

초음파현미경에서 V(z)곡선의 시뮬레이션

박익근*, 임재생**, 윤종학*, 노승남*, 서성원*

Simulation of V(z) curve at the Acoustic Microscope

Ik-keun Park*, Jea-seang Lim**, Joung-hak Yun*, Sing-nam No*, Sung-won Seo*,

Abstract

본 연구에서는 초음파현미경의 기하학적 원리와 초음파현미경의 특징중 하나인 V(z)곡선의 간섭파형을 시뮬레이션하였고, 실제 초음파현미경의 V(z)곡선법을 이용하여 미소영역에서의 누설탄성표면파 음속을 측정하였다. 초음파현미경을 이용한 V(z)곡선법의 음속측정결과가 시뮬레이션 음속값과 큰차이를 보이지 않으므로 미소영역에 초음파현미경의 V(z)곡선법을 적용하여 초음파의 음속측정이 가능함을 확인하였다. 이는 향후 초음파현미경을 이용하여 미세한 재료의 물성평가에 적용할 수 있을 것으로 기대된다.

Key Words : Scanning Acoustic microscopy(SAM), V(z) curve, Leaky Surface Acoustic Wave

1. 서 론

산업사회의 발전에 따라 커다란 구조물의 거시적인 결함의 비파괴적 평가와 함께 미세한 구조의 비파괴적 평가가 필요하게 되었다. 하지만 미세 구조 재료의 정량적인 비파괴평가에는 많은 어려움이 존재하고, 미세한 변화의 계측에서는 신뢰성이 떨어지는게 현실이다. 이에 각종계측장비들의 자동화와 높은 분해능이 요구된다.

정밀한 모터의 제어기술, 신호처리기술, 압전소자기술의 발달로 미세변화 계측의 재현성, 고분해능, 표면과 내부의 이미지관찰, 또한 미소부위에서 재료의 누설탄성표면파의 음속(V_{LSAW})측정이 가능한 초음파현미경(Scanning Acoustic microscope ; SAM)에 대한 연구가 최근들어 활발히 진행되고 있다^[1-3].

초음파현미경의 역사는 초음파를 현미경 기술에 활용해 보려는 아이디어를 시작으로 1930년대 러시아의 과학자 Sokolov에 의해 제기되었으나, 실제로는 실험장치들이 뒷받침되지 않아 실패하고 말았다. 그 후 1973년 미국 스탠퍼드대학교의 F. Quate 교수가 주사형 초음파현미경을 개발한 것을 계기로 연구가 활발히 진행되었다. 그리고 그 연구가 계속 진행되어 1970년대 말에는 미국 Hughes 연구소의 Weglein에 의해 초음파현미경을 이용한 소재물성의 정량적 측정이 시작되어 현재에 이르고 있다^[3]. 아직 초음파현미경은 많은 한계를 가지고 있지만 앞으로 주변산업의 발전과 함께 재료 특성평가에 있어 더욱더 유용한 방법으로 대두되리라 예상된다.

이에 본 연구에서는 초음파현미경의 원리를 간단하게 소개하고 초음파현미경의 V(z)곡선을 시뮬레이션하여 이론적으로 누설탄성표면파의 음속을 구해 보았으며, 또한 실제 초음파현미경을 이용하여 미소부위에서 누설탄성표면파의 음속을 측정하여 재료의 물성평가에 적용유무를 확인하였다.

