

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-A.2009.33.4.373

유도 초음파를 이용한 락 플레이트 물성 평가

이재선* · 조윤호† · 정경식*

(2009년 1월 20일 접수, 2009년 3월 20일 수정, 2009년 3월 27일 심사완료)

Material Characterization of Lock Plate Using Guided Wave

Jaesun Lee, Younho Cho and Kyoungsik Jeong

Key Words: Guided Wave(유도초음파), Inconel x-750(인코넬x-750), Dispersion Curve(분산선도)

Abstract

Presented in this paper is a new experimental technique to measure material properties of lock plate of gas turbine plants by using ultrasonic guided wave. In comparison with the mechanical destructive testings, material characterization of the Inconel x-750 was nondestructively carried out in a more efficient manner to discriminate the change in elastic moduli and the poisson's ratio attributed to the variation of heat treatment condition. The proposed technique shows a satisfactory feasibility via the comparative experiments with the imported lock plate specimens. It is also expected that the guided wave technique can cover a longer and wider range as a new cost-&-time-saving inspection tool due to the interaction with a greater part of specimen, compared to a conventional local point-by-point scheme.

1. 서 론

화력발전설비나 석유화학설비와 같은 에너지변환설비에는 고온에서 우수한 기계적 성질을 갖는 다양한 종류의 내열강이 사용되고 있다. 재질 열화도를 평가하는 방법은 파괴적인 방법과 비파괴적인 방법으로 나눌 수 있는데 이러한 방법 중 고온 설비부재의 열화도는 현장에서 재료를 채취하여 충격시험, 인장시험, 파괴인성시험 등과 같은 파괴적인 방법을 이용하여 평가하는 것이 가장 정확하나, 가동 중인 현장에서 시험편을 채취한다는 것은 사실상 불가능하고, 시간적제약과 경제적으로 많은 문제점을 내포하고 있다. 따라서 이러한 단점들을 극복할 수 있는 비파괴적인 평가기술의 개발이 요구되고 있다.^(1,2)

초음파비파괴평가(ultrasonic nondestructive evaluation) 기법은 측정의 효율성, 높은 측정감도, 측정결과 해석의 신속성 및 신뢰성 확보에 우수한 것으로 잘 알려져 있다.⁽²⁾ 초음파 비파괴 평가에 의한 열화도 평가에는 초음파 파형 특성을 분석하여 파형 변수를 추출하여 이들이 갖는 강한 특징(strong feature)변수와 재료의 열화-손상과의 물성변화에 대한 상관성을 추출하고 수치화하여 열화도를 평가한다.

국내에서는 발전 설비 중 화력발전이 차지하는 비율이 여전히 높다. 화력발전 설비 중 가스터빈의 블레이드부분 재료는 고온에서 장시간 노출되는 환경 속에서 탄화물이나 금속간 화합물의 입내 및 입계로의 석출 등으로 인하여 미세조직의 변화를 일으켜 당초의 우수한 재질특성이 저하되는 것으로 알려져 있다.^(3,4)

터빈 블레이드와 축을 연결하는 부분을 보호하는 부품을 Front-seal이라고 한다. 고속 회전하는 터빈 블레이드 또는 Front-seal에 결함이 발생하게 되면 대형 사고로 이어질 수 있기 때문에 Front-seal의 상태를 파악하는 것은 중요하다.

[이 논문은 2008년도 재료 및 파괴부문 춘계학술대회(2008. 5. 29-30., 충북대) 발표논문임]

† 책임저자, 회원, 부산대학교 기계공학부
E-mail : mechcyh@pusan.ac.kr
TEL : (051)510-2323 FAX : (051)510-7641
* 부산대학교 대학원 기계공학부

