

유도초음파를 이용한 열 교환기 튜브 결함 탐상

Inspection of Heat Exchanger Tubing Defects with Ultrasonic Guided Waves

신현재*, Joseph L. Rose**, 송성진*

Hyeon Jae Shin*, Joseph L. Rose** and Sung-Jin Song*

초 록 본 연구에서는 유도초음파를 이용하여 열 교환기와 증기발생기 튜브의 결함을 비파괴적으로 탐상하고 그 크기를 산정하였다. 이론적인 해석을 위해 인코넬 (Inconel) 튜브에 대한 위상 및 군속도 분산선도를 Longitudinal 모드와 Flexural 모드에 대해 구하였다. 튜브의 원주방향 레이저노치와 튜브 지지대 하단의 방전가공결함(EDM wear)을 각각 비대칭 및 대칭 탐촉자 세트를 사용하여 탐상하였다. 실험결과 방전가공결함은 L(0, 2), L(0, 3), L(0, 4) 모드로 탐상되었으며, 그 중 L(0, 4) 모드가 결함으로부터 가장 잘 반사되었다. 레이저노치의 경우에는 L(0, 1) 모드 주변의 Flexural 모드가 결함을 탐상하고 크기를 산정하는데 사용될 수 있음을 보였다.

주요용어 : 유도초음파, 비파괴검사, 튜브, 분산선도

Abstract This study shows the defect detection and sizing capability of ultrasonic guided waves in the nondestructive inspection of heat exchanger and steam generator tubing. Phase and group velocity dispersion curves for the longitudinal and flexural modes of a sample Inconel tube were presented for the theoretical analysis. EDM(Electric Discharge Machining) wears in tubing under a tube support plate and circumferential laser notches in tubing were detected by an axisymmetric and a non-axisymmetric transducer set up, respectively. EDM wears were detected with L(0, 2), L(0, 3) and L(0, 4) modes and among them L(0, 4) mode was found to be the most sensitive. It was also found that the flexural modes around L(0, 1) mode could be used for the detection and sizing of laser notches in the tubing.

Keywords: ultrasonic guided waves, nondestructive inspection, tube, dispersion curves

1. 서 론

유도초음파(guided waves)는 구조물의 기하학적 구조를 따라 유도되어지는 초음파로써, 박판이나 튜브와 같은 두께가 얇은 구조물을 따라 전파하는 파이며, 박판의 경우 판파 또는 Lamb wave로 불려지기도 한다. 발전소에 사용되는 증기발생기나 열 교환기 같은 튜브는 좋은 파유도체(wave guide)로써 진동수에 따라 유도초음파가 튜브의 길이 방향으로 수m에서 수십 m까지 전파되어진다. 이런 유도초음파의 장거리 전파

특성을 이용하면 고정된 탐촉자 위치에서 원거리 탐상을 할 수 있기 때문에, 이는 모든 점에서 탐상(point by point inspection)해야 하는 기존의 방법에 비해 시간적 경제적측면에서 효율을 향상시킬 수 있다.

튜브에서의 유도초음파에 관한 연구는 1950년대 후반과 1960년대의 기초적 배경[1-3]을 바탕으로 간헐적인 연구가 이루어지다가[4], 1990년대에 열 교환기 튜브나 파이프의 비파괴검사에 적용하기위해 이론적연구와 실험적연구가 활발히 진행되었다[5-16]. 최근에는 원자력발전소의 증기발생기 비파괴 안전진단에 유도초

음파를 응용하기위한 연구가 진행되었으며 그 가능성이 입증되었다[11, 12, 15]. 또한 미국의 Argonne National Laboratory에서도 증기발생기의 원주방향 crack의 크기를 유도초음파로 측정함으로써, 유도초음파의 응용 가능성을 보였으며, 1997년에는 EPRI (Electric Power Research Institute)의 NDE Center에서 제작한 증기발생기 Mock-up에 대한 유도초음파의 성능 테스트(blind test)에서 만족한 결과를 얻게 되어 Duke Power Company의 교체된 노후 증기발생기 McGuire 1 SGs을 시험 탐상을 하기에 이르렀다. 그러므로 열 교환기 튜브나 증기발생기 튜브에서 유도초음파의 특성을 이해하는 것은 비파괴 안전진단 분야에서 필요할 뿐만 아니라 또 다른 응용분야의 개척을 위해서도 흥미 있는 일이다.

본 논문에서는 튜브에서 유도초음파의 특성을 간략히 소개하고 비파괴 안전진단에 적용하기 위한 결함 탐상과 크기측정 실험의 수행결과를 논의하였다. 먼저 탄성판에서 유도초음파의 전파특성을 이해하기 위해 위상 및 군속도 분산선도를 증기발생기 인코넬 튜브에 대해 제시하였다. 실험에 있어서는 튜브 지지대(tube support plate : TSP) 아래의 열 교환기 튜브에 있는 EDM wear를 측대칭 탐촉자를 이용하여 탐상하였으며, 또한 결함의 폭이 아주 좁은 원주방향의 레이저노치는 비대칭 탐촉자를 이용하여 탐상하고 크기를 측정하는 실험을 실시하였다.

