

IoT를 이용한 조립 이중 파이프 시스템

이지민¹, 이창형¹, 오민철¹, 조상진², 조 영¹ 

¹ 울산과학기술대학교 전기전자공학부

² 주식회사 지메이드

IoT Using Assemble Double Pipe System

Ji-Min Lee¹, Chang-Hyoung Lee¹, Min-Cheol Oh¹, Sangjin Cho², and Young Cho¹

¹ Department of Electrical and Electronic Engineering, Ulsan College, Ulsan 44601, Korea

² ZMADE Inc., Ulsan 44603, Korea

(Received September 2, 2024; Revised September 19, 2024; Accepted September 20, 2024)

Abstract: Hazardous gas leakage incidents rank among the most serious safety accidents, leading to significant loss of life, extensive property damage, and severe environmental pollution. This paper describes an innovative IoT-based Assembly Double Pipe System (IADPS) designed for the prevention, early detection, and automated isolation of toxic gas leaks. The proposed system features a double-layered pipe design, with nitrogen charged between the inner and outer pipes, and gas detectors installed at strategic locations. This configuration is intended to prevent pipe corrosion, suppress ignition caused by escaping gas, and facilitate the early detection of gas leaks, thereby mitigating the risk of safety accidents. Furthermore, the system includes a comprehensive real-time monitoring system for pipe integrity and gas leakage, as well as an automated gas leakage detection and isolation system to quickly respond to any incidents.

Keywords: Double-layered pipe, Gas leakage, Automated gas leakage detection and isolation system, Real-time monitoring system

산업 현장에서 가스 누출은 인명 피해와 환경 오염 그리고 막대한 경제적 손실을 초래하는 심각한 안전사고로 이어질 수 있으므로 가스 누출을 신속히 감지하고 대응하는 것이 무엇보다 중요하다.

화학물질 안전원에 의하면, 다양한 화학물질 관련 사고들 중 가스 유출 및 누출로 인한 사고가 가장 빈번한 것으로 조사되었다 [1]. 이는 파이프 라인에 대한 철저한 관리가 필요함을 방증하는 것이며 파이프 라인 안정성에 대한 연구가 꾸준히 발표되고 있는 이유이기도 하다.

✉ Young Cho; ycho@uc.ac.kr

Copyright ©2025 KIEEME. All rights reserved.
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

천연가스 연료선박의 고압 이중 배관 설계를 위한 열-구조 해석에 관한 연구 [2]와 도시가스 배관의 지반 침하를 고려한 롱엘보(long elbow) 타입 PE 이음관 안전성 평가에 관한 연구 [3]는 배관의 구조와 배관에 가해지는 열과 응력 간 상관관계를 해석함으로써 배관의 안정성 개선의 기초자료를 제시하였다. 또한, 온도, 압력, 누출 물질 등 다양한 누출 조건을 고려하여 배관 누출에 의한 가스 폭발사고에 대한 누출 시나리오 선정하고 사고 결과를 분석하여 사고 피해를 예측하는 연구 [4]와 가스 누출 시, 압력 변화에 따른 상관관계를 통해 실시간으로 누출 지점을 예측하기 위한 실험적 연구 [5] 등 가스 누출 이후 대응에 대한 연구도 수행되었다. 더불어 다양한 기술이 적용된 가스 누출 모니터링에 관한 연구도 활발히 진행되고 있다. 가스 압력

데이터를 와이파이 모듈로 수집해 가스 누출을 확인하므로, 사용자의 편의와 주기적인 안전 점검 및 관리가 이루어지는 시스템을 가스 누출 체크를 위한 IoT 검사 방법에 관한 연구 [6]에서 제안하였다. 또한, 센서의 물리적 특성에 의한 한계를 극복하며 신뢰성 높은 모니터링 시스템을 구축하기 위해 센서 어레이 구조와 인공지능 기반 알고리즘을 적용하여 반도체식 가스 센서의 단점을 보완하는 방법도 연구 [7]되고 있다.

본 논문에서는 유독가스가 외부로 누출되는 문제를 효과적으로 해결할 수 있는 이중 배관 구조와 조립식 파이프 시스템을 적용한 가스 센서 네트워크용 IoT 시스템을 설계하여 유독가스의 누출을 실시간으로 감지하고 대응할 수 있는 방안을 제안한다.

