



Received: 2024/07/29  
Revised: 2024/08/10  
Accepted: 2024/09/24  
Published: 2024/09/30

**\*Corresponding Author:**

**Jin-Ho Park**

PGM RF & IIR SEEKER R&D Lab, LIG Nex1  
207, Mabuk-ro, Giheung-gu, Yongin-si,  
Gyeonggi-do, Republic of Korea  
Tel: +82-31-326-9208  
Fax: +82-31-326-9007  
E-mail: jhpark80@lignex1.com

**Abstract**

본 논문에서는 중적외선 대역의 냉각형 적외선 검출기를 적용한 적외선 카메라의 출력을 예측하였다. 먼저, 광경(흑체) 온도에 대한 적외선 카메라의 출력 모델을 검증하고, 검증된 적외선 카메라 출력 모델링 기반으로 적외선 창 온도에 따른 적외선 카메라의 출력 전압을 예측하고 실제 측정값과 비교하였다. 적외선 카메라의 출력 예측은 적외선 시스템 설계 시 매우 중요한 과정으로, 이를 통해 시스템에서 요구하는 성능을 만족하기 위한 설계 파라미터를 선정할 수 있다.

This paper simulates the output of Infrared Camera using Mid-Wave Infrared Detector. First, we verify the output model of Infrared Camera for scene(black body) temperature. Based on the verified output model, we simulate the output of Infrared Camera for window temperature. The simulated results are compared with test data measured by the real Infrared Camera. Output simulations of Infrared Camera is an important process when designing Infrared Systems. Design parameters can be selected to satisfy Infrared System performances by output simulations.

**Keywords**

적외선 카메라(Infrared Camera),  
중적외선(MWIR),  
적외선 검출기(Infrared Detector),  
적외선 창(Infrared Window)

**Acknowledgement**

이 논문은 2024년도 한국해군과학기술학회  
하계학술대회 발표 논문임

## 창 온도에 따른 중적외선 카메라 출력 예측 연구

### A Study on Output Simulations of MWIR Camera Depending on Window Temperatures

박진호<sup>1\*</sup>, 박성현<sup>2</sup>, 유연덕<sup>2</sup>, 김홍락<sup>1</sup>

<sup>1</sup>LIG넥스원 PGM탐색기연구소 수석연구원

<sup>2</sup>LIG넥스원 PGM탐색기연구소 선임연구원

Jin-Ho Park<sup>1\*</sup>, Sunghyun Park<sup>2</sup>, Yeondeok Yoo<sup>2</sup>, Hong-Rak Kim<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Chief research engineer, PGM RF & IIR SEEKER R&D Lab, LIG Nex1

<sup>2</sup>Research engineer, PGM RF & IIR SEEKER R&D Lab, LIG Nex1

### 1. 서론

적외선 카메라는 물체에서 방사되는 복사 에너지를 감지하여 영상으로 출력함으로써 사람의 눈으로 식별하기 힘든 것들을 탐지할 수 있다. 이러한 특성으로 군사적인 목적뿐만 아니라 산업, 의료, 소방 등 다양한 분야에 사용되고 있다. 적외선 에너지를 감지하여 전기적 신호로 변환해주는 적외선 검출기는 적외선 카메라의 핵심 부품으로, 크게 냉각형 적외선 검출기와 비냉각형 적외선 검출기로 구분된다. 냉각형 적외선 검출기는 광전효과를 이용해 적외선 에너지를 전기적 신호로 변환하는 검출기로, 적외선 방사에 대한 감도가 매우 좋고 열잡음이 매우 적어 온도 분해능이 뛰어나 원거리 표적 검출에 유리한 장점이 있다. 하지만 가격이 비싸고, 별도의 냉각장치가 필요하기 때문에 카메라의 크기가 커진다는 단점이 있다. 비냉각형 적외선 검출기는 온도 변화에 따라 달라지는 물성(저항, 전압, 전류 등)을 감지하여 적외선 에너지를 전기적 신호로 변환하며, 냉각형 검출기에 비해 온도 분해능은 떨어져 원거리 표적 검출에 불리하지만 가격이 저렴하고 별도의 냉각장치가 필요하지 않기 때문에 소형화가 가능하다는 장점이 있다.

