

## 산업용 밸브의 위험요소 분석을 통한 IoT 기반 안전관리 방안 개발

†김정훈 · 김영규

한국가스안전공사 가스안전연구원  
(2019년 8월 9일 접수, 2019년 10월 24일 수정, 2019년 10월 25일 채택)

### Development of IoT-based Safety Management Method through an Analysis of Risk Factors for Industrial Valves

†Jung-Hoon Kim · Young-Gu Kim

*Institutes of Gas R&D, Korea Gas Safety Corporation, Eumseong, 369-811, Korea*  
(Received August 9, 2019; Revised October 24, 2019; Accepted October 25, 2019)

#### 요약

플랜트시설의 핵심부품인 산업용 밸브에 대한 기존안전관리는 인력에 의해 관리되고 있으며 점검 영역이 넓고 시설물의 특성상 제한된 접근성을 가지고 있기 때문에 어려움이 있다. 플랜트 시설의 수많은 산업용 밸브에서 누출 및 고장 발생 시 생산중단, 독성물질 및 가연성 가스의 누출 및 폭발로 인한 인명피해, 사고 위치 파악 어려움 등의 문제점이 발생되기 때문에 사물인터넷(IoT) 기술을 기반으로 한 안전관리 및 제어 시스템이 필요하다. 이 연구에서는 IoT 기반 무선통신을 통한 산업용 밸브의 안전관리 및 액추에이터 제어 시스템 개발 내용 중에서 위험요소 예측 기술 개발과 관련된 내용이다. 밸브의 구조적 특성 분석을 하고 고장데이터, 문헌 등으로 부터 주요 위험요소 분석, 위험요소 원인분석 및 사고시나리오 분석을 통해 주요 위험요소로 인한 사고를 예방하기 위해 IoT 기반 산업용 밸브의 안전관리 기법을 개발하였다.

**Abstract** - The safety of industrial valves, which are the core parts of plant facilities, are managed by manpower and there are difficulties because of side area for inspection and limited accessibility due to the nature of facilities. The industrial valves used in plant facilities cause problems such as interrupted production; a loss of life due to leak or explosion of poisonous material and flammable gases, and difficulty in locating accident positions in the event of leakage or failure. Therefore, safety management and control systems based on IoT technology are needed. This study is about the development of risk factor prediction technique among the safety management of industrial valves through IoT- based wireless communication and the development of actuator control system. We have developed IoT-based industrial valve safety management techniques to prevent accidents caused by main risk factors by conducting an analysis of the structural characteristics of valves and an analysis of the causes of main risk factors through review of failure data and literature and an analysis of accident scenarios.

**Key words** : industrial valves, IoT, safety management system, accident prevention

#### I. 서론

최근 발생하는 플랜트의 대형 사고는 밸브의 노후나 불량으로 인하여 발생하는 사고로

서, 밸브는 배관과 더불어 시설물의 핵심 시설물로 항상 위험에 노출되어 있으며, 수량이 많고 넓은 지역에 분포되어 관련 안전관리 연구가 필요하다[1-4].

산업용 밸브 및 액추에이터는 가스, 액체 및 유동 고체의 흐름을 제어, 방향화, 조정하

†Corresponding author:jhkim223@kgs.or.kr  
Copyright © 2019 by The Korean Institute of Gas

기 위해 사용되는 디바이스이다. 밸브는 제어하는 유체의 종류에 따라 재료 및 구조가 상이하고 그 사용분야가 매우 광범위해 다품종 소량 생산방식을 취할 수 밖에 없고 수요자의 주문에 따라 생산, 공급하는 주문생산방식의 비중이 매우 큰 것이 특징이다. 밸브는 파이프에 연결하여 제품의 생산 또는 수송에 사용하므로 일단 고장이 나면 전체 생산을 중단해야 하는 경우가 있기 때문에 중요하다.

이 연구에서는 밸브의 구조적 특성 분석을 하고 고장데이터, 문헌 등으로 부터 주요 위험요소 분석 및 위험요소의 원인분석을 통해 주요 위험요소로 인한 사고를 예방하기 위해 IoT 기반 안전관리 방안을 개발하였다.

## II. 산업용 밸브의 구조적 특성 분석

여러 가지 밸브가 있지만, 증기 배관에서 사용되는 수동밸브의 대표적인 것으로는 글로브 밸브, 볼 밸브, 게이트 밸브, 버터플라이 밸브 등이 있으며 이 연구에서는 플랜트 분야에서 많이 사용하고 있는 볼밸브와 글로브밸브에 대해 분석을 수행하였다.