이 시스템은 유독가스의 흐름을 제어하고, 누출을 방지하며, 가스의 실시간 모니터링을 통해 조기 경고와 신속한 대응이 가능하도록 설계되었다.

이를 위해, 본 시스템은 여러 핵심 구성 요소로 구성된다. 주요 구성 요소에는 외부 및 내부 파이프, 가스켓, 버터플라이 밸브, 질소가스 충전형 팽창 가압 장치, 그리고 여러 센서가 포함된다(그림 1). 먼저 유독가스가 이동경로인 내부 파이프와 내부 파이프에서 유출된 유독가스를 외부로 유출되지 않도록 외부 파이프로 구성하였으며 외부 파이프는 부분적으로 교체할 수 있도록 좌우 및 상하로 조립되도록 설계하였다. 뿐만 아니라 내부 파이프가 외부 파이프에 있는 내부 파이프 지지대에 의해 안정적으로 고정되

도록 설계하였다. 또한, 버터플라이 밸브는 유독가스의 흐름을 제어하기 위해 구성하였다. 파이프 조립 부분에서 추가적으로 가스 차단하기 위해, 외부 파이프 좌우의 이음새 부분은 원형 가스켓으로 가스 차단하고 일자 가스켓은 조립을 위해 상하부의 이음새 부분에 가스를 차단할 수 있도록 구성하였다. 질소가스 충전형 팽창 가압 장치는 질소를 항상 순환시켜 유독가스의 감지 속도를 높여 신속한 대처가 가능하도록 설계하였고, 또한 파이프의 부식을 방지하도록 설계하였다. 하지만 질소가스 충전형 팽창 가압장치를 구하는 데 어려움이 있어 에어건으로 대신하여 사용하였다.

센서부는 일산화탄소 감지 센서(MQ-7), 서보 모터(SG90), 부저 모듈(ELB030301), 그리고 ESP-32 보드가 사용되었다(그림 1). 파이프 이음새마다 설치된 일산화탄소 감지 센서는 유독가스 농도를 실시간으로 감지하기 위해 구성하였다. 마지막으로 서보 모터와 부저 모듈은 각각 버터플라이 밸브를 회전시켜 가스 유입을 차단하고 경고음을 울려 가스 누출 경보를 발령하기 위해서이다. 모든 센서와 데이터를 제어하고 수집하는 역할은 ESP-32 보드가 담당하며, 이 보드를 통해 관리자는 실시간으로 가스 누출량을 모니터링할 수 있다.

소프트웨어는 이러한 하드웨어를 제어하고, 가스 유출 상황을 실시간으로 감지하며 데이터를 관리하는 중요한 역할을 한다. 소프트웨어는 1초 간격으로 모든 보드의 상태를 업데이트하고, 모든 보드는 LefGas.getPPM과

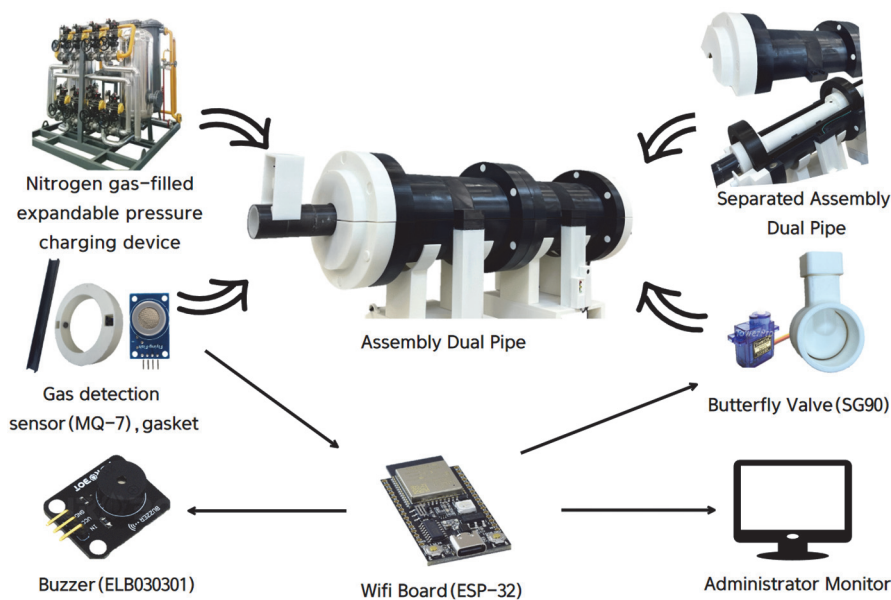


Fig. 1. The hardware of the assembled double pipe.

