

SLAM 영상을 이용한 크랙 깊이 측정

The Measurement of the Depth of Crack using Images of SLAM

황 기 환*, 전 계 석*
(Ki-Hwan Hwang*, Kye-Suk Jun*)

※이 논문은 1996-1997년도 한국과학재단 핵심연구과제 연구비 지원에 의해 연구되었음

요 약

본 논문에서는 SLAM(Scanning Laser Acoustic Microscope) 시스템을 이용하여 고체 내부에 발생한 크랙의 깊이를 측정하는 방법을 연구하였다. SLAM 시스템은 초음파의 투과계수에 따른 그림자 영상을 재생시키므로 크랙 깊이에 대한 정확한 측정방법이 요구된다. 이를 위하여 시료에 초음파를 사각으로 입사시켜 얻은 SLAM 영상의 그림자영역과 시료내의 초음파 모드 변환에 대한 기하학적 구조를 이용하여 크랙의 깊이를 측정할 수 있는 방법을 제안하고 실험을 통하여 확인하였다. 실험을 위하여 알루미늄에 서로 다른 깊이로 수직형 라인-크랙의 결함을 갖는 시료를 가공하였고 시료에 초음파를 사각 입사시키기 위하여 20° 각도로 웨지를 제작하였다.

실험 결과, 크랙의 깊이가 증가할수록 SLAM 영상의 그림자 영역이 비례적으로 증가함을 보였고, 결함의 깊이에 대한 측정치와 실제치를 비교한 결과 약 6% 이하의 측정오차를 보였다.

ABSTRACT

In this paper, we studied the configuration and depth measurement method of the crack in the interior of solid with scanning laser acoustic microscope. Precision measurement method of crack depth is required in SLAM because that system reconstructs the shadow image to the transmission coefficient. We proposed this method that used geometrical structure to the shadow area of SLAM images obtained from oblique incidence and the mode conversion of ultrasound in specimen and then experimented it. For this experiment, we fabricated various specimens which had the vertical line-crack with different depth and made the wedge as 20° for oblique incidence. Experimental results showed that the shadow area of SLAM images were proportional to the depth of crack. Measured depth error to the crack was less than 6% compared with practical crack depth.

I. 서 론

산업기술이 발전함에 따라 반도체 및 정밀부품 산업분야 등에서 생산되는 제품에 대한 수요가 증가하고 있다. 이들 생산품에 대한 품질관리와 신뢰성을 높이기 위하여 소자내부에 존재하는 미소결함을 검출할 수 있는 비파괴 검사장비에 대한 필요성이 더욱 요구되어진다. 초음파를 이용한 비파괴 검사장비는 초음파현미경(Scanning Acoustic Microscope), 광-음향현미경(Photo-Acoustic Microscope), SLAM(Scanning Laser Acoustic Microscope) 등이 있으며, 현재 SAM과 SLAM은 상용화되어 반도체, 금속, 세라믹 등의 비파괴 검사장비로 널리 사용되고 있다[1, 2].

SLAM은 음향-광 효과를 이용하여 실시간에 영상을 얻을 수 있는 큰 장점을 가진 비파괴 검사장비로써 1970년대 중반에 Kessler에 의해 개발되었으며 투과모드로 동작된다[3, 4]. SAM 시스템은 반사모드로 동작하여 영상을 얻으므로써 고체 내부에 존재하는 결함에 대한 평면정보는 좋은 분해능으로 측정할 수 있으나, 결함의 깊이를 결정하기 위해서는 반복적인 실험을 통해 여러 영상을 비교해야 하는 단점을 갖는다. SLAM 시스템은 투과모드로 동작된 초음파정보에 대한 그림자 영상을 재생시키므로 결함에 대한 깊이를 정확하게 정량적으로 측정할 수 없다. 그러므로 고체내부에 발생한 결함에 대한 깊이를 정량적으로 측정할 수 있는 방법이 요구된다.

본 연구에서는 SLAM 시스템을 이용하여 시료에 초음파를 사각으로 입사시켜 얻은 SLAM 영상의 그림자 영역과 시료를 투과하는 초음파 모드변환의 관계를 이용한

*경희대학교 전자공학과
접수일자: 1997년 1월 10일

기하학적 구조로부터 결함의 깊이를 정량적으로 측정할 수 있는 방법을 제안하였다. 실험을 위하여 알루미늄에 서로 다른 깊이로 수직형 라인-크랙을 가공하였고, 초음파를 사각으로 입사시킬 수 있는 웨지를 제작하였다. 실험에서는 중심주파수가 10MHz인 초음파를 20°로 사각 입사시켜 실시간에 SLAM 영상을 얻었으며, 이에 대한 그림자영역과 본 연구에서 제안한 기하학적 구조를 이용하여 크랙의 깊이를 측정하였다.

