

## 화학물질 저장시설의 사고대응 및 훈련을 위한 로봇기반 누출감지 및 추적시스템

박명남 · 김창완 · 김태옥 · <sup>†</sup>신동일

명지대학교 화학공학과

(2018년 11월 27일 접수, 2019년 3월 11일 수정, 2019년 3월 12일 채택)

## Mobile Robot-based Leak Detection and Tracking System for Advanced Response and Training to Hazardous Materials Incidents

Myeongnam Park · Chang Won Kim · Tae-Ok Kim · <sup>†</sup>Dongil Shin

*Department of Chemical Engineering, Myongji University, Yongin, Gyeonggido 17058, Korea*

*(Received November 27, 2018; Revised March 11, 2019; Accepted March 12, 2019)*

### 요 약

화학물질의 사용 증대와 더불어 위험물 및 독성가스 누출 사고가 빈번하게 일어나고 있다. 그 중에서도 위험물 저장설비 사고는 누출이 감지되었을 때 대응하기 위한 초동 조치가 가장 중요하지만, 전적으로 조업자에 의한 경험에 비중이 크기 때문에, 잘못된 판단으로 인한 더 큰 물적, 인적 피해가 발생할 가능성이 높다. 본 연구는 기존 고정식 감지기를 통한 알람 발생 후 수동적인 대응을 취하는 현 접근 방식에서 벗어나, 오픈소스기술을 적용하여 쉽게 제작이 가능한 로봇 플랫폼에서 작동하는 이동식 센서를 활용한 능동적인 누출원 추적 시스템을 설계하였다. 아울러 프 로토타입 시스템의 검증을 통해 누출 초기의 정확한 현장 상황 파악 및 조기대응을 바탕으로 사고의 확산 및 피해 최소화의 기틀을 마련하고자 하였다.

**Abstract** - In recent years, dangerous materials and gas leak accidents have been frequently occurred. The hazardous materials storage facility accidents are not rapidly controlled when a leak is detected, unlike other chemical plants can be controlled. Externally, the human has to approach and respond to the source of leaking directly. As a result, the human and material damage are likely to larger result in the process. The current approach has been passive response after ringing the alarm. In this study, the suggested tracking system of the leak resource is designed system to track the resource actively by utilizing the mobile sensor robot platform, which can be made easily through recent rapid development technology, is verified through prototype system. Thus, a suggested system should pave the way for minimizing the spread and damage of the accident based on the exact site situation of the initial leak and quick and early measures.

**Key words** : hazardous materials, leak monitoring, source tracking, disaster response robot, robot-cooperative problem solving

---

<sup>†</sup>Corresponding author: dongil@mju.ac.kr

Copyright © 2019 by The Korean Institute of Gas

## I. 서론

최근 들어 다양한 화학물질을 사용하는 시설이 증가하고 동시에 시설의 노후화, 기계적 결함, 인적 오류 등에 의한 화학물질 누출 사고는 줄어들지 않는 경향을 보이고 있다. 국내 유통되는 화학물질만도 4만종 이상이며[1], 유해화학물질 취급 시설의 노후화(국내 화학산업단지 조성 20년 이상 경과), 유통량의 증가, 그리고, 산업단지의 군집화 및 주거지역과의 근접한 지리적 제한으로 누출 사고 발생 시 인근 지역에 급속히 확산되어 큰 피해로 발전할 가능성이 크다[2]. 이는 CH<sub>4</sub> 가스와 같이 눈에 보이지 않는 하이드로 카본 가스 또는 휘발성 유기화합물 등 잠재적 위험 요인을 내포하고 있어 이에 따른 화학물질 누출 탐지를 위한 산업시설에서의 직접적인 탐지 방법은 작업자의 단순한 실수 요인으로 인해 큰 인명피해를 유발할 수 있다. 단순한 화재 사고와 달리, 누출로 인해 대형 폭발 사고로 이어져 복합적인 피해 유형을 띄게 되며, 초기 대응 미흡에 따라 치명적인 환경적 재난에 봉착하게 된다. 일반적인 유해화학물질의 취급시설은 노후화 및 열악한 작업조건으로 인해 감지 센서의 오작동 등이 빈번히 발생하는 경향을 보이고 있으며, 사고 대응 활동이 조업자의 숙련도에 의존하는 경향이 크다. 이러한 인적 요인에 의한 위험을 줄이기 위해, 기존 위험물 저장설비에 설치되어 있는 고정식 감지센서를 통한 알람 발생 후 사고 예방 활동을 취하는 현 접근방식에서 벗어나, 최근 이슈로 부각되고 있는 오픈소스(open source) 기술을 적용하여 쉽게 제작이 가능한 로봇 플랫폼에서 작동하는

이동식 센서를 활용하여 잠재적 위험성을 가지고 있는 현장에서의 작업자의 위험성을 줄이기 위해 로봇 기술을 활용한 능동적인 누출원 추적 시스템을 설계하고자 하였다. 본 연구에서 인공지능 planning 기반 이동식 로봇을 사용한 누출원 추적 기법을 제안하였다. 누출물질 추적시스템은 초기 정확한 현장상황과 대응방안이 중요하기 때문에 정확한 누출지점을 추적, 실시간 영상정보시스템을 활용해야 한다. 따라서 가스 감지를 위해 전면부 돌출형 센서를 탑재하여, 누출물질의 농도 구배 정보를 획득하도록 하였다. 또한, 이동식 로봇은 획득된 정보를 이용해 초기 상태에서 최종 목표상태까지 농도 구배를 이용한 추적 벡터를 생성함으로써, 누출 지점을 추적하였다. 그리고, 로봇의 planning은 오픈소스 플랫폼 중 하나인 Mindstorms NXT를 이용해 구현하였으며, 이를 위해 제안된 planning 기법은 스케일이 축소된 matlab 가상환경에서 검증하였다. 이는 향후 사고의 확산을 막고 피해를 최소화하는 방안으로 활용될 것으로 기대된다.

