

ECB 액정 셀과 1/4 파장판을 이용하여 구성한 무손실 선형편광 회전기

조재홍[†]

한남대학교, 이과대학, 광·전자물리학과
Ⓞ 306-791 대전광역시 대덕구 오정동 133번지

(2008년 10월 28일 받음, 2009년 1월 19일 수정본 받음, 2009년 2월 2일 게재 확정)

파장 514.5 nm에서 8.4 um 두께의 ECB(Electically Controlled Birefringence) 액정 셀과 1/4 파장판을 이용하여 간단하게 360도 이상으로 선형편광의 방향을 광손실없이 자유롭게 바꿀 수 있는 선형편광 회전기를 제안하고 이를 구현하였다. 이 선형편광 회전기의 편광도는 0.964이며, 1주일간의 시간적 변화도 ± 1 도 정도로 시간적 안정성이 매우 뛰어나함을 확인하였다. 이 선형편광기의 전압 대 회전각의 비선형성 문제는 사용할 전압범위를 바꾸거나 이 선형편광 회전기의 회전각에 대한 피팅곡선을 사용하면 쉽게 해결할 수 있다.

주제어: Linear polarization, Liquid crystal cell, Quarter wave plate, Linear polarizer

I. 서 론

입사하는 광의 편광상태를 바꾸기 위해서는 다양한 편광소자들이 사용된다.^[1] 가장 일반적으로 무편광상태의 입사광을 선형편광으로 바꾸는 것으로는 고분자 재료를 사용한 폴라로이드(polaroid)의 선형편광기(linear polarizer)가 있으며, 일반적으로 복굴절 결정들을 이용한 반파장판이나 1/4 파장판과 같은 위상지연자들을 사용한다.^[1] 고가이면서도 전기적으로 조절이 가능한 KDP, KTP, LiNbO₃ 결정등과 같은 비선형 결정을 이용한 전기광학변조기(electro-optic modulator)를 이용한 선형편광기 기능도 가능하며,^[2] 자기광학변조기 등도 사용한다.

그러나 폴라로이드를 이용한 선형편광기는 항상 선형편광축에 수직인 전기장의 성분이 흡수에 의해서 소멸되기 때문에 광손실이 크고 선형편광기를 모터를 이용하여 조절해야만 한다. 그리고 복굴절 결정들을 이용한 위상지연자들은 일정한 파장에서 일정한 위상지연밖에 만들 수가 없으므로 조절가능한 선형편광기의 기능을 수행할 수 없다. 또한 비선형 결정을 이용한 전기광학변조기는 마지막 편광판에 의한 광손실과 90도까지밖에 선형편광을 회전시킬 수 없다는 한계를 가지고 있다.^[2]

네마틱 액정의 광학적 정렬을 이용하여 영상을 연속적인 그레이 레벨로 기록하는 1995년에 발표한 W. M. Gibbons 등의 논문^[3]에 따르면 90도 회전이 가능한 선형편광 회전기로 전기광학변조기를 사용하였다. 그러나 광학적으로 민감한 색소가 첨가된 폴리이미드(polyimide)를 스핀코팅한 유리판에 넣은 네마틱 액정에 일정한 선형편광된 레이저광속을 입사시켜서 실시간으로 러깅(rugging)하는 네마틱 액정의 광학적 정렬방식^[4]을 이용하여 q-plate^[5-7]를 참고문헌 [3] 방식대로 만들고자 할 경우, 선형편광방향이 자유로이 0도에서 360

도까지 움직여야한다(아니면 최소한도 0도에서 180도까지는 움직여야만 한다). 이러한 목적과 디스플레이에서 twisted nematic 액정을 사용하는 achromatic 선형편광 회전자가 제안되었고,^[8] 복합 정렬된 nematic 액정셀을 이용한 선형편광 회전자가 최근에 제안되었다.^[9]

