

수소 충전 시스템의 안전성 평가에 관한 연구

김 태 훈* · 오 영 달** · 이 만 수***

*호서대학교 로봇자동화공학과 · **호서대학교 안전공학과 · ***호서대학교 기술경영학과

A study on the safety assessment of Hydrogen refueling system

Tae Hun Kim* · Young Dal Oh** · Man Soo Lee***

*Hoseo University Department of Intelligent Automation System Engineering

**Hoseo University Department of Safety Engineering

***Hoseo University Department of Technical Business Administration

Abstract

Hydrogen energy is expanding in range for civil use together with development of pollution-free power sources recently, and it is judged that the use of hydrogen will increase more as a part of carbon dioxide reduction measures according to the Climatic Change Convention. Especially, it is thought that the securement of safety of the used dispenser will be the biggest obstacle in the use of high-pressure hydrogen because the hydrogen station is operated in a high pressure. This study found risks in the process and problems on operation by making use of HAZOP(6 kinds), a qualitative safety evaluation technique, and FMEA(5 kinds), a fault mode effect analysis, for the hydrogen charging system at a hydrogen gas station, derived 6 risk factors from HAZOP and 5 risk factors from FMEA, and prepared measures for it.

Keywords : Hydrogen, Safety, Assessment, FMEA, HAZOP, Refueling, Station

1. 서 론

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. 수소에너지는 이용 측면에서 그동안 우주개발 또는 군사용 등의 특수 분야에 한정되어 왔으나, 최근 무공해 동력원 개발과 함께 민수용으로 범위가 확대되고 있으며 기후변화협약에 의한 이산화탄소 저감대책의 일환으로

수소 이용은 더 증대될 것으로 판단된다. 수소 에너지 이용을 위한 인프라 구축으로는 수소 충전소의 개발이 활발히 이루어지고 있다[1].

특히 수소 충전소에서 사용되는 Dispenser의 안전성 확보가 고압수소 이용의 가장 큰 걸림돌이 될 것이며 이러한 안전 확보를 위하여 Dispenser 고압 실링재에 대한 저온 및 고온 분위기하에 물성 변화를 테스트 하여 적정 부품을 선정하여야 하며, Dispenser에 사용되어지는 부품 및 시스템을 안전하게 제어하고 사용할 수 있도록 전반적인 안전성 평가가 이루어져야 한다.

† 이 논문은 2010년도 호서대학교의 재원으로 교내학술연구비 지원을 받아 수행된 연구임을 밝힙니다.
(과제번호 : 2011-0085)

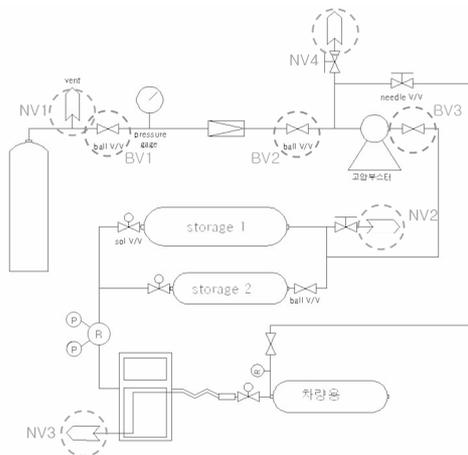
† Corresponding Author : Tae-Hun Kim, Dept. of Intelligent Automation System Engineering, HOSEO UNIVERSITY, 20, Hoseo-ro 79, baebang-eup, Asan,
M·P : 010-2472-8290, E-mail: emtxx@hoseo.edu

Received October 3, 2014; Revision Received December 17, 2014; Accepted December 18, 2014.

본 연구에서는 수소가스 충전소의 수소 충전시스템에 대한 정성적 안전성 평가를 수행하여 전반적인 system의 안전성 검토와 세밀한 분석을 통한 운전 매뉴얼의 작성, 불필요한 안전투자 배제 및 안전성이 보장된 원활한 연구를 수행함에 있으며 평가기법으로는 위험과 운전분석인 HAZOP과 고장모드 영향 분석인 FMEA 기법을 이용함으로써 공정의 위험성과 운전상의 문제점 및 주요 부품의 고장 형태와 그에 따른 영향에 대하여 검토하고자 한다.

