

액정 디스플레이 시야각 향상을 위한 복합판의 편광특성 분석

류장위[†] · 김상열

아주대학교 분자과학기술학과
 ④ 443-749 경기도 수원시 영통구 원천동 산5

김용기

삼성전자첨단기술연구소
 ④ 442-380 수원시 영통구 원천동 339 번지

(2009년 6월 22일 받음, 2009년 7월 24일 수정본 받음, 2009년 7월 24일 게재 확정)

액정 디스플레이에서 시야각 향상을 위해 사용하는 보상판과 편광판을 접합한 복합판의 광축 틀어짐 오차와 보상판의 R_{in} (in-plane retardation), R_o (out-of-plane retardation)를 동시에 결정하는 새로운 방법을 제시하였다. 보상판은 광축이 임의의 기울임각과 방위각을 갖는 o -판으로 하였으며, 확장된 존스 행렬법에 기반한 광학모델을 도입하여 복합판의 편광특성을 분석하였다. 입사각 0도와 50도에서 시료의 방위각을 360도 회전시키며 투과된 빛의 편광상태를 각각 계산한 후, 타원법의 모델링 분석기법을 적용하여 광축 틀어짐과 복합판의 기울임각과 방위각들을 역방계산하였다. 이 방법은 편광판과 보상판을 접합한 후에도 복합판의 성능평가를 할 수 있어 제조공정단계를 줄여 제조 원가를 절감하는데 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

Polarization Analysis of Composite Optical Films for Viewing Angle Improvement of Liquid Crystal Display

Jang Wi Ryu[†] and Sang Youl Kim

Department of Molecular Science and Technology, Ajou University, Suwon 443-749, Korea

[†]E-mail: jangwisi@ajou.ac.kr

Yong Ki Kim

Samsung Advanced Technology Training Institute, Suwon 442-380, Korea

(Received June 22, 2009; Revised manuscript July 24, 2009; Accepted July 24, 2009)

We suggest a new method to determine the off-alignment error of the composite film, together with in-plane(R_{in}) and out-of-plane retardation(R_o) of the compensation film, simultaneously. The composite film consists of a polarizing film and a compensation film for improvement of viewing angle of a liquid crystal display. We regarded the compensation film as o -plate with its optic axis along an arbitrary direction. By using an extended Jones matrix method, the polarization characteristics of the composite film are examined. The calculated Fourier constants, (α, β) curves of the composite film as the azimuth angle is varied at the incident angles of 0° and 50°, respectively, are used to determine the axis misalignment, the tilt angle and the azimuth angle of the compensation film by adopting the linear regressional analysis technique. Since this method can be applied for the inspection of the composite film even after laminating the polarizing film and the compensation film, it will be useful for simplifying the manufacturing process and reducing the production cost of liquid crystal display panels.

Keywords: Liquid-crystal devices, Ellipsometry, Anisotropic media, Polarization

OCIS codes: (230.3720) Liquid-crystal devices; (120.2130) Ellipsometry and polarimetry, (260.1180) Anisotropic media (crystal optics); (260.5430) Polarization

[†]E-mail: jangwisi@ajou.ac.kr

I. 서 론

평판 디스플레이로써 가장 많이 사용되고 있는 액정 디스플레이(Liquid Crystal Display, LCD)에서 TV나 일부 고품질의 모니터에는 VA(Vertical Alignment), IPS(In-plane Switching) 등 시야각이 향상된 구동 방식을 사용하고 있으나 저가형이나 소형 디스플레이에서는 비교적 제작이 간편한 TN(Twisted-Nematic) 방식의 LCD를 많이 사용하고 있다. 이러한 TN-LCD는 액정에 의한 위상지연 차이가 시야각에 따라 달라지고 이로 인하여 화질이 저하된다. 이에 따라 시야각에 따른 액정의 위상지연 차이를 보상해 주기 위해 보상판을 편광판에 접합해서 사용하는 방법이 연구되어 왔다.^[1] 그러나 편광판과 보상판의 접합과정에서 편광판의 광축과 보상판의 축 틀어짐이 발생하여 빛샘이 증가하고 후공정에도 영향을 미치게 되므로 복합판의 축 틀어짐을 평가하는 방법이 관심을 끌고 있다.^[2] 한편 보상판 등의 제조현장에서 흔히 사용되는 R_{in} (in-plane retardation), R_{th} (out-of-plane retardation) 값들은 접합공정 이전의 보상판 상태에서 광축을 결정한 후, 빠른축과 느린축을 따라 시료를 기울이며 기울임각에 따른 위상지연을 측정하는 다음 이를 분석하여 결정한다.^[3] 그러나 공정단계를 줄이기 위해 편광판과 보상판을 접합한 상태에서 축 틀어짐의 정도와 보상판의 R_{in} , R_{th} 를 동시에 측정·분석 하는 방법이 요구되고 있지만 이러한 방법은 아직 알려져 있지 않다.

본 논문에서는 기존의 확장된 존스 행렬법^[4,6]을 사용하고 타원법의 모델링 분석법을 적용하여 복합판에 의한 투과광의 편광상태 변화를 해석함으로써 축 틀어짐 오차와 보상판의 R_{in} , R_{th} 들을 동시에 결정하는 새로운 방법을 제시한다.

II. 보상판의 광학적 특성

보상판은 시야각에 따른 액정의 위상지연차이를 보정하기 위한 핵심적인 편광소자로서 필름형태로 존재한다. 위치에 따른 위상지연값의 변화가 없어야 하는 보상판의 성능은 R_{in} , R_{th} 값으로 평가한다. R_{in} 은 면 방향의 위상지연값이며 R_{th} 는 면에 수직인 방향의 위상지연값인데 이들은 각각 $R_{in}=(n_x-n_y) \times d$, $R_{th}=(n_x+n_y)/2-n_z \times d$ 와 같이 정의한다. 여기에서 d 는 보상판의 두께, n_x , n_y , n_z 는 각각 x, y, z 축 방향의 주 굴절률을 의미한다.^[7] 단축특성을 가지는 위상지연판은 광축이 x-y 평면 상에 있는 ($n_x > n_y = n_z$, 또는 $n_x = n_z > n_y$) a-판, 광축이 z-축 상에 있는 ($n_x = n_y \neq n_z$) c-판, 또는 광축이 임의의 방향을 향하는 o-판으로 나눌 수 있다.

