

음향광학변조필터의 이미지 이동 보상을 위한 프리즘 제안

류성윤[#], 유장우^{*}, 곽윤근^{*}, 김수현^{*}

Use of a Prism to Compensate the Image-shifting Error of the Acousto-optic Tunable Filter

Sung Yoon Ryu[#], Jang-Woo You^{*}, Yoon keun Kwak^{*} and Soo hyun Kim^{*}

ABSTRACT

The Acousto-Optic Tunable Filter (AOTF) is a high-speed full-field monochromator which generates two spectrally filtered light beams with ordinary and extraordinary polarization state. Thus, AOTF is widely used to build full-field spectral imaging system or spectral domain interferometer. However, AOTF has a big problem that the angle of diffracted light changes according to the scanning of wavelength, which makes image shift on CCD plane. In this paper, we propose an analytic design of prism system to compensate the image shift. The detailed analysis of light paths in a prism and basic experimental results are presented to verify our proposed compensation method. The experimental results agree with simulation results based on suggested prism model and image shift is minimized at optimal condition. Also, it can be extended to compensate the image shift for ordinary and extraordinary polarized light simultaneously.

Key Words : AOTF (음향광학변조필터), Image shift (이미지 이동), Compensation (보상), Prism (프리즘)

기호설명

A = left side bottom angle of prism
B = right side bottom angle of prism
 α = tilt angle of prism

1. 서론

최근 나노 기술의 발전에 힘입어 반도체나 디스플레이와 같은 산업분야 및 바이오, 의학 분야 등에서 나노 혹은 마이크로 단위의 시편을 측정할

수 있는 나노 계측기술에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 광학적인 측정 방법 중 하나인 Spectral domain interferometry 는 WSI(White-light Scanning Interferometry, 백색광 주사 간섭계)의 발전된 형태로서 기계적인 구동이 필요 없어서 민감도가 높고 고속측정이 가능하며 위상 모호성 문제를 갖지 않는다는 장점이 있다. 음향광학변조필터는 전기적인 신호만으로 투과되는 빛의 파장을 조절할 수 있으며, 따라서 전기적인 신호에 의한 제어 속도가 매우 빠르다는 장점이 있다. 따라서 Spectral domain interferometry 에 많이 이용되고 있

☞ 접수일: 2008 년 1 월 3 일; 게재승인일: 2008 년 2 월 21 일
교신저자: 한국과학기술원 기계항공시스템학부 기계공학전공
E-mail: mogage@kaist.ac.kr Tel. (042) 869-3252
* 한국과학기술원 기계항공시스템학부 기계공학전공

다.^{1,5} 하지만 음향광학변조필터를 통과한 후 회절된 빛이 광축과 이루는 회절각이 파장에 따라 변하며, 이로 인하여 측정부에서 이미지 이동 현상이 발생한다는 단점이 있다. 이러한 문제점은 음향광학변조필터를 이용한 고속, 고분해능의 분광 결상 시스템을 구성하는 데에 치명적인 문제점이 되고 있다.

음향광학변조필터의 회절각 변화 현상을 보상하기 위하여 여러 선행 연구가 수행된 바 있다. 이 중 음향광학변조필터의 출사면에 쉐기각을 주는 방법⁶ 과 음향광학변조필터와 동일 재질의 결정으로 만든 프리즘을 출사부에 위치시키는 방법⁷ 의 경우에는 음향광학변조필터에서 발생하는 두 개의 회절광인 정상파(Ordinary ray)와 비정상파(Extraordinary ray) 중 하나의 광선만을 보상할 수 있기 때문에 두 회절광 중 하나의 광선 성분만을 이용할 수 있다는 단점이 있다. 타원경을 이용한 방법⁸ 의 경우에는 타원경을 제작하기 힘들고, 제작 비용이 많이 소요되며, 타원경의 정렬이 적절치 못할 경우 두 회절광의 각도 변화 보상 효과가 현저히 떨어질 수 있다는 단점이 존재한다. 회절각의 변화에 따른 이미지 이동 현상을 소프트웨어적으로 보정한 방법¹ 의 경우에는 시스템의 구성이 변할 때마다 소프트웨어적 보정 작업이 재차 수행되어야 하며, 음향광학변조필터에 인가된 주파수와 이미지 이동 정도의 관계를 구함에 있어서 오차가 발생할 수 있다는 단점이 있다.

