

◆ 특집 ◆ 광학부품 제조기술

초정밀 열 영상 현미경 광학계 개발

Development of the Ultra Precision Thermal Imaging Optical System

양순철^{1,✉}, 원종호²
Sun Choel Yang^{1,✉} and Jong Ho Won²

¹ 한국기초과학지원연구원(Korea Basic Science Institute.)

² 충남대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Chungnam Univ.)

✉ Corresponding author: md941057@kbsi.re.kr, Tel: 042-865-3462

Manuscript received: 2010.9.20 / Accepted: 2010.10.22

Recently, there is a demand for a thermal imaging microscope in the medical field as well as the semi-conductor industry. Although the demand of the advanced thermal imaging microscope has been increased, it is very difficult to obtain the technology of developing a thermal camera, because it is used for defense industry. We developed the x5 zoom microscope which has 3 μm spatial resolution to research the design and fabrication of the IR (Infrared) optical system. The optical system of the IR microscope consists of four spherical lenses and four aspheric lenses. We verified individual sensitivity of each optical parameter as the first order approach to the analysis. And we also performed structure and vibration analysis. The optical elements are fabricated using Freeform 700A. The measurement results of surface roughness and form accuracy using NT 2000 and UA3P are Ra 2.36 nm and P-V 0.13 μm . Finally we ascertained resolution power of 3 μm using USAF (United State Air Force) 1951 IR resolution test chart.

Key Words: Thermography (파부온도측정), Numerical Aperture (개구수), Freeform Generator (자유곡면 가공기), Aspheric (비구면), UA3P (Ultra High Accurate 3D Profilometer; 초고정도 3 차원측정기), Infrared (적외선)

1. 서론

일본, 미국, 독일 등 일부 선진국에서 반도체 직접회로의 불량 검사를 목적으로 열 영상 현미경을 개발하여 상용화 하였으나, 최근 반도체 직접회로 기술의 비약적인 발전으로 기존의 상용 장비보다 향상된 성능(분해능, 감도, 미세온도 분석 등)의 열 영상 현미경 개발을 필요로 하고 있다.^{1,2}

또한 의료분야에서 적외선 열 영상 의료연구 응용 (Thermography)은 생체에 해가 없으며 쉽게 반복적으로 시행 가능하다는 장점으로 인해 특정 질환들의 초기진단, 감별진단, 질환의 경과관정,

예후 및 치료 적정도 판정에 매우 유용하여 1987년 FDA 에서 공인을 받은 후 장비의 성능 개선과 여러 질환들의 병태 생리가 밝혀지면서 최근 많은 연구가 진행되고 있다.³⁻⁵

독일, 미국, 일본과 같은 해외에서는 적외선 광학초자 관련 첨단기술을 보유하고 있으나 적외선 광학 기술은 국방관련 핵심 기술로써 기술공개가 극도로 제한되며 또한 엄격한 심사를 거쳐 수출을 하고 있다. 그러므로 국내에서 적외선 광학계 개발에 연구와 투자를 병행하여 국산화에 박차를 가해야 한다.

본 연구는 3 μm 분해능을 갖는 적외선 광학계

를 개발하여 바이오, 의료 등의 분야에 적용하기 위한 목적의 장비로써 이미징 과학을 이용한 생명, 나노, 환경 등의 분석연구에 이바지 하고자 한다.

2. 열 영상 현미경 광학계 설계 및 공차 분석

2.1 광학계 설계

열 영상 현미경은 3.7 - 5.0 μm 의 적외선을 감지하기 위한 광학계로써 Fig. 1 과 같이 결상 광학계와 릴레이 광학계로 나뉘어 설계되었다. 결상 광학계는 분해능을 높이기 위하여 구면의 실리콘 렌즈 3 장과 3 장의 비구면 게르마늄 렌즈로 설계되었다. 비구면 렌즈는 가공의 정밀도를 향상시키기 위해 모두 게르마늄의 볼록면으로 설계되었다. 릴레이 광학계는 각각 비구면 게르마늄 렌즈와 구면 실리콘 렌즈로 설계되었다. 릴레이 광학계에서 Stop 이 검출기 쪽에 위치하여 결상 광학계의 대구경화를 억제함과 동시에 광량의 손실을 최소화하였다. 열 영상 현미경 광학계는 5 배 광학계이며 NA (Numerical Aperture)는 0.65 이다(Table 1).

