

# 초음파현미경에서 V(z)곡선을 이용한 세라믹/금속 접합계면의 비파괴평가

박익근\* · 이철구\* · 조동수\*\* · 김용권\*\*\*

\*서울산업대학교 NDE기술센터

\*\*서울산업대학교 산업대학원

\*\*\*서울산업대학교 에너지환경대학원

## Nondestructive Evaluation of Ceramic/Metal Interface Using the V(z) Curve of Scanning Acoustic Microscope

Ik-Keun Park\*, Chul-Ku Lee\*, Dong-Su Cho\*\* and Yong-Kwon Kim\*\*\*

\*NDE Technology Center, Seoul National University of Technology, Seoul 139-743, Korea

\*\*Graduate School of Industry, Seoul National University of Technology, Seoul 139-743, Korea

\*\*\*Graduate School of Energy and Environment, Seoul National University of Technology, Seoul 139-743, Korea

### Abstract

A leaky surface acoustic wave (LSAW) velocity was measured using a scanning acoustic microscope on the ceramic/metal interface in order to investigate material properties. The inverse Fourier transform (IFFT) of the V(z) curve contains the reflectance function of a liquid-specimen interface. So, the longitudinal, transverse, and Rayleigh wave velocities for each layer are obtained by the inversion of the V(z) curve at the same time. This paper contains mainly the experimental procedure for measurements of the LSAW velocity, and the results obtained for the velocity variation of individual layer after the thermal shock. It is shown that this method is useful in measuring the material properties under external stress.

\* Corresponding author : ikpark@snut.ac.kr

(Received October 4, 2004)

Key Words : Scanning Acoustic Microscope (SAM), Leaky Surface Acoustic Wave (LSAW), V(z) curve, Ceramics/Metals Interface

## 1. 서 론

비파괴평가(NDE)는 부품·소재의 건전성(integrity) 확보를 위한 품질보증의 한 수단으로 널리 활용되고 있다. 전자 제품에 사용되는 부품·소재의 신뢰성 평가를 위해 정밀한 모터의 제어기술, 첨단 신호처리 기술, 압전소자 기술의 발달로 미세변화 계측의 재현성, 고분해능, 표면과 내부의 이미지 관찰, 또한 미소부위에서 재료의 누설탄성표면파의 음속( $V_{LSAW}$ )측정이 가능한 초음파현미경에 대한 연구가 최근 들어 활발히 진행되고 있다<sup>1,2)</sup>.

세라믹 재료는 본래 경도·내마모성·내식성 등에 우수한 특성을 가지고 있으나 기계구조부품으로 사용하려는 경우 세라믹 단일체로 사용하는 것은 드물고 대부분 세라믹과 금속의 접합체를 많이 사용한다. 이 경우 접착제의 종류, 접착 방법이나 조건, 사용 환경에 따라서 접합계면과 그 부근이 문제가 되어 제품 불량률의 원인으로 추정하고 있다.

세라믹/금속 이종 접합부가 금속과 세라믹의 좋은 특성을 모두 갖춘 재료이지만 열피로 사이클이 증가하면 접합부의 접합강도는 열팽창계수나 탄성계수의 차에 의해 생기는 잔류열응력과 외력이 가해졌을 때 생기는 응

력집중 효과의 상승이 큰 문제가 되고 있다. 이 때문에 접합재의 제작은 유한요소에 의한 시뮬레이션 데이터로부터 재료를 선택하고 인장, 굽힘, 전단 등의 파단강도로부터 실험적으로 확인하는 방법이 일반적이다. 이 계산 결과에 대응하여 접합재의 응력분포를 X선 회절 및 IF법 레이저 등에 의해 직접 측정하는 것도 검토되고 있으나 접합부에 발생하는 열간류응력은 접합계면 부근에서 집중하기 때문에 이와 같은 측정법으로는 분해능이 낮고 미소 영역에서의 응력측정이 곤란하다. 이러한 문제를 해결하기 위해 집속 초음파 빔을 탐촉자로 사용하고 있는 초음파현미경을 사용하여 미소영역의 음속변화를 측정하므로써 접합계면 부근에 존재하는 잔류열응력의 크기와 분포의 상관 관계를 추정하는 연구가 시도되고 있다.