음향광학변조필터를 통과한 정상파와 비정상파를 동시에 측정할 경우 각각 측정된 정상파에 의한 신호와 비정상파에 의한 신호를 중첩시킴으로써 보다 증폭된 신호를 얻게 되어 SNR(Signal to Noise Ratio) 값을 향상시킬 수가 있으며, 회절되어 나온 정상파와 비정상파가 서로 수직 편광되어 있다는 특징을 이용할 경우 여러 유용한 결과를 획득할 수 있어서 측정 시스템을 보다 효율적으로 이용할 수 있다는 장점이 있다. 따라서 본 연구에서는 정상파와 비정상파의 각도 변화 현상을 동시에 보상할 수 있는 방법을 제안하고자 한다. 프리즘의 분광 특성과 두 회절광의 회절 각도가 거의 비슷하다는 점을 이용하여 한 개의 프리즘을 이용하여 정상파와 비정상파의 회절각 변화 현상을 동시에 보상할 수 있는 시스템을 제안한다.

2. 음향광학변조필터의 회절각 변화

2.1 회절각 측정

음향광학변조필터를 통과한 정상파와 비정상파의 회절각 변화를 정확히 보상하기 위해서는 두 광선의 파장별 회절각을 우선적으로 측정해야 한다.

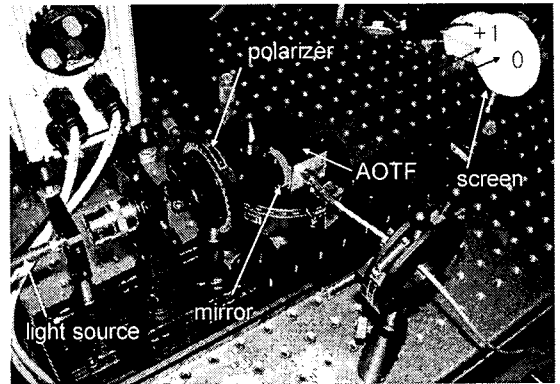


Fig. 1 Experimental setup to measure the diffraction angle

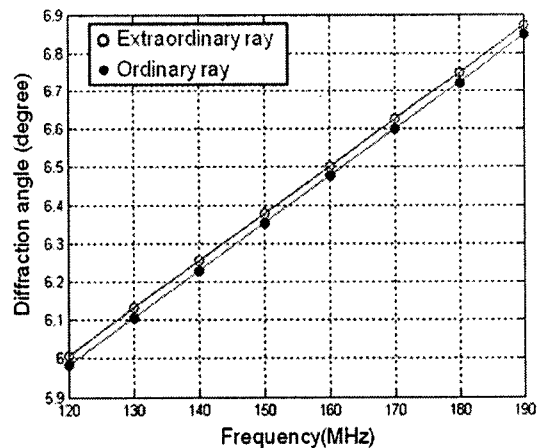


Fig. 2 The variation of diffraction angle according to the driving frequency of AOTF

회절각을 측정하기 위하여 그림 1 과 같은 시스템을 구성한 후 실험을 진행하였다. 이 때 광원은 70W 텅스텐 할로겐 램프(Tungsten halogen, 70W)가 사용되었고, 음향광학변조필터는 브림로즈사(Brimrose TEAF10-40-65)사의 제품이 사용되었다. 또한, 거울은 음향광학변조필터의 축을 광축과 일치시키기 위하여 사용되었으며, 편광기는 광량의

조절 및 비정상파와 정상파의 구분을 위하여 사용되었다.

