

# SLAM 시스템의 간섭영상을 이용한 매질의 전파속도 결정

정회원 황기환\*, 김병수\*\*

## Determination of Propagation Velocity for Material using Interference Image of SLAM System

Ki-Hwan Hwang\*, Bong-Su Kim\*\* *Regular Members*

### 요 약

본 연구에서는 SLAM 시스템의 간섭영상을 이용하여 매질에 대한 전파속도를 정량적으로 결정할 수 있는 방법을 제시하였다. 실시간에 간섭영상을 얻을 수 있는 SLAM 시스템은 매질의 탄성적 구조에 대하여 정성적인 분석만 가능하므로 정확한 분석방법이 요구된다. 따라서 매질을 투과하는 전파모드에 대한 기하학적 구조로부터 간섭영상의 라인천이와 Snell 법칙을 이용하여 매질에 대한 전파속도를 정량적 측정할 수 있는 단일 및 이중 주파수 결정법에 대한 관계식을 유도하였다. SLAM 시스템 이용한 실험을 통하여 알루미늄과 황동 매질의 시료에 대한 간섭영상으로부터 라인천이를 결정하고 이중 주파수 관계식을 이용한 결과, 매질에 대한 전파속도를 8% 오차범위 내에서 정량적으로 측정할 수 있었다.

### ABSTRACT

We have presented the method that can be quantitatively determined the propagation velocity for material using interference image of a SLAM system. Since the system can be qualitatively analyzed to material elastic structure of specimen from interference image obtained real time, the precise analysis method is required. We therefore derived relative equation about by single frequency and dual frequency that can be quantitatively determined the propagation velocity for material using the Snell's law and interference fringes from the geometrical structure to the transmission mode through a specimen. In the result of experiment, we measured the propagation velocity of materials within 8% error by determining line shift from the interference images of aluminum and brass specimens obtained from Model 2140 of the SLAM system

### I. 서 론

정밀부품 산업이 더욱 발전함에 따라 제품에 대한 표면 및 내부에 대한 영상정보를 실시간에 얻어 분석할 수 있는 실시간 시스템이 요구된다.

Kesser에 의해 개발된 SLAM(Scanning Laser

Acoustic Microscope) 시스템은 고속 주사장치로 AOM와 갈바노미터를 이용하여 실시간 영상처리할 수 있는 대표적인 검사장비이다<sup>1,2)</sup>. SLAM 시스템은 음향파의 투과모드를 이용하여 시료를 투과한 음향파 에너지를 레이저로 구성된 광검출기로 수신한 후 영상처리함으로써 시료내부의 감쇠 특성에 따른 그림자영상을 얻는다. 또한 입사파의 기준신호

\* 정보통신시스템 연구조합(hkh11@netian.com)

\*\* 신성대학 정보통신과(kimbs@shinsung.ac.kr)

논문번호: 99040-1001

접수일자: 1999년 10월 1일

와 시료를 통과하여 전파하는 매질의 전파속도 차이에 의한 간섭패턴으로부터 간섭영상도 실시간에 얻을 수 있다. 따라서 간섭영상으로부터 시료를 통과하는 매질의 분포 및 구조적 변화에 관한 정보를 정성적으로 분석할 수 있다. 매질에서 전파속도는 탄성, 밀도 및 점탄성 계수에 영향을 받으므로 간섭영상은 시료내부나 다른 매질들로부터 부분적인 탄성구조 변화를 나타낸다. 한편, 시료에 대한 더욱 정확한 분석을 위해서는 매질의 전파속도를 정량적으로 결정할 수 있는 방법이 필요하다<sup>3,4)</sup>.

본 연구에서는 SLAM 시스템의 간섭영상으로부터 매질에 대한 전파속도를 정량적으로 결정할 수 있는 방법을 제시하고자 한다. 이를 위하여 매질을 통과하는 음향파에 대한 기하학적 구조로부터 간섭영상의 라인천이와 Snell 법칙을 이용하여 매질에 대한 전파속도를 정량적 측정할 수 있는 단일 주파수를 이용한 결정법과 이중 주파수 결정법에 대한 관계식을 유도한다. 또한 SLAM 시스템 이용한 실험을 통하여 얻은 알루미늄과 황동 매질의 시료에 대한 간섭영상으로부터 라인천이를 결정하고 이중 주파수 관계식을 이용하여 매질에 대한 전파속도를 정량적으로 결정한다.