적외선 카메라의 경우 사용 목적 및 운용 환경에 따라 카메라를 보호하기 위한 별도의 하우징 내에 설치되기도 한다. 카메라가 하우징 내에 설치될 경우 적외선 영상 획득을 위해서 카메라의 광학계 전면이 적외선 신호를 투과할 수 있는 재질로 제작된 창을 적용하는 것이 일반적이다. 물체에서 방사되는 복사 에너지를 감지하

는 적외선 카메라의 특성상 적외선 창 의 온도 변화는 카메라의 출력에 영향을 주며 이는 카메라의 영상 성능 저하를 유발할 수 있다.

본 논문에서는 다양한 분야에 넓게 사용되고 있는 중적외선 대역의 냉각형 적외선 검출기를 적용한 적외선 카메라의 출력 전압을 예측하고 실제 적외선 카메라의 측정값과 비교하였다. 또한 사파이어 적외선 창 의 온도 변화에 따른 카메라의 출력 전압을 예측하고 실제 측정값과 비교하여 모델링이 적절하게 수행되었는지 검증하였다.

## 2. 적외선 카메라 출력 예측

### 2.1 적외선 카메라 출력 모델식

적외선 카메라는 광학계를 통하여 표적에서 방사되는 적외선 에너지를 적외선 검출기에 집광하고, 집광된 적외선 에너지는 적외선 검출기를 통해 전기적 신호로 변환된다. 적외선 검출기에서 변환된 적외선 신호는 신호처리보드를 통해 영상으로 구성하고 표준 통신 인터페이스로 출력된다(Fig. 1 참조).

적외선 카메라로 입사된 적외선 복사에너지는 적외선 검출기에서 전기적 신호로 변환된다. 적외선 검출기의 출력 전압( $V_{det}$ )은 식 (1)과 같이 광경 복사에너지로부터 변환된 전압( $V_{scene}$ )과 카메라 내부온도 복사에너지에 의한 전압( $V_{body}$ ), 그리고 적외선 검출기의 offset 전압( $V_{offset}$ )으로 구성된다.

$$V_{det} = V_{scene} + V_{body} + V_{offset} \tag{1}$$

냉각형 적외선 검출기에서는 광전효과를 이용하여 입사된 적외선 에너지를 전기 신호로 변환하며, 전기 신호로 변환된 적외선 검출기의 출력 전압은 식 (2)를 통해 계산할 수 있다[1].

$$V = \frac{\Phi(T) \cdot \rho \cdot q \cdot T_{int}}{C_{int}} \tag{2}$$

여기서,  $\Phi(T)$ 는 온도  $T$ 에서의 적외선 에너지 복사량,  $\rho$ 는 양자효율,  $q$ 는 electron charge,  $T_{int}$ 는 적분 시간,  $C_{int}$ 는 적분 커패시터 용량이다.

온도  $T$ 에서의 적외선 에너지 복사량  $\Phi(T)$ 는 식 (3)과 같이 표현된다[2,3].

$$\Phi(T) = L(T) \cdot \frac{\pi \cdot \tau_{optics} \cdot \tau_{det}}{1 + 4 \cdot (f/\#)^2} \cdot A_d \tag{3}$$

여기서,  $L(T)$ 는 복사휘도,  $\tau_{optics}$ 는 광학계 투과율,  $\tau_{det}$ 는 적외선 검출기 투과율,  $A_d$ 는 적외선 검출기 픽셀 면적,  $f/\#$ 는 적외선 검출기의 f-number이다.

