

# 레이저 산란의 변수 분석 및 메커니즘 개발에 대한 연구 A study on the Parameter Analysis and Mechanism Development of Laser Scattering

#김경범<sup>1</sup>, \*홍연기<sup>2</sup>

#G. B. Kim(kimgb@cjnu.ac.kr)<sup>1</sup>, \*Y. K. Hong<sup>2</sup>

<sup>1</sup>충주대학교 항공·기계설계학과, <sup>2</sup>충주대학교 대학원 항공·기계설계학과

Key words : Laser scattering mechanism, Parameter analysis, Surface inspection

## 1. 서론

유리 재질의 광학용 필터는 디스플레이 장치의 핵심 부품으로 다양한 산업 분야에서 사용되고 있다. 특히 적외선 차단 필터는 카메라폰, 디지털 카메라, 캠코더 등의 제품에서 부드럽고 선명한 영상을 얻을 수 있는 핵심 부품으로 사용된다. 디스플레이 장치의 규격이 메가급으로 높아짐에 따라 고감도 광학용 필터가 필수적으로 사용된다. 하지만 이러한 필터 표면에 결함이 존재할 경우, 화상재현 시 치명적 오류를 초래하여 왜곡된 영상의 결과가 나타난다. 또한 글래스 웨이퍼 세정 시, 20 μm 이상 되는 먼지나 흙이 발견되면 폐기처분 되므로 근래 산업 현장에서는 광학용 필터에 대해 nm 단위까지 정밀한 검사를 요구하고 있다. 그러나 현재 산업현장에서 시행하는 육안 검사의 경우 작업자의 숙련도, 피로도 등에 따라 검사 오류가 발생할 가능성이 높기 때문에 머신비전기술이 필요하게 됐다. 머신비전기술은 도장면, 금속표면, 반도체 제조 분야에서 실용화 단계까지 진행됐음에도 불구하고 유리기반 제품의 검사공정에 대해서는 국내뿐 아니라 국외에서도 다양한 조명체계와 검사 연구 및 응용사례가 미비한 실정이다.<sup>1</sup> 따라서 본 연구에서는 조명계 중 하나인 레이저의 산란변수를 정의 및 분석하고, 제어변수 변화에 따른 강건한 암시야 레이저 산란 메커니즘을 개발하였다.

## 2. 레이저 산란 변수 분석

기하학적 반사표면의 속성은 입사와 표면 위에서 반사된 복사조도(irradiance)와 반사된 복사선속(radiant flux)에 의해 결정되는 양방향 반사율 분포함수(BRDF; Bidirectional Reflectance Distribution function)의 향으로 특성을 묘사할 수 있다. BRDF의 기하학적 관계는 수식 (1)과 같이 표현된다.<sup>2</sup>

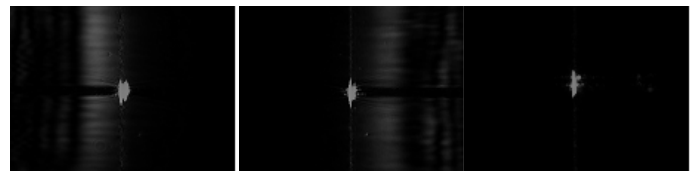
$$f_r(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r) = dL_r(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, E_i) / dE(\theta_i, \phi_i) \quad (1)$$