2. 탄성판의 유도초음파 전파특성

Fig. 1에 나타낸 것과 같은 등방성 탄성판에는 무한개의 유도초음파 모드가 전파될 수 있다. 이 유도초음파 모드들은 넓은 진동수영역에서 존재하며, 같은 진동수영역에 여러 개의 유도초음파 모드가 존재할 수 있는데, 일반적으로 진동수가 증가하면서 존재 가능한 모드의 수도 증가한다. 또한 각 모드는 서로 다른 전파 및 반사 특성을 가지고 있으며 전파속도도 진동수에 의존하는 분산특성을 가진다. 유도초음파 모드의 분산특성을 이해하는 것은 유도초음파를 이용한 비파괴 평가를 위해 우선적으로 요구되는 사항인데 식 (1)과 같은 운동방정식을 주어진 경계조건에 대해 풀면 원하는 모드에 대한 분산선도를 얻을 수 있다.

$$\mu \nabla^2 u(\lambda + \mu) \nabla \nabla \cdot u = \rho(\partial^2 u / \partial t^2) \dots\dots\dots (1)$$

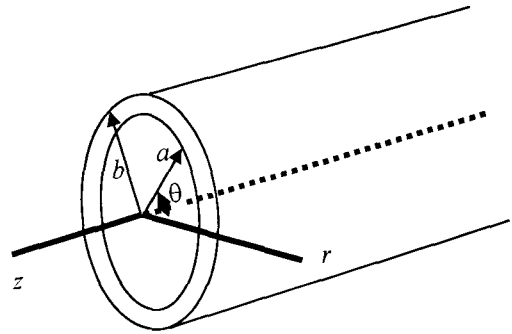


Fig. 1 A traction free infinitely long hollow cylinder with the inner radius a and outer radius b

여기서 u 는 입자의 변위벡터, ρ 는 밀도, μ 와 λ 는 Lamé's elastic constants이다. Fig. 1에 나타낸 내벽과 외벽의 반지름이 a 와 b 이고 경계면이 자유로운 탄성판의 경우, 경계조건은 식 (2)와 같다.

$$\sigma_{rr} = \sigma_{rz} = \sigma_{r\theta} = 0 \text{ at } r = a \text{ and } r = b \dots (2)$$

여기서 $\sigma_{rr}, \sigma_{rz}, \sigma_{r\theta}$ 은 원통형 좌표계(cylindrical coordinator system)에서 수직응력과 전단응력을 나타내는 것이고 여기서 r 은 탄성판의 반경방향 위치를 나타낸다. (1)을 u 에 대해 풀고 변위-변형률과 응력-변형률 관계를 이용하여 응력을 구한 후 식 (2)의 경계조건에 대해 정리하면 6개의 선형방정식을 얻을 수 있고 이를 행렬 형태로 나타내면 다음과 같다.

$$c_{ij} X = 0 \quad (i, j = 1, \dots, 6) \dots\dots\dots (3)$$

여기서 c_{ij} 는 선형탄성계수 행렬이고 X 는 6개의 미지상수 $\{A, B, A_1, B_1, A_2, B_2\}$ 이다. 식 (3)의 제차시스템(homogeneous system)이 자명하지 않은 해(non-trivial solution)를 가지기 위해서는 c_{ij} 의 determinant가 0이 되어야 하므로 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$D = \left| c_{ij} \right| = 0 \quad (i, j = 1, \dots, 6) \dots\dots\dots (4)$$

여기서 determinant의 각 요소들은 Bessel 함수와

Table 1 Material properties and dimensions of the sample tubes

Materials	Outer Diameter	Thickness	Longitudinal velocity	Transverse velocity
Inconel	18.9mm	1.22mm	6.29Km/s	3.23Km/s

modified Bessel 함수로 이루어지고 상세한 것은 [1]에서 찾아볼 수 있다. 식 (4)는 진동수식(frequency equation)으로 불리어지는데, 이로부터 위상속도 분산선도(phase velocity dispersion curves)를 구할 수 있다. 또한 군속도 분산선도(group velocity dispersion curves)는 다음의 관계식을 이용하여 위상속도로부터 구할 수 있다.

$$V_g = \frac{d\omega}{dk} \dots\dots\dots (5)$$

여기서 ω 는 각진동수이고, k 는 파수이다.

관에서의 유도초음파 모드는 크게 축 대칭 모드(axisymmetric mode)와 비대칭 모드(non-axisymmetric mode)로 분류할 수 있고, 여기서 축 대칭 모드는 다시 longitudinal 모드와 torsional 모드로 나누어 생각할 수 있으며, 각 모드는 다음과 같이 나타낸다.