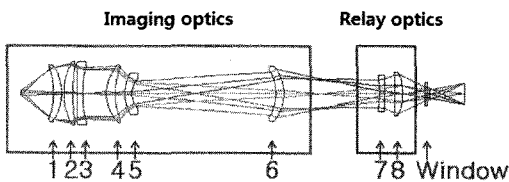


Fig. 1 Layout of the IR microscopy

Table 1 Specifications of the IR microscopy

NA	0.65
Wavelength coverage	3.7 - 5.0 μm
Zoom	x 5
Working Distance	15.5 mm
Total Length	250.70 mm
Pixel size	15 μm
Detector array format	640 x 512

광학계의 성능은 MTF (Modulation Transfer Function) 값으로 확인 할 수 있다. 광학계의 공간 분해능의 한계는 검출기의 화소 크기에 의해 결정된다. 열 영상 현미경 광학계는 검출기의 화소가 15 μm 이기 때문에 한계 분해능은 약 30 cycle/mm이다. 하지만 열 영상 현미경은 5 배율 광학계이기 때문에 실제 분해 가능한 물체의 크기는 3 μm 이다.

열 영상 현미경 광학계의 MTF 성능은 Fig. 2 에서 확인 할 수 있듯이 30 cycle/mm에서 0.35 이상으로 회절 한계에 근접해 있다. 광학계의 Strehl ratio 또한 중심 광선에 대해서 0.987 비축 광선에 대해서 0.982 의 높은 성능을 보여주고 있다.

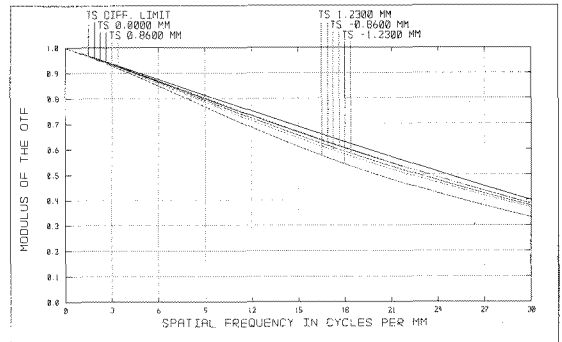


Fig. 2 MTF of the IR microscopy

2.2 민감도 및 공차분석

열 영상 현미경의 렌즈 및 기구물 제작을 위하여 민감도 분석과 공차 분석이 수행되었다. 공차는 Fig. 3 과 같이 정의되었다.⁶ 보상자는 BFL (Back Focal Length) 로 설정하여 ± 2 mm 범위에서 초점거리의 조절을 통해 공차에 의한 광학 성능의 저하를 최소화하면서 공차의 허용 한계를 늘릴 수 있도록 하였다.

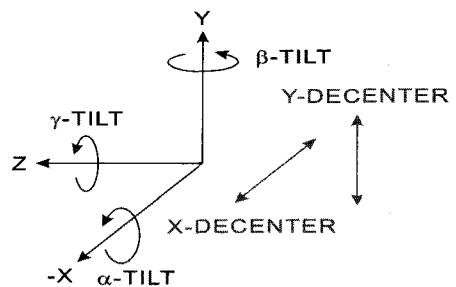


Fig. 3 Definition of tolerance parameters

민감도 분석 결과 2, 3, 5 번 렌즈의 x-, y-decenter 가 공차에 가장 민감한 부분으로 예상되었다. 또한, 이러한 공차는 보상자를 이용한 초점의 조절이 공차에 의한 광학 성능의 저하를 막지 못하기 때문에 렌즈와 기구물의 가공 및 조립에서 중심을 맞추는 것이 매우 중요할 것으로 예상된다.

