

## 해상화학사고 대응을 위한 무인선·무인기 탑재체와 모니터링 기술 개발

김성준<sup>1</sup> · 이상진<sup>1</sup> · 이호영<sup>1</sup> · 박현진<sup>1</sup> · 윤나라<sup>1</sup> · 이근우<sup>1</sup> · 김창래<sup>2</sup> · 이상홍<sup>3</sup> · 김진환<sup>4</sup> · 최성득<sup>1†</sup>

<sup>1</sup>울산과학기술원 도시환경공학부, <sup>2</sup>유콘시스템(주), <sup>3</sup>팩토리 아이엠에스(주), <sup>4</sup>한국과학기술원 기계공학과

## Development of Unmanned Air and Water Vehicle Disaster-Management Payload and Monitoring Systems for Marine Chemical Accident Response

Seong-Joon Kim<sup>1</sup>, Sang-Jin Lee<sup>1</sup>, Ho-Young Lee<sup>1</sup>, Hyeon-Jin Park<sup>1</sup>, Nara Youn<sup>1</sup>, Geun-Woo Lee<sup>1</sup>, Changrae Kim<sup>2</sup>, Sanghong Lee<sup>3</sup>, Jinwhan Kim<sup>4</sup>, and Sung-Deuk Choi<sup>1†</sup>

<sup>1</sup>School of Urban and Environmental Engineering, Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST), Ulsan, 44919, Korea

<sup>2</sup>Drone R&D Department, Uconsystem Co. Ltd, Daejeon, 34015, Korea

<sup>3</sup>Design team, Factory IMS, Co. Ltd, Gyeonggi, 13820, Korea

<sup>4</sup>Department of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST), Daejeon, 34141, Korea

Received September 20, 2019 / Revised November 15, 2019 / Accepted December 22, 2019

In recent years, the number of marine chemical accidents have increased with the quantity of hazardous and noxious substances (HNSs) transported by ships. The Korean government is developing response systems for such marine chemical accidents. Current technology for HNS monitoring includes various types of detection papers and kits, gas detectors, portable analyzers, and laboratory analytical instruments. Many of these resources are already in use by agencies responsible for marine chemical accident responses. However, most of these agencies do not use unmanned air and water vehicles (UAV and UWV) for sample collection and real-time monitoring of HNSs. In this study, we developed UAV and UWV disaster-management payloads for air and seawater samplers and real-time analyzers and evaluated these at several port locations. Finally, we make recommendations for an HNS response system, including a control center, a command ship, and UAV and UWV components, and propose a three-step of response procedures for chemical accidents. This system enables emergency response personnel to respond to chemical accidents more efficiently and with improved safety.

**Key words:** HNSs, Marine chemical accidents, UAV, UWV, Payload

### 1. 서 론

1960년대 이후, 급속한 산업화로 인해 국내 유통 화학물질 종류와 사용량이 급증하였다. 육상의 경우, 2016년(57,248 tonne/y) 화학물질 배출량(대기, 수계, 토양)은 2001년(36,587 tonne/y)보다 20,000 tonne 이상 증가하였으나(<http://icis.me.go.kr/>), 화학사고 건수는 2014년(129건)부터 2018년(66건)까지 지속해서 감소하였다(<http://csc.me.go.kr/>). 그러나 여전히 대규모 화학사고가 발생하고 있으며, 특히 2012년 구미산업단지의 불산 누출사고 이후, 화학사고에 대한 관심과 우려가 증가하고

대응체계 마련에 집중적인 연구가 수행되고 있다. 이에 환경부는 2013년 화학물질안전원을 설립하여 육상화학사고에 대한 대비, 피해예측, 대응기술을 개발하고 있다. 해상의 경우, 2017년(1,574 ktonne/y) 전국 화물 입·출항 수는 2006년(1,037 ktonne/y)에 비해 약 500 ktonne 증가하였으며, 전체 사고 건수는 1985년(408건)부터 2017년(2,582건)까지 급격히 증가하였다(<http://www.kmi.re.kr/>). 2007년 여수 이스턴 브라이트호, 2013년 부산 마리타임 메이지호, 2014년 부산 현대 브릿지호, 2015년 울산 한양 에이스호 사고 등 대규모 해상화학사고가 빈번하게 발생하고 있다.

<sup>†</sup>To whom correspondence should be addressed.

Tel: 82-52-217-2811, Fax: 82-52-217-2859, E-mail: [sdchoi@unist.ac.kr](mailto:sdchoi@unist.ac.kr)

1995년 씨프린스호 사고 이전에는 국가기관별로 해상방제 업무를 명확히 분장하지 않았으나, 현재 해양수산부는 해상운송 분야와 해양안전 관련 정책 및 피해 보상 대책 업무를 담당하고, 해양경찰청은 해양오염 방제 업무를 수행하고 있다.<sup>1)</sup> 또한, 해양환경관리공단은 해경의 지휘와 통제 하에 HNS 방제 작업을 수행한다.<sup>2)</sup> 2013년 마리타임 메이지호 사고 이후, 국민안전처(현 행정안전부)는 2015년에 위험·유해물질(Hazardous and noxious substances: HNSs) 방제정 설계를 시작하여, 2018년에 국내 첫 화학방제함 두 척을 진수하여 HNS 물동량이 많은 울산과 여수에 각각 배치하였다. 그러나 우리나라 대부분의 해상사고 대응방안은 주로 유류를 대상으로 하고, HNSs로 지정된 물질의 범위가 넓어서 방제기술 적용에 물리적인 한계가 있을 뿐만 아니라, 현행법에서는 HNS 대응, 대비, 예방이 연계되지 않아 효율적인 사고 대응에 한계가 있다.<sup>2)</sup> HNS 사고가 발생하면, 가장 먼저 현장 탐지가 이루어져야 한다. 어떤 물질이 얼마나 확산하였는지 파악해야 적절한 사고 대응이 가능하기 때문이다. 국내 여러 기관에서 다양한 HNS 탐지·분석장비를 사용하고 있으나, 사고 현장에 신속하게 접근하여 시료를 채취하거나 농도를 측정하기 어렵다.

