

Design and Implementation of a Radiative Temperature Measurement System for a Flash Light

Jung-ho Jin¹, Seungoh Han¹, Hee won Yang², and Seung-man Park^{1†}

¹Hoseo University, 20, Hoseo-ro 79beon-gil, Asan 336-795, Korea

²Defence R&D Center, Woisamdong 52-1, Yuseonggu, Daejeon 305-156, Korea

(Received October 2, 2014; Revised manuscript January 7, 2015; Accepted January 26, 2015)

The design and implementation of a radiative temperature measurement system for a flash light are carried out. Since a massive amount of energy is emitted within a very short time, it is impossible to measure the temperature of a flash with a conventional method. It is also irrelevant to measure one with an optical noncontact method. In this paper, a radiative temperature measurement system using the ratio of spectral radiances over mid- and long-wavelength infrared (IR) is designed and implemented. The implemented system utilizes optical bandpass filters to divide the wavelengths within the mid- and long-wavelength IR ranges, and pyroelectric IR detectors to measure the incident optical power of each wavelength-divided channel. It is shown that the measured radiative temperature of a flash is in the range of 1393 to 1455 K. This temperature-measurement system can be utilized to obtain information about the spectral radiance of a flash as a light source, which is of crucial importance to approaching the modeling and simulation of the various effects of a flash.

Keywords: Flash light, Radiative temperature, Spectral radiance, Pyroelectric IR detector

OCIS codes: (120.4640) Optical instruments; (120.5630) Radiometry; (040.3060) Infrared; (040.6808) Thermal (uncooled) IR detectors, arrays and imaging

섬광의 복사온도 측정 장치의 설계 및 제작

진정호¹ · 한승오¹ · 양희원² · 박승만^{1†}

¹호서대학교

Ⓞ 336-795 충청남도 아산시 배방읍 호서로 79번길 20

²한화종합연구소 화력연구센터

Ⓞ 305-156 대전시 유성구 외삼동 52-1번지

(2014년 10월 2일 받음, 2015년 1월 7일 수정본 받음, 2015년 1월 26일 게재 확정)

섬광의 복사온도를 측정 할 수 있는 장치를 설계하고 제작하였다. 본 논문에서는 중·원적외선 영역에서 광원의 스펙트럼 복사휘도(spectral radiance)를 측정하여 두 영역의 복사휘도 비로부터 섬광의 복사온도를 구할 수 있는 장치를 설계 및 제작하였다. 중·원적외선 영역에서 파장에 따른 복사휘도를 측정하기 위하여 광학적 대역 투과필터로 입사광을 파장에 따라 분할하고 각각의 파장으로 분할된 광을 동시에 적외선 검출기로 검출하여 입력광의 파장에 따른 복사휘도를 측정하였다. 제작된 장비로 섬광의 온도를 측정한 결과 1393K와 1455K의 온도를 얻었다. 제작된 복사온도 측정 장치는 섬광의 광원 정보를 파악하는데 중요하게 활용될 수 있으며, 섬광의 효과를 위한 M&S에 활용될 수 있다.

Keywords: 섬광, 복사온도, 적외선 검출기, 스펙트럼 복사휘도, 초전형 적외선 검출기

OCIS codes: (120.4640) Optical instruments; (120.5630) Radiometry; (040.3060) Infrared; (040.6808) Thermal (uncooled) IR detectors, arrays and imaging

[†]E-mail: smanpark@hoseo.edu

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

I. 서 론

섬광은 매우 짧은 시간 동안 강한 빛을 방출하여 개인이나 관측장비의 임무수행을 방해할 수 있으며 강한 폭음 또한 사람들에게 공포를 유발시킬 수도 있다. 섬광은 탐색 및 추적에 사용되는 적외선 장비를 포화시켜서 탐색 또는 추적할 목표물을 잃어버리게 할 수도 있다. 또한 섬광은 사격통제장치에도 영향을 미쳐서 고유임무수행에 방해를 초래할 수 있다. 다양한 목적으로 활용되는 전자광학 장비에 섬광이 영향을 미칠 것이란 점은 쉽게 인정되지만 이를 정량적으로 분석할 수 있는 방법은 거의 없다. 이는 섬광의 효과를 모델링 및 모사시험(modeling and simulation, M&S)할 수 있는 도구들이 거의 없기 때문이다. 최근에 고섬광 연구에 새롭게 관심을 갖기 시작하면서 섬광의 효과연구에 M&S방법이 적용되고 있다.^[1-6] 섬광의 효과M&S에는 전자광학장비의 특성뿐만 아니라 섬광원의 특성이 요구된다.^[5-9] M&S를 통하여 섬광이 전자광학 장비와 적외선 장비(electro-optic and infrared equipment, EO/IR장비)에 미치는 효과를 살펴보는 것은 섬광 효과를 정량적으로 분석하여 그 효과를 극대화할 수 있어 섬광을 개발하고 활용하는데 필수적인 과정이 될 것이며, 섬광 효과의 M&S는 섬광의 연구개발 및 활용을 더욱 효율적으로 만들어 갈 수 있을 것이다.

M&S를 통하여 섬광이 야시장비(night vision device)와 열상장비(thermal imaging device)등의 EO/IR장비에 미치는 영향을 정량적으로 파악하기 위해서는 야시 및 열상장비의 전자광학적인 정보는 물론 섬광에서 방출되는 광의 파장에 따른 광량 정보, 즉 스펙트럼 복사휘도(spectral radiance)가 요구된다. 하지만 섬광이 매우 짧게 지속되는 경우에는 실제적인 의미에서 스펙트럼 복사휘도를 정확하게 파악하는 것은 거의 불가능하다.^[7-9]

M&S를 위한 섬광원의 정보를 개략적이라도 추정할 수 있는 방법이 있으면 섬광효과 M&S의 시작에 매우 중요한 역할을 할 것이다. EO/IR 장비 중 보통 많이 사용되는 적외선 장비는 중적외선 또는 원적외선을 사용하므로 이 두 적외선 영역에서 개략적인 복사휘도를 구하거나 추정할 수 있으면 첫 번째 단계의 섬광효과 M&S를 위한 목적으로 충분히 활용가치가 있다.

