

경계요소법을 이용한 SH형 초음파 원거리 산란장 해석에 관한 연구

The Study on Scattered Far-Field Analysis of Ultrasonic SH-Wave Using Boundary Element Method

이준현*, 이서일**

Joon-Hyun Lee* and Seo-Il Lee**

초 록 가장 널리 이용되고 있는 대표적인 비파괴 평가 기술들중의 하나인 초음파 응용 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 무한체 내부에 존재하는 기공 결함에 의한 초음파 수평회파의 근거리 및 원거리 산란특성에 대하여 결함으로부터의 거리 영향을 고려하여 해석하였다. 이때 경계요소해석으로 구한 주파수 영역의 원거리 산란장을 실제 결함탐상시 관찰할 수 있는 시간영역의 신호로 나타내기 위하여 IFFT 처리를 하였다. IFFT 처리하여 얻은 파형으로부터 원형 기공결합파의 거리가 증가할수록 진폭은 감소하고 시간지연이 나타남을 알 수 있었다.

주요용어 : 비파괴평가, 수평회파, 기공결합, 동탄성 경계요소법, 고속 역푸리에 변환

Abstract It is well recognized that ultrasonic technique is one of the most common and reliable nondestructive evaluation techniques for quantitative estimation of defects in structures. For the quantitative and accurate estimation of internal defects, the characteristics of scattered ultrasonic wavefields must be understood. In this study, the scattered near-field and far-field due to a circular cavity embedded in infinite media subjected to incident SH-waves were calculated by the boundary element method. The frequency response of the scattered ultrasonic far-field was transformed into the time-domain signal by obtaining its inverse Fourier transform. It was found that the amplitude of time-domain signal decreases and its time delay increases as the distance between the detecting point of ultrasonic scattered field and the center of internal cavity increases.

Keywords: nondestructive evaluation, SH-wave, cavity, elastodynamic boundary element method, inverse fast fourier transform

1. 서 론

구조물 혹은 기계부품에 있어서의 각종 내부결함들의 존재는 초기의 설계수명에 대한 수명단축을 가져오는 주요한 원인이 된다. 특히 최근 국내에서 발생한 성수대교, 삼풍백화점 붕괴사고 등의 실례에서 보여주는 바와 같이 구조물의 안전성 확보를 위하여 비파괴평가 기

술개발의 중요성이 크게 대두되고 있고 최근 국내에서도 결함평가를 위한 비파괴평가 기술과 관련된 다수의 연구결과가 보고되고 있다[1-3].

한편 각종 구조물들의 안전성 확보를 위한 비파괴검사 기술에는 비교적 다양한 각종 비파괴검사 방법들이 이용되고 있으나 특히, 이 중에서 초음파 응용 기술은 기존의 타방법과 비교해 검사방법 및 그 결과에 있어서

의 높은 신뢰성으로 인해 현장에서 비교적 널리 이용되고 있는 대표적인 비파괴검사 적용기술들 중의 하나이다. 일반적으로 초음파를 이용한 비파괴평가 기술은 결합에 의한 산란신호를 통해 재료의 건전성을 평가하는 것이므로 보다 정량적이고 신뢰성 높은 결합평가를 위하여는 주파수, 탐촉자 위치와 같은 측정조건외의 개선, 산란신호특성의 기본적인 이해 그리고 산란특성 해석을 위한 수치해석 연구가 필수적이다. 재료내의 임의 결합에 의한 초음파 산란장 해석에는, 무한체내에서의 해석의 용이함에 기인하여 동탄성 경계요소법(elastodynamic boundary element method)[4]이 사용되고 있다. Hirose 등[5]은 중파가 재료내부에 입사하는 경우 재료내부 균열에 의한 탄성과 산란 문제를 해석하였고, Achenbach 등[6]은 단일 균열면의 일부가 접촉되었을 경우 두 개의 균열이 인접해 있는 것으로 가정하여 다중 균열에 의한 산란특성을 해석하였으며, Bose 등[7]은 등방성 무한기체에 포함된 무한고체에서의 수평횡파(SH-wave) 산란문제를 해석하였다.