지금까지 국내에서 수행된 HNS 관련 연구로는 초동 대응체계 개선방안,<sup>3)</sup> 안전관리 개선방안,<sup>4)</sup> 국내 교육 훈련체계 개선,<sup>5)</sup> 사고 대비 우선지역 선정,<sup>6)</sup> 사고 대응을 위한 우선순위 선정<sup>7)</sup> 등이 수행되었다. 또한, 기존의 HNS 연구개발과 시장 동향을 분석하고, 향후 개발이 필요한 기술(사고 예방 및 대비, 유출영향 모니터링, 사고 대응 기반, 사고 처리 및 사후관리)을 제시하는 연구도 수행되었다.<sup>1)</sup> 그러나 대부분의 연구에서 해상사고 대응을 위한 장비를 개발하거나 무인기와 무인선을 이용한 방제방안을 제시하지 않고 있다. 환경부는 사고대비물질 현장 탐지·분석(2011),<sup>8)</sup> 휴대용 장비 개발(2007~2010),<sup>9)</sup> 휴대용 측정 장비의 표준운영절차(2012)<sup>10)</sup> 관련 연구를 수행하였으나, 육상화학사고에 국한되어 해상화학사고에 대한 초동대응과 현장 탐지·분석 시스템 관련 연구는 여전히 부족하다. 환경부는 “휴대용 유해화학물질 다매체/다중 측정장치 개발(2015~2019)” 연구를 통해 사고대비물질 중 필수물질 34종 이상에 대한 식별·측정이 가능한 휴대용 장비를 개발하였으나, 해당 사업의 목적은 무인기 탑재를 위한 소형·경량화가 아니므로, 보호복을 착용한 현장 대응요원이 직접 장비를 소지하고 사고 지점에 접근해야 하는 한

계가 있다.

본 연구에서는 문헌조사와 현장 답사를 통해 기존 장비 현황을 조사하고, 무인기와 무인선에 장착 가능한 대기·해수 탐제체를 개발하여, 해상화학사고 지점 부근의 농도를 신속·정확하게 파악하는 등 초동대응을 위한 기술을 마련하였다. 또한, 평택항, 전곡항, 군산항, 울산신항에서 탐제체의 현장 적용성을 평가하였다. 이를 통해, 사고 초기에 현장 대응인력의 투입·대피경로를 확보하여 인적·경제적 손실을 최소화할 수 있는 기반을 마련하였다.

## 2. 화학물질 탐지·분석·시료채취장비 관련 기술자료 검토

### 2.1. 기존장비 조사

문헌자료<sup>8,11,12)</sup>와 실무자 접촉을 통해 주요 국가기관(환경부, 국방부, 행정안전부)에서 보유한 탐지(간이식별탐지용), 가스검지기, 휴대용 분석장비 목록을 정리하였다(Table 1). 그러나 환경부훈령 제1218호 등에 의거하여, 화학테러·사고 대응장비에 대한 점검, 현황, 구입이 수시로 진행되므로, 실제로는 본 연구에서 제시한 장비 목록보다 다양한 장비를 사용할 것으로 추정된다.

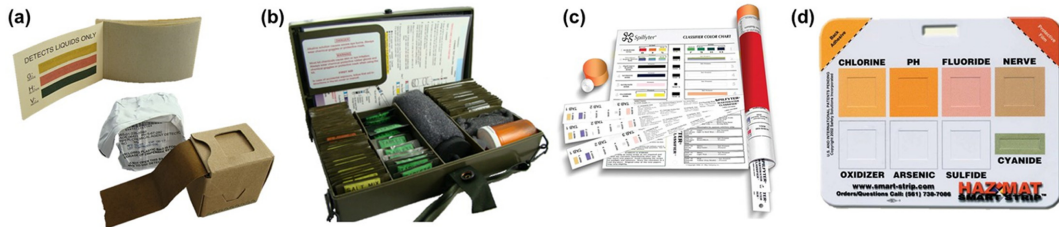
실제 해양화학사고 현장에서 사용되는 장비를 조사하기 위해, 울산 해양경찰청 주관으로 2015년 울산 온산항에서 실시한 화학사고 대응 방제훈련에 참석하였다. 이 훈련에는 육군, 울산시청, 울주군청, 낙동강유역환경청, 해양환경관리공단 관계 부서에서 약 140명이 참가하였다. 무인기를 포함한 다양한 장비(가스검지기, 간이식별탐지기, pH 종이)가 사용되었으나, 무인기와 무인선을 이용한 시료채취 및 탐지분석은 수행되지 않았다. 또한, 울산 남부소방서 화학구조대에 방문하여 육상화학사고 현장에서 사용되는 두 종류의 가스검지기(복합가스용(GasAlertMicroClip XT, Honeywell, USA)과 LPG/LNG용(JL 269, Hanwei, China)), 긴급출동차량, 보호복, 기타 소모품 등을 확인하였다.

#### 2.1.1. 탐지장비

환경부는 다양한 종류의 화학물질 탐지·분석장비에 관한 정보(일반사항, 제원, 운영사항 등)와 장비 선정시 고려할 항목(민감도, 탐지방해요소, 가격 등)을 제시하였다.<sup>13)</sup> 그중 탐지(간이식별탐지용)와 가스검지기는 대표적인 화학물질 탐지장비이며, 그 외 여러 종류의 장비가 사용되고 있다. 탐지지는 가격이 저렴하고 편리

**Table 1.** List of detection papers, gas detectors, and portable analyzers used by national agencies

	Ministry of Environment	Ministry of National Defense	Ministry of Public Administration and Security
Detection paper	- Smart strip kit (HazMat) - Water test kit (M272)	- Chemical papers (KM8 and KM9) - Water test kit (M272)	- Smart strip kit (HazMat)
Gas detector	- Gas detection system (AP-20 and CDS) - Handheld chemical detector (Chempro 100)	- Gas detection system (AP-20 and CDS) - Handheld chemical detector (APD-2000, Chempro 100, GDA-P, IQ-1000, K-CAM2, and ToxiRAE)	- Gas detection system (AP-20, AP-20S, and CDS) - Handheld chemical detector (Chempro 100, GDA-FR, LP-1, and RMX)
Portable analyzer	- FT-IR (ExoScan 4100) - GC/MS (HAPSITE) - XRD (TERRA)	- GC/MS (HAPSITE)	- GC/MS (HAPSITE) - GC-TCD (Chem-ID) - IR (Triple plus) - Remote sense (HI-90)

