

## 위상 이미지 상관기법을 이용한 시준거울의 자동정렬

김현석<sup>1</sup> · D. Tserendolgor<sup>1</sup> · 김대석<sup>1†</sup> · 이형철<sup>2</sup> · 김수현<sup>2</sup>

<sup>1</sup>전북대학교 기계시스템공학부

☎ 561-756 전라북도 전주시 덕진구 덕진동1가 664-14

<sup>2</sup>한국과학기술원 기계공학과

☎ 305-701 대전 유성구 구성동 373-1

(2010년 9월 20일 받음, 2011년 1월 14일 수정본 받음, 2011년 1월 17일 게재 확정)

본 연구에서는 현재 대부분 작업자에 의해 수동으로 이루어지고 있는 단색화장치 내 광학 요소간 광학정렬을 높은 반복도와 고속으로 수행할 수 있는 자동화 방안에 대해 논의하고자 한다. 단색 분광기의 시준거울 자동정렬을 위해 CCD센서를 이용한 위상이미지 상관기법을 핵심기술로 사용하였다. 실험결과 약 10초 내에 시준거울을 정밀하게 자동정렬 할 수 있다.

## Automatic Alignment of a Collimating Mirror by Using Phase Image Correlation

Hyunsuk Kim<sup>1</sup>, D. Tserendolgor<sup>1</sup>, Daesuk Kim<sup>1†</sup>, Hyungchul Lee<sup>2</sup>, and Soohyun Kim<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Division of Mechanical System Engineering, Chonbuk National University,*

*664-14 1 Ga, Duckjin-dong, Duckjin-gu, Jeonju 561-756, Korea*

<sup>2</sup>*Department of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology,*

*373-1 Guseong-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-701, Korea*

(Received September 20, 2010; Revised manuscript January 14, 2011; Accepted January 17, 2011)

A novel alignment method that can be used for aligning the collimating mirror employed in a monochromator is described. In most of the spectrometer industry, the alignment of optical components such as a focusing mirror, a grating and a collimating mirror has been performed manually so far. In this paper, we use a matched filter based image correlation technique for measuring the accurate image position which is used for aligning the collimating mirror. The experimental results show that with the proposed scheme automatic alignment can be completed within 10 seconds.

Keywords: Matched filter algorithm, Correlation, Collimating mirror, Monochromator, Alignment

OCIS codes: (120.4140) Monochromators; (070.5010) Pattern recognition; (120.6200) Spectrometer and spectroscopic instrumentation; (220.1140) Alignment

### I. 서 론

분광광도계(spectrophotometer)는 빛의 파장 별 물질에 따른 흡광(absorption) 및 투과도(transmittance)의 차이를 측정하여 시료의 물성치를 분석하는 계측기기이다. 그 적용 분야로 생화학 물질 분석, 환경 분야에서의 오염 물질 분석, 의학·생물 분야에서의 시료 분석 및 다양한 생산 라인의 물질 분석 등을 예로 들 수 있다. 분광광도계 내 회절격자(grating) 기반의 단색화장치(monochromator)는 분광성능을 좌우하는 핵심 부분으로 고 분해능을 구현할 수 있다는 장점을 가지며

다양한 분광관련 시스템에 널리 사용되어 왔다.<sup>[1]</sup> 단색화장치는 일반적으로 입력 slit, 출구 slit, 회절격자, 두 개의 오목 반사경(concave mirror)으로 구성되어 있으며 각 요소 간의 정렬에 따라 분광 성능이 좌우된다. 현재 단색화장치 내 광학 요소간의 정렬은 회절격자에서 Laser에 의해 반사된 회절 무늬 또는 회절 차수(order)를 출구 slit에서 검출하는 방법<sup>[2, 3]</sup> 등이 있으나 실질적인 자동정렬 시스템 구현의 어려움으로 현재까지의 대부분의 광학계 정렬은 작업자에 의해 수동으로 이루어져 왔다. 이러한 이유로 생산라인에서의 생산 속도 저하문제와 작업자 숙련도에 따른 분광성능 편차 발생문제

<sup>†</sup>E-mail: dashi.kim@jbnu.ac.kr

는 분광광도계 산업의 근본적 난점으로 인식되어 왔다.

