

칼코게나이드 유리 소재의 PGM 가공 렌즈를 사용한 저가의 적외선 광학계 설계와 제작

오승은^{1†} · 이선규¹ · 최종규¹ · 송국현² · 백종식³

¹삼성탈레스 PE 1그룹

Ⓣ 730-030 경북 구미시 공단동 259 사서함 50호

²프리시전옵텍스

Ⓣ 500-460 광주광역시 북구 월출동 970-51

³이오시스템

Ⓣ 404-250 인천광역시 서구 가좌동 542-7

(2012년 6월 26일 받음, 2012년 8월 1일 수정본 받음, 2012년 8월 1일 게재 확정)

본 논문에서는 적외선 광학장비의 가격 경쟁력을 확보하고자 상대적으로 저렴한 비용으로 제작이 가능한 PGM(Precision Glass Molding) 가공 렌즈로 구성된, 비냉각형 검출기용 적외선 광학계를 설계 및 제작하였다. PGM 가공이 가능하도록 광학계의 모든 렌즈에 칼코게나이드 유리(Chalcogenide Glass) 소재를 사용하였으며, 자체 비열화가 구현되도록 설계하였다. 또한 기존 가공법인 SPDT(Single Point Diamond Turning) 방법으로 제작된 렌즈로, 동일한 광학계를 구성하여 PGM 가공 렌즈의 성능 측정에 사용하였다. 제작된 두 광학계의 변조전달함수(MTF) 측정 결과와 실제 영상의 촬영 결과를 비교하여 분석한 결과, 가공 방법에 따른 렌즈의 성능 차이는 그리 크지 않음을 확인할 수 있었다. 따라서 향후 PGM 가공 렌즈의 사용이 증가하면, 적외선 광학장비의 가격 경쟁력이 향상될 것으로 기대된다.

Design and Fabrication of Low Cost Infrared Optical System Using Precision Glass Molding Lens Made by Chalcogenide Glass

Seung Eun Oh^{1†}, Sun Kyu Lee¹, Joong Kyu Choi¹, Kook Hyun Song², and Jong Sik Baek³

¹Product Engineering Team 1 Group, Samsung Thales Co., Ltd., #259, Gongdan-dong, Gumi 730-030, Korea

²Precision Optechs Co., Ltd., 970-51 Wolchul-dong, Bul-gu, Gwangju 500-460, Korea

³Eosystem Co., Ltd., #542-7, Gajwa-dong, Seo-gu, Incheon 404-250, Korea

(Received June 26, 2012; Revised manuscript August 1, 2012; Accepted August 1, 2012)

In this paper, for low cost infrared optical equipment, we design and fabricate an infrared optical system for an uncooled detector using PGM(Precision Glass Molding) lenses. The designed infrared optical system has a good athermalization, and the material of all of its lenses is a chalcogenide glass suitable for the PGM method. In addition, we also fabricate the same infrared optical system using SPDT(Single Point Diamond Turning) lenses in order to measure the optical performance of PGM lenses. We measure the MTF(Modulation Transfer Function) of the two infrared optical systems which use the PGM lenses and the SPDT lenses. And then we compare and analyze the images of them both. As a result, we find that they have only a very small difference in optical performance. If the use of PGM lenses increases, we expect to reduce the cost of infrared optical equipment.

Keywords: Chalcogenide glass, Glass molding, Infrared optical system, Uncooled

OCIS codes: (220.0220) Optical design and fabrication; (220.3620) Lens system design; (220.4610) Optical fabrication; (220.4840) Testing

[†]E-mail: se97.oh@samsung.com

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

I. 서 론

3 ~ 5 μm 나 8 ~ 12 μm 대역의 적외선을 사용하는 광학장비의 크기와 무게가 점점 줄어들어 따라, 군사용으로만 사용되던 예전과 달리 체열 측정이나 전기선의 누전 감지 등과 같이 다양한 분야로 사용범위가 점차 넓어지는 추세이다. 하지만 가시광선을 사용하는 일반 광학장비에 비해 가격이 월등히 높다는 단점이 적외선 광학장비의 보편화를 어렵게 하고 있다. 이 때문에 적외선 광학장비의 단가를 낮추려는 노력이 최근 들어 활발하게 진행되고 있다.^[1-2]

