

증기발생기 세관에서 유도초음파 전파에 관한 연구

A Study on Propagation of Guided Waves in a Steam Generator Tube

김 영 환*, 송 성 진*, 박 준 수*, 김 재 희**, 김 준 영***
 (Young H. Kim*, S. -J. Song*, J. -S. Park, J. H. Kim**, J. Y. Kim***)

*성균관대학교 기계공학부, **원자력연구소 종합안전평가부, *** 현대자동차
 (접수일자: 2004년 6월 14일; 채택일자: 2004년 7월 8일)

증기발생기 세관에서의 유도초음파 전파 특성에 관한 연구를 수행하였다. 증기 발생기 세관의 분산선도 및 특정 모드에 대응하는 초음파 입사각을 계산하였다. 수신된 유도초음파에 대하여 short time Fourier transform을 이용한 시간-주파수 분석을 통하여 유도초음파 모드를 확인하였다. 실험적으로 유도 초음파가 증기발생기 세관의 곡관 부분을 통과할 때 뚜렷한 모드 변환을 관측할 수 없었다. 유도 초음파를 이용한 증기발생기 세관의 최적 검사 모드를 제안하고 실험에 의하여 이를 확인하였다.

핵심용어: 증기발생기세관, 유도초음파, 분산성

투고분야: 초음파 및 탄성파 분야 (4.2)

Propagation of the guided waves in a steam generator (SG) tube was investigated. Dispersion curves and the incident angles corresponding to the specific modes were calculated for the SG tube. The modes of guided wave were identified by time-frequency diagrams obtained by short time Fourier transform. Group velocities were also determined from the time-frequency diagrams obtained at the different separations of transducers. In experiment, distinct mode conversion was not observed when the guided ultrasound passed curved region of the S/G tube. The optimum mode of guided wave for the inspection of SG tube was suggested and verified by experiments.

Keywords: steam generator tube, ultrasonic guided waves, dispersion

ASK subject classification: Ultrasonic and elastic waves (4.2)

I. 서론

국내에서 1970년대 이후 건설되어 운전 중인 원자력 발전소들의 운전 연한이 증기함에 따라 기기 및 구성 부품의 건전성이 경제적 측면과 안전성 측면에서 점차 중요한 이슈로 제기되고 있다. 그 중에서도 원자력 발전소 증기발생기 세관은 1차 계통과 2차 계통을 나누고 있는 압력 경계로서 그 두께가 1 mm 내외이며 가동특성상 결함이 발생할 가능성이 매우 높다. 또한, 이들의 파손은 방사능 물질의 유출로 이어지기 때문에, 이들의 건전성 확보는 원자력 발전소의 안전을 위해서 필수적이다. 외국에서는 이미 일본의 하마오카 원전 1호기 증기배관 파

열사고가 일어났으며[1], 2002년에 국내에서도 이와 유사한 사고가 발생하였다[2].

현재 증기발생기 세관에 대한 가동 전, 가동 중 검사에는 와전류 탐상 시험이 널리 사용되고 있다. 와전류 탐상 시험은 높은 감도로 매우 빠르게 검사할 수 있는 장점이 있으나 와전류 탐상 신호에 미치는 인자가 매우 많으며, 얻어지는 신호의 해석이 까다롭다[3]. 이런 문제점을 극복하기 위해서 초음파 탐상 시험을 세관에 적용하려는 연구가 수행되고 있다. 일례로 IRIS (Internal Rotary Inspection Systems)는 초음파 빔을 세관 내에서 회전시키면서 검사하는데, 회전하면서 세관 내를 움직여야 하므로 검사 속도가 매우 느리다는 단점이 있다. 이러한 경우에는 원거리 탐상의 장점을 지닌 유도초음파가 증기발생기 세관의 강력한 검사수단으로 제안되어 왔다[4]. 유도 초음파는 여러 모드가 존재하고 그 전파속도가 세관 재료의 물성은 물론이고, 전파모드나 주파수에

책임저자 : 김 영 환 (yhkim@skku.edu)
 440-746 경기도 수원시 장안구 청천동 300
 성균관 대학교 기계공학부
 (전화: 031-290-7460; 팩스: 031-290-5276)

따라 달라진다. 이러한 현상을 분산특성이라 하는데, 이는 유도 초음파를 세관 비파괴에 활용하는데 가장 큰 장애 중 하나이다.

본 연구에서는 유도초음파를 증기발생기 세관에 적용하기 위한 실험적 연구를 수행하였다. 이를 위하여 증기 발생기 세관의 유도초음파 분산 곡선을 계산하였으며, 웨지를 사용하여 유도초음파를 발생시키고 수신하였다. 시간-주파수 분석기법 중의 하나인 short time Fourier transform (STFT)을 이용하여 수신한 초음파 신호를 분석하여 발생된 유도 초음파의 모드를 확인하였다. 증기 발생기 세관의 곡관부에서도 동일한 실험을 수행하여 곡관부에서 모드 변환여부를 조사하였다. 탐촉자 사이의 거리를 변화시키면서 수신한 초음파 신호에 대하여 STFT를 수행하고 그 결과로부터 군속도를 구하였다. 또한, 증기발생기 세관에 사용할 유도초음파의 최적모드를 선정하여 이를 실험적으로 검증하였다.

