

## 칼날 주사방식을 이용한 중적외선 렌즈의 변조전달함수 측정 장치

송세용<sup>1,2</sup> · 조재흥<sup>1†</sup> · 홍성목<sup>2</sup> · 이회윤<sup>2</sup> · 이윤우<sup>2</sup>

<sup>1</sup>한남대학교 광·전자물리학과  
Ⓞ 306-791 대전광역시 대덕구 오정동 133번지

<sup>2</sup>한국표준과학연구원 우주광학센터  
Ⓞ 305-340 대전광역시 유성구 도룡동 1번지

(2011년 1월 13일 받음, 2011년 2월 7일 수정본 받음, 2011년 2월 16일 게재 확정)

중적외선 결상용 실리콘 렌즈의 변조전달함수(MTF)를 칼날 주사방식으로 측정하는 적외선 MTF 측정장치를 구성하였다. 이를 위하여 반달형 칼날 물체를 사용하여 초점거리 50 mm, F/4인 실리콘 렌즈에 대한 중적외선 파장대인 3 ~ 5 μm에서의 축상 자오 방향에 대한 MTF를 측정하였다. 이 때 무한 물체를 만들기 위해서 초점거리가 2.545 m인 비축 포물 반사경을 사용하였다. 측정한 MTF는 렌즈의 설계 자료로부터 구한 MTF와 비교한 결과, 7 lp/mm 이하에서 2 % 이내의 MTF 허용오차를 만족하고 있음을 알 수 있었다.

## Modulation Transfer Function System for a Mid-infrared Lens by Knife-edge Scanning Technique

Se Yong Song<sup>1,2</sup>, Jae Heung Jo<sup>1†</sup>, Sung Mok Hong<sup>2</sup>, Hoi Youn Lee<sup>2</sup>, and Yun-Woo Lee<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Applied Optics and Electromagnetics, Hannam University  
133 Ojung-dong, Daedeok-gu, Daejeon 306-791, Korea

<sup>2</sup>Center for Space Optics, Korea Research Institute of Standards and Science  
Daejeon 305-340, Korea

(Received January 13, 2011; Revised manuscript February 7, 2011; Accepted February 16, 2011)

We fabricate a measuring system to measure the modulation transfer function (MTF) of a mid-infrared imaging silicon lens by using the knife-edge scanning technique. In particular, we measure on-axial tangential MTF of the silicon lens with the focal length of 50 mm and F-number F/4 in the wavelength band of mid-infrared between 3 μm and 5 μm. In order to obtain the infinite object, the off-axial parabolic reflector with the focal length of 2.545 m is utilized. In the comparison with measured MTF data and designed MTF values curve, we find that the tolerance of measured MTF data below the spatial frequency of 7 lp/mm is within 2%.

Keywords: Modulation transfer function, Edge spread function, Mid-infrared lens, Infrared MTF system

OCIS codes: (110.4850) Optical transfer functions; (120.4570) Optical design and instruments; (220.4840) Testing

### I. 서 론

카메라나 망원경 등의 일반 결상용 광학기기 뿐만 아니라, 야시경과 같은 적외선 결상기기나 수중이나 항공기에서 사용되는 첨단 결상용 광학기기들은 상이 얼마나 선명하게 잘 맺히는지를 나타내는 결상성능을 평가하는 것이 매우 중요

하다.<sup>[1]</sup> 일반적으로 렌즈의 총체적 결상능력은 공간주파수 영역대에서 정량적으로 분석해주는 복소함수인 광전달함수(optical transfer function; OTF)의 진폭을 나타내는 변조전달함수(modulation transfer function; MTF)로 측정하는데, 대략적으로 20가지 이상의 MTF 측정법이 발표되었다.<sup>[2-4]</sup>

이 중에서 현재까지 많이 사용되고 있는 방법으로는 간섭

†E-mail: jhjo@hnu.kr

Color versions of one or more of the figures in this paper are available online.

계를 이용하는 간접계 방식과 광학계에 의해 맺혀진 상을 주사하는 주사방식이 널리 사용되고 있다.<sup>[5]</sup> 특히 상을 주사하는 주사방식으로는 직접주사방식(direct scanning method)과 간접주사방식(indirect scanning method)으로 크게 나뉘어져 있다. 직접주사방식은 여러 가지 공간주파수를 가지는 주기적인 격자의 상을 슬릿에 의해 주사하여 상의 변조값을 물체의 변조값으로 나눠서 MTF를 얻는 방법이다.<sup>[6]</sup> 이 방법은 비교적 측정 시간이 짧은 것이 장점이지만, 정확도가 낮고 측정할 수 있는 공간주파수가 한정되는 것이 단점이다. 이에 반하여 간접주사방식은 핀홀이나 슬릿의 상을 슬릿, 칼날, 혹은 CCD(charge coupled device) 영상검출기나 CMOS (complementary metal oxide semiconductor) 영상검출기에 의해 주사한 후, 이를 푸리에 변환하여 MTF를 얻는 방법이다. 이 방법은 직접주사방식보다 상대적으로 측정시간이 많이 걸리고 측정 장치가 복잡하지만 측정결과가 정확하기 때문에 정밀한 결상계에 대한 MTF는 간접주사방식의 MTF 측정 방법을 사용한다.<sup>[7-9]</sup>