그림 1 에 나타난 바와 같이 모눈종이가 부착된 스크린에 음향광학변조필터를 통과한 회절되지 않은 빛과 회절된 빛을 멧히게 한 후 이 두 빛 사이의 거리를 측정하고, 음향광학변조필터의 출사면(exit plane)으로부터의 스크린까지의 거리를 측정함으로써 음향광학변조필터에 인가된 주파수에 따른 정상파 및 비정상파의 회절각(diffraction angle)을 알 수 있다.

구동 주파수는 120MHz 에서부터 180MHz 까지 변화시켰는데 이 때 이에 해당하는 빛의 파장은 614.4230nm 에서 473.7950nm 로 변하게 된다. 그림 1(b)는 구동 주파수 변화에 따른 회절각의 변화를 나타낸다. 그림 2 에서 알 수 있듯이 인가 주파수가 클수록 회절 각도도 커지고 있음을 확인할 수 있다. 정상파의 경우 120MHz 근처에서(614.7230nm 의 빛에서) 약 6.0200° 를 나타내었고, 180Hz 에서는(456.1140nm 의 빛에서는) 약 6.6800° 를 나타내었다. 동일한 주파수가 음향광학변조필터에 인가되었을 때 비정상파가 정상파에 비하여 전체적으로 약 0.0600° 큰 회절각을 가짐을 알 수 있다.

2.2 CCD 에서의 이미지 이동 현상

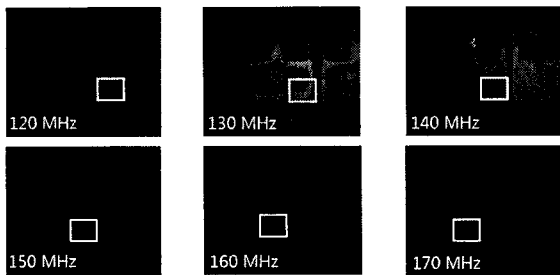


Fig. 3 Image-shift captured by the CCD

이와 같이 분광된 두 회절광의 출사각이 음향광학변조필터에 인가된 주파수의 변화에 따라서 변하기 때문에 CCD 에서 획득되는 파장별 분광 이미지 역시 이동을 하게 된다. 시편으로부터 반사된 빛이 음향광학변조필터를 통과한 후 CCD 에 도달하게 되면 그림 3 과 같은 시편의 영상을 획득할 수 있다. 이 때 음향광학변조필터에 인가되는 주파수를 변화시킴으로써 인가 주파수에 따른 시편의 분광 이미지의 변화를 확인할 수 있다. 이미지 이

동 현상을 명확히 확인하기 위하여 일정한 패턴(pattern)이 되어 있는 실리콘웨이퍼 위에 SiO₂ 박막이 도포되어 있는 시편을 사용하였다.

측정 영역 중 특정 부분을 선택하여 이미지를 추종한 결과 120MHz 일 때는 CCD 상에서 (289, 95) 픽셀(pixel)에 위치하였던 부분이 170MHz 에서는 (45, 95) 픽셀에 위치하였다. 이미지 이동 현상은 한 축 방향으로만 나타나기 때문에 CCD 상에서도 한 축 방향으로만 이미지가 이동하여 결상된 것이다. 측정된 결과로부터 인가 주파수가 50MHz 변하는 동안 이미지가 한 축 방향으로 244 픽셀이나 이동하는 것을 알 수 있었으며, 또한 이 때 주파수가 증가함에 따라 CCD 상에서의 위치가 거의 선형적으로 이동하는 것을 확인하였다.

3. 프리즘 시스템 제안

3.1 프리즘의 광학적 특성

프리즘은 크게 분산프리즘(dispersing prisms)과 반사프리즘(reflecting prisms)으로 나눌 수 있다. 본 논문에서는 프리즘의 분산 성질을 이용하여 이미지 이동을 보상할 것이기 때문에 분산프리즘에 대해서만 살펴 보도록 한다.

