

## 수동형 원격탐지 FTIR 분광계의 Radiometric Calibration

김대성<sup>†</sup> · 박도현

고등기술연구원 원격탐지팀  
 ④ 449-863 경기도 용인시 백암면 고안리 633-2

최승기

국방과학연구소  
 ④ 305-152 대전시 유성구 수남동 111

나성웅

충남대학교  
 ④ 305-764 대전시 유성구 궁동 220

(2006년 7월 11일 받음, 2006년 10월 20일 수정본 받음)

본 논문에서는 온도 제어가 가능한 blackbody를 이용하여 수동형 FTIR 분광계의 radiometric calibration을 수행하고 타당성을 살펴 보았다. Radiometric calibration은 분광계로 입사되는 radiance의 온도 변화에 대한 광 검출기의 파장 별 응답특성과 기기 내부에서 발생하는 온도 및 반사율에 의해 발생하는 측정 오차를 보정하여 Planck radiance로 변환하는 기법이다. 시료에 대한 calibration 과정을 수행한 스펙트럼을 spectral library와 비교한 결과, 흡수 스펙트럼의 파장 별 선폭과 상대적인 intensity가 매우 유사하게 나타났으며 입사 광원의 온도 차와 비례하여 spectral intensity가 일정하게 증가됨을 확인할 수 있었다.

주제어 : Passive FTIR spectrometer, Radiometric calibration, Remote sensing.

### I 서 론

FTIR 분광계를 이용한 수동형 원격탐지 기법은 능동형과는 달리 인위적인 적외선 광원 대신 배경에 존재하는 적외선 복사를 이용하여 대기 중의 오염원을 감지하고 식별하게 된다. 수동형 탐지기법은 능동형에 비해 감도가 떨어지는 단점이 있지만 별도의 적외선 광원을 사용하지 않고 탐지가 가능하기 때문에 탐지 장소의 제한이 없는 특징을 갖고 있고, 특히 야외에서 활용성이 높은 것으로 알려져 있다. 이러한 이유로 현재 환경오염 모니터링, 누설 가스 탐지, fence monitoring 등과 같은 민수 분야뿐만 아니라 화학가스 탐지와 같은 군수 분야에 이미 적용되고 있거나 개발이 진행 중이다.<sup>[4]</sup>

수동형 FTIR 분광계는 배경광원에 대한 정보가 없기 때문에 신호처리 과정에서 별도의 알고리즘을 필요로 한다. 측정된 데이터로부터 탐지온도의 radiance를 얻기 위한 알고리즘은 radiometric calibration, spectrometric calibration, atmospheric calibration 등이 적용된다. 여기에서 가장 중요한 부분을 차지하고 어떠한 상황에서든 고려되어야 하는 것이 radiometric calibration 이다. 그림 1에서 보는 바와 같이 간섭계로 입사된 탐지온도의 radiance( $L_s(\lambda)$ )가 광검출기를 거쳐서 전기적 신호( $V_s(\lambda)$ )로 표시될 때 광검출기의 파장별 응답특성과 간

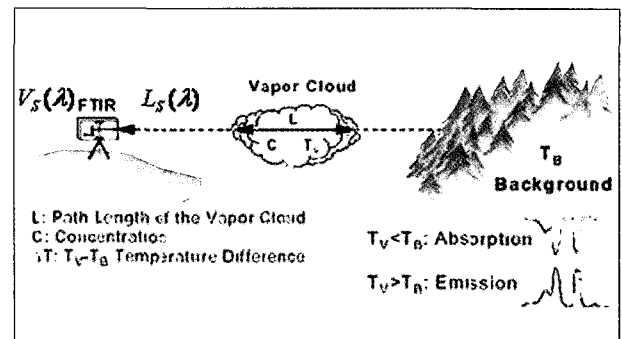


그림 1. 수동형 FTIR 원격 탐지 모델.