II. SLAM 시스템의 신호검출

SLAM 시스템은 그림 1과 같이 투과모드로 동작된 초음파에 의하여 시료 위에 위치한 커버슬립의 배면에 표면 변위를 일으킨다. 레이저, 나이프-에지 및 광다이오드로 구성된 광학장치를 이용하여 초음파 투과계수에 따른 표면 변위에 대한 정보를 가시화함으로써 시료 내부에 대한 초음파 정보를 얻는다.

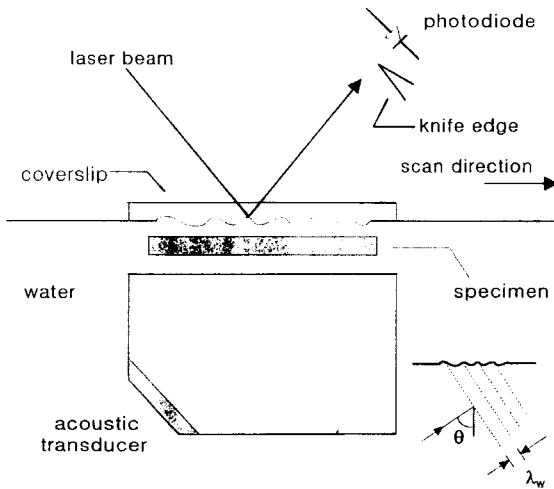


그림 1. SLAM 시스템의 데이터 획득
Fig. 1. Data acquisition of the SLAM

커버슬립에 발생하는 표면 변위의 크기는 초음파성분의 세기에 비례하므로 시스템에서 사료가 없는 경우 표면 변위 $d_0(t, x)$ 는 다음 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$d_0(t, x) = C \cos(\omega_s t - 2\pi f_x x) \tag{1}$$

여기서 C는 초음파변환기에서 발생한 초음파성분의 세기에 대한 비례상수이며, ω_s 는 초음파의 각주파수 그리고 $f_x = \sin(\theta)/\lambda_w$ 는 표면 리플의 공간주파수이다. 시스템에 사료가 존재할 때 표면 변위 $d_s(t, x)$ 는 다음 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$d_s(t, x) = A(x) \cos(\omega_s t - 2\pi f_x x + \varphi(x)) \tag{2}$$

여기서 $A(x)$ 와 $\varphi(x)$ 는 각각 시료의 초음파 특성에 의한 표면 변위의 진폭과 위상변조를 나타내며, 이들 성분은 전류로 검출되어 시료에 대한 초음파 특성으로 영상의 콘트라스트를 만든다.

광다이오드에 검출되는 레이저 빔의 광은 리플의 크기에 비례하는 표면 변위의 경사와 주기적인 상하운동에 의해 변한다. 커버슬립의 임의의 점 x_0 에 레이저 빔을 초점시키면, 광다이오드에 수신되는 전류 $I_p(t, x_0)$ 의 변화는 표면 변위의 경사에 비례하므로 다음 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$I_p(t, x_0) \approx \alpha d'_s(t, x_0) = \alpha \left. \frac{\partial d_s(t, x_0)}{\partial x} \right|_{x=x_0} \tag{3}$$

여기서 \approx 는 상하운동을 무시한 근사치로 표시한 것이고, α 는 광다이오드의 비례상수이다. 광다이오드의 전류 변화는 식(2)를 식(3)에 대입하여 다음 식(4)와 같이 구할 수 있다.

$$I_p(t, x_0) = \alpha \{ A'(x_0) \cos(\omega_s t - 2\pi f_x x_0 + \varphi(x_0)) + A(x_0) [2\pi f_x - \varphi'(x_0)] \sin(\omega_s t - 2\pi f_x x_0 + \varphi(x_0)) \} \tag{4}$$

