

재료내 기공결함에 의한 SH형 초음파 원거리 산란장의 신호특성에 대한 수치해석

이준현* · 이서일** · 박윤원***

(1999년 3월 2일 접수)

Numerical Analysis on the Signal Characteristics for Scattered Far-field of Ultrasonic SH-Wave by the Internal Cavity

Joon-Hyun Lee, Seo-Il Lee and Yoon-Won Park

Key Words: Nondestructive Evaluation(비파괴평가), SH-Wave(수평횡파), Cavity(기공결함), Elastodynamic Boundary Element Method(동탄성경계요소법), Inverse Fast Fourier Transform(고속역푸리에변환), Reflection Factor(반사계수).

Abstract

In this study, the scattered far-field due to a cavity embedded in infinite media subjected to the incident SH-wave was calculated by the boundary element method. The effects of cavity shape and distance between internal cavity and internal point in infinite media were considered. The scattered far-field of the frequency domain was transformed into the signal of the time domain by using the Inverse Fast Fourier Transform(IFFT). It was found that the amplitude of scattered signal in time domain decreased with the increase of the distance between the detecting points of ultrasonic scattered field and the center of internal cavity in media. In addition, the time delay was clearly found in time domain waveform as the distance between the detecting points of ultrasonic scattered field and the center of internal cavity was gradually increased.

1. 서론

고체내의 탄성파를 이용하는 비파괴 평가기법은 결함 탐지를 위하여 널리 사용되고 있는 방법으로 최근 국내에서도 결함평가를 위한 비파괴 평가기술과 관련된 다수의 연구결과가 보고되고 있다.⁽¹⁻³⁾ 한편, 초음파를 이용한 비파괴 평가기술로 재료내부의 결함을 규명하기 위해서는 먼저 결함의 초음파 산란특성을 파악해야 한다. 초음파의 산란특성을 규명하는데 가장 정확한 방법은 물론 해석해(analytical solution)를 이용하는 것이지만 해석해는 매우 이상적인 경우에만 존재하므

로 수치해석을 이용하는 다양한 방법이 시도되어 왔다. 본 연구에서는 무한체내에 존재하는 원형 및 타원형 기공결함에 대한 산란신호 특성의 기본적인 이해 및 산란특성 해석을 위한 수치해석으로, 무한체내에서 해석이 용이한 동탄성경계요소법(Elastodynamic Boundary Element Method)⁽⁴⁾을 사용하였다. 경계요소법을 이용하여 Hirose 등⁽⁵⁾은 종파가 재료내부에 입사하는 경우 재료내부 균열에 의한 탄성파 산란문제를 해석하였고, Achenbach 등^(6,7)은 단일 균열면의 일부가 접촉되었을 경우 두 개의 균열이 인접해 있는 것으로 가정하여 다중 균열에 의한 산란특성을 해석하였으며 또한, 균열면에 인접하여 미소기공이 존재할 때의 탄성파 산란특성을 해석하였다. 그리고 최근 Mellings 등⁽⁸⁾은 내부결함의 위치 및 크기를 결정할 수 있는 새로운 경계요소기법을 제시하기도 하였다.

실제 결함탐상시 결함으로부터 산란되어 나온 전기전압신호(electric voltage signal)를 예측하기

* 회원, 부산대학교 기계공학부

E-mail : johlee@hyowon.cc.pusan.ac.kr

TEL : (051)510-2430 FAX : (051)512-9835

** 부산대학교 대학원

*** 회원, 한국원자력 안전기술원 안전기술개발부

위해서는 다음 식 (1)과 같은 Auld의 전기기계적 상호관계(electromechanical reciprocity relations)⁽⁹⁾를 적용해야 한다.

$$\delta\Gamma = \frac{1}{4P} \int_S (V_1 \cdot T_2 - V_2 \cdot T_1) \cdot \vec{n} dS \quad (1)$$

여기서 Γ , P 와 \vec{n} 는 각각 전자기 반사계수, 탐촉자에 가해진 전기력, 그리고 적분표면 S 에 대한 법선벡터이다. V_1 과 T_1 은 각각 결함이 존재하지 않는 경우의 입자변위 속도와 응력장 그리고 V_2 와 T_2 는 각각 결함이 존재하는 경우의 입자변위 속도와 응력장이다. 본 연구에서 다루고자 하는 기공결함에 대한 원거리 산란장 해석시 기공결함 표면에서의 자유표면 경계조건으로 $T_2 \cdot \vec{n} = 0$ 이다. 따라서 식 (1)은 다음 식 (2)처럼 나타낼 수 있다.

$$\delta\Gamma = \frac{-1}{4P} \int_S (V_2 \cdot T_1) \cdot \vec{n} dS \quad (2)$$

식 (2)에서 입자변위 속도 $V = i\omega u$ 이다. 여기서 ω 와 u 는 각각 각주파수와 입자변위이다. 따라서 전기전압신호를 예측하기 위해서는 입사파에 관한 부분인 T_1 의 계산뿐만 아니라 본 연구에서 수행하고자 하는 원거리 산란 변위장 u 의 계산에 의한 입자변위 속도 V_2 의 계산이 요구된다.

