

# 화학오염은 탐지를 위한 접촉식 화학탐지기를 탑재한 무인기와 원거리 화학탐지기의 복합 운용개념 고찰

이명재<sup>1)</sup> · 정유진<sup>2)</sup> · 정영수<sup>1)</sup> · 이재환<sup>1)</sup> · 남현우<sup>1)</sup> · 박명규<sup>\*,1)</sup>

<sup>1)</sup> 국방과학연구소 제4기술연구본부

<sup>2)</sup> 국방과학연구소 정책기획부

## Hybrid Operational Concept with Chemical Detection UAV and Stand-off Chemical Detector for Toxic Chemical Cloud Detection

Myeongjae Lee<sup>1)</sup> · Eugene Chong<sup>2)</sup> · Young-Su Jeong<sup>1)</sup> · Jae-Hwan Lee<sup>1)</sup> ·  
Hyunwoo Nam<sup>1)</sup> · Myung-Kyu Park<sup>\*,1)</sup>

<sup>1)</sup> The 4th Research and Development Institute, Agency for Defense Development, Korea

<sup>2)</sup> Policy & Planning Directorate, Agency for Defense Development, Korea

(Received 14 April 2020 / Revised 20 May 2020 / Accepted 25 May 2020)

### Abstract

Early-detection and monitoring of toxic chemical gas cloud with chemical detector is essential for reducing the number of casualties. Conventional method for chemical detection and reconnaissance has the limitation in approaching to chemically contaminated site and prompt understanding for the situation. Stand-off detector can detect and identify the chemical gas at a long distance but it cannot know exact distance and position. Chemical detection UAV is an emerging platform for its high mobility and operation safety. In this study, we have conducted chemical gas cloud detection with the stand-off chemical detector and the chemical detection UAV. DMMP vapor was generated in the area where the cloud can be detected through the field of view(FOV) of stand-off chemical detector. Monitoring the vapor cloud with standoff detector, the chemical detection UAV moved back and forth at the area DMMP vapor being generated to detect the chemical contamination. The hybrid detection system with standoff cloud detection and point detection by chemical sensors with UAV seems to be very efficient as a new concept of chemical detection.

Key Words : UAV, Chemical Detection, CWA, Stand-off Detection

### 1. 서론

화학오염은 무색, 무취의 특성을 지닌 물질이 많

\* Corresponding author, E-mail: m.k.park@add.re.kr  
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

으므로 특정 지역에 오염운의 형태로 집중 살포되어 있더라도 이를 시각적으로 확인하기는 쉽지 않다. 따라서 언제든 테러나 대량 살상무기(Weapon of Mass Destruction, WMD)로의 은밀한 사용가능성이 존재한다<sup>[1-3]</sup>. 또한, 독성산업물질(Toxic Industrial Chemicals, TIC)은 유출사고 발생 시 유출지역의 작업자뿐만 아니라 인근 거주민에 대해 급성 및 만성적인 피해를 줄 수 있다<sup>[4]</sup>. 화학작용제 및 산업유해 화학물질로 인한 피해를 최소화하기 위해서는 화학물질의 노출 및 오염 여부를 신속하게 탐지하여, 그 피해를 최소화 하고, 지속적으로 모니터링 하는 것이 중요하다. 화학물질 존재여부의 확인은 다양한 물질별 탐지 센서의 성능과 함께 센서를 탑재하고 운용하는 탐지시스템이 큰

영향을 미친다.

화학탐지 센서에 대한 연구는 다양한 기술 분야에서 활발히 이루어져 왔다. 그러나 대기 중에 노출된 화학물질은 기체 상태로 오염운을 형성하여 기상 조건에 따라 다양한 방향으로 빠르게 확산하므로 시각적인 식별 또는 원거리에서의 정확한 위치 파악은 매우 어렵다. 따라서 오염지역을 신속하게 추적 또는 탐지하여 오염 여부를 확인하기 위해서는 센서기술 뿐 아니라 센서를 탑재하여 다양한 상황에서 화학오염 정보의 획득을 가능하게 하는 화학탐지센서 탑재 플랫폼 연구 역시 중요하며 발전하는 탐지센서 기술과 함께 최근 다양한 형태의 탐지기 운용개념 연구가 진행되고 있다<sup>[5]</sup>.

