

'96춘계학술발표회 논문집

한국원자력학회

유도형초음파를 이용한 열교환기류의 건전성평가기술 개발

조운호

인제대학교

진태은

한국전력기술주식회사

요 약

대형 튜브구조물의 길이방향으로 전파되는 유도형초음파(Ultrasonic Guided Wave)를 이용한 원자력발전소내의 열교환기류에 대한 새로운 건전성 평가법을 제시한다. 이를 위해, 유도형초음파의 물리적 특성을 이론적으로 해석하였고 실험을 통해 열교환기류에 대한 유도형초음파법의 타당성 여부를 검토하였다. 국부적인 평가(Local Inspection)에 근거한 기존의 평가법에 비해 유도형초음파법은 단시간 내에 보다 효율적으로 전체 열교환기에 대한 신뢰성 검사(Global Inspection)가 가능하며 만족할 만한 민감도(Sensitivity)를 갖고 있음을 보였다.

1. 서론

원자력발전소내의 열교환기류는 발전소 전체의 안전성 및 이용을 측면에서 매우 민감한 부분으로 특히 튜브의 손상에 대한 평가가 문제시 되곤 한다. 따라서, 튜브손상을 정확히 예측, 평가하는 방법의 개발은 중요한 과제의 하나로 취급되어 왔고 이를 위한 다양한 형태의 비파괴검사법(Nondestructive Evaluation)의 연구개발이 요구되어왔다. 전자기파(Electromagnetic Wave)를 이용한 와류탐상법(Eddy Current Technique)[1]이나 기존의 종파(Longitudinal Wave)나 횡파(Transverse Wave)를 빗겨서 침투시키는 초음파경사입사법(Ultrasonic Oblique Incidence Technique)등은 이미 실제 현장에서 널리 사용되고 있다. 그러나 국부적인 검사에 기초한 기존 비파괴검사법을 이용할 경우, 탐침자(Inspection Probe)를 열교환기내 각 튜브의 길이방향으로 이동시켜야 하므로 열교환기 전체의 건전성평가에 많은 시간과 경비가 소요되었다.

이런 관점에서, 최근 들어 대형구조물의 효과적인 안전진단을 위해 세계적으로 관심을 모으고 있는 유도형초음파법[2,3,4]의 원자력발전소 열교환기에 대한 응용은 많은 잠재성을 가지고 있다고 하

졌다. 구조물의 종방향(Longitudinal Direction)으로 전파되는 Lamb형 유도파에 대한 이론적 연구는 이미 19세기말 부터 시작되었으나[5], 기존의 종파나 횡파에 비해 그 물리적 특성의 난해함으로 인해 최근에 와서야 실구조물에 대한 비파괴검사법[2,3,4]에 응용되기 시작하였다. 유도형초음파를 이용하여 열교환기의 건전성평가를 할 경우, 탐침자의 이동 없이 고정된 위치에서 유도초음파를 발생시켜 단시간 내에 전체 튜브에 대한 건전성평가를 할 수 있을 뿐 아니라, 주파수변조(Frequency Control)를 통해 다양한 파형 모드(Wave Mode)를 발생시킴으로써 결함(Defect)의 형태에 맞춰 민감도 향상(Sensitivity Improvement)을 기대할 수 있다.

본 연구에서는 열교환기와 같은 대형 튜브구조물내의 유도형초음파의 물리적 특성에 대한 이해를 돕기위해 분산선도(Dispersion Curve) 및 군속도선도(Group Velocity Curve)를 소개하며, Inconel 튜브시편을 이용한 실험을 통해 원자력발전소 열교환기류의 건전성평가에 적용하기 위한 타당성을 검토하기로 한다.

2. 열교환기내 유도형초음파의 분산선도(Dispersion Curve) 및 군속도선도(Group Velocity Curve)

Fig. 1과 같은 얇은 튜브에 튜브의 두께와 비교될 만한 긴 파장(Long Wave Length)을 갖는 저주파수(Low Frequency)의 초음파가 입사된 경우, 모드전이(Mode Conversion)에 의해 발생된 수많은 내부 반사파들(Reflected Waves) 사이의 상호 중첩(Superposition)에 의해 새로운 형태의 다양한 유도초음파모드를 발생시킬 수 있다[2,3,4].