RightGas.getPPM 함수를 통해 가스 감지 센서의 데이터 값을 읽어 온다. 데이터 값을 읽어 온 보드는 esp_now_send (broadcastAddress) 함수를 통해 정보를 센터보드로 넘겨준다 [그림 2(b), 그림 3]. 센터 보드는 항상 모니터링이 가능하도록 Client Print 함수를 통해 서버에 정보를 출력한다 [그림 2(a), 그림 3]. 이와 같은 과정은 보드가 작동을 시작하는 순간부터 이루어지며, 전체 시스템의 초기화 및 감지 절차로 이어진다. 보드에 전원을 넣으면 먼저 시스템을 초기화 후, 각 보드의 정보를 수집하고 센서를 통해 유독가스를 감지한다. 가스 농도가 200 ppm이 넘는 보드가 없을 경우 보드는 초기화한다. 가스 농도가 200 ppm을 초

과하는 순간, 소프트웨어는 이를 기록하고 해당 보드 위치를 저장한다. 보드에 가스 농도가 200 ppm이 넘는 보드들이 있는지 확인하고, 가스 농도가 200 ppm이 넘는 보드가 있을 경우 부저를 울려 경보를 발령 후, 버터플라이 밸브를 작동시켜 추가적인 가스 유입을 차단시킨다. 이 과정에서 실시간으로 모니터링이 가능하도록 시스템 상태를 지속적으로 업데이트하며, 가스 누출에 신속하게 대응할 수 있는 기능을 설계하였다.

이와 함께, 유독가스의 감지 및 차단 시스템은 다음과 같은 구조적 특징을 가지고 있다. 내부 파이프와 이음새는 유독가스가 흐르는 주요 통로로, 외부 파이프의 각 이음새마