적외선 렌즈는 보통 열영상을 결상하기 때문에 열상의 공간분해능이 낮아 MTF가 중요하지 않지만, 인공위성에 설치하는 적외선 우주망원경이나 지상용 열영상 장비에서는 영상의 공간분해능이 중요한 요소가 되기 때문에 MTF 측정이 중요해 진다.<sup>[10-12]</sup> 특히 우주망원경에서는 대기문제로 인하여 투과율이 높은 중적외선 영역(파장 3~5 μm)이 사용되는데, 이 파장대에서의 적외선 결상을 위해서는 중적외선 영역대에서의 적외선 렌즈에 대한 MTF 측정 기술이 필요하다.

본 논문에서는 국내에서 최초로 적외선 우주망원경에 사용할 중적외선 결상계에 대한 성능평가의 전 단계로서 중적외선용 실리콘 렌즈에 대한 MTF 측정장치를 제안하고 이를 구성하여 MTF를 측정해 보고자 한다. 또한 중적외선의 MTF 측정장치의 분석을 위하여 중적외선 영역에서 광축에 대한 렌즈의 설계 자료로부터 구한 MTF와 측정 장치로부터 구한 MTF를 상호 비교해 보고자 한다.

## II. 주사방식 MTF 이론

광학계에 의해 맺혀진 상을 주사하는 방법인 간접주사방법은 측정시간이 낮은 단점이 있으나 측정장치의 제작이 비교적 쉽고, 변조전달함수(MTF) 및 위상전달함수(phase transfer function; PTF)를 동시에 측정할 수 있으며, 측정 정밀도가 높아서 많이 사용되고 있다.<sup>[1]</sup>

물체로 매우 좁은 슬릿을 사용할 경우 가우스 상의 강도분포함수  $i_g(x_o, y_o)$ 의 분포는 OTF를 측정하고자 하는 파장에 비해 매우 좁게 되어 1차원적인 선물체로 근사할 수 있게 된다. 따라서 점퍼짐함수 (point spread function; PSF) 대신 선퍼짐함수(line spread function; LSF)를 사용한다. LSF는 결상계의 결상특성에 따라 선물체에 대한 순간반응(impulse response)인  $h$ 의 제곱의 적분으로 주어지기 때문에

$$L(x_i) = \int_{-\infty}^{\infty} |h(x_i, y_i)|^2 dy_i \quad (1)$$

로 정의되며, 이때 상의 강도분포함수  $i(x_i)$ 는  $i(x_i) \propto \int_{-\infty}^{\infty} L(x_i - x_o) i_g(x_o) dx_o$ 이다.<sup>[2,3]</sup> 여기서  $i_g(x_o) \equiv \delta(x_o)$ 로 근사할 수 있으며, 상의 강도분포가 곧 선 퍼짐함수로 볼 수 있다.

한편 칼날주사방식에서는 선물체의 상을 칼날로 주사하면서 그 상의 밝기를 표시하는데, 이를 LSF의 적분값으로 칼날주사함수인 변두리퍼짐함수  $E(x_i)$ 라고 한다. 그러므로 이를 미분하면 LSF가 된다. 즉

$$L(x_i) = \frac{dE(x_i)}{dx_i} \quad (2)$$

이다. 그러므로 식 (1)에서 구한 선퍼짐함수의 공간주파수  $f_x$ 에 대한 푸리에 변환(Fourier transform)을 한 후에 공간주파수가 0인 성분의 값으로 규격화하여 구한 일차원 OTF인  $O(f_x)$ 는

$$O(f_x) = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} L(x_i) \exp[j 2\pi f_x x_i] dx_i}{\int_{-\infty}^{\infty} L(x_i) dx_i} \quad (3)$$

와 같다.<sup>[2,3]</sup>

## III. 중적외선 MTF 측정장치 및 정렬

### 3.1. 측정장치의 구성

중적외선 MTF 측정장치는 그림 1과 같이 기능에 따라 물체부, 시준부, 결상부로 구성되는데, 위 그림은 bread board에 설치된 측정장치를 옆에서 본 그림이고, 아래 그림은 bread board에 설치된 측정장치를 위에서 본 그림이다. 물체

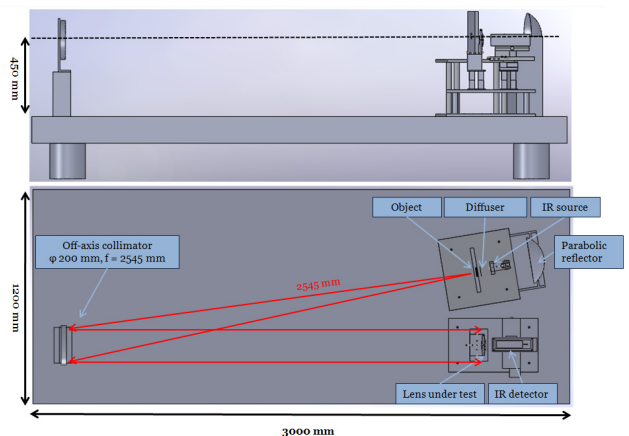


FIG. 1. Schematic diagram of mid-infrared MTF measurement system that consists of object part, collimating part, and imaging part according to various operating functions (upper : top view of the system, lower : side view of the system).

