

Infrared Characteristics of Some Flash Light Sources

Sang-Yeon Lim and Seung-Man Park[†]

Department of Nanobionics, Hoseo University 20, Hoseo-ro 79beon-gil, Baebang-eup, Asan-si, Chungnam, 31499, Korea

(Received November 3, 2015; Revised manuscript December 28, 2015; Accepted January 12, 2016)

To effectively utilize a flash and predict its effects on an infrared device, it is essential to know the infrared characteristics of the flash source. In this paper, a study of the IR characteristics of flash light sources is carried out. The IR characteristics of three flash sources, of which two are combustive and the other is explosive, are measured with an IR characteristic measurement system over the middle- and long-wavelength infrared ranges. From the measurements, the radiances over the two IR ranges and the radiative temperatures of the flashes are extracted. The IR radiance of flash A is found to be the strongest among the three, followed by those of sources C and B. It is also shown that the IR radiance of flash A is about 10 times stronger than that of flash B, even though these two sources are the same type of flash with the same powder. This means that the IR radiance intensity of a combustive flash source depends only on the amount of powder, not on the characteristics of the powder. From the measured radiance over MWIR and LWIR ranges for each flashes, the radiative temperatures of the flashes are extracted by fitting the measured data to blackbody radiance. The best-fit radiative temperatures (equivalent to black-body temperatures) of the three flash sources A, B, and C are 3300, 1120, and 1640 K respectively. From the radiance measurements and radiative temperatures of the three flash sources, it is shown that a combustive source radiates more IR energy than an explosive one; this mean, in turn, that the effects of a combustive flash on an IR device are more profound than those of an explosive flash source. The measured IR radiances and radiative temperatures of the flash sources in this study can be used to estimate the effects of flashes on various IR devices, and play a critical role for the modeling and simulation of the effects of a flash source on various IR devices.

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

OCIS codes: (040.3060) Infrared; (200.4560) Optical data processing, (350.5610) Radiation, (040.6808) Thermal (uncooled) IR detectors, arrays and imaging

섬광의 적외선 특성 연구

임상연 · 박승만[†]

호서대학교 나노바이오토크닉스학과

Ⓣ 31499 충남 아산시 배방읍 호서로 79번길 20

(2015년 11월 3일 받음, 2015년 12월 28일 수정본 받음, 2016년 1월 12일 게재 확정)

섬광을 효율적으로 활용하고 그 효과를 예측하기 위해서는 섬광의 광 방출특성을 알아야 하는 것은 필수적이다. 본 논문에서는 섬광의 효과예측과 효율적 활용을 위한 섬광의 적외선 특성을 연구하였다. 세 종류의 섬광원에 대하여 중적외선과 원적외선영역에서 적외선 특성을 측정하고 이로부터 섬광의 복사휘도와 복사온도를 추출하여 섬광의 적외선 특성을 연구하였다. 세 종류의 섬광에 대해 중·원적외선 영역에서 적외선 스펙트럼 복사휘도를 추출한 결과는 섬광 A의 복사휘도가 상대적으로 제일 강하며 섬광 C, 섬광 B 순으로 분석되었다. 동일한 연소형 섬광인 섬광 A와 B의 복사휘도가 약 10배 이상 남을 알 수 있었으며, 이는 단지 화약량의 차이에 의해 나타나는 것이므로 화약량이 증가할수록 방출 적외선의 강도가 강해지는 것으로 해석된다. 또한 폭발형 섬광 C와 연소형 섬광 A, B를 비교해도 화약량에 따라 적외선 방출 강도가 달라지는 것을 알 수 있다. 두 적외선 영역에서 측정된 복사휘도로부터 복사온도를 추출하였다. 섬광 A의 복사온도는 3300 K, 섬광 B는 1120 K, 섬광 C는 1640 K로 추출되었다. 두 적외선 영역에서 측정된 적외선 복사휘도, 복사온도 그리고 섬광의 지속시간을 종합하여 볼 때, 연소형 섬광이 폭발형 보다 더 많은 적외선 에너지를 방출하는 것으로 분석되며, 이는 적외선 관측장비에 미치는 영향은 폭발형보다는 연소형이 더 크게 됨을 의미한다. 이러한 측정된 자료를 바탕으로 분석을 통해 확보된 섬광의 스펙트럼 복사휘도와 복사온도는 섬광이 적외선 장비에 미치는 영향을 추정하는데 매우 중요한 역할을 할 수 있으며, 나아가 섬광효과의 M&S에 기반을 제공할 것으로 기대된다.

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

OCIS codes: (040.3060) Infrared; (200.4560) Optical data processing, (350.5610) Radiation, (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 임무 수행중인 개인이나 관측 장비 등을 무력화 시키며, 감시 및 추적을 위한 적외선 장비를 포화시켜 목표물을 잃어 버릴 수 있게 한다. 또한 강한 폭음으로 임무 수행중인 사람들에게 공포를 유발하기도 한다. 이처럼 섬광은 인간 또는 다양한 전자 광학 장비에 영향을 미칠 수 있지만, 그 효과를 정량적으로 분석할 수 있는 방법은 거의 없다. 이는 섬광의 광원 정보가 알려진 것이 거의 없기 때문이다^{1,2)}.

