[해 설] - 비 파 괴 검 사 학 회 지
Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing
Vol. 20, No. 3 (2000. 6)

유도초음파를 이용한 비파괴탐상 기법
Nondestructive testing by using guided wave techniques

신현재*
Hyeon Jae Shin*

초 록 유도초음파를 이용하면 배관 및 박판과 같은 파유도체에 대한 광범위한 비파괴탐상을 할 수 있게되어 시간과 경비를 절약할 수 있는 장점이 있다. 그래서 유도초음파를 이해하고 활용하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 유도초음파가 기존의 체적 초음파와 크게 다른 점은 분산성있어 초음파의 전파속도가 진동수와 파유도체의 두께에 의존한다는 것과 전파 특성이 다른 무한개의 모드가 존재한다는 것이다. 본 논문에서는 박판과 배관에서의 유도초음파를 이해하고 비파괴탐상에 적용하기 위해 필요한 모드의 분산과 선택 그리고 확인에 대해 이론적인 결과와 및 실험적인 예를 제시하여 그 개념을 소개하였다.

1. 서 론

현재 적용되고 있는 초음파 비파괴탐상 기법들은 대부분 센서가 위치한 부분의 국부적인 탐상(point-by-point inspection)에 중점을 두고 있다. 그래서 광범위한 비파괴탐상을 하기 위해서는 스캐너나 로봇을 이용하여 센서를 검사하고자 하는 부위로 이동시켜야만 한다. 그러나 유도초음파(Ultrasonic Guided Waves)를 이용한 비파괴탐상 기법은 박판이나 파이프의 경우 센서가 위치한 곳에서부터 수 미터 혹은 수십 미터까지 검사하는 광범위탐상(large area inspection)을 위해 사용되어질 수 있다.

유도초음파기술은 기존의 국부적인 탐상법에 비교하여 정밀도는 떨어지는 것으로 알려져 있으나 광범위 비파괴탐상을 효율적으로 수행할 수 있다는 점에서 여러 분야에 적용될 수 있는데, 특히 가스배관, 열교환기세관, 그리고 박판으로 이루어진 여러 가지 구조물의 비파괴탐상에 유용하다. 또한 사고의 위험도가 높은 배관 또는 박판임에도 불구하고 피복이나 지하매설 등으로 인해 피검체에 접근이 어려워 비파괴탐상 자체가 불가능한 경우와 국부적인 비파괴탐상이 가능한 경우에도 시간의 제약과 경비의 절감 때문에 보다 효과적인 검사방법이 요구되는 경우에 유도초음파 기술은 매우 유용하게 사용되어 질 수가 있다.

유도초음파는 구조물의 기하학적인 구조를 따라 길이방향으로 전파하는 파로서 종파와 횡파가 구조물의 벽면사이에서 수많이 반사되어 중첩됨으로 형성되어 진다. 이때 유도초음파는 일반적인 체적파(bulk wave: 무한매질을 진행하는 파)와는 매우 다른 특성을 가지게되는데, 그 대표적인 차이점으로 무한개의 유도초음파 모드가 넓은 진동수 영역에 걸쳐 존재한다는 점과 대부분의 모드는 진동수와 벽면의 두께에 따라 전파속도가 변화하는 특성 즉 분산특성을 갖는다는 것이다. 그래서 유도초음파를 이해하고 피검체에 적용하기 위해서는 각 모드의 분산특성을 찾는 것이 우선적으로 행하여져야 한다. 이때 주어진 진동수 영역 내에 존재하는 유도초음파 모드의 분산특성을 나타낸 곡선을 분산선도(dispersion curves)라고 하며 이는 탄성파 이론에 대상구조물의 경계조건이 주어짐으로 구하여 진다 [1-3]. 그리고 실험적으로 유도초음파를 연구하기 위해서는 분산선도상에 있는 모드를 발생시키고 수신할 수 있어야 하는데, 유도초음파를 발생하기 위해 현재 많이 사용되는 방법은 초음파의 수직 및 사각입사법과 comb transducer 법 그리고 자기변형(Magnetostriction)과 와전류(EMAT)을 이용한 방법들이 있다[3-9]. 그리고 유도초음파를 비파괴탐상에 적용하기 위해서는 피검체의

(접수 : 2000. 6. 8) * 성균관대학교 산업설비 안전성평가 연구센터(Safery and Structural Integrity Research Center, Sungkyunkwan University, Suwon 446-746)

