https://doi.org/10.7735/ksmte.2026.35.5.396

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

Check for updates

온도 의존성 최소화를 위한 카메라 모듈 광학계의 광기구적 비열화 설계

양명수[a], 전용호[a], 이문구[a,*]

Athermal Optomechanical Design of a Camera Module for Minimizing Temperature Dependency

Myoung Soo Yang[a], Yongho Jeon[a], Moon Gu Lee[a,*]

[a] *Department of Mechanical Engineering, Ajou University*

ARTICLE INFO

Article history:
Received 13 August 2026
Revised 20 September 2026
Accepted 22 September 2026

Keywords:
Athermalization
Opto-mechanical integrated design
Focus shift sensitivity
Thermal stability
Modulation transfer function (MTF)
Digital side mirror (DSM)

ABSTRACT

This study presents an optomechanical athermalization design for reducing the temperature-induced focus shifts in a digital side mirror (DSM) camera module. As DSM cameras operate in a wide range of temperatures, thermal changes in plastic lenses and mechanical structures can result in focus drift and image degradation. The focus shift sensitivity was used as a design parameter to mitigate these effects, and a mechanical compensation structure based on the thermal expansion of a holder was implemented. The proposed design maintained stable modulation transfer function performance at 120 lp/mm from -10°C to 60°C. The experimental results confirmed that the focus shift and image degradation were suppressed across a wide temperature range. These results demonstrate that the proposed method can improve the thermal stability of various optical components.

1. 서 론

최근 차량 안전 규제 강화와 자율주행 기술의 발전에 따라 차량 외부 시야 확보를 위한 카메라 기반 센서 시스템의 중요성이 증가하고 있다[1-3]. 특히 Digital Side Mirror (DSM) 카메라 모듈은 기존 광학 미러를 대체하는 장치로서, 소형화 및 경량화와 함께 다양한 환경 조건에서도 안정적인 영상 품질을 유지해야 하는 요구가 있다[1,2]. 이러한 차량용 카메라 모듈은 차량의 운전 환경에 따라 넓은 온도 범위에 노출되며 이에 따른 광학 성능 변화는 시스템 신뢰성에 직접적인 영향을 미치므로, 이 영향을 최소화해야 한다.

온도 변화에 따른 주요 성능 저하 요인 중 하나는 초점 이동(focus shift)이다[4-6]. 온도 변화는 렌즈 재질의 굴절률 변화, 열팽창에 따른 렌즈 형상 변화, 그리고 기구 구조의 열 변형을 유발하며, 이러한 요인들이 복합적으로 작용하여 초점 위치의 변화를 초래한다[4-8]. 특히 플라스틱 렌즈를 포함하는 차량용 카메라 모듈 광학계의 경우, 유리 렌즈 대비 열적 민감도가 커서 온도 변화에 따른 초점 이동 문제가 더욱 두드러지게 나타난다[6-8].

기존의 차량용 광학 시스템에서는 온도 변화에 따른 초점 이동을 보상하기 위해 광학적 비열화(athermalization) 설계 또는 기구적 보상 설계가 각각 적용되어 왔다. 광학적 비열화 설계는 렌즈 재질의 조합과 각 광학 부품별 파워를 조정하여 온도 변화에 따른 초점 이동을 저감하는 방식이다[9-12]. 기구적 보상 설계는 홀더(holder)나 배럴(barrel) 구조의 열팽창 특성을 이용하여 초점 변화를 상쇄하는 접근법이다[13-16]. 그러나 단일 보상 방식만으로는 넓은 온도 범위에서 발생하는 미세한 초점 이동을 효과적으로 억제하는 데 한계가 있다.

* Corresponding author. Tel.: +82-31-219-2338
E-mail address: moongulee@ajou.ac.kr (Moon Gu Lee).

온도 변화 환경에서도 신뢰성 있는 광학계를 구현하기 위해서는, 렌즈와 같은 광학부품의 온도 변화뿐만 아니라, 배럴 혹은 홀더와 같은 기구부품의 온도 변화도 고려하는 통합적 광기구 설계가 필요하다[14,16]. 기존의 설계 방식은 최종 성능 검증에는 유효하나, 설계 단계부터 초점 이동에 지배적인 요소를 식별하거나 설계 방향을 제시하는 데 제한적이었다[9-13].

본 연구에서는 온도 변화에 따른 초점 이동 특성을 정량적으로 평가하기 위한 설계 지표로서 초점 이동 민감도(focus shift sensitivity, FSS)를 정의하고, 이를 광학 보상 설계와 기구 보상 설계를 결합한 광기구적(opto-mechanical) 비열화 설계 기법의 핵심으로 활용하였다. DSM 카메라 모듈에 본 설계 기법을 적용하고, 시뮬레이션 및 실험을 통해 그 유효성을 검증하였다.

2. DSM 카메라의 광기구적 비열화 설계

2.1 온도 민감도와 초점 이동의 물리적 특성

카메라 모듈의 광학 성능은 온도 변화에 따른 두 가지 주요 요인에 의해 영향을 받는다. 첫 번째는 렌즈 재질의 굴절률 변화이고 두 번째는 기구 구조의 열 변형이다[4,5,6,7,8,14]. 이는 영상 해상도 저하 및 광학적 신뢰성 감소의 주요 원인으로 작용한다[4-8].

플라스틱 렌즈는 온도 변화에 따른 굴절률의 온도 계수(dn/dT)가 음의 값을 가진다. 이는 온도가 상승하면 굴절률이 감소함을 의미한다[6,-8]. 광학계의 초점거리(f)와 광학파워 (1/f)는 서로 역수의 관계이다[4,5,13]. 하나의 볼록렌즈에서 굴절률(n)의 크기는 초점거리(f)에 반비례하고, 파워에 비례한다. 저온에서는 굴절률이 커져서 파워가 증가하고 초점거리가 단축되며, 고온에서는 굴절률이 작아져서 파워가 감소하고 초점거리가 늘어난다. 반면 오목렌즈는 동일한 굴절률 변화 특성에 의해 음의 파워 절대값이 감소하는 방향으로 변화한다. 플라스틱 렌즈를 가지는 DSM 카메라와 같은 소형 광학계에서는 미세한 파워 변화도 영상 품질에 큰 영향을 미칠 수 있다.