최근 고섬광 연구에 관심이 높아지면서 섬광의 효과에 대한 논의가 증가 하고 있다. 특히 감시·정찰·관측에 사용되는 적외선 장비에 대하여 섬광이 어떠한 영향을 미칠 것 인가에 대한 관심이 매우 크다. 이런 증가되는 관심에 답을 찾기 위해서는 섬광의 정보, 특히 섬광의 적외선 방출특성을 파악해야 한다. 섬광의 적외선 방출특성을 알 수 있다면 적외선 장비에 미칠 영향을 파악하기 용이할 것이다. 보통 많이 사용되는 적외선 장비는 파장이 3~5 μm 의 중적외선과 8~12 μm 의 원적외선 영역을 활용하므로, 이 두 적외선 영역에서의 파장에 따른 복사휘도(spectral radiance)를 파악할 수 있으면 섬광이 적외선 장비에 미칠 영향을 예측하는데 결정적인 역할을 하게 될 것이다.

적외선 관측장비들에 섬광이 미치는 영향은 섬광원의 크기와 파장에 따른 복사휘도(spectral radiance)를 알면 모델링이 가능하다. 하지만 섬광의 적외선 복사휘도를 정확히 측정하기는 매우 어렵다. 이는 광원의 지속시간이 매우 짧으며, 섬광을 실험실 환경에서 재현하기도 어렵기 때문이다. 또한 관측 시 기상조건에 영향이 크며, 관측장비 운용에도 어려움이 있다. 그럼에도 불구하고 모델링을 위한 섬광원의 정보를 개략적이라도 추정할 수 있다면 섬광효과를 파악하는데 중요한 역할을 할 것이다^{1,2)}.

본 논문에서는 섬광의 적외선 방출특성을 연구하였다. 섬광의 적외선 방출 특성은 적외선 특성 측정장치로 파장에 따른 섬광의 광 방출 특성을 측정하고 이로부터 복사휘도와 복사온도를 추출하고 그 결과를 화약량, 섬광 지속시간과 함께 분석하였으며 이 분석 결과로부터 섬광의 적외선 방출 특성을 파악하여 각각의 섬광에 대한 효과를 예측하는데 활용하고자 하였다. 즉 광원으로서의 섬광을 규정하는 파라미터로 적외선 영역에서의 복사휘도 또는 복사온도로 파악하고자 하였다.

적외선 특성은 3-5 μm 범위의 중파장적외선(mid-wavelength IR)영역과 8-12 μm 범위의 장파장적외선(long-wavelength IR) 영역에서 측정하였다. 섬광의 적외선 특성의 측정 방법은 광학적 대역투과 필터(optical bandpass filter)를 사용하여 측정하고자하는 파장 영역을 세분하여 적외선 검출기로 입사시키고 신호를 관찰하는 것이다²⁾. 파장으로 분할 된 각 채널에서 측정된 신호로부터 섬광의 적외선 특성을 얻을 수 있다. 이렇게 측정된 적외선 신호를 섬광의 복사휘도로 변환가능하며, 섬광원을 흑체로 가정하면, 중파장과 장파장 적외선 영

역에서 변환된 복사휘도를 흑체 복사휘도 커브에 맞춰서 등가의 흑체복사온도를 구할 수 있다.

다음 2장에서는 적외선 특성 측정장치와 측정방법을 기술하였으며, 3장에서는 세 종류의 섬광에 대하여 측정된 적외선 특성으로부터 복사휘도를 얻는 과정을 기술하고, 마지막으로 4장에서는 측정된 복사휘도를 흑체복사 이론에 맞춰서 섬광의 복사온도를 추출하여 이 자료와 섬광의 지속시간과 화약량 등의 섬광특성을 종합적으로 분석하여 섬광의 적외선 특성을 살펴보고자 한다.

II. 섬광의 적외선 특성측정

섬광의 적외선 특성을 측정하기 위해서 제작한 적외선 특성 측정장치를 활용하였다²⁾. 여기서는 개략적인 측정장치 특성을 살펴봄으로써 측정으로부터 어떤 물리적 의미의 자료를 얻을 수 있는지를 살펴보고자 하였다. Figure 1은 적외선 특성 측정을 위한 장치의 블록도이다. 이 장치는 중·원적외선 영역을 광학적 대역 투과필터를 사용하여 분광한 후 파장으로 분광된 광을 광 검출소자로 입력시켜 검출소자의 출력을 관찰하는 시스템이다. 중적외선 영역(3 μm ~ 5 μm)에서는 0.5 μm 마다 좁은 대역투과필터(narrow band pass filter, NBPF) 5개, 전체 파장 특성을 알기 위한 넓은 대역 투과필터(wide band pass filter, WBPF) 1개로 총 6개의 광학 투과필터를 사용하였다. 원적외선 영역(8 μm ~ 12 μm)에서는 좁은 대역투과필터 7개, 넓은 대역투과필터 1개로 총 8개의 채널을 사용하여 전체 채널 14개의 채널로 구성된 측정장치이다. 좁은 파장범위로 분광된 광이 입력되었으므로 입력되는 적외선의 광자속(radiant flux)는 매우 작을 것이며 따라서 검출기의 출력신호가 매우 작을 것으로 기대된다. 따라서 신호의 증폭이 필요하다. 섬광의 적외선 방출량을 예측하고 이에 따른 검출기 신호를 근거로 하여 증폭기의 전압이득을 결정하였다. 이렇게 결정된 전압이득은 비교적 검출기의 출력신호가 큰 중적외선 영역의 채널에서 2단 증폭기로 110배로 하고 검출기의 신호가 매우 작은 원적외선 영역의 채널에서 2단 증폭기로 5041배로 하였다. 증폭된 각 채널의 신호는 DAQ에서 디지털 신호로 변환하여 PC에 저장하고 자료를 처리하였다³⁾. Table 1에는 적외선 특성 측정장치의 각 채널의 광학적 특성을 요약한 것이다. 각각의 대역 투과필터의 중심파장

