

지하매설 수소 배관망 안전 모니터링 시스템의 개념 설계: 광섬유 기반 모니터링 사례를 중심으로

Conceptual Design for Underground Hydrogen Pipeline Monitoring System: Case Study on Fiber Optic Sensing

박재우¹, 염동준^{2*}

Jae-Woo Park¹, Dong-Jun Yeom^{2*}

〈Abstract〉

Recently, as the importance of eco-friendly energy has increased hydrogen gas is in the spotlight as future energy. Due to its special properties, hydrogen gas is more difficult to detect requiring more precise sensing technology. The primary objective of this study is to design a concept of an underground hydrogen pipeline monitoring system. For this, the following research works are conducted sequentially; 1)selection of core technology for conceptual design, 2)state-of-the-art review, 3)design of a concept of the system. As a result, DAS(Distributed Acoustic Sensing), and DTS(Distributed Temperature Sensing) are selected as each core technology. Furthermore, a conceptual design of an underground hydrogen pipeline monitoring system is deducted. It is expected that the impact on the eco-friendly energy industry will be enormous due to the increasing interest in using hydrogen energy.

Keywords : Hydrogen, Underground, Pipeline, Monitoring System, Conceptual Design

1 정회원, 주저자, 한국건설기술연구원, 건설정책연구소, 수석연구원

2* 정회원, 교신저자, 한국건설기술연구원, 건설정책연구소, 박사후연구원/공학박사

E-mail: djeom@kict.re.kr

1 Construction Policy Institute, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

2* Construction Policy Institute, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

1. 서론

최근 친환경 에너지의 중요성이 대두됨에 따라, 미래청정에너지로서 수소 에너지가 각광 받고 있다. 수소 가스는 특수한 물성으로 인해, 유사한 가연성 가스(CH₄, C₃H₃ 등)에 비해 검출에 더 정밀한 센서 특성과 기능이 요구됨은 물론, 공기 중에 소량이라도 누출되면 조그만 착화열에도 쉽게 폭발하는 특성이 있으므로 수소 가스 활용을 위한 안전성 확보가 선행되어야 한다[1]. 이러한 수소 가스의 안정적인 검출을 위해서는 저농도/고농도 검출이 가능하고, 수소 이외의 가스, 수증기, 온도에는 영향을 받지 않으면서, 5년 이상의 긴 수명, 높은 정확성, 신속한 반응속도, 높은 신뢰성, 낮은 동작온도, 대량생산, 작은 크기, 낮은 소모전력, 저렴한 가격 등을 고루 갖춘 기술 개발이 필수적으로 요구된다[2, 3, 4].

최근에는 배관망의 감시를 위해 활용되는 센서의 종류로서, 분포형 광섬유 센싱(DFOS; Distributed Fiber Optic Sensing) 방식이 주목받고 있다. DFOS는 배관망과 동시 시공이 가능하고, 내구성이 우수하여 내구연한이 반영구적이며, 1m 내외의 센싱 정확도를 지니고 있어 배관망의 감시를 위한 주요기술로서 주목받고 있다[5]. 그러나 대부분의 선행기술들은 수소가스와 물성이 다른 가스 혹은 액체의 감시를 위해 활용되고 있어 수소 배관망에 그대로 적용할 수 없고, 일부 수소 배관망에 적용 가능한 기술도 지하매설관이 아닌 외기환경에 노출된 배관망을 감시하는 기술인 것으로 분석되었다.

따라서 본 연구의 목적은 지하매설 수소 배관망 안전 모니터링을 위한 센서 시스템의 개념 설계를 수행하는 것이다. 이를 위해 1)필요 센싱 요구 정보 정의, 2)매설배관 타(他)공사 및 가스 누출위치 감지 관련 선행연구 분석, 3)매설배관 시공 및 타(他)공사 관련 규정 조사 및 분석, 4)매설

배관 타(他)공사 감지 및 분포형 센서 시스템 관련 지식재산권 동향 분석, 5)분포형 센서(온도, 진동, 소음 등) 기술 사례 분석의 순서로 연구를 진행하였으며, 분석 결과를 기반으로 시스템의 핵심 요소기술 개념을 설계하고자 한다.

2. 이론적 고찰

2.1 지하매설 수소 배관망 모니터링을 위한 센싱 정보 정의

도시에서 지하매설관은 시민 생활과 연계된 필수 사회 자원으로, 매설관의 누출, 지하구조물 변형, 지하수위 변화, 지반변형(도로 침하, 지하공동) 등 눈에 보이지 않는 요인이 도시 재난재해 사고의 원인으로 작용할 수 있다. 그러나 현재까지는 지하 환경에 적용 가능한 융합 기술 마련이 미흡하고, 과학적 재난 대응 체계가 구축되지 않아 실시간 데이터 분석, 예측에 기반한 과학적 재난대응 시스템 구축이 이뤄지지 않은 상황이다[6].

수소 가스는 그 크기가 지구상에서 존재하는 기체 분자 중에서 가장 작고, 산소와의 급격한 반응에 의해 폭발할 가능성이 있어 저장, 수송, 이용에 신중함이 필요하다. 특히 수소 가스는 비점이 -253℃로 낮아서 상온, 상압에서는 기화된다. 즉, 배관망 내에서 액체 형태로 수송되더라도, 누출 시에는 가스 형태로 누출되며, 미세한 정전기에도 폭발할 정도로 폭발의 위험성이 높아 취급에 어려움이 있다[1].

지하매설 수소 배관망의 모니터링을 위해서는 두 가지 정보가 매우 중요하게 작용한다.

첫째는 배관망 손상을 유발할 수 있는 다양한 외부 요인의 접근이다. 본 연구에서는 이를 타(他)공사로 정의하였는데, 이는 주로 주변 매설물에 대

한 접근을 위한 굴착공사가 해당된다. 즉, 외부 요인에 의해 배관망의 손상이 예상될 경우 이에 대한 위치 및 충격강도 등을 파악하고, 즉각적으로 현장에서 조치할 수 있도록 연계되는 기술이 필요하다.

