

위상배열 유도초음파 검사의 이론적 고찰

The Theoretical Investigation of Phased Array Guided Waves

이재선*, 조운호*[†], Jan D. Achenbach**

Jaesun Lee*, Younho Cho*[†] and Jan D. Achenbach**

초 록 유도초음파를 활용한 진단 기술은 기존의 체적파를 이용한 진단 기법과 달리 장거리 진단의 장점 때문에 널리 사용된다. 대부분의 산업현장에서는 배관이 코팅되어 있거나 땅속이 묻혀있다. 이러한 경우 감쇠의 영향으로 기존의 방식으로는 진단에 어려움이 있다. 본 연구에서는 배관에서 전파되는 유도초음파 전파 모드별 음장을 직교모드확장기법을 이용하여 계산하였다. 단일 탐촉자에 의해 전파되는 유도초음파의 음장과 다중 탐촉자 모델링을 바탕으로 배관에서 전파되는 음장 특성을 해석하기 위해 유도초음파 모드별 집속 기술이 사용되었다. 추가적으로 배관에서 전파되는 유도초음파를 가진하는 탐촉자의 개수에 따른 집속 민감도가 종형 모드와 횡형 모드를 이용하여 계산되었다. 본 연구를 통하여 단일 탐촉자에 의해 가진된 유도초음파와 집속 알고리즘을 적용한 다중 탐촉자에 의해 가진된 음장을 비교하여 높은 에너지가 집속 되는 것을 확인 하였다.

주요용어: 유도초음파, 직교모드확장기법, 집속기술, 배관 진단

Abstract Guided waves inspection techniques that are different with inspection technique by bulk waves are widely used in pipe line evaluation due to advantages of long distance inspection. However, most of pipe lines at industrial fields are buried and/or coated. In this case, due to the attenuation effect from soil and/or coating material, there are a lot of difficulty on inspection by conventional ultrasonic technique. In this paper, guided waves propagating patterns are calculated with respect to excitation mode by Normal Mode Expansion(NME). Guided waves patterns based on excited by single transducer and guided wave focusing technique have employed to analyze focusing pattern on a pipe. A longitudinal mode and high order flexural modes are used with various number of transducers to determine sensitivity. Guided waves energy excited by multi transducer with focusing algorithm was successfully focused at a desired point.

Keywords: Guided Waves, Normal Mode Expansion, Focusing Technique, Pipe Inspection

1. 서론

현대 산업의 발달과 눈부신 경제 성장으로 발전, 정유 산업을 비롯한 토목, 건축물의 규모가 대형화 되었다. 이러한 대형 구조물은 산업의 기간을 이루고 있는 중요한 구조물로 붕괴 및 폭발, 화재 등의 사고 발생 시 막대한 인명, 재산, 환경적 피해를 가져올 수 있다. 따라서 이와 같

은 대형 구조물의 안전 진단은 무엇보다도 우선시 되어야하는 중요한 사항이다. 이러한 구조물의 파손은 장시간 이루어진 노화 및 부식, 부분적인 결함이 성장하여 이루어진 것으로 이를 진단하기 위한 기술의 필요성이 증가되고 있다. 산업 설비에 사용되는 배관의 경우 지름의 크기가 다양하고, 길이가 수십 미터에 이른다. 그리고 평판형 재료는 길이가 길고, 크기가 커 기존의 초

음파 방법으로 진단하기에는 비용과 시간이 많이 소요되므로, 장거리, 광범위 진단을 위해 유도초음파(guided waves)를 활용한 기법들이 연구되고 있다. 유도초음파를 활용한 비파괴 진단 연구는 선행 연구자들에 의해 활발히 연구되어왔다. 유도초음파 진단 기법은 평판과 배관 구조물뿐만 아니라 항공기 안전진단에도 활발히 활용되고 있다[1,2].