비구면 렌즈를 사용하면 광학계를 구성하는 렌즈의 개수를 최소화할 수 있어, 광학계의 제작단가를 효율적으로 감소시킬 수 있다. 현재 국내에서는 적외선 광학계용 비구면 렌즈를 주로 다이아몬드 툴(tool)을 사용해 렌즈를 직접 가공하는 SPDT(Single Point Diamond Turning) 방법으로 제작한다. 하지만 SPDT 방법은 매우 정밀한 가공이 가능하지만, 높은 가공 비용과 느린 가공 속도로 인해 적외선 광학장비의 가격 경쟁력 향상에 큰 걸림돌 역할을 해왔다. 만약 저렴한 비용과 빠른 가공 속도를 가져 대량 양산에 적합한 PGM(Precision Glass Molding) 방법을 사용한다면 현재보다 저렴한 비용으로 적외선 광학계를 제작할 수 있겠지만, 적외선 광학계용 렌즈 소재의 대부분이 PGM 가공이 불가능해 이 방법이 보편화되지 못하였다.

1950년대 처음 알려지기 시작한 소재인 칼코게나이드 유리(Chalcogenide Glass)는 주기율표 6족 원소 중 산소(O)를 제외한 황(S), 셀레늄(Se), 텔루륨(Te)에 하나 이상의 게르마늄(Ge), 실리콘(Si), 비소(As), 안티몬(Sb) 등의 원소가 결합된 화합물로, 적외선 파장대역에서의 광학적 특성이 우수하여 적외선 광학계용 렌즈 소재로도 사용된다. 특히 고온 압축 성형이 알맞은 특성을 가지고 있어, 현존하는 적외선 광학계용 렌즈 소재 중 유일하게 PGM 가공이 가능한 것으로 최근 각광받고 있다.^[3-4] 본 논문에서는 저렴한 비용의 적외선 광학계를 제작하기 위해 칼코게나이드 유리 소재의 렌즈로 구성된 광학계를 설계하고, PGM 방법과 SPDT 방법으로 가공한 렌즈들의 성능을 측정하여 비교해 보았다.

II. 광학계 설계

표 1은 사용목적에 맞게 설정된 적외선 광학계의 사양으로, 이것을 기준으로 광학계를 설계하였다. 광학계에 사용될 검출기는 프랑스 ULIS사의 파장대역이 8 ~ 12 μm 인 VGA급 비냉각형 Nano640E를 선정하였다. 따라서 검출기에 의한 나이퀴스트 주파수(Nyquist Frequency)는 20 lp/mm가 되며, 이를 광학계 변조전달함수(MTF, Modulation Transfer Function)의 기준 공간주파수로 설정하였다.

광학계를 구성하는 렌즈들의 소재로는 독일의 VITRON사가 생산하는 칼코게나이드 유리인 IG5를 사용하였다. VITRON사가 생산하는 다른 칼코게나이드 유리 소재들과 달리 IG5는 비소(As) 성분을 포함하지 않아, PGM 가공 중 발생할 수

TABLE 1. Specification of the infrared optical system

| 항 목 | 사 양 |
|---------|--------------------|
| 픽셀 수 | 640 × 480 |
| 픽셀 크기 | 25 μm |
| 파장 대역 | 8~12 μm |
| 시계(FOV) | 24° × 18° |
| F/# | 1.4 |
| 상 높이 | 10 mm |
| 운용 온도 | -32~50°C |

있는 환경안전성 문제를 원천적으로 차단할 수 있다는 장점이 있다. 또한 대표적인 적외선 렌즈 소재인 게르마늄(Ge)이나 실리콘(Si)과 비교해 온도에 따른 굴절률 변화량(dn/dt)이 매우 작아서 IG5 소재의 렌즈로 적외선 광학계를 구성할 경우, 다른 소재의 렌즈를 사용했을 때보다 온도에 따른 성능 변화가 작다는 장점도 가지고 있다.

