

편광소자의 광학특성의 한계

이번호에서는 광기술컨텍스트 2009년 5월호 <특집: 광학기술의 한계>에서 Toda Shin-ichiro씨가 기고한 '편광소자의 광학특성의 한계' 내용을 번역하여 게재한다.

최근 노광기, 광기록을 비롯하여 레이저 가공, 광계측 등 여러 분야에 걸쳐 광원파장의 단파장화가 진행되고 있다. 이러한 상황 속에서 광학부품의 하나인 편광자의 자외화(紫外化)에 대한 필요성이 요구되고 있다. 성능적으로 밸런스가 좋은 편광자로 글렌 톰슨 프리즘을 들 수 있는데 본 고에서는 글렌 톰슨 프리즘 구조에서 파장 $\lambda=180\text{nm}$ 부터 사용 가능하고 투과율도 높은 편광자와 그 제작 시의 문제점에 대해 설명하고 있다.

글/Toda Shin-ichiro (주식회사 Kogakugiken 기술부 기술1과)

1. 머리말

일반적으로 편광자에 요구되는 특성으로 ①고소광비 ②고투과율 ③광파장대역 ④고개구 ⑤대구경·박판 ⑥고광내력 등을 들 수 있다. 각 항목에 대해 요구되는 수준은 시대와 함께 변화하기도 하여 모든 요구를 만족하는 편광자는 존재하지 않는다. ①~④까지의 특성에 대해 비교적 우수한 특성을 가진 편광자로서 글렌 톰슨 프리즘(Glan-Thompson prism) 편광자를 들 수 있다.

최근 노광기, 광기록을 비롯하여 레이저 가공, 광계측 등 여러 분야에 걸쳐 광원파장의 단파장화가 진행되고 있다. 이러한 상황 속에서 광학부품의 하나인 편광자의 자외화(紫外化)에 대한 필요성이 요구되고 있다.

현재 가장 많이 이용되고 있는 편광자는 시트형 편광자이지만, 자외광 용도나 높은

소광비가 필요한 용도에는 복굴절 결정을 이용한 편광자 쪽이 우수하다. 특히 복굴절 결정을 이용한 편광자는 원리적으로는 직선 편광만을 투과하는 구조로 되어 있는 것이 많고, 실제 소자의 소광비는 구조가 아닌 소재인 결정의 품질(왜곡, 굴절률의 균질성 등), 광학 연마면의 거칠기 정도(精度)¹⁾, 결정의 축 정도(조합 정도 포함)에 의존하고 있다. 복굴절 결정을 이용한 편광자의 대표적인 구조는 그림 1~4와 같다.

자외광용 편광자의 대표로는 MgF_2 결정으로 만든 로션 프리즘(Rochon Prism)²⁾(그림 1)을 들 수 있다. MgF_2 결정체의 로션 프리즘은 광선분리형 편광소자이기 때문에 필요 없는 편광성분을 편광자와는 다른 부품, 장치구조 등에서 제거할 필요가 있지만, 단파장 측이 파장 $\lambda=120\text{nm}$ 부근의 자외선 영역까지 나타내는 우수한 성능을 가지고 있다. 단, MgF_2 결정체의 로션 프리즘은 입사축 프리즘의 결정축이 광축 방향에 배치되기 때문에 광선입사각에 의해 투과광량이 변화한다. 이 때문에 수속광이나 발산광에 이용하기는 적합하지 않다.

전술한 것처럼 성능적으로 밸런스가 좋은 편광자로서 글렌 톰슨 프리즘을 들 수 있다. 일반적으로 글렌 톰슨 프리즘은 방해석과 접

착제로 구성된다. 이 때문에 사용가능한 범위는 최단파장측 $\lambda = 250\text{nm}$ 부근이다. 특히 자외광용 접착제를 사용한 경우도 최단 파장은 $\lambda = 220\text{nm}$ 정도이다.