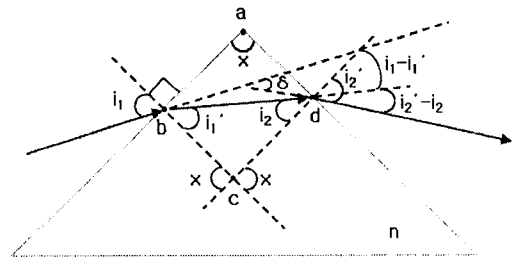


Fig. 4 Geometry of a dispersing prism

그림 4 에서와 같이 분산프리즘으로 들어가는 광선은 전형적으로 편의각(angular deviation)으로 알려진 각도 δ 만큼 원래의 방향으로부터 벗어나서 나간다. 첫 번째 굴절에서 광선은 (i_1-i_1') 각도만큼, 그리고 두 번째 굴절에서는 $(i_2'-i_2)$ 각도만큼 편향되기 때문에 전체 편향된 각도는 다음과 같다.

$$\delta = (i_1 - i_1') + (i_2' - i_2) \quad (1)$$

프리즘 굴절률이 n 이고 프리즘이 공기 중에

놓여 있다면 스넬의 법칙(Snell's Law) 및 삼각법칙을 이용하여 프리즘에서 나가는 최종 출사각 i_2' 는 식 (2)와 같다.

$$i_2' = \sin^{-1}(n \cdot \sin i_2) = \sin^{-1}[n \cdot \sin(\alpha - i_1')] \\ = \sin^{-1}[(\sin \alpha)(n^2 - \sin^2 i_1)^{1/2} - \sin i_1 \cos \alpha] \quad (2)$$

식 (1)과 식 (2), 그리고 그림 3 에서 표시된 각 x 를 이용하면 결국 편각은 식 (3)의 값으로 주어진다.

$$\delta = i_1 + \sin^{-1}[(\sin \alpha)(n^2 - \sin^2 i_1)^{1/2} - \sin i_1 \cos \alpha] - \alpha \quad (3)$$

식 (3)으로부터 편각(입사각과 최종 출사각이 이루는 각)은 굴절률의 함수로 주어지며 굴절률은 빛의 파장에 대한 함수이므로 결국 프리즘에 입사한 빛은 파장에 따라 각기 다른 각도를 가지고 분산을 하게 되는 것이다.⁹

앞서, 백색광이 음향광학변조필터를 통과할 때 회절광의 파장이 짧을수록(인가되는 주파수가 클수록) 회절각이 커지는 것을 확인하였다. 파장이 짧아질수록 유전체의 굴절률은 증가하기 때문에 식 (3)으로부터 프리즘에서도 빛의 파장이 짧을수록 분산각(편각)이 커지는 것을 알 수 있다. 따라서 프리즘의 이러한 성질을 이용하여 음향광학변조필터의 뒤 부분에 프리즘 시스템을 적절히 위치시킴으로써 파장에 따른 빛의 분산 현상을 보상할 수 있는 것이다.

3.2 프리즘 시스템 제안

간단한 구조의 하드웨어적 시스템을 이용하여 음향광학변조필터에서 발생하는 정상파와 비정상파의 이미지 이동 현상을 동시에 보상하기 위해서 본 논문에서는 그림 5 와 같은 프리즘 시스템을 제안한다.

인가 주파수별 회절각 측정 결과로부터 같은 인가 주파수에서 정상파와 비정상파의 회절각이 약간 다른 값을 가지므로 그림 5 에서 제안한 바와 같이 음향광학변조필터의 광축을 중심으로 대칭적(symmetric)인 형태로 프리즘을 위치시키고 이때 프리즘의 양 밀변 각(A, B)을 다르게 설계함으로써 프리즘 1 개를 이용하여 정상파와 비정상파의 이미지 이동 현상을 동시에 보상하고자 한다. 그림에서와 같이 음향광학변조필터를 통과한 빛들이

프리즘 시스템을 통과한 후 갖게 되는 최종 굴절각이 파장에 상관없이 거의 일정한 값을 가진다면, CCD 상에서는 이미지 이동 현상이 거의 발생하지 않을 것이다.

