



### 저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



**저작자표시.** 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



**비영리.** 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



**변경금지.** 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

**저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.**

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

비틀린 위상지연 필름의 콜레스테릭  
액정 편광판 응용에 관한 연구

**Study on Twisted Retarder and Its Application to Cholesteric  
Liquid Crystal Polarizers**

2008年 08月 25日

朝鮮大學校 大學院

光技術工學科

崔 浩

비틀린 위상지연 필름의 콜레스테릭  
액정 편광판 응용에 관한 연구

指導教授 朴 鍾 洛

이 論文을 工學碩士學位申請 論文으로 提出함

2008年 04月

朝鮮大學校 大學院

光 技 術 工 學 科

崔 浩

# 崔 浩의 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 朝鮮大學校 教授 朴 時 賢 印

審査委員 光州大學校 教授 文 哲 鴻 印

審査委員 朝鮮大學校 教授 朴 鍾 洛 印

2008 年 05 月

朝鮮大學校 大學院

# 목 차

목차	i
표 목차	ii
그림 목차	iii
Abstract	v
제1장 서론	1
제2장 이론	11
제1절 존스 행렬법을 이용한 비틀린 위상지연 필름 분석이론	11
제2절 밀러 행렬법을 이용한 광학필름 분석이론	29
제3장 실험	35
제1절 비틀린 위상지연 필름의 제작	35
제2절 비틀린 위상지연 필름의 밀러 행렬 측정 및 제작공정 파라미터 추출	40
제4장 결과 및 논의	45
제1절 광학필름의 밀러 행렬 분석	45
제2절 제작된 비틀린 위상지연 필름의 특성분석 및 이론적 결과와의 비교분석	60
제5장 결론	63
참고문헌	64

# 표 목차

표 1. 몇 가지 편광 상태에 대한 편광 타원 및 존스 벡터	16
표 2. 몇 가지 편광 상태에 대한 편광 타원 및 스토크스 벡터	33
표 3. 비틀린 위상지연 필름의 제작 공정	37
표 4. RMM498의 함량비에 따른 비틀림 비율과 위상지연 값 측정치	42
표 5. 광학 필름 샘플에 대한 밀러 행렬 측정치	49
표 6. 광학 필름 샘플에 대한 편광도 계산 결과	50
표 7. 광학 필름 샘플에 대한 출력광의 편광상태 계산 결과	51
표 8. 실험에 사용한 콜레스테릭 액정 필름과 이상적인 콜레스테릭 액정 필름에 무 편광이 입사하였을 경우 출력광의 편광상태 계산 결과	52
표 9. $S_A, S_B, S_C$ 와 각 스토크스 벡터의 완전 편광된 성분 에 대한 존스 벡터 $E_A, E_B, E_C$	53
표 10. $S_D, S_E,$ 와 각 스토크스 벡터의 완전 편광된 성분 에 대한 존스 벡터 $E_D, E_E$	54

# 그림 목차

그림 1. 콜레스테릭 액정의 원편광 선택 반사특성	5
그림 2. 일반 사분 파장판을 이용한 좌원 편광의 선편광 변환	6
그림 3. 비틀린 위상지연 필름 또는 45° 방향의 느린 축을 지닌 위상지연 필름의 편광 변환 특성	7
그림 4. 비틀린 위상지연 필름	8
그림 5. 90° TN 모드에서의 파동 가이딩 효과	9
그림 6. 일반 사분 파장판과 비틀린 위상지연 필름의 편광변환 특성 비교	10
그림 7. 기관 위에 비틀린 위상지연 필름을 코팅한 후의 모습	17
그림 8. 비틀린 위상지연 필름에 콜레스테릭 필름을 적층하고 비틀린 위상지연 필름을 기관으로부터 분리한 후의 모습	18
그림 9. 우선 비틀린 위상지연 필름에 좌원 편광이 입사할 경우 출력광의 $\text{Im}(E_y/E_x)$ 에 대해 계산한 결과	19
그림 10. 우선 비틀린 위상지연 필름에 좌원 편광이 입사할 경우 선 편광이 출력될 조건	20
그림 11. 우선 비틀린 위상지연 필름에 좌원 편광이 입사할 경우 선 편광이 출력 될 조건이 만족 될 때, 각 조건에서의 선 편광이 X축과 이루는 각도	21
그림 12. 우선 비틀린 위상지연 필름에 좌원 편광이 입사할 경우 출력 광의 X축 선 편광자 투과율 분포도	22
그림 13. 우선 비틀린 위상지연 필름에서 위상지연 값과 총 비틀림 각의 허용오차	23
그림 14. 좌선 비틀린 위상지연 필름에 좌원 편광이 입사할 경우	

출력광의 $\text{Im}(E_x/E_y)$ 에 대해 계산한 결과	24
<b>그림 15.</b> 좌선 비틀린 위상지연 필름에 좌원 편광이 입사할 경우 선 편광이 출력될 조건	25
<b>그림 16.</b> 좌선 비틀린 위상지연 필름에 좌원 편광이 입사할 경우 선 편광이 출력 될 조건이 만족 될 때, 각 조건에서의 선 편광이 X축과 이루는 각도	26
<b>그림 17.</b> 좌선 비틀린 위상지연 필름에 좌원 편광이 입사할 경우 출력 광의 Y축 선 편광자 투과율 분포도	27
<b>그림 18.</b> 좌선 비틀린 위상지연 필름에서 위상지연 값과 총 비틀림 각의 허용오차	28
<b>그림 19.</b> 뽕양카레 구면	34
<b>그림 20.</b> 러빙 공정 후 우선 비틀린 위상지연 필름이 코팅되는 모습	38
<b>그림 21.</b> 비틀린 위상지연 필름 제작공정 및 관련 사진	39
<b>그림 22.</b> RMM498의 함량비에 따른 비틀림 비율	43
<b>그림 23.</b> 필름의 코팅 두께에 따른 위상지연 값	44
<b>그림 24.</b> 필러 행렬 측정에 사용된 콜레스테릭 액정 필름 샘플의 투과 스펙트럼	55
<b>그림 25.</b> 스토크스 벡터 공간에 표시한 $\mathbf{S}_A$ , $\mathbf{S}_B$ , $\mathbf{S}_C$	56
<b>그림 26.</b> 스토크스 벡터 공간에 표시한 $\mathbf{S}_D$ 와 $\mathbf{S}_E$	57
<b>그림 27.</b> $\mathbf{E}_A$ , $\mathbf{E}_B$ , $\mathbf{E}_C$ 에 대한 편광 타원	58
<b>그림 28.</b> $\mathbf{E}_D$ 와 $\mathbf{E}_E$ 에 대한 편광 타원	59
<b>그림 29.</b> 제작된 비틀린 위상지연 필름의 구조 파라미터와 좌원 편광이 입사하였을 경우 예측되는 출력광의 X축 방향 선 편광자 투과율	62

# **Abstract**

## **Study on Twisted Retarder and Its Application to Cholesteric Liquid Crystal Polarizers**

**By Hao Cui**

**Advisor : Prof. Jong Rak Park, Ph.D.**

**Department of Photonic Engineering**

**Graduate School of Chosun University**

In this thesis, we have performed theoretical investigations using Jones matrix formulation on structural parameters of twisted retarder (TR) with which circular polarization states can be converted into linear polarization states. Especially, it was theoretically predicted that  $x$ -axis and  $y$ -axis polarization states can be obtained with a right-handed TR film and a left-handed TR film, respectively, when the incident light into the TR films has the left-handed circular polarization (LCP) state. The  $x$ -axis indicates the alignment direction of the directors for nematic liquid crystals (LCs) just on the substrate film of TR and the  $y$ -axis the perpendicular direction to the  $x$ -axis.

Also, we have fabricated TR films using LCs supplied by Merck, Ltd., RMM522 (nematic LC) and RMM498 (nematic LC blended with right-handed chiral component). Twist rate and total retardation value could be controlled by adjusting the relative content of RMM498 in the mixture with RMM522 and the thickness of TR film, respectively. Precise control of the thickness of TR films, however, has been found very difficult with the current fabrication

process employing bar-coating method. Now, process improvement is actively in progress.

Mueller matrices for a cholesteric liquid crystal (CLC) film (CLC900, Samsung Fine Chem., Ltd.), a TR film and a laminated sample of the two films were measured, and optical characteristics and output polarization states of the samples were discussed. For the case of the CLC film, degree of polarization of the output light for an unpolarized input was 0.82, which implies that about 18% of the output light is still unpolarized even after transmitting the CLC film, and most of the output light is in the LCP state. One can expect that extraction efficiency of useful linear polarization state would be only 91% using the CLC film reported in this study compared with that using an ideal left-handed circular polarizer. The structural parameters of the retardation film fabricated in this study with the mixture of RMM522 and RMM498 didn't match with any theoretically predicted parameters with which circular polarization states can be converted into linear polarization states. We have found that, however, the retardation film could be theoretically modeled nicely as a twisted retardation film and from the experimental point of view the retardation film acted as a twisted retardation film quite very well.

# 제1장 서론

현재 액정 디스플레이 기술은 국내외적으로 정보 디스플레이 산업의 견인차이자 최고 핵심기술로 인식되고 있다. 액정 디스플레이 기술은 계산기, 휴대폰, 디지털 카메라, 네비게이션, 노트북, 데스크톱 컴퓨터, 벽걸이 TV, 프로젝션 TV 등 다양한 제품에 적용되고 있으며, 전통적인 디스플레이 기술에 비해 고 해상도, 고 휘도, 저 에너지 소비, 박형화, 경량화 등의 많은 장점을 지니고 있다<sup>[1]</sup>.

액정 디스플레이는 비 발광재료인 액정을 사용하기 때문에 다른 발광 디스플레이에 비해 좁은 시야각과 느린 응답속도 등의 단점을 갖고 있었다. 그러나 최근 새로운 기술들의 개발로 시야각 문제와 응답속도 문제가 해결되고 있으며, 이에 따라 초기 액정 디스플레이에 비해 비약적인 화질개선이 이루어지고 있다<sup>[2]</sup>.

이러한 개선에도 불구하고 액정 디스플레이는 반드시 편광판을 사용해야 하는 제약조건이 있기 때문에 광효율이 감소하는 단점을 여전히 지니고 있다. 대부분의 액정 디스플레이는 흡수를 이용한 선 편광판을 채용하고 있으며, 원리적으로 흡수를 이용한 선 편광판의 투과율은 최대 50%이다. 투과되지 않은 나머지 50%의 광은 선 편광판에서 흡수되어 열로 변환된다. 최근 선 편광에 기반을 둔 반사형 편광판을 이용하여 광효율을 증가시킬 수 있는 기술이 액정 디스플레이에 도입되어 사용되고 있다<sup>[3]</sup>. 또한 원 편광에 기반을 둔 콜레스테릭 액정(CLC, Cholesteric Liquid Crystal) 편광판에 대한 연구개발이 활발히 진행되고 있다<sup>[4-9]</sup>. 콜레스테릭 액정을 이용한 컬러필터<sup>[10]</sup>에 대한 연구 또한 활발히 진행 중이며, 디스플레이 이외의 분야에 대한 응용<sup>[11]</sup>도 보고되고 있다.

기존의 편광판은 특정 선 편광을 투과시키고 이에 직교하는 선 편광을 흡수하는데 반하여, 콜레스테릭 액정 편광판은 특정 원 편광을 투과시키고 이에 직교하는 원 편광을 반사시키는 특성을 지니고 있다. 콜레스테릭 액정 편광판은 반사된 광을 다시 활용할 수 있어 기존 편광판에 비해 광효율을 최대 2배까지 증가시킬

수 있다. 콜레스테릭 액정은 네마틱 액정에 카이랄 성분을 첨가하여 제작할 수 있다. 콜레스테릭 액정은 네마틱 액정분자의 방향자가 기판에 평행한 수평면에 존재하면서 두께방향으로는 나선형의 꼬임 구조를 갖는 액정상이다. 입사광의 파장이 콜레스테릭 액정의 피치와 비슷할 때, 우원 편광(RCP, Right-Handed Circular Polarization) 또는 좌원 편광(LCP, Left-Handed Circular Polarization)을 선택적으로 반사시키는 고유한 광학특성을 갖고 있다. 우선(Right-Handed) CLC의 경우 RCP를 반사시키고, 좌선(Left-Handed) CLC의 경우 LCP를 반사시킨다. 그림 1은 우선 CLC에 무 편광된 광(Unpolarized Light)이 입사할 경우 RCP가 반사되고 LCP가 투과하는 모습을 보여주고 있다.

콜레스테릭 액정 편광판을 액정 디스플레이에 적용하기 위해서는 콜레스테릭 액정 편광판을 투과한 원 편광을 선 편광으로 변환해야 한다. 이를 위해 위상지연 필름(Phase Retardation Film)으로 사분 파장판(QWP, Quarter-Wave Plate)이 필수적으로 사용된다. 일반적으로 위상지연 필름은 고분자 필름의 연신을 이용해 제작하며, 고분자 필름을 연신할 경우 필름의 연신 방향 굴절률이 그 수직 방향 굴절률보다 커지게 된다<sup>[12,13]</sup>. 따라서 연신 방향이 위상지연 필름의 느린 축(Slow-Axis)이 되며, 그 수직 방향이 빠른 축(Fast-Axis)이 된다. 위상지연 필름은 롤형(Roll-Type) 패키지로 제작되는데, 필름의 길이 방향이 느린 축 방향이 된다. 기존의 흡수를 이용한 선 편광판도 연신공정을 통해 제작되는데, 연신방향과 평행한 방향으로 선 편광판의 흡수축이 형성된다<sup>[12,13]</sup>. 선 편광판 또한 롤형 패키지로 제작되는데, 필름의 폭 방향이 편광판의 투과축에 해당한다.

그림 2는 좌원 편광이 일반 사분 파장판에 입사하여 선 편광으로 변환되는 모습을 보여주고 있다. 일반 사분 파장판에 좌원편광이 입사할 경우 출력되는 선편광의 방향은 느린 축과 45° 각도를 이루게 된다. 이 때 롤형 패키지로 공급되는 선 편광판의 투과축과도 45° 각도를 이루게 된다. 최대의 광효율을 얻기 위해서는 사분 파장판 혹은 선 편광판을 롤형 패키지에서 분리하고 롤형 필름의 길이 방향

에 대해 45° 사각으로 재단한 후 사분 파장판과 선 편광판을 합지하여야 한다. 롤형 패키지로 공급되는 사분 파장판과 선 편광판을 롤대롤(Roll-to-Roll)로 합지하는 것이 공정적 측면에서 가장 바람직하지만 사분 파장판을 이용한 원편광의 선편광 변환원리에 의해 근본적으로 롤대롤 합지 공정이 불가능함을 알 수 있다.

본 논문에서는 원 편광을 선 편광으로 변환시킬 수 있고, 동시에 선 편광판과 롤대롤 합지 공정이 가능한 일반 사분 파장판이 아닌 새로운 종류의 위상지연 필름에 대해 연구하였다. 그림 3은 선 편광판과 롤대롤 합지 공정이 가능하도록 새로운 종류의 위상지연 필름을 도입하였을 경우, 좌원 편광이 새로운 위상지연 필름에 입사하여 선 편광으로 변환되는 모습을 보여주고 있다. 새로운 위상지연 필름으로 필름의 길이 방향에 대해 45° 방향으로 느린 축을 갖고 있는 사분 파장판이 사용될 수 있음을 쉽게 예측할 수 있다. 본 논문에서는 필름의 길이 방향에 대해 45° 방향으로 느린 축을 갖고 있는 사분 파장판 이외의 새로운 위상지연 필름으로 최근 활발히 연구되고 있는 비틀린 위상지연 필름(Twisted Retarder)<sup>[14,15]</sup>의 도입 가능성에 대해 조사하였다. 그림 4는 비틀린 위상지연 필름의 구조를 보여 주고 있다.

