



IoT 기반 산업용 밸브 안전관리 시스템 구성장치의 성능검증 방안 개발

김재옥 · 유근준 · 이경식 · †김정훈

한국가스안전공사 가스안전연구원

(2020년 4월 3일 접수, 2020년 9월 15일 수정, 2020년 9월 16일 채택)

Development of Performance Verification Method for Components of IoT-based Industrial Valve Safety Management System

Jae-Ok Kim · Geun-Jun Lyu · Kyung-Sik Lee · †Jung-Hoon Kim

Institutes of Gas R&D, Korea Gas Safety Corporation, Eumseong, 369-811, Korea

(Received April 3, 2020; Revised September 15, 2020; Accepted September 16, 2020)

요 약

석유화학 플랜트 및 가스 시설물의 밸브 사고는 심각한 인적 · 물적 피해를 유발하며 이러한 시설에서의 주요 사고 원인은 밸브에서의 가스 누출로 인한 흡입, 중독, 화재 및 폭발사고이다. 가스 누출을 예방하기 위한 점검은 인력에 의해 직접 검사가 이루어지는 경우가 많으며, 점검자는 가스 누출사고의 위협에 직접적으로 노출된다. 이러한 사고를 예방하기 위하여 IoT 기반 위험 분석 및 위험성 평가 모니터링 시스템과 자동제어 시스템을 적용하였다. 이를 통하여 산업용 밸브의 내 · 외부 가스 누출을 검지하고 하이브리드 센서를 통한 국부 및 전역 센싱으로 플랜트 현장에서의 밸브 이상으로 인한 사고를 실시간으로 모니터링 할 수 있다. 이와 같이 새로운 산업용 밸브 안전관리 시스템이 개발됨에 따라 관련 구성장치에 대한 성능 및 현장부합성에 대한 평가방안이 요구되었다. 본 연구에서는 산업용 유무선 통신을 지원하고 가스센서와 광섬유센서를 포함하는 방폭형 하이브리드 센싱 시스템과 자동제어가 가능한 액추에이터 패키지의 성능을 평가하기 위한 시험 항목 및 방법을 제시하였고 시스템의 신뢰성을 확보할 수 있는 구성장치의 성능검증 방안을 개발하였다.

Abstract - Valve leak accidents in petrochemistry plants and gas utilities cause human and property damage. The main reason why happen gas inhalation, poisoning, fire and explosion accidents is gas valve leakage. To prevent gas leakage, inspectors check the facilities in the field. And they are at risk of gas leak accidents. So we applied IoT-based risk assessment, monitoring and automatic control system. It can detect both internal and external gas leakage, do real-time monitoring of industrial valve in the plant by using hybrid sensor. As the new safety management system for industrial valve is developed, it needs method to evaluate device performance and environmental components for the system. This study is about development of method to verify performance of the explosion-proofed hybrid sensing system include gas detector and optical fiber sensor supporting wire and wireless communication.

Key words : industrial valves, safety management system, performance verification, internet of things, actuator

†Corresponding author:jhkim223@kgs.or.kr

Copyright © 2020 by The Korean Institute of Gas

I. 서론

석유화학 플랜트 및 가스 시설물의 밸브 사고는 심각한 인적·물적 피해를 유발한다. 최근 발생하는 플랜트의 대형 사고는 주로 밸브의 노후나 불량으로 인하여 일어나는 사고이다.

밸브는 배관과 더불어 시설물의 핵심 장치로 항상 위협에 노출되어 있어 사고 예방을 위한 상시점검 및 정기점검이 규칙적으로 이루어져야 한다. 하지만 밸브의 경우 수량이 많고 넓은 지역에 분포되어 있어 인력에 의한 안전 점검에 한계를 가지며 가스·화학물질 등의 누출로 인한 흡입, 중독, 화재 및 폭발 사고에 점검자가 직접적으로 노출되는 위험성을 가지고 있다[1-4].

이와 같은 문제를 해결하기 위해 국내·외에서 IoT를 기반으로 하는 안전관리 기술에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있으며 플랜트 시설, 선박 및 지하매설 배관시설 등 다양한 산업용 시설에 적용하고 있다. 그에 따라 스마트팩토리에 대한 수요가 크게 증가하고 있으며 국내에서도 앞으로 IoT 기반의 무선 통신 안전제어 시스템에 집중할 전망이다 [5-7].

본 연구에서는 산업용 유무선 통신을 지원하고 가스센서와 IoT 기반 자동제어가 가능한 액추에이터 패키지 및 무선통신의 성능을 평가하기 위한 성능평가 방법, 방폭 관련 규격 및 현장부합성 평가 방안을 개발하였다.

II. 산업용 밸브 안전관리 시스템 구성

IoT 기반 산업용 밸브 안전관리 시스템은 Fig. 1 과 같이 센싱시스템, 액추에이터 패키지 및 실시간 안전관리 시스템으로 구성된다.

2.1. 센서부 구성 및 특성

센서부는 가스센서, 광섬유센서 및 내부 누출 센서로 구성되어 가스 누출에 대해 내·외부의 검지가 가능하다. 국부 센싱을 위한 가스센서 및 전역 센싱을 위한 광섬유센서로 외부 가스 누출을 검지하고 여러센서를 통한 내부 기밀 누설 감지 기술을 적용하여 산업용 밸브 모니터링 시스템에서의 안전을 고도화 할 수 있다.