파이프나 튜브와 같은 원통형 재료에 대한 연구는 자유표면 경계조건하의 등방성, 균질 단일 원통구조에 대한 Gazis의 연구를 통해 이론적으로 제시되었다. Gazis는 처음으로 원통형 좌표계에서 유도초음파의 전파모델의 해를 구하였다[3,4]. 미국의 Rose와 영국의 Cawley 등에 의해 주도되어온 연구결과는 세부 응용사례별로 유도초음파의 탐촉자를 제작하고 최적의 모드선택과 신호해석의 기준을 유도초음파의 물리적인 특성에 기초하여 제시함으로써 유도초음파 검사법의 실용화를 가능케 하였다. Gazis의 연구를 바탕으로 Ditri와 Rose에 의해 무한 실린더에서 상반 정리를 활용하여 전개가 되는 직교성을 가진 모드가 존재함을 밝혔다[3-5]. Gazis의 연구를 바탕으로 Ditri와 Rose에 의해 무한 실린더에서 상반 정리를 활용하여 전개가 되는 직교성을 가진 모드가 존재함을 밝혔다. 그리고 normal mode expansion(NME)기법을 이용하여 유한한 크기의 가진 조건에 의해 가진된 배관 내 전파하는 유도초음파의 전파 특성을 분석하는 연구를 수행되었다[5]. 위상배열 집속화 기술은 유도초음파 기술의 적용분야 보다는 레이더, 체적파와 같은 분야에서 많이 사용되어왔다. 2002년에 Li와 Rose가 단일 탐촉자에 의한 음장을 알 수 있다면 다중 탐촉자를 활용하여 시간지연과 입력 전압의 조절로 미리 계산된 방향과 지점에 음장을 집속화 할 수 있다는 연구를 발표하였다[6,7].

본 연구에서는 Gazis에 의해 제안된 배관 내 유도초음파 전파 모드의 이론적 해석에 대한 선행연구[3-5]를 바탕으로 배관에서의 유도초음파 모드별 음장(Wave profile)을 계산하였다. 그리고 매설, 피복되어있는 환경에서도 결함 진단을 위해 다중 탐촉자를 활용한 전파 거리와 각도에 따른 에너지 집속 기술 개발을 수행하였다.

2. 이론적 배경

2.1. 배관에서의 유도초음파 이론

등방성 균질 탄성관에서 Navier 운동방정식은 식(1)과 같이 표현된다[8,9].

$$\mu \nabla^2 \vec{u} + (\lambda + \mu) \nabla (\nabla \cdot \vec{u}) = \rho (\partial^2 \vec{u} / \partial t^2) \quad (1)$$

여기서 λ 과 μ 는 Lamé 상수이고, ρ 는 밀도를 나타내며, \vec{u} 는 변위 벡터를 나타낸다. Fig. 1은 원통형 좌표계를 나타낸다. 그리고 여기서 경계조건으로 배관의 안쪽과 바깥쪽 표면에서의 표면력(traction)이 0이 된다. 식(2)의 헬름홀츠 분해정리를 이용하여 변위를 벡터와 스칼라로 분해할 수 있다.

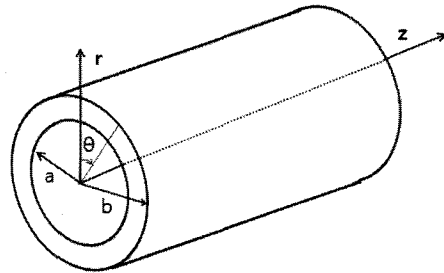


Fig. 1 The cylindrical coordinates

$$\vec{u} = \nabla \phi + \nabla \times \vec{H} \quad (2)$$

여기서 $\nabla = \frac{\partial}{\partial r} \hat{e}_r + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \hat{e}_\theta + \frac{\partial}{\partial z} \hat{e}_z$ 이고, ϕ 는 스칼라 준위함수를 나타내며, \vec{H} 는 벡터 준위함수를 나타낸다. 변위 \vec{u} 는 식(2)에서 확장하여 식(3)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} u_r &= \frac{\partial \phi}{\partial r} + \frac{1}{r} \left(\frac{\partial H_z}{\partial \theta} - r \frac{\partial H_\theta}{\partial z} \right) \\ u_\theta &= \frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial \theta} - \left(\frac{\partial H_z}{\partial r} - \frac{\partial H_r}{\partial z} \right) \\ u_z &= \frac{\partial \phi}{\partial z} + \frac{1}{r} \left(H_\theta + r \frac{\partial H_\theta}{\partial r} - \frac{\partial H_r}{\partial \theta} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