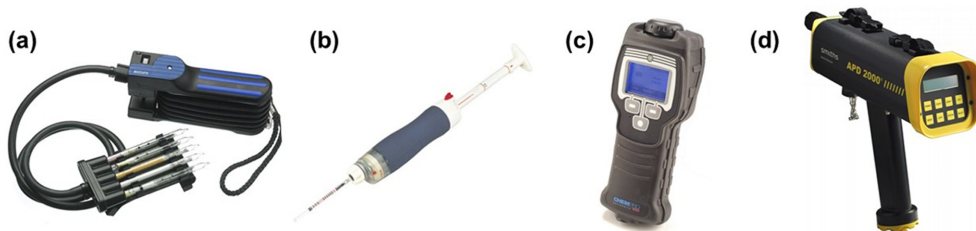


**Fig. 1.** Detection papers and kits: (a) chemical papers (KM8 and KM9, Luxfer Magtech, USA), (b) water test kit (M272, Luxfer Magtech, USA), (c) classifier strip kit (Chemical classifier, Spilfyter, USA), and (d) smart strip kit (HazMat, Safety Solution, USA).

하며 신속한 탐지가 가능하여 사용빈도가 높다(Fig. 1). KM8, KM9, pH 종이 가 대표적인 탐지지이며, 화학작용제와 산·염기성 물질 존재 여부를 간단히 판단할 수 있다. 반면, 증기 및 액상 검사키트(M272, Chemical classifier, HazMat)는 탐지지보다 여러 물질의 존재 여부를 동시에 판단할 수 있고 일정 농도 이상으로 검출되는 특정 물질을 확인할 수 있다. 그러나 이와 같은 탐지장비로는 화학물질의 정확한 농도 측정이 불가능하다.

일반적으로 검지관과 센서 형태의 가스검지기가 있으며(Fig. 2), 탐지지보다 고가이지만 특정 물질을

실시간으로 측정할 수 있다. 대표적인 두 종류의 검지관식 탐지장비(CDS와 AP-20)는 사용 방법과 원리가 유사하고 30종 이상 물질의 농도 측정이 가능하다. 기존 연구에서는 두 장비의 성능에 대한 비교 연구도 수행하였으며, 사고대비물질 중에서 각각 30종(CDS)과 39종(AP-20)을 탐지할 수 있다.<sup>10,14)</sup> 그러나 단일 검지관을 사용하므로 동시에 여러 물질을 분석할 수 없는 단점이 있다. 대표적인 센서 형태 가스검지기(Chempro 100과 APD-2000)는 휴대성이 우수하며 10종 이내의 화학물질 농도를 동시에 또는 선택적으로 측정할 수 있다. 현재 시판되고 있는 센서 형태 가스검지기의 종류,



**Fig. 2.** Gas detectors: (a) gas detection system (CDS, Dräger, Germany), (b) gas detection system (AP-20, Kitagawa, Japan), (c) handheld chemical detector (Chempro 100i, EnviroNics, Finland), and (d) handheld chemical detector (APD-2000, Smiths Detection, UK).

기능, 가격 등은 매우 다양하다. 또한, 환경부, 국립환경과학원, 화학물질안전원 등에서 다양한 종류의 가스검지기 제원, 가격, 분석가능물질, 민감도, 측정 소요시간, 사용법 등에 대한 정보를 제시하였다.<sup>11-13,15,16)</sup>

### 2.1.2. 분석장비

화학사고 현장에서는 신속한 사고물질 규명과 농도산정이 요구되므로, 가스검지기보다 다양한 물질을 정확하게 측정할 수 있는 휴대용 분석장비가 적합하다. 현재 다양한 종류의 휴대용 분석장비가 사용되고 있으며, 그중 시중에서 쉽게 접할 수 있는 휴대용 분석장비를 Fig. 3에 제시하였다: (a) 복합가스측정기, (b) 가스 크로마토그래프/질량분석기(Gas chromatograph/mass spectrometer: GC/MS), (c) 푸리에 변환 적외선 분광기(Fourier transform-infrared spectroscopy: FT-IR), (d) X-선 회절기(X-ray diffractometer: XRD). 개별 장비의 측정 가능한 물질 성상(기체, 액체, 고체)과 종류는 상이하다. 기존 연구에서는 여러 종류의 휴대용 분석장비 성능을 평가하고 장비를 개발하기 위해 다양한 실험을 수행하였다.<sup>8-10,17-19)</sup> 그러나 휴대용 분석장비의 무게, 복

잡한 구동, 제한적인 원격 운용 등으로 인해 육·해상화학사고 현장 적용에 어려움이 있다.

대형 화학사고가 장시간 지속되거나 휴대용 분석장비로 사고 물질을 규명할 수 없는 경우에는 정밀 분석장비를 활용해야 한다(Fig. 4). 유기물질을 가장 정확히 정성·정량 분석할 수 있는 장비는 질량분석기(MS)이다. 기체상 시료의 경우, 열탈착장치(Thermal desorption: TD)를 이용하여 신속한 전처리가 가능하며, 퍼지엔트랩(Purge and trap)을 이용하여 액체상 시료를 기체상 시료로 전환할 수 있다. 액체상 이온성물질의 경우, 이온 크로마토그래프(Ion chromatograph: IC)로 분석할 수 있다. 기존 연구에서는 이러한 정밀 분석장비를 이용한 환경부 사고대비물질의 분석방법을 마련하였다.<sup>20)</sup> 또한, 환경부 화학물질안전원은 화학사고 현장 측정분석차량을 제작하여 정밀 분석장비와 시료 채취장비를 탑재하고 화학사고 시 현장에 투입한다.<sup>21)</sup>