복사휘도  $L(T)$ 는 식 (4)와 같이 적외선 카메라에서 사용하는 파장 대역에 대해 적분하여 계산된다.

$$L(T) = \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} L(\lambda, T) d\lambda \tag{4}$$

여기서,  $L(\lambda, T)$ 는 복사에너지  $M(\lambda, T)$ 로 표현할 수 있으며, 이는 Plank's Radiation Law에 의해 식 (5)와 같이 계산할 수 있다[2,3].

$$L(\lambda, T) = \frac{M(\lambda, T)}{\pi} = \frac{2\pi hc^2}{\pi} \frac{1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{(hc/\lambda kT)} - 1} \tag{5}$$

여기서,  $h$ 는 플랑크 상수로  $6.626 \times 10^{-34}$  [Joule. sec] 이고,  $k$ 는 볼츠만 상수로  $1.3806 \times 10^{-23}$  [Joule/K]이며,  $T$ 는 흑체의 절대온도,  $\lambda$ 는 파장이다.

### 2.2 창 방사 모델식

적외선 카메라의 경우 사용 목적 및 운용 환경에

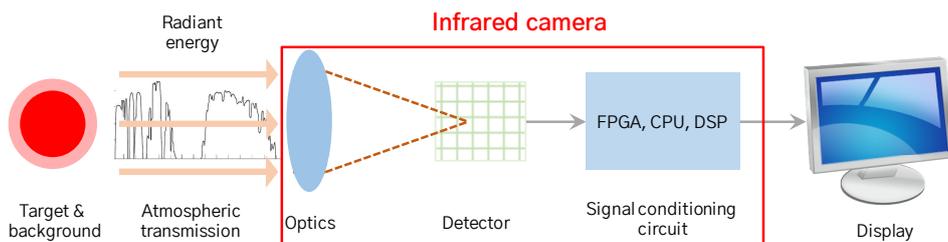


Fig. 1. Functional flow diagram for infrared camera

따라 카메라를 보호하기 위한 별도 하우징 내에 설치되기도 한다. 카메라가 하우징 내에 설치될 경우 적외선 영상을 획득하기 위해서 카메라의 광학계 전면면에 적외선 신호를 투과할 수 있는 재질로 제작된 창을 적용하는 것이 일반적이다. 적외선 창은 온도에 따라 방사율이 변화하며, 이는 적외선 카메라에 잡음으로 작용하여 카메라의 성능을 저하시킨다. 적외선 창의 방사율은 식 (6)과 같이 계산할 수 있다[4].

$$\epsilon_{w/e} = \frac{(1 - R) \cdot (1 - e^{-\alpha_{c/e}(\lambda_1, \lambda_2, T_w)X_w})}{1 - R \cdot e^{-\alpha_{c/e}(\lambda_1, \lambda_2, T_w)X_w}} \quad (6)$$

여기서,  $\alpha_{c/e}$ 는 창의 유효 흡수 계수,  $X_w$ 는 창 두께,  $R$ 은 창의 반사율,  $T_w$ 는 창의 온도,  $\lambda_1$ 은 카메라의 cut-on 파장,  $\lambda_2$ 는 cut-off 파장이다.

창의 유효 흡수 계수는 창의 재질과 창의 온도, 파장대역에 따라 변화하며 식 (7)과 같이 계산할 수 있다.

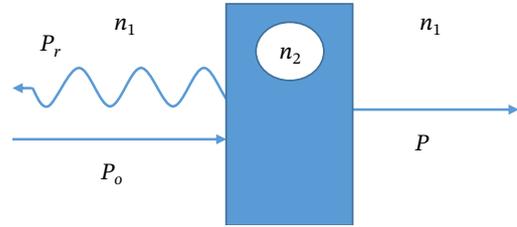
$$\alpha_{c/e}(\lambda_1, \lambda_2, T_w) = \frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \alpha(\lambda, T_w) d\lambda \quad (7)$$

여기서,  $\alpha(\lambda, T_w)$ 는 창의 흡수 계수이며, 중적외선 대역의 대표적인 창 재질인 사파이어 창의 흡수 계수는 Table 1에 나타냈다[5].