접착제를 사용하지 않은 구조로써 글랜 테일러 프리즘(Glan Taylor Prism)이 있는데, 소재에 방해석을 사용한 경우, 사용가능한 최단파장은 약 $\lambda = 220\text{nm}$ 부근이다. α -BBO 결정을 소재로 사용함으로써 $\lambda = 200\text{nm}$ 부근까지 사용 가능하게 되지만³⁾ 반사면이 많기 때문에 자외부에서의 투과율은 급속히 열화(劣化)한다. 그리고 가시자외광 영역에서도 사용하는 경우, 단파장측은 $\lambda = 210\text{nm}$ 정도가 한계이다.

이상과 같이 현재 수 종류의 자외용 편광자가 존재하지만 단파장화를 지향할 경우, ②고투과율, ④고개구 등의 특성을 만족하는 구조, 소재 조합을 발견하는 것은 어려운 상황이다.

이러한 배경으로 인해 광학 특성의 밸런스가 좋은 구조를 가진 글랜 톱슨 프리즘을 기본으로 하여 이에 더하여 단파장화를 시도해보았다. 다음에 개발한 극자외광(DUV) 대응형 편광자에 대해서 소개하겠다.

2. 구조 설명

일반적인 글랜 톱슨 프리즘의 구조는 그림2와 같다. 그림1에 표시한 것처럼 글랜 톱슨 프리즘은 2개의 방해석 프리즘을 접착제로 접합한 구조로 되어 있다. 접착제의 굴절률(n_a)은 방해석의 항광 굴절률(n_o)보다 작은 것을 선택한다. 방해석 프리즘의 정각(頂角)을 선택함으로써 방해석을 투과해왔던 항광선이 접착층과의 경계면에서 전반사하고 이상광선은 전반사하지 않고 투과한다.

결과적으로 투과광선은 직선편광이 되어 있다. 자세한 원리에 대한 설명은 전문서 등을 참고하기 바람⁶⁾, 글랜 톱슨 프리즘에 사용하는 결정의 복굴절이 크면 개구가 넓어지고 소자를 짧게 할 수

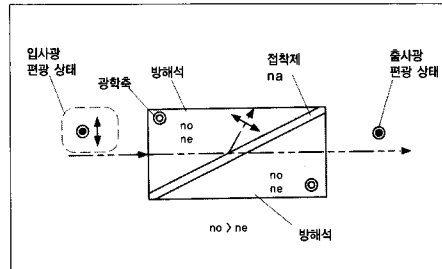


그림 2. 일반적인 글랜 톱슨 프리즘의 모식도

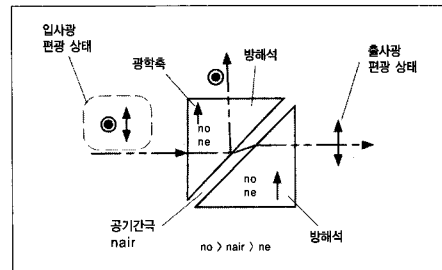


그림 3. 글랜 테일러 프리즘의 모식도

있게 된다. 접착제의 굴절률은 결정재가 방해석의 경우, 항광굴절률보다 작으면 좋지만, 투과율을 올리기 위해서는 이상광 굴절률과 일치하는 것이 바람직하다. 접착제의 굴절률이 이상광 굴절률(n_e)보다 작을 경우, 소자 길이를 짧게 할 수 있지만, 너무 작으면 개구가 좁아진다. 이 때문에 에어 갭 타입의 글랜 테일러 프리즘(그림3)에서는 소자 길이는 짧지만 개구가 좁다. 그리고 방해석과 공기에서는 굴절률의 분산이 다르기 때문에 개구가 파장에 의존하게 된다.⁴⁾

기존의 글랜 톱슨 프리즘이 극자외광에 사용되지 않는 이유는 소재인 방해석과 접착제가 극자외영역에서 흡수를 하기 때문이다. 많은 접착제가 극자외광 영역에서 흡수하기도 하지만, 소재인 방해석은 양질의 것이라도 파장 $\lambda = 250\text{nm}$ 부근에서 흡수가 시작되며, 그리고 방해석을 대체할만한 복굴절이 큰 결정도 존재하지 않기 때문에 글랜 톱슨 프리즘의 극자외화는 생각할 수 없었고, $\lambda = 220\text{nm}$ 이하에서 실용적인 글랜 톱슨 프리즘형의 편광자는 존재하지 않았다. 그림5에 파장 $\lambda = 160 \sim 500\text{nm}$ 에서 대표적