광학계를 지지하는 배럴, 스페이서, 홀더 등의 재료는 온도 변화에 따라 길이가 변한다. 이 길이 변화 비율을 열팽창계수(coefficient of thermal expansion, CTE)라 한다. 길이 변화는 부품의 원래 길이와 온도 상승에 비례하며, 광학계 렌즈들 사이의 거리를 변화시키고, 특히 후초점거리(back focal length, BFL)의 변화를 유발하여 초점 변화를 가중시킨다[14-16].

따라서 DSM 카메라 모듈의 온도 안정성을 확보하기 위해서는 굴절률 변화에 따른 광학적 변화와 기구 구조물의 열변형에 의한 기구적 변화를 동시에 고려한 통합적인 비열화 설계가 요구된다.

2.2 초점 이동 민감도의 정의와 설계 응용

온도 변화에 따른 초점 이동을 설계 단계에서 정량적으로 평가하기 위해서는 광학계의 온도 민감도를 표현하는 설계 지표가 필요하다[9-13]. 본 연구에서는 초점 이동 민감도(FSS)를 광학적 비열화 설계를 위한 설계 지표로 다음 식 (1)과 같이 정의하였다.

$$FSS \propto \sum_{i=1}^{K} \left(\frac{h_i}{h_1}\right) \varnothing_i (T) \tag{1}$$

여기서 h_1은 광학계에 입사되는 첫 번째 근축광선의 높이이고 h_i는 i번째 렌즈에 입사되는 광선의 높이를 나타낸다. 또한 $\varnothing_i = \frac{1}{EFL_{(i)}}$ 는 i번째 렌즈의 파워이며, K는 렌즈 매수를 나타낸다. $EFL_{(i)}$는 i번째 렌즈의 유효 초점거리(effective focal length)이다.

위 식에 의하면 얇은 렌즈 근축 모델을 기반으로 할 때, 온도 변화에 따른 광학계의 전체 파워 변화는 각 렌즈의 광학 파워와 해당 렌즈를 통과하는 근축 광선 높이의 조합으로 표현될 수 있다[4,5,12,13]. 즉, 광학계 내에서 각 렌즈 요소가 초점 이동에 기여하는 정도는 해당 위치에서의 광선 분포와 렌즈의 광학 파워에 따라 달라지게 된다. 광선의 높이가 큰 영역에 위치한 렌즈일수록 초점 이동에 더 큰 영향을 미치게 된다. 각 렌즈의 광학적 굴절률의 변화가 초점 이동을 초래한다. 식 (1)은 온도 변화에 따른 각 렌즈의 파워 변화와 광선 분포 특성을 동시에 반영할 수 있는 지표로서, 특정 렌즈뿐만 아니라 광학계를 구성하는 모든 렌즈가 초점 이동에 미치는 영향을 통합적으로 분석할 수 있도록 한다.

기존의 온도 안정성 평가는 주로 온도 조건을 반영하여 설계한 후에 초점거리 변화량(ΔBFL)을 결과적으로 비교하는 방식에 의존해 왔다[10,11,14]. 이러한 접근은 설계 결과를 평가하는 데에는 유효하나, 설계 초기 단계에서 초점 이동의 구조적 원인을 분석하거나 설계 방향을 제시하는 데에는 한계를 가진다. 반면 FSS는 광학계를 구성하는 렌즈들의 배열, 종류, 형상과 함께 온도 민감도를 반영한다. 그러므로 렌즈 파워 분포 및 배치를 조정해야 하는 설계 과정에서, 초점 이동을 사전에 예측하고 저감할 수 있는 설계 지표로 활용될 수 있다[9-13].

Fig. 1은 광선 분포에 기반한 FSS 개념을 도식적으로 나타낸 것으로, 광선 높이 분포가 큰 영역에 위치한 플라스틱 렌즈(P4)가 초점 이동에 상대적으로 큰 영향을 미침을 직관적으로 보여준다. 예를 들어 각 렌즈의 파워가 변화하면 각 면에서의 광선 높이(ray height)가 달라지게 되며, 이에 따라 식 (1)의 h_i/h_1항이 변화하게 된다. 식 (1)에 따르면 광선 높이 비율이 증가할수록 각 렌즈 요소의 FSS 기여도가 증가하게 된다. 이에 따라 온도가 낮아져서 렌즈 파워가 증가한 경우에는 초점거리가 더 짧아지는 방향으로 변화하게 된다. 그 결과, 렌즈 파워가 증가한 경우에는 그림의 초록색 광

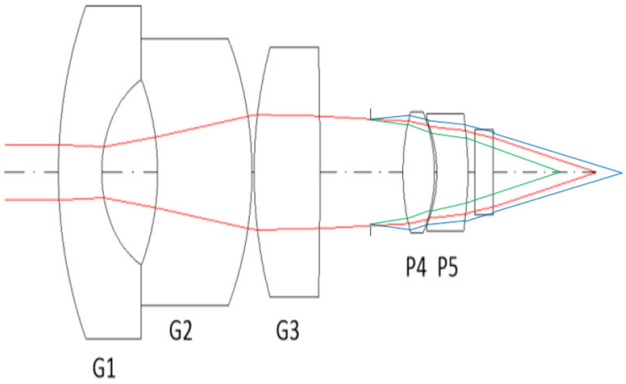


Fig. 1 FSS change due to lens shape and ray height for DSM optics: initial design