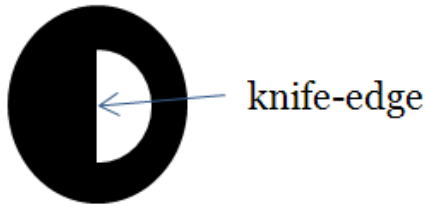


FIG. 2. Shape of a knife-edge scanning object.

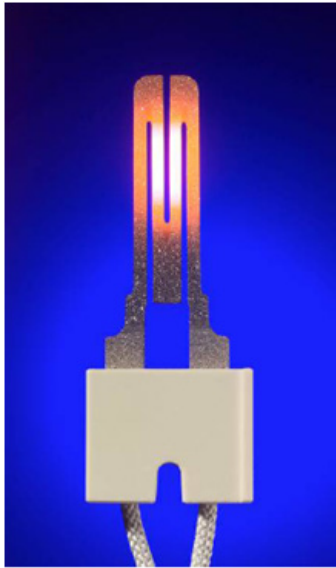


FIG. 3. Photograph of a light source with the shape of horseshoe fabricated by recrystallized silicon carbide material.

부는 물체, 적외선 광원, 포물 반사경으로 구성하였다.

물체는 그림 2와 같이 15 mm의 직경을 가진 구멍에 겹겹이 칠해진 면도날을 붙여서 반달모양으로 만들어서 칼날 주사용 물체로 사용하였다. 이 물체는 핀홀 모양이나 슬릿모양의 물체에 비하여 측정용 신호광의 세기가 충분하지만, 주변광에 의한 잡음의 영향을 더 많이 준다.

중적외선 광원으로는 비용절감과 취급의 용이성을 위하여 그림 3과 같이 생긴 재결정화 탄화규소(recrystallized silicon carbide)재질로 말굽모양의 광원(Saint gobain, CRYSTARIGNITER 271)을 사용하였다. 이 광원의 주 스펙트럼은 3~5  $\mu\text{m}$ 의 파장대이다. 그러나 이 광원의 모양 때문에 반달 모양의 칼날 주사용 물체에 균일하게 직접적으로 광을 조명할 수가 없다. 이를 보정하기 위해서 광원을 물체에 직접 조명하지 않고 확산판(diffuser)를 사용하여 물체에 균일한 광을 조사하도록 하였다. 실험적으로 측정한 이 광원의 시간적 온도 안정성은  $5 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C/s}$ 이다. 광원은 모든 방향으로 광을 방출하지만 물체에 의해 대부분이 차단되고 일부분만 물체를 통과하여 지나가며, 이에 더하여 본 장치의 적외선 광검출기까지의 광경로가 길기 때문에 실제로 적외선 광검출기에서의 광량은 상당히 줄어든다. 따라서 이러한 광량이 줄어드는 효과를 줄이기 위하여 포물 반사경을 광원 뒤에 설치하여 광량을 증가시켰다.

시준부는 비축 포물 반사경(off-axis parabolic reflector)(Sorl, 100-04-080)이 사용되었다. 이것은 초점거리 2545 mm이고, 직경 200 mm인데, 초점거리가 50 mm이고 F-수가 F/4인 평볼록 형태의 시험용 중적외선 실리콘 렌즈(Thorlabs, LA8862-E)에 입사하는 시준광을 만들어 주는 역할도 동시에 한다. 이 비축 포물 반사경은 재질은 열팽창이 거의 없는 Zerodur이며, 이 반사경면에 알루미늄으로 코팅하였으며, 반사경면의 정확도(surface accuracy)는  $\lambda/10$ ( $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ )로 설계하였다.

결상부는 그림 1에서 보듯이 적외선 광검출기와 적외선 렌즈로 구성이 되어있다. 적외선 광검출기는 중적외선용으로 많이 사용되는 InSb(indium stibium) 광전도셀(Hamamatsu, P4631-03)을 사용하였다. 이 적외선 검출기의 수광부는  $1 \times 1 \text{ mm}^2$ 의 면적을 가진 정사각형 모양이고 열전냉각(thermoelectric cooling) 타입이다. 시험용 실리콘 렌즈는 3~5  $\mu\text{m}$  중적외선 파장대에서 무반사 코팅이 되어 있으며 해당 파장에 대해서 90% 이상을 투과한다.

