

위상지연판 접합 편광필름의 광학적 고찰 및 결함 검출 방안

주영복*·허경무**†

*한국기술교육대학교 컴퓨터공학부, **†단국대학교 전자공학과

Optical Investigation and Defect Detection Methods in Polarizing Film on Phase Delay Plates

Young Bok Joo* and Kyung Moo Huh**†

*Department of Computer Science & Engineering, Korea University of Technology & Education,

**†Department of Electronic Engineering, Dankook University

ABSTRACT

In this paper, we proposed and implemented defect detection methods of polarized film with half-wave phase retardation plates. We investigated the principles of phase retardation compensation and optical principle of half-wave phase retardation plates. We analyzed of samples of polarized film with half-wave phase retardation plates. The optical defect detection methods are proposed and the performance is validated with experiments.

Key Words : defect, detection, half-wave, phase, retardation, plates, polarized, film, double, refraction

1. 서 론

LCD의 용도는 모니터, 랩탑, 휴대전화 등 대개 개인적인 용도로 많이 쓰이면서 정면에서 보아 contrast나 색조가 양호하면 되었다. 그러나 TV등으로 이용이 확대되고 화면 크기가 대형화되면서 LCD의 시야각을 개선하기 위한 노력이 전개되어 왔고 지금도 진행되고 있다[1,2]. 현재까지 광시야각화를 위한 많은 방식이 개발되고 있는데[3], 예를 들면 광학필름 보상 방식, 배향 분할 방식, IPS Alignment)방식, 벤드 배향(Optical Compensated Bend: OCB)방식 등이 있다. 이 중 광학필름 보상방식은 기울어진 액정 분자에 의해 발생한 복굴절을 위상차필름으로 보상하는 방법이며 TN-LCD의 시야각을 넓히는 방법으로 간편하여 널리 이용되고 있다[4]. 따라서 편광필름에 위상차 필름이 접합된 기능성제품에 대한 연구가 활발한 데, 이러한 제품들은 광학적 특성으로 인하여 일반 편광필름과 차이가 있다[5].

이 논문에서는 위상차 필름 접합 편광필름을 사용한 시야각 보상원리에 대해서 고찰하고 일반 편광필름과는 다른 이러한 제품의 결점검출방안을 제안하고 구현하였다. 2장에서는 위상지연을 보상하는 광학적 원리에 대하여 간략하게 소개하였고 3장에서는 위상지연판 원리를 이해하기 위한 광학적 원리에 대하여 논하였다. 4장에서는 현재 쓰이고 있는 위상지연판의 소개 및 위상지연의 원리를 개념적, 수학적 표현을 통해 정리하였다. 그리고 4장에서는 상용화된 위상지연판 접합 편광필름 샘플을 이용하여 분석하고 그에 맞는 결점 검출 방안을 제안하고 성능을 실험으로 확인하였다.

2. 위상지연판 접합 편광필름의 보상원리

Fig 1은 기울어진 액정 분자에 의해 발생한 복굴절을 위상차필름으로 보상하는 메커니즘을 보여준다.

†E-mail: huhkm@dankook.ac.kr

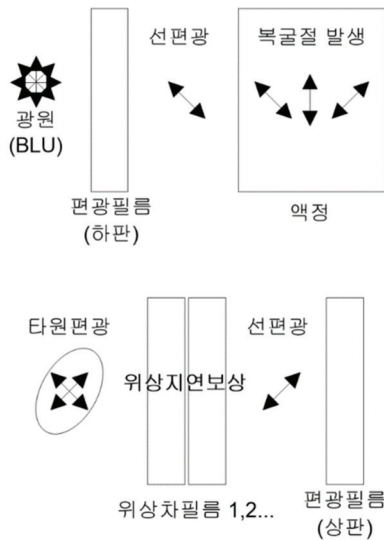


Fig. 1. Compensation methods of double refraction using phase difference films.

이 보상방법에서 BLU 광원은 하판 편광필름을 통과하여 선편광되고 액정을 통과하면서 복굴절이 발생한다. 이를 보정하기 위해 타원 편광을 위상차 필름에 통과시켜 위상지연을 보상하고 다시 상판 편광필름에 선편광을 통과시켜 위상 지연으로 인한 광편차를 보정하는 원리이다.