액정 디스플레이 모드 중 가장 널리 알려진 90° TN 모드(Twisted Nematic Mode) 또한 비틀린 위상지연 필름의 구조를 갖고 있는데, 90° TN 모드의 경우 선 편광에 대한 파동 가이드(Waveguiding) 효과가 있음이 보고 되었다<sup>[16]</sup>. 입사면에서의 네마틱 액정 방향자와 평행 혹은 수직인 선 편광은 비틀린 네마틱 액정 분자의 꼬임 방향을 따라 회전하여 출사면에서도 네마틱 액정 방향자와 평행 혹은 수직을 이루게 되는데, 이를 파동 가이드 효과라 한다.(그림 5 참조) 입사면과 출사면 사이의 실제 편광 상태는 타원 편광이지만 네마틱 액정 분자의 꼬임 방향을 따라 회전하는 선 편광으로 근사할 수 있음이 알려져 있다<sup>[16]</sup>.

그림 6의 왼쪽 그림은 일반 사분 파장판에 좌원 편광이 입사할 경우 선 편광으로 변환되는 과정을 보여 주고 있다. 좌원 편광은 그림 6에 도시된 것과 같이 위상차  $\Delta\phi$ 가  $\pi/2$ 인 X축 선 편광과 Y축 선 편광으로 구성되어 있다. 일반 사분

과장판(위상지연 값  $\Gamma: \pi/2$ )에 광이 입사하게 되면, 빠른 축에 평행한 선 편광은 느린 축에 평행한 선 편광에 비해 상대적으로 빠른 속도로 매질 내부를 진행하여 출사면에서 느린 축에 평행한 선 편광 대비 위상이  $\pi/2$  만큼 앞서게 된다. 만일 좌원 편광이 일반 사분 과장판에 입사하게 되면, 출사면에서 느린 축에 평행한 선 편광과 빠른 축에 평행한 선 편광이 동일 위상을 갖게 된다. 따라서 출사면에서의 편광은 느린 축 혹은 빠른 축과  $45^\circ$  각도를 갖는 선 편광이 된다. 위의 논의를 위해 느린 축과 빠른 축이 각각 X축과 Y축에 해당한다고 가정하였다. 이제 그림 6의 오른쪽에 도시된 것과 같이 비틀린 위상지연 필름(좌선, 비틀림 각:  $45^\circ$ , 위상지연 값  $\Gamma: \pi/2$ )에 좌원 편광이 입사되는 경우를 살펴보자. 만일 파동 가이딩 효과가 엄밀히 발생한다면 느린 축과 빠른 축에 평행한 광의 파동 가이딩 효과 및 상대적 위상지연 효과가 동시에 발생하여 출사면에서의 출력 편광은 X축 선 편광이 될 것으로 예측할 수 있다.

본 논문의 연구 목표는 원 편광을 선 편광으로 변환시킬 수 있는 비틀린 위상지연 필름의 구조 파라미터에 대한 이론적 고찰, 비틀린 위상지연 필름의 제작 및 콜레스테릭 액정 편광판 적용이다. 본 논문의 연구과정을 통해 비틀린 위상지연 필름을 사용하여 원 편광의 선 편광 변환이 가능함을 이론적으로 예측하였고, 상용 액정을 사용하여 우선(Right-Handed) 비틀린 위상지연 필름을 제작하였으며, 콜레스테릭 액정 필름, 비틀린 위상 지연 필름, 콜레스테릭 액정 필름과 비틀린 위상 지연 필름의 적층 샘플에 대한 광학적 특성 및 출력 편광상태에 대한 분석을 수행하였다.

제2장에서는 본 연구에서 사용한 존스 행렬법 및 밀러 행렬법에 대해 소개하고, 원 편광을 선 편광으로 변환시킬 수 있는 비틀린 위상지연 필름의 구조 파라미터에 대한 이론적 연구결과를 제시한다. 제3장에서는 비틀린 위상지연 필름의 제작공정에 대해 서술하고, 제4장에서는 비틀린 위상 지연 필름 등 본 연구에서 다룬 광학 필름 샘플들에 대한 특성 분석 및 이론적 예측과의 비교 분석 결과에 대해 기술하며, 제5장에서 결론을 맺도록 하겠다.

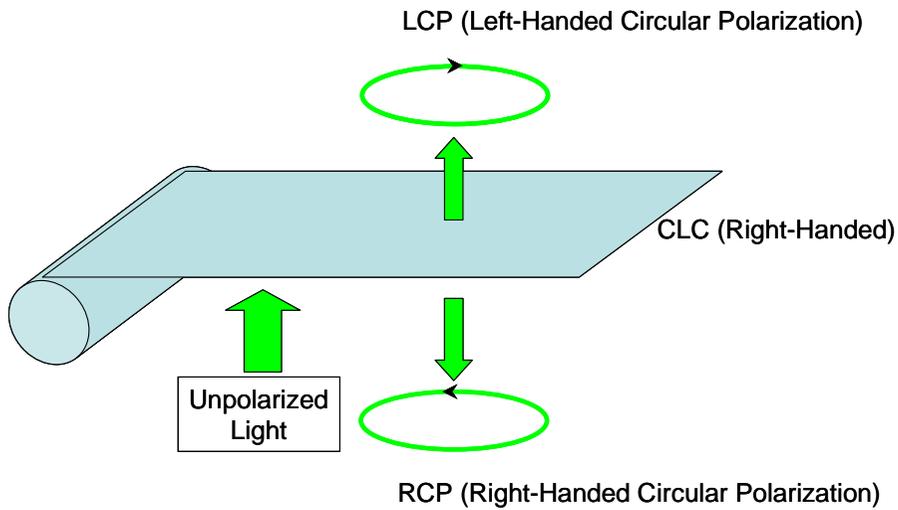


그림 1. 콜레스테릭 액정의 원편광 선택 반사특성

CLC (Cholesteric Liquid Crystal) : 원편광 선택 반사성을 지닌다.

(CLC의 분자 꼬임 방향과 같은 원편광을 반사한다.)

반사된 원편광을 재활용하여 휘도를 향상시킬 수 있다.

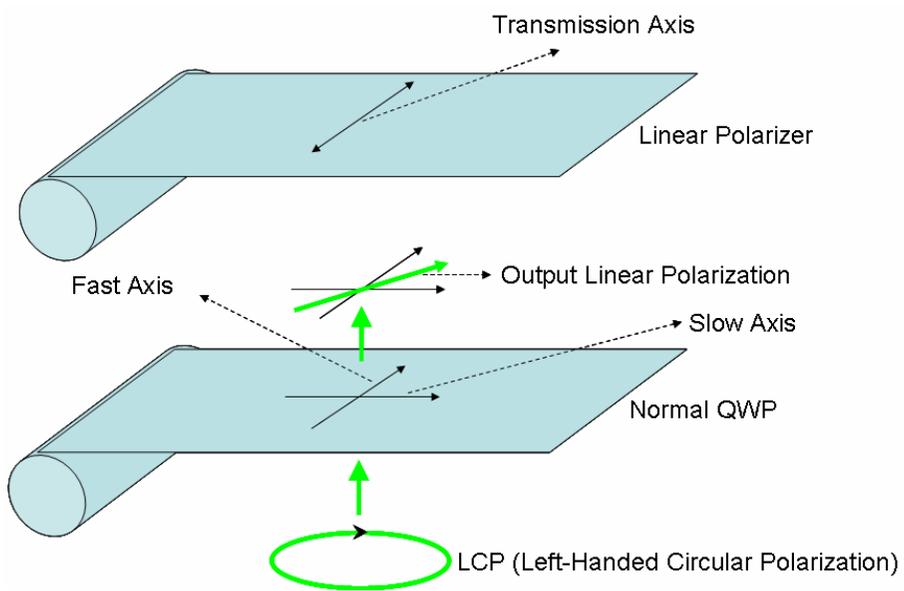


그림 2. 일반 사분 파장판을 이용한 좌원 편광의 선편광 변환

일반 사분 파장판에 좌원편광이 입사할 경우 출력되는 선편광의 방향은 느린 축과 45°각을 이루게 된다. 이 때 물형 패키지로 공급되는 선 편광판의 투과축과도 45°를 이루게 된다.

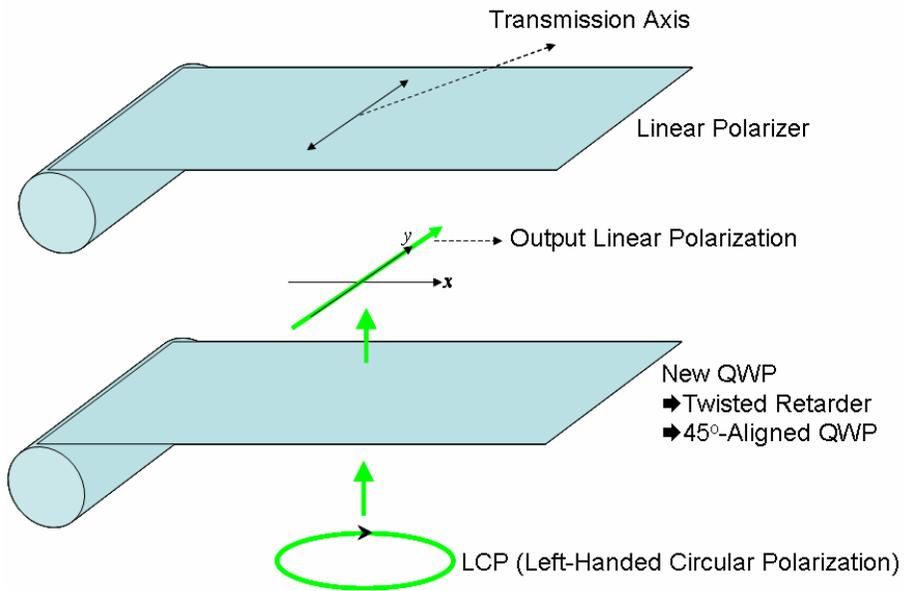


그림 3. 비틀린 위상지연 필름 또는 45° 방향의 느린 축을 지닌 위상지연 필름의 편광 변환 특성

비틀린 위상지연 필름 또는 45° 방향의 느린 축을 지닌 위상지연 필름에 좌원편광이 입사할 경우 출력되는 선편광의 방향은 필름의 길이 방향과 90°의 각도를 이루게 되고, 롤형 패키지로 공급되는 선 편광판의 투과축과 평행을 이루게 된다.

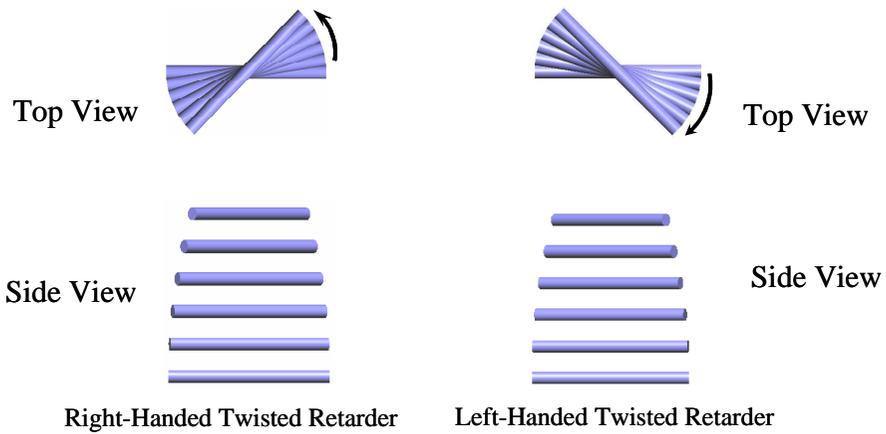


그림 4. 비틀린 위상지연 필름

위와 옆에서 본 우선(Right-Handed) 비틀린 위상지연 필름 (왼쪽 그림)

위와 옆에서 본 좌선(Left-Handed) 비틀린 위상지연 필름 (오른쪽 그림)

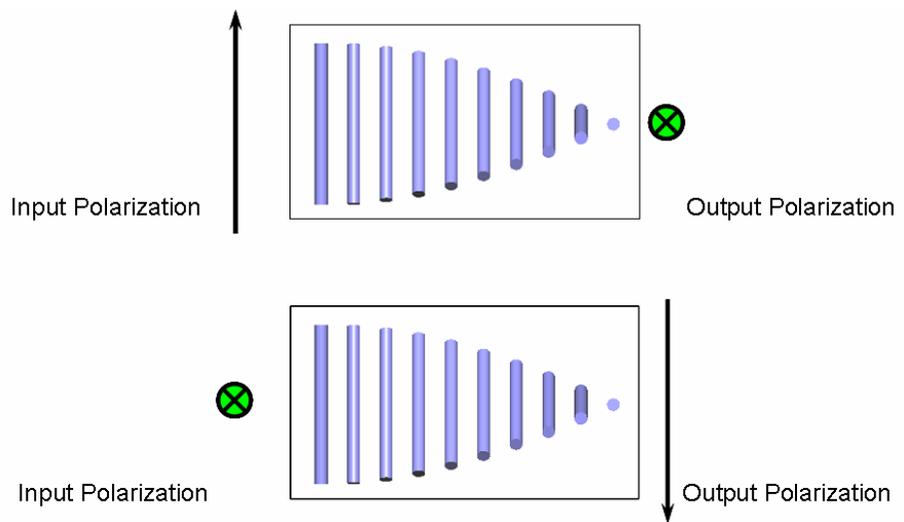


그림 5. 90° TN 모드에서의 파동 가이드 효과

비틀린 네마틱 액정의 파동 가이드 효과는 선 편광된 광이 비틀린 네마틱 액정에 입사할 경우 비틀린 네마틱 액정 분자의 꼬임 방향을 따라 선 편광의 방향이 회전하는 현상이다.

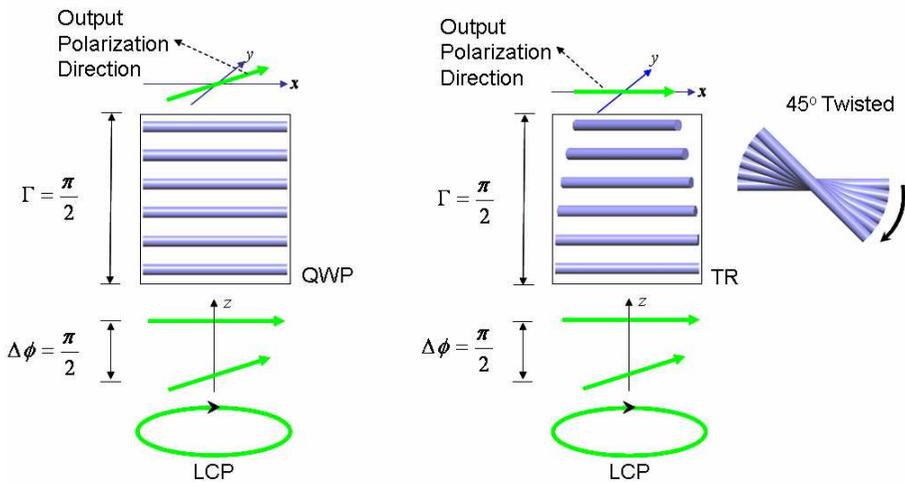


그림 6. 일반 사분 파장판과 비틀린 위상지연 필름의 편광변환 특성 비교

좌원편광이 일반 사분 파장판과 좌선(Left-Handed) 비틀린 위상지연 필름에 각각 입사할 때 예측되는 출력 선편광의 방향에 대하여 비교해 보았다.