여기서 $A'(x_0)$ 와 $\varphi'(x_0)$ 는 각각 $x=x_0$ 에서 $A(x)$, $\varphi(x)$ 의 도함수이다. 시료에서 파의 산란성분이 미세한 경우, 식(4)에서 우변항은 일반적으로 $2\pi f_x \gg \varphi'(x_0)$ 이고, 표면 변위의 크기가 약 수Å이므로 이에 대한 미분 $A'(x_0)$ 은 진폭항 $2\pi f_x A(x_0)$ 보다 매우 작다. 따라서 식(4)을 다음 식(5)와 같이 간략하게 나타낼 수 있다.

$$I_p(t, x_0) \approx \alpha 2\pi f_x A(x_0) \sin(\omega_s t - 2\pi f_x x_0 + \varphi(x_0)) \tag{5}$$

레이저 빔은 커버슬립의 표면을 스캔하므로 스캐닝 효과는 시간함수 $x_0 = vt_0$ 로 나타낼 수 있다. v 는 스캐닝 속도이다. 식(5)를 시간함수로 표현하면 다음 식(6)과 같다.

$$I_p(t, x_0) \approx \alpha 2\pi f_x A(vt_0) \sin((\omega_s - \omega_d)t_0 + \varphi(vt_0)) \tag{6}$$

여기서 $\omega_d = 2\pi f_x v$ 는 레이저 빔의 스캔에 의한 도플러 천이이다.

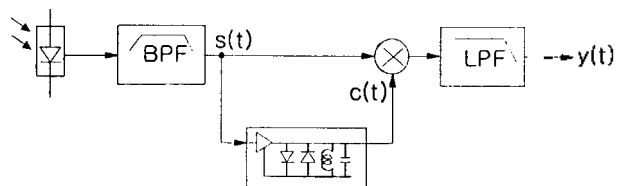


그림 2. SLAM 수신기의 블록신도
Fig. 2. Block diagram of SLAM receiver

그림 2와 같이 SLAM 시스템은 진폭모드를 영상정보로 얻는다. 블록선도에서 대역 필터를 통과한 도플러 천이된 주파수 신호는 다음 식(7)과 같다.

$$s(t) = K_s B(vt) \cos((w_s - w_d)t + \psi(vt)) \quad (7)$$

여기서 K_s 는 광다이오드의 비례상수, 대역 필터, 멀티플라이어 그리고 저역 필터의 이득을 합친 상수항이다. 도플러 천이된 주파수 신호는 제한 증폭기에 의해 증폭된다. 진폭 정보는 $s(t)$ 와 제한 증폭신호 $c(t) = k_1 \cos((w_s - w_d)t + \psi(vt))$ 의 곱으로 다음 식(8)과 같다.

$$\begin{aligned} s(t)c(t) &= K_s B(vt) \cos((w_s - w_d)t + \psi(vt)) k_1 \cos((w_s - w_d)t + \psi(vt)) \\ &= \frac{K_s k_1}{2} B(vt) \{1 + \cos(2(w_s - w_d)t + 2\psi(vt))\} \end{aligned} \quad (8)$$

그러므로 저역 필터를 통과한 출력은 다음 식(9)와 같다.

$$y(t) = \frac{K_s k_1}{2} B(vt) \quad (9)$$

시간함수의 신호를 공간함수의 신호로 역변환시키므로써 얻고자하는 진폭정보인 출력신호는 다음 식(10)과 같이 구할 수 있다.

$$y(x) = \frac{K_s k_1}{2} B(x) \quad (10)$$

III. 크랙 깊이 측정

시료에 초음파를 사각으로 입사시켜 얻은 SLAM 영상의 그림자 영역과 시료내에서 초음파의 모드 변환에 대한 기하학적 구조를 이용하여 시료 내부에 발생한 크랙의 깊이를 측정할 수 있는 방법을 제안한다.

그림 1과 같은 SLAM 시스템에서 초음파를 시료 아래의 물에서 시료로 사각 입사시킬 경우, 시료의 특성인 때

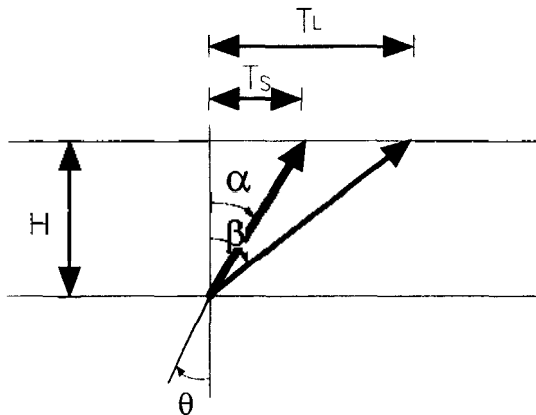


그림 3. 초음파 모드변환의 기하학적 구조
Fig. 3. A geometrical structure of acoustic mode conversion

질의 전파속도에 따라 시료 내부에서 초음파의 투과각도가 달라진다. 그러므로 시료 내부에서 초음파 모드 변환에 대한 기하학적 구조를 그림 3과 같이 도식화 할 수 있다.

