https://doi.org/10.7735/ksmte.2026.35.5.448

J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng.
ISSN 2508-5107(Online)

Check for updates

회절 비구면을 이용한 차량탑재용 LWIR 광학계 설계 및 비열화 특성 분석

최영수[a], 차두환[b], 이성현[c,*]

Design of Vehicle-Mounted LWIR Optical System Using Diffractive Aspheric Lens and Analysis of Its Athermal Characteristics

Young-Soo Choi[a], Duhwan Cha[b], Sunghyun Lee[c,*]

[a] Department of Mechanical & Automotive engineering, Gwangju University
[b] Department of ANCHOR Project Group, Gwangju University
[c] Department of Smart Manufacturing System, Chosun College of Science & Technology

ARTICLE INFO

Article history:
Received 7 August 2026
Revised 1 October 2026
Accepted 7 October 2026

Keywords:
Infrared optics
Chalcogenide glass optics
Diffractive-aspheric optics
Athermalization
Vehicle-mounted LWIR

ABSTRACT

This study presents the design and analysis of a vehicle-mounted long-wave infrared optical system for a 640 × 480 uncooled detector with a 12 μm pixel pitch. To improve manufacturability and cost efficiency, the optical system was configured with two chalcogenide glass lenses, providing a field of view of 42° × 31.2°, an F-number of 1.09, and an effective focal length of 10.7 mm. The optimized design satisfied the required optical performance, including distortion below |15|%, while maintaining adequate MTF and relative illumination over the full field of view. Athermal performance over the temperature range from -20°C to 60°C was achieved by employing IRG26($As_{40}Se_{60}$) and balancing the temperature-dependent focal shifts of the two lenses, demonstrating the feasibility of the proposed system for vehicle thermal imaging applications.

1. 서 론

Long-Wavelength Infrared (LWIR) 열영상 카메라는 대상체가 방출하는 적외선 복사 에너지를 영상 신호로 변환하여 가시광 조건과 무관하게 물체를 식별할 수 있는 장치이다. 이러한 특성 때문에 야간 감시, 안전 진단, 국방, 차량 보조 시스템 등 다양한 분야에서 활용 범위가 확대되고 있다. 특히 자동차 분야에서는 저조도 환경이나 악천후 상황에서 보행자 및 생체 객체를 검출하기 위한 수단으로 차량용 열영상 시스템의 중요성이 지속적으로 커지고 있다. 최근에는 자율주행 및 첨단 운전자 보조 시스템의 고도화와 함께 차량 전·후방 인지를 위한 열영상 센서 수요가 빠르게 증가하고 있다. 비냉각형 검출기는 냉각형 소자 대비 경제성이 우수하고 운용성이 높아 민수 분야 적용에 유리하지만, 영상 잡음 특성으로 인해 광학계 설계 시 낮은 F/# 확보가 요구된다. 또한 장파장 적외선 영역에서 사용하는 기존 렌즈는 게르마늄, ZnSe 등 특수 소재를 정밀 가공하여 제작하는 경우가 많아 부품 단가가 높다. 이에 따라 최근에는 대량 생산에 적합하고 제조 비용 절감 효과가 기대되는 칼코겐 유리 기반 성형 렌즈가 적외선 광학 부품의 대안으로 주목받고 있다[1, 2].

기존 연구는 주로 결정질 적외선 재료를 중심으로 수행된 반면, 본 연구에서는 칼코겐 유리를 적용한 차량용 장파장 적외선 광학계를 대상으로 설계와 성능을 검토하였다[3-6]. 특히 수평시야각 42° 광시야 조건에서 왜곡을 |15| %이하로 억제하고, 온도 변화에 대한 초점 이동을 최소화할 수 있는 고정초점형 구조를 구현하는 데 초

* Corresponding author. Tel.: +82-62-230-8255
E-mail address: leepro@cst.ac.kr (Sunghyun Lee).