게이지 조건은 식(4)과 같으며, 파동 방정식에서 종파와 횡파를 분할하기 위해 사용된다.

$$\nabla \cdot \vec{H} = 0 \quad (4)$$

식(2)를 식(1)에 대입하고, 식(4)을 사용하여 식(5)와 식(6)을 구할 수 있다.

$$\nabla^2 \phi = \frac{1}{C_L^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} \quad (5)$$

$$\nabla^2 \vec{H} = \frac{1}{C_T^2} \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} \quad (6)$$

여기서 C_L 은 종파 속도이고, C_T 는 횡파 속도이다. Fig. 2는 외경이 88 mm이고, 두께가 5 mm인 탄소강에서 전파 가능한 유도초음파 모드를 나타내는 위상속도 분산선도이고, Fig. 3은 동일한 배관의 군속도 분산선도이다.

2.2. 유도초음파 직교모드 진폭

원통형 배관에서는 분산선도 상에 존재하는 고유치와 특성해를 만족하는 무한개의 모드가 전파된다. 이 모드들은 수학적으로 서로 직교성을 가

지고 있어 직교모드라고 부른다. 직교모드확장 기법은 특정한 가진 조건에 의해 배관에서 발생되는 무한개의 모드의 전파 특성을 구하는 방법이다. 식(7)은 전파되는 파동속도를 나타내는 식이고, 식(8)은 응력을 나타내며, 각 모드는 n 번째 차수에 m 번째 모드를 나타낸다.

$$V_m^n(r, \theta) e^{i(\omega t - k_m^n z)} = \sum_{a=r, \theta, z} R_{ma}^n(r) \Theta_a^n(n\theta) e^{i(\omega t - k_m^n z)} \hat{e}_a \quad (7)$$

$$T_m^n(r, \theta) e^{i(\omega t - k_m^n z)} = \sum_{\alpha} \sum_{\beta} R_{m\alpha\beta}^n(r) \Theta_{\alpha\beta}^n(n\theta) e^{i(\omega t - k_m^n z)} \hat{e}_{\alpha} \otimes \hat{e}_{\beta}, \quad \alpha, \beta \in r, \theta, z \quad (8)$$

여기서 $R_{ma}^n(r)$ 와 $R_{m\alpha\beta}^n(r)$ 은 반지름 방향의 분포도이고, $\Theta_a^n(n\theta)$ 와 $\Theta_{\alpha\beta}^n(n\theta)$ 는 각도 방향의 분포도이다. 위의 식에서 보는 것과 같이 파동 속도와 응력은 배관에서의 전파 거리 z 와 시간 t 에 독립적임을 알 수 있다. 반지름 방향의 함수인 R 은 Bessel 또는 수정된 Bessel함수 1,2종으로 표현되며, 각도방향의 함수인 Θ 는 삼각함수로 표현된다. 유도초음파가 배관에서 전파되는 경우 전파되는 모드와 각도, 거리에 따라 각각의 진폭을 식(9)과 같이 계산할 수 있다[8,9].

$$A_{i_n}^M(z) = \frac{R_{nr}^M(b) e^{-k_m^M z}}{4P_{nn}^{MM}} \langle \Theta_r^M \cdot p_1(\theta) \rangle \cdot \langle p_2(z) \cdot e^{ik_m^M z} \rangle \quad (9)$$

여기서, $R_{nr}^M(b)$ 는 배관 바깥쪽 경계면에서의 반경방향 속도이며, $4P_{nn}^{MM}$ 은 특성 모드의 가중치이다. $\langle \Theta_r^M \cdot p_1(\theta) \rangle$ 는 각도 방향의 가진된 음장의 변화량이며, $\langle p_2(z) \cdot e^{ik_m^M z} \rangle$ 는 축방향의 가진된 음장의 변화량이다.