* 박익근, 서울산업대학교 기계공학과(ikpark@snut.ac.kr)

** 임재생, 서울산업대학교 산업대학원 기계공학과

* 윤종학, 서울산업대학교 기계공학과

* 노승남, 서울산업대학교 기계공학과

* 서성원, 서울산업대학교 기계공학과

2. 관련이론

2.1 초음파현미경

탐촉자의 렌즈를 구형으로 만들어 초음파 빔을 집속시켜 시험편에 조사하면 시험편의 표면과 내부의 재료특성에 따라서 반사파와 투과파가 발생한다. 이 파들의 미세한 변화를 계측하여 화상으로 나타내는 것이 초음파현미경이다. Fig. 2.1은 압전소자의 구성요소와 초음파의 간섭을 보여주는 개략도이다. 탐촉자의 구성요소는 압전현상이 일어나는 압전소자(ZnO)와 초음파빔을 집속시켜줄 수 있는 렌즈(Lens)와 압전소자에서 생성된 초음파가 렌즈까지 도달하고 또한 렌즈와의 구면수차를 작게 만들기위해 적용된 사파이어매질(Sapphire rod)로 구성되어 있다.

탐촉자에서 초음파가 집속되는 것을 초점이라고 부르고, 이 초점을 시험편 표면에 일치시키는 방법을 포커스모드(Focus mode)라고 하며, 이 동작은 시험편의 표면이미지를 얻을 때 사용한다. 또한 시험편내부의 이미지를 검출하고자 할 때 탐촉자를 시험편에 접근시켜 초점이 시험편의 내부에 형성되도록 한다. 이러한 동작을 디포커스모드(Defocus mode)라 한다. Fig. 2.1에서 #2와 같이 디포커스모드에서는 렌즈에서 여러 가지 각도의 초음파중 스넬의법칙(Snell's law)에 의해 제2임계각(Critical angle)이 되는 부분에서 누설탄성표면파(LSAW)가 발생한다. 이러한 디포커스모드는 재료내부의 특성에 대해서는 #1의 벌크파인 종파에 의해 영향을 받으며, 재료표면의 특성에 대해서는 표면파(Surface wave)인 LSAW에 의해 영향을 받아 이미지(Image)로 표현하게 된다.

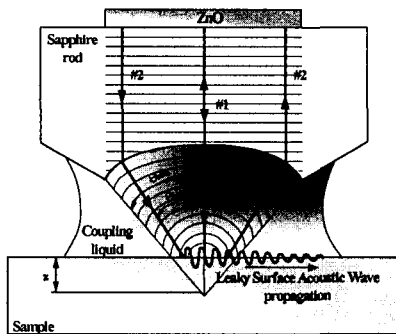


Fig. 2.1 Details of acoustic lens and interference of acoustic waves

2.2 V(z)곡선

초음파현미경의 특징으로 V(z)곡선법이 있으며, 이는 재료의 국소부위에서 누설탄성표면파의 속도를 정밀하게 측정해 음속에 의한 재료의 특성을 파악할 수 있는 장점을 가지고 있다.

Fig. 2.1에서 시험편에서 직접 반사해오는 #1과 렌즈에서 시험편 표면에 대해 제 2 임계각(θ_{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^[4].

$$V(z) = V_{\#1}(z) + V_{\#2}(z) \quad (2.1)$$

초점을 시험편의 표면에서부터 시험편 내부로 z값을 변환시키면 #1과 #2의 파장 간섭에 의해 증폭과 감쇠가 일어나며, 이 간섭패턴을 통해 V(z)곡선을 얻을 수 있다.

실험에서 얻을 수 있는 V(z)곡선을 이해하기 위해서는 #1과 #2의 파장간섭 형태를 이해하여야 한다. 이는 파장간섭곡선의 Δz 와 V(z)곡선의 Δz 는 같기 때문이다. #1과 #2의 간섭은 위상차에 의해 설명될 수 있고, #1과 #2의 위상은 다음의 식(2.2)와 (2.3)으로 나타낼 수 있다.

$$\delta_{\#1}(z) = 2k_w \cdot z \quad (2.2)$$

$$\delta_{\#2}(z) = \frac{2k_w \cdot z}{\cos \theta_{LSAW}} + 2k_{sample} \cdot z \cdot \tan \theta_{LSAW} \quad (2.3)$$