본 연구에서는 세라믹/금속 접합부의 불량률을 줄이고, 최적의 접합방법 선정, 접합계면에서의 접합강도 등 수명 향상을 위한 새로운 비파괴적 재료특성 평가 기법으로 초음파현미경(SAM)을 활용하고자 한다. 즉 초음파현미경의 누설탄성표면파(Leaky Surface Acoustic Wave: LSAW)의 전파 모델링과 접합부의  $V(z)$ 곡선을 이용하여 열응력에서의 음속의 변화를 측정하여 접합계면 부근에 존재하는 잔류열응력의 크기와 분포를 추정하고자 한다.

## 2. 관련 이론

### 2.1 초음파현미경

탐촉자에서 초음파가 집속되는 것을 초점이라고 부르고, 이 초점을 시험편 표면에 일치시키는 방법을 포커스모드(focus mode)라고 한다. 또한 시험편 내부의 이미지를 검출하고자 할 때 탐촉자를 시험편에 접근시켜 초점이 시험편의 내부에 형성되도록 한다. 이러한 동작을 디포커스모드(de-focus mode)라 한다. Fig. 1에서 #2와 같이 디포커스모드에서는 렌즈각도의 범위에서 입사하는 초음파 중 스넬의법칙(Snell's law)에 의해 제2임계각(2nd critical angle)이 되는 부분에서 누설탄성표면파(LSAW)가 발생한다.

### 2.2 $V(z)$ 곡선의 이론적 검토

초음파현미경의 특징으로  $V(z)$ 곡선법이 있으며, 이는 재료의 국소부위에서 누설탄성표면파의 속도를 정밀하게 측정해 음속에 의한 재료의 특성을 파악할 수 있는 장점을 가지고 있다. Fig. 1에서 시험편에서 직접 반사해오는 #1과 렌즈에서 시험편 표면에 대해 제 2 임계

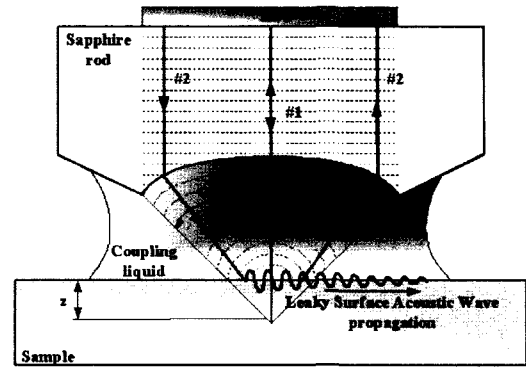


Fig. 1 Details of acoustic lens and interference of acoustic waves

각( $\theta_{LSAW}$ )으로 입사해 누설탄성표면파가 시험편의 표면을 따라 전파하여 대칭적인 경로를 따라 수신되는 #2와의 간섭(interference)에 의해  $V(z)$  곡선은 다음과 같이 표현할 수 있다<sup>3)</sup>.

$$V(z) = V_{\#1}(z) + V_{\#2}(z) \quad (1)$$

초점을 시험편의 표면에서부터 시험편 내부로  $z(-)$ 값을 변환시키면 #1과 #2의 파장 간섭에 의해 증폭과 감쇠가 일어나며, 이 간섭패턴을 통해  $V(z)$ 곡선을 얻을 수 있다. #1과 #2의 간섭은 위상차에 의해 설명될 수 있고, #1과 #2의 위상은 다음의 식(2)와 (3)으로 나타낼 수 있다.

$$\delta_{\#1}(z) = -2k_w \cdot z \quad (2)$$

$$\delta_{\#2}(z) = \frac{-2k_w \cdot z}{\cos \theta_{LSAW}} + 2k_{LSAW} \cdot z \cdot \tan \theta_{LSAW} \quad (3)$$

여기서  $k_w$ 는 접촉매질(증류수)의 종파의 파수,  $z$ 는 시험편내의 초점거리,  $k_{LSAW}$ 는 시험편에서의 파수를 나타낸다. 파수  $k$ 의 정의는 다음 식(4), (5)와 같다.

$$k_w = \frac{2\pi f}{V_w} \quad (4)$$

$$k_{LSAW} = \frac{2\pi f}{V_{sample}} \quad (5)$$

여기서  $f$ 는 초음파의 주파수이고,  $V_w$ 는 접촉매질층(증류수)에서의 종파음속,  $V_{sample}$ 은 시험편에서의 누설탄성 표면파의 음속이다. 또한,  $\theta_{LSAW}$ 는 스넬의 법칙에 의해 누설탄성표면파가 존재하는 제2임계각으로 식(6)과 같이 나타낸다.