II. 유도초음파

유도 초음파를 발생시키는 방법은 경사각 입사[5], comb transducer[6], synthetic phase tuning[7]과 같은 방법이 이용되는데, 그 중에서 그림 1에 나타낸 경사각 입사법이 널리 사용된다. 그림 1과 같이 검사체 내부로 사각 입사 된 종파나 횡파는 경계면에서 반사되면서 모드변환을 통해 수많은 종파와 횡파로의 다중반사를 일으키게 된다. 이때, 모드 변환된 종파 및 횡파의 파장이 피검체체의 두께와 비슷한 수준인 경우에는 반사된 부분파 모드들 사이에는 상호간섭과 중첩이 발생한다. 이와 같은 파동의 중첩은 상하 경계면에서 반사된 종파와 횡파, 각 부분 파동 모드의 파벡터성분 중 시험체의 종 방향으로 진행하는 파성분을 나타내는 k 성분을 제외한 두께 방향의 파성분인 p 와 q 로 표시되는 파성분 사이에 상쇠간섭이 일어난다. p , q 는 모드변환에 의해 피검체체 내에서 종파와 횡파로 다중 반사된 부분파 모드의 파벡터의 길이방향 벡터성분 k 로부터 Pythagoras의 삼각



그림 1. 경사각 입사에 의한 유도초음파의 발생.
Fig. 1. Generation of guided waves by an oblique incidence.

법을 이용하여 두께 방향 파벡터 성분을 다음과 같이 나타낼 수 있다[8].

$$p^2 \equiv k_L^2 - k^2 \equiv \left(\frac{w}{c_L} \right)^2 - k^2$$

$$q^2 \equiv k_T^2 - k^2 \equiv \left(\frac{w}{c_T} \right)^2 - k^2 \quad (1)$$

여기서 p , q 는 두께 방향의 파벡터 성분을 나타낸다. 이와 함께 피검체의 길이 방향으로의 보강간섭 효과를 통해 두께 방향이 아닌 종방향으로 전파하는 새로운 형태의 초음파가 합성되는데 이를 유도초음파라고 부른다[8].

유도초음파는 간섭이 일어나는 부분파 모드들에 따라서 다양한 유도 초음파의 모드가 존재한다. 이론적으로 무한한 수의 유도초음파 모드가 존재할 수 있는데, 이 모드들은 시험체의 밀도와 탄성 계수는 물론이고, 시험체의 형상파의 진행방향 등에 의해 결정된다. 유도초음파가 관의 길이 방향으로 진행하는 경우에는 원주방향과 두께 방향으로 간섭이 일어난다. 이에 의해 결정되는 유도초음파 모드를 나타내기 위해서 각각에 대하여 두 개의 첨자 M (circumferential order)과 n (mode number)을 사용한다. Circumferential order가 0이면 진행하는 유도초음파가 관의 축에 대해 대칭이고, 0이 아닌 경우에는 축 대칭이 아님을 의미한다. 축대칭 모드는 다시 종 (longitudinal) 모드와 비틀림 (torsional) 모드로 구별되어 지는데 이는, 파가 관의 벽 속에서 진동하는 양상에 따른다. 종 모드는 파가 진동하는 성분이 관의 길이방향과 반경방향으로만 있는 경우로서 $L(0, n)$ 으로 나타내며, 비틀림 모드는 파의 진동성분이 원주방향으로만 있을 경우로서 $T(0, n)$ 으로 나타낸다. $M=1, 2, 3, \dots$ 인 경우에는 비축대칭인 모드를 나타내는데 이를 굴곡 (flexural) 모드라고 불리우며 $F(M, n)$ 으로 표시한다. 굴곡 모드의 경우에는 관의 벽 속에서 파의 진동성분이 세 방향 (반경, 원주 그리고 길이방향)으로 모두 존재한다[9].

유도초음파가 관을 전파할 때 종 모드, 굴곡 모드, 비틀림 모드의 세 종류의 모드가 존재할 수 있다. 일반적으로 실험적으로 주로 사용되는 모드는 축 대칭인 종 모드이다. 그 이유는 일반적인 초음파 센서로 잘 발생될 수 있으며, 축 대칭이기 때문에 분석이 간단하기 때문이다. 그러나 비축대칭 센서의 사용 또는 비축대칭 결함으

표 1. 본 연구에서 사용한 증기발생기 세관 사양
Table 1. Specification of a steam generator tube used in the present work.

Item	Contents
Material	Inconel 600 HTMA
Longitudinal wave velocity (C_L)	5,915 m/s
Transverse wave velocity (C_T)	3,078 m/s
Density (ρ)	8,450 kg/m ³
Outside Diameter (D)	19.05 mm (0.75")
Thickness (d)	1.09 mm (0.043")
Total length (L)	16.94 m

로부터의 반사 등으로 인하여 실험적으로 비축대칭인 모드, 즉 굴곡 모드가 생성될 수 있기 때문에 비축대칭 모드에 대한 연구가 필수적이다. 그리고 비틀림 모드는 실험적으로 발생시키고 수신하는데 있어서 일반적인 초음파 센서로는 효율이 떨어져서 잘 사용되지 않고 있다.

III. 증기발생기 세관에 대한 유도초음파 실험

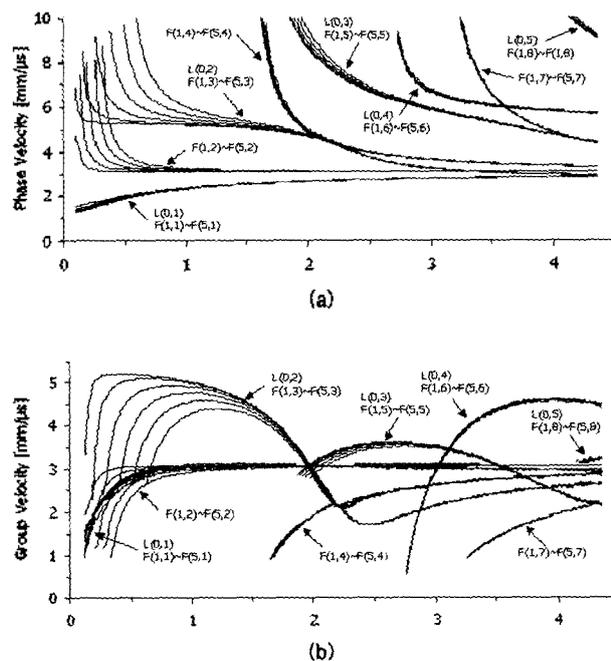


그림 2. 유도초음파 분산선도. (a) 위상속도. (b) 군속도.
Fig. 2. Theoretically determined dispersion curves of the SG tube under investigation. (a) Phase velocity and (b) group velocity.

