

수동형 FTIR 원격화학 탐지기를 이용한 SF₆ 오염운의 실시간 탐지

정유진¹⁾ · 박병황^{*,1)} · 김주현¹⁾

¹⁾ 국방과학연구소 제5기술연구본부

Passive Remote Chemical Detection of SF₆ Clouds in the Atmosphere by FTIR

Eugene Chong¹⁾ · Byeonghwang Park^{*,1)} · Ju Hyun Kim¹⁾

¹⁾ The 5th Research and Development Institute, Agency for Defense Development, Korea

(Received 5 October 2013 / Revised 30 December 2013 / Accepted 17 January 2014)

ABSTRACT

Brightness temperature spectra acquired from FTIR(Fourier Transform Infrared)-SCADS (Standoff Chemical Agent Detection System) could be available for detection and identification of the chemical agents and pollutants from different background. IR spectrum range of 770 to 1350 cm⁻¹ is corresponding to “atmospheric window”. A 2-dimensional(2D) brightness temperature spectrum was drawn from combining each data point through automatic continuous scanning of FTIR along with altitude and azimuth. At higher altitude, temperature of background was decreased but scattering effect of atmospheric gases was increased. Increase in temperature difference between background and blackbody in SCADS at higher temperature causes to increases in peak intensity of SF₆. This approach shows us a possibility that 2D visual information is acquired from scanning data with a single FTIR-SCADS.

Key Words : Passive(수동형), Sulfur Hexafluoride(육플루오린 황), Fourier Transform Infrared(푸리에 변환 분광), Standoff Chemical Agent Detection System(수동형 원격화학 탐지기), Altitude(고각), Azimuth(방위각), Simulant(유사작용제)

1. 서론

대기오염 및 인체에 유해한 산업 유독물질이나 전시 상황이나 대테러 전에서 대살상 무기로 사용되는 화학 무기와 같은 화학 오염운은 무색, 무취의 특성을 갖고 있기 때문에 이들을 조기에 탐지하여 대처하는 데는

* Corresponding author, E-mail: pbh1348@add.re.kr
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

광학기술을 이용한 원격 탐지 기술(Remote Sensing)이 필수적이다. 광을 이용한 센서는 비접촉으로 할 수 있고, 광 에너지를 전기에너지로 변환이 용이하여 이에 따른 장점들이 많다. 광센서의 검출대상이 되는 주요 파장(wave length, λ)에 따라 자외선(Ultraviolet, 1 ~ 400 nm), 가시광선(Visible light, 390 ~ 780 nm), 적외선(Infrared, 0.78 ~ 1000 μm)으로 크게 3 가지로 나뉘게 된다. 일반적으로 적외선은 대기의 기체, 수분에 의해 흡수되는데, 8 ~ 12 μm 대역의 영역에서는 자연 배경의 복사 방출율(emissivity)이 0.95 이상으로 원격 탐지기에 적용하기 유리한 영역으로 일명 대기창으로 알려져 있다.

수동형 푸리에 변환 적외선(FTIR : Fourier Transform Infrared) 기반의 원격 화학탐지기술은 오염 가스와 독성 화학물질과 같은 오염원 감지를 위해 약 10년 전부터 활발히 연구 활용되어 왔다^[1]. 이는 수동형 FTIR 원격 탐지기의 아래와 같은 장점 때문이다^[2].

- 저렴한 운용 비용
- 쉬운 사용 방법
- 실시간 측정
- 광원이 필요 없어 소형화 가능
- 대상물질에 영향을 주지 않고 여러 번 재측정 가능
- 대상물질에 화학적 변화 및 기계적 손상이 없음