중·원적외선 영역으로 범위를 좁혀 생각하면, 이 두 영역에서 섬광의 복사휘도를 추정할 가능성이 있다. 이 두 적외선 영역을 활용하기 위한 적외선 검출기와 매우 좁은 영역을 투과시키는 광학적 필터들을 용이하게 구할 수 있기 때문이다.

본 논문에서는 섬광의 복사온도를 측정하는 장치를 설계하고 제작한 내용을 기술하였다. 특히 대기 투과특성이 좋아서 관측 및 탐색장비 등에 주로 활용되는 3~5 μm 의 중적외선(Mid-Wavelength Infrared, MWIR) 영역과 8~12 μm 의 원적외선(Long Wavelength Infrared, LWIR) 영역에서 섬광의 복사휘도의 비를 측정하고 이로부터 복사온도를 추출하였다.

설계하여 제작된 복사온도 측정 장치는 중·원적외선 영역을 광학적 대역 투과필터를 사용하여 분광한 후 분광된 광을

광 검출소자로 입력시켜서 검출소자의 출력을 관찰하는 시스템이다. 적외선을 검출하기 위한 광 검출기로는 초전형 적외선 검출기(Pyroelectric IR photodetector)를 활용하고, 적외선 검출기의 미약한 출력신호는 다루기 편리한 신호로 증폭하여 디지털 신호로 변환(analog to digital conversion, ADC)하고 저장하는 시스템이다.

다음 2장에서는 측정장치의 설계를 기술하며 여기에서는 전체적인 측정 시스템의 구성을 다룬다. 3장에서는 설계된 내용을 장비로 제작하여 규정된 적외선에 대한 반응도를 측정하는 내용을 기술한다. 4장에서는 실제 섬광원의 적외선 스펙트럼을 측정한 결과와 이로부터 복사온도를 추출하는 과정을 살펴본다.

II. 복사온도 측정 장치의 설계

복사온도 측정장치의 설계에서 첫 번째로 고려하여야 할 점은 사용할 검출기를 결정하는 것이다. 검출기는 단소자 형태로 채널 수만큼 필요하므로 양자형 검출기를 사용하기에는 비용이 너무 커지는 어려움이 있다. 따라서 열형 검출기 중에 가장 감도가 좋으면서 확보하기에 적합한 검출기를 선택하기로 한다. 양자형 검출기를 제외하면 중적외선 및 원적외선 영역에서 활용 가능한 단소자의 적외선 검출기가 다양하지는 않다. 사용할 적외선 검출기가 결정되면 검출기의 출력신호를 예측하여 증폭기를 설계할 수 있다. 적외선 검출기의 출력신호를 예측하기 위해서는 광원, 즉 섬광에서 단위시간당 방출되는 광 에너지(optical power)를 개략적으로라도 추정할 수 있어야 한다.

Figure 1은 설계한 복사온도 측정 장치의 블록도이다. 광원에서 방출된 광을 광학적 대역투과필터(optical band pass filters)를 사용하여 분광한 후 특정파장 범위로 분광된 광을 적외선 검출소자로 입력시킨다. 좁은 파장범위로 분광된 광이 입력되었으므로 적외선 검출기의 출력 신호가 매우 작을 것으로 예상된다. 따라서 미약한 신호를 증폭기로 증폭한 후 디지털 신호로 변환하여 PC에서 저장하고 자료를 처리하도록 한다. 편의상 광학적 신호의 전달 순서로 기술 하도록 한다.

MWIR과 LWIR 영역에서 섬광의 복사휘도를 측정하고자 하므로, 두 영역의 적외선을 광학적 대역 투과필터를 활용하여 분광하도록 한다. 두 영역에서 모두 0.5 μm 범위마다 좁

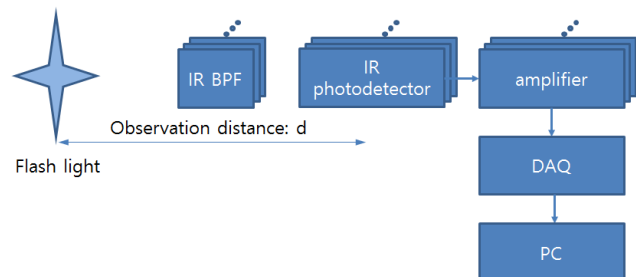


FIG. 1. Block diagram of the radiative temperature measurement system.

은 대역 투과필터(narrow band pass filter, NBPF)사용하도록 한다. 3 μm에서 5 μm까지 0.5 μm간격으로 NBPF 5개, 중적외선 영역의 넓은 대역 투과필터(wide band pass filter, WBPf) 1개, 중적외선 영역에서 총 6개의 광학 대역필터를 활용하자. 8 μm에서 12 μm까지 0.5 μm간격으로 NBPF 8개, 원적외선 영역의 WBPf 1개를 사용하여 원적외선 영역에서 총 9개의 채널을 사용한다. 전체 파장 특성을 알기 위해서 중·원적외선 영역에서 WBPf를 하나씩 추가 하였다.

측정하고자 하는 대상이 고속, 고 에너지의 섬광원이므로 검출기의 반응 속도가 가장 중요한 요인이다. 고속 광원의 특성을 고려하면 반응시간이 짧은 양자형 검출기가 좋을 것으로 판단되나 확보와 운용이 어려워서 열형 검출기중에서 반응시간이 짧고 확보가 쉬운 검출기를 검토대상으로 하였다. 본 연구에서 검토한 열형 검출기 중 초전형 적외선 검출기는 반응 시간이 수~수십 ms 범위로 본 연구의 목적에 부합된다고 판단하였다. 이렇게 선택된 검출기는 Eltec사의 Model 404이다.^[10] 이 검출기는 파장에 관계없이 단위시간당 입사된 열량에 따라 출력전압이 비례하나 검출기의 광창(optical window)에 의하여 투과되는 적외선이 중적외선과 원적외선으로 구분된다. 즉 중적외선용 검출기는 model 404-04이고 원적외선용 검출기는 Model 404-25이다. 선택한 검출기는 전치증폭기가 내장되어 있고, 1.5V의 DC오프셋 출력이 존재하며, 검출기의 반응도(responsivity)는 10Hz에서 236V/W이고 NEP (Noise Equivalent Power)는 $1.02 \times 10^{-9} \text{ W} / \sqrt{\text{Hz}}$ 이다.^[10]

앞서 논의한 것처럼 초전형 검출기에는 JFET전치증폭기가 내장되어 있으나 분광된 광 신호에 의한 검출기의 출력신호가 매우 낮은 전압으로 예상되므로 신호를 더 증폭해야 할 필요가 있다. 증폭기 설계를 위해서는 먼저 신호를 추정할 필요가 있다.