특성과 결함의 종류와 크기 그리고 탐상범위 등을 고려하여 적절한 모드선택이 이루어져야하고, 선택된 모드를 효율적으로 발생시킬 수 있는 방법을 찾아야 한다 [10-17]. 그렇게되면 선택되어 발생된 유도초음파모드의 전파경로에 있는 결함으로부터 반사된 신호를 분석함으로 그 위치를 파악할 수 있게되는데 탐상할 수 있는 결함의 크기와 종류 그리고 거리는 모드선택과정에서 고려된 모드의 전파특성과 결함에 대한 민감도에 의해 결정되어 진다. 이와 같이 이론과 실험적인 방법이 주어져있음에도 불구하고 유도초음파의 적용에 어려움 있는데 이는 주로 분산성이 있는 여러 개의 모드가 동시에 수신될 때 신호해석과 모드확인(mode identification)의 어려움 때문에 기인된다. 이와 같은 수신신호해석의 어려움을 극복하기 위해 실험적으로는 위상속도와 진동수의 범위를 제한함으로 분산성이 적은 단일모드를 사용하는 방법이 제안된바 있다[12]. 그리고 유도초음파를 진동수-시간 영역에서 분석하는 Wavelet Transforms [18-23] 나 Short Time Fourier Transforms [7-8, 24]와 같은 신호해석기법을 이용하여 수신신호를 해석하는 방법이 사용되고 있다.

본 논문에서는 박판과 배관에서의 유도초음파를 이해하고 비파괴탐상에 적용하기 위해 필요한 개념을 소개하였다. 특히 유도초음파 모드의 분산과 선택 그리고 확인에 대해 이론적인 결과와 실험적인 예를 제시하였다.

2. 유도초음파

유도초음파는 Fig. 1에 보인바와 같이 종파와 횡파가 구조물의 벽면사이에서 수많이 반사되어 중첩됨으로 형성되어 진다.

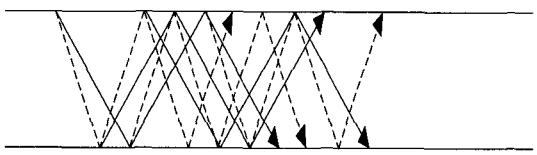


Fig. 1. Generation of guided waves in plates

2.1. 유도초음파모드의 분산성

유도초음파는 대부분의 경우 Fig. 2 에 보인 바와 같이 같은 매질을 전파할 경우에도 진동수에 따라 전파하는 속도가 다르다. 이와 같은 특성을 분산성(dispersion)이라 하는데 각 모드의 분산성을 나타낸 곡선을 분산선도라 한다. 유도초음파의 위상속도와 군속도는 서로 다르므로 위상속도분산선도(phase velocity dispersion curves)와 군속도 분산선도(group velocity dispersion curves)를 각각 구할 수 있다 [1-3]. 여기서 군속도는 에너지가 전파하는 속도로 실험적으로 측정되어지는 유도초음파의 속도에 해당한다.

유도초음파모드는 파가 파유도체 내에서 진동하는 양상, 즉 파형구조(wave structure)에 따라 구분되어지는데 박판의 경우와 배관과 같은 실린더의 경우 서로 다르게 정의 되어져있다.

Fig. 2. Propagation of guided waves

2.1.1. 박판에서의 유도초음파의 모드와 분산

파유도체가 박판인 경우 유도초음파는 판파 또는 Lamb waves로 알려져 있는데 크게 두 종류의 모드인 대칭모드(symmetric mode)와 비대칭모드(antisymmetric mode)로 구분되어진다. 판파의 파형구조를 살펴보면 대칭모드의 경우에는 파의 진동하는 양상이 박판의 두께 중심선에 대해 대칭이나, 비대칭모드의 경우에는 비대칭이다 [1-2]. Fig. 3 에 알루미늄 판에 대한 판파의 각 모드별 위상속도(V_{ph}) 와 군속도(V_g) 분산선도를 제시하였다. 세로축은 속도를 나타내고 가로축은 진동수(f) 곱하기 알루미늄 판의 두께(d)를 나타낸다. 그리고 일반적으로 대칭모드는 S_0, S_1, S_2, S_3...로 나타내고 비대칭모드는 A_0, A_1, A_2, A_3...로 나타낸다. 이러한 분산선도는 각 모드별 분산특성을 보여줄 뿐만 아니라 유도초음파모드가 존재할 수 있는 조건을 나타내어주기도 하는데, fd값이 커질수록 더 많은 모드가 존재하고 같은 fd값에서 여러 개의 모드가 존재하고 있음을 보여준다.