그림 1은 실험실 좌표계에서 x, y, z-축 및 각 방향의 주 굴절률을 나타낸 것이다. 보상판은 x-y 평면 상에 있고, 면에 수직인 방향으로 z-축이 설정되어 있다.

그림 2(a)와 같이 두께 d 인 이방성 매질의 광축을 z-축에 일치시켰을 때, 이상굴절률 n_e 는 z-축과, 정상굴절률 n_o 는 x-y 평면과 나란하게 진동하는 전기장의 굴절률이다. 이때 $n_x = n_y = n_o$, $n_z = n_e$ 가 되어 $R_{in} = 0$, $R_{th} = (n_o - n_e) \times d$ 가 된다. 일반적으로 R_{in} , R_{th} 는 이방성 물질 고유값을 갖지만, 본 연구에서는

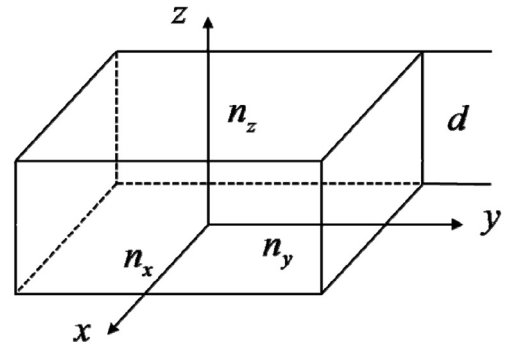


Fig. 1. Principal indices of refraction in the xyz-coordinate.

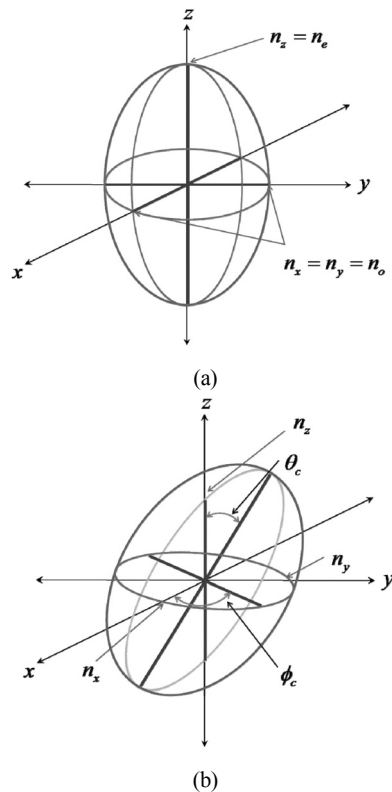


Fig. 2. Index ellipsoid of a uniaxial medium in the xyz-coordinate.

In the principal coordinate, the optic axis of the uniaxial medium is parallel to (a) z-axis and (b) the direction where the tilt angle θ_c is the angle between the optic axis and z-axis and the azimuth angle ϕ_c is the angle between x-axis and the projection of the optic axis onto x-y plane.

실험실좌표계에서 계산된 R_{in} , R_{th} 만을 고려한다. 광축의 방향이 그림 2(b)와 같이 기울임각 θ_c , 방위각 ϕ_c 일 때, 즉 광축이 z-축에 대해서 θ_c 의 각도를 가지고 있으며, x-y 평면 상에서는 x-축으로부터 ϕ_c 만큼 회전해 있을 때, n_x , n_y , n_z 는 θ_c 와 ϕ_c , n_o , n_e 의 함수로 다음과 같이 표현할 수 있다. 여기에서 빛의 진행방향은 z-축 방향이다. 한편 빛의 진행방향을 z-축으로 고정하고 광축의 방향이 기울임각 θ_c , 방위각 ϕ_c 가 되도록 시료를 회전시키는 것과 시료를 고정시키고 입사광을 반대로 회전시키는 것은 투과광의 편광상태 변화에 있어서

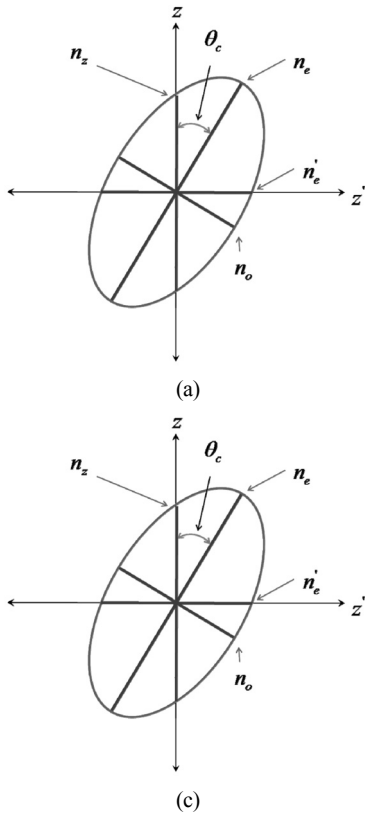


Fig. 3. z' -axis is the projection of the optic axis on the x - y plane. Section of the index ellipsoid at (a) z - z' plane and (b) at x - y plane. The imaginary extra-ordinary refractive index, n_e' , on the x - y plane.

동일한 작용을 한다.