여기서 k_w 는 접촉매질층(Water)에서의 종파의 파수, z는 시험편내의 초점거리, k_{sample} 은 시험편에서의 파수를 나타낸다. 파수 k의 정의는 다음 식(2.4), (2.5)와 같다.

$$k_w = \frac{2\pi f}{V_w} \quad (2.4)$$

$$k_{sample} = \frac{2\pi f}{V_{sample}} \quad (2.5)$$

여기서 f 는 초음파의 주파수이고, V_w 는 접촉 매질층(Water)에서의 종파속, V_{sample} 은 시험편에서의 횡파속이다. 또한, θ_{LSAW} 는 스넬의법칙에 의해 누설탄성표면파가 존재하는 제2임계각으로 식(2.6)과 같이 나타낸다.

$$\theta_{LSAW} = \sin^{-1}\left(\frac{k_{sample}}{k_w}\right) \quad (2.6)$$

단위거리의 이동에 대한 #1과 #2의 상대적변화 ξ 는 식(2.7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \xi &= \frac{\delta_{\#1}(z) - \delta_{\#2}(z)}{z} \\ &= 2 \left[k_w \left(1 - \frac{1}{\cos \theta_{LSAW}} + k_{sample} \cdot \tan \theta_{LSAW} \right) \right] \end{aligned} \quad (2.7)$$

식(2.7)에서 k_{sample} 을 앞에서 정의한 스넬의법칙을 통해 바꿔주어 정리하여 파장식으로 정리하면 식(2.8)과 같이 Δz 를 구할 수 있다. 이는 파장간섭에 의한 Δz 이며 이는 $V(z)$ 곡선의 간섭파형인 $\Delta z^{[8]}$ 이기도 하다.

$$\Delta z = \frac{V_w}{2f(1 - \cos \theta_{LSAW})} \quad (2.8)$$

위의 식에서 V_{LSAW} 를 만들기 위해 $\cos \theta_{LSAW}$ 를 스넬의법칙에 대입해 정리하면 누설탄성표면파의 전파속도 V_{LSAW} 는

$$V_{LSAW} = \frac{V_w}{\sqrt{1 - \left(1 - \frac{V_w}{2f\Delta z}\right)^2}} \quad (2.9)$$

와 같이 표현할 수 있다^[6]. 식(2.9)에 사용주파수 f 에 대해 Δz 와 V_w 를 측정하면 V_{LSAW} 가 구해진다.

3. 실험장치 및 방법

3.1 실험장치

본 연구에 사용한 초음파현미경(HSAM220)의 전반적인 구성은 Fig. 3.1에 나타내고 있으며, 장비 사양은 Table. 3.1과 같다. 또한 Fig. 3.2는 초음파현미경의 전체 사진을 나타내고 있다.

발전기(Oscillator)에서의 전기적인 정현파신호가 탐촉자의 압전소자(ZnO)를 자극하여 기계적인 진동(초음파 ; Ultrasonic wave)을 얻어내 초음파가 접촉매질(Couplant)층을 지나 시험편(Sample)을 향해 집중되고 집중된 초음파가 일부는 투과하고 일부는 반사하여 반사된 초음파는 다시 압전소자를 기계적인 진동으로 자극해 수신기(Receiver)를 지나 검출기(Detector)에 수집되고 이것은 데이터 처리장치(Data processor unit)인 컴퓨터에서 신호의 위상정보와 진폭의 크기를 처리하여 모니터(Monitor)에 화상의 정보로 표현된다. 또한 제어장치(Control unit)를 통하여 X, Y, Z 3축의 이동과 전반적인 구동부(Scanner)의 제어를 할 수 있다.