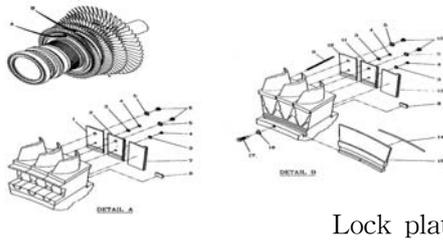


Fig. 1 Front seal & lock plates parts and contracting department

Front-seal의 재료는 인코넬(Inconel)이다. 인코넬은 니켈을 주재료로 하여 크롬, 철, 티타늄, 알루미늄·망간·규소를 첨가한 내열합금으로 내열성이 좋고 기계적 강도가 좋다. 기계적 강도가 좋은 인코넬 재료를 안전하고 충분한 기계적 강도 및 열 변형에 견딜 수 있도록 열처리를 한다. 열처리 조건에 따른 국내에서 검증을 하는 연구는 아직 부족한 부분이 많이 있었다. 그리고 이처럼 고도의 안전성 및 신뢰성이 확보되어야 하는 대형 산업설비에서는 진단 기술이 필요하다. 또한 별도의 구조물의 변형 없이 재료의 물성치를 조사하는 방법이 필요하다. 초음파 비파괴 평가방법 중 유도초음파를 이용한 연구는 미흡하였다. 유도초음파를 이용한 응용연구는 판파를 이용하여 항공기나 발전소등과 같이 안전에 민감한 대형구조물을 대상으로 초음파 법을 이용하여 물성평가나 강도평가를 해석하는데 연구되었다.⁽⁵⁻⁷⁾ 이 중에서도 유도초음파 검사기법은 구조물에 설치된 절연물질이나 단열 등 열악한 환경에 관계없이 검사를 진행할 수 있으며, 기존의 초음파를 이용한 연구방법과는 다르게 두께 방향의 국부적인 탐상이 아니라 길이방향에 대한 측정으로 넓은 부분을 한 번에 측정이 가능할 뿐 아니라 원거리 탐상까지 가능하다. 기존의 초음파 시험기법으로는 접근이 어려운 부위에 대한 탐상과 원거리 탐상도 가능하다.⁽⁸⁾ 또한 강선, 파이프, 봉재 등과 같이 길이에 비해 두께가 얇은 재료의 검사에 유용하며 유도초음파의 다양한 파형모드를 이용하면 최적의 측정감도를 얻을 수 있다.

Fig 1은 front-seal과 lock plate의 형상과 터빈 블레이드에 위치하는 모습을 보여준다. 터빈로터 블레이드 front-seal이나 lock plate와 같은 판형 재료의 경우 길이방향으로 전파되는 초음파를 이용하여 재료의 물성치를 측정하고 모드선도를 해석하는 연구의 실험적인 검증은 미약하였다. 본 연

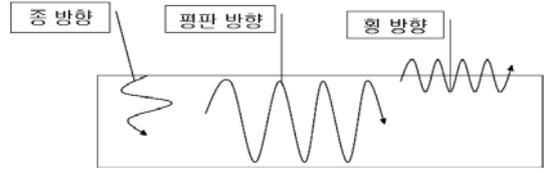


Fig. 2 Direction of guided wave

구는 기존에 연구되어진 이론들을 토대로 하여 판형재료(lock plate)에 진행하는 초음파를 이용하여 분산선도의 각 모드를 해석하고 분석하고자 한다.

2. 초음파 기초 이론

2.1 초음파 속도

초음파를 이용하는 방법의 개념은 인장시험을 하는 방법과 같지만 인장시험과 가장 큰 차이점은 인장시험을 할 때는 시편에 인장력을 가해주어야 하지만 초음파를 이용한 방법에서는 인장력 대신 초음파를 이용하여 재료의 거동을 확인할 수 없을 정도의 미세한 힘을 가한다. 재료의 횡방향 및 종 방향, 재료내부로 초음파를 입력시켜서 길이방향 및 두께방향의 변형률을 오실로스코프를 이용하여 측정할 수 있다. 재료의 변형률을 측정하기 위해서 초음파 속도를 이용한다. 초음파가 매질내로 입사된 경우 Fig. 2와 같이 방향성을 가지고 전파하게 된다. 입사 조건에 따라 유도초음파의 진행 방향을 조절 할 수 있다. 초음파속도(C)는 다음의 기본 개념이 있다. 초음파 속도는 밀도(ρ)의 제곱근에 반비례하고 재료 강성(stiffness)에 비례한다. 초음파의 속도를 안다면 다음 식들을 이용하여 탄성계수와 푸아송의 비를 구할 수 있다.