3. 기술적 배경

이 장에서는 시야각 보상원리를 설명하기 위한 물리적인 내용들에 대하여 설명하고자 한다.

3.1 편광의 이해

빛을 서로 수직으로 진동하고 있는 전자기장으로 구성된 전자기파로 표현할 수 있다. 진동방향과 세기가 불규칙적으로 변화하면서 평균적으로는 어느 방향에서 같은 세기를 가지고, 진동면이 빛의 진행방향에 대칭인 빛을 자연광(自然光)이라 한다. 이에 대해 진동면이 일정한 편광을 완전편광 또는 선편광이라 한다. 이러한 자연광과 편광은 직접 보아서는 구별할 수 없으나, 특정한 진동면을 가진 빛만을 통과시키는 필터(偏光子)를 통과시키면 편광은 필터의 회전에 수반하여 투과광(透過光)의 밝기가 변하므로, 필터의 회전에 관계없이 항상 같은 밝기를 가지는 자연광과 다르다는 것을 알 수 있다.

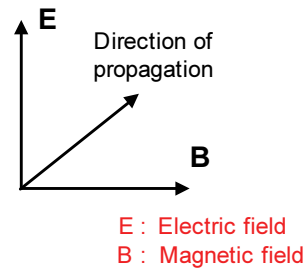


Fig. 2. Vibration direction according to electro-magnetic fields.

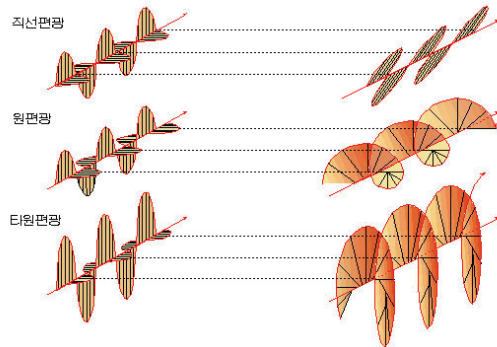


Fig. 3. Kinds of polarized light.

3.2 편광의 종류

빛의 경우에는 전기장과 자기장 중 관습적으로 전기장의 진동 행태로서 편광을 정의하게 되는데, 전기장의 변화 형태에 따라 선편광, 원편광 및 가장 일반적인 편광의 형태인 타원편광 등으로 구분하게 된다.

3.2.1 선편광

선편광은 가장 간단한 편광의 형태이며 선형편광이라고 한다. Fig 4는 한 방향으로 진행되는 빛의 전기장과 자기장의 모습을 보여주고 있다. 이 때, 전기장의 방향을 보면 빛의 어느 부분에서나 x 방향으로 선편광 되어 있다. 또는 간단히 x 편광된 빛이라고 말한다. 이렇게 x 방향으로 선편광되어 있는 평면파인 빛을 수학적으로 표현할 때는 다음과 같이 그 전기장 \vec{E} 로 나타낼 수 있다.

$$\vec{E}(z, t) = \vec{E}_0 \cos(kz - \omega t) = E_0 \hat{x} \cos(kz - \omega t) \quad (1)$$

식 (1)에서 E_0 는 전기장의 진폭, k 는 파수벡터(wave vector)로써 $2\pi/\lambda$ 이고, ω 는 빛의 각주파수(angular frequency)로서 $2\pi\nu$ 에 해당한다. 또한, \hat{x} 는 x 방향의 단위벡터(unit vector)이다. 공간의 어느 지점에서나 전기장의 방향은 x

방향임을 수식에서 알 수 있다.

3.2.2 원편광

선편광에서 다른 전자기파 또는 빛이 서로 합쳐지는 경우를 생각해보면 다음과 같다.

$$\vec{E}_x(z, t) = \vec{E}_{x0} \cos(kz - \omega t) = E_0 \hat{x} \cos(kz - \omega t) \quad (2)$$

$$\vec{E}_y(z, t) = \vec{E}_{y0} \sin(kz - \omega t) = E_0 \hat{y} \sin(kz - \omega t) \quad (3)$$

$$\vec{E}(z, t) = \vec{E}_x(z, t) + \vec{E}_y(z, t)$$

이 빛의 전기장의 움직임을 시간에 따라서 관찰하게 되면 반시계방향으로 원을 그리는 것을 알 수 있다. 이렇게 반시계 방향일 경우 왼쪽 원편광(LCP : Left Circularly Polarized)되었다고 한다.