본 연구에서는 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)[8]을 이용하여 시간영역의 신호로 나타낼 필요가 있다. 이를 위해서는 재료내부 결함으로부터 임의의 거리만큼 떨어진 매질 내부점에서의 원거리 산란장 해석이 필수적으로 요구된다. 본 연구에서 사용한 근거리와 원거리 용어는 결합표면과 매질내부를 의미하는 것으로 참고문헌[9]에서 통용되는 의미와 다르다는 것을 먼저 밝혀둔다. 최근 경계요소법을 이용한 재료내부 결함에 대한 수평횡파(SH-wave)의 근거리 산란장 해석[10, 11]이 저자들에 의해 수행되어져 왔으나 이들 문제들에 대한 원거리 산란장 연구는 거의 발표되지 않은 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 동탄성 경계요소법을 이용하여 원형 기공결함이 존재하는 재료에 대한 결합 표면에서의 근거리 산란장과 결함으로부터 임의의 거리만큼 떨어진 매질 내부점에서의 원거리 산란장을 해석하였다. 또한 이때 경계요소해석으로 구한 주파수 영역(frequency-domain)의 원거리 산란장을 실제 결합탐

상시 관찰할 수 있는 시간영역의 신호로 나타내기 위하여 IFFT 처리하여 그 신호특성에 대하여 고찰하였다.

2. 모델링 및 경계 요소 해석 결과

본 연구에서 이용된 동탄성 경계요소법에 관한 이론은 참고문헌[10]에 잘 나타나 있다. 본 연구에서 사용된 입사파는 수평횡파이며, 경계요소 모델링에서 경계 요소는 상수요소(constant element)를 사용하여 총 요소수와 총 절점수는 같다. 시간간화 수평횡파 입사시 무한체 내부에 존재하는 원형 기공결함에 의한 근거리 및 원거리 산란장을 해석하였다. 또한 이때 구해진 주파수 영역의 원거리 산란장을 IFFT 처리하여 시간영역의 신호로 나타내었다. 본 연구의 결과에서 이용된 정규화된 산란파 변위(normalized scattered wave displacement)는 산란파 변위와 입사파 변위의 비 즉, u_{x3}/u' 로서 정의되고, 이때 주파수 파라미터는 무차원 횡파 파수 $k_r r$ 로서 정의된다. 여기서 k_r 는 횡파 파수이고, r 은 원형 결함의 반경이다.

2. 1. 원형 기공결함에서 수평횡파 근거리 및 원거리 산란장

본 연구에서는 Fig. 1과 같은 무한체 내부에 존재하는 원형 기공결함에 대한 수평 횡파 근거리 및 원거리 산란장을 해석하기 위하여 Fig. 2에 나타난 것처럼, 원형 기공결함 둘레의 경계에서 64개의 상수요소로 나누었고 기공결함의 중심에서 거리 d만큼 떨어진 무한체 내부의 64개 지점을 선택하였다. 기공결함 표면에서 경계조건은 자유표면(free surface) 경계조건으로 하였고, 단위 변위 진폭의 SH 입사파가 $\theta=0^\circ$ 방향에서 무한

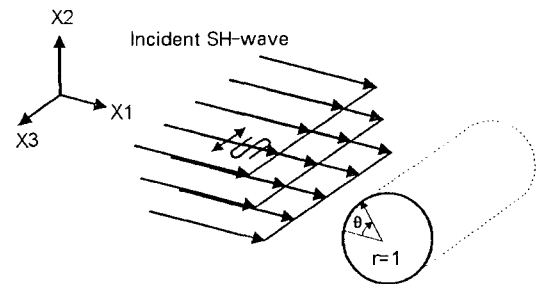


Fig. 1 A circular defect subjected to a time harmonic SH-wave

대로부터 입사된다고 가정하였다. 그때 단위 반경($r=1$)의 원형 기공결함 표면에 의해서 산란된다.

Fig. 3은 무차원 횡파 파수 $k_r r$ 이 4.0일 때, 원형 기공결함 표면에서 원주각(circumferential angle) θ 의 변화에 대한 정규화된 산란파 변위 변화를 극좌표계로 나타낸 것으로 1번부터 64번까지는 단일 원형 기공결함 둘레의 노드점을 나타내고, SH 입사파는 $\theta=0^\circ$ 방향 즉, 노드점 1번 방향으로 입사된다. 본 연구에서는 동탄성 경계요소 해석 프로그램의 검증에 의해 원형 기공결함에 대하여 급수전개식(series expansion form)으로 주어진 잘 알려진 기존의 해석적 해(4)와 비교하였다. Fig. 3에서 실선으로 표시된 부분은 기존의 해석해 결과이며 기호표시는 본 연구에서 수행된 경계요소해석 결과이다. Fig. 3의 결과에서 보여주는 바

