

논문

LiTaO₃ 재질 초전검출기를 사용한 이산화황 NDIR 분석기의 물리적 매개변수 영향연구

Effect of Physical Parameters on SO₂ NDIR Analyzer Using a LiTaO₃ Pyroelectric Detector

최인영, 딘브영, 김조천*

건국대학교 환경공학과

In-young Choi, Trieu-Vuong Dinh, Jo-Chun Kim*

Department of Environmental Engineering, Konkuk University, Seoul, Republic of Korea

접수일 2021년 8월 5일
수정일 2021년 8월 13일
채택일 2021년 8월 18일

Received 5 August 2021
Revised 13 August 2021
Accepted 18 August 2021

*Corresponding author
Tel : +82-(0)2-450-4009
E-mail : jckim@konkuk.ac.kr

Abstract Tele monitoring system (TMS) has been widely used to monitor air pollutants emitted from stationary sources in Korea. Sulfur dioxide (SO₂) emitted from an industrial stack can be analyzed using the NDIR technique. The amount of energy absorbed in the infrared wavelength band varies with the concentration of gas molecules. In this study, physical influencing factors were investigated including: the effect of signal detection according to the temperature of the detector, the flow rate of the gas cell, and the change of the optical path inside the gas cell. A LiTaO₃-based pyroelectric detector was applied to the NDIR analyzer. The physical parameters consisted of temperatures (35, 40, 45, 50°C), flow rates (100, 500, 1000, 2000, 5000, 10000 mL/min), and optical path lengths (5.6, 7.2, 10.4 m). As a result, when the temperature increased, the magnitude of the basic signal tended to decrease. In contrast, variations of flow rates did not show a significant effect on the detector signal. In addition, the longer optical path shown the lower signal. It was found that the signal resolution of pyroelectric detector was improved with respect to low concentrations of SO₂ (< 50 ppm).

Key words: Non-dispersive Infrared, Pyroelectric detector, LiTaO₃ detector, Sulfur dioxide

1. 서론

대기오염이 심화되는 것을 방지하기 위해서 대기 오염물질 배출량에 대한 정확한 측정 및 산정이 필요하다. 이것을 위하여 대한민국정부는 1997년부터 1, 2, 3중 사업장의 주요 굴뚝시설에 대한 굴뚝원격감시 체계 (Tele-Monitoring System, TMS) 설치를 의무화하고 있으며, 대기오염물질에 대한 실시간 배출량 측정을 시행하고 있다(Lee *et al.*, 2004). TMS는 이산화탄소(CO₂), 일산화탄소(CO), 황산화물(SO_x), 질소산화물(NO_x), 먼지(TSP), 염화수소(HCl), 불화수소

(HF), 암모니아(NH₃), 수분 등 굴뚝에서 발생하는 다양한 대기오염배출물질을 감시하는데 사용되고 있다(Dinh and Kim, 2021).

TMS에 사용되는 측정장비는 광(light)의 흡수를 이용한 분광분석기가 주로 사용되고 있으며, 지속적인 모니터링과 우수한 정확성의 이점으로 인하여 많이 사용되고 있다(Wang *et al.*, 2005). TMS 상에서 고정오염배출원의 대기오염물질을 실시간으로 측정하고 지속적인 운영을 하는 것이 중요하기 때문에 분광분석기 중 비분산적외선(Non-dispersive infrared, 이하 NDIR) 방법이 주로 사용된다(Jahnke, 2000).

NDIR 방법은 가스분자들이 가지는 고유흡광파장대역과 이에 대응하는 적외선파장을 조사하여 고유흡광파장대역의 적외선을 흡수시켜 이에 따른 감소된 적외선파장의 신호 차이를 검출하여 분석하는 방법이다(Wong and Anderson, 2012). NDIR 방법은 특정 가스에 선택성이 뛰어나고 5~10년 이상의 수명으로 유지보수에 적합한 장점을 지니고 있어 TMS 및 자동차 배기가스 분석기, 실내공간 공기질 측정 방법으로도 사용되고 있다(Frodl and Tille, 2006).

NDIR 분석기의 구조는 적외선 광원(IR source), 적외선 검출기(IR detector), 가스셀(Gas cell)로 구성되어 있으며, 각 구조의 성능에 따라 정확도, 정밀도 등의 성능지표가 좌우된다. 그중 적외선 검출기의 성능이 가장 큰 비중을 차지하고 있다. 적외선 검출기의 종류는 크게 Thermal type과 Quantum type으로 나뉘며 그중 Thermal type이 측정환경의 변화에 유연하게 적용될 수 있어 일반적으로 사용된다(Kinch, 2000). Thermal type 또한 Thermopile, Thermocouples, Pyroelectric 등의 여러 방식으로 구분되며, 이중 Pyroelectric 방식의 검출기는 범용성이 높아 상업적 이용률이 상대적으로 높다(Meléndez *et al.*, 1995). 그리고 Pyroelectric 방식에 대한 관련 연구가 최근에도 진행되고 있으며, 주로 재질 및 온도영향에 대한 내용이 주를 이룬다(Lehmkau *et al.*, 2021; Yang *et al.*, 2021).