## II. 관련 이론 및 연구 동향

### 2.1 고정식 센서를 이용한 누출감지

2011년 3월 태평양 해역 지진으로 인한 일본의 후쿠시마 원자력 발전소 사고 이후, 사람이 접근이 어려운 환경에서 재난대응로봇의 개발이 집중 조명되고 있으며, 미국의 DARPA에서는 미래 재난에 대응코자 로봇의 개발을 목표로 국제 Challenge를 진행하는 등 주요 선진국에서 재난 대응을 위한 로봇의 개발이 활발히 이뤄지고 있다[3].

Table 1. Comparison of leak detection methods (adapted from [4])

Features	Cable sensor	Vapor sampling	Ultrasonic flow meter	Mass /volume balance	Negative pressure wave	Pressure point analysis	Digital signal processing
Cost	High	High	High	Low	High	Low	High
Detection speed	Fast	Fast	Fast	Fast	Fast	Fast	Fast
Easy retrofitting	No	No	No	Yes	Yes	Yes	No
Easy usage	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Leak localization	Yes	Yes	Yes	No	Yes	No	Yes
Leak size estimation	No	Yes	No	Yes	Yes	No	No

Murvey & Silea [4]의 연구사례를 보면, 기존 고정식 센서 기반 방법들의 효율성에 대하여 장단점을 기술해 놓고 있다. 감지속도가 빠른 방법들을 중심으로 일부를 인용한 아래 Table 1에서 각 누출 감지방법의 활용도를 비교해 볼 수 있는데, 누출 위치 파악하는 기능들 중에 소프트웨어를 활용한 방법 중 mass/volume balance 및 pressure point analysis 가 있으며, 이는 누출 크기에 따른 검출을 확률 방법을 이용하여 계산하게 된다. 하지만, 높은 수준의 컴퓨터 성능을 요구하며, 컴퓨터 사양에 따라 누출 위치의 정확성 차이가 나타난다. 또한, 누출 크기 추정은 cable sensor, ultrasonic flow meter 등을 제외한 대부분 탐지 시스템에 의해 가능하다. 이 중 주로 쓰이는 방법 중에 하나인 cable sensor의 경우 감지속도는 빠르고, 쉽게 사용할 수 있으며, 누출의 현장을 알 수 있으나, 비용이 비싸고, 개조가 어려우며, 누출의 크기를 추정하는 것은 불가능함을 알 수 있다.

**2.2 센서 탑재 로봇을 이용한 사고 감지 및 대응**

독일 Tübingen 대학에서는 로봇 플랫폼을 이용하여 실내 환경에서 에탄올 증기의 누출 시 탐지하기 위한 방법과 검증 결과를 제시하고 있는데, 나선이동 방식이 아닌 직선 이동방식을 채택하여 사용하였다. Fig. 1의 이동 로봇 ARTHUR은 4륜의 스키드 스티어링을 채택하였으며, 미리 정의된 경로(직사각형 나선형)를 따라 이동하며, 누출 감지를

위한 nose를 통해 위치 파악 능력을 향상 시켰다. 또한, 8개의 단일 가스 센서의 측정 값을 수집하고 이를 호스트 컴퓨터에 전송하는 소형 장치가 탑재되어 있다. 기본 사양은 850 MHz Pentium III double processor를 적용, 수십개의 센서(sonar, GPS, laser, range scanner, stereo camera 등)로 구성되어 있다[6]. 본 연구에서는 이동형 로봇에 caterpil-



Fig. 1. Gas tracker robot developed in Univ. of Tübingen [5]

Table 2. OPRoS vs. ROS [8]

Item		ROS	OPRoS
Robot	Architecture		
	Operating M/W size	13.69 MB	0.35 MB
Developing tool	Component/Node editor	Linux-based	Intrinsic editor
	Component composer	Result-view only	Intrinsic editor
	Task(app) editor	None	Intrinsic editor
	Simulator	None (Interactive open source code)	Intrinsic simulator (Interactive open source code)
	Validation tool	None	Intrinsic tool
	Debugger	LINUX debugger	Intrinsic debugger

lar를 적용하고, 능동적 누출원 추적의 가능성을 살펴보기 위해 스케일을 축소, open source platform 중에 하나인 Mindstorms NXT를 이용하여 prototype을 구현하였다. 가스 감지를 위한 센서는 전면부 돌출형으로 설치하여 휘발되는 물질의 탐지를 용이하게 설계하였다.