## 제2장 이론

### 제1절 존스 행렬법을 이용한 비틀린 위상지연 필름 분석이론

본 장에서는 존스 행렬법<sup>[17,18]</sup>을 이용하여 비틀린 위상지연 필름에 대한 이론적 분석을 수행하였다. 존스 행렬법은 1941년 미국의 물리학자 존스(R. Clark Jones)에 의해 제안되었다. 그가 발전시킨 존스 행렬법은 가간섭성 광속에 적용할 수 있으며, 동시에 대단히 간결한 장점이 있다. 그러나 이 기법은 오로지 완전히 편광된 광에만 적용할 수 있다. 존스 행렬법에서 광의 편광상태를 표현하는 존스 벡터는 식(2-1)과 같이 정의된다.

$$\mathbf{E} = \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} \quad (2-1)$$

여기서,  $E_x$ 와  $E_y$ 는 각각 전기장 벡터  $\mathbf{E}$ 의 X축과 Y축 성분을 의미한다. 광학 부품의 편광에 대한 작용은 존스 행렬로 표현된다. 광학 부품에 입사되는 광의 존스 벡터를  $\mathbf{E}_{input}$ 이라 하고, 광학 부품을 통과하여 출사되는 출력 광의 존스 벡터를  $\mathbf{E}_{output}$ 이라 할 때, 두 존스 벡터는 광이 통과하여 진행되는 광학 부품의 존스 행렬  $\mathbf{M}$ 을 매개로 다음 식을 만족한다.

$$\mathbf{E}_{output} = \mathbf{M} \cdot \mathbf{E}_{input} \quad (2-2)$$

광학 부품의 존스 행렬  $\mathbf{M}$ 은 입력광의 편광 상태를 변환시켜주는 일종의 변환행렬로 이해할 수 있으며,  $1 \times 2$  벡터인 존스 벡터를 변환시켜 주는  $2 \times 2$  행렬이므로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{pmatrix} \quad (2-3)$$

표 1은 여러 가지 편광상태에 대한 존스 벡터의 간단한 목록을 보여주고 있다<sup>[1]</sup>.

그림 7은 기관 위에 비틀린 위상지연 필름을 코팅한 후의 모습을 보여 주고있다. 그림 7에서 X축은 기관 바로 윗면에서의 네마틱 액정 방향자 방향에 해당한다. 총 비틀림 각이  $\Phi$  일 때, 그림 7에 도시된 구조에 대한 존스 행렬은 다음 식과 같이 주어진다<sup>[1]</sup>.

$$\mathbf{M}_{TN} = \begin{pmatrix} \cos \Phi & -\sin \Phi \\ \sin \Phi & \cos \Phi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \Theta - i \frac{(\Gamma/2)}{\Theta} \sin \Theta & \frac{\Phi}{\Theta} \sin \Theta \\ -\frac{\Phi}{\Theta} \sin \Theta & \cos \Theta + i \frac{(\Gamma/2)}{\Theta} \sin \Theta \end{pmatrix} \quad (2-4)$$

여기서,  $\Gamma$ 는 총 위상지연 값이며,  $\Theta = \sqrt{\Phi^2 + (\Gamma/2)^2}$  이다. 총 위상지연 값  $\Gamma$ 는 복굴절 값  $\Delta n$ , 기준파장  $\lambda$ , 위상지연 필름의 두께는  $d$ 를 사용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\Gamma = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n d \quad (2-5)$$

실제 실험 상황에서는 그림 7과 같이 코팅된 비틀린 위상지연 필름에 콜레스테릭 필름을 적층한 후, 비틀린 위상지연 필름 기관으로부터 분리하여 사용하게 된다. 이 상황을 그림 8에 나타내었다. 그림 8에서 X축은 롤형 패키지 필름의 길이 방향에 해당한다. 그림 8의 비틀린 위상지연 필름은 그림 7의 구조를  $\beta = \pi - \Phi$  만큼 회전 시킨 구조를 갖고 있다. 따라서 그림 8에 도시된 비틀린 위

상지연 필름에 대한 존스 행렬은 다음 식을 사용하여 구할 수 있다.

$$\mathbf{M}_{TR} = \mathbf{R}(\pi - \Phi)\mathbf{M}_{TN}\mathbf{R}^{-1}(\pi - \Phi) \quad (2-6)$$

여기서  $\mathbf{R}$  은 회전 행렬이며, 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{R}(\beta) = \begin{pmatrix} \cos \beta & -\sin \beta \\ \sin \beta & \cos \beta \end{pmatrix} \quad (2-7)$$

식(2-6)을 정리하면 다음과 같다.

$$\mathbf{M}_{TR} = \begin{pmatrix} \cos \Theta - i \frac{(\Gamma/2)}{\Theta} \sin \Theta & \frac{\Phi}{\Theta} \sin \Theta \\ -\frac{\Phi}{\Theta} \sin \Theta & \cos \Theta + i \frac{(\Gamma/2)}{\Theta} \sin \Theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \Phi & -\sin \Phi \\ \sin \Phi & \cos \Phi \end{pmatrix} \quad (2-8)$$

이제 비틀린 위상 지연 필름에 원 편광이 입사할 경우, 출력 광의 편광상태에 대해 살펴보도록 하자. 다음 장에서 소개하겠지만 본 연구에서는 우선(Right-Handed) 콜레스테릭 액정 필름을 사용하였다. 실험적 상황에 이론적 분석을 일치시키기 위해 좌원 편광이 입사한다고 가정하도록 하겠다. 좌원 편광에 대한 존스 벡터는 다음 식과 같다.

$$\mathbf{E}_{LCP} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ -i \end{bmatrix} \quad (2-9)$$

따라서, 비틀린 위상 지연 필름을 통과한 출력광의 편광 상태는 다음 식을 이용하

여 계산할 수 있다.

$$\mathbf{E}_{output} = \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \mathbf{M}_{TR} \mathbf{E}_{LCP} \quad (2-10)$$

그림 9는 비틀린 위상지연 필름의 중요 파라미터인  $\Gamma$  와  $\Phi$  에 따른  $E_y/E_x$  의 허수부를 그래프로 표현한 것이다. 총 비틀림 각  $\Phi$  가 양수인 경우에 대해 계산하였는데, 이는 비틀린 위상지연 필름이 우선(Right-Handed) 방향으로 비틀려 있는 경우에 해당한다. 그림 9에서  $E_y/E_x$  의 허수부가 0인 부분을 점선으로 표시하였다.  $E_y/E_x$  의 허수부가 0일 때, 전기장 성분  $E_x$  와  $E_y$  의 위상차는 0 혹은  $\pi$  이므로 출력광은 선 편광 상태를 갖게 된다. 그림 10은 그림 9의 점선에 대한 그래프만을 다시 한 번 도시한 것이다. 그림 10에서 총 비틀림 각  $\Phi$  가 0이고 총 위상지연 값  $\Gamma$  가  $0.5\pi$ ,  $1.5\pi$  일 경우는 위상지연 필름이 각각 사분 파장판과 사분의 삼 파장판에 해당함을 알 수 있다.

그림 11은 선 편광이 출력 될 조건이 만족 될 때, 각 조건에서의 선 편광이 X 축과 이루는 각도  $\theta$  를 보여주고 있다. 출력 선 편광의 방향각  $\theta$  는 식  $\theta = \tan^{-1}(E_y/E_x)$  을 이용하여 계산하였다. 좌원 편광이 우선 비틀린 위상지연 필름에 입사할 경우, 출력 선 편광은  $-45^\circ$ 부터  $+45^\circ$ 까지의 방향각을 갖고 있음을 알 수 있다. 특히, X축 방향의 선 편광( $\theta$ 가  $0^\circ$ 인 경우)이 출력될 조건은  $\Phi = 0.35\pi$ ,  $\Gamma = 0.71\pi$  이다.

그림 12는 우선 비틀린 위상지연 필름에 좌원 편광이 입사할 경우 출력광의 X축 선 편광자 투과율 분포도를 보여 주고 있다. 그림 11로부터 예측할 수 있듯이,  $\Phi = 0.35\pi$ ,  $\Gamma = 0.71\pi$  인 경우 출력광의 X축 선 편광자 투과율은  $T = 1$ 이 된다. 그림 13은 그림 12를 이용하여 비틀린 위상 지연 필름 제작 시 총 위상지연 값과 총 비틀림 각이 가질 수 있는 허용오차에 대해 분석한 그림이다. 그림 13의 왼쪽

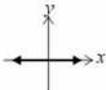
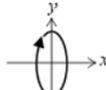
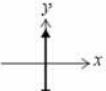
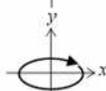
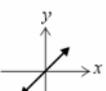
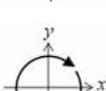
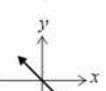
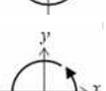
그래프는  $\Phi = 0.35\pi$ ,  $\Gamma = 0.71\pi$  를 중심으로  $\Gamma$  값에 오차  $\Delta\Gamma$  가 존재하는 경우 투과율  $T$ 가 변화하는 모습을 보여 준다. X축 선 편광자 투과율을 99% 이상으로 유지 하고자 할 때, 총 위상지연 값의 허용오차는 약  $\pm 13\%$ 임을 알 수 있다. 그림 13의 오른쪽 그래프는  $\Phi = 0.35\pi$ ,  $\Gamma = 0.71\pi$  를 중심으로  $\Phi$  값에 오차  $\Delta\Phi$  가 존재하는 경우 투과율  $T$ 가 변화하는 모습을 보여 준다. 이 경우에도 X축 선 편광자 투과율을 99% 이상으로 유지 하고자 할 때, 총 비틀림 각의 허용오차 또한 약  $\pm 13\%$ 이었다.

이제 좌원 편광이 좌선(Left-Handed) 비틀린 위상지연 필름에 입사할 경우에 대해 살펴보도록 하자. 그림 14는  $\Gamma$  와  $\Phi$  에 따른  $E_x/E_y$  의 허수부를 그래프로 표현한 것이다.  $E_x/E_y$  의 허수부가 0인 부분을 점선으로 표시하였는데, 이 경우 역시 출력광이 선 편광 상태를 갖게 될 조건에 해당한다. 그림 15는 그림 14의 점선에 대한 그래프만을 다시 한 번 도시한 것이다.

그림 16은 선 편광이 출력 될 조건이 만족 될 때, 각 조건에서의 선 편광이 X축과 이루는 각도  $\theta$ 를 보여주고 있다. 좌원 편광이 좌선 비틀린 위상지연 필름에 입사할 경우, 출력 선 편광은  $+45^\circ$ 부터  $+135^\circ$ 까지의 방향각을 갖고 있음을 알 수 있다. 특히, Y축 방향의 선 편광( $\theta$ 가  $90^\circ$ 인 경우)이 출력될 조건은  $\Phi = -0.35\pi$ ,  $\Gamma = 0.71\pi$  이다.

그림 17는 좌선 비틀린 위상지연 필름에 좌원 편광이 입사할 경우 출력광의 Y축 선 편광자 투과율 분포도를 보여 주고 있다. 그림 16으로부터 예측할 수 있듯이,  $\Phi = -0.35\pi$ ,  $\Gamma = 0.71\pi$  인 경우 출력광의 Y축 선 편광자 투과율은  $T=1$  이 된다. 그림 18은 그림 17을 이용하여 비틀린 위상 지연 필름 제작 시 총 위상지연 값과 총 비틀림 각이 가질 수 있는 허용오차에 대해 분석한 그림이다. 우선 비틀린 위상지연 필름의 경우와 마찬가지로 Y축 선 편광자 투과율을 99% 이상으로 유지 하고자 할 때, 총 위상지연 값과 총 비틀림 각에 대한 허용오차는 모두 약  $\pm 13\%$ 임을 알 수 있다.

표 1. 몇 가지 편광 상태에 대한 편광 타원 및 존스 벡터<sup>[1]</sup>

Polarization Ellipse	Jones Vector	Polarization Ellipse	Jones Vector
	$\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$		$\frac{1}{\sqrt{5}} \begin{pmatrix} 1 \\ 2i \end{pmatrix}$
	$\begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$		$\frac{1}{\sqrt{5}} \begin{pmatrix} 2 \\ i \end{pmatrix}$
	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}$		$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ i \end{pmatrix}$
	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \end{pmatrix}$		$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ -i \end{pmatrix}$