여기서  $\theta$ 와  $\phi$ 는 방향을 가리킨다. 아래첨자  $i$ 는 입사 복사 선속의 양과  $r$ 은 반사된 복사선속의 양,  $E_i$ 는 입사 복사조도,  $L_r$ 은 반사된 복사휘도 그리고  $d$ 는 미분의 양을 나타낸다. 이 때 표면 위 광산란의 기하학적 관계는 비취진 대상 표면에서 반사된 방사된 광이 다른 매개 변수를 일정하게 하고 있으면, 표면의 경사면에 의해 관계가 변하는 것을 알 수 있다. 이것은 표면의 3 차원 형상정보를 산란된 광에서 찾아낼 수 있다는 것을 의미하며, 이는 광의 파장, 표면 물질 타입(전도체, 유전체, 반전도체), 광의 파장과 관계된 표면 거칠기의 범위, 광의 입사 방향 및 표면의 법선 방향과 검출기 사이에서의 기하학적 형상, 입사광의 복사조도와 선속 등의 5 가지 양상에 의해 결정된다. 이 중 광의 입사 방향 및 표면의 법선 방향과 검출기 사이에서의 기하학적 관계는 입사각과 관찰각 제어를 통하여 알 수가 있는데 이것은 램버트(Lambert)법칙의 복사 방식을 따르게 된다. 이 요소는 실험에 의해서만 측정할 수 있으며, 표면 결함으로부터 산란된 빛의 세기와 분포를 분석하기 위해 실험 조건으로 사용할 수 있다. 또한 레이저 산란 검사의 수렴 입사각은 레일리(Rayleigh)<sup>3</sup>기준에서 접근할 수 있으며, 표면 거칠기를 측정한 결과 1~3nm범위로 측정되었다. 이

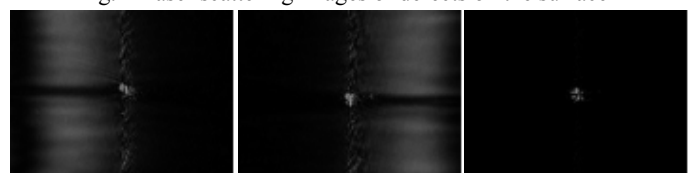
값에 의해 산란되는 광의 성분은 영상에서 비가시화 되므로 본 연구에서는 표면 거칠기에 의한 산란 성분은 결함으로부터 산란되는 성분에 영향을 거의 미치지 않는다고 판단하여 무시하였다. 따라서 결함의 3 차원 형상 정보는 레이저 입사각과 카메라 관찰각에 의해 가장 지배적인 영향을 받는 것을 검증하였다.<sup>4</sup>

이에 따라 입사각  $\theta$ 와 관찰각  $\phi$ 의 변화에 따른 결함 영상을 획득하여 비교 한 결과 카메라 관찰각  $\phi$ 가 레이저 입사각  $\theta$ 의 정반사각에 가까울수록 영상에 획득되는 결함은 광강도가 더 크고 더 작은 결함도 검출할 수 있었다. 위 표면 결함의 경우, 입사각과 관찰각이 커질수록 결함과 함께 레이저 슬릿빔의 정반사 성분이 크게 나타났으며, 아래 표면 결함은 입사각과 관찰각이 작을수록 정반사 성분이 크게 나타났다. 반면에 입사각과 관찰각의 차이가 커질수록 미세 결함 검출조건으로는 사용할 수 없게 된다. 위 또는 아래 표면에 결함이 존재할 때 검출 가능한 최소한의 관찰각은 입사각  $20^\circ$ ,  $25^\circ$ 에서 관찰각이 정반사각  $+5^\circ$  이상이어야 하며, 입사각이  $30^\circ \sim 60^\circ$  사이에선 관찰각이 정반사각에서  $-8^\circ \sim \pm 5^\circ$  이상이어야 한다. Fig. 1과 Fig. 2는 정반사각(입사각  $30^\circ$ )내에서 취득한 위 표면과 아래 표면에 존재하는 결함 영상을 보여준다. 입사각 변화에 따른 관찰각은 앞서 말한 검출 가능한 관찰각 이외에서 가장 효과적인 결함 검출이 가능하며, 결함의 산란 성분을 가장 크게 획득할 수 있다. 이에 따라 실험 조건은 입사각이  $\theta$ 일 때, 관찰각은 입사각  $\theta+5^\circ$ 로 설정하였다.

결함을 검출하는 가장 기본적인 판단 수단으로 산란광 강도와 분포가 쓰이지만 이 성분 중에는 수동 및 기계적 오차에 따라 생기는 잡음 인자가 존재하게 된다. 본 실험에서는 이 같은 잡음인자에 둔감하고 결함의 검출을 극대화 하기 위해 실험 계획법을 적용하였다. 레이저 슬릿빔의 입사각  $\theta$ , 카메라 관찰각  $\phi$ , F-number, 렌즈 끝단에서 피사체까지의 거리를 제어인자로 설정하고 결함 검출 극대화를 위해 특성 값이 클수록 검출효율이 높아지는 목적함수를 수식 (2)와 같이 정의한다.



