

실험계획법을 이용한 레이저 산란의 최적 조건 결정에 대한 연구

A Study on the Optimal Condition Determination of Laser Scattering Using the Design of Experiment

한재철¹, 김경범^{2,✉}

Jae Chul Han¹ and Gyung Bum Kim^{2,✉}

1 기가비스 (GigaVis)

2 충주대학교 항공·기계설계학과 (Aeronautical & Mechanical Design Engineering, Chungju National Univ.)

✉ Corresponding author: kimgb@cjnu.ac.kr, Tel: 043-820-5378

Manuscript received: 2009.1.6 / Accepted: 2009.4.15

In this paper, an inspection mechanism based on laser scattering has been developed for the surface evaluation of infrared cut-off filters, and optimum conditions of laser scattering are determined using the design of experiment. First of all, attributes and influence factors of laser scattering are investigated and then a laser scattering inspection mechanism is newly designed based on analyses of laser scattering parameters. Also, Taguchi method, one of experimental designs, is used for the optimum condition selection of laser scattering parameters and the optimum condition is determined in order to maximize the detection capability of surface defects. Experiments show that the proposed method is useful in a consistent and effective defect detection and can be applied to surface evaluation processes in manufacturing.

Key Words: Design of Experiment (실험계획법), Infrared Cut-off Filter (적외선차단필터), Inspection Mechanism (검사메커니즘), Surface Inspection (표면 검사), Laser Scattering (레이저 산란), Taguchi Method (다꾸찌방법)

1. 서론

최근 IT 관련 산업의 급속한 성장과 소비자의 삶의 질 향상에 따라 카메라폰, 디지털 카메라, 캠코더 등과 같은 디스플레이 기기에 대한 수요가 증가하고 기기의 고급화에 대한 소비자의 요구 또한 증가하고 있다. 디스플레이 장치의 핵심부품 중 하나인 적외선 차단 필터(infrared cut-off filter)는 CCD 또는 CMOS 영상센서 전면에 삽입되어 적외선을 차단하고 잡음을 감소시켜 부드럽고 선명한 영상을 얻을 수 있게 한다. 그러나 이러한 필터 표면에 결함이 존재할 경우, 화상재현 시 치명적

오류로 인하여 왜곡된 영상 결과를 초래하게 된다.

글래스 기반 광학 필터에서 작업자에 의한 수동검사의 경우, 작업자의 직관과 경험적 지식에 의존하기 때문에 일관성 있는 정량적 검사가 이뤄지지 않고, 검사속도의 한계가 뒤따른다. 그 동안, 이를 해결하기 위한 다양한 머신비전기술(machine vision technology)들이 개발되었다.¹⁻³ 이러한 머신비전 방식에서는 이차원 영상에서 밝기값(grey level)의 해석에 따른 것으로, 고대비 고품질 영상 취득을 위한 광학계 설계보다는 영상처리 알고리즘 개발에 더 초점이 맞춰져 왔다. 이는 결함 검출을 위한 대부분의 역할을 영상처리 알고리즘에 의존

하고 있기 때문에 그 알고리즘은 점점 복잡해지고 어려워진다. 결국, 알고리즘에 기반한 머신비전 검사방식은 미소 결함의 검출신뢰성, 시스템의 통합비용 그리고 계산비용 등에서 주요 문제를 발생시킨다. 반면, 레이저 산란을 이용한 방법은 검사 알고리즘의 단순성과 신뢰성면에서 효율적인 방법으로 간주되고 있다.^{4,5}

따라서 본 연구에서는 적외선차단필터를 위한 클래스의 표면검사를 위해 광학계 설계에 중점을 둔 레이저산란 메커니즘을 개발하였고, 레이저산란의 최적 조건을 실험계획법을 적용하여 결정하였다.