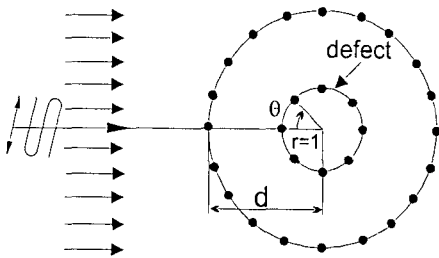


Fig. 2 BEM mesh discretization for a circular defect subjected to a time harmonic SH-wave

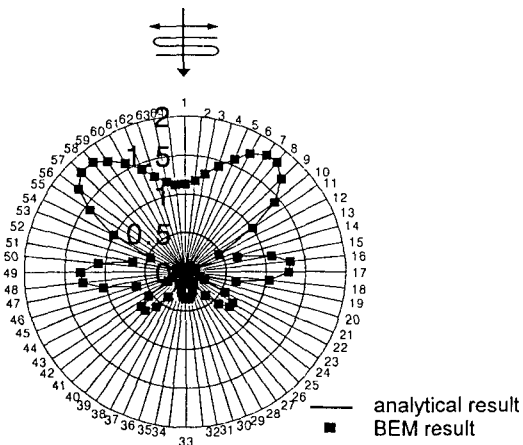


Fig. 3 Near-field scattered wave displacement profiles of a circular defect in the polar coordinates ($d=1, k_r r=4.0$)

와 같이 본 연구에서 수행된 경계요소법에 의한 해석 결과는 기존의 해석해 결과와 좋은 일치를 보이고 있다.

Fig. 4, 5, 6은 각각 수평횡파의 무차원 wave number $k_r r$ 이 4.0일 때, 원형 기공결함 중심에서 거리 d 가 각각 10, 50, 100인 지점들에서 θ 의 변화에 대한 정규화된 산란파 변위 변화를 극좌표계로 나타낸 것이다.

Fig. 3의 근거리 산란장과 Fig. 4, 5, 6의 원거리 산란장을 비교해보면 원형 기공결함과의 거리 d 가 증가할수록 원주방향을 따라서 정규화된 산란파 변위가 현

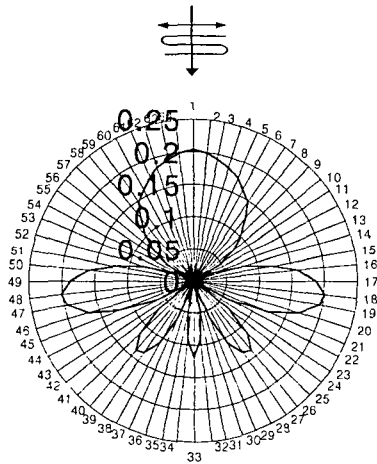


Fig. 4 Far-field scattered wave displacement profiles of a circular defect ($d=10, k_r r=4.0$)

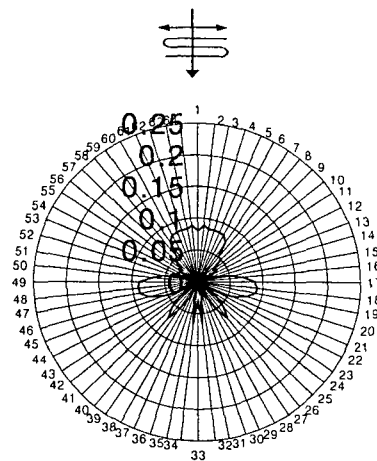


Fig. 5 Far-field scattered wave displacement profiles of a circular defect ($d=50, k_r r=4.0$)

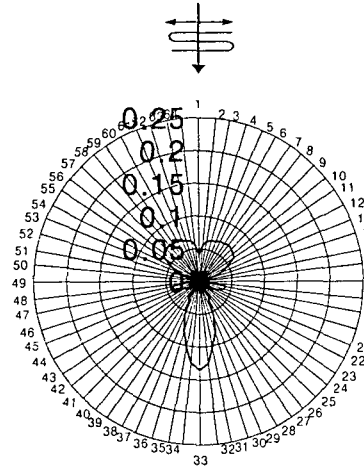


Fig. 6 Far-field scattered wave displacement profiles of a circular defect ($d=100, k_r r=4.0$)

저히 감소함을 알 수 있다. 이것은 원형 기공결합과의 거리 d 가 증가할수록 결합으로부터 산란되어 나온 수평 횡파의 에너지 밀도가 감소하기 때문이다.