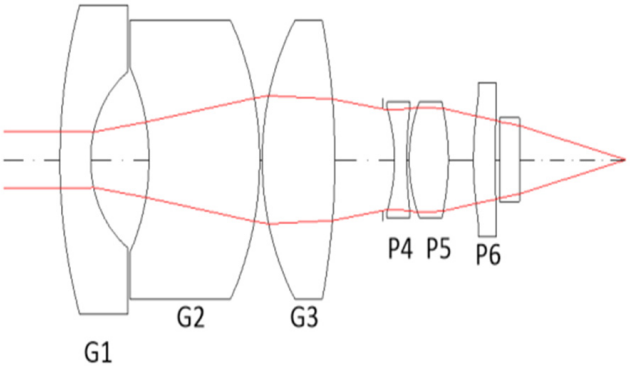


Fig. 2 FSS change due to lens shape and ray height for DSM optics: improved design

선과 같이 광선이 더 강하게 수렴하며 기존 대비 짧은 초점거리를 형성하게 된다. 반대로 온도가 높아져서 렌즈 파워가 감소한 경우에는 파란색 광선과 같이 광선의 수렴 정도가 감소하여 초점 위치가 뒤쪽으로 이동하고, 결과적으로 초점거리가 길어진다.

이 FSS 개념을 실제 DSM 광학계 설계에 적용한다. G1~G3 렌즈는 유리 재질이어서 설계 변경 비용이 크고, 온도 변화에 따른 굴절률 변화 영향 또한 상대적으로 작기 때문에 설계 변경 대상에서 제외하였다. 따라서 온도 변화에 민감한 후단 플라스틱 렌즈군을 중심으로 초점 이동 민감도를 조정하였다.

초기 설계 구조인 Fig. 1의 후단 플라스틱 렌즈군은 P4 및 P5 렌즈로 구성되어 있으며, 해당 영역에서의 광선 높이는 각 렌즈의 광학 파워뿐만 아니라 렌즈 간 거리, 렌즈 두께 및 온도 변화에 따른 굴절률 변화에 의해 복합적으로 결정된다. 또한 P4, P5 렌즈는 전체적으로 (증가, 감소) 형태의 파워 분포를 가지며, 온도 변화에 따른 각 렌즈의 FSS 기여도가 전체적으로 볼록렌즈처럼 작용하게 된다.

이러한 FSS를 본 연구의 정량적 설계 기준으로 적용하기 위해 반복적인 온도 시뮬레이션을 수행하였다. 그 결과, 본 연구 범위에서 FSS가 0.1 이하일 경우 ΔBFL 및 MTF 변화가 안정적으로 억제되는 경향을 확인하였으며, 이에 따라 FSS $\leq$ 0.1을 광학적 비열화 설계의 정량적 목표값으로 설정하였다.

초기 구조에서는 전체 FSS 값이 0에 가깝게 수렴하지 못하여 온도 변화에 따른 초점 이동 민감도가 증가하였으며, 설정한 FSS 0.1 이하의 목표를 만족시키는 데 한계가 있었다. 또한 기존 5매 구조에서는 FSS를 일부 감소시킬 수 있었으나, 수차 보정 및 해상력 확보와 같은 광학 성능까지 동시에 만족시키는 데에는 한계가 존재하였다[9,12,17,18]. 즉, FSS만을 우선적으로 최소화할 경우 온도 변화에 따른 초점 이동은 감소하더라도, 실제 영상 품질 확보로는 충분히 이어지지 않는 한계가 존재하였다.

이를 개선하기 위하여 추가 P6 렌즈를 삽입하여 기존 5매 구조를 6매 구조로 확장하였다[9,16,18]. 이후 각 렌즈의 광학 파워, 형상, 렌즈 간 거리 및 각 렌즈 요소의 온도 민감도를 종합적으로 조정함으로써, FSS와 광학 성능을 동시에 만족할 수 있는 구조를 도출하였다[9,12,16,18]. Fig. 2는 개선된 설계 구조를 나타낸 것으로, P4 및 P5 렌즈의 형상과 광학 파워를 재구성하고 추가 렌즈 P6를 삽입하였다. 이런 설계로 후단 렌즈군의 파워 분포가 기존 Fig. 1의 (증가, 감소) 구조에서 개선된 Fig. 2의 (감소, 증가, 증가) 구조로 재배치하였다. 특히 추가된 렌즈를 통해 양의 파워를 분산시키고 광선 경로를 보다 안정적으로 제어할 수 있게 되었으며, 결과적으로 온도 변화에 대한 초점 이동 민감도를 감소시키는 동시에 수차 보정 자유도도 향상시킬 수 있었다.

그 결과 식 (1)의 각 항에 대한 기여도가 상호 보상되도록 조절되어 전체 FSS 합이 0에 가깝게 유지되었으며, 최종적으로 목표 수준 이하의 FSS 특성을 확보할 수 있었다. 따라서 개선된 구조에서는 주변 온도 변화에 대한 초점 이동 민감도를 효과적으로 억제함과 동시에 기존 구조 대비 향상된 광학 성능을 확보할 수 있었다.

2.3 광기구적 비열화 설계 방법론

DSM 카메라 모듈에서 광학적 비열화 설계만으로는 기구 구조의 열변형에 의한 초점 이동을 완전히 억제하기 어렵다. [10,11,14-16]. 본 연구에서는 FSS 기반 광학 설계를 통해 먼저 초점 이동 민감도를 저감한 후, 홀더 및 배럴 구조의 축 방향 열팽창을 이용한 기구적 보상을 추가로 적용하였다[14-16]. 온도 변화에 따른 전체 초점 이동은 광학적 요인으로 발생하는 후초점거리 변화(ΔBFL)와 기구 구조의 열팽창 보상 변위(ΔL)의 상대적 차이로 표현할 수 있으며, 비열화 설계의 목표는 다음 관계식을 만족하는 것이다.