$$\theta_{LSAW} = \sin^{-1} \left( \frac{k_{LSAW}}{k_w} \right) \quad (6)$$

단위거리의 이동에 대한 #1과 #2의 상대적 변화  $\xi$ 는 식(7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \xi &= \frac{\delta_{\#2}(z) - \delta_{\#1}(z)}{z} \\ &= 2 \left[ k_w \left( 1 - \frac{1}{\cos \theta_{LSAW}} \right) + k_{LSAW} \cdot \tan \theta_{LSAW} \right] \end{aligned} \quad (7)$$

식(7)에서  $k_{LSAW}$ 을 앞에서 정의한 스넬의 법칙을 이용하여 파장 식으로 정리하면 식(8)과 같이  $\Delta z$ 를 구할 수 있다. 이는 파장간섭에 의한  $\Delta z$ 이며 이는 V(z)곡선의 간섭파형인  $\Delta z^{4,5)}$ 이기도 하다.

$$\Delta z = \frac{V_w}{2f(1 - \cos \theta_{LSAW})} \quad (8)$$

위의 식에서  $V_{LSAW}$ 를 만들기 위해  $\cos \theta_{LSAW}$ 를 스넬의 법칙에 대입해 정리하면 누설탄성표면파의 전파속도  $V_{LSAW}$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다<sup>4)</sup>.

$$V_{LSAW} = \frac{V_w}{\sqrt{1 - \left( 1 - \frac{V_w}{2f\Delta z} \right)^2}} \quad (9)$$

### 2.3 V(z)곡선의 메카니즘

Fig. 2은 구형 프로브에 발생된 초음파의 경로를 보여주고 있다. #1의 경우는 렌즈 중앙에서 종파가 (E-O-E)의 경로로 전파하고 구면렌즈와 시험편의 제2임계각에서는 (A-B-O-C-D)의 경로로 전파하는 누설탄성표면파가 존재하게 된다. 두 파는 경로의 시간차 ( $\Delta t$ )에 의해 Fig. 2의 a), b)와 같이 나타난다<sup>6,7)</sup>.

### 2.4 반사함수와 위상반전

재료에 따라 시험편 표면에서의 반사 계수는 재료마다 다르다. 반사 계수는 음향 임피던스에 의해 정의된 반사 함수(reflectance function)와 재료의 특성인 밀도(density) 및 음속(acoustic wave velocity)에 의해 얻어진다<sup>8)</sup>. 음향 임피던스 Z는 다음 식으로부터 결정되어 진다.

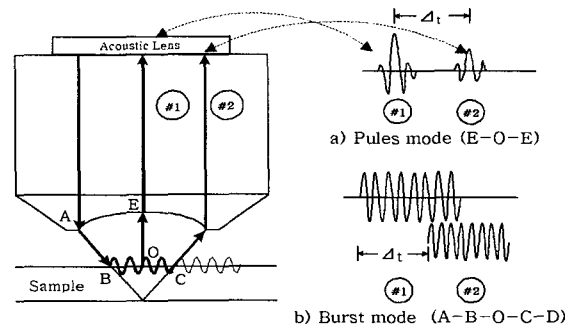


Fig. 2 Cross-sectional geometry of spherical acoustic lens, explaining the mechanism of the V(z) curves and a), b) time interval of interference wave

$$Z = \rho C \quad (10)$$

여기서  $\rho$ 는 재료의 밀도이고 C는 재료의 종파 음속이다. SAM에서는 집속형 렌즈를 사용하기 때문에 음파가  $\theta$ 의 각도로 물(couplant)에서 시험편으로 입사하고 반사와 굴절이 생기게 된다.  $Z_L^f$ 는 접촉매질에서의 음향임피던스이고,  $Z_L^s$ 와  $Z_T^s$ 는 시험편에서의 종파와 횡파의 음향임피던스이다. 등방재료(isotropic material)에서의 반사함수 R은 다음과 같이 주어진다.

$$R = \frac{Z_L^s \cos^2 2\theta_T^s + Z_T^s \sin^2 2\theta_T^s - Z_L^f}{Z_L^s \cos^2 2\theta_T^s + Z_T^s \sin^2 2\theta_T^s - Z_L^f} \quad (11)$$

여기서  $Z_n^m = \rho^m C_n^m / \cos \theta_n^m$  ( $m=f, s; n=L, T$ )은 음향 임피던스이다.  $\rho^m, C_n^m$  그리고  $\theta_n^m$ 은 각각 밀도, 음속, 반사 또는 굴절각이다. 위 첨자 f, s는 매질과 금속을 나타내며, 아래첨자 L, T는 종파 및 횡파를 뜻한다. Fig. 3은 물과 석영의 경계면에서 계산된 반사함수 R의 음압(amplitude)과 위상(phase)을 보여주고 있다.