그림 3은 이방성 매질의 광축이 기울임각 θ_c , 방위각 ϕ_c 인 경우 n_x, n_y, n_z 을 기하학적으로 표현한 것이다. 그림 3(a)는 광축을 x - y 평면상에 투영한 방향인 z' 축과 투영된 굴절률 n_e', n_z, θ_c 의 관계를, 그림 3(b)는 x - y 평면상에서 n_e', n_x, n_y, ϕ_c 의 관계를 보여준다. 그림 3의 관계를 바탕으로 계산한 n_x, n_y, n_z 는 식 (1)과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{1}{n_x^2} &= \frac{\cos^2 \phi_c}{n_e'^2} + \frac{\sin^2 \phi_c}{n_o^2} \\ \frac{1}{n_y^2} &= \frac{\sin^2 \phi_c}{n_e'^2} + \frac{\cos^2 \phi_c}{n_o^2} \\ \frac{1}{n_z^2} &= \frac{\cos^2 \theta_c}{n_e^2} + \frac{\sin^2 \theta_c}{n_o^2} \\ \frac{1}{n_e'^2} &= \frac{\sin^2 \theta_c}{n_e^2} + \frac{\cos^2 \theta_c}{n_o^2} \end{aligned} \quad (1)$$

그림 4는 보상판의 광축이 변함에 따라 즉 기울임각 θ_c 와 방위각 ϕ_c 의 변화에 따라 R_{in}, R_{th} 가 어떻게 변하는지를 보여주는 그래프이다. 사용된 보상판의 광학상수는 정상굴절률과 이상굴절률이 각각 $n_o=1.5, n_e=1.55$, 소광계수는 모두

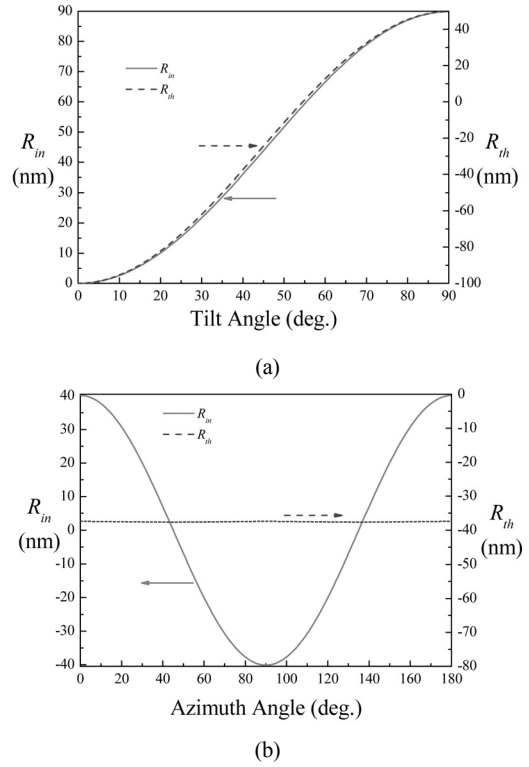


Fig. 4. In-plane retardation (R_{in}) and out-of-plane retardation(R_{th}) curves as (a) tilt angle and (b) azimuth angle of the optic axis of the compensation film is varied.

$k_o=k_e=0$, 두께 $d=2 \mu\text{m}$ 이며, 그림 4(a)는 방위각이 13도인 경우 광축을 면에 수직인 방향에서 면에 나란한 방향으로 기울이는 경우의 R_{in}, R_{th} 를, 그림 4(b)는 기울임각이 40도 인 경우, x -축을 180도 회전시킴에 따른 R_{in}, R_{th} 의 변화를 보여주고 있다. 그림 4(a)에서 알 수 있듯이 광축이 면에 수직인 경우 $R_{in}=0, R_{th}=-100 \text{ nm}$ 가 되고, 기울임각이 증가하면서 R_{in}, R_{th} 도 증가하며, 기울임각이 90도인 경우, 즉 광축이 시료평면과 나란한 경우 실험실좌표계에서 계산된 $R_{in}=89.9 \text{ nm}, R_{th}=49.8 \text{ nm}$ 가 된다. 한편 기울임각이 40도가 되면 R_{th} 는 -37.5 nm 근방에서 일정하게 유지되며, 광축의 방위각에 따라 n_x, n_y 가 달라져 R_{in} 은 감소하다가 다시 증가한다. [그림 4(b)]

III. 개선된 투과계수 표현 및 복합판에 의한 편광상태 변화 계산

보상판을 통과하는 동안 빛이 겪는 편광상태 변화는 II절에서 논의한 바와 같이 계산할 수 있다. 그러나 보상판을 통과하는 빛의 편광상태를 파악하기 위해서는 보상판을 통과하는 동안의 빛의 편광상태 변화뿐만 아니라 매질과 보상판의 경계면에서의 반사 및 투과에 의한 영향을 반영하여야 하며 편광판과 보상판이 접합된 복합판에 의한 편광상태 변화를 계산하려면 두 이방성 매질간의 경계면에서의 반사 및 투과 효과를 고려하여야 한다. 이와 같이 경계면에서의 반사와 투과 효과를 고려하여 이방성 매질을 투과한 빛의 편광상

태 변화를 계산하기 위한 방법 중 Yeh와 Gu에 의해 유도된 확장된 존스 행렬법이 있다.^[4-6] 등방성 매질과 이방성 매질의 계면에서 전자기장의 경계조건을 이용하여 투과에 따른 빛의 편광상태 변화를 계산하는데, 이 방법에 의하면 이방성이 크지 않은 경우 정상파와 이상파의 굴절각 차이가 크지 않은 것을 이용하여 이들의 굴절각을 동일하게 취급하는 근사식을 사용하여 이방성 매질을 투과한 빛의 편광상태를 비교적 간단하게 계산하였다. 그러나 이러한 근사적인 방법은 복합판의 축 틀어짐이나 보상판의 미세한 위상지연 차이를 계산하기 어려운 단점이 있어 본 연구에서는 근사식을 사용하지 않는 개선된 계산식들을 사용하였다. 특히 이미 Yeh와 Gu에 의해 유도된 등방성 매질에서 이방성 매질로의 근사식을 사용하지 않는 투과계수들에 추가하여 이방성 매질에서 등방성 매질로의 근사식을 사용하지 않는 투과계수 표현들을 다음과 같이 사용하였다.^[8] 임의의 편광상태를 갖는 빛이 이방성 매질을 투과한 후의 편광상태를 표현하는 일반적인 식인 (2)는 입사파를 *s*-파와 *p*-파로 성분 분리한 후, 등방성 매질에서 이방성 매질로의 경계면에서 성분 분리된 *s*-파와 *p*-파의 각각에 대하여 이상파(*e*-파)와 정상파(*o*-파) 성분으로 분리되어 투과하는 투과행렬 D_i , 이방성 매질내에서 빛의 진행에 따른 위상지연을 나타내는 전파행렬 P , 이방성 매질에서 등방성 매질로의 경계면에서 *e*-파와 *o*-파의 각각의 경우에 대하여 *s*-파와 *p*-파로 분리되어 투과하는 투과행렬 D_o 의 곱으로써 빛의 편광상태 변화를 표현하고 있다.