가스센서는 기체 중에 포함된 특정 가스를 검지하여 측정된 농도에 따라 적당한 전기신호로 변환하는 소자로서 검지 대상 가스가 가지는 특성에 따라 필요로 하는 성능 수준이 달라지기 때문에 이를 고려하여 성능 기준이 수립되어야 한다. 가스센서

는 Table 1과 같이 동작 원리에 따라 분류할 수 있으며 각각 감지할 수 있는 가스의 종류와 주요 성능 수준이 다르므로 용도에 따라 선택할 수 있다. 센서 시스템을 위한 무선 통신 모듈에서는 각 센서 노드에서 수집한 데이터를 근거리 무선통신망을 통해 수집하여 게이트웨이를 통해 서버로 전송하고 실시간으로 밸브의 상태를 모니터링 할 수 있다.

광섬유센서는 빛 신호를 전달할 수 있는 얇은 두께의 유리 또는 플라스틱 섬유로 구성되어 있다. 광섬유로 들어간 빛은 전반사의 원리에 의해 광섬유를 따라 이동할 수 있는데 이때 주위 온도나 압력의 변화로 인하여 광신호의 상태에 영향을 미치게 된다. 이 신호를 통해 가스 누출에 의한 환경 변화를 알 수 있게 되어 가스 누출 감지 센서로 활용할 수 있다. 특히 동작 방식의 특성 상 점화원으로써 작용하는 요소가 없기 때문에 별도의 방폭 함체

IoT-based Industrial Valve Safety Management System



Fig. 1. Scheme of IoT-based Industrial Valve Safety Management System.

Table 1. Classification by operating type of gas sensors

Type	Description	Detecting gas
Electrochemical	measure the concentration of a target gas by oxidizing or reducing the target gas at an electrode and measuring the resulting current	Toxic gas (CO, CO2, O3, SO2, NO, NO2, VOC)
Catalytic	oxidation of a gas readily occurs at the catalysed bead. Combustible gas raises the temperature further, leading to an imbalance of the bridge.	Combustible gas (Hydrogen, LPG, LNG, etc..)
Semiconductor	The absorption or desorption of the gas on the metal oxide changes either the conductivity or resistivity	Toxic gas (CO, NO2, SO2, H2S, VOC)
Photoionization	Measure absorbance of photoionization and output to gas concentration	CO, Co2, NO, NO2, So2, O2, etc..

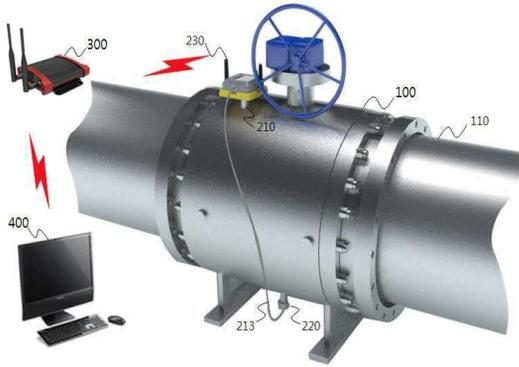


Fig. 2. Drawing of remote monitoring system for sealing leakage of industrial ball valve[8].

를 필요로 하지 않는다.

내부 누출 센서는 산업용 볼 밸브 내부에 흐르는 가스 및 유체의 기밀 누출을 감지하는 센서로, 유량, 온도 및 압력 등을 확인하거나 볼 밸브의 벤트 볼트와 드레인 볼트에 가스 또는 압력 센서를 내장하여 내부에서 형성되는 기밀 누출을 파악할 수 있다[8]. 내부 기밀 누출 센서는 Fig. 2에 나타난 것과 같이 밸브 외부에 있는 통신 모듈을 통해 서버로 데이터를 전송하여 원격지에서 밸브를 모니터링할 수 있게 구성되어 있다.

가스센서의 성능검증 방안은 일반적으로 활용되고 있는 외부가스누출 센서에 대해서 개발하였다.

2.2. 액추에이터부 구성 및 특성

액추에이터 패키지는 무선 통신 모듈을 포함하고 있어 내장 센서를 통해 액추에이터에 생기는 이상 데이터를 수집하고 서버로 전송하여 실시간 무선 모니터링 시스템을 구축할 수 있다. 또한 액추에이터 패키지는 무선 밸브 제어를 위한 액추에이터 드라이버 및 컨트롤러 모듈이 포함되어 있어 위험 발생 시 액추에이터를 통해 밸브를 원격으로 개폐하여 추가적인 안전사고를 예방할 수 있다.

액추에이터 패키지는 크게 센서부와 구동부로 이루어져 있다. 센서부에는 온습도 센서, 모션 센서, VOC 센서, 불꽃 센서, 전류 센서 및 엔코더가 있으며 각 센서는 액추에이터의 동작 상태 및 이상을 판단하기 위한 데이터를 수집한다. 수집된 데이터는 무선 통신 모듈을 통해 외부로 전송되어 실시간 모니터링 시스템과 연동된다. 이때 액추에이터 내부의 이상이나 주변 설비의 고장 등으로 인하여 임의로 제어가 필요한 경우 원격지에서 무선 통신을 통하여 액추에이터의 구동부를 조작할 수 있다.