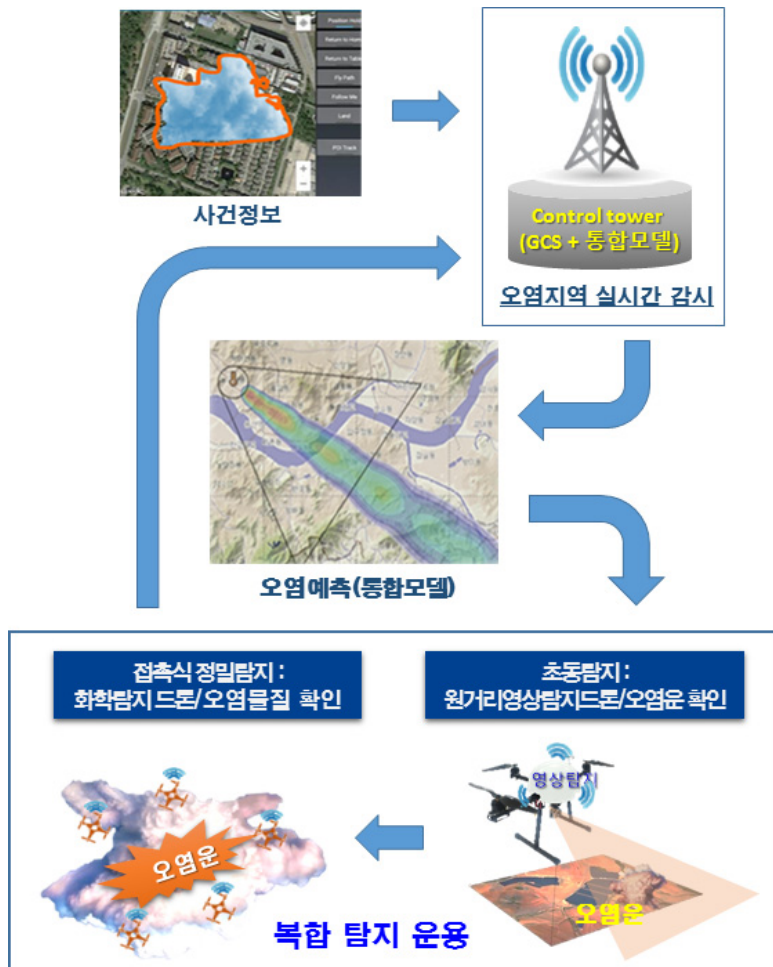


Fig. 1. Schematic diagram of hybrid operation for chemical gas cloud detection

기존의 탐지방식은 화학탐지기를 휴대한 병사가 오염지역에 침투하여 탐지정보를 수집하는 접촉식 화학탐지 방식이거나 고정 운영 방식의 원거리 탐지 방식이다. 인력이 투입되어 접촉식 화학탐지기로 탐지하는 접촉식 탐지의 경우, 위험물질의 노출에 의한 인명 손실 위험이 높고 탐지범위와 면적이 지면 2미터 이하 및 국소면적으로 국한되는 제한점이 있으며, 원거리 탐지기술로는 화학오염원의 발생 방향 정보를 획득할 수 있지만, 화학오염원의 위치에 따른 농도 확인 및 화학물질 식별에 한계가 있는 단점이 있다.

한편, 접촉식 탐지의 단점을 보완하는 화학탐지 장치로서, 무인기(Unmanned Aerial Vehicle, UAV) 플랫폼을 활용한 탐지장치의 적용연구가 활발히 진행되고 있는데<sup>5,6)</sup>, UAV에 의한 화학탐지장치는 기동성을 증가시키고 탐지의 신속성에 의하여 발생 가능한 인명피해를 최소화 할 수 있는 장점을 갖는다. 하지만 현재까지 UAV 플랫폼의 비행 시 발생하는 비행체 주위 기류의 영향이나, 야외 대기환경조건에 따른 센서의 탐지성능 변화에 대한 연구는 매우 부족한 상황이며, 실험실에서의 센서실험 결과와는 달리 대기 환경에서의 가스탐지 실험 시 자연 환경에서의 여러 가지 요인들에 의하여 센서 신호에 많은 간섭효과가 나타난다<sup>7)</sup>.