- Longitudinal modes(axisymmetric modes) : L(0, n)
- Torsional modes(axisymmetric modes) : T(0, n)
- Flexural modes(non-axisymmetric modes) : F(M, n)

여기서 M 은 circumferential order이고 n 은 모드 번호이다. 축 대칭 모드의 경우에는 $M = 0$ 이며, 비대칭 모드에서는 $M = 1, 2, 3, \dots$ 이다. 그리고 각 M 에 대해 여러 개의 $n = 1, 2, 3, \dots$ 이 존재하므로 결국 관에서는 무한개의 유도초음파 모드가 존재한다[6]. Table 1에 제시된 사양의 증기발생기튜브의 분산선도를 Longitudinal 모드와 Flexural 모드에 대해 나타낸 것이 Fig. 2이다.

3. 유도초음파를 이용한 튜브 탐상 실험

3. 1. Tone Burst System

유도초음파를 발생시키기 위해서는 여러 가지 방법을

사용할 수 있으나, 원하는 모드를 가진 시키기 위해 주로 tone burst signal을 사용한다. 이때 먼 거리를 전파 할 수 있는 유도초음파가 발생되도록 하기 위해서는 범용 초음파 pulser/receiver보다 높은 출력을 요구한다. 본 실험에서는 tone burst 신호를 만들기 위해 먼저 연속사인파(continuous sine waves)를 Hewlett Packard사의 함수발생기를 이용하여 발생시켰다. 그리고 MATEC사의 gating unit를 이용하여 원하는 길이만큼(주로 수 사이클)의 사인파를 선택하고, 고출력 증폭기를 이용하여 신호를 증폭하여 탐촉자로 보내지는 최종 tone burst 신호를 만들었다. 이 tone burst신호의 진동수와 길이는 각각 함수발생기와 gating unit를 이용하여 미세하게 조절하였으며, 이들을 컴퓨터에 oscilloscope와 함께 연결하여 자동적인 주파수 변환을 하며 RF data를 획득하였다. 본

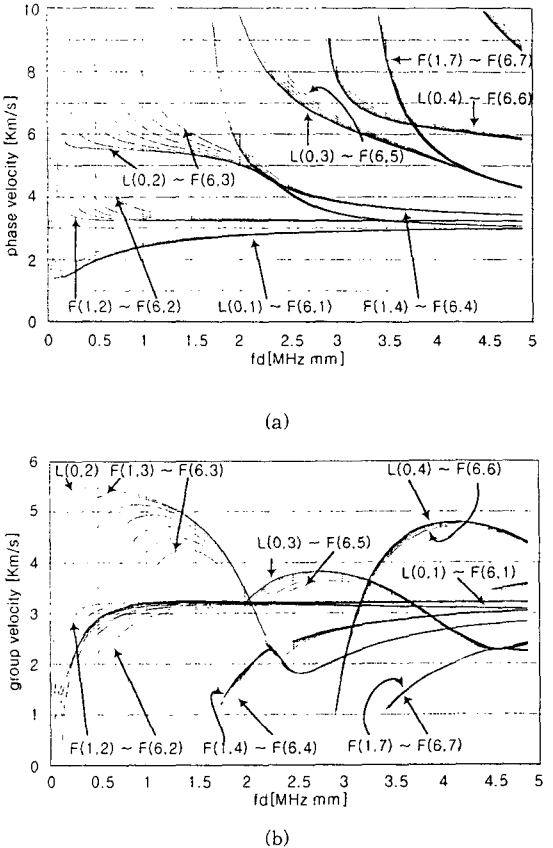


Fig. 2 (a) Phase velocity and (b) group velocity dispersion curves for the longitudinal and flexural modes of a sample Inconel steam generator tube

실험에서는 이와 같은 실험실 장비를 사용하였으나 현장 적용을 위해 손쉽게 이동할 수 있는 시스템들이 현재 일부 개발되었으며, 계속 개발 중에 있다.

3.2. Bore Probe

일반적으로 실제 사용되고 있는 열 교환기의 튜브는 외부가 밀봉되어 튜브의 내부에서 탐사를 하여야 한다. 이와 같은 이유에서 bore probe라고 불리는 유도초음파 탐촉자를 Krautkrämer사를 통해 Fig. 3에 보인 바와 같이 특별히 제작하였다. 이 bore probe에는 입사각이 28(인 두개의 초음파 송수신자(element #1 과 #2)가 있는데, 각 요소는 축 대칭의 콘 모양으로 제작되어 Longitudinal 모드를 발생하도록 설계되었다. 또한 두개의 요소는 각각 송신자와 수신자로 동시에 사용할 수 있고, 서로 마주보고있어 한 위치에서 튜브의 양방향을 탐사할 수 있다. 주파수범위는 0.5에서 5MHz 이고, 접촉매질로는 물을 사용하였다. 그리고 bore probe의 중심 축 정렬을 위해 두개의 요소 전방과 후방에 플라스틱 가이드가 설치되었다. 이 bore probe는 본 실험에서 열 교환기의 방전가공결함을 탐사하는데 사용되었다.