따라서 본 논문에서는 IG5 소재만을 사용하여 다양한 소재를 사용함에 따라 발생하는 렌즈의 제작단가 상승 요인을 최소화하고, 온도에 따른 굴절률 변화가 작다는 소재의 장점을 최대한 활용해 자체 비열화(athermalization)가 구현된 적외선 광학계를 설계하고자 한다. 자체 비열화를 구현하기 위해서는 특별한 보정자(compensator) 없이도 모든 운용온도(-32 ~ 50°C)에서 일정 수준 이상의 성능을 발휘할 수 있도록 광학계가 설계되어야 한다.^[5]

일반적으로 구경 조리개(aperture stop)를 광학계의 1면에 설정하면 렌즈들의 직경을 최소화할 수 있으므로 광학계의 단가 하락을 기대할 수 있으나, 원활한 자체 비열화 구현을 위해 수차를 최소화할 수 있는 광학계의 3면에 구경조리개를 설정하였다. 총 4개의 비구면을 사용하여 상온에서의 성능을 최적화하였으며, 특히 광학계의 4면에는 회절비구면을 사용하여 색수차 보정에 사용했다. 설계된 회절면은 계단(step)의 높이가 약 6.2 μm 인 5개의 회절 계단으로 구성되며, 사용 파장대역에서 이론적인 평균 회절효율은 99.6% 이상이다.

그림 1(a)와 같이 쿠크 삼중렌즈(Cooke Triplet)를 변형한 형상으로 광학계를 설계하여, 안정적인 성능 발휘 및 자체 비열화가 가능하도록 하였다. 그림 1(b)~(d)는 설계된 적외선 광학계의 상온에서의 성능을 나타낸다. 기준 공간주파수에서 변조전달함수의 성능은 상온에서 50% 이상이며, 모든 운용온도에서 자오(tangential) 방향의 성능이 20% 이상이 되도록 설계하였다.(그림 1(e)~(f) 참고) 운용목적에 따라 상면 최 외각에서의 왜곡수차는 0.5% 이하로 설계하였으며, 상면의 모든 높이에서 스폿(spot) RMS 크기는 18 μm 이하로 검출기 1픽셀의 크기(25 μm)나 광학계 에어리 디스크(Airy Disk)의 크기(34 μm)보다 작게 설계하였다.