Table 1 Optical requirements for an optical system

Parameters		Requirements
Detector		640 × 480, 12 μm
Spectral range		8.0~12.0 μm
F-number		≤ 1.1
Field of view		42.0° × 31.2°
MTF @42 lp/mm	(Center)	≥ 0.40
	(HFOV)	≥ 0.35
Distortion		≤ |15| %
Relative illumination		≥ 90.0 %
Athermalization (-20°C ~ +60°C)		≥ 0.3 MTF@42 lp/mm (FOV 0° ~ 53.3°)

점을 두었다.

2. LWIR 열영상카메라 광학계 설계

차량용 열영상 시스템에 적용하기 위한 광학계의 목표 사양을 Table 1에 정리하였다. 비냉각형 검출기의 특성을 고려할 때 F/#는 시스템 감도 및 영상 품질에 직접적인 영향을 미치므로, 설계 과정에서는 이를 우선적인 제약 조건으로 반영하였다. 본 연구에서 사용한 검출기는 640 × 480 해상도와 12 μm 픽셀 피치를 가지며, 에어리 디스크와 MRTD 특성을 함께 고려하여 광학계의 F/#를 1.09로 설정하였다[7].

적외선 렌즈 재료로는 열광학 계수가 낮아 온도 변화에 대한 초점 안정성 확보에 유리한 칼코겐 유리를 채택하였다. 특히 상용 소재 중 열 특성이 우수한 Schott사의 IRG26($As_{40}Se_{60}$)를 선택함으로써 차량 외부 장착 환경에서 요구되는 온도 안정성을 확보하고자 하였다. IRG26 소재의 굴절률온도계수(dn/dT)는 온도 -50~75°C, 파장 10.6 μm에서 32.2 × 10^{-6}/K로 비교적 낮은 값을 갖는다.

칼코겐 유리는 높은 분산 특성을 갖기 때문에 단순 굴절계만으로는 색수차 억제가 어렵기 때문에 이를 보완하기 위해 본 광학계에서는 회절 특성을 갖는 비구면 요소를 도입하였다. 회절면은 굴절 소자의 양의 분산과 상반되는 분산 거동을 제공하므로, 복수 재료 조합 없이도 파장별 초점 편차를 완화하는 데 효과적이다.

이에 따라 설계식에는 비구면 항과 함께 회절 Optical Path Difference (OPD) 함수를 포함하여 최적화를 수행하였다. 최종 설계된 광학계는 Fig. 1과 같이 2매 렌즈 구조를 기반으로 설계되었으며, 최적화 설계된 광학계의 주요 설계 제원을 Table 2에 나타냈다. 전 시야 범위에서 왜곡 제어와 온도 안정성 확보를 동시에 만족하도록 각 면의 형상을 최적화하였다. 모든 면에는 비구면 형상을 적용하였고, 제2렌즈의 볼록면(5번 면)에는 키노폼 기반 회절

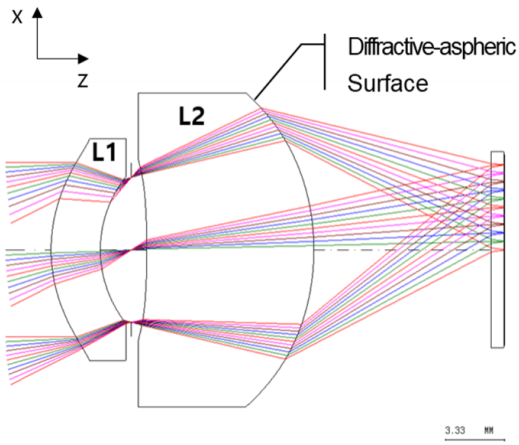


Fig. 1 Layout of the optimized optical system

Table 2 Design data of an optimized optical system

Surface	Radius (mm)	Thickness (mm)	Material
1. Lens1	8.8	2.8	IRG26
2.	6.6	1.8	
3. STO	Infinity	0.9	
4. Lens2	-55.8	9.5	IRG26
5.	-13.1	10.0	
6.	Infinity	0.73	Si