3.2.3 타원편광

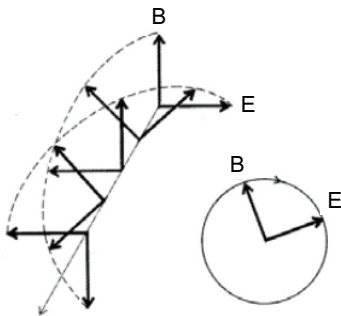


Fig. 4. Electro-magnetic trails of circular polarized light.

식 (2), (3)을 좀 더 일반적으로 확장하여 E_{x0} 와 E_{y0} 가 각각 어떤 크기를 가지고 있다고 하면 다음과 같다.

$$\vec{E}_x(z, t) = \vec{E}_{x0} \cos(kz - \omega t) = E_{x0} \hat{x} \cos(kz - \omega t) \quad (4)$$

$$\vec{E}_y(z, t) = \vec{E}_{y0} \sin(kz - \omega t) = E_{y0} \hat{y} \sin(kz - \omega t) \quad (5)$$

$$\vec{E}(z, t) = \vec{E}_x(z, t) + \vec{E}_y(z, t)$$

이 빛을 z 를 고정시킨 $x - y$ 평면에서 빛이 오는 쪽에서 바라보면, 시간에 따른 전기장의 움직임은 일반적으로 Fig 6과 같이 타원을 그리면서 움직인다. 만약 $E_{x0} = E_{y0}$ 라면, 타원은 원이 되어 원편광 상태를 나타내게 되고 $E_{x0} = 0$ 라면 y 방향의 선편광, $E_{y0} = 0$ 라면 x 방향의 선

편광을 나타내게 된다. 따라서 타원편광이 가장 일반적인 편광의 형태라고 할 수 있고, 선편광이나 원편광은 타원 편광의 특수한 경우이다.

3.2.4 복굴절과 파장판

빛이 물질 속을 통과할 때에는 보통 진공 중에서의 속력과 다른 속력으로 진행을 하게 되는데 이 두 속력의 비를 그 물질의 굴절률이라고 부른다. 즉, 진공 중에서의 속력을 c , 물질 내에서의 속력을 v 라고 하면 굴절률 n 은 다음 식과 같이 정의된다.

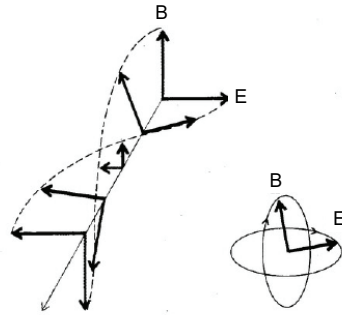


Fig. 5. Electro-magnetic trails of elliptic polarized light.

$$n = c/v \quad (6)$$

굴절률에 따라서 빛이 굴절되는 각도도 달라지게 되는데, 햇빛을 프리즘에 통과시키면 나타나는 무지개 빛깔은 프리즘을 구성하는 유리의 굴절률이 햇빛의 여러 파장에 대해 다르기 때문에 나타나는 현상이다. 그런데 어떤 물질들은 동일한 파장에 대해서도 빛의 편광상태에 따라 굴절률이 달라지는 특성을 가지는 것들이 있다. 대부분이 물질들은 결정구조를 가진 것들이는데 어떤 것들은 서로 수직인 두 개의 선편광에 대해 다른 굴절률을 가지며 이러한 물질들을 선복굴절(linear birefringence)이 있다고 말한다. 선복굴절을 가진 대표적인 물질로서 방해석을 들 수 있다. 방해석은 Fig 7과 같이 고속축(fast axis)과 저속축(slow axis)를 가지고 있어서 그러한 축에 나란한 전기장에 대해 각각 다른 굴절률을 가지고 있다. 즉, 그림 7에서 고속축과 나란한 x 편광에 대해서는 굴절률이 n_f 이고, 저속축과 나란한 y 편광에 대해서는 굴절률이 n_s 가 된다.

