한국군사과학기술학회지 제14권 제2호, pp. 161～166, 2011년 4월

학술논문 지상무기 부문

수동형 퓨리에변환 적외선 분광기의 잡음등가온도지수

Noise Equivalent Differential Temperature of Passive FTIR Sensor System

강 영 일* 박 병 황* 최 명 진* 홍 대 식*
Youngil Kang Byeonghwang Park Myungjin Choi Deasik Hong
최 수* 김 동 환** 박 도 현***
Soo Choi Donghwan Kim Dohyun Park

Abstract

The passive open-path Fourier-Transform-Infrared system was implemented for the toxic gas monitoring. Noise Equivalent Differential Temperature(NEDT) was investigated as a system performance evaluation figure and analyzed numerically with the designed parameters. Calculated NEDT was compared with the experimental value in the wavelength region of 700～1400cm^{-1}. The minimum detectable gas concentration was estimated from the obtained NEDT at the absorption wavelength of SF_6.

Keywords : NEDT(잡음등가온도차), Fourier Transform Spectroscopy(퓨리에 변환 분광), Blackbody(흑체), Radiometer Calibration(복사 보정)

1. 서 론

수동형 FTS(Fourier Transform Spectrometer)는 야외의 자연 배경 온도와 가스운의 온도차에 의해 가스운의 (농도×크기)를 측정할 수 있는 장비이며, 사용시 기준 적외선 광원이 필요 없기 때문에 독성 가스 운을 수 km까지 원거리에서 기동 중 탐지가 가능한 장비이다.

최근 광학기술을 이용한 원거리 화학 작용제 탐지기술은 외부 환경하에서도 안정적으로 동작되는 간섭계 기술, 모터제어기술, 광검출기 성능향상, 고속 컴퓨터 프로세스 기술 등의 주변기술이 발전함에 따라 실용적으로 야외에서 사용이 가능한 수동형 퓨리에 변환 분광기(Passive FTIR)가 상용화되었다. 그러나, 군운용 환경조건을 만족하는 FTS 장비는 핵심 센서인 간섭계의 기술적 어려움으로 인해 전 세계적으로도 몇 개만이 소개되고 있는 실정이다.

이러한 수동형 퓨리에 변환 분광기가 별도의 기준 적외선 광원 없이 운용되는 이유는 탐지운의 신속한 정성적 판단을 요구할 때이므로, 기준 광원으로서 자연배경의 복사선을 이용하게 된다. 따라서 자연배경의 온도조건에 따라 기준 복사선 레벨이 변하게 되므로 탐지 신호의 신호대 잡음비(SNR)가 외부 자연배경 상

† 2011년 1월 17일 접수～2011년 3월 25일 게재승인
* 국방과학연구소(ADD)
** 두산DST R&D센터
*** 무리기술(주) 전자광학연구소
책임저자 : 강영일(kyi@add.re.kr)

태에 크게 좌우 된다. 그러나, 다행히도, 8～12μm 영역에서는 대부분의 자연배경(물, 얼음, 나무, 모래, 눈 등)의 복사 방출율(Emissivity)이 0.95 이상으로 높기 때문에[1] 거의 흑체복사로 가정하여 자연배경과 가스운과의 온도차 분석에 의한 신호처리가 가능하다.

수동형 FTIR 장비의 탐지된 분광신호 세기는 (배경과의 온도차)×(농도)×(가스투과 길이)에 비례하므로, 자연배경과 가스운의 온도차이가 클수록 신호대 잡음비(SNR)가 증가한다. 통상 자연배경과 가스운과의 온도차이는 가스 확산으로 인해 낮은 농도의 경우는 3도 이상으로 알려져 있으며[2] 잡음 성능 지수는 신호온도차이 값에 대해 적어도 10% 미만이 되어야 안정적 탐지가 가능하다고 본다.

따라서, 수동형 FTIR의 시스템 성능지수는 배경온도에 대해 얼마나 정밀하게 가스 온도차를 분해해 내느냐 이며, 이는 결국 탐지 가능한 최소 농도를 결정하게 되므로 이를 정량적으로 분석하는 것은 매우 중요하다.