위상속도 분산선도는 실험적으로 유도초음파모드의 발생조건을 찾는데 유용하게 사용되어 지는데, 가장 많이 사용되는 사각입사법의 경우를 예로 들어보겠다. 유도초음파를 사각입사법으로 발생할 경우 Snell의 법칙에 따라 위상속도와 입사각은 식(1)과 같이 관계를 가진다.

$$V_{ph} = \frac{V_{shoe}}{\sin \theta_i} \tag{1}$$

여기서 V_{shoe} 는 초음파 센서에 부착된 웨지의 종파 속도이고 θ_i 는 웨지에서의 입사각이다. 이와 같은 관계를 이용하면 위상속도 분산선도상에서 가진 할 모드의 위상속도를 입사각으로 조절할 수 있게된다. 그리고 fd값은 신호발생기의 진동수 값을 조절함으로 결정할 수가 있으므로 결국 위상속도 분산선도상에서 원하는 모드를 가진 할 수 있게된다. 그러나 실험에 있어서 입사되는 신호는 진동수 대역과 위상속도 대역을 가지게됨으로 실험 시스템에 의해 결정되어지는 일정한 대역의 유도초음파 모드가 발생되어진다.

실험적으로 관측되는 유도초음파의 분산성은 군속도 분산선도에 의해 예측되어진다. 예로서 Fig. 4에 1mm 알루미늄 판에서 pitch-catch 실험을 한 결과를 제시하였다. Fig. 4(a)의 경우에는 입사각이 30도(위상속도 5.42Km/s에 해당)였고 진동수가 1MHz 였다. 그래서 S_0 모드에서 fd값이 1MHz mm 부근의 모드를 발생하여 비교적 분산성이 작은 모드를 발생하게되었다. Fig. 4에 (b)의 경우에는 입사각이 40도(위상속도 4.22Km/s에 해당)였고 진동수는 2.25MHz 였다. 그래서 S_0모드에서 fd값이 2.25MHz mm 부근의 모드를 발생하여 분산성이 큰 모드를 발생하게되었다. 즉 군속도가 fd값의 변화에 따라 급격히 변화하는 모드는 분산성이 높아 시간 축에서 유도초음파의 신호가 넓게 퍼져서 나타나게되었고, 분산성이 작은 모드는 좁게 나타났다. 이와 같은 점을 고려하면 유도초음파를 실험적으로 이용할 때 군속도 분산선도로부터 실험적으로 얻어지는 파형의 분산정도는 어느 정도는 예측할 수 있게 된다.

또한 분산선도의 좌표축에서 알 수 있듯이 유도초음파의 속도는 진동수와 파유도체의 두께에 의존하여 분산한다. 이와 같은 현상은 Fig. 4 (a) 와 Fig. 5 (a) 그리고 (b)를 비교함으로 알 수 있는데, 세 경우모두 유도초음파의 발생조건과 수신조건은 같고 알루미늄 판의 두께에만 Fig. 4 (a) 1mm, Fig. 5 (a) 2mm 그리고 Fig. 5 (b) 2.5mm로 변화를 준 경우에 pitch-catch 신호를 보여준 것이다. 즉 위상속도와 진동수는 고정되어있으나 시편의 두께변화로 인하여 fd값의 변화를 가지게되었다. 그래서 동일한 입사조건에 의해 가진 되는 모드는 fd값의 변화에 따라 분산선도상에서 가로축을 따라 변환되어 서로 다른 모드가 발생되었다. Fig. 5에서 모드를 확인하는 것은 신호의 속도를 측정하여 군속도 분산선도와 비교함으로 이루어지는데, 이 방법의 경우 만일 여러 개의 모드가 중첩되어 있을 경우에는 각 모드를 확인하는 것이 쉽지

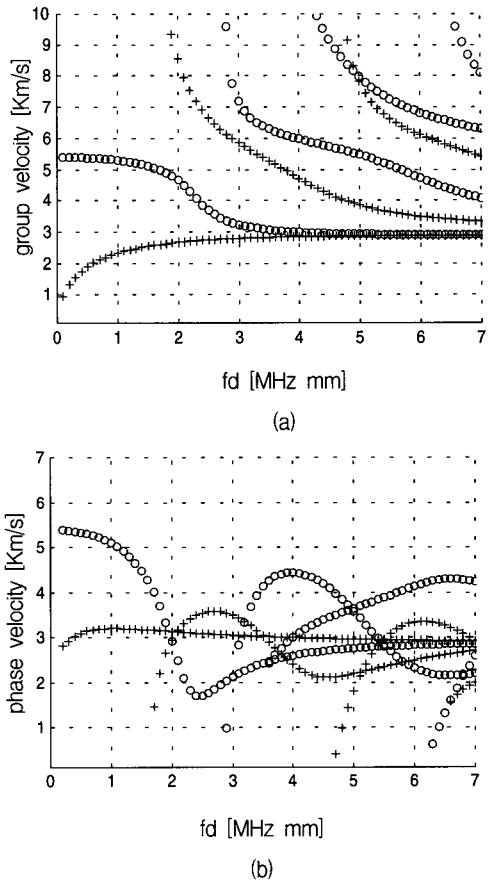


Fig. 3. (a) Phase velocity and (b) group velocity dispersion curves for an aluminum plate (+: Antisymmetic modes, o: Symmetric modes)

않고 주파수분석을 하여야한다.