두께 방향 속도(C_L) 및 횡 방향 속도(C_P)는 다음이 정의 된다.

$$C_L = \frac{1}{\sqrt{\rho}} \cdot \sqrt{\frac{E}{1+\nu}} \tag{1}$$

$$C_P = \frac{1}{\sqrt{\rho}} \cdot \sqrt{E(1-\nu^2)} \tag{2}$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \tag{3}$$

초음파의 두께 방향 속도 및 횡 방향 속도를 알게 되면 식 (1), (2)의 연립으로 재료의 영률(Young's modules)과 푸아송의 비(Poisson's ratio)를

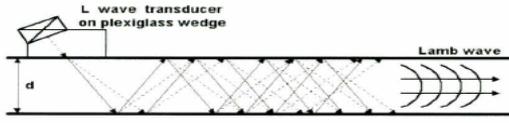


Fig. 3 Guided wave propagation in a plate

구할 수 있고, 전단 탄성계수(G)는 식 (3)을 이용하여 구할 수 있다. 여기서 인코넬 x-750의 밀도는 8.25g/cm^3 이다.

2.2 초음파 특성

종파와 횡파의 변위 퍼텐셜 ϕ 와 ψ 는 평면변형을 일 때 각각 아래의 식과 같이 나타낼 수 있다.⁽⁹⁾

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = \frac{1}{C_L^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} \quad (4)$$

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} = \frac{1}{C_T^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} \quad (5)$$

여기서, x 와 z 는 각각 길이 방향과 두께 방향의 변위이며, C_L 과 C_T 는 각각 종파와 횡파의 속도이다. ϕ 와 ψ 의 해를 각각 (6), (7)의 형태로 가정하여

$$\phi = \phi(z)e^{i(kx_1 - \omega t)} \quad (6)$$

$$\psi = \psi(z)e^{i(kx_1 - \omega t)} \quad (7)$$

식 (4)과 (5)에 대입하면 식 (8)과 (9)를 얻을 수 있다.

$$\phi(z) = A_1 \sin(pz) + A_2 \cos(pz) \quad (8)$$

$$\psi(z) = A_1 \sin(qz) + A_2 \sin(qz) \quad (9)$$

여기서 $p^2 = \frac{\omega^2}{C_L^2} - k^2$, $q^2 = \frac{\omega^2}{C_T^2} - k^2$ 이며,

k 는 파수(wave number)이고 ω/C_p 와 같다. ω 는 각 주파수, C_p 는 램파(lamb wave) 모드의 위상속도이다. 두께가 D 인 시험체 내부로 사각입사(oblique incidence)된 초음파는 시험체의 길이방향으로의 보강간섭(constructive interference)효과를 통해 Fig. 3과 같이 두께방향이 아닌 길이방향으로 전파되는 초음파가 발생한다. 유도초음파는 Fig. 3과 같이 기존의 종파 또는 횡파형 초음파 탐촉자와 웨지(Wedge)를 사용하여 시험체 표면에 특정 입사각으로 체적파 초음파를 입사시켜 발생시킬 수 있다. 이때 해당 입사각도는 시험체의 재질, 두께 단면형상 및 주파수에 따라 Fig. 4와 식 (10)의 스넬의 법칙(Snell's law)의 법칙을 통해 계

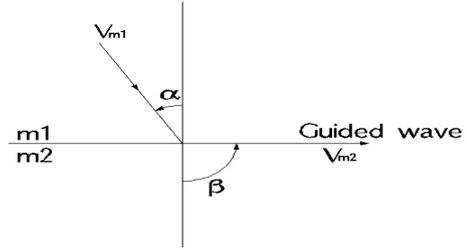


Fig. 4 Guided wave propagation between two different materials

산된다.⁽¹⁰⁾

$$\frac{V_1}{\sin \alpha} = \frac{V_2}{\sin \beta} \quad (10)$$

여기서, V_1 과 V_2 는 매질 1과 2의 음파 전달속도이며, α 와 β 는 매질 1에서 2로 입사되는 각도와 매질 2에서 굴절되는 각도이다.