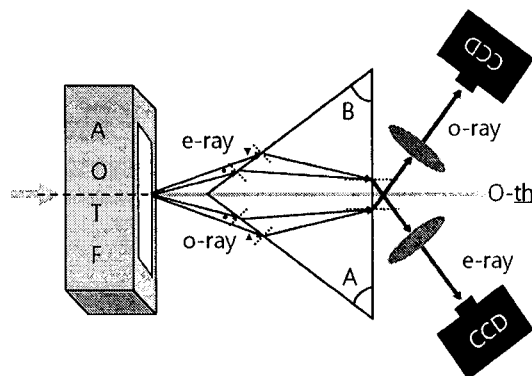


Fig. 5 The proposed prism compensation system

그림 6 은 음향광학변조필터를 통과한 정상파가 광축에 대하여 θ 의 회절각을 가지고 제안된 시스템에 입사될 때 정상파의 경로가 어떻게 변하는지를 나타내고 있다.

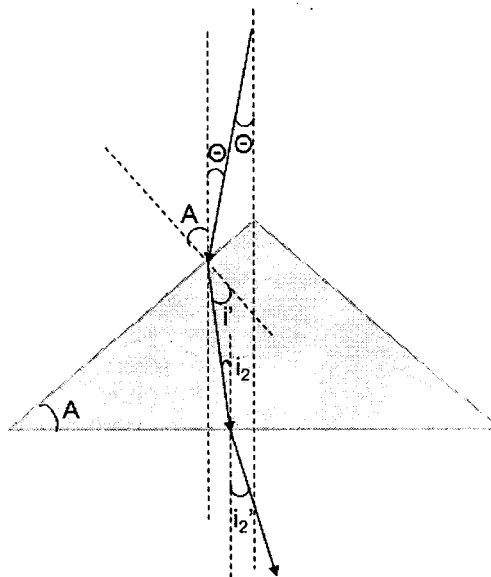


Fig. 6 Geometrical analysis of the prism system

그림에서와 같이 프리즘의 밀변 각이 A 라고 하면 프리즘 시스템에 대한 입사각은 아래의 식과

같다.

$$i_1 = \theta + A \quad (4)$$

그림 6 에 대한 기하학적 해석과 스넬의 법칙을 이용하여 빛의 경로를 해석하면 프리즘으로부터 출사하는 최종 굴절각을 얻을 수 있다.

$$i_2' = \sin^{-1} \left[n \sin \left(A - \sin^{-1} \left\{ \frac{1}{n} \sin(\theta + A) \right\} \right) \right] \quad (5)$$

식 (5)를 살펴보면, 최종 굴절각은 굴절률의 함수로 주어지며 프리즘의 밀변 각에 대하여 종속적인 것을 알 수 있다. 따라서 프리즘의 밀변 각을 적절히 설계함으로써 파장별 분산각을 최소화 할 수 있는 것이다. 비정상파의 경우 위의 유도 과정에서 밀변 각 A 를 B 로 바꿈으로써 동일한 결과를 얻을 수 있다.

4. 실험

4.1 시스템 구성

앞서 구한 식을 이용하여 프리즘을 설계하였을 때, 그 결과가 타당한지 여부를 파악하기 위해서는 밀변의 각이 다른 다양한 프리즘 셋을 실제 광학 시스템에 삽입하여 프리즘의 밀변 각에 따른 이미지 이동 정도가 이론적인 예상에 부합되는지 실험을 통해서 검증해야 한다. 하지만 이를 위해서는 매우 많은 종류의 프리즘 셋이 필요한데 시중에서 일반적으로 구할 수 있는 프리즘의 밀변 각이 특정 몇 개의 각으로 제한되어 있기 때문에 합당한 실험 결과를 획득하기가 어렵다. 따라서 본 논문에서는 45° 의 밀변 각을 가지는 프리즘을 음향광학 변조필터 뒤에 위치시킨 후 프리즘이 광축과 이루는 각을 변화시켜 주는 방법으로 실험을 수행하였다.