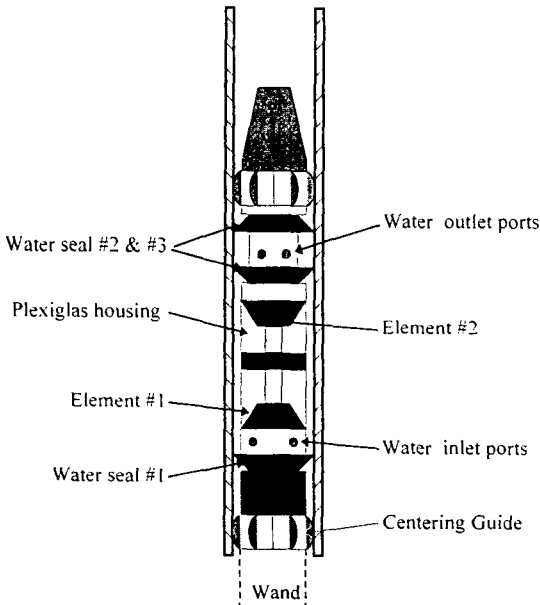


Fig. 3 Two element bore probe for tubing inspection Table 2 Vibrational EDM wear configurations

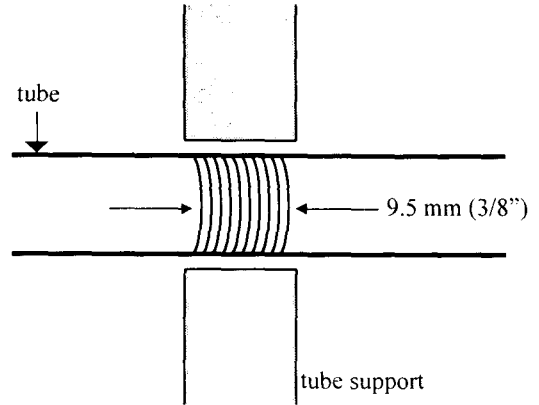


Fig. 4 Vibrational EDM wear under a tube support plate. Sample tube : 439 stainless steel with 19.05mm (3/4") OD and 0.89mm (0.035") nominal tube wall

Bore probe 설계는 적용분야별 요구와 탐상 목적에 맞게 설계하는 것이 바람직한데, 원주방향의 결함의 크기와 위치측정에 있어서는 여러 개의 분할요소가 사용될 수 있으며, 튜브 sheet안의 결함의 크기와 위치를 측정하기 위해서는 분할요소가 손잡이(Band)쪽으로 향해진 probe를 사용할 수 있다.

3.3. 열 교환기 튜브의 방전가공결함 탐상

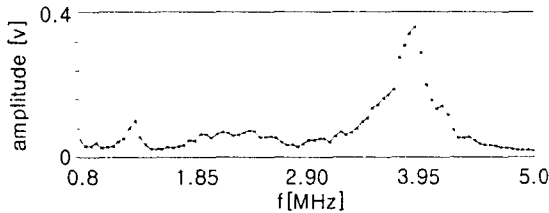
발전소의 중요한 시설중의 하나인 열 교환기 튜브는 안전과 열효율을 위해 정기적인 검사가 필요하다. 본 실험에서는 열 교환기 튜브 439 stainless steel(19.05mm OD and 0.889mm wall thickness)에 Fig. 4에 보인 것과 같이 방전가공 결함인 EDM wear를 만들어 시편으로 사용하였다. 이는 스팀에 의한 심한 진동으로 튜브 지지대(Tube Support Plate: TSP) 밑에 발생할 수 있는 결함을 나타내는 것으로 Table 2에 각 결함의 사양을 나타내었다. 열 교환기의 제작상에 있어서 TSP는 튜브에 근접하여 있거나 접촉하여 있으며, 용접되어 있지는 않다. 이 경우 유도초음파의 전파에 TSP의 영향은 무시할 만하다. 여

Table 2 Vibrational EDM wear configurations

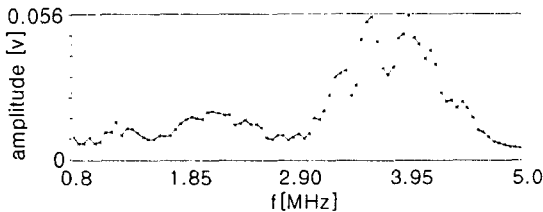
	radial extent	Flaw depth
Flaw type 1	360 degree	70 % through wall
Flaw type 2	360 degree	20 % through wall
Flaw type 3	180 degree	50 % through wall

기서 사용된 탐촉자는 bore probe이다.