본 연구에서는 동탄성 경계요소법을 이용하여 재료내부의 기공결함으로부터 산란되어 나온 신호를 실제 초음파 시험시 관찰할 수 있는 시간영역(time domain)의 신호로 나타내어 그 신호특성에 대하여 고찰하는 것이 본 연구의 주목적이다. 하지만 경계요소법을 이용한 시간영역 해석은 많은 어려움이 따르므로 주파수영역(frequency domain) 해석을 한 후, 고속 역푸리에 변환(Inverse Fast Fourier Transform, IFFT)⁽¹⁰⁾을 이용하여 시간영역의 신호로 나타낼 필요가 있다. 이를 위해서는 재료내부 결함으로부터 임의의 거리만큼 떨어진 지점에서의 원거리 산란장 해석이 필수적으로 요구된다. 최근 경계요소법을 이용한 재료내부 결함에 대한 수평회파(SH-wave)의 근거리 산란장 해석^(11,12)이 저자들에 의해 수행되어져 왔으나 이들 문제들에 대한 원거리 산란장 연구는 보고되지 않고 있다. 따라서 본 연구에서는 동탄성 경계요소법을 이용하여 원형 및 타원형 기공결함이 존재하는 재료에 대해서 결함으로부터 임의의 거

리만큼 떨어진 지점에서의 원거리 산란장을 해석하였다. 또한 이때 경계요소해석으로 구한 주파수 영역의 원거리 산란장을 실제 결함탐상시 관찰할 수 있는 시간영역의 신호로 나타내기 위하여 IFFT 처리하여 그 신호특성에 대하여 고찰하였다.

2. 동탄성 경계요소법

일반적인 동탄성 문제에 대한 지배방정식은 다음 식 (3)처럼 표현된다.

$$\sigma_{ij,j} + b_i = \rho \ddot{u}_i \quad (i, j = 1, 2, 3) \quad (3)$$

여기서, σ_{ij} , b_i 와 ρ 는 각각 응력텐서, 체적력 그리고 밀도를 나타낸다. 한편, u_i 는 다음 식 (4)와 같은 시간조화(time harmonic) 파동장을 나타낸다.

$$u_i(X, t) = u_i(X) e^{-i\omega t} \quad (4)$$

여기서 X , t 와 ω 는 각각 공간과 시간의 위치 그리고 각주파수(angular frequency)를 나타낸다. 본 연구에서 이용되어진 수평회파에 의한 변위장은 파동이 진행하는 평면을 X1-X2평면으로 정의할 때, X1-X3 평면내에서 X3방향으로의 변위 성분만을 갖게된다. 위의 식 (3)에 가중잔차법(weighted residual method)을 적용하여 다음 식 (5)와 같은 동탄성 경계적분식을 얻을 수 있다.

$$\frac{1}{2} u^i + u^l + \sum_{j=1}^n u_j \int_{\Gamma_j} t^* d\Gamma = \sum_{j=1}^n t_j \int_{\Gamma_j} u^* d\Gamma \quad (5)$$

식 (5)에서 u^l 는 입사파동장, i 는 수평회파에 의한 단위 점하중이 작용된 절점을 나타낸다. 식 (5)에서 변위 기본해 u^* 와 트랙션 기본해 t^* 는 다음 식 (6)과 식 (7)로 주어진다.

$$u_{33}^*(x, y, \omega) = \frac{i}{4\mu} H_0^{(1)}(k_T r) \quad (6)$$

$$t_{33}^*(x, y; \omega) = -\frac{ik_T}{4} H_1^{(1)}(k_T r) \frac{\partial r}{\partial n} \quad (7)$$

여기서, $H_n^{(1)}$ 는 n 차의 Hankel 함수이며, k_T 는 수평회파의 파수(wave number)이다. 그리고 식 (5)의 동탄성 경계적분식을 다음 식 (8)처럼 나타낼 수 있다.

$$\frac{1}{2} u^i + u^l + \sum_{j=1}^n u_j H_{ij}^* = \sum_{j=1}^n t_j G_{ij} \quad (8)$$

모든 경계 절점에 대하여 기본해의 단위 점하중

을 이동시키면서 전 경계에 대한 전체 행렬식 (matrix)을 다음 식 (9)처럼 표현할 수 있다.

$$CU + U^I + H^*U = GT \quad (9)$$

여기서, 완전한 경계면의 경우에 $C=1/2$ 이고, U^I 는 입사파동장에 의한 각 절점의 변위 벡터 그리고 U 와 T 는 각각 경계 변위와 경계 트랙션에 대한 벡터이다. G 와 H^* 는 각각 변위 및 트랙션 기본해의 적분을 포함하는 행렬식이다. 식 (9)의 행렬식을 다시 재배열하면 다음 식 (10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$U^I + HU = GT \quad (10)$$

여기서 $H = H^* (i=j)$ 그리고 $H = 1/2 + H^* (i \neq j)$ 이다. 위의 식 (10)에 경계 절점과 무한체 내부의 내부점을 대입하고 결함 표면에서의 자유 표면 경계조건을 적용하여 선형방정식계를 풀게 되면 결함주위의 근거리 산란장과 결함으로부터 임의의 거리만큼 떨어진 지점에서의 원거리 산란장을 구할 수 있다.

