

## 재료내 다중결함에 의한 SH형 초음파 산란장의 수치해석

이준현\*, 이서일\*\*, 조운호\*\*\*

\* 부산대학교 기계기술연구소 재료강도 및 비파괴평가실

\*\* 부산대학교 대학원

\*\*\* 인제대학교 기계·자동차공학부

**초 록** 비파괴검사중의 하나인 초음파 탐상검사는 교량, 발전설비 및 석유화학플랜트 등의 각종 다양한 구조물들의 안전성 확보를 위한 내부결함 및 손상평가를 위하여 일반적으로 폭넓게 사용되고 있다. 초음파를 이용한 비파괴 평가 기술은 각종 구조물에 존재하는 내부결함에 의한 산란신호를 통해 건전성을 평가하는 기법이므로 결함의 신뢰성 높은 정량적 평가를 위해서는 결함으로부터의 초음파 산란신호특성에 대한 기본적 이해가 필수적이며 따라서 이를 위한 모델링 수치해석 연구가 요구된다. 본 연구에서는 동탄성 경계요소법을 이용하여 무한체내에 존재하는 다중기공 결함에 의한 초음파 수평회파의 근거리 산란특성에 대하여 결함의 형상과 결함사이의 상호작용을 고려하여 해석하였다. 본 연구에서 얻어진 결과들은 결함검출 민감도의 개선 및 역변환 해석에 의한 정량적 비파괴 평가에 큰 도움을 줄 수 있다.

### 1. 서 론

최근 국내에서 발생한 성수대교, 삼풍백화점 붕괴 사고 및 가스배관 폭발사고 등의 대형사고를 계기로 구조물의 안전성 확보를 위한 비파괴평가 기술개발의 중요성이 크게 대두되고 있고 이에 따라 최근 국내에서도 결함평가를 위한 비파괴 평가 기술과 관련된 다수의 연구결과가 보고되고 있다<sup>1~3)</sup>.

각종 구조물들의 안전성 확보를 위한 비파괴검사 기술에는 비교적 다양한 각종 검사 방법들이 이용되고 있으나 초음파 탐상검사는 교량, 발전설비, 석유화학플랜트 등 다양한 분야에 걸쳐 가장 일반적으로 널리 사용되고 있는 대표적인 비파괴검사 적용기술이다. 일반적으로 초음파를 이용한 비파괴 평가 기술은 결함에 의한 산란(scattering) 신호를 통해 재

료의 건전성을 평가하는 것이므로 보다 정량적이고 신뢰성 높은 평가를 위한 주파수, 탐촉자 위치와 같은 측정조건의 개선 및 내부결함 형태의 변화에 따른 산란신호특성의 기본적인 이해 및 산란특성 해석을 위한 모델링 연구가 필수적이다. 재료내의 임의 결함에 의한 초음파 산란장 해석에는, 무한체내에서의 해석의 용이함에 기인하여 동탄성 경계요소법(elastodynamic boundary element method)<sup>4)</sup>이 사용되고 있다. 경계요소법은 수치해석에 의해서 탄성과 산란문제를 다룰 때, 경계 변위값과 경계 응력값에 대한 정확한 결과를 가져다주고, 경계 부분만을 가지고 모델링하기 때문에 복잡한 구조물을 적은 수의 절점과 요소로서 간단히 모델링할 수 있으며, 임의의 형상의 결함들을 가지는 비균질 재료에 대해서도 해석할 수 있는 장점을 갖기 때문에 결함에

의한 탄성과 산란특성 해석에 최근 활발히 응용되고 있다<sup>5, 6)</sup>.

실제 비파괴 시험은 다중산란체에 대한 경우가 지배적임에도 불구하고, 초음파 산란장에 대한 대부분의 수치연구는 단일 산란체(single scatterer)<sup>7)</sup> 문제에 대하여 수행되어 왔다. 또한 수직횡파나 종파의 다중산란 문제<sup>5, 6)</sup>에 비해 수평횡파의 다중산란 연구는 아직 활발히 발표되지 않은 것으로 판단된다.

따라서 본 연구에서는 결합특성에 의한 초음파 산란특성을 이해하기 위하여 다중기공 결합이 존재하는 재료에 대한 결합 주위의 수평횡파(SH-wave)의 근거리 산란장을 결합의 형상과 결합사이의 상호작용 등을 고려하여 해석하였다.

