



Steam Reforming 방법을 이용한 수소제조설비의 안전성 평가

†이광원 · 김태훈 · 김정근 · 한승용

호서대학교 안전공학과

(2005년 9월 30일 접수, 2005년 12월 16일 채택)

Safety Assessment for Hydrogen Gas Production Facilities (Steam Reforming)

†Rhie Kwang Won · Kim Tae Hun · Kim Jung Keun · Han Seung Yong

Dept. Safety Engineering, Hoseo University

(Received 30 September 2005, Accepted 16 December 2005)

요 약

본 연구에서는 Steam Reforming 수소 제조설비에 대한 안전성 평가를 수행하여 설비의 위험성을 체계적으로 검토하였다. 안전성 평가 방법으로는 정성적 안전성 기법인 Hazard & Operability Analysis와 Failure Mode & Effect Analysis를 사용하였다. HAZOP을 통하여 수소 제조설비의 flow, pressure, temperature 등의 주요 parameter들에 대하여 의미 있는 guide word를 적용하여 비정상 상태(deviation)를 만들어 단계별로 공정상의 인간 실수나 잘못된 운전 등의 잠재 위험을 분석하였다. FMEA를 이용하여 설비 내 장치의 파손 및 기능 실패 등 주로 부품의 불량이나 고장 등에 대한 분석을 하여 그에 따른 영향 및 대처방안을 제시하였고, RPN 값 계산을 통하여 상대적 위험순위를 결정하여 보았다.

Abstract – In this study, a process safety evaluation is implemented, in which the process hazards are investigated systematically about hydrogen production plants. Be used qualitative Safety management method such as HAZOP and FMEA. Were analysed potential hazards (human errors or operating failures of every processing steps) about parameters that flow, pressure, temperature of hydrogen production plants through HAZOP that making deviations applied signified guide words. Analysed to using FMEA mainly about bad components or troubles that equipments breakdown and malfunction in facilities and then propose its influences, and counterproposal.

Key words : Hydrogen, Steam Reforming, Safety, HAZOP, FMEA

I. 서 론

수소에너지는 지구환경 오염문제와 에너지 자원의 고갈 및 지역적인 편중 문제를 동시에 해결할 수 있는 유력한 대안으로 인식되고 있으며 수소에너지에 대한 기술력 확보가 21세기의 국가 경쟁력을 결정하는 중요한 요소 중의 하나가 될 것으로 전망되고 있다. 수소가스는 다양하게 제조 및 생산이 가능한 반면 폭발범위가 넓고 폭발화염 전파속도가 매우 빠른 가연성 가스로서 제조, 수송, 저장시 누출, 확산, 점화 및 폭발 등의 위험성으로 인해 현재까지 제한적인 용도로만 사용되고 있다. 국내의 선례 사고인 아현동 가스폭발사고,

부천 가스충전소 폭발사고, 여수 BTX라인 폭발 사고 및 기타 대규모 화재·폭발사고들에서 알 수 있듯이 가스가 사고로 전이되면 폭발압력 및 폭발파의 속도 등에 기인하여 통상 약 15~30배 정도로 그 피해규모는 가중되고 사망·상해로 인한 인적손실, 생산 가동정지 및 재투입 비용증가로 인한 경제적 손실 등은 치명적이다. 따라서 가스를 안전하게 생산, 운용하기 위해서는 다양한 사고사례 분석, 물리적 메커니즘 규명, 안전성평가 및 사고 차단기술 개발 등과 같은 정성적, 정량적 안전기술이 필수적이다. 특히 모든 가연성 가스 중 acetylene과 ethylene oxide와 더불어 가장 폭발위험성이 높기 때문에 수소설비의 안전성확보를 위한 안전성평가 및 수소가스 누출 및 폭발 사고시의 피해예측은 필수적이라 할 수 있다. 이에 본 연구에서는 natural gas

†주저자: kwrhie@office.hoseo.ac.kr

의 steam reforming 방법을 이용한 수소 제조 설비를 대상으로 위험성을 분석하기 위해 정성적 안전성평가를 통하여 위험성을 도출하였다.

