

수소 충전설비의 안전성 평가

김정근 · 이광원 · 이택홍 · 김태훈 · 이만수* · 천영기**

호서대학교 안전공학과 · *호서대학교 화학공학과 · **폴드앤드비전(주) · ***(주)덕양에너지

1. 서론

수소에너지는 지구환경 오염문제와 에너지 자원의 고갈 및 지역적인 편중 문제를 동시에 해결할 수 있는 유일한 대안으로 인식되고 있으며 수소에너지에 대한 기술력 확보가 21세기의 국가 경쟁력을 결정하는 중요한 요소 중의 하나가 될 것으로 전망되고 있다. 반면 폭발범위가 넓고 폭발화염 전파속도가 매우 빠른 가연성 가스로서 제조, 수송, 저장 시 누출, 확산, 점화 및 폭발 등의 위험성으로 인해 현재까지 제한적인 용도로만 사용되고 있으며, 향후 수소 에너지를 산업전반의 에너지원으로 효율적으로 이용하고 실용화하기 위해서는 수소 충전소의 개발이 절실하다.

특히 수소 충전소에서 사용되는 수소량을 계량하는 유량계, 충전압력조정, 충전 시 수소용기의 온도상승을 억제하기 위한 유량, 압력억제, 비상정지, 고압을 유지하는 실링 부품 등이 개발되어야 하며 데이터 감시 액정판넬을 포함한 dispenser에 대한 안전관리 지침이나 규격 등의 마련과 dispenser에 사용되어지는 부품 및 시스템을 안전하게 제어하고 사용할 수 있도록 dispenser의 설계, 제작, 조립, 운전시의 부품개발 및 시스템의 안전성에 대한 확인이 요구되어진다. 이를 위하여 정성적 안전성 평가 기법 중 FMEA(Failure Mode and Effects Analysis)와 HAZOP(Hazard and Operability Study)을 적용하여 위험성을 평가하여보고자 하였다.

2. 이론적 배경

2-1. 국내 · 외 기술현황

전 세계적으로 당면하고 있는 지구온난화, 산성비, 오존층 파괴, 도심 대기오염 등 환경문제를 대처하기 위한 저공해 자동차 보급과 관련하여 수소이용 기술은 상용화에 상당한 제약이 대두되고 있다. 일반적으로 압축상태의 수소가스를 차량에 공급할 경우, 수송용 연료로 사용되는 LPG와 비교하여 비중이 상대적으로 낮기 때문에 누출 시 대기 중에 급속히 확산되어 충전소의 폭발 위험성은 32분의 1 정도로 낮다고 보고되어 있다.

그러나 수소가스는 자체 가스가 갖고 있는 특정 위험성 때문에 충전, 저장, 주입 시 예상되는 화재 및 폭발위험성에 대한 안전 설계, 안전성 평가, 사고 시 시나리오 등 폭넓고 다양한 사고예측 검토가 필수적이다. 특히 수소 충전소에서 사용되는 수소량을 계량하는 유량계, 충전압력조정, 충전 시 수소용기의 온도상승을 억제하기 위한 유량, 압력억제, 비상정지, 데이터 감시 액정판넬을 포함한 dispenser는 ISO/TC197 working

group 등에 의해 국제표준화 작업이 시행되고 있으며, 이에 따라 고압 안전성, 설비비용 절감, 소형화 등 dispenser 개량 기술화가 본격화되고 있다.

(1) 국내 현황

CNG 충전소의 건설시 외국으로부터 기술도입을 통하여 일부 업체에서 설계 및 운전 기술에 대한 경험을 축적한 것으로 알려져 있으나, 수소의 경우 근본적으로 CNG와 물성이 다르며, 폭발범위가 매우 넓어 사소한 부주의에도 큰 재난사고의 발생위험이 있으므로 취급에 대한 다양한 노하우가 필요하다.