2. 레이저 산란 메커니즘 설계

2.1 레이저 산란 변수 분석을 통한 메커니즘 설계

적외선차단필터를 위한 클래스 표면 결함 검사에 강건한 메커니즘 설계를 위해 먼저 레이저 산란 변수들에 대해 분석하였다. 일반적으로 기하학적 반사표면의 속성들은 양방향 반사를 분포 함수(BRDF; Bidirectional Reflectance Distribution Function)의 조건, 즉 광의 파장, 표면 물질 타입(전도체, 유전체, 반전도체), 광의 파장과 관계된 표면 거칠기의 범위, 입사 조도와 입사 선속(incident light flux), 광의 입사 방향 및 표면의 법선 방향과 검출기 사이의 기하학적 관계임을 유추할 수 있다.⁶ Fig. 1은 BRDF의 기하학적 관계를 보여준다. Fig. 1의 인자들을 살펴보면 BRDF의 조건 중 검사 환경에 따라 고정된 값을 가지는 변수들 이외에 광의 입사각과 검출기의 관찰각을 나타내는 θ 와 ϕ 가 BRDF에 커다란 영향을 미침을 알 수 있다. 따라서 표면결함 검사 시 광의 입사각과 검출기의 관찰각이 영향력 있는 변수들임을 추정할 수 있다. 또한 람베르트의 법칙(Lambert's law)에 의해 거울 같은 평면에서 광의 입사각에 따른 반사광의 광량을 알 수 있다. 람베르트의 법칙은 수식 (1)과 같다.

$$I_{\theta} = I_0 \cos \theta \quad (1)$$

θ 는 광의 입사각을 의미하고, I_0, I_{θ} 는 각각 입사광의 광량과 반사된 광의 광량을 의미한다. 따라서 Fig. 1과 수식 (1)를 통해 메커니즘을 구성

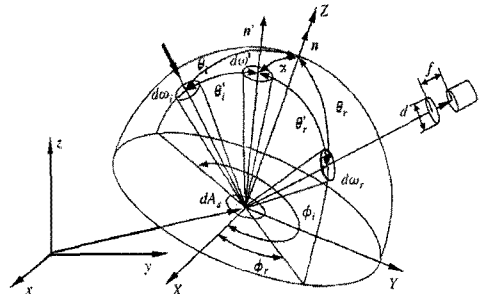


Fig. 1 Geometrical relationship of bidirectional reflectance distribution function

함에 있어 광의 입사각과 검출기의 관찰각 제어가 중요함을 알 수 있다.

표면 형상에 따른 레이저 산란 광로 역시 메커니즘 구성 시 고려해야 할 사항이다. 거친 표면에 하나의 점으로 조사된 광은 그 점에서 표면형상의 기울기에 따라 반사되는 산란광의 방향과 영역이 변화된다.⁷ 이때 표면에 따라 반사되는 광의 편향각(deflection angle) 크기는 수평축과 결함에 대한 접선축과의 각도의 두 배이고, 편향방향은 조사되는 광의 정반사 성분으로부터 편향각을 더한 방향이다. 이를 통해, 결함형상에 따라 반사된 산란광의 광로를 예측할 수 있음을 알 수 있다. 이는 메커니즘 구성 시 검출기의 자세 및 위치가 조절되어야 함을 알 수 있다.

이상의 레이저 산란 변수 분석을 토대로 Fig. 2와 같이 레이저 산란 기반 검사 메커니즘을 개발하였다. 이 메커니즘은 크게 광학계 부분과 모션(motion)부분으로 나눌 수 있다.

광학계 부분은 조명계인 레이저와 검출기인 카메라, 이들의 자세를 제어할 수 있는 수직 방향의 플레이트로 구성되어 있다. 플레이트는 결과 이미지를 획득함에 있어서 잡음을 최소화 하고 정확한 표면 검사를 위해 레이저와 카메라의 축들을 같은 평면상에 위치하게 하여 한 점을 바라볼 수 있게 설계 하였다. 상부 플레이트의 경우 레이저 입사각과 카메라 관찰각을 표준 법선을 기준으로 양방향 $20^{\circ} \sim 85^{\circ}$ 까지, 하부 플레이트의 경우 표준 법선을 기준으로 양방향 55° 까지 제어 가능하게 설계하였다. 또한 선명한 결과영상에 영향을 미치는 레이저와 카메라의 초점을 미세하게 제어하기 위해 클램핑 부분을 설계하여 카메라와 레이저의 상하 정밀 위치제어를 가능하게 했다. 그리고 이들의 보다 정밀한 위치제어를 위해 상하, 좌우로 각