III. 렌즈 가공 및 성능 측정

메니스커스(Meniscus) 렌즈를 PGM 방법으로 가공하면, 렌

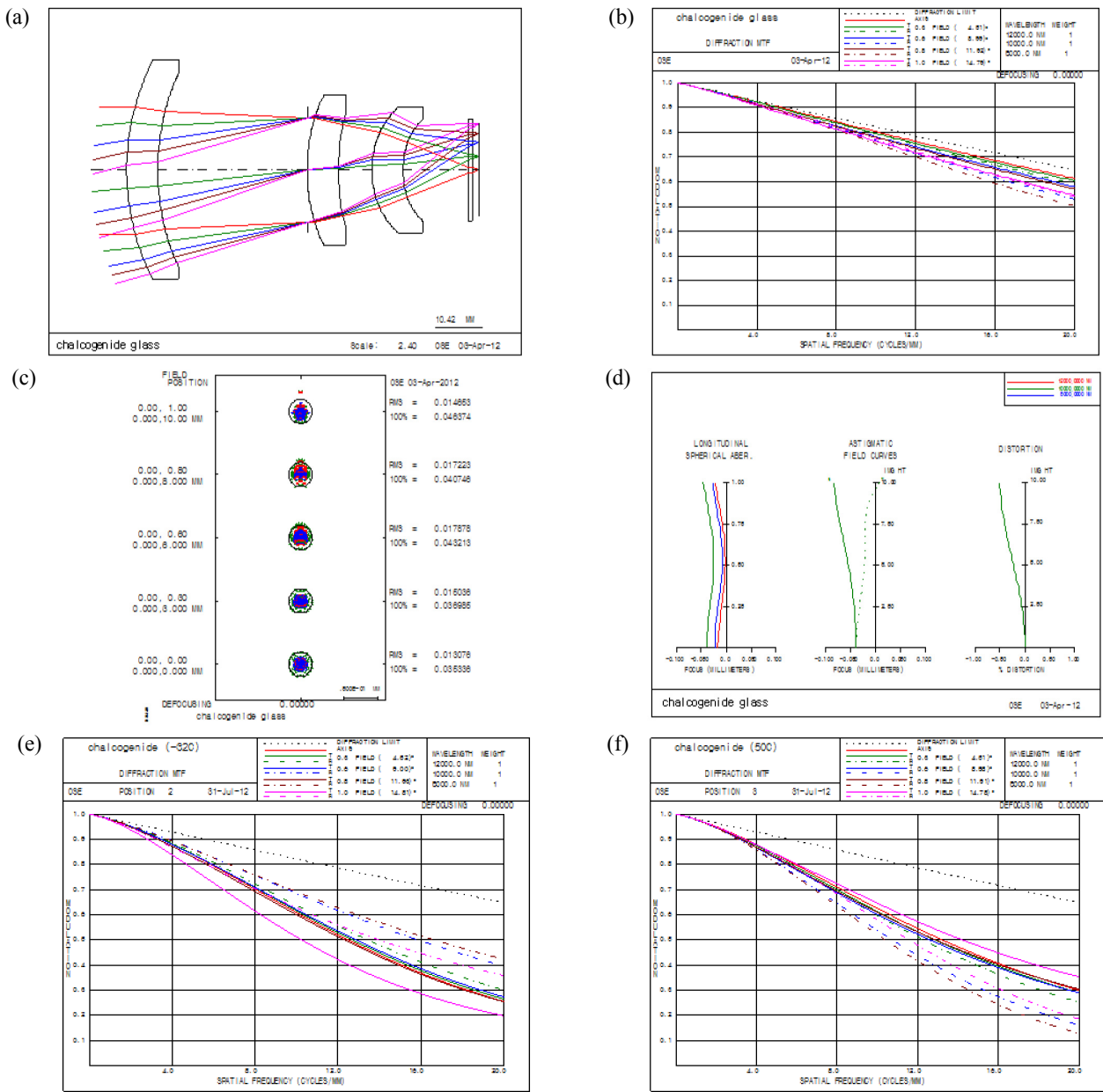


FIG. 1. Design performance of the infrared optical system at 20°C. (a) Layout. (b) MTF plots. (c) Spot diagram. (d) Aberration plots. (e) MTF plots at -32°C. (f) MTF plots at 50°C.

즈의 구조적인 특성 때문에 볼록면과 오목면에서 발생하는 IG5 소재의 퍼짐 현상이 서로 다르게 나타난다. 따라서 PGM 가공 중 렌즈의 깨짐 현상이 발생하기 쉽다. 이를 개선하고자 양 면이 구면으로 구성된 프리폼(Preform) 렌즈를 제작하여 PGM 가공에 사용하였다. 프리폼 렌즈는 PGM 가공 시 발생할 수 있는 금형 코어(Molding Core)와의 빈 공간(air gab)을 방지할 수 있는 최적의 형상을 가지고 있으며, 목표 렌즈와 체적이 동일하도록 설계하였다.