그림 7 은 광축에 대하여 α만큼 회전되어 있는 밀변 각이 A 인 프리즘에 회절각 θ를 가지고 빛이 입사하였을 경우 빛의 경로 변화를 나타낸다. 프리즘의 회전각(tilting angle)에 의하여 프리즘에 대한 입사각은 아래의 식으로 주어진다.

$$i_1 = \theta + A - \alpha \quad (6)$$

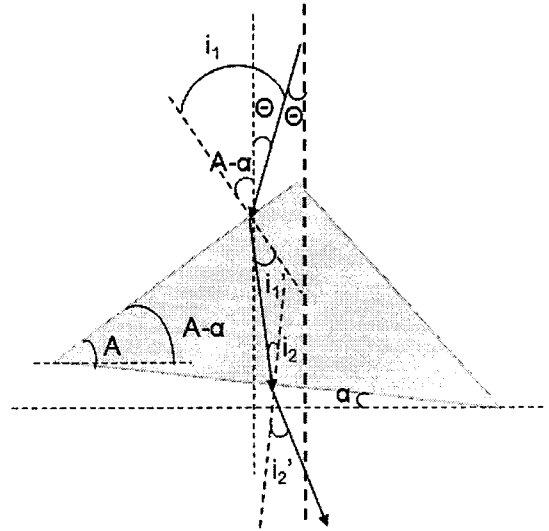


Fig. 7 Geometrical analysis of the prism with tilting angle

그림 7 에서 프리즘의 회전각 α를 고려하여 프리즘으로부터 출사되는 최종 굴절각을 구하면 아래와 같다.

$$i_2' = \sin^{-1} \left[n \sin \left(A - \sin^{-1} \left\{ \frac{1}{n} \sin(\theta + A - \alpha) \right\} \right) \right] \quad (7)$$

식 (7)로부터 프리즘의 밀변 각이 고정되어 있을 때 프리즘을 얼마나 회전시키느냐에 따라서 최종 굴절각이 달라지는 것을 확인할 수 있다. 따라서 프리즘의 회전각을 적절히 조절하면 음향광학 변조필터를 통과한 회절광의 각 분산(angle deviation)을 보상할 수 있는 것이다.

4.2 실험결과

473.7950nm ~ 614.7230nm 의 파장 대역을 갖는 광원을 사용한다고 하였을 때, 결국 가장 짧은 파장인 473.7950nm 의 빛과 가장 긴 파장인 614.7230nm 의 빛이 프리즘을 통과한 후 광축에 대하여 갖는 각이 서로 일치할 경우 CCD 에서의 이미지 이동 현상은 최소가 될 것이라고 예상하였다. 회절각 측정 실험 결과로부터 정상파의 경우 473.7950nm 의 빛은 6.5734° 의 회절각(θ)을, 614.7230nm 의 빛은 6.0206° 의 회절각을 갖는다. 또한 실험에서 사용할 BK7 의 굴절률과 파장 관

계를 이용하면 473.7950nm 의 빛은 1.5234 의 굴절률(n')을, 614.7230nm 의 빛은 1.5157 의 굴절률을 가진다.¹⁰ 이러한 값들을 식 (7)에 대입하여 계산하면 프리즘의 회전각 변화에 따른 두 파장에 대한 최종 굴절각(i_2')을 획득할 수 있으며 두 각의 편차 또한 구할 수 있다.

