

가스터빈 복합 화력발전소에 수소연료 적용을 위한 HAZOP 위험성 평가 연구

구예빈 · 이민철[†]

인천대학교 안전공학과

A HAZOP Risk Assessment Study for the Application of Hydrogen Fuel in a Gas Turbine Combined Cycle Power Plant

YE BEEN GU, MIN CHUL LEE[†]

Department of Safety Engineering, Incheon National University, 119 Academy-ro, Yeonsu-gu, Incheon 22012, Korea

[†]Corresponding author :
LMC@inu.ac.kr

Received 23 September, 2024

Revised 15 October, 2024

Accepted 19 October, 2024

Abstract >> In this study, a hazard and operability (HAZOP) risk assessment is conducted to identified potential risks and to improve safety level in the stage of design of a hydrogen fueled gas turbine combined cycle power plant which co-fire hydrogen with conventional fuel of natural gas. For the stable operation of a hydrogen fueled combined cycle power plant, it is crucial to identify the potential risks during the development of relevant technologies. By assessing risk factors in hydrogen supply system, improvement recommendations such as changes in the location and the number of piping accessories and facilities, as well as safety training, were proposed. The obtained results and lessons to reinforce the level of safety are expected to contribute to the safe use of hydrogen as a new decarbonized fuel for power generation.

Key words : Gas turbine combined cycle power plant(가스터빈 복합 화력발전소), Hydrogen safety(수소 안전), Risk assessment(위험성 평가), HAZOP(위험과 운전 분석 기법)

1. 서론

현재 화석연료인 석유, 석탄 및 천연가스 사용의 의존도는 약 85%로 매우 높은 편이며 이는 전력 생산, 산업, 운송 분야에서 두드러지게 나타난다. 이로 인한 탄소화합물 배출 문제는 지속적으로 제기되어 왔다¹⁾. 화석연료의 고갈 및 환경오염으로 인하여 대체 에너지인 신재생에너지 개발이 주목받고 있다²⁾. 특

히 수소는 다양한 에너지원으로부터 수전해(water electrolyte) 기술을 통해 생산 가능하고 이산화탄소 등 온실가스를 배출하지 않는 연료이다³⁾.

수소가 주목을 받으면서 전 세계적으로 수소 경제 사회를 구축하기 위한 투자와 지원에 힘입어 수소에너지 시장이 커지고 있는 추세이다⁴⁾. 우리나라 정부도 2019년 1월 세계 최고 수준의 수소경제 선도국가로 도약하기 위하여 「수소경제 활성화 로드맵」을

발표하였고⁵⁾ 같은 해 12월에 안전과 산업이 균형 있게 발전하기 위하여 「수소 안전관리 종합대책」을 발표하였다⁶⁾. 2050년까지 탄소중립을 목표로 탈탄소연료 도입을 활발히 진행하고 있으나 기존에 사용 중인 연료와 다른 특징을 가진 탈탄소연료로 인하여 설비 개선과 연료에 관한 적합성 연구가 추가로 요구되고 있다⁷⁾.

탈탄소연료 중 가장 대표적인 수소연료의 경우 저위 발열량(lower heating value, LHV)은 부피당 에너지 밀도와 질량당 에너지 밀도가 각각 10.7 MJ/Nm³ 및 120.1 MJ/kg의 값을 갖는다. 메탄의 LHV는 부피당 에너지 밀도와 질량당 에너지 밀도가 39.08 MJ/Nm³ 및 49.3 MJ/kg의 값을 갖는다. 이는 단위 부피당 발열량은 수소가 메탄보다 약 0.27배 작지만 단위 질량당 발열량은 메탄보다 약 2.43배 크고⁸⁾ 가볍고 빠르게 확산하는 특징을 갖는다는 것을 의미한다. 수소의 위험성은 0.011-0.017 mJ⁹⁾의 낮은 최소 점화에너지(minimum ignition energy, MIE)와 4.1-75.0 vol%¹⁰⁾의 넓은 연소 범위에서 비롯된다¹¹⁾. 따라서 수소의 위험성은 낮추고 안전도는 높이기 위한 연구가 필요하다.

상기된 특성과 안전 관리 미흡으로 2019년 5월 국내 K 테크노파크에서 수소탱크가 폭발하는 사고가

발생한 바 있다¹²⁾. 주요 원인은 수소 누출이었으며 수소 충전 및 보관과 같은 기본적인 안전 절차가 충분히 지켜지지 않은 점이 사고 규모를 악화시켰다¹³⁾.

한국가스공사에서 발표한 2023 가스 사고연감 자료¹⁴⁾를 보면 최근 5년간(2019-2023년) 가스 사고 현황 및 분석을 볼 수 있다. 고압가스 사고 분석 결과 사고 현황을 보면 2023년 전체 가스 사고 92건 중 고압가스 사고는 16건이 발생하여 전년(10건) 대비 6건(60.0%) 증가하였으며 전체 가스 사고의 17.4%를 차지하였다. Fig. 1과 같이 최근 5년간 고압가스 사고는 연평균 15.5% 증가한 것으로 나타났다.

2023년에 발생한 고압가스 사고 16건을 가스별로 분류하면 수소 4건(25.0%), 산소 4건(25.0%), 암모니아 2건(12.5%) 순으로 나타났다. 또한 Fig. 2와 같이 최근 5년간 고압가스 사고 54건을 가스별로 분류하면 산소가 15건(27.8%)으로 가장 많이 발생하였고 다음은 수소가 13건(24.1%) 순으로 나타났다.

2023년 고압가스 사고 16건을 원인별로 분류하면 시설 미비 사고가 7건으로 가장 많이 발생하였다. Fig. 3과 같이 최근 5년간 고압가스 사고 54건을 원인별로 분류하면 시설 미비, 제품 노후(고장), 기타가 12건(22.2%)으로 가장 많았고 다음으로는 사용자 취급 부주의가 7건(13.0%) 순으로 나타났다.