2. 설비 개요

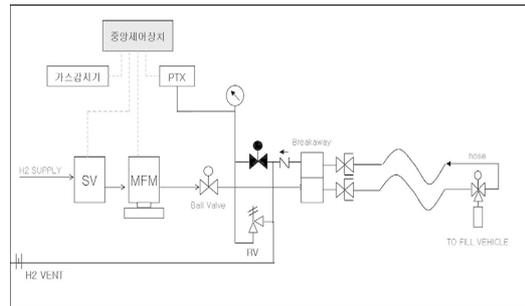
본 연구에 대상이 되는 수소 충전 시스템의 P&ID는 Figure 1과 같으며 주요 구성품 및 작동원리는 아래와 같다.



[Figure 1] P&ID of Hydrogen refueling system

- 주요 부품의 기능
 - 3-way SV : 이상적으로 수소를 공급 제어
 - BV : on/off 기능, 유체 흐름 단속
 - NV : 미량의 유량을 조절, vent 역할
 - Regulator : 420bar를 355bar로 감압
 - Vent system : 수소가스를 안전한 곳으로 배출
 - Booster : 120 또는 300bar의 수소가스를 420bar로 3단 승압
- 작동 원리
 - 실린더로 부터 수소가스 공급
 - BV 1, BV 2 개방
 - 고압 Booster 가동(최대 1200bar) - 425bar
 - BV 3을 개방하여 storage tank 1,2에 충전
 - tank의 SV를 개방하여 dispenser로 공급
 - 공급되기 전 regulator에서 350bar로 감압

- Nozzle을 통하여 차량용 tank에 350bar로 충전
 이러한 수소 충전 시스템의 핵심은 수소 Dispenser로 Figure 2에 나타나 있는 P&ID와 같은 구성으로 되어 있다. 이 Dispenser는 Filter를 통해 여과된 수소가스는 SV(Solenoid Valve)를 통하여 인입되며 중앙 제어 장치의 제어 하에 SV는 수소가스의 흐름의 유무를 통제한다. SV 측에서 인입된 수소가스는 MFM(Mass Flow Meter)에 의해 가스의 유량 및 농도를 측정하여 중앙 제어부로 신호를 전송한다. 이어서 분리기 및 충전부(노즐)로 전달되고 350 bar의 압력으로 수소 충전이 시작된다. 충전 노즐 내에 3-way SV에 의해 충전시 발생하는 잔압을 vent 시키게 된다. 중앙 제어장치에서는 가스 및 온도 감지기와 MFM, PTX1(압력 트랜스듀서)로부터 신호를 받고 처리하게 된다. 또한 인입되는 유량과 압력 그리고 충전탱크의 잔압 및 충전 압력 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[2].



[Figure 2] P&ID of Hydrogen Dispenser

수소 Dispenser의 주요 부품 및 기능은 아래와 같다.

- 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)
- MFM(Mass Flow Meter)
 - 배관에 압력 및 온도변화에 따라 얼마만큼의 유량으로 흘러 보내야 하는지를 측정하여 중앙 제어부로 신호를 전송한다. 온도, 압력의 영향의 거의 받지 않고 유체의 질량 유량을 측정할 수 있으며 응답 속도가 빠르고 유량의 측정범위가 넓다.

- Ball Valve
 배관 내 흐름의 유무를 신속히 단속한다.
 - Maximum Pressure : 10,000 psi (689 bar)
 - Flow Pattern : 2 way, 3way
- 중앙제어장치
 Dispenser의 핵심적인 부품으로서 시스템 내의 유량, 압력, 가스, 온도를 제어 및 감지한다. 또한 디스플레이 기능도 담당하고 있다.
- 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)
- PTX(압력 트랜스듀서)
 물리량의 변화 상태를 검출하여 읽기 편한 신호로 변환해주는 기능을 담당한다.
- 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. 안전성 평가 수행