### 3.2. 측정장치의 정렬

물체의 파면은 시준기를 지나면서 평면파가 되고 시험렌즈의 상면에 결상하게 된다. 스텝 모터에 의해 물체의 칼날의 상을 1  $\mu\text{m}$ 간격으로 512  $\mu\text{m}$ 를 스캔함으로써 적외선 검출기에서 변두리퍼짐함수(edge spread function, ESF)를 측정한다. 이 변두리퍼짐함수를 (2)식처럼 미분하여 선퍼짐함수(line spread function, LSF)를 구하고, 이 함수를 (3)식처럼 푸리에 변환을 하여 MTF를 구한다.<sup>[13]</sup>

본 논문에서는 물체를 무한 물체로 만들어서 측정광학계의 무한거리에 대한 축상 자오방향에 대한 MTF를 측정하기 위하여 피조형 간섭계(Zygo, GPI-XP)에서 나온 수렴광이 비축 포물 반사경에 의해서 평행광선이 되도록 하였다. 먼저 이 평행광선의 평행정도에 대한 정렬이 필요하기에 정렬용 기준거울을 MTF 측정용 렌즈가 놓일 자리에 세워서 이 평행광이 되돌아가도록 설치하여 간섭계에서의 피조 간섭무늬를 측정함으로써 정렬과 정렬상태를 측정한다. 이를 위하여 간섭계는 x-y-z 방향으로 미세이동과 기울기 조절이 가능한 마운트위에 설치하였고, 간섭계에서 나온 광은 비축 포물 반사경을 거쳐 직경 200 mm의 평행광이 만들어지도록 하였다. 이것을 직경 150 mm 기준거울을 사용하여 되 반사시킴으로써 만들어지는 간섭무늬를 보며 시준장치를 정밀하게 정렬한다. 단순한 간섭계를 이용한 기준거울만의 파면수차는 rms (root mean square)값으로  $0.01\lambda$ ( $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ )로 측정되었는데, 이는 기준거울의 표면 형상이 매우 정밀하므로 기준거울로 사용하기에 충분하는 것을 알 수 있다.

실제 파면수차를 측정하는 경우 간섭계는 광축정렬 후 거의 고정되어 있으며 오직 기준거울을 미세이동시켜 정렬한다. 만약 간섭계와 기준거울을 먼저 정렬하게 되면 간섭계의 출사광의 기준거울에 대한 수직입사를 정확히 알 수 없으므로 임의의 시야각에서 측정하게 된다. 간섭계는 본체와 직경 4인치의 기준렌즈가 탈부착이 가능하도록 구성되어 있다. F/6인 기준 구면렌즈를 사용하여 간섭계 출사광의 초점이 물

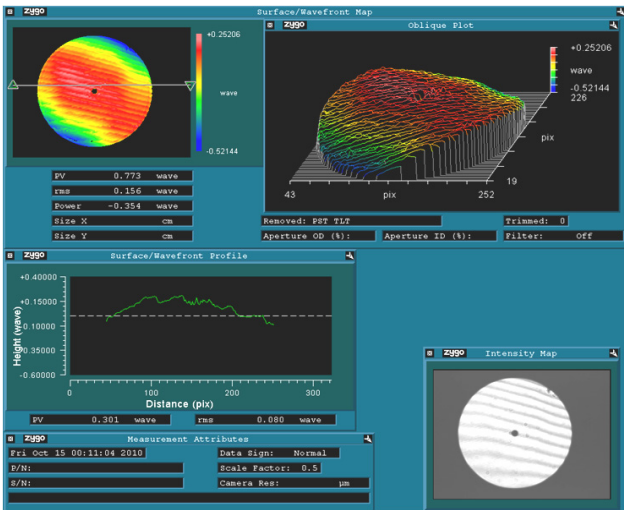


FIG. 4. The two dimensional figure of interference fringes (upper left), the three dimensional shape of interference fringes (upper right), the intensity variation of interference fringes obtained by following a central straight line of a upper left figure (lower left), and a black and white figure of interference fringes (lower right).

체에 결상하도록 한다. 그 다음에 기준 평면렌즈로 바꾸고 물체의 마운트에 거울을 대고 되돌아가는 광을 확인하며 기울기를 조정한다.

시험렌즈인 적외선렌즈는 마운트 안쪽에 장착되어 있다. 정렬 시 렌즈를 직접 정렬할 수 없으므로 마운트에 거울을 대고 간섭계의 출사광이 되반사하도록 정렬한다. 이 때 렌즈와 마운트간의 정렬오차가 MTF 측정에 중요한 영향을 줄 수 있기 때문에 본 논문에서는 렌즈와 렌즈 마운트는 리니어 게이지(Mitutoyo-LGB linear gage)를 이용하여 높이차를 측정함으로써 렌즈와 마운트간의 정렬상에서 차이가 없음을 확인하면서 정렬을 하였다. 나머지 칼날, 검출기, 기구물 등 또한 위와 같은 방법으로 정렬을 하였다. 이러한 MTF 측정 장치는 청정실(CLASS 1000)의 길이 3 m인 무진동 방진 테이블 위에서 설치되어 있으며 각 부분에는 수동으로 동작하는 미세 이동장치가 부착되어 있다.