2.2. IFFT의 검증

본 연구에서는 동탄성 경계요소법을 이용하여 구한 주파수 영역의 원거리 산란장을 실제 결합탐상시 관찰할 수 있는 시간 영역의 파형으로 나타내기 위하여 IFFT 처리를 하였다. Fig. 7은 본 연구에서 이용되어진 IFFT의 검증을 위해 실제 디지털 오실로스코프로 부터 얻은 시간영역의 파형을 나타낸 것으로 시험편은 고강도 경량화 재료로써 항공기 구조용 재료로 많이 사용되는 가로×세로×두께가 48×120×20mm인 Al

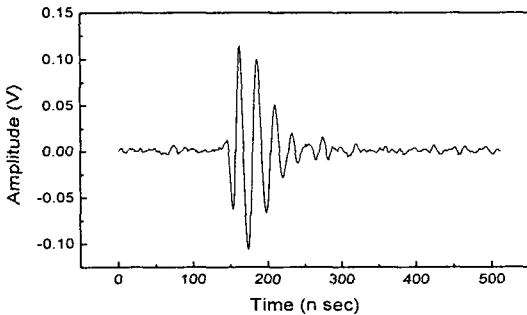


Fig. 7 Time domain waveform to be transformed

6061을 이용하였다. 실험장치로는 5MHz 종파 탐촉자에 펄스를 가하여 탐촉자에서 초음파를 발생하도록 하고 시험편 저면에서 되돌아오는 초음파 신호를 수신할 수 있는 펄서 리시버(pulsar receiver)와 초음파 신호를 모니터링 할 수 있는 디지털 오실로스코프 (LeCroy 9310A)를 사용하였다. Fig. 7의 파형은 시험편 저면에서 되돌아오는 신호부분을 나타낸 것이다. Fig. 8과 Fig. 9는 IFFT 처리를 하기 위하여 먼저

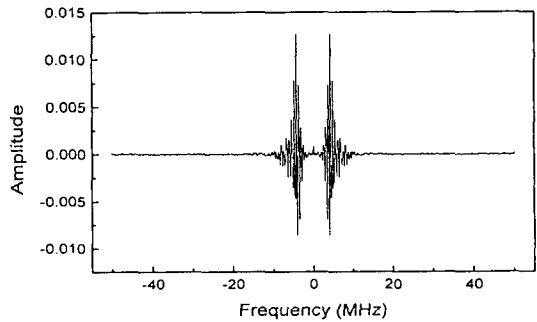


Fig. 8 Real part of frequency-domain response

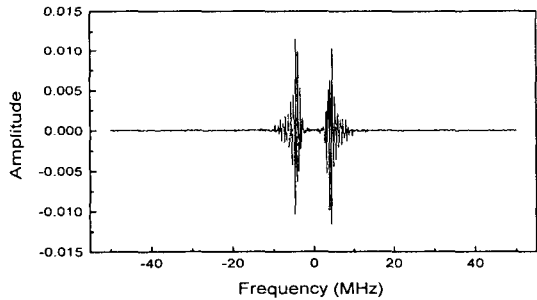


Fig. 9 Imaginary part of frequency-domain response

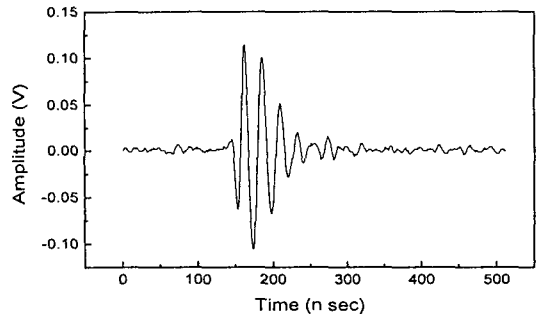


Fig. 10 IFFT of Fig. 8 and Fig. 9

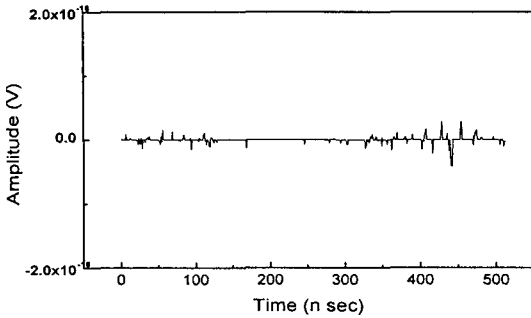


Fig. 11 Difference between original waveform (Fig. 7) and IFFT (Fig. 10)