시험체내에서 다중 반사된 종파와 횡파의 보강간섭으로 발생하는 유도초음파는 도파체인 시험체의 경계면에 평행하게 길이방향으로 진행되므로 굴절각 β 는 90도이다. 특정 유도초음파를 가진시키거나 수신하기 위해서는 각 시험체의 위상속도 분산곡선으로부터 위상속도를 결정해야 한다. 식 (8)과 식 (9)에서 자유표면(traction free, free surface)경계조건일 때 식 (11)과 식(12)의 대칭모드와 비대칭모드가 각각 생성된다.⁽¹¹⁾

$$\frac{\tan(qh)}{\tan(ph)} = -\frac{4k^2 pq}{(q^2 - k^2)^2} \quad (11)$$

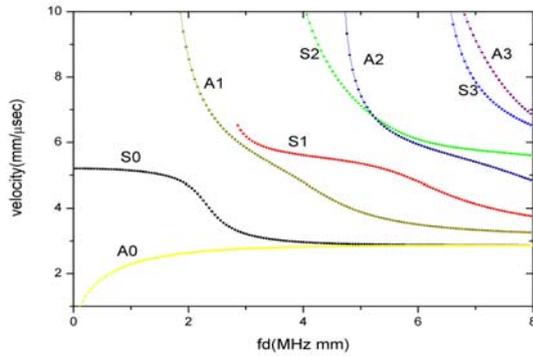
$$\frac{\tan(qh)}{\tan(ph)} = -\frac{(q^2 - k^2)^2}{4k^2 pq} \quad (12)$$

여기서, h 는 $-\frac{d}{2}$ 에서 $+\frac{d}{2}$ 이다.

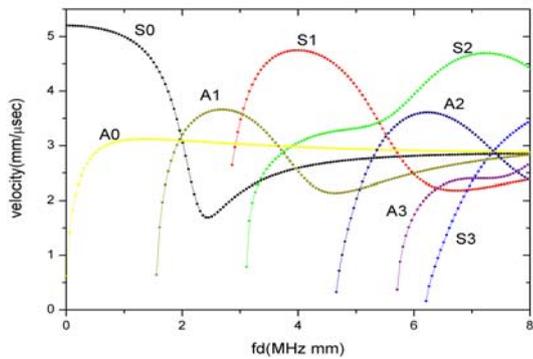
2.3 분산 선도

유도 초음파 문제의 분산선도는 위상속도 분산선도와 군속도 분산선도로 나누어진다. 단일 주파수 연속파의 동일 위상이 나타나는 지점들에 대한 시간과 공간의 비로서 정의되어지는 것이 위상속도이다.

위상속도 분산선도는 박판 구조물 내에서 주파수 변환 실험에 대한 이론적인 가진 주파수 값을 제시해 준다. 실제로 실험을 하면 여러 주파수 성분들이 조합된 유도초음파를 관찰할 수 있다. Fig. 5는 인코넬 750 plate 위상속도(a)와 군속도(b)를 나타내고 있다. A mode는 비대칭(Antisym-



(a) Phase velocity dispersion curve



(b) Group velocity dispersion curve

Fig. 5 Dispersion curve of a Inconel x-750 plate



Fig. 6 Inconel x-750 specimens

metric)형으로 파형이 진행되는 모드이고, S mode는 대칭(Symmetric)형으로 진행되는 모드이다. 그리고 0,1,2...의 번호는 각 A, S mode의 번호를 나타낸다.