3.1 수행 방법

수소 충전 시스템의 안전성 확보를 목적으로 설계와 운전 및 공정상의 문제점과 위험요소분석을 위하여 정성적 안전성 평가 기법 검토와 평가를 수행하고자 한다. 본 연구에서는 수소 충전 시스템에 대하여 정성적 안전성 평가를 수행하여 단계별 공정상의 오류나 잘못된 운전과 같은 잠재위험을 분석하고자 한다. 정성적 안전성 평가 기법으로는 위험과 운전분석인 HAZOP과 고장모드 영향 분석인 FMEA 기법을 이용한다. FMEA 기법은 전형적인 상향식 귀납적 분석방법이며 정성적인 위험성 분석기법의 대표라고 할 수 있다[3]. 특히 결합과 다음 상위 수준의 기능적 제품에 미치는 영향과 메커니즘을 연구하는데 적합하다. 분석방법으로는 대상 시스템의 분석을 통하여 의미 있는 부품들로 나누어 고장 형태를 예측하고 고장 원인 및 영향에 대

하여 검토하여 치명도, 발생도, 검출도를 분석하고 위험 우선순위(RPN)를 결정한다. RPN 값을 결정하기 위하여 본 연구에서는 5점법을 사용하였고 아래의 계산법을 이용하여 Table 5에 제시된 기준에 따라 치명도, 발생도, 검출도에 평점을 주어 RPN 값을 구하였다.

리스크 우선순위(RPN) 계산 :
 RPN : Risk Priority Number
 = Severity × Occurrence × Detection

<Table 1> Evaluation Points of Risk Priority Number

심각도	기준
5	중대사고(인명피해+재산피해), 조업 불가
4	중대사고(재산피해발생)
3	생산 불량, 경미한 사고(조업일시정지)
2	조업 일시 정지
1	피해 없음
발생도	기준
5	1년 중 1번 정도 발생
4	10년 중 1번 정도 발생
3	100년 중 1번 정도 발생
2	1000년 중 1번 정도 발생
1	발생빈도 거의 없음(1번/만년)
검출도	기준
5	검출확률 불가
4	검출확률은 희박하나 가능한 경우
3	검출확률 낮음
2	관리시스템을 통해 확인
1	현 관리에 의해 검출 확률 높음, 육안으로도 확인가능

HAZOP 기법은 구조적이고 체계적인 평가기법으로 위험성뿐만 아니라 운전에 관한 정보도 알 수 있고, 난상토론(brainstorming) 하는 과정에서 공정의 위험요소들을 규명할 수 있다[3]. 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.

3.2 FMEA

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 영향

을 FMEA 기법을 통하여 분석하였다. 총 14개의 부품에서 33여개의 failure mode를 결정하고 이들에 대한 RPN(Risk Priority Number) 값을 결정하였으며 이들

로부터 RPN을 결정하여 각 failure mode의 위험상대수 위 결정, 보완 및 안전장치 추가 설치 등을 고려하였다.

<Table 3> FMEA Data Sheet

부품 솔레노이드 밸브		FMEA		FMEA 최초작성일		Page 1 of 3			
공정 기능 and 요구 사항	잠재 적 고장 형태	고장의 잠재적 영향	심각 도 S	고장의 잠재적 원인/Mechanism	발생 도 O	현 설계 관리	검출 도 D	위험 우 선 순 위	권고조치 사항
이상적으로 수소를 공급제어 하는 장치 신속한 차단작용 설계압력 428bar 폭발압력 1930bar 작동온도 -40℃~66 ℃	내부 누출	SV1과 충전노즐사이 의 배관에 가스압 존재	4	SV1의 고장 및 마모/ 수소에 의한 부식	3	정기점검 및 교체	1	12	유지보수 관리 철저
				누전, 정전기/이물질에 의한 작동 불량	4	인입부 필터 정기점검 접지 설비 보조동력원에 의한 차단	1	16	조립매뉴 얼 준수
				초기 위치 불량/부품 불량	2	조립시 확인 및 검사 정기점검 및 교체	2	16	유지보수 관리 철저
				입력 신호 오류/ 정전에 의한 미작동	2	유량제어기의 정기점검 보조 동력원에 의한 차단	3	24	배터리 정기점검
				외부 충격에 의한 누설/ 허용압력 초과		가드 설치 정기점검 및 교체	1	8	설계도면 확인 공급시스 템 분석

평가결과 RPN 값이 20이상인 부품의 고장모드 및 원인은 다음과 같았다.