본 논문에서는 nematic 액정인 E-7으로 만든 ECB(Electrically Controlled Birefringence) 액정 셀(liquid crystal cell : LC cell)^[10]과 1/4 파장판을 이용하여 360도 이상으로 광손실없이 선형편광의 방향을 손쉽게 돌릴 수 있는 선형편광 회전기의 동작 원리를 간단하게 설명하고 이를 실험적으로 구현하고자 한다. 그리고 이 선형편광 회전기를 만들어서 액정 셀의 전기적 투과특성을 측정함으로써 이러한 동작원리가 맞다는 것을 설명한다. 이 선형편광 회전기는 구성이 매우 간단하고 광손실없이 360도 이상으로 선형편광의 방향을 돌릴 수 있으므로 매우 실용적이고 저가로 구성할 수 있는 장점이 있다.

II. 실험장치 및 실험방법

그림 1은 ECB 액정 셀과 1/4 파장판을 이용한 간단한 무손실 360도 선형편광 회전기의 구성 및 선형편광의 회전각을 측정하는 실험장치도이다. 이중에서 가운데 작은 직사각형으로 구성된 부분이 무손실 360도 선형편광 회전기의 부분이다. 맨 앞의 선형편광판 또는 선형편광된 레이저광 또는 선형편광판을 이용하여 수직으로 선형편광시킨 입사광을 ECB 액정 셀에 입사시킨 후 다시 1/4 파장판으로 입사시킨다. 입사시의 편광방향은 그림 1의 무손실 360도 선형편광 회전기의 아래에 그려놓았다. 즉 입사광의 수직으로 서있는 선형편광을 액정 셀의 director(굴절률: ne)가 액정경계면에 수직으로 투영되었을 때 생기는 유효굴절률 ne' 방향으로부터 45도가 되게 입사시키면 선형편광된 입사광의 전기장은 x-방향과 y-방향으로 분리된다. 그러면 이 분리된 광들 중 액정의 복굴절로 인한 ne' 굴절률을 갖는 전기장 성분과 이 성분의 수

[†]E-mail: jhjo@hnu.kr

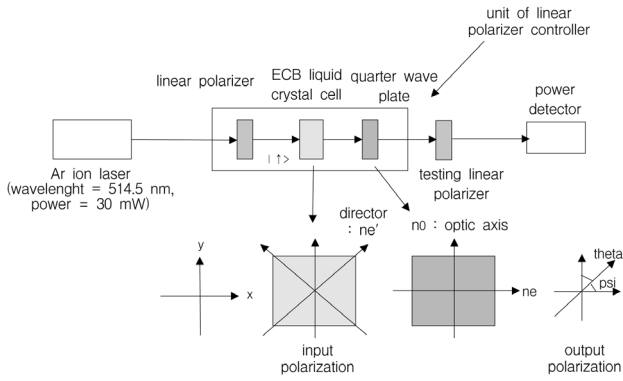


그림 1. 무손실 360도 선형편광 회전기의 각 광학부품들의 배치도 및 선형편광의 회전각을 측정하기 위한 측정장치.

직방향 전기장 성분은 각각 다음번 1/4 파장판으로 입사한다. 그러면 다시 이들 성분의 전기장들은 1/4 파장판의 광축과 45도의 경사각을 갖고 입사하므로 다시금 1/4 파장판의 각 광축 방향의 성분으로 분리가 된다.

그러므로 액정 셀을 단순하게 입사된 전기장에 의해서 위상차가 생기는 선형 복굴절 물질로 가정하여 작동원리를 아주 단순하게 살펴본다면, 그림 1의 아래쪽 왼쪽 좌표에 따른 1/4 파장판과 같은 위상지연자를 통과한 전기장의 x, y 성분

$$\text{들은 } E_x = \frac{E_0}{2} \exp(i\phi) - \frac{E_0}{2} \text{ 와 } E_y = \frac{E_0}{2} \exp(i(\phi + \pi/2)) + \frac{E_0}{2} \exp(i\pi/2) \text{ 이 된다. 여기서 } E_0 \text{는 초기에 선형편광된 레이저 광이나 무편광된 레이저의 경우에는 그림 1의 직사각형 안에서 처음으로 나타나는 선형편광 회전기에서 나오는 전기장을 나타내며, } \phi \text{는 액정 셀의 전압 } V \text{에 대응하여 액정의 } ne' \text{축과 이것에 수직방향 축에 대한 위상차를 의미한다.}$$