Table 2. Description for parts of actuator package

Part		Description
Sensing	Temp. Humidity	Measure change of resist by changing temperature and humidity on semiconductor
	Motion	MEMS type acceleration sensor that measure change of capacitance by detecting motion
	VOC	measure the concentration of a target gas by oxidizing or reducing the target gas at an electrode and measuring the resulting current
	Flame	Photodiode(PIN) detects the light from the flame
	Current	Detects electric current in a wire and generates a signal proportional to that current
	Encoder	Converts the angular position or motion of a shaft or axle to analog or digital output signals
Operating	Motor	Converts electric energy into mechanical energy
	Reducer	Reduce speed with which power is transmitted

Table 2에 액추에이터 패키지 각 부의 명칭과 특성을 나타내었다.

III. 센서 관련 성능 검증 방안

3.1. 성능 평가 및 방폭 관련 규격

가스 센서의 성능시험은 검출 가스의 종류에 따라 서로 다른 기준을 적용해야 한다. 검출 가스는 크게 가연성 가스와 독성 가스의 두 가지로 분류하며 각각 「KS C 6590 가연성 가스감지기의 성능시험방법」과 「KS C 6592 독성 가스감지기의 성능시험방법」의 내용에 따라 기본적인 성능 평가를 수행해야 한다[9,10].

가스 센서의 설치 장소가 잠재적인 폭발 위험을 가지고 있을 경우 환경적인 위험 요인을 파악하여 전기설비의 방폭등급에 따른 방폭구조, 설비등급 및 온도 등급을 만족하는 방폭 성능을 갖추어야 한다. 이는 「산업안전보건법」 제34조 제1항과 「산업안전보건법시행령」 제28조 제1항 제2호에 따른 방호

장치의 안전인증기준을 규정하는 방호장치 안전인증 고시(고용노동부고시 제2020-55호) 제7장에서 제시하는 성능기준을 만족하여야 한다[11-13]. 설치 후 유지보수 및 안전관리를 위해 「KGS GC103 (방폭전기기기의 점검 및 유지관리에 관한 기준)」에서 제시하는 방폭 관련 점검항목을 체크리스트로 하여 점검을 수행한다[14].

3.2. 현장부합성 평가 방안

산업용 밸브 안전관리 시스템에 사용되는 가스 센서는 기 검증된 제품을 사용하므로 실제로 설치되는 환경에 부합하는 적절한 센서를 선정하고 설치 기준을 정하는 것이 중요하다. 이를 위해 센서의 현장부합성에 대한 평가기준을 수립하였다.

(1) 센서 선정 기준

센서를 설치하기 전 센서의 주요 성능지표들을 통해 다음과 같은 사항을 만족하는지 확인한다.

- a) 감지 농도 범위, 응답속도 및 민감도 등 센서의 성능지표가 용도에 적합한지 여부
- b) 센서 동작 온도, 습도 및 압력 범위가 설치 환경에서 정상 작동할 수 있는 범위인지 여부
- c) 감지 대상 가스가 가연성이면서 독성인 경우, 독성가스에 대한 기준을 적용하여 선정
- d) 센서 설치 장소가 폭발 위험지역으로 방폭 성능이 요구 될 때 위험분위기 및 가스그룹에 알맞은 방폭구조를 갖추고 있는지 여부

(2) 센서 설치 장소 선정 기준

다음과 같은 장소에는 가스 누출로 인한 2차 사고가 발생할 우려가 있으므로 가스 센서의 주요 설치 장소로써 고려되어야 한다.

- a) 건축물 내·외에 설치되어 있는 가연성 및 독성물질을 취급하는 밸브, 반응기 및 배관 연결부위 등 가스의 누출이 우려되는 화학설비 주변
- b) 가열로 등 발화원이 있는 제조설비 주위에 가스가 체류하기 쉬운 장소
- c) 가연성 및 독성물질의 충전설비 접속부 주위
- d) 그 밖에 가스가 특별히 체류하기 쉬운 장소

(3) 경보 설정 기준

경보 설정치는 「가스누출감지경보기 설치에 관한 기술상의 지침(고용노동부고시 제2015-59호)」에서 제시하는 내용을 따르며 다음과 같다.

- a) 가연성 가스누출감지경보기는 감지대상 가스의 폭발하한 25퍼센트 이하, 독성가스 누출감

지경보기는 해당 독성가스의 허용농도 이하에서 경보가 울리도록 설정하여야 한다.

- b) 가스누출감지경보기의 정밀도는 경보설정치에 대하여 가연성 가스누출감지경보기는 ± 25 퍼센트 이하, 독성가스누출감지경보기는 ± 30 퍼센트 이하로 한다[15].

(4) 경보설정 기준에 따른 현장부합성 평가방안
경보 설정에 관한 법령을 토대로 현장에서의 안전 관리를 강화하기 위하여 경보 설정값에 대한 새로운 기준을 수립하였다. 가스누출감지경보기의 경보를 누출농도에 따라 안전관리 등급 4단계로 나누어 설정하여 가스누출에 대한 모니터링 수준을 강화하고, 위험한 수준에 도달하기 이전에 작업자들에 대한 경고 및 사고 예방 조치를 취하게 하여 사고 규모를 축소할 수 있다. 감지대상 가스의 종류에 따라 각각의 단계에 대한 경보 설정치가 다르며 크게 가연성가스와 독성가스로 구분한다. 감지 대상 가스가 가연성이면서 독성인 경우, 독성가스에 대한 기준을 적용하여야 한다. 실제 현장에서 경보 설정값이 다음과 같이 적용되었는지 확인하는 것으로 현장부합성을 평가한다.