유사 기술로서의 CNG Dispenser는 약 200bar로 충전되는 CNG 충전장치는 대도시의 공해저감 목적으로 CNG 버스가 적극 보급됨에 따라 상용화되고 있다. CNG 충전장치 관련부품은 일부 국산화가 진행되고 있으나 아직도 주요 핵심부품은 기술선진국으로부터 수입하는 단계이다. 전술한 바와 같이 수소의 공급압력 및 물리적 특성을 고려하면 동일한 고압가스 충전장치라 할지라도 고압수소 전용 충전장치의 개발에 천연가스 충전장치의 설계 및 개발개념을 그대로 활용하는데 무리가 따른다. 따라서 본 기술 개발에 직접 관련한 국내기술은 아직 명확히 확립되지 않은 것으로 볼 수 있으며, 2003년 과학기술부 프론티어 - 고효율 수소에너지 제조·저장·이용기술 개발사업의 일환으로서 “천연가스를 이용한 수소 스테이션 기술 개발”을 SK와 한국가스공사가 공동 진행 중에 있으며, 산업자원부 및 에너지관리공단의 대체에너지 기술개발사업의 일환인 “수소스테이션 국산화 기술개발”사업을 진행 중에 있다.

(2) 해외 현황

국외에서는 미국, 일본, 캐나다, 유럽 등 선진국을 중심으로 에너지 관련 기업(석유회사 등)과 자동차 회사가 중심이 되어 수소 스테이션 및 수소자동차를 시범 운영하고 있다. 미국의 경우 Shell, BP 등 메이저 석유회사를 중심으로 CaFCP(California Fuel Cell Partership) R&D 프로젝트를 통해 25개의 수소 스테이션을 시범 운영 중이다. 또한 유럽 및 캐나다도 각각 32개, 6개의 수소 스테이션을 운영하고 있으며, 일본도 11개의 수소 스테이션을 운영 중이다.

미국의 Sunline Transit Agency, GTI(Gas Technology Institute)는 연료 공정화, 연료 세정 시스템, 수소가스 압축기, dispenser 및 충전 알고리즘, 지상 저장소, 시스템 제어, 통합 시스템 설계 등에 관한 연구를 수행하고 있으며, 캐나다의 Powertech Labs사는 차량 연료용 수소 및 CNG 이용과 관련한 연구개발 선도 기업으로서 hydrogen/CNG 연료를 50 : 50 비율로 혼합한 내연기관 엔진 차량을 가동 중이며, 대용량 압축 수소를 수송하기 위한 경량 수송 설비를 개발하였다. 한편, 일본의 수소가스 관련 국가 연구개발과제는 WE-NET(World Energy Network)를 주축으로 JHFC(Japan Hydrogen & Fuel Cell Demonstration Project) 및 FCCJ(Fuel Cell Commercialization of Japan) 등이 추진되고 있고, Nippon Sanso 사는 이와 같은 국가 연구개발과제를 통해 다양한 수소관련 장치 및 설비를 제작, 공급하고 있다.

2-2 안전성 평가 기법

(1) FMEA 기법

FMEA 기법은 전형적인 상황식 귀납적 분석방법이며 정성적인 위험성 분석기법의 대표라고 할 수 있다. 특히 결함과 다음 상위 수준의 기능적 제품에 미치는 영향과 메커니즘을 연구하는 데 적합하다. 분석방법으로는 대상 시스템의 분석을 통하여 의미 있는 부품들로 나누어 고장 형태를 예측하고 고장 원인 및 영향에 대하여 검토하여 치명도, 발생도, 검출도를 분석하고 위험우선순위(RPN)를 결정한다. RPN 값을 결정하기 위하여 본 연구에서는 5점법을 사용하였고 아래의 계산법을 이용하여 Table 1.에 제시된 기준에 따라 치명도, 발생도, 검출도에 평점을 주어 RPN 값을 구하였다.

리스크 우선순위(RPN) 계산 :

$$RPN : \text{Risk Priority Number} = \text{Severity} \times \text{Occurrence} \times \text{Detection}$$

Table 1. Evaluation Points of Risk Priority Number

심각도	기 준	발생도	기 준
5	중대사고(인명피해+재산피해), 조업 불가	5	1년 중 1번 정도 발생
4	중대사고(재산피해발생)	4	10년 중 1번 정도 발생
3	생산 불량, 경미한 사고(조업일시정지)	3	100년 중 1번 정도 발생
2	조업 일시 정지	2	1000년 중 1번 정도 발생
1	피해 없음	1	발생빈도 거의 없음(1번/만년)

검출도	기 준
5	검출확률 불가능
4	검출확률은 희박하나 가능한 경우
3	검출확률 낮음
2	관리시스템을 통해 확인
1	현 관리에 의해 검출 확률 높음, 육안으로도 확인가능