3. 모델링 및 경계요소해석 결과

본 연구에서 사용된 입사파는 수평횡파이며, 경계요소 모델링에서 경계요소는 상수요소(constant element)를 이용하여 총 요소수와 총 절점수는 같다. 시간조화 수평횡파가 입사시 무한체내부에 존재하는 원형 및 타원형상의 기공결함에 의한 근거리 및 원거리 산란장을 해석하였다. 또한 이때 구해진 주파수 영역의 원거리 산란장을 IFFT 처리하여 시간영역의 신호로 나타내었다. 본 연구의 결과에서 이용된 반사계수(reflection factor)는 입사된 영역과 산란된 영역의 변위들의 진폭비 즉, u_{x3}/u^I 로서 정의되고, 이때 주파수 파라미터는 무차원 횡파 파수 $k_T r (k_T a)$ 로서 정의된다. 여기서 k_T 는 횡파 파수이고, r 는 원형 결함의 반경, a 는 타원형 결함의 장축의 반경이다.

3.1 원형 기공결함에서 수평횡파 근거리 및 원거리 산란장

본 연구에서는 Fig.1과 같은 무한체 내부에 존재하는 원형 기공결함에 대한 수평횡파 근거리 및 원거리 산란장을 해석하기 위하여 Fig.2에 나

타낸 것처럼, 원형 기공결함 둘레의 경계에서 64개 그리고 기공결함의 중심에서 거리 d 만큼 떨어진 무한체 내부점에서 64개, 총 128개의 상수요소로 나누었다. 기공결함 표면에서 경계조건은 자유표면(free surface) 경계조건으로 하였고, 입사 초음파에 대해서는 앞의 식 (4)에서 나타낸

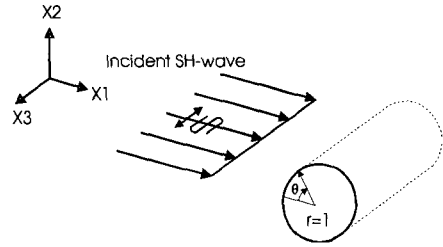


Fig. 1 Problem statement for a circular defect subjected to a time harmonic SH-wave

Total boundary nodes (128 constant elements)

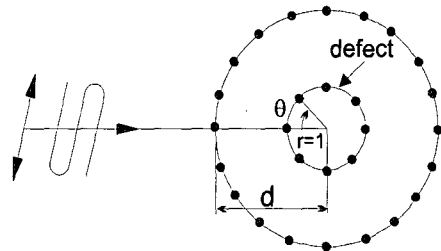


Fig. 2 BEM mesh discretization for a circular defect subjected to a time harmonic SH-wave

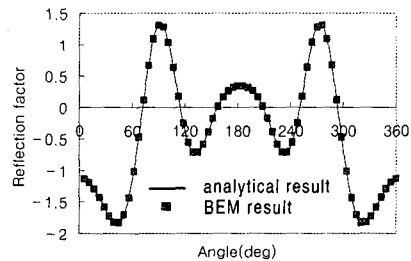


Fig. 3 Boundary displacements around a circular defect : BEM(symbols) vs. analytical(Pao and Mow, 1973 (solid lines))

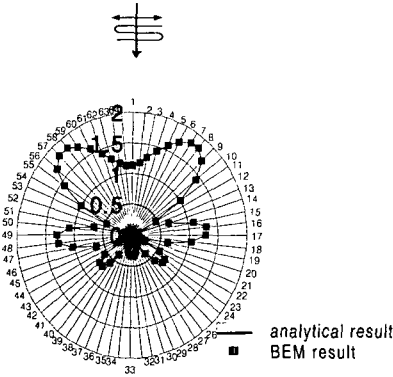


Fig. 4 Near-Field displacement profiles of a circular defect in the polar coordinates ($d=1, k_{Tr}=4.0$)

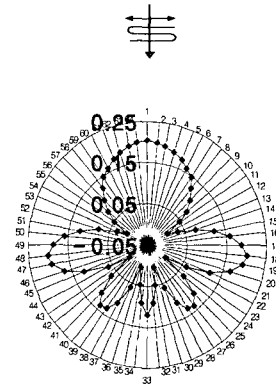


Fig. 5 Far-Field displacement profiles of a circular defect ($d=10, k_{Tr}=4.0$)

$u_i(X, t)$ 의 진폭 크기를 1로 표준화시켜 SH 입사파가 $\theta = 0^\circ$ 방향에서 무한대로부터 입사된다고 가정하였다. 그때 단위 반경($r=1$)의 원형 기공결함 표면에 대해서 산란된다.