### 2.3 로봇 구동 소프트웨어 플랫폼

로봇 구동을 가능하게 하는 소프트웨어 플랫폼에는 여러 가지 프로그램들이 개발되어 있다. 전문가적 도구를 사용해야 하는 ROS (Robot Operating System, <http://www.ros.org/>), OROCOS (Open Robot Control Software, <http://www.orocos.org/>)와 같은 플랫폼과 더불어 OPRoS (Open Platform for Robotic Services, <http://oprospac.e.org>)는 오픈소스 운영체제인 리눅스뿐만 아니라 많이 사용되고 있는 윈도우, 실시간 운영체제까지 지원한다 [7]. 복잡한 로봇소프트웨어 프로그래밍을 가능한 한 단순화하고 많은 사용자들에게 친화적인 개발 도구 요소와 자동화 기능을 극대화한, 국산 개방형 로봇서비스 플랫폼인 OPRoS는 로봇소프트웨어모듈인 OPRoS 컴포넌트와 이를 안정적이게 동작시켜주는 OPRoS 프레임워크, 그리고 OPRoS 컴포넌트를 개발, 테스트하고 가상로봇으로 가상환경에서 구동시켜볼 수 있는 체계적인 통합개발 도구 이다 (Table 2 참고). 운영체제인 OPRoS 프레임워크는 로봇에서 동작하고 개발도구는 PC 등 로봇 밖에서 동작하는 것을 기본으로 한다 [8].

## III. 이동식 로봇기반 누출감지 · 추적시스템 설계

### 3.1 로봇의 누출추적 이동 알고리즘 및 시스템 설계

로봇이 누출지점인 목적노드까지 최단시간에 이동하기 위해서는 주변 환경의 조건이 중요한 역할을 한다. 경로 계획을 작성하기 위해서는 테스트

베드에서 고정된 장애물의 위치와 로봇의 작업 공간에 관한 데이터, 그리고 알고리즘을 사용한다[9]. 이는 로봇이 실제 센서 또는 실시간 데이터 수집 장비를 통해 구현되며[9], 이러한 개념을 구현하기 위해서는 정교한 모델링이 필요하다. 정적 장애물이 배치된 테스트 베드에서 로봇의 이동을 실현하기 위해 메트릭 구성 공간에 적용 할 수 있는 가장 널리 알려진 경로 검색 중 하나인 A\* 알고리즘을 적용하였다. 구성 공간의 각 셀은 값에 의해 평가되기 때문에 A\* 알고리즘은 best-first 알고리즘으로 정의된다[10]. 일반적으로 목표 상태에 도달하기 위한 휴리스틱 거리는 선택된 초기 상태에서 목표 상태까지의 경로를 나타낸다. Fig. 2와 같이 초기 상태에서 가장 작은 값의 셀이 시퀀스를 따라 다음 셀을 선택하여 목표 거리를 채택, 수정하거나 다른 거리를 추가할 수가 있다.

로봇은 그리드(grid) 단위로 움직일 수 있다고 가정한다. 로봇은 누출지점의 목적 노드까지 도달하기 위해서는 가장 적은 수의 그리드 셀(Grid cell)을 포함하는 경로를 결정해야 한다[12]. Fig. 2는 간단한 A\* 알고리즘을 통해 장애물을 배열 후, heuristic search, 1 weight를 주고 시뮬레이션 한 결과 이다. 이는 heuristic 함수를 사용하고 최적의 솔루션[13]을 얻기 위해 작업 공간의 각 노드를 계산하게 된다. 작업공간에서 로봇의 경로에 고정된 장애물의 회피를 위해 초음파 센서를 사용하여 실시간 감지가 이루어지도록 하였으며, 동시에 장애물까지의 거리 측정되도록 하였으며, 초음파센서가 받아들이는 시간 정보를 거리정보로 환산하여 로봇이 장애물과의 거리를 측정할 수 있게 하였다. 예를 들면, 로봇이 경로를 따라 이동 중 장애물 발견 시에 로봇은 스스로 360도 8방위에 대한 장애물을 점검하게 된다. 또한 동시에 측정된 가스 농도의 수준을 판단하여 가스 농도 수준이 높은 쪽으로, 장애물을 회피하여 로봇이 이동, 그 결과로 최종 목표노드까지 진행할 수 있도록 본 시스템을 설계하였다.

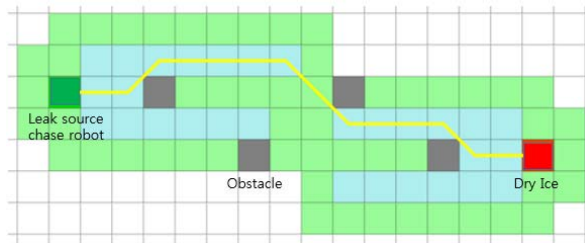


Fig. 2. A\* algorithm simple test path finding [11].

**Table 3.** Concentration measure and target-search algorithm of the robot Pseudocode

```

Let the openList and closedList equal empty list of nodes
Put the startNode on the openList (leave it's f at zero)
while the openList is not empty {
    let the currentAngle(coordinate, direction, time=0), concentration measurement 8 directions equal node of least f value
    remove the currentAngle from the openList
    add the currentAngle to the closedList
}
// moving direction for path finding
measure the concentration of current grid and eight grids adjacent to current grid
calculate the concentration gradients( $G_c$ ) of the current grid and the eight adjacent grids,  $G_c = [g_1, \dots, g_8]$ 
if any  $g_i > 0$ , ( $g_i \in G_c$ )
    if no obstacle in the grid of  $\text{argmax}(G_c)$ 
        then move to the grid of  $\text{argmax}(G_c)$ 
    if no obstacle to the current direction
        then move to the preset direction in x step

while obstacle detection in 8 directions from the currentAngle {
    if currentAngle is the goal
        Done ! You're found the end ! Backtrack to get path
}

// Create the f, g, and h values
let the children of the currentAngle equal the adjacent nodes
for each child in the children {
    if child is in the closedList
        continue to beginning of for loop
    child.g = currentAngle.g + distance between child and currentAngle
    child.h = distance from child to end
    child.f = child.g + child.h
}
// Child is already in openList
if child.position is in the openList's nodes positions {
    if the child.g is higher than the openList node's g
        continues to beginning of for loop
}

// Determination of reaching to the target
if currentValue is the highest among measured concentrations {
    then determine reaching to the leak source
} else continue search of the moving direction
if(currentAngle = ! nodeGoal) exit with error (the openList is empty)
    
```

