비냉각형 적외선 센서를 이용한 열상시스템과 냉각형 적외선 센서를 이용한 열상시스템의 화재 진압 시 성능 비교

Performance Comparison of Thermal Imagers with Uncooled and Cooled Detectors For Fire Fighting Application

김 영 호*, 김 병 혁, 정 한
(Young Ho Kim, Byung Hyuk Kim, and Han Jung)

Abstract : Thermal Imaging systems are reported to be crucial for fire fighting and beginning to be used by fire fighters. The performance of thermal imaging system is determined by both the radiation of infrared from the target and the attenuation of infrared signal in the optical path by the absorption, scattering, diffraction and reflection. In the scene of fire, water drops with various sizes such as vaporized water, wafer mist from sprinkler, and wafer to suppress the fire reside with various gas generated by burning. To measure the transmission of infrared radiation in the scene of fire, fire simulating system and thermal imagers with cooled detector which detects $3 \sim 5\mu m$ infrared and uncooled detector fabricated by the MEMS technology which detects $8 \sim 12\mu m$ infrared. are made. With thermal imagers and fire simulating system, the change of thermal image with respect to the change of visibility controlled with the burned gas was measured. It was found that the transmission of infrared was not reduced by the burned gas, which could be explained by the long wavelength of infrared ray compared with visible ray. However, the transmission of infrared ray was largely reduced by the combination of burned gas and water mist supplied by sprinkler. This is contrary to the results of calculated transmission through the pure water mist and shows that the transmission of infrared ray is mostly affected by the compounds of water mist and burned gas. In this case, it was found that the uncooled detector which detects $8 \sim 12\mu m$ infrared ray is better than cooled detector which detects $3 \sim 5\mu m$ infrared ray for fire fighting.

Keywords : *infrared sensor, thermal imager, fire fighting, transmission, water mist*

I. 서론

적외선 검출기를 이용한 적외선 열상시스템은 화재 시에 매우 유용한 것으로 보고되고 있으며 최근 점차 많이 이용되고 있는 추세이다. 적외선 열상시스템은 초기 화재 발생뿐 아니라 화재를 진압하고 마지막 점검할 때까지의 화재 상황 전반에서 사용될 수 있다. 특별히 초기 화재에서의 발화점 발견과 발화점의 직접 진화에 사용될 수 있으며, 전기 누전 등으로 인한 벽 뒤의 안 보이는 화재를 발견하거나, 인명 구조, 탈출구 탐색 등에 적용될 수 있는 것으로 보고되고 있다. 적외선 열상시스템이 화재 시에 사용될 수 있는 이유는 반사된 빛을 보는 가시광선과 달리 적외선이 물체 자체에서 발산되며 파장이 길기 때문으로, 화재 시에 발생된 연기와 물방울, 정전 등에 의해서 눈으로는 전혀 식별할 수 없는 상황에서 시각적인 정보를 얻을 수 있다.

적외선 열상시스템은 비냉각형 적외선 검출기를 이용한 비냉각형 열상시스템과 냉각형 적외선 검출기를 이용한 냉각형 적외선 열상시스템이 있다. 비냉각형 적외선 검출기는 MEMS(Micro Elector-Mechanical System) 기술을 이용한 Micro Bolometer가 있으며, 주로 $8 \sim 12\mu m$ 대역의 적외선을 감지할 수 있다. 반면 냉각형 적외선 검출기는 HgCdTe 또는 InSb를 이용한 적외선 검출기를 사용하며, $3 \sim 5\mu m$ 대역의 적외선을 감지한다. 비냉각형 열상시스템은 상온 근처의 온도를 유지하기 위한 최소한의 냉각기를 이용하여 작동하므로 고가의 냉각기를 필요로 하는 냉각형 적외선 검출기에 비해 가격이 낮지만, 냉각형 적외선 검출기에 비해서 성능이 1/100배 정도 나쁘다[1].

본 논문에서는 화재 시에 비냉각형 적외선 검출기와 냉각형 적외선 검출기의 성능을 이론적인 분석과 자체 제작된 열상시스템과 화재 상황 모사장치를 이용하여 실험적으로 비교한다.