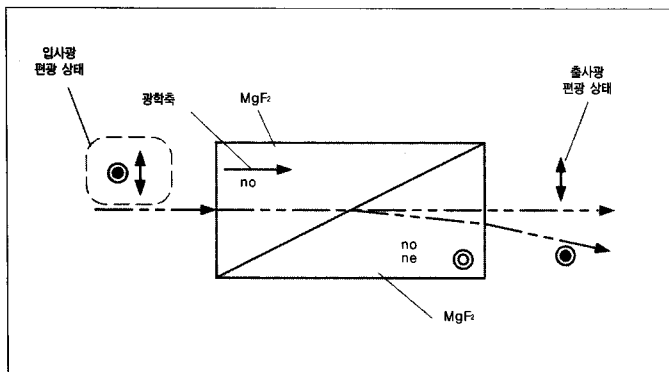


그림 1. 로션 프리즘의 모식도

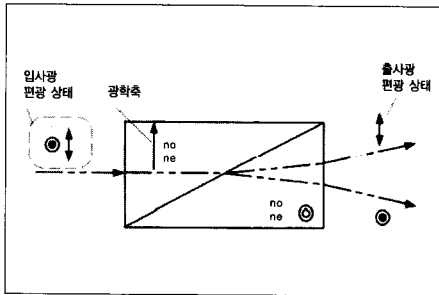


그림 4. 일반적인 울라스트 프리즘의 모식도

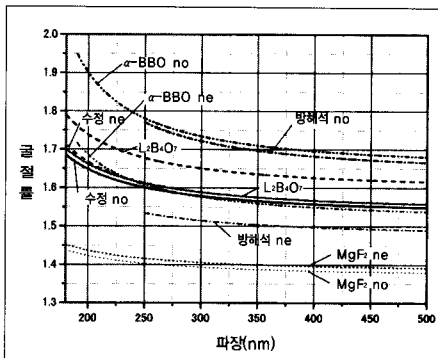


그림 5. 각종 자외 투과 결정의 파장과 굴절률의 관계

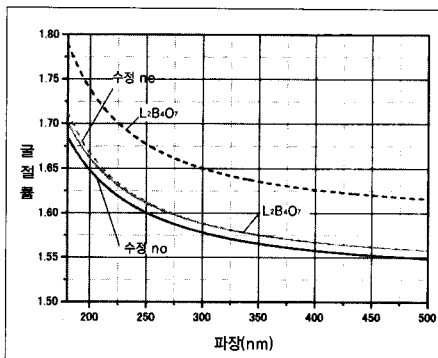


그림 6. 수정과 L₂B₄O₇ 결정의 파장과 굴절률의 관계

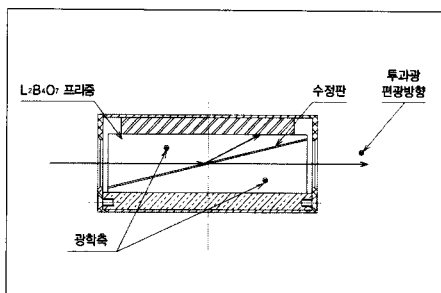


그림 7. 개발한 극자의 대응 글렌 톰슨 프리즘의 모식도

인 자외용 복굴절 결정의 굴절률을 표시하였다.^{5,6)}

그림5에서 자외광 영역에서 복굴절이 가장 큰 소재는 방해석이다. 다음으로 α -BBO결정, $L_2B_4O_7$ 결정이다. 방해석은 양질의 소재라도 $\lambda=250\text{nm}$ 부근에서 흡수가 시작되고, α -BBO결정은 흡수 데이터가 적기는 하지만 $\lambda=180\sim 190\text{nm}$ 부근까지 투명하다고 알려져 있다. 이 때문에 극자외용 편광자에 있어서 α -BBO결정은 우수한 광학 특성을 나타내는 소재이다. 접착층을 사용하지 않는 글렌 테일러 프리즘형의 편광자에 사용되는 경우도 있지만, 수분에 약하기 때문에 취급이 어렵고, 가공도 어려운 결정이다. $L_2B_4O_7$ 결정은 방해석, α -BBO결정에 비해 복굴절은 작지만 대형화가 가능하고, 결정면에 따라 차이는 있지만 비교적 조해성(潮解性)이 적은 결정이다. 우연이긴 하지만 $L_2B_4O_7$ 의 이상광 굴절률과 수정의 이상광 굴절률은 넓은 파장 대역에서 일치하고 있다. 후술하는 것처럼 본 개발품은 이 특징을 이용하고 있다.