### 3.2 로봇 하드웨어 설계

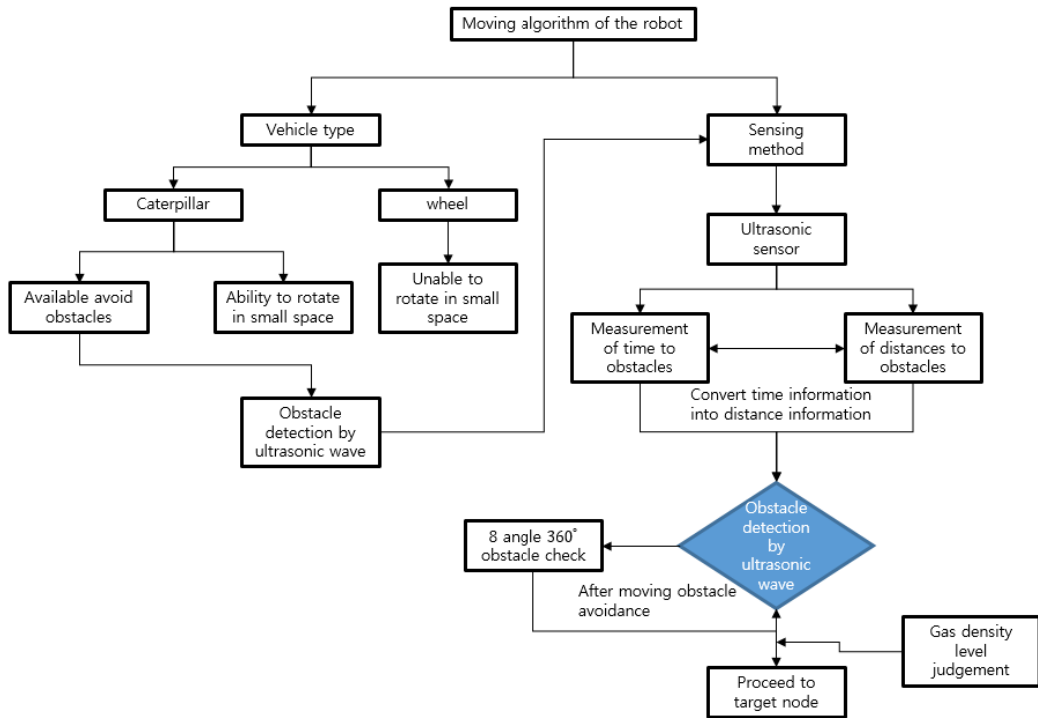
가스 누출 추적을 위한 테스트 베드 로봇의 구성 및 사양은 아래 표와 같다. 독일 Tübingen 대학의 mobile robot 의 재원 사항을 참고하였으며[5], (Tubingen work place : 12.9 m × 7.10m, 본 연구 work place: 1.8m × 1.0m), 실험 공간의 한계로 인해 로봇의 작업 공간 범위 축소를 최소한의 구동 및 가스 감지를 목표로 진행하였다. Table 4는 실험 로봇 사양으로 32-bit ARM7 microprocessor와 256 Kbytes FLASH, 64 Kbytes RAM을 사용하였으며, 구동 방식은 caterpillar 시스템을 적용하였

다. 또한 3개의 Ultrasonic Sensor와, 카메라, T-IR sensor, Interactive Servo Motors를 사용하여 로봇의 경로에 따른 가스 탐지를 위한 최적 경로를 살펴보았다.

이동플랫폼은, 무한궤도 방식을 택하였다. 무한궤도 방식은 2개 이상의 바퀴와 그 둘레에 두른 판을 사용하여 추진하는 방식으로 이동성과, 경제성, 시스템 컨트롤과 안전성에 있어서 효과적인 방식이다[14]. 무한궤도 시스템의 이동성의 경우는, 무한궤도는 앞바퀴와 뒷바퀴가 밴드로 연결되어 있어, 모터의 작은 회전에도 많은 각을 변경하여 이

**Table 4.** Technical specifications and features of the proposed gas sensing robot

Technical specifications	·32-bit ARM7 microprocessor ·256 Kbytes FLASH, 64 Kbytes RAM ·Bluetooth wireless communication (Bluetooth class II V2.0 compliant) ·Four input ports, six-wire digital platform ·Three output ports, six-wire digital platform ·Loudspeaker, 8 KHz sound quality ·Power source: Rechargeable lithium battery or six AA Batteries	
Features	Item	No. of items
	NXT(CPU)	1
	Ultrasonic sensor	3
	Camera	1
	T-IR	1
	Interactive servo motors	2
Functions	·Interactive servo motors control with sensors ·Signal processing of sensors by CPU	



**Fig. 3.** Flowchart of moving system of robot

동이 가능하다. 이는 위험물저장시설에서의 불특정한 장애물이 발견되었을 경우, 장애물을 효과적으

로 회피하여 이동 가능한 것이 큰 장점이다[14].

