한국방위산업학회
제18권 제1호
2011년 6월

원거리 화학가스 탐지용 FTIR

김 동환[1†]

내용목차

1. 서론
2. 원거리 화학가스 탐지 기술동향
3. 원거리 가스 탐지용 FTIR 원리 및 성능평가지수
4. 결론

1† 두산DST 방산연구소 수석연구원
(교신 저자 Tel: 010-5373-7386 Fax: 031-270-1543 E-mail: donghwan2.kim@doosan.com)

논문접수일: 2011년 5월 11일 게재확정일:2011년 6월 27일
논문수정일 (1차: 2011년 6월 22일, 2차: 2011년 6월 27일)

Korea Association
of Defense Industry Studies
Vol.18, No.1, June 2011

FTIR for Remote Chemical Detection

Kim, Dong Hwan[1†]

Abstract

With the maturity of precision manufacturing and fast signal processing technology, FTIR may now be used in an actual open air field. This paper summarized the present technology trend involving remote chemical detection and explained the detection principle of remote chemicals by using the two-layer model of the atmosphere. Since the FTIR for the remote chemicals is based on the measured temperature difference between background and gas, the minimum detection level of temperature difference is the key parameter for evaluating system performance.. The merits of system performance are simulated theoretically from the photoconductive detector noise model. NEDT (Noise Equivalent Differential Temperature), which is dependent on spectral resolution and signal integration time, was used to analyze in order to get the best signal-to-noise ratio. For practical operations, it was determined that a proper trade-off between lowering the NEDT and number of averaging data is necessary.

Intermittent correction of output signal is needed from the unavoidable external perturbation of temperature and mechanical vibration. In order to estimate the system's calibration period, the approximated formula of the responsivity variation was derived as a function of the environmental temperature variation from the assumed linear dependence between spectral radiance and instrument output signal.

<Key Words> *FTIR, blackbody calibration, interferometer, IR spectrometry, remote gas detection.*

1. 서론

최근 지구환경에 대한 경각심이 증대되면서 원거리에서 실시간으로 대기환경, 수질환경 등에 대해 모니터링이 가능한 기술개발에 대한 수요가 높아지고 있다. 지난 수 십년간 실험실 환경에서만 정량분석 기법으로 사용되어져 왔던 분광학기술이 주변장치의 기술발달로 인해서 외부환경에서도 사용 가능하게 됨에 따라 상용 원거리 가스모니터링 장비들이 개발되었다. 이러한 원거리 환경모니터링 장비의 수요는 최근 환경 잇슈와 더불어 계속 증가할 뿐 만 아니라, 인구증가와 도시화, 사회구조의 복잡화에 따른 화생방 대테러 대비책으로서도 조기 경보기 역할을 할 수 있어서 원거리 가스 모니터링 장비에 대한 관심이 증가되고 있다. 실제 지난 걸프전과 동경역 사린 살포 사건 등에서도 나타났듯이 대테러 대응책으로서 실시간 유해가스 모니터링 기술에 대한 수요는 더욱 증가될 것으로 보인다. 특히 화학무기는 적은 비용으로 막대한 피해를 줄 수 있는 무기이기 때문에 사전 조기 경보 기능이 매우 필요하며, 사람이 근접할 수없는 지역에서도 가스 탐지가 가능한 FTIR(Fourier Transform Infrared)의 기술적 수요는 매우 높다.

특히 적외선을 이용한 분광학기법은 원거리에서 사용이 가능하고 많은 종류의 분자들이 진동 에너지준위와 회전준위를 가지는 고유 적외선 흡수선이 존재하는 파장영역을 사용하므로 FTIR은 한꺼번에 여러 물질을 탐지할 수 있는 장점이 있다.

지구대기의 광대역 상시 관측을 위해서 인공위성에 탑재된 대형 FTIR 장비는 좀더 정확한 대기환경의 정보와 오염지역을 실시간으로 모니터링하여 범세계적으로 측정 데이터를 전파하기 때문에 국가적 개발 사업이 되고 있다.

이외에도 광활한 노천에 설치되어 있는 가스관의 누수 등에 대한 모니터링은 기존 방법들은 비용이 많이 소모되고 유지보수에 많은 인력이 소모되므로 원거리 가스 모니터링이 가장 효율적인 적인 방법으로 알려져 있으며, 지하철 등 많은 사람들이 붐비는 장소에서의 실시간 가스모니터링 시스템은 대테러 예방차원에서 매력적인 응용시장이 될 것으로 생각한다.

본 논문에서는 현 원거리 가스 모니터링 기술을 비교하고 최근 기술개발이 가장 빠른 FTIR 기술과 장비의 요소기술에 대해 중점적으로 기술하고자 한다.

2. 원거리 화학탐지기술 동향

현재 사용되어지고 있는 대표적인 원거리 가스탐지 방법으로는 DOAS(Differential Optical Absorption Spectroscopy), DIAL(Differential Absorption LIDAR), LIDAR(Light Detection and Ranging), TDLAS(Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy), OP-FTIR(Open-path Fourier Transform Infrared) 등이 있다.

국내에서는 산업단지의 굴뚝에서 배출되는 환경오염원을 측정하기 휘해서 주로 근접하여 가스성분을 측정하는 다중성분 가스 분석기가 개발되었다고 보고된바 있으나 원격으로 측정이 가능한 상용 수준의 장비 개발은 미비한 수준이다[1].

이들중 LIDAR, DIAL과 TDLAS는 레이저 광원의 안정성과 파장가변대역의 제한으로

특정 성분의 가스만이 측정가능하다는 제약조건이 있다.

