

Application of Fourier Optics to Defect Inspection of Display Substrates

Young Jin Jung[†] and Kwang Lee

School of Electricity and Electronics, Ulsan College, 57, Daehak-ro, Nam-gu, Ulsan 44610, Korea

(Received December 5, 2016; Revised manuscript December 22, 2016; Accepted February 6, 2017)

A method for inspecting defects in display substrates utilizing Fourier optics is proposed in this paper. A cost-effective inspection system can be realized with the proposed method, because it does not require a high-magnification microscope. Also, the proposed method can avoid tight tolerance for variations in displacement between substrate and camera, which is stems from shallow depth of field of the high-magnification microscope. In addition, possible damage caused by collisions between substrate and the inspection equipment can be avoided. The decision algorithm can be simpler than for a conventional inspection system, because spatial shift of periodic substrate patterns does not affect the intensity distribution of the diffracted light, by the Fourier transform property. The proposed method is explained with numerical studies, and experiments are carried out to check its feasibility for color-filter substrates of a liquid-crystal display.

Keywords: Fourier optics, Fraunhofer diffraction, Defect inspection

OCIS codes: (050.1970) Diffractive optics; (120.1880) Detection; (120.4630) Optical inspection; (070.4560) Data processing by optical means

푸리에 광학의 디스플레이 기판 결함 검출에의 활용

정영진[†] · 이 광

울산과학기술대학교 전기전자공학부
Ⓞ 44610 울산시 남구 대학로 57

(2016년 12월 5일 받음, 2016년 12월 22일 수정본 받음, 2017년 2월 6일 게재 확정)

본 연구에서는 디스플레이 기판의 결함 검출을 위해 푸리에 광학을 이용하는 방법에 대하여 제안하였다. 제안하는 방법은 고배율의 광학계를 사용하지 않기 때문에 비용적 부담이 적은 결함 검출 시스템을 구현하는데 사용될 수 있다. 그리고, 제안하는 방법은 고배율 광학계의 짧은 피사계 심도에 기인하는 기판과 카메라 간의 거리 변화에 대한 엄격한 허용오차를 피할 수 있다. 또한, 카메라와 기판의 가까운 거리로 생기는 접촉으로 인한 손상의 가능성을 피할 수 있다. 푸리에 변환의 특성에 의해 규칙적 패턴인 기판의 위치변화는 회절된 빛의 세기분포에는 영향을 미치지 않기 때문에 검출 알고리즘을 기존의 방식보다 더 간단하게 구현할 수 있다. 제안하는 결함 검출 방법을 전산모사와 함께 설명하고 액정디스플레이의 컬러필터 기판을 예로 실험을 통해 검증하였다.

Keywords: 푸리에 광학, 프라운호퍼 회절, 결함검출

OCIS codes: (050.1970) Diffractive optics; (120.1880) Detection; (120.4630) Optical inspection; (070.4560) Data processing by optical means

I. 서 론

LCD (Liquid crystal display), OLED (Organic light emitting diode display) 등의 디스플레이 분야에서 결함을 검출하는 과정은 제품 생산에서 매우 많은 노력을 필요로 하는 과정 중의 하나이다.^[1-13] 자동화된 결함 검출 구현을 위해서는 몇

가지 어려움이 있는데 첫째, 고도의 광학계 사용에 따르는 비용과 신뢰성 확보의 어려움이다. 보통 디스플레이 기판의 균열을 검출하기 위해서는 고배율의 신뢰성 있는 광학계를 필요로 한다. 이러한 고도의 광학계는 많은 비용을 필요로 하며 공차로 인한 초점이 흐려지는 등 신뢰성 문제가 생기기 쉽다. 또한, 결함 검출 과정에서 이동하는 기판의 상하 진동은 근접

[†]E-mail: y.j.jung@outlook.com

Color versions of one or more of the figures in this paper are available online.

하여 촬영하는 검출장비의 카메라와 상호간에 손상 가능성이 있다.^[14] 두번째 어려움은 결함 검출 판단 영상신호처리 알고리즘 수행을 위한 많은 계산 량의 신속한 처리 문제이다. 자동화된 결함 유무의 판단은 보통 고도의 광학계를 이용해 촬영 후, 투영법(Projection method), 필터기반방법(Filter-based approaches), 학습기반방법(Learning based approaches) 그리고 여러가지 방법을 혼합한 형태 등 복잡한 영상신호처리 알고리즘을 통해 이루어진다. 이 영상신호처리는 많은 계산량을 필요로 하며 가장 효율적인 알고리즘을 구현하기 위해 많은 노력을 해야 한다.^[13]

한편, 순수한 유리기판의 경우는 고배율의 촬영 후 영상 처리라는 기본적인 결함 검출방법의 어려움을 돕거나 대신 할 수 있는 초음파나 레이저 등을 활용한 방법들이 연구되어 왔다.^[15-17] 또한, 규칙적인 픽셀 형상을 가지는 디스플레이 기판에 적용될 수 있는 결함 검출 방법들이 제안되어 왔는데 이는 푸리에 변환을 하고 저역필터를 통과시켜 규칙적인 기판의 패턴을 제거하여 결함 이미지만을 남기는 방법이다.^[18] 그러나 이 방법은 패턴의 주기보다 작은 스케일의 결함은 패턴과 같이 제거되기 때문에 고해상도의 검출이 어렵다.