Table 3. Standard for combustible gas leak alarm setting value (Gas concentrations in air, %)

Gas type	Level 1(Safety)	Level 2(Caution)	Level 3(Warning)	Level 4(Danger)
LPG	Less than 0.05%	0.05 ~ 0.45%	0.45 ~ 1.8%	1.8 ~ 8.4%
LNG	Less than 0.05%	0.05 ~ 1.25%	1.25 ~ 5%	5 ~ 15%
H ₂	Less than 0.05%	0.05 ~ 1%	1 ~ 4%	4 ~ 75%
CO	Less than 0.05%	0.05 ~ 3.12%	3.12 ~ 12.5%	12.5 ~ 74%
C ₂ H ₆	Less than 0.05%	0.05 ~ 0.75%	0.75 ~ 3%	3 ~ 12.5%
C ₂ H ₄	Less than 0.05%	0.05 ~ 0.68%	0.68 ~ 2.7%	2.7 ~ 36%
C ₂ H ₂	Less than 0.05%	0.05 ~ 0.63%	0.63 ~ 2.5%	2.5 ~ 81%
NH ₃	Less than 0.05%	0.05 ~ 3.75%	3.75 ~ 15%	15 ~ 28%
HCN	Less than 0.05%	0.05 ~ 1.5%	1.5 ~ 6%	6 ~ 41%

a) 가연성가스 경보설정

산업용 시설에서 주로 사용하는 일부 가연성가스에 대하여 가스누출감지경보기의 경보 설정 기준을 Table 3에 나타내었고 4단계로 분류하였다.

1단계 : 대기 중 감지대상 가스의 농도가 미소하여 가스 센서에 의해 농도가 측정되지 않는 상태이다. 가스의 누출이 발생하지 않았거나 누출된 가스가 누적되지 않을 정도로 충분히 환기되고 있어 폭발사고의 우려가 없는 안전한 단계이다. 가연성 가스센서의 분해능을 고려하여 최소검지농도를 0.05%로 정하고 1단계(안전)에 적용하였다.

2단계 : 최소검지농도부터 폭발하한의 25%까지의 구간으로 가스누출이 폭발사고로 이어지는 것

에 대한 주의가 필요한 단계이다. 가스누출을 작업자에게 알려 큰 사고로 이어지지 않도록 즉시 환기 조치를 하고 누출 원인을 파악한다. 「가스누출감지경보기 설치에 관한 기술상의 지침(고용노동부고시 제2015-59호)」에서 정하는 내용에 따라 2단계(주의)의 농도 상한 기준을 가연성가스 폭발하한의 25% 이하로 정하였다.

3단계 : 가연성가스 폭발하한의 25% 농도부터 폭발하한 농도 사이의 구간으로, 짧은 시간 안에 폭발범위 농도에 도달할 수 있는 단계이다. 폭발사고로 이어지지 않도록 가스 밸브를 즉시 차단하고 폭발 위험에 대하여 작업자에게 대피 경보를 알리도록 한다.

Table 4. Standard for toxic gas leak alarm setting value (Gas concentrations in air, parts per million)

Gas type	Class	Level 1(Safety)	Level 2(Caution)	Level 3(Warning)	Level 4(Danger)
H ₂ S	TWA	Less than 0.001 ppm	0.001 ~ 2.5 ppm	2.5 ~ 10 ppm	Over than 10 ppm
	LC50	Less than 0.001 ppm	0.001 ~ 310.8 ppm	310.8 ~ 444 ppm	Over than 444 ppm
CO	TWA	Less than 0.001 ppm	0.001 ~ 21 ppm	21 ~ 30 ppm	Over than 30 ppm
	LC50	Less than 0.001 ppm	0.001 ~ 2632 ppm	2632 ~ 3760 ppm	Over than 3760 ppm
NH ₃	TWA	Less than 0.001 ppm	0.001 ~ 17.5 ppm	17.5 ~ 25 ppm	Over than 25 ppm
	LC50	Less than 0.001 ppm	0.001 ~ 5136.6 ppm	5136.6 ~ 7338 ppm	Over than 7338 ppm
Cl ₂	TWA	Less than 0.001 ppm	0.001 ~ 0.35 ppm	0.35 ~ 0.5 ppm	Over than 0.5 ppm
	LC50	Less than 0.001 ppm	0.001 ~ 205.1 ppm	205.1 ~ 293 ppm	Over than 293 ppm
F ₂	TWA	Less than 0.001 ppm	0.001 ~ 0.07 ppm	0.07 ~ 0.1 ppm	Over than 0.1 ppm
	LC50	Less than 0.001 ppm	0.001 ~ 129.5 ppm	129.5 ~ 185 ppm	Over than 185 ppm
SO ₂	TWA	Less than 0.001 ppm	0.001 ~ 1.4 ppm	1.4 ~ 2 ppm	Over than 2 ppm
	LC50	Less than 0.001 ppm	0.001 ~ 1764 ppm	1764 ~ 2520 ppm	Over than 2520 ppm
NO	TWA	Less than 0.001 ppm	0.001 ~ 17.5 ppm	17.5 ~ 25 ppm	Over than 25 ppm
	LC50	Less than 0.001 ppm	0.001 ~ 609 ppm	609 ~ 870 ppm	Over than 870 ppm
NO ₂	TWA	Less than 0.001 ppm	0.001 ~ 2.1 ppm	2.1 ~ 3 ppm	Over than 3 ppm
	LC50	Less than 0.001 ppm	0.001 ~ 61.6 ppm	61.6 ~ 88 ppm	Over than 88 ppm
HCN	TWA	Less than 0.001 ppm	0.001 ~ 3.29 ppm	3.29 ~ 4.7 ppm	Over than 4.7 ppm
	LC50	Less than 0.001 ppm	0.001 ~ 99.4 ppm	99.4 ~ 142 ppm	Over than 142 ppm
HCl	TWA	Less than 0.001 ppm	0.001 ~ 0.7 ppm	0.7 ~ 1 ppm	Over than 1 ppm
	LC50	Less than 0.001 ppm	0.001 ~ 1093.4 ppm	1093.4 ~ 1562 ppm	Over than 1562 ppm
HF	TWA	Less than 0.001 ppm	0.001 ~ 0.35 ppm	0.35 ~ 0.5 ppm	Over than 0.5 ppm
	LC50	Less than 0.001 ppm	0.001 ~ 239.4 ppm	239.4 ~ 342 ppm	Over than 342 ppm

