig. 5와 같이

펄스-에코 ($e_s = -e_i$)의 경우를 고려한다. Fig. 5에서 Q는 source point, P는 field point를 나타낸다.

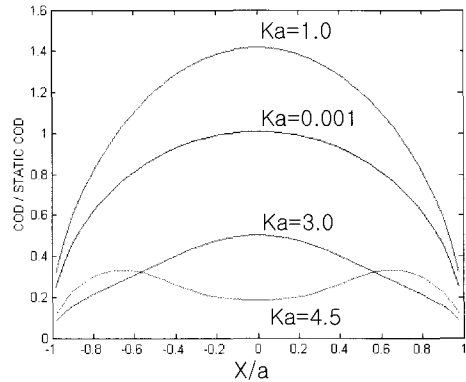


Fig. 3 Crack opening displacement for isolated crack at $\theta = 90^\circ$

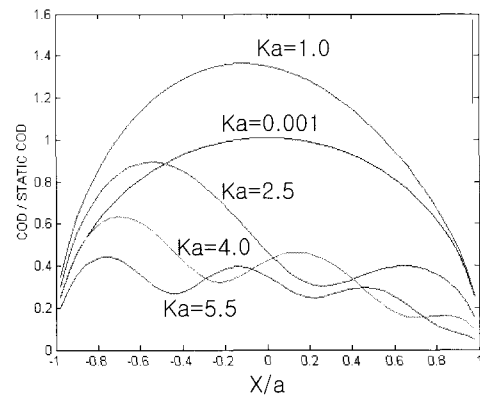


Fig. 4 Crack opening displacement for isolated crack at $\theta = 45^\circ$

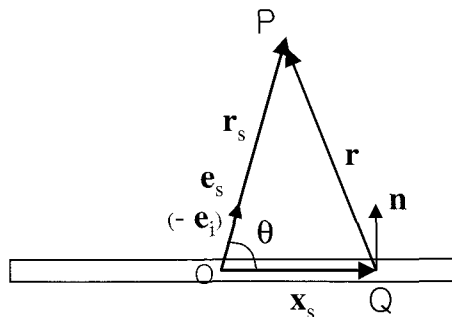


Fig. 5 Scattering geometry for defining the far-field scattering amplitude of a cracklike flaw

주어진 원점 O로부터 P까지의 거리가 O로부터 Q까지의 거리보다 아주 큰 ($r_s \gg x_s$) 원거리 산란의 경우, 기본 해 G의 진폭에서 r에 대하여 첫째 항을, 위상에 대해서는 처음 2항을 취하면 G와 그 도함수 $\partial G/\partial n$ 는 근사적으로 다음과 같이 주어진다.

$$G = \frac{i}{4} H_0^{(1)}(kr) \approx i \sqrt{\frac{1}{8\pi k r_s}} e^{ik(r_s - x_s, \mathbf{e}_s)} \quad (13)$$

$$\frac{\partial G}{\partial n(\mathbf{x}_s)} \approx i \sqrt{\frac{1}{8\pi k r_s}} [-ik(\mathbf{e}_s \cdot \mathbf{n}(\mathbf{x}_s))] e^{ik(r_s - x_s, \mathbf{e}_s)} \quad (14)$$

결합 주위 매질의 파수를 k, 결합의 characteristic dimension을 a (Fig. 2 참조)라고 할 때, 고주파수 ($ka \gg 1$)에서 Kirchhoff 근사는 입사파가 직접 부딪치는 결합의 밝은 면의 어떤 점 \mathbf{x}_s 에서 반사되는 변위 또는 응력은 \mathbf{x}_s 위치에서의 표면의 법선벡터를 갖는 무한대의 평면 반사와 같다고 가정한다. 입사파가 도달하지 않는 어두운 면에서의 산란파는 모두 0으로 가정한다.