Table 1 Chemical composition of Inconel x-750

단위 : %				
Al	C	Cr	Copper	Mn
0.4~1	0.08Max	14~17	0.5Max	1Max
Iron	Si	Sr	Ti	Nm
5~9	0.5Max	0.01Max	2.25~2.75	0.7~1.2

Table 2 Tension test result which it follows to Inconel x-750 heat treatment

	desired	Raw material	A	B	C
Yield strength (N/mm ²)	630	429	747	778	808
Seal strength (N/mm ²)	970	836	1173	1217	1252
Elongation (%)	13	51	30	30	27
Hardness (HrB)	307~339	205	337	348	360

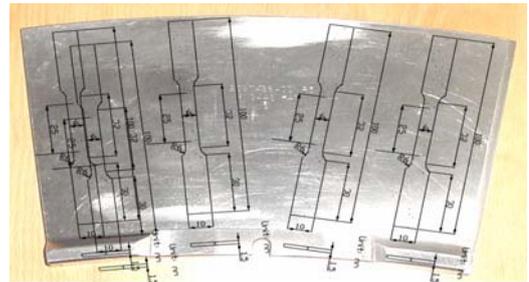


Fig. 7 Inconel x-750 raw material specimen

3. 실험 방법

3.1 재료 및 시험편

본 실험에서 사용한 재료는 인코넬 x-750으로 탄성계수와 푸아송의 비를 측정하고 기본적인 싸인(sine)파형의 데이터를 입력하여 봄으로서 검증하여 신뢰성을 확보한 후 Fig. 6과 같이 수입품 인코넬 x-750 시험편과 국내에서 열처리조건을 달리하여 제작한 시험편(A, B, C)을 실험하여 비교 분석하였다. Fig.7은 수입한 인코넬 x-750의 특성평가를 위하여 모재에서의 인장시험편을 채취하기 위한 모습이다.

Table 1은 인코넬 x-750 시험편의 화학성분을 나타내었고 Table 2는 원소재와 열처리된 시편에 대한 특성평가 결과 값을 나타내었다. 수입시편의 성분 분석을 통해 동일한 재질의 시편에 열처

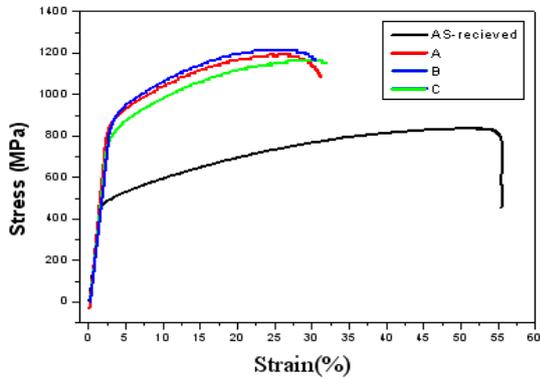


Fig. 8 The tension result of Inconel x-750 heat treatment

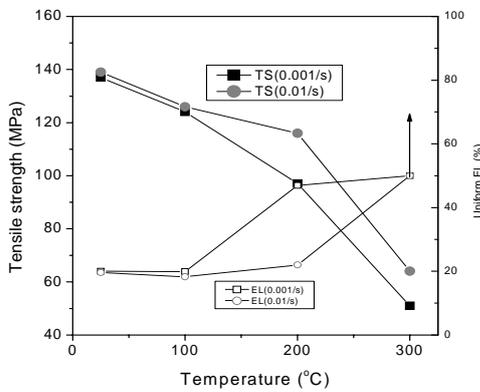


Fig. 9 The tension result of Inconel x-750 hardness

리 조건을 달리하여 제작한 시편 A, B, C는 정량적 목표치를 확보하였으며 이를 바탕으로 시험을 하였다. 최적 열처리에 의한 기계적 특성을 향상시키기 위하여 본 논문에서는 Front Seal & Lock Plates의 물성치를 항복강도(790MPa), 인장강도(1120MPa), 연신율(15% 이상)로 목표를 설정하였다.