Fig. 1의 볼 밸브는 열고 닫는 기능이 뛰어나며 핸들을 90도 회전시켜 개폐가 가능하며 유체가 흐르는 관의 내경과 같은 크기의 폴포트가 가능해서 압력손실이 적다. 또한, 밸브 축을 90도 회전 하는 것으로 그랜드 패킹부에서의 누설을 최소화 할 수 있는 특징도 있다.

주의점으로는 밸브가 전부 열렸거나 전부 닫혔을 때 이외에 밸브를 조금씩 열어가며 유량을 조절 하는데는 사용하지 않는 것이 좋은데 그 이유는 볼 밸브는 원형 모양의 소프트 밸브시트를 사용하고 있어서, 조금 열린 상태에서 사용하게 되면 밸브 시트의 일부분만이 힘을 받게 되어, 밸브 시트에 변형이 발생하고 밸브 시트가 변형되면 실링성이 저하되어 내부누설이 발생하게 된다.

조금 열린 상태 사용과 관련된 동작데이터가 계측 및 저장된다면 밸브 시트의 변형 발생 위험 예측을 통한 누설 예측 가능(시트변형 전)하고 시트변형이 발생하는 시점은 밸브의 회전력변화로 예측 가능(시트변형 발생시

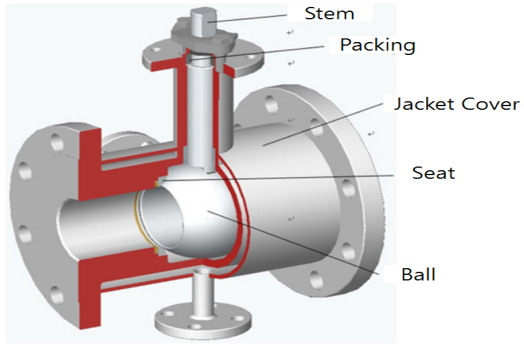


Fig. 1. Structure and operational mode of a ball valve.

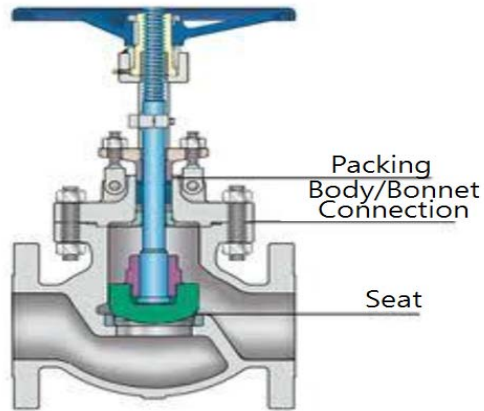


Fig. 2. Structure and operational mode of a globe valve.

점)할 것으로 판단되며, 이런 원인을 제거하기 위해 조금 열린 상태가 되는 경우 안전관리자에게 알려주거나 액추에이터로 제어하는 방안도 있을 것이다.

Fig. 2의 글로브밸브는 유량을 조절하는 용도 뿐만 아니라 차단하는 용도에도 널리 사용할 수 있다.

밸브 플러그가 밸브시트에 밀착하면 닫히고, 떨어지면 열리기 때문에 유량 조절은 밸브시트의 열림 면적이 아니라 밸브의 리프트(밸브 시트에서의 거리)로 행해 진다.

반쯤 열린 상태에서 사용을 해도, 밸브 시트나 밸브가 유체에 의해 손상을 잘 받지 않는 것이 특징이며, 특히 유량조절에 주안점을 둔

글로브 밸브에는 니들밸브(압력상승에 따른 배관 및 가압설비 보호를 위한 밸브)가 있다.

유의점으로서, 유로가 S자 모양이 되어 있기 때문에, 다른 타입의 밸브에 비해 압력 손실이 커지는 것과 밸브를 열거나 닫기 위해서는 밸브축(스텸)을 많이 회전시켜야 하기 때문에, 그랜드 패킹부에서의 누설 발생이 잦은 편이다. 밸브를 열거나 닫는 횟수 관련 데이터가 모니터링이 되면 스텸프의 재료 특성을 고려하여 마모 계산을 통한 누설 예측이 가능하다.

또, 회전하면서 썩기처럼 밸브가 닫히기 때문에 완전히 닫히는 위치 파악이 어렵고, 너무 잠그게 되면 시트면에 상처를 내는 사례가 있으며 밸브 동작데이터로 제어하는 방안을 고

려할 수 있다.