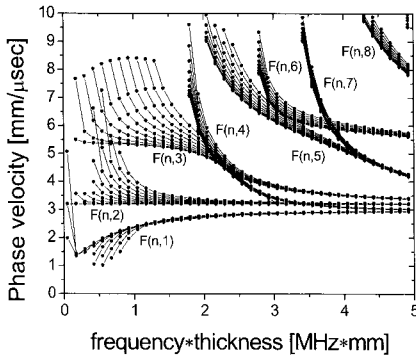


Fig. 2 Phase velocity dispersion curves of non-axisymmetric flexural waves in carbon steel pipe of 88 mm outer diameter, 5 mm thickness

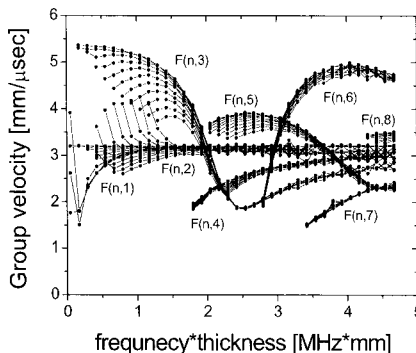


Fig. 3 Group velocity dispersion curves of non-axisymmetric flexural waves in carbon steel pipe of 88 mm outer diameter, 5 mm thickness

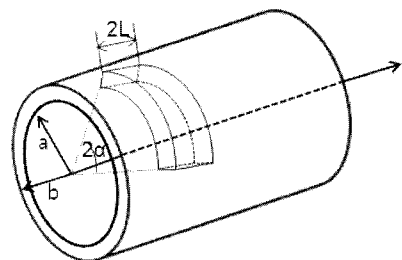


Fig. 4 An isotropic elastic hollow cylinder loaded by an ultrasonic transducer

Fig. 4는 배관에서 단일 탐촉자로 가진되는 형상을 모델링한 것으로 식(9)에서 p_1, p_2 은 탐촉자로부터 가진되는 균일 압력이며, α 는 탐촉자가 배관의 표면을 각도방향으로 접촉하는 각도의 절반에 해당된다. 그리고 L 은 탐촉자가 배관의 표면과 길이방향으로 접촉하는 길이의 절반에 해당된다.

진 하는 모델을 기준으로 계산을 하였다. Fig. 5에서 보여주는 결과는 정규화하여 음장을 비교한 그래프이다. 원주방향 변위 분포도는 배관에서 전파 가능한 모드별 동일한 주파수에서 파동 원주차수에 따라 속도차이에 의해 발생된다.

3. 배관에서 유도초음파 집중

3.2. 유도초음파 진폭 해석의 정확성 평가

3.1. 단일 탐촉자에 의한 유도초음파 음장

본 논문에서 개발된 직교모드확장기법을 사용하여 유한한 크기의 음원으로부터 가진된 유도초음파가 임의의 전파 거리에서 나타나는 원주방향 변위 분포도 계산 프로그램 데이터 정확성을 확인하기 위하여 여러 가지 기본적인 물리적인 데이터를 비교하였다. 가진 조건 중 각도방향 변수인 α 의 값을 배관의 전체원주를 감싸는 형태로 가진 하였을 경우 비틀림형 모드가 가진되어야 하며, 이에 따른 그래프는 Fig. 6과 같다.