Fig. 3은 무차원 횡과 파수 k_{Tr} 이 4.0일 때, 원형 기공결함 표면에 있어서 원주각(circumferential angle) θ 의 변화에 대한 반사계수 변화를 직교좌표계로 나타낸 것으로 본 연구에서는 동탄성 경계요소 해석 프로그램의 검증에 위해 원형 기공결함에 대하여 급수전개식(series expansion form)으로 주어진 잘 알려진 기존의 해석해⁽¹³⁾와 비교하였다. Fig. 3에서 실선으로 표시된 부분은 기존의 이론 해석 결과이며 기호표시는 본 연구에서 수행되어진 경계요소해석 결과이다. Fig. 3의 해석결과에서 보여주는 바와 같이 본 연구에서 수행되어진 경계요소법에 의한 해석 결과는 기존의 Pao등에 의한 이론해석 결과와 좋은 일치를 보이고 있다.

Fig. 4는 Fig. 3의 결과에서 반사계수의 절대치 즉, $|u_{x3}/u^i|$ 를 이용하여 극좌표계에 나타낸 것으로 1번부터 64번까지는 단일 원형 기공결함 둘레의 노드점을 나타내고, SH 입사파는 $\theta = 0^\circ$ 방향 즉, 노드점 1번 방향으로 입사된다. Fig. 5, 6, 7은 각각 수평평파의 무차원 wave number k_{Tr} 이 4.0일 때, 원형 기공결함 중심에서 거리 d 가 각각 10, 50, 100인 지점들에서 θ 의 변화에 대한 반사계수 변화를 극좌표계로 나타낸 것이다.

Fig. 4의 근거리 산란장과 Fig. 5, 6, 7의 원거리 산란장을 비교해보면 원형 기공결함과의 거리 d

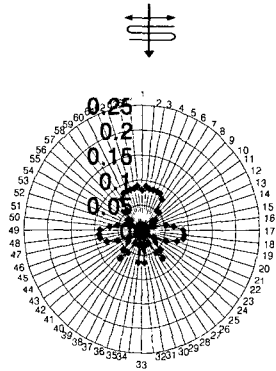


Fig. 6 Far-Field displacement profiles of a circular defect ($d=50, k_{Tr}=4.0$)

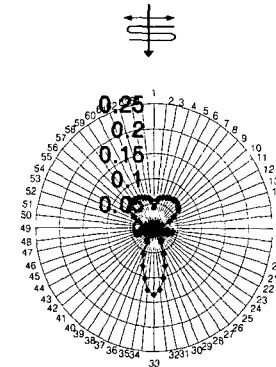


Fig. 7 Far-Field displacement profiles of a circular defect ($d=100, k_{Tr}=4.0$)

가 증가할수록 원주방향을 따라서 반사계수가 현저히 감소함을 알 수 있다. 이것은 원형 기공결

합과의 거리 d 가 증가할수록 결함으로부터 산란되어 나온 수평회파의 에너지가 감소하기 때문이다. 그리고 원형 기공결합과의 거리 d 가 100인 Fig. 7의 노드점 33번인 전방산란 방향에서 반사계수가 다시 증가함을 알 수 있는데 이것은 결함과의 거리 d 의 증가에 따른 산란 감쇠의 영향이 점점 사라지기 때문으로 판단된다.

3.2 타원형 기공결함에서 수평회파 근거리 및 원거리 산란장

본 연구에서는 무한체 내부에 존재하는 타원형 기공결함에 대한 수평회파 근거리 및 원거리 산란장을 해석하기 위하여 Fig. 8에 나타낸 것처럼, 장축의 반경 a 가 1이고 단축의 반경 b 가 0.3인 타원형 기공결함 둘레의 경계에서 64개 그리고 무한체 내부점에서 64개, 총 128개의 상수요소로 나누었다. 단위 변위 진폭의 SH 입사파는 $\theta = 0^\circ$ 의 방향에서 무한대로부터 입사되고, 그때 타원형 기공결함 표면에 대해서 산란된다. Fig. 9는 무차원 회파 파수, $k_T a$ 가 4.0인 경우의 타원형 기공결함 표면에서 θ 의 변화에 대한 반사계수 변화를 극좌표계로 나타낸 것이다. Fig. 9의 타원형 기공결함에 대한 근거리 산란장과 Fig. 4의 원형 기공결함에 대한 근거리 산란장 해석결과와 비교해 볼 때, 원형 기공결함의 경우에 후방산란 방향으로 에너지가 광범위하게 분포하는 것에 비해 타원형 기공결함의 경우 후방산란 방향으로 다소 반사계수가 감소하였고 측면산란 방향으로 에너지가 광범위하게 분포함을 알 수 있다. 이것은 타원형 기공결함이 원형 기공결함에 비해서 수평회파에 대한 반사면적이 감소하기 때문이다. 이

것으로부터 산란특성이 결함형상에 크게 좌우됨을 알 수 있다.