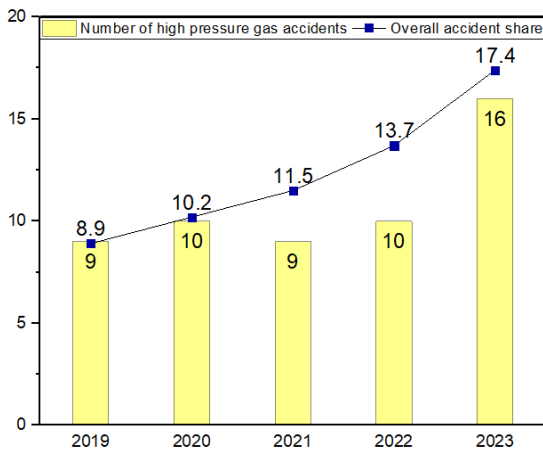


Fig. 1. Trends in the number and share of highpressure gas accident over the past 5 years

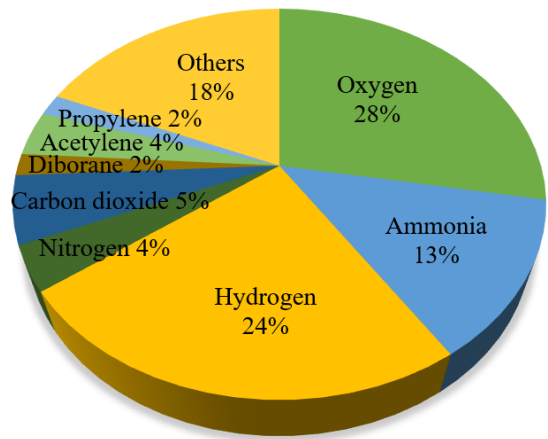


Fig. 2. Distribution of high pressure gas accident causes over the last 5 years by gas type

수소는 넓은 폭발 범위와 낮은 착화에너지 등의 조건으로 인해 다양하게 사용하기 힘든 실정이고 수소의 제조와 수송, 저장 및 분배 시 누출로 인한 화재와 같은 사고로 인해 인명 피해와 경제적 피해 등을 일으킬 수 있다¹⁵⁾. 수소가 갖는 위험 요소 때문에 국내에서는 「고압가스 안전관리법 시행규칙」에 따라 처리 시설 및 압축가스 설비로부터 30 m 이내에 보호 시설이 있는 경우 가스 폭발에 따른 충격을 견딜 수 있도록 방호벽을 설치하여야 한다. 그러나 이는 제도이므로 상황에 따라 위험한 정도가 다르기 때문에 이에 대한 분석이 필요하다¹⁶⁾.

이러한 사고 사례와 그 결과를 방지하기 위하여 재발 방지 대책 마련과 안전성 확보가 필요하지만 아직은 안전성에 대한 검증 및 연구가 부족한 실정이다. 따라서 수소 관련 활동의 위험성을 정확한 위험 분석 도구를 사용하여 적절하게 평가하여야 한다. 본 논문에서는 종래 설비의 안전성을 검증 및 확인하는 방법으로 위험성 평가(risk assessment)를 대표적으로 사용하여 사업장 내의 위험 요인을 파악하고 해당 위험 요인에 의한 피해의 발생 가능성과 치명도를 추정하여 감소 대책을 수립하는 과정을 도시하고자 한다¹⁷⁾.

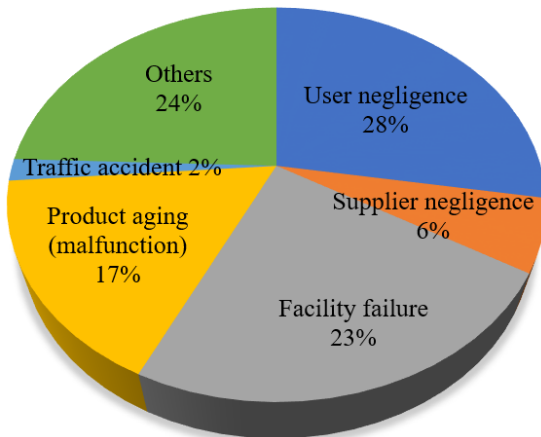


Fig. 3. Distribution of high pressure gas accident causes over the last 5 years by cause

2. 위험성 평가

2.1 위험성 평가 특징

사고를 방지하기 위하여 가장 먼저 수행하여야 할 일은 공정 중에 존재하는 위험을 모두 찾아내어 이를 평가하는 것이다¹⁸⁾. 위험이 확인되지 않은 상황에서는 그 위험을 제거하고 통제하는 적절한 대책을 세울 수 없기 때문이다¹⁹⁾. 이를 위하여 정부에서는 1996년부터 공정 안전 관리(process safety management, PSM) 제도를 시행하고 있는데 이 중 공정 위험성 평가가 가장 핵심 부분이다²⁰⁾. 공정 위험성 평가는 유해 위험 화학 물질을 취급하는 제조 공정 및 설비를 대상으로 화재, 폭발, 위험물 누출 등과 같은 잠재적 위험을 도출해 내고 잠재적 위험이 실제 사고로 연결될 가능성과 사고 발생 시 피해의 크기를 예측하여 평가, 분석하여 사고 발생 확률과 피해의 크기를 최소화하는 것을 목적으로 한다²¹⁾. 위험성 평가는 시간, 노력, 전문 지식이 필요한 활동이며 그 방법은 크게 2가지로 나눌 수 있는데²²⁾ 위험 요소의 존재 여부를 찾는 정성적 위험성 평가(qualitative risk assessment)와 위험 요소를 확률적으로 분석, 평가하는 정량적 위험성 평가(quantitative risk assessment)로 분류된다²³⁾. 정성적 위험성 평가에는 공정과 시스템 체크리스트 평가(check list), 사고 예상 질문 분석(what-if)²⁴⁾, 예비 위험 분석(preliminary hazard analysis, PHA), 위험과 운전 분석(hazard and operability studies, HAZOP)²⁵⁾, 이상 위험도 분석(failure mode, effect and criticality analysis, FMECA) 등이 있고 정량적 위험성 평가에는 결함수 분석(fault tree analysis, FTA)²⁶⁾, 사건수 분석(event tree analysis, ETA), 원인-결과 분석(cause-consequence analysis, CCA) 등이 있다.