둘째는 배관망 자체 파손에 의한 변화를 파악하는 것이다. 이 때 파악해야 하는 정보는 배관망의 손상 혹은 변형이나, 무엇보다도 배관망에서 누출되는 수소 가스를 검출하는 것이 중요하다. 즉, 배관망 전역에서 누출이 발생한 위치를 신속히 판단하고, 수소 수송을 즉각적으로 중단함은 물론 정확한 누출위치 식별을 통해 배관망의 유지보수를 적시에 수행할 수 있도록 하는 모니터링 기술이 필요하다.

2.2 광섬유 기반 매설배관 타(他)공사 감지 및 가스 누출위치 식별 기술 조사

매설배관 타(他)공사 감지를 위한 기술로는 광섬유 기반의 센싱이 주로 활용되고 있다. 광섬유 기반 모니터링 기술은 배관망에 추가적인 케이블의 적용만으로 센싱이 가능하여 비용 효과적이며, 특히 장거리 선형 개체에 대한 센싱에 특화되어 있어 배관망 전역을 실시간으로 모니터링하기 위한 주요 기술이라 할 수 있다. 또한, 해당 기술은 센서의 높은 민감성, 우수한 검출 범위 등의 장점을 지니고 있다.

광섬유 센싱의 세부 기술로서 DAS (Distributed Acoustic Sensing) 방식이 배관망 모니터링에 활용되는데, 이는 센서의 특성이 진동, 소음 등의 데이터를 취득할 수 있음은 물론, 취득된 데이터의 분석을 통해 노이즈와 실질적인 센싱 대상을 구분하는 방식이 적용되어, 본 연구에서 개발하고자 하는 매설배관 타(他)공사 감지 기술에 적합하기 때문이다.

한편, 광섬유 기반 센서 신호는 처리 과정에서 지속적인 변경이 발생하므로 알고리즘 처리가 어려운 특성을 지니고 있다. 다양한 노이즈, 약한

Table 1. Literature review

Author	Summary
Tanimola and Hill (2009) [7]	• DTS, DAS based pipe line monitoring technologies are suggested.
Wu et al. (2017) [8]	• Wavelet Decomposition(WD), Wavelet Packet Decomposition(WPD) based data features are deducted.
Zhang et al. (2018) [9]	• Frequency domain signal function applied such as Mel-frequency Cepstral.
Guo et al. (2018) [10]	• Bayesian Network-based Machine Learning
Sheng et al. (2019) [11]	• Stochastic Configuration Network (SCN)- based Machine Learning algorithm TSVD-SCN
Yang et al. (2019) [12]	• Modified Convolutional Neural Network (CNN)-based Machine Learning
Kong et al. (2020) [13]	• Probabilistic Neural Network(PNN)-based Machine Learning

신호, 신호의 변동 등으로 이상적인 조건에서 데이터의 취득이 어렵고, 이로 인해 데이터의 특성을 분석하여 알고리즘화 하는 것에 어려움이 있다는 것을 의미한다.

이러한 문제점을 개선하기 위해, 선행연구에서는 2009년 DAS, DTS 기반 배관망 센싱 방법이 제안된 이래로, 데이터 특성에 대한 식별력을 강화시키기 위한 Machine Learning 기법을 적용하여 센싱 성능을 강화시키는 방향으로 연구가 수행되고 있다(Table 1).

2.3 매설배관 타(他)공사 및 가스 누출위치 감지 관련 시장 동향 조사

다양한 매개 변수의 모니터링, 측정 및 제어를 위해 사용되는 가장 보편적 장치인 센서 중 가스 센서는 시스템 또는 특정 환경에서 가스의 존재와 농도를 감지할 수 있는 장치로, 전기, 화학, 금속

산화물 반도체(MOS), 촉매, 적외선, 레이저 및 MEMS와 같은 서로 다른 기술을 통해 특정 가스의 농도를 탐지할 수 있다. 이러한 가스 센서는 가스 센서 기술의 발전, 새로운 애플리케이션의 출현, MEMS 기반 제품에 대한 수요 증가, 낮은 전력 소비 특성 및 빠른 응답 시간 등으로 인해 이를 현업에 적용하고자 하는 수요가 증가하고 있다[14].

전 세계 가스 센서 시장은 2019년 10억 4,200만 달러에서 연평균 성장률 6.4%로 증가하여, 2024년에는 14억 1,800만 달러에 이를 것으로

전망된다. 특히 이 중 수소 관련 센싱 시장은 연평균 2.4% 성장, 연간 2,000만 달러 이상의 시장 규모를 형성하고 있다(Fig. 1)[15].

센서 종류별 글로벌 시장 규모 및 전망을 분석한 결과를 살펴보면, 다양한 센서 종류 중 전기화학식, 적외선식, 솔리드 스테이트(MOS) 순으로 시장 규모가 형성되어 있고 전체 시장 평균 6% 이상의 성장률을 보이는 것으로 분석되어[15], 향후 개발기술의 실효성이 충분히 확보될 것으로 예상된다(Fig. 2).