### 3.3 로봇 탐재 센서

총 3개의 초음파를 이용하여 장애물 회피 시스템을 구현하였다. 초음파 센서는 장애물을 추적하는데 있어 효과적인 센서로 사용되기에[15], 초음파를 발생시켜, 장애물에 도달 후에 다시 반사되어 돌아오는 시간을 가지고 거리를 계산하였으며, 초음파 센서를 3개를 사용하여, 넓은 각을 측정 할 수 있도록 설계하였다. Thermo-IR sensor(T-IR)를 사용하여, 데모버전에서 누출추적을 진행하였고, 실제 실험에서 농도구배에 대한 주기 분석이 어려워 검증은 온도 구배에 대해 추적하는 방식으로 검증하였으며, 이를 통하여 온도 차이에 따른 온도 레벨을 계산할 수 있는 T-IR센서를 사용하였다[16,17]. 감지를 통해 들어온 데이터는 처음 로봇의 출발점에서 8방위(360도) 온도 레벨을 체크하여, 온도 레벨이 가장 낮은 곳을 목적노드로 진행하도록 시스템을 설계하였다. 이는 위에서 언급한 장애물 회피 시스템과 복합적으로 사용되도록 하기 위함이다. 또한 기존에 개발되어있던 어플리케이션을 이용하여 NXT(CPU)의 WiFi기능을 통해 영상 정보 및 방위 정보를 조업자의 PC로 전송 받도록 설계하였으며, 공장 내부의 Wi-Fi망을 이용하여 오피스에 있는 조업자의 PC로 영상 및 방위 정보를 전송 가능하게 하였다. 실시간 영상정보 및 방위정보는, 누출원을 추적하는데 있어서, 누출원의 위치, 상태, 형태 등의 정보를 실시간으로 전달받는데 있어 확실하고 정확한 정보를 전달할 수 있다.

## IV. 제안시스템의 구현 및 성능 검증

본 연구에서는 NXT-Platform등 오픈 플랫폼을 참고하여, 하드웨어의 사양에 충실함을 통해 로봇을 활용한 누출감지 방법론 설계에 초점을 두고, NXT-Platform을 활용하여 축소모형을 구현하는데 관심을 가졌다. 많은 오픈소스 로봇 플랫폼이 존재하지만 NXT-Platform은 사용자의 접근성이 뛰어나며[17], 활용도가 높기 때문에 NXT-Platform을 탑재하고 있는 Mindstorms를 이용한 prototype을 구현하였다.

### 4.1 알고리즘 구현 및 Mindstorms porting

본 연구에서 사용한 Mindstorms에는 통상 Labview로 설계를 진행하는데 Labview로는 상세한 로봇의 구현이 이루어지기 어려워 구현 및 코딩 가능한 RobotC 프로그램으로 선정하여 알고리즘을 구현 하였고, 누출원 추적 로봇에 porting 하였다. porting 방법으로는 누출원 추적 로봇에 내장되어

있는 USB포트를 이용하여 PC와 연결, Labview를 이용하여 포팅 후 누출원 추적 로봇에서 구동하였다.

### 4.2 시뮬레이션을 통한 검증

본 연구에서는 위험물 저장 시설 내에서 보관중인 드럼통에서 공기보다 비중이 큰 무거운 가스의 누출이 진행되며, 기존 고정식 센서 설비는 상단에 장착이 되어 있어 누출로 인한 사고 확인이 어렵고, 정확한 감지가 불가능한 상황으로 가정하였으며, MATLAB을 이용하여 CO<sub>2</sub>농도에 따른 로봇의 이동경로를 시뮬레이션 하였다.

본 연구에서는 검증을 위하여 Fig. 5과 같이 가로 1,800mm, 세로 1,000mm로 공간을 만들고 장애물의 크기는 200×200mm로 제작하여 검증하였다. 또한 제작한 누출원 추적 로봇은 가로 260mm, 세로 200mm로 제작하였다.

### 4.3 MATLAB을 이용한 CO<sub>2</sub> 농도에 따른 로봇의 이동경로

가스 누출 탐지를 위한 로봇의 구조화한 공간을 MATLAB를 이용하여 시뮬레이션 한 결과 Fig. 6과 같이 로봇이 CO<sub>2</sub>의 농도 분포에 따라 이동한 경로를 확인하였다. 시뮬레이션은 장애물이 각각 1개 또는 2개일 경우를 가정하였으며, 농도분포가 진행되는 누출원을 향해 진행하도록 시뮬레이션을 진행하였다.