적외선 검출기에 대한 연구는 최근까지도 광범위하게 진행되고 있으나 검출기 자체의 직접적인 영향에 대한 연구가 대부분이다. NDIR 분석기의 구성부인 가스셀과 검출기는 NDIR 분석기 구조상 근접하기 때문에 상호간의 영향이 있을 것이라 여겨지나, 기존제품들은 검출기의 온도를 유지시키며, 외부노이즈를 차단하기 위한 차폐막을 설치하여 성능을 유지시킨다. 이와 같은 이유로 NDIR 분석기의 구성부인 가스셀에 대한 간접영향 연구는 적은 편이다. 이에 본 연구에서는 NDIR 분석기의 구성부 중 가스셀의 물리적 영향(유량, 온도, 광경로 변화)이 적외선 검출기에 미치는 영향을 좀더 심도 있게 실험을 통하

여 고찰하고자 한다. 이러한 연구 결과는 NDIR 분석기를 설계 및 운용하는데 있어 기초자료로 사용될 수 있을 것이다.

2. 실험 방법

2.1 실험구성

Pyroelectric 적외선 검출기를 사용하여 NDIR 분석기의 기기구조를 구현하였으며 적외선 검출기에 가스셀이 미치는 영향을 알아보기 위한 실험구성은 다음 그림 1과 같다. 실험구성은 측정가스를 주입하는 가스셀, 신호를 검출하는 적외선 검출기, 적외선을 발생하는 광원, 신호를 구분하는 초퍼, 가스셀 내부에서 광경로의 길이를 조절하는 반사경으로 구성하였다. 가스셀은 화이트셀(White cell) 방식으로 적외선 광원에서 조사된 적외선을 가스셀 내부에 설치된 반사경을 통해 반복 반사하여 광경로를 조절할 수 있는 방식이다(White, 1942). 구성된 요소들의 설계에 따라 NDIR 분석기의 성능(정확도, 정밀도, 검출한계)은 크게 차이가 나타난다. 본 연구에서는 물리적 특징(유량, 온도)에 따른 변화도와 광경로 변경 시 발생하는 영향에 대한 연구를 수행하였다. 연구를 수행함에 있어 기본적인 NDIR 기술에 적용된 이론적 근거는 Beer-Lambert 법칙이 이용되었고 그 수식은 다음 수식 (1)과 같다(Wong and Anderson, 2012).

$$I = I_0 \times \exp(-kCL) \quad (1)$$

수식에서 제시하는 각 변수는 최종광원의 세기(I), 초기광원의 세기(I_0), 흡광계수(k), 물질의 농도(C), 광경로(L)를 나타낸다. 이는 NDIR 기술의 기초적인 변량을 나타낸 것이며, NDIR 분석기의 성능향상을 위해서는 광원의 세기 증가, 높은 흡광계수 선정 및 광경로 증가 등의 방법을 고려할 수 있다. 본 연구의 실험에 사용된 구성요소는 다음과 같다.

2.1.1 가스셀(Gas Cell)

가스셀은 그림 2와 같이 화이트셀(White cell) 구조

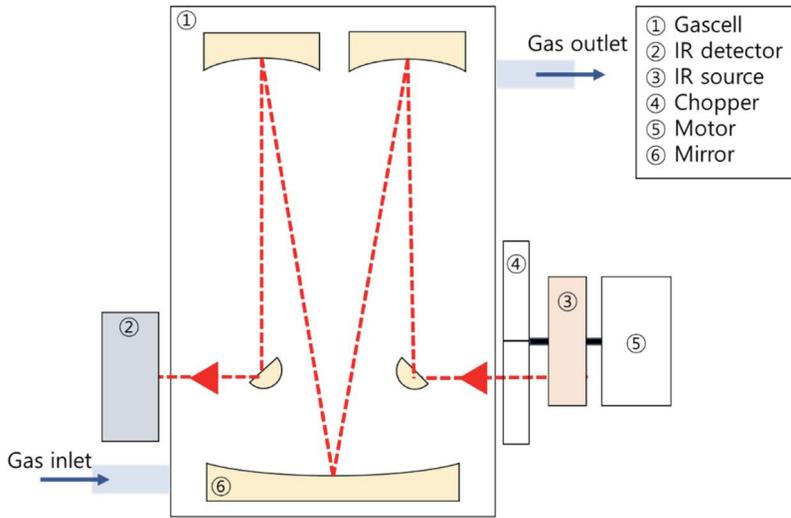


Fig. 1. NDIR experiment configuration based on white gas cell chamber.

를 적용하여, 내부 광경로를 충분히 확보할 수 있도록 제작하였다. 내부 반사경 조절을 통해 광경로의 길이를 조절 가능하도록 구성하였다. 또한 화학적 안정성 확보를 위한 테프론코팅을 가스셀 내부에 증착하였다. 적외선이 유입 및 유출되는 홀(hole)에는 가스셀을 밀폐시키고, 적외선을 투과시키는 CaF_2 재질의 Window를 설치하였다. 가스셀 내부 온도를 조절하기 위하여 열전대(Thermal couple) 센서를 사용하여 가스 유입부, 가스 유출부, 적외선 검출기의 세 요소부를 측정하였다. 가스셀 내부의 열적 평형상태를 점검하기 위하여 가스셀 가열 및 고순도 질소가스 유입을 2시간 이상 유지하여 가스셀 내부 온도의 안정성을 확인한 이후 실험을 진행하였다.