대표적인 응용연구 분야는 군수분야와 민수분야로 나눌 수가 있는데, 군수분야에서는 화학테러 및 화학전장에서 원격거리의 야외에서 실시간으로 독성 가스운의 식별 및 탐지가 가능한 수동형 FTIR 기술이 주요 기술로 응용되고 있다^[3]. 민수분야에서는 지구온난화와 관련된 온실가스 및 대기가스 및 배기가스 분석에 사용되며, 지질학적 연구를 위한 화산체 분출 가스 분석에도 활발히 응용되고 있다^[4]. 그 연구 성과로는 한국자동차공학회에 발표된 승용차의 온실가스 분석 및 배기가스 배출량, 주행모드에 따른 분석, 한국방위산업학회에 발표된 원격 화학가스 탐지용 FTIR 논문을 통해 수동형 FTIR의 기술 동향 및 원리, 탐지성능 등에 대한 연구가 있다^[5,6]. 국방과학연구소에서는 2011년 FTIR 기반 수동형 원격 화학탐지기술 연구의 기술 동향 분석과 수동형 푸리에변환 적외선 분광기의 잡음등가 온도지수 논문을 통해 흑체를 적용하여 분광분해능을 개선시킨 연구결과를 각각 지상무기 학술대회와 한국군사과학기술학회지에 발표하였다^[4,7]. 국외

의 경우 독일의 함부르크 공대의 R. Harig 박사 그룹과 Bruker Daltonics사 등이 중심이 되어 연구를 진행해 왔다. 대표적인 성과로 1998년 자연 배경으로 한 오염원의 온도 스펙트럼 검출^[8]을 SPI에 발표한 이후 비행기 연소가스의 분석 연구^[9] 및 FIFA 월드컵 경기 중 관람객의 음주에 의한 경기장 내의 에탄올(ethanol) 분석^[10] 등의 흥미로운 연구결과를 발표하였다. 캐나다에서는 Telops사를 중심으로 여러 대학과 미국과의 협력연구를 통해 다양한 연구가 진행되고 있다. 이외에도 최근에는 다양한 그룹에서 화생방 가스나 공업용 화학 물질^[11], 바이오 물질 탐지^[12] 등에 대한 FTIR을 이용한 연구 결과를 제시하기도 하였다.

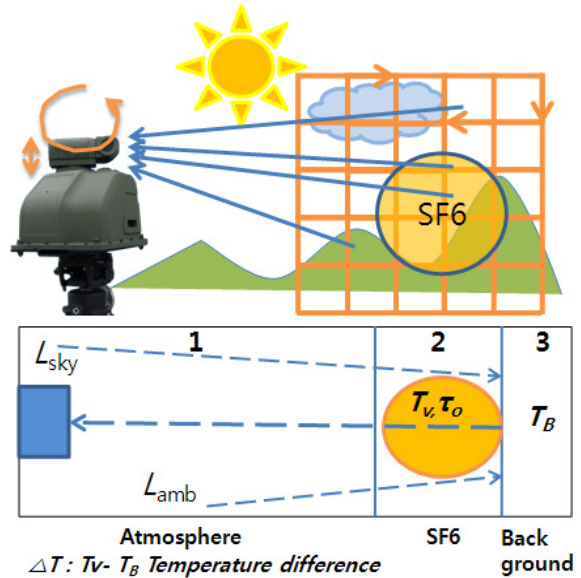


Fig. 1. The schematic of SCADS(Stanoff Chemical Agent Detection Spectrometer) system

그 원리는 복사 전달을 이용한 층 모델(Layer model)로 설명할 수 있으며, 각층이 균일한 성질을 갖고 층(layer) 1과 2의 온도가 같다고 가정하면, 측정되는 복사휘도(radiance, L)는 다음과 같다^[4,13].

$$L = B_0(1 - \tau_0) + B_B\tau_0 \quad (1)$$

where τ is transmittance of layer.
where B is spectral radiance of a blackbody at the temperature of layer.

where B_B is the radiance that enters the layer of cloud from background.