### 2.1.3. 시료 채취장비

현장 대응요원이 사고 현장에 접근할 수 없을 경우, 가스검지기 또는 휴대용 분석장비 사용이 어려울 경우,

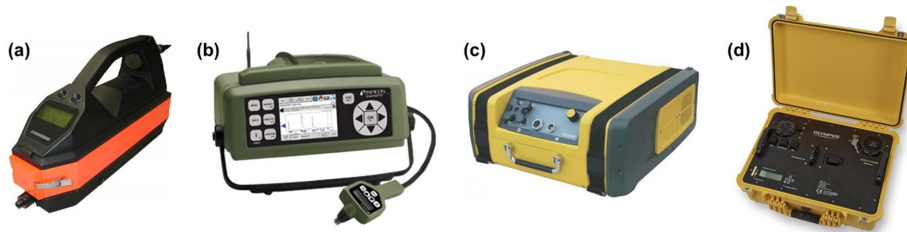


Fig. 3. Portable analyzers: (a) multiple gas detector (GDA2, Airsense Analytics, Germany), (b) GC/MS system (HAPSITE ER, Inficon, Switzerland), (c) FT-IR spectrometer (DX4040, Gasmel, Finland), and (d) XRD spectrometer (TERRA, Olympus, USA).

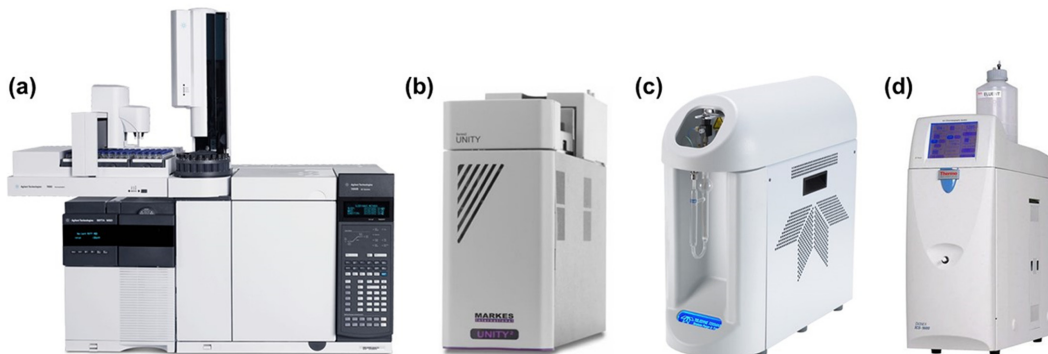










Fig. 4. Laboratory analytical instruments: (a) GC/MS (7890B/5977A, Agilent, USA), (b) TD (UNITY 2, Markes International, UK), (c) stratum purge and trap concentrator (PTC, Teledyne Tekmar, USA), and (d) IC system (Dionex ICS-1600, Thermo Fisher Scientific, USA).

**Table 2.** Various types of air and water samplers, widely used in environmental studies

Air samplers				Water samplers			
Name	Picture	Name	Picture	Name	Picture	Name	Picture
Passive air sampler		Canister		Polyurethane foam		Composite sampler	
Tedlar bag		Adsorbent tube		Van dorn sampler		Semi permeable membrane device	

정확한 농도 산정이 필요한 경우에는 원격으로 시료를 채취한 후, 정밀 분석장비를 사용해야 한다. 산·염기성 물질을 제외한 대부분의 해상화학사고 물질은 휘발성 유기화합물(Volatile organic compounds: VOCs)이므로, 대기 또는 수환경 연구에 사용되는 VOC 시료 채취장비를 정리하였다(Table 2). 대기시료 채취장비 중 수동 대기채취기(Passive air sampler)와 흡착관(Adsorbent tube)은 흡착제에 기체상 유기물질을 포집하며, 이후 용매추출 또는 열탈착을 거쳐 화학물질 분석에 활용된다. 캐니스터와 테들러백은 펌프를 이용하여 사고 현장의 기체상 시료를 포집하고, 휴대용 또는 정밀 분석장비에 채취한 시료를 주입하는 용도로 사용된다. 폴리우레탄 폼(Polyurethane form: PUF)은 일반적으로 기체상 대기시료 채취에 사용되지만, 유기용매 흡착능력이 우수하고 크기와 형태가 다양하므로 해수 중 유기물질 채취에 용이하다. 혼합시료 채취장비(Composite sampler)는 펌프를 이용하여 일정한 시간 간격으로 해수시료를 채취하고, 반자동 채취기(Van dorn sampler)는 반자동 원리로 특정 수심에서 해수시료 채취가 가능하다. 마지막으로 반투과성막장치(Semi permeable membrane device)

는 일정 시간 수환경에 노출 시, 폴리에틸렌 멤브레인 내부의 지질성분이 유기물질을 포집한다.

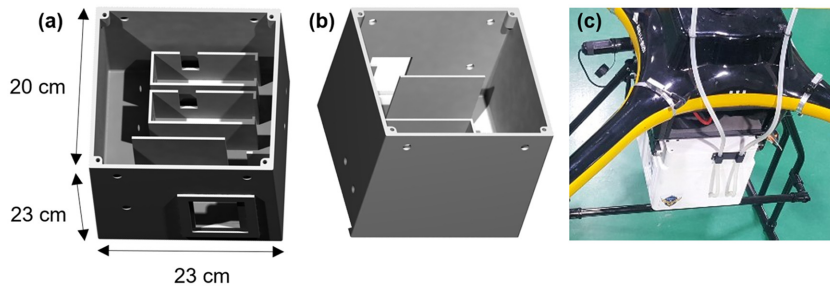
이처럼 다양한 시료 채취장비를 조사하였으며, 개별 장비의 제원과 성능 등을 고려하여 해상 화학사고 현장에 가장 적합한 장비를 선정할 수 있다. 본 연구에서는 장비 특성(무게, 크기, 원격 통신 가능 여부)을 고려하여 무인기와 무인선에 탑재하기 적합한 장비를 선정하고 탑재체를 개발하였다.