한편 레이저와 같은 별도의 광원을 사용하지 않는 수동형 FTIR은 소형의 간섭계 센서를 사용하고 퓨리에 계산으로 분광신호를 얻는 방법이기 때문에 소형 경량화가 가능하며 다중성분의 가스를 한 번에 탐지가 가능하여 측정시간이 매우 짧은 기술로 알려져 있다.

야외에서 실용화된 FTIR 기법은 실험실에서 사용하는 FTIR 기법과는 달리 별도의 적외선 광원을 사용하지 않고 가스성분을 탐지할 수 있는데, 자연배경이 기준광원을 대신하여 시준선상에 놓인 가스운과 야외배경과의 온도 차이에서 발생되는 적외선 영역에서의 시간지배 스펙트럼인 간섭무늬를 얻은 뒤, 이를 퓨리에 변환시켜 주파수 스펙트럼을 얻은 방법이다. 모든 가스 성분들은 각각 고유의 특정 흡수선을 가지므로 간섭물질의 영향을 거의 받지 않으며 동시에 여러 개의 화학물질을 탐지할 수 있어서 해외에서 많은 연구가 민수, 군수분야에서 진행되고 있다. 특히 운용면에 있어서는 수동형 FTIR은 능동형 LIDAR과 달리 목표 조준이나 레이저 유지보수 필요가 없어서 기동성, 운용성 면에서 높은 실용성을 가진다.

독일에서는 <그림 1> 과 같이 Bruker Daltonics라는 회사에서 RAPID라는 이름으로 제품 개발을 완료한 상태이다. Bruker사는 생화학 탐지 장비를 전문으로 생산하는 업체로서 내부에 시소방식의 독특한 간섭계를 적용하고 있으며 망원 광학계를 입력 광학계로 사용하여 입력 신호의 크기를 증가시킨 OPAG-22라는 장비는 야외에서 메탄 가스등을 실시간으로 측정하고 분석하는데 사용되어지고 있다(1)[1].

MIDAC 사의 AM(Air Monitoring) 제품은 능동/수동 겸용으로 제작된 제품으로 세계적으로 원격 FTIR 분광장비로 현재 가장 널리 보급된 제품이다. 능동형으로 사용할 때는 주장치와 분리된 별도의 열원(SiC 열원)을 사용하게 된다. <그림 2> 에서 보는 바와 같이 입력 광학계에는 10" 또는 14"의 망원광학계를 적용하여 입력 신호의 광량을 크게 한 구조이다(2)[2].

그 외 미국의 Designs & Prototypes 사에서 포터블 FTIR과 터보 FTIR이라고 하는 제품을 출시하여 판매하고 있다. 포터블 FTIR은 민수용으로는 세계적으로 가장 빨리 출시된 제품으로 형상이 <그림 3> 에 나타난 바와 같다. 군수용 제품들이 stirling 냉각방식을 적용하는 것과는 달리 저가의 액체 질소를 충전하는 방식을 적용하고 있다. 두 장의 육각 프리즘을 교차 왕복시키며 경로차를 만들고 있는데 굴절광학계를 이용하기 때문에 발생하는 손실이 크고, 선형운동 방식의 간섭계라서 주사 속도가 통상 1 scan/s, 최대 5 scans/s로 매우 낮은 편이다. 그리고 입사 광학계가 주사 기능이 없기 때문에 매우 불편하다. 이 제품은 1세대 시제품 개념으로 보는 것이 타당할 것이며 이를 개선하여 나온 제품이 터보 FTIR이다. 터보 FTIR 굴절식의 회전운동 방식 간섭계를 적용하였으며, 간섭계만을 모듈화하여 체계의 다양성을 높였다는 특징을 갖는다. 터보 FTIR은 최대 약 200 scans/s 의 주사 속도를 갖고 있으며 이는 현존하는 세계에서 가장 빠른 주사 속도이다(3)[3]. 이 제품들은 주로 기상, 유독가스 탐지, 광산에서 나오는 가스 분석 등을 위하여 제작되었다.

---

1) http://www.bdal.com/products/mobile-detection/chemical-detection/

2) http://www.midac.com/

3) http://www.dpinstruments.com/

<그림 1> RAPID, 간섭계형상, Bruker[3]

<그림 2> AM 시스템, 간섭계 형상, MIDAC사[4]

(a) (b) (c)

<그림 3> 포터블 FTIR(a), Turbo FTIR(b), 터보 FT 간섭계(c), D&P사[5]