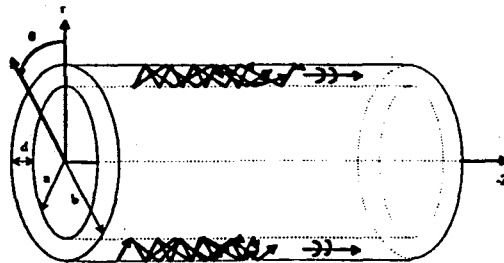


Fig. 1 얇은 튜브내에서의 유도형초음파의 발생

유도초음파모드의 위상전파속도(Phase Velocity), C_{ph} 는 주파수 및 Snell의 법칙을 통해 튜브내로의 파의 초기 입사각(Incident Angle)에 의해 결정되며, 각각의 특정 유도초음파모드는 고유한 음향학적 특성(Acoustic

Characteristic)을 갖게 된다.

위상전파속도, C_{ph} 와 주파수 사이의 관계는 주어진 튜브에 대한 동탄성 경계치문제(Elastodynamic Boundary Value Problem)의 이론해를 구하여 Fig. 2의 분산선도(Dispersion Curve)로 나타낼 수 있다.

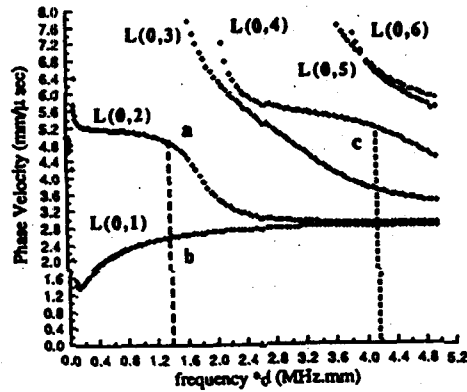


Fig. 2 열교환기내 유도형초음파의 분산선도

Fig. 2에서 fd 는 주파수, f [MHz]와 튜브의 두께, d [mm]의 곱으로서, 1 mm 두께의 튜브의 경우, 특정 유도초음파모드의 주파수를 의미한다. 따라서, Fig. 2의 선도위의 각점들은 적용된 특정주파수에서 발생가능한 각기 다른 위상전파속도를 갖는 독립적인 유도초음파모드를 나타내고 있다.

위상전파속도, C_{ph} 를 주파수, f 에 대해 미분함으로써, 실제 유도초음파모드의 파형(Wave Envelope)이 전파되는 속도인 군속도, C_g 선도(Group Velocity Curve)를 Fig. 3과 같이 얻을 수 있다.

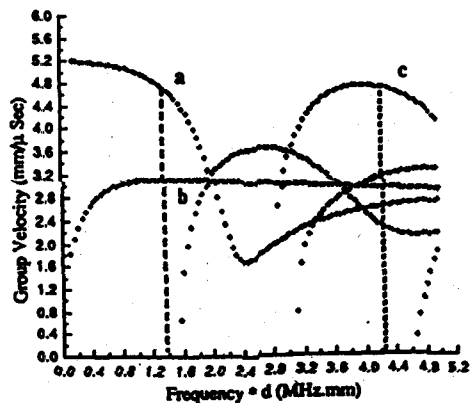


Fig. 3 열교환기내 유도형초음파의 군속도선도

Fig. 2와 Fig. 3을 참고로 하여, 튜브로 입사되는 초음파의 입사각과 주파수를 조절함으로써 필요로 하는 유도초음파모드를 발생시킬 수 있다.