## 2. 이론

### 2.1. 동탄성 문제의 기본식(Fundamental Equation)

동탄성 문제에 대한 기본식들은 다음과 같은 파동방정식, 구성방정식 및 기하학적 관계식으로 각각 표현할 수 있다.

$$\sigma_{ij,j} + b_i = \rho \ddot{u}_i \dots\dots\dots (1)$$

$$\sigma_{ij} = \lambda \epsilon_{mm} \delta_{ij} + 2G \epsilon_{ij} \dots\dots\dots (2)$$

$$\epsilon_{ij} = \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i}) \dots\dots\dots (3)$$

여기서,  $\sigma_{ij}(X, t)$ ,  $\epsilon_{ij}(X, t)$ 와  $\delta_{ij}$ 는 각각 응력, 변형률 그리고 크로네커 델타이며,  $u_i(X, t)$ ,  $b_i(X, t)$ 는 각각 변위 벡터, 체적력 벡터이다.

$\rho$ 는 밀도이고,  $G$ 와  $\lambda$ 는 Lamé 상수,  $\epsilon_{mm}$ 은 체적 변형률(dilatation)이며,  $X$ 와  $t$ 는 각각 공간과 시간의 위치를 나타낸다.

(2)식과 (3)식을 (1)식에 대입하면, Navier-Cauchy 방정식을 얻을 수 있다.

$$\lambda u_{m,mj} + G u_{i,ij} + G u_{j,ij} + b_i = \rho \ddot{u}_i \dots\dots\dots (4)$$

만약 체적력이 각주파수(angular frequency)  $\omega$  를 가진 시간조화(time harmonic) 함수라면, 식 (5)처럼 나타낼 수 있다.

$$b_i(X, t) = b_i(X) e^{i\omega t} \dots\dots\dots (5)$$

그때 상응하는 변위장은 다음의 식 (6)과 같은 각주

파수를 가지는 시간조화함수이다.

$$u_i(X, t) = u_i(X) e^{i\omega t} \dots\dots\dots (6)$$

### 2.2. 동탄성 문제의 지배방정식

일반적인 동탄성 문제에 대한 지배방정식은 다음처럼 표현된다.

$$\sigma_{ij,j} + b_i = \rho \ddot{u}_i (i,j=1, 2, 3) \dots\dots\dots (7)$$

여기서,  $\sigma_{ij}$ 는 응력 텐서이고,  $b_i$ 는 체적력,  $\rho$ 는 밀도를 나타낸다. 한편  $u_i$ 는 다음과 같은 시간조화 파동장을 나타낸다.

$$u_i(X, t) = u_i(X) e^{i\omega t} \dots\dots\dots (8)$$

여기서  $X$ 는 재료내의 위치벡터,  $\omega$ 는 각주파수를 나타낸다. 수평횡파에 의한 변위장은 파동이 진행하는 평면을  $X1$ - $X2$ 평면으로 정의할 때,  $X1$ - $X3$ 평면내에서  $X3$ 방향으로의 변위 성분만을 갖게된다.

### 2.3. 동탄성 경계 적분식

동탄성 경계 적분식은 식 (7)에 가중잔여치법을 적용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{1}{2} u^i + u^{i+} + \sum_{j=1}^n u_j \int_{\Gamma_j} t_j^* d\Gamma = \sum_{j=1}^n t_j \int_{\Gamma_j} u^* d\Gamma \dots\dots\dots (9)$$

식 (9)에서  $u^i$ 는 입사파동장,  $i$ 는 수평횡파에 의한 단위 접하중이 작용된 절점을 나타낸다. 식 (9)에서 변위 기본해와 트래션 기본해는 식 (10)과 식 (11)로 주어진다.

$$U_{33}(x, y, \omega) = \frac{i}{4\mu} H_0^{(1)}(k_T r) \dots\dots\dots (10)$$

$$T_{33}(x, y; \omega) = -\frac{ik_T}{4} H_1^{(1)}(k_T r) \frac{\partial r}{\partial n} \dots\dots\dots (11)$$

여기서,  $H_n^{(1)}$ 는  $n$ 차의 Hankel 함수이며,  $k_T$ 는 수평횡파의 파수(wave number)로서 다음의 식 (12)와 같은 관계를 가진다.

$$k_T = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi f}{c_T} \dots\dots\dots (12)$$

여기서,  $\lambda$ 는 파장,  $f$ 는 주파수 그리고  $c_T$ 는 횡파의 전달속도를 나타낸다.

모든 경계 절점에 대해서 기본해의 단위 접하중을 이동시키면서 전 경계에 대한 전체 행렬식(matrix)을 다음처럼 표현할 수 있다.

$$CU + U^I + HU = GT \quad \dots\dots\dots (13)$$

여기서, 완전한 경계면의 경우에  $C = 1/2$ 이고,  $U^I$ 는 입사파동장에 의한 각 절점의 변위 벡터,  $U$ 는 경계 변위에 대한 벡터이고,  $T$ 는 경계 트랙션에 대한 벡터이다.  $G$ 와  $H$ 는 각각 변위 기본해의 적분을 포함하는 행렬식, 트랙션 기본해의 적분을 포함하는 행렬식이다. 식 (13)에 결함들 표면에서의 자유표면 경계조건을 대입하고 선형방정식계를 풀게되면 결함주위의 근거리 산란장을 구할 수 있다.