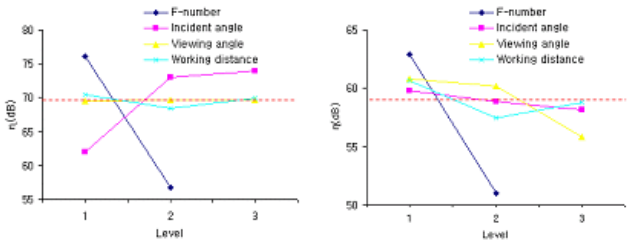
(a)  $\phi = 23^\circ$  (b)  $\phi = 34^\circ$  (c)  $\phi = 35^\circ$   
Fig. 1 Laser scattering images of defects on the surface



(a)  $\phi = 23^\circ$  (b)  $\phi = 34^\circ$  (c)  $\phi = 35^\circ$   
Fig. 2 Laser scattering images of defects under the surface

Table. 1 Control factors and levels

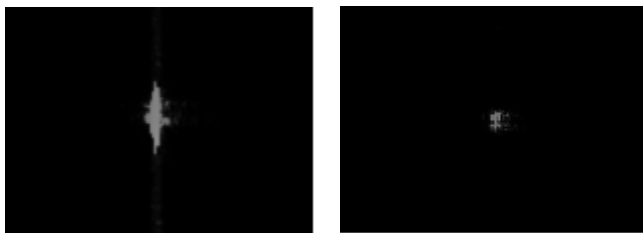
Control factors	Levels		
	1	2	3
A. F-number	1.8	4	-
B. Incidence angle(°)	L0	L0+15	L0+30
C. Viewing angle(°)	C0-15	C0	C0+15
D. Working distance(mm)	W0	W0+3	W0+7



(a) On the surface defects (b) Under the surface defects  
Fig. 3 Anova graphs about defects

$$\eta = -10 \log_{10} \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right] \quad (2)$$

제어인자의 수준은 2 또는 3 수준으로 하되 수준 상의 간격을 충분히 넓게 잡아 넓은 영역을 포함할 수 있도록 하였으며, 제어인자와 그 수준은 Table 1 과 같다. Table 1 에서 기준수준은 밑줄로 표시하였다. 다수의 제어인자의 효과를 동시에 효과적으로 실험하기 위해 다구찌(Taguchi)의 표준 직교 배열법 의거하여 실험하였다. 실험을 통해 얻은 데이터를 통해 Anova 그래프를 Fig. 3 과 같이 도시하였다. 이를 통해 레이저 산란변수의 최적 수준은 위 표면 결함에 대하여 F-number(1.8), 레이저 입사각(50°), 카메라 관찰각(55°), 렌즈 끝단에서 피사체까지의 거리(97mm), 아래 표면 결함에 대해선 F-number(1.8), 레이저 입사각(20°), 카메라 관찰각(25°), 렌즈 끝단에서 피사체까지의 거리(97mm)로 추정할 수 있었다. 이에 따라 취득한 영상을 Fig. 4 에 나타내었다.



(a) On the defect (b) Under the defect  
Fig. 4 Result images of laser scattering

### 3. 레이저 산란 메커니즘 개발

본 연구에서는 레이저 산란 변수 분석을 통해 얻은 제어 가능한 주요인자들의 상관 관계와 산란 성분만을 고려하여 결함의 산란 광로를 해석하고 그에 따른 메커니즘을 개발 하였다. 레이저 슬릿빔의 입사각이 0° 일 경우, 필터 표면의 입사빔과 반사빔이 동일한 광로에 의해 간섭현상이 발생하게 된다. 이것은 결함 검사에 치명적인 오류를 발생 시키기 때문에 오류발생을 방지하기 위해 입사각이 0° 인 경우는 무시하였다.