* 책임저자(Corresponding Author)
논문접수 : 2006. 12. 1., 채택확정 : 2006. 12. 22.
김영호, 김병혁, 정한 : i3system(주)
(muppy69@i3system.com/bhkim@i3system.com/jhan@i3system.com)

II. 이론

일반적으로 적외선은 $1.1 \sim 2.5\mu m$의 근적외선대역(SWIR, Short Wavelength Infrared), $2.5 \sim 7.0\mu m$의 중적외선대역(MWIR, Middle Wavelength Infrared), $7.0 \sim 12\mu m$의 원적외선대역(LWIR, Long Wavelength Infrared)으로 구분한다. 온도를 갖는 모든 물체는 Planks 법칙으로 기술되는 다음의 식과 같은 적외선을 방사하게 된다[1].

$$I(\lambda, T) = \frac{8\pi hc\varepsilon}{\lambda^5} \frac{1}{\exp(hc/\lambda kT) - 1} \quad (1)$$

여기에서 λ는 파장, T는 온도를 의미하며, h는 Plank 상수, k는 Boltzmann 상수, c는 빛의 속도이다. 실제의 물체는 Plank 법칙에서 기술하는 식보다 적은 양의 적외선을

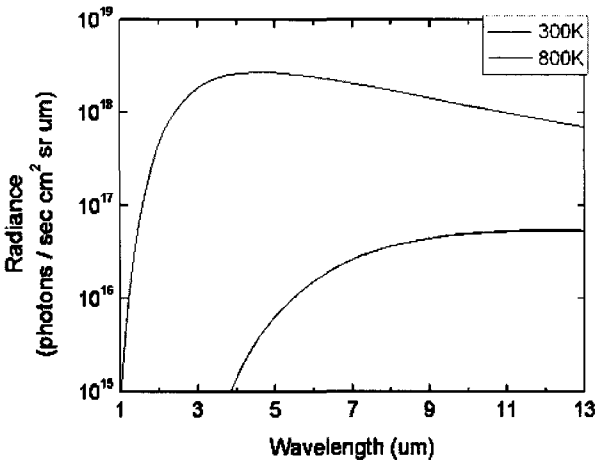


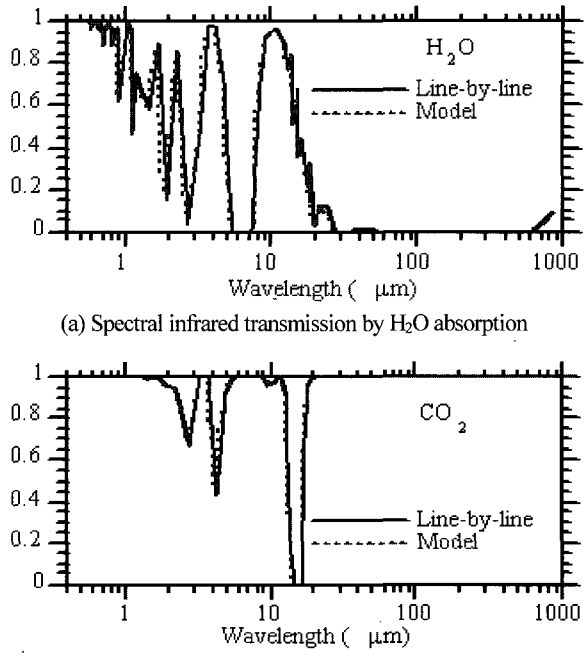
그림 1. 상온과 고온 물체의 파장에 따른 적외선 발산. 300K의 물체는 인체의 온도에 해당되며, 800K는 화재 시에 건물 위에 쌓이는 연기의 온도에 해당됨.

Fig. 1. Calculated Infrared radiation from room temperature and high temperature body. The 300 K body corresponds to human body and 800 K corresponds to high temperature fume accumulating on top of the building during fire.