2. 1. 2 적외선 검출기(Infrared Detector)

사용된 검출기는 Thermal type의 pyroelectric 방식의 검출기를 사용하였다(LME-335, InfraTec, Germany). 이 검출기는 LiTaO_3 재질로 pyroelectric 특성이 적용되었다. 이 검출기의 재질은 상대적으로 높은 감도를 가지고 있고, 신호분석에 유리한 S/N비(Signal-to-Noise ratio)를 가지고 있다. 검출기 홀(hole)에는 중심파장대역 $7.30 \mu\text{m}$ 밴드패스 필터를 사용하여 다

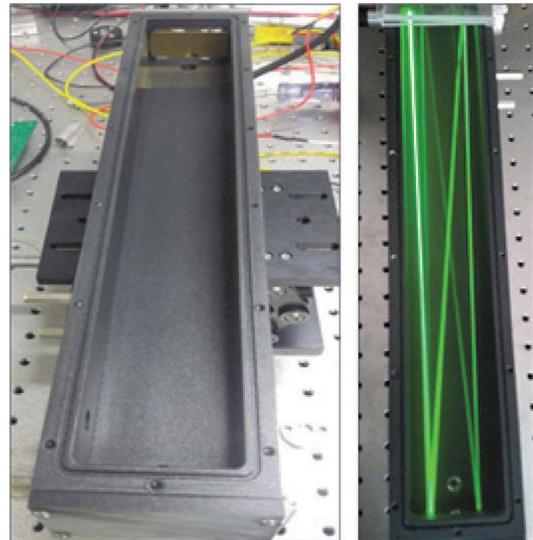


Fig. 2. Inside view of a gas cell with white cell pathway.

른 간섭을 줄이고 SO_2 가스 측정이 가능하도록 하였다.

2. 1. 3 적외선 광원(Infrared Source)

적외선 광원은 약 $1,150^\circ\text{C}$ 에서 안정적인 상태가 유지되는 Silicon Nitride 재질의 제품을 사용하였다

(IR-Si253, Hawkeye tech, USA). 이 제품에는 CaF₂ 재질의 윈도우를 장착하여 0.15~9.0 μm 파장대역의 적외선을 조사할 수 있다.

2. 1. 4 초퍼(Chopper)

적외선 검출기 LME-335 모델의 신호 검출이 가능하도록 10개의 홀이 있는 초퍼를 제작하였다. Steady motor를 사용하여 일정한 속도로 회전하여 신호적 차이를 주었으며 10 Hz의 검출기 최적신호응답성과 최적 S/N비(Signal-to-Noise ratio)를 유지하도록 하였다.

2. 1. 5 반사경(Reflection Mirror)

가스셀 내부에 장착되어 광경로를 조정할 수 있는 미러는 반사율이 적고 반사율이 높은 금재질을 기반으로 제작하여 반사중 광손실을 최소화하였다(Parante and Pepe, 2019). 그리고 내부 광경로를 반사각도에 따라 5.6, 7.2, 10.4 m로 조절할 수 있도록 구성하였다.

2. 2 실험방법

상기 실험구성을 설정하여 NDIR 측정장치의 물리적 영향인자 실험을 진행하였으며 그 조건들은 다음 표 1과 같다. 그리고 신호 감소율을 비교하기 위해 질소(N₂) 가스를 주입한 신호 측정값을 배경 값으로 설정하였다.

2. 2. 1 유량변화에 따른 적외선 검출기 영향 실험

가스셀로 유입되는 유량변화에 따른 적외선 검출기의 검출신호 변화를 연구하였다. Wang *et al.* (2021)과 Zhu *et al.* (2012)는 적외선 검출기에 직접적인 유량 변화가 있을 때 측정 정확도에 영향이 있다고 보고하였다. 이에 본 연구에서는 적외선 검출기에 직접 미치는 유량의 변화가 아닌 구분된 가스셀 내부의 유량 변화로 간접적인 유량의 변화가 적외선 검출기에 미치는 영향에 대한 실험을 수행하였다. 유량의 변화는 저유량(0.1 L/min)에서 고유량(10 L/min)까지 표

Table 1. Physical factors and experimental conditions for infrared detector tests.

Parameter	Unit	Value
Air flow rate	L/min	0.1, 0.5, 1.0, 2.0, 5.0, 10.0
Gas cell path length	m	5.6, 7.2, 10.4
Gas cell temperature	°C	40, 50, 60, 70
Detector temperature	°C	55
Chopper frequency	Hz	10
Band-pass filter (CWL)	μm	7.30 (SO ₂)
SO ₂ concentration	ppm	10, 50, 100, 200, 500, 1000

1의 유량조건으로 연구를 진행하였으며, 질량유량제어기(Mass Flow Controller, MFC)를 사용하여 가스셀 내부 압력을 일정하게 유지하며 그 내부 유량만을 조절하였다. 여기에 압력센서를 설치하여 가스셀 내부 압력을 측정하면서 그에 따른 압력변동을 확인하였다.