2.1.2 실린더에서의 유도초음파 모드와 분산

실린더는 산업현장에서 가스배관과 열교환기세관 등으로 매우 많이 사용되어지고 있다. 배관과 세관은 관경과 두께의 차이 때문에 분리되어 명명되어 지지만 실린더에 대한 유도초음파의 이론은[3] 같이 적용되어 진다. 그러나 관경이 초음파 발진자 보다 매우 큼으로 인하여 파의 진행방향이 실린더의 원주방향이 될 경우에는 판파의 이론을 근사적으로 사용할 수 있다.

유도초음파의 진행방향이 실린더의 길이방향인 경우 유도초음파 모드는 크게 Longitudinal modes, Torsional modes 그리고 Flexural modes로 파가 실린더의 벽 속에

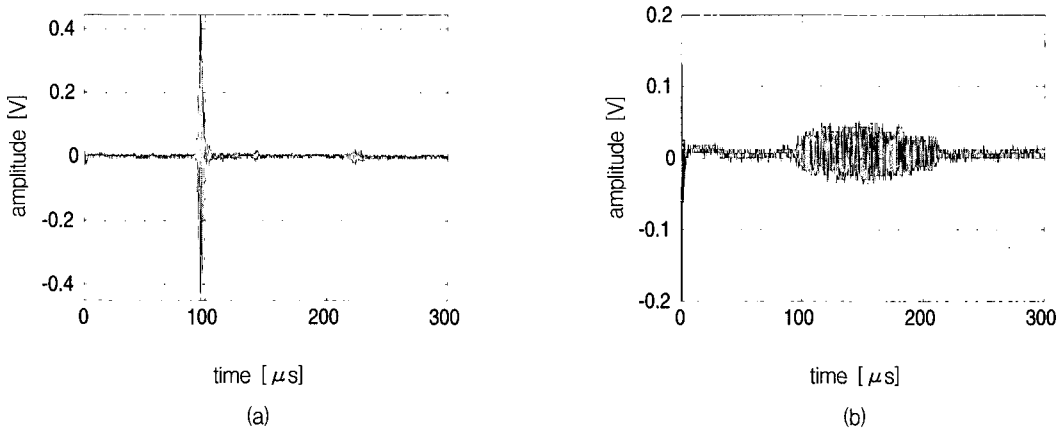


Fig. 4. Guided wave modes that (a) not much dispersive (b) and highly dispersive on aluminum plate 1 mm thick

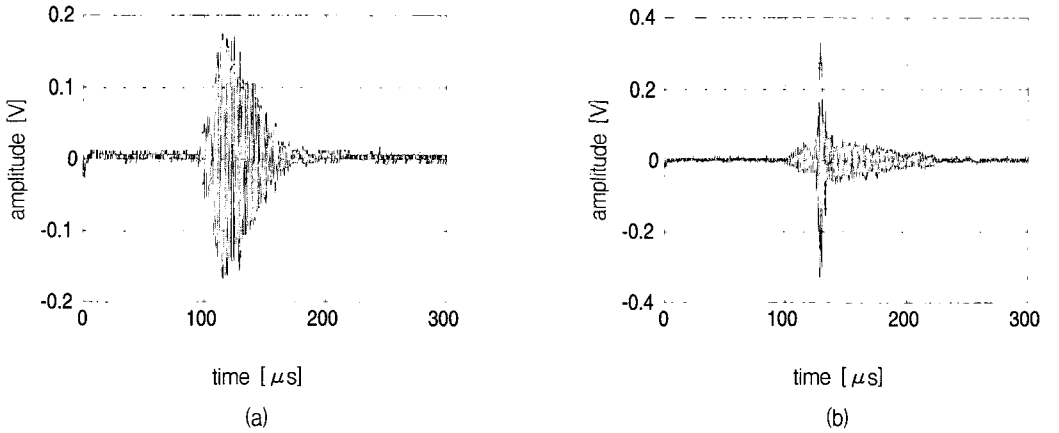


Fig. 5. Guided waves in aluminum plate of (a) 2mm thick and (b) 2.5mm thick for the same excitation condition