3.1. 유도초음파 분산선도

본 연구의 대상으로 두산중공업(주)에서 제작한 울진 3, 4 호기용 증기발생기 세관을 선정하였으며, 이 세관에 대한 유도초음파 분산곡선을 구하였다. 등방성 탄성관에 대한 유도초음파 특성방정식은 관의 내벽과 외벽에서의 Navier's 방정식으로부터 유도된다[10]. 분산선도를 구하기 위하여 사용한 증기발생기 세관 물성치 항목들은 표 1과 같다. 분산해를 구하기 위해 Matlab을 사용하였다. 5-point 평균법을 적용하였으며, 해가 발산하거나 계산상의 오류로 인해 엉뚱한 값이 생기는 경우에는 앞 뒤 수치의 평균값 등으로 보정하였다[11]. 이와 같이 구한 분산곡선을 그림 2에 나타내었다.

3.2. 실험장치

유도초음파를 발생시키고 수신하기 위해서 Ritec의 RAM-10000 고출력 Pulsar/receiver를 사용하였으며, tone burst 출력과 연속적인 주파수는 PC에 연결하여 전용 프로그램에서 조절하였다. 수신된 유도초음파 신호를 표시하고 저장하기 위해서 디지털 오실로스코프(Lecory 9310A)를 사용하였다. 증기발생기 세관은 내·외부의 위치에 따라 그 폭들의 차이는 있으나 모양은 U자형으로 되어있다. 정계면에서의 초음파 모드변환 여부

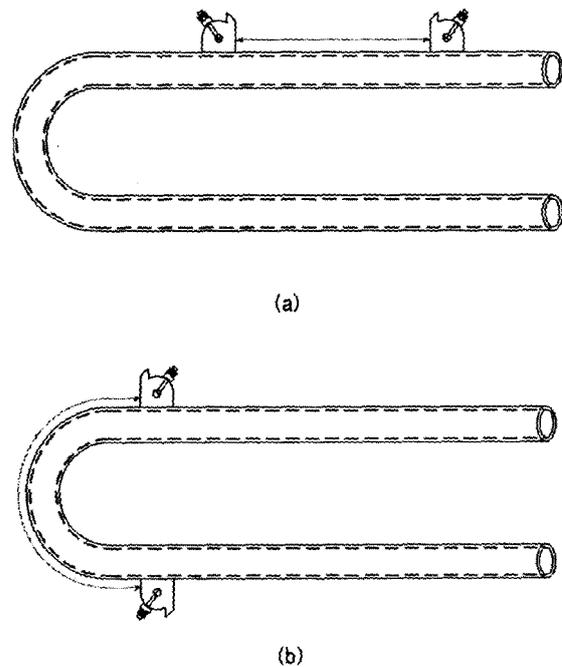


그림 3. 증기발생기 세관에서의 유도초음파 실험. (a) 직관부 (b) 곡관부
Fig. 3. Experimental setup for guided waves in a SG tube at (a) straight region and (b) bent region.

를 판단하기 위하여 그림 3과 같이 중기발생기 세관의 직관부와 곡관부에서 각각 실험을 수행하였다.

원하는 모드의 유도초음파를 선택적으로 발생시키기 위해서는 초음파 입사각을 바꾸어 주어야 한다. 입사각을 자우로이 바꾸기 위해서 가변각 웨지를 설계, 제작하였다. 웨지의 재질은 Plexiglass로써 이 재질에서의 종파속도는 2720 m/s 이다. 본 연구에서는 중심주파수가 각각 0.5, 1.0 및 2.25 MHz인 Panametrics 사의 Accusan-S, 사각형 탐촉자들을 사용하였다. 제작된 가변각 웨지에 초음파 탐촉자가 부착된 모습을 그림 4에 나타내었다.



그림 4. 제작된 가변각 웨지에 초음파 탐촉자가 부착된 모습.
Fig. 4. Transducers mounted on the fabricated wedges for variable incident angle.

3.3. 유도초음파 모드와 입사각

경사각 입사를 이용하여 유도 초음파를 발생시키고자 할 때에, 유도초음파의 위상속도와 입사각의 관계는 Snell의 법칙에 의해 다음과 같이 주어진다.

$$\sin \theta = \frac{v}{c_p} \quad (2)$$

여기서 v 는 초음파 센서에 부착된 웨지의 종파속도, θ 는 웨지에서의 입사각, 그리고 c_p 는 유도초음파의 위상 속도이다. 주어진 탐촉자의 주파수와 관의 두께로부터 fd 값이 결정되면, 원하는 모드의 위상속도를 Fig. 2(a)의 위상속도 분산곡선에서 구할 수 있다. 위상속도가 결정되면 식(2)로부터 입사각이 결정된다. 이론적으로는 단일진동수와 단일위상속도를 결정하여 위상속도 분산선도 상의 특정지점의 모드를 발생시킬 수 있으나, 실질적으로는 가진하는 신호의 시간적인 길이와 센서의