3. 유도형초음파법의 Inconel 튜브에 대한 적용

본 실험을 위해 Plexiglass와 원뿔형 압전소자(Conical Shaped Piezoelectric Element)로 특수 제작된 시험용 유도초음파 탐침자가 개발된 바 있다[2,3,4]. 탐침자는 열고환기를 가당한 Inconel 튜브시편내로 삽입되며, 튜브 내벽과 탐침자 사이의 수막(Water Gap)을 통해 튜브 내벽으로부터 입사된 파가 튜브의 길이방향으로 진행하는 유도형초음파를 발생시키도록 설계되었다. 사용된 압전소자는 1 MHz - 6 MHz사이의 주파수영역(Frequency Bandwidth)을 갖는 Broadband용 소자이다. 개발된 탐침자와 함께 Tone-Burst 초음파장비를 사용함으로써 특정 주파수의 연속파형(Continuous Wave Form)을 갖는 유도초음파모드를 발생시킬 수 있었다.

Fig. 4는 곡선형 튜브에 대해 유도형초음파법을 적용한 결과로서, 유도형초음파가 튜브의 곡률에 관계없이 잘 전파될 뿐만 아니라, U자형 튜브의 중앙에 있는 결함(Defect)도 성공적으로 검출해낼 수 있음을 보여주고 있다.

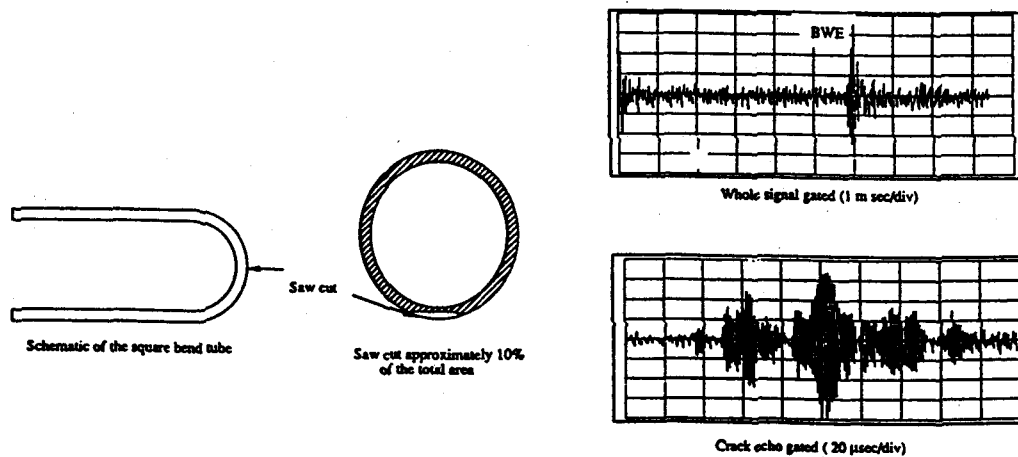


Fig. 4 유도형초음파법을 이용한 U자형 튜브내의 결함검출

Fig. 5는 긴 튜브의 한쪽 끝에서 유도형초음파를 이용하여 튜브의 반대편 끝단에 있는 횡방향 표면결함을 검출해낸 결과이다. 이를 통해, 탐침자의 위치를 고정하고 원거리로부터 결함을 찾는 경우에도, 유도형초음파

법은 만족할 만한 민감도를 갖고 있음이 밝혀졌다.