수동형 FTIR 탐지기의 측정원리는 자연배경의 적외선 복사선을 이용하여 대기 중의 오염원을 감지하고 식별한다. 자연배경과 타겟 가스로부터 수광되는 적외선을 주사장치 내부의 광학계를 거쳐 간섭계로 전달하여 간섭계 내부의 광선분할기와 고속 회전판에 의해 광검출기에서 간섭신호(interferogram)를 생성하게 된다. 광검출기에서 생성된 간섭신호는 1차적으로 AD 변환기를 통해 간섭무늬를 증폭하고 필터링을 거쳐, 디지털신호로 저장되어 피크를 검출한 후 푸리에 변환(Fourier Transform)에 의하여 파수(wavenumber) 영역의 분광 스펙트럼이 얻어지게 된다(Fig. 2).^[4,5] 이 때 얻어지는 분광 스펙트럼은 장비 내부의 열잡음에 의한 복사휘도에 의해 왜곡되는 경우가 있는데, 이는 배경온도와 탐지온도의 온도차가 크지 않을 경우 더 심해진다. 이를 보정하기 위해 흑체(blackbody)를 이용한 Plank 흑체 복사이론을 적용하여, Brightness temperature(B.T)로 보정된 스펙트럼으로 보여준다^[13]. 이는 기계내부에서 발생하는 온도변화나 반사율에 의해 발생할 수 있는 측정 오차에 대해 보정할 수 있다.

현재까지 발표된 대부분의 연구 결과는 대기 환경 유해가스에 관한 주제를 배경 스펙트럼과 복사 스펙트럼을 이용하는 제한된 조건에서 실험이 진행된 것이 주를 이루었다^[5,6,8-10]. 이에 본 연구에서는 국방과학연구소에서 자체 개발되어 흑체에 의한 B.T 스펙트럼 측정이 가능한 수동형 FTIR 원격화학 탐지기(SCADS : Standoff Chemical Agent Detection System) 장비를 사용하여 야외를 배경으로 유사작용제(simulant)인 Sulfur Hexafluoride(SF₆)를 이용하여 수동형 FTIR 원격 탐지기를 이용한 오염원 2차원 분포의 감지 특성을 연구하였다. 본 장비는 외부 운용환경을 고려한 수광광학계와 마이켈슨 간섭계를 채용한 770 ~ 1350 cm⁻¹의 적외선 대역에서 분광분해능 4 cm⁻¹에 시야각(FOV : Field of View)는 1.5도를 갖는 것으로 표준열원인 흑체를 탑재하고 있다. 또한, 자동으로 설정된 고각과 방위각에 따른 측정이 실시간으로 이루어지고 그 위치센서정보가 동시에 저장되는 것을 특징으로 한다. 이는, 다양한 환경에서 오염원(SF₆) 데이터를 실시간으로 수집하여 오염원의 2차원 분포 정보를 제시함으로써, CCD 카메라 등 영상장치와 연동시 화학오염원의 영상화가 가능하여 폭넓은 응용가능성을 제시할 것이다.