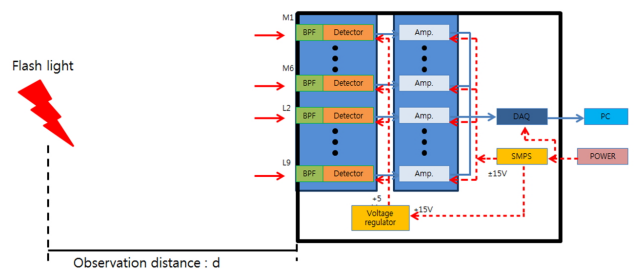


FIG. 1. The block diagram of the infrared radiance measurement system.

TABLE 1. The optical parameters of each channel of the IR radiance measurement system

Channel	λ_{cent} (nm)	$\Delta\lambda$ (nm)	T_F (%)	Responsivity [V/W]	σ/R_{avg} (%)	comments
M1	2900	240	80	216	1.9	
M2	3500	125	80	249	2.0	
M3	4000	120	80	234	1.4	
M4	4370	220	80	233	0.8	
M5	5000	400	85	201	3.5	
M6	3000~5100	2000	85	6	1.5	WBPF
L2	8490	168	75	315	0.6	
L3	9035	186	65	290	3.5	
L4	9530	227	80	328	2.8	
L5	10200	200	70	312	1.7	
L6	10560	200	75	340	1.4	
L7	11000	120	60	660	2.5	
L8	12205	190	80	352	3.5	
L9	8000~14000	6000	70	10	1.1	WBPF

(λ_{cent}), 반치폭(또는 파장범위)($\Delta\lambda$), 투과도(T_F)^[4], 검출기 투과도의 투과도(T_W)^[5], 측정된 광반응도(R_V) 등으로 뒤에서 활용될 중요한 광학적 파라미터들이다.

한편, 측정하고자 하는 대상이 짧은 시간만 존재하는 섬광이므로 검출기의 반응속도가 매우 중요한 요인이다. 섬광의 적외선 특성을 좀더 자세히 관찰하기 위해서는 반응속도가 빠른 양자형 적외선 검출기를 사용하는 것이 좋다고 생각된다. 그러나 양자형 검출기는 확보와 운용이 어렵고 비용도 많이 소요되어 어려움이 있다. 본 연구에서는 열형 검출기중에 가장 감도가 좋은 초전형 검출기를 활용하였다. 사용한 초전형 검출기의 반응속도는 검출기의 시상수로 결정되며, 초전형 검출기의 정전용량 C와 로드저항 R_L 의 곱이 검출기의 시상수가 된다. 검출기의 정전용량은 수광면적에 따라 결정되고 로드저항 R_L 을 조절하여 반응속도를 조절할 수 있다. 그러나 여기에도 제약이 있다. 초전형 검출기의 반응속도와 광응답도(responsivity)는 절충관계(trade-off)에 있다. 즉 반응속도를 높이면 광응답도가 감소하여 관찰하기가 어려워지고 탐지도 또한 감소한다. 따라서 반응속도와 광응답도를 적절하게 절충하여 결정된 응답속도가 신호가 작은 협대역 투과 필터채널에서 30 ms 비교적 신호가 큰 광대역 투과 필터채널에서 3 ms 되도록 각 채널의 로드저항을 조절하였다. 참고로 사용한 검출기의 정전용량은 30 pF이었다^[6]. 이 반응속도는 연소형 섬광의 적외선특성을 관찰할 정도가 되며 폭발형 섬광의 지속시간 동안을 관찰하기에는 매우 부족한 면이 있다. 그럼에도 불구하고, 대부분의 적외선 방출은 폭발직후 잔존하는 화약 또는 가스에 의한 열 방출에 의한 것이라는 점을 고려하면, 섬광의 적외선 방출은 ms 범위에서 수 초까지 지속되는 적외선을 측정할 수 있으면 된다. 이런 측면에서 현재 설정된 측정 속도는 섬광의 적외선 특성을 측정하기에 적합하다고 생각된다.

적외선 측정 장치를 활용하기 위해서는 광 응답도가 요구된다. 광선속(photon flux)에 단위시간당 입사된 적외선 에너지, 즉 광선속에 대하여 그 출력신호의 크기가 얼마인가를 나타내는 척도로 식 (1)로 정의된다.

$$R_{v,\lambda} = \frac{V_{s,\lambda}}{\phi_{e,\lambda}} \quad (1)$$

여기서 $R_{v,\lambda}$ 는 λ 의 중심파장을 갖는 채널의 광 응답도, $V_{s,\lambda}$ 는 검출기의 출력전압이며 $\phi_{e,\lambda}$ 는 그 채널의 검출기에 입사된 광선속이다. 따라서 광 응답도의 측정은 각 채널에 알려진 광량을 입사시키고 그때의 채널의 검출기 신호를 측정하면 된다. Table 1에 측정된 광응답도를 나타내었다. 측정은 각 채널에 대하여 5회 반복 측정하여 그 결과를 평균한 것으로 측정의 표준편차를 광 응답도의 평균치로 나눈 척도가 3.5% 미만인 점으로 볼 때 광 응답도의 측정이 매우 잘 측정되었음을 알 수 있다.

