

수소 충전소 계량오차 검증 설비 설치를 위한 위험성 분석 사례 연구

이화영 · 장현우 · 이민경 · 김정환 · †이재훈

한국가스안전공사 가스안전연구원

(2022년 12월 1일 접수, 2022년 12월 15일 수정, 2022년 12월 16일 채택)

A Case Study on the Risk Analysis for the Installation of Measurement Error Verification Facility in Hydrogen Refueling Station

Hwayoung Lee · Hyeonwoo Jang · Minkyung Lee · Jeonghwan Kim · †Jaehun Lee

Institute of Gas Safety R&D, Korea Gas Safety Corporation

(Received December 1, 2022; Revised December 15, 2022; Accepted December 16, 2022)

요약

수소 충전소를 이용한 에너지원의 상거래에 있어 부정확한 계량에 의한 과 충전 등의 사고 예방과 정확한 계량을 통한 수소 상거래의 투명성 확보를 위해서는 높은 정확도의 유량계가 필요하다. 본 연구에서는 코리올리 방식 유량계 시제품을 개발하였으며, 계량 성능 검증을 위하여 기존에 운영 중인 충전소를 대상으로 공정 변경을 통한 계량 성능 비교 실험 중 발생할 수 있는 사고의 예방을 위하여 위험성 평가를 수행하였다. 실증 실험용 계량설비 설치를 위한 공정 변경 구간을 정의하고 HAZOP을 실시하였다. 또한 실증 실험 중 밸브 오 개방 예방 등 실험자 안전성 확보를 위한 JSA도 병행하였다. HAZOP을 통하여 도출된 위험 요소를 개선하기 위한 방안을 수립하였으며 JSA를 통해 인적오류를 최소화하고 작업자의 안전성 확보할 수 있는 작업 절차를 수립하였다. 이와 같은 위험성 평가 결과를 반영하여 계량시스템 설치를 위한 설계 변경 및 시스템 제작을 완료하였으며 개발된 계량기 시제품의 성능비교 실험을 통해 안전성을 확인할 수 있었다. 개발된 시제품 유량계는 70MPa의 운전 조건에서 총 30회 유량 측정 실험 결과 평균 오차는 -1.58% ~ 3.96%로 나타났다. 이와 같은 계량오차는 상업용으로 설치 운영 중인 유량계와 동등 수준의 성능을 가진 것으로 분석되었다.

Abstract - In commercial transactions of energy sources using hydrogen charging stations, high-accuracy flow meters are needed to prevent accidents such as overcharging due to inaccurate measurements and to ensure transparency in hydrogen commercial transactions through accurate measurements. This research developed a Corioli-type flowmeter prototype and conducted a risk assessment to prevent accidents during a process change comparison experiment for existing charging stations to verify the measurement performance. A process change section was defined for the installation of measurement facilities for empirical experiments and HAZOP was conducted. In addition, JSA was also conducted to secure the safety of experimenters, such as preventing valve mis-opening during empirical experiments. Measures were established to improve the risk factors derived through HAZOP, and work procedures were established to minimize human errors and ensure the safety of workers through JSA. The design change and system manufacturing for the installation of the metering system were completed by reflecting the risk assessment results, and safety could be confirmed through the performance comparison test of the developed meter prototype. The developed prototype flow meter showed a total of 30 flow measurements under the operating conditions of 70 MPa, and the average error was -1.58% to 3.96%. Such a metering error was analyzed to have the same performance as a flow meter installed and operated for commercial use.