2. 2. 2 가스셀 온도변화에 따른 적외선 검출기 영향 실험

본 연구에서는 가스셀 온도변화에 따른 적외선 검출기의 SO₂ 가스 검출신호 영향을 체계적으로 실험하였다. 직접적인 온도 조절이 아닌 가스셀을 통한 간접적인 온도영향 실험이기는 하지만, pyroelectric 방식의 적외선 검출기의 민감도가 높기 때문에 검출기 신호에 영향이 있을 것으로 예상된다. 실험에 사용된 적외선 검출기의 권장 온도는 50°C이며 작동제한 온도는 60°C이다. 이에 온도변화에 따른 영향을 살펴보기 위하여 온도를 70°C까지 가열하여 온도영향에 대한 가스 분석 실험을 수행하였다. 가스셀의 온도변화를 위해 실리콘히터를 사용하여 가스셀의 온도를 조절하였으며, 추가적인 외부 방해인자를 차단하기 위해 단열제를 사용하였다. 온도 안정성 확보를 위해 열화상카메라를 사용하여 온도분포도를 측정하여 적합한 조건을 유지하였다. 본 연구에서는 적외선 검출기의 온도를 검출기 권장 온도(50°C)로 유지한 후 가스셀 자체의 온도변화가 적외선 검출기에 미치는 영향을 확인하는 실험을 진행하였다.

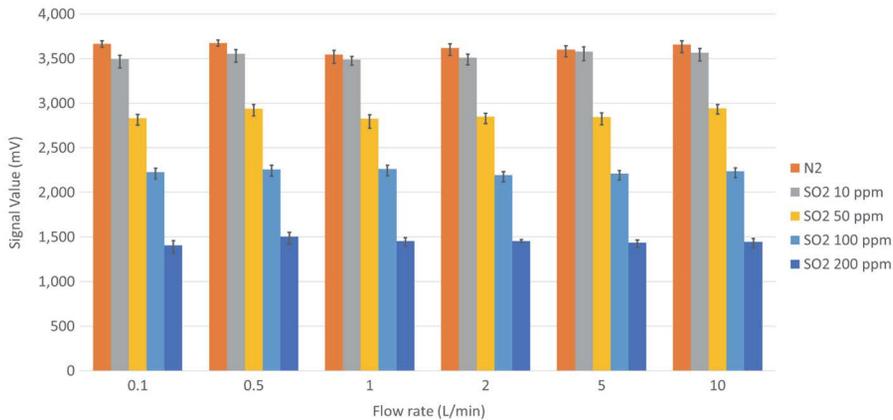


Fig. 3. Variations of infrared detector signals with respect to various flow rates.

2.2.3 광경로 길이 변화에 따른 적외선 검출기 영향 실험

NDIR 시스템에서 광경로는 전체시스템의 운영 범위에 영향을 주므로 광경로에 따른 검출신호 변화 연구가 매우 중요하다. 이에 본 연구에서는 내부 광경로를 5.6, 7.2, 10.4 m로 설정하였다. 이는 ppm 수준의 무기가스를 측정하기 위하여 본 실험에 사용된 IR 광원과 적외선 검출기간의 신호수용범위에 적합하게 제작된 화이트셀(White cell)의 조정가능한 광경로 조건이다. 이를 사용하여 SO₂ 가스를 측정할 때 광경로의 길이 변화에 따른 검출기 신호 포화점을 확인하였다

3. 결과 및 고찰

본 연구에 앞서 NDIR 검출기에 간접적으로 영향을 줄 수 있는 가스셀의 조건(유량, 온도, 광경로)에 따른 검출기 신호의 영향을 조사하였다. 선행 연구 조사 결과, 특히 가스셀 온도 및 유량의 변화가 NDIR 신호에 미치는 영향에 대한 연구는 상당히 미비한 것으로 나타났다. 이러한 연구를 위하여 여기에서는 상대적으로 높은 감도를 가지고 있는 LiTaO₃ 재질로 제작된 적외선 검출기가 사용되었다(Batra *et al.*, 2009; Kovář *et al.*, 1994). 사용된 적외선 검출기(LME-335)

의 물리적 영향에 대한 정도파악을 정확하게 하기 위하여 최적 신호 응답성과 최적 S/N(Signal-to-Noise ratio)비에 맞춰 10 Hz로 NDIR 검출기 신호분석을 수행하였다(Feng and Xu, 1999).

3.1 유량변화가 적외선 검출기 신호에 미치는 영향

MFC를 사용하여 일정한 유량의 SO₂ 가스를 가스셀로 주입하였으며, 내부압력은 1013.0±2 hPa로 유지하였다. 그림 3과 같이 유량변화에 따른 SO₂ 농도 신호 변화가 나타남을 알 수 있었다. 질소가스를 사용한 배경 값을 기준으로 각 농도별 신호 감소율은 모든 유량에서 10 ppm SO₂는 5% 이내의 검출기 신호 감소율을 보였으며, 50 ppm은 20%, 100 ppm은 35~40% 그리고 200 ppm의 경우 60%의 감소율을 보였다. 그러나 Wang *et al.* (2021)의 실험결과에서는 권장 유량보다 적은 유량 조건에서는 유속측정이 불안정해짐과 동시에 상대 정확도 오차가 크게 발생하였으며, Zhu *et al.* (2012)은 가스셀 내부의 유량이 기준유량에 비하여 2배 증가하였을 때 간섭영향이 유의미하였다는 것을 보고한 바 있다. Jahnke (2000)와 Wong and Anderson (2012)의 연구에서는 직접적인 유량의 변화로 인해 압력이 변동되어 적외선 검출기에 간섭영향을 미친다는 결과를 발표한 바 있다. 그