**3. 모델링 및 경계요소해석 결과**

본 연구에서 사용된 입사파는 수평횡파이며, 경계요소 모델링에서 경계요소는 상수요소(constant element)를 사용하여 총 요소수와 총 절점수는 같다. 시간조화 수평횡파가 입사시 무한체내부의 원형 혹은 타원형의 기공결함에 의한 산란장을 해석하였다.

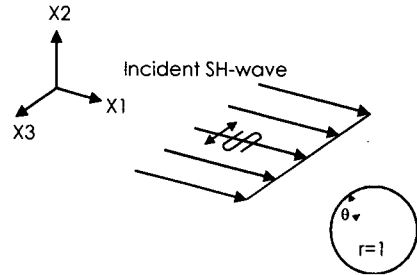
본 연구의 결과에서 사용된 반사계수(reflection factor)는 입사된 영역과 산란된 영역의 변위들의 진폭비 즉,  $u_{xy}/u^I$ 로서 정의되고, 이때 주파수 파라미터는 무차원 횡파 파수,  $k_T r$ ( $k_T a$ )로서 정의된다. 여기서  $k_T$ 는 횡파 파수이고,  $r$ 는 원형 결함의 반경,  $a$ 는 타원형 결함의 장축의 반경이다.

**3.1. 단일 원형 기공결함에서의 수평횡파 산란**

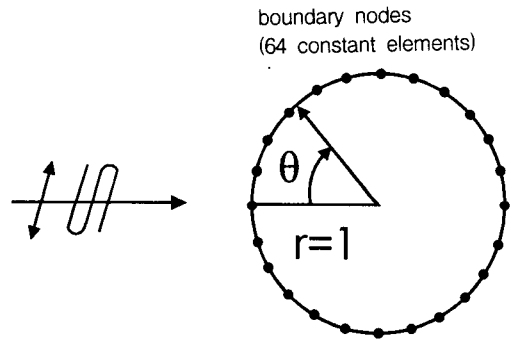
본 연구에서는 단일 프로그램의 검증을 위해 단일 원형 기공결함에 대하여 급수전개식(series expansion form)으로 주어진 잘 알려진 기존의 해석적 해<sup>7)</sup>와 비교하였다.

본 연구에서는 Fig. 1 (a)와 같은 무한체내부에 존재하는 단일 원형 기공결함에 대한 수평횡파 산란장을 해석하기 위하여 Fig. 1 (b)에 나타난 것처럼, 단일 원형 기공결함 둘레의 경계를 64개의 상수경계요소로 나누었다. 단위 변위 진폭의 SH 입사파는

$\theta = 0^\circ$ 의 방향에서 무한대로부터 입사되고, 그때 단위 반경( $r=1$ )의 원형 기공결함의 표면에 대해서 산란된다.



(a) Problem statement



(b) BEM mesh discretization

Fig. 1 A circular defect subjected to a time harmonic SH-wave

Fig. 2는 무차원 횡파 파수,  $k_T r$ 이 각각 4.0, 7.0인 경우의 단일 원형 기공결함의 표면에서의 원주각(circumferential angle)  $\theta$ 의 변화에 대한 반사계수의 변화를 직교좌표계로 나타낸 것으로 본 연구에서는 해석결과를  $Pao^{7)}$  등에 의한 이론해석 결과와 비교하였다. Fig. 2에서 실선으로 표시된 부분은 기존의 이론해석 결과이며 기호표시는 본 연구에서 수행되어진 경계요소해석 결과이다. Fig. 2의 해석 결과에서 보여주는 바와 같이 본 연구에서 수행되어진 경계요소법에 의한 해석 결과는 기존의  $Pao$  등에 의한 이론해석 결과와 좋은 일치율을 보이고 있다.

Fig. 3은 Fig. 2의 결과를 극좌표계에 나타낸 것으로 1번부터 64번까지는 단일 원형 기공결함 둘레의 노드점을 나타내고, SH 입사파는  $\theta = 0^\circ$  방향 즉,

노드점 1번 방향으로 입사된다. SH 입사파의 입사 방향 즉, 원주각  $\theta=0^\circ$  부근에서 반사계수는 SH 입사파의 주파수를 증가시킴으로써 다소 증가함을 알 수 있다. 즉, 무차원 횡파 파수  $k_{Tr}$ 이 4.0인 경우보다  $k_{Tr}$ 이 7.0인 경우에 다소 반사계수가 증가함을 알 수 있는데 이는 주파수를 증가시킴으로써 후방산란(back scattering) 에너지가 집중되기 때문이다. 반면에  $\theta=90^\circ$  와  $270^\circ$  즉, SH 입사파의 방향에 수직인 위치에서는 거의 같은 반사계수를 나타냄을 알 수 있었다.