섬광원을 흑체로 가정하여, 섬광원에서 검출기 사이의 거리가 d일 때 각채널의 검출기 출력신호의 예측은 다음 식으로 할 수 있다.^[11]

$$V_{s,\lambda}(t) = R_v \cdot \phi_{e,\lambda}(t) \tag{1}$$

$$\begin{aligned} \phi_{e,\lambda}(t) &= \frac{A_d \cdot A_s(t)}{d^2} T_F \cdot T_W \int_{\lambda_{on}}^{\lambda_{off}} L_e(\lambda, T) d\lambda \\ &\cong \frac{A_d \cdot A_s(t) \cdot T_F \cdot T_W}{d^2} \cdot L_e(\lambda_{cent}, T) \Delta\lambda \end{aligned} \tag{2}$$

$$L_e(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5 [e^{hc/\lambda kT} - 1]} \tag{3}$$

여기서, $V_{s,\lambda}(t)$ 와 R_v 는 각각 파장이 λ 인 채널의 검출기 출력신호와 검출기의 반응도, $\phi_{e,\lambda}(t)$ 는 면적 $A_s(t)$ 인 광원에서 방출되는 광량 중 검출기의 수광면적 A_d 에 입사한 광량이다. $\Delta\lambda$ 는 광학필터의 반치폭을 의미하고, T_F 와 T_W 는 각각 광학

TABLE 1. The parameters used for signal estimation ^[12, 13]

Channel	$\lambda_{cent}[\text{nm}]$	$\Delta\lambda[\text{nm}]$	$T_F(\%)$	$T_W(\%)$	Comments
M1	2900	240	80	85	
M2	3500	125	80		
M3	4000	120	80		
M4	4370	220	80		
M5	5000	400	85		
M6	3000~5100	2000	85		WBPf
L1	7850	162	70	75	
L2	8490	168	75		
L3	9035	186	65		
L4	9530	227	80		
L5	10200	200	70		
L6	10560	200	75		
L7	11000	120	60		
L8	12205	190	80		
L9	8000~14000	6000	70	WBPf	

적 투과필터와 검출기 창 의 투과도이고, $L_e(\lambda_{cent}, T)$ 는 λ_{cent} 의 중심파장을 갖는 스펙트럼 복사휘도이며 T는 흑체로 가정한 광원의 온도이다. 신호추정에 사용된 각 채널의 파라미터를 Table 1로 정리하였다. 또한 A_d 와 A_s 는 각각 $3.14 \times 10^{-2} \text{ cm}^2$, $3.14 \times 10^4 \text{ cm}^2$ 이다.^[10]

Figure 2에는 d=70 m일 때 광원의 온도에 따른 각 채널의 신호를 추정한 결과를 나타내었다. 중적외선 영역에서는 2000 K에서 가장 작은 신호가 1 mV, 3000 K에서 가장 큰 신호가 수십 mV이므로 이 신호를 수백 mV ~ 수 V로 관찰하기 위해서는 약 100배를 증폭하면 된다. 원적외선 영역에서도 수십 μV ~ 수 mV로 추정되므로 5000배를 증폭하여 0.1 ~ 1 V로 되도록 한다. 즉, 중적외선 영역의 채널에서 증폭기의 이득을 100배, 원적외선 영역의 채널에서 5000배로 한다.

앞서 고려한 증폭 이득 외에도 증폭기의 설계에서 고려할 점은 주파수 특성이 충분이 빨라서 증폭기에 의한 주파수 특성이 제한되지 않도록 하는 것이다. 우리가 측정하고자 하는 광원의 개략적인 특성은 1 ms 이내에 최대로 광을 방출하고 그 후로 지수적으로 감소하는 특성을 보이며 감소할 때의 시정수(time constant)는 약 수십 ms정도이다. 이런 광원의 특성을 측정하기 위한 측정 시스템의 주파수 응답특성은 수 kHz 정도가 되어야 함을 알 수 있다. 따라서 증폭기의 주파수 응답특성은 요구되는 측정시스템의 주파수 특성보다 충분히 빠르도록 설계하도록 한다. 측정 시스템의 주파수 응답 특성의 제한은 초전형 적외선 검출기에 의하여 결정되도록 설계하는 것이 목표이며 이때가 측정 시스템 주파수 응답 특성을 최대로 하는 것이다.