**Table 1.** Absorption coefficients of sapphire

Temp. (K)	Wavelength (um)						
	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0
300	0.001	0.007	0.047	0.24	0.96	2.66	6.53
400	0.001	0.008	0.058	0.28	1.13	3.13	7.54
500	0.001	0.011	0.074	0.35	1.36	3.76	8.88
600	0.001	0.015	0.096	0.44	1.65	4.53	10.49
700	0.002	0.019	0.12	0.54	1.99	5.43	12.32
800	0.003	0.025	0.16	0.67	2.39	6.43	14.35
900	0.004	0.033	0.2	0.81	2.83	7.53	16.53
1,000	0.005	0.042	0.24	0.97	3.31	8.72	18.86
1,300	0.01	0.08	0.42	1.58	5.01	12.72	26.51

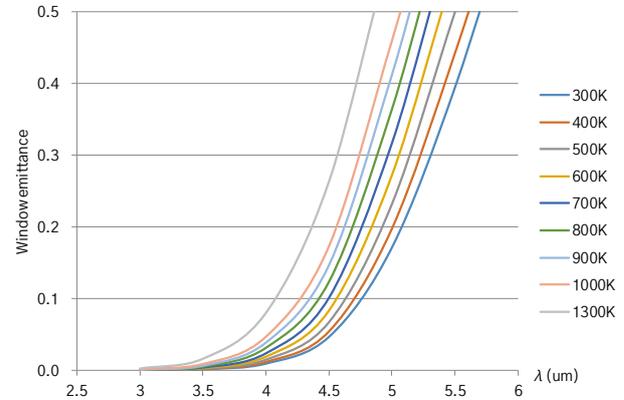
Fig. 2에서와 같이 적외선 창의 굴절률이  $n_2$ 이고 주변 매질의 굴절률이  $n_1$ (일반적으로 공기는 굴절률이 1)일 때 한 면에서의 반사율은 식 (8)과 같이 표현된다.



**Fig. 2.** Transmission and specular reflection with perpendicular incidence

$$R = \left( \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2 \quad (8)$$

일반적으로 공기의 굴절률은 1이고, 사파이어의 굴절률은 1.677이다. 앞의 식과 Table 1의 사파이어 창 흡수계수를 이용해 온도별 사파이어의 방사율을 계산하면 Fig. 3와 같다.



**Fig. 3.** Emittance of sapphire window

### 2.3 출력 예측 및 검증

2.1에서 기술한 적외선 카메라 출력 모델식을 이용하여 출력을 예측하고 적절성을 판단하기 위하여 예측 결과값과 실제 카메라를 이용한 측정 결과값을 비교하였다. 실제 측정에 사용된 적외선 카메라로는 ○○○社의 중적외선 대역의 검출기가 적용되었으며 모델링에 사용된 입력 변수는 Table 2에 나타낸 것과 같다.

**Table 2.** Input parameters for infrared camera output simulations

Parameters		Values
Scene (blackbody) temperature		5 °C,
		10 °C,
		15 °C,
		20 °C,
		25 °C,
	30 °C,	
	35 °C	
Detector transmittance	Detector window	○○ %
	Cold filter	○○ %
	FPA	○○ %
Wavelength	Cut-on	○.○ um
	Cut-off	○.○ um
Integration capacitor		○○○ fF
Pixel pitch		○○ um
F/#		F/○
Optics transmittance		○○ %
Integration time		○.○○ ms
Camera body temperature		20 °C