3.2. 단일 타원형 기공결합에서의 수평횡파 산란

단일 타원형 기공결합에서의 산란특성을 해석하기 위하여 Fig. 4에 나타난 것처럼, 장축의 반경  $a$ 가 1이고 단축의 반경  $b$ 가 0.5인 타원형 기공결합 둘레의 경계를 64개의 상수경계요소로 나누었다. 단위 변위 진폭의 SH 입사파는  $\theta=0^\circ$ 의 방향에서 무한대로부터 입사되고, 그때 타원형 기공결합의 표면에 대해서 산란된다. Fig. 5는 무차원 횡파 파수,  $k_{Tr}$ 가 각각 4.0, 7.0인 경우의 타원형 기공결합의 표면에서의  $\theta$ 의 변화에 대한 반사계수의 변화를 극좌표계로 나타낸 것이다. 단일 타원형 기공결합의 경우 앞의 Fig. 3의 단일 원형 기공결합에 대한 해석결과와 비교해 볼 때, 동일 주파수에 대한 전방산란 및 후방산란 방향으로의 에너지 집중도가 증가함을 알 수 있다.

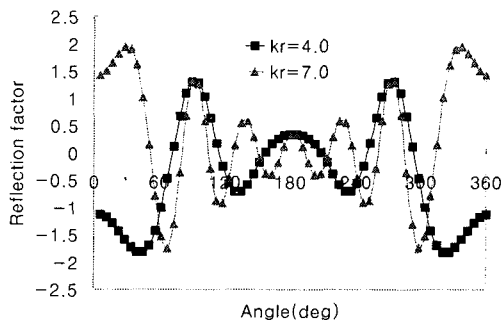


Fig. 2 Boundary displacements around a circular defect due to a time harmonic SH-wave: BEM(symbols) vs. analytical(Pao and Mow, 1973(solid lines)

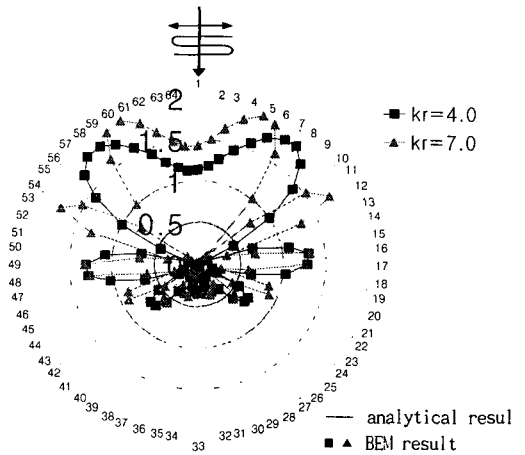


Fig. 3 Scattered displacement profiles of a circular defect subjected to SH-wave incidence in the polar coordinates

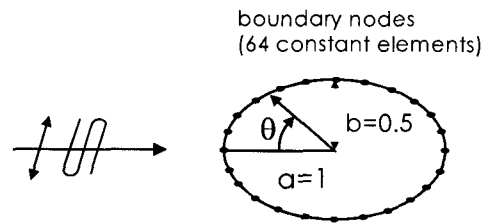


Fig. 4 BEM mesh discretization for an elliptical defect subjected to a time harmonic SH-wave

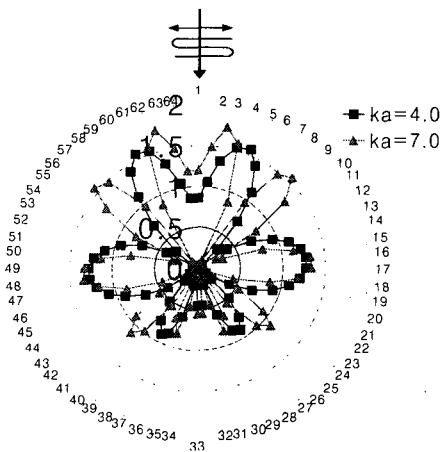


Fig. 5 Scattered displacement profiles of an elliptical defect subjected to SH-wave incidence in the polar coordinates

3.3 다중 원형 기공결함에에서의 수평형파 산란

본 연구에서 중점적으로 다룰 다중산란 문제로서 Fig. 6 (a)와 같은 무한체 내부에 존재하는 두 개의 원형 기공결함에 의한 수평형파 산란장을 해석하였다. Fig. 6 (b)에 나타난 것처럼, 두 원형 기공결함 둘레의 경계를 각각 64개씩 총 128개의 상수경계요소로 나누었다. 단위 변위 진폭의 SH 입사파는  $\theta = 0^\circ$ 의 방향에서 무한대로부터 입사되고, 그때 단위 반경( $r=1$ )의 두 원형 기공결함의 표면에 대해서 산란된다.