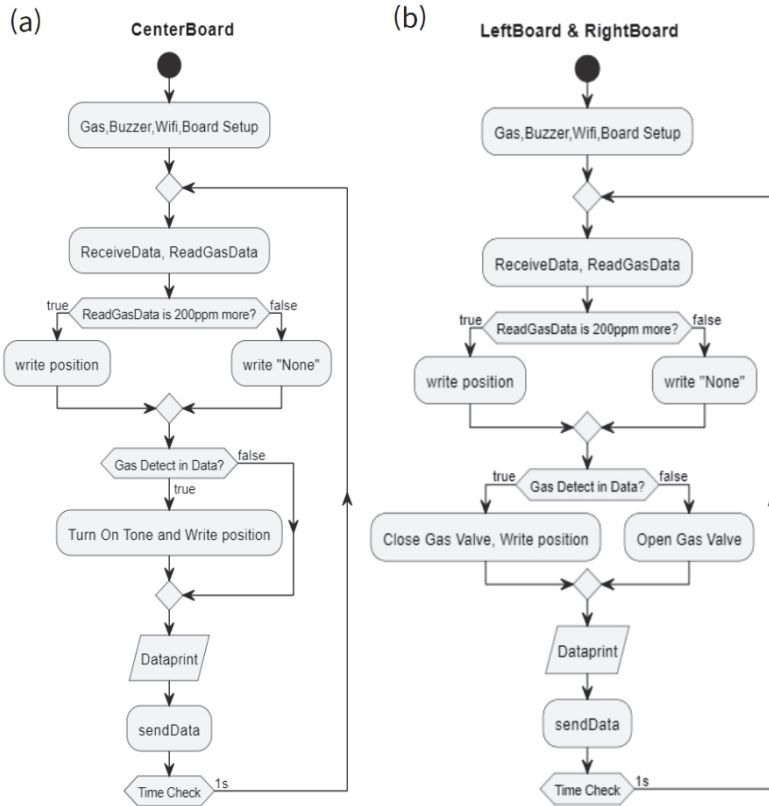


Fig. 2. The software of the assembled double pipe: (a) the software of the center board and (b) the software of left board and right board.

```

infoData[Center].LeftGas = LeftGas.getPPM();
infoData[Center].RightGas = RightGas.getPPM();

esp_err_t result1 = esp_now_send(broadcastAddress1,
    (uint8_t *) & infoData[Center], sizeof( infoData[Center]));
esp_err_t result2 = esp_now_send(broadcastAddress2,
    (uint8_t *) & infoData[Center], sizeof( infoData[Center]));

Print();
ClientPrint();
    
```

Fig. 3. Code using 'LeftGas.getPPM', 'RightGas.getPPM', 'esp_now_send(broadcastAddress)', 'ClientPrint', and 'Print'.

다 들어가는 원형 가스켓에 일산화탄소 감지 센서를 설치하였다(그림 4). 각 외부 파이프의 좌우에 존재하는 이음새마다 설치한 가스 감지 센서는 가스 농도를 실시간으로 측정하여 누출이 발생하면 감지할 수 있도록 배치하였고, 내부 파이프와 외부 파이프의 사이를 질소가스로 순환시켜 더욱 신속한 감지가 가능하도록 설계하였다.

질소가스 충전형 팽창 가압 장치에 의해 순환되는 질소는 화학적으로 매우 안정적인 불활성 기체로, 산화 반응에 참여하지 않기 때문에 화학적 폭발을 예방할 수 있다. 또한, 공기 중의 산소 농도를 낮출 수 있으며, 화재와 폭발의 가능성을 줄이고, 금속과 반응하지 않기 때문에 부식을 방지할 수 있다. 또한, 질소 충전 및 순환 장치는 항상 질소를 내부 파이프와 외부 파이프 사이를 순환시켜 유독가스 누출 시 빠르게 누출된 가스를 순환시켜 다른 가스 감지 센서들도 가스를 감지할 수 있도록 설계하였다.

이와 더불어, 시스템의 통신과 모니터링 기능도 강화되었다. 아두이노 센서 프로그램에서 지원하는 ESP-NOW 라이브러리를 이용하여, 여러 ESP 보드끼리 N:N 통신이

가능하도록 설계하였다. 이를 통해, 1:1 통신이 아닌 대다수 통신 방식으로 ESP 보드끼리 서로 정보를 주고받을 수 있으며, 와이파이 통신을 사용하여 어디에서나 실시간 모니터링이 가능하도록 설계하였다. 또한, 가스 감지 센서는 가스의 농도를 실시간으로 측정하여 ESP 보드로 데이터 값을 전송하고, ESP-32 보드는 이 값을 받아 가스 감지량을 파악하여, 네트워크 기능을 통해 관리자에게 실시간으로 가스 누출 상황을 전송한다. 또한, ESP-32 보드의 Mac address를 통해 관리자는 실시간으로 가스의 유출량을 모니터링 할 수 있다 [그림 5(a), (b)].

이 시스템의 설계와 기능이 이론적으로 검증된바, 실제 환경에서의 적용 가능성을 확인하기 위해 실험을 진행하였다. 현재 파이프의 프레스 및 용접 공정을 이용한 제작 과정에 어려움이 있어, 3D 프린터로 석유 화학 공장 외부에 설치된 유독가스 파이프라는 가정하에 설계하여 실험을 진행하였다. 그리고 3D 프린팅으로 파이프 라인을 제작하는 과정에서 내부 파이프에는 유독가스가 새어나갈 수 있게 임의로 구멍을 뚫었으며, 마지막으로 유독가스 확보 과정에 어려움이 있어서 부탄가스로 대신하여 실험을 진행하였다.