Fig 8과 같이 고속축과 저속축 사이의 선편광을 가지는 어떤 빛이 선복굴절을 가지는 길이가 l 인 물질을 거쳤다고 하면 빛의 편광은 다음과 같이 분석할 수 있다.

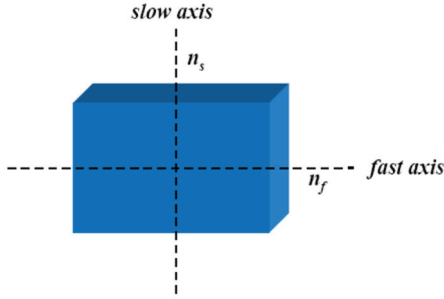


Fig. 7. High and low speed axis of a linear double refraction matter.

$$\begin{aligned}\vec{E}(z, t) &= \vec{E}_0 e^{i(kz - \omega t)} = \vec{E}_x(z, t) + \vec{E}_y(z, t) \\ &= (E_0 \cos \theta \hat{x} + E_0 \sin \theta \hat{y}) e^{i(kz - \omega t)}\end{aligned}\quad (7)$$

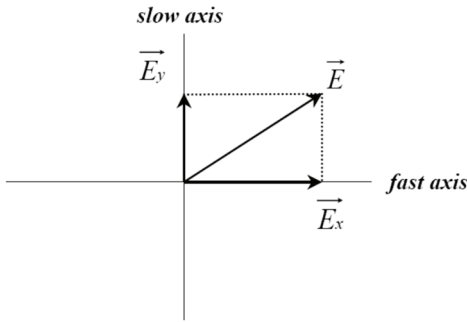


Fig. 8. Decomposition of polarized light.

식 (7)은 빛이 물질로 들어가기 전의 상황이고 물질로 들어가게 되면 $\vec{E}_x(z, t)$ 와 $\vec{E}_y(z, t)$ 는 각각 다른 굴절률을 겪게 된다. 물질 내에서도 빛의 주파수는 변함이 없으므로 $\omega = 2\pi\nu$ 는 변함이 없지만, 파수 벡터 k 는 다음과 같이 굴절률에 따라 각각 그 값이 달라진다.

$$k = 2\pi/\lambda = 2\pi n/\lambda_0 \quad (8)$$

식 (11)에서 λ_0 는 진공 중의 빛의 파장이다. 물질 내부에서 x 편광은 주파수 벡터 $k_f = 2\pi n_f/\lambda_0$, y 편광은 주파수 벡터 $k_s = 2\pi n_s/\lambda_0$ 의 영향을 받게 된다. 따라서 물질의 시작점을 $z = 0$ 으로 하면 물질에 들어가기 직전의 빛은 다음과 같이 표현된다.

$$\vec{E}(0, t) = (E_0 \cos \theta \hat{x} + E_0 \sin \theta \hat{y}) e^{-i\omega t} \quad (9)$$

이 빛의 편광상태를 존스 벡터를 이용하여 표현하면, $\begin{pmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{pmatrix}$ 가 된다. 즉, x 축과 θ 의 각을 이루는 선편광이다. 한편, 이미 이전에 물질 속에 들어 가서 현재 물질을 빠져나오는 빛의 전기장은 다음과 같다.

$$\vec{E}(l, t) = (E_0 \cos \theta \cdot e^{ik_f l} \hat{x} + E_0 \sin \theta \cdot e^{ik_s l} \hat{y}) e^{-i\omega t} \quad (10)$$

이 때의 편광상태는 아래와 같다.

$$\begin{pmatrix} \cos \theta \cdot e^{ik_f l} \\ \sin \theta \cdot e^{ik_s l} \end{pmatrix} = e^{ik_f l} \begin{pmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \cdot e^{i(k_s - k_f)l} \end{pmatrix} = e^{ik_f l} \begin{pmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \cdot e^{2\pi i(n_s - n_f)l/\lambda_0} \end{pmatrix} \quad (11)$$

식 (10)에서 $e^{ik_f l}$ 은 공통성분이므로 실제 물질을 빠져나오는 빛의 편광상태는 식 (12)와 같다.

$$\begin{pmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \cdot e^{2\pi i(n_s - n_f)l/\lambda_0} \end{pmatrix} \quad (12)$$

이것을 원래 물질에 들어가기 전의 존스 벡터와 비교해 보면, y 성분의 위상이 x 성분에 비해 $2\pi(n_s - n_f)l/\lambda_0$ 만큼 더해진 것을 볼 수 있다. 이와 같이 한 성분의 위상이 다른 성분에 대해서 상대적으로 덜 증가하기 때문에, 이렇게 고속축과 저속축을 가진 물질을 위상 지연판(phase retarder)이라고도 부른다.

