



부생가스 기반 수소 정제시설의 정량적 위험성 평가에 관한 연구

신현국 · 김민주 · 정지운 · 하상준 · †최종호*

한국가스안전공사 가스안전연구원, *경일대학교 전기전자에너지학부 교수
(2023년 10월 24일 접수, 2023년 12월 25일 수정, 2023년 12월 26일 채택)

A Study on Quantitative Risk Assessment of Off-gas based Hydrogen Purification Facilities

Hyun-Gook Shin · Min-Joo Kim · Ji-Woon Jeong · Sang-Jun Ha · †Jong-Ho Choi*

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

*Kyungil University Department of Electrical and Energy Engineering**

(Received October 24, 2023; Revised December 25, 2023; Accepted December 26, 2023)

요약

부생가스 발생 및 이용현황보고서(2015)에 따르면 철강 사업에서 나오는 부생가스는 국내 연간 8,000만 톤으로 추정된다. 이를 정제할 경우 다량의 수소 생산이 가능하여 수소 정제시설과 관련해 활발한 연구 개발이 진행 중이다. 본 연구에서는 부생가스 기반 수소 정제시설의 구성요소를 분석하고 위험요인을 조사하여 정량적 위험성 평가(QRA)를 실시하였다. 위험도 분석 결과는 허용 가능 수준으로 도출되었으며 수소의 위험성을 고려한 시설물의 안전성 향상을 위한 기초자료로 활용할 예정이다.

Abstract - According to the Off-Gas Generation and Use Status Report (2015), Off-gas from the steel industry is estimated to be 80 million tons per year in Korea. If this is purified, large amounts of hydrogen can be produced, so active research and development related to hydrogen purification facilities is underway. In this study, a quantitative risk assessment (QRA) was conducted by analyzing the components of a off-gas based hydrogen purification facility and investigating risk factors. The risk analysis results were determined to be at an acceptable level and will be used as basic data to improve the safety of facilities considering the risks of hydrogen.

Key words : off-gas, QRA, hydrogen, purification, safety

I. 서론

그레이수소의 한 종류인 부생수소는 나프타의 개질이나 분해, 제철 등의 공정에서 발생하는 부산물 중에 수소가 많이 포함된 혼합가스를 수소로 정제하는 공정을 통해 높은 순도의 수소로 정제한 것을 말한다.

수소 정제 공정은 다양한 방식이 있으며 그중 가장 대표적인 방식은 압력 순환 흡착공정(Pressure-Swing Adsorption, PSA)이다. 기존의 부생가스 PSA 시스템은

고압에서 운전되며 가스 회수율이 낮아 플랜트 제작, 운영 비용 및 에너지가 많이 드는 단점을 가지고 있어 이를 보완 대체하기 위한 기술의 개발이 요구되고 있다. 이에 따라, PSA 공정의 장점을 살리고 단점을 보완하기 위해 분리막(Membrane) 공정을 결합한 혼합형 공정에 관한 연구도 활발히 진행되고 있다.

국내에서는 수소충전소 시스템에 대한 여러 차례의 정량적 위험성 평가 연구가 진행되었지만, 앞서 언급한 혼합형 공정 수소 정제시설에 대한 정량적 위험성 평가연구 결과는 부족한 실적을 보여주고 있다.

본 연구에서는 제철소에서 발생 되는 부생가스를 PSA 공정과 분리막 공정을 결합한 혼합형 방식 수소 정제시설의 구성 요소를 분석하고 주변 환경 요소

†Corresponding author:jchoi@kiu.ac.kr

Copyright © 2023 by The Korean Institute of Gas

및 위험 요인을 분석하여 정량적 위험성 평가를 실시하였다. 분석에는 위험성 평가 프로그램으로 널리 사용되고 있으며 Off-Gas와 같은 혼합가스 조성을 구현할 수 있는 SAFETI (8.9 ver.)를 이용하였다. 분석 결과를 통해 사고 시나리오에 따른 피해 범위 및 위험 요소별 피해 순위를 확인하고 경감 대책을 마련하고자 한다. 정량적 위험성 평가 결과는 수소 정제시설의 안전성 향상을 위한 기초자료로 활용될 예정이다.