$$\Delta BFL - \Delta L \approx 0 \tag{2}$$

Fig. 2의 개선된 광학계에서는 온도 변화에 따라 P4~P6 렌즈의 광학 파워, 굴절률 및 렌즈 조합이 변화하게 되며, 이에 따라 광학

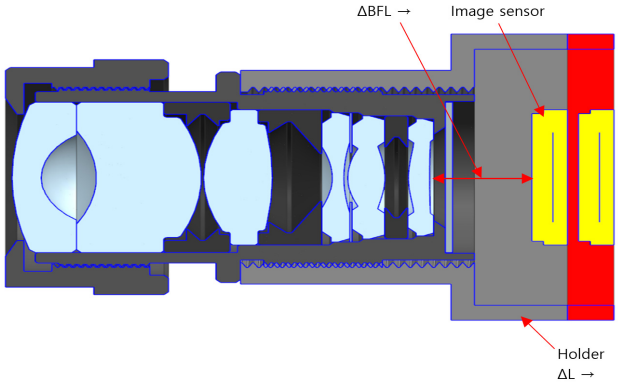


Fig. 3 Thermal compensation structure of DSM optics

계의 ΔBFL 값은 양의 방향으로 증가하게 된다. 그러나 동시에 광학계를 지지하는 홀더 역시 온도 변화에 의해 열팽창이 발생하여 ΔL이 증가하게 된다. 양의 값인 ΔBFL은 센서에 맺는 영상의 초점이 영상 센서보다 멀리서 맺게 하지만, 열팽창에 따른 길이 증가가 있으면 초점이 영상센서 면에 맺히게 된다. 따라서 식 (2)와 같이 광학계의 ΔBFL 변화와 기구물의 ΔL 변화가 상호 보상되도록 설계함으로써, 온도 변화 환경에서도 초점 위치 변화에 대한 비열화가 가능하게 된다. Fig. 3에서 온도 변화에 따른 홀더의 팽창 위치와 방향, 그리고 ΔBFL 변화 구간을 보다 명확하게 나타내기 위해 해당 영역을 강조하여 표현하였다.

광학 설계를 통해 FSS를 최소화하고, 기구 설계를 통해 ΔL이 잔존 초점 이동을 상쇄하도록 설계함으로써, 온도 변화에 따른 전체 초점 이동을 효과적으로 억제할 수 있다. 본 연구에서는 온도 변화에 따른 초점 이동 억제 과정을 광학적 보상 단계와 기구적 보상 단계, 그리고 두 요소의 통합 설계 단계로 구분하여 수행하였다.

광학 설계 단계에서는 렌즈 파워 재배치, 곡률 반경 조정, 중심 두께 최적화 및 비구면 고차항 계수의 균형을 통해 ΔBFL을 최소화한다[9,12,17]. 이 과정은 온도 변화에 대한 광학계

고유의 민감도를 저감시키는 단계로서, 초점 이동의 근본 원인을 설계 단계에서 선제적으로 억제하는 것을 목적으로 한다. 이 과정에서는 전 절에서 논의된 FSS 최소화 기법이 적용되었다. 기존 설계 구조에서 온도 변화에 따른 최대 ΔBFL은 약 0.052 mm였으나, 광학적 비열화 설계를 적용한 결과 약 0.0067 mm까지 감소하였다. 이는 초기 설계 대비 약 87.1% 감소한 결과이며, 초기 설계와 개선 설계의 주요 성능 비교를 Table 1에 나타내었다.

기구 설계 단계에서는 광학 설계를 통해 감소되었으나 여전히 잔존하는 초점 이동을 보상하기 위하여, 센서와 렌즈군 간 상대 거리를 결정하는 홀더 구조의 축방향 열팽창 특성을 적극적으로 활용하였다. 즉, 온도 상승 시 렌즈 파워 감소로 인해 발생하는 초점 후퇴 방향의 ΔBFL과 동일한 방향의 보상 변위가 형성되도록 보상 변위(ΔL)를 의도적으로 형성함으로써, 광학적 잔여 초점 이동을 기구적 변위로 상쇄하는 구조를 구현하였다. 최종 광학-기구 통합 구조에서는 −10°C, 20°C 및 60°C 조건에서 광학적 ΔBFL과 기구적 보상 변위 ΔL이 상호 상쇄되도록 설계하여, 잔여 초점 이동이 0에 가까운 수준으로 유지되도록 하였다.

Table 1 Comparison of initial and improved optical designs

Parameter	Initial design	Improved design	Improvement
Number of lenses	5 elements	6 elements	+1 element
FSS	> 0.1	≤ 0.1	Target satisfied
Maximum ΔBFL	52 μm	6.7 μm	87.1% reduction

3. 실험 및 성능 평가

3.1 실험 구성 및 평가 방법

본 연구에서는 제안된 광학-기구 통합 비열화 설계의 유효성을 검증하기 위해 투영기 기반 초점 이동 측정과 영상 기반 해상도 성능 평가를 수행하였다. 비열화 설계를 적용하여 제작한 DSM 카메라 모듈 광학계를 사용하였으며, 영상 기반 해상도 성능 평가는 ISO 12233을 참고하였다[19]. 자동차 전자장비의 환경시험에 관한 일반적인 시험 원칙은 JASO D 001-94를 참고하였다[20].

온도 조건은 대상 DSM 카메라 모듈의 설계 운용 온도 범위를 고려하여 저온(-10°C), 상온(20°C), 고온(60°C)으로 설정하였다. -10°C와 60°C는 각각 해당 운용 범위의 저온 및 고온 경계조건으로 설정하였으며, 20°C는 상온 기준 조건으로 선정하였다. 이와 같이 저온 및 고온 경계조건과 상온 기준조건을 함께 평가함으로써, 대상 모듈의 설계 운용 범위 내에서 온도 변화에 따른 초점 및 영상 성능의 안정성을 확인하고자 하였다. 모든 측정은 각 온도 조건에서 충분한 열적 안정화 이후 수행되었다. 투영기 기반 실험은 온도 변화에 따른 광학계의 초점 이동 경향을 확인하기 위한 목적으로 수행되었으며, 영상 기반 실험은 DSM 카메라 모듈로 ISO 12233 해상도 차트를 촬영한 영상을 비교하여 온도 변화에 따른 영상 선명도 및 해상도 유지 특성을 정성적으로 평가하였다.

