

음향광학변조필터의 이미지 이동 현상을 보상하기 위한 프리즘 설계 Design of a Prism to Compensate the Image-shifting Error of the Acousto-optic Tunable Filter

*류성윤¹, 유장우¹, 곽윤근¹, #김수현¹

*Sung Yoon Ryu¹, Jang-Woo You¹, Yoon keun Kwak¹, # Soo hyun Kim¹ (Soo Hyun@kaist.ac.kr)
¹ 한국과학기술원 기계공학과

Key words : : AOTF, Image shift, Compensation, prism

1. 서론

음향광학변조필터는 복굴절 (birefringence) 성질을 가지는 크리스탈(crystal)의 한 면에 전기적인 신호를 음파 (Acoustic wave)로 변환시켜주는 압전효과(piezo effect)의 성질을 가지는 변환기(transducer)를 부착시킴으로써, 변조되는 음파와 진행하는 빛과의 상호 작용(Acousto-optic interaction)을 일으키는 광학소자이다. 이때 구동 전기 주파수 (frequency)에 따라 특정 파장의 빛이 회절(diffraction)되기 때문에 분광소자의 역할을 수행하게 된다. 이때 회절되는 빛의 파장은 수 nm 정도로서, 매우 높은 분해능(spectral resolution)을 보이고 있다. 음향광학변조필터의 경우 이러한 변조에 있어서 반복능이 높아 별다른 교정(Calibration)이 필요 없으며, 하드웨어적으로 구동하는 부분이 없으므로 견고한 설계가 가능하며 전기적인 신호에 의하여 회절되는 빛의 파장이 결정되므로 파장별 고속 주사(scanning)가 가능하다. 또한 결상 능력(imaging capability)을 가지고 있으므로 다축정점의 측정이 가능하다. 따라서 음향광학변조필터에 기반을 둔 시스템은 고속, 고분해능의 분광 결상이 가능하다. 이러한 여러 장점들에 의하여 음향광학변조필터는 백색광을 파장 주사하여 시편의 정보를 추출하는 Spectral domain interferometry 나 세포의 단층구조를 측정하는 Optical Coherence Tomography 등에 다양하게 이용되고 있다[1-3]. 하지만 음향광학변조필터의 특성 상 음향광학변조필터를 통과한 회절광의 회절각이 파장에 따라 변하며, 이로 인하여 측정부에서 파장별 이미지 이동 현상이 발생한다는 단점이 있다. 이러한 문제점은 음향광학변조필터를 이용한 고속, 고분해능의 분광 결상 시스템을 구성하는 데에 치명적인 문제점이 되고 있다. 따라서 본 연구에서는 이러한 음향광학변조필터의 이미지 이동 현상을 효율적으로 보상하기 위하여 프리즘 시스템을 제안하고자 한다.

2. 프리즘 시스템

백색광이 음향광학변조필터를 통과하게 되면 복굴절 성질에 의하여 서로 수직 편광된 정상파(Ordinary ray)와 비정상파(Extraordinary ray)가 각각 발생하게 된다. 발생된 정상파와 비정상파의 파장이 473.795nm ~ 614.723nm 변하는 동안 두 빛이 광축과 이루는 회절 각도는 각각 6.5734° ~ 6.0206°, 6.6287° ~ 6.0760° 변하는 것을 확인하였으며 이러한 회절각의 변화에 의하여 측정부에서 이미지 이동 현상이 발생하는 것을 확인하였다.

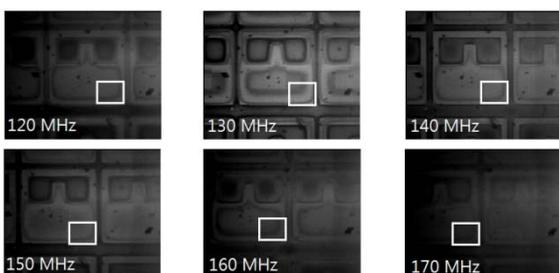


Fig. 1 Image-shift captured by the CCD

음향광학변조필터의 구동 주파수가 120MHz ~ 170MHz 변하는 동안 전 파장 대역에 대하여(473.795nm ~ 614.723nm) 그림 1 에서와 같이 CCD 상에서 244 픽셀의 이미지 이동 현상이 발생하였다. 이러한 이미지 이동 현상을 보상하기 위하여 그림 2 와 같은 프리즘 시스템을 제안하였다.