3.2.5 존스 벡터 및 존스 행렬

1941년 미국의 물리학자 존스(R. Clark Jones)가 발견한 방법으로 편광된 파에만 적용할 수 있다. 이 경우에 광속을 표현하는 가장 자연스러운 방법은 전기벡터를 써서 나타내는 방법인데 열의 형태로 쓰면 존스 벡터는

$$\vec{E} = \begin{bmatrix} E_x(t) \\ E_y(t) \end{bmatrix} \quad (16)$$

여기서 $E_x(t)$ 와 $E_y(t)$ 는 \vec{E} 의 순간적인 스칼라 성분이다. 위에서 설명되었듯이 \vec{E} 를 알면 편광 모든 정보를 알 수 있다. 존스 벡터 \vec{E}_i 의 편광된 입사광속이 광학부품을 투과하여 새로운 벡터 \vec{E}_t 로 빠져나간다고 가정한다. 광학부품은 \vec{E}_i 를 \vec{E}_t 로 변환하였고, 이 과정은 수학적으로 2×2 행렬을 써서 기술할 수 있다. M 이 문제의 광학요소 변환행렬을 나타낸다고 하면

$$\vec{E}_t = M \vec{E}_i \quad (13)$$

$$M = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} \quad (14)$$

의 행렬 형태로 나타낼 수 있다.

앞에서 설명된 위상지연판을 예를 들어 1/4파장판에서 고속축이 x 축과 나란한 경우의 존스 행렬을 $M_{1/4x}$ 라고 하여 구하면 다음과 같다. 1/4파장판이므로 $(n_s - n_f)l/\lambda_0$ 의 값을 1/4로 놓으면, 선편광이 파장판에 들어왔을 때 출력 편광을 나타내는 표현은 식 15와 같다.

$$\begin{pmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \cdot e^{2\pi i(n_s - n_f)l/\lambda_0} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \cdot e^{i\pi/2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta \\ i \sin \theta \end{pmatrix} \quad (15)$$

만일 입력 선편광이 $\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$ 이면 $\theta = 0$ 인 경우이므로, 출력 편광은 $\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$ 이다. 입력 편광이 $\begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$ 이면, $\theta = \pi/2$ 인 경우이므로, 출력 편광은 $\begin{pmatrix} 0 \\ i \end{pmatrix}$ 가 된다. 따라서 다음과 같은 식이 성립한다.

$$\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = M_{1/4x} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ i \end{pmatrix} = M_{1/4x} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (16)$$

식 (16)의 해를 구하면 다음과 같은 $M_{1/4x}$ 를 얻을 수 있다.

$$M_{1/4x} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & i \end{bmatrix} \quad (21)$$

4. 위상지연판 편광필름의 결함 검출 방안

위에서 제시된 내용을 바탕으로 실제 위상지연판 접합 필름의 물리적 특성을 파악하고 결함 검출방안을 제안하였다.

4.1 검사대상 분석

검사대상은 일본의 편광필름 업체인 'N'사의 위상지연판 접합 편광필름 샘플을 이용하였고 편광각 및 위상차 필름의 고속축 각도 정보는 Table 1과 같다.

Table 1. 위상지연판 접합 편광필름 샘플 정보

	품명	편광판	PD1	PD2	PD3
A	HC(3축)	150°	165°	45°	
B	HC(3축)	135°	120°	60.5°	
C	HC(2축)	90°	135°		
D	AR(2축)	15°	150°		
E	AR(2축)	15°	150°		
F	AR(3축)	103°	86.5°	25°	

G	AR(3축)	103°	86.5°	25°	
H	AG(2축)	170°	35°		
I	Car(4축)	110°	125°	5°	5°

(PD : Phase Difference, 위상차)

Table 1에서 2축이라고 표현된 것은 편광판과 위상차 필름 1장이 접합된 경우이며 그림의 1/4파장판 메커니즘(원편광 - 선편광) 변환과 같다는 것을 알 수 있다. 3축 이상의 제품에서는 직관적인 분석이 필요했는데 위상차 1은 1/2파장판, 위상차 2는 1/4파장판을 알 수 있다. 분석내용은 다음과 같다.