세 종류의 섬광에 대하여 적외선 특성을 측정하였다. 이들 섬광은 금속 분말이 산화되면서 강한 빛을 내는 것으로 금속 분말, 산화제, 그리고 첨가제로 구성된다.^[7] 이들 섬광의 화약 성분, 상대적 광도(luminous intensity), 섬광 유지시간 그리고 화약량 등의 특성을 Table 2에 정리 하였다.

섬광의 적외선 측정은 특별히 안전시설과 측정시설이 준비된 야외시험장에서 실시하였다. Figure 2는 40 m 거리에서 섬광 A를 측정한 각 채널의 출력파형이다. Figure 2(a)에서 M1~M6는 중적외선 채널을, Fig. 2(b)에서 L2~L9은 원적외선 채널을 나타낸다. 한편 신호가 매우 작은 M6와 L9은 광대역 투과필터의 채널을 나타낸다. 이 두 채널에 입사된 광선속은 같은 영역의 다른 채널에 비교하여 매우 크지만 Table 1에서

TABLE 2. The some characteristics of each flash

Name	Main component of the flash	Flash duration	Relative luminous intensity	features
Flash A	Powder of Aluminum series	48ms	1.00	Amount of powder : 1600g, Combustive flash
Flash B	Powder of Aluminum series	16ms	0.17	Amount of powder : 80g, Combustive flash
Flash C	Powder including inert Xe gas	40 μ s	0.97	Amount of powder : 600g, Explosive flash

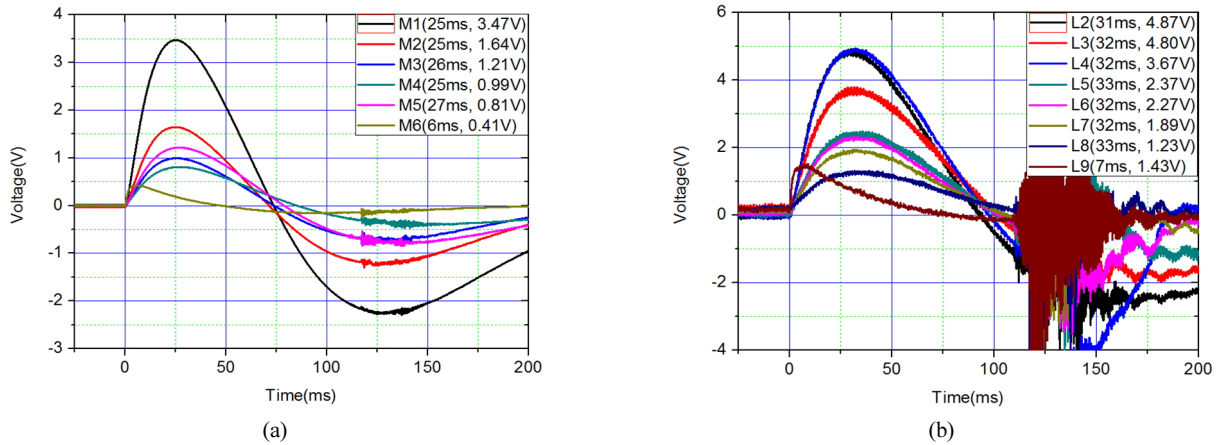


FIG. 2. The measured signals of flash A. (a) for the channels in MWIR region, (b) for the channels in LWIR region.

보는 바와 같이 반응도가 각각 6과 10 V/W로 매우 낮기 때문에 신호가 비교적 작다. 측정된 신호파형을 보면, 폭발직후 전압이 최고점에 도달 한 뒤 감소하여 다시 음의 값으로 떨어지는 형태의 그래프를 보이고 있다. 초전형 검출기의 특성인 자발분극 현상으로, 외부에서 전하의 주입이 있었고 입사된 적외선의 변화가 없으면 분극이 소멸되면서 주입된 전하가 외부 회로로 나오며 음의 전압을 보이는 것이다. 자발분극이 생성되고 소멸되는 시간을 규정하는 것이 앞서 논의한 초전형 검출기의 $R_L C$ 시상수 이다. 또 그래프 중반부인 120 ms 이후 잡음이 많이 측정되는 것을 볼 수 있다. 이는 섬광이 폭발 후 내는 폭음으로 인한 잡음으로 이해된다. 장비의 측정거리가 40 m이므로 섬광의 폭음이 도달하는 시간과 일치한다. 이러한 잡음은 초전형 검출기가 열전도로 인해 외부로 열이 유출되는 것을 막기 위해 열 고립구조로 충격에 민감하기 때문에 발생하는 것으로 판단된다.