II. 혼합형 방식 수소 정제 시설 구성

철강의 부생가스에서 효과적으로 수소를 분리·정제하는 기술은 PSA 방식으로 알려져 있다. 하지만 상용화되어 있는 PSA 기술들은 고압의 운전 조건으로 인해 전처리 비용, 플랜트 투자 및 운영비가 높아져, 최종적으로 수소의 단가가 높아지는 단점을 가지고 있다. 따라서, 보다 경제적인 수소 정제시설에 관한 연구가 진행되어 왔으며 PSA와 분리막을 결합한 혼합형 방식의 수소 정제 시스템은 그 대안의 하나로 볼 수 있다. [1]

본 연구에서 수행한 정량적 위험성 평가의 대상도 혼합형 방식의 수소 정제 시설이며 공정 개략도는 Fig. 1.과 같다.

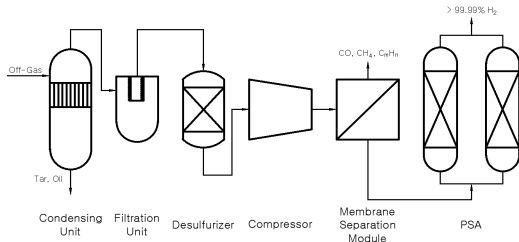


Fig. 1. Process for Hybrid Hydrogen Purification

Table 2. Gas Composition Volume(%) by Process

Gas	COG	PSA Tail Gas	H ₂ Product Gas	Membrane Charge Gas	PSA Charge Gas	Pretreated Gas
H ₂	28.80	45.14	>99.995	80.44	80.44	14.2
CO ₂	3.39	18.04	0.00	6.43	6.43	9.2
CO	44.90	27.98	0.00	9.98	9.98	50
N ₂	21.36	8.28	0.00	2.95	2.95	25.8
CH ₄	1.55	0.57	0.00	0.20	0.2	1.7

공정에 투입되는 부생가스는 전처리 공정에서 황, 타르, 유분, 수분 등의 불순물이 여과된다. 전처리가 완료되면 분리막 모듈과 압축기로 이루어진 분리막 패키지 공정에서 부생가스 내의 수소를 순도 80% 이상으로 농축하고 PSA 공정을 통해 고순도의 수소를 최종적으로 얻게 된다. [2]

최초의 부생가스는 다양한 가스의 혼합체로 그 구성은 Table 1.과 같다.

III. 해석 시나리오 구성

3.1. 사고 시나리오 구성

혼합형 방식의 수소 정제시설의 정량적 위험성 평가를 진행하기 위해서는 발생가능한 사고 시나리오의 구성이 필요하다.

본 연구의 평가 대상인 혼합형 방식의 수소 정제 시스템에 대한 데이터베이스가 별도로 운영되지 않아서 KOSHA GUIDE의 기술 지침을 참조하였으며 PSA 시스템과 관련된 일반적인 위험은 수소, 누출, 압력, 수소 점화 관련 위험으로 볼 수 있다. [6]

이를 참조하여 밸브, 배관 등과 같은 공정 구성품에서의 누출, 과압 등으로 인한 용기의 파열 등의 시나리오를 구성하였으며 누출의 경우, 누출원의 크기에 따라 Large, Medium, Small 3단계로 구성하였다. [3] 용기 파열의 경우, 용기의 사이즈가 크거나 길지 않아 용기의 중간 지점에서 심각한 파열 (Catastrophic rupture)이 일어나는 것으로 선정하였다. 정제로 인해 공정마다 가스 조성이 변경되며 그 내용은 Table 2.와 같다.