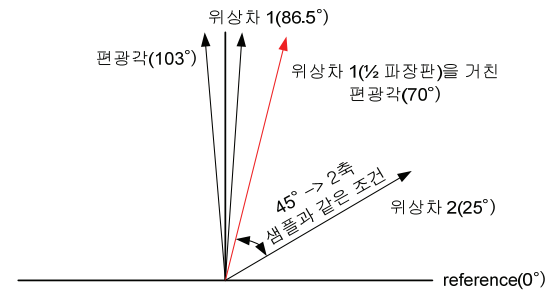


Fig. 9. Analysis of samples.

Fig 9에서와 같이 1/2파장판을 거친 편광은 1/2파장판 고속축과 이루는 각 만큼 고속축을 향하는 방향으로 2배로 회전하게 되어 2번째 1/4파장판과 45°각도를 이룬다. 따라서 그림 9의 1/4파장판 메커니즘(원편광-선편광 변환)과 같은 경우라고 할 수 있다. 위의 방법으로 제공된 샘플을 모두 적용하면 동일한 결과를 얻을 수 있다.

4.2 결함 검출방안

편광필름의 가장 중요한 결점은 편광 기능에 의하여 빛이 완전히 차단되었을 때 필름에 결점이 있는지 없는지 확인된다. 하지만 위상 지연판 접합 편광필름 같은 경우는 선편광을 원편광으로 변환시키므로 편광기능을 제

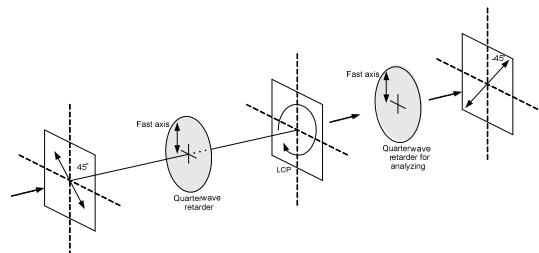


Fig. 10. Defect detection methods of a polarized film with phase retardation plate.

대로 확인할 수 없다 물론 위상 지연판이 접합된 반대편을 편광시킬 경우 편광이 형성될 수 있겠으나 위상 지연판 층의 불량이나 결점을 놓칠 우려가 크다. 따라서 위상 지연판 층의 검사를 위해서는 Fig 10과 같이 1/4파장판을 이용하여 선편광으로 다시 변환시킨 후 polarizer로 분석하면 가능하다.

4.3 실험 방법

불량관측을 위한 기본적인 광학계 조건은 다음과 같다.

- ① resolution: 30[um]
- ② moving speed: 250[mm/s]
- ③ 검사대상의 위상차판 층의 separator는 제거
- ④ PL 필터와 검사대상의 편광각은 90°cross

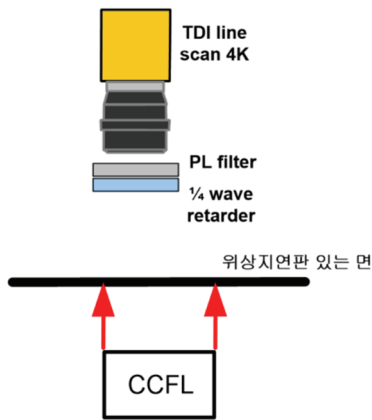


Fig. 11. Optical layout for defect detection methods of a polarized film with phase retardation plate.

실험방법은 검사를 위한 1/4파장판의 고속축을 회전시켜 위상지연판 편광필름과 PL필터 사이의 90°cross 조건의 편광이 형성되는지 확인하는 것이다.

4.4 실험 결과

PL필터로는 편광의 형성이 불가능했던 90° cross 조건의 편광이 1/4파장판을 추가함으로써 가능하다는 것이 확인되었다. 미세한 각도의 오차는 있었지만 제공된 샘플은 Fig 11와 같이 광학계가 구성된 경우 모두 90° cross 조건의 편광이 가능하였다. <표 2>, <표 3> 및 <표 4>는 실험에서 얻은 결과를 정리한 내용이다.