일반적으로 시스템의 성능지수는 신호대 잡음비로 표현되므로, 잡음지수가 낮을수록 성능지수는 향상된다. FTIR 시스템의 잡음지수는 광신호 잡음과 전자신호 잡음이 결합되어 총체적으로 온도분해능으로 나타나므로 시스템 설계 시 저잡음 광검출기와 저잡음 전자회로 설계가 매우 중요하다.

분광신호를 플랑크 복사신호 세기로 가정할 때, 신호의 크기는 밝기온도(Brightness Temperature) 또는 플랑크 복사(Plank Radiance)로 각각 표현이 가능한데, 측정결과의 표현 방법에 따라 잡음지수로서 NEDT외에 Noise Equivalent Spectral Radiance(NESR, 잡음등가 복사선세기)로도 표현되기도 한다. NEDT와 NESR과의 관계는 정의에 의해 NESR은 NEDT만큼의 온도차이에 대한 복사선의 차이이며, 이때는 SNR이 1 이 될 때의 상호 관계식에서 상호 변환이 가능하다.

FTIR에 많이 사용되는 냉각형 적외선 검출기는 중적외선 이상의 파장 대역에 따라 MCT/HgCdTe (7～14 μm), InSb(5～8μm) 등의 광전자 검출기를 주로 사용하며 검출기 자체만으로의 NEDT는 약 수십 mK 정도로 알려져 있다.

FTIR의 시스템 구조상 NEDT의 주요인으로는 광경로상의 타 열원에 의한 광잡음, 검출기의 shot 노이즈, 전자보드상의 전기적 접촉 노이즈, ADC에서의 양자화 잡음 등에 의한 전기적 잡음으로 인해 시스템 NEDT는 광검출기 잡음지수에 비해 수 십배이상 떨어지게 된다. 특히 낮은 NEDT를 갖기 위해서는 분광계에서의 높은 광학배출을 갖는 광학계 설계와 아날로그 형태의 광검출기 신호로부터 전원등 주변 전자회로에서 전달될 수 있는 전기적 잡음의 차단 설계가 중요하며, 아날로그-디지털 변환시에도 발생되는 ADC 양자 노이즈 저감기술이 중요하다.

본 논문에서는 FTIR 시스템 성능을 결정짓는 시스템 잡음지수인 NEDT, NESR 특성을 모델링하고 700～1400cm^{-1} 대역에서의 파장별 잡음지수 특성을 계산하고 이를 제작된 FTIR 장비의 NEDT 값과 비교 분석하였다. 또한 측정된 NEDT 값을 이용하여 장비가 탐지 가능한 최소 탐지농도를 SF_6 가스에 대해 예측하였다.

2. 복사보정

FTIR 장비의 분광 신호형태는 FTIR 시스템의 광검출기 주파수 특성, 광부품의 투과도 및 반사도 특성, 집속렌즈의 색수차 등의 파장별 특성치에 의해 최종 간섭무늬 신호가 FFT 변환된 전기적 신호로 나타나게 된다. 이러한 광원의 신호파형과 FTIR 시스템에 최종 나타난 전기적 파형(ADC 카운트 수)과의 1차 관계식의 기울기를 복사반응도(Radiance Responsivity)라고 정의하며, 이는 복사선 크기를 환산하는데 있어서 중요한 보정 변수가 된다.