Key words : hydrogen refueling station, commercial price, measurement error, HAZOP, JSA

†Corresponding author:sasimi@kgs.or.kr

I. 서론

탄소중립 실현을 위해 세계적으로 수소를 에너지 원으로 사용하기 위한 인프라 구축이 활발히 진행되고 있으며, 국내에서도 전국적으로 수소 충전소를 구축을 통하여 탄소 중립 실현에 대응중이다. 수소를 원료로 하는 이동 수단의 보급이 활발해짐에 따라 수소 충전소의 필요성은 급격히 증가하였다. 수소경제 활성화 로드맵을 통한 수소전기차 보급과 수소 충전소의 확충이 이루어지고 있으며 이는 수소경제 실현의 핵심 사업으로 추진되고 있다. 그간 국내 수소전기차 보급은 2021년 10월 기준 누적 1.8만대를 기록하고 있으며 수소 충전소 또한 18년도 누적 14기에 비해 8배 증가한 누적 118기를 설치하여 운영 중에 있다[1].

수소전기차, 수소 충전소 등의 인프라 보급이 확대됨에 따라 안전성 확보에 대한 요구가 커지고 있으며, 이와 더불어 신뢰성 있는 수소 거래를 위해 높은 정확도의 유량계가 필요한 실정이다.

수소 충전소의 정량 계량 필요성이 대두되고 있으나, 이와 관련한 국제 표준은 정립 중에 있다. 미국에서는 수소 연료차량의 충전프로토콜에 대한 기술 기준인 SAE-J2601을 통해 수소 충전 시 안전성 확보를 위한 연료 충전 방식 및 충전량에 대한 내용을 제시하고 있다[2].

이 기준에서는 수소를 순수상태로 가정하여 15℃에서 70MPa의 압력이 제한된 체적에 충전되는 한계량을 SOC(State of Charge)로 정의하며, SOC와 상용화된 유량계에서 표시되는 값의 측정 불확도를 확인하기 위한 연구에 따르면 유량계 값이 SOC 값보다 15.5% 더 높게 측정되는 경우도 있는 것으로 보고되고 있다[3]. 이러한 계량오차는 충전 중 수소의 물리·화학적 특성 변화 혹은 유량계 압력강하 등에 의하여 발생할 수 있다.

계량 오차는 거래량에 대한 신뢰도에 영향을 주기 때문에 거래 투명성 확보 및 수소 정량제공을 위해서는 높은 정확도의 유량계가 필요하다. 본 연구에서는 코리올리타입 유량계 시작품을 개발하였으며, 개발된 유량계의 성능 비교 평가를 위해서는 수소 충전소 내 설치를 통한 실증 실험이 요구된다. 70MPa의 고압으로 운전되는 수소 충전소의 특성상 실험자 및 충전소 운전자의 안전성 확보를 위해서는 개발된 시작품 및 상용화된 유량계를 설치하는 과정에서 발생할 수 있는 위험성을 분석하고 공정 설계 및 시공 과정에 반영이 필요하다. 본 연구에서는 수소 충전소에 유량계를 설치하고 실증 실험을 수행하는 과정 중 발생할 수 있는 위험을 예방하기 위하여 공정 위험성 평가(Hazard and Operability analysis, HAZOP)와 작업 안전 분

석(Job Safety Analysis, JSA)을 수행하였다.

II. 본론

2.1. 계량설비 설치를 위한 충전소 공정 변경

(1) 계량설비 설치 위치 설정

수소 충전소는 일반적으로 수소공급사업자와 충전사업자간 거래량을 산정하기 위한 디캔트 패널(Decant Panel)을 튜브 트레일러와 중간 압력상승 완화를 위한 버퍼 탱크 사이에 설치한다. 또한, 소비자와의 거래량 산정을 위한 계량설비는 디스펜서 내부에 설치된다.

계량설비 설치 시 위험성 분석 대상을 구체화하기 위해서는 변경되는 공정에 대한 검토 범위의 설정이 필요하다. 본 연구에서 검토된 변경 대상 공정 범위는 수소 충전소에서 계량을 실시하는 구간인 수소공급사업자와 충전사업자간 거래구간(구간1)과 충전사업자와 소비자와의 거래구간(구간2)으로 구분하여 설정하였다. Fig. 1은 계량설비 설치 시 위험성 평가를 위한 공정변경 대상을 나타낸 개념도이다.