### 2.5 반사함수에 의한 물성평가

스넬의 법칙(Snell's law)에 의해, 각각의 임계각에서 정규화된 파수와 음속과의 관계는 다음과 같이 주어진다.

$$\left[ k_{Lz}^r / k_L^f \right]_A = \sqrt{1 - C_L^f / C_L^s} \quad (12)$$

$$\left[ k_{Lz}^r / k_L^f \right]_B = \sqrt{1 - C_L^f / C_T^s} \quad (13)$$

$$\left[ k_{Lz}^r / k_L^f \right]_C = \sqrt{1 - C_L^f / C_R^s} \quad (14)$$

여기서,  $C_R^s$ 은 금속에서의 누설탄성표면파(Rayleigh

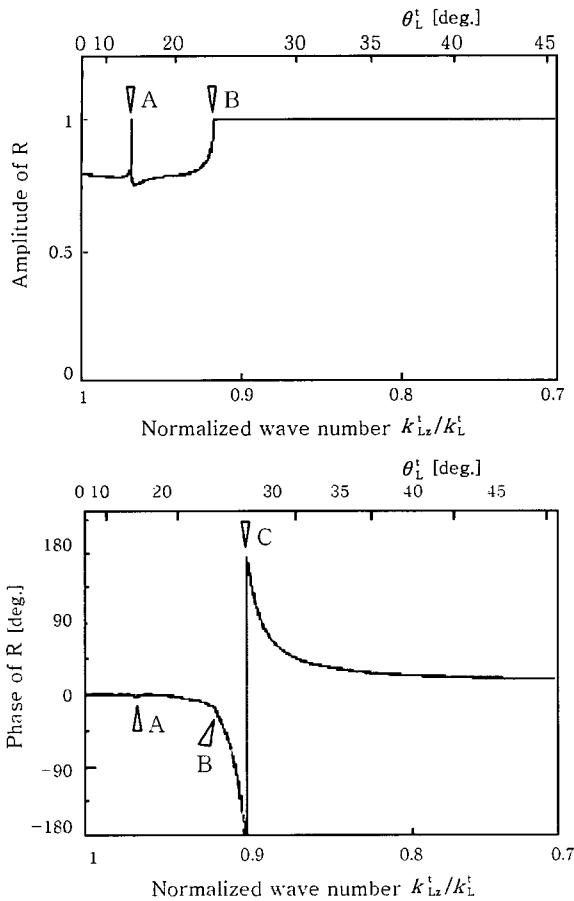


Fig. 3 Theoretical amplitude and phase of reflectance function R (at the interface between water and fused quartz  $\nabla A$ : longitudinal wave  $\nabla B$ : transverse wave  $\nabla C$ : Rayleigh wave)

wave)속도이다. 아래첨자 A, B, C는 Fig. 3에서의 각각의 임계각(critical angle)을 나타낸다<sup>9)</sup>. 또한, 외부로부터 받은 응력(열충격, 인장, 압축, 비틀림, 굽힘 등)은 그 시험편에서의 음속 변화로 알 수 있다.

$$C_R = K\sigma + C_{R0} \quad (15)$$

여기서,  $\sigma$ 는 응력,  $C_R$ 는 시험편의 누설탄성표면파 속도,  $C_{R0}$ 는 시험편의 무응력 상태의 표면파 속도이고, K는 음탄성 상수로 알려진 재료의존 파라메타이다<sup>10)</sup>. 외부에서 가한 힘이 단일 요소라면 그 응력 변화에 의해 시험편이 갖고 있는 외력에 대한 잔류응력을 얻을 수 있다.

### 3. 실험장치 및 방법

#### 3.1 실험장치

본 연구에 사용한 초음파현미경의 전반적인 구성은 Fig. 4에 나타내고 있다.