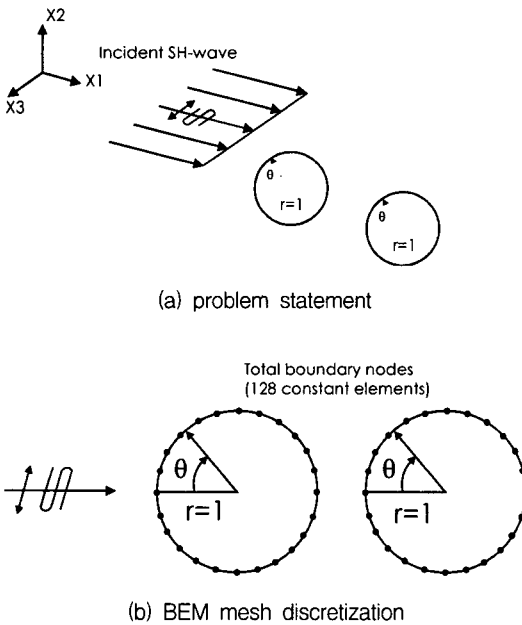


Fig. 6 Two circular defects subjected to a time harmonic SH-wave

Fig. 7은 무차원 횡파 파수,  $k_r r$ 이 4.0인 경우의 두 원형 기공결함 표면에서의  $\theta$ 의 변화에 대한 반사계수의 변화를 극좌표계로 나타낸 것으로서, 단일 원형 기공결함에 대한 해석결과인 Fig. 3의  $k_r r$ 이 4.0인 경우와 다중 원형 기공결함에 대한 해석결과인 Fig. 7의 첫 번째 결함의 경우와 비교해보면 전방산란 방향인  $135^\circ$ 와  $225^\circ$  사이에서 반사계수의 변화가 크게 나타남을 알 수 있다. 이것은 첫 번째 결함과 두 번째 결함과의 상호작용(interaction)에 의

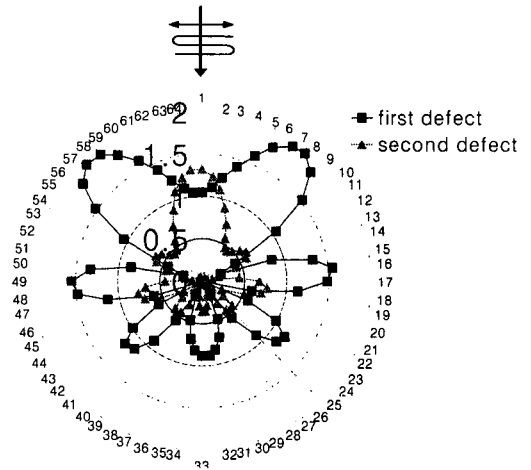


Fig. 7 Scattered displacement profiles of two circular defects subjected to SH-wave incidence in the polar coordinates ( $k_r r = 4.0$ )

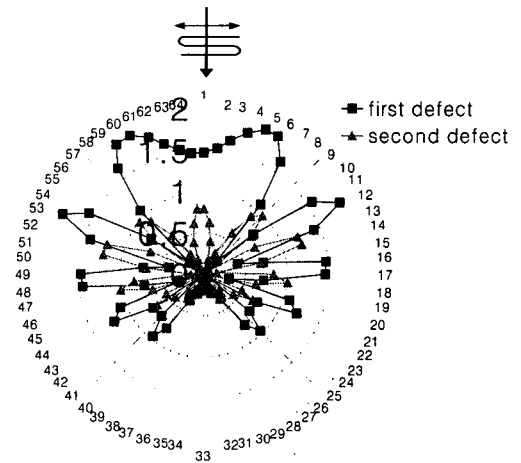


Fig. 8 Scattered displacement profiles of two circular defects subjected to SH-wave incidence in the polar coordinates ( $k_r r = 7.0$ )

한 것이다. Fig. 7의 두 번째 결함에 대한 반사계수의 변화를 살펴보면, SH 입사파의 입사방향 즉, 후방산란장에만 조금의 반사계수의 증가가 있을 뿐 전체적으로 반사계수가 감소하였음을 알 수 있다. 이것은 첫 번째 결함에 의한 산란(scattering)의 영향에 기인한다.