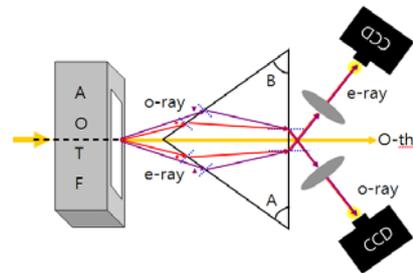


Fig. 2 The proposed prism compensation system

그림 2 와 같이 특정 밀변 각을 가지는 프리즘 시스템을 설계한 후 이를 음향광학변조필터 뒤 부분에 광축과 수직되게 위치시키면 음향광학변조필터를 통과한 정상파와 비정상파의 이미지 이동 현상을 동시에 보상할 수 있다. 그림 3 은 음향광학변조필터를 통과한 비정상파가 광축에 대하여 θ 의 회절각을 가지고 제안된 시스템에 입사될 때 비정상파의 경로가 어떻게 변하는지를 나타내고 있다. 그림 3 에 대하여 기하학적 해석과 스넬의 법칙(Snell's law)을 이용하여 빛의 경로를 해석하면 프리즘으로부터 출사하는 비정상파의 최종 굴절각을 얻을 수 있다.

$$i_2' = \sin^{-1} \left[n \sin \left(A - \sin^{-1} \left\{ \frac{1}{n} \sin(\theta + A) \right\} \right) \right] \quad (1)$$

비슷한 방법을 사용하여 정상파에 대한 최종 굴절각을 유도할 수 있다.

$$i_2' = \sin^{-1} \left[n' \sin \left(B - \sin^{-1} \left\{ \frac{1}{n'} \sin(\theta + B) \right\} \right) \right] \quad (2)$$

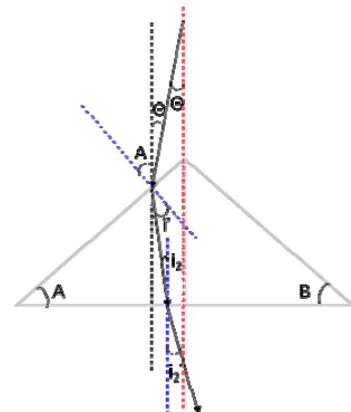


Fig. 3 Geometrical analysis of the prism system

식 1, 2 를 토대로 정상파와 비정상파의 이미지 이동 현상을 최소화하는 프리즘의 밑변 각 B, A 를 선택하여 제작하기에 앞서, 두 식을 이용하여 시뮬레이션적으로 획득된 두 밑변 각이 실제 광학시스템에서 실험을 통하여 획득되는 최적의 밑변 각과 일치하는지 실험적으로 검증해야 한다. 이를 위해서는 매우 많은 종류의 프리즘 셋이 필요하고 각 프리즘에 대한 실험을 실시할 때마다 프리즘의 정렬을 다시 해야 하며 또한, 시중에서 일반적으로 구할 수 있는 프리즘의 밑변 각은 대부분은 45° 나 60° 이기 때문에 그 이외의 밑변 각을 가지는 프리즘은 직접 주문 제작해야 한다는 단점이 있다. 따라서 비용이나 시간상의 문제, 실험의 편의성 등의 이유로 45° 의 밑변 각을 가지는 프리즘을 음향광학변조필터 뒤에 위치시킨 후 그림 4 와 같이 프리즘이 광축과 이루는 각을 변화시켜 주는 방법으로 실험을 실행하였다.

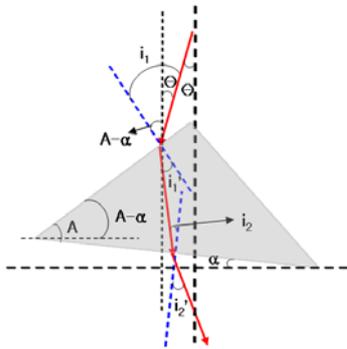


Fig. 4 Geometrical analysis of the prism with tilting angle (Extraordinary ray)

그림 4 에서 프리즘으로부터 출사되는 비정상파의 최종 굴절각은 아래의 식으로 주어진다.

$$i_2' = \sin^{-1} \left[n' \sin \left(A - \sin^{-1} \left\{ \frac{1}{n'} \sin(\theta + A - \alpha) \right\} \right) \right] \quad (3)$$

유사하게, 정상파의 최종 굴절각은 다음과 같다.

$$i_2 = \sin^{-1} \left[n' \sin \left(\sin^{-1} \left\{ \frac{1}{n'} \sin(\theta + B + \alpha) \right\} - B \right) \right] \quad (4)$$

식 3,4 로부터 프리즘의 밑변 각이 고정되어 있을 때 프리즘의 회전 정도에 따라서(즉, α 값의 변화 정도에 따라서) 정상파와 비정상파의 최종 굴절각이 달라지는 것을 확인할 수 있다. 두 식에 정상파와 비정상파의 파장별 회절각 정보(θ)와 굴절률 정보(n')를 대입하고 두 밑변 각을 모두 45° 로 가정하였을 때 두 빛은 회전각도가 각각 +3.337°, -3.274° 일 때 이미지 이동을 최소화하는 것을 확인하였다. 이 결과를 실험적으로 검증하기 위하여 45° 의 밑변 각을 가지는 BK7 프리즘을 음향광학변조필터 뒤에 위치시킨 후 프리즘을 회전시켜가면서 이미지 이동 현상이 최소가 되는 최적의 회전각도를 측정해보았다. 그 결과 정상파와 비정상파는 회전각도가 각각 +3.2°, -3.1° 일 때 이미지 이동이 최소가 되었으며 시뮬레이션 결과와 유사한 값을 가지는 것을 확인하였다.