아래와 같이 시스템의 전기신호와 광신호와의 선형적 관계식으로부터 복사반응도 곡선을 측정할 수가 있다.

$$S_s(\nu,T) = k(\nu)L_s(\nu,T) + L_o(\nu,T) \quad (1)$$

$S_s(\nu,T)$: 분광전기신호
$k(\nu)$: 복사반응도
$L_s(\nu,T)$: 분광신호
$L_o(\nu,T)$: 옵셋 인자

복사반응도 서로 다른 2점에서의 흑체 온도(T_{high}, T_{low})에 대한 복사 신호를 측정하여 위의 선형 관계식의 기울기로부터 다음과 같이 계산된다[3].

$$k(\nu) = \frac{S(\nu,T_{high}) - S(\nu,T_{low})}{L(\nu,T_{high}) - L(\nu,T_{low})} \quad (2)$$

3. 신호대잡음비(SNR), NESR, NEDT 모델

적외선 검출기의 specific detectivity(D^*)는 검출기 단면적(A_D)의 제곱근에 비례하며, 단위 주파수당 잡음등가파워(NEP)에 반비례 하는데, NEP와 검출기의 광잡음 출력(N')과의 관계는 아래와 같다[4].

$$D^* = \frac{(A_D)^{1/2}}{NEP},\ cm\,Hz^{1/2}\,W^{-1} \tag{3}$$

$$N' = \frac{NEP}{t^{1/2}},\ W \tag{4}$$

여기서, t는 단일 측정에 의한 잡음 측정시간이다.한편 수동형 FTS의 분광신호 크기(S')는 복사신호에 대한 플랑크 신호로부터 구할 수가 있으며, 이는 배경온도와 가스운의 복사 온도 차이에 비례하고, 광학계를 통과한 포집된 신호량과 간섭계 광부품들의 투과도 및 감쇄되는 정도를 고려하면 아래와 같다[4].

$$S' = \left(L(\nu, T_{background}) - L(\nu, T_{gas})\right)\Theta\Delta\nu\xi \tag{5}$$

$$L(\nu, T) = \frac{C_1\nu^3}{\exp(C_2\nu/T) - 1},\ W/srcm^2cm^{-1}$$

$$C_1 = 1.191\times10^{-12}\,Wcm^{-2}sr^{-1}(cm^{-1})^{-4}$$

$$C_2 = 1.439\,Kcm$$

$$\Theta = \frac{A_D \times A_{optics}}{f^2}, srcm^2$$

$\xi = 0.1$(시스템 효율)

여기서, $\Delta\nu$는 분광분해능이고, ξ는 광투과도를 포함하는 시스템 효율로서 입사창의 투과도, 간섭계 투과효율을 모두 고려하면, 약 0.1(10%)의 값을 갖는다. Θ는 광학계의 광배출율(Optical Throughput)을 나타내는 것으로, A_{optics}는 집속광학계의 면적을 나타내며, 분석에 사용된 간섭계의 변수들을 적용하면 2.45×10^{-3} sr · cm^2의 크기를 갖는다.

따라서 광신호에 대한 SNR을 신호크기와 잡음크기의 비율$\left(=\frac{S'}{N'}\right)$로서 표현하면 다음과 같다.

$$SNR(\nu) = \frac{\left(L(\nu, T_{high}) - L(\nu, T_{low})\right)\Theta(\Delta\nu)t^{1/2}D^*\xi}{A_D^{1/2}} \tag{6}$$

만일 위식에서 흑체 분광신호를 N회 평균화하여 $SNR(\nu:N)$을 구하면 잡음은 랜덤이므로 표준편차가 $\sqrt{N}$에 비례하여 줄어듦으로 이를 고려한 SNR의 표현식은 다음과 같다.

$$SNR(\nu:N) = \frac{\left(L(\nu, T_{high}) - L(\nu, T_{low})\right)\Theta(\Delta\nu)t^{1/2}D^*\xi\sqrt{N}}{A_D^{1/2}} \tag{7}$$

Table 1. 시스템 설계변수

설계변수	설계값
파장대역	700～1400 cm^{-1}
specific detectivity(D^*)	$4.2\times10^{10}cmHz^{1/2}\ W^{-1}$
집속렌즈 촛점	19mm
FOV	26mrad(1.5도)
optical throughput	$2.45\times10^{-3}srcm^2$
시스템 효율	0.1
분광분해능	$2.6cm^{-1}$
데이터 측정시간	167ms(16Hz 평균)