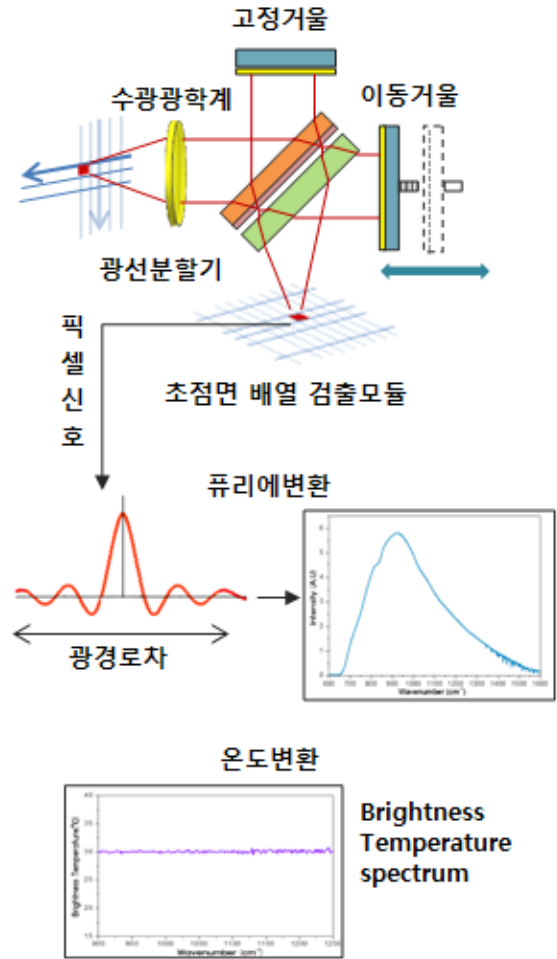


Fig. 2. The procedure of brightness temperature spectrum from IR signal

2. 실험 방법

SCADS는 지상 2 m 높이에서 남쪽으로, 산과 하늘을 배경으로 보는 방향으로 가스셀을 설치하였다. 사용된 가스셀은 직경 13.2 cm, 길이 20 cm의 튜브 형태로 빛이 통과하는 양면에 IR 영역에서 투명한 셀레늄화 아연(ZnSe) 원도우를 채용하였다. 설정된 측정모드는 초당 1.5도의 시야각, 초당 1.5도의 주사속도 그리고 초당 1도씩 고각변화 값을 설정하여, 측정 시야각 135도에서 15도 사이 그리고 고각 8도에서 -8도 범위에서 다양한 배경의 적외선 신호를 자동으로 탐지하여 배경에 따른 오염원의 검출도와 오염원의 크

기 및 위치정보를 탐지해 보았다. 오염원이 포함된 직경 13.2 cm의 가스 셀은 방위각 5도, 고각 3도 기준에 위치하였다.

측정시 대기의 평균 기온은 온도 24도, 습도 51 %, 연무(얇은 안개)가 있는 조건으로, 측정 시간은 오후 4시에서 5시 사이에 데이터의 신뢰성을 위해 반복 진행 되었다.

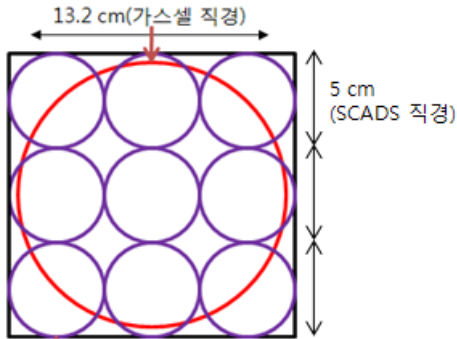


Fig. 3. A diameter of gas cell and clear aperture for SCADS

3. 결과 및 고찰

파수 940 ~ 955 cm^{-1} 사이에 SF₆ 고유의 특성 스펙트럼이 나타내어지는 것을 Fig. 4을 통해 확인 할 수 있다. 이는 수동형 FTIR 장비를 이용하여 근거리에서 다른 배경의 간섭을 최소한으로 받는 조건하에 SF₆ 가스셀을 측정된 값이다.