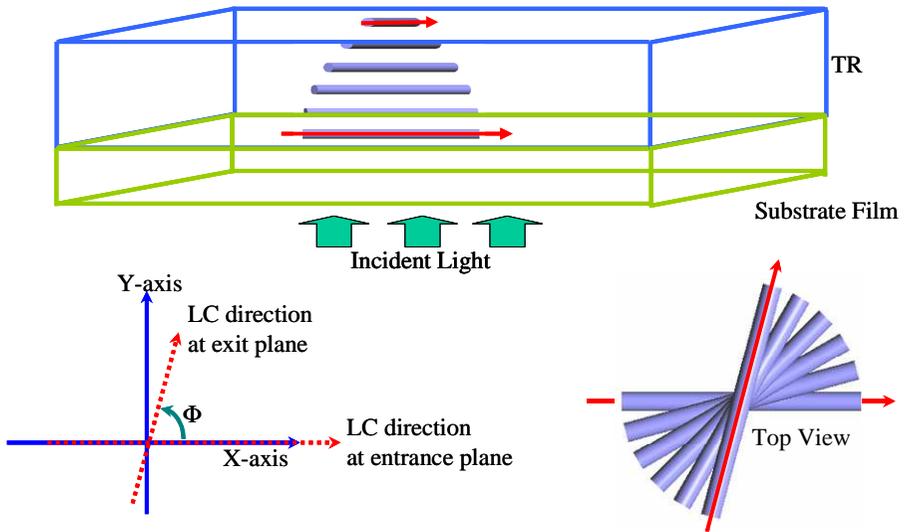


그림 7. 기관 위에 비틀린 위상지연 필름을 코팅한 후의 모습

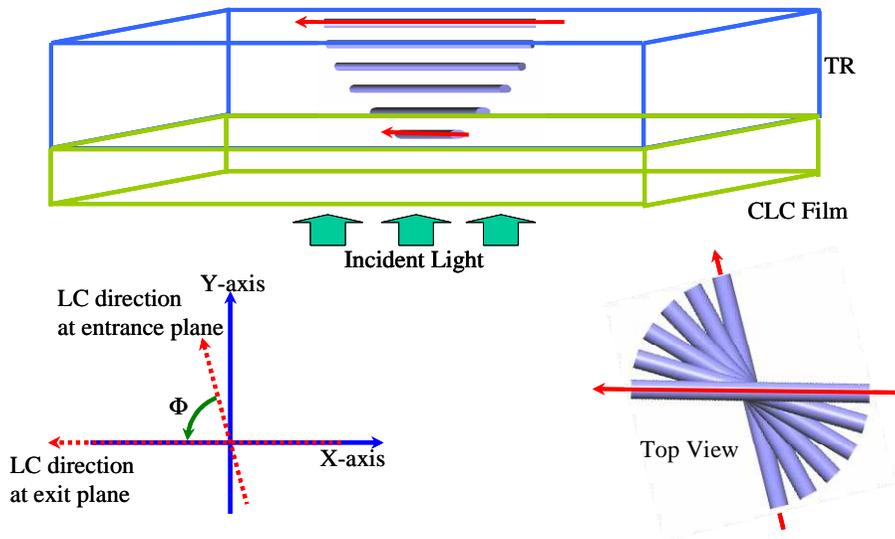


그림 8. 비틀린 위상지연 필름에 콜레스테릭 필름을 적층하고, 비틀린 위상지연 필름을 기판으로부터 분리한 후의 모습

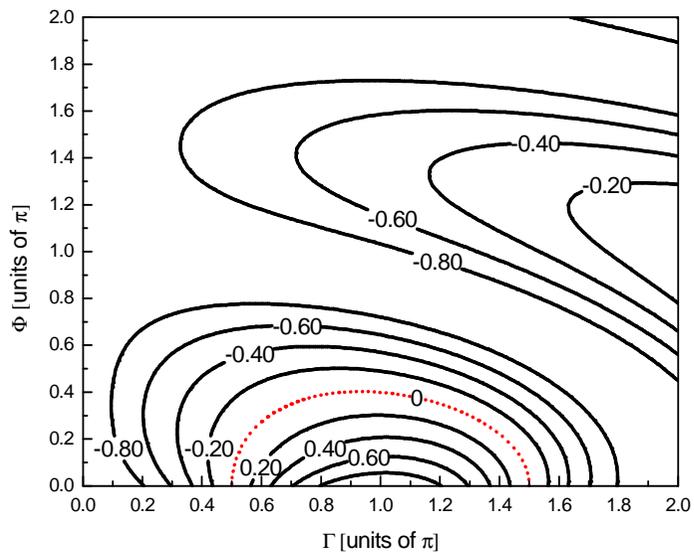


그림 9. 우선 비틀린 위상지연 필름에 좌원 편광이 입사할 경우, 출력광의  $\text{Im}(E_y/E_x)$ 에 대해 계산한 결과

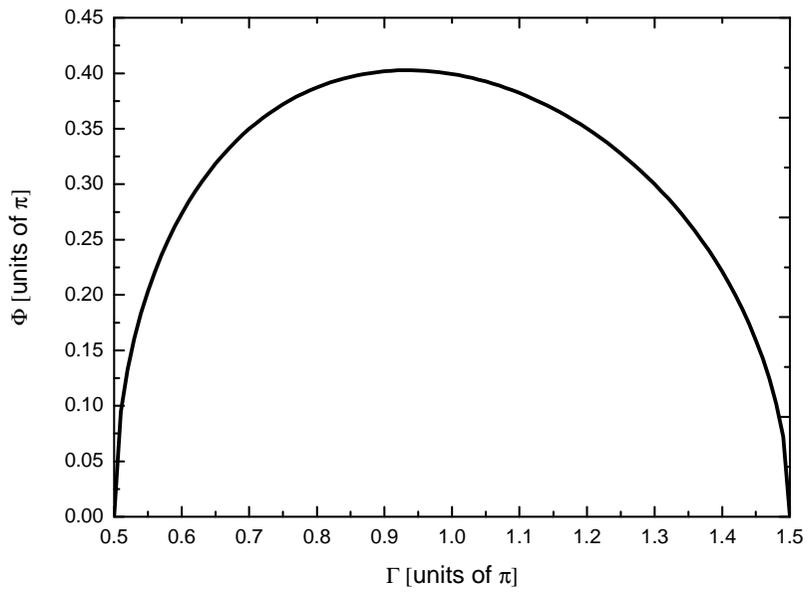


그림 10. 우선 비틀린 위상지연 필름에 좌원 편광이 입사할 경우 선 편광이  
출력될 조건

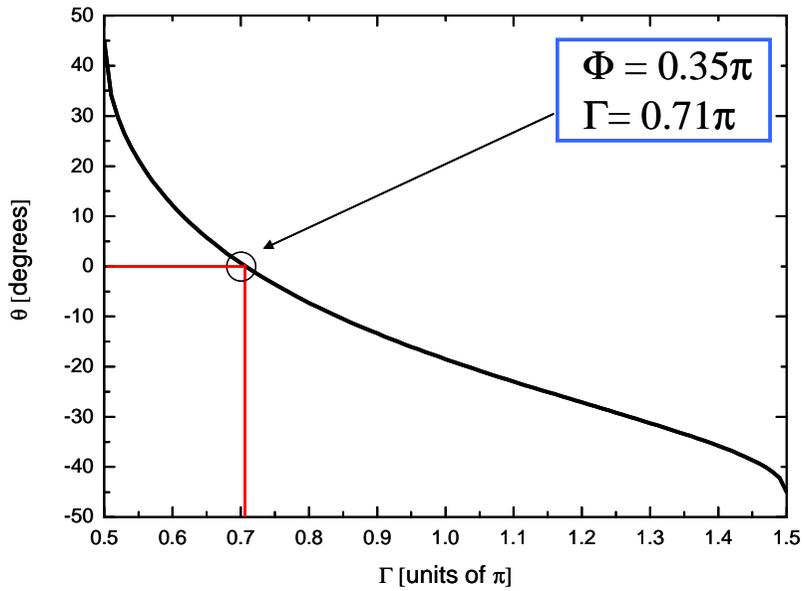


그림 11. 우선 비틀린 위상지연 필름에 좌원 편광이 입사할 경우 선 편광이 출력 될 조건이 만족 될 때, 각 조건에서의 선 편광이 X축과 이루는 각도

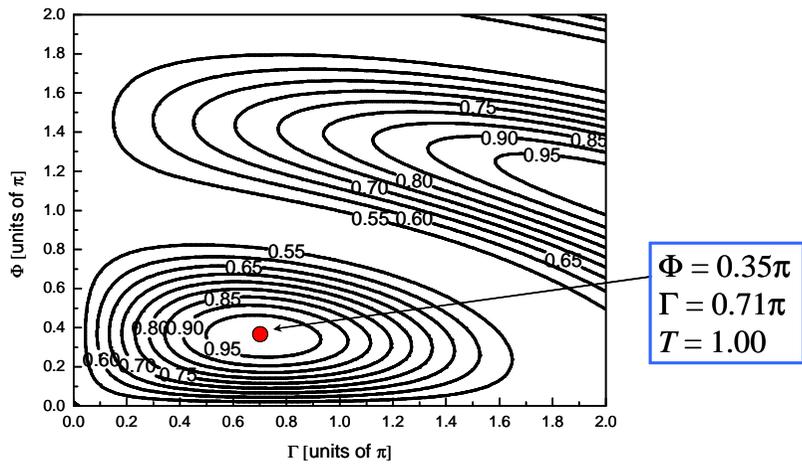
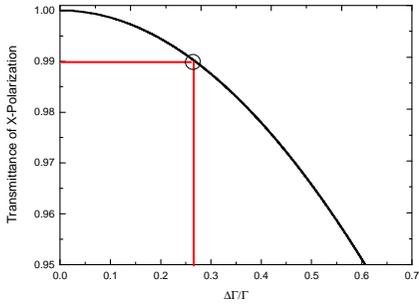
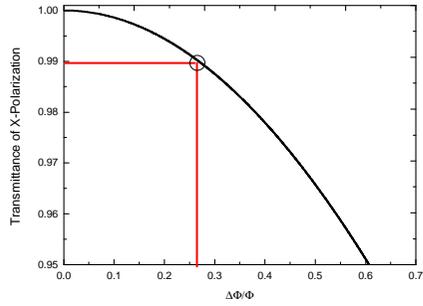


그림 12. 우선 비틀린 위상지연 필름에 좌원 편광이 입사할 경우 출력 광의 X축 선 편광자 투과율 분포도



X축 선편광의 투과율이 1% 감소할 때  $\Gamma$ 의 허용오차가  $\pm 13\%$  임.



X축 선편광의 투과율이 1% 감소할 때  $\Phi$ 의 허용오차가  $\pm 13\%$  임.

그림 13. 우선 비틀린 위상지연 필름에서 위상지연 값과 총 비틀림 각의 허용오차

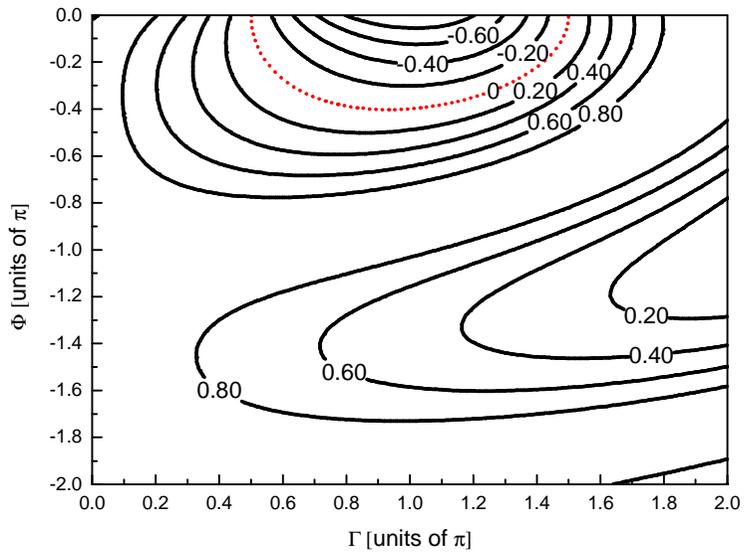


그림 14. 좌선 비틀린 위상지연 필름에 좌원 편광이 입사할 경우 출력광의  $\text{Im}(E_x/E_y)$ 에 대해 계산한 결과

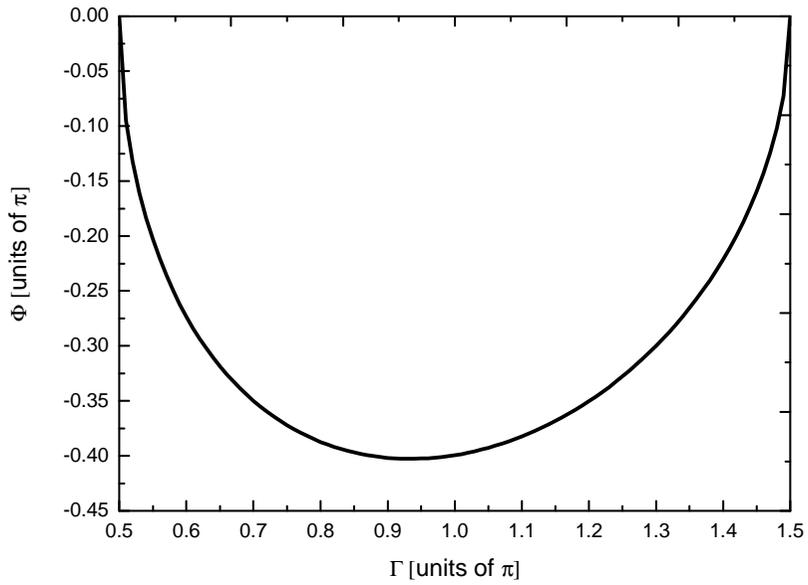


그림 15. 좌선 비틀린 위상지연 필름에 좌원 편광이 입사할 경우 선 편광이  
출력될 조건

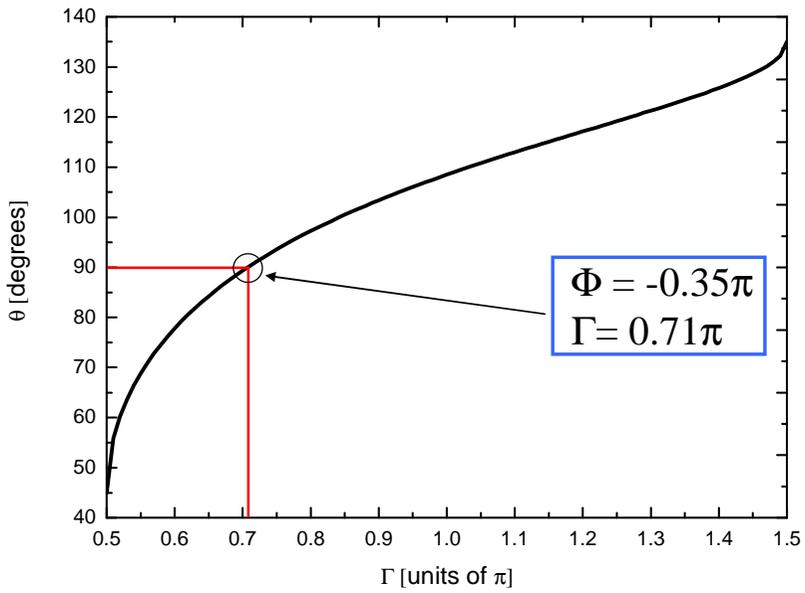


그림 16. 좌선 비틀린 위상지연 필름에 좌원 편광이 입사할 경우 선 편광이 출력 될 조건이 만족 될 때, 각 조건에서의 선 편광이 X축과 이루는 각도

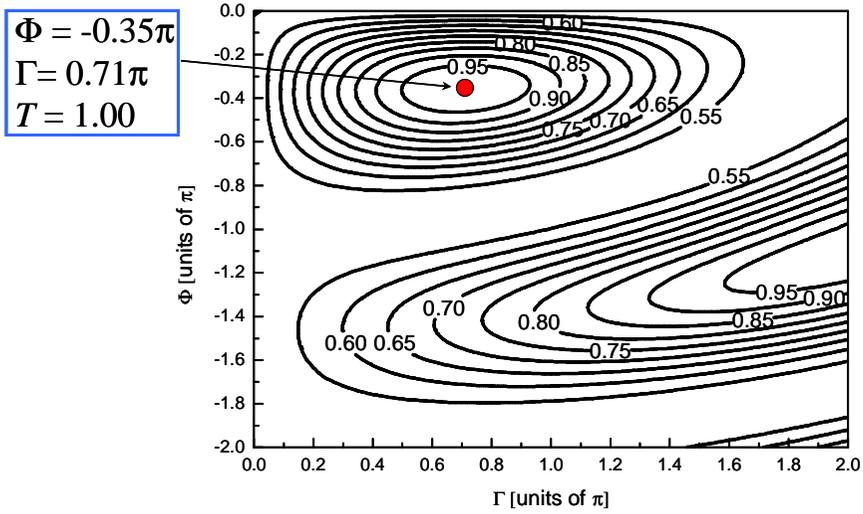
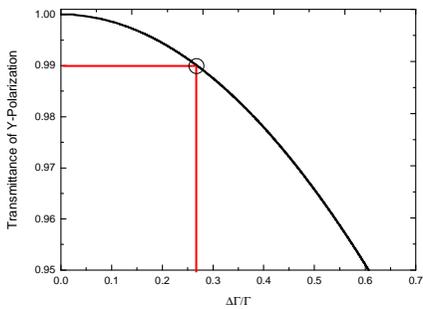
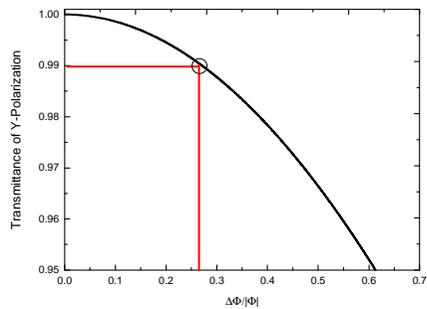


그림 17. 좌선 비틀린 위상지연 필름에 좌원 편광이 입사할 경우 출력 광의 Y축 선 편광자 투과율 분포도



Y축 선편광의 투과율이 1% 감소할 때  $\Gamma$ 의 허용오차가  $\pm 13\%$  임.



Y축 선편광의 투과율이 1% 감소할 때  $\Phi$ 의 허용오차가  $\pm 13\%$  임.

그림 18. 좌선 비틀린 위상지연 필름에서 위상지연 값과 총 비틀림 각의 허용오차

## 제2절 밀러 행렬법을 이용한 광학필름 분석이론

편광된 광에 대한 현대적 표현은 1852년에 수행된 스토크스(G. G. Stokes)의 연구에서 유래한다. 그는 네 개의 측정 가능한 물리량을 도입하였는데, 지금은 이 네 물리량을 조합하여 스토크스 벡터(Stokes Vector)라고 부른다. 스토크스 벡터는 다음과 같이 정의된다<sup>[19]</sup>.

$$\mathbf{S} = \begin{pmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} P_H + P_V \\ P_H - P_V \\ P_{45} - P_{135} \\ P_R - P_L \end{pmatrix} \quad (2-11)$$

식(2-11)에서  $S_0$ 는 단지 광의 총 복사 조도를 의미하며,  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$ 를 통해 광의 편광상태를 알아낼 수 있다.  $P_H$ 는 수평방향 선 편광판,  $P_V$ 는 수직방향 선 편광판,  $P_{45}$ 는 45° 선 편광판,  $P_{135}$ 는 135° 선 편광판,  $P_R$  우원 편광판,  $P_L$  좌원 편광판을 투과한 광의 복사 조도를 각각 의미한다. 표 2는 몇 가지 편광 상태에 대한 편광 타원 및 스토크스 벡터를 보여주고 있다<sup>[19]</sup>. 스토크스 벡터는 완전 편광과 뿐만 아니라 부분 편광과의 편광 상태도 기술할 수 있는 장점이 있다.

