

## 재난상황 대응을 위한 유해가스 측정기 개발연구

심재웅 화재안전연구소 수석연구원

### | 들어가며

전 세계적으로 사용되고 있는 상업용 화학물질은 1,500만 종 이상으로 알려져 있다. 이들 중 약 7만여 종 이상의 화학물질이 우리 생활에 밀접하게 사용되고 있으며, 매년 1t 이상 생산되고 있는 화학물질은 1,000여 종에 달한다. 우리나라에서 산업공정에 사용 및 유통되는 화학물질의 수가 약 4만여 종에 달하는 등 현대사회 산업발전에서 차지하는 화학물질의 중요도와 범위는 상당하다고 볼 수 있다. 하지만 화학물질 생산과 사용이 증가함에 따라 경제적 손실을 초래하는 화학사고의 발생빈도와 피해규모 또한 지속적으로 증가하고 있다. 특히 우리나라에서 발생한 2012년 구미 불산사고로 인하여 화학사고가 지니는 위험성에 대해 각인되었으며 화학사고에 대한 안전대책을 다시 돌아보는 계기가 되었다. 이후에도 각종 화학사고가 발생하면서 화학물질을 철저하게 등록 및 관리 하여 피해를 방지하기 위하여 2015년부터 화평법(화학물질의 등록 및 평가 등에 관한 법률)과 화관법(화학물질관리법)이 시행됨으로써 유해화학물질에 대한 안전을 근본적으로 관리하고자 하였다.

유해화학물질 안전관리에 대한 대응 체계에 맞춰서 우리나라의 화학물질 사고를 저감하기 위해 2014년부터 출연(연)간 공동 융합시범과제가 시행되었으며 14개 기관이 참여, 245억 원의 연구지원으로 '화학물질사고 예방, 감시 대응기술 개발' 연구를 수행한 바 있다. 당시 산업공정에서 발생 가능한 유해가스 및 휘발성 유기화합물에 대하여 원거리에서 실시간으로 모니터링이 가능한 기술을 통해 화학적 사고발생을 예방하고자 하는 연구가 시작되었다. 이후 다부처 연구 과제를 통해 소형·경량화 유해화학 측정 센서를 무인기에 장착하여 원거리 가스 모니터링 기술 개발연구가 수행되었다. 해당 연구에 대한 주요 내용은 화학적 가스누출 등 재난이 발생한 곳에 신속하게 도착하여 실시간으로 누출 가스를 측정 및 분석하여 재난상황에 대응하고 안전지역을 확보하는 것이다.

### | 국내외 정책 및 기술 동향

#### · 국내외 현황 및 정책

화학물질 사고는 유형별로 화재, 폭발, 질식 등 단일유형으로 나타나기도 하지만, 각 유형들의 복합적 사고발생이 많이 나타난다. 특히 화재가 전체의 43%, 누출 23%, 폭발 19%로 전체 유형의 상위

3가지로 85%를 차지하고 있다. 화재나 누출과 같은 사고의 경우 울산, 여수, 경기 지역 등 석유화학단지나 공단 등 대규모 산업단지가 위치한 지역에서 다수 발생한 보고가 있다. 화학물질을 취급하는 사업장, 보유자들의 취급 부주의, 안전의식 부재 등으로 인한 사고가 일반적으로 보고되고 있으며, 현재 화학물질로 인한 사고예방과 대응체계와 관련된 내용은 화학물질관리법에 구체적으로 명시되어 있다.

국외의 경우 유해가스 배출 관리 정책을 통해 대부분의 산업공정은 다양한 설비로 구성되어 부분적 손상으로 인한 기체/액체 형태의 화학물질 외부 누출 가능성을 방지하여 화학적 재난을 최소화하고자 각국에서는 산업공정에서 정기적 누출검사와, 즉각적 수리를 규정하고 있다. Leak Detection and Repair(LDAR : 배출탐지기술)는 산업공정 중 발생하는 위험성 배출을 방지하기 위한 프로그램으로 이를 통해 산업체의 화재 및 폭발 방지, 근로자 보호 등의 효과를 보고 있다. 미국의 경우 EPA를 중심으로, FDA, DOE, USDA, NIH, NIEHS 등의 국가기관들이 연계하여 신중 유해화학물질 모니터링 및 노출관리 관련 정책을 마련하고 있다. 유럽의 경우 환경기술관련 연구 대부분이 Framework Programme에서 수행하고 있고, 오염자부담원칙과 사전오염예방원칙에 근거한 신화학물질 정책인 REACH(Registration, Evaluation, Authorization and Restriction of Chemicals)를 마련하여 2007년 6월부터 법안을 시행하고 있다.