### III. 산업용 밸브의 위험요소 분석

#### 3.1. 문헌 조사를 통한 위험요소 분석

일반적 산업용 밸브에서의 파괴모드, 파괴 원인 및 영향을 검토 및 분석을 통해 결과적으로 발생하는 영향인자에 대해 모니터링이 가능한 관련 센서를 Table 1과 같이 설정하였다.

산업용 밸브는 9개 케이스의 고장모드로 구분할 수 있다. Seal 누출의 경우 약화, 내시공성, 마모, 표면손상, 뒤틀림 및 동적 불안정으로 발생하고 내부 또는 외부 누출이 될 수 있기 때문에 내/외부 센서 또는 시트누르개의

**Table 1.** Types, causes and effects of failure mode for general valves and review of related sensors [5]

Failure mode	Cause of failure	Effect	Review of related sensor
Seal leakage	<ul style="list-style-type: none"> <li>Embrittlement (making it embrittled)</li> <li>Installation damage</li> <li>Wear</li> <li>Surface damage</li> <li>Distortion</li> <li>Dynamic instability</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Internal or external leakage</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Internal / external leak sensor</li> </ul>
Worn or damaged poppet seat	<ul style="list-style-type: none"> <li>Wear of poppet / seat assembly</li> <li>Pollutant</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Unsealed poppet causes internal leak</li> <li>Low or irregular pressure drop</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Internal / external leak sensor</li> <li>Pressure sensor</li> </ul>
Damaged valve stem	<ul style="list-style-type: none"> <li>Vibration</li> <li>Shock</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Defective valve response</li> <li>Open / Closed failure</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Torque (turning force) Sensor</li> </ul>
Worn or damaged spool	<ul style="list-style-type: none"> <li>Pollutant</li> <li>Poor adjustment</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Internal leakage</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Internal leak sensor</li> </ul>
Valve piston fixing of main valve body	<ul style="list-style-type: none"> <li>Pollutant</li> <li>Lubricant shortage</li> <li>Bubbles in the coating film</li> <li>Very high temperature</li> <li>Structural interference</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Low or irregular pressure drop</li> <li>Reduced operational response</li> <li>Valve not moving</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Pressure sensor and torque sensor</li> </ul>
Broken or damaged spring ends	<ul style="list-style-type: none"> <li>Fatigue</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Failure to adjust or maintain pressure</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Pressure sensor</li> </ul>
Inoperative solenoid parts	<ul style="list-style-type: none"> <li>Winding coil is opened</li> <li>Poor alignment in spool or poppet stem</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Valve open / closed failure</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Torque sensor</li> </ul>
External leakage	<ul style="list-style-type: none"> <li>Pollutant</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Worn poppet stem</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>External leak sensor</li> </ul>
Cracked parts / housing (parts cover)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Fatigue</li> <li>External shock</li> <li>Vibration</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>External leakage</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>External leak sensor</li> </ul>

접지력 센서 등이 필요할 수 있다.

마모나 손상된 포핏 시트는 포핏/시트 조립부의 마모나 오염물질로 발생하고 밀봉되지 않은 포핏은 내부누설이 발생하고 불규칙한 압력저하가 발생 할 수 있기 때문에 내부 누출센서, 압력센서 및 패킹 누르개의 접지력 센서 등이 요구된다.

손상된 밸브 Stem의 경우 진동이나 충격으로 발생하고 밸브 반응 불량 및 열림/닫힘 실패가 되기 때문에 토크(회전력)센서가 필요하다.

마모나 손상된 Spool은 오염물질과 조정불량으로 발생하고 내부누설이 될 수 있어 내부 누출센서와 시트누르개의 접지력 등의 센서를 설치한다.

메인 밸브 본체에 밸브 피스톤 고착의 경우 오염물질, 윤활유 부족, 도료 도막에 기포가 발생해 있는 상태, 매우 높은 온도 및 구조적 간섭이 원인이며 낮거나 불규칙한 압력저하, 운전상의 반응 감소 및 밸브 움직임 고착화로 인해 압력센서 및 토크센서가 필요하다.

파손된 스프링 또는 손상된 스프링 엔드는 반복된 하중으로 인한 피로에 의해 발생되며 압력을 조정하거나 유지하지 못하게 되기 때문에 압력센서를 설치한다.

작동하지 않는 솔레노이드 어셈블리는 권선형 코일이 개방되거나 스톱 또는 포핏 대에 정렬이 불량한 경우에 생기며 밸브 열림/닫힘 실패가 되어 토크센서 설치를 해야 한다.