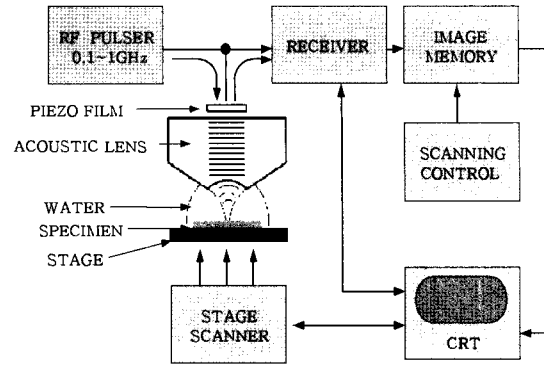


Fig. 4 Schematic diagram of scanning acoustic microscope (SAM)

#### 3.2 시험편

본 실험에 사용한 시험편은 세라믹/금속( $Al_2O_3 + Cr_2O_3 / Mo + Mn / Ni$ )의 이중 접합부를 사용하였다. 이 시험편은 전자렌지에 들어가는 핵심 부품으로 열피로나 열충격에 항상 노출되어 있다. 접합부의 형상과 두께는 Fig. 5와 같다

##### 3.2.1 시험편의 열충격 조건

시험편은 세 가지의 다른 종류로 구성 되어 있기 때문에 각각의 물성을 조사하기 위해 표면 연마작업과 그라인딩 작업을 하였다. 층과 층 사이의 간격이 작기 때문에  $0.3 \mu m$ 알루미나를 사용하였다. 열충격 조건은 Table 1과 같다.

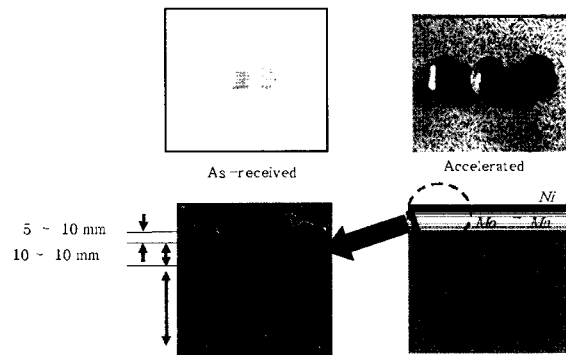


Fig. 5 Shape and size of specimen

Table 1 Thermal shock condition of test material

	As-received	300°C	500°C
Heating & cooling rate	-	10°C/min	10°C/min
Hold time (min.)	-	60	60
Cycles	-	10	10



Fig. 6 Scanning electron microscope (SEM) micrograph of Magneto-Stem

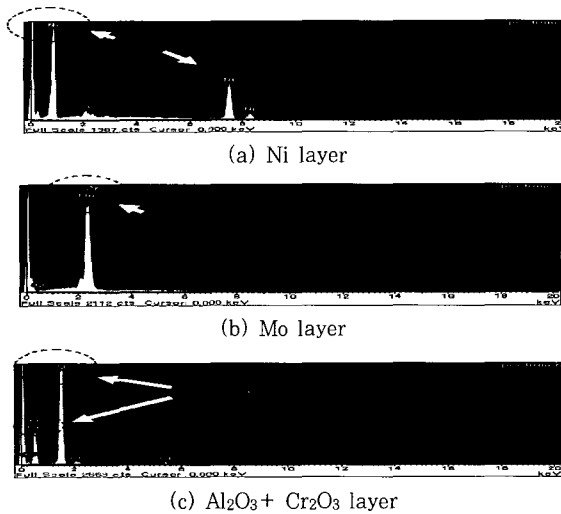


Fig. 7 Chemical composition of each layer(SEM EDX)

3.2.2 시험편의 화학조성

본 시험편의 화학조성을 알아보기 위해 SEM EDX를 사용하였다. 그 결과 다음과 같은 성분 결과를 알 수 있었다. Fig. 6은 접합부( $Al_2O_3+Cr_2O_3/Mo+Mn/Ni$ )를 SEM으로 1000배 확대해서 본 그림이다. Fig. 6에서 보여진바와 같이 Ni층과 기저층인 ( $Al_2O_3+Cr_2O_3$ ) 사이에 가지 모양의 Mo-Mn층으로 이루어져 있다. 각각의 층에 대한 재료의 화학성분을 SEM EDX를 통하여 Fig. 7를 얻을 수 있었다.

4. 결과 및 고찰

4.1 접합부에서의 음압변화

Fig. 8은 Ni에 대한 종파, 횡파 및 누설탄성표면파에 대한 반사함수의 이론적인 음압변화의 결과이다. 각각의 A, B 그리고 C 값이 Ni의 임계각을 나타내며 또한 파수를 뜻한다.