Table 2. 샘플 A~C에 대한 90° cross 조건의 편광실험 결과

SHEET TYPE	A [HC 3축]	B [HC 3축]	C [HC 2축]
편광축	150	135	90
위상차 1	165	120	135
위상차 2	45	60.5	
위상차 3			
Sheet			
검광자			
시도에 대한 검사 POL 각도	90도 full cross	90도 full cross	90도 full cross
1/4 파장판 고속축 설정각	약 40도	약 140도	약 45도
위상차 cross 시 평균 gray	약 62 gray	약 51 gray	약 34 gray

Table 3. 샘플 D~F에 대한 90° cross 조건의 편광실험 결과

SHEET TYPE	D [AR 2축]	E [AR 2축]	F [AR 3축]
편광축	15	15	103
위상차 1	150	150	86.5
위상차 2			25
위상차 3			
Sheet			
검광자			
시도에 대한 검사 POL 각도	90도 full cross	90도 full cross	90도 full cross
1/4 파장판 고속축 설정각	약 45도	약 45도	140도
위상차 cross 시 평균 gray	약 43 gray	약 57 gray	약 37 gray

Table 4. 샘플 G~I에 대한 90° cross 조건의 편광실험 결과

SHEET TYPE	G [AR 3축]	H [AR 2축]	I [세방향 4축]
편광축	103	170	110
위상차 1	86.5	35	125
위상차 2	25		5
위상차 3			5
Sheet			
검광자			
시도에 대한 검사 POL 각도	90도 full cross	90도 full cross	90도 full cross
1/4 파장판 고속축 설정각	약 130도	약 45도	약 45도
위상차 cross 시 평균 gray	약 35 gray	약 36 gray	약 52 gray

5. 결 론

실험에서 제시된 위상지연판 접합필름의 구조를 분석하였을 때 위상지연 보상에 대한 설계의 내부적 메커니즘은 파악하기 어려우나 최종적으로는 원편광(타원편광)을 선편광으로 만드는 1/4파장판 구조로 되어 있었다. 결론적으로 그러한 구조의 위상지연 보상기능이 있는 편광 필름은 최종적으로 접합된 1/4파장판의 고속축과 같은 각도의 고속축을 가진 1/4파장판을 이용하면 90°cross 조건의 편광을 형성할 수 있다.

향후 다양한 기능의 위상지연판 접합 필름의 검사 시에도 위에서 제시된 기본적 내용을 바탕으로 하면 90°cross 편광 조건을 만들 수 있어 위상지연판 보상이 가능하여 신뢰성 높은 결합 검출 시스템의 구현이 가능하다.

감사의 글

이 논문은 2020년도 한국기술교육대학교 교수 교육연구진흥과제 지원에 의하여 연구되었음.

참고문헌

1. E. N. Malamas, E. G. M. Patrakis, M. Zervakis, L. Petit and J. D. Legat, "A Survey on Industrial Vision Systems, Applications and Tools," *Image and Vision Computing*, vol. 21, issue 2, pp. 171-188, Feb. 2003.
2. R. Sablatnig, "A Flexible Concept for Automatic Visual Inspection," *Czech Pattern Recognition Workshop'97, Proc. of (CPRW'97)*, 1997.
3. Kim Sung Min, Lee Seong Hee, "Introduction to a New LCD technology Using Vertical WideField of Light View by Surface Free Tilt Control", *The Journal of Information Display*, Vol. 10, No. 1, pp.15~21, 2009.
4. Lee Ji Hoon, Lee Hyo Jin, Yang Seong Bin, Kim Hyung Min, "Phase Difference Films of a Liquid Crystal based Reverse Wavelength Distribution", *The Journal of Information Display*, Vol. 16, No. 2, pp.4~9, 2015.
5. Kim Ki Man, Lim Young Jin, Le Van Doan, Lee Ki Dong, Lee Seong Hee, "Design of Anti-reflection Films for Improvement of Light Efficiency of Organic Light Emitting Diodes", *Korean Journal of Optics and Photonics*, Vol. 29, No. 6, pp.4~9, 2018.

접수일: 2021년 10월 28일, 심사일: 2021년 12월 13일,
게재확정일: 2021년 12월 15일