외부누출의 주요 고장원인은 오염물질이고 포핏 대 마모가 발생해서 누출이 되기 때문에 외부누출센서가 필요하다.

균열이 있는 부품 또는 housing은 피로, 외부충격 및 진동으로 발생하고 외부누출이 될 수 있기 때문에 외부누출 센서를 설치한다.

각 고장모드의 영향내용 검토를 통해서 주요 위험요소가 누출과 동작불량인 것을 알 수 있다.

### 3.2. 산업용 밸브 고장데이터 분석을 통한 위험요소 분석

국내 산업용밸브 주요 제조사 3곳으로 부터 최근 3년 동안의 고장데이터를 수집 및 데이터 가공을 하여 고장종류 발생현황, 불밸브와

글로브 밸브의 주요 고장종류와 취약 위치 분석을 하였다.

Fig. 3은 모든 밸브 형식의 파괴모드 현황을 보여준다. 누출 126건, 작동불량 35건, 기타 7건 등의 고장이 발생하고 있는 것을 알 수 있다. Fig. 4는 모든밸브 형식의 고장 종류 중 누

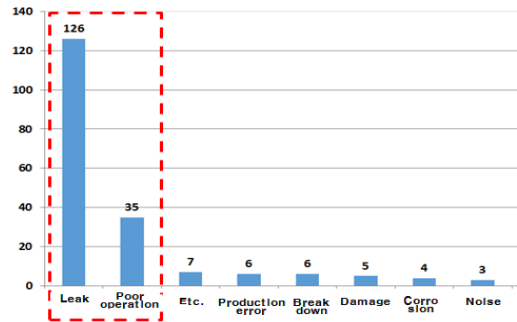


Fig. 3. Status of fault mode for all types of valve.

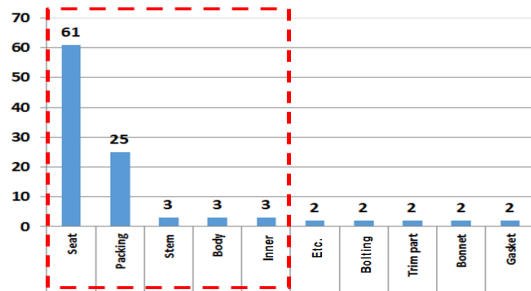


Fig. 4. Vulnerable position related to leak fault mode for all types of the valve.

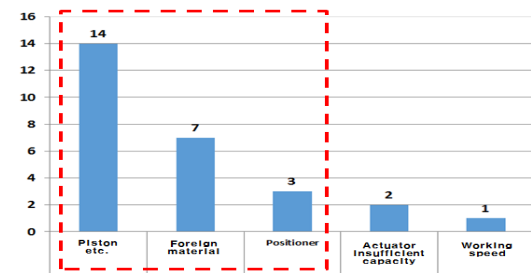


Fig. 5. Vulnerable position related to poor operation fault mode for all types of the valve.

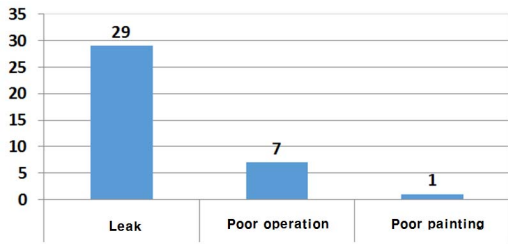


Fig. 6. Status of fault mode for ball valve.

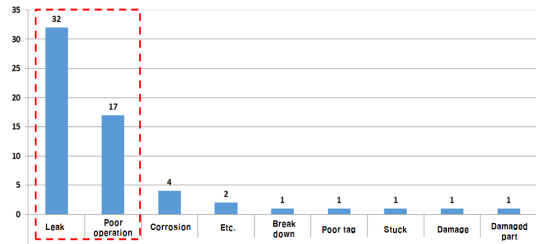


Fig. 8. Status of fault mode for globe valve.

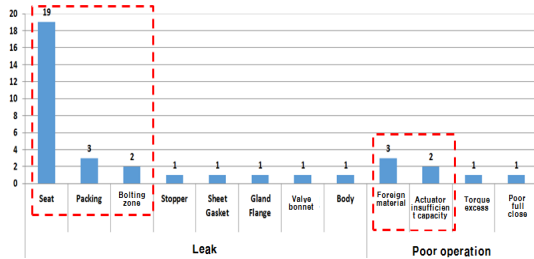


Fig. 7. Vulnerable position related to fault modes for ball valve.