3. 광학계 구조물 설계

3.1 광학계의 해석 조건

광학계의 무게에 의해 발생하는 처짐, 응력 그리고 고유 진동수를 알아보기 위해 구조물의 설계와 공차분석을 토대로 구조물을 3D 모델로 생성한 후 구조 및 진동해석을 수행하였다. 광학계의 무게에 의해 발생하는 처짐의 양이 크게 되면 광경로의 비틀림으로 인해 광경로가 어긋나게 되어 광학 성능을 크게 떨어뜨리게 된다. 그리고 무게에 의해 구조가 취약한 부분에서는 응력 집중 현상이 발생하게 되는데 구조물이 가지고 있는 항복 응력 값을 넘어가게 되면 더욱 큰 처짐이 발생하게 된다. 고유 진동수를 측정하는 이유는 열 영상 현미경에서 작은 대상(3 μm range)을 관찰할 때 작은 면적을 보기 때문에 미세한 진동이 발생하더라도 측정되는 대상물이 흔들려 보이게 된다. 또한, 열 영상 현미경에서 나오는 진동수와 줌 렌즈 광학계의 고유진동수가 겹치게 되면 공진이 일어나 열 영상 현미경에서 더욱 큰 진동이 발생하게 되어 정확한 측정을 할 수 없게 되는 경우가 발생한다. 이러한 영향들은 광학계의 고유진동수를 알게 되면 공진되는 주파수 대역을 피할 수 있기 때문에 고유진동수를 알아볼 필요성이 있다.⁷

Table 2 Boundary conditions of the IR microscopy model

Materials	Lens : Germanium, Silicon
	Others : Al6061-T6
Size	Ø 89 mm x 205 mm L
Mass	1.247 kg
Analysis conditions	Fixed end
	Earth gravity
	Sweep method
Mesh	Grid : Hexahedron

해석을 수행하기 위한 경계조건은 Table 2 에서 보여주고 있는 것과 같으며 광학계 자체는 수평방향으로 고정되어 있는 상태이다. 우선 분할 (격자의 크기와 형태를 나누는 작업)를 통하여 격자의 형태를 6 면체로 결정한 후 끝단을 고정하고 광학계의 무게에 의해 발생하는 자체중량을 하중조건으로 ANSYS 12.1 Workbench 에서 구조 해석을 수행하였다. Fig. 4 는 경계조건을 부여한 후의 그림이며, Fig. 5 는 3D 모델에 분할을 완료한 결과이다.

3.2 광학계의 구조해석 결과

구조 해석을 통하여 열 영상 현미경 광학계의

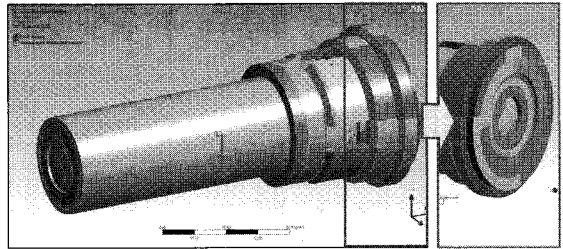


Fig. 4 Boundary conditions of the IR microscopy model

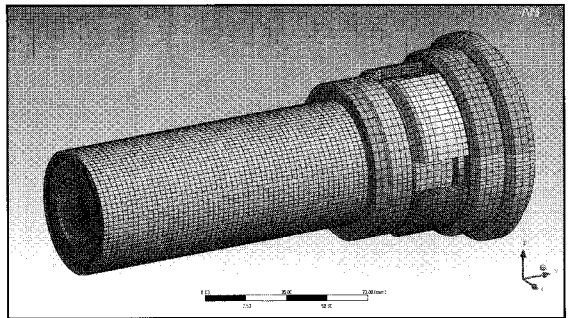


Fig. 5 Mesh of the IR microscopy model

무게에 의한 처짐이 광학계의 성능에 미치는 영향에 대해 알아보았다. 구조해석 결과 처짐량과 응력값은 최대 0.41472 μm, 0.69633 MPa 로 처짐과 응력이 광 경로에 미치는 영향은 광학계의 제작 및 조립 공차에 비해 매우 작은 값이다. 따라서 열 영상 현미경 광학계는 무게 대비 강성이 만족할만한 수준임을 확인할 수 있으며 광학계에 미치는 영향은 무시할만한 수준임을 알 수 있다. Fig. 6 은 광학계의 무게에 의한 처짐량을 해석한 결과이며, Fig. 7 은 무게에 의해 받는 응력을 해석한 결과이다.