(2) 계량성능 평가를 위한 공정설계 방향

구간1과 구간2에서 개발된 시작품의 성능검증을 위해서는 디캔트 패널 후단과 디스펜서 전단에 유량계를 추가로 설치할 필요가 있다. 따라서, 추가로 설치되는 계량시스템 중 디캔트 패널 후단에 설치되는 것은 H₂ Inlet Panel, 디스펜서 전단에 설치되는 것은 H₂ Dispenser Panel로 명명하였다. 각 패널에 대한 P&ID는 Fig. 2의 (a), (b)와 같다.

2.2. 공정 변경에 따른 위험성 평가

(1) 위험성평가 방법

위험성평가는 사업장의 유해·위험요인에 의한 부

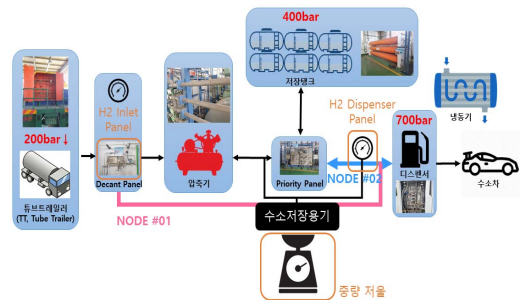


Fig. 1. Schematic drawing of measuring system for risk analysis

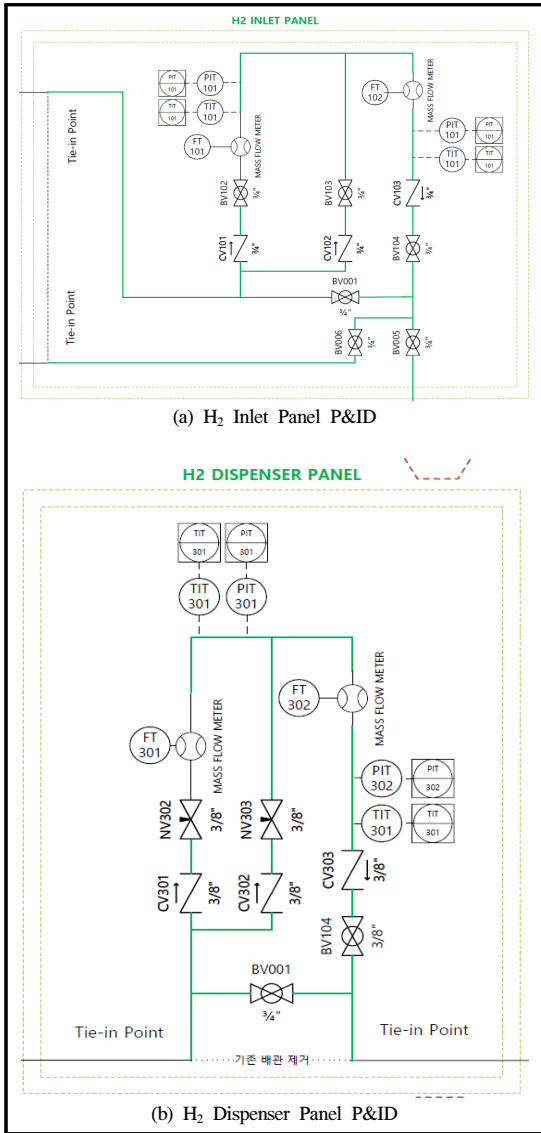


Fig. 2. Process P&ID before HAZOP

상 또는 질병의 발생 가능성(빈도)과 중대성(강도)을 추정·결정하고 감소 대책을 수립하여 실행하는 일련의 과정을 말한다.