단위 진폭을 갖는 평면파($w^{inc} = e^{ik\mathbf{e}_s \cdot \mathbf{x}}$)의 입사를 고려하면

$$\Delta w = w^{inc} + w^{refl} = 2e^{ik\mathbf{e}_s \cdot \mathbf{x}} \quad (15)$$

식 (14), (15)를 식 (1)에 대입하면, 균열길이 2a의 경우에 Kirchhoff 근사에 의한 펄스-에코 모드에서의 원거리 산란 음장 A_{SC}^{Kirch} 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} w^s(\mathbf{P}) &= \int_a^b \frac{\partial G(\mathbf{P}, \mathbf{Q})}{\partial n_Q} \Delta w(\mathbf{Q}) dS_Q \\ &= A_{SC}^{Kirch} \frac{e^{ikr_s}}{\sqrt{r_s}} \end{aligned}$$

여기서

$$\begin{aligned} A_{SC}^{Kirch} &= \frac{i}{\sqrt{2\pi k}} \int_{-a}^a e^{-ikx_s \cdot \mathbf{e}_s} [-ik\mathbf{e}_s \cdot \mathbf{n}] e^{ik\mathbf{e}_s \cdot \mathbf{x}_s} dx \\ &= \frac{\sin \theta}{\sqrt{2\pi k}} \frac{\sin(2ka \cos \theta)}{\cos \theta} \end{aligned}$$

3.2. 원거리 산란음장 - 엄밀해

3.1 에서와 같이 원거리에 대한 $\partial G/\partial n$ 의 근사식 (14)를 식 (1)에 사용하고, 2장에서 경계적분방정식으로 구한 엄밀한 Δw 값을 사용하면 이 경우에 원거리 산란음장은 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} w^s(\mathbf{P}) &= \int_a^b \frac{\partial G(\mathbf{P}, \mathbf{Q})}{\partial n_Q} \Delta w(\mathbf{Q}) dS_Q \\ &= A_{SC}^{Exact} \frac{e^{ikr_s}}{\sqrt{r_s}} \end{aligned}$$

여기서

$$\begin{aligned} A_{SC}^{Exact} &= \frac{k}{\sqrt{8\pi k}} \int_{-a}^a e^{-ikx_s \cdot \mathbf{e}_s} [\mathbf{e}_s \cdot \mathbf{n}] \Delta w dx \\ &= \frac{k \sin \theta}{\sqrt{8\pi k}} \sum_{i=1}^n \Delta w_i e^{-ikx_i \cos \theta} (x_{i+1} - x_i) \end{aligned}$$

Fig. 6은 균열폭 2a, $ka=10$ 의 경우에 Kirchhoff 근사와 엄밀해법으로 구한 원거리 산란진폭 계산결과를 입사각의 함수로 보여 준다. Specular reflection(거울면 반사)에서는 두 가지 결과가 완전하게 일치한다. 이 각도에서 벗어나면 진폭이 모두 급격히 감소한다. 따라서 균열의 탐지를 위해서는 입사각이 균열면에 대하여 수직이 되도록 해야 한다. 그러나 균열의 크기를 산정하기 위해서는 균열면에 대하여 (아래 5절 참조) 경사지게 입사시키는 것이 필요하다. Kirchhoff 근사는 거울면 입사각에서는 엄밀해와 완전히 일치하나 이 각도에서 멀어질수록 엄밀해와 차이가 커진다.

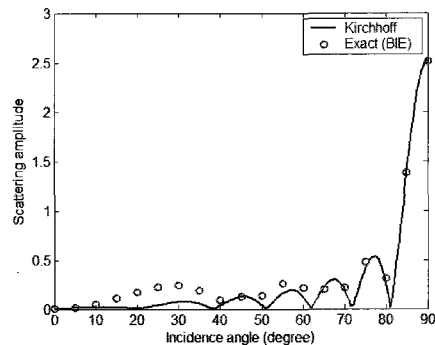


Fig. 6 Dependence of far-field scattering amplitude on incidence angle θ when $ka=10$

Fig. 7은 균열면에 수직으로 평면파가 입사한 경우 원거리 산란진폭을 주파수 'ka'의 함수로 보여준다. Kirchhoff 근사 결과는 주파수가 증가함에 따라 산란진폭도 비례하여 증가한다. 엄밀해의 결과는 Kirchhoff 근사 결과를 중심으로 oscillation 하는 모습을 보이며 주파수가 증가함에 따라 oscillation 이 감소하며, 아주 높은 주파수에서는 고주파수 근사인 Kchhoff 근사법에 접근하게 된다.