Fig. 8은 무차원 횡파 파수,  $k_r r$ 이 7.0인 경우의 두 원형 기공결함의 표면에서의  $\theta$ 의 변화에 대한

반사계수의 변화를 극좌표계로 나타낸 것이다. 무차원 횡파 파수,  $k_{Tr}$ 이 4.0인 경우인 Fig. 7의 결과와 비교를 해보면, 무차원 횡파 파수,  $k_{Tr}$ 이 7.0인 경우 일 때가 결함의 원주방향을 따라서 더 많은 수의 요동(fluctuation)이 있음을 알 수 있으며, 두 번째 결함에 대한 결과에 대해서 살펴보면,  $k_{Tr}$ 이 4.0의 경우인 Fig. 7의 결과에 비해서 수평횡파 입사방향으로 반사계수의 감소가 두드러지게 나타났다. 이것은 주파수를 증가시킴으로써, Fig. 7의  $k_{Tr}$ 이 4.0인 경우에 비해 입사파장이 감소하여 첫 번째 결함에 의한 후방산란 에너지가 증가하였기 때문에 결국 두 번째 결함에 대해서는 후방산란 에너지가 감소함을 알 수 있었다.

3.4. 다중 타원형 기공결합에서의 수평횡파 산란

무한체 내부에 존재하는 장축의 반경  $a$ 가 1이고 단축의 반경  $b$ 가 0.5인 두 타원형 기공결합에서의 수평횡파 산란장을 해석하기 위하여 Fig. 9에 나타난 것처럼, 두 타원형 기공결합 둘레의 경계를 각각 64개씩 총 128개의 상수경계요소로 나누었다. 단위 변위 진폭의 SH 입사파는  $\theta=0^\circ$ 의 방향에서 무한대로부터 입사되고, 그때 두 타원형 기공결합의 표면에 대해서 산란된다.

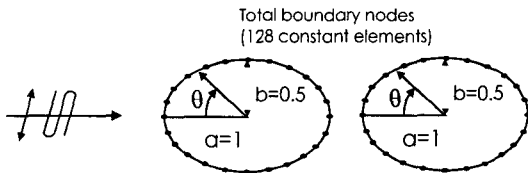


Fig. 9 BEM mesh discretization for two elliptical defects subjected to a time harmonic SH-wave

Fig. 10과 Fig. 11은 수평횡파의 무차원 횡파 파수,  $k_{Tr}$ 가 각각 4.0, 7.0인 경우의 두 타원형 기공결합 표면에서의  $\theta$ 의 변화에 대한 반사계수의 변화를 극좌표계로 나타낸 것으로서, 단일 타원형 기공결합에 대한 해석결과인 Fig. 5의  $k_{Tr}$ 가 4.0인 경우와 다중 타원형 기공결합에 대한 해석결과인 Fig. 10의 첫 번째 결함의 경우와 비교해보면 전방산란 방향 즉,  $\theta=180^\circ$  부근에서 큰 차이가 있음을 알 수 있다. 그리고 단일 타원형 기공결합에 대한 해석결과인 Fig. 5의  $k_{Tr}$ 가 7.0인 경우와 다중 타원형 기공결합

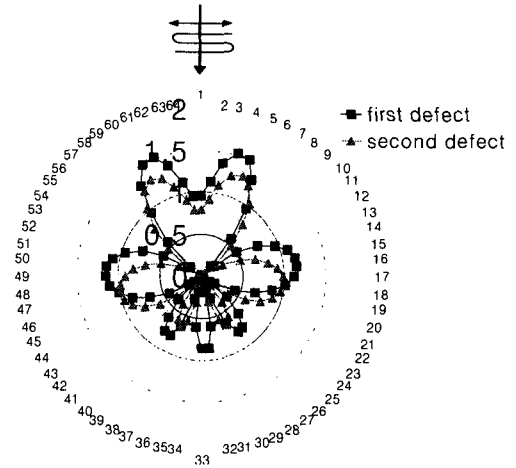


Fig. 10 Scattered displacement profiles of two elliptical defects subjected to SH-wave incidence in the polar coordinates ( $k_{Tr}=4.0$ )

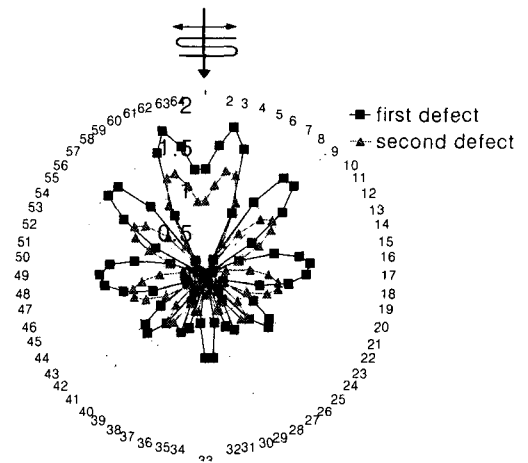


Fig. 11 Scattered displacement profiles of two elliptical defects subjected to SH-wave incidence in the polar coordinates ( $k_{Tr}=7.0$ )