이 연구에서는 화학 공정에서 많이 사용하고 있는 정성적 위험성 평가 방법 중 하나인 HAZOP 기법을 사용하여 현존하는 가스터빈 복합 화력발전소에 수소연료를 적용하였을 경우 발생할 수 있는 사고 원인과 안전성을 평가하고 안전성 향상을 위한 개선

사항을 제안하였다. 설계 완료 단계에 사용하는 안전성 평가에는 초기 설계 단계에 사용하는 PHA, 공정 운영 도중에 사용하는 공정 위험성 분석(process hazard review, PHR)이 있다. 이 연구에서는 공정 도면을 확보한 상태이고 수소연료를 적용하기 전에 설계 완료 단계이므로 HAZOP을 실시하였다.

2.2 HAZOP 기법

HAZOP은 1969년에 영국 Imperial Chemical Industries (ICI)에서 제작된 위험성 평가 방법이다. 위험성(hazard)과 운전성(operability)을 결합한 용어로 공정에 존재하는 위험 요인과 공정의 효율을 떨어뜨릴 수 있는 운전상의 문제점을 찾아내어 그 원인을 제거하는 위험성 평가 기법으로써 정해진 규칙에 따라 설계 의도, 설계도면, 각종 기술 명세 등을 활용하여 위험성 평가를 실시한다²⁷⁾. 근래에 화학 공정의 운전성 평가 문제는 공정의 설계 단계에서 가장 필수적인 부분으로 인식되고 있다²⁸⁾. 다양한 분야 지식을 가진 5-7명의 전문가들이 모여 브레인스토밍(brainstorming) 방법을 사용하여 공정에서 발생 가능한 모든 이탈(deviations)을 분석 및 검토하고 해결책을 찾아야 하므로 많은 반복 작업과 그에 따르는 시간 소요가 많고 분석자의 지식 수준에 따라서 서로 다른 결과가 나오기도 하는 단점도 있으나 공정의 운전상 발생할 수 있는 비효율적 문제를 해결하는 데 매우 효과적인 방법이다²⁹⁾.

본 기법은 공정변수(process parameter)의 질이나 양을 표현하는 용어인 가이드워드(guide word)를 사용하여 공정의 위험성과 운전상의 문제점을 도출함

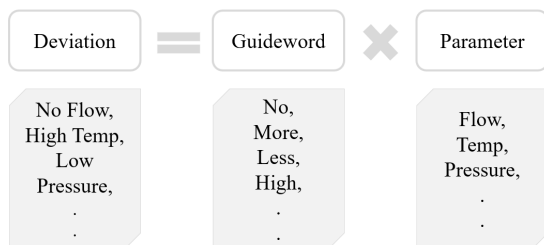


Fig. 4. Formation of deviation

으로써³⁰⁾ 공정의 모든 문제를 체계적으로 검토할 수 있을 뿐만 아니라 공정 설계 의도나 조건 등에 대한 상세한 설명을 제공할 수 있다³¹⁾.

본 연구에서는 HAZOP의 기본 양식을 사용하여 설계 의도를 기준으로 도출된 공정변수에 가이드워드를 조합하여 이탈을 발생시키고 각 이탈에 대한 원인, 결과 및 현재 안전 조치 사항을 평가하여 허용 가능한 범위 내의 위험도(risk)일 경우 평가를 종료하고 허용 범위를 벗어난 경우에는 개선 사항을 제안하였다. 이때 제안한 개선 사항을 반영한 위험도를 재평가하여 위험도가 허용 범위 내에 있는 경우 위험성 평가를 종료하고 허용 범위를 벗어날 때는 추가적인 개선 사항을 도출하여 허용 범위 이내가 될 때까지 평가를 계속하였다.

Fig. 4와 같이 가이드워드와 공정변수가 조합되는 이탈(deviation)은 유체 흐름의 정지 또는 과잉 상태

Table 1. Criteria of assessment by frequency

Occurrence frequency	Frequency level	Description
Frequent	3	An incident occurs one or more times before the setup period
Possible	2	There is a possibility of an incident occurring before the setup period
Unlikely	1	There is a low possibility of an incident occurring before the setup period

Table 2. Criteria of assessment by severity

Severity classification	Severity level	Description
Critical	4	Deaths, two or more injuries, financial loss of 1 billion KRW or more; equipment downtime of 5 days or more
Major	3	1 injury, financial loss between 100 million and 1 billion KRW; equipment downtime of 1 to 5 days
Minor	2	No injuries, financial loss less than 100 million KRW; equipment downtime of less than 1 day
Negligible	1	Need for improvement in safety design or operational efficiency, no financial loss

등과 같이 설계 의도에서 벗어난 상태를 말한다³²⁾.

2.3 위험 등급

HAZOP 기법은 일반적으로 사고 발생 가능성(빈도, frequency)과 치명도(severity)의 곱으로 위험 등급(risk)을 추정한다. 한국산업안전보건공단 자료를 바탕으로 사고 발생 가능성과 치명도는 Table 1 및 Table 2의 기준에 따라 각각 3등급, 4등급으로 구분하였고 빈도 및 강도를 시각적으로 표현한 2차원 행렬인 Table 3으로 위험 등급(risk)을 평가하였다(Table 4).

Table 3. Frequency and severity matrix

Severity \ Frequency	Frequent (3)	Possible (2)	Unlikely (1)
Critical (4)	5	5	3
Major (3)	4	4	2
Minor (2)	3	2	1
Negligible (1)	2	1	1

Table 4. Definition of risk level

Risk level	Control criteria	Remarks
1 Tolerable risk	Maintain current safety measures	Can continue hazardous work (continue work under current conditions)
2 Warning risk	Requires safety information and periodic monitoring/training	
3 Significant risk	Plan necessary for maintenance, requires temporary safety measures	Can continue hazardous work under conditional management (continue work with risk control measures)
4 Major risk	Urgently requires additional safety measures, must plan for work	Can continue hazardous work under conditional management (continue work after implementing temporary safety measures)
5 Intolerable risk	Immediate cessation of work, requires urgent improvement	Cannot continue work (must stop immediately)