세 종류의 섬광에 대하여 측정한 결과를 관찰해보면 출력 전압 파형은 유사하나 채널의 피크치의 위치가 서로 다를 수 있다. 이를 Fig. 2에 함께 정리하였다. 초전형 검출기의 출력이 입력 적외선의 변화량에 비례하는 신호를 만들어 내므로 MWIR 영역의 채널에서 약 25~27 ms 범위에서 피크를 보이는 것은 섬광의 적외선 방출은 기폭직후에 최대가 되고 이후로는 계속 줄어 들고 있음을 의미한다. 즉 각 채널의 시상수가 30 ms 인 점을 감안하면 중적외선 영역의 채널에서는 기폭직후에 가장 많은 적외선 광량이 수신되었고, 원적외선 영역의 채널에서는 이보다 6~7 ms 후에 적외선 이 최대

로 수신되었다고 생각할 수 있다. 한편으로, Fig. 2에서 관찰할 수 있듯이 출력전압의 피크 이후에는 상승되는 시간에 비하여 더 긴 시간 동안 완만하게 출력이 감소함을 볼 수 있다. 이는 피크 시간 후에도 적외선이 계속 방출되고 있음을 의미한다. 이 신호는 섬광의 연소 과정을 반영하고 있다고 생각할 수 있다. 즉 연소가 가장 맹렬하게 진행되어 적외선 에너지의 피크까지 방출하고 그 후 연소의 강도는 줄었지만 아직 연소가 계속되고 있다는 증거가 된다. 섬광 B 에서 얻은 자료에서도 이와 유사한 특성을 보인다. 즉 광도계로 측정한 섬광의 지속시간보다 다소 짧은 기간 동안에 걸쳐서 출력신호가 증가하고 그 후에 바로 감소하는 경향을 보인다.

그러나, 섬광 C에서 얻은 자료에서는 섬광 A, B에서와 달리 섬광지속시간과 관계가 없는 적외선 특성을 보이고 있다. Table 3에 세 종류의 섬광에 대해 M1, M6, L2, L9 채널의 최대값과 그때의 시간을 정리하였다. Table 3에서 볼 수 있듯이 각 채널의 최고 출력전압이 섬광 A보다 훨씬 낮고, 그 최고 전압을 나타내는 시간도 섬광 A보다 유사하거나 더 길다. 반응속도 측면에서는 가장 빠른 채널인 M6과 L9에서 섬광A와 비교하면 최고전압을 나타내는 시간이 섬광 C가 두 배 이상 늦게 나타남을 Table 3에서 관찰할 수 있으며, 그 피크 전압은 M6채널에서 5배 L9채널에서 2.4배 섬광 C에서 낮게 나타난다. 섬광 C에서 광도계로 측정한 섬광의 유지시간은 약 40 μ s로 섬광 C의 적외선 특성 측정결과에서 보이는 시간과 연관성이 없어 보인다. 즉 연소형 섬광 A, B에서 보였던 기폭 직후부터 강한 적외선을 방출하다가 점점 감소하는 특성

TABLE 3. The peak signals and their times of M1, M6, L2 and L9 channel of three flashes

Name	MWIR		LWIR	
	M1	M6	L2	L9
Flash A	3.47V, 25ms	0.41V, 6ms	4.87V, 31ms	1.43V, 7ms
Flash B	0.20V, 11ms	0.05V, 6ms	0.40V, 17ms	0.35V, 9ms
Flash C	0.71V, 28ms	0.08V, 14ms	1.38V, 30ms	0.60V, 14ms

을 섬광 C에서는 보이지 않는다. 이런 차이점은 다음과 같이 설명할 수 있다. 폭발형 섬광 C에서는 섬광 지속시간이 매우 짧아서 폭발 시 방출한 강한 광을 초전형 검출기로는 검출되지 않으며, 단지 폭발의 잔존물로 존재할 화약 등이 연소되는 과정에서 방출되는 적외선을 검출하고 있는 것으로 판단된다. 폭발 시에는 강한 빛이 방출된다는 근거는 광도계로 측정된 상대적인 광도에서도 볼 수 있다. 즉 Table 2에서 볼 수 있듯이 섬광 A와 C의 상대적 광도는 별다른 차이가 없다. 그럼에도 불구하고 적외선 영역에서 측정된 광은 섬광 A와 비교하여 중적외선 영역에서 5배 원적외선 영역에서 2.4배나 낮고 시간적으로 섬광의 지속시간과 적외선 방출되는 시간 사이에 많은 차이가 있다.

지금까지의 섬광의 관측신호를 관찰한 논의를 종합하면 다음과 같다. 연소형 섬광 A, B의 적외선 방출특성과 폭발형 섬광 C의 적외선 방출특성은 명확히 구분된다. 연소형 섬광에서는 비교적 장시간의 섬광 지속시간 중에 적외선을 방출하기 시작하여 지속시간 이후에도 적외선 방출이 계속된다. 섬광 지속시간 이후에 방출되는 적외선은 잔존화약의 연소에 의한 적외선으로 생각할 수 있다. 한편, 폭발형 섬광에서는 비교적 매우 짧은 지속시간에 매우 강한 광을 방출하지만 이 시간 동안 방출되는 적외선은 측정장치에서 반응하지 않으며 지속시간 보다 한참 이후에 적외선이 방출된다. 이 섬광에서도 섬광 지속시간이 한참 지난시기에 방출되는 적외선은 잔존화약의 연소에 의한 적외선으로 생각할 수 있다.