개발한 극자의 대응형 글렌 톰슨 프리즘의 구조는 그림7과 같다. 기존 제품과의 차이는 프리즘부를 $L_2B_4O_7$ 결정으로, 접착층 부분을 수정으로 바꾸었다는 점이다. 특히 접착층을 결정판으로 함으로써 결정만을 사용한 구성으로 되어 있다. 소재의 선정 이유는 먼저 설명한 것처럼 $L_2B_4O_7$ 결정은 자외광을 투과하는 결정재 안에서 비교적 복굴절이 크다는 것과 $L_2B_4O_7$ 결정의 이상광 굴절률과 수정의 이상광 굴절률이 거의 일치하고 있고(그림6 참조), 글렌 톰슨 프리즘형 편광자에 사용할 경우 높은 투과율을 얻을 수 있기 때문이다. 게다가 $L_2B_4O_7$ 결정은 매우 큰 결정의 육성이 가능하여 대형 소자를 제작할 수 있는 이점도 있다.⁷⁾

본 고에서는 $L_2B_4O_7$ 결정과 수정을 조합한 예를 소개하지만, 결정만으로 구성한다는 것은 α -BBO 결정과 수정을 조합함으로써 개구를 한층 넓히거나 소자 길이를 축소시키는 것도 이론적으로는 가능하다는 것을 의미한다.

$L_2B_4O_7$ 프리즘과 수정은 광학식 접촉(Optical Contact)으로 접합되어 있다. 접합에 대한 상세한 것은 후술하겠다.

$L_2B_4O_7$ 결정의 이상광 굴절률과 수정의 이상광 굴절률이 거의 일치하고 있기 때문에 이상광(지면에 수직인 편광) 접합면에서의 반사는 적고, 이 때문에 그림8과 같이 편광분리형 소자의 제작도 가능하다. 그리고 $L_2B_4O_7$ 결정과 수정의 결정 축을 울라스트 프리즘(Wollaston Prism)처럼 조합함으로써 투과율의 입사각 의존성이 적고 게다가 출사편광의 분리방향이 로션 프리즘과 같은 편광자나 $L_2B_4O_7$ 프리즘과 수정 프리즘을 조합한 전반사형 편광자 등의 구조도 가능하다.