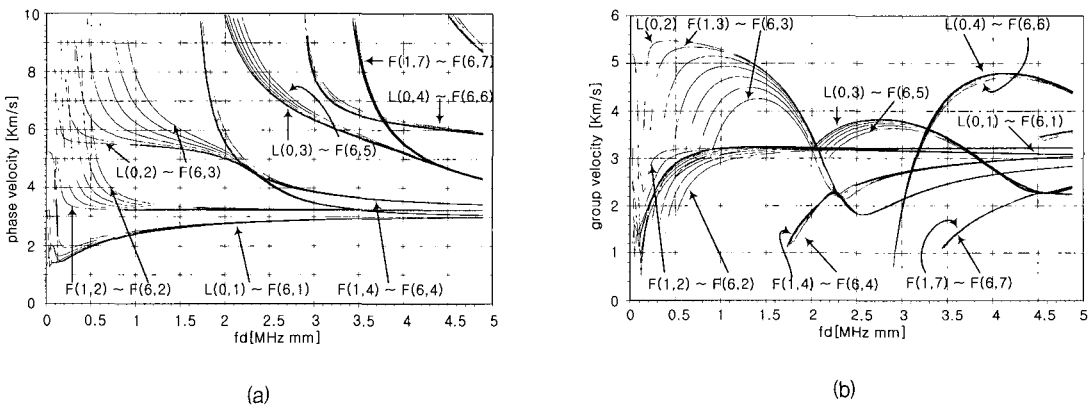


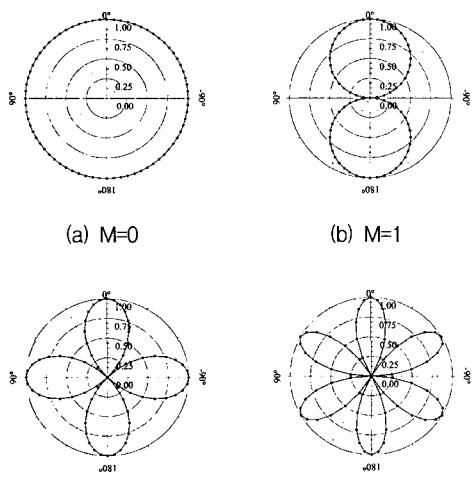
Fig. 6 (a) Phase velocity and (b) group velocity dispersion curves for Longitudinal modes and Flexural modes in an Inconel tubing

서 진동하는 양상에 따라 구별되어 진다[1]. 실린더의 경우 분산선도의 예로서 Fig. 6에 원자력발전소에서 증기발생기로 사용되는 인코넬튜브에 대한 분산선도를 Longitudinal 모드와 Flexural 모드에 대해 보였다.

Fig. 6에 보인 실린더의 분산선도는 박판의 경우에 비교하여 매우 복잡하다. 그러나 박판의 경우에 설명된 Snell의 법칙적용과 모드의 분산성에대한 예측은 똑같이 적용된다.

실린더에서의 유도초음파 모드를 구분하여 지칭하기 위해 두 개의 첨자 (M,n)을 사용하는데, M은 circumferential order로 불리어지며 0, 1, 2, 3, ... 이다. M의 변화에 따른 실린더에서의 파의 진동의 원주방향 속도성분의 진폭분포를 Fig. 7에 보였다. Fig. 7에서 보듯이 M=0인 경우에는 실린더에 대해 축대칭(axisymmetric)이고 M=1, 2, 3... 인 경우에는 비축대칭(non-axisymmetric)이다. n은 모드 번호로 1, 2, 3, ...이다. 이론적으로 한 개의 M에 대해 무한개의 n이 존재하여 하나의 모드군(a family of modes)을 이루는데, M 또한 무한개가 있으므로 결국 무한개의 모드군이 존재하게된다[15].

M=0인 모드군, 즉 축대칭인 모드군에는 Longitudinal 모드와 Torsional 모드가 있는데, Longitudinal 모드는 파의 진동하는 성분이 실린더의 길이방향과 반경방향으로만 있을 경우이고 L(0,n)으로 나타낸다. Torsional 모드 파의 진동성분이 원주방향으로만 있을 경우이며 T(0,n)



(a) M=0 (b) M=1

(c) M=2 (d) M=3

Fig. 7 Circumferential distribution of Radial component of particle velocity of guided waves in cylinder for the different circumferential order M

으로 나타낸다. Flexural modes는 M=1, 2, 3,...인 경우로서 파의 진동성분이 세 방향 모두에 존재할 수 있는 경우이며 F(M,n)으로 나타내고, 이는 비축대칭이다.

실린더에서는 이와 같은 세 종류의 모드가 있는데 현재까지 실험적으로 주로 사용되는 모드는 축대칭인 Longitudinal 모드이다. 그 이유는 일반적인 초음파 센서로 잘 가진 될 수 있으며, 축대칭이기 때문에 분석이 비교적 간단하고 원주 방향 중 어느 곳이든지 탐상이 가능하기 때문이다. 그러나 비대칭 센서의 부착 또는 비대칭 결함으로부터의 반사등으로 인하여 실험적으로 비축대칭인 모드 즉 Flexural modes가 생성될 수가 있기 때문에 비축대칭모드의 연구가 필수적이다[14]. 그리고 Torsional modes는 실험적으로 발생시키고 수신하는데 있어서 일반적인 초음파 센서로는 효율이 떨어져서 잘 사용되지 않고 있다.