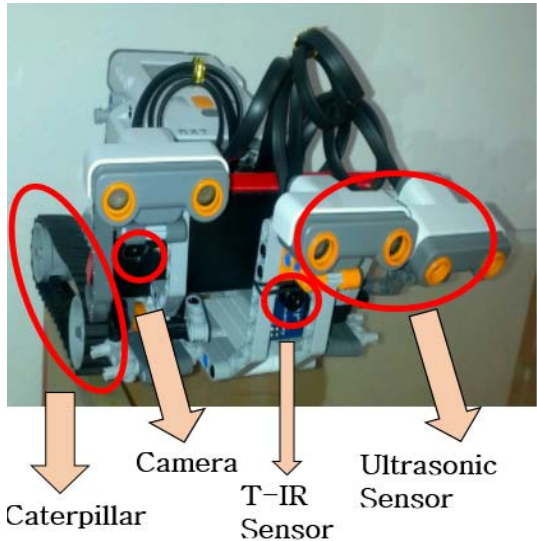


Fig. 4. Porting and designed leak source, tracker robot



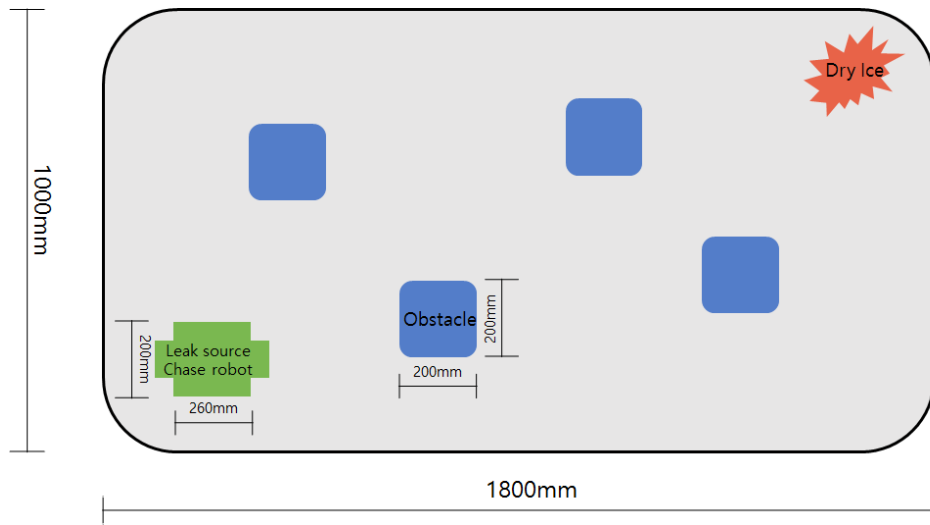


Fig. 5. Test experiment layout

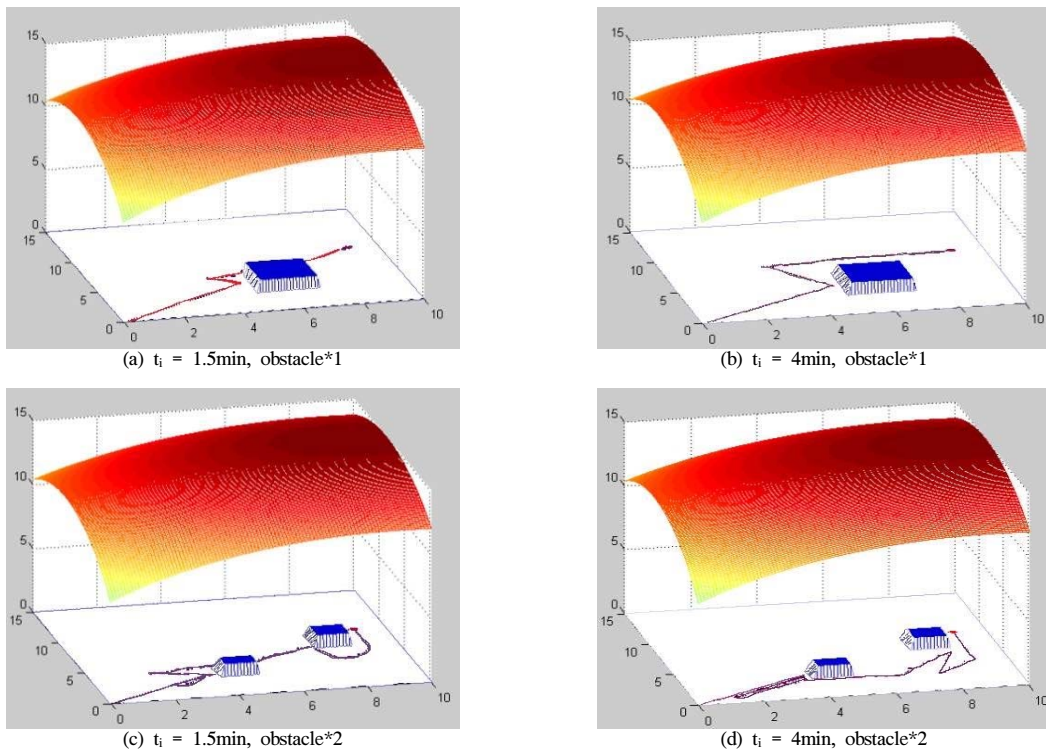


Fig. 6. Simulation of concentration gradient, obstacles, and measurement rate path robot (1/ti)