본 연구에서는 규칙적인 픽셀 형상을 가지는 디스플레이 기판에 적용될 수 있는 회절 형상 분석을 통한 고해상도의 결함 검출 방법을 제안한다. 논문에서 먼저, 제안한 방법을 전산 모사를 통해 검출 원리를 먼저 소개하고 디스플레이 컬러필터에 대한 예시를 실험을 통해 검증해 본다. 제안하는 방법을 통해 결함 판단에 필요한 영상처리의 계산 량을 최소화하고 고도의 광학계 사용으로 인한 신뢰성확보의 어려움을 극복할 수 있음을 밝힌다.

II. 검출원리

단일 파장 빛의 회절 패턴은 프라운호퍼 회절(Fraunhofer Diffraction) 의해서 계산될 수 있다. 그림 1의 $\zeta-\eta$ 평면상의 슬릿을 통과한 파장이 λ 인 빛의 세기 분포 $u(\xi, \eta)$ 가 거리 z 만큼 떨어져 있는 $x-y$ 평면상에 회절 된 빛의 세기분포 $U(x, y)$ 을 형성할 때 프라운호퍼 회절은 식 (1)과 같이 계산될 수 있다. 이 수식은 푸리에 변환(Fourier transform)을 포

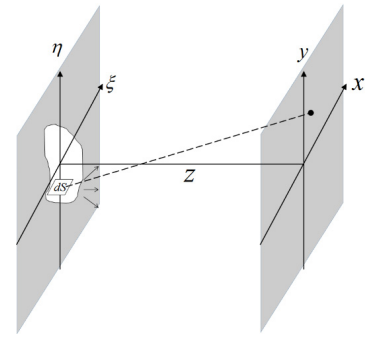


Fig. 1. Coordinate definition for the calculation of Fraunhofer diffraction.

함한 간략화 된 수식으로 표현 가능하며 따라서 빛의 세기분포는 푸리에 변환만으로도 계산이 가능하다.^[19,20]

$$\begin{aligned}
 U(x, y) &= e^{jkz} \frac{e^{j\frac{k}{2z}(x^2+y^2)}}{j\lambda z} \iint_{-\infty}^{\infty} u(\xi, \eta) \exp\left[-j\frac{2\pi}{\lambda z}(x\xi + y\eta)\right] d\xi d\eta \\
 &= e^{jkz} \frac{e^{j\frac{k}{2z}(x^2+y^2)}}{j\lambda z} F[u(\xi, \eta)]
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

여기서 $f_x = \frac{x}{\lambda z}, f_y = \frac{y}{\lambda z},$

본 연구에서 제안하는 디스플레이 기판의 결함 검출 방법을 그림 2에 설명하였다. 먼저 결함 검출의 대상이 되는 디스플레이 기판의 회절 형상을 반투명한 면에 투영하여 카메라를 통해 촬영한다. 제안하는 방법은 고배율의 카메라 촬영이 필요 없기 때문에 카메라와 기판의 가까운 거리로 인한 접촉으로 인한 손상의 가능성을 없애고, 고도의 광학계 사용에 대한 비용적 부담을 줄이고, 초점이 벗어나기 때문에 생기는 작은 오차 허용범위를 극복할 수 있을 것으로 기대된다.

그림 2와 같이 결함의 판단은 회절형상의 변화만으로 결함을 결정하고 결함이라고 판단되는 경우 이 이미지를 필요에 따라 복원할 수 있다. 따라서 결함 검출과정에서는 회절 이

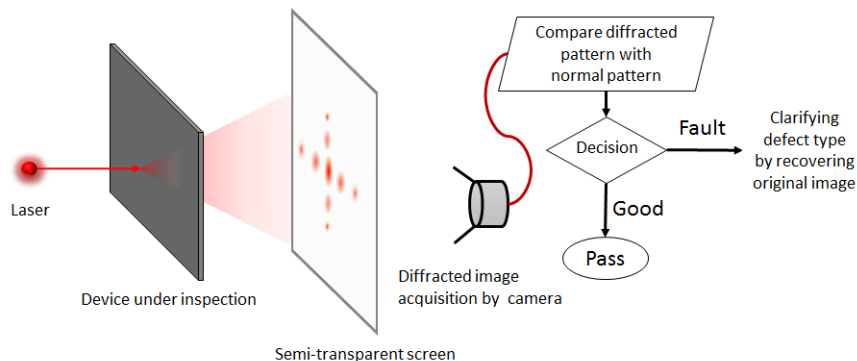


Fig. 2. Schematic illustration of the proposed inspection method.

미지의 변화를 알아내는 계산만 필요하기 때문에 실시간으로 빠르게 이루어질 수 있다. 이미지의 복원은 회절 이미지로부터 복원할 수 있으며, 더 확실한 확인이 필요한 경우 결함의 위치 좌표를 기억해 두고 카메라로 다시 촬영하는 방법이 쓰일 수 있다.