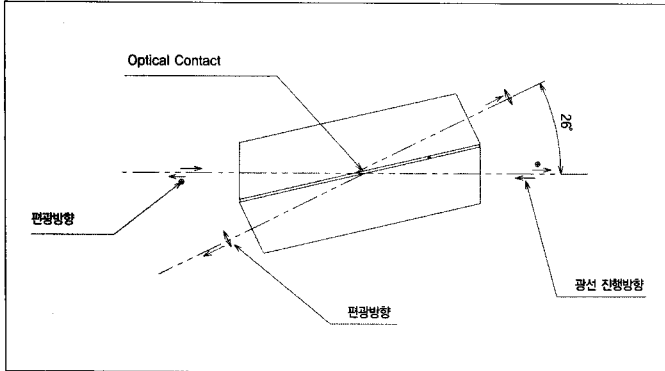


그림 8. 편광분리형 극자의 대응 글렌 톰슨 프리즘의 모식도

3. 광학 특성

먼저 그림9, 10은 개발한 극자의 대응 글렌 톰슨 프리즘형 편광자의 투과율의 파장 의존성을 나타낸 것이다. 그림9는 자외 영역을 확대한 투과 특성의 측정 결과이고, 그림10은 파장 $\lambda=180\sim 2600\text{nm}$ 에서의 투과 특성의 측정 결과이다. 투과율 80% 이상의 파장 대역은 $\lambda=185\text{nm}\sim 1950\text{nm}$ 이며, 손실 원인은 표면 반사에 의한 것으로 생각된다. 이 때문에 이 대역에서는 편광자의 길이에 의해 투과율은 거의 변하지 않는다. 측정 샘플에서는 파장 $\lambda=173\sim 2200\text{nm}$ 의 범위에서 투과율이 50% 이상이다. 측정은 편광자로 개발한 글렌 톰슨형 편광자를 사용하여 이 편광자의 투과율을 100%로 했을 때의 샘플(검광자)의 투과율을 측정하였다.

그림9에는 비교를 위해 가시자외용 α -BBO 결정으로 만든 글렌 테일러 프리즘, 방해석으로 만든 글렌 테일러 프리즘의 투과율도 표시했다. 그림9에서 개발한 글렌 톰슨형 편광자는 투과율이 높고, 단파장화하고 있음을 알 수 있다. 그림에 표시하지 않았지만 기존의 글렌 톰슨 프리즘의 투과특성은 자외광용의 것이라도 방해석으로 만든 글렌 테일러 프리즘과 같은 정도이다.

다음으로 각 파장에서 소광비의 측정결과를 표1에 나타냈다. 모든 파장에서 소광비는 약 50dB 이상이였다. 특히 자외 영역에서의 측정 결과는 거의 측정기기의 다이내믹 영역(Dynamic range)과 같은 값이며, 편광자의 실력은 보다 높다고 생각된다.

그림11은 입사각 허용각(개구)의 계산결과와 측정결과이다. 그림 11에 나타난 입사 허용각은 수직입사를 0° 로 하여 일정 방향으로 입사광을 기울였을 경우의 각도이다. 전각에서는 그림11의 배 이상의 입사 허용각이 된다. 측정결과와 계산결과는 잘 일치하고 있어 자외 영역에서부터 가시영역에 걸쳐 5° 이상의 개구를 가지고

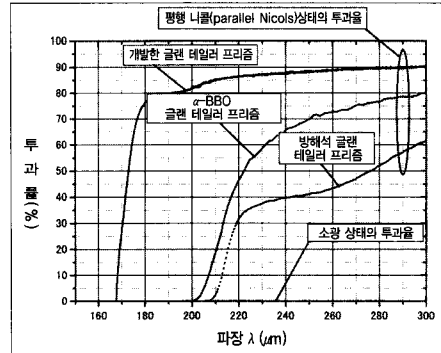


그림 9. 자외광용 편광소자의 투과율 비교; 자외광 영역

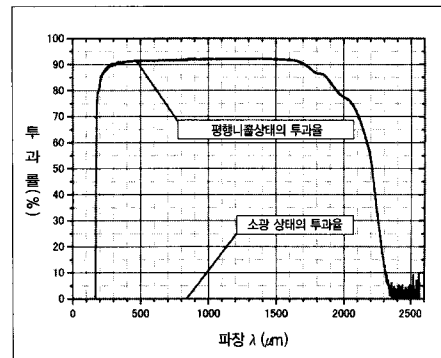


그림 10. 자외광용 편광소자의 투과율 비교; 자외가시근적 영역

있음을 알 수 있다. 특히 파장 $\lambda=200\text{nm}$ 이하에서는 약 10° 의 입사허용각을 가지고 있음을 알 수 있다.

4. 제작에 대하여

광학결정을 사용한 편광자의 소광비 등의 광학성능은 연마면의 표면 거칠기, 광학 축의 조합 정도(精度), 광학면의 평행도, 면 정도(精度) 등 가공 정도(精度)에 따른다. 본 개발품은 자외 영역에서 적외 영역까지 고투과율, 고소광비를 목적으로 하기 때문에, 상기 요소에 대해 높은 가공 정도를 필요로 하는 것은 당연하지만, 이들 요소는 기존 편광 소자와 같기 때문에 상세한 것은 생략하겠다.

표 1. 각 파장에서의 소광비 측정 결과

파장 λ (nm)	195	199	396	532	633
소광비(dB)	50	49	57	58	59

깨끗한 접합면으로 되어 있다.