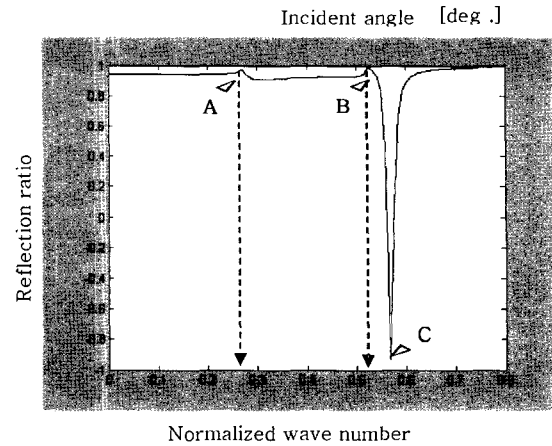


Fig. 8 Theoretical amplitude result of reflectance function in Ni

Table 2 Wave velocity of metals<sup>11)</sup>

	$Al_2O_3$	Mo	Ni
Longitudinal wave (m/s)	10,750	6,250	5,630
Shear wave (m/s)	6,360	3,350	2,960
Rayleigh wave (m/s)	-	3,110	2,640

Table 3 Simulated result of wave velocity of metals

	$Al_2O_3$	Mo	Ni
Longitudinal wave (m/s)	10,706	6,159.1	5,535.8
Shear wave (m/s)	6,354	3,330.5	2,959.7
Rayleigh wave (m/s)	5,843	3,063.9	2,754.6

Table 4 Simulated result of critical angle of metals

		$Al_2O_3$	Mo	Ni
Critical Angle (°)	Longitudinal wave	8.02	13.9	15.5
	Shear wave	13.6	26.6	30.0
	Rayleigh wave	14.9	28.9	32.5

Table 2는 각각의 시뮬레이션과 데이터를 비교하기 위해 작성한 기준값이고, Table 3과 Table 4는 시뮬레이션 결과이다. 기준값과 시뮬레이션 값을 비교해 볼 때 오차범위 0.4%범위로 신뢰함을 알 수 있다.

4.2 V(z) 곡선에 의한 접합부 평가

Fig. 9은 초음파 현미경으로  $Al_2O_3+Cr_2O_3$  층에 열충격(thermal shock)을 가한 후의 시험편에서 얻은 V(z)커브를 보여주고 있다. 하지만, 초기 상태의  $\Delta z$ 는 300°C, 500°C의 열충격 후의  $\Delta z$ 과 별다른 변화가 없었다.

Fig. 10은 실험편의 Ni층으로 초기 상태의 V(z)곡선과 300°C의 열충격을 준 시험편의 V(z)곡선은 별다른 차이가 나타나지 않았지만, 500°C의 열충격 하에서

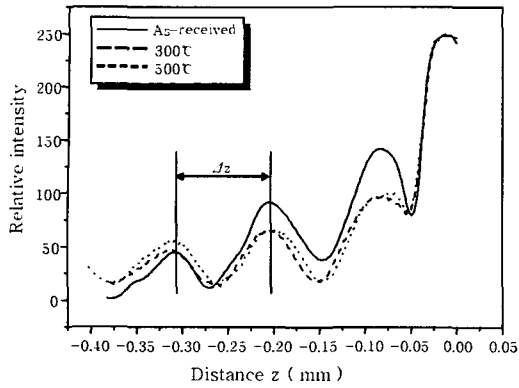


Fig. 9 Experimental result of V(z) curve in Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> layer

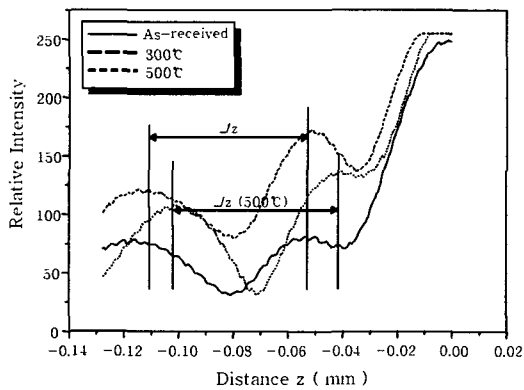


Fig. 10 Experimental result of V(z) curve in Ni layer

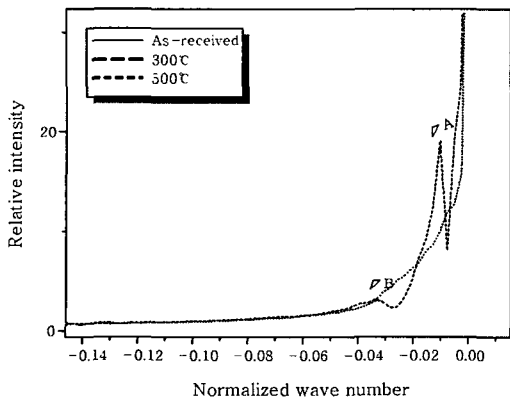


Fig. 11 Inversion of experimental result of V(z) curve in Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> layer