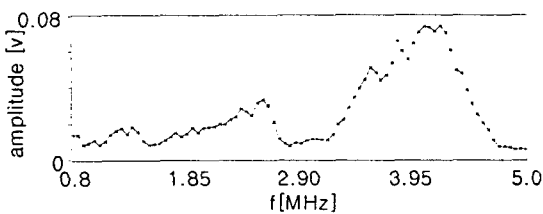
Fig. 5는 Table 2에 보인 세 개의 결함을 유도초음파를 이용하여 탐상한 결과로 진동수에 대한 진폭의 변화를 나타낸 것이다. 이때 진동수는 유도초음파 발진주파수로서 bore probe에 보내어지는 진동수를 나타내는 것이다. 본 실험에서는 0.8에서 5MHz 사이의 진동수를 주사하였는데, 이는 입사각이 28°임을 고려하면 유도초음파 분산선도에서 L(0,2), L(0,3), L(0,4)와 같은 모드를 발생하게 할 수 있게 한다. Fig. 5의 결과를 보면 L(0,4) 모드가 결함을 가장 잘 발견한 것으로 나타나고 있으며 또한 각 결함의 깊이와 크기에 따라 전반적인 진동수변화의 영향이 다르게 나타난 것을 볼 수 있다. 이렇게 L(0,4) 모드가 결함에 가장 민감한 이유는 두 가지로 해석할 수 있는데; 첫째는 진동수가



(a) Flaw type 1 : 360 degree radial extent and 75 % deep



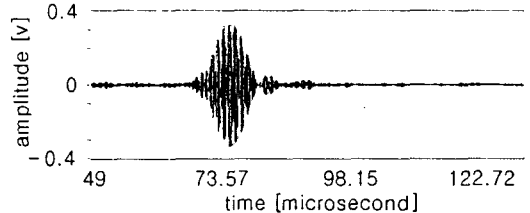
(b) Flaw type 2 : 360 degree radial extent and 20 % deep



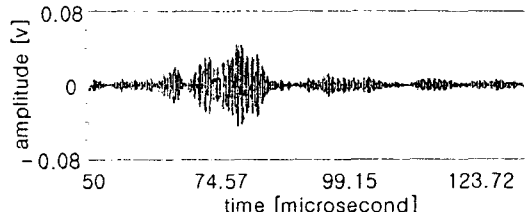
(c) Flaw type 3 : 180 degree radial extent and 50 % deep

Fig. 5 A comparison of the amplitude versus frequency curves for the different configurations of the 9.5mm thick vibrational EDM wear under the tube support plate. note : different amplitude scales

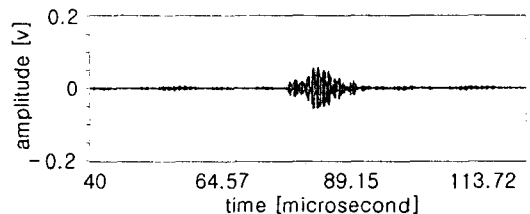
L(0,2)와 L(0,3)에 비해 상대적으로 높고, 둘째는 L(0,4) 모드가 bore probe에서 초음파의 접촉매질로 사용된 물에 대해 에너지의 손실이 L(0,3) 모드에 비해 적으면서, L(0,2) 모드보다는 표면결함에는 민감한 특성을 가지고있기 때문이다[11]. 절대진폭에 있어서도 가장 큰 결함인 Flaw type 1이 가장 큰 진폭을 가졌으며 Flaw type 2와 3은 비슷한 진폭을 나타내었다. 그러나 많은 경우 초음파의 coupling 상태가 조건에 따라 달라질 수 있기 때문에 사실상 상대적인 진폭의 변화를 심도 있게 분석하는 것이 바람직하다. Fig. 6는 진동수가 3.85MHz일 때 각 결함으로부터 반사된 RF waveform들을 나타내는 것이다. 모든 결함은 어려움 없이 발견됨을 알 수 있으며, Flaw type 1에서는 큰 신호가 반사되어 왔고, Flaw type 2와 3에서는



(a) Flaw type 1 : 360 degree radial extent and 75 % deep



(b) Flaw type 2 : 360 degree radial extent and 20 % deep



(c) Flaw type 3 : 180 degree radial extent and 50 % deep

Fig. 6 A comparison of the RF waveforms for the different configurations of the 9.5mm thick vibrational EDM wear under the tube support plate. L(0,4) mode at 3.85MHz was used. note : different amplitude scales

작은 여러 개의 신호가 반사됨을 보여주고 있다. 이는 비록 하나의 모드가 bore probe에서 발생되었다 할지라도 결합의 모양과 크기에 따라 모드변환이 일어남을 나타내고 있다. 이러한 모드변환은 차후 결합의 크기와 모양을 예측하는 요인으로 사용될 수 있음을 암시하고 있다.

3.4. 증기발생기 튜브의 레이저노치 탐상

증기발생기 튜브는 원자력발전소의 설비중의 하나로서 방사능에 노출된 1차수와 깨끗한 물인 2차수의 경계가 되는 중요한 요소이다. 그러므로 안전을 위한 증기발생기 튜브의 주기적인 탐상이 진행 중이며, 또한 보다 신뢰도 높은 탐상을 위한 연구가 지속적으로 이루어지고 있다. 본 연구에서는 유도초음파를 이용하여 증기발생기의 주요 부품인 인코넬 튜브에 인공 결합인 레이저노치를 만들어 결합을 탐상하고 원주방향의 길이를 측정하였다. 인코넬 튜브시편의 사양은 Table 1에 보인 것과 동일하다.