시료 내부에서 모드 변환 즉, 입사각도에 따른 투과각도의 관계는 Snell의 법칙을 이용하여 다음 식(11)과 같이 유도할 수 있다.

$$\alpha = \sin^{-1} \left(\frac{C_s}{C_w} \sin \theta \right), \beta = \sin^{-1} \left(\frac{C_L}{C_w} \sin \theta \right) \quad (11)$$

여기서 α 와 β 는 각각 횡파와 종파에 대한 투과각이다. C_w 는 물에서 초음파의 속도이고, C_s 와 C_L 는 시료에서 종파, 횡파속도이다. 물에서의 초음파 속도는 1500m/s이고, 알루미늄과 스틸에 대한 횡파와 종파속도는 각각 3040 m/s, 6420m/s와 3200m/s, 5900m/s이다. 알루미늄과 스틸에 초음파를 입사각도 10°와 20°로 사각 입사시킬 경우, 이에 대한 투과각도는 표 1과 같이 구할 수 있다.

표 1. 알루미늄과 스틸의 투과각도
Table 1. Transmission angles of the Al, steel

입사각	시료	횡파투과각	종파투과각
10°	Al	20.60	48.01
	Steel	21.74	43.08
20°	Al	43.88	*
	steel	46.86	*

한편, 그림 4는 입사각도에 대한 반사계수와 투과계수의 크기를 나타낸 것이다[5]. 종파에 대한 임계각은 약 13°이므로 초음파를 20°로 물에서 시료로 사각 입사시킬 경우, 전반사되어 투과되는 종파의 성분은 존재하지 않는다.

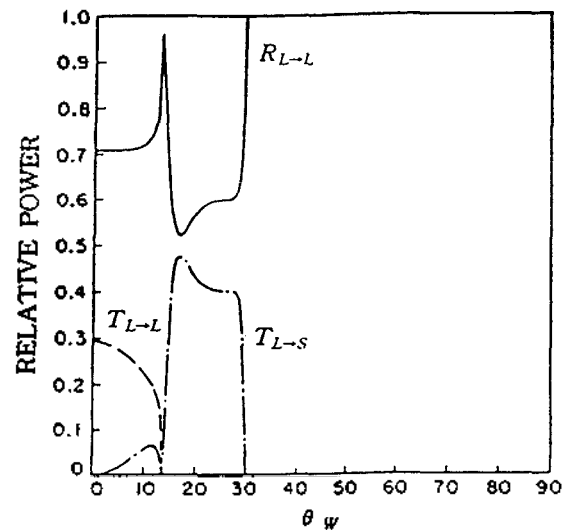


그림 4. 입사각도에 대한 투과계수와 반사계수
Fig. 4. Transmission and reflection coefficients to the incidence angle

IC를 비롯한 정밀소자 등에서 발생하는 결함은 대부분 수직으로 성장된 라인형태의 크랙구조를 갖는다. 그림 5는 수직형 라인-크랙의 그림자 영역을 갖는 시료에 투과모드로 동작된 초음파성분의 그림자 영역을 나타낸다. 모드변환에 의해 굴절된 초음파성분이 결함영역을 통과할 때 전파성분은 투과율에 따른 에너지분포를 가지므로 어두운 그림자 영역을 나타낸다.