섭계의 자체 온도에 의한 radiance에 의해 왜곡되어 나타나게 되는데 이렇게 왜곡된 신호로부터 기기의 응답특성과 간섭계의 자체 radiance 효과를 보정하는 알고리즘이 radiometric calibration 이다.<sup>[1]</sup> radiometric calibration은 배경온과 탐지온의 온도차( $\Delta T = T_B - T_v$ )가 크지 않은 수동형 FTIR 분광계에서 그 효과가 더욱 두드러진다.

본 논문에서는 본 연구진에서 개발한 분광센서용 고속 스캔 간섭계를 사용하여 획득한 스펙트럼 데이터를 대상으로 radiometric calibration 알고리즘을 적용하였고, 데이터의 신뢰도를 확인하기 위하여 응답의 선형성을 측정하였다.

<sup>†</sup> E-mail: dskim@iae.re.kr

## II. Radiometric Calibration

Radiometric calibration은 광검출기의 비균일한 응답특성과 기기 내부에 의한 radiance를 보정하려는 것이다. 일반적으로 일정한 광원을 사용하는 능동형 분광기의 경우(예, FTIR spectrometer) 배경의 크기와 비교하여 기기 내부의 radiance는 무시가능한 수준이기 때문에 광검출기의 응답특성만 보정하는 것으로 충분하며, 이로 인해서 normalization하는 과정에서 자연스럽게 검출기의 환산계수가 소거되게 되어 굳이 환산계수를 계산할 필요가 없다. 실제로 능동형 분광기에서는 별도의 radiometric calibration 과정을 수행하지 않지만, 엄밀히 표현하자면, normalization 과정에 radiometric calibration 과정이 포함되어 있다고 할 수 있다. 그러나 수동형 분광기에서는 시료 또는 탐지온이 있을 때와 없을 때를 명확하게 구분하여 스펙트럼 데이터 획득이 어렵기 때문에 별도의 radiometric calibration 과정이 필요하다.

FTIR 분광기로 입사되는 탐지온의 radiance( $L_s(\lambda)$ )와 광검출기의 출력신호( $V_s(\lambda)$ )는 다음과 같은 관계식으로 표현될 수 있다.<sup>[2,3]</sup>

$$V_s(\lambda) = r(\lambda)[L_s(\lambda) - L(\lambda, T_{inst})] \quad (1)$$

- $V_s(\lambda)$  : output spectral voltage,
- $r(\lambda)$  : linear instrument responsivity,
- $L_s(\lambda)$  : spectral radiance measured at the instrument,
- $L(\lambda, T_{inst})$  : instrument self-emission.

즉, 광 검출기에서 측정된 radiance( $V_s(\lambda)$ )는 파장 의존성을 갖는 검출기의 응답 특성인 환산 계수,  $r(\lambda)$ 와 간접계 내부의 자체 방출(emission)에 의한 오프셋 인자,  $L(\lambda, T_{inst})$ 에 의해 영향을 받게 된다. 따라서 탐지온의 radiance를 얻기 위해서는 측정 데이터로부터 환산 계수와 오프셋 인자를 계산하고 보정하는 절차를 필요로 하는데 이것이 radiometric calibration 과정이다.

환산 계수와 오프셋 인자는 실험적으로 구하게 되는데, 두 개의 독립변수가 존재하기 때문에 두 개의 온도  $T_H, T_C$ 을 갖는 흑체 광원의 radiance로부터 이를 구할 수 있게 된다. 선형적인 응답특성 구간에 존재하는 두 개의 온도 값에 대한 radiance를 측정하게 되면 아래의 관계식에 의하여 환산계수와 오프셋 인자를 계산할 수 있게 된다.

$$\begin{aligned} V_H(\lambda) &= r(\lambda)[L_H(T_H, \lambda) - L(\lambda, T_{inst})], \\ V_C(\lambda) &= r(\lambda)[L_C(T_C, \lambda) - L(\lambda, T_{inst})] \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} r(\lambda) &= \frac{V_H(\lambda) - V_C(\lambda)}{L(T_H, \lambda) - L(T_C, \lambda)}, \\ L(\lambda, T_{inst}) &= L(T_C, \lambda) - [V_C(\lambda)/r(\lambda)] \end{aligned} \quad (3)$$

- $V_H(\lambda)$  : Hot temperature blackbody radiance,
- $V_C(\lambda)$  : Cold temperature blackbody radiance,
- $L(T_H, \lambda)$  : Hot temperature Planck radiance,
- $L(T_C, \lambda)$  : Cold temperature Planck radiance.