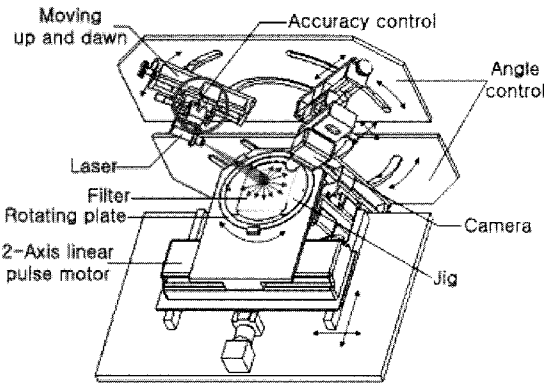


Fig. 2 An inspection mechanism based on laser scattering

각 10mm 를 이동할 수 있게 설계 하였다. 레이저의 경우 슬릿빔(slit-beam)을 사용함으로써 대면적 검사 시 검사속도에 대해 강건하게 설계하였다.

모션 부분은 크게 글래스 고정부와 모터에 의한 이송부로 구성되어 있고, 이 역시 정확한 표면 검사를 위해 기본적으로 플레이트와 직각을 유지하였다. 글래스 고정부는 탈부착을 가능하게 하여 여러 크기의 글래스를 검사할 수 있게 설계하였다. 또한 고정부를 360° 회전 가능하게 함으로서 결함의 각 방향에 따른 산란 성분을 입체적으로 획득할 수 있게 하였다. 구동부는 반복 정밀도 $\pm 5\mu\text{m}$, 분해능 $1\mu\text{m}$ 을 갖는 선형 모터(linear pulse motor)를 사용하여 X-Y 가이드 축을 따라 글래스 이송을 가능하게 함으로서 자동검사를 할 수 있게 설계하였다.

본 연구에서는 레이저와 카메라의 위치에 따른 잡음을 최소화 하고, 레이저 산란 변수 조건 변화에 강건한 검사 메커니즘을 개발하였다.

3. 레이저 산란 변수의 최적 조건 선정

3.1 실험계획법

적외선 차단 필터를 위한 글래스의 표면 결함 검사 시 외부잡음에 강건하고 높은 결함 검출성을 위한 레이저 산란의 최적 조건을 결정하기 위해 실험 계획법 중 하나인 다구찌(Taguchi) 직교배열법(orthogonal array)을 적용하였다. 글래스의 결함을 검출하는데 있어 다양한 제어인자와 잡음인자들이 획득 영상에 영향을 미친다. 이러한 여러 인자들의 영향을 정량적으로 비교하기 위해 각각의 인자와 그 수준을 조합하여 실험할 경우, 실험횟

수는 기하급수적으로 증가하게 된다. 따라서 실험 횟수를 최소화하면서 예측하지 못한 잡음인자가 작용해도 결함 검출 성능을 최대화 할 수 있는 레이저 산란의 최적 조건을 찾는 것은 매우 중요한 실험과정이다.⁸ 다구찌 직교배열법에 따른 강건설계(robust design)는 잡음인자에 대한 민감성을 최소화하고 특성품질을 강건하게 유지시키기 위해 SN 비(signal to noise ratio)를 사용한다. SN 비는 신호 대 잡음의 비율로 입력신호의 크기와 잡음이 주는 영향의 크기 비율로 나타난다. 따라서 각각의 조절 인자의 SN 비를 크게 만드는 값을 그 인자의 값으로 결정하면 그 값은 잡음에 대해 강건한 성질을 갖게 된다. SN 비는 목적함수, 즉 품질특성에 의해 그 정의가 달라지는데, 본 연구의 품질특성인 결함 검출 성능은 높으면 높을수록 좋으므로 망대특성을 갖는다. 망대특성의 경우 $L(y) = kE(1/y^2)$ 로 표현되는 기대 손실을 작게 해주기 위한 $E(1/y^2)$ 의 추정값인 평균표준편차(mean squared deviation)를 이용하여 SN 비를 수식 (2)와 같이 나타낸다.

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

여기서 n 은 측정값의 수를, y_i 는 측정된 품질 특성값을 나타낸다. 따라서 SN 비 값이 클수록 결함 검출 성능은 향상된다고 할 수 있다.