촬영된 회절 형상을 분석하여 기판의 결함 여부를 검출하는 과정에서 중요한 특성 중 하나는 검출하고자 하는 위치를 이동하여도 규칙성을 가지는 디스플레이 기판에 의한 회절 형상의 변화는 무시할 정도로 작다는 점이다. 그림 3에서와 같이 레이저 빛의 세기 분포 $u_1(\xi)$ 을 분산이 σ 이며 중심 위치가 μ 인 가우시안(Gaussian)으로 가정하고, 기판의 투과도 $u_2(\xi)$ 를 주기가 T 이며 폭이 T_1 인 구형파(square wave)로 가정하였다. 그러면 투과된 빛의 세기분포 $u(\xi)$ 는 두 식의 곱으로 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$u_1(\xi) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\xi-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (2)$$

$$u_2(\xi) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{\sin\left(\pi\frac{T_1}{T}n\right)}{\pi n} e^{jn\frac{2\pi}{T}\xi} \quad (3)$$

$$u(\xi) = u_1(\xi) \times u_2(\xi) \quad (4)$$

한편, 회절된 빛의 세기 분포 $U(x)$ 는 $u_1(\xi)$, $u_2(\xi)$ 각각의 푸리에 변환된 $U_1(x)$ 과 $U_2(x)$ 의 합성곱연산(convolution)에 의해서 식 (7)과 같이 얻을 수 있다.

$$U_1(x) = e^{j2\pi x\mu} e^{-2(\pi\sigma x)^2} \quad (5)$$

$$U_2(x) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{\sin\left(\pi\frac{T_1}{T}n\right)}{\pi n} \delta\left(x - \frac{n}{T}\right) \quad (6)$$

$$U(x) = U_1(x) \otimes U_2(x) \quad (7)$$

식 (2)와 식 (5)로부터 알 수 있듯이 검출위치를 옮기기 위해 μ 값을 이동할 경우, $U_1(x)$ 의 위상정보에 영향을 미치게 된다. 이는 최종적인 회절패턴 $U(x)$ 에 영향을 미치며 이는 식 (7)과 같이 계산될 수 있다.

여기서 레이저 입사광의 직경이 충분히 커서 푸리에 변환된 $U_1(x)$ 의 폭이 충분히 작아 $U_2(x)$ 와 합성곱 되었을 때

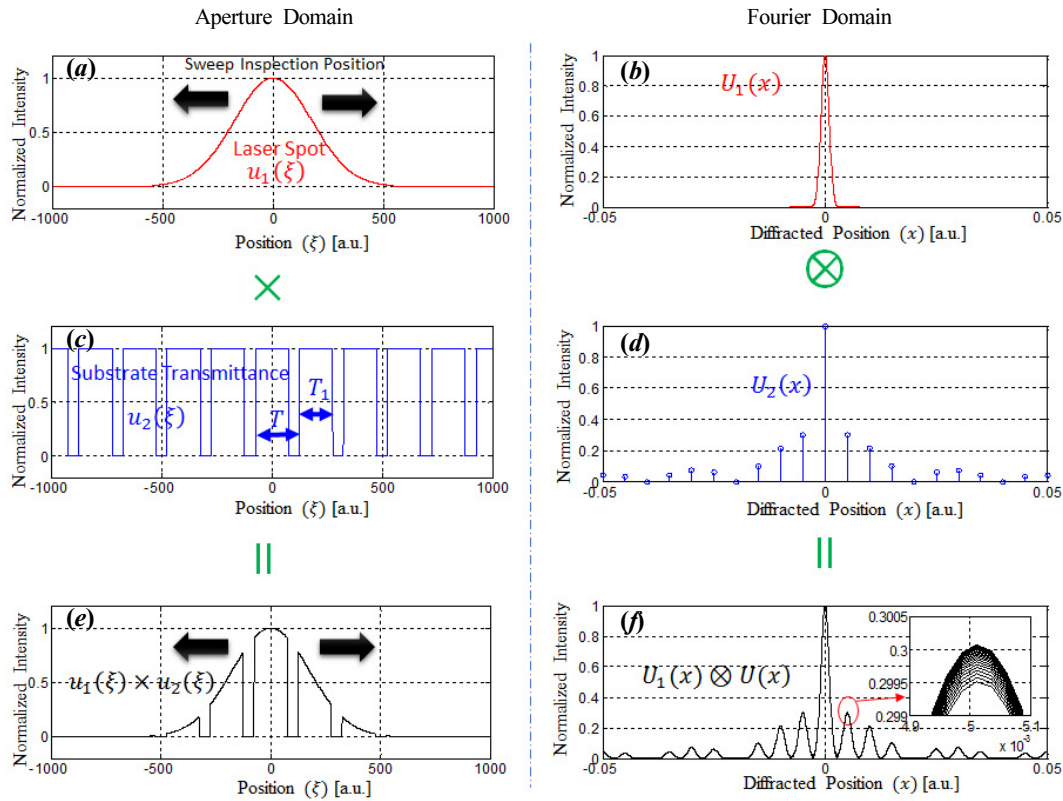


Fig. 3. Illustration of diffracted light intensity variation caused by sweeping of inspection position. (a) and (b) shows Gaussian assumed laser spot and its Fourier transformed intensity. (c) and (d) shows the substrate transmittance and its Fourier transformed intensity. (e) and (f) shows transmitted light intensity through substrate and its Fourier transformed intensity. Inset graph of (f) show the accumulation of intensity profiles during sweep to see the amount of pattern variation while sweeping.