II. 이론적 배경

2.1. 수소의 성질

수소의 기본적인 물리, 화학적 성질은 이미 알려진 바와 같이 지구상 원소 중에서 가장 작고 가장 가벼운 것이 두드러진 특징이다. 수소분자는 두 개의 수소원자가 수소결합으로 결합되어 있어 탄화수소 가스에 비하여 발화온도는 높으나 점화 에너지는 탄화수소 가스에 비해 1/10 정도로 작다. 따라서 전기스파크 등의 직접적인 고온 분위기에서는 비교적 안전하나 직접적 점화원이 될 수 있는 전기불꽃이나 불티, 정전기 등에 의해서 폭발 위험성이 있다. 또한 수소는 모든 원소 중에서 가장 간단한 구조로 여러 종류의 물질들과 반응을 일으키는 반응성이 높은 물질이지만 저온에서는 반응성이 낮고, 상온에서는 촉매가 없으면 안정한 상태로 존재한다. 수소는 공기, 산소, 할로젠, 질소화물 등의 지연성 가스와는 연소반응을 일으키고 적당한 농도, 온도, 압력 조건에서는 폭발적으로 반응한다[5].

2.2. 연구 동향

2.2.1 해외 현황

일반적으로 수소에너지 관련 기술 중 이용분야의 수소가스 사고 위험성 평가는 수소가스 사고의 위험성을 정확히 파악하고 이를 차단할 수 있는 기술개발 부문으로서, 공정상 수소가스 사고 발생경로 및 빈도분석, 누출·폭발 등 수소가스 사고시의 물리적 현상 연구, 그리고 수소가스 사고 차단기술과 같은 3가지 영역을 기반으로 하고 있다. 가스 폭발에 관한 일반적인 연구는 선진 각국에서 수행되고 있으며 미국의 FM, UL, 영국의 EECS, 독일의 PTB, 일본의 산업안전연구소, 프랑스의 Ecole University, 노르웨이의 CMR 등이 대표적인 주요 연구 기관이다. 또한 flame arrester에 대한 연구도 상기 기관들에서 수행되었으며, 제품화한 회사로는 독일의 PROTEGO, 영국의 AMAL, 캐나다의 WESTEK 등이 대표적이다. 그러나 이들 연구기관 중 수소가스 이용에 따른 전문적인 연구만을 단독 수행하는 곳은 없으며, 모든 가연성 가스의 폭발 위험성에 대한 연구와 폭발방지기술 및 방폭 기기를 총체적으로 평가하고 있는 실정이다.

한편 수소사고 차단기술로는 수소검지센서, 수소취성 방지를 위한 재질의 선정, 화염방지기 기술개발 등

이 있으며, 수소가스의 물리적 현상에 관한 기술로는 수소의 화학적·물리적 특성을 중심으로 한 수소의 화재폭발에 관한 연구에 집중되고 있다. 특히, 외국의 경우 가스의 폭발피해를 보다 과학적이고 체계적으로 검토하기 위해 안전성평가와 더불어 수치 해석적으로 접근하고 있으며, 현재 상용화되어 있는 대표적인 소프트웨어는 독일의 RiSA, 네덜란드 TNO의 AutoReaGas, 노르웨이 CMR의 FLACS, 영국 AEAT의 CFX, 기타 D3UNS, AIXCO 등이 있다. 세계 각국은 수십 퍼센트 이상의 오차가 발생하는 S/W의 신뢰성을 회복·향상시키고, 계산 속도를 향상시키기 위하여 체계적인 연구를 수행하고 있는 중이다[2-4].

2.2.2 국내 현황

국내 현황을 살펴보면 수소에너지 기술에 대한 연구는 매우 활발히 진행 중에 있으나 수소가스 사고의 위험성에 대한 정량적 평가기술 연구는 미미한 상태이다. 일반적인 plant에 대한 평가기술은 상당히 많이 수행되고 있으나 수소시스템에 관한 평가기술은 거의 없는 실정이다. 가스폭발 및 방지에 대한 연구가 1986년부터 한국기계연구원에서 탄광용 방폭기기 시험업무를 시작으로 본격화되었으나, 국내 여건상 시장성이 없는 기반 기술로서 연구가 활성화되지 못했으며, 실험의 위험성 등으로 연구자도 거의 없는 실정이다. 현재 고효율 수소에너지 제조·저장·이용 기술개발 사업단이 발족되어 활발히 연구 중에 있으며 에너지관리공단에서 기후변화협약 대응을 위해 에너지 절약 및 에너지 기술개발 등 여러 사업에 지원을 하고 있다.