## 2.2. 장비 개발

화학사고 현장과 기존 환경연구에서 사용하는 장비의 성능과 제원을 고려하여 해상화학사고 현장 적용성이 높은 장비를 선정하였다. 이러한 장비를 무인기와 무인선에 장착하기 위하여 탑재체를 제작하였다.

### 2.2.1. 무인기 대기 탑재체

3D 프린터를 이용하여 폴리아미드 재질(PA2200)의 무인기 대기 탑재체를 제작하였으며, 무인기 하단부에 장착 시 비행에 적합하도록 탑재체의 무게와 크기를 고려하였다. 탑재체에 총 VOC 측정기(Series 500, Aeroqual,



**Fig. 5.** Unmanned air vehicle with disaster management payload for air sample collection: (a) front view, (b) back view, and (c) UAV with an onboard payload. The payload contains two air pumps, a gas detector for total VOC analysis, a Tedlar bag (1 L), and cable lines.

New Zealand), 소형펌프(Grab air pump, SKC, USA), 테들라백(Tedlar bag, 1 L, Sigma-Aldrich, USA), 장비 전원, 자료 송수신 원격제어 장치를 장착하였으며, 모든 장비를 장착한 탑재체의 부피(무게)는 23 cm × 20 cm × 23 cm (1.8 kg)이다(Fig. 5). 소형펌프 두 대는 각각 VOC 측정기와 테들라백에 사용되며, 비행 시 하강기류로 인한 대기 포집량 영향을 차단하기 위해 시료채취 주입구를 무인기 프로펠러보다 높은 곳에 부착하였다. 또한, 원격으로 장비 전원을 제어하고 측정 자료를 송수신하는 시스템을 구축하였다. 무인기는 대기 탑재체를 장착하고 사고 현장을 비행하여, 실시간 총 VOC 농도 자료와 영상을 상황실로 전송하고, 자동으로 대기시료를 채취하여 출발지점으로 복귀한다.

2.2.2. 무인기 해수 탑재체

대기 탑재체와 마찬가지로 3D 프린터를 이용하여 해수 탑재체와 해수채취기를 제작하였다. 대기 탑재체, 해수 탑재체, 해수채취기 모두 유기용매와 산·염기성 물질에 대한 내구성이 우수하였다. 무인기 해수 탑재체는 윈치(Winch)시스템, 해수채취기, PUF 디스크, 원격 제어를 위한 부속품으로 구성되며, 탑재체 부피(무게)는 18 cm × 18 cm × 8 cm (1.5 kg)이다(Fig. 6). 해수채취기

(200 mL 용량)는 하단부 테두리 공간과 내부에 장착한 PUF 디스크를 이용하여 표층수와 화학물질을 채취한다. 해수채취기 주변부에 일정한 간격으로 다수의 유입구를 만들고 상단부를 개방하여 해수와 화학물질을 효과적으로 채취할 수 있다. 사고 지점으로 이동한 무인기는 일정 고도를 유지하며 윈치시스템으로 해수채취기를 하강하여 표층수를 채취하고, 출발지점으로 복귀한다. 이 모든 과정을 약 2 km 거리에서 원격으로 제어할 수 있다.

2.2.3. 무인선 대기 모니터링 시스템

무인선은 무인기보다 장비 탑재 허용용량(부피와 중량)이 충분하므로, 고성능 휴대용 분석장비를 탑재할 수 있다. 무인선은 디젤엔진(U-series 125PS, Hyundai-Seasall, Korea)과 추진기(Mercruiser Bravo 1, Performance Product Technologies, USA)로 운항되며, 그 외 컴퓨터, 통신장비, 센서 등은 배터리에서 전력을 공급받는다. 무인선 중앙부 내부 공간(조종석)에 대기 모니터링 시스템을 탑재했으며, 전단부에는 해수 탑재체를 장착하였다(Fig. 7). 무인선 대기 모니터링 시스템은 휴대용 FT-IR (DX4040, Gasetm, Finland)과 대기채취기(Air bag sampler 1062, Sigma-Aldrich, USA)로 구성되며, 두

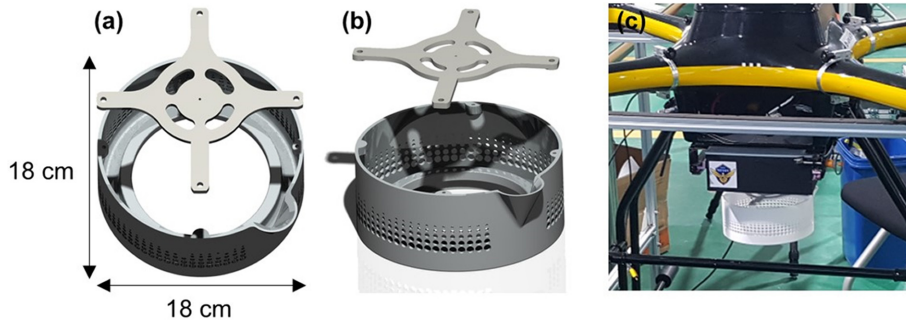


Fig. 6. Disaster management payload for water sample collection by an unmanned air vehicle: (a) top view, (b) side view, and (c) UAV with an onboard payload. The payload contains a winch system, three PUF disks, and cable lines.