3.2 레이저 산란에 대한 실험 및 영상분석

레이저 산란의 최적 조건을 결정하기 위한 실험에 앞서 실험방법과 결함 검출에 영향을 미치는 제어인자들, 그리고 인자들의 수준에 대해 고찰하였다.

먼저 결함의 형상에 따른 결과영상의 특징을 알아보기 위하여 실험 시 사용할 표본 결함을 대칭형 삼각형 형상으로 정하여 미세레이저가공기(UV laser micro machining system)로 가공한 다음, AFM(atomic force microscopy)으로 측정된 결과 폭 $22.40\mu\text{m}$, 끝까지의 깊이 $4.96\mu\text{m}$ 임을 확인 하였다.

결함검사법은 빛이 조사된 영역에 결함이 존재할 경우 빛이 다양한 방향으로 산란되어 결함영상에서 밝게 나타나는 암시야(dark-field) 검사법을 사용하였다. 암시야 레이저 산란 검사의 성공을 위해 요구되는 것은 결함이 존재하지 않는 거울 같

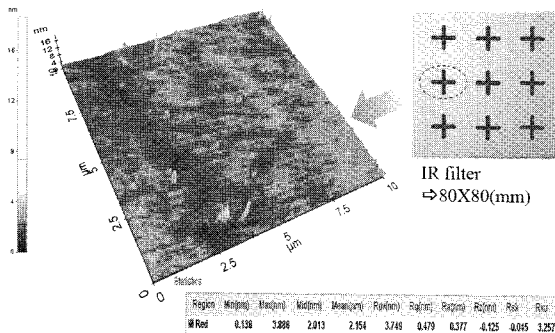


Fig. 3 Descriptions of surface roughness using AFM

은 검사 표면이다. 거울과 같은 표면에 조사되는 레이저 입사각은 레일리(Rayleigh)기준에서 접근할 수 있다.⁹ 암시야 레이저 산란 검사의 수렴 입사각을 선정하기 위해 AFM 측정장비를 이용하여 적외선 차단 필터의 표면 거칠기를 측정한 결과 1~3nm로 나타남을 Fig. 3에 도시하였다. 측정결과를 레일리기준에 적용하면 입사각 θ 는 $0^\circ \leq \theta \leq 89^\circ$ 에 위치해야 함을 알 수 있다. 또한 측정된 표면 거칠기 값이 매우 작고, 실제 영상을 획득함에 있어서 영향을 미치지 않으므로 실험 시 표면 거칠기 값은 무시하였다. 따라서 2장에서 언급하였듯이 BRDF에 영향을 미치는 요인 중 레이저 입사각과 카메라 관찰각을 제외한 변수들은 일정한 값으로 유지되므로 두 변수를 제어 인자로 선정하였다. 또한 영상획득 시 전체영상의 명암도에 강하게 영향을 미치는 카메라의 F-number, 카메라로 촬영 가능한 영역에 영향을 미치는 피사체부터 렌즈 끝단까지의 거리(WD: working distance) 역시 제어 가능한 요소이므로 제어인자로 선정하고 그 수준들과 함께 Table 1에 나타내었다. 먼저 레이저 입사각 수준의 범위는 제어 가능한 최소 각도인 20° 와 정반사성분의 영향과 잡음(공기상에 존재하는 미립자)의 영향을 받지 않는 최대각 50° , 그리고 이들의 중간값인 35° 로 선정하였다. 카메라 관찰각의 경우 암시야 검사법의 조건에 따라 정반사각을 피하기 위해 최소 5° 이상의 차이를 두어 선정하였다.

실험에 있어서 다구짜 직교 배열법을 사용하는 이유는 재현성과 최적조건 선정 시 안정성을 보장하고 실험의 횟수를 최소화하며 실험에 다양한 영향인자와 그 수준을 포함시킬 수 있기 때문이다. 따라서, 본 실험의 환경에 맞는 4 인자 3 수준계의 직교배열표 ($L_9 3^4$)를 선정하여 실험순서와 특성값

Table 1 Control factors and levels

Control factor	Level		
	1	2	3
A. F-number	1.8	4	-
B. Incident angle($^\circ$)	20	35	50
C. Viewing angle($^\circ$)	25	40	55
D. WD(mm)	97	100	104