발산하며 그 비율을 발산율(emissivity)로 나타낸다. 그림 1은 발산율이 1인 흑체에 해당하는 물체에서 파장에 따라 발산되는 적외선의 양을 계산한 결과이다. 인체의 온도와 비슷한 300K에 해당하는 물체는 8~12㎛ 대역의 적외선을 많이 발산하게 되며, 화재 시에 건물 위에 쌓이는 연기의 온도에 해당하는 800K의 물체에서는 3~5㎛ 대역의 적외선이 많이 발산되는 것을 알 수 있다. 그림 1로부터 저온의 물체가 고온의 연기에 덮이는 경우 고온의 가스에서 발생되는 적외선이 저온의 인체에서 발생되는 적외선 보다 100배 이상 많게 되므로 적외선 열상시스템으로는 저온의 물체를 구분할 수 없다는 것을 알 수 있다.

물체로부터 발산된 적외선은 대기를 통과해서 적외선 열상시스템으로 입사하게 되며, 이중 일부는 대기의 H_2O나 CO_2에 의해 흡수된다. 그림 2는 H_2O와 CO_2의 흡수에 의해 파장에 따른 투과율을 계산하고 측정한 결과이다[2]. 3~5 ㎛ 대역의 적외선은 H_2O와 CO_2 모두에 의해서 적외선 흡수가 발생되는 것을 알 수 있으며, 따라서 중적외선 대역보다는 원적외선 대역에서의 적외선 투과가 유리한 것을 알 수 있다. 일반적으로 화재 시에 발생되는 연기에 의한 적외선의 반사와 굴절 현상은 파장이 길수록 유리하다[3,4].

화재 현장에서 적외선의 진행에 방해가 되는 또 다른 요소는 화재 현장에서 발생되는 열에 의한 고온의 습기와 스프링클러에서 분사되는 물방울이며, 이러한 물방울이 연기와 결합되는 경우 그 영향이 더욱 커지게 된다. 스프링클러에서 분사되는 미세한 물방울에 의한 적외선의 굴절과 투과현상은 스프링클러의 특성을 아는 경우 Mie 이론으로 계산할 수 있다[5]. 특히 물방울에 의한 다중굴절(multiple scattering)이 발생하지 않는 경우[6] 적외선의 투과는 다음의 식으로 나타낼 수 있다.



(a) Spectral infrared transmission by H_2O absorption

(b) Spectral infrared transmission by CO_2 absorption

그림 2. 대기 중의 적외선 흡수에 의한 파장에 따른 적외선 투과도.

Fig. 2. Spectral infrared transmission through air.

$$In[\tau(\lambda)] = In(\frac{I(\lambda)}{I_0(\lambda)}) = -\int_0^L [\Sigma(n_i(D_i,\lambda)Q_{ext}(D_i,\lambda)\frac{\pi D_i^2}{4}]dx \quad (2)$$

x는 광학경로상의 거리이며, n_i는 i번째 부피군에 해당하는 물방울의 부피비, D_i는 i번째 부피군에 해당되는 물방울의 직경, Qext는 광학 흡수 효율을 의미한다. (2)를 이용하여 적외선의 투과를 계산하기 위해서는 스프링클러 및 고온의 습기의 물방울 크기와 분포를 알아야 하며, 굴절률(refractive index)을 알아야한다. 스프링클러에서 발생되는 물방울을 가정하며 전방 산란(forward scattering)과 다중 굴절현상을 무시한 경우의 적외선 투과는 계산 결과 전파장 대역에서 80% 정도의 투과를 나타내는 것으로 계산되었다[7]. 그러나 이러한 결과는 실제 화재 상황에서 발생되는 CO_2, CO, H_2S, SO_2, NH_3, HCN, $COCl_2$, HCl 등의 연소가스와 물방울과 결합된 연기를 고려할 때 많은 차이를 가져올 것으로 예상되며 따라서 실제 상황과 비슷한 상태에서의 적외선 투과에 대한 측정이 필요하다.