원주방향의 EDM 결합의 탐상에 대한 기초적인 연구는 이미 이루어져 그 가능성이 입증되었다[11]. 본 연구에서는 Table 3에 보인 바와 같이 결합의 폭(thickness)이 매우 작은 4개의 레이저노치가 가공된 시편을 이용하였는데, 사실상 레이저노치는 단한 균열로 육안으로 쉽게 식별할 수 없다. 이 실험을 위해서 입사각 조절이 가능한 탐촉자 shoe를 Fig. 7에 보인 것과 같이 사용하였다. 이 탐촉자 shoe는 입사각을 0°에서 약 80°까지 연속적으로 변화시킬 수 있도록 되어있어, 동일한 진동수에서 위상이 다른 여러 개의 유도초음파모드를 발생시킬 수 있도록 한다. 또한 비대칭으로 초음파를 입사 하게하기 때문에 Longitudinal 모드를 비롯하여 그 주변의 Flexural 모드도 함께 발생되어질 것이다. 본 실험에서 가진 된 tone burst신호의 진동수는 3.5MHz 이고 길이는 약 3 μ sec였다.

이상의 유도초음파 발생조건을 고려하면 본 실험에서

Table 3 Specification of Laser Notches in sample steam generator tubes

Samples	#39	#40	#49	#50
Depth	34%	36%	72%	58%
Thickness(mm)	0.05	0.076	0.041	0.061
Circumferential Length	51°	55°	45°	73°

발생될 수 있는 유도초음파모드는 $L(0,1)$, $L(0,2)$, $L(0,3)$, $L(0,4)$ 주변의 Flexural 모드들이다(참고: 분산선도 Fig. 2). 물론 이러한 Flexural 모드의 정확한 규명을 위해서는 앞으로 계속적인 연구가 필요하나 여기서는 실험적으로 그 응용가능성을 제시하고자 한다. 본 실험에서는 입사각을 연속적으로 변화 시키며 레이저노치로부터 반사된 파를 관찰하였고 Fig. 8에 대표적인 결과를 보였다. Fig. 8 (a)는 시편의 사양을 나타내는 것으로서 레이저노치 39번과 40번의 결합을

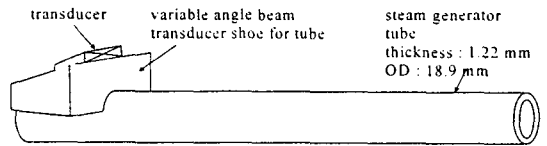
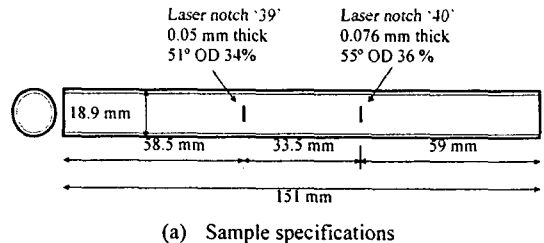
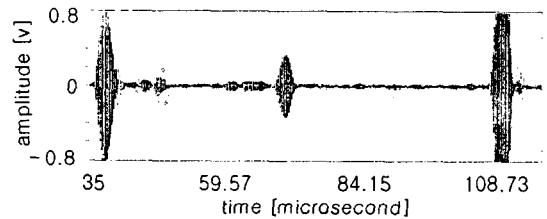


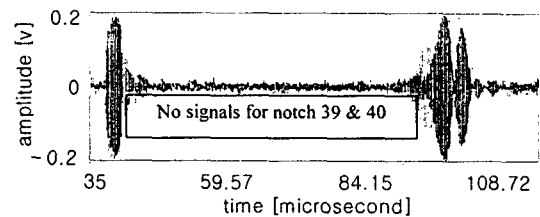
Fig. 7 Transducer setup for laser notch detection



(a) Sample specifications



(b) Angle of incidence : 77°



(c) Angle of incidence : 28°

Fig. 8 Laser notch detection with changing angle

가지고 있다. Fig. 8 (b)과 (c)는 입사각이 77°와 28° 일 경우에 수신된 반사파를 나타내는 것으로 두 경우 모두 튜브 끝단에서 오는 반사파를 잘 보여주고 있다. 그러나 28°의 경우에는 레이저노치에서 돌아오는 반사파를 찾아볼 수가 없었으며, 77°의 경우에는 39번 결함과 40번 결함에서 오는 반사파를 잘 보여준다. 사실상 본 실험에서 28°와 77°의 입사각은 분산선도에서 각각 L(0,4)와 L(0,1) 주변의 Flexural 모드에 해당하는 유도초음파 모드를 발생하고 수신하는 조건이다. 그러므로 이 실험결과는 레이저노치의 탐상에 있어서 L(0,4) 모드부근의 Flexural 모드 보다는 L(0,1)부근의 Flexural 모드 가 더 적합하다는 것을 보여준다. 이는 bore probe에서 발생한 L(0,4) 모드가 방전가공노치를 잘 탐상할 수 있었던 경우[11]와 비교하면 매우 흥미 있는 결과이다.