본 연구에서는 생산속도 및 분광성능에 대한 반복도를 개선하기 위해 새로운 자동정렬 방안을 제안하고자 한다. 본 연구에서 제안된 자동정렬 방법은 단색화장치 상부에 독립적으로 간단히 설치되는 CCD이미징 시스템으로 얻은 영상으로 매우 정밀한 정렬이 가능한 위상 이미지 상관기법에 기반하고 있다.<sup>[4, 5]</sup> 본 연구에서 제안된 방법은 기존 방식의 난해성을 극복한 단순화된 방법으로 실제 생산라인에서 쉽게 적용될 수 있는 장점을 갖는다. 본 연구에서 두 개의 반사경은 회절격자에 대해 대칭으로 가정되며 반사경 중 시준 거울(collimating mirror)의 기하학적 정렬 과정만을 논하도록 한다.

## II. 시준거울의 자동정렬 장치

### 2.1. Czerny-tuner type 단색화장치 및 반사경의 정렬

Czerny-tuner type 단색화 장치는 Fig. 1(a)와 같이 회절격자, 두 개의 반사경과 입구 및 출구 슬릿으로 구성되어 있으며 회절 격자에서의 분광은 아래와 같이 식 (1)로 표현 된다.

$$m\lambda = 2a\cos\theta \quad (1)$$

위 식 (1)에서  $m$ 은 차수,  $\lambda$ 는 파장이고  $a$ 는 회절격자의 격자 폭,  $\theta$ 는 Fig. 1(b)에서 정의되었듯이 단색화장치의 상대칭선과 회절격자의 회전 시 회절격자면에 수직인 법선벡터가 이루는 각도이며,  $\alpha$ 는 두 반사경과 회절격자 사이의 0차

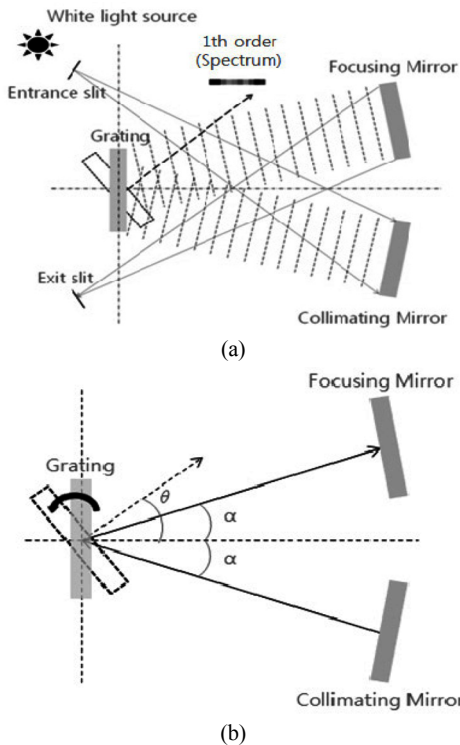


FIG. 1. (a) Schematic of the used monochromator and (b) definition of the grating rotation angle  $\theta$ .

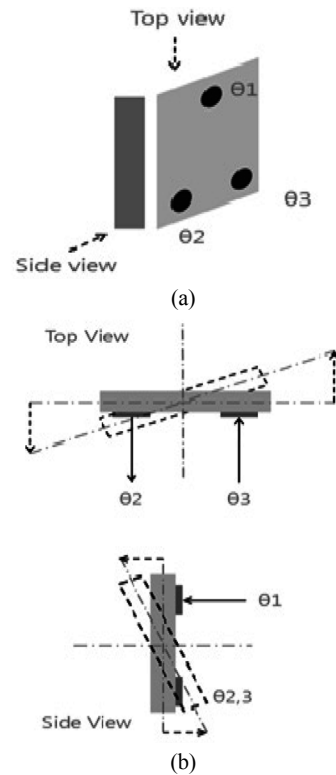


FIG. 2. Schematics of the adjustment screws: (a) back side view of the collimating mirror mount and (b) top and side views after adjusting by using adjustment screws.

광의 입사각 및 반사각이다. Fig. 1(b)에서  $2\alpha$ 는 차수  $m$ 이 0인 조건으로 회절격자에 입사되는 빛은 거울 반사<sup>[1]</sup>가 되며 이때의 상은 회절격자 평면과 동일한 크기 및 모양을 가진다. 이는 각 요소에서 반사되는 백색광이 출구의 중심으로 향하도록 회절격자에 대해 대칭성을 가지는 것을 의미하며 위 조건에서 반사경의 정렬이 이루어져야 한다.