III. 실험 및 고찰

실제 화재 상황에서의 적외선 열상시스템의 성능을 분석하기 위해서 화재 상황 모사 장치와 열상시스템을 제작하였다. 그림 3은 화재모사장치의 개념도이다. 한쪽 면에 흑체를 위치시키며 반대 면에 적외선 열상시스템을 위치시킨다. 흑체로부터 적외선이 입사할 수 있도록 ZnSe로 제작된 적외선 창을 사용하였다. ZnSe는 비반사막 처리가 되어 있지 않으며 1~20um 대역의 적외선에 대해서 평균 60%의

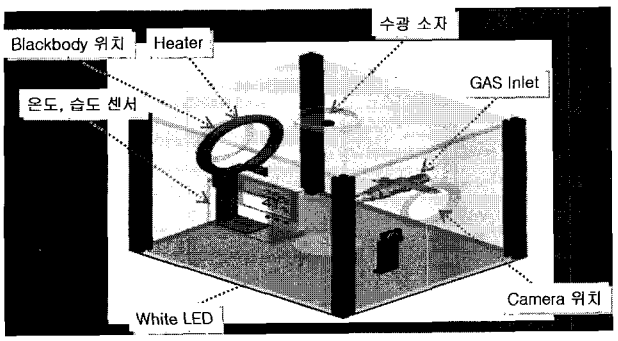


그림 3. 화재 모사 장치의 개념도.

Fig. 3. Schemetic diagram of fire simulation system.

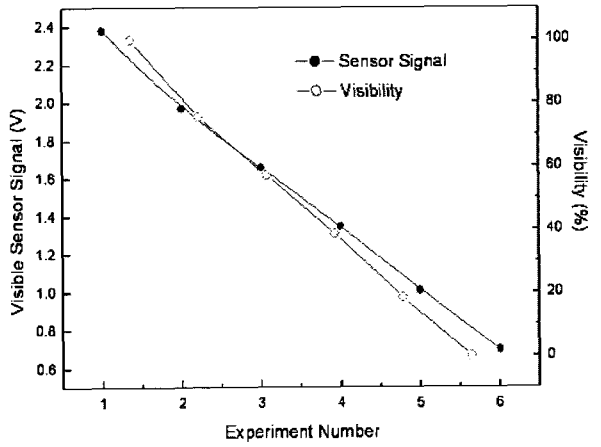


그림 4. 백색 LED로부터 나온 빛을 수광소자를 이용하여 측정한 가시도. 유입되는 가스의 양을 조절하여 일정한 가시도에서 적외선의 투과도를 측정하게 됨.

Fig. 4. Visibility defined by the photo-sensor signal generated by the white LED. The visibility is controlled for maintaining uniform infrared transmittance.

투과도를 갖는다. 흑체로부터 발산된 적외선은 가스와 수증기를 함께 넣을 수 있는 관으로부터 들어오는 가스를 통과하여 열상시스템으로 입사하게 된다. 적외선이 통과하는 가스의 농도를 일정하게 만들기 위해서 가스의 농도를 측정할 수 있도록 하였다. 화재 모사 장치 아래 면 중심에 백색 LED를 놓고 수직의 윗면에 수광소자를 위치하여, 백색 LED로부터 발생된 빛을 수광 소자로 측정하여 가시도를 규정할 수 있도록 하였다. 또한 내부에 팬을 놓아 공기를 순환시켜 내부의 가스분포가 일정하도록 하였으며, 내부의 가스가 외부로 새어나오는 것을 막기 위해서 내부를 외부와 완전히 차단하였다. 그림 4는 화재 모사 장치를 이용하기 위해서 가시도를 미리 측정한 결과이다. 백색 LED에서 나온 빛은 유입된 가스에 의해 산란되거나 흡수되어 위에 방출된 빛 중 일부만 수광소자로 도달하게 되고, 그 양이 작을수록 수광소자에서 나오는 신호의 크기가 작아지게 된다. 가스가 전혀 유입되지 않은 경우 수광 소자의 신호는 2.4V이며 가시도를 100%로 규정하였고, 가스가 최대로 들어간 경우 수광소자에서 발생되는 신호는 0.7V로 가시도을 0%로 규정하였다.

표 1. 제작된 열상시스템의 제원.