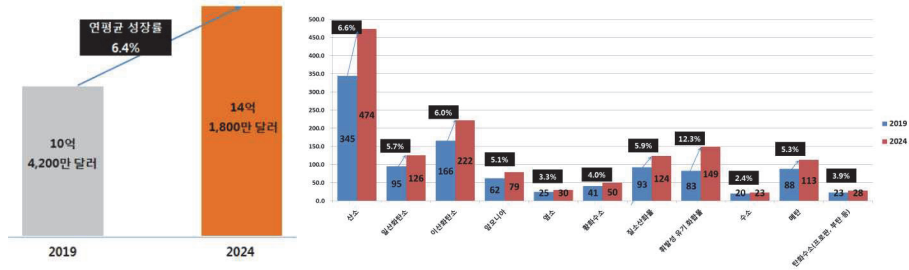


Fig. 1 Market size of gas sensing technology[15]

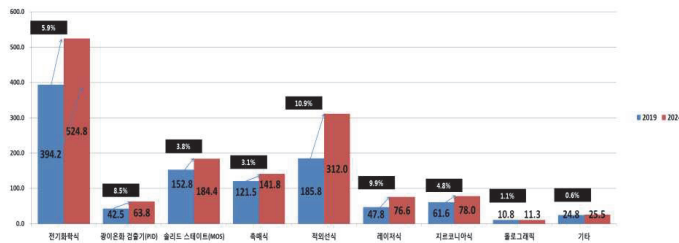


Fig. 2 Market size of each gas sensor type[15]

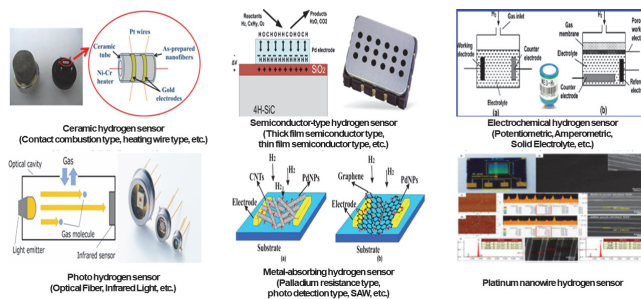


Fig. 3 Gas sensor type

본 연구에서는 지하매설 수소 배관 가스 누출 위치 식별을 위해 적용 가능한 센서의 종류를 아래 Fig. 3과 같이 조사 및 분석하였다. 지하매설 수소 배관의 가스 누출 위치 식별을 위한 주요 기술로는 DTS 기반의 기술이 주로 적용되고 있으나, DTS 기반 센싱 데이터를 토대로 지하매설 배관 가스 누출 위치의 식별을 강화를 위한 센서 조합을 분석하고 이를 본 연구의 결과인 개념 설계에 반영하고자 한다.

3. 지하매설 배관 관련 규정 및 유관 기술 사례 분석

3.1 매설배관 시공 및 타(他)공사 관련 규정 조사 및 분석

지하매설 배관은 매설관을 통하는 매질의 종류, 또는 관리 주체에 따라 그 종류를 구분할 수 있다.

Table 2. Underground pipelines types and their management host[16]

Pipeline type	Management host	Spec. of pipeline
LNG Pipeline	KOGAS	Steel pipeline $\Phi(610-760\text{m/m})$
LPG Pipeline	City gas company	Steel pipeline $\Phi(50-500\text{m/m})$
Oil Pipeline	DOPCO	Steel pipeline $\Phi(300-350\text{m/m})$
Electrical distribution pipeline	KEPCO	PVC, Hume pipeline $\Phi(50-300\text{m/m})$
Communication pipeline	Telecom company	PVC pipeline $\Phi(50-300\text{m/m})$
Water pipeline	Kwater, municipality	Cast iron, Steel pipeline $\Phi(80-2,800\text{m/m})$
Sewer pipeline	municipality	PVC, Hume pipeline $\Phi(150-2,000\text{m/m})$

※ Management extension is subject to change according to the implementation of pipeline construction.

Table 3. Regulations related to underground pipeline construction and construction interference

Regulations	Contents
Ministry of Commerce, Industry and Energy Notice No. 2005-84	• Announcement of special standards for city gas pipe laying status confirmation and consultation.
Ministry of Knowledge Economy Notice No. 2013-45	• Special standards for confirmation and consultation of high-pressure gas pipelines
Ministry of Land	• Infrastructure and Transport, safety management tips for underground facilities related to construction work
Ministry of Trade, Industry and Energy Ordinance No. 418, City Gas Business Act Enforcement Rule Article 52	• Confirmation of City Gas Pipeline Laying Status, etc.
Gas Technology Standards Committee	• Standards for facility, technology, inspection, and precise safety diagnosis of pipelines outside of gas wholesale business factories and supply stations
Notice of Ministry of Trade, Industry and Energy	• Criteria for Imposition of Operating Expenses for the Excavation Construction Information Support Center
Article 44 of the City Gas Act, Article 34 of the High-Pressure Gas Safety Management Act	• Article 8 Safety Management and Operation Standards for Liquefied Petroleum Gas Pipeline Network Supply

Table 2는 국내에서 운용되고 있는 지하 매설관의 종류 및 관리 주체를 표로 정리한 것이다[16].

상기 Table 2에서 조사된 지하 매설배관의 시공 및 타(他)공사 관리 관련 규정에 대한 조사 및 분석을 수행한 결과는 Table 3과 같다.

관련 규정 조사 및 분석 결과, 대부분의 규정은 배관의 시공 방법에 관한 것으로 조사되었으며, 이 중 타(他)공사 관리와 관련하여 정의된 규정이 일부 존재하는 것으로 분석되었다. 이는 실질적으로 타(他)공사로 인해 관리 주체간의 시공 중 갈등이 빈번하게 발생하기 때문인 것으로 판단되며, 실질적인 배관 파손 사고와도 직결되고 있어 이를 규정화하여 정의하고 있는 것으로 분석되었다. 그러나 대부분 타(他)공사와의 충돌 방지를 위한 대책으로 굴착계획의 신고, 배관 확인 수준의 공사간섭 방지 대책 정도만을 규정하고 있을 뿐 타(他)공사가 발생했을 때 이를 실시간으로 파악하고 적시 대응할 수 있는 방안은 마련되지 않은 것으로 분석되었다.