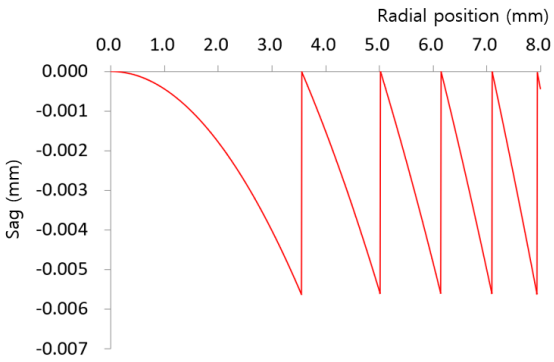


Fig. 2 Sag of the diffractive kinoform on surface no. 5

구조를 부가하여 수차 보정 성능을 향상시켰다. 또한 Fig. 2는 5번 면에 적용된 회절구조에 의한 Sag 형상이고, Table 3은 회절링 수와 깊이를 나타낸 것으로 중심 파장, 렌즈 직경, 재료 굴절률을 기준으로 식(1)과 식(2)와 같이 정의된다.

$$N = \left(\frac{1}{\lambda_0}\right)\sum C_n r_{\max}^{2n} = \frac{D^2}{8\lambda_0 f_0} \tag{1}$$

$$Depth = \frac{\lambda_0}{n_0 - 1} \tag{2}$$

여기서, λ_0는 중심파장, D는 유효직경, f_0는 회절면 초점거리, n_0

Table 3 Specification of the diffractive kinoform on surface no. 5

Refractive index [$n_{10\mu m}$]	Clear aperture (mm)	Depth (μm)	Number of rings
2.7781	15.96	5.63	5.09

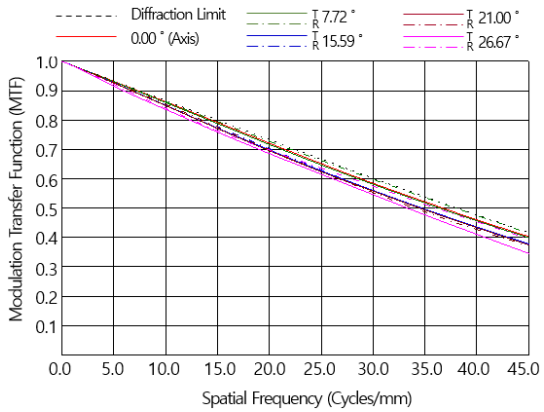


Fig. 3 MTF chart of the optimized optical system

는 중심파장에서 소재 굴절률이다.

3. 결과 및 고찰

설계 결과를 확인하기 위해 최적화 광학계의 다양한 광학성능 파라미터 및 비열화 성능을 분석하여 목표사양을 만족하는지 확인하였다.

3.1 해상도, 광학왜곡 및 주변광량비 성능 분석

설계 결과는 해상도, 광학왜곡 및 주변광량비를 기준으로 평가하였다. Modulation Transfer Function (MTF)는 광학계의 해상도를 평가하기 위한 기준으로 활용되는 항목으로서, 식 (3)과 같이 정의된다.

$$MTF(\nu)=\frac{M_i(\nu)}{M_o(\nu)}=\mid OTF(\nu)\mid,\ M(\nu)=\frac{I_{\max}(\nu)-I_{\min}(\nu)}{I_{\max}(\nu)+I_{\min}(\nu)} \quad (3)$$

여기서, ν는 공간주파수, I_{max}는 최대광도, I_{min}은 최소광도이다. Fig. 3은 20°C의 상온 조건에서 설계된 적외선 광학계에 대해 공간주파수와 반시야각(0.00°, 7.72°, 15.59°, 21.00°, 26.67°) 변화에 따른 MTF 시뮬레이션 결과를 보여준다. 각 곡선은 반시야각별 MTF 특성을 나타내며, 입사각이 증가할수록 광학수차의 영향이 커져 MTF가 점차 감소하는 경향을 확인할 수 있다. 또한 Nyquist 주파수인 42 lp/mm에서 중심 시야의 MTF는 0.46으로 확인되었고, 수평화각 42°에서는 접선 및 sagittal 방향의 MTF가 각각 0.427과 0.433으로 나타나 설계 목표를 충족하였다. Fig. 4는 상높이에 따른 광학왜곡 특성을 나타낸다. 시야각 전 범위에서의 최대값