#### · 국내외 기술동향

국내외 가스 형태의 화학(대기)물질(환경규제물질)을 진단 및 측정하는 기술은 지속적으로 발전하고 있다. 앞서 언급된 LDAR은 적외선(IR) 탐지와 같은 광학 이미지 시스템을 적용하며, 광범위한 지역의 배출상태를 신속히 확인하는 데 유용하다. 광학 영상화 기술이 도입되어 화학물질 누출을 관리하는 데 활용하며 무선전송기술, Taglee LDAR, 상대위치정보시스템(RPS) 등과 같은 기술이 접목된 새로운 측정기술이 지속적으로 개발 및 활용되고 있다. 광학 기술 중 대중적으로 보급화 된 적외선영역 기술은 누출, 배출되는 가스의 적외선 흡수를 통해 특정 파장을 분석함에 따라 IR 모니터에 표시하거나, 카메라처럼 영상으로 확인할 수 있도록 개발된 바 있다. 현재까지 대기 중 가스 측정에서 일반적으로 사용되는 대기오염

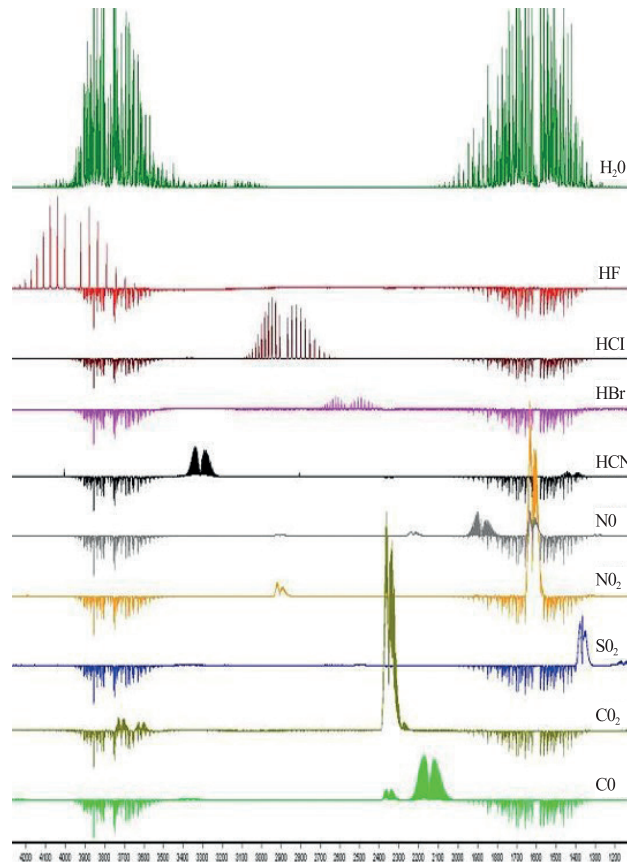


그림 1 IR spectrum of gases

측정기들은 대부분 기계 내부의 소형 펌프를 이용하여 공기샘플을 측정기 내부로 흡입한 후 설치지점의 오염농도를 측정하는 지점 모니터링(point monitoring) 방식을 사용하며, 최근 몇 년 사이 광투과 방식을 이용한 원격측정장치인 DOAS(Differential Optical Absorption Spectrometer), FTIR(Fourier Transform Infrared Spectrometer) 등의 첨단 환경계측기들이 개발되어 보급되고 있는 추세이다.

#### | 적외선 분광분석

적외선 분광분석이란 적외선 영역의 스펙트럼인 약  $12,800\text{cm}^{-1}$  내지  $10\text{cm}^{-1}$  범위의 주파수 또는  $0.78\mu\text{m}$  내지  $1,000\mu\text{m}$  파장을 갖는 복사선을 이용하여 정성 및 정량 분석에 널리 응용되고 있다. 적외선에 노출된 분자는 분자의 진동이나 회전운동으로 인한 에너지의 변화를