Table 1. Composition of Off-Gas

Gas	H ₂	CO ₂	CO	N ₂	CH ₄
Mole Wt	2.0	44.0	28.0	28.0	16.0

3.2. 사고발생 빈도

정량적 위험성 평가에서 중요한 요소 중 하나인 위험은 일반적으로 사고 발생 빈도 x 사고 피해 영향으로 정의된다. 앞서 언급한 바와 같이, 현재 혼합형 방식의 수소 정제시설에 대한 데이터베이스가 존재하지 않으므로 영국의 Failure Rate and Event Data for use within Risk Assessments를 참조하여 설정한 사고 시나리오에 대한 빈도는 Table 3.과 같다. 사고 시나리오는 공정별 대표 설비를 1개씩 정리하였으며, Membrane Module은 4x10으로 구성되어 4개의 Vessel로 그룹화하였고 PSA Module은 4개의 흡착 타워로 구성되어 있어 4개의 Vessel을 적용하였다. 시나리오, Leak Size 및 Frequency는 HSE 자료를 인용하였다. [3]

3.3. 점화원

수소 정제시설 설치부지 주변의 점화원(Ignition source)은 교통, 주차장, 흡연장으로 이루어져 있다. 교통의 경우 평균 속도는 도로 제한속도인 40km/hr, 시간당 통행량은 1일 동안 조사한 도로 통행량의 평균치 시간당 5대로 설정하였다.

주차장 및 흡연장의 경우 이번 Safeti 8.9 버전에서 새롭게 지원하는 기능인 Ignition Definition 탭의 Source type을 이용하였다.

3.4. 인구 및 기상 정보

기상 정보의 경우, 기상청에서 제공하는 기상 자료 개방 포털에서 수소 정제시설이 구축되는 지역의 2022년 기후 데이터를 입수하여 평균기온, 평균습도, 평균 지면 온도, 낮/밤, 16 풍향, 풍속을 정리하고

Table 3. Accident scenario and Frequency data

Components	Inventory			Scenario	Leak size (mm)	Leak frequency (/year)	Gas
	Pre (barG)	Temp. (°C)	Volume (m ³)				
Feed Gas Drum (D-1101)	6	40	6	Catastrophic Rupture	-	2.00E-06	COG
				Large Leak	25	5.00E-06	
				Medium Leak	13	1.00E-05	
				Small Leak	6	4.00E-05	
Feed Gas Treater (T-1001A)	5	40	6	Catastrophic Rupture	-	2.00E-06	COG
				Large Leak	25	5.00E-06	
				Medium Leak	13	1.00E-05	
				Small Leak	6	4.00E-05	
Membrane Charge Compressor (C-1201)	8.9	20	6	Catastrophic Rupture	-	1.40E-05	Membrane Charge Gas
				Large Leak	100	1.40E-05	
				Medium Leak	50	3.30E-03	
				Small Leak	25	8.60E-02	
Membrane Module (M-1301)	8.8	20	6	Small Leak	3	1.00E-05	PSA Charge Gas
				Large Leak	25	5.00E-06	
				Full-bore Rupture	101.6	1.00E-06	
TSA Module (TSA)	0.5	25	6	Catastrophic Rupture	-	2.00E-06	Pre treated Gas
				Large Leak	25	5.00E-06	
				Medium Leak	13	1.00E-05	
				Small Leak	6	4.00E-05	
PSA Module (PSA)	8	40	6	Catastrophic Rupture	-	2.00E-06	H2 Product Gas
				Large Leak	25	5.00E-06	
				Medium Leak	13	1.00E-05	
				Small Leak	6	4.00E-05	

Table 4. Populations

Location	Control Room	Facilities	Factory
Population	Process Control	Engineer	Operator
Day	2	2	5
Night	2	2	2

기후 등급을 설정하였다.

인구의 경우 수소 정제시설의 근무 스케줄을 참고하였으며 내용은 **Table 4.**와 같다. 일반적인 근무 시간 8시부터 18시까지 Day, 그 외의 시간을 Night로 구분하였다.

IV. 정량적 위험성 평가 해석 결과

4.1. 개인에 대한 위험성 (IR) 해석 결과

사고의 영향 범위 내의 어느 지점에 있을 지 모르는 개인에 대한 위험을 개인에 대한 위험성(Individual Risk, IR)이라고 한다.