없는 것으로 생각할 수 있으나, 500°C의 열충격에 의한 시험편에 대한 V(z)커브의 FFT 결과는 종파와 횡파의 임계각이 나타나지 않았다. 그 이유에 대해서는 다양한 실험조건에 의한 실험적 검증이 필요하다고 생각된다. Fig. 10의 결과에 의하면 Ni층 V(z)곡선의 FFT분석 결과는 500°C에서 종파 및 횡파의 음속 변화와 임계각 변화를 예상할 수 있다. 그러나 Fig. 12는 FFT분석 그래프를 확대한 결과로써 피크를 나타내는 부분의 데이터가 3개 밖에 안되어 정확한 피크 이동을 찾기가 어려웠다. Table 5에서 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 과 Mo-Mn층에서는 열충격에 대한 음속 변화가 나타나지 않았으며, 기존의 값<sup>11)</sup>과 비교해 볼 때 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 층은 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 영향으로 Mo-Mn층은 Mn의 영향으로 인한 음속의 차이를 볼 수 있다.

그러나 Ni층에서의 누설탄성표면파 침투깊이는 약 16 μm이고 Ni층의 두께가 5~10 μm 정도이며 연마작업을 감안할 때 Ni층이 상당수 소실되었을 것으로 생각되며, Ni층이라 생각되는 부분의 V(z)곡선과 FFT분석 결과를 보면 Mo-Mn의 음속값을 나타냄을 알 수 있다. 또한 Mo-Mn층에서도 같은 연마작업을 하였기에 일부 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>층의 음속을 나타냄을 알 수 있다.

본 실험에서는 접합부분의 접합상태가 가장 중요한 요인으로 열팽창계수가 서로 틀린 세라믹과 금속의 접

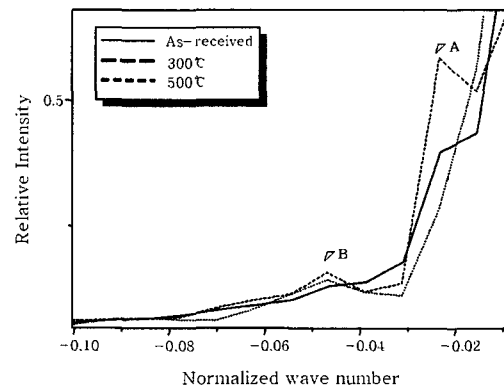


Fig. 12 Inversion of experimental result of V(z) curve in Ni layer

Table 5 Experimental result with SAM

		Δz (mm)	Longitudinal wave (m/s)	Shear wave (m/s)	Rayleigh wave (m/s)
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		0.123	10,288.7	5,732.7	5,421.2
Mo-Mn		0.118	6,881.7	-	5,314.7
Ni	As-received & 300°C	0.041	6,881.7	4,890	3,219.7
	500°C	0.061			3,851.4

는 Δz의 변화를 발견할 수 있다. 이 Δz값은 식(9)에 의해 누설탄성표면파(LSAW) 음속이 631.7m/s 만큼 커진 것을 알 수 있다. Fig. 11은 Fig. 9에서 얻은 실험적 데이터 V(z) 커브를 FFT(fast fourier transform) 분석을 한 것이다. A, B값은 각각 종파, 횡파의 임계각 및 파수를 나타내고 있다. 이 파수를 이용하여 종파 및 횡파의 음속을 알 수 있다. 하지만, 초기 상태와 300°C에서는 Fig. 11으로부터 종파와 횡파의 음속의 변화는

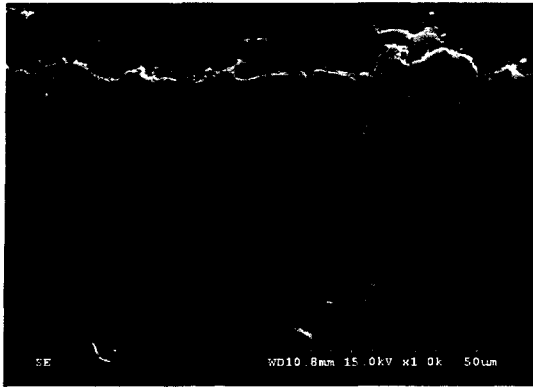


Fig. 13 SEM image of specimen thermal shock in 500°C (×1000)