2.2. 유도초음파 모드의 선택

분산선도에서 알 수 있는 바와 같이 유도초음파모드는 주어진 진동수영역에서 여러 개가 존재하고 각 모드들은 서로 다른 전파특성을 가지므로, 목적에 따라 어떠한 모드를 선택하여 사용할 것인가를 결정하여야 한다[13, 25].

모드의 선택은 우선적으로 진동수영역을 결정함으로부터 시작되는데 이를 위해서는 시편의 두께와 탐상거리 그리고 결함에 대한 민감도를 고려하여야한다. 펜실베니아 주립대학에서 시도한 원자력발전소의 증기발생기세관에 대한 유도초음파의 연구 중에서 모드선택시 고려되었든 사항을 예로 들어보면, fd 값이 대략 5MHz mm 이하에서 좋은 비파괴탐상 결과가 있었다[13, 26]. 세관의 원주방향전체를 탐상하고 원주방향결함을 탐상하기위해 선택된 모드는 축 대칭면서 비교적 가진 하기 쉬운 Longitudinal 모드, L(0,n), 였다. fd 값이 5MHz mm 이하에 존재하는 Longitudinal 모드는 L(0,1), L(0,2), L(0,3) 그리고 L(0,4)로서 사각입사법을 사용하였을 때 위상속도를 Snell의 법칙에 따라 조절하면 각 모드들을 발생시킬 수 있다. 기초적인 실험에서 발견한 사실은 L(0,1) 모드는 세관의 표면 조건에 민감하여 표면에 물이 있으면 파의 감쇠가 매우 빨리 일어나는 반면, 세관이 자유경계면을 가질 경우에는 작은 표면결함을 찾는 데 매우 유용하였다. L(0,2) 모드는 세관표면의 물에는 상대적으로 민감하지 않았으며 멀리까지 전파하면서 비교적으로 큰 결함을 탐상하는데 유용하였다. L(0,3) 모드는 표면의 물에 민감하였고 작은 결함에 민감하기는 하였으나, 대부분의 경우 L(0,2)모드와 L(0,4)모드가 함께 발생되어 신호해석

에 어려움이 있었다. 그리고 L(0,4) 모드는 표면의 물에는 상대적으로 민감하지 않았고, L(0,2)모드보다는 전파거리가 짧으나 작은 결함을 찾을 수 있는 모드였다. 이와 같은 모드분석을 바탕으로 하면 증기발생기 세관의 비파괴탐상에 사용될 모드를 선택할 수 있는데, 먼저 세관 지지대의 영향을 극소화하기 위해 표면에 민감한 L(0,1)과 L(0,3)는 우선적으로 제외되는 반면 L(0,2)는 원거리 큰 결함탐상을 위해 그리고 L(0,4) 모드는 근거리 작은 결함탐상을 위해 선택되어 진다. 그리고 입사각과 진동수는 가급적이면 Fig. 4 (a)에 보인 것과 같은 분산성인 작은 모드가 발생되도록 선택하면 시간영역에서 신호의 해석이 쉽다.

2.3. 유도초음파 모드의 확인

선택된 모드를 실험적으로 발생시킨 후 원하는 모드가 발생되었나를 확인하는 모드확인이 이루어져야할 필요가 있다. 또한 모드확인은 유도초음파의 전파와 반사 과정에서 생길 수 있는 모드변환을 감지하여 모드변환의 특성을 비파괴탐상에 응용하기 위해서는 매우 필요한 과정이다.

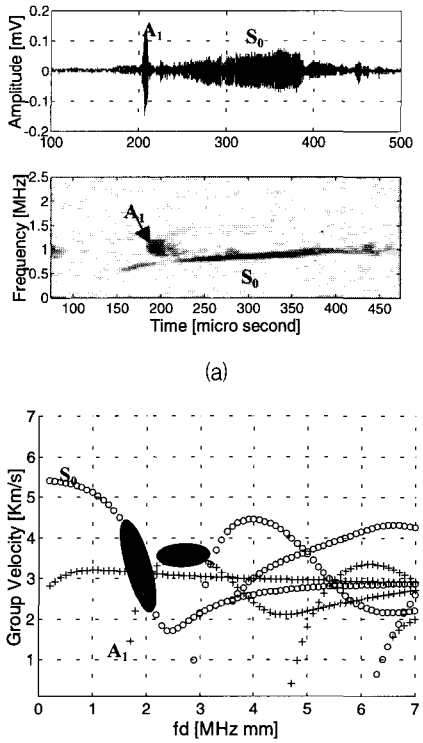


Fig. 8 Guided wave mode identification by short time Fourier transforms. (a) Time domain signal and short time Fourier transform of the signal. (b) The identified modes are indicated in group velocity dispersion curves