NESR은 FTS가 감지하는 복사선의 최소 변화량으로서 시스템 잡음과 같은 수준의 복사선 변화량으로 정의된다. 따라서, 이를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$NESR(\nu) = \frac{L(\nu, T_{background}) - L(\nu, T_{gas})}{SNR(\nu)} \tag{8}$$

앞 절에서 유도한 SNR 모델 표현을 위식에 대입하여 치환하면 다음과 같다.

$$NESR(\nu) = \frac{(A_D)^{1/2}}{D^*\Theta(\Delta\nu)t^{1/2}\xi} \tag{9}$$

NEDT는 최소 분해 가능한 온도 차이이므로 NEDT 온도 차이에 의한 복사 신호 크기의 차이가 NESR이 되며, 이때 SNR이 1이 되는 조건으로부터 NESR과 NEDT간의 값을 환산할 수 있다.

$$NESR(\nu) = L(\nu, T+NEDT) - L(\nu, T) \tag{10}$$

여기서 온도 T는 상온 기준으로 약 300K 정도이고

NEDT는 0.1도 정도이므로 NEDT가 충분히 작다고 볼 수 있으므로, 위식을 근사하면 NESR과 NEDT는 다음과 같은 관계식을 갖는다[5].

$$NESR(\nu) \approx \left|\frac{\partial L}{\partial T}\right| \bullet NEDT(\nu) \tag{11}$$

$$NEDT(\nu) = \frac{NESR(\nu)}{\left|\frac{\partial L}{\partial T}\right|} = \frac{(A_D)^{1/2}}{D^*\Theta(\Delta\nu)t^{1/2}\xi\left|\frac{\partial L}{\partial T}\right|} \tag{12}$$

4. NEDT 측정

NEDT를 직접 측정하는 방법은 NEDT의 정의로부터 FTS가 분해 가능한 최소 온도차이이므로, 표준 흑체를 사용하여 2점 온도(High와 Low)에서의 분광신호의 밝기온도에 대한 평균과 표준편차를 측정하여 아래와 같은 식으로부터 산출한다[6].

$$NEDT(\lambda) = \frac{\sqrt{\frac{1}{2}\left(S_{high}^2(\lambda) + S_{low}^2(\lambda)\right)}}{\overline{x_{high}}(\lambda) - \overline{x_{low}}(\lambda)}\left(T_{high} - T_{low}\right) \tag{13}$$

$S_{high}(\lambda), S_{low}(\lambda)$: 밝기온도 표준편차

$\overline{x_{high}}(\lambda), \overline{x_{low}}(\lambda)$: 밝기온도 평균

T_{high}, T_{low} : 흑체 설정 온도

여기서, 밝기온도(Brightness Temperature)는 플랑크 복사식에서 복사세기(L)에 대응하는 온도이며 플랑크 복사식으로부터 다음과 같은 관계식을 갖는다.

$$T(\nu, L) = \frac{hc\nu}{\ln\left[\frac{L(\nu) + 2hc^2\nu^3}{L(\nu)}\right]k} \tag{14}$$

1회 평균에 의한 NEDT 값은 온도분해능이 높은 상태이므로 N회 데이터를 평균하여 신호처리를 하게 되면 NEDT가 낮아지는 효과를 볼수 있다. 이러한 효과를 보기 위해 Fig. 1에서 설계수치를 이용하여 잡음등가온도차를 모델링 한 것을 신호 평균화 횟수(1회, 4회, 8회, 16회)에 따라 비교하여 표시하였다. 스펙트럼 데이터를 N회 평균화하여 측정하게 되면 잡음신호는 랜덤이므로 표준편차는 $1/\sqrt{N}$에 비례하여 감소하게 되어 결과적으로 S/N는 $\sqrt{N}$만큼 증가하게 된다. 따라서 NEDT는 S/N 표현식(7)과 NESR과의 관계식(12)으로부터 스펙트럼의 평균화 횟수의 제곱근에 반비례하게 된다.