- 외부누출
 - SV의 조립불량/부품불량/진동에 의한 너트 풀림
 - 수소에 의한 저장탱크 부식/Regulator의 부식 및 취성 파괴
- 내부누출
 - 사용자 조작 미숙으로 인한 Needle Valve의 파손
- Filter의 파손으로 인한 이물질 발생

3.3 HAZOP

HAZOP에서는 수소 Dispenser와 충전소 시스템에 존재 가능한 위험요소들뿐만 아니라 공정의 효율을 떨어뜨릴 수 있는 운전상의 문제점을 파악하고 원인파

결과를 분석하여 그에 따른 안전 대책을 강구하였다.

먼저, Study Node를 고압수소 생성 및 저장 공급부와 Dispenser 부분으로 나누어 총 30가지의 비정상 상태를 고려하였고 이들에 대한 발생 원인과 결과 그리고 보완사항 등을 고찰하였다.

고압수소 생성 및 저장 공급부에서는 Flow, Pressure, Temperature의 Parameter에 More, Less, Other than, As well as, reverse 등의 Guide Word를 조합하여 9가지의 비정상상태(Deviation)에 대한 원인 및 결과를 분석하였다.

또한, Dispenser부에서는 Flow, Pressure, Temperature, Operation, Loading의 Parameter와 More, Less, No, Other than, As well as, Part of, reverse 등의 Guide Word를 조합하여 총 21가지의 비정상상태(Deviation)에 대하여 검토하였다.

<Table 3> HAZOP Data Sheet

Parameter	Guide word	Deviation	Causes	Consequences	Action/Comments
flow	other than	물 또는 기타 불순물 혼입 (CH ₄ , C ₂ H ₆ , i-C ₄ H ₁₀ , n-C ₄ H ₁₀ , C ₅ H ₁₂ , N ₂ , H ₂ O, CO, CO ₂)	인입 가스의 불량 필터 불량 시 여과기내 drain 밸브의 고장으로 인한 이물 혼입	고객의 손해 정제 불량 SV 고장 RV 고장 Shut off 및 Needle 밸브의 손상 완충기의 막힘 압력 변환기의 손상	정기 점검 유지 보수 작업자 매뉴얼 준수 인입전 가스의 조성 테스트 규격 부품 사용
flow	reverse	역류	배관 부속품의 오조립 (체크 밸브의 역방향 설치)	충전 불능	정기 점검 유지 보수 규정된 절차에 맞게 운전 조립시 주의 규격 부품 사용

평가결과는 다음과 같았다.

- Fitting/배관/기기/tank 등의 정기점검 및 유지 보수를 철저히 하고 관계자의 조작 금지
- 불순물 함유 및 타 가스 혼입 충전을 방지하기 위해 G/C로 성분 분석
- 부스터로 부터 고압수소의 역류를 막기 위하여 봄베 전단에 check valve 설치 요망
- 부스터의 고압 형성에 대처하기 위하여 high pressure alarm 설치 요망
- Filter의 고장으로 인해 배관내에 이물질 또는 물이 발생하는 것을 막기 위해 정기적인 점검 및 보수를 시행하고 규격에 맞는 filter 사용

4. 결론

본 연구에서는 수소의 성질과 기술현황을 파악하고 수소설비에 적절한 정성적 평가기법으로 FMEA와 HAZOP을 선택하여 수소 Dispenser의 P&ID를 참고하여 안전성평가를 시행하였다.

HAZOP 기법을 통하여 Dispenser의 Flow, Pressure, Temperature 등 제조상의 공정변수들에 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 고장 모드를 우선 순위화 시킬 수 있었으며, RPN 값이 20

이상인 주요 부품의 고장 모드 및 원인은 다음과 같다.

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

다음은 HAZOP 시행 후의 주요 보완사항이다.

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

FMEA와 HAZOP평가 결과 FMEA를 통하여 14개의 의미 있는 부품에서 발생 가능한 33개의 고장형태를 관찰하였고 이에 대해 각각의 RPN값을 계산하여

부품별 고장형태에 대한 상대적 위험순위를 결정하고 잠재적 고장원인에 따른 위험성을 확인하였다. HAZOP평가는 고압수소 생성 및 저장 공급부와 Dispenser부의 두 개의 study node에 대하여 발생 가능한 위험요소분석과 운전상의 문제점에 대하여 고찰하였으며 위의 결과를 토대로 Dispenser의 안전한 사용 지침을 위한 Safety Manual(안) 작성을 위한 기초자료로 활용하고자 한다.