본 연구의 영상 해상도 평가는 ISO 12233에서 제시하는 디지털 카메라의 해상도 및 공간주파수 응답 평가 방법을 참고하였다[19]. ISO 12233은 해상도 평가 방법을 규정하고 있으나, 차량용 DSM 카메라의 특정 공간주파수에 대한 MTF 허용 기준을 직접 제시하지는 않는다. 따라서 본 연구에서는 대상 DSM 카메라 모듈의 설계 요구사양을 기준으로, 적용된 이미지 센서의 사양(1/3.6″, 1920 × 1536 pixel, pixel pitch 2.1 μm)을 고려하여 120 lp/mm, 0.8 field에서 MTF 55% 이상을 성능 목표로 설정하였다. 또한 저온, 상온 및 고온 조건에서 각각 CODE V 해석 결과와 Image Master

측정 결과를 비교하였다.

3.2 투영기 기반 초점 이동 측정

온도 변화에 따른 DSM 카메라 광학계의 초점 이동 특성을 평가하기 위하여 Fig. 4의 개략도와 같이 투영기 기반 측정 실험을 수행하였다. Fig. 5는 실험에서 사용한 투영기 기반 초점 이동 측정 시스템이다. 투영기에서 생성된 패턴 영상이 DSM 카메라 모듈을 통과한 후 투영 스크린 상에 형성된다.

실험에서는 DSM 카메라 모듈이 체결된 투영기의 위치를 조절하여 가장 선명한 상이 형성되는 위치를 확인하였으며, 이를 기준으로 온도 조건별 초점 위치 변화를 측정하였다.

실험은 저온(-10°C), 상온(20°C), 고온(60°C) 조건에서 동일하게 수행하였다. 저온 조건을 만들기 위해서 드라이아이스를 활용하였고 고온 조건을 만족하기 위하여 열풍기를 활용하였다. 드라이 아이스와 열풍기의 파워를 조절하면서 온도를 유지하였다. 각 온도 조건이 약 5~10분간 안정적으로 유지된 이후 측정을 진행하였다. 실험 중 온도 변화는 디지털 온도계를 이용하여 지속적으로 확인하였다. 저온 실험에서는 냉각 온도 유지를 위해 스티로폼 상판을 닫은 상태로 측정을 수행하였으며, 상온 및 고온 조건에서는 공기 순환 및 열 축적 영향을 고려하여 실험을 진행하였다. 이를 통해 온도 조건 이외의 외부 환경 영향을 최소화하고자 하였다.

실제 DSM 카메라 모듈은 홀더 구조의 열팽창 특성이 함께 고려되어야 한다. 그러나 투영기 기반 측정 장비의 구조적 제약으로 인해 홀더를 직접 체결한 상태에서 실험을 수행하기에는 한계가 있었다. 따라서 본 실험에서는 홀더와 동일 재질의 모듈 구조 지그를 광학계 앞에 적용하여 기구적 열변형 특성을 간접적으로 반영하였다.

Fig. 5와 Fig. 6은 상온(20°C) 조건에서의 실험 환경 및 획득 영상을 나타낸다. Fig. 6은 전술한 초점거리의 이동이 거의 없는 광학계와 기구를 설계한 초점 위치에 위치했을 때의 패턴 차트의 이미지이다. 이 이미지가 흐려짐이 없이 명확한 것을 알 수 있다.

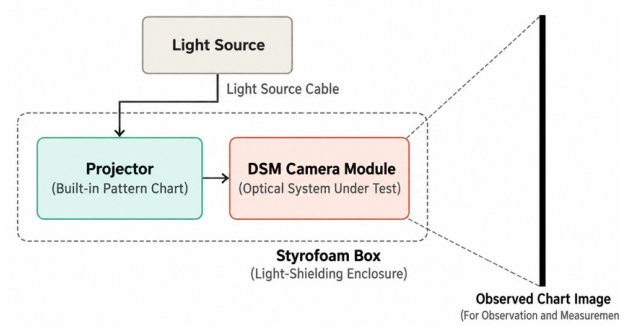


Fig. 4 Schematic of the projector-based focus shift measurement setup

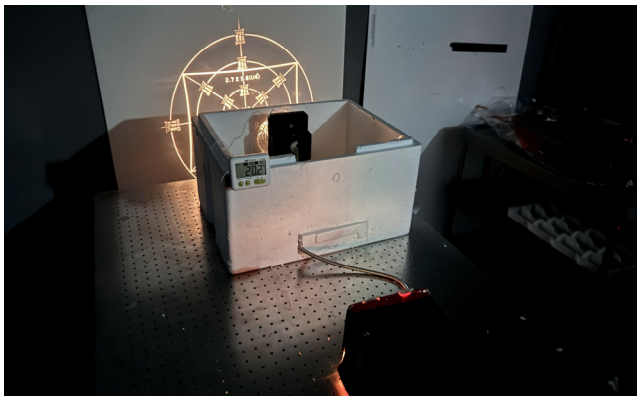


Fig. 5 Experimental setup of the projector-based focus shift measurement (cover opened)

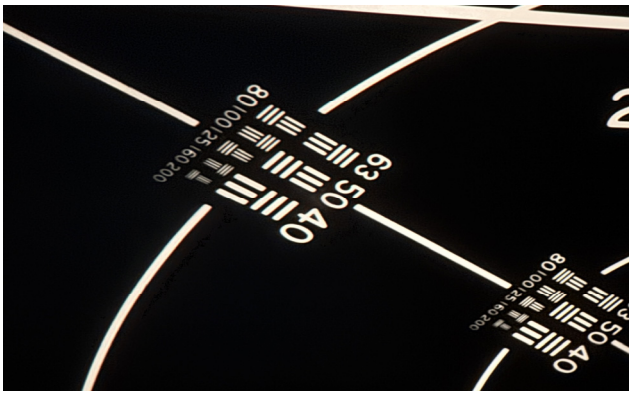


Fig. 6 Example of projected target pattern for qualitative focus stability evaluation

기존 광학계와 비교하여 본 연구의 방법으로 제작한 DSM 카메라 모듈 광학계는 온도 변화 전 구간에서 초점 이동이 효과적으로 억제되는 경향을 보였다. 이는 기구 구조의 축 방향 열팽창 변위가 온도 변화에 따른 광학계의 BFL 변화를 보상하도록 설계되었기 때문이며, 광학 설계만으로는 완전히 억제하기 어려운 잔여 초점 이동을 기구적 보상을 통해 추가로 감소시킬 수 있음을 의미한다.