비축 포물 반사경 정렬오차는  $0.156 \lambda (\lambda=632.8 \text{ nm})$ 의 rms 값이 됨을 그림 4의 상단 좌측 사진과 결과로부터 알 수 있다. 그림 4의 상단 우측 그림은 간섭무늬의 형상을 나타내는 3차원 그림이며, 하단 좌측 그림은 상단 좌측 그림의 데이터에서 직선으로 그은 선을 따라 형상을 보여주는 단면도이며, 하단 우측 그림은 흑백으로 보여주는 간섭무늬 사진이다.

### 3.3. MTF 측정을 위한 프로그래밍

측정에 사용한 프로그램 언어는 Visual Basic을 이용하였다. 측정된 신호인 ESF를 미분하여 LSF를 얻고, 이것을 다시 푸리에 변환하여 나온 복소함수의 진폭(amplitude)인 변조전달함수를 구했다. 이 과정에 앞서 측정용 적외선 렌즈의 초점을 맞추기 위해서 MTF를 측정하여 MTF 값이 최대가 되는 최적 초평면을 확인하는 과정이 들어간다. 이 부분은 4

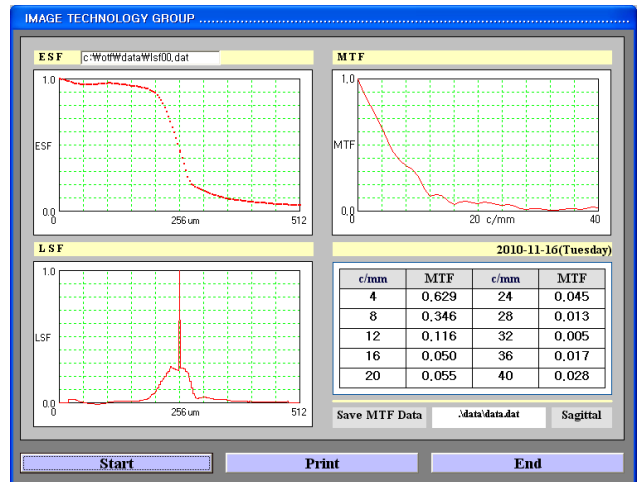


FIG. 5. Input/output windows programmed by using Visual Basic language for the measurement of MTF and the control of MTF system and MTF. (a) the input window of initial conditions, (b) the input window of motor controls, (c) the input window of MTF measurement conditions, (d) the output window of MTF results.

장에서 자세히 설명할 것이다.

측정 및 측정 장치 조절용 소프트웨어는 초기조건 입력부 (Initial Condition and Lens Spec.), 모터 조절부(Motor Control), MTF 측정용 조건 입력부(MTF Condition), MTF 측정부(MTF measurement)로 구성이 된다. 초기조건 입력부는 초기 입력 값 설정부로서 사용하는 측정광학계 이름, 중심 파장, 테스트 렌즈의 초점거리, 테스트 렌즈의 F/#를 입력해 넣는다. 이 값들은 최대 측정공간주파수를 한정해 주기 위해 사용한다. 모터 조절부는 상면에서 검출기를 움직이는 스캔 모터를 조정하기 위한 프로그램이다. 모터의 회전축에 따라 적외선 검출기의 위치를 이동시킬 수 있다. 모터의 방향(Motor direction) 과 이동거리(Interval)를 입력해주면 모터는 이동하면서 검출기로부터 신호를 받아 실시간으로 아래의 그래프에 나타난다. MTF 측정용 조건 입력부에서는 ‘데이터(Data)의 취득갯수(No. of FFT data)’와 ‘이송간격(Interval)’ 및 ‘data 평균치’ 등을 결정한다. Data의 취득갯수와 이송간격을 곱한 값은 모터가 주사하는 총거리가 된다. ‘Average data’는 신호를 받을 때 설정값만큼 신호를 받아 평균을 취한 값을 사용함으로써 측정오차를 줄이기 위함이다.

그림 5는 앞서의 초기조건 입력부, 모터 조절부, MTF 측정용 조건 입력부에서 입력한 데이터에 따라 MTF를 보여주는 측정부에 해당하는 출력창으로 ESF, LSF, MTF를 규격화된 값으로 그래프로 보여주는 것이다. 또한 40 lp/mm까지 공간주파수별 변조전달함수를 자동으로 출력하고 측정결과를 파일로 저장한다.

## IV. 실험결과 및 분석

적외선은 가시광과 달리 눈에 보이지 않기 때문에 측정렌즈의 초점을 정확히 알 수 없으므로 적외선 검출기의 신호에



의지하여 초점을 찾아야 한다. 적외선 검출기 또한 렌즈와 같은 방법으로 정렬한다. 이 때 광축에 대한 기울기 정렬이 된 상태에서 상의 크기에 비해 검출기의 수광 면적이 크기 때문에 축상의 초점 부근에서는 초점 전후로 거의 비슷한 신호가 나타난다.