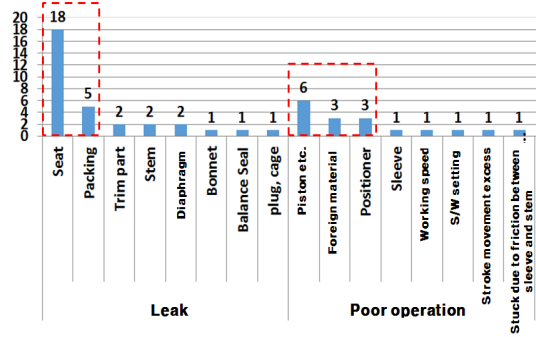


Fig. 9. Vulnerable position related to fault modes for globe valve.

출 고장모드의 주요 취약위치를 나타낸다. 주요 취약위치는 내부누출과 관계있는 Seat와 외부누출이 발생할 수 있는 Packing부이며 그 외에 몸체와 내부 등이 있다. Fig. 5는 모든 밸브 형식의 작동불량 고장모드의 주요 취약위치로 피스톤, 이물질 및 Positioner 등에서 발생한다.

Fig. 6은 볼밸브 형식의 파괴모드 현황을 보여준다. 누출 29건, 작동불량 7건, 도장불량 1건의 고장이 발생하고 있는 것을 알 수 있다. Fig. 7은 볼밸브 형식의 고장 종류 중 누출 및 작동불량 고장모드의 경우 주요 취약위치를 나타낸다. 누출부는 Seat, Packing, Bolting 등에서 발생하고, 작동불량은 액츄에이터 및 이물질 등에서 발생한다.

Fig. 8은 글로브밸브 형식의 파괴모드 현황을 보여준다. 누출 32건, 작동불량 17건, 부식 4건 등의 고장이 발생하고 있는 것을 알 수 있다. Fig. 9는 글로브밸브 형식의 고장 종류 중 누출 및 작동불량 고장모드의 경우 주요 취약위치를 나타낸다. 누출은 Seat 및 Packing 등에서 발생하고, 작동불량은 피스톤, 이물질

및 Positioner 등에서 발생한다.

볼밸브와 글로브 밸브의 주요 위험요소는 문헌조사와 동일하게 Fig. 6과 Fig. 8에서와 같이 누출과 작동불량인 것을 확인 할 수 있다.

### 3.3. 산업용 밸브의 주요 위험요소 발생의 원인 분석

밸브고장데이터로 부터 실제 현장에서 발생하는 주요 위험 요소인 내·외부 누출과 동작 불량 발생의 주요원인은 Fig. 10 및 Fig. 11과 같이 이물질이라는 것을 알 수 있다. 관련 문헌에서도 주요 고장 모드는 오염물질로 인한 마모이고 가스 밸브에서 오염물질은 압력을 받는 액체를 포함하고 시트는 밀봉요소가 시트와 접촉하는 곳에서 마모가 되어 누출이 된다.

오염 물질에 의한 포켓 및 시트의 열화는 재료 특성 및 오염 물질의 수와 포켓이 열려 유체 압력 하에서 오염 물질에 노출되는 시간 등에 따라 달라진다. 오염계수(Z)은 아래 식과 같으며 영향을 주는 인자를 확인 할 수 있다[5].

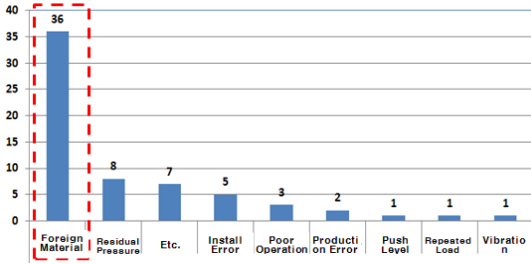


Fig. 10. Distribution of main causes for leaks

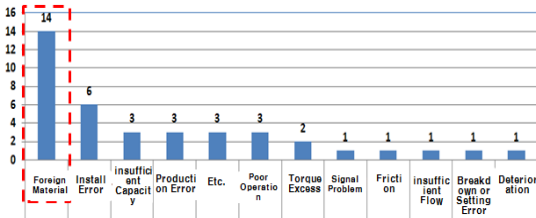


Fig. 11. Distribution of main causes for poor working

$Z = (function\ of)[\alpha, n, Q, d, T]$   
 여기서:  $Z$  = 포맷 / 시트 열화  
 $\alpha$  = 오염 물질 마모 계수,  $in^3 / 입자$   
 $n$  = 오염 입자의 수/  $in^3$   
 $Q$  = 유량,  $in^3/min$   
 $d$  = 포맷이 열려있는 시간과 총 작동 시간의 비율  
 $T$  = 작동 온도,  $^{\circ}F$

시스템 및 유체 매질의 청결은 밸브의 작동 및 수명에 직접적인 영향을 미치고 오염 물질은 포맷을 방해하거나 막히게 할 수 있으며 금속 간 시트 밸브에 과도한 누출을 발생시킨다. 기체 상태의 매질인 헬륨과 같이 더 가벼운 기체의 미립자 물질은 음파 조건 하에서 얻을 수 있는 매우 빠른 속도 때문에 내부 부품, 특히 시트에 매우 파괴적일 수 있다.