Planck 흑체 복사이론에 의하면 일정한 온도를 갖는 흑체는 이에 대응하는 스펙트럼을 갖게 되며, 반대로 스펙트럼 각각의 값은 이에 대응하는 brightness temperature로 표현될 수 있다. 따라서 FTIR 분광기에 의하여 측정된 스펙트럼은 일정한 온도 범위 안에서 값을 갖는 brightness temperature로 표현될 수 있는데 이 때 배경 온도와 탐지온의 온도가 온도 범위를 결정하게 된다. 배경 온도가 탐지온의 온도보다 높은 경우 흡수 스펙트럼으로 반대의 경우 방출 스펙트럼으로 나타나게 된다.

식 (3)에 의하여 환산 계수와 오프셋 인자를 구하여야 하는데 이 때 보정에 사용될 흑체의 온도를 결정하는 것이 매우 중요하다. 왜냐하면 광 검출기의 응답특성이 신호처리부의 dynamic range에서 일정한 값을 갖는 것이 아니어서 측정 범위를 가능한 작업 영역으로 한정하는 것이 필요하기 때문이다. 따라서 보정을 위한 온도 범위를 분광계의 측정 스펙트럼이 갖는 brightness temperature의 온도 상한과 온도 하한으로 설정한다. 이 때 작업 파장 범위에서 온도 상한을 hot temperature( $T_H$ ), 온도 하한을 cold temperature( $T_C$ )라 가정하고 각각의 온도에 대한 흑체 radiance를 측정한다. 각 온도에서 측정된 radiance와 Planck radiance 방정식을 이용하여  $T_H, T_C$ 와 등가 관계의 radiance를 구함으로써 환산 계수( $r(\lambda)$ )와 오프셋 인자( $L(\lambda, T_{inst})$ )를 계산할 수 있다.<sup>[2,5]</sup> 이와 같은 방법으로 온도 변화에 대한 detector의 응답 특성과 기기 내부에서 발생하는 온도 및 반사율에 의해 발생하는 측정 오차에 대한 보정이 가능하며, 본 연구에서는 온도 제어가 가능한 Blackbody를 이용하여 실험하였다.

## III. 실험 및 결과

실험에 사용된 간접계의 사양 및 실험 조건은 표 1과 같으며 간접계는 자체적으로 설계 제작한 것이다.

입사된 radiance를 보정하기에 앞서 입사광의 온도 변화에 대한 광 검출기의 선형 구간을 판별하기 위하여 흑체의 온도를  $-10 \sim 70^\circ\text{C}$ 까지  $0.5^\circ\text{C}$  단위로 변화시켜가며 검출기의 출력을 측정하였다. 실험에 사용된 blackbody는 본 연구의 목적으로 특수하게 제작된 것으로  $-10 \sim 70^\circ\text{C}$  범위에서  $0.5^\circ\text{C}$  단위로 온도 제어가 가능하다(그림 2). 표 2은 blackbody의 온도를  $5^\circ\text{C}$ 씩 변화시켰을 때의 스펙트럼 곡선에서 봉우리 값을 측정할 것이다. 5도의 온도 증가에 약 0.5의 세기가 증가하는 것을 볼 수 있다.