이러한 문제점을 해결하기 위하여 본 논문에서는 기준 공간주파수의 MTF를 초점 전후에서 측정하고 이를 서로 비교하여 가장 MTF가 큰 위치를 최적초점 위치로 정하는 방법을 이용했다. 즉 축상 방향으로의 이동간격을 넓게 잡아서 축상으로 검출기를 이동하면서 MTF 신호를 취득한 후, 가장 높은 수준의 MTF 신호를 출력하는 범위를 정하고 그 중간 지점을 임시 초점으로 잡는다. 그리고 다시 미세한 간격으로 움직이면서 각각의 MTF를 측정한 이후, 기준 공간주파수에서 가장 높은 MTF를 나타내는 지점을 최적의 상점으로 잡았다.

그림 6은 광축 방향으로 시험용 렌즈를 이동한 거리 대 MTF의 기준주파수를 나타낸 그림으로 여러 번의 실험 결과 중 하나를 보여준 것으로 이 경우에는 최대 MTF가 0.26으로 측정되었다. 마이크로미터를 이용하여 0.5 mm 간격으로 이동하면서 임시 초점을 잡은 이후 다시 0.01 mm 간격으로 이동하면서 구한 MTF를 기준 주파수인 12 lp/mm을 비교해 보았다. 이 결과를 2차 함수로 피팅하여 구한 최적의 초점은 1.0 mm 위치에서 가장 높은 값이 나오기 때문에 이 부분을 최적의 초점이라고 표기하였다.

그림 6에서 구한 최적의 물체(칼날)의 초점거리를 잡은 후, 칼날을 이용한 반달모양 물체를 사용하여 MTF를 정확히 측정한다. 그런데 반달모양의 물체가 1장 서론에서 설명한 대로 신호는 강하되 주변에서 들어오는 주변광에 의한 잡음이 큰 단점이 존재한다. 이러한 물체의 산란광에 의한 잡음은 ESF에서 선형적인 감소추세를 갖는 것으로 가정할 수 있는데, 이를 미분한 LSF에서는 일정한 값이 된다.<sup>[4]</sup>

그림 7은 시험에 사용한 적외선 실리콘 렌즈의 배경잡음(적색 직선)이 포함된 ESF 측정결과이다. 배경잡음은 주사구

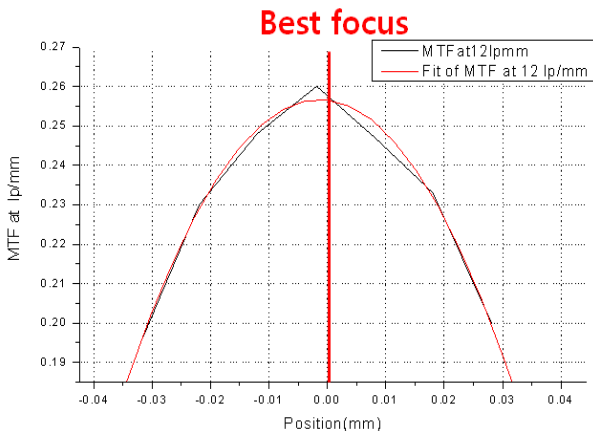


FIG. 6. MTF variation according to various moving distances of a test mid-infrared lens with the axial direction.

간 중에서 일정한 기울기를 가지는 범위인 파장 3~5 μm에서 선형 피팅을 통하여  $y = -3.93 \times 10^{-4}x + 0.56$ 로 주어짐을 알 수 있다. 이 잡음 배경함수를 측정한 ESF에서 빼줌으로써 산란된 주변광에 의한 잡음 배경이 제거된 MTF를 구했다. 이러한 선형피팅은 배경잡음을 제거하는 중요한 과정이므로 이에 대한 세심한 피팅이 필요하다.

그림 8는 그림 7의 결과를 이용하여 식 (2)와 식 (3) 및 그림 5의 측정 프로그램으로 측정한 적외선 실리콘 렌즈에 대한 축상 자오방향의 MTF(검정색 굵은 점)와 설계자료로 부터 구한 축상 자오 방향 MTF(적색 곡선)를 비교한 그래프이다. 검정색 굵은 점은 10회 측정한 MTF의 평균값이고 오차한계(error bar)는 각 주파수당 3σ로 표시하였다. 적색 곡선은 적외선렌즈의 설계 자료로부터 구한 MTF이다. 측정 결과는 동일렌즈를 총 10번씩 연속 측정하여 평균값을 결과로 나타낸 것이다.