내부 파이프에 임의로 뚫은 구멍 근처의 가스 센서에서 가스 농도가 200 ppm 이상이 될 때까지 가스를 유입하였다. 농도가 200 ppm을 넘을 경우, 파이프 구조물 양쪽에 설치한 디지털 서보 모터를 활용한 버터플라이 밸브가 90도 회전하여 가스 유입을 차단하고, 동시에 부저 모듈이 알람을 울려 주변에 가스 누출을 경고한다. 이러한 실험 과정을 수행하기 위해 ESP-32 보드 3개를 활용하여 섹션을 나누었다. 1번 보드를 센터 보드, 2번 보드를 라이트 보드, 3번 보드를 레프트 보드로 임의로 지정한 후, 보드마다 가스 센서 2개씩 연결하여 데이터를 수집하였다. 라이트 보드와 레프트 보드의 가스 감지 데이터 값은 무선으로 센터 보드에 전송되어, 아두이노 프로그램의 시리얼 모니터를 통해 가스 감지 위치와 농도를 확인할 수 있도록 하였다. 또한, 센터 보드의 맥주소를 입력하여 무선으로 감지된 가스 데이터를 확인할 수 있는 통신 환경을 구축하였다. 가스 농도가 200 ppm을 넘으면 감지한 가스 센서와 위치를 시리얼 모니터와 구축한 서버에 표시하며, 초과한 데이터를 넘은 보드를 제외한 나머지 보드에게 데이터를 넘겨주어 각 보드들도 가스가 유출되었다는 걸 알 수 있다. 이와 같은 설정을 통해 가스 누출이 발생하면 어느 위치에서 감지되었는지 확인할 수 있는 관제 시스템의 동작 여부와 성능을 테스트하였다. 또한, 일반적인 파이프라인에 사용되는 파이프도 제작하여 IADPS와 비교하여 성능을 테스트하는 실험을 진행하였다.

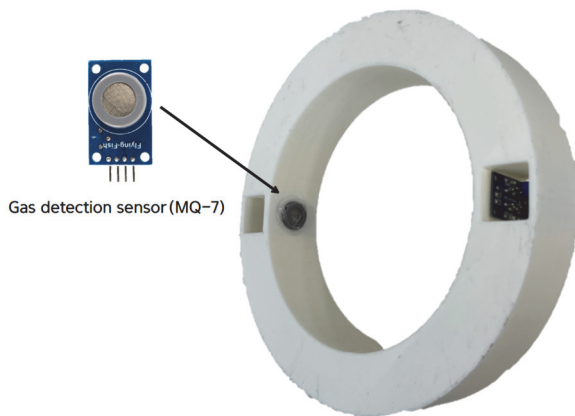


Fig. 4. Round gasket with an integrated gas detection sensor (MQ-7).

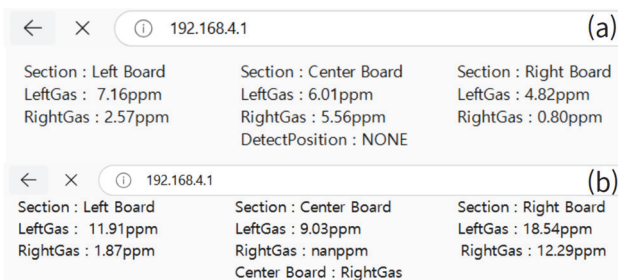


Fig. 5. Server monitoring through MAC address: (a) monitoring without gas detection and (b) monitoring with gas detection.

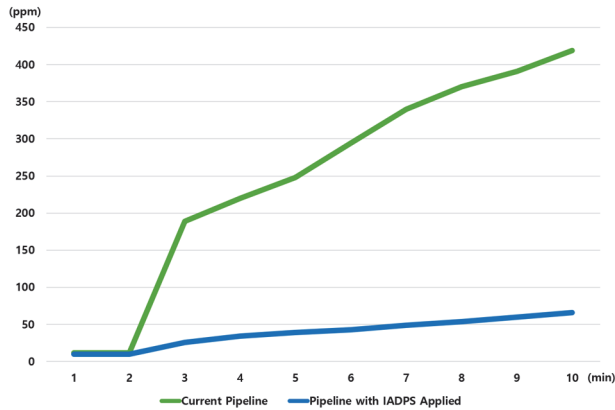


Fig. 6. Gas leak concentration measured in external environment.