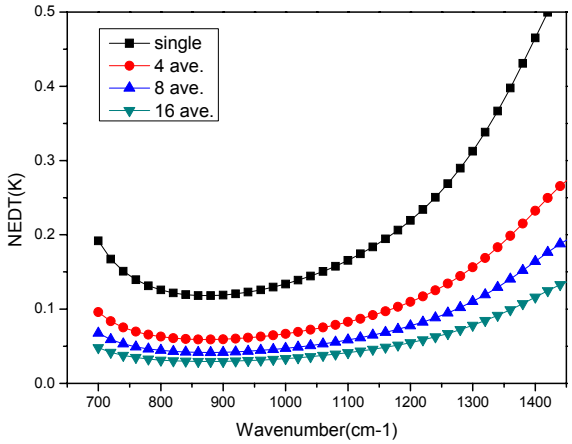

Fig. 1. 데이터 평균 횟수에 따른 NEDT 계산, 분해능 = 2.6cm^{-1}

Fig. 2는 분광분해능에 따른 NEDT를 1회 데이터 평균에 대해 계산한 것으로서 분해능이 저하될 수록 고주파성분의 분광스펙트럼이 무뎌지므로 모델식과 같이 선형적으로 NEDT가 낮아짐을 알 수 있다.

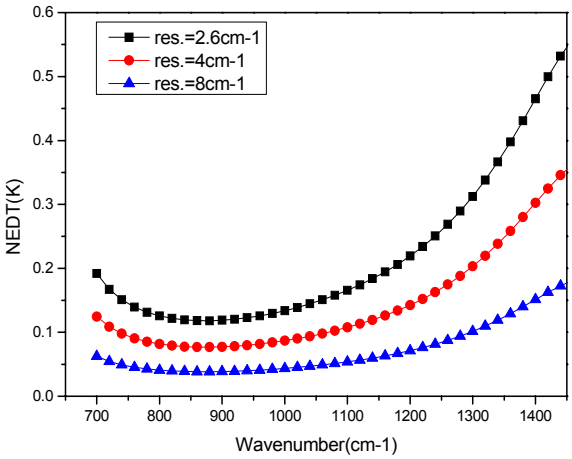

Fig. 2. 분광분해능에 따른 NEDT 비교

전반적으로 모델링한 NEDT 값이 측정치에 비해 낮은 이유는 전기회로 보드상의 접촉잡음 등 현실적으

로 모델링이 어려운 부분은 제외한 경우이므로 본 논문에서의 계산은 이상적인 NEDT라고 볼 수 있으며, 검출기의 감도 특성에 의한 U 자형태의 특성 곡선을 갖으며, 평균화 횟수, 분해능 등의 변화에 의한 NEDT의 양상을 예측할 수 있었다. 특히 광검출기의 반응도 특성과 광부품의 코팅 투과도특성을 고려할 때, 단파수영역은 광검출기의 반응도 특성(Cut-off 파장 존재)에 의해 NEDT 값이 급격히 악화되고, 장파수영역에서는 광부품의 적외선 투과도 특성효과가 반영된 것으로 보였다.

Fig. 3은 제작된 FTS에 대해 2점 흑체 온도에서의 잡음특성을 측정하여 단일 데이터 획득인 경우와 16회 평균한 경우에 대해 NEDT를 700~1400cm^{-1} 구간에 대해 측정하였다. 특히, SF_6 가스의 중심 흡수선 파장인 946.4cm^{-1}에서는 단일측정과 16회 평균 측정에서 각각 0.51K와 0.12K가 측정되었다.