위험성평가는 정량적 평가와 정성적 평가를 통해 최종적으로 위험요인 및 개선대책을 수립한다. 정량적 평가를 위해서는 장기간 누적된 사고데이터가 필요하나, 수소 충전소의 경우 이와 관련된 사고 데이터가 충분히 누적되지 않아 정량적인 평가 시행이 어렵다. 따라서 본 연구에서는 정성적 위험성 평가 통해 위험

Table 1. Risk Level Standards

위험 등급 기준			
위험 등급	내 용		
5 등급	허용불가 위험	즉시 작업 중단	위험작업 불허 (즉시 작업 중지)
4 등급	중대한 위험	긴급임시 안전대책	조건부 위험작업 수용 (위험 감소 활동 실시)
3 등급	상당한 위험	보수기간 안전대책	
2 등급	경미한 위험	주기적 교육	위험 작업 수용 (현 상태 작업 계속 가능)
1 등급	무시할 수 있는 위험	현재 안전대책 유지	

Table 2. Frequency and Criticality Specification

빈도(가능성) 구분			
빈도	내 용		
5(상)	자주	1개월 1회 이상 발생	
4(중상)	가끔	6개월 1회 이상 발생	
3(중)	드물게	1년에 1회 이상 발생	
2(중하)	거의	5년에 1회 이상 발생	
1(하)	없음	10년에 1회 미만 발생	
강도(치명도) 구분			
치명도	내 용		
5(치명적)	사망, 부상 2명 이상	재산손실 10억원 이상	설비운영 정지 기간 30일 이상
4(중대함)	부상 1명 이상	재산손실 1억원 이상 10억원 미만	설비운영 정지 기간 7일 이상 30일 미만
3(보 통)	경상 2명 이상	재산손실 1천만원 이상 1억원 미만	설비운전 정지 기간 7일 미만
2(경 미)	경상 1명 이하	재산손실 1천만원 미만	설비운전 정지 기간 1일 미만
1(무 시)	안전설계	운전성 향상을 위한 변경	손실일수 없음

요인을 분석하고자 한다. 대표적인 정성적 위험성 평가 방법은 공정 위험성 평가(Hazard and Operability analysis, HAZOP)와 작업 안전 분석(Job Safety Analy-

sis, JSA)로 이 기법을 이용하여 위험성 평가를 진행하였다.

위험도를 정량화하기 위해 빈도, 강도에 따른 위험 등급을 1급에서 5급까지 각 절차 별 최종 등급을 부여하였으며, 그 결과를 Table 1과 Table 2에 나타내었다.

(2) 공정 위험성 평가(HAZOP) 결과

HAZOP 기법은 분석 대상의 잠재된 위험이나 기능저하, 운전 잘못 및 전체시스템에 의해 야기되는 결과로 미칠 수 있는 영향 등을 평가하는 대표적인 정성적 안전성 평가 기법이다.[4]

HAZOP 수행을 위해서는 구간별 위험 요인 도출을 위한 노드의 설정이 필요하며 본 연구에서는 H₂ Inlet Panel을 Node #01로 H₂ Dispenser Panel을 Node #02로 설정하였다.

먼저 Node #01에서 공정 변경 전 설계에서는 체크밸브와 볼밸브를 직렬로 배치하였으나, 과압 해소의 문제 발생 가능성이 있어 밸브 위치의 변경을 검토하였다. 하지만, 설치되는 밸브의 수량이 증가할수록 연결부가 증가하기 때문에 가스 누출 가능성이 증가한다는 문제점이 있어 이를 개선하기 위해 체크밸브를 제거하고 볼밸브만 이용하는 것으로 수정하였다.

Fig. 2 (a)에서 디스펜서로 이어지는 바이패스 배관의 경우 공정 변경 전 설계 시 패널 내 폐쇄구간(closed loop)이 형성되어 과압 방출이 불가능하므로 체크밸브와 니들밸브 및 볼밸브의 위치를 변경하였다. 그리고 공정상 불필요한 밸브들을 제거하여 연결부의 누

출 가능성을 최소화시켰다. 계량시스템에 설치되는 볼밸브의 경우 유량 측정 중 진동 및 작업자 실수의 영향으로 의도치 않게 열릴 경우 측정 오차 발생이 우려되었다. 따라서 니들밸브로 교체하도록 변경하였다. 특히 H₂ Inlet Panel의 볼밸브 중에 고압(70MPa)부에서 Back pressure가 발생하여 설치 패널을 파손시킬 가능성이 있으므로 이를 방지하기 위해 연관된 밸브를 고압용으로 교체하고 후단에 같은 압력을 견딜 수 있는 체크밸브를 추가 설치하는 것으로 개선하였다.