일으킨다.  $\text{O}_2$ ,  $\text{N}_2$  또는  $\text{Cl}_2$ 와 같은 동핵 화학종의 진동이나 회전에서는 쌍극자모멘트의 알짜변화(net change)가 일어나지 않는다. 이러한 몇 가지 종류의 화합물을 제외하고는 모든 분자화학종은 독특한 적외선 흡수스펙트럼(그림 1)의 특징을 나타내기 때문에 특정 화합물의 정성 및 정량에 효과적으로 활용되며, 대기오염물질의 분석에 많이 활용된다. 액체와 고체에서는 분자의 회전이 크게 제한되어 불연속적인 진동선 및 회전선들은 안 보이고, 분자 간의 충돌과 상호작용 때문에 넓게 퍼진 봉우리들이 나타난다. 그러나 기체상태에서는 몇 개의 회전에너지 상태가 존재하므로 적외선 스펙트럼은 일련의 밀집된 선들로 구성되며 명확하고 sharp한 peak을 가지게 된다. 그림 1은 표준가스를 사용하여 적외선 분광분석기로 분석한 화학종의 고유 흡수스펙트럼을 나타낸다.

**| 유해화학물질 선정 및 DB 구축**

유해화학물질로 선정할 수 있는 다양한 가스 중 산업에서 많이 사용되고 있는 가스 10종과 CO, CO<sub>2</sub>를 포함한 총 12종(질산, 암모니아, 염화수소, 황산, 톨루엔, 불화수소, 아크릴로니트릴, 황화수소, 벤젠, 메틸에틸케톤)을 선정하였다. 대기 중에서 가스를 측정하기 위해서는 기존에 보유한 데이터를 바탕으로 정량 및 정성분석을 수행하게 된다. 따라서 선정된 가스의 표준 가스들을 이용하여 연구 중 개발한 챔버(ZnSe window chamber)에 표준가스를 주입하여 농도에 따른 검량선을 작성하였다(그림 2). 해당 검량선을 바탕으로 가스의 정량·정성 분석을 할 수 있는 DB를 구축하였다.

**| 유해가스 측정기 개발연구**

유해가스 측정기 개발을 위하여 NDIR 방식을 적용하여 개발 연구를 진행하였다. NDIR 측정방식은 광학식 센서(Pyroelectric sensor)를 이용하여 가스분자의 광 흡수도를 측정하여 농도로 환산하는 방식인 비분산적외선 방식(NDIR : Non-Dispersive Infrared)이며, 이는 선택적 가스 검출이 가능하여 측정 정확도가 높고, 센서 수명이

길어서 경제성 또한 확보할 수 있다. 연구를 통해 개발한 시작품의 경우 1kg 미만의 센서 개발이 연구목표이기 때문에 최소한의 광원과 검출기를 이용해야 하여 측정 거리는 10m로 제한하였으나, 고정식 측정 방식으로 바꾸게 되면 측정거리는 충분히 늘릴 수 있다(그림 3). 시작품으로 화학종별 가스분석을 수행한 결과 분석대상이 다중으로 존재할 경우 화학 종간 중적외선 영역에서 간섭현상이 발생하기 때문에 이를 화학종별 고유 스펙트럼으로 분리하여 확인하고자 파장별 보정인 PCA(주성분분석법) 통계법을 활용하여 보정에 따른 화학종의 정량분석 정확성을 상승시켰다. 유해가스 측정기는 다양한 디자인 변경 및 거리별 측정 연구 등 챔버를 이용하여 실내에서 연구를 수행하였고, 외부 태양 빛 간섭, 온습도 보정, 실내 비행시험 등을 통해 지속적으로 시작품의 성능을 향상시켰다. 특히 개발된 유해가스 측정기는 항온·항습시험, 방수·방진시험, 전자파 규격시험등 기본적인 환경시험을 통과하였다(그림 4). 이후 과제 내 타 기관에서 개발한 무인비행체와 유해가스 측정기의 집벌을 통해 개발 시작품을 장착하여 한국항공우주연구원 고흥비행센터에서 비행시험을 수행하였다. 실내 챔버를 이용하여