(2) HAZOP 기법

HAZOP 기법은 구조적이고 체계적인 평가기법으로 위험성뿐만 아니라 운전에 관한 정보도 알 수 있고, 난상토론(brainstorming) 하는 과정에서 공정의 위험요소들을 규명할 수 있다. 수행절차는 대상 시스템에 대하여 적절한 study node를 정하고 공정변수에 Guide-word를 적용하여 의미 있는 비정상 상태를 만들어 가능한 원인 및 결과를 검토하여 위험요인을 찾아 보완사항 등을 분석한다

3. 안전성 평가

3-1. 수소 Dispenser

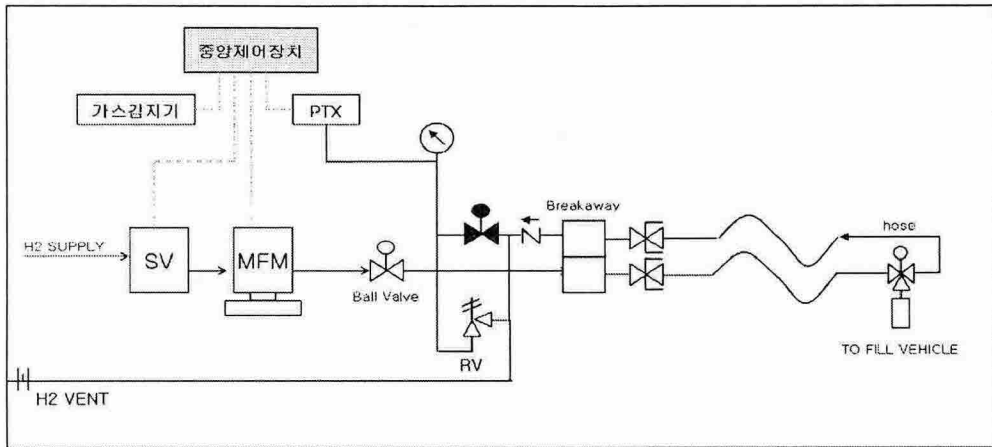


Fig 1. P&ID of Hydrogen Dispenser

Filter를 통해 여과된 수소가스는 SV(Solenoid Valve)를 통하여 인입되며 중앙제어 장치의 제어 하에 SV는 수소가스의 흐름의 유·무를 통제한다. SV 측에서 인입된 수소가스는 MFM(Mass Flow Meter)에 의해 가스의 유량 및 농도를 계측하여 중앙제어부로 신호를 전송한다. 이어서 분리기 및 충전부(노즐)로 전달되고 350 bar의 압력으로 수소 충전이 시작된다. 충전 노즐 내에 3-way SV에 의해 충전 시 발생하는 잔압을 vent 시키게 된다. 중앙제어장치에서는 가스 및 온도 감지기와 MFM, PTX1(압력 트랜스듀서)로부터 신호를 받고 처리하게 된다. 또한 인입되는 유량과 압력 그리고 충전탱크의 잔압 및 충전압력 등을 제어하며, 디스플레이 기능도 담당하고 있다. 안전을 위한 RV(Relief Valve)는 설정된 압력(425.2 bar) 이상이 되면 자동으로 밸브가 열려 배관 및 장치의 파손을 보호한다.

수소 Dispenser의 주요 부품 및 기능은 아래와 같다.

(1) SV(Solenoid Valve)

수소의 공급측 밸브로서, dispensing system을 위해 이상적으로 수소를 공급 제어 하는 것이 목적이며, power fail 등 비상시 유체의 이동을 신속히 차단하는 기능을 갖고 있다.

■ Design Pressure : 7,000 psi (482 bar)

■ Burst Pressure : 28,000 psi (1,930 bar)

(2) MFM(Mass Flow Meter)

배관에 압력 및 온도변화에 따라 얼마만큼의 유량으로 흘러 보내야 하는지를 측정하여 중앙제어부로 신호를 전송한다. 온도, 압력의 영향의 거의 받지 않고 유체의 질량 유량을 측정할 수 있으며 응답 속도가 빠르고 유량의 측정범위가 넓다.

(3) Ball Valve

배관 내 흐름의 유·무를 신속히 단속한다.