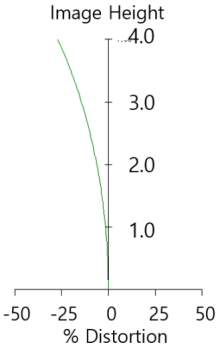


Fig. 4 Optical distortion chart of the optimized optical system

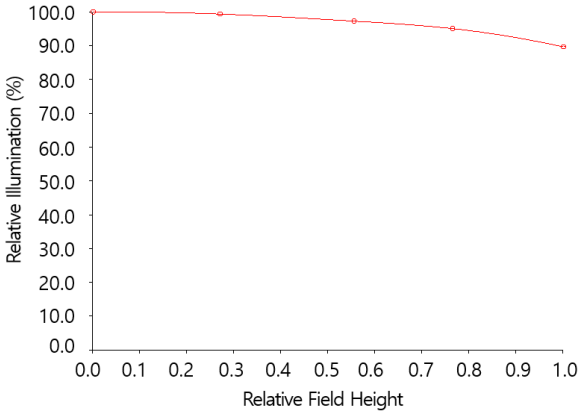


Fig. 5 Relative illumination chart of the optimized optical system

은 -10.8%로 평가되었다. 한편, 주변광량비(relative illumination)는 센서 중심에서의 조도와 임의 영상점에서의 조도를 비교하여 나타내는 지표이며, 식 (4)로 정의된다.

$$RI=\frac{E_\theta}{E_0} \quad (4)$$

여기서, E_0는 센서 중심점의 조도이고 E_θ는 물체 영역에서 반시야각 θ로 입사한 광선이 형성하는 영상점의 조도를 의미한다. Fig. 5의 주변광량비 분석 결과, 시야각 전 범위에서 90.2% 이상의 값을 나타내었다.

3.2 비열화(Athermalization) 성능 분석

적외선 광학 재료는 일반적인 가시광용 산화물 유리에 비해 높은 굴절률을 가져 소형화 및 고개구 설계에 유리하지만, 온도 변화에 따른 굴절률 변동과 열팽창의 영향이 커 광학 성능이 민감하게 달라질 수 있다. 특히 고정 초점형 적외선 광학계에서는 이러한 열적 영향이 주로 디포커스의 형태로 나타나며, 이를 효과적으로 억제하기 위해서는 광학 재료와 기구 재료의 열물성을 동시에 고려한 수동 광학식 비열화(passive optical athermalization) 설계

Table 4 Material properties of the materials used in the optical system

Element	Material	Refractive index [$n_{10\mu m}$]	Abbe number [$V_{8\text{-}12\mu m}$]	α [x10^{-6}/K]	$dn/dT_{10\mu m}$ [x10^{-6}/K]
Lens	IRG26	2.7781	161	20.8	32.2
Housing	Aluminum (AL6061)	-	-	26.3	-

Table 5 Focal shift of individual lenses in the optical system with temperature

Lens	Material	EFL(mm) @20ºC	$(dn/dT)/(n-1)$ [x10^{-6}/K]	df_r/dT [mm/K]
L1	IRG26	-20.546	18.11	-0.000055
L2	IRG26	8.304	18.11	0.000022