6. References

- [1] 서두현, 이광원, 김태훈, 오규형, 김영규 “ 국내 수소 충전소의 안전성 평가” , 한국가스학회, 08 추계학술발표회, pp.9~14, 2008.
- [2] 이광원, 김태훈, 이택홍, “수소 충전소 충전기의 정량적 안전성 평가” , 한국수소 및 신에너지학회 논문집, Vol. 17, No.3, September, 2006
- [3] Sue Cox and Robin Tait "Safety, Reliability and Risk Management : an integrated approach" Butterworth Heinemann, (1988)
- [4] NREL/TP-570-27079, Survey of the Economics of Hydrogen Technologies (September 1999.)
- [5] A.Szyszkla: Int.J.Hydrogen Energy, 23(3) 849.860(1998)
- [6] A.Bahbout, D.Kluyskens, R.Wurster: in Proceedings of the 12th world hydrogen conference, Buenos Aires, Argentina, June 21.26, 1998.
- [7] B.Sorensen and F. Sorensen: in Proceedingd of the 13th World Hydrogen Energy Conference, Beijing, China, Jun 12.15, 2000.
- [8] T.N.Veriroglu: in Proceedingd of the 13th World Hydrogen Energy Conference, Beijing, China, Jun 2.12, 2000.
- [9] Rosen,M.A. and Scott,D.S. : Int.J. Hydrogen Energy, 17(3) 199.204(1992)
- [10] Int.J.Hydrogen Energy, 12(2) 99.129(1987)
- [11] R.A.Hefner: Int.J.Hydrogen Energy, 20(2) 945.948(1995)
- [12] C.Mitsugi, A.Harumi and F.Kenzo: Int.J.Hydrogen Energy, 23(3) 159.165(1998)
- [13] NASA Glenn Research Center, Glenn Safety Manual – Chapter 6 "Hydrogen"
- [14] "National Hydrogen Energy Roadmap", United States Department of Energy, (2002)
- [15] 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)
- [16] Summary work description & results of "European Integrated Hydrogen Project Phase II [EIHP2] – Regulations for hydrogen vehicles and hydrogen refuelling", (2003)
- [17] NASA Glenn Research Center, Glenn Safety Manual – Chapter 6 "Hydrogen"
- [18] Pamela L. Spath, Margaret K. Mann, "Life Cycle Assessment of Hydrogen Production via Natural Gas Steam Reforming", NREL, (2001)
- [19] Frederick D. Gregory, "Facility System Safety Guidebook", NASA, (1998)
- [20] 오규형, 이광원, "수소의 폭발 특성에 관한 연구", 2004.
- [21] 이광원, 김태훈, 김정근, 한승용, "Steam Reforming 방법을 이용한 수소제조설비의 안전성 평가" , 2005
- [22] 김유탣, 이광원, 백재진, 오신규, 한정민, 김원국, "가스설비의 정량적 안전성 평가" , 산업안전학회, 2000
- [23] 이광원, 김태훈, 김정근, 한승용, "Steam Reforming 방법을 이용한 수소제조설비의 안전성 평가" , KIGAS, Vol. 9, No. 4, December, 2005, pp. 44~49

저자 소개

김 태 훈



호서대학교 안전공학과 박사 취득. 현재 호서대학교 로봇자동화공학과 교수로 재직중
관심분야 : 수소에너지, 신뢰도 분석, 신뢰도 데이터, 안전성 평가, 연구실 안전, 인간신뢰도 분석 등

주소 : 충남 아산시 배방읍 호서로 79번길 20 제1공학관 104호

이 만 수



호서대학교 안전공학과 석사, 박사를 취득하였으며 기업체에서 20여년간 안전, 환경, 소방분야 실무 경험이 있으며, 기업체 안전 진단 및 전문강사, 겸임교수를 거쳐 현재는 호서대학교 게임학과 교수로 재직 중이다.

주소 : 충남 아산시 배방읍 호서로 79번길 20 조형과학관 306호

오 영 달



호서대학교 대학원 안전공학과 석사 취득 후 현재 인하대학교 대학원 안전공학과 박사과정 중
관심분야 : 수소에너지, 신뢰도 분석, 신뢰도 데이터, 안전성 평가, 연구실 안전, 인간신뢰도 분석 등

주소 : 충남 아산시 배방읍 호서로 79번길 20 제1공학관 129호