3.3 영상 기반 해상도 성능 평가

온도 변화에 따른 DSM 카메라 모듈의 영상 기반 해상도 성능을 평가하기 위하여, 각 온도 조건에서 ISO 12233 해상도 차트를 촬영한 영상을 비교·분석하였다. 본 평가는 Image Master와 같은 정량적 MTF 측정 장비를 이용한 분석이 아니라, 실제 DSM 카메라 모듈로 획득한 영상의 시각적 특성을 기반으로 온도 변화에 따른 해상도 안정성을 정성적으로 확인하기 위한 목적으로 수행되었다[19,21].

영상 기반 해상도 평가는 Fig. 7의 실험 구성에서 수행하였다. 실험은 앞서 기술한 온도 환경 조건과 동일하게 저온(-10°C), 상온(20°C), 고온(60°C)에서 진행하였으며, DSM 카메라 모듈을 고정한 상태에서 ISO 12233 해상도 차트를 촬영하여 각 온도 조건별

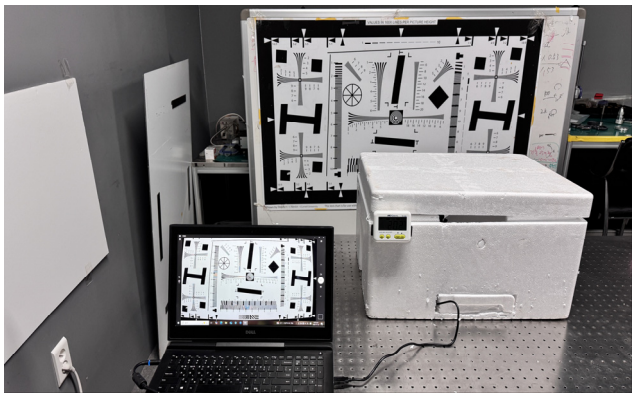


Fig. 7 Experimental setup for image-based resolution evaluation using the DSM camera module

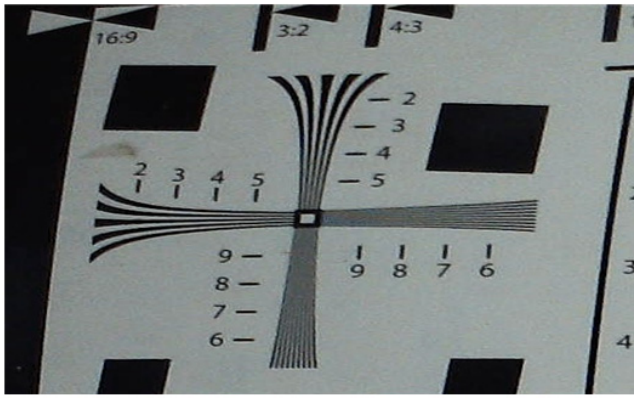


Fig. 8 Representative ISO 12233 resolution chart image captured by DSM camera module for qualitative resolution evaluation

영상을 획득하였다. 촬영된 영상은 동일 조건에서 비교·분석하여 온도 변화에 따른 영상 패턴의 변화 여부를 확인하였다.

각 온도 조건에서 획득한 ISO 12233 차트 영상을 비교하였으며, 대표적인 촬영 영상은 Fig. 8에 나타내었다. 전체 영상과 고해상도 패턴 영역을 확대하여 비교한 결과, 저온(-10°C), 상온(20°C), 고온(60°C) 조건 모두에서 패턴 형태와 엣지 선명도가 전반적으로 유사하게 유지되는 것을 확인하였다. 또한 온도 변화에 따른 뚜렷한 초점 흐림이나 해상력 저하 현상은 관찰되지 않았다.

이 영상은 DSM 카메라 모듈의 출력을 디스플레이에 표시한 뒤 외부 카메라로 재촬영한 영상이므로, 미세한 MTF 변화나 해상력 차이를 정량적으로 비교하는 데에는 한계가 있다. 그러나 모든 온도 조건에서 영상 패턴과 엣지 특성이 안정적으로 유지되었으며, 이를 통해 온도 변화에 따른 초점 위치 변화가 효과적으로 억제되었음을 확인할 수 있었다.

3.4 CODE V 시뮬레이션과 Image Master 측정 비교

광학-기구 통합 비열화 설계의 타당성을 검증하기 위하여, 광학 설계 단계에서 수행한 CODE V 해석 결과와 Image Master를 이용하여 측정한 MTF 결과를 비교하였다. 광학 해석은 CODE V를 이용하여 수행하였으며, 온도 변화에 따른 광학계의 성능 변화 경향을 예측하였다[9,12,16]. Image Master는 광학계의 MTF를 측정하는 광학 성능 측정 시스템이다. 본 연구에서는 Trioptics사의 Image Master® HR을 사용하였다. 장비의 특성상 온도 챔버 내부에서 직접 측정을 수행할 수 없으므로, DSM 카메라 모듈만 각 온도 조건(-10°C, 20°C, 60°C)에서 약 5~10분 동안 충분히 안정화한 후 Image Master로 이동하여 측정을 수행하였다.

Table 2 Comparison of CODE V and Image Master MTF at 120 lp/mm and 0.8 field under different temperatures

Temperature	CODE V MTF (%)	Image Master MTF (%)
-10°C	69.1	62.6
20°C	74.9	68.7
60°C	74.5	67.5

Image Master 측정은 장비의 구조적 제약으로 인해 실제 Holder가 결합된 상태에서 수행하기 어려우므로, 측정된 MTF는 Holder의 영향을 제외한 광학계 자체의 성능을 나타낸다.