본 논문에서는 바깥지름이 88 mm이고, 두께가 5 mm인 탄소강을 이용하여 이론적 해석을 하였다. Fig. 5는 45°, 300 kHz로 가진된 배관에서의 $L(0,2)$ 모드를 기준으로 고차모드인 $F_L(1,2)$ 모드부터 $F_L(10,2)$ 모드의 원주방향 변위 분포도를 보여준다. 여기서 탐촉자는 배관의 상부인 0°에 위치하여 가

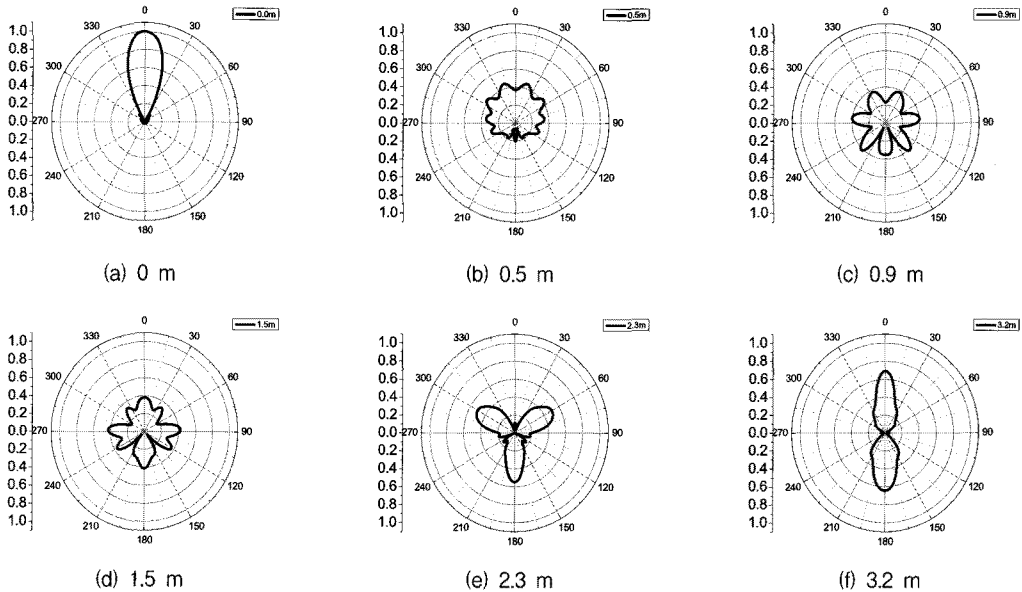


Fig. 5 Angular profile of the modes from $L(0,2)$ to $F_L(10,2)$ generated by a 45° circumferential loading at 300 kHz in carbon steel pipe of 88 mm outer diameter, 5 mm thickness with respect to propagation distance

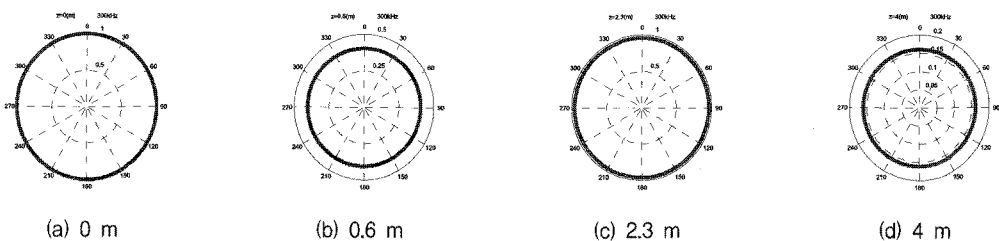


Fig. 6 Angular profile of 360° circumferential loading condition at 300 kHz with respect to propagation distance

본 논문에서 개발된 프로그램에서는 가진 조건이 배관의 바깥표면에 수직으로 가해지는 압력이므로, 가진된 조건에 의해서 양방향으로 동일하게 전파됨을 알 수 있다. 실제로 유도초음파를 실험적으로 증명하는 방법에서는 입사각이 존재하므로 파동전파 현상이 한쪽 방향으로 발생된다. 하지만 이를 이론적으로 계산하는 프로그램에서는 전파현상이 양의 방향과 음의 방향으로 모두 전파되며, 이는 유한요소 또는 경계요소를 사용한 수치해석적인 방법에서도 동일한 현상이 발생된다. Fig. 7에서는 동일한 거리를 +방향과 -방향으