그림 3은 흑체의 온도를  $15 \sim 40^\circ\text{C}$  까지 변화시켰을 때의 출력 스펙트럼의 변화를 나타낸 것이다.  $700 \sim 1400 \text{ cm}^{-1}$  범위에서는 온도 증가에 따라 스펙트럼의 세기가 선형적으

표 1. 실험 환경

간섭계	방식	Michelson
	분광 범위	700~1350 $\text{cm}^{-1}$
	분광 분해능	1.8 $\text{cm}^{-1}$
	광 검출기	MCT(HgCdTe)
흑체 광원	온도 설정 범위	-10~70°C
	온도 오차	0.5°C
실험 장소	Laboratory	
시료	Methanol	

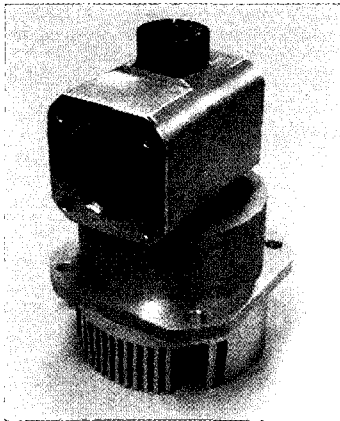


그림 2. Blackbody.

표 2. Blackbody 온도 변화에 따른 스펙트럼의 최대 Intensity (Intensity는 간섭계마다 다를 수 있음)

Blackbody 설정 온도(°C)	Spectrum Maximum Intensity ( $10^{-6} \text{ W/cm}^2$ )
15	14.2
20	14.5
25	15.1
30	15.7
35	16.1
40	16.6
45	17.1

로 증가 하였으나, 그 외 영역에서는 비선형적인 형태를 나타내었다. 비선형적 영역의 경계지점은 온도 변화 폭에 의해 범위가 다소 변화하였으나 검출기의 감지 영역에서 보면 700 ~ 1400  $\text{cm}^{-1}$  바깥 구간에서는 감도가 떨어지고 온도에 의한 세기 변화보다 검출기의 오차에 의한 영향이 상대적으로 큰 영역이라 판단된다.

다음으로 환산 계수와 오프셋 인자를 계산하기 위해 배경 온도와 시료 온도에 대한 흑체 radiance를 측정하였다. 위의 두 온도를 각각 hot, cold temperature라 정의하고, 실험 환경을 고려하여 hot temperature는 배경 온도(30°C)로 설정하고, cold temperature는 배경 온도보다 5°C 낮게 설정하였다. 이

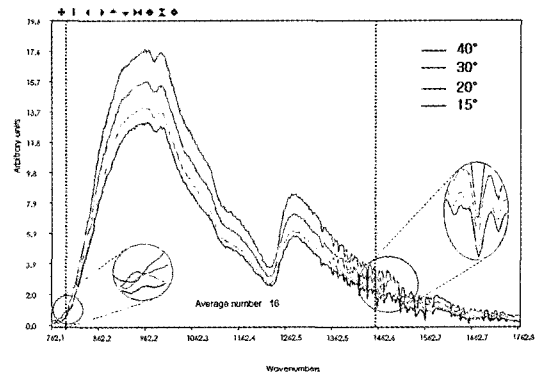


그림 3. 입사광의 온도 변화에 의한 스펙트럼 세기의 선형 구간 판별.

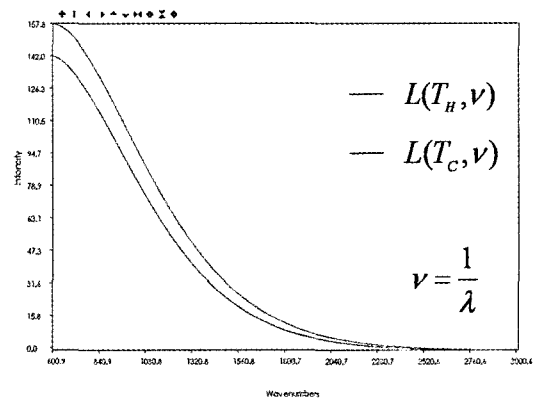
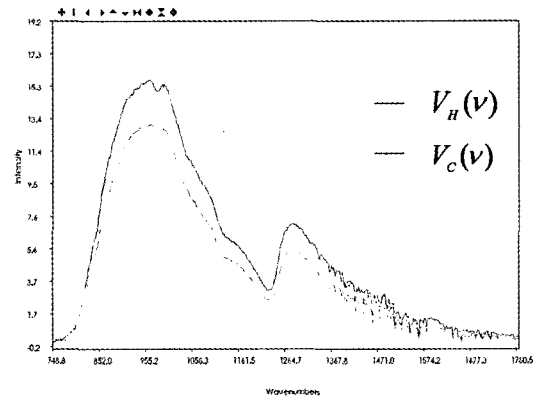


그림 4. Hot/Cold Temperature에서의 blackbody radiance(위)와 Planck radiance(아래).