앞서 적외선 검출기의 출력 신호를 추정하여 증폭 이득을 결정하였고 주파수 특성을 결정하였으므로 이에 적합한 회

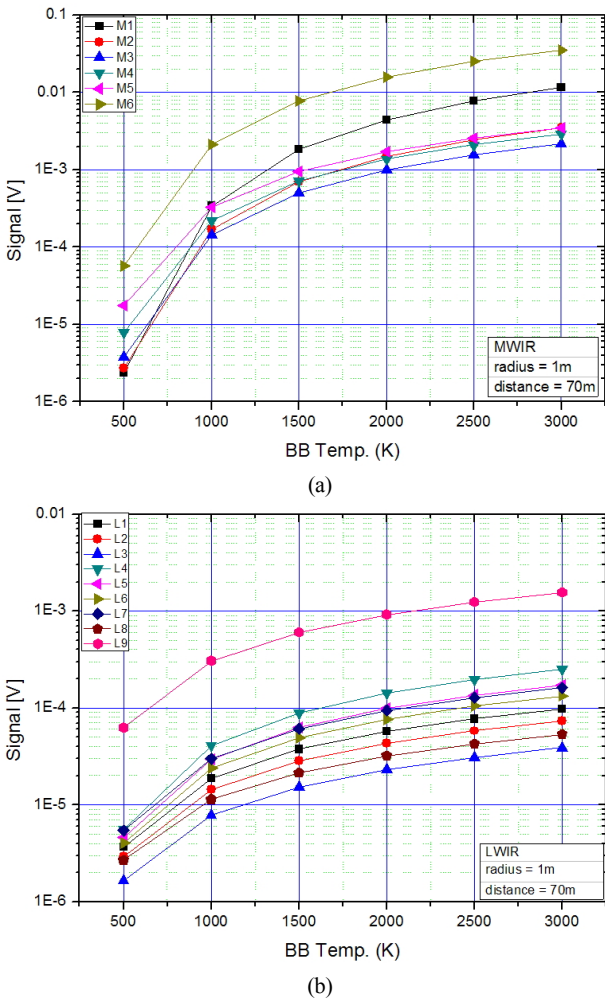


FIG. 2. Estimated signal of each channel in (a) MWIR region and (b) LWIR region.

로를 설계할 수 있다. 증폭기에 사용한 증폭소자는 연산증폭기 LF356으로 GBW(gain bandwidth product)가 5 MHz이고 등가입력잡음전압(equivalent input noise voltage)이 $12 \text{ nV/Hz}^{1/2}$ 인 고속 저잡음 연산증폭기이다. Figure 3은 원적외선 채널용으로 설계된 증폭회로와 SPICE 모의 실험 결과이다. 이 그림에서 볼 수 있듯이 설계된 증폭회로는 증폭기의 잡음이 적외선 검출기에서 발생하는 잡음에 비하여 무시 가능하므로, 전압 이득을 두 단계 동등하게 배분하여 주파수 특성을 최대로 만드는 구조로 설계하였다. 또한 적외선 검출기 출력의 DC 성분과 증폭소자의 DC offset 전압을 제거하기 위하여 2단의 능동 고대역 통과필터로 설계하였다. 2단 각 채널의 전압이득은 중적외선 채널이 110배, 원적외선 채널이 5041배이다. 중적외선 채널의 낮은 임계주파수(low critical frequency)는 1.6 Hz, 높은 임계주파수(high critical frequency)는 375.1 kHz이고 원적외선 채널에서는 각각 1.6 Hz, 72.3 kHz로 설계요구조건을 모두 만족한다. Figure 3 (b)에는 주파수 응답 특성의 모의시험결과를 실선으로, 실험치를 점으로 나타내었다. 이 그림에서 모사 시험결과와 실험결과가 잘 일치하는

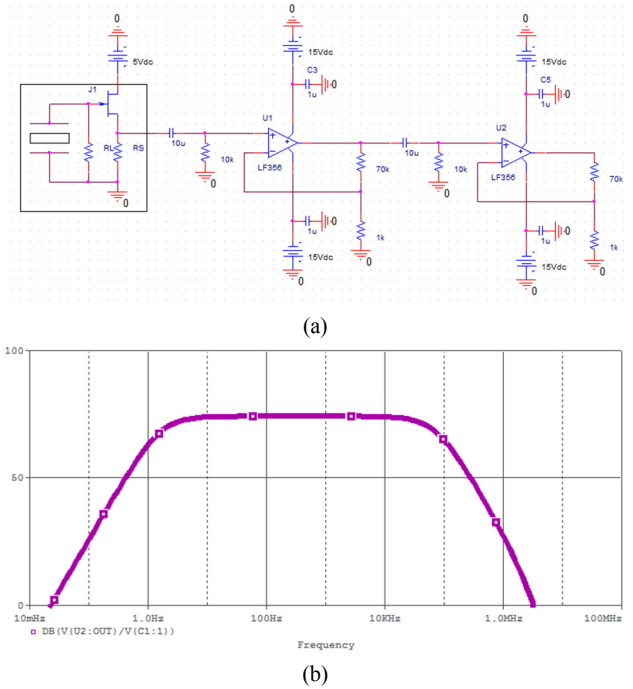


FIG. 3. Amplifier circuit and its frequency response. (a) Schematic circuit(line) and (b) SPICE simulation and measurement data(□).

것을 볼 수 있다.

증폭된 검출기 신호를 저장하고, 자료 처리과정을 용이하게 하기 위하여 아날로그 신호를 디지털 신호로 변환(Analog to Digital Conversion, ADC)하는 것이 필요하다.

ADC의 입력신호로 증폭기 출력이 사용되므로 앞서 추정했던 것과 같이 증폭기 출력전압이 수백 mV에서 수V까지의 범위에 있으므로 ADC의 입력전압 범위로 적당하다. ADC 선택에서 고려할 사항은 전압 분해능과 단위시간당의 샘플링 횟수(sampling rate)를 결정하는 것이다. 전압 분해능은 검출기 출력신호의 최소량, 즉 검출기의 잡음전압을 분해하는 정도면 충분하다. 적외선 검출기의 잡음 전압은 NEP와 반응도(responsivity)에서 구할 수 있으며 검출기 규격에서 구한 검출기의 rms잡음은 761 nV이고 여기에 증폭 이득을 고려하면 증폭기의 출력에서는 장파장 채널에서 3.84 mV가 된다. 따라서 충분한 여분을 두고 결정해도 ADC분해능으로 LSB (least significant bit)가 1 mV이면 충분하다. 중적외선 영역의 채널에서는 ADC분해능이 아무런 문제가 되지 않는다. 단위시간당 샘플링 수는 채널당 10 kHz 이상이면 충분하다고 생각하였다. 디지털로 변환된 신호는 PC를 통해서 정보를 처리할 수 있게 하며 PC가 ADC를 통해 전체 시스템을 제어하도록 설계한다.

III. 복사온도 측정 장치의 제작

복사온도계는 대역투과필터와 검출기를 고정시킬 수 있는 고정판, 증폭기 보드, ADC 그리고 전원을 공급해 줄 전원공

급장치로 구성된다. 앞서 논의한 바와 같이 복사온도 측정 장치의 각 채널은 대역 투과필터, 검출기, 그리고 증폭기로 이루어진다. 검출기와 증폭기는 크게 증적외선용 과 원적외선용으로 구분된다.