3. 원거리 가스탐지용 FTIR 원리 및 성능 평가지수

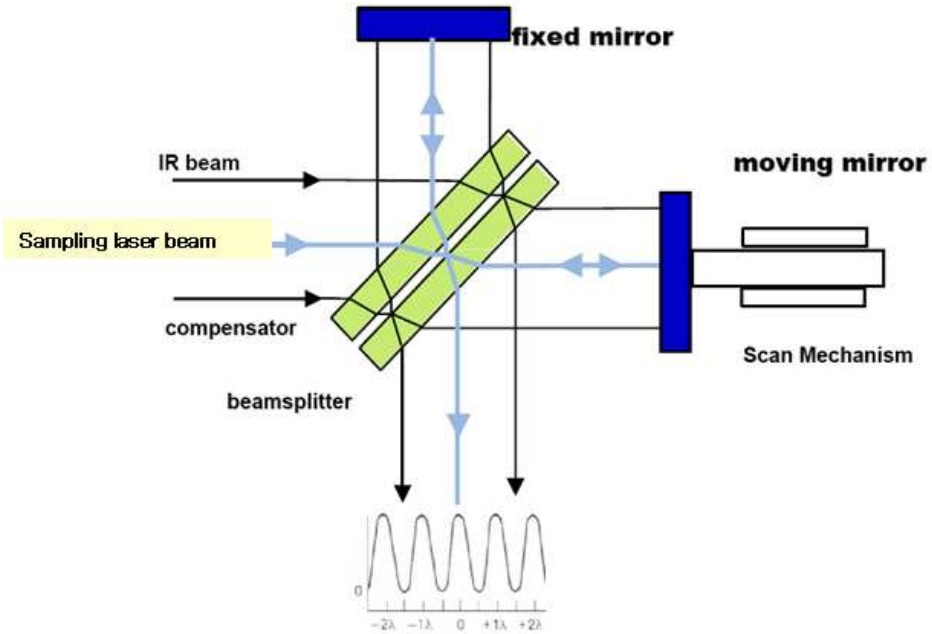
FTIR 장비의 핵심 구성부는 간섭계이며 탐지성능은 최소 온도차 분해능인 NEDT에 의해 평가된다. 또한 분광신호의 베이스 라인을 보정하기 위해 표준 흑체에 의한 복사보정이 필요하다. 세부 절에서는 이들의 작동 원리와 시스템 변수들에 의한 성능 평가에 대해 고찰해 본다.

3.1. 간섭계(Interferometry)

FTIR 장비에서 센서부는 <그림 4>와 같이 마이켈슨 간섭계나 변종된 형태의 마이켈슨 간섭계를 사용한다. 마이켈슨 간섭계는 광선분할기와 고정된 반사경, 이동하는 반사경으로 구성된다.

단일파장(λ) 광원 빛이 간섭계에 입사되면 광선분할기에 의해 고정된 반사경과 이동하는 반사경까지 각각 분할된 빛을 수학적으로 표현하면 다음과 같다.

$$E_1 = E_o \cos(kx_1 - \omega t) \qquad (1)$$
$$E_2 = E_o \cos(kx_2 - \omega t)$$



<그림 4> 마이켈슨 간섭계

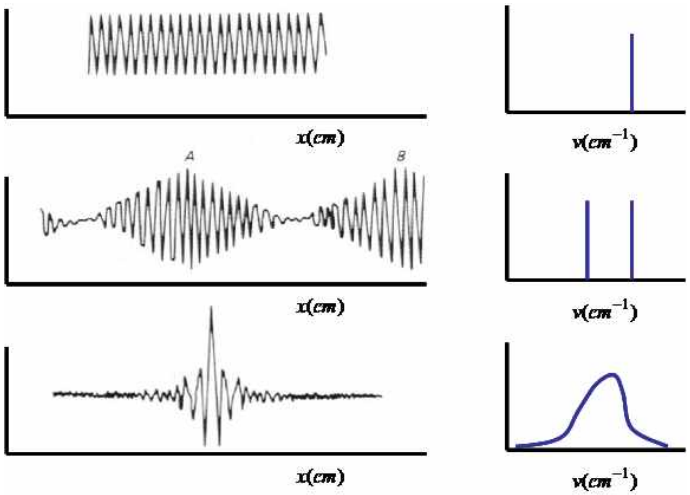
광선분할기와 각각의 반사경간의 거리차이를 진행한 후 검출기에서 다시 합쳐진 빛의 세기는 아래와 같이 광경로차($x = x_1 - x_2$)의 함수로 코사인으로 진동하는 함수로 표현된다.

$$I_k = \langle (E_1 + E_2)^2 \rangle = 2I_o(1 + \cos kx) \tag{2}$$

만일 복색광이 입사되면 모든 파수에 대해 적분해야하므로 옵셋항을 제외한 진동하는 간섭무늬항만 취하면 아래와 같이 광경로차와 스펙트럼간에 퓨리에 변환식과 같은 형태를 나타낸다.

$$I(x) = \int_0^\infty I(k)\cos(kx)dk \tag{3}$$
$$I(k) = \left(\frac{2}{\pi}\right)\int_0^\infty I(x)\cos(kx)dx$$

위식에 대한 해석은 간섭계에서 발생되는 광경로 차이에 의한 간섭무늬를 퓨리에 변환하면 광원의 파수정보(스펙트럼)를 알 수 있다. 아래그림은 몇 가지 간섭무늬신호를 퓨리에 변환 했을 때 대응되는 분광스펙트럼의 예이다.



<그림 5> 간섭무늬와 스펙트럼 비교

따라서, FTIR을 이용한 야외에서의 가스성분 탐지는 연속 스펙트럼을 갖는 배경신호와 가스 고유의 흡수선을 갖는 신호와의 합산에 의한 복합된 간섭무늬이다. 이러한 복합

된 간섭무늬를 퓨리에 변환하여 배경신호와 구별하여, 분광 데이터베이스에 내장된 특정 가스의 스펙트럼과의 유사도를 실시간으로 비교하여 원거리의 가스 성분을 식별하게 된다.

그런데 여기서 현실적으로 무한대의 광경로를 구현하기가 불가능하므로 유한한 광경로 차이는 유한한 파수간격, 즉 주파수 분해능을 제한하게 되며, 최대 광경로 차이를 x_w 라 할 때, 최소 분해 가능한 파장간격은 아래와 같다[3].

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{x_w} \tag{4}$$

한편 아나로그 신호 형태인 간섭무늬 신호를 퓨리에 변환하려면 등간격의 간섭무늬 샘플링이 필요한데 이는 별도의 단일파장의 레이저를 간섭계내의 광신호가 지나가는 광경로 상에 위치함으로서 등간격의 광경로 차이에 의한 샘플링이 가능하다.