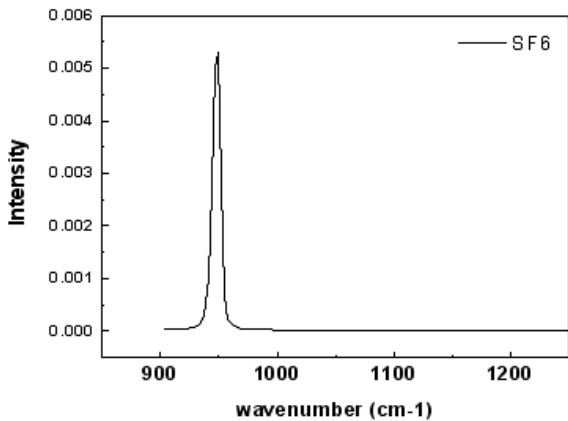


Fig. 4. The reference spectrum of SF₆ gas

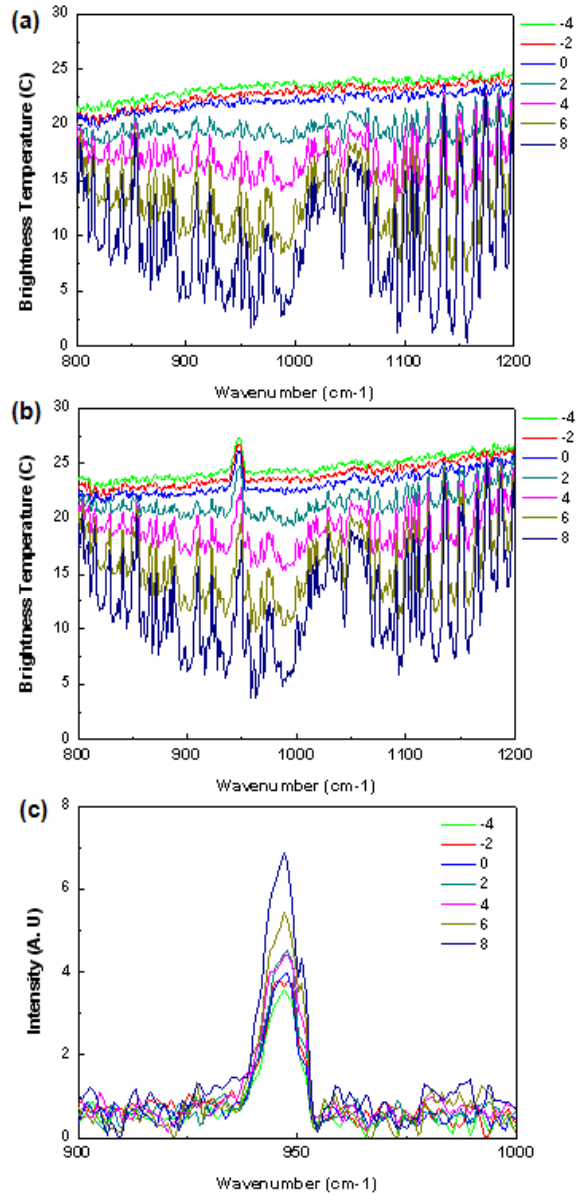


Fig. 5. (a) The measured spectrum of (a) different background and (b) SF₆ gas cell with their background along the altitude angle. (c) The comparison of SF₆ intensity

Fig. 5는 고각에 따른 배경의 B.T 스펙트럼(a) 및 SF₆ 오염원의 B.T 스펙트럼(b)과 고각에 따라 변하는 SF₆의 신호세기의 기준선을 일정하게 고정시킨 후 변화값(c)을 각각 나타내었다. 하늘 배경(고각이 올라갈

수축)으로 갈수록 배경 온도가 약 23도에서 3도로 20도 가량 내려가고, 배경과 흑체간의 온도차에 의한 SF₆ 피크의 감도는 증가하는 경향이 나타난다. 이는 하늘 배경으로 오염운을 탐지할 경우 수분과 오존에 의한 간섭현상이 심해지지만, 감지기와 배경의 온도차가 커지면서, 전체적인 감도는 높아지는 것을 Fig. 5를 통해 확인할 수 있었다.

하늘 배경(고각 0도, 방위각 10도)으로 한 SF₆ 농도 변화에 따른(30, 60, 90, 120, 150 mg/m²) SF₆ 피크의 세기 변화를 관찰하여 Fig. 6에 나타내었다. 같은 방위 위치에서 측정이 이루어져 기준선의 온도차와 배경 스펙트럼에서 가스셀이 없는 하늘 스펙트럼(하늘색 점선)과 거의 유사한 특성을 나타내는 것을 확인할 수 있었으며, SF₆의 피크 경향이 나타나는 948 cm⁻¹에서 피크 세기가 농도의 증가와 함께 비례적으로 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