Fig. 8은 열처리 조건에 따른 인장곡선을 나타낸 것으로 시편 C에서 변형률이 가장 큰 것을 알 수 있다. Fig. 9는 열처리 시 온도에 따른 인장 강도와 연신율을 나타낸 그래프이다.

3.2 실험장치

관파를 이용한 유도초음파 실험장치의 구성은 Fig.10과 같으며, 이 실험을 위하여 고풍력 초음파 Tone-Burst 탐상기와 스펙트럼분석기가 내장된 디지털 오실로스코프를 이용하였으며, 고풍력 초음파 실험장치는 연속파 신호발생기, 게이트증폭기, 수신필터기, 수신증폭기의 세부 장치로 구성된다.



Fig. 10 Testing system of the guided wave testing

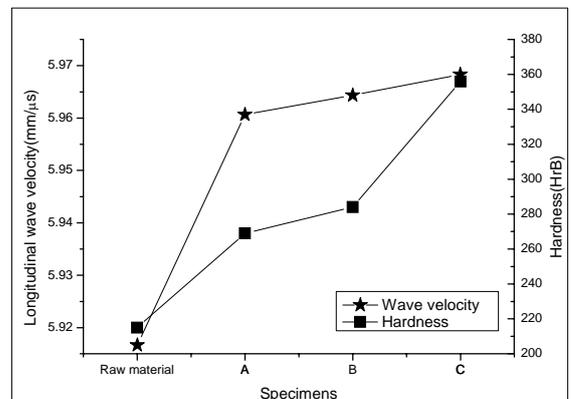


Fig. 11 Correlation of longitudinal wave speed and hardness

연속파 신호발생기에서 발생된 연속파 신호를 게이트증폭기로 원하는 주파수에 맞게 잘라내어 Tone-Burst 파를 발생시키므로 단일 사이클의 펄스형 초음파신호에 비해 협대역인 신호의 송수신이 가능하다.

3.3 실험 조건

위상속도 분산선도에서 입력 값으로 무차원 수인 $f*d$ 값은 $7\text{MHz}\cdot\text{mm}$ 로 결정을 하고 A_0 모드를 선정하여 실험을 진행하였다. 실제 사용되는 lock plate에 사용되는 Inconel x-750 시편의 두께를 고려하여 비교적 높은 $f*d$ 값을 선정하였다. 위상속도 분산 선도에서 입력 값을 설정한 후 실험을 통해 군속도 분산선도의 데이터와 동일한 결과를 측정할 수 있다.

4. 결과 및 고찰

4.1 실험 결과

4.1.1 두께방향 속도(C_L) 측정

두께 방향은 시편의 두께 방향으로 측정을 한

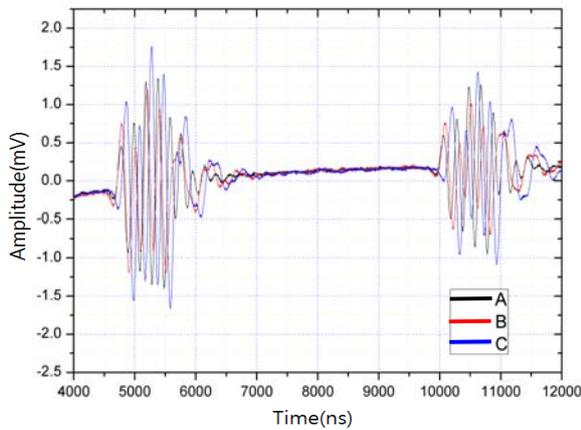


Fig. 12 The FR waveform of the longitudinal wave



Fig. 13 Lock plate specimen

다. 두께 방향 속도를 측정할 때 단일 탐촉자를 사용하여 측정을 하였다. Fig 11과 같이 원소재와 열처리된 A, B, C 시편의 속도를 측정하여 각 시편의 경도와 비교해보았다. 그 결과 경도가 강할수록 파동의 속도가 빨라지는 것을 알 수 있었다.