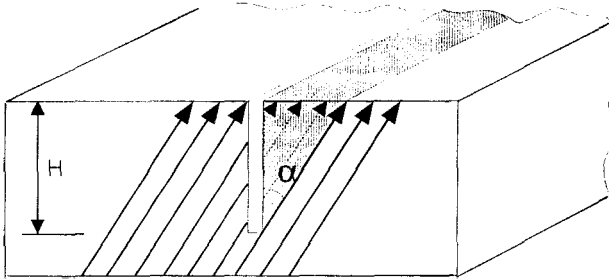


그림 5. 수직형 라인-크랙의 그림자 영역
Fig. 5. A shadow area to the vertical line-crack

그림 5에서 그림자 영역의 폭과 투과각도의 관계를 이용하여 크랙의 깊이를 측정하는 관계식을 다음 식(12)와 같이 유도하였다.

$$H = \frac{T_S}{\tan \alpha} = \frac{T_L}{\tan \beta} \quad (12)$$

여기서 H 는 크랙의 깊이이고, T_S 와 T_L 은 횡파, 종파성분에 대한 그림자 영역의 폭이다.

한편, 그림 1에서 처럼 시료 내부를 투과한 초음파 성분은 다시 물로 전파되어 커버슬립에 도달되므로 정확한 깊이를 측정하기 위해서는 시료에서 물로 굴절된 각도까지 고려해서 그림자 영역을 구해야 한다. 그러나 SLAM 시스템을 이용하는 실험에서는 커버슬립을 시료 위에 최

표 2. 크랙 깊이에 대한 그림자 영역의 폭
Table 2. Widths of shadow area to the crack depth

입사각	시료	결합 깊이 (mm)	그림자 폭	
			T_S (mm)	T_L (mm)
10°		2.0	0.75	2.22
		4.0	1.50	4.44
	Steel	2.0	0.80	1.87
		4.0	1.60	3.74
20°	Al	2.0	1.92	*
		4.0	3.85	*
	Steel	2.0	2.13	*
		4.0	4.27	*

대로 가깝게 접근시켜 SLAM 영상을 얻기 때문에 이를 무시할 수 있다.

식(12)를 이용하여 알루미늄과 스틸의 크랙 깊이에 대한 그림자 영역의 폭을 표 2와 같이 구할 수 있다.

표 2에서 나타난 바와 같이 크랙의 깊이가 증가함에 따라 그림자 영역의 폭이 비례적으로 증가함을 알 수 있다. 초음파를 사각으로 입사시켜 얻은 SLAM 영상의 그림자 영역의 폭과 시료내의 초음파 모드변환에 대한 기하학적 구조를 이용하여 시료 내부에 존재하는 결함의 깊이를 정량적으로 측정할 수 있는 것이다.

IV. 실험 및 고찰

SLAM 시스템을 이용하여 시료 내부에 존재하는 결함의 형태와 깊이를 정량적으로 측정하기 위해, 시료에 초음파를 사각으로 입사시킬 수 있는 20° 각도의 웨지를 제작하였으며, 시료는 크기가 70×30×4mm인 3개의 알루미늄판에 결함의 폭을 0.5mm로 동일하게 하고 결함의 깊이를 각각 1mm, 2mm, 3mm가 되게 그림 6과 같은 수직형 라인-크랙을 가공하였다.

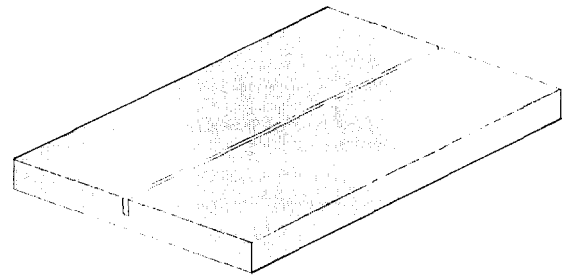


그림 6. 수직형 라인-크랙을 갖는 시료
Fig. 6. Specimen with the vertical line-crack

실험에서는 중심주파수가 10MHz인 평면형 초음파변환기를 사용하여 여기시킨 평면파를 시료배면의 법선축으로부터 20° 각도로 시료아래의 물에서 시료로 연속으로 사각 입사시켰다.

그림 7은 실험에 이용한 모델 2140 SLAM 시스템에 대한 블록선도이다. ULTRASONIC DRIVER에서 발생된 전기적인 정현파신호를 수조내의 시료 아래에 고정된 초음파변환기에 인가시켜 연속적인 초음파를 여기시킨다. 물을 통과한 초음파는 시료를 투과한 후 시료 위에 가깝게 위치한 커버슬립에 전파되어 Gold로 코팅된 배면에 미세한 표면 변위 즉, 리플을 발생시킨다. He-Ne 레이저를 커버슬립의 표면 변위에 사각으로 입사시켜 커버슬립으로부터 반사된 빔을 나이프-에지 뒤에 위치한 광다이오드로 수신하여 전기적인 신호로 변환시킨 후 이를 신호처리하여 비디오 디스플레이장치로 보내지거나, A/D