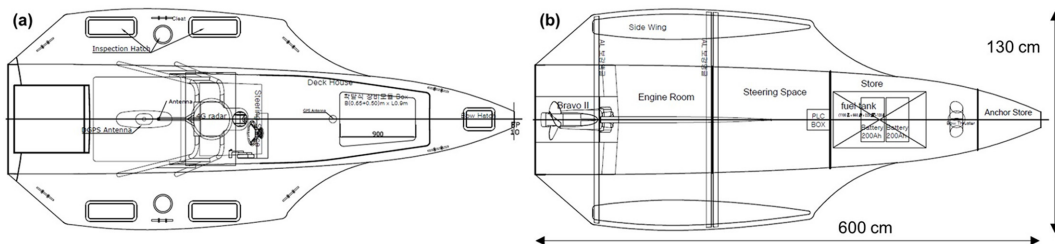
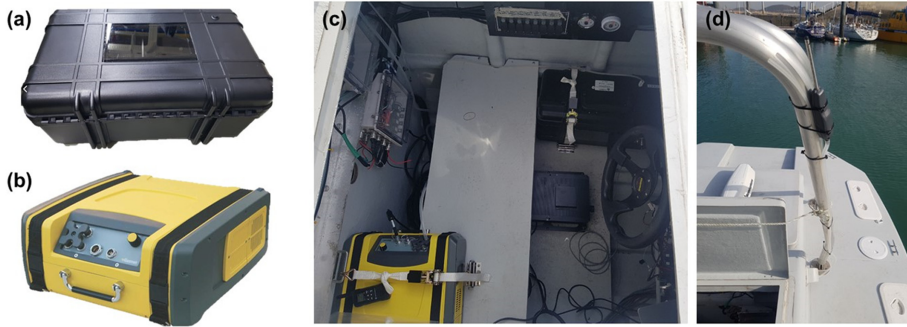


Fig. 7. Blueprint for an unmanned water vehicle: (a) top view and (b) bottom view.



**Fig. 8.** Air monitoring system for an unmanned water vehicle: (a) air-bag sampler equipped with a 10 L Tedlar bag, (b) portable FT-IR spectrometer, (c) interior of the UWV, and (d) air-bag sampler and portable FT-IR inlets.

장비의 부피(무게)는 각각 41 cm × 39 cm × 17 cm (13.8 kg)와 55 cm × 37 cm × 23 cm (7.7 kg)이다(Fig. 8). 휴대용 FT-IR은 필수측정항목(이산화질소, 이산화탄소, 일산화탄소, 메탄, 수증기)을 포함하여 총 50종 물질을 동시에 분석하며, 그중 29종의 농도자료를 실시간 전송한다. 대기채취기는 5 L 또는 10 L 테들라백을 내장하고, 시료 부피가 최고 용량에 도달하면 자동으로 시료채취를 중단한다. 수분 영향을 최소화하기 위해, 두 장비의 시료 채취 주입구를 무인선 최상단에 고정하였으며, 수분 제거 여과지를 주입구 전단부에 장착하였다.

#### 2.2.4. 무인선 해수 탑재체

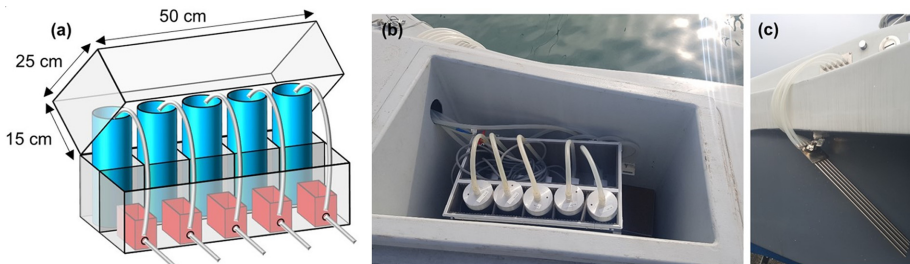
강화형 알루미늄 재질의 하드케이스로 무인선 해수 탑재체를 제작하였다. 탑재체는 소형펌프(380 dc micro diaphragm pump, Flameser, China) 5개, 스테인리스 스틸 재질의 해수채취통 5개(자체 제작), 실리콘 관, 펌프 원격제어를 위한 부속품을 내장하고 있으며(Fig. 9), 부피(무게)는 50 cm × 25 cm × 30 cm (20 kg)이다. 5개 지점에서 별도로 해수시료 채취가 가능하고, 각 펌프는 1분 동안 해수 500 mL를 채취하며 최고 용량에 도달하면 자동으로 멈춘다. 또한, 효율적인 표층수와 화학물

질 채취를 위해 시료 주입구를 무인선 하단에 고정하였다. 무인기 탑재체와 마찬가지로, 무인선 대기 모니터링 시스템과 해수 탑재체를 상황실이나 모션에서 원격으로 제어할 수 있다.

### 2.3. 현장 적용 및 대응방안

#### 2.3.1. 현장 적용 사례

본 연구에서 개발한 대기·해수 탑재체를 평가하기 위해, 화학사고를 가정하고 무인기와 무인선에 모든 장비를 탑재하여 서해 평택항(2017년 11월 27일), 서해 전곡항(2018년 10월 19일), 서해 군산항(2018년 11월 19일), 동해 울산신항(2018년 12월 6일)에서 현장 적용성을 평가하였다(Fig. 10). 이 과정에서 장비 운용과 통신 등에 대한 문제점을 확인하고 개선하였으며, 추가 연구를 통해 보완·개선할 사항을 다음과 같이 정리하였다. (1) 무인기에 총 VOC 측정기를 탑재하였으나, 개별 물질을 측정할 수 있는 다양한 센서를 장착하고 실시간으로 개별 물질 농도를 관제 시스템에 전송해야 한다. 특히, 무인기가 사고 선박 주변을 선회하면서 측정된 3차원 자료를 지도상에 표출하여 사고 지점을 정확하게 파악할 필요가 있다. (2) 해수 탑재체를 이용하면 해수



**Fig. 9.** Payload for an unmanned water vehicle for water sample collection: (a) diagram of a water sampler, (b) UWV equipped payload, and (c) seawater inlets.