## II. 간섭영상의 전파속도 결정

음향파를 이용한 간섭영상은 전기적인 기준신호와 매질을 전파하는 음향파의 간섭현상에 의해 밝고 어두운 수직라인을 나타낸다. 입사된 음향파는 매질의 전파속도에 따라 위상이 달라지므로 시료내부의 구조적 변화나 다른 매질로 구성된 영역에서 간섭영상의 수직라인은 천이된다. 따라서 본 절에서는 간섭영상으로부터 라인천이를 결정하여 매질에 대한 전파속도를 정량적으로 측정할 수 있는 단일 및 이중 주파수를 이용한 결정 방법을 제안하고자 한다.

### 2-1. 단일 주파수 결정법

연속적인 음향파를 일정한 모양의 균일한 매질에 입사시키면 전파하는 음향파의 위상면은 동위상면을 가지므로 등 간격의 수직라인을 갖는 간섭영상을 나타낸다.

그림 1은 물 속에 위치한 일정한 모양의 균일한 매질을 갖는 시료에 단일 주파수의 연속적인 음향파를 입사시키는 경우, 기준매질인 물의 전파속도와 시료에 대한 매질의 전파속도 차이에 의한 동위상

면을 나타낸 간섭영상과 입사파에 대한 다른 두 매질의 경계면에서 모드변환을 나타낸 기하학적 구조이다<sup>6)</sup>.

그림 1의 간섭영상에서 위 부분은 기준매질에 대한 영역이고 아래 부분은 시료 영역으로 두 매질의 경계면에서 간섭라인이 천이됨을 나타낸다. 물에서 입사되는 음향파는 물과 시료의 경계면에서 굴절되므로 Snell 법칙을 이용한 다음 식으로부터 굴절각을 구할 수 있다.

$$\theta_S = \sin^{-1} \left[ \frac{C_S}{C_0} \sin \theta_0 \right] \quad (1)$$

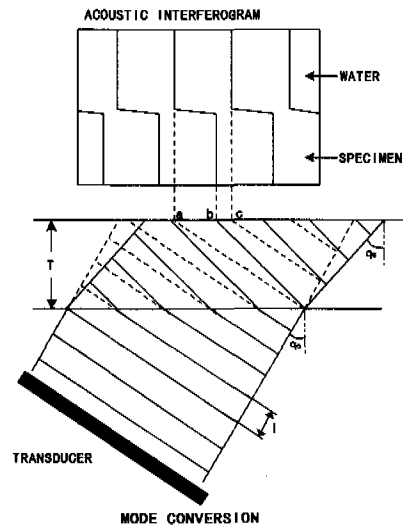


그림 1. 모드변환의 간섭패턴

그림 1의 입사파에 대한 모드변환에서 두께가  $T$  인 시료 영역에서 실선은 굴절된 파의 동위상면을 나타내며, 점선은 입사파의 동위상면을 나타낸다. 간섭영상에서 입사파가 기준매질인 물을 전파하여 나타내는 수직라인 등 간격  $\overline{ac}$  은 다음 식과 같이 구할 수 있다.

$$\overline{ac} = \frac{\lambda_0}{\sin \theta_0} = \frac{\lambda_S}{\sin \theta_S} \quad (2)$$

여기서  $\lambda_0$ 와  $\lambda_S$ 는 각각 물과 시료에 대한 파장이고,  $\theta_0$ 와  $\theta_S$ 는 각각 입사각과 굴절각이다. 위 식을 전파속도와 동작주파수에 관계식으로 다시 나타내면 다음 식과 같다.

$$\overline{ac} = \frac{C_0}{f \sin \theta_0} = \frac{C_S}{f \sin \theta_S} \quad (3)$$

여기서  $j$ 는 입사파의 동작주파수이고,  $C_0$ 와  $C_s$ 는 각각 기준매질과 시료에 대한 전파속도이다.