러나 본 연구에서는 유입 가스의 유량이 1 L/min의 10배 적거나 많을 때에도 각 신호의 오차율이 1.0% 이내로 나타났다. 이를 확인하기 위해 각 유량에 대한 유의성 검정을 50 ppm SO₂의 분산분석 결과를 사용하여 다중범위 검정을 실시하였으며, 그 결과는 그림 4와 같다. 여기에서 각 Col_1, Col_2, Col_3, Col_4, Col_5, Col_6은 유량 0.1, 0.5, 1, 2, 5, 10 L/min을 나타낸다. ANOVA 테스트를 통하여 P-value가 0.05보다 크기 때문에 95% 신뢰 수준에서 통계적으로 유의한 차이가 없음을 알 수 있었다. 즉 통계적 처리를 통한 검출신호의 동일성을 확인하였고, 피셔의 최소유의차 검정을 통하여 표 2와 같이 각 그룹(유량별) 간 동질 그룹으로 추측되는 그룹은 X로 표기하였다.

결과적으로 유량변화에 따른 검출 신호의 차이는 미미하였으며, 검출신호의 동일성을 통계적으로 검증한 결과, NDIR 시스템에서 유량변화에 따른 검출 신호 특성 변화는 거의 없는 것으로 확인되었다.

3.2 가스셀 온도변화가 적외선 검출기 신호에 미치는 영향

기존 적외선 검출기의 온도변화 영향 연구들은 검출기 자체의 온도를 조절하여 실험을 진행한 바 있다 (Zhao *et al.*, 2021; Kinch, 2000; Yi, 2017; Hossain and Rashid, 1991; Roundy and Byer, 1973). 그러나 본 연구에서는 검출기의 온도를 일정하게 유지하면서 외부 열원인 가스셀 온도변화가 검출기 신호에 끼치는 영향요소를 확인하고자 하였다. 이러한 가스셀 온도변화에 따른 SO₂의 검출신호 (Detection signal)는 그림 5와 같다. 결과값은 가스셀을 통과한 광 에너지가 검출기 (Detector)에 열적 변화를 줌으로써 발생한 미세 전류 (V)값을 컨버터를 통해 일련의 신호처리를 한 결과값이다. 일반적으로 가스셀 온도가 상승할 때 검출신호의 크기가 감소하는 경향이 나타났다. 40°C 조건에서의 검출신호를 기준으로 했을 때 50°C에서 약 3~15% 감소현상이 나타났으며, 60°C와 70°C에서 40°C 신호 대비 각각 9~25%, 13~37% 감소현상이 나

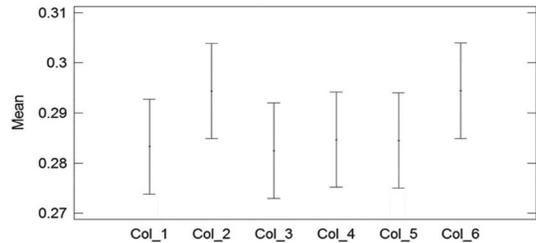


Fig. 4. ANOVA test results for various flow rates experiments at 50 ppm SO₂.

Table 2. Results of Fisher's least significant difference test for means of detector signals with respect to various flow rates.

Column	Count	Mean	Homogeneous group
Col_1	3	0.283278	X
Col_2	3	0.294380	X
Col_3	3	0.282485	X
Col_4	3	0.284685	X
Col_5	3	0.284519	X
Col_6	3	0.294416	X

타났다. 결과적으로 가스셀 내부 온도가 상승함에 따라 검출신호 감소율이 높아지는 경향이 나타났다. 각 농도별 신호에 대해서도 비슷한 경향을 보였으나, 특히 1,000 ppm SO₂ 농도에서만 온도가 변하여도 비슷한 신호 값이 나타났다. 이는 고농도의 SO₂가 IR 흡수파장을 모두 흡수하여 적외선 검출기가 반응하지 않고 일반 노이즈 (Noise) 값만 출력됨을 시사하고 있다 (Wong and Anderson, 2012).

가스셀 온도변화에 따른 검출신호에 대한 통계적인 경향을 보기 위해, 상관분석을 실시하였으며 도출된 결과는 표 3과 같다. 상관계수는 농도별 각 -0.997, -0.992, -0.999, -0.992, -0.978, -0.998, 0.631로 1,000 ppm을 제외하고 가열온도 증가에 따른 신호의 변화가 음의 상관관계로서 높게 작용한다는 것을 알 수 있었다. Zhao *et al.* (2021)의 적외선 검출기에 대한 온도 영향 실험에서는 온도가 상승할 때 신호의 크기도 같이 증가하는 경향을 보였다.