본 연구에서는, 원거리에서 상시감시가 가능한 적외선 초분광분석 방식의 원거리 화학탐지기와 접촉식 화학탐지기가 탑재된 화학탐지 UAV를 이용하여 영상탐지에 의한 특정지역의 화학오염원 존재여부를 확인한 후, 접촉식 화학탐지기를 탑재한 UAV가 해당지역에 투입되어 탐지센서에 의해 오염물질을 확인하는 화학탐지 복합 운용개념에 대한 연구를 진행하였다. 접촉식 화학탐지방식과 원거리 화학탐지방식의 장점을 활용한 복합형 운용개념으로써의 본 UAV 화학탐지기술은 Fig. 1에서 묘사한 바와 같이 화생방 보고관리 및 모델링 S/W인 화생방 통합모델(NBC-RAMS)과 연동하여 운용가능하다. 즉, 사건발생 정보가 접수되면, 화생방 오염확산 상황을 통합모델링으로 예측한 후, 원거리 화학탐지 및 접촉식 화학탐지 UAV 운용을 통해 신속하게 오염상황을 확인하는 방식으로 인명 및 물자 피해를 최소화하는 상황조치 방안이다.

**2. 원거리 탐지기술 : IR 기반 탐지기**

비접촉식 탐지기술은 주로 광학기반 기술이 적용되

는데, 적외선 분광법(Infrared spectroscopy)<sup>8)</sup>, 레이저 기반 분광법(Laser Induced Breakdown Spectroscopy, LIBS)<sup>9)</sup> 그리고 라만 분광법(Raman spectroscopy) 등이 있다<sup>10)</sup>. 이 중에서도 수 km 이상의 원거리에서도 높은 화학오염원 탐지성능이 구현되는 적외선 분광법기반 탐지기술은 높은 정확성과 소형화 가능한 장점이 있으며, LWIR(Long-Wave IR) 파장영역에서 화학물질의 식별이 가능하다는 특성을 기반으로 화학물질 탐지기술로 각광받고 있다<sup>11)</sup>.

Table 1. Specification of commercial infrared(IR) chemical detector


Model	 (HI 90, Bruker optics)
Technology	IR hyperspectral analysis
Wave length	7~12 μm (wave number : 900~1450 cm <sup>-1</sup> )
Detection Target	TICs(Toxic Industrial Chemical) and CWAs(Chemical Warfare Agent)
Weight	33 kg
Size	550 × 455 × 210 mm
Feature	Target Chemical can be added in DB

Table 1은 본 연구에서 사용한 적외선 초분광분석장치 HI 90(Bruker optics, 독일)이다. 해당 기기는 마이켈슨 간섭계와 FPA(Focal Plan Array) 방식의 적외선 탐지기로 LWIR 파장영역에 해당하는 파장 7~12 μm에서 물질의 고유 흡수 스펙트럼을 분석하여 각종 TIC와 화학작용제를 탐지 및 식별할 수 있다<sup>12,13)</sup>. 시야각 내의 각 픽셀에 대해서 각각 흡수 스펙트럼을 분석하여 탐지여부를 알려준다. 운용화면에서 화학물질을 탐지한 픽셀은 붉은 점으로 표시된다. 본 장치는

삼각대를 설치하여 지상에 고정시키며 수 m에서 수 km의 거리까지 탐지 가능하다.

신속한 기동 및 이동형 탐지를 위해서는 원거리 화학탐지기를 UAV 등의 모바일 플랫폼에 적용해야 하나 크기, 무게 및 소비전력에 의한 제약이 있어, 현재 기술로는 지상에서 고정형 또는 차량형으로만 운용 가능하다는 제한사항이 있다. 이는 탐지정보에도 영향을 주는데, 고정 및 지상 운용 시 건물 및 산에 의해 시야가 제한되고, 화학오염원의 방향은 파악할 수 있으나 거리를 측정하기 어렵다. 원거리 화학탐지기의 활용성을 높이고 이동하는 화학오염원을 실시간으로 추적하기 위해서는 UAV플랫폼에 적용하기 위한 소형화, 소비전력 감소, 광학계 안정성을 고려한 기구 설계 등 추가적인 연구가 요구된다.

### 3. 접촉식 탐지기술

접촉식 화학탐지는 대기중에 분포된 화학물질과 센서가 직접 접촉하여 탐지를 수행하는 방식으로, 본 연구에서는 탄소나노튜브(Carbon Nano Tube, CNT) 기반의 상용 정전용량 변화 검지형 센서(국내제작)를 사용하였다. CNT(Carbon Nano-tube) 센서는 소형화가 가능하고, 튼튼하고, 전기전도도가 좋으며 민감도가 높고 응답시간이 빠른 장점이 있다<sup>14)</sup>. 정전용량 변화 검지형 CNT 센서는 두 전극 사이에 채워진 화학처리된 CNT에 탐지대상물질이 흡착될 경우 전기장 및 정전용량의 변화가 생기는 원리에 착안한 센서로, 벤젠, 아세톤, DMMP(Dimethyl methylphosphonate)등 다양한 TIC를 탐지할 수 있다<sup>15,16)</sup>.