사고의 위험성 순위(Risk Ranking, RR)는 공정에서 가장 압력이 높은 구간이며 수소 순도 및 함량이 가장 높은 Membrane과 PSA 공정, 정제시설의 근무자가 상주하는 Control Room, 정제시설 주변에 위치한 Office 총 4가지를 Risk Ranking Point(RRP)로 설정하였으며 그 결과는 **Table 5.**와 같다.

위 **Table 5.**에서 Total Risk란 RRP 위치에서 각 누출/영향 유형에 따라 발생하는 연간 사망 가능성을 말한다. PSA 공정에서 위험성이 가장 높게 나타나고 있으며 Membrane이 2번째이다. 거리가 있는 Control Room과 Office는 위험성이 낮게 나타났다.

영국 HSE에서 제안한 기준에 따르면 작업자의 위험도는 1.0E-03에서 1.0E-06까지의 범위에서 허용 가능한 것으로 보고 있다. [4] Individual Risk Contour는 분석된 지역의 모든 지리적 위치에서 사망 가능성을 보여준다. **Fig. 2.**와 같이 허용 가능 범위 내에서의 Risk Contour는 수소 정제 시설 부지를 크게 벗어나지 않게 형성되는 것을 확인할 수 있었다.

4.2. 대중에 대한 위험성 (SR) 해석 결과

사고의 영향 범위 내에 있을지 모르는 일반 대중에 대한 위험을 대중에 대한 위험성(Societal Risk, SR)이라고 한다.

Risk Integral은 평균 연도(Average Year)에 누출 시나리오에 의해 잠재적으로 사망할 수 있는 사람들의 수를 나타내며, SR Ranking Grid 결과는 **Table 6.**

Table 5. IR Ranking Grid

Risk Ranking	Vulnerabilities	Total Risk (/AveYear)
Membrane	Outdoor	0.0052
	Indoor	0.0004
PSA	Outdoor	0.0105
	Indoor	0.0053
Control Room	Outdoor	9.71E-08
	Indoor	5.61E-08
Office	Outdoor	2.49E-12
	Indoor	1.35E-12



Fig. 2. Multi level contour for Day & Night

과 같다.

본 연구에서 평가한 수소 정제 시설에 대한 위험도가 허용 가능한 수준인지를 평가하기 위해 사회적 위험도를 보여주는 FN Curve는 **Fig. 3.**에 나타내었다. 영국 HSE의 기준으로 보았을 때, FN Curve 결과는 위험성 허용범위 내에 분포하고 있으나 점으로 표시되고 있으며 근무자의 수가 평균 2명이라는 점에서 사회적 위험도에서 유의미한 결과를 도출하기 어렵다고 판단된다.

4.3. 안전성 향상 방안

혼합형 방식의 수소 정제시설에 대한 정량적 위험성 평가 실시 결과, PSA 공정의 경우 압력이 8 barG로 전체 공정에서 높은 수준이며 순도 99.995% 이상의 수소를 포함하고 있어 **Table 5.**에서 보는 바와 같이 높은 사망 가능성을 가지고 있다. 따라서, 다음과 같은 안전 조치 강화가 필요하다. PSA 공정에

Table 6. SR Ranking Grid

Model	Frequency	Risk Integral Percentage	Risk Integral	Average Fatalities
PSA1_Leak_Small Hole	0.012	18.8024	0.0049	0.051
PSA2_Leak_Small Hole	0.012	18.4054	0.0048	0.05
PSA3_Leak_Small Hole	0.012	16.6904	0.0043	0.045
C-2101_Leak_Medium Hole	0.0033	15.5429	0.004	0.152
PSA4_Leak_Small Hole	0.012	14.33	3.70E-03	3.90E-02
C-1201_Leak_Medium Hole	0.0033	13.0881	3.40E-03	1.28E-01
D-3401_Leak_Medium Hole	0.00027	1.16354	3.00E-04	1.39E-01