PGM 방법으로 가공한 렌즈의 성능을 확인하기 위해 SPDT 방법으로도 렌즈를 가공하였으며, 표 2는 각각의 방법으로 가공한 렌즈에 적용된 제작공차를 나타낸다. 렌즈 면의 제작

공차로 구면에는 불균일도를, 비구면에는 형상정밀도를 각각 적용하였으며, 그림 2는 측정된 비구면의 형상정밀도를 나타낸다. 3개의 렌즈 중 직경이 작은 2개는 렌즈의 가공 방법과 무관하게 제작공차의 크기가 비슷하나, 직경이 가장 큰 렌즈는 PGM 가공 렌즈의 제작공차가 SPDT 가공 렌즈에 비해 큰 것을 확인할 수 있다. 따라서 PGM 가공 렌즈로 구성된 광학계는 SPDT 가공 렌즈 광학계에 비해 상대적으로 광학적 성능이 떨어질 것으로 예상된다.

IG5 소재의 경우 사용 파장대역에서 60% 정도의 투과율을 가지므로, 투과율 향상을 위해 렌즈의 양 면에 비반사(Anti-Reflection) 코팅을 적용한다. 본 논문에서는 목적에 따라 2

TABLE 2. Fabrication tolerances for PGM and SPDT

| | 직경 47 mm | | 직경 32 mm | | 직경 27 mm | | 비고 |
|------------------------|----------|-------|----------|-------|----------|---------|-------|
| | PGM | SPDT | PGM | SPDT | PGM | SPDT | |
| 외경(%) | 0.1 | 0.1 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | |
| 두께(%) | 0.4 | 0.4 | 0.7 | 0.7 | 0.3 | 0.3 | |
| 곡률반경(fringe) | 8/24 | 8/6 | 7/12 | 6/12 | 9/6 | 9/6 | R1/R2 |
| 불균일도(fringe) | 4/- | 1/- | -/1 | -/1 | -/- | -/- | |
| 형상정밀도(μm) | -/1.0 | -/0.5 | 0.6/- | 0.5/- | 0.5/0.5 | 0.5/0.5 | |

TABLE 3. Durability requirements for anti-reflection coatings. The D-AR has three requirements more than the BBAR as durability of the D-AR is better than the BBAR

| 시험 항목 | | D-AR | BBAR |
|-------------|---------------------------|------|------|
| MIL F 48616 | Humidity | pass | pass |
| | Temperature | pass | pass |
| | Adhesion | pass | pass |
| | Solubility & Cleanability | pass | pass |
| | Moderate abrasion | pass | pass |
| | Severe abrasion | pass | - |
| MIL STD 810 | Salt spray fog | pass | - |
| | 10 day Humidity | pass | - |

가지 종류의 비반사 코팅을 설계하여 사용하였는데, 외부에 노출되는 면에는 코팅박막의 환경내구성을 증가시킨 D-AR(Durable Anti-Reflection) 코팅을, 그 이외의 면에는 사용 파장대역의 평균 투과율을 최대로 증가시킨 BBAR(Broad Band Anti-Reflection) 코팅을 적용하였다. 2가지 종류의 코팅 모두 이온빔 보조 증착(ion-beam assisted deposition) 방법을 사용하여 제작하였으며, 미국의 국방규격인 MIL F 48616과 MIL STD 810을 적용하여 코팅의 환경내구성 평가를 수행하였다. 표 3은 적용된 환경내구성 시험 항목과 수행한 시험 결과를 나타내며, 그림 3은 코팅의 종류에 따른 사용 파장대역의 투과율과 반사율을 나타낸다. 투과율 및 반사율 측정에는 직경 25 mm, 두께 1 mm의 시편을 사용하였으며, 사용 파장대역의 평균 투과율과 평균 반사율은 각각 D-AR이 93.2% 이상, 3.9% 이하, BBAR이 96.9% 이상, 0.5% 이하로 측정되었다.