적외선영역(700~1400cm-1)에서의 간섭무늬의 진동수는 이동거울의 속도를 v_M 이라고 할 때 한주기 간섭무늬를 생성하기위한 시간으로부터 계산되어 지는데 이를 퓨리에 주파수라고 한다.

$$f_F = \frac{1}{\tau} = \frac{v_M}{\left(\frac{\lambda}{2}\right)} = 2\frac{v_M}{\lambda} = 2v_M\nu \tag{5}$$

예를 들어 이동거울의 속도는 통상 1cm/s 라고하면 적외선 중심파장인 1000cm-1 에서의 퓨리에 주파수는 약 2kHz 정도로 오디오 주파수 영역이다. 한편 샘플링 주파수는 이보다 짧은 파장의 레이저 광원을 사용하며 He-Ne 레이저를 예로 들면 파장이 $0.63\mu m$ 이므로 32kHz 이다. 이는 $10\mu m$ 대역의 적외선 신호를 수십 kHz 정도로 신호 주파수를 낮추게 함으로서 기존의 오디오 AD 변환기로도 신호처리가 가능하다.

한편 최소 요구되는 샘플링의 개수(N)는 정보이론인 Nyquist 정리에 의해서 아래와 같이 구할 수 있다.

$$N-1 = \frac{2x_w}{\lambda_{\min}} \tag{6}$$

여기서 $\lambda_{\min}$ 은 퓨리에 변환시 반복되지 않는 최소 분별 가능한 신호파장이다. 위식에서 분석하고자 하는 파장범위를 광대역으로 하려면, 최소 파장이 짧아질수록 샘플링 개수가 증가하게 된다. 샘플링 개수의 증가는 퓨리에 변환시 연산 갯수가 N^2 로 증가되므로, 컴퓨터 연산시간이 급격히 증가되고 대용량 저장 메모리가 요구되므로, FTIR 기법은 과거에도 존재했었으나 보편화되지 못하였다. 그러나, 최근의 컴퓨터 프로세스 속도와 데이터 저장용량의 증가 및 Cooley-Tukey 알고리즘에 의한 FFT 기법으로 인해 현장에서 보통의 일반 컴퓨터로도 신호처리가 가능하게 되었다.

3.2. 복사보정(Radiometric Calibration)

FTIR 장비에서 측정된 신호는 장비내의 검출기, 투과창, 간섭계 등 구성부품들이 각각 다른 광학적, 전기적 반응도를 내므로 이들을 모두 거쳐서 나타나게 된 전기적 신호형태이므로 기준이 되는 이상적 광원(완전 흑체)에 대한 분광응답율을 측정하여 보정 계수를 환산한 후 신호처리보드에 기억해 두어야 임의의 적외선 신호가 들어올 때 정확한 스펙트럼으로 신호처리를 할 수 있다.

광원의 분광 신호형태는 FTIR 시스템의 광검출기 주파수 특성, 광부품의 투과도 및 반사도 특성, 집속렌즈의 색수차등에 의해 변형된 최종 간섭무늬 신호가 FFT로 변환된 전기적 신호로 나타나게 된다. 이러한 광원의 신호파형과 FTIR 시스템에 최종 나타난 전기적 파형(ADC 카운트 수)과의 1차 관계식의 기울기를 분광응답율(Radiance responsivity) 라고 정의하며, 이는 Radiance 보정 계수 및 잡음지수 평가에 중요한 변수가 된다.

야외에서 가스탐지에 사용되는 FTIR장비는 주변의 사계절 온도변화를 고려하면 약 -30~40도 범위의 온도변화를 겪게 된다. 따라서 야외에 살포된 가스운도 배경온도에 따라 다르지만 배경대비 약 수도 범위 내에 존재하기 때문에 신호세기의 동적 범위는 약 배경온도 범위 내에서의 복사세기에 해당하게 된다. 다행히도, $8\sim12\mu m$ 영역에서는 대부분의 자연배경 (물, 얼음, 나무, 모래, 눈등)의 방사율(emissivity)이 0.95이상으로서 거의 흑체복사와 같은 정도로 방출율이 높아서 회색체(graybody) 또는 흑체(blackbody) 로 근사하여 모델링할 수 있다.

온도 T에서 열적 평형상태인 이상 흑체의 단위면적당, 단위파수당, 단위 입체각당 복사력(Spectral Radiance)은 플랑크 식으로부터 다음과 같다[4].

$$L_\nu(T) = \frac{C_1\nu^3}{\exp(C_2\nu/T)-1} \quad W/(sr.cm^2.cm^{-1}) \tag{7}$$
$$C_1 = 2hc^2 = 1.191\times10^{-12} \quad W/(sr.cm^2.cm^{-4})$$
$$C_2 = \frac{hc}{k} = 1.439\ K.cm$$

한편 식 (7)로부터 온도를 복사력의 함수로 표현하면 다음과 같은 밝기온도(Brightness Temperature)로 표현할 수 있다.

$$T = \frac{C_2\nu}{\ln[1+\frac{C_1\nu^3}{L_\nu}]} \tag{8}$$

이러한 밝기온도로의 변환식은 가스운의 성분을 탐지할 때 배경온도에 대한 분광온도 스펙트럼은 연속적인 일직선 형태로 나타나고 특정 가스성분의 스펙트럼은 선스펙트럼으로 대비되므로 밝기온도로 환산된 식별 알고리즘에서 배경신호와 가스성분신호를 분명하게 분리할 수가 있으므로 간섭계 센서의 분광응답율에 대한 정확한 보정이 필요하다.