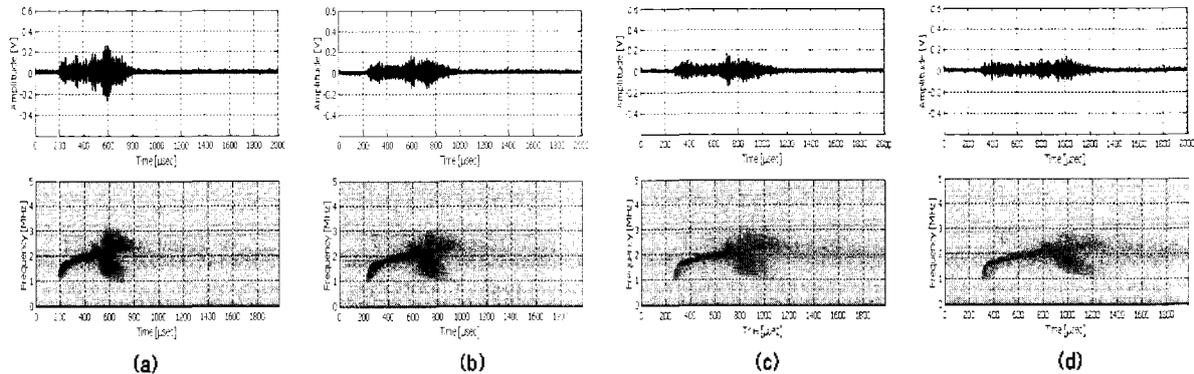


그림 5. 주파수가 2.25 MHz이고 입사각이 30°일 때에 직관부에서 수신된 유도 초음파 신호와 STFT. 탐촉자 사이의 거리는 (a) 0.8 m (b) 1.0 m (c) 1.2 m (d) 1.4 m 이다.

Fig. 5. Received RF signals and their STFT for the straight region obtained by a 2.25 MHz transducer and an incident angle of 30°. The distances between the transducers were (a) 0.8 m (b) 1.0 m (c) 1.2 m and (d) 1.4 m.

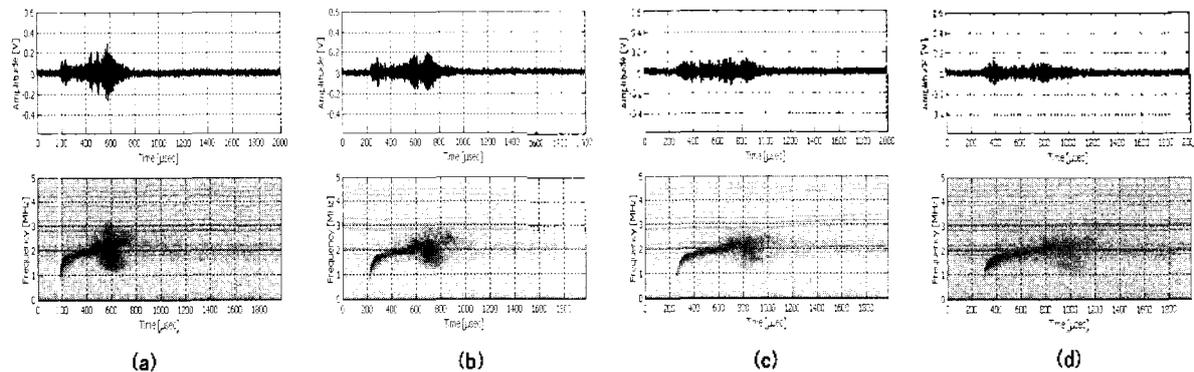


그림 6. 중심주파수가 2.25 MHz이고 입사각이 30°일 때에 곡관부에서 수신된 유도 초음파 신호와 STFT. 탐촉자 사이의 거리는 (a) 0.8 m (b) 1.0 m (c) 1.2 m (d) 1.4 m 이다.

Fig. 6. Received RF signals and their STFT for the curved region of the SG tube obtained by a 2.25 MHz transducer and an incident angle of 30°. The distance between the transducers were (a) 0.8 m (b) 1.0 m (c) 1.2 m and (d) 1.4 m.

표 2. 탐촉자 거리를 달리할 경우에 주파수성분에 따른 통과시간.

Table 2. The transit time for different frequency components at various distance between transducers.

Distance(mm)	Transit time (μs)		
	f=1.0 MHz	f=1.5 MHz	f=2.0 MHz
0800	180.82	191.78	337.53
1000	222.47	236.71	410.96
1200	260.82	290.41	493.15
1400	300.27	337.53	574.25
1600	338.63	380.27	654.25
Slope (μs/mm)	0.1967	0.2389	0.3984
Group velocity(m/s)	5.080	4.190	2.510

크기 제한으로 인하여 단일 진동수와 단일 위상속도를 갖는 유도초음파를 발생시키기가 곤란하다. 따라서, 실험적으로 발생하는 유도초음파는 시스템, 사용하는 탐촉자의 주파수 폭 및 빔 퍼짐 각도 등에 의해 결정되어지는 진동수 대역과 위상속도의 대역을 가지고 있다.

3.4. 유도초음파 송수신

대표적으로 2.25 MHz 탐촉자를 사용하여 입사각이 30°로 하고 송수신 탐촉자 사이의 거리를 0.8, 1.0, 1.2, 1.4 m로 하였을 때에 직관부와 곡관부에서 수신된 파형과 STFT 결과를 그림 5와 6에 각각 나타내었다. 두 그림을 비교해 보면 경과시간과 STFT 결과가 큰 차이가 없어서 확인한 모드 변환이 일어나지 않은 것으로 판단된다. 다른 주파수와 다른 입사각에 대해서도 유사한 결과를 얻을 수 있었다. 이는 관경에 비하여 대상체의 곡률이 크지 않아서 모드 변환으로 인한 신호의 변화를 고려하지 않아도 된다는 것을 의미한다.

그림 5에서 알 수 있듯이 수신된 파의 시간 폭은 매우 길며 주파수 성분은 도착시간에 따라 달라져서 전형적인 분산특성을 나타내고 있다. 따라서, 수신된 유도 초음파는 전파거리가 멀어질수록 분산에 의해 파의 에너지가 긴 시간 동안에 퍼져서 진폭이 줄어들고 파형의 모양도 달라진다. 그럼에도 불구하고 STFT의 형태는 유사하여 동일한 모드가 전파됨을 알 수 있다. 즉, 낮은 주파수 성분 (1 MHz)이 먼저 도착하고 시간이 경과할수록 높은 주파수 성분 (2 MHz)이 도착하여 높은 주파수 성분의 군속도가 더 느림을 정성적으로 유추할 수 있다.