3. 가스터빈 복합 화력발전소 P&ID

본 연구에서는 일반적인 가스터빈 복합 화력발전소에 수소가스를 연료로 신규 공급 시 연료 공급 시스템에 대해 위험성 평가를 실시하였다. 추가적으로 가스터빈 복합 화력발전소 내에서 발생할 수 있는 위험 요소를 가이드워드와 공정변수를 조합하여 도시하고 이후 안전성 향상 계획을 수립하였다. 이 연구에서는 HAZOP 분석을 위해 A 복합 화력발전소의 piping and instrument diagram (P&ID)을 사용하였으며 Fig. 5에 복합 화력발전소에 대한 수소연료 공급 시 P&ID를 도시하였다. P&ID는 가스 처리 공정에서 안전하고 효율적인 운영을 보장하기 위한 중요한 정보를 제공하며 각 구성 요소와 배관이 어떻게 연결되고 제어되는지 보여준다. 설비의 P&ID와 사양 등은 기업의 비밀과 관계되는 자료이므로 제외하고 관련 설비를 연결하는 시스템과 부속 설비의 구성 요소에 대해서만 연구하였다³³⁾. 복합 화력발전소의 주요 설비를 연결하는 배관 및 배관 부속품과 부속 설비의 종류는 Fig. 5의 오른쪽에 정리하였다. 수소 배관 공급에서 노즐까지 배관 및 배관 부속품은 볼 밸브(ball valve, BV), 게이트 밸브(gate valve, GV), 수소가스 검출기(hydrogen gas detector, HGD), 압력 방출 밸브(pressure relief valve, PRV), 안전밸브(safety valve, SV), 감압기(reducer, RE), 인라인 정류 혼합기(inline static mixer, ISM)가 있고 압축된 수소를 공급하여 주는 역할을 한다.

이 연구에서는 각각의 노드를 Fig. 5와 같이 ‘모듈 외부에서 수소가 들어오는 상류 라인(Node 1)’, ‘모듈 내부에서 수소연료를 운반하는 주요 헤드 라인(Node 2)’, ‘모듈 내부에서 파일럿 연료를 운반하는 분기 라인(Node 3)’, ‘모듈 내부에서 메인 연료를 운반하는 분기 라인(Node 4)’, ‘가스터빈실에서 파일럿 연료를 공급하는 라인(Node 5)’, ‘가스터빈실에서 메인 연료를 공급하는 라인(Node 6)’으로 총 6개의 노드(node)로 구분하고 각 노드별로 HAZOP 분석을 실시하여 복합 화력발전소의 안전성 향상 방안을 제안하였다. 가스터빈에 공급되는 연료의 경우 크게 메인

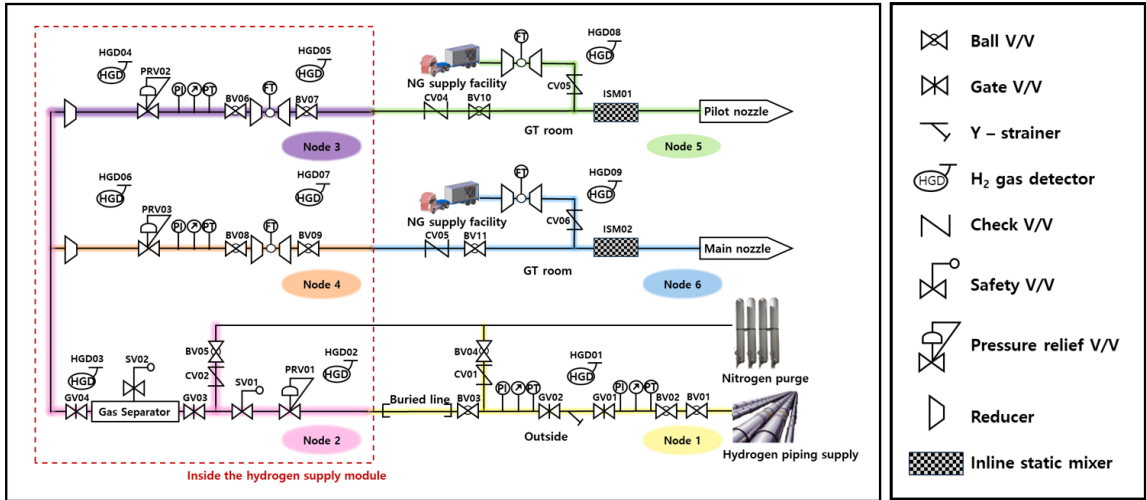


Fig. 5. Piping and instrumentation diagram of hydrogen supply system for a gas turbine combined cycle power plant (CCPP). Node 1: upstream line for hydrogen outside the hydrogen supply module. Node 2: head line for hydrogen fuel in the hydrogen supply module. Node 3: branch line for pilot fuel in the hydrogen supply module. Node 4: branch line for main fuel in the hydrogen supply module. Node 5: supply line for pilot fuel in the gas turbine room. Node 6: supply line for main fuel in the gas turbine room

연료와 파일럿 연료로 구분되는데 기존 연료인 천연 가스(natural gas, NG)가 메인 연료와 파일럿 연료로 공급되는 라인에 수소가 각각 공급될 수 있도록 구성되었다. Fig. 5와 같이 고압수소가 Node 1의 배관을 통해 공급되면 Node 2에서 감압 및 정제된 후 Node 3 및 Node 4를 통해 파일럿 연료와 메인 연료로 분기되어 공급되고 이후 Node 5 및 Node 6에서 NG 배관과 병합 및 수소와 NG가 혼합되어 최종적으로 메인 연료 노즐 및 파일럿 연료 노즐로 공급된다.

Fig. 5에서 네모 점선은 inside the hydrogen supply module로 수소 공급 시스템 내부이다. 수소 공급 배관에서 3.1 MPa로 압축된 수소가 외부 배관인 Node 1을 통해 이동하여 점선이 의미하는 실내(땅속)로 들어가는 배관으로 간다. 수소는 각 노드를 거쳐 가스 터빈실로 이동해서는 ISM에서 NG와 혼소되고 Node 5, Node 6과 같이 각각 파일럿 노즐, 메인 노즐로 흘러 가스터빈에서 연료로 사용될 수소를 공급한다. 파일럿 연료는 메인 연료의 연소를 개시하거나 유지하는 데 도움을 주고 메인 연료는 실제로 에너지를 생성하는 주요 에너지원으로 전체 연료 사용량의 대부분을 차지하여 가동된다. 수소 공급 중에 과도한 압

력 상승을 방지하기 위해 가스 방출 밸브인 PRV가 설치되었다.