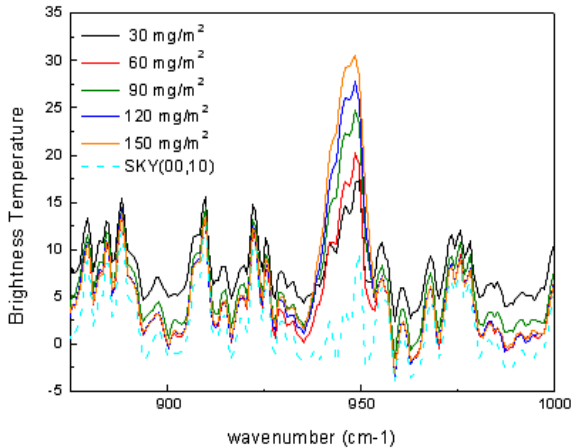


Fig. 6. The spectrum of different concentration(30, 60, 90, 120, 150 mg/m²) for SF₆ with the sky as background

Fig. 7은 방위각 0에서 고각 -8도(지면 배경)에서 8도(하늘 배경) 사이에서 30 mg/m² 농도의 SF₆의 가스셀의 위치를 고정시켜 놓고, 오염운의 고각 위치 정보를 파악할 수 있는지 실험해 보았다.

SF₆ 피크의 세기 변화를 구하기 위해 배경 스펙트럼 중 909 cm⁻¹ 피크 세기값으로 SF₆ 피크 값을 나눈 값을 그래프 왼쪽에 표기하여 비교해 보았다. 그림에서 보여지 듯 가스셀이 위치한 것으로 보이는 고각 -2도에서 8도 사이에서 SF₆ 피크가 관찰되는 것을 확인

할 수 있다. 고각이 높아질수록 배경 온도가 낮아져 상대적인 세기가 높아지는 것을 고려할 때 고각이 높아질수록 상대적인 SF₆의 세기가 높아져야 하나, 고각 2도에서 6도 사이의 피크 세기는 배경 피크 과 비교하여도 뚜렷한 양상을 보이거나 고각 8도에서는 배경 스펙트럼과 비교시 낮아지는 것을 확인할 수 있었다. 이는 SF₆ 오염운이 방위각 0도에서 고각 2도, 4도를 중심으로 위치하는 것을 확인할 수 있다.

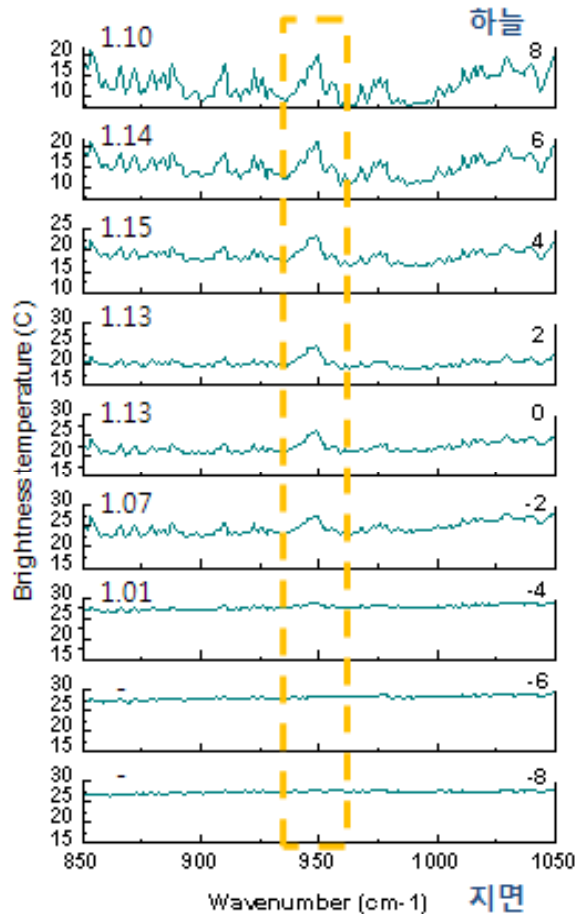


Fig. 7. The comparison of SF₆ spectrum with different background

더 나아가 Fig. 8에서는 방위각과 고각을 자동 스캔 모드로 하여, 수집한 B.T 스펙트럼 데이터를 정리해보았다. 수집된 데이터는 방위각 345도(왼쪽)에서 15도(오른쪽) 방향으로 1.5도 씩, 고각 -8도에서 8도 방향으로 1도씩 순차적으로 진행이 되었지만, Fig. 8에는

전체적인 스펙트럼의 특성을 보여줄 수 있는 고각과 방위각의 스펙트럼 데이터를 선정하여 파수와 온도 축을 기준으로 도식화하였다. 흥미롭게도 수집된 데이터만으로도 오염운 분포의 방위각과 고각 정보를 알 수 있었다. 이는 체계적인 알고리즘을 적용할 수 있는 데이터로 영상화 가능성을 보여준다.