측정, 해석 및 비교는 -10°C, 20°C 및 60°C의 모든 온도 조건에서 수행하였다. 전 온도 조건에 대한 정량 비교 결과를 Table 2에 나타내었다. 120 lp/mm, 0.8 field 기준 Image Master MTF는 -10°C, 20°C 및 60°C에서 각각 62.6%, 68.7% 및 67.5%로 나타났으며, 모든 온도 조건에서 설정한 성능 목표인 55% 이상을 만족하였다. 또한 CODE V 해석 결과와 Image Master 측정 결과는 모든 온도 조건에서 유사한 성능 변화 경향을 나타냈다.

이에 따라 중복되는 결과의 제시를 최소화하기 위해 Fig. 9와 Fig. 10에는 대표 조건인 상온(20°C)에서의 CODE V 해석 결과와 Image Master 측정 결과를 제시하였다. 여기서 CODE V의 Real Image Height와 Image Master의 Image Height는 모두 이미지 중심으로부터의 위치를 의미하는 동일한 개념이다.

CODE V 해석 결과에서는 Fig. 9와 같이 이미지 중심부에서 주변부로 이동할수록 MTF가 점진적으로 감소하는 경향을 보였으며, 급격한 성능 저하는 나타나지 않았다. 실제 Image Master 측정 결과에서도 Fig. 10과 같이 중심부에서 가장 높은 MTF를 나타냈으며, 주변부로 갈수록 완만하게 감소하는 경향을 보였다. 따라서 시뮬레이션 결과와 실제 측정 결과는 이미지 높이에 따른 광학 성능 변화 경향에서 유사한 특성을 나타내었다.

실제 측정에서 120 lp/mm 기준 MTF는 중심부에서 약 0.68 수준이었으며, 주변부에서도 안정적 성능 분포를 유지하였다. 또한 반경 방향(sagittal)과 원주 방향(tangential)의 MTF 차가 크게 증가하지 않아, 상온 조건에서 비점수차(astigmatism)에 의한 성능

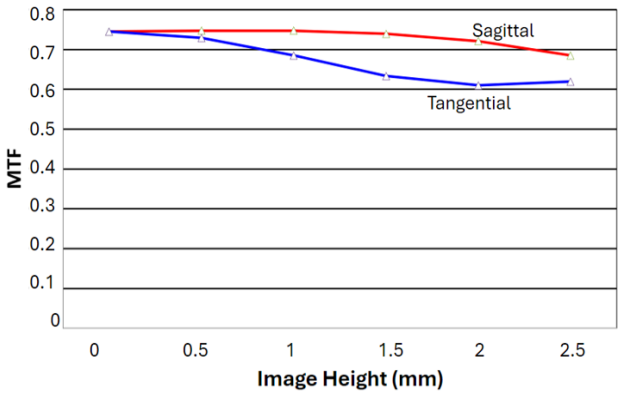


Fig. 9 CODE V simulation result at 20°C (MTF vs image height, 120 lp/mm)

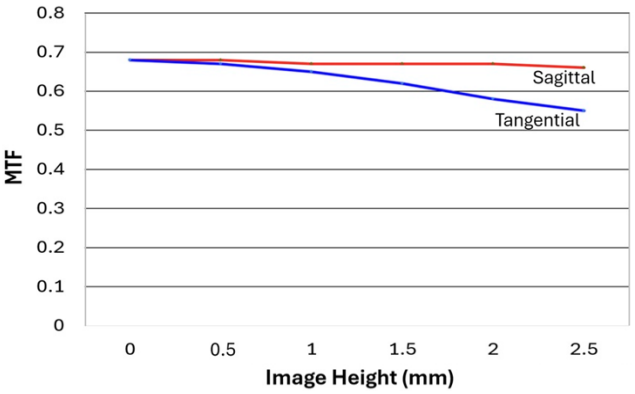


Fig. 10 Image Master measurement result at 20°C (Image-based MTF vs image height, 120 lp/mm)

불균형은 크지 않은 것으로 확인되었다.

따라서 CODE V 해석 결과와 실제 Image Master 측정 결과는 절대적인 MTF 값에서는 일부 차이가 있었으나, 이미지 중심부에서 주변부로 이동함에 따른 MTF 변화 경향은 전반적으로 유사하게 나타났다. 이는 제작된 DSM 카메라 모듈이 CODE V 해석 결과와 유사한 광학 성능 분포를 나타냈으며, 상온 조건에서 중심부와 주변부 모두 안정적인 해상 성능을 확보하였음을 확인한 결과이다. MTF는 공간주파수에 따른 영상 대비 전달 특성을 나타내는 지표로, 광학계의 해상 성능을 정량적으로 평가하는 데 활용된다[22,23].

4. 결 론

본 연구에서는 DSM 카메라 모듈의 온도 변화에 따른 초점 이동을 최소화하기 위해 초점 이동 민감도(FSS)를 기반으로 광학 설계와 기구 설계를 결합한 광기구적 비열화 설계 기법을 제안하였다. 온도 변화에 따른 렌즈의 굴절률 및 형상 변화와 기구 구조의 열변형을 설계 단계에서 함께 고려함으로써 광학계의 온도 민감도를 저감하고자 하였다.

광학 설계 단계에서는 FSS ≤ 0.1을 정량적 설계 목표로 설정하고 렌즈 파워 분포와 광선 경로를 조정하였다. 그 결과 초기 설계에서 약 52 μm였던 최대 ΔBFL은 광학적 비열화 설계 후 약 6.7 μm까지 감소하여 약 87.1%의 개선 효과를 나타냈다. 이후 홀더의 열팽창을 이용한 기구적 보상을 적용하여 잔여 초점 이동을 추가로 상쇄하였다.