결론적으로 수소 연료가 외부에서 공급 모듈로 들어와서 모듈 내부에서 분배된 후 각각의 연료 라인이 가스터빈실로 연결되는 흐름을 보여준다. 이러한 6개의 노드는 특정 기능을 담당하며 전체 수소 공급 시스템을 이룬다.

4. HAZOP 분석 결과 및 고찰

앞서 기술한 6개의 노드에 대해 잠재적인 위험과 그에 대한 현재의 안전 조치를 나타내고 현재 상태 및 개선 권고 사항으로 변화된 상태의 위험 등급을 F (frequency, 빈도)와 S (severity, 심각도) 각각 3점 및 4점 척도로 평가하고 그들의 곱인 R (risk, 위험도) 점수를 5점 척도로 산출하여 평가하였다. 가스터빈 복합 화력발전소의 관련 설비를 연결하는 시스템과 부속 설비의 안전성 향상에 중점을 두고 연구를 수행한 결과는 Table 5와 같다.

수소 공급 배관에서 수소 공급 모듈로 연결되는 배관(Node 1)에 수소가 누출될 경우와 유지 보수가

Table 5. HAZOP analysis results of A power plant

Node	Deviation	Cause	Consequence	Current safety measures	Risk as-is			Improvement recommendation	Risk to-be		
					F	S	R		F	S	R
1	HIGH FLOW	1. Only manual valves installed 2. Unable to control flow remotely	1. Decrease in operational efficiency	1. Installation/operation of gas detector 2. Install PI, PG, PT	3	2	3	1-1. Install automatic valve 1-2. Install emergency shutdown valve 1-3. Regular inspections needed 1-4. Installation of flow alarm low/high	1	1	1
	SAFETY	1. Impact or vehicle collision with external piping during external work	1. Ductile failure of the piping 2. Risk of H ₂ leakage	1. Safety work permit 2. Installation/operation gas detector 3. Activation of purge nitrogen upon fire detection	3	3	4	1-4. Establish restricted access zone 1-5. Conduct safety training for workers 1-6. Install collision barriers 1-7. Enclose the piping indoors 1-8. Install shutoff valves and purge nitrogen supply lines at regular intervals in hydrogen supply pipes both indoors and outdoors 1-9. Installation of fire detector	2	2	1
2	HIGH PRESSURE	1. Pressure increase due to PRV01 failure	1. Increased pressure in H ₂ gas transfer 2. Increased risk of leakage at fittings when piping operation pressure exceeds normal levels	1. Installation/operation of safety valve 2. Measurement of fuel concentration using a gas detector	2	4	5	2-1. Regularly inspect PRV 2-2. Install additional PRV in the piping after the gas separator 2-3. Install emergency shutdown valve 2-4. Installation of pressure alarm low/high	1	2	1
3, 4	LOW PRESSURE	1. Nozzle openings become smaller due to internal pipe corrosion	1. Decreased flow and pressure inside the piping 2. Decrease in operational efficiency	No measure	3	3	4	3-1. Use metal materials with a small potential difference combination 3-2. Increase corrosion resistance by using cathodic protection or electroplating 3-3. Replace pipes that have exceeded their lifespan regardless of corrosion status	2	2	2
5, 6	HIGH TEMP	1. External fire	1. Increase in internal pipe temperature	1. Installation/operation of fire detector 2. Installation/operation gas detector 3. Activation of purge nitrogen upon fire detection	2	4	5	4-1. Regular training for hydrogen gas fire 4-2. Use and maintain fireproof insulation 4-3. Lower the surrounding temperature of the fire with high-pressure water spray 4-4. Equip with a ventilation system (intelligent control system)	1	3	2

필요할 경우를 대비하여 공급을 차단하기 위해 볼 밸브(BV 01-04)와 게이트 밸브(GV 01-02)를 설치하였으나 수동식 밸브만 설치되어 사고 발생 시 원격

으로 긴급 유량 제어가 불가능하다. 따라서 운영의 효율성이 저하될 수 있으므로 자동식 밸브와 긴급 차단 밸브(emergency shut-off valve, ESV)를 설치하

고 저유량 경보(flow alarm low, FAL)와 고유량 경보(flow alarm high, FAH) 기기를 설치하여 유량이 정상 운전 조건을 벗어났을 때 관리자가 신속히 조치를 취할 수 있도록 한다.

또한 Node 1은 외부 배관이므로 외부 작업에 의한 충격 및 차량 충돌 사고가 일어날 수 있다. 충돌로 인해 배관에 연성 파괴가 발생하여 H₂ 누출 위험이 생길 수 있기 때문에 이러한 문제를 예방하기 위하여 국내 A 복합 화력발전소에서는 현재 안전 조치로 안전 작업 허가서를 받고 작업을 하거나 가스 감지기를 설치해서 수소 누출을 감지하거나 수소가스 누출 시 퍼지용 질소를 작동시켜 수소 농도를 낮추어 그 위험을 낮춘다. HAZOP 분석을 통한 추가적인 위험도 저감 방법으로는 출입 제한 구역을 설정하고 충돌 방지대와 화염 방지기를 설치하는 것이 있다. 또한 배관을 옥내화시키고 수소 공급 배관 옥내외에 일정 간격을 확보하여 차단 밸브를 설치하는 것이 추가적으로 제안된다.

모듈 내부에서 수소 연료를 운반하는 주요 헤드 라인(Node 2)에는 PRV 01의 고장으로 인한 압력 상승의 문제가 생길 수 있다. 압력 상승은 수소가스의 과압으로 이어져 시스템의 손상을 주거나 연소 상태를 불안정하게 할 수 있다. 현재는 SV를 설치해 관리하지만 주기적인 PRV 01 점검 및 교체와 가스 분리

기(gas separator) 후단 배관에 PRV를 추가 설치하고 저압 경보(pressure alarm low, PAL)와 고압 경보(pressure alarm high, PAH) 기기를 설치하는 것이 제안된다. 개선 조치 전에는 위험 등급이 5였던 것이 개선 조치 후에는 위험 등급이 1로 상당히 줄어드는 것을 알 수 있다.