Table 2(a) An orthogonal array for a defect on the surface

No. of experiment	Level arrangement				y_i
	A	B	C	D	
1(1111)	1.8	20	25	97	3913.3
2(1222)	1.8	35	40	100	11111.0
3(1333)	1.8	50	55	104	14795.0
4(2123)	4	20	40	104	296.0
5(2231)	4	35	55	97	1115.7
6(2312)	4	50	25	100	987.3
7(1132)	1.8	20	55	100	1726.7
8(1213)	1.8	35	25	104	7116.7
9(1321)	1.8	50	40	97	8434.7

Table 2(b) An orthogonal array for a defect under the surface

No. of experiment	Level arrangement				y_i
	A	B	C	D	
1(1111)	1.8	20	25	97	3155.3
2(1222)	1.8	35	40	100	1829.3
3(1333)	1.8	50	55	104	1196.3
4(2123)	4	20	40	104	443.3
5(2231)	4	35	55	97	300.3
6(2312)	4	50	25	100	341.0
7(1132)	1.8	20	55	100	662.7
8(1213)	1.8	35	25	104	1241.0
9(1321)	1.8	50	40	97	1304.0

y_i 를 Table 2와 같이 나타내었다. SN 비를 구하기 위한 특성값 y_i 는 영상에 맺히는 산란성분 영역의 픽셀 명암값의 총합으로 정하였고 영역은 라벨링 방법을 사용하여 분할하였다. 잡음인자로는 레이저의 정반사성 성분, 초점 정도, 결함 형상, 표면 기울어짐 및 두께 불균일성, 입사각과 관찰각 사이의 편심 등이 존재하나 반복 실험을 통한 평균값으로 잡음인자 값을 결과값에 포함하여 잡음에

Table 3(a) SN ratios for a defect on the surface

No. of experiment	Level arrangement				SN
	A	B	C	D	
1	1.8	20	25	97	71.9
2	1.8	35	40	100	80.9
3	1.8	50	55	104	93.4
4	4	20	40	104	49.4
5	4	35	55	97	60.9
6	4	50	25	100	59.8
7	1.8	20	55	100	64.7
8	1.8	35	25	104	77.0
9	1.8	50	40	97	78.5
Average(m)					70.7

Table 3(b) SN ratios for a defect under the surface

No. of experiment	Level arrangement				SN
	A	B	C	D	
1	1.8	20	25	97	70.0
2	1.8	35	40	100	65.2
3	1.8	50	55	104	61.6
4	4	20	40	104	52.9
5	4	35	55	97	49.6
6	4	50	25	100	50.7
7	1.8	20	55	100	56.4
8	1.8	35	25	104	61.9
9	1.8	50	40	97	62.3
Average(m)					58.95

대하여 강건하게 실험하였고, Table 3 과 같이 SN 비를 구하였다. Fig. 4 의 (a, b)와 (c, d)는 위 표면과 아래 표면 결함에 대한 실험 영상 중에서 일부분을 보여 주고 있다.

3.3 레이저산란 변수의 선정 및 결과

레이저 산란의 최적 조건을 결정하기 위해 Table 3 에 나타난 SN 비를 이용하여 각 인자의 수준별 효과를 수식 (3)을 이용하여 Table 4 와 같이 계산하였다.

$$m_{A1} = \frac{1}{n} [\eta_1 + \eta_2 + \eta_3 + \eta_7 + \eta_8 + \eta_9] \quad (3)$$

여기서, 아래첨자 A1 은 제어인자의 종류와 그 수준을 의미하고 n 은 A1 이 속한 실험의 총 횟수, η_i 는 i 실험에 대한 SN 비 값을 말한다. Table 4 를 바탕으로 가장 영향력 있는 제어인자를 선정하기 위해 ANOVA(analysis of variance)그래프를 Fig. 5 와 같이 도시하였다. 위 표면 결함의 경우 인자별 최대 평균인 수준을 선정하면 F-number, 레이저 입사각, 카메라 관찰각 그리고 WD 는 각각 1.8, 50°, 55°, 97mm 로 추정되었다. 아래 표면 결함의 경우, 각 인자의 결정값은 1.8, 20°, 25°, 97mm 이다. 여기서, F-number 의 수준별 영향이 두드러지게 나타나는 것은 카메라가 받아들이는 전체광량을 직접적으로 제어하여 영상전체의 밝기값에 변화를 주기 때문이다.