식 (7)에서 온도가 상승하면 복사력도 함께 상승하는데 온도상승에 따른 복사력의 상

승 비율은 적외선영역에서의 Wien 복사 근사식($L_\nu(T) \approx C_1 \nu^3 e^{-C_2 \nu / T}$)으로부터 미분하면 부터 아래와 같이 구해진다.

$$\frac{dL_\nu}{L_\nu} = \alpha \frac{dT}{T} \qquad (9)$$
$$\alpha \approx \frac{C_2 \nu}{T}$$

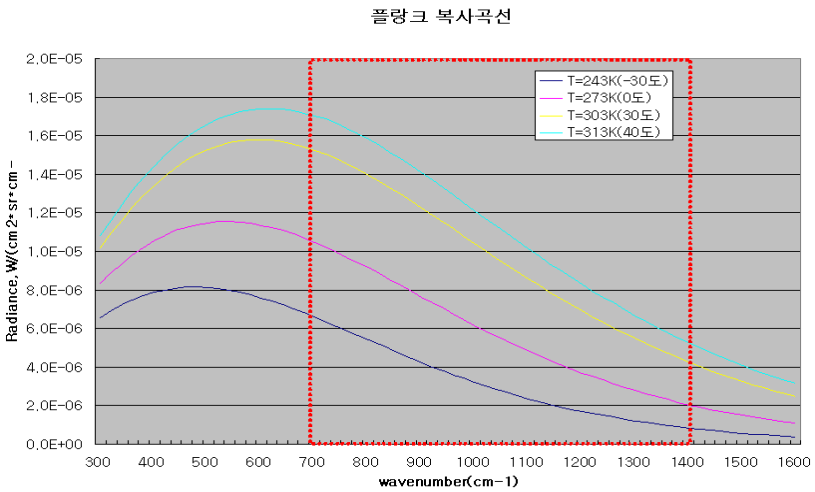
위식에서 보면 복사선과 온도간의 비례계수가 온도와 파수의 함수이므로 온도가 변화하면 복사광원의 세기가 스펙트럼 상으로도 변화하게 된다. 이는 어느 특정온도에서 기기 보정을 해두어도 주변 온도에 따라서 자연배경인 스펙트럼 형태가 변화하므로 엄밀히는 각 온도별 광원에 대한 보정계수가 필요하다. 또한 식 (9)의 특징은 장파수(짧은파장)에서가 단파수(장파장)보다 온도감응도가 높다. 예를 들면, 300K의 온도에서 파수 700cm-1 와 1400cm-1에서의 온도 감응도는 각각 3.36과 6.71이다.

국내 연중 온도변화 범위인 약 -30~40도에 대해 파수단위로 흑체 플랑크 곡선을 표현하면 <그림 6>과 같다.

최대 복사력의 파수위치는 플랑크 복사선 공식에서 파수에 대한 미분으로부터 구할 수 있는데 아래와 같이 표현된다.

$$\lambda_{max} = \frac{2897}{T} \quad \mu m \qquad (10)$$
$$\nu_{max} = 1.95\,T \quad cm^{-1}$$

최대 복사력의 위치는 상온기준 300K에서 파수단위로 표현하면 585cm-1 이며, 700~1400cm-1 대역에서는 복사선의 최대치가 없는 것이 특징이다. 이는 분광복사선(spectral Radiance)을 파장단위와 파수단위로 표현시 최대 복사력 세기 위치가 다르게 표현되는 것이 특징이다.



<그림 6> 플랑크 복사곡선(파수단위 표현식)

통상, FTIR 기기의 복사보정을 위하여 표준흑체를 사용하는데, 표준흑체의 광신호에 대한 FTIR 시스템의 1차적 분광신호 형태는 간섭계특성, 광검출기 주파수 특성, 광부품의 투과도 및 반사도 특성, 집속렌즈의 색수차 등에 의해 형성된 간섭무늬 신호가 FFT 변환된 전기적 신호로 표현된다. 이러한 임의의 입력 광원의 광신호와 측정된 전기적 파형(ADC 카운트 수)과의 관계식을 아래와 같이 1차식으로 기술할 때, 기울기항을 instrument gain 또는 instrument spectral response (분광응답율)라고 정의하며, 이는 온도범위가 좁은 경우에 대해서는 온도와는 무관한 비례상수로 가정하며 복사 보정 계수 및 잡음지수 평가에 중요한 변수가 된다[5].

$$S_\nu(T) = G(\nu) \cdot (L_\nu(T) + O_\nu(T)) \tag{11}$$

$S_\nu(T)$: $spectrum\,from\,the\,instrument\,measurement\,[a.u.]$
$G(\nu)$: $instrument\,gain\,[a.u./(W/(sr.cm^2.cm^{-1}))]$
$L_\nu(T)$: $scene\,true\,spectral\,radiance\,[W/(sr.cm^2.cm^{-1})]$
$O_\nu(T)$: $instrument\,offset\,[W/(sr.cm^2.cm^{-1})]$

위식에서 미지수가 2개이므로 서로 다른 2점 흑체 온도(T_{high}, T_{low})에 대한 복사 신호, $L_\nu^{bb}(T_{high}), L_\nu^{bb}(T_{low})$를 측정한 뒤 위의 선형 관계식의 기울기로부터 분광응답율을 다음과 같이 계산한다.

$$G(\nu) = \frac{S_\nu(T_{high}) - S_\nu(T_{low})}{L_\nu^{bb}(T_{high}) - L_\nu^{bb}(T_{low})} \tag{12}$$

여기에 사용된 가정은 보정 계수는 온도와는 무관한 파수의 함수이며, 검출기가 광신호세기에 대해 선형적으로 반응하고 보정에 사용된 흑체는 방사율이 1인 완전흑체(emissivity=1)임을 가정하였다.