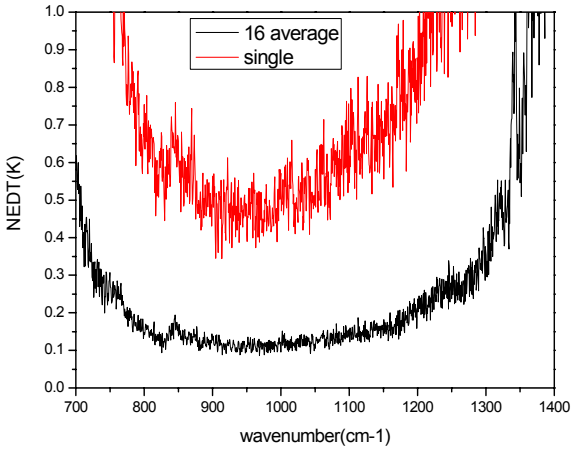

Fig. 3. 파수에 따른 NEDT 측정 결과(1회 평균 결과치 : 표준편차가 큰 값, 16회 평균결과치 : 표준편차가 작은 값).
분해능 = 2.6cm^{-1}, 2점 흑체온도 : 30℃, 40℃에서 측정

Fig. 4에서는 1회 측정된 NEDT 값과 16회 스펙트럼을 평균화하여 측정한 값을 평균화 횟수의 제곱근의 역수식 그래프(~1/$\sqrt{\text{평균횟수}}$)와 함께 나타내었다. 1회 평균시와 16회 평균시간 값과의 오차는 1회 측정시는 표준편차가 상대적으로 커서 측정값 기록시 오차에 기인하며, 전체적으로 데이터를 16회 평균하여 신호처리를 하면 1회 측정시보다 NEDT가 ~1/$\sqrt{\text{평균횟수}}$의 경향을 따른다. 이는 데이터 평균 횟수를 너무 증가시키도 NEDT값의 감소 변화율이 둔화되므로 야외 운용시 요구되는 신호처리 소요시간과 탐지 성능간의 적절한 타협점을 예측할 수 있는 지표이다.

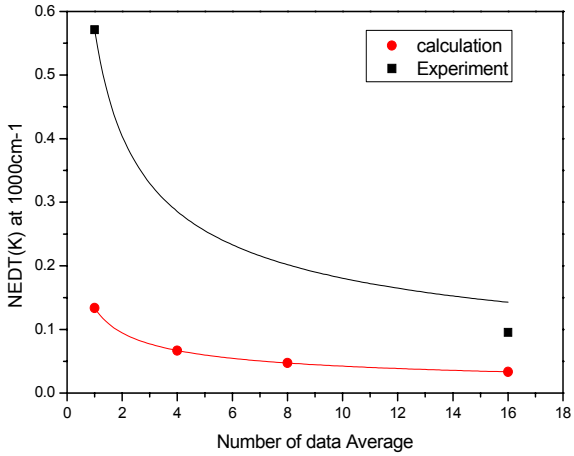

Fig. 4. 데이터 평균 횟수에 따른 NEDT 모델 결과와 측정치 비교. 실선은 데이터 평균화 횟수의 제곱근의 역수 그래프임

한편, 탐지농도 한계는 대기의 흡수가 무시되는 짧은 거리에서는 간단히 가스운과 자연배경을 두층 모델로 설명이 가능한데, 두층 모델에서는 일정한 (농도×탐지운 깊이 : $c \times d$)인 경우 이므로, 관측선상의 어느 점에 모여 있는 가스운인 경우와 배경과 관측점까지 낮은 농도로 퍼져 있는 탐지운의 경우가 동등히 묘사하는 모델이다. 따라서, 에어로졸과 입자에 대한 산란을 무시하면, 수동형 FTS에서 관측되는 복사량은 아래와 같다.

$$L_{FTIR} = B_{gas}(1-\tau) + B_B\tau \qquad (15)$$

L_{FTIR} : 관측점에서의 복사량,
B_{gas} : 관측층의 온도에서의 흑체복사량,
B_B : 배경 복사량,
τ : 관측층의 투과도($\tau = e^{-\epsilon\alpha l}$).