그림 4는 제작이 완료된 PGM 가공 렌즈들의 실제 형상이며, 이들의 성능 평가를 위해 광학계의 변조전달함수 측정 및 최종 영상을 촬영하였다. 슬릿 주사방식의 측정장비를 사용하여 광학계의 광축에 대한 변조전달함수의 성능을 확인하였으며, 평가의 신뢰성 향상을 위해 SPDT 가공 렌즈들도 동일한 조건으로 시험을 진행하여 그 결과를 비교 분석하였다. 측정된 변조전달함수의 성능은 PGM 가공 렌즈 광학계보다 SPDT 가공 렌즈 광학계가 좋았으나, 그 차이는 그리 크지 않아 기준 공간주파수를 기준으로 할 때 두 광학계의 성능차이가 5% 이내임을 확인할 수 있었다.(그림 5 참고) 또

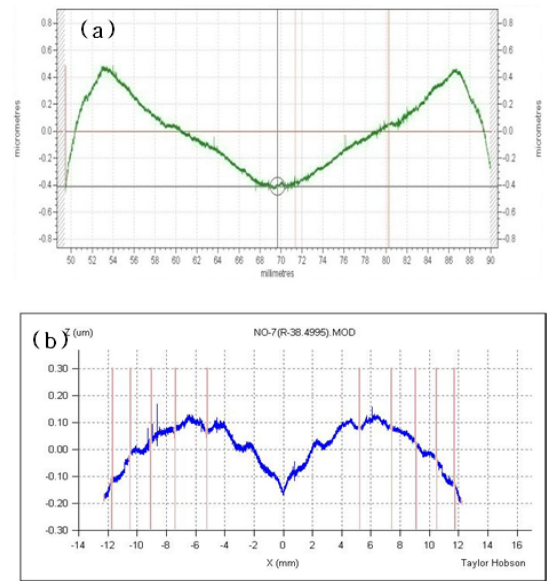


FIG. 2. Figure accuracy of an aspheric surface of the PGM lenses. (a) Aspheric surface of diameter 47 mm (b) Aspherodiffractive surface of diameter 27 mm.

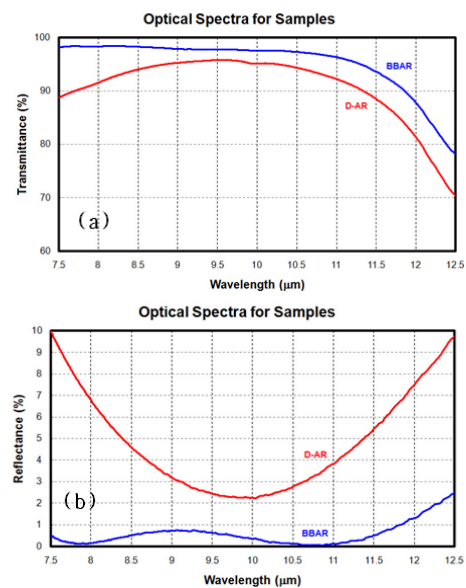


FIG. 3. Performance of the anti-reflection coatings. (a) Transmittance average of the D-AR and the BBAR. (b) Reflectance average of the D-AR and the BBAR.

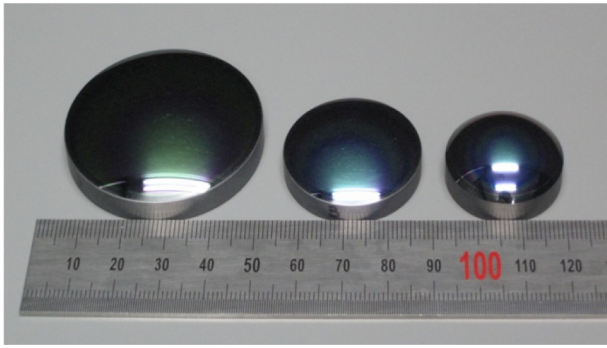


FIG. 4. Molded aspheric and aspherodiffractive lenses.

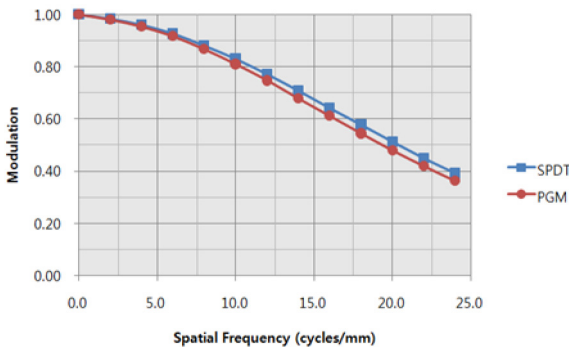


FIG. 5. Measured MTF plots of the infrared optical systems by using PGM and SPDT.