3.2 매설배관 시공 및 타(他)공사 현황 분석

2019년 산업통상자원중소벤처기업위원회 소속 이훈 의원(서울 금천구)이 가스안전공사로부터 제출받은 국정감사 자료[17]에 따르면, 지난 2017년부터 2019년 8월까지 전국에서 시행된 고압·중압 도시가스 매설배관 공사 3,825건 중 3,030건, 약 80%에 달하는 공사에서 당초 설계도와 매설깊이 나 길이가 다르게 시공된 것으로 확인되었다[18].

또한 배관깊이가 얇게 매설된 경우 평균 30cm 가량 얇게 매설되었다. 특히, 이 중 1m까지 얇게 매설된 사례(경기도 용인시, 광주시 각 1건)도 있었는데, 이때 두 공사 모두 당초 설계도상 매설깊이가 1.2m로, 실제로는 20cm만 굴착해 매설한 것으로 조사되었다[19].

산업통상자원부는 2019년 11월 ‘도시가스사업

법 시행규칙 제52조’ 도시가스배관 매설상황 확인 관련 일부개정을 통해 굴착공사자에게 굴착 24시간 전 도시가스배관의 매설 여부를 의무적으로 확인하도록 하는 관련 시행규칙을 신설 및 적용하였다. 그러나 도시가스 관련 사고 현황(Fig. 4)을 살펴보면, 2019년에만 32건의 도시가스관련 사고가 발생했고, 이 중 41%가 굴착공사 관련 사고인 것으로 조사되었다.

굴착공사 관련 사고는 도시가스사 입장에서는 타(他)공사로 분류되어 능동적인 안전관리를 수행할 수 없어 예방안전으로 위험성을 알리는 수준에 그치고 있다. 이렇다보니 굴착공사 사고 건수(Fig. 5)는 2016년 7건, 2017년 7건, 2018년 6건으로 감소하지 않고 있으며, 2019년에는 13건으로 급증한 바 있다[20].

즉, 매설배관 시공 및 타(他)공사 현황 분석 결과를 종합하여 분석하면, 현재 시공 불일치(깊이, 길이 등) 사례가 빈번히 발생하고 있다고 판단할 수 있다. 따라서 이와 같은 문제점을 개선하기 위해서는 단순히 규정 측면에서의 예방안전뿐만 아니라, 보다 적극적인 안전관리 방안이 마련되어야

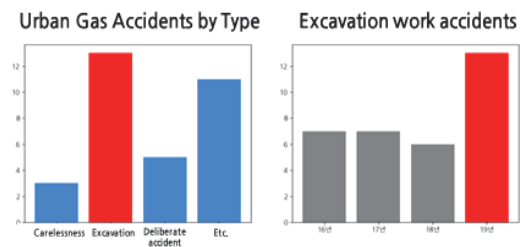


Fig. 4 Urban gas accidents type and excavation accidents[20]



Fig. 5 Fotech Solutions DAS Technology[21]

할 것이며, 이와 관련된 대안 기술의 마련이 필요한 것으로 판단된다.

3.3 매설배관 타(他)공사 감지 및 분포형 센서 시스템 관련 지식재산권 동향 분석

3.3.1 매설배관 타(他)공사 감지 시스템 관련 지식재산권 동향 분석

매설배관 타(他)공사 감지와 관련하여 지식재산권 조사를 수행한 결과 국내에서 총 110건의 유관 특허가 검색되었으며, 이 중 본 연구와 관계성이 높은 9건 지식재산권에 대해 아래 Table 4와 같이 분석되었다.

매설배관 타(他)공사 감지 관련 지식재산권 동향 분석 결과, 주로 2003년부터 2014년까지 관련 연구 수행을 통한 특허 출원이 진행되었으며, 최근에는 관련 지식재산권 확보 동향이 없는 것으로 조사되었다. 그러나 최신 기술개발동향 분석 결과, 요소 기술의 진보로 인한 추가적인 지식재산권의 확보가 필요할 것으로 사료된다.

3.3.2 매설배관 분포형 센서 시스템 관련 지식재산권 동향 분석

매설배관 분포형 센서 시스템 관련 지식재산권 조사를 수행한 결과, 국내에서 총 1,238건의 유관 특허가 검색되었으며, 이 중 본 연구와 관계성이 높은 26건의 지식재산권에 대해 아래 Table 5와 같이 분석되었다.

분포형 센서 시스템과 관련된 연구는 2000년대 중반부터 현재까지 활발하게 진행 중인 것으로 분석되었다. 특히 광섬유 기반 센싱이 배관망에 적용되기 시작한 2000년대 후반부터는 다양한 적용 분야에서 활용되기 시작하였으며, 2017년 이후부터 배관 상태의 모니터링을 위한 기술이 지식재산권으로 등록되면서 그 활용이 증가되는 실정이라 판단할 수 있다.

3.4 분포형 센서(온도, 진동, 소음 등) 측정 자료 분석 기술 사례 연구

최근 분포형 센서, 즉 광섬유 기반의 센싱 기술

Table 4. Patents related to the detection system for underground pipeline

Patent No.	Title / Patent holder
10-2018-0012888 (Decline)	• Monitoring system and method for other pipe construction using acoustic analysis / KOGAS
10-1388498	• Monitoring method for other construction of buried piping considering ambient noise / KOGAS
10-2011-0037661 (Decline)	• Other construction monitoring system and method using time data filtering / KOGAS
10-0820737	• Other construction monitoring system and method by auxiliary sensor / KGS
10-0660158	• Other construction monitoring method by frequency analysis / KOGAS
10-0660157	• Other construction monitoring system by closed-loop method / KOGAS
10-0660156	• Wireless other construction monitoring system using gas pipe as a waveguide / KOGAS
10-2006-0012556 (Decline)	• Monitoring method of other construction by frequency spectrum density analysis / KOGAS
10-0402685	• Real-time damage detection monitoring system for buried pipe by other construction and method of calculating impact location of gas pipe / KGS