■ Maximum Pressure : 10,000 psi (689 bar)

■ Flow Pattern : 2 way, 3way

(4) 중앙제어장치

Dispenser의 핵심적인 부품으로서 시스템 내의 유량, 압력, 가스, 온도를 제어 및 감지한다. 또한 디스플레이 기능도 담당하고 있다.

(5) RV(Safety Relief Valve)

설정 압력 이상이 되면 자동으로 밸브가 열려 배관 및 장치의 파손을 보호하는 기능을 담당한다.

■ Process Pressure : 50 ~ 6,000 psi (3.45 ~ 413.7 bar)

■ Process Temperature : -40 ~ 205 °C (-40 ~ 400 °F)

(6) PTX(압력 트랜스듀서)

물리량의 변화 상태를 검출하여 읽기 편한 신호로 변환해주는 기능을 담당한다.

(7) 가스감지기(Gas Detector)

가스 센서에 포함된 위험한 가스들의 감지 기능과 누출이 제한된 장소의 산소 수준이 어느 정도인지와 독소의 수준을 확인할 수 있는 기능을 담당한다.

3-2 FMEA 평가

Fig 1.의 수소 Dispenser 시스템을 SV(Solenoid Valve), MFM(Mass Flow Meter), Ball Valve, 중앙제어장치, RV(Relief Valve), PTX(압력 트랜스듀서), 가스 감지기 등의 의미 있는 부품들로 나누어 고장 모드 및 영향을 FMEA 기법을 통하여 분석하였다. 총 10개의 부품에서 160여개의 failure mode를 결정하고 이들에 대한 RPN(Risk Priority Number) 값을 결정하였으며 이들로부터 RPN을 결정하여 각 failure mode의 위험상대순위 결정, 보완 및 안전장치 추가 설치 등을 고려하였다.

Table 2. FMEA DATA SHEET

System <u>Hydrogen Dispenser</u>		<u>FMEA</u>		FMEA num _____				
Team _____				Page <u>1</u> of _____	date _____			
Equipment Item	Potential failure mode	Potential effect of failure	Severity	Potential cause of failure/Mechanism	Occurrence	Detection	RPN	Recommendations or Comments
SV (Solenoid Valve)	내부누출	SV와 충전노즐 사이의 배관에 가스입 존재	3	SV의 고장	2	2	12	정기점검
				SV의 노화	2	2	12	정기점검 및 교체
				이물질에 의한 작동 불량	2	3	18	인입부 필터 정기점검
				입력신호 오류	1	2	6	유량제어기의 정기점검
				경전에 의한 미작동	2	2	12	보조 동력원에 의한 차단
				외부 충격에 의한 누설	2	2	12	가드 설치
	외부누출	가스의 외부누출	4	누전/경전기 등에 의한 오작동	2	2	12	검지 설비 설치
				SV의 파손	2	1	8	정기점검 및 알람설치
				허용압력초과	2	2	16	N/A
				배관의 취성파괴	2	2	16	정기점검
				진동에 의한 너트 풀림	2	1	8	정기점검

3-3 HAZOP 평가

Fig 1의 수소 Dispenser를 대상으로 평가를 하였으며, 부품별로 매우 밀접한 관련을 가지고 있으므로 study node는 정하지 않았다. 공정변수는 Flow, Temperature, Pressure 를 적용하여 HAZOP 기법을 통하여 분석하였다. Dispenser를 대상으로 40여 개의 비정상 상태를 고려하였고 이들에 대한 발생 원인과 결과 그리고 보완사항 등을 분석하였다.

Table 3. HAZOP DATA SHEET

Parameter	Guide word	Deviation	Cause	Consequences	Action/Comments
GAS FLOW	No	No Flow	제어부(Micon)의 고장	충전 불능	규정된 절차에 맞게 순서대로 운전한다. 경기 점검 유지 보수
			변환기의 입력변환실패		
			차단기의 오조립/잘못된 위치	비상시 제어기능 상실	
			제어부 스위치 기능 상실		
	As well	Water in Gas (가스 안에 수분함유)	정전시	충전 불능	규정된 절차에 맞게 순서대로 운전한다. 경기 점검 유지 보수
			노즐 고장시		
			필터 이상시	SV 고장	
			필터 없을시	이물질로 인한 배관 막힘	
			충전 전에 파이프 점검불량	Ball Valve 고장 Transmitter 충격을 받음	
			불량 압축기의 사용	수소에 수분이 함유됨	

4. 결론

본 연구에서는 수소의 성질과 기술현황을 파악하고 수소설비에 적절한 정성적 평가 기법으로 FMEA 와 HAZOP을 선택하여 수소 Dispenser의 P&ID를 참고하여 안전성평가를 시행하였다.