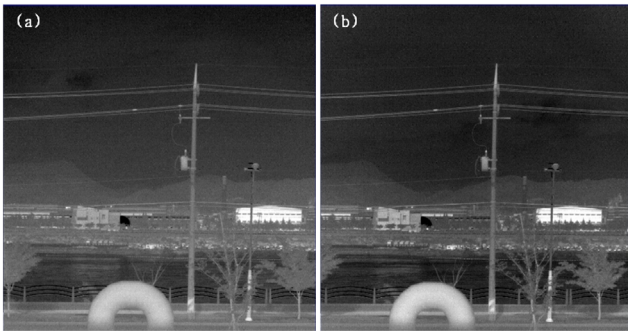


FIG. 6. Comparison of two images. (a) PGM. (b) SPDT.

한 두 개의 광학계로 실제 외부 영상을 촬영하여 비교한 결과, 촬영된 영상의 차이를 육안으로 판별하기는 쉽지 않음을 확인할 수 있었다.(그림 6 참고) 따라서 직경이 가장 큰 렌즈에 적용된, 가공 방법에 따른 제작공차 차이에 의해 발생하

는 광학계의 성능 변화는 우려할만한 양이 아닌 것을 확인할 수 있었다.

IV. 결 론

본 논문에서는 칼코게나이드 유리 소재인 IG5를 사용하여 적외선 광학계를 설계하였으며, PGM 방법으로 렌즈를 가공한 후 성능을 측정하였다. 설계된 광학계의 성능을 최대한 향상시키기 위해 비구면 3개와 회절비구면 1개를 사용하였으며, 자체 비열화를 구현하여 보정자가 없어도 모든 운용 온도에서 일정 수준 이상의 성능을 발휘할 수 있도록 설계하였다. PGM 가공의 정밀도 향상을 위해 프리폼 렌즈를 선제작하여 사용하였으며, PGM 가공 렌즈의 광학적 성능을 확인하기 위하여 동일한 렌즈를 기존의 가공법인 SPDT 방법으로도 제작하였다. 제작된 렌즈의 양면에는 BBAR 코팅을 적용하여 효과적으로 렌즈의 투과율을 증가시켰으며, 외부에 노출되는 면에는 환경내구성의 증가를 위해 BBAR 코팅이 아닌 D-AR 코팅을 적용하였다. PGM 가공 렌즈와 SPDT 가공 렌즈로 구성된 광학계의 변조전달함수 측정 데이터와 촬영된 영상을 비교한 결과, PGM 가공 렌즈와 SPDT 가공 렌즈에 적용된 제작 공차의 차이에 의한 성능 변화는 그리 크지 않음을 확인할 수 있었다. 따라서 향후 다양한 목적의 적외선 광학계에 PGM 가공 렌즈를 사용하면, SPDT 가공 렌즈와 비교해 큰 성능 차이가 없으면서도 저렴한 적외선 광학계의 제작이 가능할 것으로 기대된다.

References

1. Y. Guimond, J. Franks, and Y. Bellec, "Comparison of performances between GASIR moulded optics and existing IR optics," Proc. SPIE **5406**, 114 (2004).
2. Y. Guimond and Y. Bellec, "High precision IR moulded lenses," Proc. SPIE **5252**, 103 (2004).
3. R. Hilton Sr., "Development of chalcogenide glasses as optical materials for infrared systems," Proc. SPIE **5786**, 258 (2005).
4. G. Cogburn, A. Symmons, and L. Mertus, "Molding aspheric lenses for low-cost production versus diamond turned lenses," Proc. SPIE **7660**, 766020 (2010).
5. W. J. Smith, *Modern Optical Engineering*, 3rd ed. (McGraw Hill, New York, USA, 2007), Chapter 12.