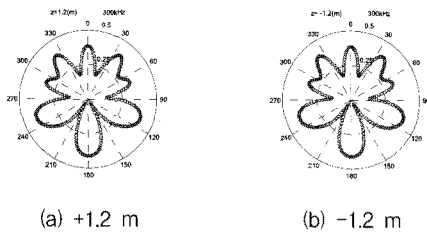


Fig. 7 Angular profile of 45° excitation condition with propagating opposite direction each other

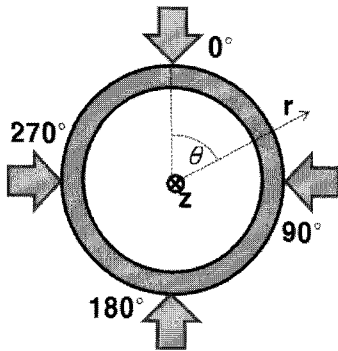


Fig. 8 Excitation point on a pipe

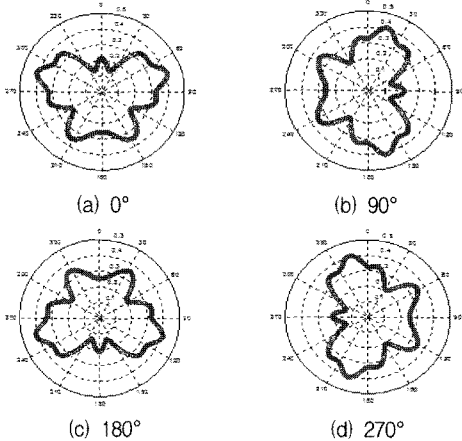


Fig. 9 Guided wave profile on a pipe with respect to excitation point

로 전파한 동일한 원주방향 변위 분포도를 보여 준다. Fig. 8에서 보는 것과 같이 배관 주위에 가진 위치를 변화 시키면서 이론적 해석 결과의 정확성을 평가하였다. 가진 위치를 변화시켰을 경우 Fig. 9에서 보는 것과 같이 동일한 거리를 전파하여 나타나는 진폭은 가진 각도만큼 회전하여 나타나는 것을 확인 할 수 있다. 이는 본 연구를 위해 이론적인 내용을 바탕으로 재작성된 프로그램이 정확하게 해석 값을 나타내는 것을 볼 수 있다.

3.3. 다중 탐촉자에 의한 유도초음파 집중

배관을 주위로 N개의 탐촉자를 이용하여 진단을 할 경우 앞 절에서 설명한 것과 같이 동일시간에 동일한 가진 조건으로 가진을 할 경우 wave profile은 가진 조건에 따라 달라진다. 여기서 하나의 탐촉자를 이용하여 가진 할 경우 일정한 거리 z에서 생성된 wave profile을 $h(\theta)$ 라고 한다면 다른 탐촉자에 의해 가진된 wave profile 또한 거리 z에서 동일한 $h(\theta)$ 를 가지지만 탐촉자의 최초 위치에 따라 각도 방향으로 옮겨져서 나타난다. 그리고 초음파 빔을 집중화하고 싶은 지점 z에서 집중화하고 싶은 원주방향 변위 분포도를 $g(\theta)$ 라 한다. 따라서 임의의 i번째 탐촉자의 원주방향 변위 분포도는 $h(\theta - \theta_i)$ 로 표현할 수 있으며, θ_i 는 탐촉자가 원주방향으로 위치한 각도를 의미하며, θ_1 과의 각도차를 의미한다.

앞서 설명한 것과 같이 임의의 집중 지점에서의 wave profile $g(\theta)$ 은 각 탐촉자에서 전파되는 파동의 합으로 표현된다.

$$g(\theta) = \sum_{i=1}^{N-1} a(\theta_i)h(\theta - \theta_i) \tag{10}$$

여기서 $a(\theta_i)$ 는 미지의 i번째 탐촉자의 복소 진폭을 나타낸다. 식(10)은 컨볼루션(convolution)으로 표현하면 식(11)과 같이 표현 할 수 있다.