광학적 대역투과필터와 검출기는 알루미늄 고정판에 고정시킨다. 광학적 대역투과필터는 각 파장별로 15개의 광학적 대역투과필터가 고정판에 고정될 수 있게 제작하였다. 대역투과필터와 검출기의 고정판은 광원에 바로 노출되는 부분으로 이 부분에서 광 반사를 줄이기 위해 무광 검정색 양극산화(anodizing) 처리하였다. 한편 검출기 앞부분의 적절한 전자파 차폐가 잡음에 크게 영향을 미치므로 검출기 앞부분을 전자파 차폐가 잘되도록 만드는 것이 중요하며 대역 투과필터 고정부와 전자파 차폐를 위한 부분은 또한 검출기의 시계(Field of view)를 규정하는 역할을 한다. 각 검출기의 시계는 30°로 하였다.

복사온도 측정 장치의 전압원으로는 SMPS(Switching Mode Power Supply)를 사용하였다. SMPS에서 ±15V의 DC전압을 생성하여 증폭기에 공급된다. 한편 검출기 내부의 전치증폭기에는 +5V 전원이 요구되는데, 이는 +15V를 다시 한번 전압조정기를 거쳐 잡음이 최소화된 상태의 +5V전원으로 만들어 검출기에 입력된다.

ADC는 National Instruments 사의 NI9220 model을 사용하였다. 이 ADC는 총 16개 채널을 사용할 수 있고, 채널당 동시 샘플링속도는 100 kS/s로 설계 목표인 10 kHz를 충분히 만족한다. 16 채널 중 15채널은 광신호를 처리하는 채널이고, 나머지 한 개의 채널은 트리거 동기 신호를 처리하도록 하였다. 이 ADC는 Ethernet 통신을 사용하여 PC와 통신한다. ADC 분해능은 입력 전압범위가 ±10V 이므로 20 V를 16 bit로 분해하므로 LSB는 0.3 mV가 되어 설계 목표치 1 mV를 충분히 만족한다.

섭광의 복사온도 측정은 대부분 야지에서 행하므로 휴대가 편리한 노트북 PC로 디지털 신호를 받아 저장하고 처리하도록 하였다. 또한 전체 시스템은 PC에서 ADC 제어를 통하여 측정이 시작되고 측정자료를 저장하여 종료되도록 프로그램 하였다. Figure 4는 복사온도 측정 장치의 제어 흐름도이다. 제어 프로그램이 시작되면 장비연결을 확인하고 계측설정과

저장설정을 하게 된다. 설정을 마친 후 계측을 시작하며 자료를 취득하고, 그래프를 모니터에 그리고 자료를 저장한다.

Figure 5는 제작된 복사온도 측정장치의 외형과 내부의 사진이다. Figure 5의 (a)는 복사온도계의 외형의 사진이고, (b)는 ADC, (c)는 증폭기 보드의 사진이다. 내부에는 고정판, ADC 및 전원공급장치가 배열되어 있다. 장비의 외부박스는 판상의 탄소강으로 제작하였으며, 장비외부의 모든 금속 부분은 전기적으로 같은 퍼텐셜을 갖도록 연결하고 이를 전원을 통하여 외부 접지와 연결하도록 하였다. 고정판 사이를 연결하는 전선은 자체로 전자파 차폐를 고려한 전선을 사용하여 차폐로 사용되는 부분은 모두 접지시켰으며 외부에 다시 알루미늄 호일로 정교하게 감싸고 이를 다시 접지시킴으로 전자파에 의한 영향을 최소화하였다. 특히 적외선 검출기 고정판에서 증폭기보드로 연결되는 라인은 증폭되기 이전의

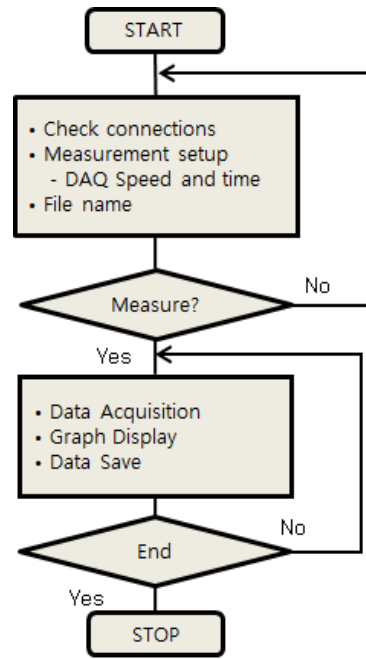


FIG. 4. Control flow of the radiative temperature measurement system.

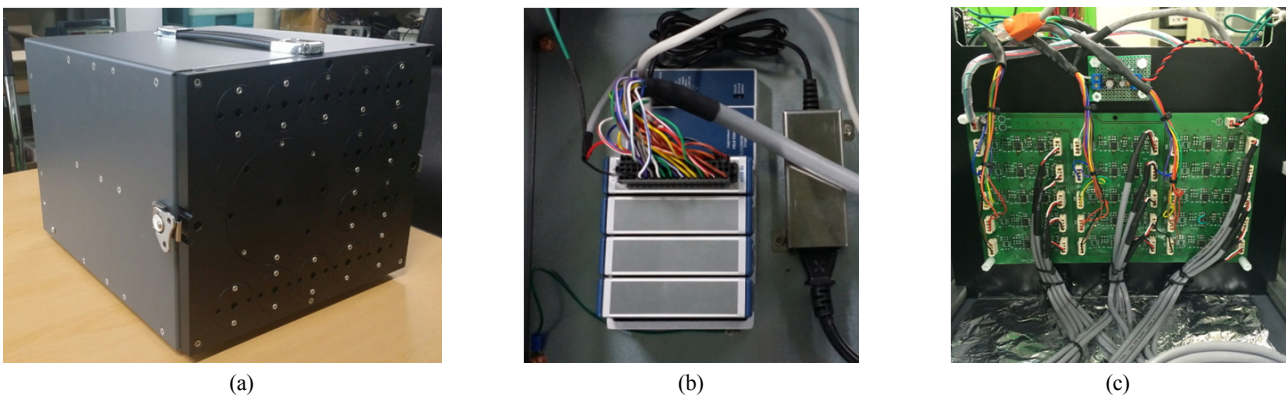


FIG. 5. Pictures of the radiative temperature measurement system. (a) Whole system, (b) ADC and (c) Amplifier board.