두 개의 반사경은 빛을 회절격자에 평행하게 입사시키는 시준 거울과 출구 슬릿에 모아주는 초점 거울(focusing mirror)이 있으며 각각의 정렬을 위해 반사경의 후면에 그 중심으로부터 3개의 조절나사가  $120^\circ$ 의 간격으로 Fig. 2(a)와 같이 배치되어 있다. 반사상의 입사 평면에 대한 직교 이동은 Fig. 2(b)와 같이 이상적으로  $x$ 는 중심으로부터 두 개의 나사가 서로 반대방향 조건하에  $\pm\theta_2$  및  $\pm\theta_3$ 으로,  $y$ 는  $\pm\theta_1$ 로 조절 가능하다.

### 2.2. 자동정렬 시스템의 구성

본 연구에서는 현재 사람의 눈으로 인식하고 있는 단색화장치 각 요소에서의 상 획득에 CCD를 사용하였다. 단색화장치에서 정렬에 사용되는 상의 크기는 일반적으로 약  $35\text{ mm} \times 35\text{ mm}$ 이나 CCD센서의 크기는 약  $8\text{ mm} \times 6\text{ mm}$ 이다. 이와 같이 상과 CCD의 상대적 크기차이가 있으므로 축소 광학계를 구성해야 하나 단색화 장치 내부의 협소함과 각 요소에서의 반사상 및 기계간의 간섭으로 내부에 CCD를 포함한 축소광학계를 설치하기에는 어려움이 따른다. 따라서 Fig.

3(b)와 같이 제안된 광학계는 단색화장치 내 광 경로의 수직인 상부 CCD로 반사상을 입사시키는 방안이다. 제안된 축소 광학계는 빔 분리기(Beam splitter), 역으로 설치된 빔 확장기(Beam expander), ND필터(Neutral density filter), CCD로 구성되어 있으며 단색화장치 내에 Fig. 3(a)의 위치에 설치된다. 회절격자와 비슷한 크기로 선정된 빔 분리기는 상을 수직으로 올려 상부로 나갈 수 있도록 하며 빔 축소기와 ND필터를 통과하여 이미지의 크기 및 세기가 조절된 후 CCD영역 내에 입사된다.

제안된 광학계에 의한 상의 축소 비율은 약 1:5 이고 ND필터는 N.D 2.0, CCD는 768 × 494 픽셀로 1 픽셀에 11 μm × 13 μm의 크기이며 빔 분리기는 35 mm × 35 mm이다. 제안된 시준거울의 3축 구동계는 Fig. 3(c)에 나타내었으며, 반사경 후면의 조절나사 홈과 모터 축을 축이음 하였고 각 3개 모터를 잡아주는 Mount, Mount 전체의 수직 높이조절을 위

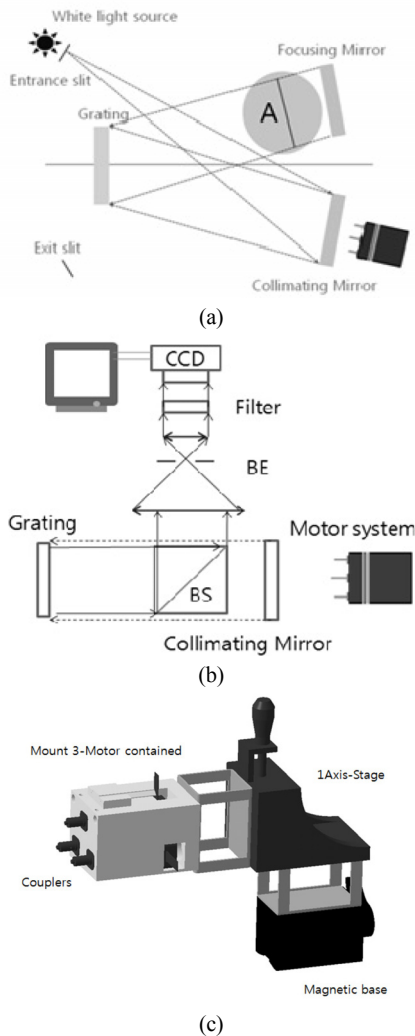


FIG. 3. Proposed automatic alignment system: (a)upper view and (b)side view of the monochromator installed with the alignment system represented by A, and (c)3D drawing of the actuating sub-system for aligning the collimating mirror.