론적으로는 hot temperature와 cold temperature를 배경 온도와 시료 온도로 설정하는 것이 이상적이지만 시료의 온도를 정확하게 알 수 있는 방법이 없기 때문에 실험적으로 배경 온도를 가변하여 시료에 대한 흡수 스펙트럼이 사라지는 지점(배경과 시료의 온도가 동일)의 온도를  $T_c$ 로 설정하였다. 위의 각 온도에서 측정된 흑체 radiance와 Planck 방정식(식 4)으로 계산된 각 온도에 대한 radiance는 그림 4와 같다.

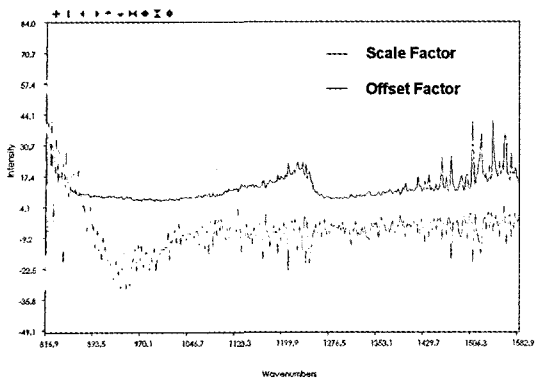


그림 5. 스펙트럼의 파장 별 환산 계수(위)와 오프셋 인자(아래).

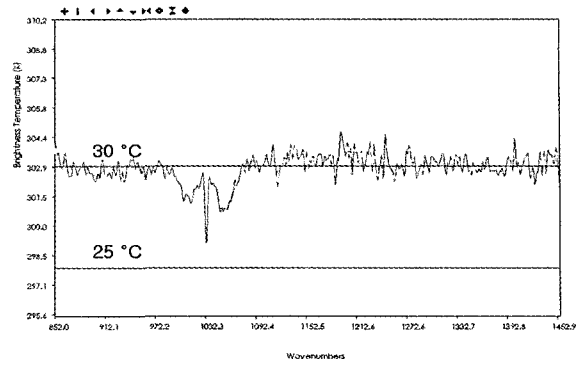


그림 7. Methanol에 대한 Brightness Temperature.

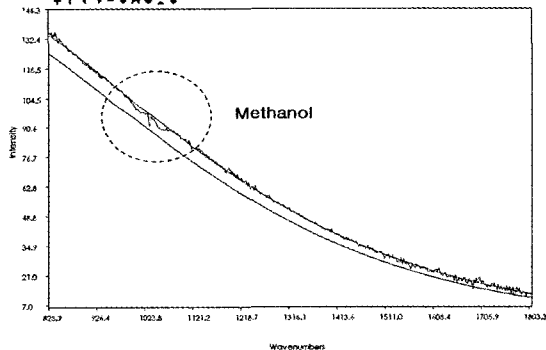
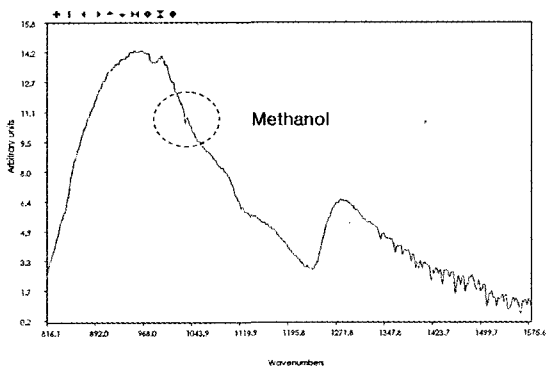