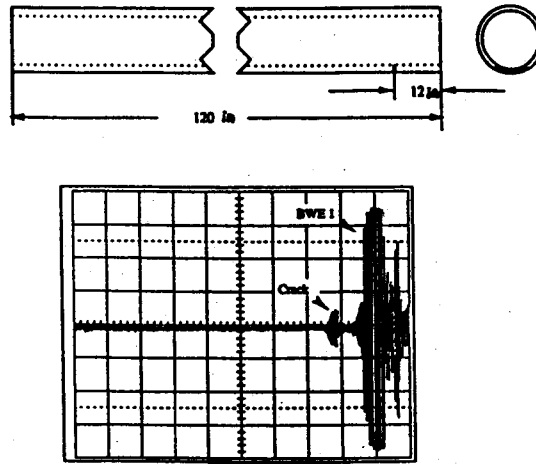


Fig. 5 유도형초음파법을 이용한 원거리로부터의 결함검출

Fig. 6은 튜브내에 결함들이 연이어 존재하는 경우, 유도초음파법을 통해 동시에 다수의 결함을 탐지해낼 수 있음을 보여주는 실험결과이다. 이 실험에서, 내면재 결함은 의도적으로 튜브시편 내벽에 만들어 놓음으로써, 유도형초음파법이 열교환기의 내,외면결함 모두에 대해 만족할 만한 민감도를 갖고 있음을 보여주고 있다.

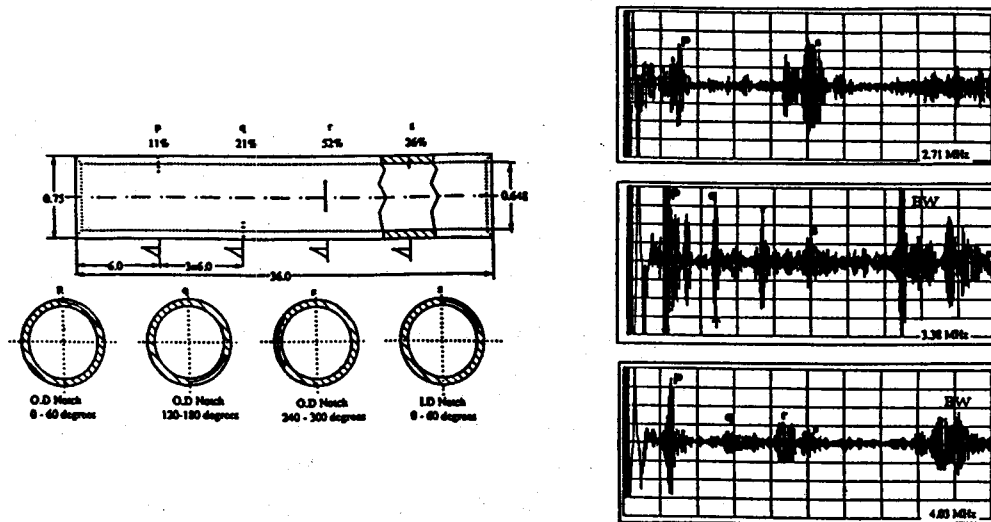


Fig. 6 유도형초음파법을 이용한 연속적인 결함의 검출

4. 결 론

원자력발전소 열교환기류의 주요 손상부위인 튜브에 대한 기존의 평가법을 보완하기 위한 유도형초음파법을 소개하였다. 주파수변조를 통해 얻어진 다양한 형태의 유도초음파모드를 이용하여 보다 간편하고 경제적으로 튜브의 각종 손상부위에 대한 해석이 가능함을 보였다. 따라서, 앞으로 유도형초음파에 의한 건전성평가법에 대한 국내에서의 기술축적 및 관련기술개발이 필요하다고 판단된다.

5. 참 고 문 헌

- [1] T.E. Chung and Y.M. Chung, "Application of Nondestructive Technology for Steam Generator Tubing in Nuclear Power Plant," The Proceedings of Safety and NDT '95, Pusan, Korea, 117-130, (1995)
- [2] J.L. Rose and Y. Cho, "Ultrasonic Guided Wave Inspection Potential in the Power Generation Field," The Proceedings of Safety and NDT '95, Pusan, Korea, 101-116, (1995)
- [3] J.L. Rose, "Recent Advances in Guided Wave NDE," presented at the 1995 IEEE International Ultrasonics Symposium, Seattle, WA, U.S.A., (1995)
- [4] J.L. Rose, Y. Cho and J.J. Ditri, "Cylindrical Guided Wave Leakage due to Liquid Loading," The Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Vol. 13, 259-266, (1994)
- [5] K. Lamb, "The Flexure of an Elastic Plate," The Proceedings of London Mathematical Society, 85-90, (1889)