III. 안전성 평가

3.1. 개요

수소 관련 설비에는 제조, 저장, 충전 및 운송 설비 등이 있다. 이 중 제조설비는 제조기술에 따라 설비를 구성하는 부품 및 공정이 달라진다. 본 논문에서는 현재 세계적으로 가장 많이 사용하고 있는 natural gas의 steam reforming 방법을 이용한 설비에 대한 정성적인 안전성을 평가를 수행하였으며 적용한 기법은 HAZOP (Hazard & Operability Analysis)과 FMEA(Failure Mode & Effect Analysis)이다.

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-word

를 적용하여 의미있는 비정상 상태를 만들어 가능한 원인 및 결과를 검토하여 위험요인을 찾아 보완사항 등을 분석한다[1].

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 Table 1에 제시된 기준에 따라 치명도, 발생도, 검출도에 평점을 주어 RPN 값을 구하였다.

리스크 우선순위(RPN) 계산 :

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

3.2. 수소제조설비

Fig. 1은 수소제조설비의 P&ID로서 앞장에서 기술한 바와 같이 열화학적 수소 제조 방법으로 현재 가장 많이 사용되는 설비이다[6,7]. 이 설비는 크게 feed pre-treatment, reforming, the water-gas shift reaction, PSA process, boiler & cooling system 부분으로 나누어지며 공정 설명은 아래와 같다.

(1) feed pre-treatment - natural gas를 투입하여 steam reforming 전에 탈황 공정으로 H₂S를 분리 및 제거한다. 이 단계에서 생산되는 소량의 수소는 steam 생산에 이용한다.

(2) reforming - 전처리 후에 natural gas와 2.6 MPa (380 psi)의 증기가 투입되어 4.8 MPa(700 psi)의 water gas로 개질된다.

(3) the water-gas shift reaction - water gas는 HTS (High Temperature Shift)와 LTS(Low Temperature Shift)로 공급되어 H₂와 CO가 반응하여 92%의 수소가스를 생성한다.

(4) PSA process - 92%의 수소가스는 여기서 99.999%의 고순도 수소가스로 정제된다.

(5) boiler & cooling system - 공정 전반에 걸쳐 관여하고 있으며 가열과 냉각을 하여 공정을 안정적으로 유지하고 수소 발생에 필요한 열을 제공한다.

3.3. 정성적 안전성 평가

3.3.1 HAZOP 평가

Fig. 1의 제조설비를 대상으로 하여 적절한 study

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

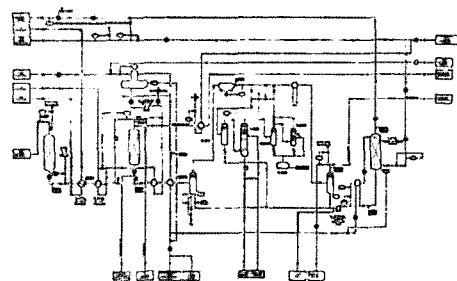
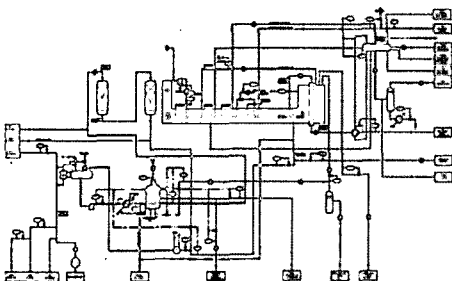


Fig. 1. P&ID of a hydrogen product plant.

Steam Reforming 방법을 이용한 수소제조설비의 안전성 평가

node(feed pre-treatment, reforming, the water-gas shift reaction, PSA process, boiler & cooling system 등)로 나누고 flow, temperature, pressure, reaction, adsorption의 파라미터를 적용하여 HAZOP 기법을 통하여 분석하였다.

다음의 표는 HAZOP 분석의 일부를 보여준다. 총 14개의 study node에서 84개의 비정상 상태를 고려하였

고 이들에 대한 발생 원인과 결과 그리고 보완사항 등을 분석하였다.