한 Stage와 구동계 전체를 지지하는 Magnetic base로 구성된다. 반사경 후면의 조절 나사는 1회전 피치(pitch) 및 리드(lead)가 0.5 mm로 동일하며 축소광학계에 사용된 렌즈의 초점 거리(focal length)에 따라 입사 평면에서 반사된 상의 x 혹은 y로의 이동 분해능이 결정된다. 3개의 조절나사는 3개의 모터로 Fig. 2(b)와 같이 직교 이동을 위해 제어되고 사용된 모터는 Maxon사의DC motor, Gear head, Incremental encoder의 combination model로 기어비 및 엔코더 분해능은 모두 256:1로, 조절 나사의1회전(360°)에 262,144qc(quadrature counter)이며 2000qc(0.18°)에 따른 최소 회전 분해능을 가진다. 시준 거울에 대한 모터 제어와 회절격자에서 반사된 상은 시뮬레이션 결과에 따라 x, y의 이동에 대해 선형 관계에 있음을 확인하였다.

모터의 최소 회전 분해능(0.18°)에 의해 조절나사가 제어되고, 이에 반사된 상은 회절격자 평면에서 x축으로 14 μm, y축으로 29.3 μm의 평면 분해능을 가진다. 또한 광학계와 빔 분리기의 축소율이 고려되어 계산될 시, CCD 1 pixel 당 빔 분리기에서 x축으로 약 45 μm, y축으로 약 70 μm의 평면 분해능을 가진다. 이는 모터의 분해능이 광학계의 측정 분해능보다 좋으므로 이상적으로 최대 1 pixel 범위로 상의 평면 이동이 측정 될 수 있음을 보여준다.

### III. 시준 거울 정렬을 위한 위상 이미지 상관법

상의 위치 인식은 matched filter algorithm에 근거한 위상 이미지 상관 기법에 의해 이루어진다. 아날로그 광 정보처리 영역에 근거한 matched filter algorithm의 표현 식은 아래와 같다.<sup>[4-9]</sup>

$$C(x,y) = | F^{-1} \{ F[u_i^T(x,y)] \times F^* [u_i^R(x,y)] \} |^2 \quad (2)$$

위 식 (2)에서  $F$ 와  $F^{-1}$ 은 각각 푸리에 변환(Fourier Transform)과 역 푸리에 변환(Inverse Fourier Transform)을 의미하며  $F^*$ 는  $F$ 에 대한 쥘레(conjugate) 복소수를 의미한다. 또한  $u_i^R(x,y)$ 는 기준(reference)영상이고  $u_i^T(x,y)$ 는 입력(target) 영상을 나타낸다.

Fig. 4는 matched filter algorithm을 아날로그 광학계에 적용한 도식도이다. Matched Filter가 특정 정보  $u_i^R(x,y)$ 를 기준(reference)으로 가질 때 새로운 입력(target),  $u_i^T(x,y)$ 가 이와 동일한 정보를 갖는다면 matched filter의 후면에서는 평면파(plane wave)가 발생한다. 입력-L1-Matched filter, Matched filter-L2-출력 사이 공간에서는 푸리에 변환과 그의 역 변환이 일어나며 matched filter평면의 각 점에선 두 정보 사이의 정합(matching)이 이루어 진다. 여기서 L1 및 L2는 푸리에 변환렌즈로서의 기능을 갖는다.

반대로  $u_i^R(x,y)$ 와 정합되는  $u_i^T(x,y)$ 의 중심이 서로 다르다면 출력 평면의 중심은  $u_i^T(x,y)$ 와 정합되는 위치에 따라 이동(shifting)된다. 또한 정합되는 위치에서 중심점은 Intensity 분포의 peak로 나타난다. 위 원리를 적용하면 식 (1)의 2a 조

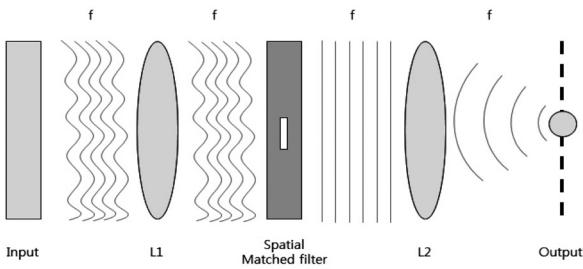


FIG. 4. A schematic of 4-f optical system for implementing the matched filter algorithm ( $f$  : focal length of lenses L1 and L2).