3.3 광학계의 진동해석 결과

열 영상 현미경에서 발생하는 진동수를 Fig. 8 에서와 같이 레이저 변위 측정기를 이용한 삼각측량법으로 측정된 결과 Fig. 9 에서와 같이 48.5 Hz 의 결과를 얻을 수 있었다. 광학계의 고유진동수를 해석한 결과 1st 고유진동수는 905.37 Hz (Fig. 10), 2nd 는 908.32 Hz(Fig. 11)이며 3rd 이상의 모든 진동수는 그 이상의 값을 갖는다. 만약 진동수가 겹쳐 공진이 일어난다면 광학계의 무게에 의한 처짐량보다 최소 2 배 이상의 수치로 처짐량이 발생하게 될 것이다. 하지만 측정된 결과와 해석 결과를 비교했을 때 해석된 고유진동수가 측정된 진동수인 48.5 Hz 보다 매우 높기 때문에 공진에 의한 변형이 없을 것으로 사려된다.

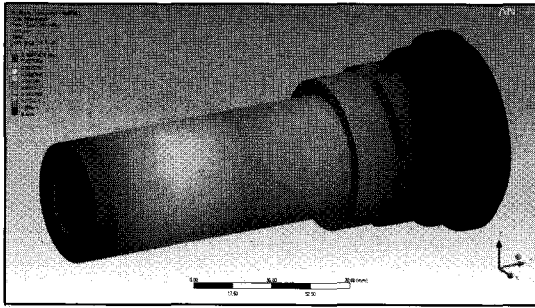


Fig. 6 Deformation of the IR microscopy model

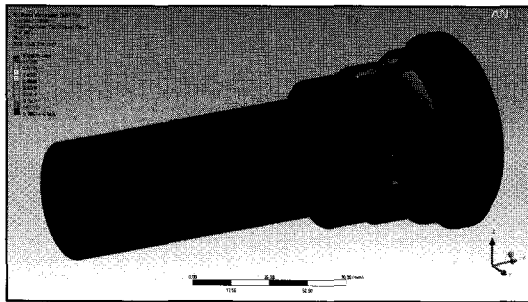


Fig. 7 Stress of the IR microscopy model

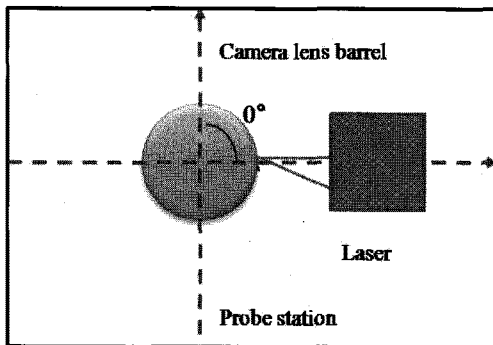


Fig. 8 Measurement with respect to the IR microscopy

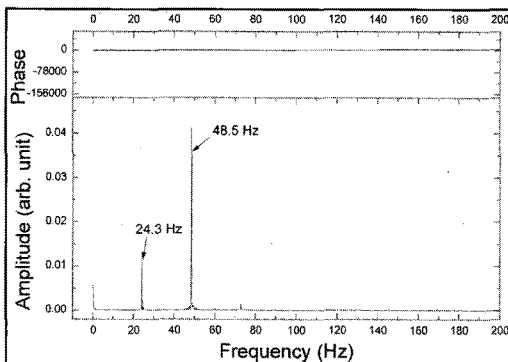


Fig. 9 Frequency of the IR microscopy

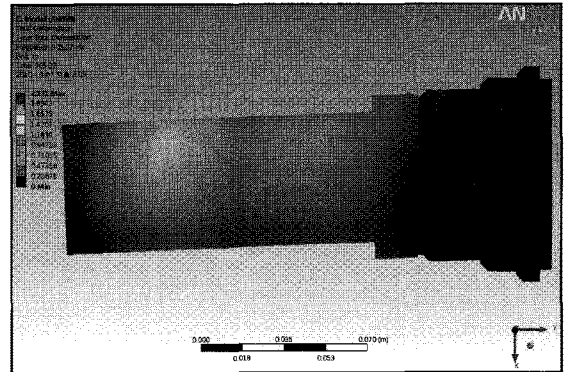


Fig. 10 1st mode shape of the IR microscopy model

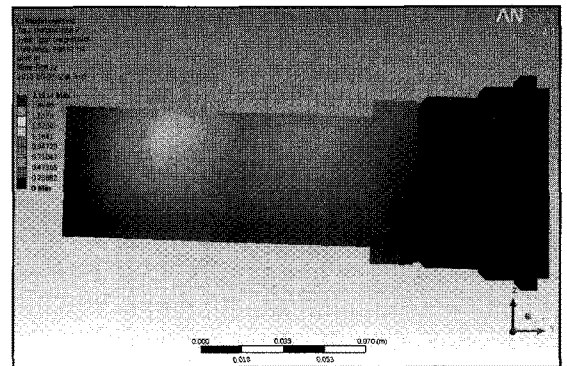
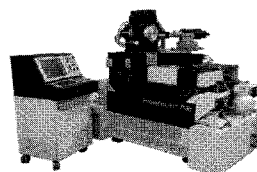


Fig. 11 2nd mode shape of the IR microscopy model