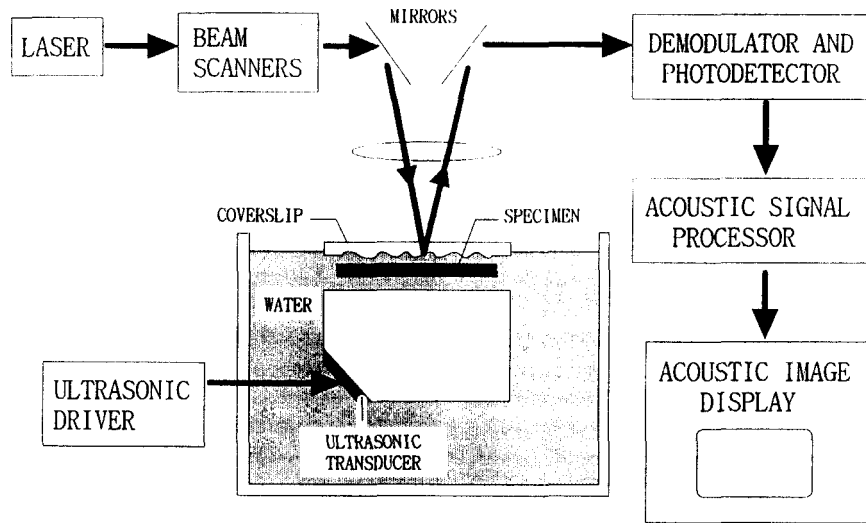


그림 7. SLAM 시스템의 블록선도
Fig. 7. Block diagram of the SLAM system

변환시킨 후 디지털 영상처리하여 SLAM 영상을 얻을 수 있다.

나이프-에지는 표면 변위에 리플이 없는 경우에 커버슬립의 배면으로부터 반사된 빔을 반만 통과되도록 빔을 차단시킨다. 크기가 다른 리플의 경사로부터 반사된 빔은 굴절에 따라 서로 다르게 편향되므로 나이프-에지를 통과하여 광다이오드에 수신되는 빔의 양은 리플의 크기에 비례하는 기울기에 따라 달라진다. 따라서 표면 변위에 대한 미세한 변화를 더욱 정확하게 검출할 수 있다[6, 7].

그림 8은 제작한 웨지를 사용하여 중심주파수가 10MHz 인 초음파변환기를 시료배면에 대해 수직인 법선으로부터 20°가 되게 수조 배면에 고정시킨 후 시료에 연속적으로 평면파를 입사시켜 실시간에 얻은 SLAM 영상이다.

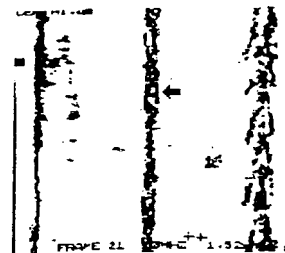
그림 8의 SLAM 영상에서 수직형 라인-크랙에 대한 그림자 영역은 ← 표시된 부분이다. 본 영상에 대한 그림자 영역의 폭과 길이로 라인형 결함임을 알 수 있으며, 크랙의 깊이가 증가함에 따라 그림자 영역의 폭이 비례적으로 넓어짐을 볼 수 있다.

입사각도와 SLAM 영상에 대한 그림자 영역의 폭을 식(11), 식(12)에 대입하여 크랙 깊이를 측정하였고, 이를 실제치와 비교한 결과 표 3과 같이 약 6% 범위내의 측정 오차를 얻었다.

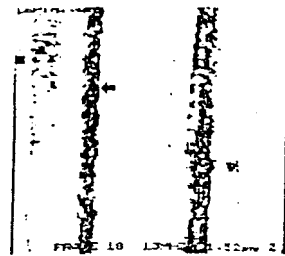
표 3. 크랙 깊이 측정

Table 3. Measurement of the crack depth

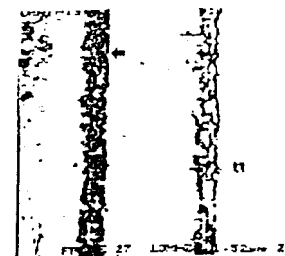
입사각도	크랙 길이(mm)	측정오차(%)
20°	1.0	6.07
	2.0	5.21
	3.0	2.93