성능 평가 결과, 120 lp/mm, 0.8 field 기준 Image Master MTF는 -10°C, 20°C 및 60°C에서 각각 62.6%, 68.7% 및 67.5%로 측정되어 모든 온도 조건에서 설정한 성능 목표인 55% 이상을 만족하였다. 또한 CODE V 해석 결과와 Image Master 측정 결과는 이미지 높이에 따른 MTF 변화 경향에서 전반적으로 유사한 특성을 나타내어, 설계 단계에서 예측한 온도 안정화 특성이 실제 제작된 모듈에서도 유지됨을 확인하였다.

따라서 본 연구에서 제안한 광기구적 비열화 설계 기법은 DSM 카메라 모듈의 온도 변화에 따른 초점 및 해상도 성능 변화를 억제하는 데 유효한 것으로 판단된다. 향후에는 보다 넓은 온도 범위와 장기 고온 환경, 진동 및 충격이 포함된 복합 환경 시험을 수행하고, 플라스틱 렌즈와 기구 구조 사이의 열적 상호작용을 보다 정밀하게 반영한 통합 해석 모델에 대한 추가 연구가 필요하다.

후 기

본 연구는 2026년도 정부(산업통상부)의 재원으로 한국산업기술진흥원(KIAT)의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2026-25569146).

References

[1] Schkreba, A., Pampel, S., Burnett, G., Large, D. R., 2021, Driver Perception Using a Camera-Based Digital Side Mirror: An On-Road Study, Ergonomics and Human Factors, 65:2, 3-10.

[2] Flannagan, M. J., Sivak, M., 2006, Distance Cues and Fields of View in Rear Vision Systems, SAE Technical Paper, 2006-01-0947, https://doi.org/10.4271/2006-01-0947.

[3] UNECE, 2016, Devices for Indirect Vision, Regulation No. 46, Geneva.

[4] Born, M., Wolf, E., 1999, Principles of Optics, 7th ed., Cambridge University Press, Cambridge.

[5] Hecht, E., 2017, Optics, Pearson, 5th ed., New York.

[6] Kasarova, S. N., Sultanova, N. G., Nikolov, I. D., 2010, Temperature Dependence of Refractive Characteristics of

Optical Plastics, J. Phys.: Conf. Ser., 253 012028, https://doi.org/10.1088/1742-6596/253/1/012028.

[7] Sultanova, N., Kasarova, S., Nikolov, I., 2009, Dispersion Properties of Optical Polymers, Acta Phys. Pol. A, 116:4 585-587, https://doi.org/10.12693/APhysPolA.116.585.

[8] Lu, S. H. D., 2010, viewed 30 September 2026, Tutorial for Plastic Optical Materials, University of Arizona, <https://wp.optics.arizona.edu/optomech/wp-content/uploads/sites/53/2016/10/S.H.Lu_Plastic-Optics-Tutorial.pdf>.

[9] Shannon, R. R., 1997, The Art and Science of Optical Design, Cambridge University Press, Cambridge, https://doi.org/10.1017/CBO9780511816529.

[10] Grey, D. S., 1948, Athermalization of Optical Systems, J. Opt. Soc. Am., 38:6 542-546, https://doi.org/10.1364/JOSA.38.000542.

[11] Rogers, P. J., 1991, Athermalization of IR Optical Systems, Proc. SPIE 10260, Infrared Optical Design and Fabrication: A Critical Review, 102600F, https://doi.org/10.1117/12.48455.

[12] Smith, W. J., 2007, Modern Optical Engineering, 4th ed., McGraw-Hill, New York.

[13] Yoder, P. R., Vukobratovich, D., 2015, Opto-Mechanical Systems Design, 4th ed., CRC Press, Boca Raton.

[14] Bayar, M., 1981, Lens Barrel Optomechanical Design Principles, Opt. Eng., 20:2 181-186, https://doi.org/10.1117/12.7972687.

[15] Fischer, R. E., Tadic-Galeb, B., Yoder, P. R., 2008, Optical System Design, 2nd ed., McGraw-Hill, New York.

[16] Greivenkamp, J. E., 2004, Field Guide to Geometrical Optics, SPIE Press, Bellingham, https://doi.org/10.1117/3.547461.

[17] Lee, Y. H., Lee, C. J., Cha, D. H., 2023, Optical Design and Analysis for Automotive Thermal Cameras Using the Chalcogenide-glass Lens, J. Korean Soc. Manuf. Process Eng., 22:6 55-61, https://doi.org/10.14775/ksmpe.2023.22.06.055.

[18] Malacara-Hernández, D., Malacara-Hernández, Z., 2013, Handbook of Optical Design, 3rd ed., CRC Press, Boca Raton.

[19] ISO, 2017, Photography - Electronic Still Picture Imaging - Resolution and Spatial Frequency Responses, ISO 12233:2017, International Organization for Standardization, Geneva.

[20] JSAE, 1994, General Rules of Environmental Testing Methods for Automotive Electronic Equipment, JASO D 001-94, Society of Automotive Engineers of Japan, Inc., Tokyo, Japan.

[21] Hertel, D. W., Chang, E., 2007, Image Quality Standards in Automotive Vision Applications, Proc. 2007 IEEE Intelligent Vehicles Symposium, 404-409, https://doi.org/10.1109/IVS.2007.4290148.

[22] Burns, P. D., 2000, Slanted-Edge MTF for Digital Camera and Scanner Analysis, Proc. IS&T PICS Conf., 135-138.

[23] Williams, C. S., Becklund, O. A., 2002, Introduction to the Optical Transfer Function, SPIE Press, Bellingham, https://doi.org/10.1117/3.2265056.



Myoung Soo Yang
M.Sc. Candidate in the Department of Mechanical Engineering, Ajou University. His research interests include athermal opto-mechanical design of camera module optics for minimizing temperature dependence.
E-mail: msyang@ajou.ac.kr



Yongho Jeon
Professor in the Department of Mechanical Engineering, Ajou University. His research interests include additive manufacturing, welding.
E-mail: princaps@ajou.ac.kr



Moon Gu Lee
Professor in the Department of Mechanical Engineering, Ajou University. His research interests include design and control of high precision positioning systems.
E-mail: moongulee@ajou.ac.kr