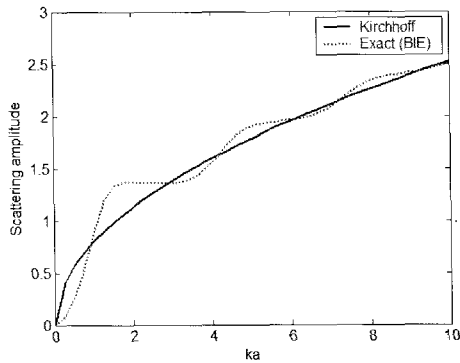


Fig. 7 Dependence of far-field scattering amplitude on frequency ka at normal incidence

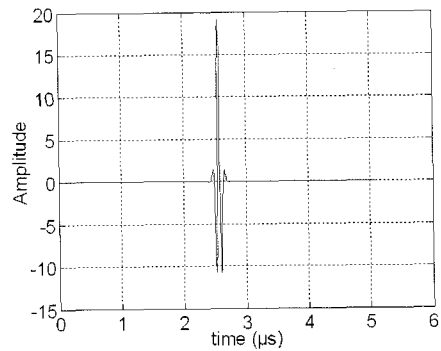
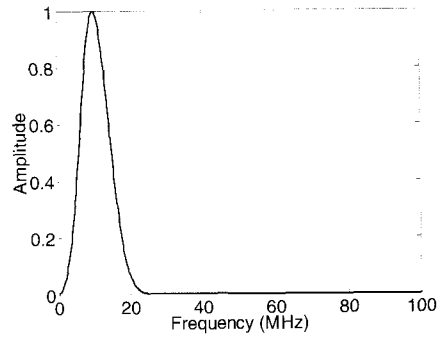


Fig. 8 A band-limited spectrum of 10 MHz center frequency and its time domain signal

4. 시간영역에서의 균열신호

원거리 산란 진폭은 결함에 대한 모든 정보를 지니고 있으므로 초음파 탐상 시스템의 다른 요소를 고려하지 않아도 결함의 초음파 신호 특성을 관찰할 수 있다. 실제 초음파 시험에서는 시간 영역의 펄스 신호가 사용되므로, 임의의 대역폭을 갖는 스펙트럼을 가정하고 이를 주파수 영역의 원거리 산란진폭에 곱한 다음 역푸리에 변환을 통하여 시간영역에서의 균열 신호를 얻는다. 여기서는 중심주파수 10 MHz의 스펙트럼이 사용되었으며, Fig. 8에 스펙트럼 모양과 시간영역 신호가 나와 있다.

Fig. 9-11은 입사각 θ 가 각각 90° , 60° , 40° 의 경우에 Kirchhoff 근사법과 엄밀해법으로 구한 균열의 시간영역 신호를 보여준다. 수직입사($\theta = 90^\circ$)를 제외한 모든 경사입사에서 시간영역 신호는 균열의 오른쪽과 왼쪽 가장자리(flash points)에서의 회절에 의하여 분리된다. 이들 신호는 서로 비대칭이며, 두 신호 사이의 간격은 균열의 길이와 관계된다. 입사각도가 증가할수록 두 신호 사이의 시간 간격이 멀어지고, 진폭은 감소한다. 엄밀해의 결과와 비교할

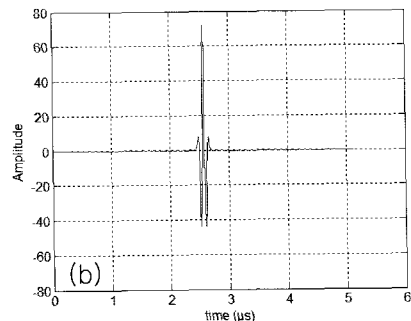
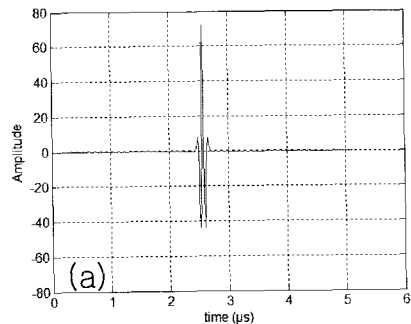