최종적으로 1/4 파장판에서 나온 전기장의 세기 $|\vec{E}|$ 와 선형편광의 x 축에 대한 기울어진 각 θ (그림 1 아래의 가장 왼쪽 좌표에서 ‘theta’라고 표현함)는 앞의 두 식으로부터

$$|\vec{E}| = E_0, \tag{1}$$

$$\tan \theta = \frac{|E_y|}{|E_x|} = \sqrt{\frac{1 + \cos \phi}{1 - \cos \phi}} \tag{2}$$

이다. 이와 같이 전기장의 크기 $|\vec{E}|$ 는 액정 셀과 1/4 파장판을 통과한 후에도 변화가 없다. 즉 이는 두 광학부품을 통과하여도 선형으로 입사광이 출력광으로 나갈 때 손실이 없다는 것을 의미한다. 그리고 ECB 액정 셀의 전압에 따른 위상차 ϕ 는 인가된 전압의 함수이므로 위상차를 0에서 2π 까지 가했다는 가정 하에 그림 1의 광출력검출기 앞에 설치한 검사용 선형편광기(testing linear polarizer)의 수직축(y 축 방향)으로부터 기울어진 각도 ψ (psi)는 $\psi = \pi/2 - \theta$ 이다. 이 값을 구해보면 위상차 ϕ 가 0부터 π 까지는 변할 때 ψ 는 선형적으로 변화함을 알 수 있는데, 이 결과는 액정 셀에 인가된 전압에 의하여 증가하는 위상차 ϕ 는 최종적으로 1/4 파장판을

통과한 전기장이 선형편광상태이고, 이 선형편광의 각도가 360도 이상으로 회전할 수 있음을 나타낸다.

이와 같이 본 논문에서 시도한 직관적인 단순한 분석에서는 위상지연자가 1/4 파장판이 아닌 복굴절을 갖는 임의의 위상지연자라도 식 (2)의 결론이 나옴을 알 수 있다. 그러나 참고문헌 (9)에 따르면 액정에서 나온 광의 수직한 두 전기장 성분은 위상차가 $\pi/2$ 의 차이를 갖고 있기 때문에 한쪽 방향의 전기장 성분만 보고자 할 경우 임의의 위상지연자는 1/4 파장판으로 만들어서 액정의 두 전기장 성분이 갖는 $\pi/2$ 의 차이를 보정해주어야만 한다는 것을 알 수 있다.^[9] 이를 근거로 본 논문에서는 위상지연자로 1/4 파장판만을 사용하였다.

본 논문에서는 파장이 514.5 nm인 10 W급 Ar⁺ 레이저 (Coherent, INNOVA 100-10)의 출력을 30 mW로 줄여서 선형편광판(linear polarizer)에 해당하는 100:1의 편광도를 갖는 PBS(Polarizing Beam Splitter)를 통과시킨다. 이렇게 만들어진 수직편광 성분의 입사광의 선형편광 방향이 액정 셀의 ne' 방향에 대해서 45도 기울어져서 입사되도록 한다. 입사하는 선형편광의 방향(수직방향)으로 정사굴절률 no의 광축이 놓인 514.5 nm용 1/4 파장판(Edmund, NT43-692)을 통과시키면 선형편광의 방향이 무손실로 회전하게 된다. 이렇게 회전한 선형편광의 방향을 측정하기 위하여 검사용 선형편광판(test linear polarizer)을 설치한 후 조리개(aperture)와 광출력 검출기(power detector)(Newport, 919SL)로 가장 어두운 경우와 가장 밝은 선형편광판 방향을 측정한다. 액정 셀에 인가하는 전압은 LabVIEW 8.2 프로그램을 이용하여 0 V부터 6 V까지 1 kHz의 사각파를 만들어서 사용하였다. 이때 실험에 사용한 액정 셀은 INSTEC사의 SA100A090uG180인 10 mm × 10 mm × 8.4 um(셀 간격)로 antiparallel로 폴리이미드(polyimide)가 리깅이 되어있는 ITO 액정 유리셀에 E-7 액정(EM industries)을 주입하여 사용하였다.