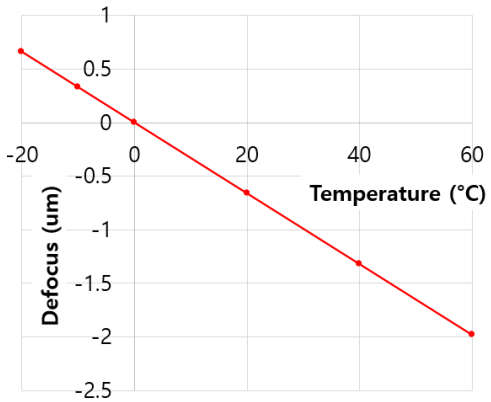
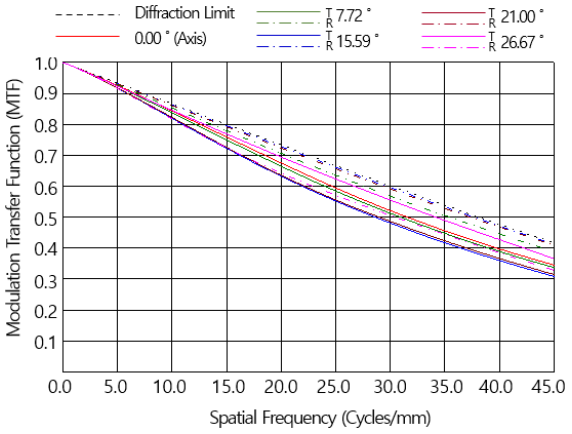
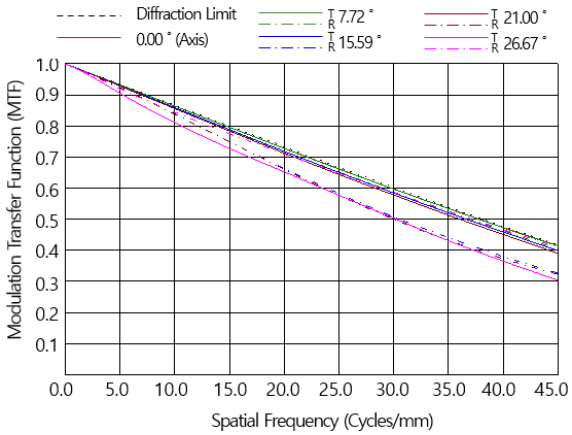


Fig. 6 Thermal defocus of the optimized optical system

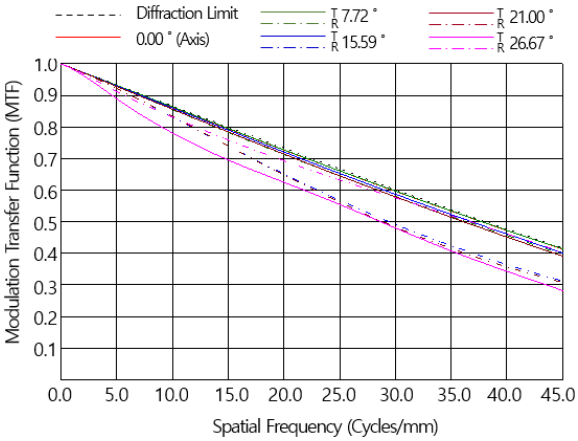
가 중요하다. 선행연구에서도 기계적 구동을 수반하는 능동 보정보다, 고정 유효초점거리를 갖는 적외선 목적계에서는 재료 선택과 광학 파워 배분을 통한 수동 비열화 방식이 구조 단순화와 소형화 측면에서 더 적합하다고 보고하고 있다[8]. 이러한 관점에서 본 연구에서는 설계에 적용된 렌즈 및 기구 재료의 열물성치를 Table 4에 정리하고, 온도 변화에 따른 각 렌즈의 초점거리 변동을 분석하였다. 얇은 렌즈 근사에서 초점거리 변화는 재료의 열팽창계수와 dn/dT, 즉 온도에 따른 굴절률 변화의 복합 효과로 설명될 수 있다. 칼코겐계 유리에 대한 선행연구에서는 굴절률과 dn/dT가 조성 및 내부 결합 구조에 따라 유의미하게 달라지며, 열팽창계수(CTE)가 n^{-3}·dn/dT와 밀접한 상관성을 보여 비열화용 재료 선별의 핵심 지표로 활용될 수 있음을 제시하였다. 이는 적외선 광학계의 온도 안정성을 확보하기 위해 단순히 굴절률만이 아니라 dn/dT와 CTE를 함께 고려해야 함을 뒷받침한다[9]. 온도에 따라 발생되는 각 렌즈의 초점거리 변화는 렌즈의 굴절능 변화 및 열팽창 계수에 의한 렌즈 외형 변화로 인해 일어나며, 얇은 렌즈로 가정한 경우 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다[6].