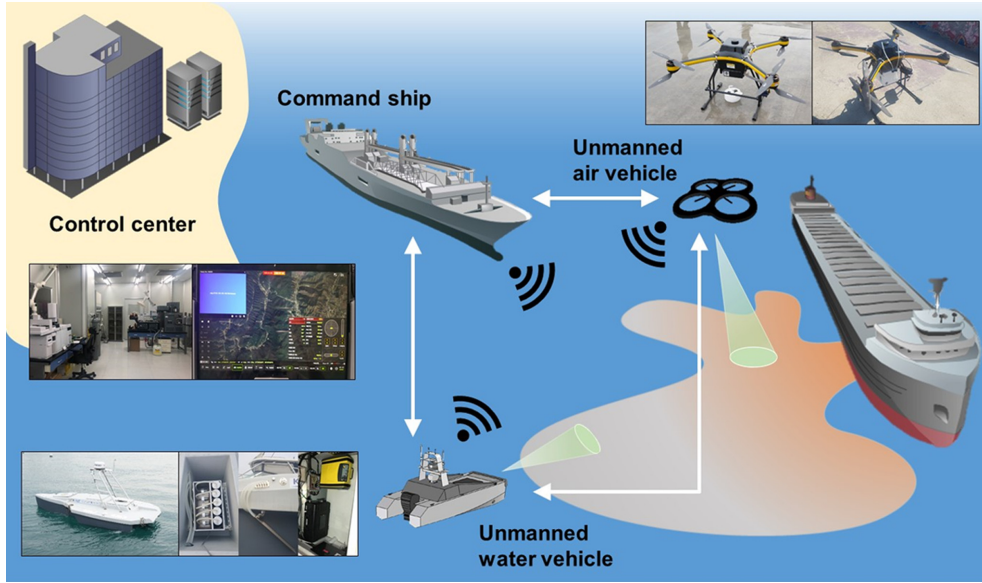
Fig. 10. Field simulations of the developed payloads at the Ports of (a) Pyeongtaek, (b) Jeongok, (c) Gunsan, and (d) Ulsan.

표층에 부유하는 대부분의 유기용매를 채취할 수 있지만, 용존성유기화합물과 산·염기성 물질을 충분히 채취하지 못할 수 있다. 그러므로 다양한 수심에서 해수와 화학물질을 채취할 수 있도록 해수 탐재체의 시료채취 주입구 높이를 조절하는 장치를 제작할 필요가 있다. (3) 무인선에 탑재하는 휴대용 FT-IR은 해상 물동량 상위 50개 물질을 측정하지만, 추후 연구에서는 이외 물질의 정보를 라이브러리에 입력하여 더욱 넓은 범위의 해상화학사고에 대응해야 한다. (4) 휴대용 분석장비와 탐재체 사용을 위한 전문가 교육이 필요하며, 주기적인 장비점검 및 소모품 교체 등이 요구된다. 앞으로 지속적으로 모의 점검과 사고 현장 적용을 통해 탐재체를 개선하고 무인기와 무인선 운용 능력을 확보해야 한다.

### 2.3.2. 단계별 대응방안

화학사고에 초동대응하기 위해서는 환경 매체(기체상, 액체상, 고체상)에 상관없이 특정 장비 한 대를 이용하여 다수의 화학물질을 탐지하고 정확한 농도를 분석하는 것이 이상적이다. 그러나 본 연구에서는 현실적인 제약을 고려하여 무인선과 무인기에 적당한 시료 채취 장비와 분석장비를 선정하고 이를 안전하고 효과적으로 장착하기 위한 탐재체를 개발하였다. 이러한 장비체계를 바탕으로 기상조건과 사고 현장 상황을 고려한 해상화학사고 대응절차를 아래와 같이 제안하였다.

지상 상황실, 모선, 무인선, 무인기는 모든 통신체계를 공유하며, 상황실이나 모선에서 무인기와 무인선(대기·해수 탐재체 장착)을 원격으로 조종하여 실시간 영상 전송, 대기·해수시료 채취, 휴대용 장비를 이용한



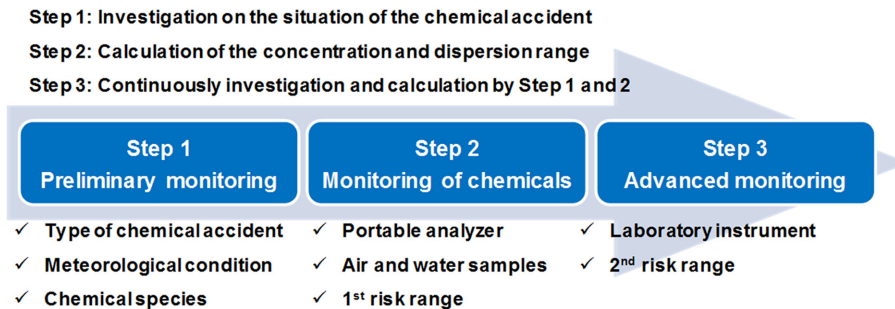
**Fig. 11.** Schematic diagram of an HNS response system including control center, command ship, and unmanned air and water vehicles for marine chemical accident response.

사고 물질 분석을 수행한다(Fig. 11). 무인선과 무인기 상호 보완적인 체계를 기반으로, 기상조건과 사고 현장의 접근성을 고려하여 개별 장비를 선택적으로 사용할 수 있다. 예를 들어, 기상조건이 양호하면(풍속 8 m/s 이하, 해상상태 3 (파고 0.5~1.25 m) 이하) 모선, 무인선, 무인기를 모두 이용하며, 악기상의 경우 모선에서 모든 사고 대응절차를 진행한다. 또한, 기상조건이 양호함에도 모선이나 현장 대응요원이 사고 지점에 접근하기 어려운 경우, 무인선과 무인기를 이용하여 사고 대응절차를 진행한다.

본 연구에서 개발한 장비를 이용한 단계별 해상화학사고 대응절차는 아래와 같다(Fig. 12). 1단계에서 사고 현장, 기상조건, 사고 물질, 사고 형태에 대한 조사를 수행하고, 현재의 기상조건을 고려하여 우선 투입할 장비를 결정한다. 일반적인 해상화학사고의 경우, 사고 물

질 정보(선박별 적재 화학물질 종류와 양)를 즉각 파악할 수 있지만, 다종의 화학물질이 동시에 누출되어 반응을 일으키거나 피해범위가 확대될 경우에는 사고 물질을 직접 분석해야 한다. 그러므로 2단계에서는 대기와 해수를 채취하고 자동측정장비를 이용하여 사고 물질 농도와 확산반경을 파악한다. 이후, 화학물질 사고 현장의 1차 위험·피해범위(직접적인 영향)를 예측하고 현장 대응요원의 투입·대피 경로를 확보한다. 마지막 3단계(사고 장기화)에서는 모선의 정밀 분석장비를 이용하여 사고 물질의 정확한 농도와 2차 위험·피해범위(간접적인 영향)를 산정한다. 장기 해상화학사고의 경우, 기상조건과 현장 상황이 계속해서 변화하므로, 이러한 변화를 고려한 위험·피해범위(장기적인 영향)를 지속해서 산정한다.