$$g(\theta) = a(\theta) \otimes h(\theta) \tag{11}$$

복소 변위인 $a(\theta)$ 는 역 컨볼루션(deconvolution)으로 계산이 가능하다. 푸리에 변환(Fourier transform)을 통해 식(11)의 공간 함수는 주파수 영역으로 다음과 같이 바뀐다.

$$G(\omega) = A(\omega)H(\omega)$$

$$A(\omega) = G(\omega)/H(\omega) \tag{12}$$

여기서 $A(\omega), G(\omega), H(\omega)$ 는 각각 $a(\theta), g(\theta), h(\theta)$ 의 푸리에 변환 결과이다. $a(\theta)$ 는 식(12)의 푸리에 변환으로 구할 수 있다. 여기서 가진하는 탐촉자의 형상 정보는 Fig. 10과 같이 배관을 모두 덮을 수 있는 형상으로 하여 동일한 계산 과정을 통하여 Fig. 11과 같은 결과를 얻을 수 있다. Fig. 11에서 보는 것과 같이 가진 하는 탐촉자의 개수가 많을수록 원하는 위치에서 정확히 집중이 되는 것을 알 수 있다. Fig. 11에서 보면, 탐촉자는 최소한 동일한 크기로 4개 또는 8개가 있어야 보다 정확한 집중효과를 볼 수 있다. 일반적으로 상업화된 탐촉자의 크기는 직경이 작은 배관의 경우 45° 범위를 가진할 수 있으므로, 45° 범위를 가진 하는 일반적인 탐촉자를 사용할 경우 Fig. 11의 (d)와 (f)의 결과와 같은 집중효과를 보려면 최소한 4개, 8개의 탐촉자가 필요하다. 탐촉자의 개수를 2개 또는 3개를 사용하였을 경우에도 집중알고리즘을 통해 집중은 이루어지지만 집중되는 범위가 비교적 넓어 집중 효율이 탐촉자를 4개 또는 8개를 사용했을 경우보다 떨어지는 것을 볼 수 있다. 하지만 탐촉자를 5개를 사용한

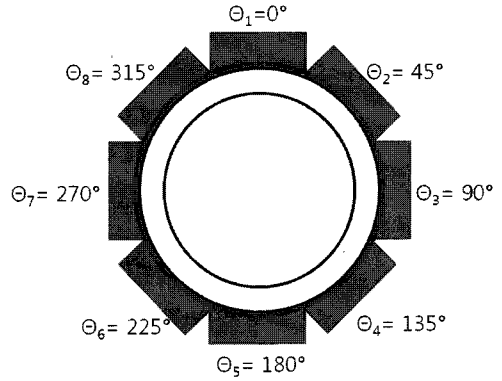


Fig. 10 Illustration of a 8-channel guided wave phased array system

경우에는 원하고자하는 위치(0°)에 집중이 이루어지지만 180° 위치에도 비교적 큰 에너지가 분포하는 것을 볼 수 있다. 만약 결함이 180° 위치에 있을 경우 집중위치에서 발생된 반사 신호와 원하지 않는 위치의 신호를 정확하게 파악하기 어렵기 때문에 문제점이 발생할 수 있게 된다.