3. 프리즘 설계

실험 결과를 바탕으로 이미지 이동을 현상을 최소화시킬 수 있는 프리즘을 설계하였다. 2 장의 결과에서 시뮬레이션 결과와 실험 결과가 정확히 일치하지 않았기 때문에 이러한 영향을 고려하여 프리즘의 두 밑변 각을 선택하였다. 시뮬레이션 값과 실험 값을 보상하는 방법을 식 1,2 에 적용한 결과 이미지 이동 현상을 최소화시킬 수 있는 최적의 두 밑변 각 B 와 A 는 46.62°, 46.57° 이었다.

그림 5 는 이러한 결과를 이용하여 설계된 프리즘의 치

수들을 나타낸다. 프리즘의 두 밑변 각을 만족시키면서, 빛이 프리즘에 입사되고 내부에서 굴절되어 최종적으로 밑면을 통해 출사되는 과정 동안 빛의 어떠한 손실이나 왜곡이 발생하지 않도록 각각의 치수들을 선택하였다.

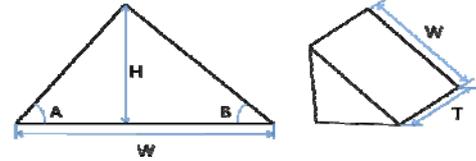


Fig. 5 Design of a specific prism (A = 46.57°, B = 46.62°, H = 20mm, S = 37.717mm, T = 20mm, Material: BK7)

실제 제작된 프리즘을 음향광학변조필터의 뒤에 광축과 수직되도록 위치시킨 후 정상파와 비정상파의 이미지가 CCD 상에서 얼마나 이동되는지 확인해 보았다. 그림 6 은 CCD 상에서 획득된 정상파의 이미지를 나타낸다.

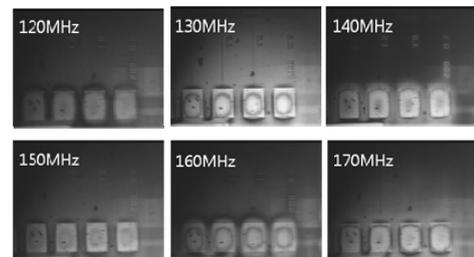


Fig. 6 Compensated images of ordinary ray in the CCD with a designed prism

측정 결과 정상파와 비정상파는 473.795nm~614.723nm 의 파장 대역에 대하여 CCD 상에서 각각 5 픽셀과 6 픽셀의 이미지 이동 현상이 발생하는 것을 확인하였다. 프리즘을 사용하지 않았을 때 발생하였던 244 픽셀에 비하면 굉장히 작은 값을 알 수 있으며, 두 빛의 이미지 이동 현상이 효율적으로 잘 보상된 것을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 프리즘을 이용하여 음향광학변조필터에서 발생하는 이미지 이동 현상을 보충하였다. 음향광학변조필터에서 발생하는 정상파와 비정상파는 서로 수직 편광되어 있으므로 두 빛에 서로 다른 정보를 포함시킬 경우 한 번 측정을 통하여 복수의 정보를 획득할 수 있으므로 측정 시스템을 보다 효율적으로 활용할 수 있다. 제안된 프리즘 시스템은 두 밑변 각을 최적화하여 정상파와 비정상파의 이미지 이동 현상을 동시에 최소화시킬 수 있으므로 여러 측정 시스템에 응용이 가능할 것이다.

참고문헌

1. Kim, D. and Kim, S. "Measurement of the thickness profile of a transparent thin film deposited upon a pattern structure with an acousto-optic tunable filter", OPTICS LETTERS, Vol. 27, No. 21, pp. 1893-1895, 2002.
2. Akiyama, H., Sasaki, O. and Suzuki, T., "Sinusoidal wavelength-scanning interferometer using an acousto-optic tunable filter for measurement of thickness and surface profile of a thin film", OPTICS EXPRESS, Vol. 13, No. 25, pp. 10066-10074, 2005.
3. Dubey, S., Mehta, D., Anand, A. and Shaker, C., "Simultaneous topography and tomography of latent fingerprints using full-field swept-source optical coherence tomography", J. Opt. A: Pure Appl. Opt., Vol. 10, Issue 015307, (8pp), 2008