10회 측정하여 얻은 평균 MTF가 30%되는 지점은 12 lp/mm이고, 10 lp/mm에서는 0.404, 20 lp/mm에서는 0.098이다. 여기에서 조심할 것은 그림 6에서 보여준 12 lp/mm에서의 MTF는 10회 측정 중 어떤 한 경우이며, 여기에서는 10회

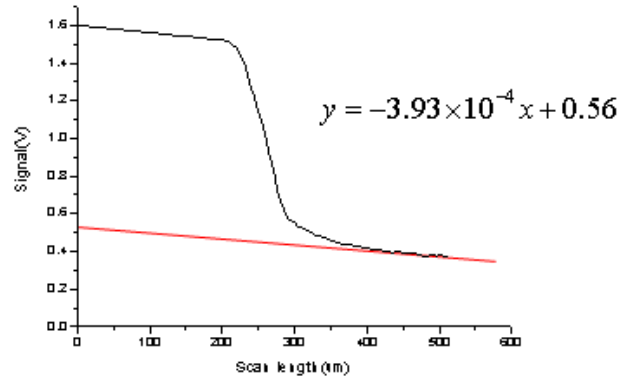


FIG. 7. Edge spread function of a silicon lens including various background noises.

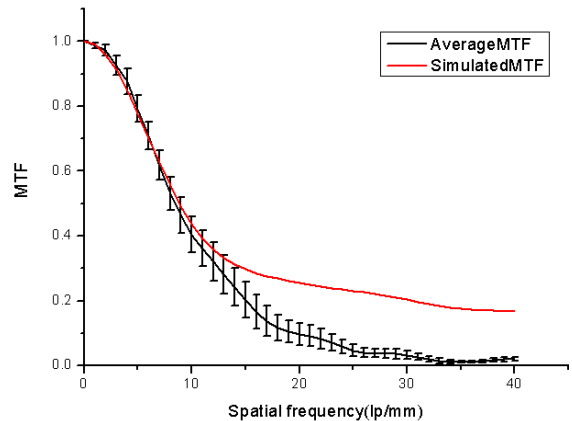


FIG. 8. MTF results that compare the measured axial tangential MTF (black solid dots) with the designed MTF (red curve) of a mid-infrared silicon lens.

**TABLE 1.** The comparison of the magnitudes of tolerance between simulated MTFs and measured average MTFs according to low spatial frequencies with less than 10 lp/mm

spatial frequency (lp/mm)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
magnitude of tolerance (%)	0.3	1.3	1.5	2.0	1.9	1.0	1.4	4.4	5.6	7.6

측정의 평균값을 나타낸 것으로 그 값은 약간 다르다는 것을 알 수 있다. 그러나 설계 데이터로부터 구한 MTF의 30% 지점은 14 lp/mm이고, 10 lp/mm에서는 0.436, 20 lp/mm에서는 0.255, 30 lp/mm에서는 0.204였다. 설계 데이터에서 보면 15 lp/mm에서부터는 MTF 값이 다소 완만하게 감소한다. ISO에서 정한 MTF의 허용오차는 2% 내로 규정하고 있는데, 표 1에서 보듯이 실험결과 7 lp/mm 이하의 낮은 공간주파수에서는 이 규정에서 규정한 허용오차범위에 잘 맞는다는 것을 알 수 있다. 여기에서 허용오차의 크기(magnitude of tolerance, %) = |(설계 MTF) - (실험 평균 MTF)| / (설계 MTF)로 계산하였다. 그러나 적외선 렌즈의 설계자료에 비해 실제 적외선 렌즈는 고주파 성분에서 대한 분해능이 떨어짐을 쉽게 볼 수 있다. 이와 같이 고주파 성분에서 측정결과가 설계값보다 낮은 이유는 장치의 배치상 광원과 센서의 거리가 가까워 광원에서 쓸데없이 들어오는 광들은 최대한도로 중간차단을 했지만 미세하게나마 영향이 있기 때문으로 판단한다. 또한 최적초점을 찾는 과정에서 눈에 보이지 않는 적외선을 센서의 신호에만 의지하여 정렬하면서 오차가 생겼을 가능성이 있다. 또한 마이크로미터를 손으로 움직였던 것을 정밀한 분해능을 가진 스텝모터를 이용해서 자동으로 초점을 찾는 소프트웨어를 이용하면 더욱 좋은 결과를 얻을 수 있으리라 생각한다. 또한 측정 정밀도를 높이기 위하여 전반적인 정렬오차를 더욱 더 줄이고, 이러한 정렬오차가 MTF 측정에 미치는 영향에 대해서도 추후로 연구할 것이다.

**V. 결 론**

증적외선 결상용 적외선 렌즈의 변조전달함수(MTF)를 칼날 주사방식으로 측정하는 방법을 제안하고 적외선 MTF 측정 장치를 구성하였다. 이를 위하여 초점거리 50 mm, F/4, 평-볼록 실리콘 렌즈에 대한 3 ~ 5 μm 파장대의 축상 자오 방향에 대한 칼날 물체를 사용한 MTF를 측정하였다. 그리고 MTF 측정 및 측정 장치 조절용 소프트웨어로 초기조건 입력창, 모터 조절부 입력창, MTF 측정용 조건 입력창, MTF 측정용 출력창을 Visual Basic 언어로 프로그램하였다. 이때 무한 물체를 만들기 위해서 초점거리가 2.545 m인 비축 포물 반사경을 사용하였고, Zygo 간섭계를 이용하여 이 비축 포물 반사경의 정렬오차를 측정한 결과 0.156 λ(λ=632.8 nm)의 rms 값이 됨을 알 수 있었다. 이러한 정렬오차 범위 내에서 적외선 실리콘 렌즈에 대해 측정한 MTF를 렌즈의 설계 자료로부터 구한 MTF와 비교한 결과, 7 lp/mm이하에서 2 % 이내의 MTF 허용오차를 만족하고 있다.