Fig. 10, 11, 12는 각각 무차원 회파 파수 $k_T a$ 가 4.0일 때, 타원형 기공결함 중심에서 거리 d 가 각각 10, 50, 100인 지점들에서 θ 의 변화에 대한 반사계수 변화를 극좌표계로 나타낸 것이다. Fig. 9의 근거리 산란장과 Fig. 10, 11, 12의 원거리 산란장을 비교해보면 앞의 원형 기공결함의 경우와 마찬가지로 타원형 기공결함과의 거리 d 가 증가할수록 원주방향을 따라서 반사계수가 현저히 감소함을 알 수 있다. 이것은 타원형 기공결함과의 거리 d 가 증가할수록 결함으로부터 산란되어 나온 수평회파의 에너지가 감소하기 때문이다. 그리고 타원형 기공결함과의 거리 d 가 100인 Fig. 12의 노드점 33번인 전방산란 방향에서 반사계수가 다시 증가함을 알 수 있는데 이것은 앞의 원형 기공결함의 경우와 마찬가지로 결함과의 거리

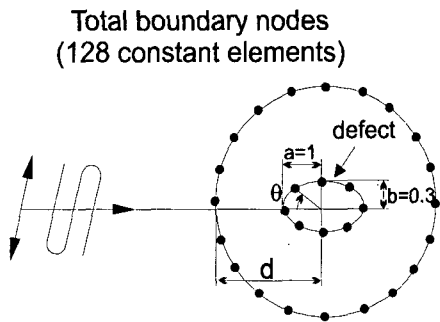


Fig. 8 BEM mesh discretization for an elliptical defect

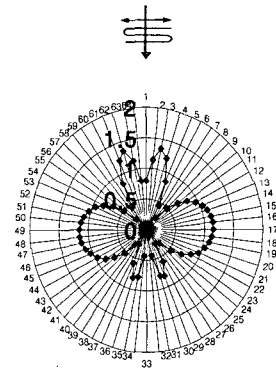


Fig. 9 Near-Field displacement profiles of an elliptical defect

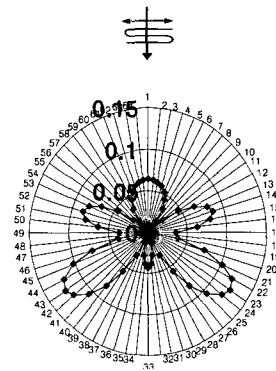


Fig. 10 Far-Field displacement profiles of an elliptical defect (d=10)

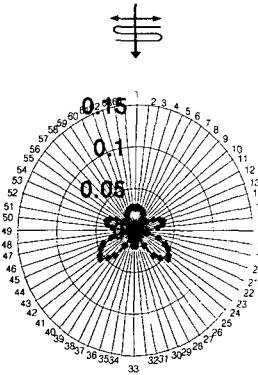


Fig. 11 Far-Field displacement profiles of an elliptical defect ($d=50$)

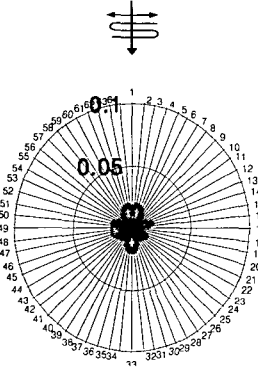


Fig. 12 Far-Field displacement profiles of an elliptical defect ($d=100$)

d 의 증가에 따른 산란 감쇠의 영향이 점점 사라지기 때문에 판단된다.

3.3 원형 기공결함에 대한 원거리 산란장의

IFFT

본 연구에서는 원형 기공결합과의 거리 d 와 SH 입사파와의 각도 θ 의 변화에 대한 원거리 산란특성을 해석하기 위하여 Fig. 13에 나타난 것처럼, 반경 r 이 1인 원형 기공결합 둘레의 경계를 64개, 그리고 무한체 내부의 내부점 6개(θ 가 0° 이고 d 가 10, 50, 100인 지점과 d 가 10이고 θ 가 30° , 60° , 90° 인 지점), 총 70개의 상수요소로 나누었다. 단위 변위 진폭의 SH 입사파는 $\theta = 0^\circ$ 의 방향에서 무한대로부터 입사되고, 원형 기공결합 표면에 대해서 산란된다.

Fig. 14와 Fig. 15는 SH 입사파와의 각도 θ 가 0° 이고 원형 기공결합과의 거리 d 가 10, 50, 100

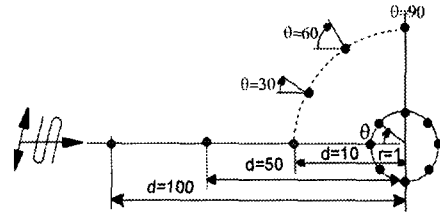


Fig. 13 BEM mesh discretization for a circular defect

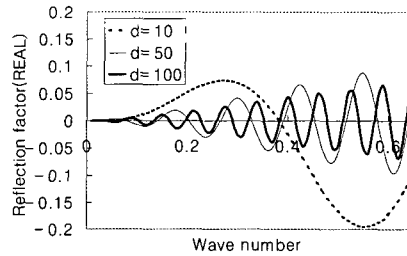


Fig. 14 Reflection factor (REAL) vs. Wave number ($\theta = 0^\circ$, $d=10, 50, 100$)

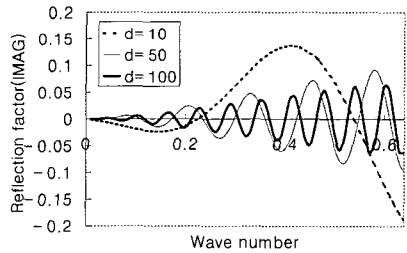


Fig. 15 Reflection factor (IMAG) vs. Wave number ($\theta = 0^\circ$, $d=10, 50, 100$)