1943년 MIT의 물리학과 교수였던 밀러(Hans Mueller)는 스토크스 벡터를 다루는 행렬법인 밀러 행렬법을 고안하였다<sup>[17]</sup>. 밀러 행렬법에서 광학 부품의 편광에 대한 작용은  $4 \times 4$  행렬인 밀러 행렬로 표현된다. 입사광의 스토크스 벡터가  $\mathbf{S}_{input}$  이고, 광학 부품의 밀러 행렬이  $\mathbf{M}^{Mueller}$  라면, 이를 투과한 출력광의 스토크스 벡터  $\mathbf{S}_{output}$  은 다음 식을 이용하여 계산할 수 있다.

$$\mathbf{S}_{output} = \mathbf{M}^{Mueller} \cdot \mathbf{S}_{input} \quad (2-12)$$

광학 부품의 밀러 행렬  $\mathbf{M}^{Mueller}$  은  $4 \times 4$  행렬이므로 일반적으로 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{M}^{Mueller} = \begin{pmatrix} m_{00} & m_{01} & m_{02} & m_{03} \\ m_{10} & m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{20} & m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{30} & m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{pmatrix} \quad (2-13)$$

그림 7과 같은 구조의 비틀린 위상지연 필름에 대한 밀러 행렬  $\mathbf{M}_{TN}^{Mueller}$  은 다음과 같이 주어진다<sup>[1]</sup>.

$$\mathbf{M}_{TN}^{Mueller} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(2\Phi) & -\sin(2\Phi) & 0 \\ 0 & \sin(2\Phi) & \cos(2\Phi) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 - 2\frac{\Phi^2}{X^2}\sin^2 X & \frac{\Phi}{X}\sin(2X) & -2\frac{\Phi(\Gamma/2)}{X^2}\sin^2 X \\ 0 & -\frac{\Phi}{X}\sin(2X) & \cos(2X) & \frac{(\Gamma/2)}{X}\sin(2X) \\ 0 & -2\frac{\Phi(\Gamma/2)}{X^2}\sin^2 X & \frac{(\Gamma/2)}{X}\sin(2X) & 1 - 2\frac{(\Gamma/2)^2}{X^2}\sin^2 X \end{pmatrix} \quad (2-14)$$

식 (2-14)에서  $\Phi$  와  $\Gamma$  는 제2장 제1절에서 도입된 총 비틀린 각과 총 위상지연 값을 각각 의미하며,  $X = \sqrt{\Phi^2 + (\Gamma/2)^2}$  이다.

그림 8에 제시되어 있는 비틀린 위상지연 필름의 구조는 앞서 설명했듯이 그림 7의 구조를  $\beta = \pi - \Phi$  각도만큼 회전한 모습이다. 따라서 그림 8의 비틀린 위상지연 필름의 구조에 대한 밀러 행렬  $\mathbf{M}_{TR}^{Mueller}$  은 다음 식을 이용하여 계산할 수 있다.

$$\mathbf{M}_{TR}^{Mueller} = \mathbf{M}_R(\pi - \Phi)\mathbf{M}_{TN}^{Mueller}\mathbf{M}_R^{-1}(\pi - \Phi) \quad (2-15)$$

여기서  $\mathbf{M}_R$  은 회전 행렬이며, 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{M}_R(\beta) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(2\beta) & -\sin(2\beta) & 0 \\ 0 & \sin(2\beta) & \cos(2\beta) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2-16)$$

식(2-15)는 식(2-16)을 이용하면 다음과 같이 계산된다.

$$\mathbf{M}_{TR}^{Mueller} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 - 2\frac{\Phi^2}{X^2}\sin^2 X & \frac{\Phi}{X}\sin(2X) & -2\frac{\Phi(\Gamma/2)}{X^2}\sin^2 X \\ 0 & -\frac{\Phi}{X}\sin(2X) & \cos(2X) & \frac{(\Gamma/2)}{X}\sin(2X) \\ 0 & -2\frac{\Phi(\Gamma/2)}{X^2}\sin^2 X & \frac{(\Gamma/2)}{X}\sin(2X) & 1 - 2\frac{(\Gamma/2)^2}{X^2}\sin^2 X \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(2\Phi) & -\sin(2\Phi) & 0 \\ 0 & \sin(2\Phi) & \cos(2\Phi) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2-17)$$

스토크스 벡터로부터 광의 편광도에 대한 정보를 얻어 낼 수 있는데, 편광도 (*DOP*, Degree of Polarization), 선 편광도 (*DOLP*, Degree of Linear Polarization), 원 편광도 (*DOCP*, Degree of Circular Polarization) 등은 다음의 식을 이용하여 구할 수 있다<sup>[19]</sup>.

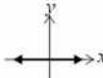
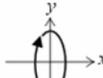
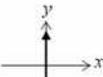
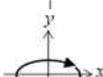
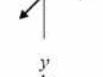
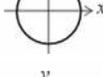
$$DOP = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}}{S_0} \quad (2-18)$$

$$DOLP = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2}}{S_0} \quad (2-19)$$

$$DOCP = \frac{S_3}{S_0} \quad (2-20)$$

광의 편광상태는 스토크스 벡터의 세 성분  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$ 로 정의 할 수 있음을 앞서 언급하였는데, 광의 편광상태는 이 세 개의 물리량을 좌표( $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$ )로 사용하여 3차원 공간 상의 점으로 표현할 수 있다. 완전 편광된 광의 경우  $S_1^2 + S_2^2 + S_3^2 = 1$ 을 만족하며, 이는 3차원 공간에서의 단위 구면에 해당한다. 이런 3차원 단위 구를 포앙카레 구면이라고 한다<sup>[1]</sup>.(그림 19 참조)

표 2. 몇 가지 편광 상태에 대한 편광 타원 및 스토크스 벡터<sup>[1]</sup>

Polarization Ellipse	Stokes Vector	Polarization Ellipse	Stokes Vector
	$\begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$		$\begin{pmatrix} 1 \\ -3/5 \\ 0 \\ 4/5 \end{pmatrix}$
	$\begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$		$\begin{pmatrix} 1 \\ 3/5 \\ 0 \\ 4/5 \end{pmatrix}$
	$\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}$		$\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$
	$\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix}$		$\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix}$

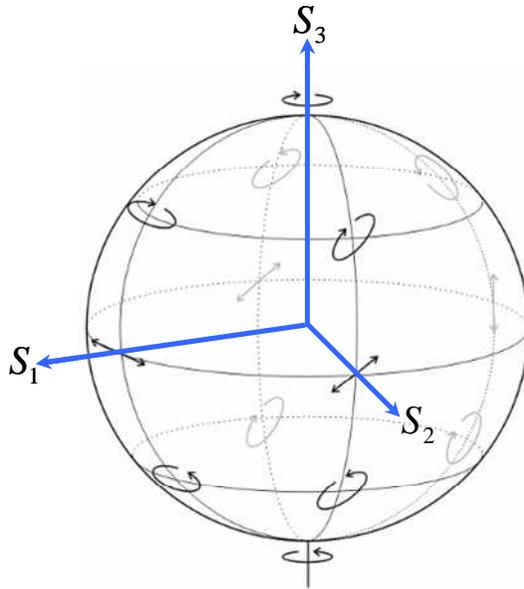


그림 19. 뽀앙카레 구면<sup>[1]</sup>

- 좌표  $(S_1, S_2, S_3)$ 가  $(0, 0, 1)$ 이면 우원 편광(북극)
- 좌표  $(S_1, S_2, S_3)$ 가  $(0, 0, -1)$ 이면 좌원 편광(남극)
- 좌표  $(S_1, S_2, S_3)$ 가  $(1, 0, 0)$ 이면 X축 선 편광
- 좌표  $(S_1, S_2, S_3)$ 가  $(-1, 0, 0)$ 이면 Y축 선 편광
- 좌표  $(S_1, S_2, S_3)$ 가  $(0, 1, 0)$ 이면  $45^\circ$  선 편광
- 좌표  $(S_1, S_2, S_3)$ 가  $(0, -1, 0)$ 이면  $135^\circ$  선 편광

## 제3장 실험

### 제1절 비틀린 위상지연 필름의 제작

본 절에서는 비틀린 위상지연 필름의 제작과정에 대해 서술하도록 한다. 기관 필름으로 TAC(Tri-Acetyl Cellulose) 필름을 사용하였고, 비틀린 위상지연 필름 제작을 위한 코팅물질로 Merck사의 RMM522(네마틱 액정)와 RMM498(네마틱 액정에 우선 카이랄 성분이 포함됨)을 사용하였다. 코팅액 제조를 위한 용매로는 MEK(Methyl Ethyl Ketone)와 톨루엔을 사용하였다.

비틀린 위상지연 필름의 제작 과정은 다음과 같다. 우선 기관으로 사용될 TAC 필름에 대한 러빙 공정을 진행한다. Yoshikawa Chemicals사의 FINE FUFF(YA-181-R)를 러빙포로 사용하였다. 러빙공정은 기관 필름 바로 위에 코팅될 액정분자가 일정한 방향으로 배열되도록 하기 위해 수행하는 공정이다. 그림 20은 러빙 공정 후 우선(Right-Handed) 비틀린 위상 지연 필름이 코팅되는 모습을 보여주고 있다. 다음으로 코팅액을 제조한다. Merck사의 RMM522와 RMM498을 일정한 조성비로 혼합하여 MEK와 톨루엔에 광개시제(Photo Initiator)인 CIBA사의 IG184와 함께 용해시킨다. RMM522와 RMM498의 조성비를 조절하여 총 비틀림 각을 변화시킬 수 있다. 광개시제는 자외선으로부터 에너지를 흡수하여 중합(Polymerization)반응을 시작하게 하는 물질이다. 다음으로 코팅공정을 진행한다. 코팅기로는 바 코터(Bar Coater)인 Han Jin사의 Film Coater를 사용하였다. 코팅두께는 코팅을 수행하는 코팅 바의 번호(Bar Number)에 따라 조절이 가능하다. 코팅 후 처리 공정으로 건조 공정과 UV(Ultra-Violet)경화 공정을 진행하였다. JISICO사의 J-300M 열 건조 장비를 사용하여(건조 조건: 60°C, 5분) 코팅된 비틀린 위상지연 필름을 건조시켰다. 건조 공정 후 필름의 중합반응을 유도하기 위해 진행되는 UV경화 공정은 JEIUV사의 UV경화장치를 사용하여 진행하였다. 필름 제작 완료 후에는 Axometrics사의 AxoScan

장비를 사용하여 제작된 필름의 필러 행렬과 총 비틀림 각 및 총 위상지연 값 등을 측정하였다. 표 3에 제작 과정에 대한 세부 사항을 정리하였다.

그림 21은 비틀린 위상지연 필름 제작공정 및 관련 사진을 보여준다. 앞에서 설명한 제작공정은 그림에서 **Lab Scale**로 표시된 부분에 해당한다. **Lab Scale**로 표시된 부분에 러빙 공정 및 바 코팅 공정에 사용된 장비의 사진과 A4 크기로 제작된 비틀린 위상지연 필름 샘플 사진을 제시하였다. 비틀린 위상지연 필름 제작은 **Pilot Scale**로도 수행될 수 있으며, 이를 위해 사용할 수 있는 인라인(**In-Line**) 러빙기 및 롤 코터(**Roll Coater**)의 사진도 함께 제시되어 있다.

표 3. 비틀린 위상지연 필름의 제작 공정

순번	공정	세부사항
1	기판 준비	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 기판 필름 : TAC 필름</li> <li>• 러빙</li> </ul> [러빙포 : FINE FUFF(YA-181-R), 제조사 : Yoshikawa Chemicals]
2	코팅	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 코팅 물질 : RMM522와 RMM498 혼합액</li> </ul> [용매 : MEK, 톨루엔, 광개시제 : IG184(CIBA사)] <ul style="list-style-type: none"> <li>• 코팅 방법 : Bar Coating</li> </ul> [Model 명 : Film Coater , 제조사 : Han Jin Co.]
3	코팅 후 처리	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 건조 : 60°C, 5 분</li> </ul> [Model 명 : J-300M, 제조사 : JISICO] <ul style="list-style-type: none"> <li>• UV 조사</li> </ul> [Model 명 : UV 경화장치, 제조사 : JEILUV]
4	측정	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 필러 행렬, 총 비틀림 각, 총 위상지연 값</li> </ul> [Model 명 : AxoScan, 제조사 : Axometrics, Inc.]

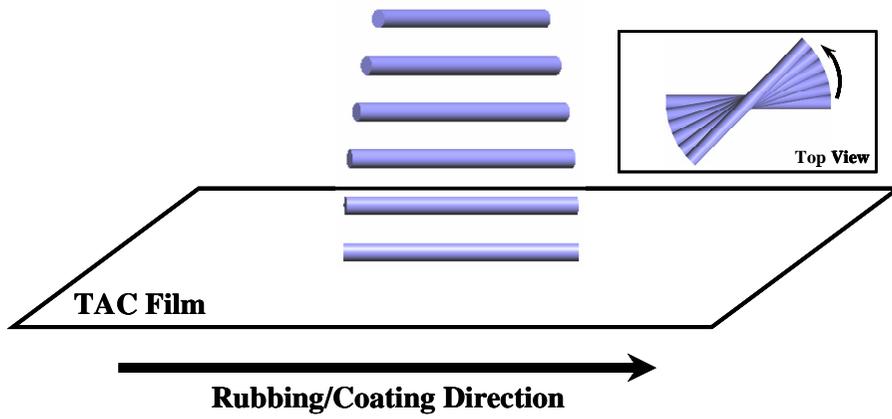


그림 20. 러빙 공정 후 우선 비틀린 위상지연 필름이 코팅되는 모습

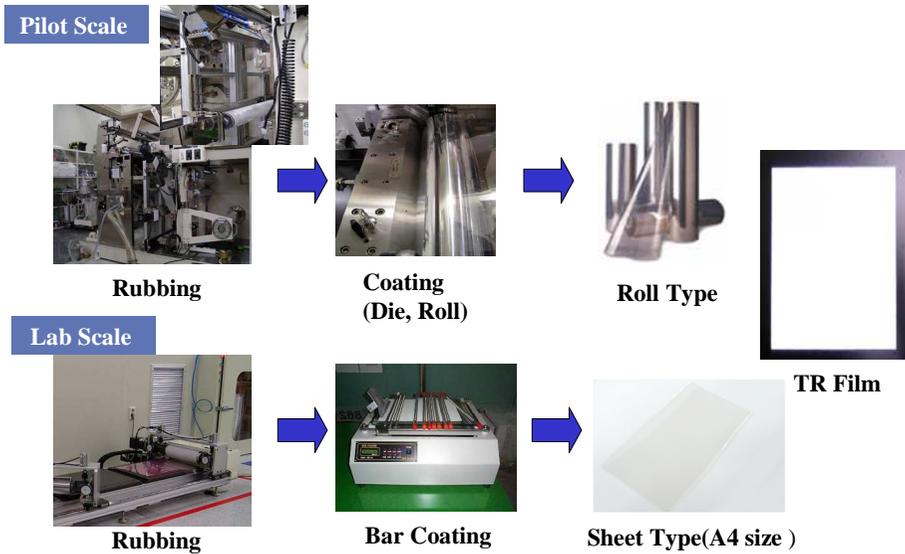


그림 21. 비틀린 위상지연 필름 제작공정 및 관련 사진  
(TR Film : Twisted Retarder Film)

## 제2절 비틀린 위상지연 필름의 밀러 행렬 측정 및 제작공정 파라미터 추출

앞 절에서 서술한 바와 같이 제작된 비틀린 위상지연 필름의 광학적 특성 분석을 위하여 Axometrics사의 AxoScan 장비를 사용하였다<sup>[20]</sup>. AxoScan은 미리 프로그램 되어 있는 여러 편광상태의 광을 광학 샘플에 조사하여 출력된 광의 편광상태를 측정하고, 이를 분석하여 광학 샘플의 밀러 행렬을 추출할 수 있는 장비이다. 제2장에서 서술하였듯이 입력 편광의 스토크스 벡터는 광학 샘플의 밀러 행렬에 의해 출력 편광의 스토크스 벡터로 변환 된다. 따라서 충분한 수의 입력 편광상태에 대한 스토크스 벡터와 이에 대응하는 출력 편광상태에 대한 스토크스 벡터를 사용하면 광학 샘플의 밀러 행렬을 측정해 낼 수 있다. 또한, 제작된 비틀린 위상지연 필름을 샘플로 사용하여 측정한 밀러 행렬을 식(2-17)에 데이터 맞춤(Fitting)하여 비틀린 위상지연 필름의 중요 파라미터인 총 비틀림 각  $\Phi$ 와 총 위상지연 값  $\Gamma$ 를 추출해 낼 수 있다.