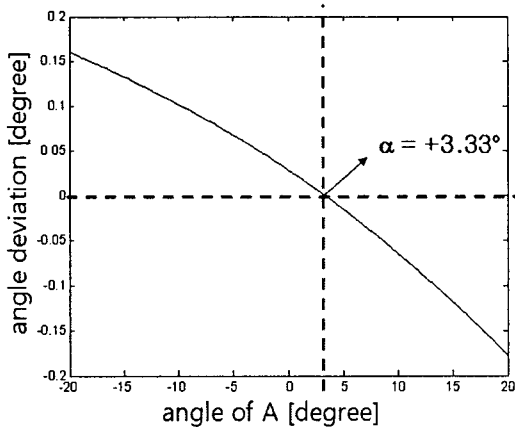


Fig. 8 Simulation result of angle deviation according to the prism tilting angle

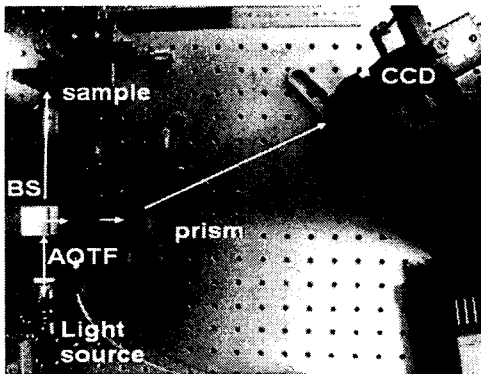


Fig. 9 Experimental setup with the proposed prism compensation

그림 8 은 밀변의 각이 45° 인 BK7 프리즘에 대하여, 프리즘의 회전각도 변화에 따른 473.7950nm 빛과 614.7230nm 빛의 회절각 편차를 나타낸다. 회전각도의 변화에 따라 두 빛의 회절각 편차가 변하는 것을 알 수 있으며, 회전각도가 약 +3.330° 일 때 회절각 편차가 0 이 되는 것을 알

수 있다.

시뮬레이션 결과와 실제 실험 결과를 비교하기 위하여 그림 9 와 같은 광학 시스템을 구성하였다. 음향광학변조필터 뒤 부분에 밀변 각이 45° 인 BK7 프리즘을 위치시켰는데, 프리즘은 회전 스테이지(rotating stage)에 고정되어 있어서 미세한 회전이 가능하도록 구성되었다. 특정 표식이 있는 시편을 위치시킨 후 프리즘을 미세하게 회전시켜 가면서 이미지가 이동 되는 정도를 관찰해 보았다.

그 결과 프리즘의 회전각도가 약 +3.200° 에서 이미지의 이동이 최소화되는 것을 확인할 수 있었으며, 이는 시뮬레이션에서 최적의 회전각도였던 +3.3300° 와 거의 유사한 값이다. 두 경우에 있어서 회전 각도의 값이 약간 다르게 나타난 것은 프리즘의 정렬 과정에서 음향광학변조필터의 광축과 프리즘이 장착되어 있는 회전 스테이지의 0 점 축이 정확히 일치하지 않을 때 발생하는 오차, 시뮬레이션에서 BK7 의 파장별 굴절률을 구하기 위하여 2 차원 피팅을 하는 과정에서 발생하는 오차, 파장별 회절각의 오차, 사용한 프리즘의 설계 오차 및 구성요소의 불균질에 의해 발생하는 오차 등에 원인이 있을 것이다. 하지만 이는 앞서 언급 하였듯이 매우 작은 값이며, 따라서 실험에 앞서 실시하였던 모델링 과정과 시뮬레이션 과정이 매우 합당하였음을 알 수 있다.