만일 완전흑체가 아닌 회색체(graybody)를 사용하였으면 방사율 만큼 아래와 같이 추가적으로 보정해주어야 한다.

$$G'(\nu) = \epsilon \cdot \frac{S_\nu(T_{high}) - S_\nu(T_{low})}{L_\nu^{bb}(T_{high}) - L_\nu^{bb}(T_{low})} \tag{13}$$

ϵ : $emissivity$

그런데, 분광응답율은 작은 온도변화에 대해서는 간섭계성능이 변화하지 않지만 야외에서 사용시 사계절 온도변화를 겪게 되므로 장기간 연속 동작시나 일교차가 매우 큰 경

우는 간섭계 광부품중 ZeSe 광선분할기의 온도변화에 의한 굴절율 특성이 변화하게 된다. 즉 이로 인해서 광경로가 변화하게 되어 실제로는 주변온도변화에 따라서 신호 레벨이 변화하게 된다. 따라서 간섭계 센서가 극심한 온도 변화를 겪게 되는 경우는 새롭게 분광 보정 계수를 설정해주어야 동일한 광원세기에 대해 주변 온도 변화에 상관없이 동일한 분광 반응을 낼 수 있다. 보정의 주기는 장비의 운용 지속시간과 주변 온도 변화에 의해 정해지는데 연속 사용 시는 기후 변화에 따른 복사 보정이 주기적으로 시행되도록 운용 알고리즘 반영이 필요하다.

간섭계가 외부환경으로부터 온도차(ΔT)를 겪게 되면서 신호레벨의 변화가 생길 때 이를 보상해주는 새로운 보정계수의 변화량(ΔG)은 식(11) 과 아래와 같은 관계식으로부터 이론적으로 도출할 수가 있다.

$$S_\nu(T+\Delta T) = (G(\nu)+\Delta G)L_\nu(T;T_{amb}+\Delta T) \tag{14}$$

여기서 신호레벨(S_ν)은 $T=T_{amb}$ 에서 보정되었으면, $T=T_{amb}+\Delta T$에서의 변화는 최적 크기에서 선형적으로 변화하는 것으로 가정하면 아래와 같이 표현된다.

$$S_\nu(T+\Delta T) \approx (1-\kappa|\Delta T|)S_\nu(T) \tag{15}$$

κ : 선형기울기

식 (14)와 (15)를 선형 전개하면 아래와 같이 보정계수의 변화량이 도출된다.

$$\left|\frac{\Delta G}{G}\right| = \frac{\kappa|\Delta T|+(1-\epsilon)\alpha\frac{\Delta T}{T}}{1+(1-\epsilon)\alpha\frac{\Delta T}{T}} \quad , \epsilon : emissivity\ of\ blackbody \tag{16}$$

위의 결과로부터 외부 온도변화에 따른 간섭계의 신호레벨 변화율로부터 보정계수의 알짜 변화율을 계산하였다. 이러한 알짜 보정계수의 변화율을 제한하게 되면 이에 따른 사용가능한 온도범위가 산출되므로 한반도의 일교차 변화에 대한 데이터로부터 적절한 보정주기에 대해 예측이 가능하다.

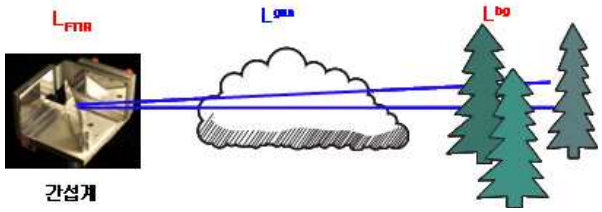
3.3. 잡음등가온도차(NEDT)

FTIR 장비의 탐지 성능에 대한 평가는 NEDT 성능으로 표현되는데 이는 최소 온도 분해능을 나타내는 지표로서 광학적, 전기적인 총체적 잡음지수에 해당한다.

FTIR 신호세기를 2층 모델을 사용하여 1차적으로 도출하면 <그림 7>과 같은 배치에서 FTIR에 도달하는 복사선 세기는 아래와 같다[6]

$$L_{FTIR} = \tau L^{bg} + (1-\tau) L^{gas} \quad (17)$$

L^{bg}: 자연배경의 복사세기
L^{gas} : 가스운의 복사세기
τ: 가스운의 투과도



<그림 7> Two layer model for FTIR

여기서 대기 투과도를 1차 근사하여 $\tau = e^{-\epsilon cd} \approx 1 - \epsilon cd$ 를 적용하고 자연배경의 복사세기와 가스운의 복사세기의 차이는 온도차이(ΔT)에 비례하므로 대입하면 아래와 같은 신호세기에 대한 근사식을 얻는다.

$$\Delta^2 T \approx \epsilon (c \times d \times \Delta T) \quad (18)$$

수동형 FTIR 장비의 탐지된 분광신호 세기는 $\Delta T \bullet (c \times d)$에 비례하므로, 자연배경과 가스운의 온도차이가 클수록 신호대 잡음비(SNR)가 증가한다. 통상 자연배경과 가스운과의 온도 차이는 가스 확산으로 인해 수도 정도에 불과하므로 FTIR의 온도잡음지수는 신호대 잡음비(SNR)를 10 이상 유지하려면 신호온도차이 값에 대해 적어도 10% 미만이 되어야 안정적 탐지가 가능하다고 본다.