$$\begin{pmatrix} B_s \\ B_p \end{pmatrix} = D_o P D_i \begin{pmatrix} A_s \\ A_p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} t_{es} & t_{os} \\ t_{ep} & t_{op} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e^{ik_{ez}d} & 0 \\ 0 & e^{ik_{oz}d} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t_{se} & t_{pe} \\ t_{so} & t_{po} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_s \\ A_p \end{pmatrix} \quad (2)$$

식 (2)에서 A 는 입사파, B 는 투과파, s, p 첨자는 각각 *s*-파와 *p*-파를 나타내며 e, o 첨자는 각각 이상파와 정상파를 나타낸다. 즉 식 (2)에서 A_s 와 A_p 는 각각 입사파의 *s*성분과 *p*성분을, B_s 와 B_p 는 투과파의 *s*성분과 *p*성분을 가리키며 t_{se} 와 t_{pe} 는 각각 *s*-파 또는 *p*-파에서 *e*-파로 진행하는 투과계수, t_{so} 와 t_{po} 는 각각 *s*-파 또는 *p*-파에서 *o*-파로 진행하는 투과계수, t_{es} 와 t_{os} 는 각각 *e*-파 또는 *o*-파에서 *s*-파로 진행하는 투과계수, t_{ep} 와 t_{op} 는 각각 *e*-파 또는 *o*-파에서 *p*-파로 진행하는 투과계수, d 는 이방성 매질의 두께, 그리고 k_{ez} 와 k_{oz} 는 각각 *e*-파 또는 *o*-파 파수벡터의 *z*-축 성분을 가리킨다. 입사파와 투과파의 성분은 진폭과 위상정보를 모두 포함하고 있으므로 이들로로부터 입사파와 투과파의 편광상태를 알 수 있고, 이들의 비로부터 투과형 타원법의 타원상수를 얻을 수 있다. 식 (2)에서 사용된 각 투과계수의 각 성분의 구체적인 표현은 다음과 같다.^[4-6]

$$t_{so} = \frac{2k_z D}{AD - BC}, \quad t_{po} = \frac{-2k_z B}{AD - BC}, \quad t_{se} = \frac{-2k_z C}{AD - BC}, \quad t_{pe} = \frac{2k_z A}{AD - BC} \quad (3)$$

여기에서 k_z 는 입사파의 파수벡터 \vec{k} 의 *z*-축 성분이고 A, B, C, D 는 식 (4)와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} A &= \hat{o} \cdot (\hat{y} \times \vec{k}) + \hat{o} \cdot (\hat{y} \times \vec{k}_o) \\ B &= \hat{e} \cdot (\hat{y} \times \vec{k}) + \hat{e} \cdot (\hat{y} \times \vec{k}_e) \\ C &= \hat{o} \cdot \hat{y} k - \frac{(\hat{y} \times \vec{k}) \cdot (\vec{k}_o \times \hat{o})}{k} \\ D &= \hat{e} \cdot \hat{y} k - \frac{(\hat{y} \times \vec{k}) \cdot (\vec{k}_e \times \hat{e})}{k} \end{aligned} \quad (4)$$

여기에서 $\vec{k}_o, \vec{k}_e, \hat{o}, \hat{e}$ 는 이방성 매질을 진행하는 굴절파에서 *o*-파, *e*-파의 파수벡터와 각 파수벡터의 단위벡터이다. *o*-파 또는 *e*-파에서 *s*-파 또는 *p*-파로의 투과계수는 이방성 매질과 등방성 매질의 경계면에서 반사한 파를 *o*-파와 *e*-파로 나눌 때 각각의 파수벡터와 단위벡터를 $\vec{k}'_o, \vec{k}'_e, \hat{o}', \hat{e}'$ 와 같이 나타낸다면 아래 식 (5)와 같다.^[8]

$$\begin{aligned} t_{os} &= \frac{(\hat{x} \cdot \hat{o})(\hat{y} \cdot (\vec{k}'_o \times \hat{o}')) - (\hat{x} \cdot \hat{o}')(\hat{y} \cdot (\vec{k}_o \times \hat{o}))}{(\hat{y} \cdot (\vec{k}'_o \times \hat{o}')) - (\hat{x} \cdot \hat{o}')(\hat{y} \cdot (\vec{k}_o \times \hat{o}))} \\ t_{op} &= \frac{(\hat{y} \cdot \hat{o})(\hat{x} \cdot (\vec{k}'_o \times \hat{o}')) - (\hat{y} \cdot \hat{o}')(\hat{x} \cdot (\vec{k}_o \times \hat{o}))}{(\hat{y} \cdot \hat{p})(\hat{x} \cdot (\vec{k}'_o \times \hat{o}')) - (\hat{y} \cdot \hat{o}')(\hat{x} \cdot (\vec{k}_o \times \hat{o}))} \\ t_{es} &= \frac{(\hat{x} \cdot \hat{e})(\hat{y} \cdot (\vec{k}'_e \times \hat{e}')) - (\hat{x} \cdot \hat{e}')(\hat{y} \cdot (\vec{k}_e \times \hat{e}))}{(\hat{y} \cdot (\vec{k}'_e \times \hat{e}')) - (\hat{x} \cdot \hat{e}')(\hat{y} \cdot (\vec{k}_e \times \hat{e}))} \\ t_{ep} &= \frac{(\hat{y} \cdot \hat{e})(\hat{x} \cdot (\vec{k}'_e \times \hat{e}')) - (\hat{y} \cdot \hat{e}')(\hat{x} \cdot (\vec{k}_e \times \hat{e}))}{(\hat{y} \cdot \hat{p})(\hat{x} \cdot (\vec{k}'_e \times \hat{e}')) - (\hat{y} \cdot \hat{e}')(\hat{x} \cdot (\vec{k}_e \times \hat{e}))} \end{aligned} \quad (5)$$