인접한 패턴과 영향을 미치지 않아야 한다. 이웃하는 패턴과의 간섭정도는 $U_2(x)$ 의 한 주기만큼 위치에서의 크기인 식 (8)의 크기 이하로 예상할 수 있다.

$$e^{-2\left(\pi\sigma\frac{1}{T}\right)^2} \quad (8)$$

그림 3은 패턴 분포 $u_2(\xi)$ 의 주기 $T=200$ [a.u.], 펄스 폭 $T_1=150$ [a.u.]인 경우의 기판에 대해 레이저 빛 분포 $u_1(\xi)$ 의 반치전폭(FWHM: Full width half maximum)이 패턴 주기 T 의 2배가 되는 경우($\sigma = \frac{FWHM}{(2\sqrt{2\ln 2})}$)를 나타내고 있다. 그림 3의 (f)는 레이저의 위치를 이동시키며 패턴분포를 추적하여 그린 그림이며 레이저의 위치 이동이 최종적인 회절패턴에 얼마나 영향을 미치는지를 보여주고 있다. 첫번째 피크에서 상대적인 크기 변동은 대략 0.2% 정도였다. 즉, 레이저 입사광의 직경이 기판 패턴 주기의 2배인 경우 레이저 위치변동에 따른 첫번째 피크의 패턴 변화는 0.2%이하로 예상할 수 있다. 레이저 입사광이 너무 큰 경우에는 결함에 의한 빛의 영향세기와 비교하여 정상적인 빛의 세기가 커지기 때문에 결함 검출의 정밀도가 떨어진다. 따라서, 레이저 입사광의 크기는 최소한으로 하되 앞의 계산에 의한 간섭을 고려하여 줄여야 한다.

레이저 위치 이동이 회절패턴 변화에 매우 작은 영향을 미친다는 점은 제안하는 검출방법에 장점을 제공한다. 그것은 검출하고자 하는 위치를 이동하여도 규칙성을 가지는 디스플레이 기판에 의한 회절 형상은 항상 그대로 라는 점이다.

즉, 검출하고자 하는 기판의 위치를 실시간으로 이동할 때 정상적인 기판이라면 회절 패턴이 항상 같게 되므로 회절 형상이 변하는 것만으로 결함이라고 판단할 수 있다는 것을 의미한다. 따라서 결함을 판단하는 알고리즘을 매우 단순하게 할 수 있다.

그림 4는 제안하는 결함 검출 방법을 전산 모사를 통해 검증해 보기 위한 디스플레이 기판의 예를 보여주고 있다. (a)는 정상적인 디스플레이 기판을 가정하였고, (b)는 기판위에 이물질로 오염이 된 경우를 (c)는 기판이 긁힌 경우를 가정하고 있다.

이 기판을 그림 2와 같이 레이저에 노출시켜 회절 형상을 얻으면 각각 그림 5의 (a), (b), (c)와 같다. 이때, 레이저의 파장은 650 [nm]로 가정하였으며 기판과 회절 형상의 이미지를 얻는 스크린 사이의 거리는 1 [m]로 가정하였다. 정상적인 경우를 가정한 디스플레이 패널의 회절 형상인 그림 4의 (a)의 경우와 비교하여 (b)와 (c)의 경우 회절 형상이 변화한 것을 볼 수 있으며 이 경우 결함이라고 판단을 하여 그 위치를 고배율의 카메라를 통해 자세히 확인하면 정확한 결함을 알 수 있게 된다.

한편, 이러한 고도의 광학계 사용에 따른 부담을 줄이기 위해 회절 형상으로부터 기판의 이미지를 복원할 수 있다. 이 경우 회절 형상을 획득하는 과정에서 손실된 위상정보를 추정하는 과정이 필요하며 변형된 게르츠베르그-삭스톤(Gerchberg-Saxton) 알고리즘을 통해 가능하다.^[21-23] 일반적으로 게르츠베르그-삭스톤 알고리즘은 원하는 회절 형상을 얻고자 할 경우 필요한 광원의 위상 변조 정보를 계산하기 위해 사용된다. 그러나 본 연구에서 하는 응용의 경우는 기판으로부터