전파모드를 확인하기 위해서는 정량적인 군속도 값을 알 필요가 있다. 군속도를 측정하려면 초음파 전파거리를 전파시간으로 나누면 되는데, 일반적으로 전파시간은 시험체의 내부에서 진행된 시간 뿐 아니라, 탐촉자와 웨지 내에서의 시간 지연 등을 포함한다. 지연시간을 상쇄하기 위해서 탐촉자 사이의 간격을 0.2 m 씩 움직이면

서 전파시간을 측정하였다. 분산이 있는 파의 군속도를 시간대역 파형에서 직접 측정하기는 매우 어렵다. 따라서, 그림 5의 STFT에서 대표적으로 1.0, 1.5, 2.0 MHz 주파수대의 전파시간을 측정하여 그 결과를 Table 2에 나타내었다. 또한, 각각의 주파수에 대하여 탐촉자 거리에 대한 전파시간의 변화를 그림 7에 나타내었다. 그림 7에서 주파수에 해당하는 직선의 기울기를 구하고 그 값의 역수로 군속도를 정의하여 Table 2의 하단에 표시하였다.

그림 8에 유도초음파의 모드 분석을 위한 다이어그램을 나타내었다. 이 다이어그램은 유도초음파 모드 분석을 위한 유용한 정보들을 체계적으로 보여주고 있다 [12]. 그림 8(a)는 수신된 유도초음파의 rf 파형이고, (b)는 이론적으로 계산된 위상속도 분산곡선이며, (c)는 수신된 유도초음파의 주파수 스펙트럼, (d)는 수신된 유도초음파의 STFT 결과이고, (e)는 계산된 군속도 분산곡선이다. 여기에서는 대표적으로 2.25 MHz 탐촉자와 입사각이 30°인 경우에 해석한 결과를 보여주고 있다. 입사각이 30°로 정해지면 이에 해당하는 위상속도는 5,370 m/s로 결정되고, 그림 8(b)의 위상속도 분산곡선에서 발생 가능한 모드들을 알 수가 있다. 실제로 웨지를 사용하여 작은 구경의 관에서 유도 초음파를 발생시키고자

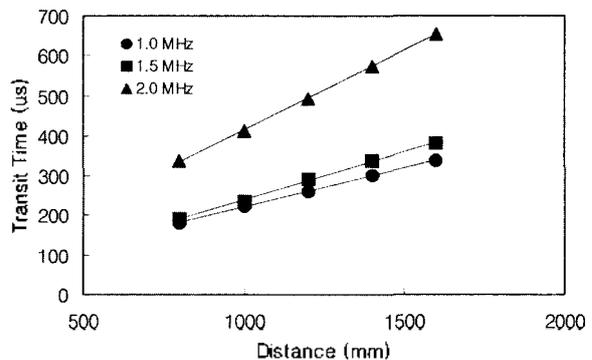


그림 7. 탐촉자 거리를 달리할 경우에 주파수성분에 따른 통과시간. Fig. 7. Transit time versus transducer distances for the different frequency components.

할 경우에 입사각은 원하는 값 이외에도 넓은 범위의 값을 가진다. 따라서, 탐촉자의 주파수 범위와 입사각 범위를 고려하면 그림 8(b)의 사각진 부분에 해당하는 모드가 발생 가능성이 크다. 표2의 측정값이 그림 8(e)에 나타난 군속도 분산곡선상의 군속도와 잘 일치한다. 따라서 탐촉자에서 발생하는 주파수 성분의 폭과 빔 퍼짐으로 인하여 위상속도와 주파수 성분에 어느 정도 오차는 있으나 발생된 유도초음파 모드는 L(0,2), F(1,3) - F(5,3)임을 알 수 있다.

VI. 결합 검출 최적 모드 선정

결합 검출을 위한 유도초음파의 최적 모드 선정 기준은 검사 대상체에 따라 달라질 수 있으나, 본 연구에서는 다음과 같은 사항을 고려하였다.

- 군속도 분산선도에서 속도가 되도록 가장 빠른 모드를 선정한다. 피검체에 결합이 존재하게 되면 그 근처를 지나가는 초음파는 물리적인 특성상 경계면에서 모드변환 되어, 그 모드와 속도가 바뀌고 예상치 못한 신호가 발생하면 신호해석이 어렵다. 따라서 빠른 군속도를 가지는 모드를 선정하면 다른 모드들과의 식별이 용이하고 모드변화 여부를 명확히 확인할 수 있다.
- 위상속도 분산곡선에서 비교적 평탄한 부분의 모드를 선정한다. 입사각에 의해 결정되는 위상속도에 대해

fd의 폭이 넓으면, 탐촉자의 초음파에너지 중에서 많은 양이 유도초음파로 변환 될 가능성이 높아지며, 또한 넓은 주파수대역으로 인해 펄스 폭 (pulse duration)이 좁아져서 시간 분해능 (resolution)이 높아지는 장점이 있다.

- 선정된 모드 부근에 여러 모드가 발생하지 않아야 한다. 비슷한 속도를 가진 모드가 많으면 구별이 어려워져, 신호의 특성 분석이 곤란해 진다.

- 적합한 탐촉자를 쉽게 구할 수 있어야 한다. 현재 일반적으로 구할 수 있는 탐촉자는 중심주파수 및 대역폭, 크기나 모양이 제한되어 있다. 이러한 탐촉자 중에서 앞서 언급된 조건들을 만족하는 탐촉자를 선정해야 한다.