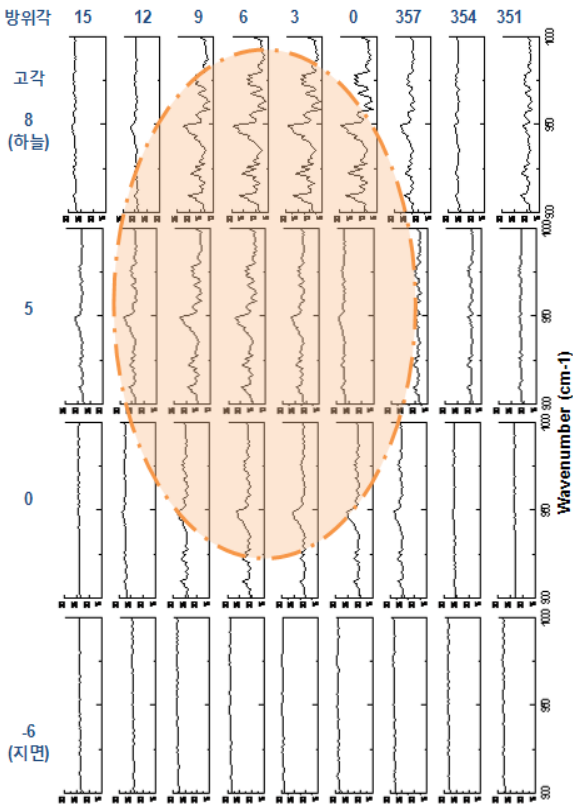


Fig. 8. The B.T spectrum of SF₆ cloud in real time detection

그러나 실지 야전 상황에서는 오염운이 퍼지는 형태로 유동특성이 있고, 농도특성이나 거리특성 정보를 분석하는데 한계가 있어 이에 대한 보완 연구가 필요하다.

4. 결론

본 연구에서는 수동형 FTIR 원격 탐지기(SCADS)를 이용한 배경별 스펙트럼과 그 배경에 따른 SF₆ 가스의

밝기 온도 스펙트럼을 770 ~ 1350 cm⁻¹ 영역에서 측정하였다. 연속측정 기능을 적용하여, 측정 위치에 따라 실시간 수집된 데이터를 이용하여 고각과 방위각에 따라 달라지는 배경에서 유사작용제를 이용한 오염운의 2차원 분포 감지 특성을 확인하였다. 하늘 배경일 경우 수분이나 오존에 의한 간섭효과가 있었으나, 감지기와 배경의 온도차가 커지면서 소량의(30mg/m²) SF₆ 주입량에서도 SF₆의 특성파장을 확인 할 수 있어, 넓은 감지영역에서 안정하게 탐지할 수 있는 가능성을 확인 하였으며, 측정 데이터의 방위각, 고각 정보를 통해 오염운의 2차원 분포를 측정할 수 있어 사용자에게 명확한 시각정보를 제공할 수 있는 영상화가 가능할 것으로 판단된다. 또한, 수집된 오염운의 위치정보를 통해 대략적인 확산 정보도 추측할 수 있는 데이터로 체계적인 알고리즘이 적용되면 2차원의 영상화 가능성을 보여주었다. 이는, 야전상황에서 유동형의 미지의 오염운의 경우 거리나 농도정보를 알기 힘들어 추가적인 연구가 필요하나, 다양한 배경에서 오염운(SF₆) 데이터를 실시간으로 수집하여 오염운의 2차원 분포 정보를 제시함으로써, 화학오염운의 영상화가 가능하여 SCADS의 폭넓은 응용가능성을 보여준다.