Fig.12는 각각의 조건으로 열처리된 A, B, C 시편에서 실제 실험을 통해 얻어진 파동신호를 나타낸다.

4.4.2 판파 속도 측정.

판파의 속도측정은 송수신 방식을 사용하여 실험을 하였다. 판파의 속도를 측정하기 위해서는 시편이 얇을수록 측정하기가 편하다. 판파의 초음파 특성상 재료 내부를 모두 통과하기 때문에 내부가 얇을수록 신호를 측정하기가 수월하다. 이동 거리에 따른 신호의 이동을 이용하여 판파의 속도를 구한 결과는 다음과 같다.

Fig.14는 원소재와 각각의 조건으로 열처리된 A, B, C시편에서 측정된 판파속도를 나타낸다.

Table 3 Material properties from wave velocity

	Original standard	Raw material	Domestic specimen	Imported specimen
Longitudinal velocity [mm/ μ s]	5.70	5.92	5.91	5.94
Plate velocity [mm/ μ s]	3.023	2.856	3.073	3.092
Young's modulus (E)	92.97	84.14	97.37	97.54
Poisson's ratio(ν)	0.431	0.444	0.434	0.434
Shear modulus (G)	32.47	29.13	33.59	34.00

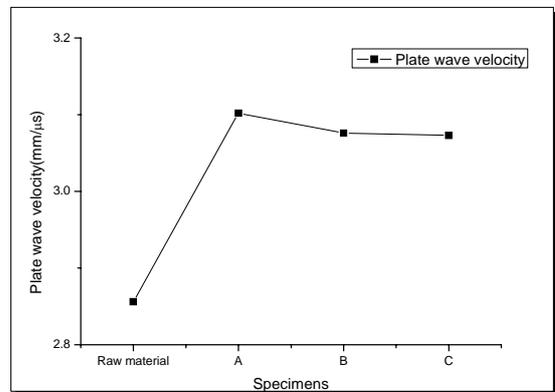


Fig. 14 Plate wave velocity of each specimen

4.4.3 재료 물성 검사 결과

실험결과를 바탕으로 탄성계수와 푸아송 비를 구할 수가 있다. Table 3은 실험을 통해 구한 wave속도를 이용하여 재료의 물성치인 영률과 푸아송 비를 구하였다.

4.2 파형 분석

두께방향 초음파 실험을 Fig.11과 같이 원재료와 열처리 조건을 달리하여 경도에 변화를 주었을 때 종파 속도에 영향을 미치는 것을 알 수 있었다. 경도가 커질수록 조직이 치밀해져서 초음파 속도가 증가하는 것으로 생각 된다. 그러나 판파 실험에서는 원재료의 판 파속도($v = 2.868 \text{ mm}/\mu\text{s}$)와 C 조건으로 열처리된 시편의 판 파속도($v = 3.073 \text{ mm}/\mu\text{s}$)와는 큰 차이가 발생함을 알 수 있었다. 실험에서는 A0 Mode를 (입사각 75° , 이론속도 $v = 2.866 \text{ mm}/\mu\text{s}$)이용하여 판파 속도를 측정하였는데 $v = 2.868 \text{ mm}/\mu\text{s}$ (열처리를 하지 않은 원소재) $v = 3.073 \text{ mm}/\mu\text{s}$ (C조건으로 열처리된 시편), $v = 3.092 \text{ mm}/\mu\text{s}$ (외국 S사의 시편)

로 열처리에 의한 영향만을 미치는 결과를 얻게 되었다.