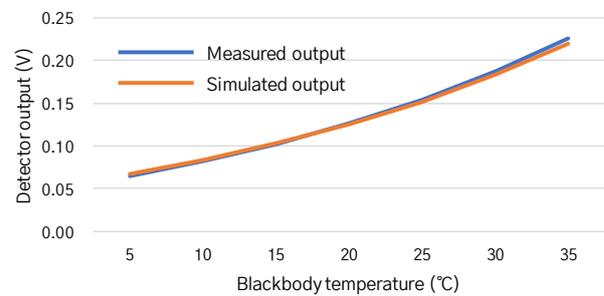
적외선 카메라 출력은 적외선 검출기에서 출력된 아날로그 영상 신호가 카메라 내 전자보드의 아날로그 회로 및 A/D converter를 거쳐 디지털로 변환되어 영상으로 출력되는 방식이다. 아래 제시한 출력 예측 결과값과 측정 결과값은 카메라 전자보드의 신호처리를 수행하기 전 적외선 검출기에 출력되는 값을 나타내며, 0 V에서 2.1 V 사이의 출력 범위를 가진다.

모델링 결과를 검증하기 위하여 적외선 카메라에서의 광학계 효과를 제외한 적외선 검출기 단품의 출력에 대하여 검증을 우선 진행하였다. Table 3와 Fig. 4는 흑체 온도에 따른 적외선 검출기 단품의 출력 전압을 예측한 결과값과 실제 측정 결과값을 나타낸다.

Table 3의 출력 예측값과 측정값의 오차 범위를 계산해보면 최대 5 %를 벗어나지 않아 흑체 온도에 따른 적외선 검출기 출력 예측 모델링은 적절하게 수행되었다고 판단된다. 검증된 적외선 검출기 출력 모델에 광학계를 포함한 적외선 카메라의 출력을 예측하였다.

**Table 3.** Simulated and measured infrared detector outputs depending on blackbody temperatures (without optics)

Blackbody temperature (°C)	Simulated output (V)	Measured output (V)
5	0.0675	0.0651
10	0.0836	0.0821
15	0.1027	0.1024
20	0.1253	0.1262
25	0.1519	0.1543
30	0.1831	0.1871
35	0.2193	0.2252

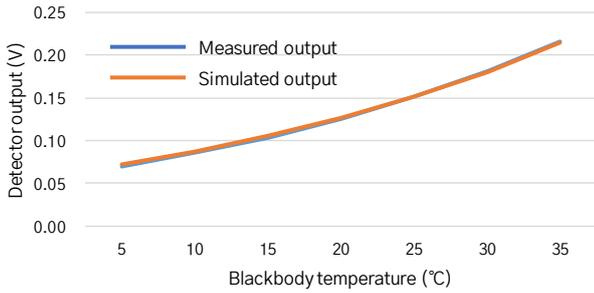


**Fig. 4.** Simulated and measured infrared detector outputs depending on black body temperatures (without optics)

Table 4와 Fig. 5는 흑체 온도에 따른 적외선 카메라의 출력 전압 예측 결과값과 실제 측정 결과값을 나타낸다. Table 4의 출력 예측값과 측정값의 오차 범위 또한 최대 5 %를 벗어나지 않아 흑체 온도에 따른 적외선 카메라의 출력 예측 모델링은 적절하게 수행되었다고 판단된다.

**Table 4.** Simulated and measured infrared detector outputs depending on black body temperatures (with optics)

Blackbody temperature (°C)	Simulated output (V)	Measured output (V)
5	0.0725	0.0696
10	0.0875	0.0852
15	0.1053	0.1037
20	0.1264	0.1255
25	0.1512	0.1511
30	0.1802	0.1812
35	0.2140	0.2160



**Fig. 5.** Simulated and measured infrared detector outputs depending on black body temperatures(with optics)

검증된 적외선 카메라 출력 모델식에 2.2에서 기술된 적외선 창 방사 모델식을 추가 적용하여 창 온도에 따른 카메라 출력을 예측하였다. 적외선 창은 중적외선 대역의 대표적인 재질인 사파이어를 적용하였으며 광경(흑체) 온도는 25 °C로 고정하여 진행하였다. 앞의 실험에서와 같이 창 방사 모델의 적절성을 판단하기 위해 예측값과 실제 카메라를 이용한 측정 결과값을 비교하였다. 적외선 창 방사 모델링에 사용된 입력 변수는 Table 5와 같다.