4단계 : 가연성가스의 폭발범위에 해당하는 농도 구간으로 산소 및 점화원이 존재할 경우 폭발사고로 이어지는 위험한 단계이다.

폭발방지 또는 사고 규모를 최소화하기 위하여 가스누출 경보와 가스밸브 차단이 이루어져야 하고 119 및 비상대응팀이 출동하여야 한다. 가연성 가스는 폭발하한부터 폭발상한까지의 범위에서 폭발사고에 대한 위험도가 가장 높으므로 해당 구간을 4단계(위험)로 정하였다.

b) 독성가스 경보설정

산업용 시설에서 주로 사용하는 일부 독성가스에 대하여 가스누출감지경보기의 설정기준을 Table 4에 나타내었다. 허용농도는 산정방식에 따라 TWA (Time Weight Average, 시간가중 평균농도)와 LC50 (Lethal Concentration 50%, 반수치사농도)의 두 가지 기준으로 나타내었다.

TWA는 정상인이 1일 8시간 또는 주 40시간 통상적인 작업을 수행함에 있어 건강상 나쁜 영향을 미치지 아니하는 정도의 공기 중 가스농도이며 LC₅₀는 해당 가스를 성숙한 흰쥐 집단에게 대기 중에서 1시간 동안 계속 노출시킨 경우 14일 이내에 그 흰쥐의 2분의 1 이상이 죽게 되는 가스의 농도이다. 기존의 「고압가스안전관리법 시행규칙」에서 독성물질의 TLV-TWA를 허용농도 기준으로 사용하고 정의하였으나 독성가스의 허용농도를 정하기 위한 인체 실험이 불가능하기 때문에 독성가스 사고 발생 시 역학조사를 통하여 특정 가스에 대한 허용농도를 지정하고 매년 법령의 개정이 이루어졌다. 이러한 번거로움을 없애고자 「고압가스안전관리법 시행규칙」의 2008.7.16. 개정안에서 독성가스의 판단기준을 국제기준에 맞게 조정하였고 허용농도 기준을 동물을 대상으로 실험할 수 있는 LC₅₀으로 변경하였다. 하지만 독성물질의 MSDS나 일부 KGS code의 가스누출감지경보장치에 대한 내용에서 경보설정 기준을 TLV-TWA로 사용하고 있는 등 최근까지도 두 허용농도 기준이 혼용되고 있기 때문에 본문에서도 두 가지 기준에 대한 경보 설정값을 4단계로 나누어 제시하였다[16].

1단계 : 대기 중 감지대상 가스의 농도가 미소하여 가스 센서에 의해 농도가 측정되지 않는 상태이다. 가스의 누출이 발생하지 않았거나 누출된 가스가 누적되지 않을 정도로 충분히 환기되고 있어 허용농도를 초과하는 사고가 발생할 우려가 없는 안전한 단계이다. 독성 가스센서의 분해능을 고려하여 최소검지농도를 0.001ppm으로 정하고 1단계(안전)에 적용하였다.

2단계 : 최소검지농도부터 허용농도의 70%까지에 해당하는 구간으로 독성가스가 허용농도 이상으로 누적되는 것에 대한 주의가 필요한 단계이다. 가스누출을 작업자에게 알려 중독 및 질식 사고로 이어지지 않도록 즉시 환기 조치를 하고 누출 원인을 파악한다. 본 가이드라인에서는 안전단계를 4단계로 세분하고자 「가스누출감지경보기 설치에 관한 기술상의 지침(고용노동부고시 제2015-59호)」에 따라 독성가스누출경보의 정밀도가 ±30퍼센트 이하인 것을 고려하여 허용농도의 70% 지점을 2단계(주의)의 농도 상한 기준으로 정하였다.

3단계 : 독성가스 허용농도의 70%부터 100%까지의 구간으로, 누출된 독성가스가 짧은 시간 안에 허용농도에 도달할 수 있는 단계이다. 작업자가 현장에 있는 경우 흡입으로 인한 중독 및 질식사고로 이어지지 않도록 가스 밸브를 즉시 차단하고 유독 가스 누출지역으로 부터 대피하도록 경보를 알리도록 한다.

4단계 : 독성가스의 허용농도를 초과한 단계로, 가스 흡입으로 인한 중독과 폐 손상 및 산소 부족으로 질식 사고가 발생할 수 있으며 피부 및 기타 장기와의 접촉으로 인한 상해가 발생할 수 있다. 유독가스의 확산을 막기 위하여 가스누출 경보와 가스밸브의 차단이 이루어져야 하고 119 및 비상대응팀이 출동하여야 한다. 독성가스가 허용농도 이상일 때 흡입 및 접촉에 의한 피해가 가장 심각하기 때문에 해당 독성가스의 허용농도를 4단계(위험)의 하한 농도로 정하였다.