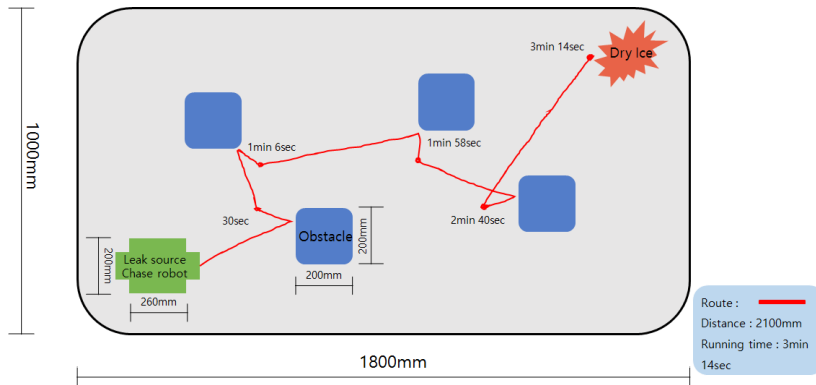
본 연구에서는 2가지의 경우를 가정하여 실행하였는데, 하나는 1.5min마다 가스의 농도를 감지

하는 시뮬레이션과 또 다른 하나는 4min마다 가스의 농도를 감지하는 시뮬레이션을 개별적으로 진



**Table 5.** The result of experiment

Robot path to obstacle	Time to reach	Verification process / error rate
1 <sup>st</sup> Obstacle	30 sec	
2 <sup>nd</sup> Obstacle	1 min 6 sec	
3 <sup>rd</sup> Obstacle	1 min 58 sec	
4 <sup>th</sup> Obstacle	2 min 40 sec	
Total	3 min 14 sec	20 / ±10



**Fig. 7.** Test experiment using leak source tracker robot

행하였다. 이는 제한된 공간에서는 누출 직경, 누출 속도 및 시간에 따른 확산 농도가 달라지는 현상을 고려하였으며, 농도 탐지와 장애물 등의 제한 조건과 이동로봇의 기능적 한계로 인해, 시뮬레이션 결과, 걸리는 시간의 대표 값을 정하였다. 첫 번째 1.5min마다 가스의 농도를 감지하는 시뮬레이션과 두 번째 4min마다 가스의 농도를 감지하는 시뮬레이션의 로봇 이동경로를 분석한 결과, 첫 번째 1.5min마다 가스의 농도를 감지하는 시뮬레이션이 두 번째 경우 보다 누출원까지 도달하는 시간이 훨씬 단축되었다. 이에 따른 결과는 처음 누출원 추적 로봇은 1초당 약 150mm를 이동하였으며, 두 번째에는 4min 동안(장애물감지 포함) 36,000mm를 이동하게 되었는데, 36,000mm를 운행하는 동안에는 가스의 농도를 감지하지 못하기 때문에, 그에 따라 비효율적 운행에 의해 누출원으로 도달하는 시간이 증가하게 되었다. 따라서, 본 시뮬레이션 결과를 바탕으로 한, 결론은 1.5min마다 8방위로 가스 농도를 측정(장애물감지 포함)하는 것이 적합하다는 결과를 도출하였다. 또한 시뮬레이션 시 누출원으로 부터 거리에 반비례하게 인위적으로 설정

한 농도구배에서 다음의 함수식을 이용하여 계산하였다.

$$(x - x_p)^2 + (y - y_p)^2 + (z - z_p)^2 = r^2 \quad (1)$$

$$z_p = 0 \quad (2)$$

$$z^2 = r^2 - (x - x_p)^2 - (y - y_p)^2 \quad (3)$$

$$z = \pm \sqrt{r^2 - (x - x_p)^2 - (y - y_p)^2} \quad (4)$$

#### 4.4 축소 모형을 통한 실험실환경 검증

본 연구에서는 공개된 로봇 플랫폼을 이용하여 누출원 추적 로봇을 실제 제작하여 본 연구에 대하여 검증하였다. 실제 검증에서 농도구배에 대한 주기가 어려워 온도구배에 대하여 누출원을 추적하는 방식으로 검증하였다. 검증방법은 실제 제작한 1,800mm×1,000mm의 공간속에 4개의 장애물을 설치하고 온도 구별이 가능한 드라이아이스를 이용하여 검증하였다. Table 5는 휘발 물질의 농도구배를 추적하여, 장애물을 회피하여 최종 목적지

까지 걸린 시간에 대한 결과이다.

첫 번째 장애물까지의 이동시간과 농도측정을 위하여 30초가 경과 되었고, 두 번째 장애물까지의 이동시간과 농도측정까지 1분 6초가 경과되었다. 세 번째는 1분 58초, 네 번째는 2분 40초가 경과되었으며, 실제 누출원으로 가정한 드라이아이스까지는 총 3분 14초가 소요되었다. 검증과정은 총 20회 실시하였으며 시간 오차는  $\pm 10$ 초가 발생하였다.

로봇 플랫폼을 이용한 누출원 추적 로봇과 검증 공간의 공개된 Wi-Fi를 이용하여 PC용 프로그램과 연동하여 실시간 영상정보 및 방위정보를 확인 가능하도록 설계 하였다. 실시간 영상정보 전송으로 인하여 조업자는 안전한 지역에서 PC를 통해 현장의 상황과 로봇의 이동경로, 누출원의 위치, 누출원의 종류, 누출원의 상태를 확인할 수 있으며, 방위정보를 통하여 로봇의 현재 진행방향을 확인할 수 있다. 이를 통하여 사고현장의 정확한 정보전달이 가능하다.