Merck사의 RMM498의 함량비를 0%부터 100%까지 20% 간격으로 변화시키며 RMM522와 RMM498의 혼합 코팅액을 사용한 비틀린 위상지연 필름을 제작하였다. 표 4는 RMM498의 함량비에 따른 비틀림 비율과 위상지연 값( $\Delta nd$ ) 측정치를 보여 주고 있다. 측정 파장은 550 nm이었으며, 각 함량비 별로 제작된 샘플에 대해 4개 영역을 무작위로 지정하여 밀러 행렬을 측정하였고, 데이터 맞춤 방법을 사용하여 총 비틀림 각  $\Phi$ 와 위상지연 값  $\Delta nd$ 를 추출하였다. 표 4에서 오차에 해당하는 데이터는 4개 측정치에 대한 표준편차를 의미한다. 제작된 필름의 두께는 측정된 필름의 질량과 코팅물질의 알려진 비중 데이터를 사용하여 계산하였다. 비틀림 비율(Twist Rate)은 총 비틀림 각을 필름의 두께로 나눈 값으로 단위 두께당 비틀림 각에 해당한다.

그림 22는 RMM498의 함량비에 따른 비틀림 비율을 보여 주고 있다. 비틀린

위상 지연 필름의 비틀림 비율은 RMM498의 함량비에 대해 선형적으로 변화함을 알 수 있다. 비틀림 비율(단위: deg./ $\mu\text{m}$ )을  $y$ , RMM498의 함량비(무차원)를  $x$ 라 할 때,  $y$ 와  $x$ 는  $y = 58.8x - 0.4$ 로 선형 곡선 맞춤 되었다. 이 때, 곡선 맞춤의 양호도에 대한 척도(Measure of Goodness)로 사용되는 상관 계수(Correlation Coefficient)는 0.98로 계산되어 선형 곡선으로 매우 양호하게 곡선 맞춤 되고 있음을 알 수 있다.

그림 23은 제작된 필름의 코팅 두께에 따른 위상지연 값을 보여주고 있다. 위상지연 값(단위: nm)을  $y$ , 필름의 두께(단위:  $\mu\text{m}$ )를  $x$ 라 할 때,  $y$ 와  $x$ 는  $y = 82.9x + 12.9$ 로 선형 곡선 맞춤 되었으나, 그림 22에 비해 선형 곡선 맞춤 양호도가 불량함을 알 수 있다. 이 때, 선형 곡선 맞춤에 대한 상관 계수는 0.77로 계산되었다.

바 코팅을 통한 비틀린 위상지연 필름 제작 과정에서 코팅 바의 번호변경을 통한 코팅 두께 조절이 어느 정도는 가능하였으나, 정밀한 코팅 두께 조절에는 어려움이 있었다. 또한 코팅 두께의 균일도 조절 역시 까다로운 문제였다. 현재 코팅 두께의 정밀 제어를 통한 위상지연 값의 미세 조절이 실험적으로 가능하도록 하기 위하여 코팅 공정 개선이 진행 중이다.

표 4. RMM498의 함량비에 따른 비틀림 비율과 위상지연 값 측정치

(Measured @550 nm)

RMM 498 [%]	Total Twist Angle [degrees]	Twist Rate [deg./ $\mu\text{m}$ ]	Retardation Value [nm]	Thickness [ $\mu\text{m}$ ]
0	$3.0 \pm 0.5$	$1.8 \pm 0.3$	$169.6 \pm 4.9$	1.70
20	$18.6 \pm 1.2$	$12.4 \pm 0.8$	$144.7 \pm 7.5$	1.50
40	$35.0 \pm 0.7$	$22.7 \pm 0.5$	$142.1 \pm 1.2$	1.54
60	$49.9 \pm 1.7$	$30.4 \pm 1.0$	$134.5 \pm 2.7$	1.64
80	$64.1 \pm 0.6$	$42.2 \pm 0.4$	$125.6 \pm 1.0$	1.52
100	$77.6 \pm 1.7$	$64.7 \pm 1.4$	$115.5 \pm 1.9$	1.20

RMM522(Merck사, Nematic LC)

RMM498(Merck사, Nematic+ Chiral LC, Right-Handed)

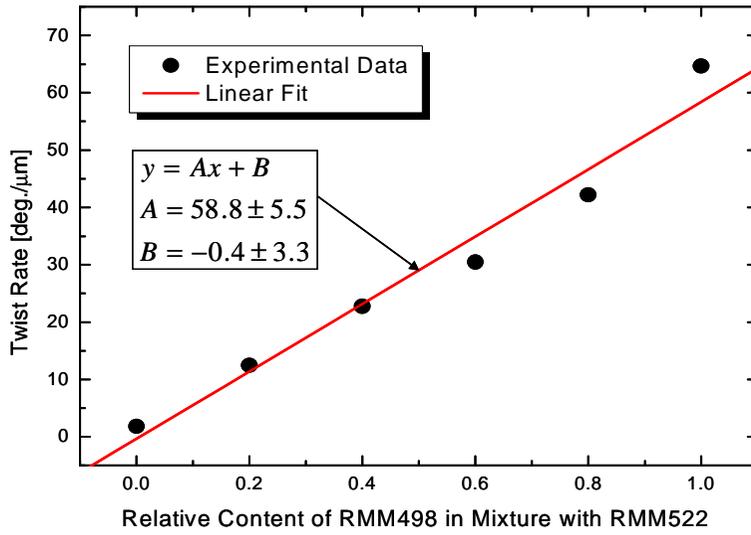


그림 22. RMM498의 함량비에 따른 비틀림 비율

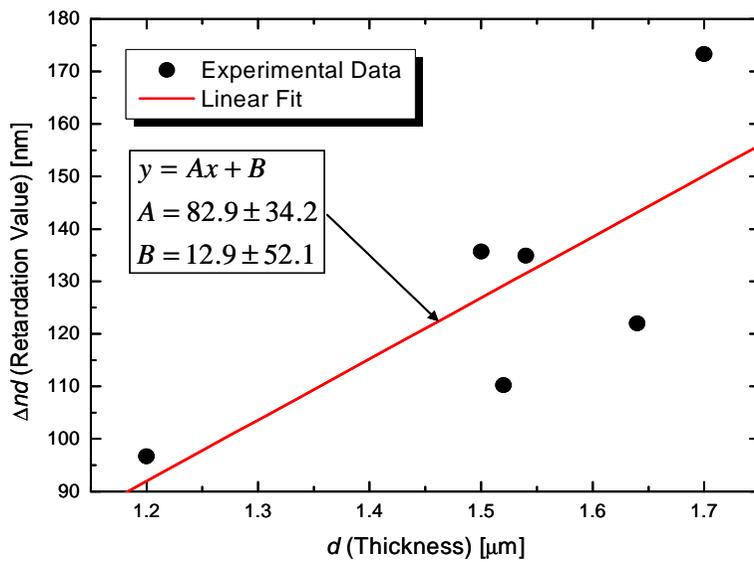


그림 23. 필름의 코팅 두께에 따른 위상지연 값

## 제4장 결과 및 논의

### 제1절 광학필름의 밀러 행렬 분석

콜레스테릭 액정 필름, 비틀린 위상 지연 필름, 콜레스테릭 액정 필름과 비틀린 위상지연 필름이 적층된 필름 샘플에 대한 밀러 행렬을 측정하였다. 측정결과는 표 5와 같다. 샘플 별 측정된 밀러 행렬을 각각  $\mathbf{M}_{CLC}$ ,  $\mathbf{M}_{TR}$ ,  $\mathbf{M}_{CLC+TR}$  로 표기하였다.

콜레스테릭 액정 필름 샘플로 삼성정밀화학(주)에서 제작한 우선(Right-Handed) 콜레스테릭 액정 필름인 CLC900을 사용하였는데, 이 필름은 각각 반사밴드 중심 파장이 620 nm, 550 nm, 475 nm인 3장의 콜레스테릭 액정 필름이 합지된 필름이다. 실험에 사용된 CLC900의 투과 스펙트럼은 그림 24와 같다. 제3장에서 언급한 것과 같이 실험적으로 비틀린 위상지연 필름의 두께 제어를 통한 위상 지연 값 조절에 어려움이 있었다. 좌원 편광이 입사할 경우 X축 선 편광으로 변환되는 우선(Right-Handed) 비틀린 위상지연 필름( $\Phi = 0.35\pi$ ,  $\Gamma = 0.71\pi$ )을 제작하지 못하였고, 기 제작된 비틀린 위상 지연 필름을 사용하여 실험을 진행하였다. 측정된 밀러 행렬을 통해 실험에 사용한 비틀린 위상지연 필름이  $\Phi = 0.52\pi$ ,  $\Gamma = 0.58\pi$  의 파라미터를 갖고 있음을 알 수 있었다. 콜레스테릭 액정 필름과 비틀린 위상 지연 필름이 적층된 샘플은 상기의 두 필름을 PSA(Pressure Sensitive Adhesive)를 사용하여 합지한 샘플이다.

표 6은 광학 필름 샘플에 대한 편광도 계산 결과를 보여주고 있다. 표에서  $\mathbf{S}_{unpol}$  과  $\mathbf{S}_{LCP}$  는 각각 무 편광된 광과 우원 편광된 광의 스토크스 벡터를 의미한다. 콜레스테릭 액정 필름 샘플에 무 편광된 광이 입사할 경우( $\mathbf{M}_{CLC} \cdot \mathbf{S}_{unpol}$ ) 출력 광의 편광도는 약 0.82, 원 편광도는 약 -0.81임을 알 수 있다. 실험에 사용한 콜레스테릭 액정 필름 샘플은 완벽한 원 편광자 역할을 수행하지 못하고 있으며, 무

편광이 입사할 경우 투과광 중 약 18%는 여전히 무 편광 상태에 있을 것으로 예상이 된다. 원 편광도가 약 -0.81이므로 편광된 대부분의 광은 좌원 편광 상태가 됨을 알 수 있다. 본 필름을 콜레스테릭 액정 편광판에 사용한다면 이상적인 콜레스테릭 액정 편광판 대비 약 91%정도만의 선 편광 출력 효율을 기대할 수 있다. 비틀린 위상지연 필름 샘플에 좌원 편광이 입사할 경우( $\mathbf{M}_{TR} \cdot \mathbf{S}_{LCP}$ ) 출력광의 편광도는 1임을 알 수 있는데, 비틀린 위상지연 필름 샘플에 의한 무 편광화 효과(Depolarization Effect)는 전혀 없는 것으로 분석된다. 선 편광도는 약 0.85이므로 실험에 사용된 비틀린 위상지연 필름에 좌원 편광이 입사할 경우 출력광은 타원 편광을 갖게 됨을 알 수 있다. 콜레스테릭 액정 필름과 비틀린 위상 지연 필름이 적층된 필름 샘플에 무 편광된 광이 입사할 경우( $\mathbf{M}_{CLC+TR} \cdot \mathbf{S}_{unpol}$ ) 편광도는 약 0.86, 선 편광도는 약 0.79임을 알 수 있다. 무 편광된 광( $\mathbf{S}_{unpol}$ )이 콜레스테릭 액정 필름( $\mathbf{M}_{CLC}$ )을 투과하고, 그 출력 광이 비틀린 위상지연 필름( $\mathbf{M}_{TR}$ )을 다시 한번 투과할 경우( $\mathbf{M}_{TR} \cdot \mathbf{M}_{CLC} \cdot \mathbf{S}_{unpol}$ ) 출력광의 편광도는 약 0.82, 선 편광도는 0.75로 예측되는데, 이 값은 콜레스테릭 액정 필름과 비틀린 위상 지연 필름이 적층된 필름 샘플에 무 편광된 광이 입사할 경우의 값과 거의 일치하고 있다. 이는 두 필름의 적층에 사용된 PSA가 두 필름을 접착하는 역할 이 외에 광학적으로 별다른 작용을 하고 있지 않음을 의미한다. 두 결과 사이에 존재하는 오차는 콜레스테릭 액정 필름 및 비틀린 위상지연 필름의 균일도 오차에 기인하는 것으로 사료된다.

표 7은 광학 필름 샘플에 대한 출력광의 편광상태 계산 결과를 보여 주고 있다. 출력광의 편광상태는 규격화된 스토크스 벡터로 표현하였다. 콜레스테릭 액정 필름과 비틀린 위상지연 필름이 적층된 필름 샘플에 무 편광된 광이 입사할 경우 출력광의 편광상태를  $\mathbf{S}_A$ , 무 편광된 광이 콜레스테릭 액정 필름을 투과하고, 그 출력 광이 비틀린 위상지연 필름을 다시 한번 투과할 경우 출력광의 편광상태를  $\mathbf{S}_B$ , 무 편광된 광이 이상적인 콜레스테릭 액정 필름을 투과하고, 그 출력 광이 비틀린 위상지연 필름을 다시 한번 투과할 경우 출력광의 편광상태를  $\mathbf{S}_C$ 로 표기하

였다.  $\mathbf{S}_A$ ,  $\mathbf{S}_B$ ,  $\mathbf{S}_C$ 를 스톡스 벡터 공간에 표시한 결과는 그림 25와 같다.  $\mathbf{S}_A$ 와  $\mathbf{S}_B$ 는 거의 같은 편광 상태를 보이고 있다. 이는 앞서 서술한 바와 같이 콜레스테릭 액정 필름과 비틀린 위상지연 필름의 적층에 사용된 PSA가 두 필름을 접착하는 역할 이 외에 광학적으로 별다른 작용을 하고 있지 않기 때문인 것으로 판단된다. 그러나  $\mathbf{S}_A$ ,  $\mathbf{S}_B$ 는  $\mathbf{S}_C$ 와 다소 다른 편광 상태에 있음을 알 수 있는데, 이는 실험에 사용한 콜레스테릭 액정 필름이 완벽한 원 편광자 역할을 수행하지 못하고 있기 때문이다.

표 8은 실험에 사용한 콜레스테릭 액정 필름과 이상적인 콜레스테릭 액정 필름에 무 편광이 입사하였을 경우 출력광의 편광상태 계산 결과를 보여주고 있다. 이 경우도 역시 출력광의 편광상태를 규격화된 스톡스 벡터로 표현하였다. 실험에 사용한 콜레스테릭 액정에 무 편광이 입사하였을 경우 출력광의 편광상태를  $\mathbf{S}_D$ , 이상적인 콜레스테릭 액정 필름에 무 편광이 입사하였을 경우 출력광의 편광상태를  $\mathbf{S}_E$ 로 표기하였다. 이상적인 우선(Right-Handed) 콜레스테릭 액정 필름(좌원 편광자)에 대한 밀러 행렬  $\mathbf{M}_{CLC}^{ideal}$ 는 다음과 같이 주어진다<sup>[17]</sup>.

$$\mathbf{M}_{CLC}^{ideal} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4-1)$$

$\mathbf{S}_D$ ,  $\mathbf{S}_E$ 를 스톡스 벡터 공간에 표시한 결과는 그림 26과 같다. 편광상태  $\mathbf{S}_E$ 는 당연히 완벽한 좌원 편광 상태에 있으나, 실험에 사용한 콜레스테릭 액정 필름에 무 편광이 입사하였을 경우 출력광( $\mathbf{S}_D$ )은 좌원 편광 상태에서 벗어나 있음을 발견할 수 있다.