위와 같이 평가 분석한 결과는 다음과 같이 요약될 수 있다. 제조 설비는 feed pre-treatment, reforming, the water-gas shift reaction, PSA(pressure swing adsorption) process 그리고 부수적으로 boiler & cooling system의 단계가 있다. 여기서 일어날 수 있는 중대 사고는 폭발

Table 2. HAZOP DATA SHEET.

study node : Reforming

Parameter	Guide word	Deviation	Cause	Consequences	Action/Comments
FLOW	MORE	HIGH Flow	pipe rupture	feed fuel release	set of release sensor periodical checkup
			over supply	failure of reforming	set of flow meter
	LESS	LESS Flow	adsorption of suction and deflation in pipe	flow decrease	set of flow meter strainer filter check
			pressure decrease of steam	working delay	set of manometer
TEMPERATURE	MORE	HIGH Temp	trouble of heating device	rise of pressure	set of manometer set of thermo-sensor
	LESS	LOW Temp	failure of heating device	reforming failure	set of thermo-sensor
PRESSURE	MORE	HIGH Press	pipe block	over pressure, rupture of pipe and Reformer	strainer filter check set of manometer
	LESS	LOW Press	rupture of pipe and Reformer	The water-gas release	periodical checkup set of manometer and alarm
REACTION	MORE	HIGH Rate	over reaction	over pressure Reformer rupture	set of manometer and alarm
	LESS	LOW Rate	reaction decrease	loss of pressure Reforming failure	set of manometer

study node : PSA(pressure swing adsorption) process

Parameter	Guide word	Deviation	Cause	Consequences	Action/Comments
PRESSURE	MORE	HIGH Press	decompress failure	device rupture	periodical checkup set of manometer and alarm
			block on deflation side valve	rupture of valve and vessel	strainer filter check set of manometer and alarm
	LESS	LOW Press	rupture of valve, pipe and vessel	fuel release	periodical checkup set of release sensor
FLOW	MORE	HIGH Flow	rupture of valve, pipe and vessel	fuel release	periodical checkup set of release sensor and alarm
	LESS	LESS Flow	block on valve and pipe	output decrease	strainer filter check set of flow meter

및 누출사고가 가장 큰 부분을 차지하고 있다고 생각할 수 있으며 아래의 경우에 발생 가능하다.

- (1) 전 단계에서 발생 가능한 경우로 외부 충격이나 기타 요인에 의한 배관 및 용기의 파손시
 - (2) 배관내의 이물질 침착이 발생시
 - (3) reformer 내의 온도 이상 발생으로 인한 반응폭주
 - (4) cooling system의 이상으로 인한 과열 발생시
 - (5) PSA Process에서 압력조절 실패시
- 위의 사고를 방지하기 위하여 정기점검을 소홀히 하지 말아야 하며 사고를 미연에 감지할 수 있는 누출감지기, 압력계, 온도 센서 등이 설치되어 있어야 한다.

이 설비의 몇 가지 보완사항이 요구되며 이는 결론에서 서술하도록 한다.

3.3.2 FMEA 평가

Fig. 1의 제조설비의 전체 시스템을 Refinery, Reformer, Boiler, Cooling Device, CO Shift, PSA 등의 의미 있는 부품들로 나누어 고장 모드 및 영향을 FMEA 기법을 통하여 분석하였다. 총 46개의 부품에서 132개의 failure mode를 결정하고 이들에 대한 Risk Priority Number 값을 결정하였으며 이들로부터 RPN을 결정하여 각 failure mode의 위험상대순위 결정, 보완 및 안전

Table 3. FMEA DATA SHEET

FMEA								FMEA num _____
System <u>Hydrogen product Plant</u>								Page <u>1</u> of _____
Team _____								date _____
Equipment Item	Potential failure mode	Potential effect of failure	Severity	Potential cause of failure/Mechnism	Occurrence	Detection	RPN	Recommendations or Comments
Refinery (disulfurization)	efficiency precipitate	quality deterioration	3	AC replacement deficiency	2	2	12	standard manual
	malfunction	refinement incapable	4	refinery breakdown	1	3	12	routine check, management set emergency refinery
Reformer	furnace breakdown	Explosion Hazard by release	5	impact	1	1	5	non-distruction test set thermometer
				Temp. control failure	3	2	30	
	reaction stop	reforming failure	3	Temp. control failure	2	1	6	routine check, management set manometer
				efficiency precipitate	2	1	6	
Boiler	efficiency precipitate	steam supply falling-off	4	efficiency precipitate	2	2	16	routine check, management set thermometer
				aging	1	1	4	
	breakdown	releasing high pressure gas	3	impact	1	1	3	set manometer routine check, management
			rise in pressure by overheated	2	2	12		
Cooling device (coolant)	breakdown	coolant leak	4	impact	2	1	8	set flowmeter routine check, management
		rise in Temp	5	impact	2	1	10	
	efficiency precipitate	rise in Temp	5	adsorption	1	3	15	routine check, management set filter
				aging	1	3	15	