이와 같이 고주파 성분에서 측정결과가 설계값보다 낮은 이유는 장치의 광원과 센서의 거리가 가까워 광원에서 쓸데없이 들어오는 광들이 미세하게나마 영향이 있기 때문이며, 최적초점을 찾는 과정에서 눈에 보이지 않는 적외선을 센서의 신호에만 의지하여 정렬하면서 오차가 생겼기 때문이다. 이러한 영향을 없애고, 동시에 마이크로미터를 손으로 움직였던 것을 정밀한 분해능을 가진 스텝모터를 이용해서 자동으로 초점을 찾는 소프트웨어를 이용하면 더욱 좋은 결과를 얻을 수 있으리라 생각한다. 또한 측정 정밀도를 높이기 위하여 전반적인 정렬오차를 더욱 더 줄이고, 이러한 정렬오차가 MTF 측정에 미치는 영향에 대해서도 추후로 연구할 것이다.

본 논문은 국내에서 최초로 증적외선 렌즈에 대한 칼날 주사방식의 MTF 측정 장치를 구성하고 이를 이용하여 측정결과를 분석하였다는데 의의가 있으며, 앞으로는 본 논문에서 논의된 문제점들을 개선하고, 측정결과에 대한 신뢰도를 높이는 연구가 진행될 예정이다.

**감사의 글**

이 논문은 2010년도 한남대학교 학술연구조성비 지원에 의하여 연구되었습니다.

**References**

1. I. W. Lee, Y. W. Lee, H. M. Cho, J. W. Han, H. Y. Lee, J. H. Lee, S. N. Park, B. H. Jeon, J. B. Song, D. J. Shin, S. G. Yun, Y. S. Yu, C. W. Park, H. S. Lee, J. Y. Lee, and B. C. Park, "Development of evaluation technology for precision optical system," KRISS/IR-2001-091, KRISS, Daejeon (2001).
2. S. M. Hong, Ph. D. Thesis, "Modulation transfer function measurement for imaging optics systems by using square objects and its applications," Daejeon (2009), pp. 9-30.
3. J. S. Song, Ph. D. Thesis, "Real-time measurement of polychromatic optical transfer function and its applications," Daejeon (2003), pp. 1-24.
4. H. M. Cho, Y. W. Lee, J. B. Song, H. Y. Lee, J. H. Lee, I. W. Lee, and T. H. Park, "Image evaluation of optical systems," KRISS-98-104-MO, KRISS, Daejeon (1998).
5. H. M. Cho, Y. W. Lee, I. W. Lee, S. T. Lee, and J. U. Lee, "Modulation transfer function measurement of a linear charge coupled device imager by using a knife-edge

- scanner,” *Hankook Kwanghak Hoeji* **6**, 173-177 (1995).
- 6 D. Malacara, *Optical Shop Testing*, 3rd ed. (A John Wiley & Sons, Inc., New York, USA, 2007), Chapter 14.
  - 7 J. S. Song, Y. W. Lee, I. W. Lee, and J. H. Jo, “Polychromatic modulation transfer function analysis of color LCD,” *Proc. SPIE* **4927**, 404-412 (2002).
  - 8 J. S. Song, J. H. Jo, S. M. Hong, Y. W. Lee, H. S. Yang, and I. W. Lee, “Image quality assessment of color LCD monitors by polychromatic modulation transfer function,” *Hankook Kwanghak Hoeji* **16**, 63-70 (2005).
  - 9 S. M. Hong, J. H. Jo, Y. W. Lee, H. Y. Lee, H. S. Yang, and I. W. Lee, “Development of an equipment for measuring the MTF of camera phone lenses,” *Hankook Kwanghak Hoeji* **18**, 31-36 (2007).
  - 10 A. P. Tzannes and J. M. Mooney, “Measurement of the modulation transfer function of infrared cameras,” *Opt. Eng.* **34**, 1808-1817 (1995).
  - 11 G. C. Holst, *Testing and Evaluation of Infrared Imaging Systems*, 2nd ed. (SPIE Press, Bellingham, USA, 1998), Chapter 8.
  - 12 G. D. Boreman, *Modulation Transfer Function in Optical and Electro-optical Systems* (SPIE Press, Washington, USA, 2001), Chapter 2.
  - 13 C. J. Hutchinson, J. P. Jennings, C. Lewis, and G. N. Turner, “An automated MTF measurement system for use in the 8~12  $\mu\text{m}$  spectral region,” *J. Phys. E* **14**, 846-850 (1981).