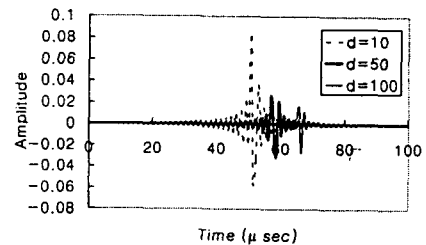


Fig. 16 The IFFT of the frequency domain obtained from the change of distance (d) for a circular cavity

인 지점에서 횡파 파수 변화에 대한 반사계수 변

화를 나타낸 것으로 각각 실수부와 허수부를 나타낸 것이다. 결과에서 알 수 있는 것처럼 결함과의 거리 d 가 증가할수록 최대 반사계수가 감소하지만 사이클 수가 증가함을 알 수 있다. 이것은 d 가 클수록 Hankel 함수들의 값이 k_T 의 증가에 따라 빠르게 변화하기 때문으로 판단된다.

본 연구에서는 동탄성 경계요소법을 이용하여 구한 주파수 영역의 원거리 산란장을 실제 결함 탐상시 관찰할 수 있는 시간 영역의 파형으로 나타내기 위하여 IFFT 처리를 하였다. Fig. 16은 경계요소해석으로 구한 주파수 영역의 실수부와 허수부인 Fig. 14와 Fig. 15의 데이터로부터 IFFT 처리하여 얻은 시간영역의 파형을 나타낸 것으로 시간축 크기는 상대적인 크기로 나타낸 것이다. 결과에서 보여주는 바와 같이, 원형 기공결합과의 거리 d 가 증가함에 따라 진폭이 현저히 감소하며 결함과의 거리 d 의 변화에 의한 시간 영역상에서 시간지연이 나타남을 확인할 수 있다.

Fig. 17과 Fig. 18은 원형 기공결합과의 거리 d 가 10이고 SH 입사파와의 각도 θ 가 각각 30° , 60° , 90° 인 지점에서 횡파 파수 변화에 대한 반사계수 변화를 나타낸 것으로 각각 실수부와 허수부를 나타낸 것이다. 결과에서 알 수 있는 것처럼 SH 입사파와의 각도 θ 가 증가할수록 최대 반사계수가 감소함을 알 수 있다.

Fig. 19는 경계요소해석으로 구한 주파수 영역의 실수부와 허수부인 Fig. 17과 Fig. 18의 데이터로부터 IFFT 처리하여 얻은 시간영역의 파형을 나타낸 것이다. 결과에서 보여주는 바와 같이, SH 입사파와의 각도 θ 가 증가함에 따라 산란감쇠의 영향으로 진폭은 현저히 감소함을 알 수 있다. 그러나 결함으로부터의 거리 d 가 일정하므로 θ 가 변하더라도 시간 영역상에서 시간지연이 나타나지 않음을 알 수 있다.

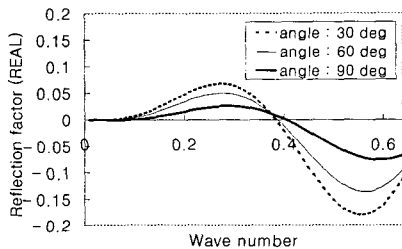


Fig. 17 Reflection factor(REAL) vs. Wave number ($d=10, \theta=30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$)

3.4 타원형 기공결함에 대한 원거리 산란장의 IFFT

본 연구에서는 타원형 기공결합과의 거리 d 와 SH 입사파와의 각도 θ 의 변화에 대한 원거리 산란특성을 해석하기 위하여 Fig. 20에 나타낸 것처럼, 장축의 반경 a 가 1이고 단축의 반경 b 가 0.3인 타원형 기공결합 둘레의 경계를 64개, 그리고 무한체 내부의 내부점 6개(θ 가 0° 이고 d 가 10, 50, 100인 지점과 d 가 10이고 θ 가 $30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ 인 지점), 총 70개의 상수요소로 나누었다. 단위 변위 진폭의 SH 입사파는 $\theta=0^\circ$ 의 방향에서 무한대로부터 입사되고, 그때 타원형 기공결합 표면에 대해서 산란된다.

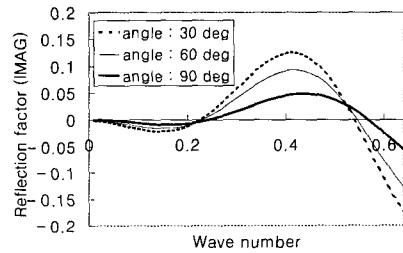


Fig. 18 Reflection factor(IMAG) vs. Wave number ($d=10, \theta=30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$)

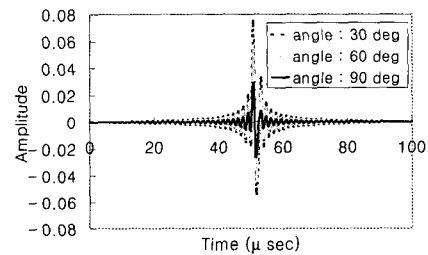


Fig. 19 The IFFT of the frequency domain obtained from the change of angle(θ) for the circular cavity