모듈 내부에서 파일럿 연료를 운반하는 분기 라인(Node 3)과 모듈 내부에서 메인 연료를 운반하는 분기 라인(Node 4)에서 내부 배관 부식으로 분출 구멍이 작아지면 배관 내부 유량과 압력이 낮아져 운영 효율성이 저하된다. 부식을 억제하기 위해 전위차가 작은 조합을 사용한 금속 재질을 사용하고, 전기 방식이나 전기 도금을 하여 부식에 대한 저항성을 높이고, 수명이 지난 배관은 부식 여부와 상관없이 교체하여 사고를 예방하는 것이 필요하다.

가스터빈실에서 파일럿 연료를 공급하는 라인(Node 5)과 가스터빈실에서 메인 연료를 공급하는 라인(Node 6)에는 외부 화재로 인하여 배관 내부 온도가 상승할 위험이 있다. 이로 인해 배관이 파열되거나 손상될 가능성이 있다. 현재 화재/가스 감지기와 소화 시스템이 설치되어 있으나 HAZOP 분석을 통한 추가적인 위험도 저감 방법으로 고온 절연 및 보호 시스템(방화 단열재 사용)을 강화하고 온도 제어 시스템을 갖추기 위해 고압 물 분무 등으로 화재

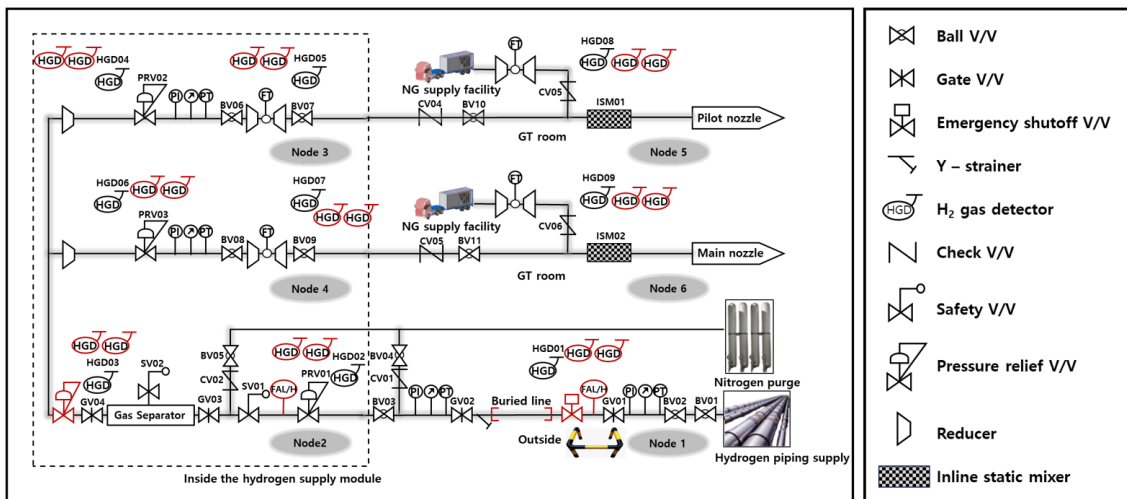


Fig. 6. Piping and instrumentation diagram of hydrogen supply system for a gas turbine CCGP including HAZOP analysis results

발생 시 주변 온도를 낮추고 지능형 제어 기능이 적용된 환기 시스템의 설치가 추천된다.

마지막으로 전체적인 시스템에 대해 개선 권고 사항을 제시하면 다음과 같다. 가스 감지기가 각 영역에 1개 설치되어 있기에 가스 감지기 고장 시 수소가 누출되지 않은 상태에서 누출된 것으로 오인되어 ESV 등이 닫힐 경우 복합 화력발전소가 정지(shut down)될 수 있다. 반대로 가스 감지기가 누출된 수소를 감지하지 못할 경우에는 대형 폭발, 화재 사고가 발생할 수 있다. 따라서 안전성 확보를 위해 각 영역에 가스 감지기를 3개씩 설치하고 3개 중에 2개 이상이 설정값을 나타낼 때 ESV를 작동하도록 시스템을 개선하는 것이 추천된다.

또한 누출된 수소 농도가 설정값 미만이라도 관리자가 수동으로 외부에서 수소 누출을 차단할 수 있도록 ESV를 원격으로 조작할 수 있는 조작 스위치를 설치하는 것이 추천된다.

환기 설비는 상시 작동하도록 설정하는 것이 바람직하나 상시 작동되지 않을 경우는 가스 감지기가 특정 값(ESV의 설정값보다 작은 값)을 나타낼 때 환기 설비가 작동하도록 한다.

상기와 같이 HAZOP 위험성 평가를 실시하고 도출된 개선 권고 사항에 대해 Fig. 6에 도시함으로써 Fig. 5 대비 추가된 사항을 종합적으로 확인할 수 있도록 하였다.

5. 결론

A 복합 화력발전소에 수소를 혼소시킬 때 화재, 폭발 등의 큰 위험성을 가지고 있으므로 적절한 위험성 평가 및 관리가 필수적이다. HAZOP 수행 단계에서 우선 빈도와 강도로 위험 등급을 5단계로 구분하여 위험성 매트릭스를 결정하였다. A 복합 화력발전소의 P&ID를 바탕으로 6개의 검토 구간을 나누고 HAZOP을 수행하여 위험 요소를 유량 증가, 안전, 압력 증가, 압력 감소, 온도 증가로 구분하였다. 주요 위험 요소를 규명하고 위험 요소를 완화하거나 제거하여 안전도를 향상할 수 있도록 개선된 안전 조치

사항을 요약하면 아래와 같다.

1) Node 1에서 수동식 밸브만 설치한 곳은 자동식 밸브와 ESV를 설치하고 FAL, FAH 기기를 설치한다.

2) Node 1에서 외부에 있는 배관은 충돌 방지대와 화염 방지기를 설치하거나 배관을 옥내화 혹은 이중화시킨다.

3) Node 3과 Node 4에서 배관 부식을 예방하기 위해 전기 방식이나 전기 도금을 하여 부식에 대한 저항성을 높이고 수명이 지난 배관은 부식 여부와 상관없이 교체한다.