Table 5. Patents related to the distributed sensor system for underground pipeline

Patent No.	Title / Patent holder
10-2021-0084140 (Open)	• IoT pipe temperature monitoring system using thermoelectric power module
10-2238436	• Pipeline abnormal condition monitoring system, device and method / KRISS
10-2226050	• Boiler Piping Monitoring Systems and Methods / KEPCO
10-2020-0030902 (Decline)	• Water pipe leak detection monitoring system and leak detection monitoring method
10-2019-0135674 (Open)	• Plant pipe temperature monitoring device using OFDR / Cellogic
10-20431558	• Pipe monitoring device and method / KAERI
10-2025272	• Fiber Optic Sensor System / Chung-Ang Univ.
10-2013494	• Pipe condition monitoring device and method / DOPCO
10-2011424	• Pipe Condition Monitoring Apparatus and Method / Cha
10-1996894	• Underground hot water pipe leak detection device / Prime Corporation
10-1953035	• Pipe condition monitoring device and method / DOPCO
10-1913605	• Ball valve central control system equipped with a leak detection device for flammable fluid / Samjin Precision
10-2017-0106097 (Decline)	• Underground pipeline monitoring device / KOGAS
10-1737216	• Pipe Inspection Device and Pipe Inspection Method / Doshiba
10-1731450	• Pipe monitoring system and pipe monitoring method / KOGAS
10-1663490	• Airtight leak remote monitoring system for industrial ball valves_KPM
10-15538908	• Safety diagnosis system for nuclear power plant piping that integrates laser ultrasonic wave and shear interferometer / GP
10-1481013	• Piping and piping system for thermal energy / KIER
10-1468086	• Piping and piping systems for thermal energy / KIER
10-1155975	• Underground facility detection and management system using optical fiber sensor and magnetic marker / EWOOTC
10-1147989	• Pipe Monitoring System / KLES
10-0913536 (extinction)	• Pipe monitoring system using distributed optical fiber sensor / Korea Maintenance
10-0842119 (extinction)	• Fiber Optic Hydrogen Sensor and Applied Hydrogen Concentration Measuring Device / Kim
10-2006-0112264 (Decline)	• Constant monitoring system using optical fiber grid sensor / Lee
10-2006-0028777 (Withdraw)	• Fiber Optic Processing Equipment and Treatment Method / Shin-Etsu Chemical High School

이 활성화됨에 따라 이를 기반기술로 하여 배관망의 안전관리를 수행하는 기술이 실용화되고 있다. 이때 DAS, DTS 기반의 배관망 모니터링 기술이 주로 활용된다. 해당 기술을 활용할 경우 광학 센서 케이블 전 구간에서 정확한 데이터를 실시간으로 획득할 수 있으며, 1m 이내의 정확도를 확보할 수 있다.

이러한 광섬유 센싱은 외부 환경 요인에 대한 영향이 작고, 부식이 발생하지 않으므로 반영구적 활용이 가능하다는 장점이 있다. 또한, 선형으로 장거리 구간에 대한 측정이 가능하고, 유지보수에 소요되는 비용 절감이 가능하다. 특히 DAS, DTS 기반 기술은 배관 내 유동 상태에 영향을 받지 않기 때문에 노이즈가 최소화된 계측 데이터를 취득하는 것이 가능하다.

현재 일부 기술 선도업체에서 가스, 물, 액상 탄화수소, LNG, LPG, 다상 배관 감지 및 위치 파악을 위한 광섬유 기반 누출 감지 시스템 솔루션을 제공하고 있으며, 세부 기술로는 배관 손상 또는 도난 방지를 위한 제삼자 간섭 모니터링, 배관 파열 및 발화 감지, 파열 배관 방지를 위한 배관 벽 온도 모니터링, 다상 배관 누출 감지 및 잔여물 추적 등의 기술이 적용되고 있다.

3.4.1 Fotech Solutions DAS Technology

Fotech Solutions의 분포형 DAS 시스템(Fig. 5)[21]은 표준통신 단일 모드 광섬유를 수천개의 음향 및 진동 센서로 변환하는 방식으로 배관망 전반의 센싱을 수행한다. 광섬유의 한 쪽 끝에 연결된 분산 음향 센서는 레이저를 사용하여 초당 수천 개의 짧은 펄스의 빛을 광섬유를 따라 보낸다. 광섬유에서 이동하는 빛의 작은 부분은 레일리 후방 산란(Rayleigh Backscatter)으로 알려진 프로그래밍에 의해 재반사 된다. 주변 환경의 진동은 광섬유의 빛을 방해하기 때문에 DAS 인터로게이터에 의해 관찰되며, 이때 데이터가 실시간으로 처리

되므로 알고리즘은 각 이벤트 유형의 고유한 특징을 인식하고, 문제가 될 수 있는 센싱 데이터를 기반으로 경보 알림을 서버에 보고하는 방식으로 시스템이 구축되어 있다. 시스템은 운영자에게 위협의 정확한 위치를 표현해주고, 이벤트에 대한 상세한 정보를 제공하며, 이에 따른 적시 대응이 가능하도록 시스템이 설계되었다. 해당 시스템은 센서 구성의 선택이 가능하며, 레이저 펄스 주파수, 펄스 폭 및 기타 여러 매개변수를 제어하여 시스템을 각 고객의 특정 요구에 맞게 조정할 수 있다.