Zhao *et al.* (2021)의 실험은 -10~40°C 범위로 진

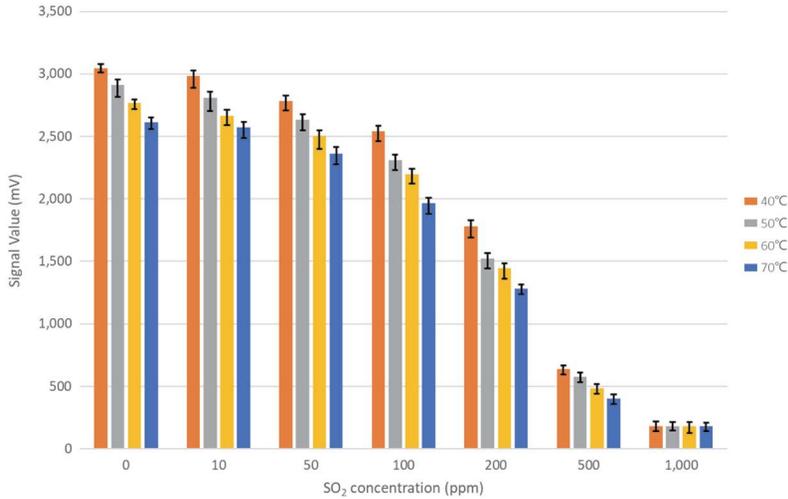


Fig. 5. Variations of infrared detector signals with respect to various gas cell temperatures.

Table 3. Correlation analysis with respect to SO₂ infrared detector signal and gas cell temperature.

SO ₂ concentration	Pearson correlation (r)	Significance level (P)
N ₂	-0.997**	0.003
10 ppm	-0.992**	0.008
50 ppm	-0.999**	0.001
100 ppm	-0.992**	0.008
200 ppm	-0.978*	0.022
500 ppm	-0.998**	0.002
1,000 ppm	0.631	0.369

** : Correlation is significant at the 0.01 level

* : Correlation is significant at the 0.05 level

행하여 본 연구의 실험 온도 범위인 40~70°C 범위에 비해 낮은 온도이지만 상관관계에서 반대의 결과가 나타났다. 그러나 해당 결과를 좀 더 고찰하면 온도가 상승할 때 offset의 신호 증가율이 상대적으로 크기 때문에 본 실험과 같은 음의 상관관계가 나타났음을 알 수 있다. Yi (2017)의 실험에서도 -20~60°C 구간에 대한 온도영향 실험결과 검출신호의 크기가 증가하는 결과가 나타났다. 이와 같이 Thermal type의 적외선 검출기는 주변온도가 상승하면 검출신호가 증가하는 경향을 보이므로 온도변화에 따른 검출신호 보정을 고려해야 할 것이다.

3.3 광경로 길이 변화가 적외선 검출기 신호에 미치는 영향

광경로는 특정파장을 측정하는 NDIR의 특성상 포화되는 신호포화 현상이 발생할 수 있으므로 적합한 광경로를 설정하는 것이 매우 중요하다(Akram *et al.*, 2020; Hodgkinson *et al.*, 2013; Wong and Schell, 2011). 광경로 변화에 따른 SO₂에 대한 적외선 검출기의 결과값은 그림 6과 같다. 즉 광경로의 길이가 짧은 5.6, 7.2, 10.4 m 순으로 적외선 검출기의 세기가 강하게 나타나는 것을 확인하였다. 화이트셀(White cell) 구조의 가스셀 내부의 반사경으로 인하여 적외선이 반복적으로 반사되며 그림 6의 결과와 같이 광경로가 길어짐에 따라 적외선 검출기에 감지되는 신호세기는 상대적으로 낮게 나타났다. 그리고 N₂ 가스 신호 대비 각 농도에 따른 신호 감소율은 그림 7과 같다. 광경로 길이 10.4 m에서 10, 50, 100, 200 ppm 순으로 농도변화가 나타났을 때 각각 14.06%, 29.61%, 40.73%, 52.64%의 신호 값 감소율을 보였으며, 7.2 m에서는 2.30%, 21.40%, 42.41%, 62.80% 그리고 5.6 m에서는 1.53%, 18.37%, 35.83%, 57.71%의 감소율이 나타났다. 저 농도에서 10.4 m 광경로가 상대적으로 높은 적외선 흡수율을 보였지만, 100 ppm 이후 7.2 m

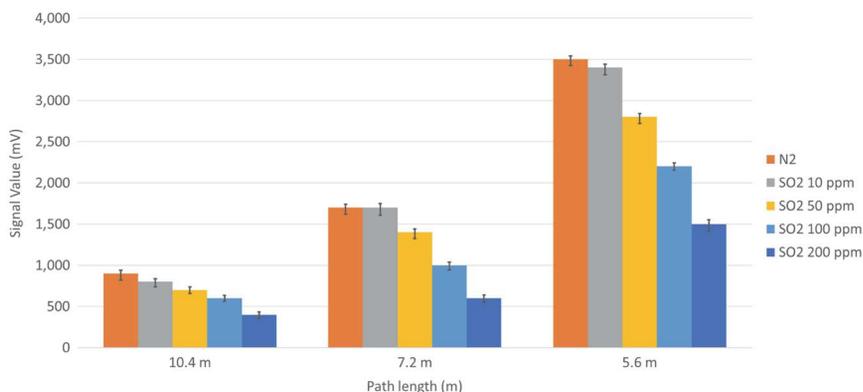


Fig. 6. Infrared detector signal change according to variations of path length and SO₂ concentration inside a gas cell.