(a) -20ºC



(b) +40ºC



(c) +60ºC

Fig. 7 MTF charts of the optimized optical system in the temperature range of −20ºC~+60ºC

$$\frac{df_r}{dT} = -f_r\left[\frac{dn}{dT}\left(\frac{1}{n-1}\right) - \alpha\right] \quad (5)$$

본 연구에서 설계된 광학계 분석 결과(Table 5), L1과 L2의 초점거리 변화는 온도 변화에 대해 서로 반대 방향으로 나타났으며, 이러한 상쇄 작용으로 인해 시스템 전체의 비초점 성분이 효과적

으로 보정됨을 확인하였다. 또한 각 렌즈의 초점거리 변화량 자체도 전 온도 구간에서 매우 작게 유지되어, 결과적으로 광학계의 열적 민감도가 낮은 수준으로 억제되었다. 이는 수동 광학식 비열화 설계에서 요구되는 전형적인 보상 메커니즘과 일치하며, 온도 변화에 의해 유도되는 초점 이동을 개별 광학요소 간 파워 분배로 완화할 수 있음을 보여준다[8]. 한편, 칼코겐계 유리는 게르마늄 등에 비해 분산이 큰 편이어서 단순 굴절계로는 색수차 제어에 불리할 수 있으나, 회절 비구면을 적용하면 회절면의 음의 분산 특성을 이용해 추가 렌즈 수 증가 없이 색수차를 보정할 수 있다. 최근 연구에서는 이러한 회절 구조가 칼코겐계 유리의 정밀 성형 공정에서도 구현 가능하며, 적절한 성형 조건이 확보될 경우 회절 구조 전사가 충분히 가능하다고 보고하였다. 따라서 회절 비구면의 도입은 단지 광학 성능 향상뿐 아니라, 차량용 LWIR 광학계의 소형화·저비용화·양산 적합성 측면에서도 의미가 있다[10]. 설계된 광학계는 사용 온도 범위인 -20ºC~+60ºC에서 +0.66 μm에서 -1.98 μm의 낮은 비초점량을 보였으며, 이에 대한 결과를 Fig. 6에 제시하였다. 또한 동일 온도 범위에서 수행한 MTF 시뮬레이션 결과(Fig. 7), 전 시야 구간에서 MTF가 0.3 이상으로 유지되어 요구 성능을 만족하였다. 이러한 결과는 Table 4의 재료 열물성치와 Table 5의 초점거리 이동 특성을 함께 반영한 해석에 기반한 것으로, 제안한 광학계가 실제 차량 탑재 환경에서도 안정적인 영상 성능을 유지할 수 있음을 시사한다.

4. 결 론

본 연구에서는 칼코겐유리 기반의 회절 비구면 렌즈를 적용하여 차량용 열화상카메라(640 × 480, 12 μm 비냉각 검출기)에 적합한 장파장 적외선 광학계를 설계하고 그 성능을 분석하였다. 렌즈 구성은 대량생산 시 경제성과 제조 수율을 고려하여 2매 구조로 채택하였다. 설계된 광학계는 42.0º × 31.2º의 시야각을 확보하였으며, 에어리 디스크와 MRTD 특성을 함께 반영하여 F/#는 1.09로 설정하였다. 또한 최적화 과정을 통해 유효초점거리 10.7 mm를 구현하였고, 전체 시야 범위에서 왜곡수차가 |10.8|% 이하가 되도록 설계하였다.

차량 외부에 장착되는 열화상카메라의 운용 환경을 고려하여, 제안한 광학계는 -20ºC~60ºC의 사용 온도 범위에서도 MTF가 0.3 이상 유지되도록 비열화 성능을 확보하였다. 이를 위해 상용 칼코겐 유리 가운데 열광학계수가 비교적 낮은 IRG26($As_{40}Se_{60}$)을 렌즈 재료로 적용하였다. 또한 왜곡수차 요구조건을 만족시키는 동시에 광학적 비열화를 구현하기 위해 두 렌즈 모두 비구면으로 설계하였으며, 색수차 보정을 위해 제2렌즈(L2)에는 회절 비구면 형상을 추가로 도입하였다. 특히 온도 변화에 대해 L1과 L2의 초점거리 변동이 서로 반대 방향으로 나타나도록 설계함으로써, 열적 변화에 의해 발생하는 비초점(defocus)이 상쇄되도록 하였다.