4. 적외선 광학계 초정밀 가공 기술

4.1 실험 장비

적외선 광학계를 제작함에 있어 사용된 장비로는 5 축 자유곡면 가공기 Freeform 700A(미국 precitech 사)를 사용하였다. 측정장비는 비접촉식 표면형상 측정기 NT2000(미국 Veeco 사)을 사용하여 표면조도를 측정하였고, 비구면 형상정밀도 측정은 UA3P(일본 Panasonic 사)를 사용하여 측정을 하였다. Fig. 12(a)는 자유곡면 가공기 Freeform 700A 를 보여준다.



(a) Freeform 700A



(b) NT2000

Fig. 12 Equipment for fabrication and measurement

Fig. 12(b)는 적외선 렌즈 표면 거칠기를 측정하고 있는 NT 2000 을 보여준다. 측정기의 측정범위는 최대 100 mm × 100 mm, 측정범위는 0.1 nm ~ 150 μm, 분해능은 0.1 nm 이며 자동 초점 이송방식이다. Fig. 13 은 표면형상측정기 UA3P 이다. 원자단위의 힘으로 측정 대상물 표면에 접촉하여 2 차원 또는 3 차원으로 측정자가 원하는 방향으로 측정할 수 있는 장점을 가지고 있다.⁸

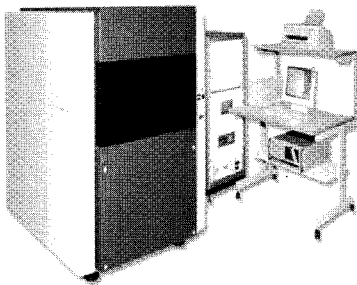


Fig. 13 Photograph of measuring instrument (UA3P)

4.2 적외선 렌즈 초정밀 가공 기술개발

열 영상 현미경 광학계에서 3,5,6,7 번 렌즈가 비구면 형상으로 설계되어 있다. 자유곡면 가공기를 이용하여 적외선 초자 게르마늄의 초정밀 절삭 특성을 파악하여 비구면 렌즈가공에 적용하였다. 절삭특성을 파악하기 위하여 사용된 바이트는 A.L.M.T 사 천연다이아몬드 바이트이며 바이트 마모로 인한 소모를 줄이기 위하여 노우즈 반경 R0.8 mm 를 사용하였다. 게르마늄 초정밀 최적 절삭조건은 Table 3 과 같다.⁹