신호가 이동하는 라인이므로 이 라인들의 전자파 차폐가 매우 중요함을 알 수 있었다.

제작된 측정장치를 활용하기 위해서는 반응도(responsivity)를 측정하여야 한다. 측정된 신호로부터 섬광의 복사휘도를 얻는데 있어서 신뢰성 있는 자료를 얻기 위해서 각 채널의 반응도가 필요하다. 식 (1)에 의하면, 각 채널의 반응도는 검출기의 출력전압과 그때 각 채널 검출기에 입사된 광 파워의 비이다. 반응도 측정은 흑체(blackbody)로부터 나오는 광을 장비의 각 채널에 입력 시키고 채널의 신호를 측정하면 된다. 즉 흑체와 검출기 사이의 거리와 흑체의 온도를 알면 입사되는 각 채널에서 대역투과 필터를 거쳐서 검출기에 입사된 광량을 정확하게 알 수 있고 이 입사광량에 의한 신호를 측정하여 반응도를 구할 수 있다. 흑체 온도 1050 K, 흑체와 검출기의 거리 20 cm, 흑체의 aperture 직경이 0.6 inch 그리고 단속 주파수 10 Hz에서 측정을 하였다.

각 채널의 반응도를 측정한 결과를 Table 2에 정리하였다. 좀더 신뢰성 있는 반응도를 측정하기 위해 7번의 반복실험하여 평균 값을 취하였다. Table 2에서 볼 수 있듯이 7회의 측정결과에 대한 평균 값은 중적외선 채널인 M1~M5 채널에서 220~322 V/W의 범위에 있으며 원적외선 영역 채널인 L2~L8의 채널에서 289~667 V/W의 범위에 있음을 볼 수 있다. 이 값들은 검출기 공급자가 제공하는 규격상의 반응도 236V/W와는 다소 차이를 보인다.^[10] 이런 차이의 원인으로 규격상의 반응도는 전형적인 반응도 값이고 매 검출기를 측정한 자료는 아니라는 점과 규격상의 전형적인 반응도는 좁은 대역 투과 필터가 없이 광대역 필터범위의 넓은 파장 영역에 대한 반응도이며 본 연구에서 측정한 것은 매우 좁은 영역의 파장범위의 광에 대하여 측정한 것이라는 점이다. Table 2에서 반응도 측정의 신뢰성을 살펴볼 수 있다. 표준 편차와 평균반응도의 비(σ/R_{ave})가 0.4~4.9% 범위에 있으므로

충분히 신뢰성 높은 반응도를 측정한 것으로 평가된다. 한편 M6와 L9 이 WBPF 채널이므로 규격상의 반응도와 유사할 것으로 기대할 수 있으나 이 채널에서는 반응 속도를 빠르게 하기 위하여 반응도는 매우 낮춰놓은 채널이다. 초전형 검출기에서 반응도와 반응속도는 상호 절충(trade-off)관계에 있다.^[10] 초전형 검출기의 반응속도는 부하저항을 조절하여 어느 범위에서 조절 가능하다.

IV. 섬광의 복사온도 추출 및 논의

관측실험에 사용한 광원은 폭발 후 1ms 이내에 최대광을 방출하고 최대 광에서 지수적으로 감소하는 빛을 방출하며 소멸되는 특성을 보인다. 이 광원의 두 적외선 영역에서 복사휘도를 측정하고 이로부터 복사온도를 구하는 과정을 살펴본다.

Figure 6은 복사온도 측정장치로 섬광을 측정한 결과를 나타낸 것이다. 이 그림에서 M1~M6는 중적외선, L2~L9는 원적외선 채널의 출력전압이다. 각 파장 영역의 마지막 채널, 즉 M6, L9는 넓은 파장 대역투과필터의 채널 출력이다. 전체적으로 볼 때 측정 파형은 기대하는 파형을 보이고 있다. 즉 섬광원의 특성과 초전형 검출기의 반응 특성을 고려하면 초기 급격히 증가하는 출력과 최고 점을 지나면서 지수적으로 감소하여 음의 전압을 보이다가 기준점으로 회복하는 과정은 예상되는 결과로 해석할 수 있다.

Figure 6의 내부그림에 표시한 것 처럼 최대 전압에 도달한 후에 다시 음의 값으로 떨어지는 이유는 초전형 검출기의 특성 때문이다. 즉 입사된 적외선에 의한 검출기 내부에서 자발분극(spontaneous polarization) 현상으로 외부에서 전하의 주입이 있었고 입사 적외선의 변화가 없으면 분극이 소멸되면서 주입된 전하가 외부 회로로 나오며 음의 전압을 보이

TABLE 2. Responsivity measurements of each channel

channel	average voltage [V]	incident power [W]	average responsivity [V/W]	standard deviation (σ)	σ/R_{ave} (%)
M1	0.367	1.30E-05	256	3.6	1.4
M2	0.222	6.25E-06	322	1.4	0.44
M3	0.154	5.10E-06	275	2.7	0.97
M4	0.238	7.84E-06	276	2.7	0.98
M5	0.286	1.15E-05	226	2.6	1.2
M6	0.047	7.97E-05	5	0.1	1.7
L2	1.606	9.86E-07	323	12.1	3.7
L3	1.150	7.88E-07	289	14.2	4.9
L4	1.721	9.95E-07	343	2.7	0.78
L5	1.056	6.20E-07	338	9.6	2.8
L6	1.040	5.95E-07	347	5.4	1.6
L7	0.867	2.58E-07	667	9.6	1.5
L8	0.667	3.74E-07	354	9.0	2.6
L9	0.461	1.40E-05	7	0.1	2.0