Fig. 7의 시간영역의 파형을 FFT 처리하여 구한 주파수 영역의 실수부(real part)와 허수부(imaginary part)를 나타낸 것이다. Fig. 10은 Fig. 7의 파형을 FFT 처리하여 구한 주파수 영역의 실수부(Fig. 8)와 허수부(Fig. 9)로부터 IFFT 처리하여 재생된 파형이다. 그리고 Fig. 11는 Fig. 7의 디지털 오실로스코프로부터 얻은 원파형과 Fig. 10의 IFFT 처리하여 재생된 파형과의 진폭의 차를 구하여 나타낸 것으로써 두 파형의 진폭오차는 극히 미소함을 알 수 있다.

2.3. 원형 기공결함에 대한 원거리 산란장의 IFFT

본 연구에서는 원형 기공결함과의 거리 d 와 SH 입사파와의 각도 θ 의 변화에 대한 원거리 산란특성을 해석하기 위하여 Fig. 12에 나타낸 것처럼, 반경 r 이 1인 원형 기공결함 둘레의 경계를 64개의 상수요소로 나누었고 무한체 내부의 6개 지점(θ 가 0° 이고 d 가 10, 50, 100인 지점과 d 가 10이고 θ 가 $30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ 인 지점)을 선택하였다. 단위 변위 진폭의 SH 입사파는 $\theta=0^\circ$ 의 방향에서 무한대로부터 입사되고, 원형 기공결함 표면

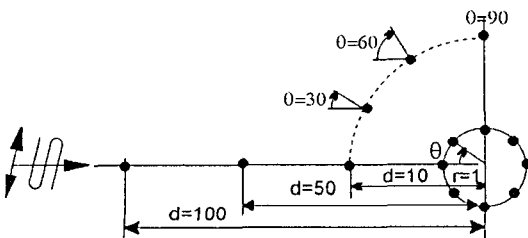


Fig. 12 BEM mesh discretization for a circular defect

에 의해서 산란된다.

Fig. 13과 Fig. 14는 SH 입사파와의 각도 θ 가 0° 이고 원형 기공결함과의 거리 d 가 10, 50, 100인 지점에서의 wave number 변화에 대한 정규화된 산란파 변위 변화를 나타낸 것으로 각각 실수부와 허수부를 나타낸 것이다. 결과에서 알 수 있는 것처럼 결함과의 거리 d 가 증가할수록 정규화된 산란파 변위 변화가 현저히 감소하지만 사이클 수가 증가함을 알 수 있다. 이것은 d 가 클수록 Hankel 함수들의 값이 k_r 의 증가에 따라 빠르게 변화하기 때문으로 판단된다. 이 주파수 영역의 실수부와 허수부를 실수부에 대해서는 y축 대칭을, 그리고 허수부에 대해서는 원점 대칭을 시켜 IFFT 처리(8)를 하였다. Fig. 15는 경계요소해석으로 구한 주파수 영역의 실수부와 허수부인 Fig. 13과 Fig. 14의 데이터로부터 IFFT 처리하여 얻은 시간영역의 파형을 나타낸 것으로 시간축 크기는 상대적인 크기로 나타낸

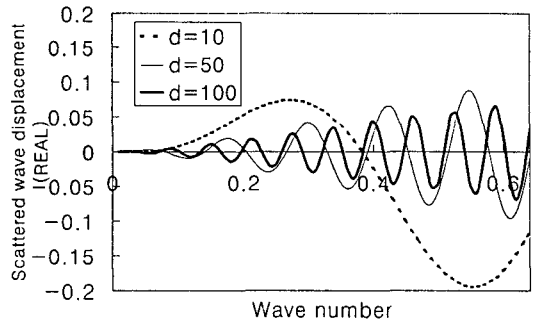


Fig. 13 Scattered wave displacement(REAL) versus wave number ($\theta=0^\circ, d=10, 50, 100$)