유도초음파의 모드를 확인하기 위해서 주로 사용되는 방법은 신호의 전파시간으로부터 군속도를 실험적으로 측정하고 fd값을 구한 후 이론적인 결과인 군속도 위상선도와 비교하는 것이다. 이와 같은 단순한 방법은 발생하고자하는 모드가 그 주변의 모드와 fd값과 위상속도의 차이가 크서 선택한 한 개의 모드만 발생된 경우와 Fig. 4(a) 와 같이 분산성이 작은 모드 한 개가 발생된 경우에 적용되어 모드확인을 할 수 있다. 그러나 Fig. 5(b)와 같이 군속도가 비슷한 여러 개의 모드가 동시에 전파하는 경우와 Fig. 4(b)와 같이 분산성이 큰 모드가 전파하는 경우에는 사실상 몇 개의 모드가 전파하는가를 파악할 수가 없음으로 모드확인에 어려움이 있다. 그래서 유도초음파의 응용에 있어 많은 경우 단일 모드의 발생이 가능한 모드와 분산성이 작은 모드를 사용하였고, 때때로 이와 같은 제한 조건은 모드선택의 중요한 결정인자로 작용하였다[12].

최근 Fig. 4(b)와 Fig. 5(b) 같은 모드를 확인하는 효과적인 방법이 제시되고 있는데, 이는 유도초음파 신호를 시간-진동수 영역에서 분석하는 신호처리기법을 적용하는 것으로 Short Time Fourier Transforms(STFT)나 Wavelet Transforms(WT)를 이용한다. 분산성이 있는 유도초음파가 시간-진동수영역에 표시되면 진동수 성분에 따른 군속도의 정보를 얻을 수 있으므로, 군속도가 진동수에 따라 분산되는 양상을 파악함으로 모드를 확인할 수가 있게된다. Fig. 8에 STFT 을 이용하여 모드확인을 한 결과를 나타내었다.

3. 맺음말

광범위 비파괴탐상의 필요성과 국내외여건을 고려하여 보면 향후 연구목표는 첫째 유도초음파 기법을 체계적으로 개발하여 광범위 비파괴 탐상 프로토콜을 개발하는 것과, 둘째 유도초음파를 송수신하고 분석할 수 있는 비파괴 탐상시스템의 개발이다. 이러한 유도초음파기법이 성공적으로 개발되면 배관 또는 세관과 박판의 부식과 결함을 신속하게 탐상할 수 있게되리라 예측된다.

본 논문에서는 유도초음파 기술을 이해하기 위한 기초적인 개념을 소개하였으며, 유도초음파를 이용하여 비파

괴탐상을 수행할 경우에 고려하여야 할 이론 및 실험적인 사항을 설명하였다. 유도초음파는 광범위탐상을 할 수 있다는 점에서 기존의 초음파탐상 기법과 차별화가 되는데, 끝으로 유도초음파를 비파괴탐상에 적용함에 있어서 장단점을 요약함으로 본 기술의 소개를 마치고자 한다.

1) 유도초음파를 이용한 비파괴탐상기법의 장점:
- 광범위(신속한) 비파괴 탐상이 가능하다.
- 배관인 경우 원주방향과 함께 길이방향의 비파괴 탐상이 동시에 가능하다.
- 시편의 내면 또는 외면 모두에서 탐상이 가능하다.
- 시편의 내면과 외면 그리고 벽 속에 있는 결함을 모두 탐상할 수 있다.
- 단열재 아래에 존재하는 결함을 탐상할 수 있다.
- 모드선택의 폭이 넓어 감도를 향상시킬 수 있다.

2) 유도초음파를 이용한 배관 비파괴탐상기법의 단점:
- 신호의 해석이 기존의 초음파 탐상법에 비하여 어렵다.
- 이론이 어려워 현장 사용을 돕기 위한 프로그램이 요구된다.
- 고출력 초음파 탐상시스템이 필요하다.
- 결함의 크기를 정확하게 산출하기 위해서는 많은 연구가 필요하다.

참고문헌

[1] K. F. Graff, Wave Motion in Elastic Solids, Dover Publication INC., New York, (1975)

[2] J. L. Rose, Ultrasonic Waves in Solid Media, Cambridge University Press, (1999)

[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, No. 5, pp. 568-573, May, (1959)

[4] J. Ditri, A. Pilarski, J. L. Rose, and B. Pavlakovic, "Generation of guided waves in plate by axisymmetric normal surface loading," Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Vol. 13, Edited by D. O. Thompson and D. E. Chimenti, Plenum press, New York, (1994)

[5] J. Ditri, J. L. Rose, and A. Pilarski, "Generation of guided waves in hollow cylinders by wedge and comb type transducers," Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Vol. 12A, Edited by D. O. Thompson and D. E. Chimenti, Plenum press, New York, pp. 211-218, (1993)