Table 1. Specification of thermal imaging system.

항목	비냉각형 열상시스템	냉각형 열상시스템
Format	320 × 256	320 × 256
Spectral Range	8 ~ 12㎛	3 ~ 5㎛
F/#	0.86	3.25
Sensor	Micro-Bolometer	HgCdTe
Frame Rate	60Hz	60Hz
NETD	200mK	20mK

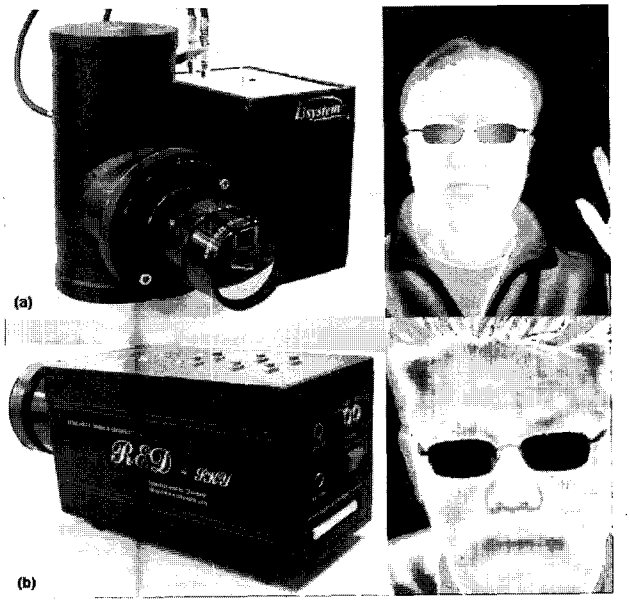
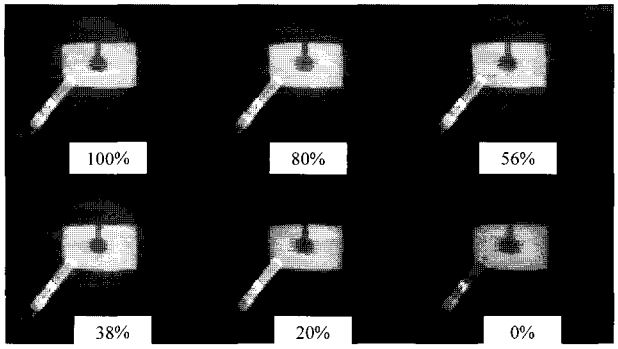


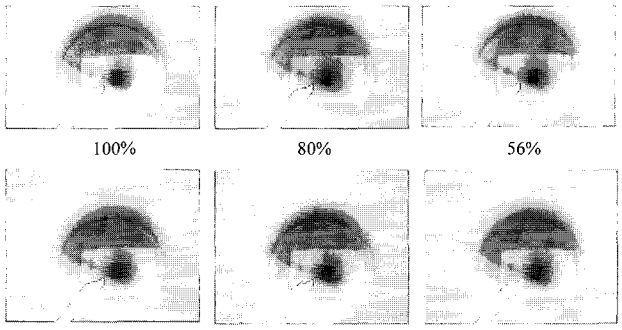
그림 5. 제작된 적외선 열상시스템과 이를 이용하여 획득한 적외선 열상. (a) 냉각형 중적외선 열상시스템 (b) 비냉각형 원적외선 열상시스템.

Fig. 5. Fabricated thermal imaging system and achieved thermal image. (a) Cooled MWIR thermal imaging system (b) Uncooled LWIR thermal imaging system.