4) 가스 감지기가 설치되어 있는 각 영역에 2개 이상의 가스 감지기를 설치하여 1개 감지기의 고장 시에도 가스 누출을 감지할 수 있도록 하고 다중의 감지를 통해 오작동을 검증토록 한다.

5) 환기 설비는 항상 작동하게 설정하거나 가스 감지기가 설정값보다 초과하는 값을 나타낼 때 작동하도록 한다.

6) 수소의 낮은 점화에너지를 고려하여 고온에 의한 점화를 방지하기 위해 열 차단을 철저히 한다. 특히 복합 화력발전소와 같이 고온 열원이 존재하는 장소에서의 수소 배관은 주기적인 온도 모니터링 혹은 상시 모니터링 시스템을 구축할 필요가 있다. 또한 발전소 내 수소연료 사용 시 KGS GC101³⁴⁾ “가스 시설의 폭발위험장소 종류 구분 및 범위 산정에 관한 기준” 및 KGS GC102³⁵⁾ “방폭전기기의 설계, 선정 및 설치에 관한 기준”에 따라 방폭 지역 및 방폭 등급을 선정할 수 있는데 수소의 경우 설비 등급은 IIC, 온도 등급은 T1에 해당하지만 발전소 내 고온부가 많은 것을 고려할 때 방폭 전기 설비는 IIC T6 수준의 높은 온도 등급을 적용하는 것이 추천된다³⁶⁾.

본 HAZOP 위험성 평가를 통해 종합적으로는 노드별 위험도를 순서대로 각각 3.5점에서 1점, 5점에서 1점, 4점에서 2점, 4점에서 2점, 5점에서 2점, 5점에서 2점으로 저감할 수 있었고 평균적으로는 4.42점에서 1.67점으로 저감되었다. 한편 이러한 개선된 안전 조치 사항은 설비의 개선과 장치의 추가 설치 등 예산이 수반되는 항목들이 있기 때문에 안전 관리를 위한 예산의 확보가 필요하다. 그러나 수소에너지 경

제 사회로 전환되는 시기에 사고의 발생을 최소화하여 안전성을 확보하고 인근 주민의 수용성을 강화할 필요가 있기에 적극적인 안전 예산의 투자와 안전 활동의 강화가 반드시 필요하다고 할 수 있다.

후 기

이 논문은 2023년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(연구번호: 00236869, 300MW급[H급] 가스터빈 50% 수소혼소 변환 기술개발 및 실증). 이 연구는 한국전력공사의 2022년 착수 기초연구개발 과제 연구비에 의해 지원되었음(과제번호: R22XO02-06).

References

1. International Energy Agency (IEA), "World Energy Outlook 2023", IEA, 2023. Retrieved from <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>.
2. J. Y. Lee, J. Lee, and H. Song, "A study on the analysis of risk factors for hydrogen fuel stations based on quantitative risk assessment", *Journal of the Korean Institute of Gas*, Vol. 24, No. 6, 2020, pp. 70-76, doi: <https://doi.org/10.7842/kigas.2020.24.6.70>.
3. H. R. Gye and C. J. Lee, "Fire risk assessment on urban hydrogen refueling station using probit model", *Korean Journal of Hazardous Materials*, Vol. 7, No. 1, 2019, pp. 19-26, doi: <https://doi.org/10.31333/kihm.2019.7.1.19>.
4. S. Lee, Y. W. Chon, I. M. Lee, and Y. W. Hwang, "A study on the evaluations of damage impact due to VCE in liquid hydrogen charging station", *Journal of the Korean Institute of Gas*, Vol. 21, No. 5, 2017, pp. 56-63, doi: <https://doi.org/10.7842/kigas.2017.21.5.56>.
5. Ministry of Science and ICT (MSIT), "Press release on cultural events for October 2024", MIST, 2024. Retrieved from <https://www.korea.kr/briefing/pressReleaseView.do?newsId=156313631>.
6. Ministry of Trade, Industry and Energy (MOTIE), "Hydrogen safety management comprehensive plan", MOTIE, 2019. Retrieved from <https://www.korea.kr/archive/expDocView.do?docId=39153>.
7. J. H. Park, "The research on improvement of hydrogen fueling protocol by HAZOP & LOPA [Master's thesis]", Seoul: Soongsil University, 2021.
8. H. Park and M. Lee, "Consequence analysis on the leakage accident of hydrogen fuel in a combined cycle power plant: based on the effect of regional environmental features", *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 34, No. 6, 2023, pp. 698-711, doi: <https://doi.org/10.7316/JHNE.2023.34.6.698>.
9. D. J. Jang, S. Y. Kim, and M. C. Lee, "Property based quantitative risk assessment of hydrogen compared with methane, ethane, propane and butane", *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers - B*, Vol. 46, No. 2, 2022, pp. 103-114, doi: <https://doi.org/10.3795/KSME-B.2022.46.2.103>.
10. I. Mohammadfam and E. Zarei, "Safety risk modeling and major accidents analysis of hydrogen and natural gas releases: a comprehensive risk analysis framework", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 40, No. 39, 2015, pp. 13653-13663, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.07.117>.
11. R. C. West, M. J. Astle, and W. H. Beyer, "CRC handbook of chemistry and physics", 64th ed, CRC Press, USA, 1983.
12. D. Y. Pyo, Y. H. Kim, and O. T. Lim, "A study on safety assessment of hydrogen station", *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 30, No. 6, 2019, pp. 499-504, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2019.30.6.499>.
13. M. J. Jeon, D. J. Jang, and M. C. Lee, "A study on the risk assessment and improvement methods based on hydrogen explosion accidents of a power plant and water electrolysis system", *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 35, No. 1, 2024, pp. 66-74, doi: <https://doi.org/10.7316/JHNE.2024.35.1.66>.
14. Korea Gas Safety Corporation, "2023 gas accident annual report", KGS, 2024. Retrieved from <https://www.kgs.or.kr/kgs/abca/board.do>.
15. D. K. Pritchard, M. Royle, and D. Willoughby, "Installation permitting guidance for hydrogen and fuel cell stationary applications: UK version", Health and Safety Executive, 2009. Retrieved from <https://firealarmengineers.com/forum/attachment.php?aid=476>.
16. J. L. Alcock, L. C. Shirvill, and R. F. Cracknell, "Compilation of existing safety data on hydrogen and comparative fuels", European Integrated Hydrogen Project, 2001. Retrieved from http://www.eihp.org/public/documents/CompilationExistingSafetyData_on_H2_and_ComparativeFuels_S_.pdf.
17. Y. G. Jo and S. H. Han, "Study on risk assessment method of hydrogen station using FAHP-HAZOP", *Journal of the Korean Institute of Gas*, Vol. 27, No. 4, 2023, pp. 92-101, doi: <https://doi.org/10.7842/kigas.2023.27.4.92>.
18. B. K. Kim, T. Y. Ha, and H. J. Cho, "A study on the effect of new technology for gas safety management", *Journal of the Korean Institute of Gas*, Vol. 14, No. 5, 2010, pp. 26-31. Retrieved from <https://koreascience.kr/article/JAKO201015441599457.page>.
19. Y. S. Lee, "Analysis of fire accident outcomes - focusing on the impact assessment of hazardous material fire accidents", *Fire Protection Technology*, Vol. 22, 1997, pp. 17-23. Retrieved