4. 결 론

직교모드확장기법을 바탕으로 단일 탐촉자에 의해 가진되어 배관에서 전파되는 유도초음파의

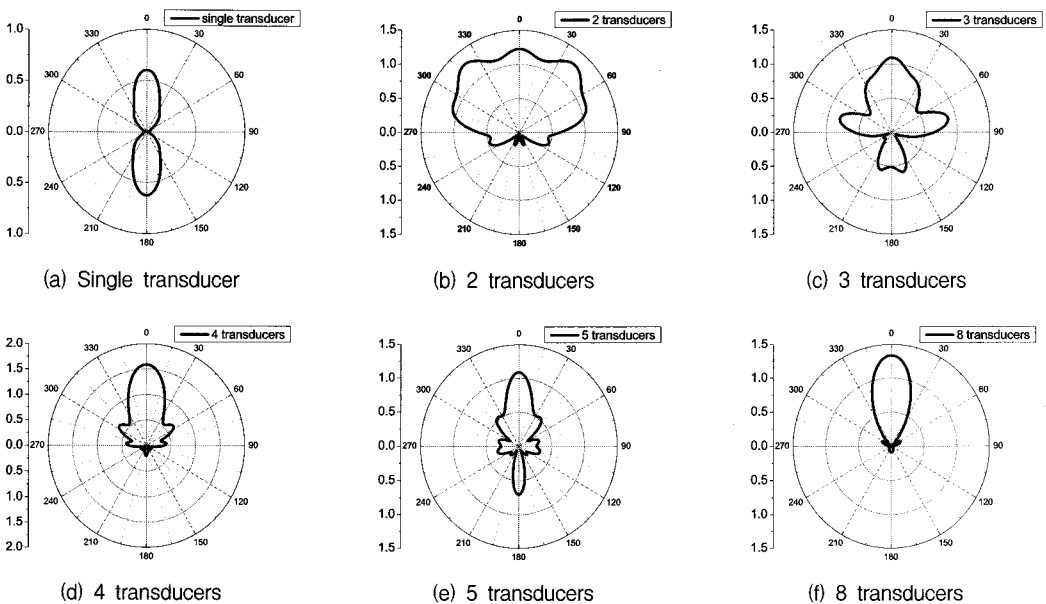


Fig. 11 Focused angular profile for $(360/N)^\circ$ loading condition from single to 8 transducers at 3,2 m

음장을 해석하였다. 표면결함에 가장 민감한 L(0,2), F(M,2)모드를 기준으로 주파수 변화에 따라 전파 거리별로 나타나는 유도초음파 음장을 계산하여 도식화 하였다. 단일 탐촉자에 의한 전파 특성을 바탕으로 다중 탐촉자에 의해 가진된 전파 특성을 파악하였다. 다양한 탐촉자 개수에 따라 달라지는 거리별 원주방향 변위 분포도를 계산하여 나타내었다. 단일 탐촉자에 의해 가진된 신호는 일정 거리를 전파한 후 파동의 간섭과 중첩의 영향으로 집속이 이루어지며, 이에 다중 탐촉자를 활용하여 집속화 하는 알고리즘을 개발하였다. 서로 다른 개수의 탐촉자를 이용하여 유도초음파를 집속할 때 그 효율이 달라지는 것을 확인하였다.

후 기

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 원자력 연구 사업임(No.2010-0026087).

참고문헌

- [1] Y. Cho, H.-S. Ham and H. H. Choi, "Thickness assessment of adhesive layer in inhomogeneous layer by guided wave," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 21, No. 4, pp. 391-397 (2001)
- [2] Y. Cho, D. Kim, H. Choi and J. Lee, "Evaluation of composite laminates for aircraft primary-structure applications using nonlinear parameter of ultrasonic guided wave," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 30, No. 2, pp. 126-131 (2010)
- [3] D. C. Gazis, "Three dimensional investigation of the propagation of waves in hollow circular cylinders. I. Analytical foundation," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 31, pp. 568-573 (1959)
- [4] D. C. Gazis, "Three dimensional investigation of the propagation of waves in hollow circular cylinders. II. Analytical foundation," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 31, pp. 573-578 (1959)
- [5] J. J. Ditri and J. L. Rose, "Excitation of guided wave modes in hollow cylinders by applied surface tractions," *J. Appl. Phys.*, Vol. 72, No. 7, pp. 2589-2597 (1992)
- [6] J. Li and J. L. Rose, "Excitation and propagation of non-axisymmetric guided waves in a hollow cylinder," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 109, No. 2, pp. 457-464 (2001)
- [7] J. Li and J. L. Rose, "Natural beam focusing of non-axisymmetric guided waves in large diameter pipes," *Ultrasonics*, Vol. 44, pp. 35-45 (2006)
- [8] J. L. Rose, "Ultrasonic Waves in Solid Media," Cambridge University Press, Cambridge, UK, (1999)
- [9] Jan D. Achenbach, "Wave Propagation in Elastic Solids," North-holland Publishing Company, Oxford, UK, (1975)