합이 열충격이나 열피로가 증가하였을 때 접합부 계면에서의 거동 관찰이 목표이기 때문에 Ni층에 대한 정보를 접합부에 대한 정보로 간주 하여도 무리는 없을 것이다. Table 5에서 Ni층을 살펴보면, Fig. 10에서 알 수 있는바와 같이 초기상태와 300°C보다 500°C로 열충격을 증가 하였을 때  $\Delta z$ 의 값이 커지면서 누설탄성 표면파(LSAW)의 음속이 증가하였다. 열충격에 의한 음속의 변화는 접합부에 열응력이 존재하고 있다는 뜻이고, Fig. 13에서 보는바와 같이 들뜸(delamination), 기공(void), 같은 결함이 없는 것으로 봐서 열응력이 해방되지 않고 구속되어 있음을 예측 할 수 있다. 따라서 접합부에 잔류열응력이 존재하고 있는 것으로 생각되고 그 잔류열응력이 음속의 변화에 주요 원인이 된 것으로 생각된다. 그러나 Table 5의 결과에서 Ni층의 종파 및 횡파의 속도 변화 판별이 난해하여 재료 특성의 평가를 위해서는 더 많은 실험적 검증 데이터를 확보하여야 할 필요가 있다.

## 5. 결 론

세라믹/금속 접합부의 고장분석에 초음파현미경의 V(z)곡선을 적용하고 그 유용성 유무를 실험적으로 검증하여 얻은 결과는 다음과 같다.

1) 세라믹/금속( $Al_2O_3+Cr_2O_3/Mo+Mn/Ni$ ) 접합계면 해석에 적용할 수 있는 초음파 현미경의 V(z)곡선의 전파모델링 및 시뮬레이션용 프로그램을 개발하였다.

2) 세라믹/금속의 각층에 대한 음속과 임계각의 시뮬레이션 결과는 이론값과 잘 일치하였으며 매우 유용함을 알 수 있었다.

3) 세라믹/금속 접합부의 음속변화 실험을 수행한 결과 접합 계면인 Mo-Mn층에서 631.7m/s의 음속 변화를 확인할 수 있었다. 이 음속의 변화 값은 열충격에 의해 접합부에서 해방되지 못해 존재하고 있는 잔류응력의 영향으로 추정된다. 접합계면 부근에 존재하는 잔류열응력의 크기와 분포를 정량적으로 추정하기 위해서는 보다 많은 모의 시험편의 제작과 최적 시험조건의 선정에 의한 재현성 있는 실험 데이터의 확보가 필요하다.

## 참 고 문 헌

1. Se Ahn-Song : Progress and Applications of Microscopy Techniques, Polymer Science and Technology, **12-1** (2001), 98-107
2. 정규원, 이종덕, 송준태 : 초음파현미경의 원리와 응용, 전기전자재료학회, **12-1** (1999), 55-62 (in Korean)
3. J.Kushibiki, N.Chubachi : Material Characterization by Line-Focus-Beam Acoustic Microscope, IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics, **SU-32-2** (1985), 189-212
4. T.Kobayashi, J.Kushibiki, and Chubachi : Improvement of measurement accuracy of line-focus-beam acoustic microscope system, IEEE Ultrasonics symposium, 1992, 739-742
5. Hiroshi Kanai, Noriyoshi Chubachi and Toshio Sannomiya : Microdefocusing Method for Measuring Acoustic Properties Using Acoustic Microscope, IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control, **39-5** (1992), 643-652
6. 石川 : 超音波顯微鏡による材料評價, 金屬, **67-10**(1997), 19-25 (in Japanese)
7. Shamachary Sathish and Richard W. Martin, : Quantitation imaging of Rayleigh wave velocity with a scanning acoustic microscope, IEEE Transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control, **49-5** (2002), 550-557
8. 박은수, 박익근, 송성진, "비파괴평가공학", 學研社, 2001, 206-213 (in Korean)
9. Masahiro Nishida, Tomio Endo, Tadahru Adachi and Hiroyuki Matsumoto, : Measurements of local elastic moduli by amplitude and phase acoustic microscope, NDT&E International, **30-5** (1997), 217-277
10. Jian Lu, : Handbook of measurement of residual stresses, Society for experimental mechanics, 1996, 149-178
11. Nondestructive Testing Handbook Vol. 7, ultrasonic testing, American society for nondestructive testing, 1991, 836-840