III. 실험결과 및 논의

그림 2는 실험에 사용한 액정 셀의 T-V(transmitted signal vs. voltage) curve를 측정한 결과이다. 이 측정 결과는 그림

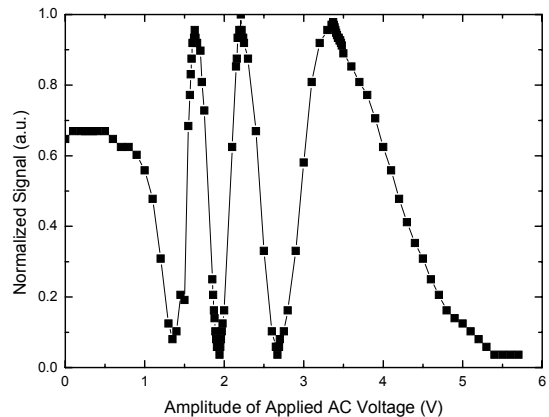


그림 2. 실험에 사용한 액정 셀의 T-V curve를 측정한 결과.

표 1. 그림 2와 그림 3의 결과를 이용한 T-V curve의 최대값들과 최소값들의 전압, 무손실 360도 선형편광 회전기에서 회전된 선형편광 회전각, 예상되는 편광상태와 회전각, LC에서 생기는 위상차.

min. and max. points	1st minimum point	1st maximum point	2nd minimum point	2nd maximum point	3rd minimum point	3rd maximum point
T-V curve (V)	1.35	1.63	1.94	2.22	2.67	3.37
measured polarization angle (deg.)	87	177	275	355	450	536
polarization state and angle from T-V curve (deg.)	↔ (90)	↑ (180)	↔ (270)	↓ (360)	↔ (450)	↑ (530)
phase difference of LC (rad.)	6π	5π	4π	3π	2π	π

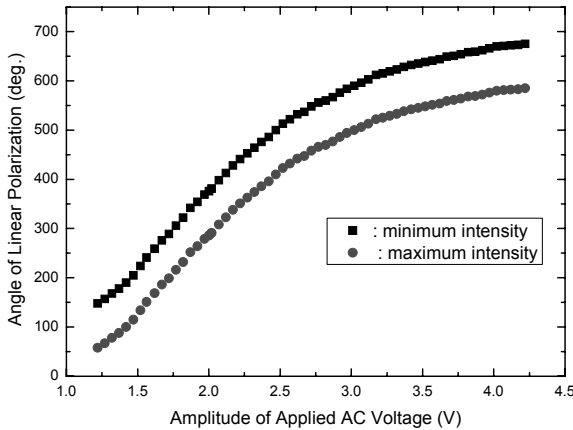


그림 3. 액정 셀에 인가된 전압에 따라 그림 1에서 보여준 무손실 360도 선형편광 회전기의 선형편광된 출력광의 회전각 θ 을 측정된 결과(검은 색 사각형: minimum 출력, 적색 원형: maximum 출력).