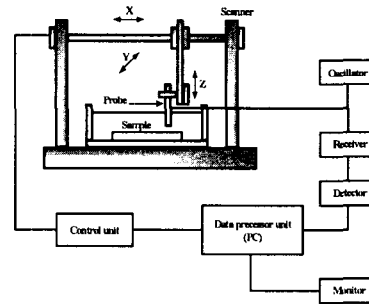


Fig. 3.1 Structure diagram of acoustic microscope



Fig. 3.2 Scanning acoustic microscope (SAM)

Table. 3.1 Specification of HSAM220

Microscope parts	Frequency range of burst-wave	10~200MHz	
	Effective stroke	340~340mm	
	Scanning range	0.3×0.2~340×340 mm	
	Display point	600×400/600×200	
	Display colors	256	
Scanning image parts	Pulse-wave oscillator	Minimum input time	2ns
		Maximum output voltage	300V
	Receiver amplifier	Gain	60dB
		Band width	1~300MHz

3.2 실험방법

3.2.1 V(z)곡선의 시뮬레이션

식(2.2)에서 식(2.7)까지 나와있는 이론식을 이용하여 V(z)곡선의 간섭파형을 시뮬레이션 하였다^[10]. 여기서 구한 Δz를 식(2.9)에 대입하고, 시뮬레이션의 주파수 200MHz와 20℃에서 물의음속 1,480m/s를 대입해주면 국소부위에서의 누설탄성 표면파의 음속을 구할 수 있다. z축 깊이는 초점(Focus)인 0에서 1μm씩 200μm까지 탐촉자가 시험편방향으로 이동(Defocusing)하여 시뮬레이션 하였고, 시뮬레이션에 사용한 데이터는 Table 3.2와 같다^[11,12].

V(z)곡선의 시험편은 탄소강(SM45C)를 준비하여 표면 굴곡에 의한 음향임피던스 변화를 줄이기 위해 #2,000까지 연마를 하여 사용하였다. 시험편을 초음파현미경의 수조에 넣고 탐촉자의 위치를 z축으로 조정하여 시험편의 표면에 초점을 맞춘다. 버스트파모드(Burst-wave mode)로 변환 후 주파수는 197MHz를 사용하고, 에너지는 14V, 카운트(Count)는 15로 조정(Setting)하였다. 포커스거리가 1.2mm인 프로브를 사용하여 디포커스거리는 125μm로 설정한다. 얻어진 V(z)곡선의 Δz는 식(2.9)로부터 주파수 197MHz와 접촉매질인 물의 음속을 이용하여 국소부위에서의 누설탄성표면파

의 음속을 계산하였다.

Table. 3.2 Simulation data of V(z) curve

	Sapphire (Al ₂ O ₃)	Couplant (H ₂ O)	Steel	Piezoelectric cell
Velocity (m/s)	11,100 (Longitudinal)	1,480 (Longitudinal)	3,230 (Shear)	6,330 (Longitudinal)
Density	4.00	1.00	14.24	5.70

4. 실험 결과 및 고찰

Fig. 4.1은 V(z)곡선에 가장 큰 영향을 미치는 위상차에 의한 간섭현상의 시뮬레이션 결과이다. 간섭파형의 한 파장을 알아보기 위해 한 파장거리의 최대 peak 부분에서 z값을 읽어, 두 z값의 차인 Δz를 구한다. 이러한 위상차에 의한 간섭에 의해 얻어진 Δz값을 식(2.9)에 대입하여 이론적인 누설탄성표면파의 음속측정이 가능하며, Fig. 4.1에서 시뮬레이션된 음속값은 3,216m/s로 계산되었다.