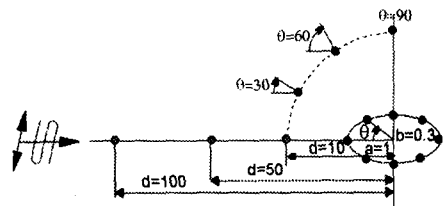


Fig. 20 BEM mesh discretization for an elliptical defect

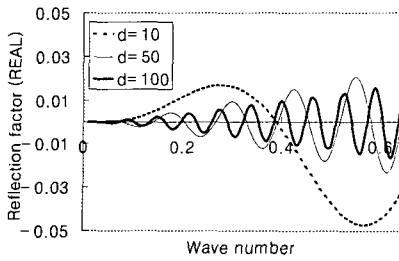


Fig. 21 Reflection factor(REAL) vs. Wave number ($\theta = 0^\circ$, $d=10, 50, 100$)

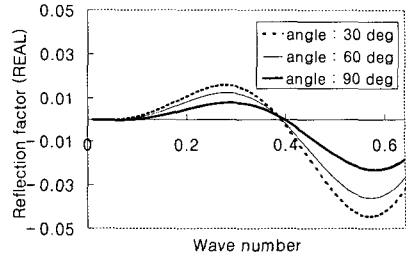


Fig. 24 Reflection factor(REAL) vs. Wave number ($d=10, \theta = 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$)

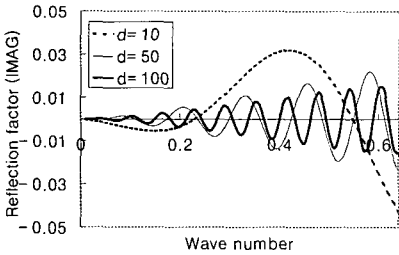


Fig. 22 Reflection factor(IMAG) vs. Wave number ($\theta = 0^\circ$, $d=10, 50, 100$)

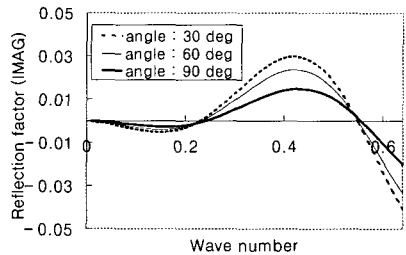


Fig. 25 Reflection factor(IMAG) vs. Wave number ($d=10, \theta = 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$)

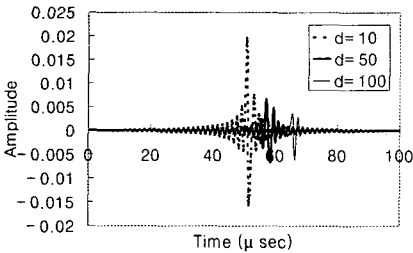


Fig. 23 The IFFT of the frequency domain obtained from the change of distance(d) for an elliptical cavity

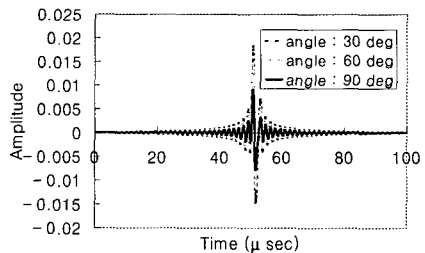


Fig. 26 The IFFT of the frequency domain obtained from the change of angle(θ) for an elliptical cavity

Fig. 21과 Fig. 22는 SH 입사파와의 각도 θ 가 0도이고 타원형 기공결합과의 거리 d 가 각각 10, 50, 100인 지점에서 횡과 파수 변화에 대한 반사계수 변화를 나타낸 것으로 Fig. 21은 실수부를, Fig. 22는 허수부를 나타낸 것이다. 앞의 원형 기공결합의 경우와 마찬가지로, 타원형 기공결합과의 거리 d 가 증가할수록 최대 반사계수가 감소하지만 사이클 수가 증가함을 알 수 있다. Fig. 23은 주파수 영역의 실수부와 허수부 데이터인 Fig. 21과 Fig. 22로부터 IFFT 처리하여 얻은 시간영역의 파형을 나타낸 것으로서 타원형 기공결합과의 거

리 d 가 증가함에 따라 진폭이 상당히 감소함을 알 수 있는데 앞의 Fig. 16의 원형 기공결합에 대한 결과에 비해서 진폭이 75% 정도 감소하여 나타났다. 이것은 앞에서 언급하였듯이 타원형 기공결합이 원형 기공결합에 비해서 수평횡과에 대한 반사면적이 감소하였기 때문이다. 그리고 결합과의 거리 d 의 변화에 의한 시간 영역상에서 시간지연이 나타남을 확인할 수 있다.

Fig. 24와 Fig. 25는 타원형 기공결합과의 거리 d 가 10이고 SH 입사파와의 각도 θ 가 각각 30° , 60° , 90° 인 지점에서 횡과 파수 변화에 대한

반사계수 변화를 나타낸 것으로 Fig. 24는 실수부를, Fig. 25는 허수부를 나타낸 것이다. 결과에서 알 수 있는 것처럼 SH 입사파와의 각도 θ 가 증가할수록 최대 반사계수가 감소함을 알 수 있다.