메커니즘 구성 시, 결함으로부터 산란된 광의 정확한 분석을 위해서는 레이저 빔의 선폭 중심과 각도 변화에 따른 카메라의 자세가 외부 오차를 줄이는 데 가장 큰 변수로 작용하며, 입사각 θ 로 표면 경계면의 한 점에 조사된.

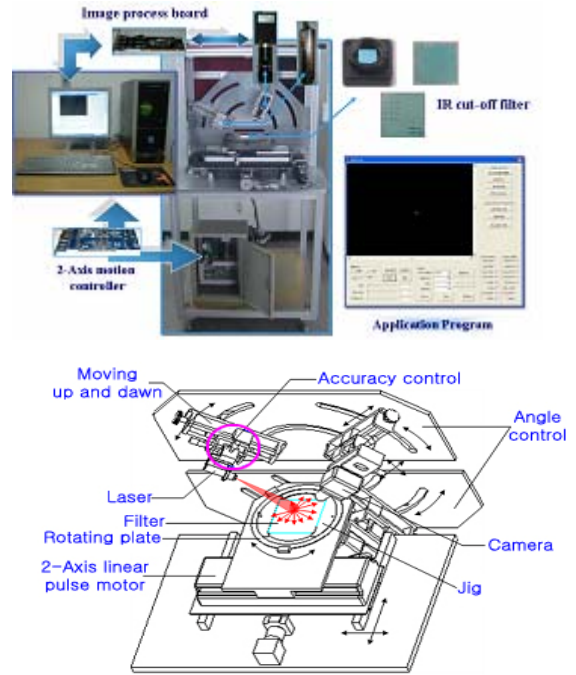


Fig. 5 An inspection mechanism based on laser scattering

빔이 정반사 되는 위치에서 카메라 영상의 중심점에 정확하게 나타나야 한다. Fig. 5 는 결함 검사를 위한 레이저 산란 검사 메커니즘의 전체 구성도 이다.

광학적 조건에 따라 레이저 입사각과 카메라 관찰각을 제어할 수 있게 각도 제어부를 설계하였고, 제어된 각도 축을 따라 상/하 이송이 가능하도록 구성하였다. 기구부는 필터 전체를 자동 검사하기 위해 2-Axis linear pulse motor 로 구성하였으며, 필터에 상층 결함이 존재할 경우 모든 결함 방향에 대해 강건하게 검사할 수 있게 필터를 고정시켜주는 지그부를 회전 가능하도록 설계하였다. 제어부는 PC 와 카메라 및 레이저의 동기를 고려하여 화상처리 보드를 사용하였고, 정밀 이송 제어를 위해 Step driver 가 연결된 Motion Controller 사용하였다.

따라서 본 연구에서는 개발한 메커니즘은 관찰 각도 변화에 따른 외란을 줄여 결함 영상의 정확한 분석이 가능하도록 구성하였다.

### 4. 결론

본 논문에서는 결함으로부터 야기되는 광산란 속성 및 영향인자를 조사하여 각각의 레이저 산란 변수를 정의하였으며, 레이저 산란에 가장 지배적인 영향을 미치는 변수는 레이저 입사각과 카메라 관찰각임을 검증하고, 이를 기반으로 강건한 레이저 산란 메커니즘을 개발하였다. 향후 실험을 통해 결함 검출 성능을 극대화 하고, 결함의 이론적 분석과 결함들을 자동 검사할 수 있는 기술개발 연구가 진행될 예정이다.

### 참고문헌

1. Bakolias, C., "Dark field, scheinpflug imaging for surface inspection," SPIE, Vol. 3029, pp. 57-68, 1997.
2. Takami, K., "Defect inspection of wafers by laser scattering," Materials Science and Engineering B, Vol. 44, No.1-3pp. 181-187, 1997.
3. Beckmann, P and Spizzichino, A, "The scattering of electromagnetic waves from rough surfaces," Pergamon Press, Oxford, pp. 9-16, 1963.
4. Kim, G, B., Han, J, C., "An experimental analysis on dark-field laser scattering for the surface inspection of infrared cut-off filters," KSPE, Vol 24, No.11, pp76-83, 2007.