IV. 액추에이터 관련 성능 검증 방안

4.1. 성능 평가 및 방폭 관련 규정

액추에이터 패키지에 대한 성능 시험 중 액추에이터 동작에 관한 성능 시험은 「KS B 2823 산업용 밸브 전동액추에이터 - 일반요구사항」에서 제시하는 적합성 평가, 「KS IEC 60034-1 회전기기-제1부 : 정격 및 성능」에서 제시하는 정격 및 현장운전 조건에 대한 시험을 만족하거나 UL 및 CE 인증을 취득한 것으로 대신한다[17].

액추에이터는 다음 기준에서 제시한 사항을 따라 방폭 인증을 취득한다.

- a) 구성 장치의 방폭 함체는 「산업안전보건법」 제34조 제1항과 「산업안전보건법시행령」 제28조 제1항 제2호에 따른 방호장치의 안전인증 기준을 규정하는 방호장치 안전인증 고시(고용노동부고시 제2020-33호) 제7장에서 제시

Table 5. IEEE 802.11 standard transmit test[22]

IEEE 802.11 Standard	802.11a	802.11b	802.11g	802.11n	802.11ac
Transmit power	O	O	O	O	-
Transmit spectral mask	O	O	O	O	O
Transmit center frequency tolerance	O	O	O	O	O
Symbol clock frequency tolerance	O	-	O	O	O
Transmit power-on and power-down ramp	-	O	-	-	-
Transmitter center frequency leakage	O	-	O	O	O
RF carrier suppression	-	O	-	-	-
Transmitter spectral flatness	O	-	O	O	O
Transmitter modulation accuracy test	O	O	O	O	O
Transmitter constellation error	O	-	O	O	O

Table 6. IEEE 802.11 standard receive test[22]

IEEE 802.11 standard	802.11a	802.11b	802.11g	802.11n	802.11ac
Receiver minimum input level sensitivity	O	O	O	O	-
Adjacent channel rejection	O	O	O	O	O
Non-adjacent channel rejection	O	-	O	O	O
Receiver maximum input level	O	O	O	O	O

하는 성능기준 및 시험방법을 따른다[11-13].

- b) 폭발위험지역에서 사용하는 액추에이터의 경우 내압방폭구조 또는 본질안전방폭구조를 가져야하며 「KS C IEC 60079-1(방폭 기기 - 제1부 : 내압방폭구조 “d”)와 「KS C IEC 60079-11(본질안전방폭구조 “i”)」에서 제시하는 회전기기에 대한 규정을 따른다[18,19].
- c) 보호등급의 경우 「KS C IEC 60034-5(회전기기 - 제5부 : 회전 기기의 보호 등급(IP코드))」의 내용에 따라 IP68 등급에 해당하는 시험 방법을 따른다[20].

액추에이터의 방폭 관련 점검사항은 「KGS GC103 (방폭전기기의 점검 및 유지관리에 관한 기준)」에서 제시하는 방폭 관련 점검항목을 체크리스트로 하여 점검을 수행한다[14].

4.2. 현장부합성 평가 방안

- (1) 액추에이터 선정 기준
액추에이터를 설치하기 전 다음과 같은 사항을

확인하여 설치 환경에 적합한지 판단해야 한다.

- a) 듀티 타입(IEC 60034-1에서 정의된 S1부터 S10까지)이 의도된 운전조건에 적절한지 여부
- b) 공급 전압 및 주파수 범위 확인
- c) 작동기기(펌프 등)로부터의 열전이
- d) 베어링 및 윤활유 수명
- e) 절연 등급
- f) 토크, 속도, 전압, 밀폐등급 확인
- g) 액추에이터의 출력토크가 밸브를 구동하기에 적절한지 여부
- h) 센서 설치 장소가 폭발 위험지역으로 방폭 성능이 요구 될 때 위험분위기 및 가스그룹에 알맞은 방폭구조를 갖추고 있는지 여부

(2) 액추에이터 설치 전 검사 항목

액추에이터가 현장에 설치되기 전에 다음과 같은 검사를 진행하여 설치 후 발생할 수 있는 고장 및 오작동을 방지한다.

- a) 밸브 액추에이터에 대한 전류값 측정
- b) 액추에이터와 밸브 조립 후 개폐 작동시험

- c) 인칭 시험 시 각 구간별 (5, 50, 75, 100%) 개폐상태 확인시험
- d) 액추에이터에 대한 토크 시험
- e) 밸브 스템에 대한 스트로크 시험

(3)액추에이터 설치 장소 선정 기준
액추에이터의 고장 및 오작동을 최소화하기 위하여 다음과 같은 장소가 설치장소로써 고려되어야 한다.