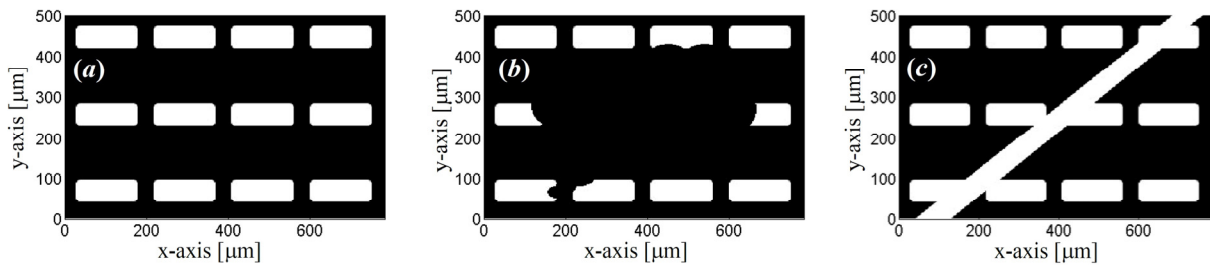


Fig. 4. Substrate image used for the simulation study (a) normal substrate, (b) substrate with dusted defect, (c) substrate with scratched defect.

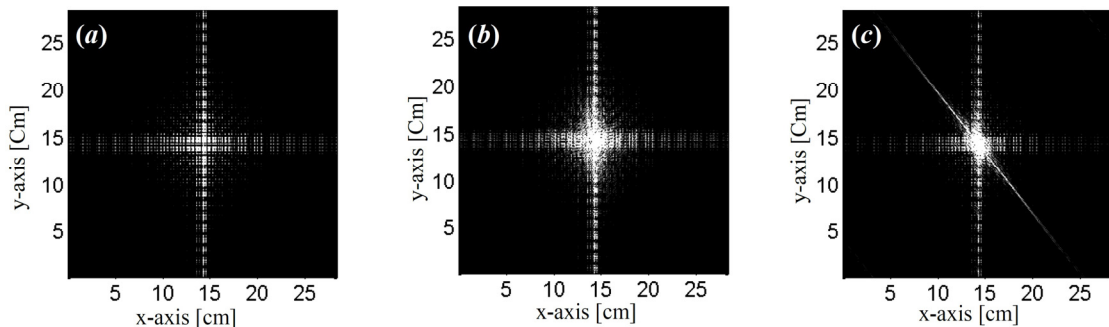


Fig. 5. Diffracted image of the (a) normal substrate, (b) substrate with dusted defect, (c) substrate with scratched defect.

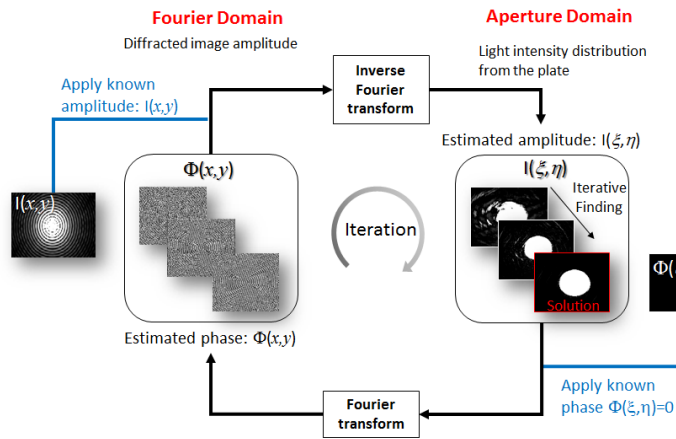


Fig. 6. Iterative retrieving process of the aperture image form the diffracted image by Gerchberg-Saxton algorithm.

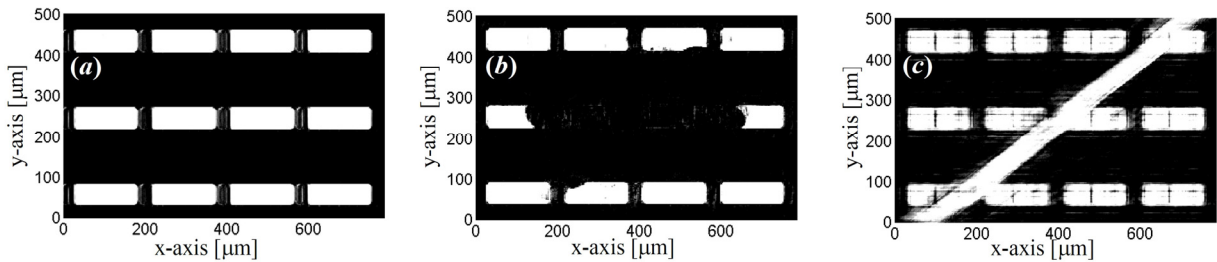


Fig. 7. Reconstructed image from the diffracted image by phase recovering algorithm: (a) normal substrate, (b) substrate with dusted defect, (c) substrate with scratched defect.

나오는 빛의 위상이 알려진 상태에서 그 세기분포 정보를 얻어야 하는 응용이다.