또한 식 (2)에서 *e*-파 파수벡터의 *z*-축 성분인 k_{ez} 와 *o*-파 파수벡터의 *z*-축 성분인 k_{oz} 의 차이값에 이방성 매질의 두께인 d 를 곱하면 이방성 매질을 진행하는 빛의 정상파와 이상파의 위상지연이 되는데 k_{ez} 와 k_{oz} 는 식 (6)과 같이 표현된다. 입사면은 *y-z* 평면상에 존재하고 파수벡터는 입사면 상에 있다.

$$\begin{aligned} k_{oz} &= \left(\left(\frac{2\pi n_o}{\lambda} \right)^2 - \beta^2 \right)^{1/2} \\ k_{ez} &= \frac{v + \sqrt{v^2 - 4uw}}{2u} \end{aligned} \quad (6)$$

단 식 (6)에서 β, u, v, w 는 식 (7)과 같고, β 는 파수벡터의 *y*-축 성분이다.

$$\begin{aligned} \beta &= \frac{2\pi}{\lambda} n_{air} \sin \theta \\ u &= \frac{\sin^2 \theta_e}{n_e^2} + \frac{\cos^2 \theta_e}{n_o^2}, \quad v = \beta \sin 2\theta_e \sin \phi_e \left(\frac{1}{n_e^2} - \frac{1}{n_o^2} \right) \\ w &= \beta^2 \left(\frac{1 - \sin^2 \theta_e \sin^2 \phi_e}{n_e^2} + \frac{\sin^2 \theta_e \sin^2 \phi_e}{n_o^2} \right) - \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 \end{aligned} \quad (7)$$

이상과 같은 표현들은 등방성 매질내에 한 층의 이방성 매질이 있을 때 이를 투과하는 빛의 편광상태 변화를 계산하는데 유용하게 사용될 수 있다. 그러나 이 식들은 이방성 매질

내의 다중반사를 고려하지 않고 있으므로 이방성 매질의 두께가 대략 빛의 결맞음길이(coherence length)의 1/2 보다 작을 때에는 다중반사에 의한 효과만큼의 오차를 발생시킨다. 즉 식 (2)는 이방성 매질내의 다중반사를 고려하지 않는 경우 등방성 매질 사이에 있는 단층 이방성 매질을 투과하는 빛의 편광상태 계산에 유용하다.

한편 편광판과 보상판이 접합된 복합판의 편광판에서 보상판으로 진행하는 빛의 편광상태 변화를 알기 위해서는 두 이방성 매질간 경계면에서의 정확한 투과계수 표현을 알아야 하는데 한 이방성 매질에서 다른 이방성 매질로 진행하는 빛의 반사계수와 투과계수에 대한 정확한 표현은 알려져 있지 않다. 본 연구에서는 이방성 매질과 이방성 매질 사이에 두께가 0인 가상의 등방성 매질을 상정하고 이방성 매질에서 가상의 등방성 매질로의 투과행렬, 가상의 등방성 매질내의 다중반사를 고려한 유효반사행렬, 가상의 등방성 매질에서 이방성 매질로의 투과행렬을 연속적으로 곱한 형태로 한 이방성 매질에서 이웃한 다른 이방성 매질로의 투과계수를 처리하였다.^[9] 즉 가상의 등방성 매질의 두께를 0으로 두고 등방성 매질내에서의 다중반사도 반영함으로써 두 이방성 매질간의 경계면에서의 투과계수 표현을 대치하고자 하였다.

IV. 투과형 타원법 및 모델링 분석

타원법은 편광된 빛을 사용하여 시료의 광학적 특성을 분석하는 방법으로, 시료 표면에서 반사된 빛을 사용하는 반사형 타원법과 시료를 투과한 빛을 사용하는 투과형 타원법으로 나눌 수 있다.^[10] 본 연구에서는 복합판을 투과하는 빛의 편광상태 변화를 투과형 타원법을 사용하여 해석하였다. 시료에 비스듬히 입사하는 빛은 전기장의 진동방향이 입사면과 나란한 *p*-파 성분과 입사면에 수직한 *s*-파 성분으로 나눌 수 있는데 이들 투과계수의 비 즉 *p*-파의 투과계수 *t_p*와 *s*-파의 투과계수 *t_s*의 비로 식 (8)과 같이 타원상수들을 정의할 수 있다.

$$\rho = \tan \Psi e^{i\Delta} = t_p / t_s \quad (8)$$

식 (8)에서 $\tan \Psi$ 는 *p*-파와 *s*-파의 투과계수의 진폭비를 의미하고, Δ 는 *p*-파와 *s*-파의 위상변화의 차이를 의미한다. 본 연구에서는 투과형 타원법 중 회전검광자 방식을 사용하여 복합판을 투과한 빛의 타원상수를 계산하고 복합판의 미지상수인 i) 편광판에서 투과축의 방위각 ii) 보상판에서 광축의 기울임각과 방위각 등의 광학상수에 의한 영향을 분석하였다. 회전검광자 방식의 타원계에서는 검광자를 회전시키면서 측정하는 빛의 세기로부터 식 (9)와 같이 정의되는 푸리에 계수 α , β 를 결정하는데 α , β 는 타원상수 Ψ 와 Δ 를 사용하여 식 (10)과 같이 나타낼 수 있다. 여기에서 I_D 는 측정되는 빛의 세기, I_0 는 평균 빛의 세기, ω 는 회전하는 검광자의 각진동수, 그리고 P 는 편광자의 방위각이다.