입자 크기 분석에는 필터 유지 관리 일정, 밸브와 필터 사이의 상류 구성 요소의 수 및 포맷 / 시트 어셈블리에서 마주칠 수 있는 입자의 수, 상류 필터 크기의 결정 등이 포함된다. 오염물질이 기본 고장률에 미치는 영향을 고려한 배율( $C_N$ )은 아래와 같으며 영향을 주는

Table 2. Particle material and  $N_{10}$  according to typical quantities [5]

Typical quantities of particles produced by hydraulic components	Particle material	Number particles under 10 micron per hour per rated GPM( $N_{10}$ )
Piston Pump	steel	0.017
Gear Pump	steel	0.019
Vane Pump	steel	0.006
Cylinder	steel	0.008
Sliding action valve	steel	0.0004
Hose	rubber	0.0013

인자를 확인 할 수 있고 Table 2dp 입자재료에 따른  $N_{10}$ 의 값을 나타낸다[5].

$$C_N = \left( \frac{C_o}{C_{10}} \right)^3 \cdot FR \cdot N_{10}$$

여기서:  $C_o$  = 시스템 필터 크기 (단위: 마이크론)  
 $C_{10}$  = 표준 시스템 필터 크기 = 10 마이크론  
 $FR$  = 정격 유량, GPM  
 $N_{10}$  = 입자 크기 계수

#### IV. 산업용 밸브 위험요소 관련 IoT 기반 안전관리 방안 개발

밸브고장데이터 및 문헌 등으로 부터 주요 위험요소인 내·외부 누출과 동작불량에 따른 고장 및 사고 시나리오를 정의하고 관련 피해 영향 및 조치 방안을 수립하였다.

##### 4.1. 누출 관련 IoT 기반 안전관리 방안

밸브고장데이터 및 문헌 등으로 부터 주요 위험요소인 내·외부 누출에 따른 고장 및 사고 시나리오 관련 피해영향 및 조치 방안을 Table 3과 같이 수립 하였다.

누출 모니터링 및 제어를 위해 누출, 유량, 압력, 온도, 음향방출 및 접지력 등의 센서 활용이 가능하다. 현장에서 외부누출의 경우 가스류는 소음 및 버블테스트, 액체류는 육안 판

Table 3. Effects of leak accident scenarios and action plans

Accident scenario	Review of effects	Action plans
- Internal leakage from the seat due to embrittlement, installation damage, wear, surface damage, distortion, dynamic instability, etc.	- Internal leak - Low or irregular pressure drop	- Take actions through internal leak sensors and internal pressure sensors in consideration of change characteristics
- Internal leakage and low / abnormal pressure drop due to wear or damage to the poppet / seat assembly due to wear and pollutants.		
- Leakage due to spools worn or damaged by pollutants and poor alignment		
- External leakage in packing parts due to brittleness, installation damage, wear, surface damage, distortion, dynamic instability etc.	- External leakage - Loss of life (by toxic gas)	- Take actions by detecting the change characteristics through monitoring using external leak sensors, etc.
- Exterior leakage due to the worn packing parts due to pollutants		
- External leakage from the cracked fittings and housing due to fatigue load, external shock, vibration, etc.		

단 및 유해성 가스는 누출 검지기 등을 이용하고 대부분 육안 및 소음으로 판단하며, 현장에서 내부 누출은 유량, 온도 및 압력 등으로 확인하여 누출 판단을 한다.

가스누출의 경우 Fig 12와 같이 크게 가스 누출 전과 후의 위험예측 개발방안으로 개발할 수 있다. 가스 누출 전 위험예측 개발 방안은 마모, 부식, 피로 모델 및 고장률 등을 이용하는 것이며 밸브의 경우 밸브의 누적 회전수를 고려하여 마모열화모델을 적용할 수 있다. 가스 누출 후 위험예측 개발 방안의 경우 가스농도 변화데이터 특성을 분석하여 사고전조가 가능한 적합한 방법을 검토하여 예측모델을 개발하는 방안이며 누출센서 데이터 기반으로 개발하는 것이다.