간섭영상의 수직라인은 매질에 관계없이 입사파의 파장에 관계되므로 등 간격을 나타낸다. 음향파는 매질의 특성에 따라 고유한 전파속도를 가지므로 시료의 배면에 전파된 입사파에 대한 동위상면은 각각 다른 매질의 시료와 물을 통과한 후 다른 동위상면을 갖는다. 그러므로 서로 다른 매질의 경계면에서 간섭영상의 라인은 기준매질의 간섭패턴과 다르게 친이된다.

그림 1에서 시료 배면에 입사된 입사파는 각각 기준매질인 물의 윗면에서 a점과 시료의 윗면인 b점에 도달된다. 기준매질과 시료에 대한 라인변위  $\overline{ab}$ 는 삼각함수를 이용하여 다음 식과 같이 유도할 수 있다.

$$\overline{ab} = T (\cot \theta_s - \cot \theta_0) \quad (4)$$

낮은 동작주파수를 사용하거나 매질의 전파속도가 기준매질에 비해 상대적으로 크게 빠르지 않을 경우, 그림 1에서와 같이 간섭영상에 대한 동위상면의 등간격  $\overline{ac}$ 와 라인변위  $\overline{ab}$ 에 대한 결정이 용이하므로 단일 주파수만을 이용하여 전체 라인천이  $N$ 를 쉽게 얻을 수 있다.

단일 주파수에 대한 간섭영상의 전체 라인천이  $N$ 는  $\overline{ac}$ 와  $\overline{ab}$ 의 관계로 다음식과 같이 일반화하였다.

$$N = \frac{\overline{ab}}{\overline{ac}} = \frac{f T \sin \theta_0 (\cot \theta_s - \cot \theta_0)}{C_0} \quad (5)$$

그러므로 매질에 대한 전파속도  $C_s$ 는 위 식(5)를 식(1)에 대입하여 다음 식과 같이 유도할 수 있다.

$$C_s = \frac{C_0 \sin \left( \tan^{-1} \left[ \frac{f T \sin \theta_0}{f T \sin \theta_0 \cot \theta_0 + N C_0} \right] \right)}{\sin \theta_0} \quad (6)$$

음향파의 단일 주파수를 사용하여 획득한 간섭영상으로부터 전체 라인천이를 결정한 후 Snell 법칙을 이용한 위의 관계식을 이용함으로써 매질에 대한 전파속도를 정량적으로 측정할 수 있다.

표 1은 몇 가지 매질에 대하여 위의 단일 주파수 관계식을 이용하여 구한 이론치이다. 조건은 두께가 1mm인 시료에 10MHz 동작주파수를 갖는 단일 음향파를 10°로 사각 입사시킨 경우이다.

표 1. 단일 주파수의 이론치

매질	굴절각 $\theta_s$	변위 $\overline{ab}$	라인천이 $N$	전파속도 $C_s$
Al	48.0°	4.80mm	5.52	6420% <sub>s</sub>
Brass	33.0°	4.10mm	4.78	4700% <sub>s</sub>
Acryl	18.9°	2.75mm	3.18	2800% <sub>s</sub>

### 2-2. 이중 주파수 결정법

실제적인 응용에서는 대부분 시료가 기준매질에 비해 상대적으로 빠른 전파속도를 갖거나 높은 동작주파수를 사용하므로 간섭영상에서 시료에 대한 라인천이는 기준매질의 수직라인에 대해 크게 친이된다. 그러므로 전체 라인천이  $N$ 를 결정하기는 어렵다. 따라서 본 절에서는 이중 동작주파수를 이용하여 간섭영상의 라인천이 차를 결정한 후 이를 이용하여 매질에 대한 전파속도를 정량적으로 결정하는 방법을 제시하고 이에 대한 관계식을 유도한다.

부분 라인천이  $n$ 는 다음과 같은 관계식을 갖는다.

$$n = N - l \quad (7)$$

여기서  $l$ 는 시료내에서 친이된 라인의 정수이다.