III. 섬광의 적외선 복사휘도와 복사온도

섬광을 광원으로 규정하는 파라미터를 생각해보면 어떤 강도의 광을 얼마동안 방출할 것인가를 나타내는 파라미터가 필요하다. 광원에서 방출되는 광의 강도, 즉 단위시간당의 방출되는 총 에너지는 단위시간당 광원의 단위면적에서 방출되는 에너지와 광원의 면적의 곱으로 표현할 수 있다.^[8] 적외선 광원의 관점에서 보면 적외선의 방출강도, 즉 적외선 영역에서의 복사휘도(radiance)와 광원의 면적의 곱이 된다. 복사휘도는 광원의 단위면적당에서 단위 입체각당 단위시간에 방출되는 적외선 에너지를 의미한다.

이 절에서는 섬광의 광원 파라미터로서 적외선 영역에서의 복사휘도를 고려하자. 복사휘도는 섬광의 측정결과에서 추출 가능하며 이 방법에 대한 소개는 참고문헌 2에서 상세히 기술하고 있으므로 여기에서는 결과만 논의하도록 한다. Figure 3에는 세계 섬광의 복사휘도를 보이고 있다.

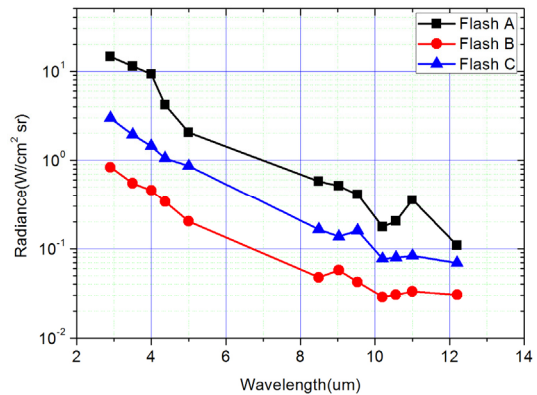


FIG. 3. The spectral radiances of the flash A, B and C.

Figure 3에서 다음을 관찰할 수 있다. 섬광 A의 복사휘도가 가장 크며, 섬광 C, B의 순으로 작아진다. 동일한 연소형 섬광인 A와 B를 비교해보면, 섬광 A의 복사휘도는 섬광 B 보다 약 10배 정도 크다. 또한 동일한 파장에서 두 섬광의 복사휘도의 비는 중적외선 영역에서의 비가 원적외선 영역에서의 비보다 크다. 즉 파장이 길수록 비가 줄어드는 경향을 보인다. 폭발형 섬광 C와 비교해도 비슷한 양상이 보인다. 또한 광원의 파라미터로서 섬광의 면적을 구할 수 있는 섬광의 등가반경은 섬광 A, C 그리고 B의 순으로 5.2 m, 3.6 m 그리고 3.0 m로 순서대로 줄어든다. 이 섬광의 등가 반경은 적외선 영상장비로 관찰한 관찰영상에서 추출된 것이다.

이 관찰 결과로부터 다음과 같이 말할 수 있다. 적외선 방출이 가장 큰 섬광은 섬광 A이고 그 다음이 섬광 C, B의 순서이다. 이는 광원의 광원의 면적 순서이기도 하다. 또한 광원의 화약량의 순서이기도 하다. 즉 화약량이 많을수록 연소 또는 폭발의 면적이 크고 이는 에너지를 많이 방출하는 경향을 보인다.

복사휘도는 섬광의 크기와 함께 섬광의 적외선 방출 정도를 나타내는 중요한 정보이다. 따라서 적외선 장비에 섬광이 미치는 영향을 모델링하기 위해서는 중적외선과 원적외선 영역에서 복사휘도와 광원의 면적이 요구된다. 우리는 섬광의 적외선 정보를 두 영역에서 파장에 따른 복사휘도를 규정하는 것보다 더욱 효과적인 방법으로 섬광의 적외선 정보를 파악할 수 있는 방법이 있다는 것을 알았다. 이 방법은 바로 섬광을 흑체로 근사적으로 취급하여 섬광의 복사휘도를 흑체의 복사온도로 근사할 수 있다는 점이다. 그러면 두 적외선 영역에서 복사휘도를 알아내는 것 보다는 복사온도를 알

면 그 온도에 해당되는 복사휘도를 바로 구할 수 있으므로 아주 편리하게 섬광을 규정지을 수 있다. 이에 대한 논의를 지금부터 시작한다.

섬광의 복사온도를 구하는 것은 세 종류의 섬광에 대하여 각각 두 적외선 영역에서 복사휘도를 구하였으므로, 이들로 구한 복사휘도를 대표할 수 있는 흑체의 복사온도를 구하는 문제로 귀결된다. 즉 Fig. 3에 있는 세 종류의 섬광의 복사휘도에 가장 잘 부합되는 흑체의 온도를 구하는 문제이다. Figure 4에는 세 종류의 섬광에 대하여 복사휘도 측정결과와 가장 잘 어

울리도록 가장 적합한 온도(the best fitted temperature)를 구한 결과를 보이고 있다. 즉 측정된 섬광의 복사휘도를 다음의 식 (2)로 주어지는 흑체의 복사휘도에 가장 잘 부합하도록 하는 흑체의 온도 T를 구하는 것이다.