- a) 깨끗한 공기로 환기가 잘되는 위치
- b) 기계 외함의 형태가 위치, 환경 및 주변 조건에 적합한 것
- c) 폭발 위험 지역의 경우 액추에이터의 방폭 성능에 맞는 지역을 선정하고 해당하는 방폭 등급 규칙 및 규정에 따라 설치
- d) 사용지역 주변온도가 제품의 사용온도 범위에 포함되는 곳에 설치

V. 무선통신 관련 성능 검증 방안

5.1. 성능 평가 및 방폭 관련 규격

WLAN(Wireless Local Area Network) 디바이스는 다양한 무선 통신 규격을 지원한다. 따라서 규격별 채널, 채널 대역폭, 변조 방법, 부호화율을 포함한 다양한 파라미터 조합을 평가해야 한다. 그 중 주로 사용하는 IEEE 802.11 규격을 기준으로 하였으며 해당 규격에서 규정한 송신 성능 측정 항목을 Table 5에, 수신 성능 측정 항목을 Table 6에 나타내었다[22]. 무선통신 방폭 관련 규격은 「KGS GC102 방폭전기기의 설계, 선정 및 설치에 관한 기준」과 「KS C IEC 60079-0 - 제0부 : 기기 - 일반요구 사항」의 내용을 따른다[22].

5.2. 현장부합성 평가 방안

(1) 원거리 무선 통신 전송 성공률

구성장치의 무선 통신 모듈(LTE Module)의 데이터 전송 성공률을 측정하여 원거리 통신 신뢰성을 검증할 수 있다. 무선 통신 중단 노드간 전송 성공률을 측정하며 시험 절차는 다음과 같다.

- a) 클라이언트용 센서 모듈에 전원을 인가한다.
- b) 웹 서버의 통신성공률 페이지에 접속한다.
- c) 웹페이지의 통신 점검 탭을 클릭한다.
- d) 클라이언트용 센서 모듈이 서버에 접속이 된 후, SEND에 5000을 기입 후 Send 버튼을 누른다. 메시지 기입 시 서버 수신메시지와 센서 모듈 응답 메시지를 다르게 설정한다.
- e) 웹에서 서버에서 보낸 데이터와 응답받은 데

이터를 확인한다.

- f) 클라이언트용 센서 모듈에 연결된 PC에서 서버에서 보낸 데이터와 서버에 보낸 데이터를 확인한다.
- g) 수식 (1)과 같이 전송성공률을 구한다. 여기서, 전송한 값과 수신된 값은 각각 전송 및 수신에 대한 횟수를 의미한다. 전송성공률에 대한 기준은 현장 여건에 따라 달라질 수 있고 관련된 적용사례로는 -20 ~ 60 °C 범위에서 30분간의 데이터 전송 횟수에 대해서 실시하였다.

$$\text{전송성공률(\%)} = \frac{\text{전송한 값}}{\text{수신된 값}} \times 100 \quad (1)$$

(2) 원거리 무선 통신 데이터 오분류율

액추에이터 패키지에 포함된 내장 센서 모듈의 측정된 값에 따라 정상 또는 이상 상태 판단을 확인하여 원거리 통신 신뢰성을 검증할 수 있다. 센서에 인가되는 값을 각 센서 마다 정상 수치 5회, 이상 수치 5회를 무작위로 입력하여 임의로 이상 상태를 만들어 주어야 하며 액추에이터 패키지의 VOC 센서, 온/습도 센서, 불꽃 감지 센서 및 가속도 센서에 대해 수행한다. 시험 절차는 다음과 같다.

- a) 센서를 제거한 클라이언트용 센서 모듈에 전원을 인가한다.
- b) 웹 서버의 센서 데이터 페이지에 접속한다.
- c) 클라이언트용 센서 모듈에 연결된 PC에서 각 센서에 인가되는 값을 강제로 입력한다.

(3) 근거리 무선통신 모의실험

구성장치가 설치될 환경을 다음 Table 7과 같이 임의로 조성하여 센서 노드간 근거리 무선 통신 성능을 측정하는 것으로 해당 무선 설비의 현장부합성을 평가할 수 있다. 평가 시험은 다음 사항들을 고려하여 구성하였다.

- a) 센서 노드 배치 시 신호 송신기(Transmitter)를 기준으로 수신기(Receiver)의 거리를 일정 간격으로 늘리거나 노드 간 장애물의 개수를 변화시키면서 패킷 에러율(Packet Error Rate, PER)을 측정한다. 실외의 경우 구조물을 활용하여 LOS(Line-of-Sight), NLOS(None-Line-of-Sight) 환경을 조성할 수 있다.
- b) 패킷 에러율이 낮을수록 무선 네트워크 시스템의 신뢰성이 보장되는 것으로 볼 수 있으며, 실제 환경에서의 방해 요인을 임의로 조성하여 통신 성능을 측정하는 것으로 무선 센서 네트워크의 현장부합성을 평가한다.

Table 7. Field adaptability for WLAN[23]

Environment	Method
WLAN	Channel overlapping
	Distance between sensor node and WLAN module
Indoor	By metal structure
	By concrete structure
	Communication between floors
Outdoor	LOS
	NLOS by stairs
	NLOS by structures

c) 설치 대상 장소의 실제 환경적 요건에 따라 Table 7의 근거리 무선통신에 대한 방해 요소를 적절히 배치하여 실험 환경을 조성할 수 있다.

VI. 결론

IoT 기반 산업용 밸브 안전관리 시스템이 개발됨에 따라 구성장치에 대한 성능 및 현장부합성에 대한 평가 방안이 요구되었다. 구성 장치는 가스 검지를 위한 센서와 산업용 밸브 제어를 위한 액추에이터 패키지로 이루어지며 각 부분은 무선 통신을 통하여 원격모니터링 및 제어가 가능하다.