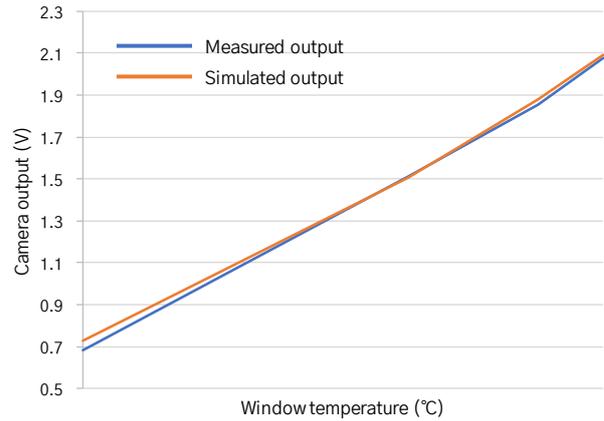
**Table 5.** Input parameters for infrared window emittance simulations

Parameters	Values
Material	Sapphire( $Al_2O_3$ )
Thickness	0.0 mm
Reflectance	0.1
Scene(blackbody) temperature	25 °C
Window temperature	○○○ °C, ○○○ °C, ○○○ °C, ○○○ °C

Table 6과 Fig. 6는 창 온도에 따른 적외선 카메라의 출력 전압 예측 결과값과 실제 카메라를 통해 측정된 결과값을 나타낸다.

**Table 6.** Simulated and measured infrared camera outputs depending on window temperatures

Window temperature (°C)	Simulated output (V)	Measured output (V)
○○○	0.7304	0.6814
○○○	1.5086	1.5124
○○○	1.8821	1.8533
○○○	2.0932	2.0770



**Fig. 6.** Simulated and measured infrared camera outputs depending on window temperatures

Table 6의 출력 예측값과 측정값의 오차 범위를 계산해보면 대부분의 구간에서 1% 이내 수준이며, 가장 큰 구간에서 약 7.3%였다. 상대적으로 오차 범위가 큰 구간의 오차는 실제 시험을 통한 측정 시 창 온도의 불균일성으로 인한 것으로 예상되며, 전체 구간에서의 결과 기준으로 적외선 카메라 출력 예측 모델링은 적절하게 수행되었다고 판단된다.

### 3. 결론

본 논문에서는 중적외선 대역의 냉각형 적외선 검출기를 적용한 적외선 카메라의 출력을 예측하였다. 먼저, 광경(흑체) 온도에 대한 적외선 카메라의 출력 모델을 검증하고, 검증된 적외선 카메라 출력 모델링 기반으로 적외선 창의 온도에 따른 적외선 카메라의 출력 전압을 예측하고 실제 측정값과 비교하였다. 실험 결과 출력 예측값과 실제 측정값이 유사하여 적외선 카메라의 출력 모델링이 적절하게 수행되었다고 판단된다. 적외선 카메라의 출력 예측은 적외선 시스템 설계 시 매우 중요한 과정으로, 카메라 설계단계에서 시스템에서 요구하는 성능을 만족하기 위한 설계 파라미터(적분시간, 파장대역, 창 재질 등)를 선정하고 성능을 예측하기 위해 활용될 수 있다.

### 참고문헌

[1] Rogalski A., Infrared Detectors, 2nd Edition, CRC Press, Boca Raton, 2011

- [2] Daniels A., Field Guide to Infrared Systems, Detectors, and FPAs, 2nd Edition, SPIE Press, Bellingham, 2010
- [3] Holst G.C., Testing and Evaluation of Infrared Imaging Systems, 3rd Edition, SPIE Press, Bellingham, 2008
- [4] Edward F.C., Analytical method to calculate window heating effects on IR seeker performance, In Proceedings of SPIE Vol. 2286, 1994, pp. 493-496.
- [5] Daniel C.H., Materials for Infrared Windows and Domes, SPIE Press, Bellingham, 1999.