1의 실험장치에서 PBS를 통과한 수직 선형편광인 입사광이 액정 셀을 통과한 후 입사 편광상태와 평행하게 수직으로 편광방향이 설정된 폴라로이드로 만든 선형편광판을 통과하도록 하였으며, 이 때 액정 셀의 러깅 방향인 director 방향이 선형편광판과 45도가 되도록 설치하였다. 그림 2에서 보듯이 액정 셀에 인가된 0 V부터 6 V의 전압에서 3번의 최소값(minimum point)과 3번의 최대값(maximum point)을 관찰할 수 있으며, 이들 값에서의 전압은 표 1의 첫 번째 줄에 자세히 나타내었다. 최소값들의 전압에서 액정 셀을 통과한 파장 514.5 nm인 입사 레이저광의 편광상태는 수평(표 1의 셋째 줄에서 “↔” 상태) 선형편광상태이며, 액정 셀 뒤의 수직 선형편광 상태인 선형편광판에서 통과하지 못한다. 그리고 최대값들의 전압에서는 액정 셀을 통과한 파장 514.5 nm인 입사 레이저광의 편광상태가 수평(표 1의 셋째 줄에서 “↑” 상태) 선형 편광상태이며, 액정 셀 뒤의 수직 선형편광 상태인 선형편광 판을 그대로 통과한다. 이러한 전압에 따른 T-V curve의 특징은 ECB 액정의 특징으로 잘 알려져 있다.^[10,11]

그림 3은 액정 셀에 인가된 전압에 따라 그림 1에서 보여준 무손실 360도 선형편광 회전기의 선형편광된 출력광의 회전각 θ 를 측정된 결과이다. 그림 3의 위쪽에 있는 검은 색 사각형 데이터는 검사용 선형편광판의 출력을 광출력검출기로 측정하였을 때 최소값이 나오는 회전각 θ 에 대한 결과이며, 그림 3의 아래쪽에 있는 적색 원형 데이터는 검사용 선

형편광판의 출력을 광출력검출기로 측정하였을 때 최대값이 나오는 회전각 θ 에 대한 결과이다. 이들 사이의 각도차는 90도이며, 편광도(degree of polarization) P는 전체 모든 전압에서 평균적으로 0.964로 무손실 360도 선형편광 회전기로 입사한 선형편광된 입사광이 손실없이 거의 직선 편광상태로 출력되는 것을 확인할 수 있다. 총 회전각은 530도 이상이 가능하며, 이 최대 회전각을 늘리고자 할 경우에는 액정 셀의 두께를 두껍게 만들면 되지만, 이 경우 액정의 작동 안정성과 응답속도가 문제가 될 수 있다.

그림 2의 최소값들과 최대값들에 해당하는 그림 3의 직선 편광 회전각은 표 1의 두 번째 줄에서 정확히 정리하여 놓았는데, 그림 2의 결과에서 유추된 편광상태와 이에 대응하는 검사용 선형편광판의 회전각과는 최대 5도 정도의 오차 범위 내에서 일치하고 있는데, 이러한 오차는 그림 2의 측정에서 5% 정도의 전압에 따른 출력(power)요동 때문에 발생한다.

그림 2의 T-V curve로부터 최소값들과 최대값들의 전압들에서 무손실 360도 선형편광 회전기에 사용된 E-7 ECB 액정 셀에 대한 위상차를 표 1의 넷째 줄에 표기하였다. 이러한 액정 셀의 최소값과 최대값들 사이의 위상차의 변화량은 π rad.이지만 무손실 360도 선형편광 회전기에서 출력되는 선형편광된 출력광의 회전각들의 변화량은 90도가 된다.

표 1과 그림 2에 따르면 T-V curve에서 최소값들의 전압 위치에서 액정 셀에서 나가는 광의 선형편광 상태는 “↔” 상태인데, 이것이 무손실 360도 선형편광 회전기의 다음번 광학부품인 1/4 파장판의 no축과 일치하므로 출력광의 회전각은 그림 3에서 보듯이 자연스럽게 90도, 270도, 450도가 된다. 마찬가지로 T-V curve에서 최대값들의 전압 위치에서 액정 셀에서 나가는 광의 선형편광 상태는 “↑” 상태이고, 이는 무손실 360도 선형편광 회전기의 1/4 파장판의 ne축과 일치하므로 출력광의 회전각은 그림 3에서 보듯이 자연스럽게 180도, 360도, 530도가 된다.