## V. 결 론

기존 누출원의 추적은 배열방식으로 설치되어 있는 센서나 미리 예상한 누출원 주위에 설치한 센서에 의해서만 피동적으로 이루어져 왔다. 본 연구에서는 이동식 로봇을 이용한 능동형 A\* 경로 planning 기법을 기반으로 누출원 추적 시스템을 설계하고 시스템의 하드웨어 구성과, 농도감지, 장애물회피, 이동방향 설정으로 이루어진 추적 알고리즘을 제시하였다. 위험물 저장시설에서의 누출감지 및 누출원 추적 시스템 설계하였는데, 구성요소로는 크게 이동과 장애물 회피, 농도 분석, 그리고 영상 정보 전송으로 이루어져 있다. A\* 알고리즘을 이용하여 목적노드까지 최단시간 안에 이동 가능한 알고리즘을 제시하였다. 또한 초음파 센서를 사용하여 장애물에 대하여 실시간 감지가 이루어지도록 설계하고, 동시에 초음파 센서가 받아들이는 시간에 대한 정보를 거리정보로 환산하여 로봇이 장애물과의 거리를 측정할 수 있도록 하였으며, 측정된 농도 레벨분석이 가능하게 하기 위한 탐지 절차를 제안하였다. 이는 MATLAB 시뮬레이션 프로그램을 통하여 가스상의 농도 확산에 따른 소요시간 및 로봇의 이동 경로를 확인할 수 있었다. 현재는 비난류성 농도 분포를 가정하고 진행하였으나, 가스 누출시 이동식 감지시스템을 통하여 정확한 누출원 추적이 가능하며 실시간 영상정보 전송을 통하여 현장의 상황과 로봇의 이동경로, 누출원의 위치, 누출원의 종류, 누출원의 상태를 보다

정확하게 파악 할수 있는 계기를 마련하였다. 향후 본 연구의 결과는 인적 오류에 의한 재난을 막고, 4차산업에서 주목 받는 드론의 활용성에 확대와 탐지로봇간의 협업을 통해 미래 재난을 방지할 수 있는 계기가 될 것이며, 향후 조업자의 누출원 탐지에 관한 안전 훈련에도 활용될 것으로 기대 된다.

## 감사의 글

본 연구는 정부(국토부)의 재원으로 햅틱기반 안전 훈련 시스템의 지원을 받아 수행된 연구임 [MPSS-사회-2014-38]

## REFERENCES

- [1] 김기태, "화학물질 사용현황과 독성평가", 환경부, (2016)
- [2] 송창영, 양병수, "유해화학사고의 효과적 대응을 위한 방재플랫폼 구축 연구: 여수국가산업단지를 중심으로", 한국방재학회 17(2), 93-99, (2017)
- [3] DARPA Robotics Challenge <https://www.darpa.mil/program/darpa-robotics-challenge>, (2018)
- [4] Pal-Stefan Murvay, Ioan Silea, "A survey on gas leak detection and localization techniques Review", *J. Loss Prevention Proc. Ind.*, 25(6), 966-973, (2012)
- [5] Michael Wandel, Achim Lilienthal, Tom Duckett, Udo Weimar, Andreas Zell, "Gas Distribution in Unventilated Indoor Environments Inspected by a Mobile Robot", *IEEE International Conference on Advanced Robotics (ICAR)*, Coimbra, Portugal, (2003)
- [6] A. J. Lilienthal, M. R. Wandel, U. Weimar, and U. Weimar, and A. Zell., "Experience using gas sensors on an autonomous mobile robot", *proceedings of EU-Robot, 4<sup>th</sup> European workshop on advanced mobile robots*, 1-8, (2001)
- [7] Open Platform for Robotic Services (OPRoS), <http://www.oprospace.org>
- [8] 박홍성, 김미숙, "오픈 소스 개방형로봇플랫폼 OPRoS의 로봇소프트웨어개발도구", 월간 로봇 8월, (2012)
- [9] Ismail, AL-Taharwa, Alaa Sheta, and Mohammed Al-Weshah, "A mobile robot path planning using genetic algorithm in static environment", *Journal of Computer Science* 4.4,

- 341-344, (2008)
- [10] Frantisek Duchon, Andrej Babinec, Martin Kajan, Peter Beno, Martin Florek, Tomas Fico, Ladislav Jurisica, "Path planning with modified A star algorithm for a mobile robot", *MMaMS*, 59-69, (2014)
- [11] Xueqia Xu, PathFinding, <http://qiao.github.io/PathFinding.js/visual/>, (2017) (accessed 02 November 2018)
- [12] Seungho Lee and Teresa M. Adams, "A Path planning algorithm for automated construction equipment", *automation and robotics in construction*, XVI.CC3M, (1999)
- [13] Dave Ferguson, MaximLikhachev, and Anthony Stentz, "A guide to heuristic based path planning", *ICAPS*, (2005)
- [14] Giuk lee, Jubhwan Park, Hwang Kim, Taewon Seo, "Wall climbing robots with track-wheel mechanism", *ICMLC*, (2011)
- [15] Anish Pandey, "Mobile robot navigation and obstacle avoidance techniques: A review", *International Journal of Robotics and Automation*, (2017)
- [16] Lidice E. Castro Jimenez and Edgar A. Martinez-Garica, "Thermal image sensing model for robotics planning and search", *Sensors* 16(8), (2016)
- [17] Ibarguren, A., Molina, J, Susperregi, L., Maurtua, I., "Thermal tracking in mobile robots for leak inspection activities", *Sensors* 13, (2013)
- [18] Ning Gui, Vincenzo De Florio, Chris Blondia, "Run-time compositional software platform for autonomous NXT robots", *IJARS*, (2011)