UAV 플랫폼에 대한 접촉식 화학탐지센서의 적용을 고려할 때 센서의 크기, 무게, 소비전력, 신호전송 통신거리, 성능, 및 가격 등 다양한 특징이 고려되어야 하는데, 본 연구에서 사용한 화학탐지센서는 50×30×12 mm의 작은 크기와 20 g의 가벼운 무게 및 40mAh의 매우 낮은 소비전력으로 운용이 가능하므로 UAV 플랫폼에 매우 적합하다. PPM 단위 수준의 농도까지도 빠른 반응시간으로 탐지할 수 있다는 장점이 있지만, 재탐지를 위해서는 화학오염원을 벗어나 머무르는 회복(refresh)환경이 필요하고, 고농도의 물질에 노출되거나 지속적으로 노출되었을 경우 센서의 민감도가 현저하게 줄어들어 교체해주어야 한다는 단점이 있다.

금속산화물 및 CNT 기반의 정전용량변화/저항변화

센서기술은 많은 연구가 진행 중이지만 현 기술수준으로는, 다종의 물질 중 특정 물질을 선택적으로 분석하거나 1 ppm 미만 극미량의 기체 탐지가 제한되어 물질 선택성, 감도를 향상시키기 위한 지속적 노력이 필요한 것으로 보인다<sup>17)</sup>.

본 연구에서 사용한 CNT 기반 접촉식 화학센서는 최저농도 1.98 ppm의 DMMP에 대해 탐지 가능하며, 유사한 구조의 신경작용제 역시 탐지 가능하지만 단독운용 시 각 화학물질의 식별은 제한된다. 그러나 다른 소재의 센서를 혼합운용하거나, 원거리 적외선 초분광분석 장비 등으로 식별을 돕는 경우 선택성 측면에서 보완할 수 있다.

### 4. 실험

접촉식 화학탐지센서를 탑재한 UAV와 원거리 화학영상탐지 UAV의 복합 운용성을 시험하기 위해서 특정 지역에 살포된 화학오염원에 대하여 두 장비에서 동시에 탐지되는지 여부를 확인하는 실험을 수행하였다. 본 실험에서는 오염원 영상 확인을 위하여 원거리 화학탐지기(적외선 초분광분석 장치, HI90)를 고정배치 하였고, CNT 기반 정전용량변화 센서를 Table 2의 UAV에 탑재 및 실제 화학오염원에 접촉시킴으로서 센서의 탐지신호를 수신하여 복합형 화학탐지 실험을 진행하였다. 정전용량변화 센서가 탑재된 화학탐지드론은 국방과학연구소에서 자체 제작되었다. 센서로부터 수신되는 탐지신호 자료는 탐지드론에서 수신하여 통신모듈을 통하여 지상제어시스템에 송신되고 저장되었다.

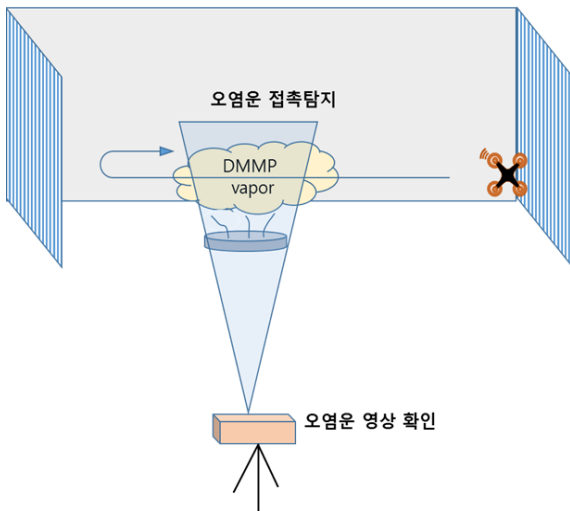
Table 2. Specification of the UAV

Type	Quadrotor (4 propellers)
Size	360 × 360 × 270 mm
Weight	1.8 kg
Diameter of prop	120 mm
Flight Controller	Pixhawk 2.1
Communication	Radio telemetry 433 Mhz / 915 Mhz
Flight time	15 min

#### 4.1 실험 구성

지표면에서 기화되는 화학오염운을 원거리 화학탐지기와 UAV에 탑재된 접촉식 화학탐지 센서를 동시에 운용하여 탐지하는 시나리오를 구현하기 위하여 Fig. 2(a)와 같이 실험을 구성하였다.