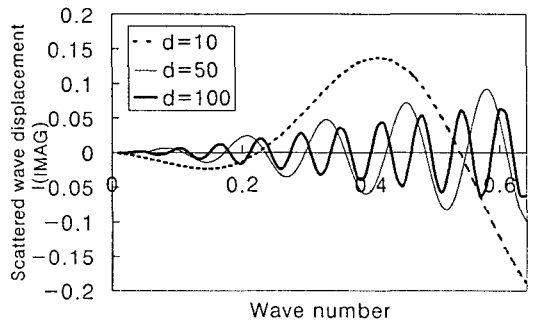


Fig. 14 Scattered wave displacement(IMAG) versus wave number ($\theta=0^\circ, d=10, 50, 100$)

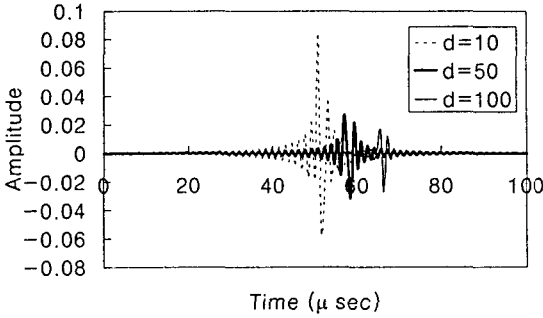


Fig. 15 The IFFT of the frequency-domain response for various values of d

것이다. 결과에서 보여주는 바와 같이, 원형 기공결합과의 거리 d 가 증가함에 따라 산란감쇠의 영향으로 진폭이 현저히 감소하며 결합과의 거리 d 의 변화에 의한 시간 영역상에서 시간지연이 나타남을 확인할 수 있다.

Fig. 16과 Fig. 17은 원형 기공결합과의 거리 d 가 10이고 SH 입사파와의 각도 θ 가 각각 30° , 60° , 90° 인 지점에서 wave number 변화에 대한 정규화된 산란파 변위 변화를 나타낸 것으로 각각 실수부와 허수부를 나타낸 것이다. 결과에서 알 수 있는 것처럼 SH 입사파와의 각도 θ 가 증가할수록 정규화된 산란파 변위 변화가 현저히 감소함을 알 수 있다. Fig. 18은 경계요소 해석으로 구한 주파수 영역의 실수부와 허수부인 Fig. 16과 Fig. 17의 데이터로부터 IFFT 처리하여 얻은 시간영역의 파형을 나타낸 것이다. 결과에서 보여주는 바와 같이, SH 입사파와의 각도 θ 가 증가함에 따라 반사파의 에너지 밀도가 감소하여 진폭은 현저히 감소함을 알 수 있다. 그러나 결합으로부터의 거리 d 가

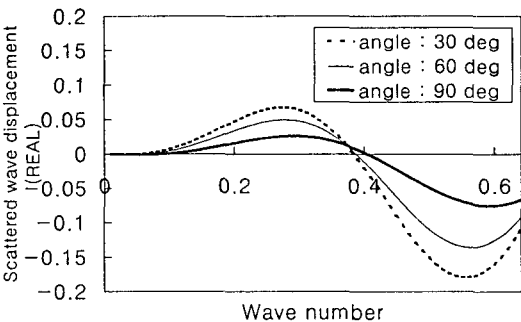


Fig. 16 Scattered wave displacement(REAL) versus wave number ($d=10$, $\theta=30^\circ$, 60° , 90°)

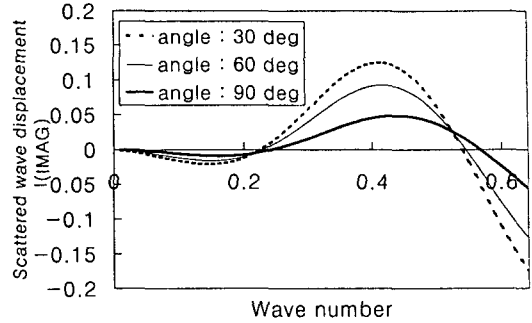


Fig. 17 Scattered wave displacement(IMAG) versus wave number ($d=10$, $\theta=30^\circ$, 60° , 90°)

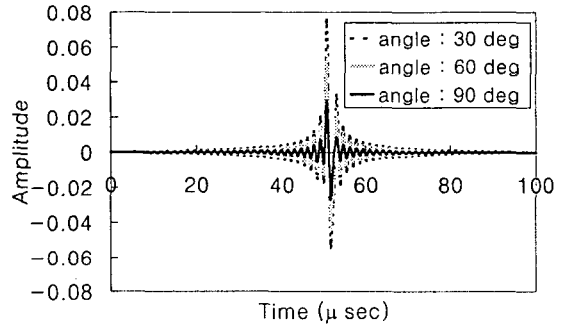


Fig. 18 The IFFT of the frequency-domain response for various values of θ

일정하므로 θ 가 변하더라도 시간 영역상에서 시간지연이 나타나지 않음을 알 수 있다.