그림 6. Uncalibrated Methanol spectrum(위)과 Calibrated Methanol spectrum(아래).

$$L(\nu) = \frac{hc^2\nu^3}{\exp(kT(\nu, L)/h\nu) - 1} \quad (4)$$

$T(\nu, L)$  : Radiation temperature,

$\nu$  : Wavenumber,

$L(\nu)$  : Blackbody radiation,

$h$  : Planck constant,  $6.626 \times 10^{-27}$  erg-sec,

$k$  : Boltmann constant,  $1.38 \times 10^{-16}$  erg/K,

$c$  : Speed of light,  $3 \times 10^{10}$  cm/sec.

흑체 radiance와 Planck radiance를 이용해 계산된 환산 계

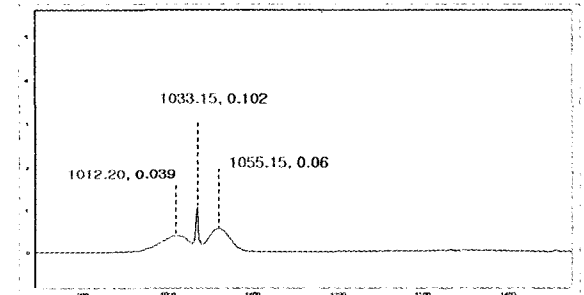
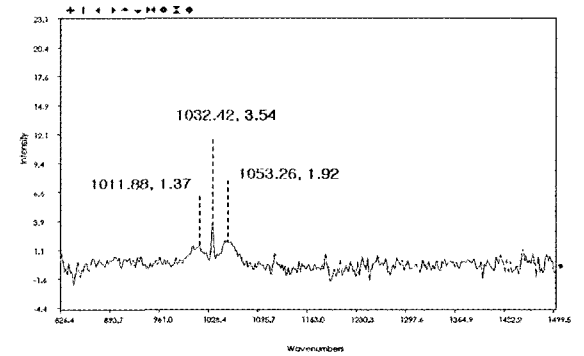


그림 8. Methanol에 대한 Absorption Spectrum(상)과 Methanol의 EPA Library(하).

수와 오프셋 인자는 그림 5와 같은 파장별 응답 특성을 나타내었으며, 실험을 위해 30°C에서 측정된 메탄올(그림 6의 위)에 대해 calibration 과정을 수행한 결과(그림 6의 아래), 메탄올의 스펙트럼은 배경 온도와 샘플 온도에 대한 Planck radiance 영역내로 들어오는 것을 확인할 수 있었다.

$$T(\nu, L) = \frac{h\nu}{\ln\left[\frac{L(\nu) + 2hc^2\nu^3}{L(\nu)}\right]k} \quad (5)$$

위에서 보정된 메탄올에 대한 스펙트럼을 Inverse Planck 복사 방정식(식 5)을 이용하여 스펙트럼의 파장별 brightness temperature로 변환하게 되면 그림 7과 같으며, hot temperature radiance를 기준으로 흡수 스펙트럼으로 변환하게 되면 그림 8의 위와 같게 된다. 메탄올에 대한 흡수 스펙트럼을

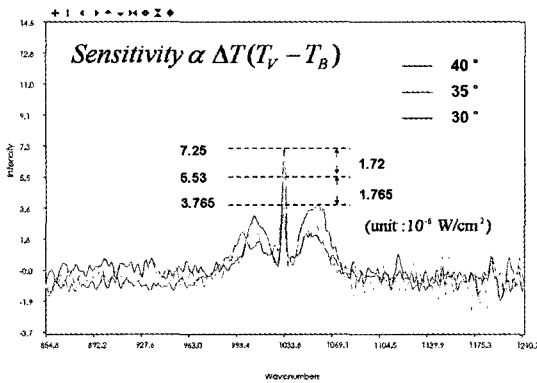


그림 9. 배경 온도 변화에 의한 spectral intensity 변화

EPA(미국 환경보호청) 표준 라이브러리(그림 8 아래)와 비교하였을 때, 메탄을 emission line의 선폭과 상대적인 세기가 거의 일치하는 것으로 나타났으며 배경 온도를 30°C에서 40°C까지 5°C씩 증가시킴에 따라 온도 차와 비례하여 spectral intensity가 일정하게 증가됨을 확인할 수 있었다(그림 9).