가스를 통한 적외선의 흡수를 측정하기 위해서 냉각형 열상시스템과 비냉각형 열상시스템을 제작하였다. 사용된 열상시스템의 성능은 표 1에 요약하였다. 냉각형 열상시스템에는 HgCdTe를 이용한 적외선 센서를 사용하였으며 냉각을 위해서 액체질소를 부어 냉각하는 금속 듀워를 이용하여 제작하였다. 비냉각형 열상시스템은 Micro-Bolometer형의 센서를 이용하여 제작되었다. 냉각형 열상시스템은 센서를 냉각하므로 비냉각형 열상시스템에 비해 최소분해가능온도(NETD: Noise Equivalent Temperature Difference)가 1/10로 작은 것을 알 수 있다. 이것은 비냉각형 열상시스템에 비해 1/10로 작은 온도차를 구분할 수 있다는 것을 의미한다. 냉각형 열상시스템에 사용된 적외선 센서는 3 ~ 5㎛의 적외선을 감지하나, 비냉각형 열상시스템에 사용된 센서는 8 ~ 12㎛ 대역의 적외선을 감지한다. 그림 5는 제작된 열상시스템의 사진과 각 열상시스템을 이용하여 획득한 인체의 적외선 열상이다. 냉각형 열상시스템이 비냉각형 열상시스



(a) Infrared thermal image obtained by uncooled LWIR imaging system

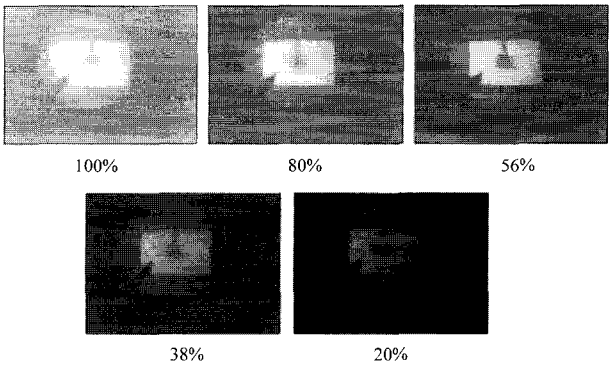


(b) Infrared thermal image obtained by cooled MWIR imaging system

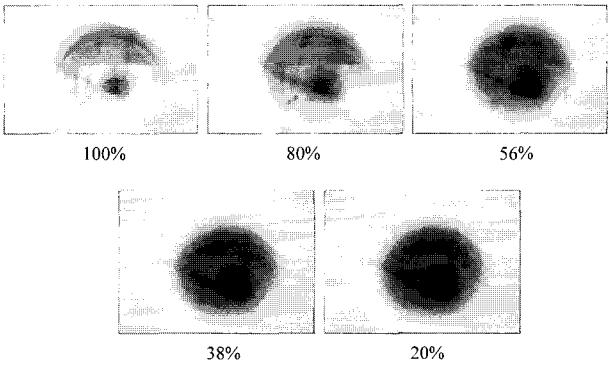
그림 6. 가스를 주입하며 측정한 가시도에 따른 적외선 열상의 변화. 중심의 밝은 부분이 30도에 해당됨.

Fig. 6. Visibility vs. thermal image change by the gas injection. Center white region corresponds to 30 °C target.

템에 비해 최소분해가능온도가 작으므로 깨끗한 열상을 얻을 수 있는 것을 알 수 있다. 그림 6은 제작된 열상시스템과 화재모사장치를 이용하여 획득한 가시도에 따른 열상의 변화를 측정한 결과이다. 연소 가스만을 주입하여 가시도의 변화를 만든 후 측정하였으며, 습도는 일정하게 유지하였다. 가운데에 위치한 직사각형의 밝은 부분이 30도 흑체로부터 발생된 적외선 신호로 얻은 열상이며, 중심의 형태는 열상시스템의 초점을 잡기 위해서 만든 패턴이다. 바깥의 밝은 부분은 고온의 인두이다. 그림에서와 같이 가시도가 변해도 적외선 열상은 크게 변하지 않는 것을 알 수 있다. 이러한 특성은 파장이 긴 적외선의 특성상 입자의 크기가 작은 먼지와 같은 가스에 의해서는 적외선이 크게 감소되지 않는 다는 것을 의미한다. 그림 7은 가스와 스프링클러의 물방울을 함께 넣으며 가시도에 따른 적외선 열상의 변화를 측정한 결과이다. 가스만을 넣은 경우와 달리 동일한 가시도에서 열상으로부터 얻은 신호의 크기가 감소하는 것을 볼 수 있다. 이러한 현상은 스프링클러의 물방울만을 고려한 계산 결과와는 상반되는 것으로, 실제의 화재 상황에서의 적외선 투과도의 변화는 가스와 물방울이 혼재된 경우 물체로부터 발산된 적외선의 많은 부분이 흡수되어 적외선 열상의 질이 나빠진다는 것을 의미한다. 그림 7에서 볼 수 있듯이 8 ~ 12㎛ 대역의 적외선을 감지하는 비냉각형



(a) Infrared thermal image obtained by uncooled LWIR imaging system.