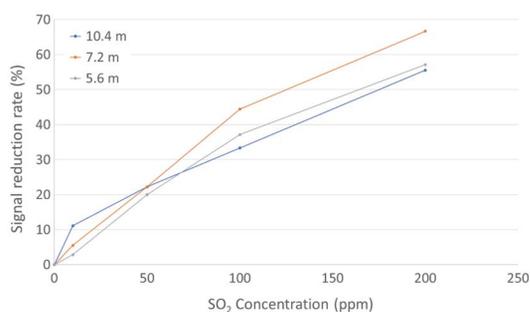


Fig. 7. Signal reduction rate by path length (Compared to N₂).

의 농도 가스를 분석하기 위해서 광경로를 길게 하여 검출 한계 값을 낮추는 것이 중요하다는 것을 암시해 주고 있다. Akram *et al.* (2020)은 광경로 길이에 따라 포화되는 가스의 농도차이를 설명하였으며, Hodgkinson *et al.* (2013) 또한 가스 성상과 농도에 따라 포화되는 결과값이 다르므로 다양한 실험을 통한 경로 설정이 중요하다고 언급하였다. 따라서 광경로가 길 경우 상대적으로 고농도의 가스에서는 흡수율이 낮아지는 경향을 보였기 때문에 분석 가스의 농도 범위에 따른 NDIR 광경로 설계가 필요함을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 NDIR 시스템 구성 중 가스셀의 물

리적 영향(유량, 온도)이 pyroelectric 방식을 사용한 LiTaO₃ 적외선검출기의 검출신호에 미치는 영향을 연구하였다. 그 결과 NDIR에서 가스 유입유량의 변화에 따른 검출신호 변화는 거의 나타나지 않음을 알 수 있었다. 유량변화로 인한 내부 압력 변화로 인해 발생하는 신호차이 수준을 제외하면 유량의 변화로 인한 검출신호 영향은 거의 나타나지 않았다. 즉 본 연구의 유량범위에서는 압력만이 검출신호에 영향을 주었다.

한편 가스셀 온도를 높이면 검출신호는 낮아지는 경향을 확인하였다. 40°C 조건에서의 검출신호를 기준으로 했을 때 50°C에서 약 3~15% 감소현상이 나타났으며, 60°C와 70°C에서 40°C 신호 대비 각각 9~25%, 13~37% 정도의 감소현상이 나타났다. 이는 Thermal type의 적외선 검출기의 경우 미세한 열에도 영향을 받아 신호변화가 일어나기 때문이다. 그리고 설정된 광경로에 대한 검출신호 변화는 상대적으로 적외선 흡수율이 큰 SO₂ 가스만을 기준으로 얻어진 결과로 실제 측정 환경에서는 배출가스의 종류에 따라 적외선 흡수정도가 각각 다르므로 광경로에 대한 추가적인 실험이 필요하다.

본 실험을 통해 Thermal type의 적외선 검출기를 적합한 조건에서 사용하는 것이 중요함을 알 수 있었다. 이를 요약하면 다음과 같다.

첫째, 유량의 변화는 큰 영향을 주지 않으나 압력

변화에 따른 영향이 있으므로 유량이 변화하더라도 가스셀 내부의 압력은 일정하게 유지하는 것이 좋다.

둘째, 검출기 주변의 열적 안정성을 충분히 고려해야 한다. Thermal type의 적외선 검출기는 미세한 열 원에도 반응하여 영향을 받기 때문에 검출신호에 대한 안정성 유지를 위해서는 실제 가동 환경에서 가용 가능한 온도를 유지해주는 것이 도움을 줄 수 있다.

결과적으로 가스셀의 물리적 영향은 Thermal type의 적외선 검출기에 영향을 미치기 때문에 안정적인 NDIR 신호를 얻기 위해서는 가스셀의 물리적 안정 및 유지가 중요하다.

감사의 글

본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 대기환경 관리기술 사업화 연계 기술개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다(RE202103429).