Table 3 Condition of ultra precision machining

Material (bite type)	natural
Nose radius (mm)	0.8
Cutting speed (rpm)	1300
Depth of cut (μm)	0.5
Rake angle (deg)	-25 (chamfered)
Cutting fluid	mist

Fig. 14 는 광학계 3 번 렌즈를 초정밀 가공 하고 있는 사진과 가공 후 렌즈 표면을 보여준다. 비구면 렌즈를 고정시키기 위하여 Al6061 소재로 치공구를 제작하여 렌즈가 닫는 부분을 초정밀 가공하여 평면도를 유지한 후 렌즈를 왁스로 고정하

였다. 렌즈 고정방법에 따라 비구면 형상을 가공한 후 표면형상이 악화될 수 있으므로 치공구 또한 주의 깊게 제작되어야 한다.

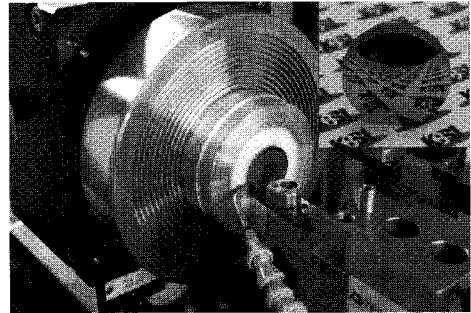


Fig. 14 Ultra precision machining of aspheric lens

Fig. 15 에서와 같이 가공한 렌즈를 NT 2000 을 이용하여 렌즈 중심 부위 표면 거칠기를 측정한 결과 Ra 2.36 nm 를 얻을 수 있었다. 취성을 가진 IR 초자들은 가공 후 중심부위가 가장 낮은 표면 거칠기 값을 가진다. 사용되는 파장 3.7 ~ 5 μm에서 요구되는 표면 거칠기 Ra 3.0 nm 이하를 만족하기 때문에 난반사와 같은 현상에 따른 광학 성능의 저하는 없을 것으로 판단된다.

Fig. 16 에서는 표면형상 측정기 UA3P 로 비구면 형상 정도를 측정하고 있는 사진을 보여준다. 측정은 X, Y 축을 유효구경까지 측정하여 결과를 얻었다. Fig. 16 에서 측정결과를 보여주듯이 설계된 곡률 값으로 분석한 결과 형상정밀도 P-V 0.1381 μm를 얻을 수 있었다. 광학설계에서 형상정밀도의 공차가 P-V 0.3 μm이하로 설정되었기 때문에 충분한 성능을 가질 수 있는 렌즈를 제작했다고 볼 수 있다.