그림 4는 액정 셀에 인가한 전압이 2.31 V(검은색 사각형), 2.77 V(붉은색 원형), 3.52 V(푸른색 삼각형)의 3군데에서 무손실 360도 선형편광 회전기의 회전각을 6회의 측정된 결과로 이 선형편광 회전기의 안정성을 확인한 것이다. 이들은 각각 360도, 450도, 540도의 선형편광 회전각에 대응하며, 이들의 총변화는 초기 3회인 약 1시간 동안에는 5도 정도가 증가하지만 1시간이 지난 후에는 0.5도 이하로 매우 안정적으로 변한다. 초기 1시간 동안에는 레이저를 작동시켜서 액정 셀과 1/4 파장판이 열적으로 안정화될 때까지 걸리는 시

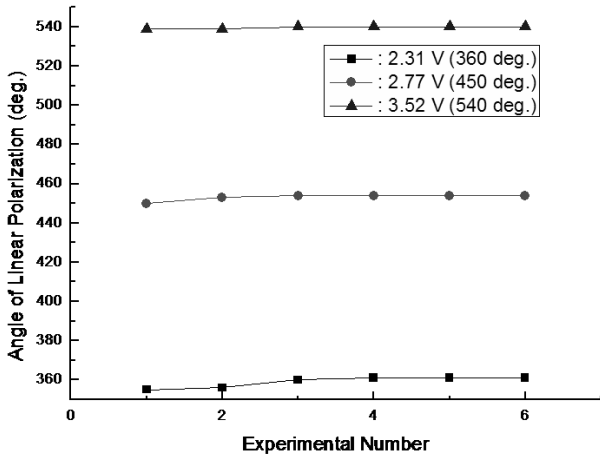


그림 4. 액정 셀에 인가한 전압이 2.31 V(검은색 사각형), 2.77 V(푸른색 원형), 3.52 V(푸른색 삼각형)의 3군데에서 무손실 360도 선형편광 회전기의 회전각을 6회의 측정된 결과.

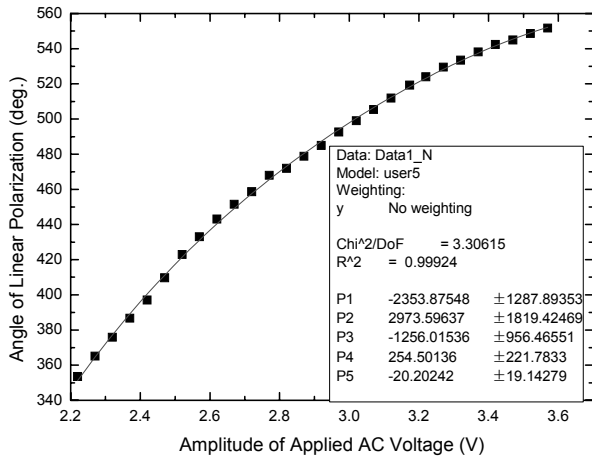


그림 5. 전압에 따른 선형편광된 출력광의 회전각 θ 가 360도부터 180도 더 회전한 540도까지의 영역에 대하여 측정된 데이터를 다항식으로 비선형 피팅한 결과.

간으로 추정된다. 그러므로 본 시스템을 사용할 경우에는 1시간의 예비 작동시간을 거친 후에 사용하면 회전각의 오차가 0.5도 이하로 줄어든다는 것을 알 수 있으며, 이러한 안정성은 1주일간의 측정에서도 확인되었다.

그림 5는 전압에 따른 선형편광된 출력광의 회전각 θ 가 360도부터 180도를 더 회전한 540도까지의 영역에 대하여 측정한 그림 3의 결과를 총 6번 측정하여 평균한 데이터 값들로부터 다항식으로 비선형 피팅한 결과이다. 무손실 360도 선형편광 회전기는 실제로 사용할 경우 그림 4와 같이 360도 회전각에 대응하는 2.25 V부터 540도 회전각에 대응하는 3.52 V까지의 전압을 2번 반복하여 작동시키면 선형편광된 광의 회전각 θ 가 0도에서 360도로 회전한 효과를 낼 수 있으므로 이 부분에 대한 데이터를 가지고 Mathematica 6.0 프로그램으로 피팅하였다. 피팅정도를 나타내는 $R^2 = 0.99924$ 로 1이므로 완벽한 피팅임을 알 수 있으며, 피팅 결과는 선형편광의 회전각을 y 로 놓고 인가된 전압을 x 로 놓을 경우

$$y = -2353.87548 + 2973.59637x - 1256.01536x^2 + 254.50136x^3 - 20.20242x^4 \quad (3)$$