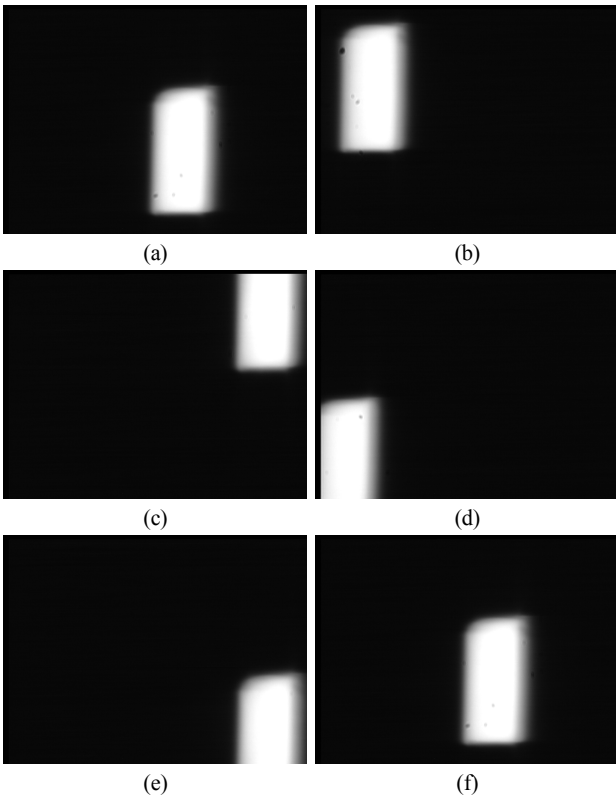


FIG. 5. Acquired CCD images: (a) reference image used for generating the matched filter, (b) ~ (e) target images in case of not aligned states, and (f) the aligned final image.

긴 하 시준 거울에 대한 회절격자의 반사상은 정렬이 잘 되었다는 기준 영상으로서 활용된다. 또한  $C(x,y)$ 가 특정한 값을 가진다는 것은 기준에 대해 이동되어 있음을 의미하므로 이것으로부터 정렬 근거 값을 알아낼 수 있다.

실험에서 Fig. 5(a)는 최적으로 광학계 정렬이 이루어졌을 때 획득 후 저장되어 있던 기준(reference) 영상으로  $u_i^R(x,y)$ 가 되고, (b)~(f)는 CCD에서 새롭게 획득된 입력(target) 영상으로  $u_i^T(x,y)$ 이다. 본 연구에서 사용된 matched filter 알고리즘은 아날로그 광학계에 의한 matched filter가 아닌 디지털로 구현된 digital matched filter 알고리즘에 해당되며, CCD에 맺히는 영상(Amplitude 정보)을 위상정보로 변환하여 matched filter 알고리즘을 적용하였기 때문에 보다 민감한 위치 변화