$$I_D = I_0(1 + \alpha \cos 2\omega t + \beta \sin 2\omega t) \quad (9)$$

$$\alpha = \frac{\tan^2 \Psi - \tan^2 P}{\tan^2 \Psi + \tan^2 P} \quad (10)$$

$$\beta = \frac{2 \tan \Psi \cos \Delta \tan P}{\tan^2 \Psi + \tan^2 P}$$

보상판인 *o*-판이 편광판과 접합되어 있는 복합판을 투과한 빛의 편광상태 변화는 II절과 III절에서 소개된 이론을 바탕으로 계산할 수 있다. 즉 편광판과 보상판이 접합된 복합판을 투과한 빛을 확장된 존스 행렬법을 사용하여 입사파의 편광상태가 복합판의 각 경계면과 매질을 진행함에 따라 변하는 편광상태를 순차적으로 계산할 수 있고, 입사파에 대한 투과파의 편광상태변화 계산결과를 사용하여 식 (8) 및 식 (10)에 따라 푸리에 계수들을 구할 수 있는데 회전검광자 방식의 타원법에서는 미지상수의 수치값을 바꾸어가며 측정된 α , β 와 광학적 모델에 의한 α , β 를 비교하여 그 차이를 최소화하는 방법 즉 실험값에 계산치를 최적맞춤하는 모델링 방법을 사용하여 시료의 광학상수 등 미지상수를 결정한다. 본 연구에서도 이 같은 모델링 방법을 사용하였다. 사용된 오차함수는 식 (11)과 같다. 여기에서 N 은 데이터의 수이다. 분석에 사용된 전산프로그램은 본 연구실에서 자체 제작한 것으로 비선형 회귀분석법에 기초한 Levenberg-marquardt 알고리즘을 적용하였기 때문에 최소 오차함수 값으로의 접근성이 뛰어나다.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left((\alpha_{\text{exp},i} - \alpha_{\text{gen},i})^2 + (\beta_{\text{exp},i} - \beta_{\text{gen},i})^2 \right)} \quad (11)$$

그림 5는 기준좌표계에 대하여 복합판을 360도 회전시키며 계산한 푸리에 계수 α , β 그래프이다. 입사각은 50도이며,

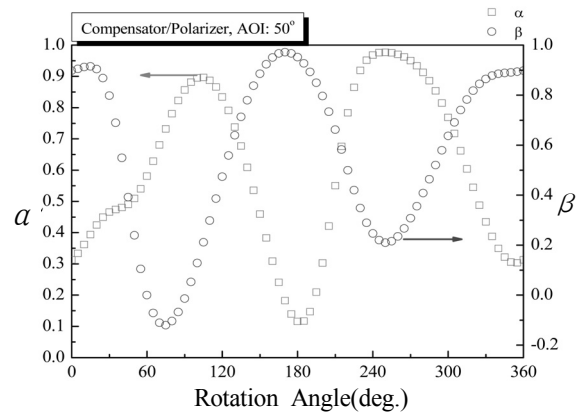


Fig. 5. Calculated (α : \square , β : \circ) curves of the composite film as the azimuth angle is varied at the incident angle of 50°. Optical constants of the polarizer are $n_o=n_e=1.5$, $k_o=0$, $k_e=0.05$, $\theta_c=90^\circ$, $\phi_c=12^\circ$, $d=1 \mu\text{m}$, and optical constants of the compensation film are $n_o=1.5$, $n_e=1.55$, $k_o=k_e=0$, $\theta_c=40^\circ$, $\phi_c=13^\circ$, $d=2 \mu\text{m}$.

계산에 사용된 편광판의 광학상수와 구조상수들은 $n_o=n_e=1.5$, $k_o=0$, $k_e=0.05$, $\theta_c=90^\circ$, $\phi_c=12^\circ$, $d=1 \mu\text{m}$ 이고, 보상판의 상수들은 $n_o=1.5$, $n_e=1.55$, $k_o=k_e=0$, $\theta_c=40^\circ$, $\phi_c=13^\circ$, $d=2 \mu\text{m}$ 이다.

V. 복합판 광학상수의 비선형 회귀분석

투과형 타원계를 사용하여 복합판을 투과한 빛의 편광상태 변화를 측정하고 편광판의 투과축 방향과 보상판의 광축 기울임각 및 방위각을 미지상수로 하여 모델링 분석기법을 적용하면 이들 미지상수를 역방계산할 수 있다. 편광판의 투과축과 보상판의 광축 방향(기울임각과 방위각)이 결정되면 복합판의 광축 틀어짐은 편광판의 투과축과 보상판의 방위각의 차이에서 바로 구할 수 있으며 보상판의 위상지연값은 식 (1)과 $R_{in}=(n_x-n_y)\times d$, $R_{th}=(n_x+n_y)2-n_z)\times d$ 의 표현으로부터 바로 계산할 수 있다. 본 연구에서는 그림 5에서 계산한 바와 같이 계산으로 구한 푸리에 계수들을 실험값으로 대체하였다. 다만 회전점광자 방식 투과형 타원계의 푸리에계수 측정오차가 ± 0.001 정도인 점을 고려하여 계산된 값을 소수점 이하 넷째 자리에서 반올림하여 사용하였다. 모델링 분석에서는 편광판의 투과축, 보상판의 광축 기울임각 및 방위각, 보상판의 정상굴절률과 이상굴절률 등 5개의 변수를 미지상수로 취급하였으며 분석의 신뢰성을 높이기 위하여 0도와 50도의 2개의 입사각에서의 값들을 동시에 분석하였다. 계산에 사용된 편광판과 보상판의 초기 상수들 및 역방계산으로 결정한 이 상수들의 값은 표 1에 정리하였다. 모델링 분석에서 미지상수의 초기값 설정은 역방해석으로 결정하는 미지상수의 정확도 및 접근성에 큰 영향을 미친다. 산업 현장에서는 편광판의 투과축과 보상판의 광축위치를 개략적으로나마 파악하고 있기 때문에 본 연구에서는 이들 각도의 초기값을 실제값보다 ± 3 도 정도 차이가 나도록 설정하였다. 복합판의 광축정렬 오차가 0.5도 이하인 점을 감안하면 ± 3 도 정도로 차이가 나는 초기값 설정에도 불구하고 투과축과 광축의 방향을 정확하게 결정한다면 본 연구에서 제시하는 방법이 실제의 복합판 시료의 분석에도 적용될 수 있음을 확인할 수 있겠다. 마찬가지로 보상판의 정상굴절률과 이상굴절률의 초기값도 실제값과 ± 0.05 정도의 차이를 가지도록 하였다.