이 된다. 식 (3)의 비선형 피팅식을 이용하면 본 논문에서 제안한 무손실 360도 선형편광 회전기로 선형편광된 광의 회전을 360도 자유롭게 돌릴 수 있다. 이와 같은 회전각이 180도가 차이가 나도록 선정한 전압영역은 그림 3의 결과와 표 1로부터 그림 5보다 낮은 전압영역에서도 구할 수 있지만 이들 영역에서는 전압이 낮아서 일반적으로 전압에 따른 응답속도가 느리기 때문에 그림 5의 영역을 사용하는 것이 빠른 응답속도를 유지하면서 사용하기에 편리하다. 식 (3)의 비선형성은 본 선형편광기의 회전각을 전압으로 간단하게 조절하기가 어렵게 만드는 단점이지만, 이는 식 (3)을 이용하여 프로그램으로 회전각을 조절하거나 그림 2와 그림 3의 결과에서 보다 낮은 전압의 회전각이 180도가 되는 전압영역을 찾아서 사용하면 된다.

그리고 그림 2와 그림 3의 결과에서 나온 3번째 최소값에서 3번째 최대값에 해당하는 2.67 V에서 3.37 V까지의 전압을 순간적으로 인가할 경우에 응답속도는 13.2 ms로 측정되었으며, 반대로 끌 경우에 측정된 decay time은 42.2 ms로 측정되어서 전체 응답시간은 55.4 ms이다. 그러므로 이 무손실 360도 선형편광 회전기의 응답속도는 이 ECB 액정 셀의 응답속도인 55.4 ms가 된다.

IV. 결 론

0도에서 360도까지 자유로이 광손실없이 선형편광의 방향을 간단하고 손쉽게 돌리는 선형편광 회전기를 E-7 액정을 이용하여 두께 8.4 μm 인 ECB 액정 셀과 1/4 파장판을 이용하여 514.5 nm 파장에서 구현하였다. 이러한 무손실 360도 선형편광 회전기를 설명하기 위하여 존스벡터를 도입하지 않고 액정 셀을 단순한 복굴절 광학부품으로 고려하여 분석함으로써 선형편광된 출력광이 360도의 회전이 가능함을 보였다. 그리고 이 액정 셀의 T-V curve를 측정하여 3개의 최소값 전압과 최대값 전압이 존재함을 보이고, 실제로 측정된 선형편광 회전각과 비교하여 설명함으로써 무손실 360도 선형편광 회전기의 작동원리를 간단하게 설명하였다.

이 무손실 360도 선형편광 회전기의 회전각 작동 범위는 90도 ~ 530도까지 가능하며, 회전각 360도에 해당하는 2.25 V부터 540도 회전각에 대응하는 3.52 V를 2번 반복하면 55.4 ms의 응답속도로 실제 회전각 0도에서 360까지 조절이 가능해진다. 이 선형편광 회전기의 편광도는 모든 전압에서 평균적으로 0.964로 저의 완벽한 선형편광된 출력광이 회전함을 확인하였고, 1주일간의 측정 결과 시간적 안정성도 매우 뛰어남을 확인하였다. 이 선형편광 회전기의 전압 대 회전각의 비선형성은 전압 범위를 바꾸거나 피팅곡선을 사용하면 해결할 수 있다. 이 선형편광 회전기는 구성이 매우 간단하고 광손실없이 0도에서 360도 이상으로 선형편광의 방향을 돌릴 수 있으므로 매우 실용적이고 저가로 구성할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 2008년도 한남대학교 교원연구년 동안에 미국 Ohio주 Kent State University(KSU), Liquid Crystal Institute (LCI)에서 진행한 연구의 일부임을 알려드립니다. 그리고 본 연구를 할 수 있도록 LCI 실험실 방문을 허락한 미국 켄트 주립대학교 LCI의 Peter Palffy-Muhoray 교수에게도 감사를 드립니다. 또한 ECB 액정에 대한 특성측정을 도와준 황정연 박사와 실험장비의 사용법을 친절하게 알려준 Dr. Michele Moleira에게 감사를 드립니다.