그림 6은 결함 검출을 위해 얻은 회절 형상의 세기분포로부터 게르츠베르크-사스톤 알고리즘을 응용하여 원래의 기판 이미지를 얻어내는 과정을 자세히 설명하고 있다. 먼저, 알려진 회절 형상의 세기분포와 임의의 초기값으로 지정된 위상정보를 역 푸리에 변환하여 기판을 통과한 빛의 세기분포를 추정한다. 그리고 추정된 기판의 빛 세기분포와 알려진 기판의 위상정보를 푸리에 변환하여 다시 회절 된 빛의 위상정보를 추정한다. 이 추정된 위상정보와 알려진 회절 평상으로부터 다시 기판의 세기분포를 추정하는 과정을 수렴할 때까지 반복 수행하여 최종적으로 기판의 이미지 정보를 얻는다.

그림 7은 이와 같은 과정을 거쳐 앞에 예시로 가정한 (a) 정상기판, (b) 오염된 기판 그리고 (c) 긁힌 기판에 대해 500번의 반복연산 수렴과정을 거친 복원 이미지를 보여주고 있다.

III. 검출 예

제안하는 결함 검출 방법에 대한 검출 예로 LCD 컬러필터 기판에 대해 실험적으로 검증해 하였다. 실험에 사용될 컬러필터의 뒷면에서 백색 빛을 비추고 카메라로 촬영하여 그 구조와 그 크기를 그림 8에 나타냈다. 그림 9는 실험에 사용될 정상적인 기판과 긁힘의 결함이 있는 기판의 사진을 보여주고 있다. 긁힘의 결함이 잘 보이도록 기판의 뒷면이 아닌 전

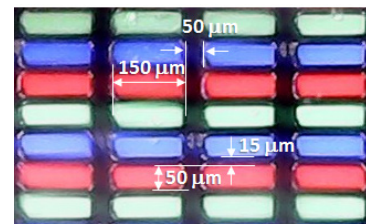


Fig. 8. Dimension of the color filter plate to be used for the experimental study.

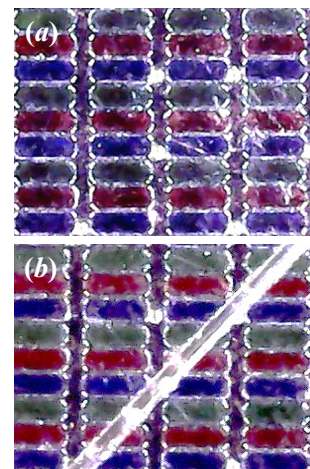


Fig. 9. Color filter substrates used for experiment: (a) normal substrate, (b) substrate with scratched defect.

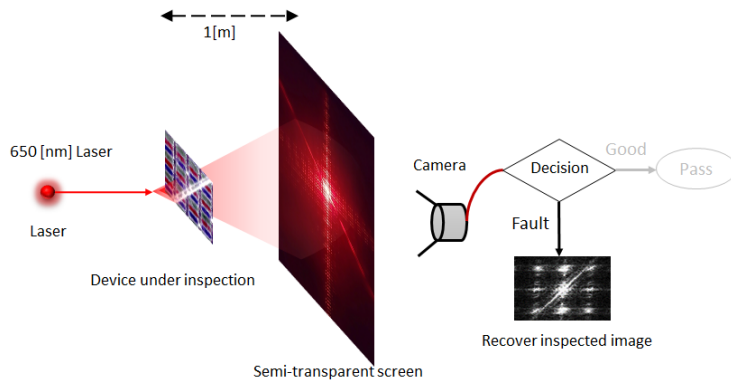


Fig. 10. Illustration of the experiment for the proposed inspection method.

면에서 백색 빛을 비추어 촬영하였다.

그림 10은 앞의 그림 9의 기관을 가지고 실시한 실험에 대한 이해를 돕기 위한 그림이다. 그림 9 (b)의 기관과 그 회절 형상, 그리고 그 것로부터 결함으로 판단한 뒤 그 이미지를 복원하는 모습을 보여주고 있다. 회절 형상을 얻기 위해 사용된 레이저 빛은 파장이 650 [nm]이며 검출 대상인 기관과 회절 형상을 얻는 스크린과의 거리는 1 [m] 로 하였다. 회절 형상의 이미지의 왜곡이 없도록 촬영하기 위해 반투명한 스크린을 활용하여 레이저 빛의 진행과 직선상에 카메라를 배치하여 촬영하였다.

그림 11은 실험을 통해 촬영된 회절 형상으로 (a)는 정상 패턴의 경우이며 (b)는 굽힘의 결함이 있는 경우이다. 기관을 실시간으로 이동하면서 회절 형상을 관찰한 결과 레이저가 정상적인 기관을 비추는 경우는 회절 형상이 항상 그림 11의 (a)와 동일한 형상으로 아무런 변화가 없었다. 실험에

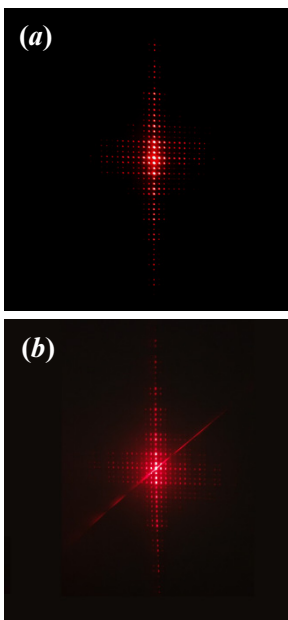


Fig. 11. Experimentally measured diffracted image of the (a) normal substrate, (b) substrate with scratched defect.