(b) Infrared thermal image obtained by cooled MWIR imaging system.

그림 7. 가스와 스프링클러의 물방울을 함께 주입하며 얻은 가시도에 따른 적외선 열상의 변화.

Fig. 7. Visibility vs. thermal image change by the injection of both the gas and water from sprinkler.

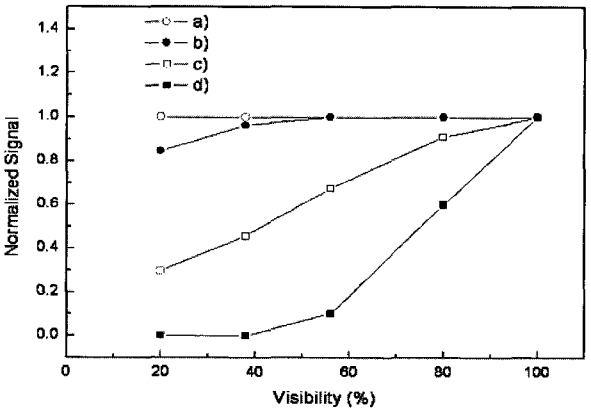


그림 8. 가시도에 따른 적외선 의 투과도의 변화. a) 3 ~ 5㎛ 대역, 가스만을 주입 b) 8 ~ 12㎛ 대역, 가스만을 주입 c) 8 ~ 12㎛ 대역, 가스와 스프링클러 물방울 함께 주입 d) 3 ~ 5㎛ 대역, 가스와 스프링클러 물방울 함께 주입.

Fig. 8. Infrared transmittance vs. visibility. a) 3 ~ 5㎛ range, only gas was injected b) 8 ~ 12㎛ range, only gas was injected c) 8 ~ 12㎛ ranage, gas and sprinkler water were both injected d) 3 ~ 5㎛ ranage, gas and sprinkler water were both injected.

열상시스템이 3~5㎛ 대역의 적외선을 감지하는 냉각형 열상시스템보다 화재 상황에서 유리한 것을 알 수 있다. 그림 8은 측정된 열상으로부터 추출된 적외선의 투과도를 계산한 결과이다. 단순 물방울만을 고려한 투과도 계산과는 달리 물방울과 가스가 혼재하는 경우 3~5㎛ 대역의 적외선 투과는 크게 감소하는 것을 알 수 있으며, 8~12㎛ 대역의 적외선 투과도 계산과는 달리 많이 감소하는 것을 알 수 있다. 따라서 8~12㎛ 대역의 적외선을 감지하는 비냉각형 열상시스템이 성능이 매우 좋은 냉각형 열상시스템보다 화재 현장에서 유리한 것을 알 수 있다.