온도와 압력 트랜스미터의 경우 유량계 후단에만 설치할 경우 유량계 전단의 안전성 확보를 위한 모니터링 및 데이터 수집이 불가능하다. 따라서 트랜스미

Table 3. Risk Assessment result about HAZOP of H₂ Station Process Changes for Metering System

No	Cause	Result
1	볼밸브와 체크밸브 사이 수소가스 정체 및 과압방출 불가	볼밸브와 체크밸브 위치변경
2	체크밸브 과다로 leak point, 관리, 유량 측정 손실 증가	체크밸브 필요성 유무 검토 후 삭제
3	유량측정 후 H ₂ Inlet Panel 내 수소 잔가스 정체로 배관 폐쇄구간 내 과압 방출 불가	볼밸브 필요성 유무 검토 후 삭제
4	유량측정 실증 시험 중 진동 및 작업자 실수로 인한 밸브 오작동으로 유량 측정 오차 및 역류 발생	H ₂ Inlet Panel 내부의 볼밸브를 니들밸브로 변경 고려

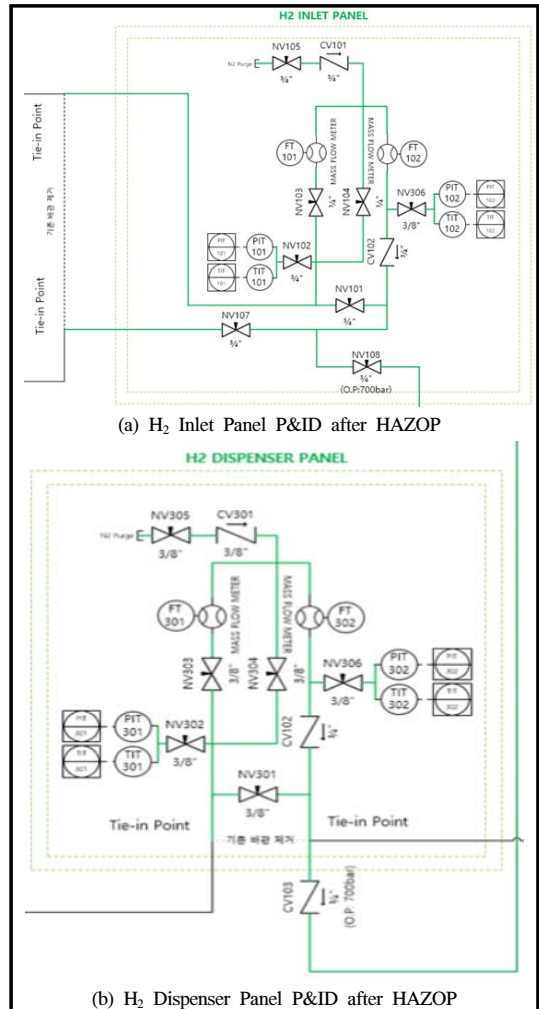


Fig. 3. Improved P&ID after HAZOP

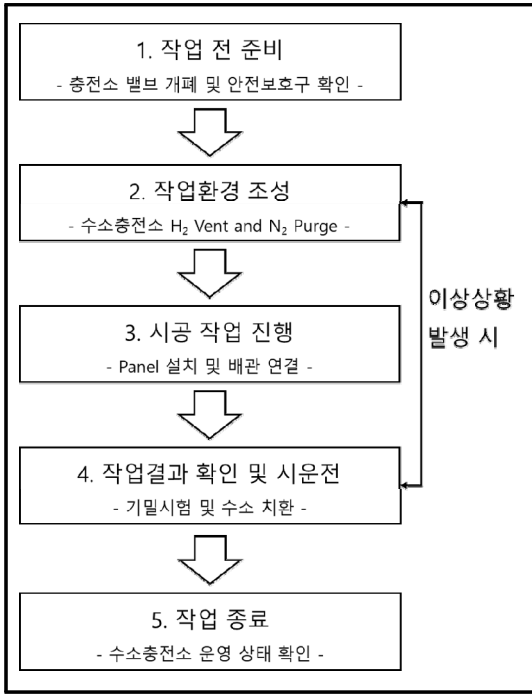


Fig. 4. Work Procedures Reflecting JSA Results

터틀 추가 설치하여 유량계 전단 및 후단에서 실험 데이터 수집이 가능하도록 하였다. 또한, 각 트랜스미터의 유지보수 용이성을 고려하여 트랜스미터와 배관의 연결부에 니들 밸브를 설치하도록 개선하였다.

계량시스템 패널 시공 후 원활한 질소 퍼지(Purge)를 위해 수소 충전소 N₂ Purge Line과 계량시스템 패널을 연결하여 안전성을 확보하였다. 또한, 디스펜서와 연결된 방출라인을 활용하여 과압을 해소하는 방안을 도출하였다. Table 3은 HAZOP 수행 결과를, Fig. 3은 위험성평가 결과를 반영하여 개선된 P&ID를 나타내었다.