참고문헌

- [1] Eugene Hecht, *Optics*, 4th ed. (Addison Wesley, New York, 2002), pp. 325-357.
- [2] Amnon Yariv, *Quantum Electronics*, 3rd ed. (John Wiley & Sons, New York, 1989), pp. 298-318.
- [3] W. M. Gibbons, T. Kosa, P. Palffy-Muhoray, P. J. Shannon, and S. T. Sun, "Continuous grey-scale image storage using optically aligned nematic liquid crystals," *Nature*, vol. 377, pp. 43-46, 1995.
- [4] Kunihiro Ichimura, "Photoalignment of Liquid-Crystal Systems," *Chem. Rev.*, vol. 100, no. 5, pp.1847-1873, 2000.
- [5] L. Marrucci, C. Manzo, and D. Paparo, "Pancharatnam-Berry phase optical elements for wave front shapinf in the visible domain: Switchable herical mode generation," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 88, pp. 221102-1 - 221102-3, 2006.
- [6] L. Marrucci, C. Manzo, and D. Paparo, "Optical Spin-to-Orbit Angular Momentum Conversion in Inhomogeneous Anisotropic Media," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 96, pp. 163905-1 - 163906-4, 2006.
- [7] L. Allen, M. W. Beijersbergen, R. J. C. Screeuw, and J. P. Woerdman, "Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian Laser modes," *Phys. Rev. A*, vol. 45, no. 11, pp. 8185-8189, 1992.
- [8] Z. Zhuang, Y. J. Kim, and J. S. Patel, "Achromatic linear polarization rotator using twisted nematic liquid crystals," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 76, no. 26, pp. 3995-3997, 2000.
- [9] Fuzi Yang, Lizhen Ruan, S. A. Jewell, and J. R. Sambles, "Polarization rotator using a hybrid aligned nematic liquid crystal cell," *Opt. Exp.*, vol. 15, no. 7, pp. 4192-4197, 2007.
- [10] R. A. Soref and M. J. Rafuse, "Electrically Controlled Birefringence of Thin Nematic Films," *J. Appl. Phys.*, vol. 43, no. 5, pp. 2029-2037, 1972.
- [11] Shin-Tson Wu, Uzi Efron, and Laverne D. Hess, "Birefringence measurements of liquid crystals," *Appl. Opt.*, vol. 23, no. 21, pp. 3911-3915, 1984.

Lossless Linear Polarization Rotator by Using a ECB Liquid Crystal Cell and a Quarter Wave Plate

Jae Heung Jo[†]

Department of Optics and Electromagnetics, Hannam University, Daejeon 306-791, Korea

[†]*E-mail: jhjo@hnu.kr*

(Received October 28, 2008; Revised manuscript September 19, 2009; Accepted February 2, 2009)

We make a simple electrically controllable linear polarization rotator over 360° without loss by using a thick ECB(electrically controlled birefringence) liquid crystal cell and a quarter wave plate at 514.5 nm wavelength. Its operating principle can be analyzed and explained by using simple polarization analysis and experimental data. We demonstrate that the degree of polarization of the rotator is 0.964 and the temporal variation for 1 week lies within ±1 degree. We can easily solve the problem of nonlinearity of the dependence of the rotational angle of linear polarization on the applied voltage by changing the utilized voltage range or its fitting curve.