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

보통 실험치를 최소자승법으로 커브-피팅(curve fitting)하여 실험식을 구한다. 그러나 본 연구에서는 증적외선 영역과 원적외선 영역에서 구한 복사휘도가 10배 이상 차이가 발생하여 커브 피팅에 최소자승법을 사용할 수 없었다. 이러한 이유로 적합한 온도를 찾는 데 가중치를 갖는 최소자승법(weighted least squares)을 사용하였다^[9,10].

$$WSS(T, w_i) = \sum_i w_i (L_{mi} - L_{Bi}(T))^2 \quad (3)$$

여기서 w_i 는 i -번째 data의 가중치이고, L_{mi} 와 L_{Bi} 는 각각 실험에서 구한 섬광의 복사휘도의 i -번째 자료와 같은 파장에서 온도 T의 흑체복사 휘도를 나타낸다. 식 (3)에서 적절한 가중치 w_i 에 대하여 WSS(Weight sum of square)가 최소로 되는 온도 T를 구하는 것이다. 그러면 가중치를 어떻게 결정할 것인가만 남아있다.

가중치는 실험적으로 구한 증적외선 영역의 복사휘도와 원적외선 복사휘도를 동일한 중요성으로 커브 피팅에 사용되도록 하기 위하여 원적외선 영역에 대하여 가중치 w_i 를 곱하고 증적외선 영역에서는 가중치를 1로 두었다. 원적외선 영역에 사용한 가중치는 M6와 L9채널의 신호의 비로 결정하였다. 이들 두 채널은 증적외선과 원적외선 영역의 전체 파장영역의 반응을 대표하는 즉 광대역 투과필터를 사용한 채널이므로 평균적으로 두 영역의 적외선의 방출 강도를 나타낸다고 볼 수 있다. 따라서 이들 두 채널의 출력신호의 비는 두 영역의 복사휘도의 비로 볼 수 있다는 점이다. 섬광 A의 경우 가중치는 13.1로 하였다. 한편, 어떤 범위의 가중치가 구하려는 복사온도에 미치는 영향이 미미한 범위가 있다. 즉 식 (3)의 WSS가 가중치에 따라 크게 변하지 않는 범위가 존재하고 이때의 온도 T 또한 큰 변화가 없는 가중치의 범위가 존재한다. 본 연구에서 광대역 채널의 신호비로부터 구한 가중치가 이 범위에 있는 것으로 보아 섬광을 흑체로 근사하는 것이 타당한 방법이라는 생각이 들었다.

이렇게 구한 섬광의 온도는 Table 4에 정리한 바와 같이 섬광 A, B 그리고 C에서 각각 3300K, 1120K 그리고 1640K 이었다. 구해진 섬광의 온도를 섬광의 화약량에 대하여 그림을 그리면 Fig. 5와 같다. 이 Fig. 5에서 보면 시험범위 내에서는 섬광의 복사온도가 화약량에 비례하는 것으로 생각할 수 있다. 이는 섬광이 연소(또는 폭발)시 화약이 산화되면서 방출하는 에너지 가운데 일부는 광에너지로 방출되고, 나머

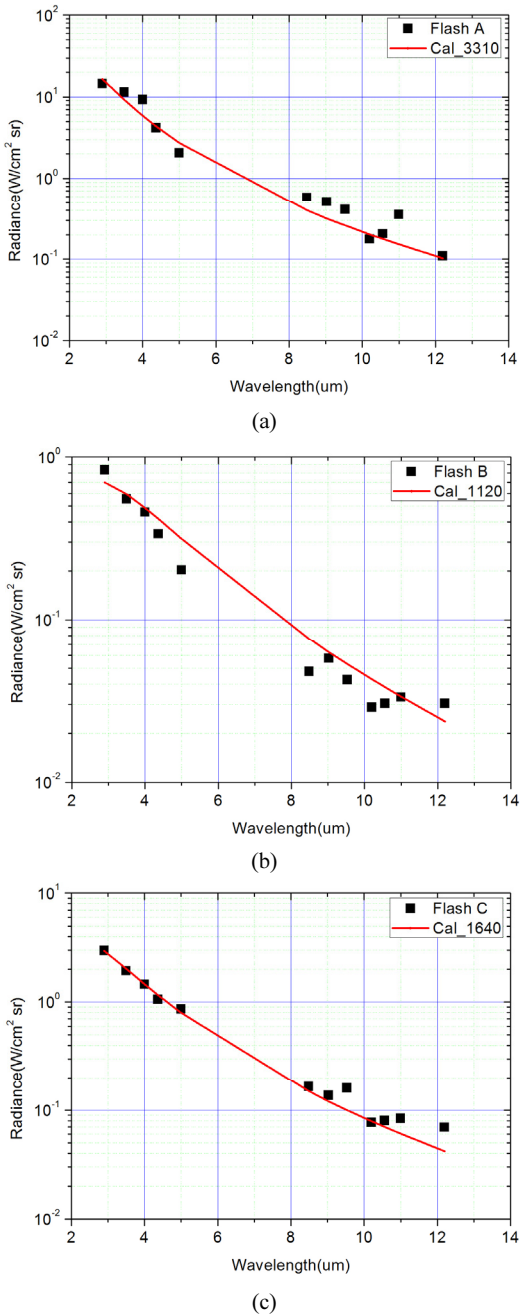


FIG. 4. The weighted least square fitting of the measured radiances to blackbody radiation theory (flash A, B, C).