(3) 작업 안전 분석(JSA) 결과

유량계 추가 설치 공정에 대한 안전성 확보를 위해 작업안전분석(JSA)을 실시하였다. 유량 성능 비교 시험 시 추가 설치되는 유량계의 데이터 수집을 위해서는 조작해야 하는 밸브가 다양하여 밸브 개폐 오류 등의 오작동 가능성이 존재한다. 이는 데이터 수집 실패 혹은 역류 발생 위험 우려가 있으므로 JSA 수행을 통해 안전성 확보를 위한 작업절차서를 수립할 필요가 있다.

JSA에서는 작업자의 적합한 공구 및 보호구 착용 등 안전과 관련된 내용을 포함하여 순서별 위험 요인

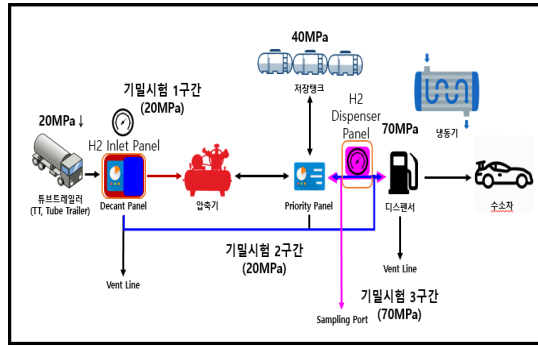


Fig. 5. Compartmentation of leak test section

을 도출하였다. 또한, 유량계 추가 설치 작업에 있어서 안전 담당자, 시공 담당자, 시설 관리자의 교차 확인을 실시하도록 작업절차를 수립하였다. 질소 Purge 및 누출 검사는 충분한 시간동안 수행하고 상시 확인하도록 작업절차서에 포함하였다. JSA를 통해 도출된 내용을 바탕으로 수립된 작업절차는 Fig. 4와 같다.

시스템 전체의 안전성 확보를 위한 기밀시험의 경우 압력이 달라지는 구간 전체에 대하여 시험이 가능하도록 20MPa과 70MPa으로 영역을 구분하였다. JSA를 통해 도출된 기밀시험 구간은 Fig. 5와 같다. 운전 중 밸브 조작과 수소가스 배출 작업에 대한 안전성을 고려하였으며, 충전시스템 운전 중 불꽃, 스파크 및 외부 충격 등이 발생할 수 있는 작업은 충전소 부지 외부에서 실시하도록 하였다. 마지막으로, 공정 변경 설치 작업 이후엔 시운전 및 누출 검사에 대한 절차를 포함시켜 안전을 확보하였다.