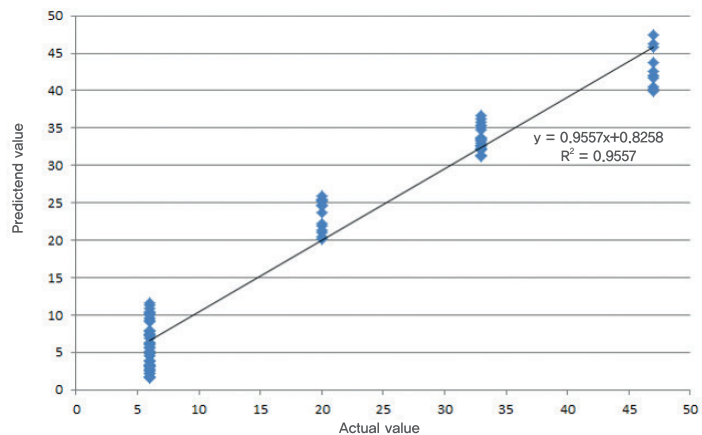
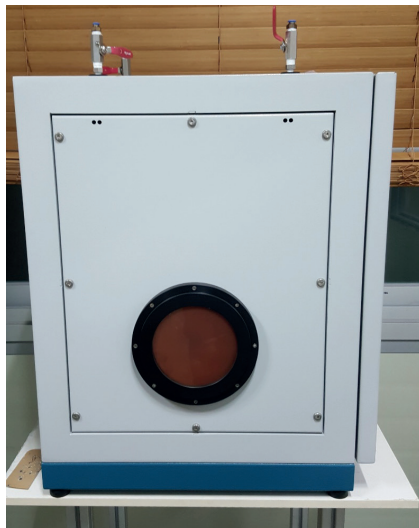


그림 2 유해가스 화학종 흡수영역 database 구축

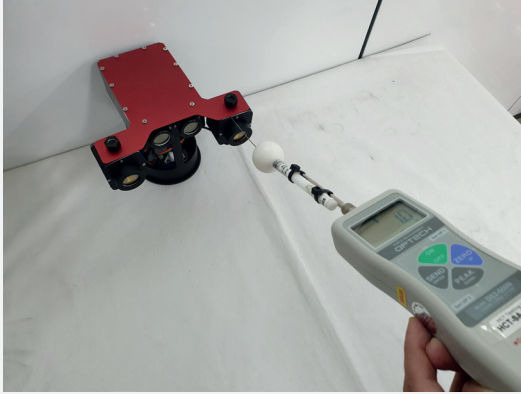


그림 3 유해가스 측정기 시작품

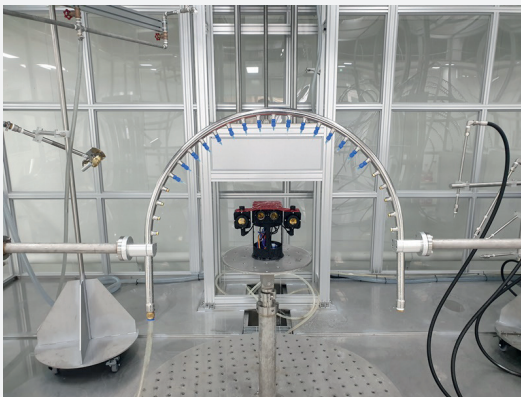


그림 4 유해가스 측정기 시작품 환경시험 장면



그림 5 유해가스 측정기 비행시험(전남 고흥)

12종의 가스를 측정 및 농도확인은 하였으나, 대기 중에 고 위험군 유해가스를 누출하기가 어려워 소형 화염에서 발생하는 CO와 CO<sub>2</sub>를 비행을 통해 가스 측정을 확인하였다(그림 5).

### | 맺음말

본 연구는 사람이 들어갈 수 없는 재난상황 중 유해가스를 파악하고 신속하게 안전지역을 확보하기 위한 목적으로 진행되었다. 특히 드론이라는 장비를 이용하여 사람이 파악하기 어려운 대규모 충전시설이나 사업장 등에 본 기술이 적극 활용 가능할 것으로 사료된다. 능동적 감시 및 관리를 통해 재난상황이 발생하지 않으면 좋겠지만, 발생하더라도 신속하게 확인 및 안전지대 확보를 통해 국민 모두에게 안전한 삶을 누릴 수 있기를 기대하는 바이다. **K**

### 참고자료

- 박정규, 서양원 (2013), "화학물질 사고대응을 위한 제도개선 연구", 한국환경정책 평가연구원 보고서.
- 박정규, 서양원, 간순영, 이선우 (2016), "화학물질관리법 내 화학사고 정책의 개선방안 및 산업계 지원방안 연구()", 한국환경정책 평가연구원 보고서.
- 서양원, 박정규, 간순영, 조상기, 한선영 (2017), "화학물질관리법 내 화학사고 정책의 개선방안 및 산업계 지원방안 연구()", 한국환경정책 평가연구원 보고서.