Fig. 26은 주파수 영역의 실수부와 허수부 데이터인 Fig. 24와 Fig. 25로부터 IFFT 처리하여 얻은 시간영역의 파형을 나타낸 것으로 입사파와의 각도 θ 가 증가함에 따라 산란감쇠의 영향으로 진폭은 현저히 감소함을 알 수 있다. 그러나 원형 기공결함의 경우와 마찬가지로 타원형 기공결함으로부터의 거리 d 가 일정하므로 θ 가 변하더라도 시간 영역상에서 시간지연이 나타나지 않음을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 경계요소법을 이용하여 무한체 내부에 존재하는 원형 혹은 타원형상의 기공결함에 대하여 수평회파 근거리 산란장과 임의의 거리만큼 떨어진 지점에서의 원거리 산란장을 해석하였고, 이때 구해진 주파수 영역의 원거리 산란장을 시간영역의 신호로 나타내기 위해 IFFT 처리하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 원거리 산란장에서 원형 및 타원형 기공결합과의 거리 d 가 증가할수록 결함으로부터 산란되어 나온 수평회파의 에너지 감소에 기인하여 결함의 원주방향을 따라서 반사계수가 현저히 감소함을 알 수 있었다.

(2) IFFT 처리하여 얻은 파형으로부터 원형 및 타원형 기공결합과의 거리 d 가 증가할수록 진폭은 감소하고 시간지연이 나타남을 알 수 있었으며, 일정한 거리에 대해서는 입사파와의 각도 θ 가 증가함에 따라 진폭은 감소하고 시간지연이 나타나지 않음을 알 수 있었다.

(3) 장축이 수평회파 전파방향인 타원형 기공결합이 원형 기공결함에 비해서 수평회파에 대한 반사면적이 감소하여 시간영역상의 진폭이 75% 정도 감소하여 나타남을 알 수 있었다.

(4) 원형 및 타원형 기공결함에 대한 원거리 산란특성의 수치해석 결과는 실제 기공결합이 존재하는 구조물의 초음파 탐상시, 탐촉자의 최적의 위치 그리고 기공결합의 형상 및 위치 등을 결정하는 데 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 1998년도 한국학술진흥재단의 학술연구 조성비(국제협력공동연구과제) 및 한국과학재단 산하 성균관대학교 산업설비 안전성 평가 연구센터의 부분 지원하에 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) 이준현, 1993, "초음파를 이용한 입자강화 금속복합재료의 계면특성에 관한 이론적 연구," 한국비파괴검사학회지, Vol. 13, No. 4, pp. 9~17.
- (2) Lee, J. H. and Ahn, B. S., 1997, "Development of Measuring Technique for Micro-Crack in Ceramic by High Frequency Acoustic Microscopy," *J. Japan Soc. Str. Fracture Mats*, Vol. 31, No. 2, pp. 43~54.
- (3) 이준현, 이진경, 조윤희, 1998, "세라믹의 열충격 손상거동 및 초음파 Lamb파를 이용한 비파괴적 손상평가," 대한기계학회논문집 A권, 제22권 제12호, pp. 2278~2285.
- (4) Dimitri E. Beskos, 1987, *Boundary Element Methods in Mechanics*, Elsevier Science Publishers B.V., pp. 191~256.
- (5) Hirose, S. H. and Niwa, Y., 1986, "Scattering of Elastic Waves by a Three Dimensional Crack," *Boundary Elements VII Conference*, pp. 169~179.
- (6) Zhang, C. H. and Achenbach, J. D., 1988, "Scattering by Multiple Crack Configurations," *Transactions of the ASME*, Vol. 55, pp. 104~110.
- (7) Zhang, C. H. and Achenbach, J. D., 1989, "Effect of an Adjacent Cavity on the Interaction of Elastic Waves with a Crack," *Int. J. Engng.* Vol. 27, pp. 711~722.
- (8) Mellings, S. C. and Aliabadi, M. H., 1995, "Flaw Identification Using the Boundary Element Method," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 38, pp. 399~419.
- (9) Auld, B. A., 1979, "General Electromechanical

- Reciprocity Relations Applied to the Calculation of Elastic Wave Scattering Coefficients" *Wave Motion* 1, pp. 3~10.
- (10) Robert W. Ramirez, 1985, *The FFT Fundamentals and Concepts*, Prentice Hall PTR, pp. 76~91.
- (11) 이준현, 이서일, 조윤희, 1998, "재료내 다중결합에 의한 SH형 초음파 산란장의 수치해석," *한국비파괴검사학회지*, Vol. 18, No. 4, pp. 304~312.
- (12) 이준현, 이서일, 1999, "경계요소법을 이용한 다중결합의 SH형 초음파 산란장 해석에 관한 연구," *대한기계학회논문집 A권*, 제23권, 제11호, pp. 1878~1885.
- (13) Chao-Chow Mow and Yih-Hsing Pao, 1971, "The Diffraction of Elastic Waves and Dynamic Stress Concentrations," *The Rand Corporation*, pp. 111~140.