3.5. 증기발생기 튜브의 레이저노치 원주방향 길이 측정

레이저노치의 탐상이 앞 절에서 성공적으로 이루어짐을 보였다. 본 절의 실험에서는 이상의 유도초음파의 발생 및 수신조건을 이용하여 증기발생기 튜브에 있는 결함의 원주방향길이(circumferential length)를 측정하였다. Table 3에 보인 4개의 레이저노치 시편과 Fig. 3의 탐촉자를 사용하였는데, 입사각은 77°, 진동수는 3.5MHz, 신호의 길이는 약3μsec로 유도초음파를 발생 시켰다. 원주방향의 길이를 측정하기 위해서 탐촉자를 원주방향으로 회전시키며 레이저노치로부터 반사되어오는 파의 진폭 변화를 관찰하였다.

Fig. 9는 탐촉자의 원주방향각도에 대해 레이저노치로부터 반사된 파의 진폭을 나타낸 것으로 레이저노치 결함 39번과 50번에 대한 결과이다. 여기서 6dB drop 지점에서 원주방향 길이를 측정할 수 있는데 결

함 39번에 대해 38°와 결함 50번에 대해 69°로 각각 측정되었다. 이는 실제의 길이에 비해 각각 -13°와 -4°의 오차를 나타낸다. Table 4에 4개의 레이저노치에 대한 6dB drop 측정 결과를 나타내었는데, 실제 결함의 길이에 대한 유도초음파측정의 오차는 결함의 깊이와 연관을 가지고 나타남을 볼 수가 있다. 깊이가 72%인 결함 49번의 경우 오차는 +1°로 나타났으며, 결함의 깊이가 얇아질수록 오차가 커짐을 알 수가 있다. 따라서 본 실험 조건에서 6dB drop법은 깊이가 약 70%인 결함의 원주방향 길이를 잘 측정할 수 있으리라 추론된다. 물론 이러한 측정오차는 탐촉자의 방사음장과 밀접한 관계가 있고 특히 이 경우에는 튜브의 기하학적 구조와도 밀접한 관계가 있다.

이와 같은 결과를 미루어 고찰해보면 원주방향의 결함 길이를 측정하기 위해서는 결함깊이를 고려한 적절한 dB drop 값을 선택하여야 비교적 정확한 측정이 이루어지리라 판단되어진다. 이는 또한 결함의 길이를 정확히 알면 결함의 깊이를 측정할 수 있는 근거를 제공하고있다. 그러나 실제의 경우 결함은 원자력발전소 내부의 보이지 않는 곳에 위치하고 있으므로 결함의 깊이나 원주방향 길이 둘 중 하나라도 정확히 측정하는 것은 현실적으로 매우 어려운 일이다. 결국 비파괴 탐상에 있어서는 두 가지 정보를 동시에 가진 결함신호가 획득될 것이다. 이와 같은 관점에서 피검사체의 여건을 고려한 적절한 표준시편을 만들어 최적의 dB drop 값을 추론하는 것은 의미가 있는 일이다.

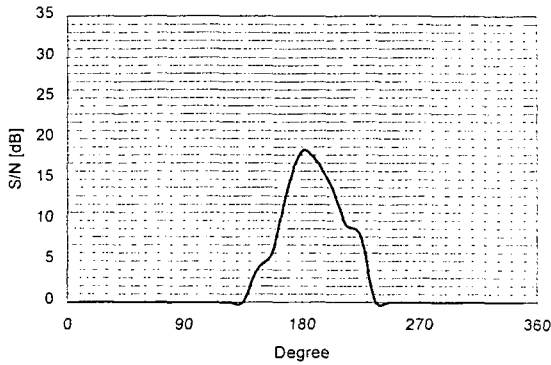
본 논문에서 주어진 시편은 이미 결함의 길이와 깊이를 알고있으므로 이를 표준시편으로 이용하여 결함의 원주방향 길이를 측정하는 최적의 dB drop값을 추론할 수 있다. 이를 위해 먼저 Fig. 9의 실험 결과에서 각 결함의 실제 원주방향길이(length by ruler)에 해당하는 dB drop값을 찾았고 이를 Table 5에 corresponding dB로 나타내었다. 그리고 그 corresponding dB값들을 평균함으로써 최적의 dB drop 값을 추론 하였다. 결함의 깊이가 30%에서 70% 사이

Table 4 Laser notch circumferential sizing results: 6.0dB drop measurements

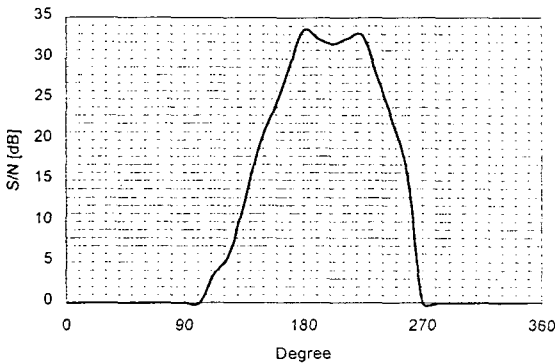
Samples	#39	#40	#49	#50
Depth	34%	36%	72%	58%
Thickness(mm)	0.05	0.076	0.041	0.061
Length by ruler	51°	55°	45°	73°
6.0 dB drop measurement (error)	38° (-13°)	45° (-10°)	46° (+1°)	69° (-4°)