표 9는  $\mathbf{S}_A$ ,  $\mathbf{S}_B$ ,  $\mathbf{S}_C$ 와 각 스톡스 벡터의 완전 편광된 성분에 대한 존스 벡

터  $\mathbf{E}_A$ ,  $\mathbf{E}_B$ ,  $\mathbf{E}_C$  를 보여 주고 있다. 사실 모든 존스 벡터를 스톡스 벡터로 변환하는 것은 가능하지만, 부분 편광된 광에 대한 스톡스 벡터를 존스 벡터로 변환하는 것은 불가능하다. 표 9에 계산된 존스 벡터는 각 해당 스톡스 벡터를 뽀앙카레 구면 상에 투영한 완전 편광상태에 대한 존스 벡터이다. 스톡스 벡터보다는 존스 벡터를 이용한 편광 타원(Polarization Ellipse)이 시각적으로 편광 상태를 잘 표현해 주기 때문에 편광 타원을 이용하여 편광 상태들을 비교 분석하고자 각 스톡스 벡터에 대한 존스 벡터를 계산 하였다. 그림 27은 표 9에 계산된 존스 벡터를 사용하여 표현한  $\mathbf{E}_A$ ,  $\mathbf{E}_B$ ,  $\mathbf{E}_C$  에 대한 편광 타원을 보여 주고 있다. 그림 27에서 존스 벡터의 회전 방향을 통해 모두 좌원 타원 편광임을 알 수 있다.  $\mathbf{E}_A$  와  $\mathbf{E}_B$  는 거의 동일한 편광 상태에 있음을 살펴볼 수 있는데,  $\mathbf{E}_A$  와  $\mathbf{E}_B$  에 대한 편광 타원의 장축 각도( $\phi_A$ ,  $\phi_B$ )와 편광 타원의 타원율( $e_A$ ,  $e_B$ )은 각각  $\phi_A = -9.4^\circ$ ,  $\phi_B = -9.3^\circ$  와  $e_A = -0.22$ ,  $e_B = -0.21$ 로 계산되었다.  $\mathbf{E}_C$  에 대한 편광 타원의 장축 각도와 편광 타원의 타원율은 각각  $\phi_C = -11.2^\circ$  와  $e_C = -0.29$ 로 계산되었으며,  $\mathbf{E}_A$  및  $\mathbf{E}_B$  의 편광 상태와 다름을 다시 한 번 확인 할 수 있다.

표 10은  $\mathbf{S}_D$ ,  $\mathbf{S}_E$  와 각 스톡스 벡터의 완전 편광된 성분에 대한 존스 벡터  $\mathbf{E}_D$ ,  $\mathbf{E}_E$  를 보여 주고 있으며, 그림 28은 표 10에서 계산된 존스 벡터를 사용하여 표현한  $\mathbf{E}_D$ ,  $\mathbf{E}_E$  에 대한 편광 타원을 보여 주고 있다.  $\mathbf{E}_E$  는 완벽한 좌원 편광상태이지만,  $\mathbf{E}_D$  는 완벽한 좌원 편광상태에서 벗어나 있음을 알 수 있다.  $\mathbf{E}_D$ ,  $\mathbf{E}_E$  의 타원율은 각각  $e_D = -0.85$  와  $e_E = -1$  이었다.

표 5. 광학 필름 샘플에 대한 뮐러 행렬 측정치

Optical Component	Symbol	Mueller Matrix
Cholesteric Film	$M_{CLC}$	$\begin{pmatrix} 0.47863 & 0.10534 & -0.13656 & -0.38635 \\ 0.05457 & 0.16176 & 0.12649 & -0.06622 \\ 0.03151 & -0.13134 & 0.12076 & -0.11220 \\ -0.38792 & -0.09339 & 0.15820 & 0.40108 \end{pmatrix}$
Twisted Retarder	$M_{TR}$	$\begin{pmatrix} 0.86227 & -0.00568 & -0.00941 & 0.01104 \\ -0.00607 & 0.36798 & 0.37420 & -0.67996 \\ -0.00668 & -0.27837 & 0.76811 & 0.27004 \\ -0.00693 & 0.72129 & 0.10667 & 0.45263 \end{pmatrix}$
Cholesteric Film Laminated with Twisted Retarder	$M_{CLC+TR}$	$\begin{pmatrix} 0.46841 & 0.00134 & -0.00082 & -0.38213 \\ 0.34831 & 0.00303 & 0.11190 & -0.36345 \\ -0.11872 & -0.17159 & 0.10020 & 0.14098 \\ -0.16811 & 0.11822 & 0.14235 & 0.18953 \end{pmatrix}$

표 6. 광학 필름 샘플에 대한 편광도 계산 결과

Optical Component	Input Polarization State	Symbol	Degree of Polarization	Degree of Linear Polarization	Degree of Circular Polarization
Cholesteric Film	Unpolarized State	$M_{CLC} \cdot S_{unpol}$	0.821	0.132	-0.811
Twisted Retarder	Left-Handed Circular Polarization	$M_{TR} \cdot S_{LCP}$	1.000	0.846	-0.534
Cholesteric Film Laminated with Twisted Retarder	Unpolarized State	$M_{CLC+TR} \cdot S_{unpol}$	0.864	0.786	-0.359
Cholesteric Film and Twisted Retarder	Unpolarized State	$M_{TR} \cdot M_{CLC} \cdot S_{unpol}$	0.820	0.751	-0.331

표 7. 광학 필름 샘플에 대한 출력광의 편광상태 계산 결과

Optical Component	Input Polarization State	Symbol	Normalized Stokes Vector for Output Polarization
Cholesteric Film Laminated with Twisted Retarder (Experimental)	Unpolarized State	$\mathbf{M}_{CLC+TR} \cdot \mathbf{S}_{unpol}$	$\mathbf{S}_A = \begin{pmatrix} 1.0000 \\ 0.7436 \\ -0.2535 \\ -0.3589 \end{pmatrix}$
Cholesteric Film (Experimental) and Twisted Retarder (Experimental)	Unpolarized State	$\mathbf{M}_{TR} \cdot \mathbf{M}_{CLC} \cdot \mathbf{S}_{unpol}$	$\mathbf{S}_B = \begin{pmatrix} 1.0000 \\ 0.7110 \\ -0.2403 \\ -0.3308 \end{pmatrix}$
Cholesteric Film (Ideal) and Twisted Retarder (Experimental)	Unpolarized State	$\mathbf{M}_{TR} \cdot \mathbf{M}_{CLC}^{ideal} \cdot \mathbf{S}_{unpol}$	$\mathbf{S}_C = \begin{pmatrix} 1.0000 \\ 0.7825 \\ -0.3213 \\ -0.5336 \end{pmatrix}$

표 8. 실험에 사용한 콜레스테릭 액정 필름과 이상적인 콜레스테릭 액정 필름에 무 편광이 입사하였을 경우 출력광의 편광상태 계산 결과

Optical Component	Input Polarization State	Symbol	Normalized Stokes Vector for Output Polarization
Cholesteric Film (Experimental)	Unpolarized State	$\mathbf{M}_{CLC} \cdot \mathbf{S}_{unpol}$	$\mathbf{S}_D = \begin{pmatrix} 1.0000 \\ 0.1140 \\ 0.0658 \\ -0.8105 \end{pmatrix}$
Cholesteric Film (Ideal)	Unpolarized State	$\mathbf{M}_{CLC}^{ideal} \cdot \mathbf{S}_{unpol}$	$\mathbf{S}_E = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix}$

표 9.  $\mathbf{S}_A$ ,  $\mathbf{S}_B$ ,  $\mathbf{S}_C$  와 각 스토크스 벡터의 완전 편광된 성분에 대한 존스 벡터

$$\mathbf{E}_A, \mathbf{E}_B, \mathbf{E}_C$$

Optical Component	Input Polarization State	Stokes Vector	Jones Vector [Assumed To Be Perfectly-Polarized ]
Cholesteric Film Laminated with Twisted Retarder (Experimental)	Unpolarized State	$\mathbf{S}_A = \begin{pmatrix} 1.0000 \\ 0.7436 \\ -0.2535 \\ -0.3589 \end{pmatrix}$	$\mathbf{E}_A = \begin{pmatrix} 0.9646 \\ 0.2637\exp(-2.1858i) \end{pmatrix}$
Cholesteric Film (Experimental) and Twisted Retarder (Experimental)	Unpolarized State	$\mathbf{S}_B = \begin{pmatrix} 1.0000 \\ 0.7110 \\ -0.2403 \\ -0.3308 \end{pmatrix}$	$\mathbf{E}_B = \begin{pmatrix} 0.9661 \\ 0.2580\exp(-2.1990i) \end{pmatrix}$
Cholesteric Film (Ideal) and Twisted Retarder (Experimental)	Unpolarized State	$\mathbf{S}_C = \begin{pmatrix} 1.0000 \\ 0.7825 \\ -0.3213 \\ -0.5336 \end{pmatrix}$	$\mathbf{E}_C = \begin{pmatrix} 0.9440 \\ 0.3299\exp(-2.1128i) \end{pmatrix}$

표 10.  $\mathbf{S}_D$ ,  $\mathbf{S}_E$  와 각 스토크스 벡터의 완전 편광된 성분에 대한  
존스 벡터  $\mathbf{E}_D$ ,  $\mathbf{E}_E$

Optical Component	Input Polarization State	Stokes Vector	Jones Vector [Assumed To Be Perfectly-Polarized ]
Cholesteric Film (Experimental)	Unpolarized State	$\mathbf{S}_D = \begin{pmatrix} 1.0000 \\ 0.1140 \\ 0.0658 \\ -0.8105 \end{pmatrix}$	$\mathbf{E}_D = \begin{pmatrix} 0.7546 \\ 0.6562\exp(-1.4898i) \end{pmatrix}$
Cholesteric Film (Ideal)	Unpolarized State	$\mathbf{S}_E = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix}$	$\mathbf{E}_E = \begin{pmatrix} 0.7071 \\ 0.7071\exp(-1.5708i) \end{pmatrix}$