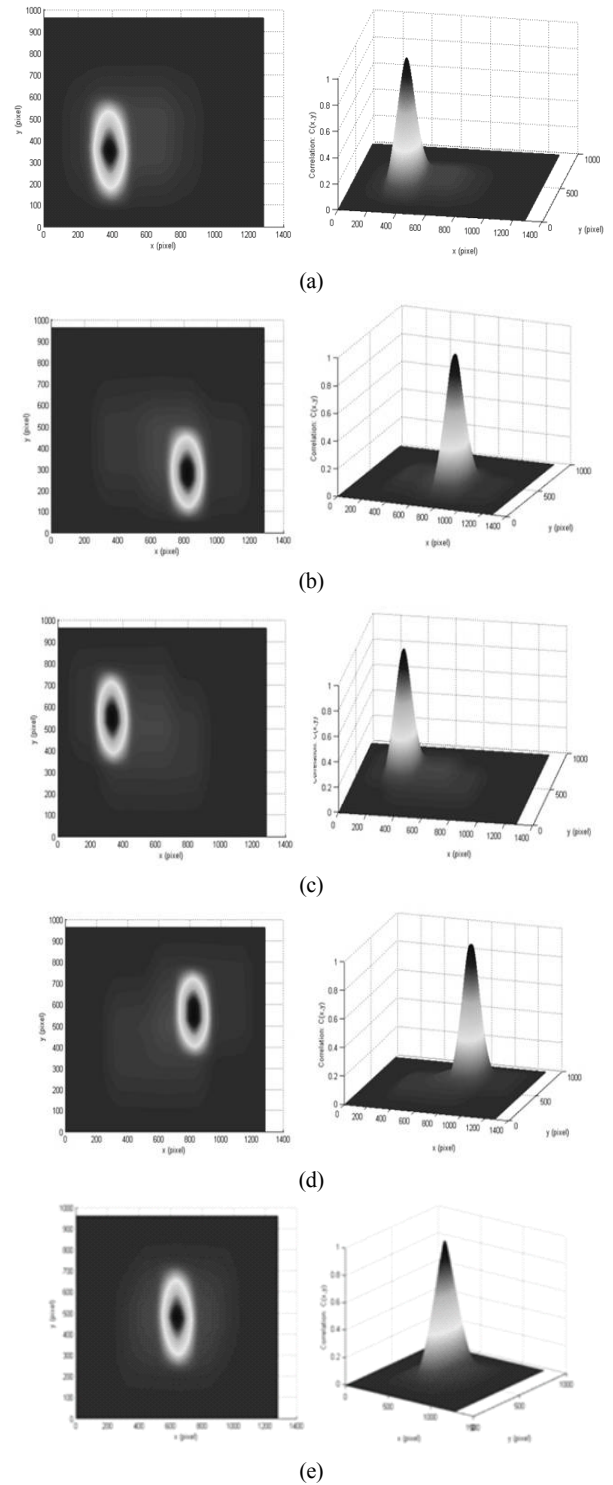


FIG. 6. Cross-correlation results: (a)between Fig. 5(a) and 5(b), (b)between Fig. 5(a) and 5(c), (c)between Fig. 5(a) and 5(d), (d)between Fig. 5(a) and 5(e) and (e)between Fig. 5(a) and 5(f).

인식이 가능하다.<sup>[5]</sup> CCD에서 획득되는 영상정보를 실제 복소수로 표현되는  $u_i^R(x,y)$ 과  $u_i^T(x,y)$ 의 위상 term에 사용하여 correlation 그래프를 얻었다. Fig. 5의 (a)와 (b)~(f)에 대한 위상 이미지 상관 분석의 결과는 Fig. 6 (a)~(e)와 같다.

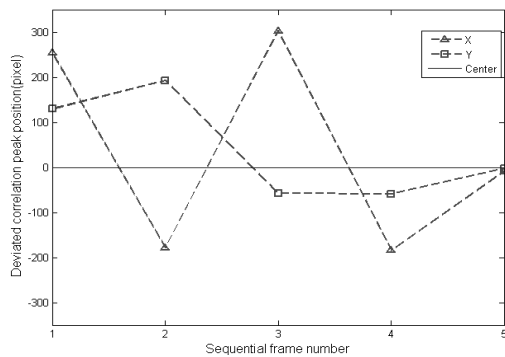


FIG. 7. Correlation peak coordinate variation as the alignment process performed.

Fig. 6(a)는 상호 상관(cross-correlation)의 결과로 초기 정렬 시 Fig. 5(a)의  $u_i^R(x,y)$ 에 대한 Fig. 5(b)의  $u_i^T(x,y)$ 로 분석 결과이며 최대가 중심에서 좌측 상단으로 벗어나 있음을 알 수 있다. 위의 결과로서 측정된  $C(x,y)$ 는 영상 평면 중심에 근거하여 방향성을 가지므로 분석 후  $x$ 는 서로 대칭되는 부호  $\pm 0_2$  및  $\pm 0_3$ ,  $y$ 는  $\pm 0_1$ 에 대한 모터 회전 수 및 방향( $ccw$ ,  $ccw$ )을 포함한 값으로 출력된다. 같은 방식으로 Fig. 6(b) ~ 6(e)와 같이 상관된 최대값의 중심이 반복 분석되어 영상평면 중심에 점차 근접하게 되며, Fig. 5(a)와 Fig. 5(f)의 두 위상 term에 대한 상호 상관에서 peak가 center에 위치하여 Fig. 6(e)와 같은 최종 cross correlation 결과가 얻어진다. Fig. 7은 기준 영상에 서서히 근접해 가는 correlation peak값의  $x$ ,  $y$  좌표가 정 중심에서 얼만큼  $x$ ,  $y$ 축으로 벗어나 있는지를 정량적으로 표시한 그래프이다. Fig. 7에서 볼 수 있듯이, 초점 거울로 향하는 Zeros order의 중심은  $x$  및  $y$ 에서 약  $\pm 5$  pixel 의 오차를 가진다.