[6] M. G. Silk and K. P. Bainton, "The propagation in metal tubing of ultrasonic wave modes equivalent to Lamb waves," Ultrasonics, 17, 11-19, (1979)

[7] H. Kwun, and K. A. Bartels, "Experimental observation of elastic-wave dispersion in bonded solids of various configurations," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 99(2), pp.962-968, (1996)

[8] H. Kwun, and K. A. Bartels, "Magnetostrictive sensor technology and its applications," Ultrasonics, Vol. 36, pp. 171-178, (1998)

[9] R. B. Thompson, R. K. Elsley, W. E. Peterson, and C. F. Vasile, " An EMAT system for detecting flaws in steam generator tubes," Ultrasonic symposium, pp. 246-249, (1979)

[10] J. Ditri, J. L. Rose, and G. Chen, "Mode selection criteria for defect detection optimization using Lamb waves," Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Vol. 11, Edited by D. O. Thompson and D. E. Chimenti, Plenum press, New York, pp. 2109-2115, (1992)

[11] P. Wilcox, M. Lowe and P. Cawley, "Long range Lamb wave inspection: The effect of dispersion and modal selective," Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Vol. 18, Edited by D. O. Thompson and D. E. Chimenti, Plenum press, New York, pp. 151-158, (1999)

[12] David N. Alleyne and Peter Cawley, "Optimization of Lamb wave inspection techniques," NDT&E international Vol. 25, No. 1, pp. 11-22, (1992)

[13] H. J. Shin and J. L. Rose, "Guided wave tuning principles for defect detection in tubing," Journal of Nondestructive Evaluation, Vol. 17, No. 1, pp. 27-36, (1998)

[14] H. J. Shin and J. L. Rose, "Guided waves by axisymmetric and non-axisymmetric surface loading on hollow cylinders," Ultrasonics 37, Issue 5, pp. 355-363, June, (1999)

[15] J. Ditri and J. L. Rose, "Excitation of guided wave modes in hollow cylinders by applied

surface tractions," J. App. Phys., Vol 72(7), 2589-2597, (1992)

[16] 정희돈, 신현재, Joseph L. Rose, "유도초음파를 이용한 박판에서의 결함의 검출에 관한 연구," 비파괴검사회지, Vol. 18, No. 6, pp.445-453, (1998)

[17] 신현재, Joseph L. Rose, 송성진, "유도초음파를 이용한 열교환기 튜브 결함탐상," 비파괴검사학회지 Vol. 20, No. 1, pp. 1-9, (2000)

[18] K. Kishimoto, H. Inoue, M. Hamada, and T. Shibuya, "Time frequency analysis of dispersive waves by means of wavelet transform," Journal of Applied Mechanics, Vol. 62, pp. 841-846, December, (1995)

[19] K. L. Veroy, S. C. Wooh, and Y. Shi, "Analysis of dispersive waves using the wavelet transform," Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Vol. 18 Edited by D. O. Thompson and D. E. Chimenti, Plenum press, New York, pp.687-694, (1999)

[20] J. B. Han, and J. C. Cheng, "Wavelet analysis of ultrasonic Lamb waves excited by pulsed laser in composite plate," Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Vol 18, Edited by D. O. Thompson and D. E. Chimenti, Plenum press, New York, pp.695-701, (1999)

[21] A. Abbate, D. Klimek, and P. Kotidis, "Analysis of dispersive ultrasonic signals by the ridges of the analytic wavelet transform," Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Vol 18, pp. 703-710, (1999)

[22] T.-T. Wu and Y.-Y. Chen, "Wavelet analysis of laser-generated surface waves in a layered structure with unbond rigions," Journal of Applied Mechanics, Vol. 66, pp. 507-513, (1999)

[23] C. K. Chui, *Wavelets: A Mathematical Tool for Signal Analysis*, Siam, Philadelphia, (1997)

[24] 이정빈, 송성진, 신현재, "Short time Fourier transform을 이용한 알루미늄 판에서의 판파의 모드확인", 한국비파괴검사학회, 춘계학술발표회, KSNT/SC0001, pp11-18, May 12, (2000)

[25] 신현재, 송성진, Joseph L. Rose, "원지력발전소 세관의 비파괴검사를 위한 유도초음파 모드선택에 관한 연구", 제7회 원전기기건전성 Workshop, 한국원자력안전연구소 주관, KINS/AR-560 Vol. 3, pp.329-340, May 9-10, (2000)

[26] H. J. Shin, R. Yi, and J. L. Rose, "Defect detection and characterization in power plant tubing using ultrasonic guided waves," Proceedings of the 14th WCNDT, New Delhi, India, p.2299, December 8-13, (1996)