군속도 분산선도에서 속도가 가장 빠른 모드는 L(0,2)의 0.5 MHz부근이나 이 부분은 위상속도 분산선도에서 평탄하지 않고 군속도 분산선도 상에서 부근에 여러 개의 모드 발생 여지가 있다. 1.0 MHz 부분은 속도도 비교적 빠르고 위상속도 곡선도 비교적 평탄하며 군속도 선도의 모드들의 뭉쳐있어 수신 신호의 강도도 높을 것으로 예상된다. 그리고 1.0 MHz의 탐촉자는 초음파 탐상에서 일반적으로 사용되고 있어 구입이 용이하다. 1 MHz의 중심 주파수를 가진 탐촉자에서 L(0,2) 모드를 발생시키기 위한 이론적인 입사각은 31.6°이다. 탐촉자의 빔이 퍼지는 각도와 주파수의 대역폭 등을 고려하고, 또 L(0,2) 모드의 1.0 MHz 부근에는 F(1,3), F(2,3)이 뭉쳐있어 이 모드들 또한 발생할 가능성이 있으므로 본 실험에서는 입사각을 30°로 선정하였다.

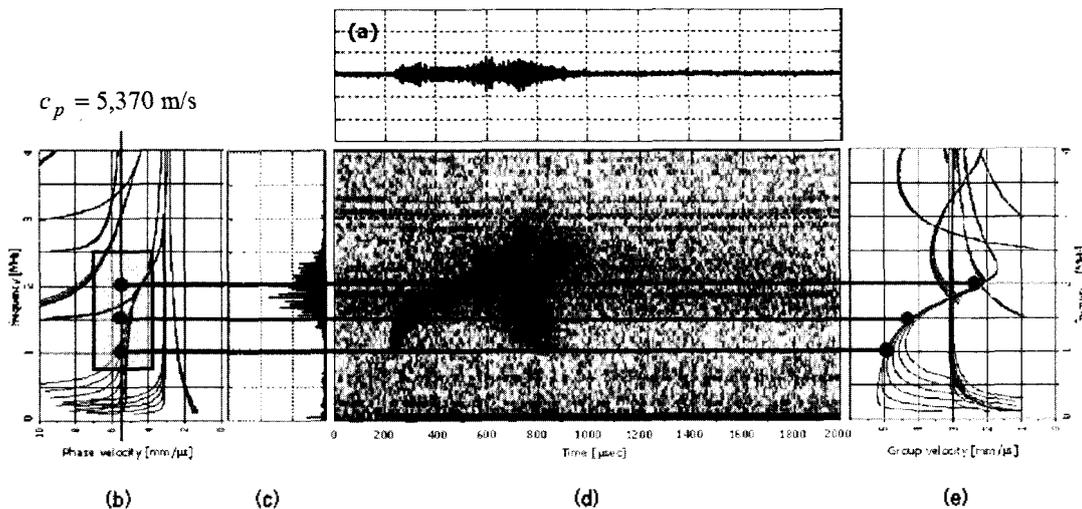


그림 8. 유도초음파 모드 분석용 다이어그램(2.25 MHz 탐촉자, 입사각 30°). (a) 수신된 유도초음파의 시간대역 파형, (b) 계산된 위상속도 분산곡선, (c) 수신된 유도초음파의 주파수 스펙트럼, (d) STFT 결과, (e) 계산된 군속도 분산곡선.
 Fig. 8. An example of the analysis: (a) time-domain waveform, (b) the phase velocity dispersion curve, (c) the frequency spectrum of the waveform, (d) the short time Fourier transform and (e) the group velocity dispersion curve.

그림 9는 pitch-catch 방식으로 입사각 20°에서 0.2 m 거리차에 따른 RF 신호와 STFT이고 그림 10은 동일 조건에서 입사각이 30°인 경우를 보여주고 있다. 그 결과 그림 9는 그림 10에 비해서 STFT의 신호가 명확하지 않으며 거리차에 따라 신호의 진폭이 급격하게 감소하고 펄스가 퍼지고 있다. 반면에 그림 10에 나타낸 바와 같이 입사각이 30°인 경우에는 거리에 따른 진폭의 감쇠가 적기 때문에 보다 멀리 전파할 수 있는 가능성이 있고 STFT결과도 보다 뚜렷하여 모드를 분석하는 데에 유리하다. 또한, 그림 10의 앞부분에 나타나는 피크에 대하여 탐촉자 사이의 거리와 도달시간 사이의 관계는 그림 11과 같으며, 이로부터 균속도는 4,880 m/s임을 알 수 있다.

그림 12는 선택된 모드에 대하여 유도초음파 분석용 다이어그램을 나타내고 있다. 이 다이어그램에서는 RF 신호(a), FFT(c), 위상속도(b)와 균속도(e) 분산선도 그리고 STFT(d)를 유기적으로 분석할 수가 있다. 입사각

이 30°이므로 위상속도는 5,370 m/s이다. 이를 위상속도 분산선도와 균속도 분산선도에서 보면 RF 신호에서 좌측부분(속도가 빠른 부분) 신호는 L(0,2) 또는 F(1,3), F(2,3)이다. 이는 측정된 균속도와 일치한다. 한편 그림 9의 RF 신호 우측부분(속도가 느린 부분) 신호는 STFT가 명확하지 않고 분산이 큰데 균속도는 대략 1,200 - 1,800 m/s이며 이는 L(0,3) 또는 F(1,5)-F(5,5) 모드들의 연장선에 해당하는 것으로 추정된다. 결론적으로 증기발생기 세관의 결함 검출 최적모드는 L(0,2) 또는 F(1,3), F(2,3)이며 이 모드를 발생시키기 위해서는 1 MHz 초음파 탐촉자를 사용하여 입사각이 30°인 웨지를 사용하여야 한다.