- from <https://koreascience.kr/article/JAKO199742871532924.page>.
20. D. H. Lee, G. W. Bae, S. Y. Nam, K. D. Nam, and J. Y. Lee, "A process hazard analysis using HAZOP", Proceedings of the Safety Management and Science Conference, Vol. 2000, No. 5a, 2000, pp. 193-200. Retrieved from <https://koreascience.kr/article/CFKO200011921437753.page>.
 21. Korea Intechology handbook", Korea Industrial Safety Corporation, Industrial Safety Corporation, "Industrial safety 1998. Retrieved from <https://dl.nanet.go.kr/SearchDetailView.do?cn=MONO1199814115#none>.
 22. J. M. Lee, B. K. Hoe, and K. S. Hwang, "Object-oriented modelling for automated HAZOP analysis", Journal of the Korean Society of Safety, Vol. 13, No. 1, 1998, pp. 77-84. Retrieved from <https://koreascience.kr/article/JAKO199811922392156.page>.
 23. A. Bahrami, H. Akbari, A. Nezam abadi, and A. A. Khajevandi, "Risk assessment and modeling of chlorine leakage consequences using fuzzy HAZOP technique and PHAST software", International Archives of Health Sciences, Vol. 10, No. 4, 2023, pp. 150-155, doi: <https://doi.org/10.48307/iahsj.2023.183010>.
 24. H. J. Yun, C. H. Yu, and H. J. Lee, "A study on the establishment and the management of safety training environment on based virtual reality", 2016 Korean Institute of Gas Annual Spring Conference, 2016, pp. 156. Retrieved from <https://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE06740127>.
 25. K. M. Park, "A study on qualitative risk assessment for radical and condensation reaction of batch process [Doctoral dissertation]", Daegu: Keimyung University, 2019.
 26. D. H. Seo, T. H. Kim, K. W. Rhie, and Y. E. Choi, "A study on FTA of off-site packaged hydrogen station", Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 31, No. 1, 2020, pp. 73-81, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2020.31.1.73>.
 27. Korea Industrial Safety Corporation, "Casebook of Major Industrial Accidents", Korea Industrial Safety Corporation, 2004. Retrieved from <https://www.kosha.or.kr/kosha/data/seriousAccident.do?mode=view&boardNo=239&articleNo=274081&attachNo=>.
 28. J. Park, D. Park, C. Chae, J. Heo, and K. Park, "Improvement of hydrogen fueling protocol by HAZOP and LOPA", Korean Journal of Hazardous Materials, Vol. 10, No. 1, pp. 82-90, doi: <https://doi.org/10.31333/kihm.2022.10.1.82>.
 29. J. M. Lee, B. K. Hou, K. S. Hwang, and E. S. Yoon, "Expert system using qualitative propagation for HAZOP analysis", The Korean Institute of Gas Annual Conference, 1997, pp. 138-141. Retrieved from <https://koreascience.kr/article/CFKO199702612971887.page>.
 30. B. Lee, J. Park, H. Lee, M. Byun, C. W. Yoon, and H. Lim, "Assessment of the economic potential: CO_x-free hydrogen production from renewables via ammonia decomposition for small-sized H₂ refueling stations", Vol. 113, 2019, pp. 109262, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109262>.
 31. S. H. Yu, "Hazard Analysis on package type hydrogen station [Master's thesis]", Asan: Hoseo University, 2017.
 32. J. H. Park, "A study on the risk assessment on acrylic pressure sensitive adhesive manufacturing process - focused on operating process - [Master's thesis]", Incheon: Inha University, 2020.
 33. H. Noh, S. H. Park, S. G. Cho, K. Kang, and H. Kim, "A case study on the risk assessment for offshore plant solid desiccant dehydration package by using HAZOP", Journal of the Korean Society of Industry Convergence, Vol. 23, No. 4_2, 2020, pp. 569-581, doi: <https://doi.org/10.21289/KSIC.2020.23.4.569>.
 34. Korea Gas Safety Corporation (KGS), "Classification code for explosive hazardous area on gas facility", KGS, 2022. Retrieved from https://cyber.kgs.or.kr/kgscode.codeSearch.view.ex.do?onEngYn=F&pbclRlmCd=&pbclMdcCd=&pbclCd=GC101_220830&stDayY=2008&stDayM=01&etDayY=2024&etDayM=10.
 35. Korea Gas Safety Corporation (KGS), "Design, selection and installation code for explosion proof electrical equipment", KGS, 2018. Retrieved from https://cyber.kgs.or.kr/kgscode.codeSearch.view.ex.do?onEngYn=F&pbclRlmCd=&pbclMdcCd=&pbclCd=GC102_220830&stDayY=2008&stDayM=01&etDayY=2024&etDayM=10.
 36. J. H. Kim, M. K. Lee, S. H. Kil, Y. G. Kim, and Y. K. Ko, "Area classification of hazardous gas facility according to KGS GC101 code", Journal of the Korean Institute of Gas, Vol. 23, No. 4, 2019, pp. 46-64, doi: <https://doi.org/10.7842/kgas.2019.23.4.46>.