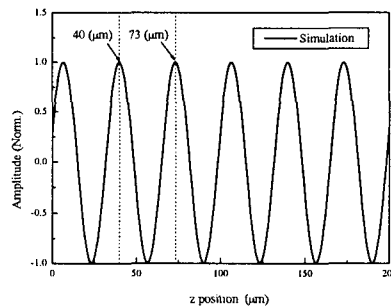


Fig. 4.1 Simulation result of V(z)curve in steel

Fig. 4.2는 SM45C에서 초음파현미경을 이용하여 얻은 V(z)곡선을 나타내고 있다. 시뮬레이션의 결과와는 다르게 점차적으로 감쇠되는 것을 볼 수 있다. 재료내부에서 초음파는 감쇠되면서 종파(Longitudinal wave)성분의 초음파와 표면파(Surface wave)성분의 초음파가 서로 간섭현상을 일으켜 파장을 형성하기 때문이다. 시뮬레이션의 결과와 마찬가지로 한 파장의 길이 즉, Δz값을 측정하고

식(2.9)에 대입하면 실제 실험을 통해 얻은 누설 탄성표면파의 음속측정이 가능하다. 이로부터 계산되어진 음속값은 3,101m/s 이다.

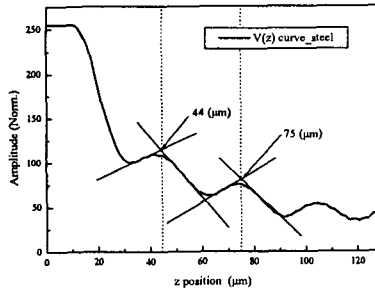


Fig. 4.2 Experimental result of V(z) curve in steel

Table. 4.1 Simulated and Experimental result with SAM

	Δz	$V_{(LSAW)}$	Frequency
Simulation	33	3,216 m/s	200MHz
Experimental	31	3,101 m/s	197MHz
Error	-	3.57 %	-

Table. 4.1은 시뮬레이션과 실험을 통해 얻은 위상간섭 Δz 값과 누설탄성표면파음속 (V_{LSAW}) 값을 나타내고 있다. 누설탄성표면파의 오차율은 약 3.5%정도 인 것을 알 수 있다. 이 오차는 시뮬레이션을 할 때 사용한 재료 물성치의 값이 정확하지 못한 것과 실험시의 온도나 실험오차에 기인한 것으로 사료된다.

5. 결 론

이론식을 바탕으로한 시뮬레이션결과와 초음파 현미경을 이용한 V(z)곡선법의 실제 실험결과, 3.5%의 오차로 시험편의 음속측정이 가능하였다.

이러한 결과로부터 미세한 시험편의 물성평가에 초음파현미경의 V(z)곡선법이 적용가능 함을 알 수 있었다.

참고문헌

- [1] K.H. Chan and H.L. Bertoni, "Measurement of longitudinal wave properties of low velocity materials using the acoustic microscope", IEEE Ultrasonics symposium, pp.1333~1336, 1990
- [2] T.Kobayashi, J.Kushibiki, and Chubachi, "Improvement of measurement accuracy of line-focus-beam acoustic microscope system", IEEE Ultrasonics symposium, pp.739~742, 1992
- [3] Paul A. Reinholdtsen and butrus T. Khuri-Yakub, "Image Processing for a Scannin Acoustic Microscope That Measures Amplitude and Phase", IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control. Vol.38, No.2, pp.141~147, march 1991
- [4] D. Chizhik, D. A. Davids and H. L. Bertoni, "A Diffraction Corrected Ray Theory for the Acoustic Microscope", IEEE Ultrasonics Symposium, pp.731~735, 1991
- [5] M.Duquennoy, M.Ourak, W.J.Xu, B.Nongailard and M.Ouafouh, "Observation of V(z) curves with multiple echoes", NDT. & E. International, Vol.28, No.3, pp.147~153, 1995
- [6] C. K. Jen, C. Neron, et.al., "Acoustic Microscopy of Cladded Optical Fibers", IEEE Ultrasonics Symposium, pp.831~835, 1989
- [7] F.Augereau, V.Roque, L.Robert, G.Despau, "Non-destructive testing by acoustic signature of damage level in 304L steel samples submitted to rolling, tensile test and thermal annealing treatments", Materials Science and Engineering, A266, pp.285~294, 1999