가스 누출의 경우 가스종류, 외부환경(밀폐공간 등), 일반적인 누출양(허용 누출양) 등에 따라 여러 가지 방법론으로 가스누출 예측이 가능하다. 현장에서 계측된 가스변화데이터(기울기), 통계적특성변화(표준편차, 이동평균, 최대값, 가스누출빈도 등)을 고려한 예측모델 개발을 통해 알고리즘 개발이 가능하다. 미소한 가스누출 측정이 가능한 센서를 활용하여 사고발생 전에 조치하는 방안으로 안전관리를 수행하게 된다.

누출의 주요 원인은 오염물질이기 때문에

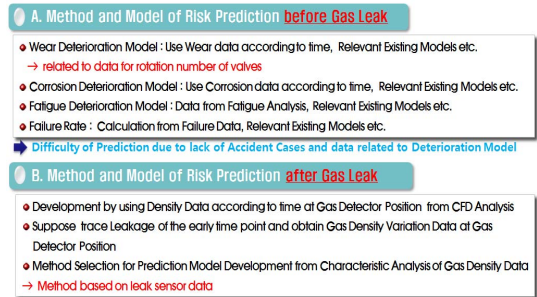


Fig. 12. Risk prediction method and model before and after gas leakage

3.3의 오염계수 식과 관련있는 데이터가 존재한다면 열화모델을 개발할 수 있지만 미비하기 때문에 센서를 통해 모니터링이 가능한 인자로 간접적으로 적용하는 방안이 적용 가능하다. 유량(Q)과 포켓이 열려있는 시간과 총 작동시간의 비율(d)과 관련된 데이터를 모니터링을 하여 고려할 수 있다. 이물질로 인한 마모로 해외 밸브모니터링시스템에서도 회전충이동 길이로 모니터링하여 관리하는 사례가 있다. 특히, 글로브 밸브의 경우 밸브축을 많이 회전시켜 패킹부의 누설 발생이 많은 것과 관련된다. 총 이동 거리에 따라 stem packing 나 seats of the valve의 마모를 측정하여 밸브 패킹 교체 시기를 예측할 수 있다. 향후 시트열

**Table 4.** Effects of poor operations accident scenarios and action plans

Accident scenarios	Review Impact	Action plan
- Inadequate valve response and open and close failure due to damaged valve stem due to vibration, shock, etc.	- Inadequate valve response- Open / closed failure - Low / irregular pressure drop - Reduced operational response - Pressure control failure - Valve not moving	- Analyze the characteristics of poor operations by monitoring through sensors for torque, rotation position, pressure sensor, etc.
- Low / irregular pressure drop due to valve piston fixing of main valve body due to pollutant, lubricant shortage, air trapping, excessive high temperature, structural interference, reduced operational response and valve not moving.		
- Broken or damaged spring ends due to repeated fatigue loads. It is not possible to control or maintain the pressure.		
- Open/closed failure in the inoperative solenoid assembly due to solenoid misalignment for open winding coil, spool or poppet stem.		

화 모델 개발을 위한 관련 DB를 모니터링 시스템에 축적하여 안전관리 모델을 개발하는 방안이 필요하다.

**4.2. 동작불량 관련 IoT 기반 안전관리 방안**

밸브고장데이터, 문헌 등으로 부터 주요 위험요소인 동작불량에 따른 고장 및 사고 시나리오와 관련된 피해영향 및 조치 방안을 수립하였다[6-7].

작동불량의 모니터링 및 제어를 위해 위치센서, 압력, 토크, 변형률 및 온도 등의 센서를 활용 할 수 있다. 현장에서 매뉴얼 밸브인 경우 기준 토크 값을 정하여 수행하는 경우가 있지만 실사용중에는 고착되어 동작하지 않을 때 동작이상으로 판단한다.

- 위치센서 : 위치를 분석하는 방식으로 열림/닫힘 불량, 반응속도 불량 등의 데이터 분석으로 통해 고장 예측을 한다.
- 피스톤 압력센서 : 피스톤의 공기압을 모니터링하여 밸브를 닫는데 필요한 유속을 제공하여 이를 통해 작동불량 및 SOV(Shut Off Valve)나 액츄에이터 밸브 손상을 확인 (밸브를 제어하는 액츄에이터 외력 관련) 한다.
- 토크센서 : 선형 센서에서는 모니터링 토크를 사용하여 작업자가 밸브 작동 시 필요한 힘을 확인하는 것으로 토크 변화 분석으로 작동불량 고장을 예측한다.
- 변형률게이지 : 선형 분석기에서는 밸브를

작동하기 위해 재작동하는 힘과 관련된 데이터를 제공하고 토크 센서와 같이 필요한 힘의 변화를 모니터링 한다.