사용된 레이저의 직경은 대략 1200 [μm]로 패턴 주기의 6배 정도의 크기로 검출 위치의 변화로 인한 패턴의 상호간섭에 의한 영향 $e^{-2(\pi\sigma\frac{1}{T})^2}$ 는 10^{-56} 수준으로 무시할 수준이었다. 따라서 레이저 위치의 변화에 따른 패턴의 변화는 무시할 수 있었다.

실험에 사용된 결함의 크기는 (b)와 같이 패턴의 주기를 T 라고 할 때 T/4 수준인 대략 50 [μm] 수준 두께의 선 모양으로 하였다. 이때, 결함이 있는 위치에 레이저가 비추는 경우 회절 형상이 변하는 것을 확인할 수 있었다. 기존 참고문헌 [18]의 푸리에 변환을 이용한 결함 검출 방법의 경우 250 [μm] 주기의 격자로 실험했을 때, 격자 주기 수준 크기의 결함은 형태를 알아볼 수 없는 이미지로 되었지만 본 연구의 제안하는 방법의 경우 그림 11의 (b)에서와 같이 50 [μm] 결함에 의한 회절 형상의 선명한 변화를 통해 결함을 검출할 수 있었다.

다른 위치의 결함을 검출하는 동안 결함의 종류를 확인하기 위해 이미지를 복원할 수도 있다. 그림 12는 복원된 이미지를 보여주고 있다. 본 실험의 경우 816×459 픽셀의 이미지의 500번 푸리에 변환 반복 수행을 위해 Intel(R) Core(TM) i5-2500 CPU @ 3.300GHz 프로세서를 장착한 개인용 컴퓨터를 이용했을 때 평균 20초정도의 복원시간이 걸렸다. 참고로 레이저의 파장이 650 [nm] 이므로 빛은 대부분 붉은색의 컬러필터의 개구로 통과하므로 복원된 기관의 이미지는 붉은색 컬러필터를 통과하는 빛의 세기분포가 된다. 필요한 경

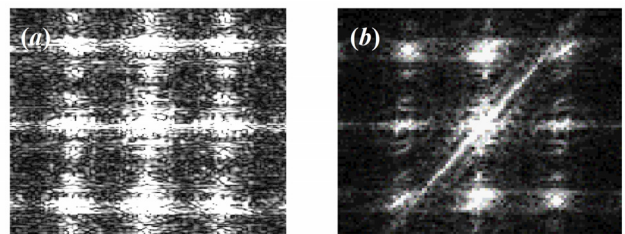


Fig. 12. Reconstructed image from the experimentally measured diffracted image by phase recovering algorithm: (a) normal substrate, (b) substrate with scratched defect.

Table 1. Comparisons between conventional methods and the proposed method

Inspection method	Resolution	Speed	Complexity
Proposed method	Medium	Fast	Simple
Signal processing from microscope image [1-14]	High	Slow	Complex
Ultrasonic [15-17]	Low	Fast	Simple
Optical domain signal processing [18]	Low	Fast	Simple

우 녹색과 파란색의 경우는 녹색 레이저와 파란색 레이저를 통해 결함을 따로 검출 해야 한다. 여러 개의 레이저를 사용 해야 하는 등의 단점이 될 수도 있으나 정밀한 검사를 할 수 있다는 장점도 될 수 있다.

기존의 결함 검출 방법들과 비교하여 제안하는 방법의 장 단점을 표 1에 정리하였다. 촬영된 이미지를 신호 처리하여 결함을 검출하는 기존의 방법과 비교해 제안하는 방법의 장점은 빠른 속도와 장비의 단순성이다. 해상도면에서 다소 떨어질 수 있으나 이는 필요할 경우 결함의 위치를 촬영하여 보완할 수 있다. 그 이외에 초음파나 광학적 신호처리를 활용한 결함 검출방법들과 비교할 때는 해상도 면에서 큰 장점을 가진다고 할 수 있다.

IV. 결론

본 논문에서는 규칙적인 배열 형상을 가지는 디스플레이 기판에 적용될 수 있는 레이저 회절 형상 분석을 통한 결함 검출 방법을 제안하였다. 제안하는 방법은 고도의 광학계를 이용한 근거리 촬영이 필요 없기 때문에 기판에 손상을 줄 우려가 적으며, 회절 형상의 변화만으로 결함의 유무를 판단할 수 있기 때문에 단순한 알고리즘으로 구현이 가능한 점을 밝혔다. 또한, 게르츠베르그-삭스톤 알고리즘을 활용하여 기판 형상 이미지가 복원을 통해 결함의 종류를 알아낼 수 있음을 보였다. 이러한 장점들로 인해 제안하는 결함 검출 방법은 기존의 고도의 광학계 촬영과 많은 계산 량의 실시간 영상신호처리를 통한 검출 방법을 보완하거나 대체할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 2014년 울산과학대학교 교내학술연구비 지원에 의해 수행됨.