2.3. 실증 실험을 통한 안전성 검증

본 연구를 통해 수행된 위험성 평가 방법의 안전성 검증용을 위하여 개발된 유량계 시작품을 이용하여 실증 실험을 수행하였다. 개발된 시작품은 압력범위 70MPa, 유량범위 1.8~6.0kg/min, 오차율은 ±1.5%이다. Fig. 6은 개발된 유량계 시작품을 나타낸 것이다.

실험은 Fig. 1에서 제시된 개념도와 같이 수행되었으며, 튜브트레이러에서 충전소로 공급되는 충전압력 및 충전유량 측정과, 디스펜서에서 자동차로 공급되는 수소유량 및 충전압력을 실제 충전소 운전 조건에서 측정하였다. 계량 오차 검증의 기준이 되는 로드셀을 이용한 중량 측정 방식과 개발된 시작품의 계량 오차 검증을 위해 30회 실증 실험을 수행하였으며, 측정된 값에서 수소충전 과정에서 디스펜서 내 유량계를 통과하고 차량에는 주입되지 않은 양을 나타내는 값인 수소 탈압량을 보정하였다.

Fig. 7은 개발된 시작품의 성능 평가를 위해 실험대

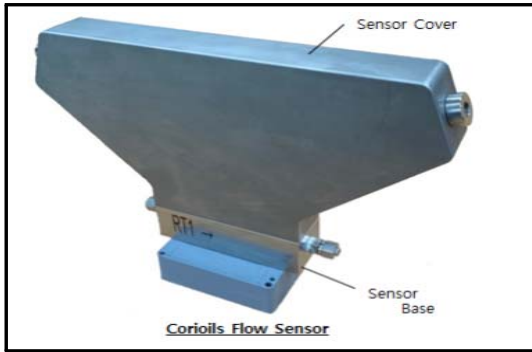


Fig. 6. Prototype of Coriolis flow meter

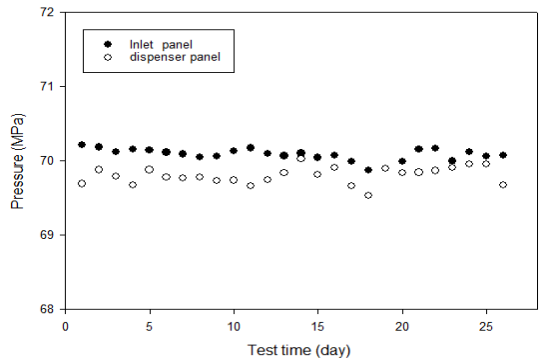


Fig. 8. Test results of pressure deviation



Fig. 7. Photograph of empirical test rig

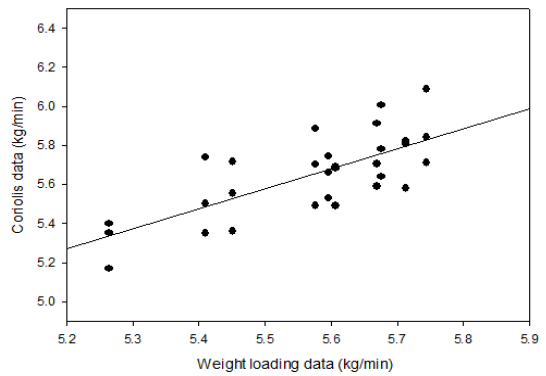


Fig. 9. Test results comparison of weight loading type and prototype mass flow meter

상 충전소에 설치된 사진을 나타낸 것이다.

Fig. 8은 위험성 평가 결과를 반영한 공정시스템의 안전성 검증을 위하여 계량설비가 설치되어 운전 중인 수소 충전소의 실증시험 기간 중 운전 압력 변화를 나타낸 그래프이다. 그림에서 보이는 바와 같이 전체 시스템에서 25일간 운전한 결과 가스 누출이나 작동 오류가 발생하지 않았음을 확인할 수 있었다.