현재 사용 중인 파이프라인은 가스 누출이 발생하면 바로 외부 환경으로 빠져나가기 때문에 외부의 가스 농도가 지속적으로 증가하는 모습이 보이지만, IADPS를 적용한 파이프라인은 가스 누출이 발생하면 이중 구조인 파이프와 에어건으로 순환시킨 내부 공기로 인해 외부 환경으로 바로 빠져나가지 않고 따로 만들어 놓은 탱크로 이동하여 외부 환경에서는 많이 검출되지 않는 모습이다(그림 6). 이 과정에서 3D 프린팅을 통해 설계 및 제작하여서 오차범위가 존재하는 점, 실제 질소가스를 사용하지 못한 점, 그리고 재료비의 한계에 의해 길게 제작하지 못한 점 등 실험 과정의 개선점이 남았다.

이러한 점들을 바탕으로, 본 논문에서는 유독가스 누출로 인한 위험을 줄이고 안전성을 높이며, 조립식 파이프를 통해 유지 보수가 용이하고 비용 효율적인 시스템을 제안하였다. IADPS는 유독가스가 지나가는 파이프를 외부 파이프로 추가적으로 둘러싸서 구조적 안전성을 강화하고, 외부 파이프를 조립식으로 설계하여 조립 및 분해가 쉽고 빠르게 설계하였다. 또한, 이음새마다 설치되어 있는 가스 감지기를 통해 가스 누출을 실시간으로 모니터링 할 수 있도록 하였다. 유독가스가 지나가는 내부 파이프에서 가스 누출이 일어난다면 외부 파이프가 추가적으로 차단한다. 이와 동시에 내부와 외부 파이프의 사이의 공간을 질소 가스로 충전 및 순환시켜 더욱 빠르게 가스 누출을 감지하고, 2차 피해를 막기 위해 버터플라이 밸브의 작동으로 유독가스의 추가적인 유입을 차단한다. 이 과정에서 ESP-32 보

드는 모니터링 서버에 위험 경고 및 가스 농도 정보를 실시간으로 전송하며, 부저를 통해 근로자들에게 대피를 유도하도록 하였다.

제안한 시스템은 유독가스뿐만 아니라 기타 유해 물질의 누출 위험을 줄이는 데 기여하며, 지속 가능하고 안전한 산업 환경을 조성하는 데 중요한 역할을 할 것으로 생각된다. 이를 위해서는 실제 제작물의 구조적 해석을 통한 보완점 도출 등의 IADPS의 효율성과 신뢰성, 설치 시의 가격 경쟁력을 더욱 강화할 수 있는 연구가 수행되어야 할 것이다.

ORCID

Young Cho

<https://orcid.org/0009-0000-6303-8186>

감사의 글

본 논문은 교육부와 한국연구재단의 내원으로 지원을 받아 수행된 첨단분야 혁신융합대학사업(차세대 통신)의 연구 결과입니다.

REFERENCES

- [1] National Institute Chemical Safety, Chemical Safety and Hazard Status (2014).
- [2] S. B. Park, M. J. Sim, M. S. Kim, J. H. Kim, and J. M. Lee, *J. Korean Soc. Mar. Eng.*, **39**, 425 (2015).
doi: <https://doi.org/10.5916/jkosme.2015.39.4.425>
- [3] M. K. Lee, J. H. Kim, S. H. Kil, and G. J. Ryo, *J. Energy Eng.*, **29**, 1 (2020).
doi: <https://doi.org/10.5855/energy.2020.29.4.001>
- [4] T. O. Kim, H. C. Lee, and R. Jun, *J. Korean Inst. Gas*, **10**, 52 (2006).
- [5] K. M. Jin, G. H. Choi, S. K. Lee, T. Y. Chung, D. H. Shin, S. S. Hwang, and J. S. Oh, *J. Energy Eng.*, **20**, 292 (2011).
doi: <https://doi.org/10.5855/ENERGY.2011.20.4.292>
- [6] D. G. Kang, *Master's Thesis, A Study on IoT Inspection Methods for Gas Leak Detection*, Graduate School of Korea National University of Transportation, Chungju (2023).
- [7] S. J. Kang, *Proc. the Korean Institute of Communications and Information Sciences* (2023) p. 601.