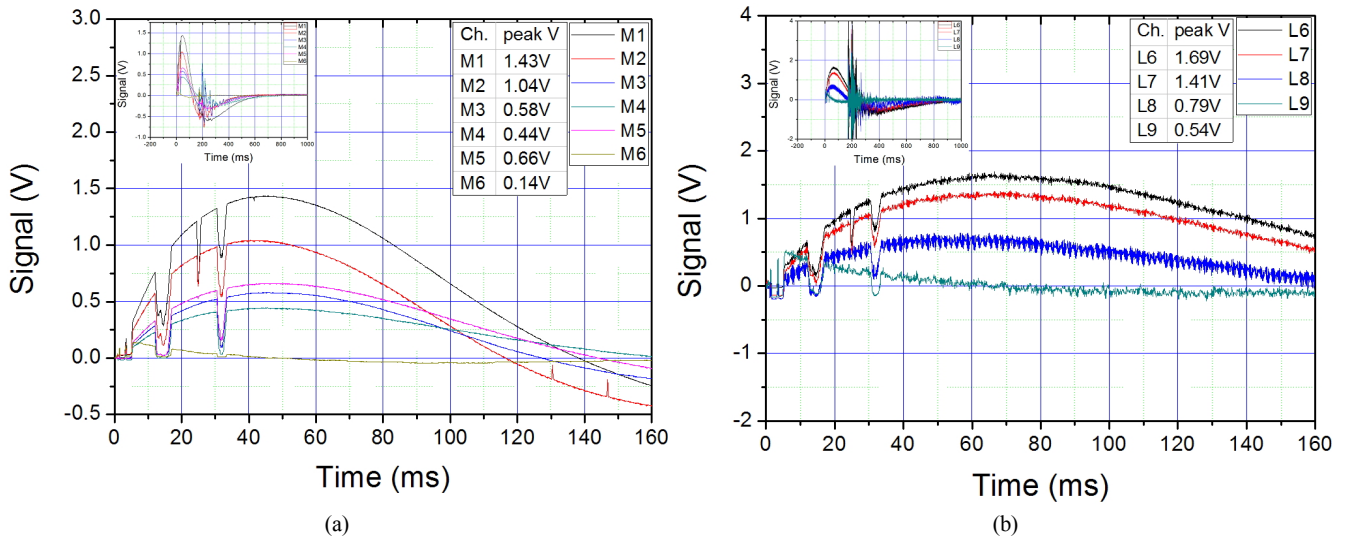


FIG. 6. The measured signals of a flash, (a) for the channels in MWIR region, (b) for the channels in LWIR region.

TABLE 3. Radiance ratio and its corresponding temperature

Ch.	Radiance Ratio	T _c (K)	ΔT (K)	(ΔT/T _c) (%)
M2/L7	44.33	1455	62K	4.45
M3/L7	30.29	1393	0	0

게 된다. 섬광이 발생한 후 200 ms 정도가 지난 시점에서 잡음이 많이 측정되는 것을 볼 수 있는데 이것은 섬광이 폭발하면서 내는 폭음에 의한 잡음으로 이해된다. 관측 시 광원과 측정장치의 거리가 70 m이었으므로 섬광의 폭음이 도달하는 시간과 일치한다. 이 부근의 시간대에 존재하는 큰 잡음은 모두 폭음과 관계된 것으로 이해된다. 비냉각 적외선 검출기인 초전형 검출기는 입사된 열(적외선)이 열전도에 의하여 외부로 유출되는 것을 막기 위하여 열 고립 구조(thermal isolation structure)를 갖고있다.^[10] 따라서 충격에 매우 민감하다.

광원을 흑체 또는 회색체(graybody)로 가정하면 각 채널에서 측정된 신호로부터 광원의 복사온도를 구할 수 있다.^[9,11] 먼저 측정된 신호에서 각 채널의 중심 파장에서 복사휘도를 추출할 수 있다. 앞서 신호예측에서 사용한 식 (2)를 다시 정리하면 다음의 식 (4)를 얻을 수 있고 측정 전압과 광 반응도에서 $L_e(\lambda_{cent}, T)$ 를 구할 수 있다.

$$L_e(\lambda_{cent}, T) \cong \phi_{e,\lambda_{cent}} \cdot \frac{d^2}{A_d \cdot T_F \cdot T_W \cdot A_s \cdot \Delta\lambda} \quad (4)$$

$$\phi_{e,\lambda_{cent}}(t) = \frac{V_{s,\lambda_{cent}}(t)}{R_v} \quad (5)$$

이 식에서 $V_{s,\lambda_{cent}}(t)$ 는 λ_{cent} 채널에서 측정된 전압 값이며

R_v 는 앞에서 측정한 채널의 반응도이다. 각 채널의 복사휘도를 구하면 섬광의 온도를 추출할 수 있다. 측정하고자 하는 섬광의 온도는 두 파장 영역에서 섬광의 발산도(exitance) 비가 흑체복사법칙에 의한 두 영역에서의 비와 같게 되는 온도이다. 즉 $M(\lambda_1)$ 을 파장이 λ_1 으로 대표되는 영역의 발산도라 하면 다음 식 (6)이 성립한다.

$$\frac{M(\lambda_1)}{M(\lambda_2)} = \frac{\lambda_2^5 (e^{hc/\lambda_2 k T_c} - 1)}{\lambda_1^5 (e^{hc/\lambda_1 k T_c} - 1)} \quad (6)$$

램버시안 복사체(Lambertian radiator)인 경우 식 (6)의 두 파장에서 발산도의 비는 바로 복사휘도의 비와 같다.^[11] 섬광의 경우 복사휘도가 관찰방향에 따라 변화하지 않는다고 가정할 수 있으므로 램버시안 복사체로 볼 수 있고 따라서 식 (7)이 성립한다.

$$\frac{M(\lambda_1)}{M(\lambda_2)} = \frac{L(\lambda_1)}{L(\lambda_2)} \quad (7)$$

식 (6)과 (7)에서, 두 파장에서 복사휘도의 비를 만족하는 T_c 는 유일하게 결정되며 이 온도가 바로 섬광의 복사온도가 된다. 이 복사온도는 color 온도라고 부르며 T_c 로 표기하며, 이 복사온도는 광원이 흑체가 아닌 회색체일지라도 유일하게 온도가 결정된다. 회색체의 방출률은 파장의 함수가 아니

고 일정하므로 식 (6)에 의하면 두 파장에서의 발산도 비에서 서로 상쇄되기 때문이다.