탐지 대상 오염물질은 신경작용제의 유사작용제인 DMMP(Sigma Aldrich, CAS 756-79-6)로서, 액상 DMMP를 200 °C로 가열된 핫플레이트에 에어로졸 상태로 분사하였다. 열에 의해 기화된 DMMP는 화학오염운을 형성하였는데, 이때 화학오염운에 미치는 바람의 영향을 최소화하기 위해 가로 × 세로 × 높이 약, 20 × 5 × 4 m의 바람막이 천막을 설치하였다. 실험시 환경은 기온 32 °C, 상대습도 73.5 %, 풍속 1.5 m/s 이다.



(a) Schematic diagram of experimental setup



(b) Window image through HI 90

Fig. 2. Experimental setup

DMMP 발생지점으로부터 약 30 m 떨어진 곳에 적외선 초분광분석장치를 지면으로부터 1.2 m 높이에 설치한 후 장치의 시야각 안에 DMMP 발생지점이 들어오도록 영상획득 방향을 조정하였다.

Fig. 2(b)에서 볼 수 있듯이 적외선 초분광 분석장치는 DMMP 발생지점 위 지면으로부터 1 m ~ 2 m, 너비 1 m 폭으로 시야를 확보하였다. 정전용량변화 검지형 센서는 UAV의 측면에 부착하였다. 매 실험에 앞서 2분간 화학오염운이 없는 곳에서 센서의 값을 확인하면서 안정화를 위해 대기하였다. 실험시작 후 DMMP를 발생시키고 적외선 초분광분석 장치로 확인하면서 접촉식 화학탐지 UAV를 화학오염운 방향으로 천천히 이동하였다. 이동 중 정전용량변화 검지형 센서의 탐지신호 발생 시 잠시 제자리에서 정지비행(hovering mode)을 하였다가 해당지역을 벗어나 센서를 회복시켰다.

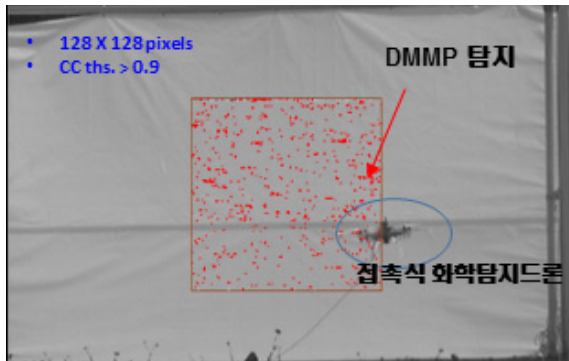
이 과정을 3회 반복하여 실험하였고 DMMP 발생은 각각 실험 시작 후 120초, 240초, 360초에 이루어졌다.

#### 4.2 복합형 화학탐지 운용개념의 실험결과

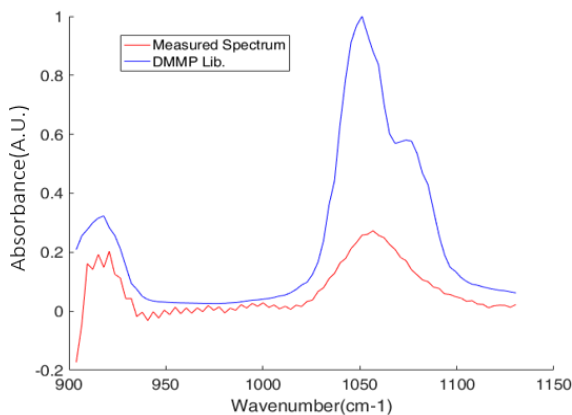
DMMP 화학오염운 탐지를 위한 복합형 화학탐지 실험 중 적외선 초분광분석 장치(HI-90)로 획득한 데이터를 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3(a)는 CCD 영상과 각 픽셀단위의 탐지결과이다. 영상 가운데에 사각형으로 표시된 영역이 시야각이다. 해당 영역에 대해서 픽셀 단위로 흡수 스펙트럼을 분석하여 저장된 라이브러리와 비교한다. 이때 저장된 라이브러리 데이터와 탐지된 흡수 스펙트럼을 비교하는 알고리즘을 통하여 탐지된 물질을 식별하고, 탐지정보를 빨간색 점과 경보음을 이용하여 표시한다.