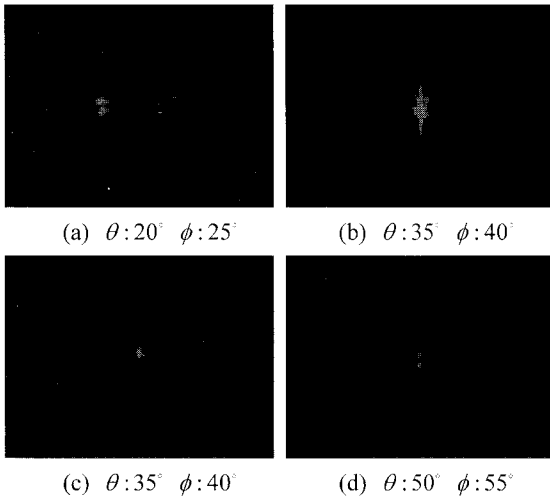


Fig. 4 A part of laser scattering images

Table 4(a) Response table for SN ratios on the surface

Control factor	Level		
	1	2	3
A. F-number	76.07	56.72	-
B. Incident angle(°)	62.00	72.96	73.91
C. Viewing angle(°)	69.57	69.61	69.69
D. WD(mm)	70.43	68.49	69.95

Table 4(b) Response table for SN ratios under the surface

Control factor	Level		
	1	2	3
A. F-number	62.89	51.04	-
B. Incident angle(°)	59.77	58.89	58.17
C. Viewing angle(°)	60.89	60.15	55.84
D. WD(mm)	60.61	57.44	58.78

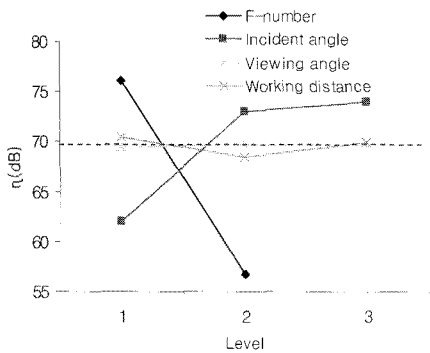


Fig. 5(a) ANOVA graph about a control factor effect each level on a surface defect

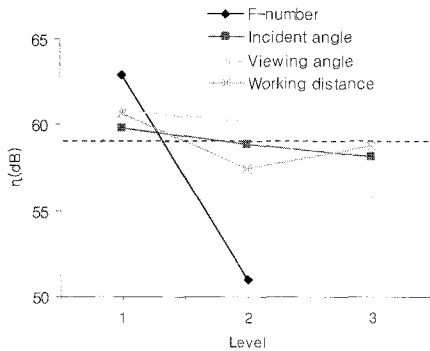


Fig. 5(b) ANOVA graph about a control factor effect each level on a surface defect

따라서 이를 배제하면 제어인자 중 레이저 입사각의 변화에 따른 수준별 영향이 가장 많은 차이를 보임을 알 수 있다.

행렬실험 결과로 얻은 최적 조건이 실제 향상을 가져오는지 알아보기 위해 검증실험을 수행하였다. 검증실험 시 영상에 가장 큰 영향을 미치는 레이저 입사각과 카메라 관찰각만을 변화시켰다. 실험적 경험에 의해 암시야 검출 방법에서 검출 성능이 높은 조건은 카메라 관찰각이 레이저 입사각보다 최소 5° 이상으로 유지하는 것이다.