이러한 방법으로 접합한 상태의 양단 면을 광학 연마하여 최종적으로 소자로 완성하였다. 그림17은 완성한 소자를 홀더에 넣은 상태의 것이다.

5. 끝맺음

글렌 톰슨 프리즘 구조에서 파장 $\lambda=180\text{nm}$ 부터 사용 가능하고 투과율도 높은 편광자와 그 제작 시의 문제점에 대해 설명하였다. 글렌 톰슨 프리즘이 고려되고부터 현재까지 약 130년이 지났다. 그 사이에 몇가지 아이디어나 기술의 진보에 의해 다양한 개량이 이루어져 왔지만, 본 고에서 소개한 편광자는 자외화라는 점에서 큰 진보를 이루었다고 생각된다. 단, 기존의 글렌 톰슨 프리즘이 고안되고부터 본 개발품 고안까지 130년이라고 하는 긴 시간이 걸렸다는 것만을 보아도 원래의 설계가 매우 우수했다고 말하지 않을 수 없다. 유감스럽게도 소개한 편광자에 대해서도 아직 한계라고는 말하기 어렵다. 특히 파장이 $\lambda=200\text{nm}$ 이하의 고출력 레이저광을 입사한 경우, 광학식 접촉 부분이 박리하는 일이 있어, 이것이 다음 문제점으로 여겨지고 있다.

[참고문헌]

1. Charlea E. Moeller, et al., Applied Optics Vol.8, No.1 pp. 206-207 (1969)
2. D. L. Steinmetz, et al., Applied Optics Vol. 6 No. 6 pp. 1001-1004 (1967)
3. Roland Appel et al., Applied Optics Vol. 41, No. 13 pp. 2470-2480 (2002)
4. Paul Kuttner, Acta Physica Austriaca, Bd. 17 pp. 215-226 (1962)
5. T. Sugawara et al., Solid State Commun. Vol. 107(5) pp. 233-237 (1998)
6. "Handbook of Optics Vol. II" McGraw-Hill, Inc (1995)
7. N. Tsutusi et al., J. Cryst. Growth Vol. 229 (1-4), pp. 283-288 (2001)

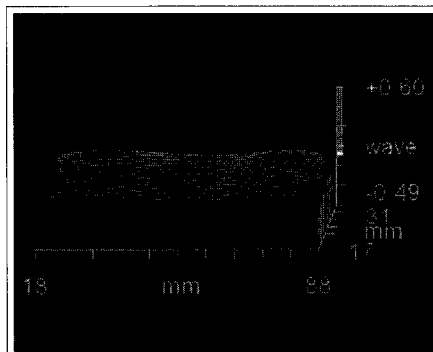


그림 15. 프리즘1과 수정판 접합 후의 수정표면 형상. 개량 후 접합 시의 변형을 고려하여 프리즘 1, 수정판을 제작

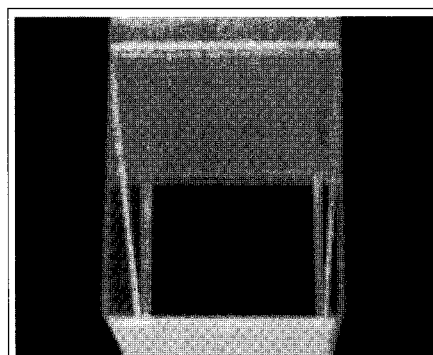


그림 16. 접합방법 개량 후의 접합면 모습

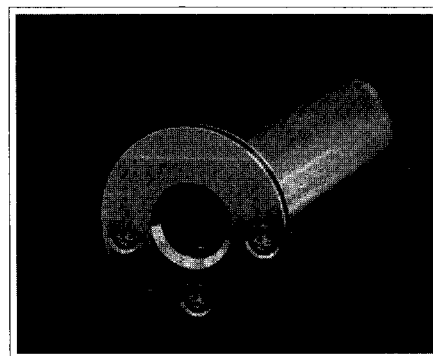


그림 17. 개발한 극자외광 대응 글렌 톰슨 프리즘