이러한 안전관리 시스템에서 고장 및 오작동 발생 시 가스 누출에 의한 사고로 직결되므로 센서와 액추에이터의 동작과 무선통신에 대한 신뢰성을 중점적으로 검증하기 위한 성능검증 방안을 개발하였다. 가스 센서의 경우 가연성가스와 독성가스의 기준이 다르고 가스 종류별 특성에 따라 위험도 및 허용농도 기준이 다르므로 이를 고려하여 성능평가 방안을 개발하였다. 센서 성능평가 및 방폭 관련 규격을 조사 및 분석을 하고 실제로 설치되는 환경에 적합한 센서를 선정하고 설치 기준을 정하는 것이 중요하기 때문에 센서의 현장부합성에 대한 평가기준을 정의하였다.

액추에이터의 내장 센서를 통한 모니터링 기능과 원격 제어 기능에서 오류를 최소화하기 위한 성능평가 방안을 개발하였다. 액추에이터 관련 성능평가 및 관련규격을 조사 및 검토를 수행하고 설치 환경에 적합성 여부, 설치 전 검사항목 및 설치 장소 선정 기준에 대해서 개발하였다.

센서와 액추에이터의 무선 통신 성능은 원거리와 근거리 무선 통신 각각에 적합한 성능 평가 방안을 적용하였고 센서 노드 간 통신 성능과 장애물에 의한 전파 방해 요소를 고려하여 모의시험 평가 방안을 제시하였다. 또한, 성능평가 및 방폭 관련 규격을 조사 및 분석을 하고 현장부합성 평가기 위해 원거리 무선 통신 전송 성공률, 원거리 무선 통신 데이터 오분류율 및 근거리 무선통신 모의실험 방안을 수립하였다.

향후 연구는 개발한 성능 평가 방안을 적용하여 산업용 밸브 안전관리 시스템 구성장치에 대한 가이드라인을 작성하여 실제 현장에서 이 시스템을 적용할 수 있도록 할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 2017년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다. (No. 20172210100130)

REFERENCES

- [1] KPM, "Research for current Safety Management And usage of Industrial Valves", (2015)
- [2] S.K. Pandey, K.H. Kim, K.T. Tang, "A review of sensor-based methods for monitoring hydrogen sulfide", Trends in Analytical Chemistry, 32, 87-99, (2012)
- [3] S.C. Lee, H.J. Jang, U.B. Baek, C.S. Kim, S.H. Nahm, "Wireless Sensor Monitoring System for Hydrogen Leakage Detection", International Information Institute, 17(5), 1777-1782, (2014)
- [4] J.H. Yoon, J.M. Jung, B.J. Ko, "Implementation of Monitoring System for Smart factory", J. Adv. Navig. Technol. 22(5), 485-489, (2018)
- [5] J.H. Yoon, J.M. Jung, B.J. Ko, "Implementation of Monitoring System for smart Factory", J. Adv. Navig. Technol., 22(5), 485-489, (2018)
- [6] C. Garrido, F. J. Castano, D. Dieguez, Pedro S. Hernandez, "Wireless Remote Monitoring of Toxic Gases in Shipbuilding", Journal of Sensors, 14, 2981-3000, (2014)
- [7] S.C. Lee, C.S. Kim, S.H. Nahm, "Development of Hydrogen Gas Leak Monitoring System based on Sensor Network", Korea Multimedia Society, 280-282, (2010)
- [8] S.Y. Park, "Remote Monitoring System for Sealing

- Leakage of Industrial Ball Valve*”, KR Patent 101663490B1, (2016)
- [9] Korean Industrial Standard, “*Performance requirements for combustible gas detectors*”, KS C 6590, (2007)
- [10] Korean Industrial Standard, “*Performance requirements for toxic gas Detection-instruments: Hydrogen sulfide*”, KS C 6592, (2007)
- [11] Occupational Safety and Health Act, Article 34, Clause 1, (2020)
- [12] Enforcement Decree of Occupational Safety and Health Act, Article 28, Clause 1, (2020)
- [13] Public Notice of Safety Certification for Protective Device Chapter 7 (2020)
- [14] Korea Gas Safety Corporation, “*Inspection and Maintenance Code for Explosion Proof Electrical Equipment*”, KGS GC103, (2018)
- [15] Technical Guidelines for Installation of Gas Leak Alarms, Article 6, (2015)
- [16] Enforcement Rule of High-Pressure Gas Safety Control Act, Article 2, (2019)
- [17] Korean Industrial Standard, “*Electric actuator for industrial valves - General requirements*”, KS B 2823, (2017)
- [18] Korean Industrial Standard, “*Explosion atmospheres - Part 1: Equipment protection by flameproof enclosures “d”*”, KS C IEC 60079-1, (2014)
- [19] Korean Industrial Standard, “*Explosion atmospheres - Part 11: Intrinsically safe circuits “i”*”, KS C IEC 60079-11, (1999)
- [20] Korean Industrial Standard, “*Rotating electrical machines Part 5: Degrees of protection provided by the integral design of rotating electrical machines(IP code) - Classification*”, KS C IEC 60034-5, (2008)
- [21] Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE 802.11 Standard
- [22] Korea Gas Safety Corporation, “*Design, Selection and installation Code for Explosion Proof Electrical Equipment*”, KGS GC102, (2018)
- [23] X. Di, B.H. Moon, “*Performance Analysis of Wireless Sensor Nodes over Indoor and Outdoor Environments*”, Journal of the Korea Industrial Information Systems Research, 17(2), 1-9, (2012)