3.4.2 SMARTEC : Pipeline Safety Monitoring Systems

SMARTEC의 Pipeline Safety Monitoring Systems (Fig. 6)[22]은 분포형 DTS 시스템을 활용하여 파이프라인의 손상 발생 전 가스 누출 위치 감지 및 국소화를 수행할 수 있으며, 30km 이상의 파이프라인 변형, 토양 내부 침식 등을 감지할 수 있다. 분포형 광섬유 케이블, 측정기기, 소프트웨어 통합 솔루션을 제공하고 있으며, 파이프라인 전체에 걸쳐 1m 정확도 범위 내에서 누출, 침입, 변형 등을 식별할 수 있다. 매설된 파이프라인의 온도 분포 분석을 통해 정확한 누출 영역 식별 및 주요 구조적 결함을 방지하는 기능을 가지고 있으며, 분포형 DTS 시스템을 기반으로 공간 및 온도 분해 성능 확보, 미세 가스 누출 모니터링 및 위치 파악이 가능하다. 또한, 광섬유가 스테인리스 스틸 외장 강화 케이블로 보호되고 있어, 케이블의 설



Fig. 6 SMARTEC : Pipeline Safety Monitoring Systems[22]

치 용이성 및 내구성을 확보하였다. Fotech Solutions의 시스템과 마찬가지로 시스템이 운영자에게 가스 누출의 정확한 위치를 표시하고, 이벤트에 대한 정보를 제공해주며, 시스템 운영자는 이러한 상황에 대해 적시 대응이 가능하다. 또한 SMARTEC의 DTS 시스템은 파이프 구조 안정성 감지를 위한 스트레인 게이지 등 추가적인 센서 구성이 가능하고, 시스템 완전 자동화로 운영비용 절감을 기대할 수 있다.

3.4.3 AP Sensing : Pipeline Monitoring (Leak Detection, Flow Assurance, Third Party Interference)

AP Sensing의 Pipeline Monitoring(Leak Detection, Flow Assurance, Third Party Interference) [23]은 분포형 DAS, DTS 시스템을 복합적으로 활용하는 솔루션이다(Fig. 7). 정유 및 가스탱크 모니터링, 화재 감지, 전력 케이블 모니터링 등 광범위한 분야에서 핵심 안전을 보장하기 위한 용도로 활용된다. 관리 소프트웨어인 Smart Vision을 활용하여 Mass Balance 및 Negative Pressure Wave LDS 등 기타 센서와 누출 감지 시스템을 통합적으로 제공한다. 광학 센서 케이블 전 구간에서 정확도 높은 데이터를 실시간으로 획득할 수 있고, EMI에 대한 영향이 없고 내구성이 우수하며, 장거리 측정이 가능하고 배관 내 유동 상태에 대한 영향이 없다는 장점을 지닌다. DTS는 누출이 일어나는 근처 지반의 온도 편차를 분석해 핫스팟/콜드스팟

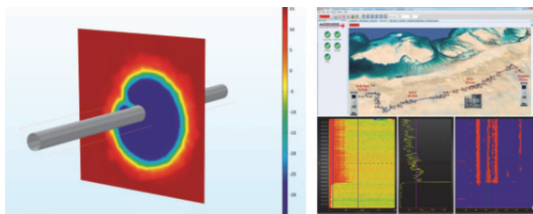


Fig. 7 AP Sensing : Pipeline Monitoring[23]

위치의 정확한 감지를 수행하고 해당 데이터를 활용하여 배관망의 누출을 감지한다. 또한 DAS는 관련 소음/진동, 온도(DTS) 및 저압 확장파(NPW)의 즉각적 변화를 파악하여 가스의 누출을 감지하거나, 수작업, 굴착, 건설 작업, 배관 드릴 작업 등 제삼자 간섭을 감지하는데 활용된다. AP Sensing의 DFOS(DTS+DAS) 시스템은 고유기술에 기반한 고성능 측정을 가능하게 하고, 프로젝트 계획, 설계, 설치, 위탁 등의 지원이 가능하다.

4. 지하매설 수소 배관망 안전 모니터링 시스템 개념 설계

본 연구에서는 2장의 연구를 통해 1)매설배관 타(他)공사 감지, 2)매설배관 가스 누출 위치 식별의 두 가지 정보를 지하매설 수소 배관망 모니터링을 위한 필요 센싱 정보로 정의한 바 있다. 또한, 지하매설 배관 관련 규정 및 유관 기술 사례 분석 결과 및 분포형 센서(온도, 진동, 소음 등) 측정 자료 분석 기술 사례 연구 분석 결과를 활용하여 지하매설 수소 배관망 안전 모니터링 시스템 개발을 위한 주요 요소 기술을 1)매설배관 타(他)공사 감지에는 DAS, 매설배관 가스 누출 위치 식별에는 DTS와 전기화학식 센서를 활용하는 것으로 정의하였다.

4.1 매설배관 타(他)공사 감지 기술

DAS는 진동, 소음 등의 감지에 특화된 센싱 기법을 지니고 있어, 타(他)공사 및 간섭 감지를 위한 최적의 조건을 갖추고 있다. DAS를 활용한 타(他)공사 감지를 수행하기 위해서는 타(他)공사 및 간섭에 대한 정확한 구별을 필요로 하는데, 지하매설 배관망의 특성상 차량의 운행, 보행자의 도보, 주변 진동 등 다양한 노이즈가 발생할 수 있

다는 특징이 있어 DAS를 그대로 적용해서는 정확한 센싱을 수행할 수 없다. 이와 같은 이유로 지하매설 배관망에서 DAS의 활용이 제한되는 것으로 분석되었다. 또한, 2.2절에 따르면 이와 같은 한계점을 개선하기 위해 주로 Machine Learning 기반의 알고리즘을 적용하여 인식률을 제고하려는 시도가 수행되고 있다.

따라서 본 연구에서는 매설배관 타(他)공사 감지를 위한 기반 기술로서 DAS를 선정하고, 취득 데이터의 분석을 통해 Machine Learning 기반의 노이즈 최소화 알고리즘을 적용하고자 한다. 추후 연구를 통해 지하매설 배관망의 DAS 센싱 데이터를 활용하여 다수의 노이즈 샘플을 확보하고, 확보된 샘플을 학습시켜 알고리즘의 고도화를 수행함으로써 기존 대비 우수한 성능의 타(他)공사 감지가 가능할 것으로 기대된다.