Fig. 9 Time domain crack response at $\theta=90^\circ$: (a) Kirchhoff approximation, (b) exact method

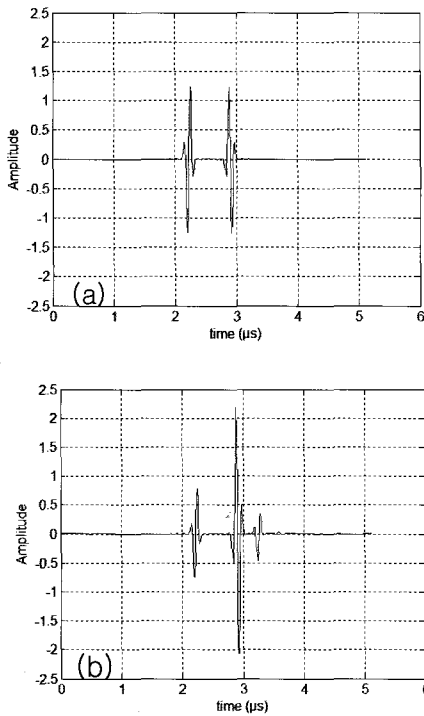


Fig. 10 Time domain crack response at $\theta = 60^\circ$: (a) Kirchhoff approximation, (b) exact method

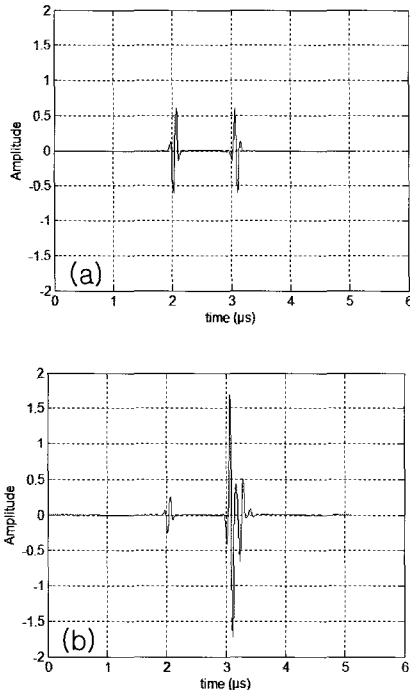


Fig. 11 Time domain crack response at $\theta = 40^\circ$: (a) Kirchhoff approximation, (b) exact method

때 Kirchhoff 근사법은 flash points의 시간 간격을 정확하게 계산하나, 동일한 크기의 신호를 제공하므로 부정확하다. 입사각 $\theta = 30^\circ - 90^\circ$ ($\beta = \theta + 90^\circ$) 범위에서 구한 시간 영역 신호의 진폭 크기 (peak-to-peak amplitude)를 Fig. 12에 보인다. 수직 입사에서 멀어질수록 kirchhoff 근사법의 정확도가 떨어진다.