식 (7)을 사용하여 두 파장에서의 복사휘도의 비를 구할 때 λ_1 은 중적외선, λ_2 는 원적외선 영역으로 하면 중적외선 영역에서 NBPF의 5개 채널, 원적외선 영역에서 NBPF의 7개 채널이 있으므로 이론적으로는 35개의 복사온도 추출방법이 있을 수 있다. 본 연구에서는 원적외선 영역에서 잡음 전압이 가장 낮으며 측정값이 안정된 채널 중 가능한 장파장 쪽으로 L7 채널을 선택하였으며, 중적외선 영역에서도 유사하게, 그러나 가능한 단파장 쪽으로 M2, M3 두 채널을 선택하여 복사휘도 비를 구하였다. 이 비와 식 (7)을 만족하는 복사온도를 Table 3으로 정리하였다.

이런 방법으로 추출된 섬광의 복사온도는 1393K와 1455K로, 이들 세 채널에서 얻은 복사온도가 약 4.5% 차이를 보이고 있어 두 온도는 매우 잘 일치한다고 생각할 수 있다.

전투기의 배기가스 온도가 약 800 K 정도임을 고려할 때 이 섬광의 온도는 매우 높은 온도이고, 이 섬광으로 적당한 거리에서 800 K부근의 표적을 탐색 및 추적하는 적외선 장비를 충분히 포화시킬 수 있을 것으로 생각된다. 또한 본 연구를 통해 측정된 복사온도를 섬광의 적외선 특성을 결정짓는 필요-충분 조건으로 사용가능 하도록 하기 위해서는 더 많은 실험과 분석이 필요하지만 적어도 본 연구에서 의도했던 첫번째 섬광원에 대한 근거자료로서의 역할은 충분하다고 생각된다. 즉 측정된 섬광의 온도는 섬광원의 효과 모델링에서 광원정보를 추정할 수 있는 충분한 근거를 제공한다.

V. 결 론

섬광의 온도를 측정하기 위한 장치를 설계 및 제작하였다. 설계 및 제작된 복사온도 측정 장치는 섬광을 광학적 대역 투과필터를 사용하여 분광한 후 분광된 광을 광 검출 소자로 입력시켜서 검출소자의 출력을 동시 측정하는 시스템이다. 광 검출 소자는 초전형 적외선 검출기를 활용하였고, 검출기에서 얻어지는 미약한 신호를 증폭하여 안정적으로 ADC로 입력하였다. ADC를 통해 디지털 신호로 변환된 신호는 PC에서 데이터처리 되도록 하였다. 본 연구에서 제작된 장비로 측정된 섬광의 복사온도는 1393 K와 1455 K로 약 4.5%의 차이로 매우 잘 일치한다. 측정된 온도는 매우 높은 온도로 생각되며, 측정된 섬광의 복사온도는 섬광원의 효과 M&S에 광원정보를 추정하는데 매우 중요한 역할을 한다.

감사의 글

본 연구는 (주)한화의 지원으로 이뤄졌으며, 장비의 제작은 (주)선영시스텍에서 담당하였다.

References

1. K. S. Kim, J. W. Ahan, M. R. Kwon, and K. H. Chang, "Design characteristics of a high flash generator," in *Proc. 2014 Symposium of KIMST* (Jeju International Convention Center, Korea, June 2014).
2. S. M. Park, S. Han, K. S. Kim, and K. H. Chang, "Nullification modeling of night vision device by a flash," in *Proc. 2014 Symposium of KIMST* (Jeju International Convention Center, Korea, June 2014).
3. J. H. Jin, S. Han, J. G. Shin, K. H. Chang, and S. M. Park, "Design of IR characteristic measurement system of a flash," in *Proc. 2014 Symposium of KIMST* (Jeju International Convention Center, Korea, June 2014).
4. H. W. Yang, J. G. Shin, M. R. Kwon, K. S. Kim, and K. H. Chang, "Performance analyses of a high flash generator with gunpowder shockwave," in *Proc. 2014 Symposium of KIMST* (Jeju International Convention Center, Korea, June 2014).
5. S. Han, S. M. Park, H. W. Yang, and K. H. Chang, "Saturation modeling of thermal imaging system," in *Proc. 2014 Symposium of KIMST* (Jeju International Convention Center, Korea, June 2014).
6. J. H. Jin, S. Han, and S. M. Park, "Design and characteristics of radiative temperature measurement system of a flash," in *Proc. Optical Society of Korea Summer Meeting 2014* (Jeju International Convention Center, Korea, Aug. 2014), CD, paper MP-II 15.
7. H. B. Kong and D. J. Cho, "Design and analysis of infrared diffractive optical system using beam synthesis propagation," *Korean J. Opt. Photon.* **24**, 189-195 (2013).
8. H. J. Joen, G. S. Lim, D. G. Na, and J. H. Kwon, "Measurement and analysis of phosphor conversion efficiency for color-matching LCDs," *Korean J. Opt. Photon.* **24**, 256-261 (2013).
9. C. F. Tsai and M. S. Young, "Pyroelectric infrared sensor-based thermometer for monitoring indoor object," *Rev. Sci. Instrum.* **74**, 5267-5273 (2003).
10. Silverlight, "Pyroelectric detector data sheet," http://www.silverlight.ch/pdf/eltec_404.pdf.
11. E. L. Dereniak and G. D. Boreman, *Infrared Detectors and Systems* (John Wiley & Son, NewYork, 1996).
12. Spectrogon, "Bandpassfilter data sheet," <http://www.spectrogon.com/product-services/optical-filters/spectrogon-ab/narrow-b-andpass-filters>.
13. Mirhz, "Bandpassfilter data sheet," <http://www.mirhz.com/Narrow+Bandpass+Filter>.