4.2 매설배관 가스 누출 위치 식별 기술

DTS는 온도의 감지에 특화된 센싱 기법을 지

니고 있어, 가스 누출에 의해 변화되는 배관망의 온도를 즉각적으로 파악하기 위한 최적의 조건을 갖추고 있다. DTS의 경우 DAS보다 노이즈에 대한 영향이 적고, 인식률이 높아 그 활용성이 우수하다. 단, 2장에서 분석된 수소 가스의 특성 때문에 타 매질에 비해 그 위험성이 높으므로, 2.2절의 연구 결과를 반영하여 DTS 기반 센싱 데이터를 토대로 누출 위치 식별을 강화를 위해 전기화학식 센서 조합의 하이브리드 센싱을 개념설계에 반영하였다.

4.3 지하매설 수소 배관망 안전 모니터링 시스템 개념 설계

본 연구에서는 상기의 조건을 적용하여 지하매설 수소 배관망의 안전 모니터링을 위한 시스템의 개념설계를 아래 Fig. 8과 같이 수행하였다[24].

시스템 개념설계는 센싱 데이터를 직접적으로 수집하는 1)광섬유 케이블, 수집된 데이터를 분석하는 2)센싱 데이터 분석 시스템, 분석된 데이터

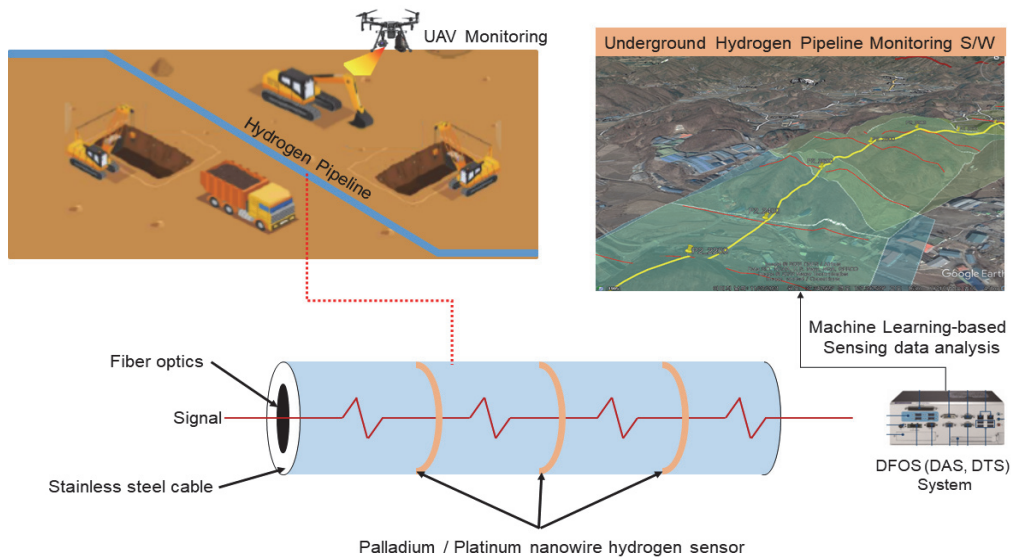


Fig. 8 Conceptual Design for Underground Hydrogen Pipeline Monitoring System[24]

를 사용자에게 표출하는 3)현장 모니터링 시스템, 현장 적시 대응을 위한 4)UAV(Unmanned Aerial Vehicle) 순찰 시스템으로 구분할 수 있다.

1) 광섬유 케이블에는 지하에 매설되는 특성을 반영하여 내구성이 좋은 스테인리스 스틸 케이블이 적용되었으며, 수소가스 누출 시 즉각적인 온도 반응이 발생하는 팔라듐 또는 백금 소재의 나노와이어를 적용하여 하이브리드 센싱을 통한 센싱 능력 향상이 가능하도록 설계하였다. 2)센싱 데이터 분석 시스템에는 머신러닝 기반 알고리즘을 적용하여 상황 식별 능력을 향상 시켰으며, 3) 현장 모니터링 시스템은 오픈 API 기반의 위성지도와 결합하여 상황 발생 위치 식별이 용이하도록 구성하였다. 추가적으로 4)UAV 순찰 시스템을 계획하여 배관망 전역의 이상 징후를 사전 감시하거나, 상황 발생 시 즉각적인 현황을 파악할 수 있도록 시스템이 설계되었다.

5. 결론

본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 본 연구에서는 이론적 고찰을 통해 1)매설배관 타(他)공사 감지, 2)매설배관 가스 누출 위치 식별의 두 가지 정보를 지하매설 수소 배관망 모니터링을 위한 필요 센싱 정보로 정의하였다.
- 2) 매설배관 타(他)공사 감지 관련 선행연구 조사 결과, 기존 센싱 알고리즘의 개선을 위해 주로 Machine Learning 기반의 검출 정확도 향상 방식이 적용되는 것으로 분석되었다.
- 3) 광섬유 기반 매설배관 가스 누출위치 식별 기술 분석 결과, DTS 기반 센싱 데이터를 토대로 식별률 강화를 위한 센서 조합이 고려되어야함이 분석되었다.

4) 매설배관 시공 및 타(他)공사 관련 규정 조사 및 분석 결과, 대부분 타(他)공사와의 충돌 방지를 위한 대책으로 굴착계획의 신고, 배관 확인 수준의 공사간섭 방지 대책 정도만을 규정하고 있을 뿐 타(他)공사가 발생했을 때 이를 실시간으로 파악하고 적시 대응할 수 있는 방안은 마련되지 않은 것으로 분석되었다.