References

1. C. F. J. Kuo, K. C. Peng, H. C. Wu, and C. C. Wang, "Automated inspection of micro-defect recognition system," *Optics and Lasers in Engineering* **70**, 6-17 (2015).
2. Y. G. Cen, R. Z. Zhao, L. H. Cen, L. H. Cui, Z. J. Miao, and Zhe Wei, "Defect inspection for TFT-LCD images based on the low-rank matrix reconstruction," *Neurocomputing* **149**, 1206-1215 (2015).

3. J. H. Kim, S. Ahn, J. W. Jeon, and J. E. Byun, "A high-speed high-resolution vision system for the inspection of TFT LCD," *IEEE International Symposium of Industrial Electronics (Pusan, Korea, 2001)*, pp. 101-105.
4. D. M. Tsai, Y. H. Tseng, and W. Y. Chiu, "Surface defect detection in low-contrast images using basis image representation," *14th IAPR International Conference on Machine Vision Applications (Tokyo, Japan, May, 2015)*, pp. 186-189.
5. V. A. Sindagi and S. Srivastava, "OLED panel defect detection using local inlier-outlier ratios and modified LBP," *14th IAPR International Conference on Machine Vision Applications (Tokyo, Japan, May, 2015)*, pp. 214-217.
6. J. H. Kim, T. Y. Lee, and Y. H. Ko, "Self-reference PCSR-G method for detecting defect of flat panel display," *Journal of Korea Multimedia Society* **18**, 312-322 (2015).
7. D. M. Tai, S. T. Chuang, and Y. H. Tseng, "One-dimensional-based automatic defect inspection of multiple patterned TFT-LCD panels using Fourier image reconstruction," *International journal of production research* **45**, 1297-1321 (2007).
8. H. I. Son and M. H. Oh, "Real-time automatic inspection of macro defects in in-line TFT fabrication process," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering* **226**, 178-183 (2011).
9. K. M. Lee, M. S. Chang, and P. Park, "Periodic comparison method for defects inspection of TFT-LCD panel," *Proceedings of the 7th WSEAS International Conference on Robotics, Control & Manufacturing Technology (Hangzhou, China, April, 2007)*, pp. 279-283.
10. M. H. Wu, C. S. Fuh, and Hsien-Yei Chen, "Defect inspection and analysis of color filter panel," *Image and Recognition* **6**, 74-90 (2000).
11. J. J. Lee, K. H. Lee, C. D. Chung, K. H. Park, Y. B. Park, and B. G. Lee, "Pattern elimination method based on perspective transform for defect detection of TFT-LCD," *Journal of Korea Multimedia Society* **15**, 784-793 (2012).
12. D. C. Tseng, I. L. Chung, P. L. Tsai, and C. M. Chou, "Defect classification for LCD color filters using neural-network decision tree classifier," *International Journal of Innovative Computing, Information and Control* **7**, 3695-3707 (2011).
13. S. H. Huang and Y. C. Pan, "Automated visual inspection in the semiconductor industry: A survey," *Computers in industry* **66**, 1-10 (2015).
14. K. Amano, S. Yoshimoto, M. Miyatake, and T. Hirayama, "Basic investigation of noncontact transportation system for

- large TFT-LCD glass sheet used in CCD inspection section,” *Precision Engineering* **35**, 58-64 (2011).
15. M. F. Shirazi, K. Park, R. E. Wijesinghe, H. Jeong, S. Han, P. Kim, M. Jeon, and J. Kim, “Fast industrial inspection of optical thin film using optical coherence tomography,” *Sensors* **16** 1598 (2016).
 16. I. Arias, and J. D. Achenbach, “A model for the ultrasonic detection of surface-breaking cracks by the scanning laser source technique,” *Wave Motion* **39**, 61-75 (2004).
 17. K. Kimoto, S. Ueno, and S. Hirose, “Image-based sizing of surface-breaking cracks by SH-wave array ultrasonic testing,” *Ultrasonics* **45**, 152-164 (2006).
 18. D. S. Yoon and S. W. Kim, “Rapid defect inspection of display device with optical spatial filtering,” *International Journal of the Korean Society of Precision Engineering* **1**, 56-61 (2000).
 19. J. W. Goodman, “Introduction to Fourier optics,” 2nd Edition, Mcgraw-Hill Internal editions (1996).
 20. M. Born and E. Wolf, “Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light,” Cambridge University Press (1997)
 21. R. W. Gerchberg and W. O. Saxton, “A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictures,” *Optik* **35**, 237 (1972).
 22. M. Guizar-Sicairos and J. R. Fienup, “Image reconstruction by phase retrieval with transverse translation diversity,” *Proc. of SPIE* **7076**, 70760A (2008).
 23. Y. Shechtman, Y. C. Eldar, O. Cohen, H. N. Chapman, J. Miao, and M. Segev, “Phase retrieval with application to optical imaging: a contemporary overview,” *IEEE signal processing magazine* **32**, 87-109 (2015).