최종적으로 최적화된 적외선 광학계는 해상도(MTF), 광학왜곡, 주변광량비 및 비열화 특성 등 주요 성능 항목에서 모두 요구 사양을 만족하는 것으로 확인되었다. 따라서 본 연구에서 제안한 광학계는 차량용 열화상카메라에 충분히 적용 가능한 설계안으로 판단된다. 다만 본 논문에서 제시한 시뮬레이션 결과의 타당성을 보다 명확히 검증하기 위해서는, 설계 데이터를 기반으로 실제 렌즈를 제작하고 실험적으로 평가하는 후속 연구가 필요하다.

후 기

본 연구는 2026년도 교육부 및 전남광주통합특별시 재원으로 광주 앵커센터의 지원을 받아 수행된 지역성장 인재양성체계(앵커)의 결과입니다. (2026-ANCHOR-05-014)

References

[1] Cha, D. H., Kim, H. J., Hwang, Y., Jeong, J. C., Kim, J. H., 2012, Fabrication of Molded Chalcogenide-Glass Lens for Thermal Imaging Applications, Appl. Opt., 51:23 5649-5656, https://doi.org/10.1364/AO.51.005649.

[2] Lee, N. S., 2024, Study on the Effects of an Insulation Film on the Cooling Process and Filling Properties of Mold Cavities During Partial Compression Molding, J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng., 33:2 113-118, https://doi.org/10.7735/ksmte.2024.33.2.113.

[3] Ok, C. M., Park, S. C., 2014, Design and Analysis of a 10× Optical Zoom System for an LWIR Camera, Journal of the Optical Society of Korea, 18:5 574-581, https://doi.org/10.3807/JOSK.2014.18.5.574.

[4] Chen, J., Su, J., Jin, N., Li, Z., Zhang, X., Zhang, H., Zhou, L., 2017, Design and Tests of a High-Performance Long-Wave Infrared Refractive Thermal Imager: Freeform Lens in Coaxial System, Appl. Sci.-Basel, 7:11 1195, https://doi.org/10.3390/app7111195.

[5] Hong, S. M., Kim, H. S., 2005, Advanced LWIR Thermal Imaging System with a Large Zoom Optics, Korean Journal of Optics and Photonics, 16:4 354-360, https://doi.org/10.3807/KJOP.2005.16.4.354.

[6] Ok, C. M., Kong, H. B., Park, H. W., 2017, Design and Analysis of an Optical System for an Uncooled Thermal-imaging Camera

Using a Hybrid Lens, Korean Journal of Optics and Photonics, 28:5 241-249, https://doi.org/10.3807/KJOP.2017.28.5.241.

[7] Ok, C. M., Lee, H. J., Kim, H. K., 2008, Optimization of a Middle Wavelength Infrared Optical System with Double Magnification, Proceedings of the Optical Society of Korea Conference, 397-398.

[8] Greisukh, G. I., Levin, I. A., Ezhov, E. G., 2022, Design of Ultra-High-Aperture Dual-Range Athermal Infrared Objectives, Photonics, 9:10 742, https://doi.org/10.3390/photonics9100742.

[9] Gleason, B., Richardson, K., Sisken, L., Smith, C., 2016, Refractive Index and Thermo-Optic Coefficients of Ge-As-Se Chalcogenide Glasses, Int. J. Appl. Glass Sci., 7:3 374-383, https://doi.org/10.1111/ijag.12190.

[10] Son, B. R., Kim, J. K., Choi, Y. S., Park, C. S., 2023, Transferability of Diffractive Structure in the Compression Molding of Chalcogenide Glass, Micromachines, 14:2 273, https://doi.org/10.3390/mi14020273.



Young-Soo Choi

Professor in the Department of Mechanical & Automotive engineering Gwangju University. His research interests include microsensors and actuators.

E-mail: memschoi@gwangju.ac.kr



Duhwan Cha

Ph.D. in the Department of ANCHOR Project Group, Gwangju University. His research interests include athermalized optical systems.

E-mail: chadh@gwangju.ac.kr



Sunghyun Lee

Assistant professor in the Department of Smart Manufacturing System, Chosun College of Science & Technology. His research interests include 3D printing, and system health monitoring and assessment.

E-mail: leepro@cst.ac.kr