4.2 열처리 조건에 따른 결과 분석

항복강도(790MPa이상), 인장강도 (1120MPa이상), 연신율(15%이상)을 만족시키는 재료의 물성치를 갖는 최적의 열처리 조건을 찾을 수 있었다. 인코넬 x- 750의 재료를 가진 lock plate내에 존재하는 초음파의 A₀ 모드에 대한 신호를 해석하고 열처리를 가한 조건과 원소재와의 차이점을 찾아내었다. 인코넬 x- 750의 재료를 가진 lock plate를 주파수와 재질에 따른 초음파 모드특성선도를 획득할 수 있는 가능성을 확인할 수 있었다. 열처리 조건에 따라 wave의 속도가 달라짐에 따라 열처리 등급을 확인할 수 있다.

5. 결 론

최적화된 유도초음파 검사기법을 통해 기존의 국부 탐상 법에 비해 탐촉자의 이동 없이 고정된 탐상위치에서 유도초음파 신호에 대한 송수신만을 제어함으로써 초음파 모드를 해석하고 열처리를 가한 조건과 원소재와 차이점을 찾아내었다. 인코넬 X-750 시편의 열처리에 따라 wave 속도가 달라짐에 따라 열처리 등급을 확인할 수 있다. 생성되는 유도초음파의 위상속도와 군속도를 비교함으로써 서로 다른 열처리 조건하에서 초음파 속도가 다름을 알게 되었다. 따라서 유도초음파 기법을 이용하여 열처리 등급을 확인할 수 있음을 알 수 있다.

후 기

본 논문은 부산대학교 기계공학부 BK21 사업단 및 WBC사업단의 연구비 지원과 2009년도 부산대학교 자유 과제 연구비의 지원으로 수행되었기에 이에 감사를 표한다. 본 연구의 기술적 조언을 해준 (주)GIM의 이 창연 부장에게 감사를 표한다.

참고문헌

- (1) Jung, H., 1991, "A Study in Measurement of Thermal Aging in High Temperature Facility," *Journal of the KSME*, Vol. 37, No. 11, pp.251~260.
- (2) Hur, S. K., Hong, K. T. and Do, J. M., 1988, "The Measurement of Degradation in Creep-Ruptured Cr-Mo-V Steels by NDE Methods," *Proc. of the 2nd Conference on Mechanical Behaviors of Materials*, Seoul, Korea, pp. 17~24.
- (3) Yamashita, M., Viswanathan, U. K., Yamamoto, I. and Kobayashi, T., 1997, "Service-induced Changes in the Microstructure and Mechanical Properties of a Cr-Mo-Ni-V Turbine Steel," *ISIJ International*, Vol. 37, No. 11, pp. 1133~1138.
- (4) Viswanathan, R. and Brummer, S. M., 1985, "In-Service Degradation of Toughness of Steam Turbine Rotors," *Transactions of the ASME*, Vol. 107, pp. 316~324.
- (5) Rose, J. L., Rajana, K. M. and Carr, F. T., 1994, "Ultrasonic Guided Wave Inspection Concepts for Steam Generator Tubing," *Material Evaluation*, Vol. 52, pp. 307~311.
- (6) Cho, Y. and Rose, J. L., 1996, "Guided waves in a Water Loaded Hollow Cylinder," *Nondestructive Testing and Evaluation*, Vol. 12, pp. 323~339.
- (7) Cho, Y., 1995, "Defect Detection and Characterization Potential with Guided Waves," Ph. D. Dissertation, The Pennsylvania State University.
- (8) Younho Cho, J. L Rose, 1996, "The Study on mode Characteristic of Ultrasonic Guided wave for a Large Structure NDE," *A proceeding of korean Nondestructive Testing*, pp. 93~101.
- (9) Rose, J. L., 1999, *Ultrasonic Waves in Solid Media*, Cambridge.
- (10) Younho Cho, 2001, "Understanding and Application of Ultrasonic Guided Waves," *Journal of korean Nondestructive Testing*, Vol. 21, pp. 446~463.
- (11) Lamb H, 1917, "On waves in an elastic plate. *Proc. Soc.*" PT series A. pp. 114~128.