이상과 같은 방법으로 분석한 결과는 그림 6에 입사각이 50도인 경우의 그래프로 나타내었다. 입사각이 0도인 데이터의 분석결과는 입사각이 50도인 경우와 내용이 동등하기 때

문에 중첩된 그래프가 보여주는 복잡함을 피하기 위하여 그림에 포함시키지 않았다. 실험치로 사용된 데이터는 심볼로 나타내고 최적맞춤한 결과를 실선으로 표시한 그림 6의 그래프에서 두 그래프가 매우 잘 일치함을 볼 수 있다. 이는 실험치로 사용된 데이터가 잘 정의된 광학모형에 따라 계산된 정확한 값을 소수점 이하 넷째자리에서 반올림하는 과정을 통해 실제 예상되는 측정오차 정도의 작은 값만을 무작위로 더하거나 빼기 때문에 동일한 광학모델과 동일한 수학적 표현을 사용하여 미지상수를 역방계산으로 결정할 때에는 측정오차 내에서 서로 정확히 일치하는 것이 당연하기 때문이다. 실제로 최적맞춤한 결과 표 1에 정리되어 있는 미지상수의 수치값들은 모든 변수에서 모두 0.1% 이내의 정확도로 분석되었다. 보상판의 위상지연도 각각 $R_{in}=18.01 \text{ nm}$, $R_{th}=-18.72 \text{ nm}$ 으로 0.1% 이내의 정확도를 보여준다. 0.1%의 오차는 계산된 푸리에 계수를 실험치로 사용할 때 반영한 측정오차 정도이므로 이는 본 연구에서 사용하고 있는 분석기법이 강한 상관관계를 가지는 미지상수를 일지라도 그 값들을 정확하게 결정할 수 있음을 보여주는 것으로 해석된다.

편광판과 보상판이 접합된 복합판은 아니지만, 2개의 이방성 물질이 접합되어 있는 복합판에 위에서 분석한 방법을 적용하여 그 광학상수들을 결정하였다. a-판 위에 c-판이 있는

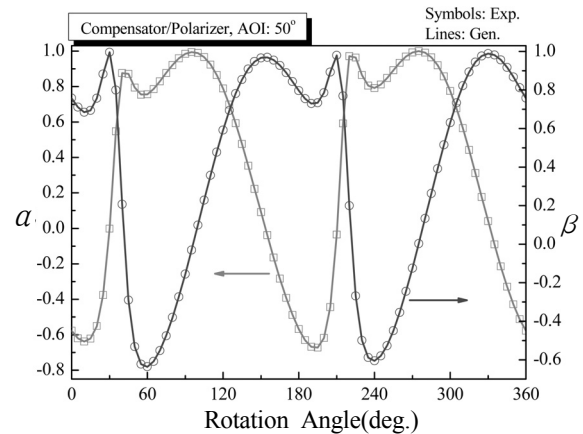


Fig. 6. Calculated and best fit (α \square , β \circ) curves of the Fourier coefficients of the composite film as the azimuth angle is varied at the incident angle of 50° . Symbols are calculated results while experimental errors are considered, and lines are best fit results by linear regressional analysis method.

Table 1. Optical constants of the composite film used for the calculation of the polarization state change of the light passing through it. The azimuth angle of polarizer, the tilt angle and the azimuth angle of compensation film, and the ordinary refractive index and the extra-ordinary refractive index of compensation film are the unknown variables to be determined by using modeling process. The best fit results also appear for comparison

		n_o	k_o	n_e	k_e	θ_c	ϕ_c	d (nm)	σ
simulation	polarizer	(1.5)	(0)	(1.5)	(0.02)	(90)	12	(7000)	-
	compensator	1.5	(0)	1.55	(0)	40	13	(1000)	
best fit results	polarizer	(1.5)	(0)	(1.5)	(0.02)	(90)	12.000	(7000)	0.00066
	compensator	1.501	(0)	1.551	(0)	39.992	13.012	(1000)	

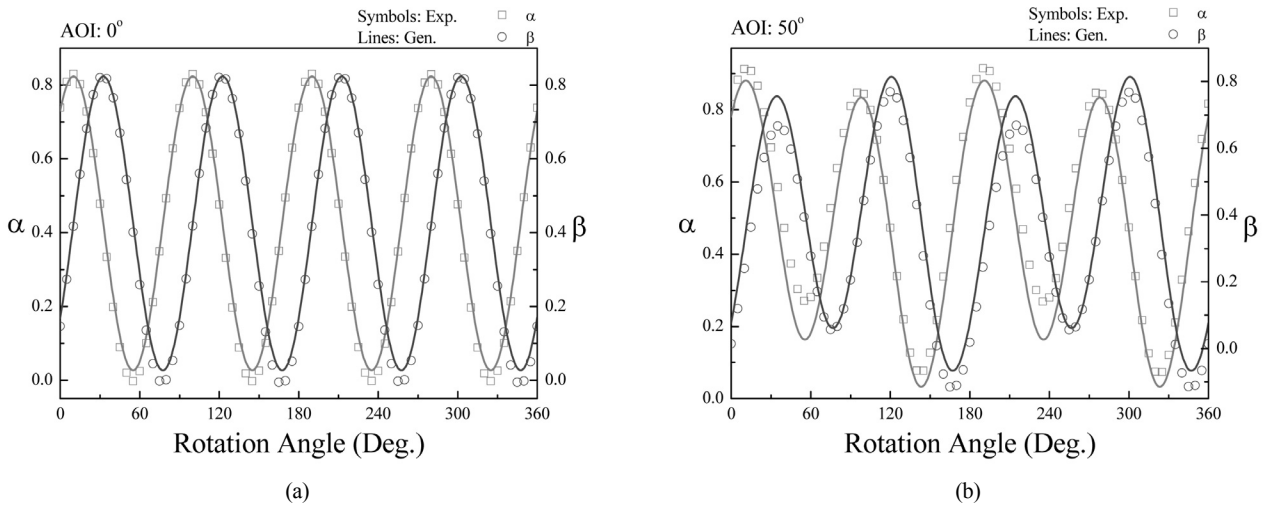


Fig. 7. Measured and best fit (α : \square , β : \circ) curves of the Fourier coefficients of the composite film as the azimuth angle is varied at the incident angle of 0° (a) and 50° (b). Symbols are measured results, and lines are best fit results by linear regressional analysis method.