Fig. 3(b)는 경보가 울린 픽셀에서 탐지된 화학물질의 FT-IR 스펙트럼(red)을 라이브러리(blue)와 비교하여 도식화 하였다. 이때 측정 스펙트럼은 라이브러리에 있는 DMMP의 스펙트럼과 완벽히 일치하지는 않지만, 이는 확산농도, 습도 등 Library 작성 조건에서의 제어된 환경에서의 실험조건에 비하여 야외 측정 환경이 다른 결과에 기인할 수 있다. 그러나 측정 목적으로 하는 DMMP에 대한 탐지결과로서 주파수 920  $\text{cm}^{-1}$ 와 1050  $\text{cm}^{-1}$  부근에서 주 피크가 정확히 탐지된 것은 탐지장비의 Library와 실제 실험결과를 비교하여 특정가스 존재여부를 판단하기에 충분한 결과라고 판단되는데, 실제 화재방 상황에서는 가스탐지 상황 시, 탐지대상을 수 종의 화학물질로 추정 및 확인하기 때

문이다. 석유화합물과 같은 휘발성 유기물이 배경 물질로써 IR 탐지결과에 영향을 미칠 수 있으며 마찬가지로 접촉식 센서에도 영향을 미친다. 특정 화학작용에 선택성을 갖는 다양한 소재의 접촉식 화학센서를 집합적으로 구성하는 배열형 탐지센서를 이용하여 식별능력을 높이는 연구가 진행되고 있으며<sup>18)</sup>, 동시에 생성되는 다양한 탐지신호를 필터링하고 신호처리하여 배경물질의 영향을 배제하고 특정가스를 식별해내는 탐지신호 알고리즘 연구도 활발히 진행되고 있다<sup>19)</sup>. 따라서 본 논문의 운용개념에서 IR 영상탐지에 의해 오염은 존재를 확인 할 시 Library로부터 즉시 가스종류를 식별하지 못하더라도 이어 뒤따르는 접촉식 탐지드론에 의한 2차 가스탐지 및 식별결과를 기대할 수 있다.



(a) Red dot alarm when target material detected



(b) FT-IR spectrums of detected material(red) and DMMP library(blue)

Fig. 3. Data of HI-90 hyperspectral imager

화학탐지 UAV의 정전용량변화 감지형 센서를 통하여 획득한 데이터를 Fig. 4에 챔버에서 실험한 참고 데이터와 함께 나타내었다. 그래프의 y축은 시간에 따른 정전용량 변화량( $\Delta C$ , pF)을 의미한다. 실험에서 사용한 센서는 DMMP 접촉식 정전용량이 감소하는 특성이 있어, 아래로 향하는 피크가 있을 때, 탐지대상물질이 있다고 판단한다. Fig. 4의 (a) 그림에서 회색 화살표 화살표가 나타내는 지점은 DMMP 발생 시점으로 각각 120초, 240초, 360초 이다. 그래프에서 회색 화살표 시점을 지나면 센서가 즉시 반응하기 시작하여 정전용량 값이 떨어지는 것을 확인할 수 있다. 그리고 노란색 화살표 지점은 화학오염이 없는 곳으로 이동하기 시작한 시점으로, 노란 화살표 이후 정전용량값이 다시 회복되는 것을 알 수 있다. Fig. 4의 (b)에 나타난 챔버 실험 데이터는 실험실용 소형 챔버에 센서를 놓고, 약 2 ppm의 DMMP 가스를 주입하여 측정한 결과이다. 챔버의 환경은 기온 25.5 °C, 상대습도 26.8 %로 일반적인 실내의 상온이다. 야외실험을 진행했을 때의 환경과는 기온, 상대습도의 차이가 지만, 챔버 실험 데이터와 야외 실험 데이터를 비교하면, DMMP 접촉 시 하락했다가 화학오염 운으로 부터 벗어나면서 다시 회복하는 형태가 유사한 것을 확인할 수 있다. 그러나 Fig. 4의 (a)의 야외 실험 결과의 경우 측정 피크의 요동이 챔버 실험 결과와는 달리 상당한 요동이 있고 회복시간도 다소 지연되는 현상을 보이고 있다. 센서 신호의 요동은 UAV가 비행하며 발생하는 유동장 급변에 따라 센서에 접촉하는 화학오염은의 농도가 균일하지 않고 및 풍속에 의하여 센서 감도가 영향을 받는 것으로 보이며, 화학오염은 중심을 벗어났을 경우 센서 회복 시간이 챔버 실험의 경우보다 길어지는 것은, 챔버 실험의 경우 센서가 오염 환경에 노출된 후 비오염 환경으로 전환되어 센서의 성능회복이 신속하게 이루어지는 반면에 본 야외 실험 환경의 경우, 유동하는 대기 및 UAV에 의하여 증기가 확산하여 오염 영역이 넓어지므로 제한된 실험 영역에서 오염 농도 차이는 있으나 오염/비오염 경계가 명확하지 않고 UAV의 비오염 지역으로의 이동에도 불구하고 화학오염은과 UAV에 탑재된 센서의 접촉이 일부 이루어지고 있는 결과로 추정된다. 상기의 탐지신호 요동 현상은, 오염은 크기가 매우 커서 탐지센서 주변 오염농도가 UAV에 의한 유동장 변화에도 불구하고 균일할 경우 감소될 것으로 판단되며, 탐지신호에 노이즈 필터링 기술 및 최근 활발하게 연