References

- [1] H. Y. Bae, S. I. Oh, D. H. Park, V. A. Boiko, "Design and Test of High Speed Rotary Scan Interferometer for FTIR Spectrometer Application," Optical society of Korea Annual Meeting, pp. 30~31, 2004.
- [2] E. Flores, K. Schafer, J. Black, R. Harig, C. Jahn, "Remote Sensing of Aircraft Exhaust Temperature and Composition by Passive Fourier Transform Infrared," Proc. of SPIE, Vol. 6745, pp. 67451Q-1~67451Q-12, 2007.
- [3] Y. Chen, Y. Hu, K. Kou, H. Li, G. Zhang, "Research on the Influence of Ocean Atmosphere to Infrared Detection," Adv. Mat. Research, Vol. 472~475, pp. 1698~1701, 2012.
- [4] B. H. Park, Y. I. Kang, D. S. Hong, J. H. Lee, J. H. Kim, "A Study of Passive FTIR Sensor System," The 20th Conference of Ground Weapon System, pp. 82~85, 2012.

- [5] J. P. Jo, Y. J. Lee, G. C. Kim, O. S. Kwon, "Measurements of non-CO₂ Greenhouse Gases from Passenger Cars using FTIR Spectroscopy," The Korean Society of Automotive Engineers, Vol. 11, pp. 563~566, 2009.
- [6] D. I. Kang, T. Y. Moon, S. E. Lee, C. Y. Seo, J. S. Kim, "A Study Of Greenhouse Gas Emission Rate from LPG Vehicles According to Driving Cycles", The Korean Society of Automotive Engineers, Vol. 11, pp. 612~614, 2011.
- [7] Kang, Young-Il; Park, Byeong-Hwang; Choi, Myung-Jin; Hong, Dea-Sik; Choi, Soo; Kim, Dong-Hwan; Park, Do-Hyun, "Noise Equivalent Differential Temperature of Passive FTIR Sensor System," Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology, Vol. 14, No. 2, pp. 161~166, 2011.
- [8] A. Beil, R. Daum, R. Harig, and G. Matz, "Remote Sensing of Atmospheric Pollution by Passive FTIR Spectrometry," Proceedings of SPIE Vol. 3493, pp. 32~43, 1998.
- [9] R. Harig, G. Matz, P. Rusch, J.-H. Gerhard, K. Schäfer, C. Jahn, P. Schwengler, A. Beil, "Remote Detection of Methane by Infrared Spectrometry for Airborne Pipeline Surveillance : First Results of Ground-Based Measurements," Proceedings of SPIE, Vol. 5235, pp. 435~446, 2004.
- [10] R. Harig, G. Matz, P. Rusch, H.-H. Gerhard, J.-H. Gerhard, V. Schlabs, "Infrared Remote Sensing of Hazardous Vapours : Surveillance of Public Areas During the FIFA Football World Cup 2006," Proceedings of SPIE, Vol. 6538, pp. 65381Z-1~65381Z-10, 2007.
- [11] J. M. Theriault, P. Lacasse, H. Lavoie, F. Bouffard, Y. Montembeault, V. Fareley, L. Belhumeur, P. Lagueux, "CATSI EDM-a New Sensor for the Real Time Passive Stand-off Detection and Identification of Chemicals," Proceedings of SPIE, Vol. 7665, pp. 766513-1~766513-10, 2010.
- [12] M. I. Blecka, M. Rataj, G. Szymanski, "Passive Detection of Biological Aerosols in Atmosphere with a Fourier Transform Instrument(FTIR)," Vol. 42, pp. 101~111, 2012.
- [13] D. S. Kim, D. H. Park, S. K. Choi, S. U. Na, "Radiometric Calibration For Passive Remote Sensing FTIR Spectrometer", The Proceeding of Optical Society of Korea Annual Meeting, Vol. 17, No. 5, pp. 391~395, 2006.