본 연구를 통해 초정밀 광학계측 분야 중의 하나인 단색화장치의 정렬 환경에서 백색광의 반사상 인식에 matched filter 알고리즘에 기반한 위상 이미지 상관기법의 적용가능성을 확인해볼 수 있었다. 기존의 수작업방식에서 발생할 수 있는 약 수백  $\mu m$  수준의 정렬 편차에 비해, 본 연구에서 제안된 방법을 통해  $\pm 5$  pixel(100  $\mu m$  이하)의 편차로 개선할 수 있었다. 향후, Motor 정지 시 발생하는 진동의 원인을 저속 구동으로 개선한다면 보다 높은 정밀도를 가질 수 있을 것으로 판단된다. 또한 획득된 영상에서 보여지듯이 Background와 Zeros order의 상이 명확히 구분되며 중심의 Peak만을 확인하므로 분산의 영향은 거의 무시될 수 있다.

#### IV. 결 론

본 연구에서는 기준 정렬과정을 자동화하기 위해 두 이미지의 인식에 디지털화된 matched filter algorithm에 기반한 위상 이미지 상관 기법을 적용하여 시준 거울을 자동 정렬하였다. 결과를 요약하면, 위상 이미지 상관 기법에 의한 두 이미지의 인식은  $\pm 5$  pixel의 위치 오차로 회절격자 평면에서 최대 가로 11  $\mu m$ , 세로 13  $\mu m$ 의 정밀도를 가지며 정렬을 1회

과정으로 볼 때, 5-6회 반복으로 약 12초 이내의 시간에 정렬이 완료된다. Matched filter algorithm이 적용된 위상 이미지 상관기법의 시준거울 자동정렬 방법은 다음과 같은 장점을 가진다.

- (1) Amplitude정보인 영상 정보를 위상정보로 변환하여 디지털 matched filter 알고리즘을 적용하기 때문에 보다 sharp한 peak그래프를 얻을 수 있어  $\pm 5$  pixel(100  $\mu m$  이하)의 정밀 정렬이 가능하며 중심의 위치만 고려되므로 영상의 contrast에 의한 영향은 거의 무시될 수 있다.
- (2) 완성된 단색화장치 내부 구성 부품 등의 추가나 제거 등의 변경 없이 제안된 광학계를 적용하여 단순한 과정으로 정밀 정렬이 가능하며 수작업자에 의해 발생되어 왔던 반복 정렬작업에 의한 편차가 100  $\mu m$  이내로 개선될 수 있다.

#### 감사의 글

This work was supported by the National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korean government(MEST) (2010-0016064).

부족한 실력임에도 끈기 있게 지도를 해주시고 많은 조언을 주신 메카시스의 장해섭 팀장님 이하 프로젝트 팀원들과, 진행을 도와주고 다양한 아이디어를 내준 실험실의 박선도, 박경동, 김정훈, 유창완에게 감사를 표합니다.

#### References

1. D. S. Kim, K. B. Choi, S. H. Kim, and Y. K. Kwak, "A study on precision drive mechanism for monochromator grating," Korean Society for Precision Engineering **14**, 42-46 (1997).
2. M. A. Sainz and D. M. Coleman, "Experiment alignment of a spectrometer system using laser diffraction," Applied Spectroscopy **35**, 564-567 (1981).
3. K. L. Tsang, "Monochromator alignment technique," IEEE **63**, 1293-1295 (1992).
4. J. W. Goodman, *Introduction to Fourier Optics* (Mcgraw-hill Company Inc., Singapore, 1996).
5. H. Lee, D. Kim, and S. Kim, "A simple and quantitative alignment procedure between solid state cameras," Opt. Express **17**, 23947-23952 (2009).
6. G. L. Turin, An Introduction to Matched Filters, IRE Trans. Info. Theory, IT-6:311 (1960).
7. J. R. Homer and J. R. Leger, "Pattern recognition with binary phase-only filters," Appl. Opt. **24**, 609-611 (1985).
8. E. Hecht, *Optics*, 2nd ed. (Addison-Wesley, Inc., Massachusetts, USA, 1987).
9. R. C. Gonzalez and R. E. Woods, *Digital Image Processing*, 2nd ed. (Green Publishing Company, Seoul, Korea, 2003).