(a)



(b)



(c)

그림 8. SLAM 영상 (a) 크랙 깊이 1mm (b) 크랙 깊이 2mm (c) 크랙 깊이 3mm

Fig. 8. Images obtained from SLAM system (a) Crack depth (1mm) (b) Crack depth (2mm) (c) Crack depth (3mm)

V. 결 론

본 논문에서는 SLAM 시스템을 이용하여 고체 내부에 존재하는 크랙의 깊이를 측정하기 위한 방법을 연구하였다. SLAM 시스템은 음향-광 효과를 이용하여 실시간에 영상을 얻을 수 있는 큰 장점을 가진 비파괴 검사장비이나 초음파를 투과모드로 동작시켜 투과계수에 따른 그림자 영상을 재생시키기 때문에 결함의 깊이를 정량적으로 분석할 수 없다. 따라서 이에 대한 정확한 측정방법이 요구된다.

본 연구에서는 초음파를 사각으로 입사시켜 얻은 SLAM 영상의 그림자 영역과 시료 내부를 투과하는 초음파의 모드 변환에 대한 기하학적 구조를 이용하여 결함에 대한 깊이를 정량적으로 측정하는 방법을 제안하였고, 실험을 통하여 크랙의 깊이를 측정한 결과, 크랙의 깊이가 1mm인 시료에 대해서는 약 6% 정도의 측정오차와 크랙 깊이가 2mm와 3mm인 시료에 대해서는 각각 약 5%, 3%의 측정오차를 얻었다. 결함을 더욱 정밀하게 가공한다면 크랙의 깊이에 대한 측정오차를 더욱 줄일 수 있을 것이다. 실험을 통한 분석 결과, 초음파를 사각으로 입사시켜 얻은 SLAM 영상에 대한 그림자 영역의 길이와 폭으로부터 시료 내부에 존재하는 결함의 형태를 파악 할 수 있었고, 입사각도와 그림자 영역의 폭을 이용하여 크랙의 깊이를 정량적으로 측정하였다. 따라서 본 연구에서 제안한 초음파의 사각 입사와 초음파 모드 변환에 대한 기하학적 구조는 고체내부에 발생한 결함의 깊이를 측정하는데 있어 매우 유용한 방법임을 확인하였다.

본 논문의 연구 결과로부터 IC 내부에 발생하는 결함의 형태나 깊이를 측정하는 반도체 산업분야는 물론 다른 정밀 산업분야에도 유용하게 이용되리라 기대된다.

참 고 문 헌

1. G. Wade, "A History of Acoustic Imaging", Acoustical Imaging, Vol. 17, pp. 1-28, 1987.
2. L. W. Kessler and D. E. Yuhas, "Acoustic Microscopy-1979", proc. IEEE, vol. 67, No. 4, pp. 526-536, April 1979.
3. E. M. Tatistcheff, "Evaluation of Plastic Packages for Integrated Circuits using Scanning Laser Microscopy", Acoustical Imaging, Vol. 17, pp. 119-128, 1987.
4. G. Z. Al-Sibakhi, M. G. M. Hussian and M. M. Sadek, "Interaction Between Void Parameters and the Outputs of the Scanning Laser Acoustic Microscope", Acoustical Imaging, Vol. 16, pp. 147-164, 1986.
5. G. S. Kino, Acoustic Waves, Prentice-Hall, Chapter 2, pp. 98-103, 1987.
6. R. L. Whiteman and A. Korpel, "Probing of Acoustic Surface Perturbations by Coherent Light", Applied Optics, Vol. 8, No. 8, pp. 1567-1576, Aug. 1969.
7. L. W. Kessler, "Image with Dynamic-Ripple Diffraction",

Acoustical Imaging, G. Wade, Ed., New York, Plenum, Ch. 10, pp. 229-239, 1976.

▲황 기 환(Ki-Hwan Hwang)



1991년 2월:경희대학교 물리학과(이학사)
 1993년 2월:경희대학교 전자공학과(공학석사)
 1994년 3월~현재:경희대학교 전자공학과 박사과정 재학중
 ※주관심분야:초음파 토모그래피 및 음향-광 신호처리, 영상처리, 비파괴검사

▲전 계 석(Key-Suk Jun)

제14권 6호 참조
 현재:경희대학교 공과대학 전자공학과 교수