그림 2는 시료의 두께가 같은 그림 1과 동일한 조건에서 단지 높은 동작주파수를 사용한 경우에 대한 간섭영상과 모드변환을 나타낸 구조이다. 시료에 대한 라인변위  $\overline{ab}$ 는 기준매질에 대한 라인간격  $\overline{ac}$ 에 비해 크게 친이된다. 동작주파수를 변화시킴에 따라 간섭라인은 다른 간격비를 가지므로 다른 두 주파수에 의한 전체 라인천이의 차  $dN$ 은 다음식과 같이 나타낼 수 있다.

$$dN = (N_2 - N_1) = \frac{(f_2 - f_1) T \sin \theta_0 (\cot \theta_s - \cot \theta_0)}{C_0} \quad (8)$$

따라서 식(8)을 이용하여 매질에 대한 전파속도를 구하는 이중 주파수 관계식은 식(5)로부터 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_s = \frac{C_0 \sin \left( \tan^{-1} \left[ \frac{df T \sin \theta_0}{df T \sin \theta_0 \cot \theta_0 + dN C_0} \right] \right)}{\sin \theta_0} \quad (9)$$

여기서  $df = (f_2 - f_1)$ 로 사용하는 동작주파수의 차이다.

이중 주파수에 대한 각각의 전체 라인천이는 부

분 라인천이 식(7)으로부터  $N_1 = I_1 + n_1$ 와  $N_2 = I_2 + n_2$  관계식을 가지므로 라인천이의 차  $dN$ 은 다음 식으로부터 결정할 수 있다.

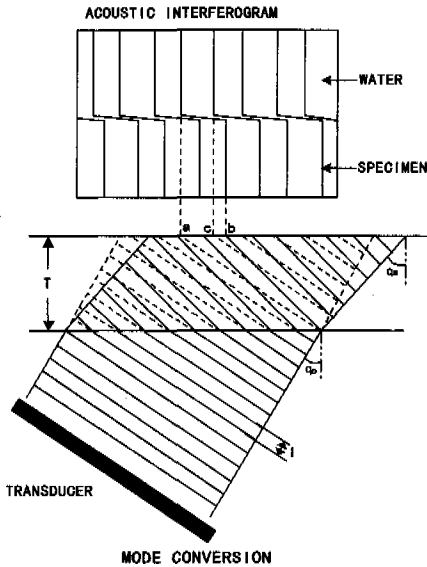


그림 2. 높은 주파수의 간섭패턴

$$dN = (I_2 - I_1) + (n_2 - n_1) \quad (10)$$

이중 동작주파수를 이용하여 라인천이 차를 결정 한 후 매질에 대한 전파속도를 정량적으로 측정할 수 있는 이중 주파수 관계식을 유도하였다. 표 2는 매질의 두께가 1mm이고 입사각이 10°인 조건에 대하여 이중 주파수 관계식을 이용하여 구한 이론치이다

표 2. 이중 주파수의 이론치

매질	굴절각 $\theta_s$	라인천이		천이 차 $dN$	전파속도 $C_s$
		$N_1$	$N_2$		
		9.5MHz	10.5MHz		
Al	48.0°	5.25	5.80	0.55	6420%
Brass	33.0°	4.54	5.02	0.48	4700%
Acryl	18.9°	3.02	3.34	0.32	2800%

### III. 실험결과 및 고찰

본 절에서는 이중 주파수를 이용한 실험을 통하여 획득한 SLAM 시스템의 간섭영상으로부터 라인 천이 차를 결정한 후 유도한 이중 주파수 관계식(8)

을 이용하여 알루미늄과 황동 매질에 대한 전파속도를 정량적으로 측정하였다.