시스템의 성능지수는 광신호 잡음과 전자신호 잡음이 결합된 시스템 잡음 수준에 의해 결정되므로 이를 모두 포함한 시스템 잡음등가온도차(NEDT)의 특성이 중요한 성능지수가 된다. 또한, 온도차에 의한 분광신호는 밝기온도(Brightness Temperature) 또는 Plank Radiance로 각각 표현이 가능한데, 측정결과의 표현 방법에 따라 다른 잡음지수로서 NESR(Noise Equivalent Spectral Radiance)로도 표현되기도 한다. NESR은 SNR 이 1이 되는 잡음등가의 복사선 세기이다.

또한 측정된 NEDT로부터 시스템이 탐지 가능한 최소농도수준을 계산할 수가 있다. FTIR의 시스템 구조상 NEDT를 결정하는 주요 변수로는 광경로 상의 타열원에 의한 광잡음, 검출기의 shot 노이즈, 전자보드상의 전기적 접촉 노이즈, ADC에서의 양자잡음 등에 의한 잡음 등이 있으며, 이로 인해 시스템 NEDT는 광검출기 잡음지수에 비해 수십배 이상 떨어지게 된다. 특히 낮은 NEDT를 갖기 위해서는 분광계에서의 높은 광학배출을 갖는 광학계 설계와 아나로그 형태의 광감출기 신호로부터 전원등 주변 전자회로에서 전달될 수 있는 전기적 잡음의 차단 설계가 중요하며, 아나로그-디지털 변환시에도 발생

되는 ADC 양자 노이즈 저감기술이 중요하다.

중적외선 검출기로부터 발생되는 최소잡음수준은 검출기의 잡음등가파워(NEP) 모델로부터 계산할 수가 있는데, 이는 검출기의 specific detectivity(D*)에 반비례하며, 검출기 단면적(A_D)의 제곱근에 비례한다. 따라서 최소잡음출력(N′)과의 관계는 아래와 같다[8].

$$D^* = \frac{(A_D)^{1/2}}{NEP},\ cmHz^{1/2}W^{-1} \tag{19}$$
$$N' = \frac{NEP}{t^{1/2}},\ W$$

한편 수동형 FTS의 분광신호 크기(S′)는 배경온도와 가스운의 radiance 온도신호차이에 비례하고, 광학계를 통과하면서 감쇄되는 정도를 고려하면 아래와 같다[7].

$$S' = (L(\nu, T_{high}) - L(\nu, T_{low}))\Theta\Delta\nu\xi, \tag{20}$$
$$L(\nu, T) = \frac{C_1\nu^3}{\exp(C_2\nu/T)-1},\ W/srcm^2cm^{-1},$$
$$C_1 = 1.191\times10^{-12}\ Wcm^{-2}sr(cm^{-1})^4$$
$$C_2 = 1.439\,Kcm$$
$$\Theta = \frac{A_D\times A_{optics}}{f^2}, srcm^2$$
$$\xi = 0.1\,(system\ \ efficiency)$$

여기서, $\Delta\nu$ 는 분광분해능이고, ξ 는 광투과도를 포함하는 시스템 효율로서 적외선 광학창의 투과도를 평균 0.85(85%), 간섭계 투과효율을 0.5(50%), 검출기윈도우의 투과도와 상대적 감도 변화를 0.5(50%) 정도로 고려하고 오차범위를 고려하면 약 0.1(10%)의 값을 갖는다.

A_{optics} 는 집속광학계의 면적을 나타내며, Θ는 광학계의 광배출율(optical throughput)을 나타내는 것이다.

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

$$SNR(\nu) = \frac{(L(\nu, T_{high}) - L(\nu, T_{low}))\Theta(\Delta\nu)t^{1/2}D^*\xi}{A_D^{1/2}} \tag{21}$$

광주파수에 따른 SNR의 표현을 보기위해서는 시스템 성능지수로서 상수로 정의된 ξ

는 시스템 광투과도를 포함하여 제조회사에서 제공하는 광검출기의 감도함수 (responsivity curve) 특성을 삽입한다.

NESR은 FTS가 감지하는 radiance의 최소 변화량으로서 시스템 잡음과 같은 수준의 복사 변화량으로 정의 된다. 따라서, 이를 수식으로 표현하면 다음과 같다[3].

$$NESR(\nu) = \frac{L(\nu, T_{high}) - L(\nu, T_{low})}{SNR(\nu)} \tag{22}$$

앞절에서 유도한 SNR 모델 표현을 위식에 대입하여 치환하면 다음과 같다.

$$NESR(\nu) = \frac{(A_D)^{1/2}}{D^* \Theta(\Delta\nu) t^{1/2} \xi} \tag{23}$$

NEDT는 최소분해 가능한 온도 차이이므로 NEDT 온도 차이에 의한 복사 신호크기의 차이로부터 SNR이 1이 되는 조건으로부터 NESR값을 환산할 수 있다.

여기서 NEDT가 충분히 작다고 가정하면, NESR과 NEDT는 다음과 같은 관계식을 갖는다.

$$NESR(\nu) = L(\nu, T + NEDT) - L(\nu, T) \approx \left|\frac{\partial L}{\partial T}\right| \bullet NEDT(\nu) \tag{24}$$

$$NEDT(\nu) = \frac{NESR(\nu)}{\left|\frac{\partial L}{\partial T}\right|}$$

따라서 시스템 설계 변수를 적용하면 각각의 SNR, NESR, NEDT 값을 이론적으로 계산할 수 있다.

식(23)과 (24)로부터 잡음등가 온도는 광검출기의 디텍티비티와 광학배출량이 크고, 분해능이 낮을수록 저잡음이 된다. 이상은 단일 주사시의 이론식이므로 SNR을 높이려면 여러 데이터를 순차적으로 평균하여 적용하면 데이터 평균횟수의 제곱근, $\sqrt{N}$에 비례하여 SNR이 증가하는 것이 통계적으로 알려져 있다. 따라서 신호 평균 횟수를 늘리면 하드웨어적으로 NEDT가 제한되더라도 탐지 및 식별 확률을 높일 수 있다.