IV. 결 론

본 연구에서는 우선 수소의 성질과 연구 동향을 파악하고 적절한 정성적 안전성 평가기법으로 FMEA와 HAZOP을 선택하여 수소제조설비에 대하여 안전성평가를 시행하였다.

수소설비는 특성상 주요부품의 고장은 수소가스 누출이나 폭발 등 매우 위험한 상황에 도달할 가능성이 높으므로 주요 부품의 고장모드를 확인하고 이에 대한 원인과 파급효과, 발생빈도, 고장의 검지 확률 등을 분석하는 것은 필수적이며 이를 위하여 FMEA가 꼭 필요하다. 또한 운전 중의 잠재적 위험을 체계적으로 찾아내기 위해서는 다른 모든 기법에 비하여 HAZOP 기법이 가장 잘 적용될 수 있음을 확인하였다.

HAZOP 기법을 통하여 제조설비의 Flow, Pressure, Temperature 등 제조상의 parameter 들에 대하여 의미 있는 guide word를 적용하여 비정상 상태(Deviation)를 만들어 체계적으로 단계별 공정상의 인간 실수나 잘못된 운전과 같은 잠재 위험을 찾아내고 분석하였다.

FMEA 분석을 통하여 주요 부품들의 고장 모드들을 정의하고 또한 FMEA 분석 중 RPN 값을 Table 1과 같이 결정하여 분석을 시행하고 상대적으로 위험한 고장모드를 랭킹화시킬 수 있었으며, RPN 값이 20이상인 주요 부품에 대하여 우선적으로 조치를 하였으며 다음과 같다.

(1) Reformer 가열로 내의 온도 조절 실패로 인해 압력상승이 초래되어 가열로 파손의 우려가 있다.

(2) CO shift에서는 온도 조절 실패로 파손이 발생하여 수소가스의 누출로 인한 위험이 존재한다.

(3) CO shift 내의 온도 상승과 촉매제가 될 수 있는 이물질의 첨가로 반응폭주의 발생 우려가 있다.

(4) PSA 장치의 흡착 불량 및 off-gas 배출 밸브의 고장으로 정제 불량이 생겨 고순도의 수소가스를 생산하지 못할 우려가 있다.

(5) PSA 장치의 수소 배출 밸브의 이상으로 고압이 걸려 배출 밸브 및 배관의 파손으로 누출의 우려가 있다.

다음은 HAZOP 시행 후의 주요 보완사항이다.

(1) Pre-treatment 시 배관의 정기점검을 철저히 하고, 활성탄 사용주기에 맞춰 정제불량이 일어나지 않도록 교체를 한다.

(2) Reformer 내의 이상과열을 방지하고 온도센서 및

비상차단스위치를 설치한다.

(3) Shift에서는 냉각실패에 대비하여 정기점검 및 온도센서, 누출감지기 등을 설치한다.

(4) PSA는 감압실패, 밸브 및 배관의 파손 등에 대비하여 점검과 압력계의 설치가 요구된다.

위와 같이 HAZOP 및 FMEA 평가를 사용하여 제조설비의 설계상의 하자가 없는지 구조적 결함이나 운전시 주의할 점 등에 대하여 체계적으로 검토하였고 상대적으로 위험한 고장모드 및 원인에 대하여 우선적인 조치를 취하여 RPN 값을 허용할 수 있는 범위(20이하)로 낮출 수 있다. 추후 수소설비의 부품에 대한 신뢰도 data들이 확보된다면 FTA나 ETA 기법들은 이용한 정량적 평가도 꼭 시행되어야 한다고 사료된다.

감사의 글

이 논문은 2005년도 호서대학교 학술연구조성비에 의하여 연구되었음.

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] Devillers, C., K. Pehr, D. Stoll, J.S. Duffield, S. Zisler, T. Driessens, H. Vandenborre, 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)