Fig. 3. FN Curve for Hybrid system Hydrogen Purification Facilities

서의 사고 가능성을 줄이기 위하여 작업표준서 비치 및 작업자 안전교육을 통해 휴먼 에러에 의한 인적 사고를 예방할 필요가 있다. 또한 수소 누출 검지기 설치 지점을 추가, 근무자가 수소 검지가 가능한 휴대용 누출 검지기를 소지하고 근무 중 주기적인 점검을 실시하여 누출을 조기에 확인할 수 있는 시스템 마련이 필요하며 주요 누출 의심 부위에 수소 검지 테이프를 부착하여 육안으로 쉽게 누출이 가능하도록 할 필요성이 있다. 또한 인터록 설비 추가 구축 등을 통해 사고를 방지할 수 있는 자동화 시스템을 구축하는 노력이 필요하다. 마지막으로 장비 영향평가서를 기준으로 방호벽 추가 설치에 대한 보정값을 반영하여 정량적 위험성 평가를 재실시한 결과 **Table 5.**에서 가장 높은 IR 위험도를 보여주었던 PSA 공정의 Total Risk가 0.0105에서 8.60E-05로 감소함을 확인하였으며 이에 따라 방호벽을 추가 설치한다면 사고에 대한 피해 영향 저감에 크게 기여할 수 있다고 판단된다. [5]

V. 결론

본 연구는 혼합형 방식의 수소 정제 시설에 대한 정량적 위험성 평가를 통해 위험 요인을 파악하고 그에 대한 경감 대책을 수립하여 더욱 안전한 수소 정제시설을 구축하기 위한 데이터를 마련하고자 하였다. 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 사고 피해의 심각성을 볼 때, 수소 순도가 99.995% 이상으로 가장 높은 수준인 PSA 공정에서의 사고 발생이 가장 위험한 사고로 분석된다. 사고 발생에 의한 피해 영향 범위는 주변에 영향을 끼칠 정도로 크지 않지만, 그 범위 안에 인적, 물적 자원이 존재할 경우 피해 심각도가 높은 수준으로 분석되며 Risk Integral Percentage의 약 68% 이상이 PSA에 의한 사고로 보여진다.

2) FN Curve의 분석 결과, 위험성 허용범위 내에 분포되어 있지만 평균 2명의 근무자수로 인해 SR 결과보다는 IR 결과를 토대로 위험성을 평가하고 안전대책을 수립하는 것이 바람직하다고 볼 수 있다. IR Ranking Grid에서 PSA 공정의 Total Risk가 높으므로 위험도를 저감할 수 있는 추가적인 안전 대책 마련이 필요하다고 판단된다.

3) 안전성 강화 대책으로는 작업표준서 비치 및 작업자 안전 교육을 통한 운영 시스템 강화, 수소 누출 검지기 추가 설치, 수소 검지용 테이프 부착, 인터록 시스템 구축, 수소 누출 검지가 가능한 휴대용 검지기를 통한 근무자의 상시 점검을 통해 사고를 예방 혹은 조기 발견하여 위험도 저감에 큰 역할을 할 수 있다고 판단된다. 또한 비용적인 부분에서 부담이 있을 수 있으나 방호벽을 설치한다면 사고 발생에 의한 2차 피해 예방에 많은 도움이 될 수 있을 것이라 사료된다.

감사의 글

이 논문은 2022년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구입니다(No. 20213030040170).

REFERENCES

- [1] LI, B., He, G., J iang, X., Dai, Y., Ruan, X., “Pressure swing adsorption /membrane hybrid processes for hydrogen purification with a high recovery”, *Front. Chem. Sci. Eng.*, 10, 255-264, (2016)
- [2] Kim, J.H., Jeon, J.Y., Park, B.R., Kang, H.C., “Method and system for separation and recovery of hydrogen from coke oven gas in the steel industry”, *Korea Patent*, 10-2329389, (2021)
- [3] F. Rate, “Failure Rate and Event Data for use within Risk Assessments”, UK HSE, (2006)
- [4] “Guidance on ALARP Decisions in COMAH”, UK HSE
- [5] 환경부, 화학물질안전원, 한국화학물질관리협회, 장외영향평가서 작성안내서, (2017)
- [6] 한국산업안전보건공단, 수소 분리 및 정제를 위한 압력변환흡착(PSA) 시스템의 안전에 관한 기술 지침, KOSHA GUIDE (P-178-2022), (2022)