지금까지 설명한 해상화학사고 대응절차는 본 연구



**Fig. 12.** Three-step response procedure for the marine chemical accidents.

에서 개발한 탐재체에 초점을 맞추어 제시한 것이므로, 추후 해상화학사고에 대한 상세 시나리오를 작성하여 구체적인 대응절차를 마련해야 한다. 예를 들어, 해상화학사고·사례, 피해범위, 기상자료 등의 정보를 수집하고 다양한 해상화학사고 시나리오를 구축하여, 기관·장비별 명확한 역할 분담을 포함한 상세 대응절차를 마련해야 한다.

### 3. 결 론

여러 국가기관에서 다양한 종류의 화학물질 탐지장비(탐지지와 가스검지기), 분석장비(휴대용과 정밀장비), 시료 채취장비(대기와 해수)를 사용하고 있으나, 무인기 또는 무인선과 연계하여 사용하지 않거나, 현장 대응요원이 사고현장에서 직접 장비를 운용하는 등 안전하고 효과적인 사고 대응이 이루어지지 않았다. 그러므로 본 연구에서는 무인기 대기·해수 탐재체, 무인선 대기 모니터링 시스템, 무인선 해수 탐재체를 개발하고, 서해 평택항과 진곡항 등에서 현장 적용성을 평가하였으며, 최종적으로 단계별 해상화학사고 대응방안을 제시하였다. 본 연구 결과를 실용화하면 해상화학사고 현장 대응요원이 안전하고 신속하게 사고에 대응할 수 있을 것이다. 후속 연구에서는 다양한 자료(사고사례, 장비현황, 기상조건 등) 기반의 상세한 사고 시나리오를 작성하여, 기관·장비별로 효과적인 해상화학사고 상세 대응절차를 마련해야 한다.

### 감사의 글

본 연구는 해양경찰청의 재원으로 재난안전기술개발사업단(KCG-01-2017-01)의 지원을 받아 수행되었습니다.

### 참고문헌

1. 해양수산부, “위험유해물질(HNS, Hazardous & Noxious Substance) 해양유출사고 신속대응기술개발 및 대응체계 구축 기획연구”, 2014.
2. 해양환경관리공단, “위험유해물질(HNS) 방제대응체계 구축방안 연구”, 2013.
3. 조형민, 류제완, 김남균, 박희경, “매뉴얼 모델링 및 시

나리오 시뮬레이션을 통한 해상 HNS 유출사고 초동대응체계 개선 방안 평가”, *한국방재학회지*, 2017, 17, 357-365.

4. 이덕재, 홍원표, 권진욱, 송창근, “항만 위험·유해화학물질 안전관리 개선방안 연구”, *한국방재학회지*, 2018, 18, 333-340.
5. 김광수, 이문진, “해상화학사고 대응을 위한 국내 교육훈련체계 개선에 관한 연구”, *해양환경안전학회지*, 2017, 23, 847-857.
6. 하민재, 장하용, 김태형, 윤종휘, 이문진, 이은방, “집중도 지수를 활용한 HNS 사고 대비 우선지역 선정”, *한국항해항만학회지*, 2017, 41, 437-444.
7. 김영윤, 김태원, 손민호, 오상우, 이문진, “해상 위험·유해물질(HNS) 관리 우선순위 선정에 관한 연구”, *해양환경안전학회지*, 2015, 21, 672-678.
8. 국립환경과학원, “화학 사고대비물질 현장탐지 및 시험 분석방법 개발”, 2011.
9. 환경부, “휘발성 유해 화학 물질 정성·정량 분석을 위한 휴대용 GC/MS 개발(통합)”, 2010.
10. 국립환경과학원, “국내 화학사고 사건원인물질 현장 탐지·분석 기술 연구”, 2012.
11. 국립환경과학원, “화학테러 피해유형 및 대응방안 연구”, 2006.
12. 화학물질안전원, “소방방재요원 화학재난 대응과정”, 2014.
13. 환경부, “화학물질 탐지장비 편람”, 2005.
14. 안성용, 김정민, 김성범, 천광수, 이진선, 박춘화, “화학사고 초기대응자를 위한 검지관식 탐지장비의 반응성 연구”, *한국재난정보학회지*, 2014, 10, 33-39.
15. 환경부, “화학사고·테러 대응장비 사용자 운영매뉴얼”, 2016.
16. 화학물질안전원, “화학사고·테러 대응장비 사용자 운영 매뉴얼”, 2015.
17. 노혜란, 이진선, 김정민, 김기준, 석광설, “사고대비물질 현장 탐지·분석에 관한 연구”, *한국환경분석학회지*, 2012, 15, 27-34.
18. 박연선, 노혜란, 양희선, 석광설, “휴대용 GC/MS 성능 검사 및 분석방법 연구”, *한국재난정보학회지*, 2013, 9, 249-258.
19. 김성범, 노혜란, 이진선, 김정민, 조문식, 박춘화, 천광수, 안승영, 석광설, “사건현장의 고체상 화학물질 현장 분석 연구”, *한국재난정보학회지*, 2012, 8, 304-309.
20. 김기준, 이진선, 이수영, 황승률, 김영희, 석광설, “실�험실 GC-MS를 이용한 사고대비물질 분석방법 연구”, *한국분석과학회지*, 2013, 26, 80-85.
21. 환경부, “사고대비물질 표준작업절차서”, 2015.