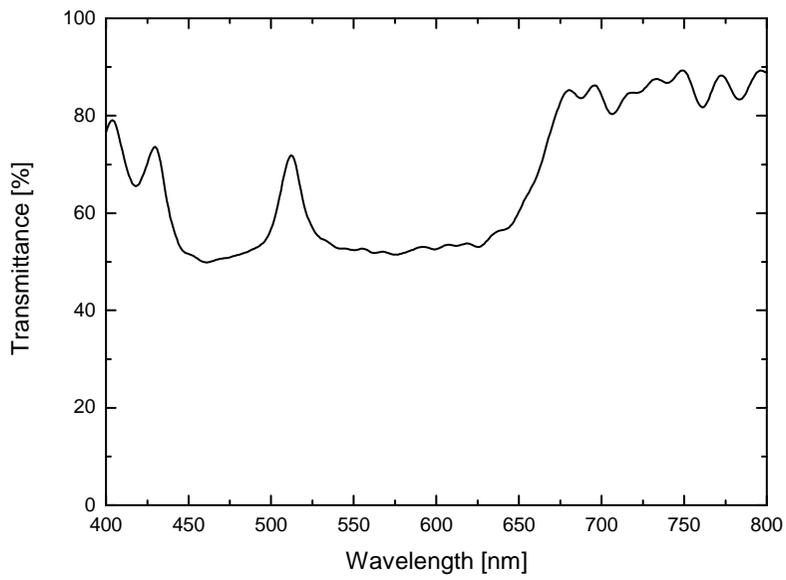


그림 24. 밀러 행렬 측정에 사용된 콜레스테릭 액정 필름 샘플의 투과 스펙트럼

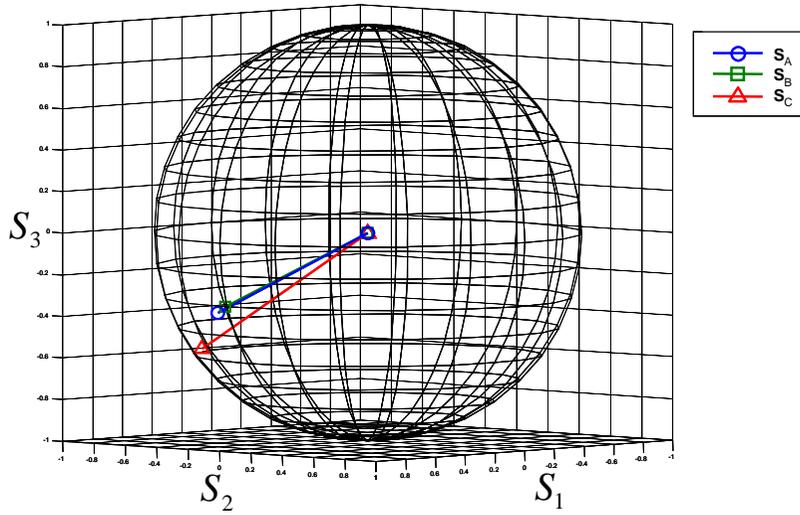


그림 25. 스토크스 벡터 공간에 표시한  $S_A$ ,  $S_B$ ,  $S_C$

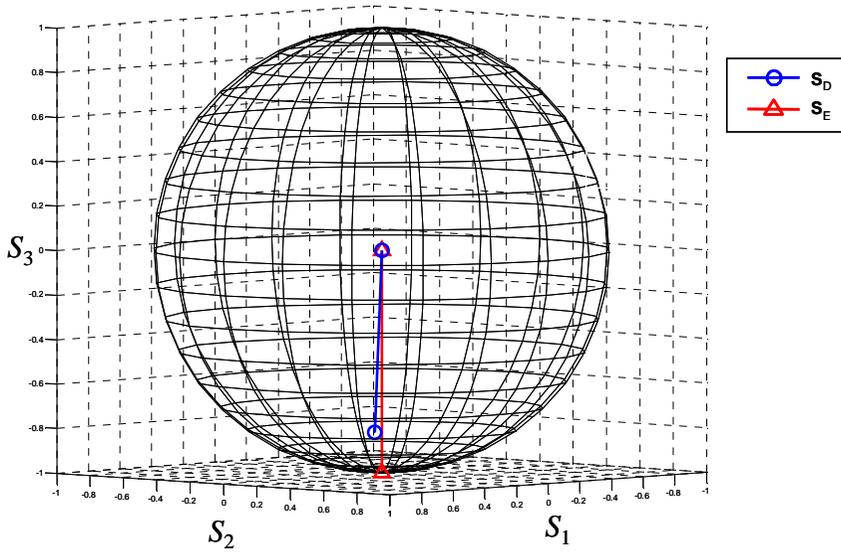


그림 26. 스토크스 벡터 공간에 표시한  $S_D$ 와  $S_E$

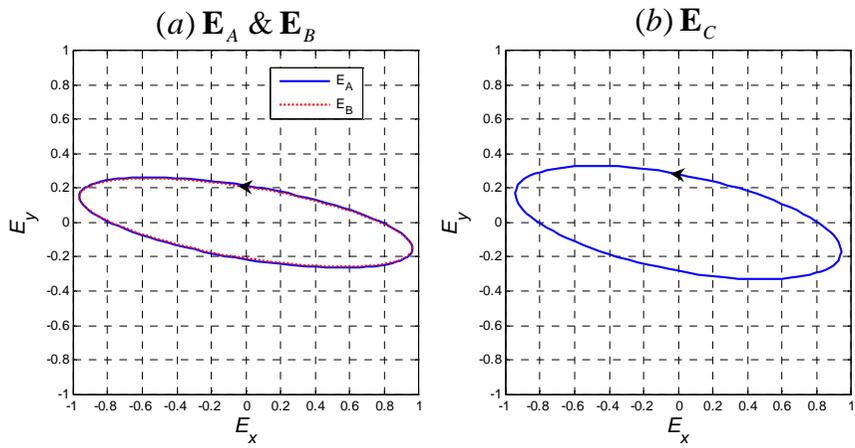


그림 27.  $\mathbf{E}_A$ ,  $\mathbf{E}_B$ ,  $\mathbf{E}_C$  에 대한 편광 타원

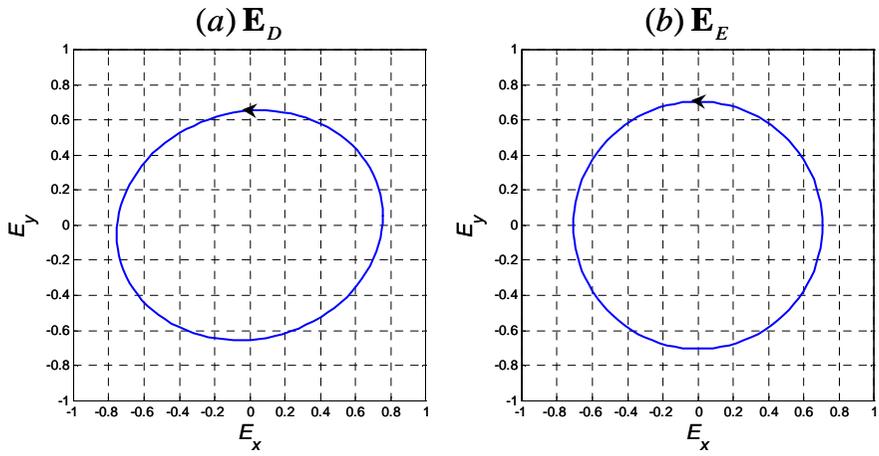


그림 28.  $\mathbf{E}_D$  와  $\mathbf{E}_E$  에 대한 편광 타원

## 제2절 제작된 비틀린 위상지연 필름의 특성분석 및 이론적 결과와의 비교분석

본 절에서는 실험적으로 제작한 비틀린 위상지연 필름의 특성에 대하여 좀 더 상세히 분석하고자 한다. 실험적으로 제작한 비틀린 위상지연 필름의 밀러 행렬은 표 5의  $\mathbf{M}_{TR}$  과 같다. 실험적으로 측정된 밀러 행렬  $\mathbf{M}_{TR}$  을 비틀린 위상지연 필름에 대한 이론적 밀러 행렬인 식(2-17)  $\mathbf{M}_{TR}^{Mueller}$  에 데이터 맞춤 하여 실험적으로 제작한 비틀린 위상지연 필름의 구조 파라미터를 추출하였다. 추출된 파라미터는  $\Phi = 0.52\pi$ ,  $\Gamma = 0.58\pi$  이었다.

추출된 파라미터를 비틀린 위상지연 필름에 대한 존스 행렬인 식(2-8)에 대입 하여 실험적으로 제작한 비틀린 위상지연 필름에 대한 존스 행렬을 수치적으로 계산하였고, 계산된 존스 행렬에 좌원 편광에 대한 존스 벡터를 곱하여 출력광에 대한 존스 행렬을 계산하였다. 계산된 출력광의 존스 벡터  $\mathbf{E}_{Call}$  은 다음과 같다.

$$\mathbf{E}_{Call} = \begin{pmatrix} 0.9407 \\ 0.3392 \exp(-2.0349i) \end{pmatrix}$$

이 때, 출력광의 X축 방향 선 편광자 투과율  $T_{Call} = 0.9407^2 \approx 0.89$  로 계산된다. 그림 29는 제작된 비틀린 위상지연 필름의 구조 파라미터와 이 구조 파라미터를 갖고 있는 비틀린 위상지연 필름에 좌원 편광이 입사하였을 경우 예측되는 출력광의 X축 방향 선 편광자 투과율을 보여주고 있다.

실험적으로 측정된 밀러 행렬  $\mathbf{M}_{TR}$  에 좌원 편광에 대한 스톡스 벡터를 곱하여 실험적으로 제작한 위상지연 필름에 좌원 편광이 입사하였을 경우의 출력광에 대한 스톡스 벡터를 계산할 수 있다. 결과는 표 7의 스톡스 벡터  $\mathbf{S}_C$  와 동일하다. 스톡스 벡터  $\mathbf{S}_C$  에 대응하는 존스 벡터  $\mathbf{E}_{Exp}$  를 계산할 수 있는데, 그 결과는 앞서 제시한 표 9의  $\mathbf{E}_C$  와 같다.

$$\mathbf{E}_{Exp} = \begin{pmatrix} 0.9440 \\ 0.3299 \exp(-2.1128i) \end{pmatrix}$$

이 때, 실험적으로 측정이 예측되는 X축 방향 선 편광자 투과율  $T_{Exp} = 0.9440^2 \approx 0.89$  이다.  $\mathbf{E}_{Exp}$  및  $T_{Exp}$  는 각각  $\mathbf{E}_{Cal1}$  및  $T_{Cal1}$  과 매우 유사한 값을 갖고 있음을 알 수 있는데, 이는 제작된 위상지연 필름 샘플이 비틀린 위상 지연필름으로 잘 모델링 되고 있음을 보여준다 하겠다.

일반 위상지연 필름에 대한 밀러 행렬 이론식<sup>[1]</sup>에 측정된 밀러 행렬  $\mathbf{M}_{TR}$  을 데이터 맞춤 하여 실험에 사용한 위상지연 필름 샘플을 일반 위상지연 필름으로 모델링 했을 경우에 대한 구조 파라미터를 추출하였다. 추출된 파라미터는  $\phi = 0.73\pi$  ,  $\Gamma = 0.33\pi$  이었다.  $\Gamma$  는 비틀린 위상지연 필름에 대한 파라미터와 동일하게 총 위상지연 값을 의미하며,  $\phi$  는 일반 위상지연 필름의 느린 축이 X축과 이루는 각을 의미한다.

추출된 파라미터를 일반 위상지연 필름에 대한 존스 행렬 이론식<sup>[1]</sup>에 대입하여 이에 대한 존스 행렬을 계산하였고, 계산된 존스 행렬에 좌원 편광에 대한 존스 벡터를 곱하여 출력광에 대한 존스 행렬을 계산하였다. 계산된 출력광의 존스 벡터  $\mathbf{E}_{Cal2}$  은 다음과 같다.

$$\mathbf{E}_{Cal2} = \begin{pmatrix} 0.9644 \\ 0.2645 \exp(-1.7690i) \end{pmatrix}$$

이 때, 출력광의 X축 방향 선 편광자 투과율  $T_{Cal2} = 0.9644^2 \approx 0.93$  으로 계산된다. 이 값들은 실험적으로 측정이 예측되는  $\mathbf{E}_{Exp}$  및  $T_{Exp}$  와 큰 차이를 보이고 있으며, 이는 제작된 위상지연 필름 샘플이 일반 위상지연 필름으로는 잘 모델링 되지 않음을 보여준다.

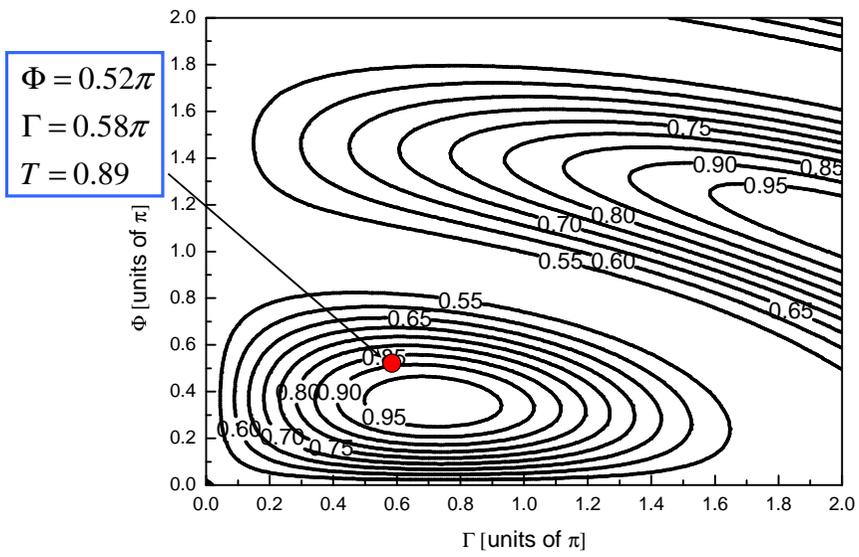


그림 29. 제작된 비틀린 위상지연 필름의 구조 파라미터와 좌원 편광이 입사하였을 경우 예측되는 출력광의 X축 방향 선 편광자 투과율

## 제5장 결론

본 논문에서는 원편광을 선편광으로 변환시킬 수 있는 비틀린 위상지연 필름의 구조 파라미터에 대한 이론적 연구를 존스 행렬법을 사용하여 수행하였다. 특히 좌원편광이 입사할 경우, 우선(Right-Handed) 비틀린 위상지연 필름을 사용하면 X축 선편광으로의 변환이 가능하고, 좌선(Left-Handed) 비틀린 위상지연 필름을 사용하면 Y축 선편광으로의 변환이 가능함을 이론적으로 예측하였다. X축 및 Y축은 비틀린 위상지연 필름 제작 시 네마틱 액정 장축의 최초 배향방향 및 이에 대한 수직 방향을 의미한다.

Merck사의 액정인 RMM522(네마틱 액정)와 RMM498(네마틱 및 카이랄 성분 혼합액정)을 사용하여 비틀린 위상지연 필름을 제작하였다. 두 액정의 조성비, 필름의 총 두께를 각각 조절하여 비틀린 위상지연 필름의 비틀림 비율과 위상 지연 값을 제어할 수 있었다. 하지만 실험적으로 비틀린 위상지연 필름의 두께 조절에 어려움이 있었으며, 향후 이에 대한 공정 개선이 필요한 상황이다.

콜레스테릭 필름(CLC900, Samsung Fine Chem., Ltd.), 비틀린 위상지연 필름 및 두 필름의 적층 샘플에 대한 밀러행렬을 측정하여 각 필름의 광학적 특성 및 출력 편광 상태에 대해 논의하였다. 콜레스테릭 필름의 경우 무편광 광(Unpolarized Light) 입사시 출력광의 편광도가 82%로, 약 18%의 출력 광은 여전히 무편광 상태였으며, 출력광의 대부분은 좌원편광 상태였다. 실험에 사용한 콜레스테릭 필름을 콜레스테릭 액정 편광판에 적용할 경우 이상적인 콜레스테릭 필름 및 4분 파장판 조합 대비 약 91%정도만의 선편광출력 효율을 기대할 수 있음을 알 수 있었다. 본 연구에서 Merck사의 RMM522와 RMM498의 혼합액을 사용하여 제작한 광학필름은 이론적으로 예측한 좌원편광을 선편광으로 변환시킬 수 있는 구조 파라미터를 갖고 있지는 않았으나, 이론적 측면에서 비틀린 위상지연 필름으로 매우 잘 모델링 되며, 실험적 측면에서도 비틀린 위상지연 필름으로 잘 동작하고 있음을 확인하였다.

## 참 고 문 헌

- [1] D. K. Yang, S. T. Wu, *Fundamentals of Liquid Crystal Devices* (John Wiley & Sons, Ltd., Chichester, England, 2006), pp. 1-104.
- [2] T. H. Kim, Y. J. Lim, S. J. Hwang, M. H. Lee, W. G. Jang, and S. H. Lee, "Improvement of Optical Characteristics in Viewing Directions in a Reflective Cholesteric Liquid Crystal Color Filter," *Polymer (Korea)*, vol. 31, no. 2, pp. 148-152, 2007.
- [3] M. F. Weber, C. A. Stover, L. R. Gilbert, T. J. Nevitt, and A. J. Ouderkerk, "Giant Birefringent Optics in Multilayer Polymer Mirrors," *Science*, vol. 287, pp. 2451-2456, 2000.
- [4] J. R. Park, G. H. Ryu, J. G. Byun, H. N. Hwang, S. T. Kim, and I. S. Kim, "Numerical Modeling and Simulation of a Cholesteric Liquid Crystal Polarizer," *Optical Review*, vol. 9, no. 5, pp. 207-212, 2002.
- [5] H. Pak, K. I. Kim, K. C. Yoon, S. T. Kim, J. C. Jung, H. D. Park, and J. R. Park, "Optical Modeling and Simulation of a Cholesteric Liquid Crystal Polarizer," *Proc. IDW '05*, pp. 1407-1410, 2005.
- [6] W. J. Jeong, H. Pak, K. C. Yoon, S. T. Kim, J. C. Jung, H. D. Park, and J. R. Park, "Comparative Study on Reflective Polarizers: On-axis Properties," *Proc. IDW '06*, pp. 999-1002, 2006.
- [7] H. Cui, D. H. Lee, H. S. Lee, H. C. Yoon, K. C. Yoon, S. T. Kim, and J. R. Park, "Understanding Optical Characteristics of a Cholesteric Liquid Crystal Polarizer Through Computational Simulation," *Proc. IDW '07*, pp. 617-618, 2007.
- [8] H. Motomura, and T. Nakajima, "Seeking to Improve the Light Utilization Ratio of PCF Reflective Polarizing Film," *Nitto Denko Technical Report*, vol. 39, no. 1, pp. 34-38,

2001.

- [9] T. Nakajima, "NIPOCS Brightness Enhancement Film," Nitto Denko Technical Report, vol. 41, no. 1, pp. 30-33, 2003.
- [10] W. G. Jang, T. W. Beom, H. Cui, J. R. Park, S. J. Hwang, Y. J. Lim, and S. H. Lee, "Reduction of Viewing-Angle Dependent Color Shift in a Reflective Type Cholesteric Liquid Crystal Color Filter," *Applied Physics Express*, vol. 1, no. 3, pp. 032001-1-032001-3, 2008.
- [11] N. C. Choi, J. Y. Jung, K. W. Rhie, and S. T. Shin, "Application of the cholesteric liquid crystal as a indicator of a dairy product turned sour," *Proc. IDW '07*, pp. 1755-1757, 2007.
- [12] M. G. Robinson, J. M. Chen, and G. D. Sharp, *Polarization Engineering for LCD Projection* (John Wiley & Sons, Ltd., Chichester, England, 2005), pp. 77-88.
- [13] E. H. Stupp, M. S. Brennessolfz, *Projection Displays* (John Wiley & Sons, Ltd., Chichester, England, 1998), pp. 126-137.
- [14] <http://www.eneos.co.jp/english/products/lcfilm/>
- [15] H. Seiberle, T. Bashes, C. Benecke, and M. Ibn-Elhaj, "Volume Photo-Aligned Retarders," *Proc. IDW '06*, pp. 303-306, 2006.
- [16] P. Yeh, C. Gu, *Optics of Liquid Crystal Displays* (John Wiley & Sons, Ltd., New York, USA, 1999), pp. 103-151.
- [17] E. Hecht, *Optics* (Addison Wesley Publishing company, Inc., Singapore, 1989), pp. 270-332.
- [18] F. L. Pedrotti, L. S. Pedrotti, *Introduction to Optics* (Prentice-Hall, Inc., New Jersey, USA, 1993), pp. 280-298.
- [19] M. Bass, *Handbook of Optics* (McGraw-Hill, New York, USA, 1995), pp. 22.1-22.37.
- [20] <http://www.axometrics.com/>