실험적으로는 NEDT는 표준 흑체를 사용하여 2점 온도(high, low)에서의 밝기온도 평균과 표준편차를 측정하여 아래와 같은 평균치 계산으로부터 구할 수 있다. 여기서 밝기온도(Brightness temperature)는 식(8)에서 정의된 바와 같이 플랑크 복사식에서 radiance(L)에 대응하는 온도이다[7].

$$NEDT(\lambda) = \frac{\sqrt{\frac{1}{2}\left(S_{high}^2(\lambda) + S_{low}^2(\lambda)\right)}}{\overline{T_{high}}(\lambda) - \overline{T_{low}}(\lambda)} \left(T_{high} - T_{low}\right) \quad (25)$$

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

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

T_{high}, T_{low} : 2점 흑체 설정 온도

FTIR 장비의 탐지농도 한계는 표준흑체와 챔버의 온도차이를 고정시키고 탐지가스의 농도를 변화시켜가면서 분광신호세기의 크기 변화를 측정함으로서 구할 수 있다. 가스농도 변화에 대해 신호크기를 $(c \times L \times \Delta T)$로 환산하여 그래프를 그리면 기울기는 가스의 흡수계수가 되므로 한계탐지농도는 $NECL = \frac{NEDT}{\epsilon \bullet \Delta T}$ 로 계산된다.

실제로 최소탐지 가능한 농도는 측정 오차를 고려하면 통상 한계 탐지농도(NECL)의 3배 이상으로 정의하는 것으로 보고되어 있다[1].

제작된 FTIR 시제의 설계 변수를 사용하여 NEDT를 계산한 결과 16회 데이터 평균시 1000cm-1에서 약 0.029도이고 실험적으로는 0.1도가 측정되어 보고된 바 있다[2].

현실적으로 높은 신호대 잡음비를 유지하면서 실시간 야외 탐지를 위해서는 신호처리에 소요되는 시간을 고려하여 식별하려는 가스의 분해능에 맞춘 분광분해능을 사용하고 데이터 평균횟수를 증가시키는 최적화가 필요하다.

4. 결론

수동형 FTIR의 현 기술 수준 동향을 리뷰하였고, 동작원리와 시스템 평가를 위한 지표로서 NEDT에 대한 모델링과 시스템 변수들로부터의 탐지성능 한계에 대해 고찰하였고, 2점 흑체 온도에서의 분광신호를 이용한 보정계수 측정법과 주변온도 변화에 의한 보정주기를 예측하는 방법을 논의하였다. 주변온도에 대한 간섭계 신호레벨의 변화량으로부터 보정 계수의 변화량을 모델링하여 외부 환경 온도변화에 의한 보정계수의 변화량을 수식적으로 도출하였다.

신호대 잡음비는 NEDT의 모델로부터 분광분해능은 낮을수록, 데이터 평균횟수의 제곱근에 비례하여 향상되므로, 야외에서 실시간 가스 모니터링을 위해서는 적절한 분광분해능 설정과 신호처리 시간간의 타협이 필요하다. 야외에서 검출하려는 화학가스 성분이 유기화합물인 경우는 분광선폭(Spectral Linewidth)이 넓으므로, 이에 맞게 분광 분해능을 설정하고 신호처리 시간에서 이득을 보는 것이 필요하다.

야외의 실시간 가스 모니터링을 위한 FTIR 기술은 견고한 간섭계기술, 정밀구동제어기술, 초정밀 가공기술, 고속신호 처리등 주변기술의 발달로 시스템이 구현된 기술로서 향후 응용분야는 화생방센서, 반도체공정센서, 대기환경모니터링, 기후모니터링, 노천광맥탐사, 폐기물 모니터링등 응용시장은 더욱 더 넓어질 것으로 예상된다. 향후 다양한 탑재플랫폼 및 무인 탑재체 기술이 성숙됨에 따라 이들과 체계 결합이 되면 민수 및 군수분야에서 보다 다양한 응용분야가 전개될 것으로 전망된다.

참고문헌

[1] 강원국 외, “대기오염 측정 장비 기술”, 『한국생산기술연구원 보고서』, 환경부, 1999.

[2] 김동환, 김영운, 강영일, 최명진, 박병황, 박도현, 이석구, “원거리 가스탐지를 위한 퓨리에변환 분광기의 시스템 성능지수”, 『한국군사과학기술학회 종합학술대회 발표논문(‘10)』 2010. 6.

[3] Frank L. Pedrotti, Leno S. Pedrotti, "Introduction to Optics", p.505. *Pearson,* 2008.

[4] Peter R. Griffiths, James A. de Haseth, "Fourier Transform Infrared Spectrometry", *John Wiley & Sons, New Jersey*, pp.161-162(second Ed.), 2007.

[5] Vincent Farley, et al., "Radiometric Calibration Stability of the FIRST: a Longwave Infrared Hyperspectral Imaging Sensor", *Proceedings of SPIE,* pp.6206-80(2006).

[6] Andreas Beil, Rainer Daum, etc., "Remote sensing of atmospheric pollution by passive FTIR spectrometry", *Proceedings of SPIE* vol. 3493, pp.32-43, 1998.

[7] Claes Nelsson, et al., "ScanSpec:an imaging FTIR spectrometer", *Proceedings of SPIE* vol.4029, pp.324-336, 2000.

[8] Peter R.Griffiths, James A.de Haseth, "Fourier Transform Infrared Spectroscopy", *Wiley-Interscience*, p.161, 2007