#### IV. 결 론

수동형 FTIR 분광계에서 입사되는 radiance의 온도 변화에 대한 광 검출기의 파장 별 응답특성과 기기 내부에서 발생하는 온도 및 반사율에 의해 발생하는 영향을 radiometric calibration 과정을 통해 보정하였다. 시료에 대한 calibration 과정을 수행한 결과, spectral library와 비교하여 emission line의 선폭과 상대적 세기가 매우 유사하게 나타났으며 또한 입

사 광원의 온도 차와 비례하여 spectral intensity가 일정하게 증가됨을 확인할 수 있었다. 또한 Calibration 과정을 통해 Planck radiance로 변환함으로써 스펙트럼의 정량적 분석의 기준 단위로 사용 가능할 것이다.

차후 시료의 농도 조절이 가능한 챔버를 이용하여 다양한 시료에 대한 분석을 진행할 예정이며, 야외 시험을 통해 대기 에 의한 영향을 고려한 calibration 알고리즘을 연구할 것이다.

#### 참고문헌

- [1] Roland Harig, and Gerhard Matz. "Toxic Cloud Imaging by Infrared Spectrometry : A Scanning FTIR System for Identification and Visualization", FIELD ANALYTICAL CHEMISTRY AND TECHNOLOGY 5(1-2):75-90, 2001.
- [2] Simon J. Hook and Anne B. Kahle. "The Micro Fourier Transform Interferometer(uFTIR) - A New Field Spectrometer for Acquisition of Infrared Data of Natural Surfaces". REMOTE SENS. ENVIRON. 56 :172-181, 1996.
- [3] Andrew R. Korb, Peter Dybwad, Winthrop Wadsworth, and John W. Salisbury. "Portable Fourier transform infrared spectroradiometer for field measurements of radiance and emissivity". APPLIED OPTICS / Vol. 35, No. 10 / 1 April 1996.
- [4] 박도현, 김대성, 배효욱, 오승일. "실시간 원격 탐지용 소형 분광센서 개발 - 중간보고서". 고등기술연구원. 2004.
- [5] 박도현, 김대성, 배효욱, 오승일. "실시간 원격탐지 FTIR 분광계의 스펙트럼 분석 알고리즘 - 기술보고서". 고등기술연구원. 2005.

### Radiometric Calibration of FTIR Spectrometer For Passive Remote Sensing Application

Dae-Sung Kim<sup>†</sup>, and Do-Hyun Park

*Institute for Advanced Engineering, 633-2, Goan-ri, Baegam-myeon, Yongin-si, Gyeonggi-do, 449-863 Korea*

Seung-Ki Choi

*Agency For Defense Development, 305-600, Yuseong P.O.BOX 35-1, Daejeon, Korea*

Sung-Woong Ra

*Chungnam National University, 220, Gung-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-764, Korea*

<sup>†</sup>E-mail: dskim@iae.re.kr

(Received July 11, 2006, Revised manuscript October 20, 2006)

In this paper, radiometric calibration of a FTIR spectrometer for passive remote sensing application was introduced and verified. Radiometric calibration is a significant signal processing procedure to retrieve the object radiance from the measured spectrum. The object radiance is measured and registered distorted by the detector's responsivity dependent on wavelength and instrument self-emission. Radiance of two temperature points, hot temperature and cold temperature, from a well-controlled blackbody was measured and used to obtain the scale factor and offset factor which are required for radiometric calibration. For gas phase C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH, radiometric calibration was done and verified through comparison of its emission line width and intensity with the standard spectrum.

OCIS code : 040.3060, 280.1100, 300.6340.