본 실험에서는 SONOSCAN사의 SLAM 시스템 Model 2140을 사용하였으며 시스템에 대한 블록선도는 그림 3과 같다. SLAM 시스템은 그림 3과 같이 투과모드로 동작된 음향파의 에너지에 의해 시료 위에 위치한 커버슬립(Coverslip)의 배면에 표면 변위를 발생시킨다. 검출부의 레이저, 나이프-에지(Knife-Edge) 그리고 포토다이오드로 구성된 광학장치를 이용하여 표면변위에 대한 정보를 가시화함으로써 시료내부에 대한 영상정보를 획득할 수 있는 대표적인 실시간 시스템이다. 또한 간섭모드를 이용하여 입사파의 기준신호와 시료를 투과하는 음향파 에너지의 속도차로부터 실시간에 간섭영상도 얻을 수 있다. 이 시스템은 중심주파수가 10MHz, 30MHz 그리고 100MHz인 초음파변환기를 사용할 수 있으며, 중심주파수의 가까운 범위 내에서 동작주파수를 가변시킬 수 있다. 실험을 위하여 시료는 알루미늄과 황동을 평면판 모양으로 가공하였다. 기준매질은 매칭물질로 널리 이용되는 물을 사용하였다.

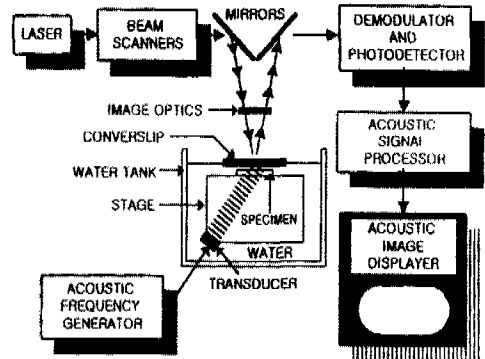


그림 3. SLAM 시스템의 블록선도

본 실험에서는 중심주파수가 10MHz인 평면형 초음파변환기를 사용하여 동작주파수를 각각 9.5MHz와 10.5MHz로 미세 조절하여 시료에 평면파를 입사시켰다. 입사파 각도는 시료면의 법선축에 대해 10°로 사각 입사시켜 종파를 여기시켰다.

그림 4는 SLAM 시스템을 사용한 실험을 통하여 얻은 황동에 대한 SLAM 간섭영상이다.

실험을 통하여 얻은 SLAM 간섭영상으로부터 두께가 1.0mm와 2.0mm인 알루미늄의 라인천이 차는 각각  $dN=0.53$ 와  $dN=1.08$ 를 얻었으며 황동의 1.0mm, 2.0mm에 대한 라인천이 차는 각각  $dN=0.46$ ,  $dN=0.93$ 을 얻었다.

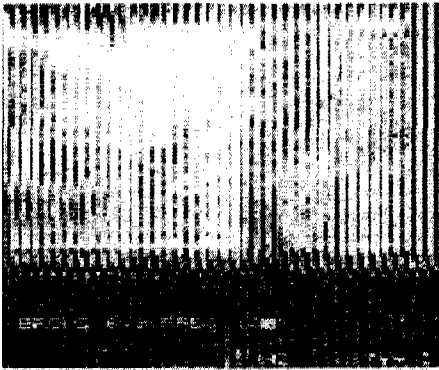


그림 4. 황동의 SLAM 간섭영상

이를 이중 주파수를 이용한 매질의 전파속도 관계식에 대입하여 각 시료의 매질에 대한 전파속도를 측정된 결과, 두께가 1.0mm와 2.0mm인 알루미늄 시료에 대해서는 각각 5932%와 6088%의 전파속도를 얻었으며, 두께가 1.0mm와 2.0mm인 황동 시료에 대한 전파속도는 각각 4434%와 4477%의 실험치를 얻었다.

표 3. 매질의 전파속도 실험치

매질	두께 $T$	천이 차 $dN$	전파속도 $C_s$	오차율
Al	1.0mm	0.53	5932%	7.6 %
	2.0mm	1.08	6088%	5.2 %
Brass	1.0mm	0.46	4434%	5.7 %
	2.0mm	0.93	4477%	4.8 %

표 3에서 보는 바와 같이 알루미늄과 황동 매질의 시료에 대한 SLAM 간섭영상의 라인천이를 이용하여 측정된 전파속도는 각각 알루미늄의 종파속도 6420%와 황동의 종파속도 4700%에 대하여 8% 이내의 오차를 갖는 실험치를 얻었다. 측정 오차를 개선시키기 위한 방법으로는 높은 동작주파수를 사용한 실험을 통하여 더욱 정확한 결과치를 얻을 수 있을 것이다.