에 대한 해석결과인 Fig. 11의 첫 번째 결함의 경우와 비교해보면 마찬가지로 전방산란 방향 즉,  $\theta=180^\circ$  부근에서 큰 차이가 있음을 알 수 있다. 이것은 첫 번째 결함과 두 번째 결함과의 상호작용에 기인한다. 그리고 Fig. 10과 Fig. 11의 두 번째 결함에 대한 결과를 살펴보면, 첫 번째 결함에 의한 반사계수의 변화와 매우 유사한 반사계수의 변화를 나타내지만 다소 반사계수의 감소를 나타낸다. 이는 첫 번째 결함에 의한 산란의 영향에 기인한다.

3.5. 원형 기공결함과 타원형 기공결함이 함께 존재하는 재료내의 산란장 해석

무한체내부에 존재하는 한 개의 원형 기공결함과 다른 한 개의 타원형 기공결합에서의 수평회파 산란장을 해석하기 위하여 Fig. 12에 나타난 것처럼, 원형 기공결합 둘레의 경계를 64개의 상수경계요소로, 마찬가지로 타원형 기공결합 둘레의 경계를 64개의 상수경계요소로 나누었다. 이때 단위 변위 진폭의 SH 입사파는 앞의 해석 문제들과는 다르게  $\theta=45^\circ$ 의 방향에서 무한대로부터 입사되고, 그때 원형 기공결합 및 타원형 기공결합의 표면에 대해서 산란된다.

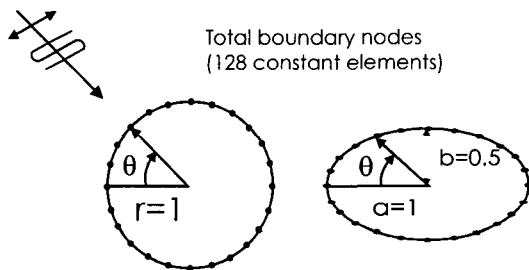


Fig. 12 BEM mesh discretization for a circular defect and an elliptical defect subjected to a time harmonic SH-wave

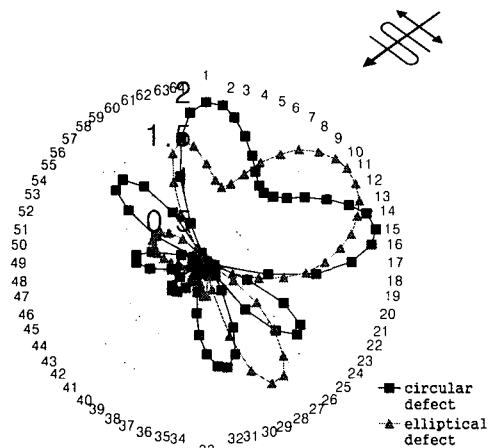


Fig. 13 Scattered displacement profiles of a circular defect and an elliptical defect subjected to SH-wave incidence in the polar coordinates

Fig. 13은 무차원 회파 파수,  $k_{TR}$  또는  $k_{Ta}$ 가 4.0 일 때의 원형 기공결합과 타원형 기공결합 표면에서의 반사계수의 변화를 극좌표계로 나타낸 것이다. SH 입사파의 입사각을  $45^\circ$  (절점 8번)로 경사지게 입사시켰을 때 먼저 원형 기공결합에 대한 반사계수의 변화를 살펴보면  $\theta=0^\circ$ 와  $90^\circ$  방향으로 주에너지(main energy)의 후방반사가 나타났고, 타원형 기공결합에 대한 반사계수의 변화를 살펴보면  $\theta=60^\circ \sim 70^\circ$  부근에서 주에너지의 후방반사가 나타남을 알 수 있다. 이것을 통해 SH 입사파를  $\theta=45^\circ$ 로 경사지게 입사시킴으로써 두 다른 결함의 신호를 분리하여 측정할 수 있으리라 기대된다.