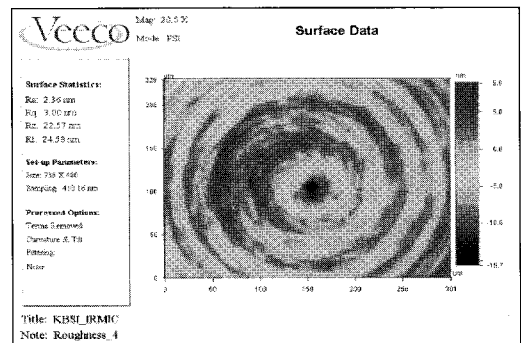


Fig. 15 Measurement roughness of germanium lens

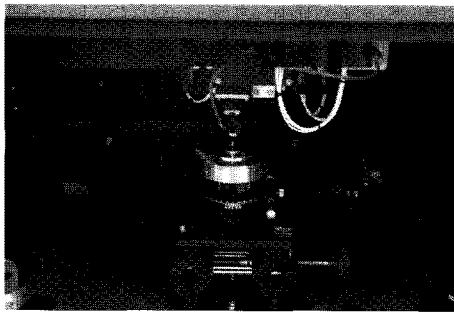


Fig. 16 Measurement of aspheric surface by UA3P

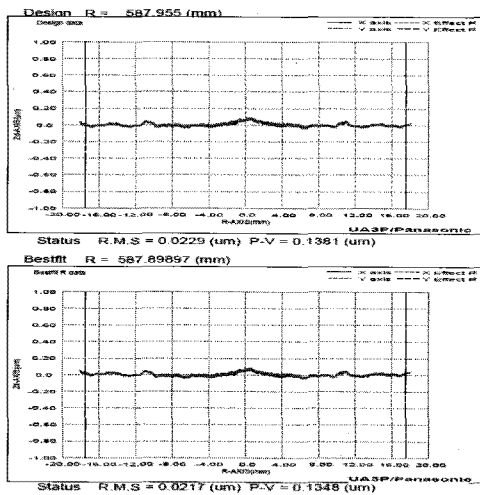


Fig. 17 Result of measurement form error (UA3P)

5. 광학계 성능평가

열 영상 현미경 광학계의 조립을 완료한 후 광학계의 분해능 USAF (US Air Force) 1951 를 이용하여 평가하였다.¹⁰ 첫 번째로 흑체(Ci-system 이스라엘)를 이용한 열 영상 현미경 광학계의 성능을 평가하기 위해서 NUC (Non-Uniformity Correction)를

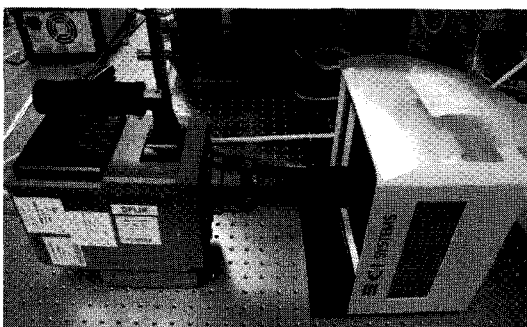


Fig. 18 Calibration of the IR microscope

수행하였다(Fig. 18). 오차를 줄이기 위해서 흑체와 현미경을 근접하게 위치시킨 후 흑체의 온도를 변화시키며 검출기가 가지고 있는 불량 화소를 검출해서 보상하고 모든 검출기 화소의 민감도를 일정하게 조정하였다.

USAF 1951 에서는 lp (Line Pair) / mm라는 단위를 사용하며, 이것은 1 mm 안에 몇 쌍의 검은색과 흰색 선이 들어있는지 표시하는 단위로 Fig. 2 의 MTF 그래프에서 표현한 cycle/mm와 같은 단위이다. USAF 1951 을 열 영상 현미경으로 측정된 결과 약 3 μm 크기인 target 까지 분해가 가능하였다(Fig. 19). 열 영상 현미경 광학계가 5 배율 광학계이기 때문에 3 μm의 분해능은 검출기의 한계 분해능인 15 μm에 대응한다. 정확한 성능 측정을 위하여 여러 target 에서의 대비치를 확인하고 설계치와 비교하였다(Table 3). 비교 결과 설계치에 비해서 성능이 떨어진 것을 확인하였다. 성능 저하의 가장 큰 이유는 자동 초점 기능이 없기 때문에 정확한 초점위치에서의 측정이 불가능하기 때문이며 렌즈 및 기구물의 가공 정밀도, 그리고 조립 오차도 성능 저하의 요인으로 예상된다. 하지만 약 3 μm에서의 측정 결과가 목표 성능에 근접하기 때문에 광학계의 사용에 큰 문제는 발생하지 않을 것으로 생각된다.

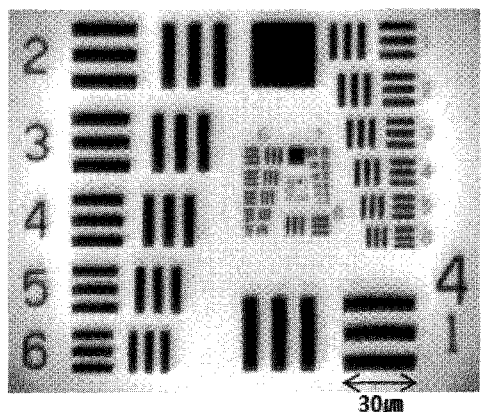


Fig. 19 USAF 1951 resolution test target

Table 4 MTF test of the IR microscope

lp / mm	Design Value	Measurement Value
6.35	0.97	0.95
12.70	0.94	0.84
25.39	0.89	0.58
50.8	0.77	0.34
102.00	0.56	0.23
144.00	0.38	0.19