구되고 있는 탐지신호 처리기술이 적용될 경우 가스 식별성 향상과 함께 깨끗하고 정확한 탐지피크 획득이 가능할 것으로 예상된다<sup>[9]</sup>. 탐지센서의 반응시간은 야외실험과 챔버실험 모두 2초 이내로 즉각적 반응 결과를 나타냈다. 한편, CNT 기반 가스탐지 센서는 습도와 온도의 영향을 받으므로 측정환경에 따라 탐지신호의 크기가 달라질 수 있는데, 특히 습도의 영향이 커서 습도 센서로 연구되기도 한다<sup>[20-22]</sup>. 그러나 측정환경에 따라 감도 및 신호 크기는 다를 수 있으나 오염 유/무 판단 및 탐지센서로 적용이 가능하다.

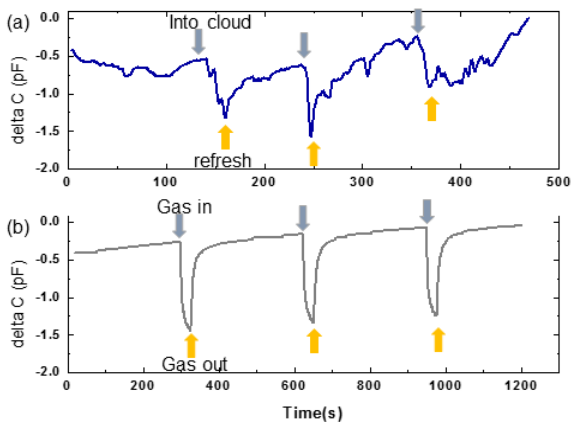


Fig. 4. Data of chemi-capacitive sensor  
(a) experimental data (b) reference data

본 연구에서, 원거리와 접촉식 탐지방식을 이용하여 DMMP 화학오염운을 탐지한 결과, 두 가지 탐지방식에 의한 DMMP 증기 탐지결과 모두 신속하고 명확한 탐지결과를 획득할 수 있었다. 특히 접촉식 화학탐지 UAV는 센서의 탐지결과와 GPS좌표 등 비행정보를 함께 전송하여 화학오염운의 정확한 위치를 실시간으로 확인할 수 있다.

## 5. 결론

본 연구에서는, 기존의 고정식 혹은 병사휴대용 개념으로 운용되는 화학탐지센서의 이동 제한적인 운용방식과 비교되는 개념으로서 소형의 UAV 플랫폼을 활용하여 기동성을 획기적으로 증가시키면서, 상이한 두 종류의 탐지기술을 동시 적용한 복합형 화학오염운 탐지방식을 시도하였고 야전 운용가능성을 확인하였다.

원거리 화학탐지와 접촉식 화학탐지 두 방식을 가스탐지에 순차적으로 적용하여 화학오염 탐지를 수행함으로써 오염운 영상획득에 의한 초동탐지 및 접촉식 탐지에 의한 정밀탐지의 복합탐지기술 운용의 가능성을 확인하였다. 이 복합탐지기술은 화재방 또는 오염확산 사건 발생시, 확산예측 프로그램(화재방 통합모델)의 예측 결과를 실시간으로 확인함으로써 조기경보 기능을 구현하고 인명피해를 줄이는데, 획기적으로 기여할 수 있을 것이다.