위 표면 결함에 대한 검증실험 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 그 결과 실험계획법을 수행하여 얻은 레이저 산란의 최적 조건과 일치함을 확인할 수 있다. Fig. 7은 레이저 산란 최적 조건을 통해 획득한 영상이다. 위 표면의 경우 레이저 입사각이 크므로 반사 성분이 많아 결함에 대한 레이저 산란 현상이 크게 발생하여 결함 영상이 크게 나타나고, 결함의 깊이가 깊어질수록 영상에서 두껍게 나타

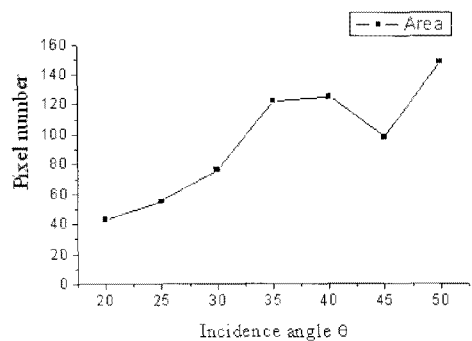
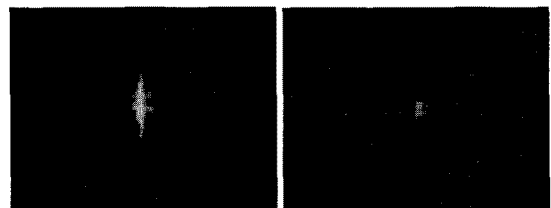


Fig. 6 Verification results for a defect on the surface



(a) On the surface (b) Under the surface

Fig. 7 Evaluations of laser scattering images update

나는 특징을 보이고 있다. 반면에 아래 표면의 경우 투과 성분이 많은 비중을 차지하는 작은 입사각에서 결함 영상이 가장 크게 나타나고, 결함영상이 분할된 특징을 보인다. 이는 산란 광로의 방향이 삼각형 결함의 골 부분을 중심으로 양방향으로 분할되어지기 때문이라 판단된다.

본 연구에서는 결함 검출 극대화를 위한 레이저 산란 변수 선정의 실험적 노력을 상당히 감소시킬 수 있었으며 이러한 접근법이 일관되고 효율적인 결함 검출을 할 수 있는 방법임을 검증할 수 있었다.

4. 결론

본 논문에서는 표면결함으로부터 야기되는 레이저 광산란의 속성 및 영향인자를 조사하여 레이저 산란변수를 분석하였으며, 이를 통해 적외선차단필터의 글래스 검사를 위한 레이저 산란 검사 메커니즘을 개발하였다. 또한, 레이저 산란 검사 메커니즘의 최적 조건을 다구체의 실험계획법을 적용하여 선정하였다.

향후 규격 별 표면결함 형상에 대한 이론적 분석과 함께 결함들을 자동 검사할 수 있는 기술개발이 완료되면, 각종 표면의 결함을 검사하고 평

가하는데도 적용이 가능할 것으로 판단된다.

후 기

이 논문은 2007 년도 정부재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 연구되었음(KRF-2007-013-D00015).

참고문헌

1. Song, J. Y., Park, H. Y., Jung, Y. W. and Kim, H. J., "Development of defect inspection system for PDP ITO patterned glass," Journal of KSPE, Vol. 21, No. 12, pp. 92-99, 2004.
2. Kim, G. B. and Moon, S. H., "An adaptive and robust inspection algorithm of PCB patterns based on movable segments," Journal of KSPE, Vol. 23, No. 3, pp. 102-109, 2006.
3. Latif, A., Ertuzun, A. and Ercil, A., "An efficient method for texture defect detection: sub-band domain co-occurrence matrices," Image and Vision Computing, Vol. 18, No. 6-7, pp. 543-553, 2000.
4. Takami, K., "Defect inspection of wafers by laser scattering," Materials Science and Engineering B, Vol. 44, No. 1-3, pp. 181-187, 1997.
5. Tay, C. J. and Quan, C., "A parametric study on surface roughness evaluation of semi-conductor wafers by laser scattering," Optics, Vol. 114, No. 1, pp. 1-6, 2003.
6. Nayar, S. K., Ikeuchi, K. and Kanade, T., "Surface reflection: physical and geometrical perspectives," IEEE Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 13, Issue 7, pp. 611-634, 1991.
7. Bakolias, C., "Dark field, scheinplflug imaging for surface inspection," Journal of SPIE, Vol. 3029, pp. 57-68, 1997.
8. Roy, R. K., "Design of Experiments Using the Taguchi Approach," John Wiley & Sons Inc, 2001.
9. Beckmann, P. and Spizzichino, A., "The scattering of electromagnetic waves from rough surface," Pergamon Press, 1963.