- 온도센서 : 시험 동안 밸브 온도(프로세스 또는 주변)를 감시함으로써, 운전자는 밸브 성능 변화가 실제 마모 및 파손이 아닌 온도 변화에 기인하는지 여부를 탐지할 수 있으므로, 불필요한 유지 보수를 할 필요 없다. 배관 내부 물질의 특성에 따라 누출 탐지도 가능하다.

**V. 결 론**

이 연구에서 일반적 산업용 밸브에서의 구조적 특성, 위험요소, 사고시나리오, 영향 및 조치방안을 검토 및 분석을 하였다. 결과적으로 발생하는 영향인자에 대해 모니터링이 가능한 관련 센서를 선정하여 예방적 유지관리를 위한 밸브 고장진단 및 사고예측 기법을 도출하였다.

국내 산업용밸브 주요 제조업체들로부터 고장데이터를 수집 및 데이터 가공을 하여 위험요소 분석을 수행하였다. 모든 형식 밸브 고장종류는 대부분 누출과 작동불량이며 누출일 경우 취약 위치는 Seat, Packing, Stem, Body 및 내부 등에서 발생하고 작동불량일 경우 취약 위치는 피스톤, 이물질 및 Positioner 등에서 발생하였다. 또한, 문헌, 핸드북 등으로 부터 고장모드, 원인, 영향 분석 내용으로 부터



주요 위험 요소는 누출과 동작불량인지 확인하였다. 밸브 고장데이터로 부터 실제 현장에서 발생하는 주요 위험 요소인 누출과 동작불량 발생의 주요원인은 이물질이라는 것을 알 수 있었고 관련 문헌에서도 주요 고장 모드는 오염물질로 인한 마모이고 가스 밸브에서 오염물질은 압력을 받는 액체를 포함하고 시트는 밀봉요소가 시트와 접촉하는 곳에서 마모가 발생한다.

이 연구에서 수행한 산업용 밸브의 주요 위험인자인 누출과 작동불량에 대한 예측 기술 및 안전관리 방안을 개발하였다. 누출 관련 IoT 기반 안전관리 방안은 누출, 유량, 압력, 온도, 음향방출 및 접지력 등의 센서 활용이 가능하며 가스 누출을 예측할 수 있는 다양한 방법론을 개발하였다. 동작불량 관련 IoT 기반 안전관리 방안은 위치센서, 피스톤 압력센서, 토크센서, 변형률게이지 및 온도센서를 이용하여 모니터링하는 방안을 수립하였다. 이러한 방법은 다른 종류의 밸브형식에도 적용할 수 있다.

향후 연구는 산업용 밸브의 주요 위험인자에 대한 고장진단 및 사고예측 관련 세부알고리즘을 개발하여 안전관리 시스템 개발에 적용할 예정이다.

### 감사의 글

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

### REFERENCES

- [1] Goncalves, L. F., Bosa, J. L., Balen, T. R., Lubaszewski, M. S., Schneider, E. L. and Henriques, R. V. "Fault Detection, Diagnosis and Prediction in Electrical Valves Using Self-Organizing Maps", *J Electron Test.*, **27**(4), 551-564, (2011)
- [2] Tan WW, Huo H, "A generic neurofuzzy model-based approach for detecting faults in induction motors", *IEEE Trans Ind Electron*, **52**(5),1420 - 1427, (2005)
- [3] Park K. D., Lee I. J., "A Study on Safety Enhancement of Petrochemical Facility by Using the Latest Equipment Diagnosis Technology", *Korean Journal of Hazardous Materials*, **2**(2), 1-13, (2014)
- [4] Hari Prasad, M., Rami Reddy, G., Srividya, A. and Verma, A. K., "Reliability prediction of control valves through mechanistic models"., *Journal of Mechanical Engineering Research*, **2**(3), 52-57, (2010)
- [5] "Handbook of Reliability Prediction Procedures for Mechanical Equipment", Naval Surface Warfare Center Carderock Division, West Bethesda, Maryland, (2011)
- [6] "Fluid power actuators and control systems", Rotork Fluid Systems, (2012)
- [7] "ValveWatch Introduction", MRC Global. (2011)