6. 결론

본 연구에서는 3.7 - 5.0 μm 의 파장에서 3 μm 의 해상도를 갖는 5 배율 열 영상 현미경을 개발하였다. 총 8 장의 렌즈로 구성된 열 영상 현미경 광학계는 4 장은 실리콘 구면 렌즈이고 4 장의 게르마늄 비구면 렌즈이며 비구면은 모두 볼록면으로 설계되어 가공이 용이하도록 하였다. 광학계의 민감도 및 공차분석 결과를 토대로 구조설계를 하였다. 구조해석 결과 처짐량은 0.41 μm , 응력값은 0.70 MPa 로 무게에 의한 처짐이 광학계에 주는 영향은 무시할 수 있다. 진동 측정 및 해석 결과 또한 고유진동수가 측정된 진동수인 48.5 Hz 보다 매우 높기 때문에 공진에 의한 변형은 고려하지 않아도 될 것으로 보인다. Freeform 700A 를 이용해 가공한 렌즈를 NT 2000 과 UA3P 를 이용하여 측정한 결과 Ra 2.36 nm의 표면 조도와 P-V 0.1381 μm 의 형상 정밀도를 확인하였다. 열 영상 현미경 광학계를 USAF 1951 를 이용하여 측정한 결과 3 μm 크기까지 분해 가능한 것을 확인하였다.

후 기

본 논문은 한국기초과학지원연구원 “초정밀 열 영상 현미경 개발” 사업에 의하여 수행되었습니다.

참고문헌

- Vallett, D. P., “Failure analysis requirement for nanoelectronics,” IEEE Trans. on Nanotech., Vol. 1, No. 3, pp. 117-121, 2002.
- Ippolito, S. B., Thorne, S. A., Eraslan, M. G., Goldberg, B. B., Unlu, M. S. and Leblebici, Y., “high spatial resolution subsurface thermal emission microscopy,” Appl. Phys. Lett., Vol. 84, No. 22, pp. 4529-4531, 2004.
- Nowakowski, A., Kaczmarek, M., Ruminski, J., Hryciuk, M., Renkielska, A., Grudzinski, J., Siebert, J., Jagielak, D., Rogowski, J., Roszak, K. and Sojek, W., “Medical applications of model based dynamic thermography,” Pro. of SPIE, Vol. 4360, pp. 492-503, 2001.
- Gordon, N., Rispler, S., Sideman, S., Shofti, R. and Beyar, R., “Estimation of coronary blood flow by ECG gated cardiac thermography in open-chest conditions,” Physiol. Meas., Vol. 19, No. 3, pp. 353-366, 1998.
- Vainer, B. G., “FPA-based infrared thermography as applied to the study of cutaneous perspiration and stimulated vascular response in humans,” Phys. Med. Biol., Vol. 50, No. 23, pp. R63-R94, 2005.
- Schroeder, D. J., “Astronomical Optics,” Academic, 2000.
- Yoder, P. R., “Mounting Optics in Optical Instruments,” SPIE Press, 2002.
- Tsutsumi, H., Yoshizumi, K. and Takeuchi, H., “Ultrahigh Accurate 3D Profilometer,” Proc. of SPIE, Vol. 5638, pp. 387 -394, 2005.
- Yang, S. C., Kim, G. H., Kim, H. S., Lee, S. Y., Bok, M. G. and Won, J. H., “The Characteristics of Ultra Precision Machining of Optical Element Germanium,” Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 23, No. 6, pp. 7-13, 2006.
- MIL-STD-150A, Section 5.1.1.7, USAF (1951) 3-Bar Resolving Power Target, Available from: <<http://www.efg2.com/Lab/ImageProcessing/TestTargets/>>