V. 결론

화재 현장에서의 열상시스템의 성능은 물체로부터 발생된 적외선의 투과도와 매우 밀접한 관련이 있다. 적외선의 투과도가 높을수록 좀 더 멀리 있고 온도가 낮은 물체를 식별 가능하여, 인명 및 재난을 막을 가능성이 높아지게 된다. 화재 현장은 화재로 인한 다양한 종류의 가스와 열기로 인한 습도, 스프링클러로부터 발생되는 물방울 등으로 매우 복잡하다. 따라서 이러한 상황에서의 적외선의 투과를 계산하는 것은 매우 복잡하며 많은 경우 실제와 다르게 된다. 따라서 본 논문에서는 화재를 모사할 수 있는 장치를 제작하고, 일반적으로 많이 사용되는 중적외선과 원적외선의 열상시스템 제작하여 화재 상황에서의 적외선 투과를 열상의 변화를 통하여 측정하였다. 화재 모사 장치는 가시도를 규정하여 일정한 가시도 에서의 적외선 투과도를 측정할 수 있도록 하였다. 중적외선 열상시스템의 성능은 원적외선 열상시스템의 성능에 비해 최소 분해 가능 온도 차이(NETD)가 1/10로 작은 값을 보인다. 적외선 투과도 측정은 가스만 넣은 상태와 가스와 수분을 함께 놓은 상태에 대해서 측정하였다. 수분만 넣은 상태에 대한 이론적 실험적 투과도는 파장 대역에 관련없이 80% 정도 이다. 중적외선과 원적외선 열상시스템은 가스에 대해서 매우 높은 투과도를 보이는 것으로 측정되었다. 가시도가 20% 이하에서도 중적외선 원적외선 모두 80% 이상의 투과도를 보이는 것을 알 수 있다. 반면에 가스와 스프링클러의 물방울이 결합된 연기에 의한 적외선 투과는 매우 작아지는 것으로 측정되었다. 특히 중적외선 대역의 적외선은 가시도 60% 이하에서의 투과도가 10% 이하로 크게 감소하는 것을 알 수 있다. 반면에 원적외선의 투과도는 가시도에 비례해서 감소되는 것을 알 수 있었다. 이러한 결과는 화재 상황에서의 열상시스템의 성능이 열상시스템 고유의 성능에 의해서 결정되지 않으며 주위의 상황에 더 큰 영향을 받게 되어, 성능이 우수한 중적외선 열상시스템보다 성능이 떨어지는 비냉각형 원적외선 열상시스템이 화재 현장에 더 유리하다는 것을 의미한다.

참고문헌

[1] E. L. Dereniak and G. D. Boreman, *Infrared Detectors and Systems*, John Wiley & Sons. Inc. New York, 1996.

[2] G. C. Holst, *Testing and Evaluation of Infrared Imaging System,* JCD Publishing, Winter Park, FL. USA, 1998.

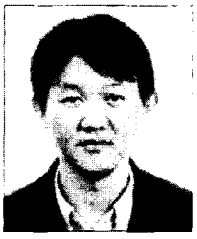
[3] H. C. van de Hulst, *Light Scattering by Small Particles*, General Publishing Company, Toronto, Canada, 1957.

[4] J. F. Widmann, "Evaluation of planck mean absorption coefficients for radiation transport through smoke," *Combust Sci Technol.*, 175, p. 2299, 2003.

[5] G. Mie, "Optics of turbid media," *Ann Phys*, 25, p. 377, 1908.

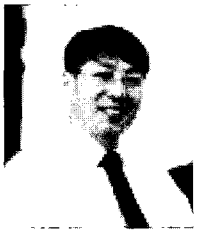
[6] J. F. Widmann, "Characterization of a residential fire sprinkler using phase doppler interferometry," *Atomizat Sprays*, 11, p. 69, 2002.

[7] J. F. Widmann, "The Effect of Water Sprays on Fire Fighter Thermal Imagers," *Fire Safety Journal*, 39. p. 217, 2004.



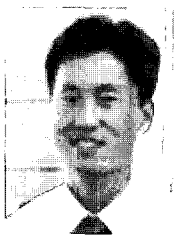
김 영 호

1993년 한국과학기술원 학부 전자과 졸업. 1995년 동 대학원 석사. 2000년 동 대학 박사. 2003년~현재 i3system (주)에 재직. 관심분야는 적외선 센서 및 반도체 공정.



정 한

1988년 연세대 학부 전자과 졸업. 1991년 한국과학기술원 대학원 석사. 1995년 동 대학 박사. 1992년~1997년 현대 반도체 선임연구원. 1998년~현재 i3 system (주) 대표이사.



김 병 혁

1995년 경북대학교 전자공학과 학사. 1997년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 석사. 2002년 동 대학원 박사. 2002년~현재 i3system (주)에 재직. 관심분야는 신호취득회로 설계 및 영상시스템.