3. 결론

본 연구에서는 경계요소법을 이용하여 무한체내부에 존재하는 원형의 기공(cavity) 결합에 대하여 수평회파 근거리 산란장과 임의의 거리만큼 떨어진 매질 내부 점에서의 원거리 산란장을 해석하였고, 이때 구해진 주파수 영역의 원거리 산란장을 IFFT 처리하여 시간영역의 신호로 나타내어 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 원거리 산란장에서 원형 기공결합과의 거리 d 가 증가할수록 결합으로부터 산란되어 나온 수평회파의 에너지 밀도 감소에 기인하여 결합의 원주방향을 따라서 정규화된 산란파 변위가 현저히 감소함을 알 수 있었다.

2. 동탄성 경계요소법을 이용하여 기공결함이 존재하는 재료에서 결함으로부터 임의의 거리만큼 떨어진 매질 내부점에서의 원거리 산란장을 해석하여 구한 주파수 영역의 실수부와 허수부를 IFFT 처리하여 시간 영역의 파형으로 나타낼 수가 있었다.
3. IFFT 처리하여 얻은 파형으로부터 원형 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.
4. 원형 기공결함에 대한 원거리 산란특성의 수치해석 결과는 실제 기공결함이 존재하는 구조물의 초음파 탐상시, 탐촉자의 최적의 위치 그리고 기공결함의 위치 등을 결정하는 데 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

- [1] 이준현, "초음파를 이용한 입자강화 금속복합재료의 계면특성에 관한 이론적 연구", 한국비파괴검사학회지, Vol. 13, No. 4, pp. 9-17, (1993)
- [2] J. H. Lee and B. 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, pp. 43-54, (1997)
- [3] 이준현, 이진경, 조운호, "세라믹의 열충격 손상거동 및 초음파 Lamb파를 이용한 비파괴적 손상평가", 대한기계학회논문집 A권, 제 22권 제 12호, pp. 2278-2285, (1998)
- [4] D. E. Beskos, Boundary Element Methods in Mechanics, Elsevier Science Publishers B. V., pp. 191-256, (1987)
- [5] S. H. Hirose and Y. Niwa, "Scattering of elastic waves by a three dimensional crack", Boundary Elements VII Conference, pp. 169-179, (1986)
- [6] C. H. Zhang and J. D. Achenbach, "Scattering by multiple crack configurations", Journal of Applied Mechanics, Transactions of the ASME, Vol. 55, pp. 104-110, (1988)
- [7] S. K. Bose and A. K. Mal, "Longitudinal shear waves in a fiber-reinforced composite" Int. J. Solids Structures, Vol. 9, pp. 1075-1085, (1973)
- [8] R. W. Ramirez, The FFT Fundamentals and Concepts, Prentice Hall PTR, pp. 76-91, (1985)
- [9] L. E. Kinsler, A. R. Frey, A. B. Coppen and J. V. Sanders, Fundamentals of Acoustics, John Wiley & Sons, pp. 178-188, (1982)
- [10] 이준현, 이서일, 조운호, "재료내 다중결함에 의한 SH형 초음파 산란장의 수치해석", 한국비파괴검사학회지, Vol. 18, No. 4, pp. 304-312, (1998)
- [11] 이준현, 이서일, "경계요소법을 이용한 다중결함의 SH형 초음파 산란장 해석에 관한 연구", 대한기계학회논문집 A권, 제 23권, 제 11호, pp. 1878-1885, (1999) 인쇄 중
- [12] C. A. Brebbia, The Boundary Element Method for Engineers, Pentech press, (1980)
- [13] M. Kitahara, Boundary Integral Equation Methods in Eigenvalue Problems, Elsevier Science Publishers B. V., (1985)