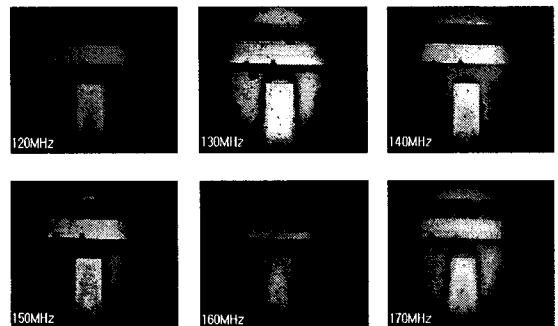


Fig. 10 Compensated images on CCD with prism system

음향광학변조필터에 인가되는 주파수가 120MHz 에서 170MHz 로 변하는 동안(사용되는 빛의 파장이 473.7950nm 에서 614.7230nm 로 변하는 동안) 전 대역의 인가 주파수에 대하여 CCD 상에서 이미지가 약 3 픽셀만이 이동하는 것을 확인하

였다. 이는 프리즘을 사용하지 않은 시스템에서 약 244 픽셀 이동하였던 것과 비교할 때 굉장히 향상된 결과라고 할 수 있다. 그림 10 은 일정한 패턴 위에 SiO₂ 박막이 도포되어 있는 시편에 대하여 이미지를 획득한 결과이다. 그림에서 알 수 있듯이 인가 주파수가 변하더라도 CCD 상에서 이미지 이동 현상이 거의 발생하지 않는 것을 알 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 음향광학변조필터를 사용할 시 발생하는 이미지 이동 현상을 보상하기 위하여 프리즘을 이용하는 방법을 사용하였다. 실험에서 획득한 결과와 같이 프리즘을 적절히 설계하면 정상파의 회절각 변화 현상을 효과적으로 보상할 수 있다는 것을 확인하였다. 또한 이론적인 계산을 통한 시뮬레이션 결과와 실제 실험 결과가 상당히 일치하는 것을 알 수 있었다. 정상파와 비정상파가 거의 비슷한 회절각 변화를 나타내며 프리즘 내에서 비정상파의 경로 변화가 정상파의 경우와 일치하므로 비정상파에 대해서도 위에서 유도한 식을 이용하여 회절각 변화 현상을 최소화할 수 있는 최적의 밀변 각을 유추할 수 있다. 따라서 논문에서 제시한 방법과 같이 특정 밀변 각을 가지는 프리즘 시스템을 설계한 후 이를 음향광학변조필터 뒤 부분에 광축과 대칭적으로 위치시키면 음향광학변조필터를 통과한 정상파와 비정상파의 이미지 이동 현상을 한 번에 보상할 수 있을 것이다.

후 기

이 논문은 2007 년도 2 단계 두뇌한국(BK)21 사업에 의하여 지원되었음.

참고문헌

1. Kim, D. S. and Kim, S. H., "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. Georgiev, G., Glenar, D. A. and Hillman, J. J., "Spectral characterization of acousto-optic filters used in imaging spectroscopy," Applied Optics, Vol. 41, Issue 1, pp. 209-217, 2002.
4. Gass, P. A. and Sambles, J. R., "Accurate design of a noncollinear acousto-optic tunable filter," Optics Letters, Vol. 16, Issue 6, pp. 429-431, 1991.
5. Xue, B., Xu, K. and Yamamoto, H., "Discussion to the equivalent point realized by the two polarized beams in AOTF system," Optics Express, Vol. 4, Issue 3, pp. 139-146, 1999.
6. Yano, T. and Watanabe, A., "Acoustooptic TeO₂ tunable filter using far-off-axis anisotropic Bragg diffraction," Applied Optics, Vol. 15, Issue 9, pp. 2250-2258, 1976.
7. Wachman, E. S., Niu, W. H. and Farkas, D. L., "AOTF microscope for imaging with increased speed and spectral versatility," Biophysical Journal, Vol. 73, Issue 3, pp. 1215-1222, 1997.
8. Glenar, D. A., Hillman, J. J., Saif, B. and Bergstrahl, J., "Acousto-optic imaging spectro- polarimetry for remote sensing," Applied Optics, Vol. 33, Issue 31, pp. 7412-7424, 1994.
9. Hecht, E., "OPTICS," Addison Wesley, pp. 187-188, 2002.
10. http://www.escoproducts.com/html/bk-7_optical_glass.html