TABLE 4. The radiative temperature of each flash

name	Radiative temperature	comments
Flash A	3300 K	Combustive
Flash B	1120 K	Combustive
Flash C	1640 K	Explosive

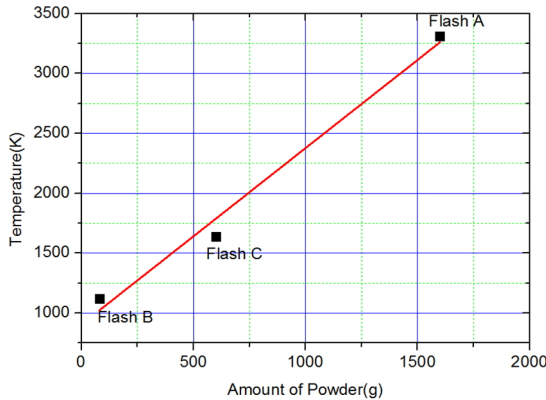


FIG. 5. The radiation temperature vs. the amount of powder of the flashes.

지는 열(적외선) 에너지로 대기로 방출하게 될 것이다. 열 에너지 가운데 섬광의 온도를 높이는 데 작용하는 양과 대기로 방출되어 소산되는 열을 고려하고, 측정 시 대기조건이 세 종류이 섬광에 대하여 동일하다고 가정하면 섬광의 온도는 화약량의 증가에 따라 증가하는 경향을 보일 것이라는 점을 기대할 수 있다.

후체복사법칙을 통해 추출된 각 섬광에 대한 복사온도는 약 1120 K~3300 K의 범위에 있으며 이는 상당히 높은 온도임을 확인할 수 있다. 복사회도와 마찬가지로 화약량이 많은 섬광 A의 온도가 3300 K로 가장 높으며, 섬광 C 1640 K 그리고 섬광 B 1120 K 순으로 나타난다.

전투기 배기가스온도가 800 K 정도임을 고려해볼 때 추출한 복사온도는 매우 높은 온도로 본 연구에 활용된 섬광이 800K부근의 표적을 탐색 또는 추적하는 적외선 장비를 충분히 포화시킬 수 있는 역할을 할 수 있다는 것을 의미한다.

IV. 결 론

섬광의 적외선 특성을 측정하고 그 결과로부터 섬광의 복사회도를 구하였다. 세 종류의 섬광에 대하여 적외선 특성을 측정하여 복사회도를 구하고 이로부터 섬광의 복사온도를 구하였다.

적외선 방출 특성은 섬광 A의 광파위가 가장 세며 섬광 C, B가 순으로 약해지는 것을 알 수 있었다. 추출된 복사회도에서 섬광의 복사온도를 추출하였다. 중적외선과 원적외선 복

사회도 값의 차이가 크기 때문에 가중최소제곱법을 사용하여 복사온도를 구하였다. 추출한 각 섬광에 대한 복사온도는 섬광 A 3300 K, 섬광 B 1120 K, 섬광 C 는 1640 K이다. 측정된 적외선 복사회도와 복사온도의 추출결과에서 볼 때, 적외선 방출은 화약량 의해 크게 의존하는 것을 알 수 있다. 또한 연소형 섬광이 폭발형 보다 더 강한 적외선을 방출하는 것으로 분석되며, 이는 적외선 관측장비에 미치는 영향은 폭발형 보다는 연소형이 더 크다는 것을 알 수 있었다. 측정된 섬광의 스펙트럼 복사회도 또는 복사온도는 광원의 크기와 함께 광원으로서 섬광의 정보로 활용될 수 있으며, 또한 섬광효과와 M&S에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 (주)한화의 지원으로 수행되었습니다.

References

1. S. Y. Lim, S. O. Han, H. W. Yang, S. B. Lee, and S. M. Park, "Extraction of the effective equivalent radius of flash," in *Proc. 2015 Symposium of KIMST* (Jeju International Convention Center, Korea, June 2015), pp. 216-216.
2. J. H. Jin, S. O. Han, H. W. Yang, and S. M. Park, "Design and implementation of a radiative Temperature measurement system for a flash light," *Korean J. Opt. Photonics*, **26**, 31-37 (2015).
3. J. H. Jin, S. O. Han, J. G. Shin, K. H. Chang, and S.M. Park, "Design of IR characteristics measurement system for flash source," in *Proc. 2014 Symposium of KIMST* (Jeju International Convention Center, Korea, June 2014), pp. 314-314.
4. Spectrogon, "Bandpassfilter data sheet," <http://www.spectrogon.com/product-survice/optical-filters/spectrogon-ab/narrow-bandpass-filter>.
5. Mirhz, "Bandpassfilter data sheet," <http://web.sensor-ic.com:8000/zlxiazai/eoc-inc/Narrow%20Band%20Pass%20Stock%20Filter%20List.pdf>.
6. Silverlight, "Pyroelectronic detector datasheet," http://www.silverlight.ch/pdf/eltec_404.pdf.
7. M. R. Kwon and D. W. Kim, "Bright Flash Device driven by Explosives of Directional type," *Korea Patent 1020120041347* (2014).
8. E. L. Dereniak and G. D. Boreman, *Infrared Detectors and Systems* (John Wiley & sons, New York, USA, 1996), Chapter 2.
9. D. Ruppert and M. P. Wand, "Multivariate locally weighted least squares regression," *The annuals of statistics*, **22**, 1346-1370 (1994).
10. N. Cressie, "Fitting variogram models by weighted least squares," *Mathematical Geology*, **17**, 563-586 (1985).