References

- Akram, M.-M., Nikfarjam, A., Hajghassem, H., Ramezannezhad, M., Iraj, M. (2020) Low Cost and Miniaturized NDIR System for CO₂ Detection Applications, *Sensor Review*, 40(6), 637-646. <https://doi.org/10.1108/SR-06-2019-0140>
- Batra, A.-K., Corda, J., Guggilla, P., Aggarwal, M.-D., Edwards, M.-E. (2009) Dielectric and Pyroelectric Properties of LiTaO₃:P (VDF-TrFE) Composite Films, *Organic Photonic Materials and Devices XI*, 7213(721313), 1-9. <https://doi.org/10.1117/12.807948>
- Dinh, T.-V., Kim, J.-C. (2021) Moisture Removal Techniques for a Continuous Emission Monitoring System: A Review, *Atmosphere*, 12(1). <https://doi.org/10.3390/atmos12010061>
- Feng, C., Xu, P. (1999) The Detection Mechanism of LiTaO₃ Type II Pyroelectric Detectors, *Infrared Physics & Technology*, 40(2), 61-70. [https://doi.org/10.1016/s1350-4495\(98\)00042-5](https://doi.org/10.1016/s1350-4495(98)00042-5)
- Frodl, R., Tille, T. (2006) A High-Precision NDIR CO₂ Gas Sensor for Automotive Applications, *IEEE Sensors Journal*, 6(6), 1697-1704. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2006.884440>
- Hodgkinson, J., Smith, R., Ho, W.-O., Saffell, J.-R., Tatam, R.-P. (2013) Non-Dispersive Infra-Red (NDIR) Measurement of Carbon Dioxide at 4.2 Mm in a Compact and Optically Efficient Sensor, *Sensors and Actuators, B: Chemical*, 186, 580-588. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2013.06.006>
- Hossain, A., Rashid, M.-H. (1991) Pyroelectric Detectors and Their Applications, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 27(5), 824-829. <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=90335>
- Jahnke, J.A. (2000) *Continuous Emission Monitoring*, 2nd Ed., Wiley & Sons, Inc., New York, U.S.A., 1-10.
- Kinch, M.-A. (2000) Fundamental Physics of Infrared Detector Materials, *Journal of Electronic Materials*, 29(6), 809-817. <https://doi.org/10.1007/s11664-000-0229-7>
- Kovář, M., Dvořák, L., Černý, S. (1994) Application of Pyroelectric Properties of LiTaO₃ Single Crystal to Microcalorimetric Measurement of the Heat of Adsorption, *Applied Surface Science*, 74(1), 51-59. [https://doi.org/10.1016/0169-4332\(94\)90099-X](https://doi.org/10.1016/0169-4332(94)90099-X)
- Lee, H.-G., Kim, H.-R., Kim, H.-R., Lee, G.-W., Lee, G.-H., Lee, G.-W. (2004) Status of Pollutants Through Smoke Stack Tele-Monitoring System, *Proceeding of the 38th Meeting of KOSAE, Seosan, Korea*, 89-90. <https://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE00567288>
- Lehmkau, R., Lienig, J. (2021) A Novel Approach to Model the Thermal-Electrical Behavior of Pyroelectric Infrared Sensors, *Proceeding of the SMSI 2021- Sensor and Measurement Science International Conference, Nuremberg, Digital Conference*, 177-178. <https://doi.org/10.5162/SMSI2021/C1.3>
- Meléndez, J., Castro, A.-J., López, F., Meneses, J. (1995) Spectrally Selective Gas Cell for Electrooptical Infrared Compact Multigas Sensor, *Sensors and Actuators, A: Physical*, 46-47, 417-421. [https://doi.org/10.1016/0924-4247\(94\)00933-9](https://doi.org/10.1016/0924-4247(94)00933-9)
- Parente, C., Pepe, M. (2019) Benefit of the integration of visible and thermal infrared images for the survey and energy efficiency analysis in the construction field, *Journal of Applied Engineering Sciences*, 17(4), 571-578. <https://doi.org/10.5937/jaes17-22080>
- Roundy, C.-B., Byer, R.-L. (1973) Sensitive LiTaO₃ Pyroelectric Detector, *Journal of Applied Physics*, 44(2), 929-931. <https://doi.org/10.1063/1.1662294>
- Wang, G., Qian, C., Yang, G., Nan, L., Yu, H. (2021) Verification of PEMS Measurement Accuracy Based on Light Vehi-

- cle Emission Test System, 6th International Symposium on Vehicle Emission Supervision and Environment Protection, E3S Web of Conferences, 268 (01003). <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202126801003>
- Wang, Y., Nakayama, M., Yagi, M., Nishikawa, M., Fukunaga, M., Watanabe, K. (2005) A NDIR CO₂ Monitor with Smart Interface for Global Networking, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 54(4), 1634-1639. <https://doi.org/10.1109/imtc.2004.1351278>
- White, J.-U. (1942) Long Optical Paths of Large Aperture, Journal of the Optical Society of America, 32(5), 285-288. <https://doi.org/10.1364/JOSA.32.000285>
- Wong, J.-Y., Anderson, R.-L. (2012) Non-Dispersive Infrared Gas Measurement, International Frequency Sensor Association Publishing, Barcelona, Spain, 21-22.
- Wong, J.-Y., Schell, M. (2011) Zero Drift NDIR Gas Sensors, Sensor Review, 31(1), 70-77. <https://doi.org/10.1108/02602281111099116>
- Yang, R., Li, J., Wang, Y., Liu, Y., Du, X., Li, W. (2021) Pyroelectric Polyvinylidene Fluoride Film Prepared by a Novel Combining Method and Its Application in Fully Flexible Infrared Detector, Infrared Physics and Technology, 113. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2020.103624>
- Yi, S.-H. (2017) Temperature Compensation Methods of Non-dispersive Infrared CO₂ Gas Sensor with Dual Ellipsoidal Optical Waveguide, Sensors and Materials, 29(3), 243-252. <https://doi.org/10.18494/SAM.2017.1439>
- Zhao, J., Zhu, R., Chen, J., Zhang, M., Feng, P., Jiao, J., Wang, X., Luo, H. (2021) Enhanced Temperature Stability of Compensated Pyroelectric Infrared Detector Based on Mn: PMN-PT Single Crystals, Sensors and Actuators, A: Physical, 327. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2021.112757>
- Zhu, Z., Xu, Y., Jiang, B. (2012) A One Ppm NDIR Methane Gas Sensor with Single Frequency Filter Denoising Algorithm, Sensors, 12(9), 12729-12740. <https://doi.org/10.3390/s120912729>

Authors Information

최인영 (건국대학교 환경공학과 박사과정)

딘브영 (건국대학교 환경공학과 조교수)

김조천 (건국대학교 환경공학과 교수)