Table 5 Laser notch circumferential sizing results: Estimation of the proper value of dB drop for improved sizing

Samples	#39	#40	#49	#50
Length by ruler	51°	55°	45°	73°
Corresponding dB	8.9	7.2	5.6	6.8
Average	7.1dB			



(a) Sample #39, 0.05mm thick 34% through wall



(b) Sample #50, 0.061mm thick 58% through wall

Fig. 9 Laser notch circumferential sizing

에 분포된 본 시편의 경우에 추론된 값은 7.1dB로 계산되었고, 7.1dB drop를 이용하여 결함의 원주방향 길이를 다시 측정한 결과를 Table 6에 보였는데, 이때 오차의 범위는 7° 이내로 줄어 들었다.

4. 결 론

튜브에서 유도초음파를 고려할 때는 축 대칭 모드 (axisymmetric mode)와 비대칭 모드(non-axisymmetric mode)를 고려하여야 하기 때문에 이를 위해 필요한 분산선도를 제시하였다. 유도초음파를 이용하여 튜브 지지대(tube support plate) 아래의 열교환기 439 stainless steel 튜브에 있는 방전가공 결함(EDM wear)이 여러 모드에서 잘 탐상 되었으며, 결함의 깊이와 원주방향 길이에 따라 진폭뿐만 아니라 모드변환의 양상이 달라짐을 보였다. 이는 차후 정밀진단을 위한 기초 요인이 될 수 있음을 시사했다. 또한 증기발생기로 사용되는 인코넬 튜브에 발생할 수

있는 닫힌 균열을 모사한 레이저노치 탐상에 있어서는 3.5MHz의 L(0,1)모드 주변의 Flexural 모드가 잘 활용될 수 있음을 보였으며, 결함의 원주방향 길이측정 가능성을 보였다. 그리고 각 Flexural 모드에 대한 정확한 규명은 유도초음파를 더욱 정밀한 비파괴 탐상에 이용하기 위해 계속해서 연구되어야 할 필요가 있는 것으로 판단된다.

5. 후 기

본 실험에서 사용된 시편은 EPRI NDE Center에서 제공하였으며, Pennsylvania State University에서 실험을 하였다. 또한 자료정리를 위해 지원한 성균관대학교 산업설비 안전성평가 연구센터에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] 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)
- [2] Greenspon, Joshua E., "Vibrations of a thick-walled cylindrical shell-Comparison of the exact theory with approximate theories", J. Acoust. Soc. Am., Vol. 32(5), 571-578, (1960)
- [3] A. H. Fitch, "Observation of elastic-pulse propagation in axially symmetric and nonaxially symmetric longitudinal modes of hollow cylinders", J. Acoust. Soc. Am., Vol. 35, 706-708 (1963)
- [4] 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)
- [5] M. Brook, T. D. K. Ngoc and J. Eder, "Ultrasonic inspection of steam generator tubing by cylindrical guided waves", Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Vol. 9, pp. 243-249, (1990)

- [6] J. 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)
- [7] J. J. Ditri, "Utilization of guided elastic waves for the characterization of circumferential cracks in hollow cylinders", *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 96, 3769-3775, (1994)
- [8] J. L. Rose, J. J. Ditri, A. Pilarski, K. M. Rajana and F. Carr, "A guided wave inspection technique for nuclear steam generator tubing", *NDT & E International*, Vol. 27, No. 6, pp. 307-310, (1994)
- [9] 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)
- [10] D. N. Alleyne, M. Lowe and P. Cawley, "The excitation of lamb waves in pipes using dry-coupled piezoelectric transducers", *Journal of Nondestructive Evaluation*, 15 (1), pp. 11-20, (1996)
- [11] Shin, H. J., Yi, R. and J. L. Rose, "Defect detection and characterization in power plant tubing using ultrasonic guided waves", 14th WCNDT, New Delhi, India, December 8-13, (1996)
- [12] Shin, H. J. 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)
- [13] Shin, H. J. and J. L. Rose, "Guided waves by axisymmetric and non-axisymmetric surface loading on hollow cylinders", (accepted for publication by *Ultrasonics*)
- [14] Younho Cho, Joseph L. Rose, "Guided waves in a water loaded hollow cyliner", *Nondestr. Test. Eval.*, Vol. 12, pp.323-339, (1996)
- [15] Joseph L. Rose, Younho Cho, "Ultrasonic guided wave inspection potential in the power generation field", *Safety & NDT'* 95, pp. 101-115, Oct. (1995)
- [16] Younho Cho, Derrick D. Hongerholt, Joseph L. Rose, "Lamb Wave Scattering Analysis for Reflector Characterization", *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, Vol. 44, No. 1, pp. 44-52, (1999)