## References

- [1] Sun, Y., "Detection Technologies for Chemical Warfare Agents and Toxic Vapors," CRC Press, pp. 8-31, 2004.
- [2] Khan, A. S., Levitt, A. M., Sage, M. J., "Biological and Chemical Terrorism: Strategic Plan for Preparedness and Response Recommendations of the CDC Strategic Planning Workgroup," MMWR. Recommendations and Reports: Morbidity and Mortality Weekly Report. Recommendations and Reports / Centers for Disease Control, Vol. 49, No. RR04, pp. 1-14, 2000.
- [3] Falkenrath, R. A., Newman, R. D., Thayer, B. A., America's Achilles' Heel: Nuclear, Biological, and Chemical Terrorism and Covert Attack, MIT Press, pp. 1-26, 1998.
- [4] Russell, D., Simpson, J., "Emergency Planning and Preparedness for the Deliberate Release of Toxic Industrial Chemicals," Clinical Toxicology, Vol. 48, No. 3, pp. 171-176, 2010.
- [5] Bartholmai, M., Neumann, P., "Micro-drone for Gas Measurement in Hazardous Scenarios Via Remote Sensing," Proceedings of the 6<sup>th</sup> WSEAS International Conference on Remote Sensing(REMOTE'10), pp. 149-152, 2010.
- [6] Shigaki, S., Fikri, M. R., Kurabayashi, D., "Design and Experimental Evaluation of an Odor Sensing Method for a Pocket-sized Quadcopter," Sensors, Vol. 18, No. 11, 3720, 2018.
- [7] Neumann, P., Bennetts, V. H., Lilienthal, A. J., Bartholmai, M., Schiller, J. H., "Gas Source

- Localization with a Micro-drone Using Bio-inspired and Particle Filter-based Algorithms,” *Advanced Robotics*, Vol. 27, No. 9, pp. 725-738, 2013.
- [8] Stuart, B., “Infrared Spectroscopy,” *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*, John Wiley & Sons Inc., pp. 1-18, 2000.
- [9] Cremers, D. A., Radziemski, L. J., “Handbook of Laser-induced Breakdown Spectroscopy,” John Wiley & Sons Ltd., pp. 1-28, 2013.
- [10] McCreery, R. L., “Raman Spectroscopy for Chemical Analysis,” Vol. 225, John Wiley & Sons Ltd., pp. 1-14, 2005.
- [11] Kozak, D. A., et al., “Infrared Spectroscopy for Chemical Agent Detection Using Tailored Hypersorbent Materials,” *Next-generation Spectroscopic Technologies VIII, International Society for Optics and Photonics*, Vol. 9482, p. 94820E, 2015.
- [12] Lee, J. M., Kang, Y. I., Chong, E., Choi, S., “Remote Sensing of Hazardous Materials using the Hyperspectral Imager,” *KIMST Annual Conference*, Vol. 2014, pp. 1112~1113, 2014.
- [13] Rosi, F. et al., “Noninvasive Analysis of Paintings by Mid-infrared Hyperspectral Imaging,” *Angewandte Chemie International Edition*, Vol. 52, No. 20, pp. 5258-5261, 2013.
- [14] Iijima, S., “Helical Microtubules of Graphitic Carbon,” *Nature*, Vol. 354, pp. 56-58, 1991.
- [15] Snow, E. S., Perkins, F. K., Houser, E. J., Badescu, S. C., Reinecke, T. L., “Chemical Detection with a Single-walled Carbon Nanotube Capacitor,” *Science*, Vol. 307, pp. 1942-1945, 2005.
- [16] Snow, E. S., Perkins, F. K., “Capacitance and Conductance of Single-walled Carbon Nanotubes in the Presence of Chemical Vapors,” *Nano Letters*, Vol. 5, No. 12, pp. 2414-2417, 2005.
- [17] Jang, J. S. et al., “Material Technology White Paper,” *Korea Institute of Materials Science*, Vol. 9, pp. 353-376, 2017.
- [18] Park, S. Y. et al., “Chemoresistive Materials for Electronic Nose: Progress, Perspectives, and Challenges,” *InfoMat*, Vol. 1, No. 3, pp. 289-316, 2019.
- [19] Uzarski, J. R., “Improved Chemical Agent Detection and Discrimination in Complex Environments: A Material and Data Science Fusion Approach,” *CBD S&T Conference 2019, Cincinnati, Ohio*, 2019.
- [20] Han, J. W., Kim, B., Li, J., Meyyappan, M., “Carbon Nanotube based Humidity Sensor on Cellulose Paper,” *The Journal of Physical Chemistry C*, Vol. 116, No. 41, pp. 22094-22097, 2012.
- [21] Tulliani, J. M., Inserra, B., Ziegler, D., “Carbon-based Materials for Humidity Sensing: A Short Review,” *Micromachines*, Vol. 10, No. 4, p. 232, 2019.
- [22] Chen, W. P., Zhao, Z. G., Liu, X. W., Zhang, Z. X., Suo, C. G., “A Capacitive Humidity Sensor based on Multi-wall Carbon Nanotubes(MWCNTs),” *Sensors*, Vol. 9, No. 9, pp. 7431-7444, 2009.