HAZOP 기법을 통하여 Dispenser의 Flow, Pressure, Temperature 등 제조상의 공정 변수들에 대하여 의미 있는 guide word를 적용하여 비정상 상태(Deviation)를 만들어 체계적으로 단계별 공정상의 오류나 잘못된 운전과 같은 잠재 위험을 분석하였다.

FMEA 분석을 통하여 주요 부품들의 고장 모드를 정의하고 RPN 값을 결정하여 상대적으로 위험한 고장모드를 우선 순위화 시킬 수 있었으며, RPN 값이 20 이상인 주요 부품의 고장 모드 및 원인은 다음과 같다.

- (1) S/V와 충전노즐 사이의 배관에 이물질에 의한 작동불량으로 인해 가스압이 발생하여 위험이 존재 한다.
- (2) C/V의 Ball의 마모 및 스프링의 노화에 의한 Breakaway-노즐까지의 고압수소 역류방지실패 및 vent가 실패될 우려가 있다.
- (3) 수소에 의한 부식, 조립불량으로 인한 C/V의 파손으로 인해 가스의 외부누출 위험성이 존재한다.
- (4) 설계 시 결함으로 인한 중앙제어장치의 오류에 의해 과충전/불완전충전 및 비상 시스템작동이 실패될 위험이 존재한다.

다음은 HAZOP 시행 후의 주요 보완사항이다.

- (1) 중앙제어장치의 정기점검 및 유지보수를 철저히 하고 관련 매뉴얼의 운전법을 준수한다.
- (2) Storage의 과압 및 수소가스 압축실패를 방지하기 위해 허용최대압력에 관한 라벨을 부착하거나 판매자에 Dispenser 작동 시 요구되는 압력의 범위를 잘 전달한다.
- (3) 비정상적인 주변온도의 상승 및 저하로 인해 Dispenser에 영향을 끼치는 것을 방지하기 위해 가장 높았던 온도와 가장 낮았던 온도를 고려하여 설계한다.
- (4) Filter의 고장으로 인해 배관 내에 이물질 또는 물이 발생하는 것을 막기 위해 정기적인 점검 및 보수를 시행하고 규격에 맞는 Filter를 사용한다.

위와 같이 HAZOP 및 FMEA 평가를 사용하여 Dispenser의 설계상의 하자가 없는지 구조적 결함이나 운전 시 주의할 점 등에 대하여 체계적으로 검토하였다. 검토결과 중 대한 문제점은 발견하지 못하였으나 언제, 어떻게 일어날지 모르는 수소가스의 위험성은 여전히 존재한다. 이 설비 시스템에 대하여 통달하고 안전에 관한 지식이 풍부한 관리자가 체계적인 안전계획을 수립하여 안전관리를 한다면 어떠한 사고도 미연에 방지하여 안전하게 사용하리라 사료된다.

참고문헌

1. Sue Cox and Robin Tait "Safety, Reliability and Risk Management : an integrated approach" Butterworth Heinemann, (1988)
2. "National Hydrogen Energy Roadmap", United States Department of Energy, (2002)
3. C. Devillers, K. Pehr, D. Stoll, J.S. Duffield, S. Zisler, T. Driessens, H. Vandendorre, A. Gonzalez, R. Wurster, M. Kesten, M. Machel, F. Heurtaux, P. Adams, Publishable final report of "European Integrated Hydrogen Project [EIHP]", (2000)
4. Summary work description & results of "European Integrated Hydrogen Project Phase II [EIHP2] - Regulations for hydrogen vehicles and hydrogen refuelling", (2003)
5. NASA Glenn Research Center, Glenn Safety Manual - Chapter 6 "Hydrogen"
6. Pamela L. Spath, Margaret K. Mann, "Life Cycle Assessment of Hydrogen Production via Natural Gas Steam Reforming", NREL, (2001)
7. Frederick D. Gregory, "Facility System Safety Guidebook", NASA, (1998)

본 연구는 산업자원부 신재생에너지 프로젝트형
기술개발사업의 일환으로 지원되었습니다.