4. 결론

본 연구에서는 경계요소법을 사용하여 무한탄성체에 존재하는 원형 혹은 타원형 형상의 두 기공결함에 대하여 수평회파가 입사될 때의 결함표면의 산란특성을 몇몇 경우에 대하여 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 수평회파의 무차원 회파 파수,  $k_{TR}(k_{Ta})$ 이 4.0일 때보다 7.0일 때가 결함 표면의 반사계수가 전반적으로 증가함을 알 수 있었다. 즉, 결함 탐상시 더 나은 결함 탐지 해상도(resolution)를 나타냄이 확인되었다.
2. 두 기공결함이 모두 원형 형상일 때와 모두 타원형 형상일 때를 비교한 경우 두 번째 결함이 원형 형상일 때는 첫 번째 원형 결함과 전혀 다른 산란특성을 나타내었지만, 타원형 형상일 때는 첫 번째 타원형 결함의 산란특성과 매우 유사한 특성을 보임을 알 수 있었다.
3. 원형 기공결함과 타원형 기공결함이 함께 존재하는 재료내의 산란장 해석에 있어서 SH 입사파를 비스듬히 입사시킴으로써 두 다른 결함의 신호를 분리하여 측정할 수 있으리라 기대된다.
4. 이들 다중 기공결함에 대한 산란특성의 수치해석 결과는 실제 다중 기공결함이 존재하는 구조물의 초음파 탐상시, 탐촉자의 최적 주파수 및 위치등을 결정하는 데 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

## 참고 문헌

- 1) J. H. Lee, "A Theoretical Study on Interface Characteristics of SiC Particulate Reinforced Metal Matrix Composite Using Ultrasonics", Journal of the Korean Society for Non-destructive Testing, Vol. 13, No. 4(1993), pp. 9-17
- 2) J. H. Lee and V. S. Ahn, "Development of Measuring Technique for Micro-Crack in Ceramic by High Frequency Acoustic Microscopy", J. Japan Soc. Str. Fracture Mats, Vol. 31, No. 2(1997), pp. 43-54
- 3) J. H. Lee, J. K. Lee and Y. H. Cho, "Thermal Shock Damage Behavior of Ceramics and Its Nondestructive Evaluation by Ultrasonic Lamb Wave", 대한기계학회 '97 춘계학술대회논문집 A(1997), pp. 242-246
- 4) Dimitri E. Beskos, "Boundary Element Methods in Mechanics", Elsevier Science Publishers B. V., (1987), pp. 191-256
- 5) C. H. Zhang and J. D. Achenbach, "Scattering by Multiple Crack Configurations", Transactions of the ASME, Vol. 55(1988), pp. 104-110
- 6) C. H. Zhang and J. D. Achenbach, "Effect of an Adjacent Cavity on the Interaction of Elastic Waves with a Crack", Int. J. Engng, Vol. 27(1989), pp. 711-722
- 7) Chao-Chow Mow and Yih-Hsing Pao, "The Diffraction of Elastic Waves and Dynamic Stress Concentrations", The Rand Corporation (1971)
- 8) C. A. Brebbia, "The Boundary Element Method for Engineers", Pentech press (1980)
- 9) Michihiro Kitahara, "Boundary Integral Equation Methods in Eigenvalue Problems", Elsevier Science Publishers B. V. (1985)
- 10) J. D. Achenbach, "Wave Propagation in Elastic Solids", Elsevier Science Publishers B. V. (1991)
- 11) S. C. Mellings and M. H. Aliabadi, "Flaw Identification Using the Boundary Element Method", International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 38(1995), pp. 399-419



## Numerical Analysis of Scattered Fields of Ultrasonic SH-Wave by Multi-Defects

Joon-Hyun Lee\*, Seo-Il Lee\*\* and Youn-Ho Cho\*\*\*

\* Materials Strength & NDE Group, RIMT, Pusan National University, Pusan 609-735

\*\* Graduate School, Pusan National University, Pusan 609-735

\*\*\* School of Mechanical and Automobile Engineering, Inje University, Kimhae 621-749

**Abstract** In order to assure the reliability and integrity of structures such as bridges, power and petrochemical plants, nondestructive evaluation techniques are recently playing more important roles. Among the various kinds of nondestructive evaluation techniques, ultrasonic technique is one of the most widely used methods for nondestructive inspection of internal defects in structures. For the reliable quantitative evaluation of internal defects from the experimental ultrasonic signals, a numerical analysis of ultrasonic scattering field due to a defect distribution is absolutely required. In this paper, the SH-wave scattering by multi-cavity defects using elastodynamic boundary element method is studied. The effects of shape of defects on transmitted and reflected fields are considered. The interaction of multi-cavity defects in SH-wave scattering is also investigated. Numerical calculation by the boundary element method has been carried out to predict near field solution of scattered fields of ultrasonic SH-wave. The presented results would be useful to improve the sensitivity of flaw deflection for inverse analysis and pursue quantitative nondestructive evaluation for inverse problem.