V. 결론

증기 발생기 세관에 유도초음파를 적용하기 위한 기본

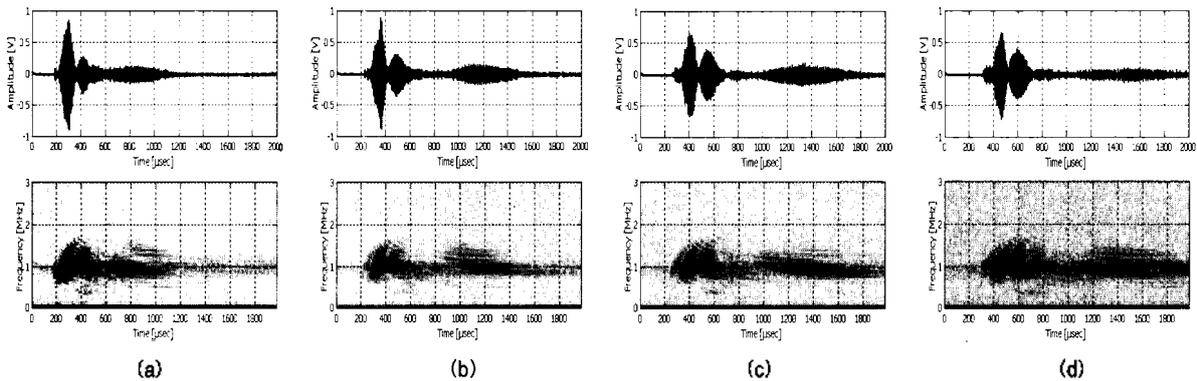


그림 9. 중심주파수가 1.0 MHz이고 입사각이 20°일 때 수신된 유도 초음파 신호와 STFT 결과. 탐촉자 사이의 거리는 (a) 0.8 m (b) 1.0 m (c) 1.2 m (d) 1.4 m 이다.

Fig. 9. Received RF signals and their STFT obtained by a 1.0 MHz transducer and an incident angle of 20°. The distance between the transducers were (a) 0.8 m (b) 1.0 m (c) 1.2 m and (d) 1.4 m.

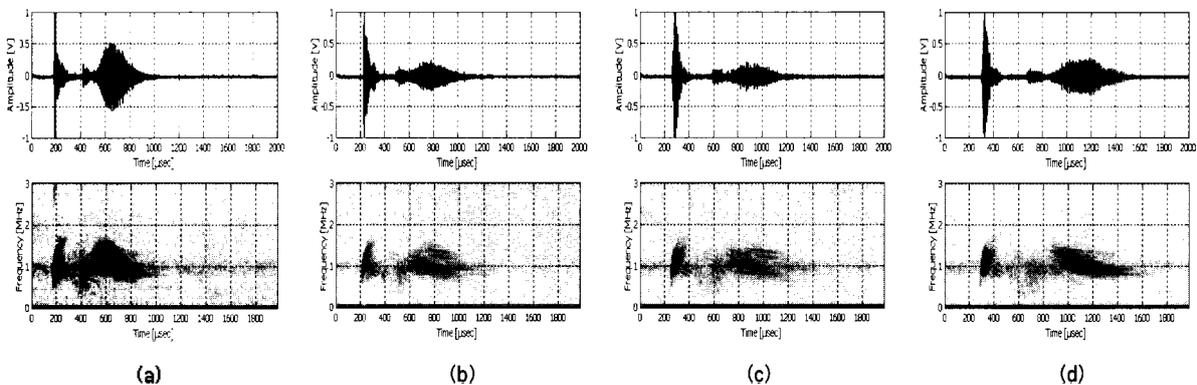


그림 10. 중심주파수가 1.0 MHz이고 입사각이 30°일 때 수신된 유도 초음파 신호와 STFT 결과. 탐촉자 사이의 거리는 (a) 0.8 m (b) 1.0 m (c) 1.2 m (d) 1.4 m 이다.

Fig. 10. Received RF signals and their STFT obtained by a 1.0 MHz transducer and an incident angle of 30°. The distance between the transducers were (a) 0.8 m (b) 1.0 m (c) 1.2 m and (d) 1.4 m.

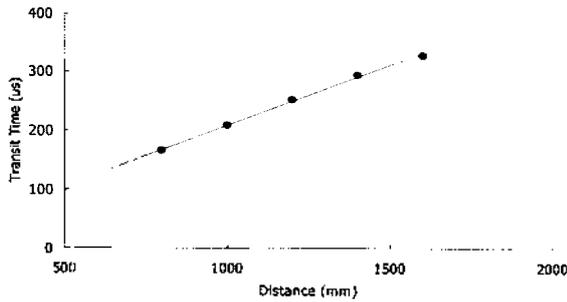


그림 11. 최적모드에서의 탐촉자 거리에 따른 통과시간.
 Fig. 11. Transit time versus transducer distances for the optimized mode.

적 연구와 실험을 수행하였고 그 결과 적용 가능성을 확인하였다. 증기 발생기 세관을 실험 대상으로 하여 분산선도 및 특정 모드에 대응하는 초음파 입사각의 계산을 수행하였고 short time Fourier transform을 이용한 시간-주파수 분석을 통하여 유도초음파 모드를 확인하였다. 또 서로 다른 거리에 배치된 탐촉자를 사용하여 수신한 초음파 신호에 대한 시간-주파수분석으로부터 군속도를 계산하였다. 그리고 유도 초음파가 증기발생기 세관의 곡관 부분을 통과할 때 모드 변환이 발생하지 않는 것을 실험적으로 확인하였으며, 유도 초음파를 이용한 증기발생기 세관의 최적 검사 모드를 제안하고 실험에 의하여 이를 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 및 한국과학기술기획평가원의 지원을 받아 2002년도 원자력 연구개발사업을 통해 수행되었습니다.