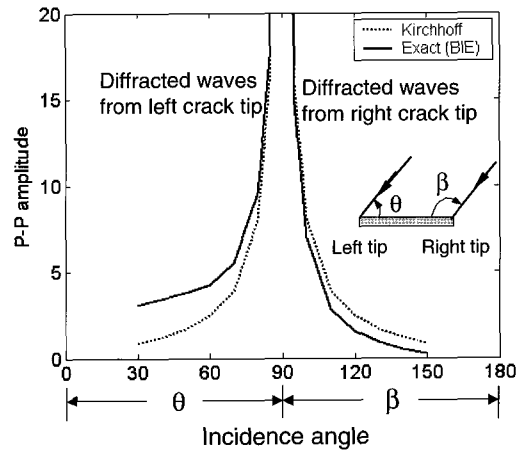


Fig. 12 Comparisons of time domain peak-to-peak far-field scattering amplitude

5. 결론

본 논문에서는 SH파에 의한 평면 균열의 산란장 해석을 다루었으며, 결함의 특성을 포함하고 있는 원거리 산란진폭을 두 가지 방법으로 구하였다. 펄스-에코 모드에서 Kirchhoff 근사법과 BIE-COD에 기초한 엄밀해의 결과를 입사각도의 함수로 계산하고 비교하였다. SH파가 균열면에 수직으로 입사한 경우 산란장은 최대가 되고, 두 방법은 정확히 일치한다. 수직입사에서 멀어질수록 산란진폭은 모두 급격히 감소하며, Kirchhoff 근사법은 엄밀해와 차이를 보였다. 시간 영역에서의 산란진폭은 경사 입사시에 균열 선단에 의해 분리된다. 엄밀해와 비교할 때 Kirchhoff 근사법은 정확한 시간 간격을 제공하나, 좌우 균열 선단으로부터 같은 크기의 신호를 제공하는 부정확함이 있다. 실제 초음파 탐상에서 균열 탐지를 위하여 균열면에 수직인 방향의 신호를 이용하여 가능한 최대 탐상 신호를 얻는 것임에 근거하고 있다. 또한 경사 입사를 이용하면

균열 선단 신호의 시간 차이로부터 균열 크기를 계산할 수 있다. 이러한 측면에서 Kirchhoff 근사법이 초음파 탐상 시험 모델링에 사용될 때 그 타당성이 있다고 볼 수 있다[12].

후 기

이 논문은 2002년도 한국학술진흥재단의 대학교수 해외방문연구 지원사업에 의해 수행됨.

참고문헌

- [1] A. K. Mal, "Interaction of elastic waves with a Griffith crack," *Int. J. Eng. Sci.*, Vol. 8, No. 8, pp. 763-776, (1970)
- [2] A. K. Mal, "Interaction of elastic waves with a penny-shaped crack," *Int. J. Eng. Sci.*, Vol. 8, No. 5, pp. 381-388, (1970)
- [3] S. F. Stone, M. L. Ghosh and A. K. Mal, "Diffraction of antiplane shear waves by an edge crack," *J. Appl. Mech.*, Vol. 47, No. 2, pp. 359-362, (1980)
- [4] T. H. Tan, "Scattering of plane elastic waves by a plane crack of finite width," *Appl. Sci. Res.*, Vol. 33, No. 1, pp 75-88, (1977)
- [5] J. D. Achenbach, A. K. Gantesen and H. McMaken, "In: Acoustic, electromagnetic and elastic wave scattering," V. K. Varadan and V. V. Varadan, Eds, Pergamon Press, NY, p. 355, (1980)
- [6] J. D. Achenbach, A. K. Gantesen and H. McMaken, "In: Modern problems in elastic wave propagation," J. Miklowitz and J. D. Achenbach, Eds, John Wiley, NY, p. 219, (1978)
- [7] W. M. Visscher, "Scattering of elastic waves from planar cracks in isotropic media," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 69, No. 1, pp. 50-53, (1981)
- [8] S.-W. Liu and C.-S. Chang, "Transient scattering of SH waves by surface breaking and sub-surface cracks," *Int. J. Solids Struct.*, Vol. 34, No. 30, pp. 4019-4035, (1997)
- [9] L. W. Schmerr, "A new boundary integral equation model for the scattering of elastic waves by cracks," In *Elastic wave scattering and propagation*, V. K. Varadan and V. V. Varadan, Eds, Ann Arbor Science, MI, pp. 21-31, (1982)
- [10] J. D. Achenbach, A. K. Gantesen and H. McMaken, "Ray methods for waves in elastic solids," Pitman Books, London, UK, (1982)
- [11] L. W. Schmerr, "Fundamentals of ultrasonic nondestructive evaluation: A modeling approach," Plenum Press, NY, (1998)
- [12] 정현조 외, 초음파 탐상 검사용 컴퓨터 시뮬레이터 개발, 한국과학재단 특정기초연구 최종보고서, (2003)