#### IV. 결론

본 연구에서는 SLAM 간섭영상으로부터 매질에 대한 전파속도를 정량적으로 결정할 수 있는 방법에 관하여 연구하였다.

매질을 투과하는 음향파에 대한 모드변환의 기하학적 구조와 Snell 법칙으로부터 간섭영상의 전체

라인천이와 부분 라인천이를 이용한 라인천이 차로부터 매질에 대한 전파속도를 정량적 측정할 수 있는 단일 주파수 및 이중 주파수 결정방법에 대한 관계식을 각각 유도하였다. SLAM 시스템 Model 2140을 이용한 실험을 통하여 알루미늄과 황동 매질의 시료에 대한 간섭영상을 획득하여 라인천이차를 결정한 후 이중 주파수 관계식을 이용하여 매질의 전파속도를 측정된 결과, 8% 이내의 오차율을 갖는 실험치를 얻을 수 있었다.

본 연구의 SLAM 간섭영상의 라인천이를 이용하여 매질의 전파속도를 정량적으로 결정함으로써 의료, 반도체 및 정밀 산업분야 등에서 세포조직 검사, 비파괴 검사 그리고 재료분석을 위하여 이용될 수 있으리라 기대된다.

#### 참고 문헌

- [1] L.W.Kessler, "Tissue Charaterization by Means of Acoustic Microscopy", Proc. of Seminar on Ultrasonic Tissue Characterization at NBS, Gaithersburg, MD, May 28-30, 1975, NBS, Spec. Publ. 453(Issued Oct, 1976)
- [2] L. W. Kessler, and D. E. Yuhas, "Acoustic Microscopy -1979", Proc. of IEEE, Vol. 67, No. 4, pp. 526-536, April 1979.
- [3] S. A. Gross and W. D. O'Brien, Jr., "Direct Ultrasonic Velocity Measurements of Mammalian Collagen Threads", J. Acou. Soc. Am. 65(2), Feb. 1979, pp. 507-511
- [4] W. D. O'Brien, J. Olerud, K. K Shung and J, M. Reid, "Quantitative Acoustical Assessment of Wound Maturation with Acoustic Microscopy", J. Acoust, Soc. Am., 69(2), Feb., 1981, pp, 575-579.
- [5] S. Lees, J. D. Heeley, J. M. Ahern and M. G. Oravccz, "Axial Phase Velocity in Rat Tail Tendon Fibers at 100MHz by Ultrasonic Microscopy", IEEE Trans. on Sonic and Ultrasonics 30(2), March 1983, pp. 85-90.
- [6] 송대건, 황기환, 신진섭, 전계석, "간섭영상을 이용한 매질속도 결정법", 한국음향학회 학술 발표회 논문집, Vol. 16, No. 2(s), 1997. pp. 171-174

**황 기 환(Ki-Hwan Hwang)**

1991년 2월 : 경희대학교 물리학과(이학사)  
1993년 2월 : 경희대학교 전자공학과(공학석사)  
1999년 2월 : 경희대학교 전자공학과(공학박사)  
현재 : 정보통신시스템 연구조합(선임연구원)  
<주관심 분야> 토모그래피 영상시스템, 광-음향 신호  
및 영상처리, 마이크로파 회로설계

**김 병 수(Boung-Su Kim)**

1993년 2월 : 경희대학교 전자공학과 졸업(공학사)  
1995년 2월 : 경희대학교 전자공학과 졸업(공학석사)  
1997년 2월 : 경희대학교 일반대학원 전자공학과 박사  
사과정 수료  
1998년 2월~현재 : 신성대학 정보통신과 교수  
<주관심 분야> 전자파 해석, 전파 전파특성, 마이크로  
파 회로 설계