Fig. 9는 개발된 시제품 유량계의 계량 오차를 검증하기 위하여 H₂ Inlet Panel 및 디스펜서 전단에 설치된 유량계와 표준이 되는 유량계인 중량식 계량시스템과 유량 측정 결과를 비교한 그래프이다.

70MPa의 운전 조건에서 총 30회 측정 결과 개발된 시제품 유량계의 평균 오차는 -1.58% ~3.96%로 나타났다. 이와 같은 계량오차는 상업용으로 설치 운영 중인 유량계와 동등 수준의 성능을 가진 것으로 분석되었다.

III. 결론

수소 공급업체로부터 공급받는 수소량과 소비자에게 판매되는 수소량의 정확한 계량 방법은 수소 충전소 경제성 확보와 운영 손실 예방은 물론 사용자의 수소 상거래 신뢰도 측면에서 매우 중요하다. 이를 위해서는 계량 정확도가 향상된 유량계의 개발이 필요하며, 계량정확도는 실제 운영 중인 충전소에서 실증을 통한 검증이 필요하다. 본 연구에서는 코리올리 방식 유량계 시제품을 개발하였으며, 계량성능 검증을 위하여 기존에 운영 중인 충전소를 대상으로 설비 변경을 통한 실증 실험을 수행하였다. 그러나 70MPa 등 높은 압력으로 운전되는 수소 충전소의 특성상 사고 예방을 위해서는 실증 실험 전후 안전성 확보가 선행되어야 한다. 이를 위하여 계량설비 설치를 위한 공정 변경 구간을 정의하고 HAZOP을 실시하였다. 또한 실증 실험 중 밸브 오개방 예방 등 실험자 안전성 확보를

위한 JSA를 수행하였다. HAZOP을 통하여 도출된 위험 요소를 개선하기 위한 방안을 수립하였으며 JSA를 통해서 시공 작업 시 발생할 수 있는 위험 요인을 발굴하여 인적 오류를 최소화하고 작업자의 안전성을 확보할 수 있는 작업 절차를 수립하였다. 이와 같은 위험성 평가 결과를 바탕으로 기존 충전소에 실증 실험을 위한 계량시스템 설치를 위한 설계 변경 및 시스템 제작을 완료하였으며 개발된 시작품의 계량 성능 비교 실험을 30회 이상 실시하였다. 위험성 평가 결과를 반영한 공정시스템의 운전 결과 누출이나 사고 등이 발생하지 않음으로서 본 위험성 평가 결과의 안전성을 확인할 수 있었다. 70MPa의 운전 조건에서 개발된 시작품 유량계의 계량 오차를 검증 결과 평균 오차는 -1.58% ~ 3.96%로 나타났다. 이와 같은 결과는 현재 상업용으로 설치 운전 중인 유량계와 동등 수준의 정확도를 가진 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2020년도 산업통상자원부의 재원으로

한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다(No. 20202910100060).

REFERENCES

- [1] J. K. Lee, *환경부 수소 충전소 전략적 배치계획 (2021~2025)*, Climate and Carbon policy Office, Ministry of Environment, pp. 7, (2021)
- [2] J.H. Park, D.H. Park, C.G. Chae, J.R. Heo, G.S. Park, "Improvement of Hydrogen Fueling Protocol 'by HAZOP and LOPA'", *Korean Journal of Hazardous Materials*, 10(1), 82~90, (2022)
- [3] T.H. Lee, B.W. Kang, E.W. Hong, C.J. Bae, H.S. Jin, "The Study to Find Causes for Measuring Differences of Hydrogen Fillings in Hydrogen Refueling Station", *Transactions of the Korean hydrogen and new energy society*, 29(1), 32-40, (2018)
- [4] N.C. Kang, T.H. Kim, "Analysis of hydrogen fuel cell vehicle system using HAZOP", *Proceeding of '18 KIGAS autumn Conference*, 204-204, (2018)