5) 매설배관 시공 및 타(他)공사 현황 분석 결과, 현재 시공 불일치(길이, 깊이 등)의 사례가 다수 발생함에 따라 이를 개선하기 위해서는 기존 마련되어 있는 규정 측면에서 보다 적극적인 안전관리 방안 및 기술 마련이 필요한 것으로 분석되었다.

6) 매설배관 타(他)공사 감지 및 분포형 센서 시스템 관련 지식재산권 동향 분석 결과, 광섬유 기반 센싱이 배관망에 적용되기 시작한 2000년대 후반부터는 다양한 적용분야에서 활용되기 시작하였으며, 2017년 이후부터 배관 상태의 모니터링을 위한 기술이 지식재산권으로 등록되면서 그 활용이 증가한 것으로 분석되었다.

7) 분포형 센서(온도, 진동, 소음 등) 측정 자료 분석 기술 사례 연구 결과, 매설배관 타(他)공사 감지 기술로는 Machine Learning 알고리즘 기반 DAS 기술이 선정되었으며, 매설배관 가스 누출 위치 식별 기술로는 DTS 및 전기화학식 센서의 조합을 통한 하이브리드 센싱 기술이 선정되어, 지하매설 수소 배관망 안전 모니터링 시스템 개념 설계에 반영되었다.

향후 본 연구의 결과가 현업에 적용될 경우, 국내외적으로 친환경 에너지로 각광받고 있는 수소 에너지의 보급이 활성화 될 수 있을 것이며, 이를 통한 경제적 파급효과가 매우 우수할 것으로 기대된다. 추후 연구를 통해 DAS, DTS 기반 실제 센

싱 데이터의 확보를 통해 기술 개선 및 고도화를 위한 연구를 지속적으로 수행할 예정이며, 본 연구의 개념설계를 토대로 실질적인 개발을 추진하고자 한다.

사 사

본 연구는 한국에너지기술평가원 신재생에너지핵심 기술개발사업(과제번호: 20213030040380)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] Han, S. D., "Review and new trends of hydrogen gas sensor technologies", *Journal of the Korean Sensors Society*, 19(2), pp.67-86, (2010).
- [2] Lee, D. D., "Air Environment Sensor Technology", *Kyungpook National University Press*, (2007).
- [3] Gerard C. M. Meijer, "Smart Sensor Systems", *John Wiley & Sons, INC*, (2008).
- [4] Craig A. Grimes, Elizabeth C. Dickey and Michael V. Pishko, "Encyclopedia of Sensors", *American Scientific Publishers*, (2006).
- [5] H. Y. Kim, D. Kang, and D. H. Kim, "Reliability evaluation of fiber optic sensors exposed to cyclic thermal load," *Journal of Korean Society for Nondestructive Testing*, 36(3), pp.225-230, (2016).
- [6] National Science and Technology Research Association, "Internet of Things (IoT)-based urban underground facility monitoring and management system technology development", (2014).
- [7] Tanimola, F., and Hill, D., "Distributed fibre optic sensors for pipeline protection", *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 1.4-5, pp.134-143, (2009).
- [8] Wu, H., Qian, Y., Zhang, W., Tang, C., "Feature extraction and identification in distributed optical-fiber vibration sensing system for oil pipeline safety monitoring", *Photonic Sensors*, 7.4, pp.305-310, (2017).
- [9] Zhang, Y., Zhao, L., Tian, Q., Fan, J., "Optical Fiber Intrusion Signal Recognition Based on Improved Mel Frequency Cepstrum Coefficient", *In 2018 11th International Congress on Image and Signal Processing, BioMedical Engineering and Informatics. IEEE*, pp.1-9, (2018).
- [10] Guo, X., Zhang, L., Liang, W., Haugen, S., "Risk identification of third-party damage on oil and gas pipelines through the Bayesian network". *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 54, pp.163-178, (2018).
- [11] Sheng, Z., Zeng, Z., Qu, H., Zhang, Y., "Optical Fiber Intrusion Signal Recognition Method based on TSVD-SCN", *Optical Fiber Technology*, 48, pp.270-277, (2019).
- [12] Yang, Y., Li, J., Tian, M., Zhou, Y., Dong, L., He, J. X., "Signal Analysis of Distributed Optic-Fiber Sensing Used for Oil and Gas Pipeline Monitoring". *In Proceedings of the 2019 International Symposium on Signal Processing Systems*. pp.21-25, (2019).
- [13] Kong, W., Yu, J., Yang, J., Tian, T., "Model building and simulation for intelligent early warning of long-distance oil & gas storage and transportation pipelines based on the probabilistic neural network", *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing*, 546(2), 2020.
- [14] INNOPOLIS, "Market of Gas Sensor (annual report)", (2020).
- [15] MarketsandMarkets, "Gas Sensors Market", (2019).
- [16] MOLIT, "Guidelines for Safety Management of Underground Buried Structures Related to Construction Work", (1995).

- [17] Press Release of the National Audit, “Urban gas piping construction, 80% of the last 3 years have been constructed differently from the design plan. Buried depth and length are jagged, and there is a risk of damage during other excavation works”, (2019).
- [18] Joo B. G., “Urban Gas Piping, 80 percent different from the design in the last three years”, *Gas News*, (2019).
- [19] Cho, D. I., “City gas pipe buried deep jagged.80% of construction is different from the design”, *Today Energy*, (2019).
- [20] Joo B. G., “Excavator must also check in advance whether city gas pipes are buried”, *Gas News*, (2020).
- [21] Fotech Solutions, <https://www.fotech.com>, (2022).
- [22] SMATECH, <https://smartec.ch/en/>, (2022).
- [23] AP Sensing, <https://apsensing.com/>, (2022).
- [24] D. J. Yeom, J. W. Park, “A Conceptual Design for Underground Hydrogen Pipeline Monitoring System”, *The 10th International Conference on Wave Mechanics and Vibrations*, (2022).

(접수: 2022.07.22. 수정: 2022.08.05. 게재확장: 2022.08.08.)