참고 문헌

1. 한국원자력연구소, "일본 히미오까(浜岡) 원전 1호기 잔열제거계통 증기배관 파단 사고 예비분석보고서," KAERI/TR-1944, 2001.
2. 증기발생기 연구협의회/한국원자력 안전기술원, "울진 4호기 증기발생기 전열관 파나사고 원인분석 및 대책," KINS/RR-203, 2003.
3. S. -J. Song, Y. H. Kim, E. -L. Kim and Y. H. Choi, "Model-based interpretation of experimental eddy current signals obtained from steam generator tubes by bobbin probe," *Insight*, 45(5), 337-343, 2003.
4. J. L. Rose, "A Baseline and Vision of Ultrasonic Guided Wave Inspection Potential," *J. Press. Vess. T. ASME*, 124, 273-282, 2002.
5. 송성진, 박준수, 신현재, "폴리에틸렌 코팅 가스배관의 광범위탐상을 위한 유도초음파 모드 선정 및 결함검출," *비파괴검사학회지*, 21(4), 406-414, 2001.
6. J. L. Rose, S. P. Pelts and M. J. Quarry, "A comb transducer model for guided wave NDE," *Ultrason.*, 36, 163-169, 1999.
7. S. -C. Woo and Y. Shi, "Synthetic phase tuning of guided wave," *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelec. Freq. Contr.*, 48, 200-223, 2001.
8. K. F. Graff, "Wave motion in elastic solids," Dover Publication, New York, 1975.

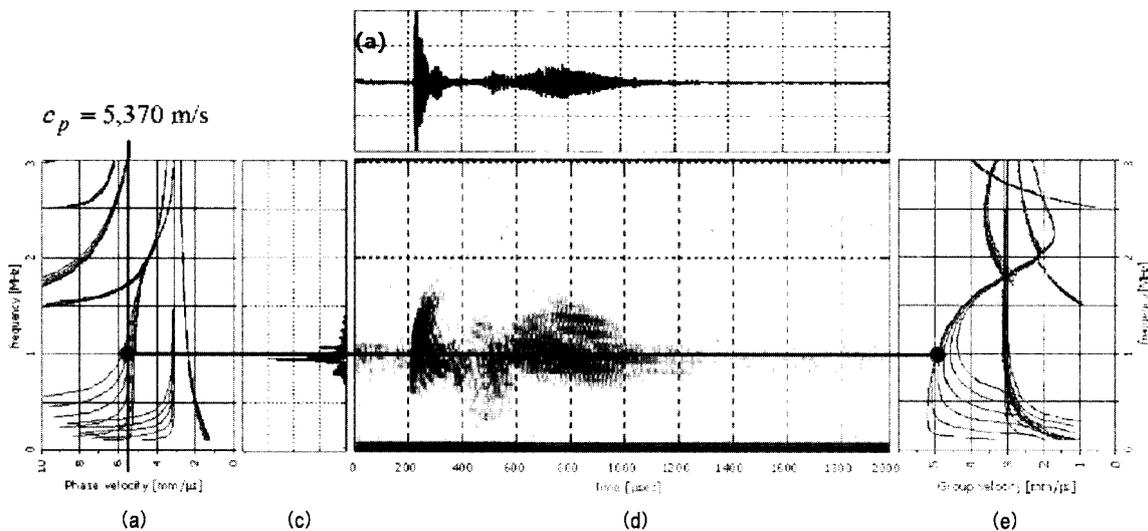


그림 12. 최적 모드에 대한 유도초음파 분석 다이어그램(1.0 MHz 탐촉자, 입사각 30°). (a) 수신된 유도초음파의 시간대역 파형, (b) 계산된 위상속도 분산곡선, (c) 수신된 유도초음파의 주파수 스펙트럼, (d) STFT 결과, (e) 계산된 군속도 분산곡선.
 Fig. 12. Analysis of guided waves for the optimized mode (a 1.0 MHz transducer and an incident angle of 30°): (a) time-domain waveform, (b) the phase velocity dispersion curve, (c) the frequency spectrum of the waveform, (d) the short time Fourier transform and (e) the group velocity dispersion curve.

- 9. H. J. Shin and J. L. Rose, "Guided waves by axisymmetric and non-axisymmetric surface loading on hollow cylinders," *Ultrasonics*, 37, 355-363, 1999.
- 10. H. J. Shin, R. Yi and J. L. Rose, "Defect detection and characterization in power plant tubing using ultrasonic guided waves," *Proc. 14th WCNDT*, New Delhi, India, Dec. 8-13, pp. 2299-2302, 1996.
- 11. 송성진, 김영환, 이동훈, 이현동, 배철호, "스케일이 있는 금수관내의 유도초음파의 전파 특성에 관한 연구," *비파괴검사학회지*, 23(1), 1-6, 2003.
- 12. Y. H. Kim, S. -J. Song and S. -D. Kwon, "Determination of dispersion curves of phase and group velocities using backward radiated leaky Lamb waves," *Rev. Prog. Quant. Nondestr. Eval.*, 23, 150-157, AIP, New York, 2004.

저자 약력

• 김 영 환 (Young H. Kim)

음향학회지 제 22권 제1호 참조

• 송 성 진 (Sung-Jin Song)

음향학회지 제 22권 제1호 참조

• 박 준 수 (Joon-Soo Park)



1999년: 성균관대학교 기계공학과 (학사)
 2001년: 성균관대학교 기계공학과 (석사)
 2001년~현재: 박사과정
 * 주관심분야: 비파괴시험, 초음파모델링, 유도초음파

• 김 재 희 (Jae Hee Kim)



1980년: 서울대학교 기계공학과 (학사)
 2002년: 서울대학교 기계공학과 (석사)
 2003년: 한국과학기술원 생산공학과 (박사)
 1983년 ~ 현재: 한국원자력연구소
 * 주관심분야: 검사자동화, 자동제어, 로보틱스, 인공지능

• 김 준 영 (Joon Young Kim)



2000년: 성균관대학교 기계설계학과 (학사)
 2002년: 성균관대학교 기계설계학과 (석사)
 2003년: 한국원자력연구소 석사 후 연수생
 2004년~현재: 현대기아연구개발본부 자동변속기설계팀 연구원
 * 주관심분야: 유도초음파, 자동변속기 기어설계