따라서, 위식에서 신호크기에 해당하는 복사량을 계산하려면 배경에 의한 복사량을 차감하여 다시 정리하면 다음과 같다.

$$\Delta L = (B_{gas} - B_B)(1-\tau) \quad (16)$$

그런데, 플랑크 온도곡선에서 복사선 세기는 적은 온도 구간에서 선형적으로 비례하는 것이 알려져 있다. 따라서 위식으로부터 탐지하려는 가스운에 의한 분광신호 크기($\Delta^2 T$)는 다음과 같다.

$$\Delta^2 T = \Delta T(\epsilon \times c \times d) \quad (17)$$

즉, 가스운과 배경과의 온도차(ΔT), 흡수계수(ϵ), 농도(c) 및 가스운의 깊이(d)의 곱에 비례하게 되므로 농도항만을 분리하여 측정하는 것은 불가하다.

따라서 탐지농도의 한계는 신호크기가 잡음등가온도차와 같을 때로 정의되므로 탐지 농도한계(NECL)는 아래와 같다[7].

$$NECL = (c \times d)_{limit} = \frac{NEDT}{\epsilon \bullet \Delta T} \quad (18)$$

가스운의 예로서 SF_6 가스의 중심파장에서의 흡수계수인 ϵ = 0.0094m^2/mg[8]를 이용하면 탐지운과 배경의 온도차를 1도 기준으로 생각할 때 위 측정된 NEDT 값을 적용하면 16회 평균시에는 탐지한계는 12.8mg/m^{2}로 예측되었다.

5. 결 론

수동형 퓨리에 변환 적외선 분광기의 시스템 성능지수로서, NEDT 값을 설계 변수치를 이용하여 계산하였고, 분광 파장범위인 700～1400cm^{-1} 영역에서의 잡음등가온도차에 대한 특성 곡선을 분석하였다. 단일 측정에 대한 NEDT의 모델식으로부터 N회 데이터를 평균한 NEDT 값은 데이터 평균 횟수의 제곱근에 반비례하며, 실험적으로 1회 및 16회 평균 측정값으로부터 이론적인 예측과 비교적 잘 매칭되는 것을 확인하였다.

따라서, 야외 운용시 실시간 가스 모니터링이 요구되는 경우는 가스의 최소 검출 농도량과 측정시간의 제곱근의 곱이 일정한 관계를 가지므로 적절한 타협점이 존재함이 밝혀졌다.

또한 잡음등가온도차는 분광분해능에 반비례하므로 분광분해능과 측정 평균횟수를 함께 조정함으로서 실시간 야외 탐지운영에 요구되는 최소 탐지 농도 수준을 충족시키는 것이 가능하다.

Reference

[1] MODIS(Moderate Resolution Imaging Spectrometer) UCSB Emissivity Libery, http://www.icess.ucsb.edu/modis/EMIS/html/em.html.

[2] Edwin P. Przybylowicz, et al., “Testing and Evaluation of Standoff Chemical Agent Detectors”, The National Academies Press, Washington D.C., p. 13, 2003.

[3] Julia H. Rentz and James R. Engel, “Passive Spectro-Radiometer Calibration: Radiance Responsivity, Sensitivity, and Radiation Reference”, OPTRA, Inc.

[4] Peter R. Griffiths, James A. de Haseth, “Fourier Transform Infrared Spectrometry”, John Wiley & Sons, New Jersey. p. 161(second Ed. 2007).

[5] 김동환, 김영운, 강영일, 최명진, 박병황, 박도현, 이석구, “원거리 가스탐지를 위한 퓨리에변환 분광기의 시스템 성능지수”, 한국군사과학기술학회 종합학술대회 논문집, 2010. 6.

[6] Claes Nelsson, Frans Lundberg, Par Nilsson, Mattias Berglund, “ScanSpec : An Imaging FTIR Spectrometer”, SPIE. Vol. 4029, pp. 324～336, 2000.

[7] Andreas Beil, Rainer Daum, Roland Harig, and Gerhard Matz, “Remote Sensing of Atmospheric Pollution by Passive FTIR Spectrometry”, SPIE Vol. 3493, pp. 32～43, 1998.

[8] “RAPID Instruments Description”, BRUKER SAXONIA ANALITIK GmbH, 1999.