Table 2. Optical constants of the composite film used for the calculation of the polarization state change of the light passing through it. The azimuth angle and the thickness of a -plate, the thickness of c -plate are the unknown variables to be determined by using modeling process. The best fit results also appear for comparison

		n_o	k_o	n_e	k_e	θ_c	ϕ_c	d (nm)	σ
initial value	a -plate	(1.4806)	(0)	(1.4788)	(0)	(90)	0	70000	-
	c -plate	(1.4802)	(0)	(1.4796)	(0)	(0)	(0)	50000	
best fit results	a -plate	(1.4806)	(0)	(1.4788)	(0)	(90)	-1.28	71594.2	0.087
	c -plate	(1.4802)	(0)	(1.4796)	(0)	(0)	(0)	51937.3	

복합판 구조를 가진 시료에 대하여 투과방식의 회전검광자형 편광계를 사용하여 측정된 타원상수를 분석하여 이 복합판의 광학상수를 역계산하였다. 그림 7은 이 복합판을 투과한 빛의 편광상태 변화를 입사각 0도(a)와 50도(b)에서 5도 간격으로 시료를 360도 회전하면서 측정된 타원상수 그래프와 최적맞춤한 그래프를 나타낸 것이다. 복합판을 구성하는 a -판과 c -판의 각각의 정상굴절률과 이상굴절률은 단판인 상태에서 측정된 결과를 사용하였고^[3], a -판의 방위각과 두께, c -판의 두께 등을 미지상수로 하였다. 0도와 50도의 2개의 입사각에서 동시에 최적맞춤하여 결정한 미지상수의 값들을 표 2에 정리하였다. 그림 7에서 최적맞춤한 그래프가 측정된 그래프와 다소 차이가 나는 이유는 측정에 사용된 a -판이 근사적으로는 단축이방성 구조와 비슷하지만 엄밀하게는 쌍축이방성 물질이기 때문에 단축이방성 물질을 사용하여 그 편광특성 기술하는데 한계가 있기 때문이다. 그러나 a -판의 R_m 은 123.3 nm으로 표 2에 보여진 복굴절과 두께를 사용하여 구한 R_m 인 123.8 nm와는 거의 일치한다. 즉 a -판과 c -판이 접합되어 있는 복합판에도 본 연구에서 제시하는 방법을 적용할 수 있음을 알 수 있다.

이상과 같은 분석결과는 광축이 시료 평면에 있는 a -판이나 광축이 시료 평면에 수직인 c -판, 광축이 임의의 각도를 가지는 o -판을 포함한 보상판과 편광판이 접합된 실제 시

료의 축 틀어짐과 위상지연을 본 연구에서 제시된 타원법 측정 및 모델링 분석기법으로 정확하게 한꺼번에 결정할 수 있음을 예측하게 한다. 한편 본 분석기법은 광학적 쌍축(optically biaxial) 특성을 가지고 있는 보상판을 포함하는 복합판 시료에는 적용될 수 없는 한계를 가지고 있다.

VI. 결 론

본 연구에서는 액정 디스플레이에서 시야각 향상을 위해 사용하는 복합판의 광축 틀어짐 오차와 보상판의 R_m , R_{th} 를 동시에 결정하는 방법을 새로이 제시하였다. 복합판은 o -판인 보상판과 편광판이 접합된 판으로 하였고 확장된 존스 행렬식을 사용하여 유도한 개선된 투과계수 표현들과 타원법의 모델링 분석기법을 사용하였다. 계산된 타원상수에 측정 오차를 반영한 데이터를 측정값으로 하여 편광판과 보상판이 접합된 복합판의 경우 축틀어짐, 보상판의 광축 기울임각과 방위각 그리고 보상판의 정상굴절률과 이상굴절률 들을 0.1% 이내의 정확도로 동시에 결정할 수 있었고, 이들 값으로부터 복합판의 축 틀어짐과 보상판의 R_m , R_{th} 를 바로 구할 수 있었다. 본 연구결과를 활용하면 복합판 상태에서 복합판의 광학적 특성분석과 성능평가 가능하므로 공정단계와 제조 원가를 줄이는데 기여할 수 있을 것으로 예상된다.

감사의 글

이 논문은 2007년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국 학술진흥재단(KRF-2007-313-C00292) 사업의 지원을 받아 수행된 연구임.

References

1. H. Mori, "The wide view (WV) film for enhancing the field of view of LCDs," *J. Display Technology* **1**, 179-186 (2005).
2. S. H. An, S. J. Kim, and S. Y. Kim, "Technique of measuring optic axis off-alignment error for LCD polarizing and compensating plates by using a polarimetry," *Hankook Kwanghak Hoeji (Korean J. Opt. Photon.)* **15**, 527-530 (2004).
3. <http://www.ellipsotech.com/product/product-5.asp>.
4. P. Yeh, "Extended Jones matrix method," *J. Opt. Soc. Am.* **72**, 507-513 (1982).
5. C. Gu and P. Yeh, "Extended Jones matrix method. II," *J. Opt. Soc. Am. A* **10**, 966-973 (1993).
6. C. Gu and P. Yeh, "Extended Jones matrix method and its application in the analysis of compensators for liquid crystal displays," *Displays* **10**, 237-257 (1999).
7. Y. Saitoh, "Optical compensation film and liquid crystal display," U. S. Patent 2005/0195348 (2005).
8. J. W. Ryu, Y. S. Shin, S. Y. Kim, S. H. An, and Y. K. Kim, "An improvement of the extended Jones matrix expression for analyzing polarization transmission characteristics of a uniaxial medium," *Hankook Kwanghak Hoeji (Korean J. Opt. Photon.)* **19**, 150-158 (2008).
9. J. W. Ryu, S. Y. Kim, and Y. K. Kim, "Polarization analysis of light passing through a non-uniform anisotropic medium," *J. Opt. Soc. Korea*, to be submitted.
10. S. Y. Kim, *Ellipsometry* (Ajou University Press, Korea, 2000), pp. 64-97.