

튜브 트레일러를 이용한 복합화력발전소 수소연료 공급 방식에 대한 사고영향분석 기반 위험 감쇄 전략

김다희¹ · 이민철^{2†}

¹인천대학교 공학대학원 안전환경시스템공학과, ²인천대학교 안전공학과

Risk Mitigation Strategy Based on Consequence Analysis for the Hydrogen Fuel Supply Method Using Tube Trailers for Combined Cycle Power Generation

DA HEE KIM¹, MIN CHUL LEE^{2†}

¹Department of Safety and Environmental System Engineering, Incheon National University Graduate School of Engineering, 119 Academy-ro, Yeonsu-gu, Incheon 22012, Korea

²Department of Safety Engineering, Incheon National University, 119 Academy-ro, Yeonsu-gu, Incheon 22012, Korea

†Corresponding author :
LMC@inu.ac.kr

Received 8 May, 2025
Revised 27 May, 2025
Accepted 10 June, 2025

Abstract >> This study aims to reduce the quantitative damage scope by minimizing the amount of hydrogen leakage in the event of an accident by adding physical protection layer (safety separation distance) and functional protection layer (quick couplers, gas leak detection and shutdown system) to the tube-trailer supply system of a hydrogen combined cycle power plant. Areal Location of Hazardous Atmospheres (ALOHA) and Process Hazard Analysis Software Tool (PHASt) software were used to analyze the impact range of the accident, and the addition of physical and functional safety barriers in the design reduced the overall risk by 91% and 89% in ALOHA and PHAST software, respectively.

Key words : Hydrogen(수소), Tube trailer supply(튜브 트레일러 공급), Hydrogen supply(수소 공급), Safety strategy(안전 전략), Consequence analysis(영향분석)

1. 서 론

전 세계가 지구 온난화 문제를 해결하기 위하여 화석 연료로부터 멀어지는 전환을 개시하면서¹⁻³⁾ 친환경 에너지 연료인 수소 에너지 기반의 수소 경제가 주목을 받고 있다. 유럽과 북미 국가, 일본 등에서는 수소 기반의 인프라 구축 및 수소 활용 확산을 위

한 노력으로 수소의 생산과 더불어 수요와 공급 간의 연결 체계, 운송에 필요한 다양한 기술과 제도를 만들어 가고 있다^{4,5)}. 국내에서도 정부의 주도하에 2019년 「수소 경제 활성화 로드맵」을 수립하고⁶⁾ 「수소 경제 육성과 수소 안전관리에 관한 법률」⁷⁾, 「수소 도시 건설 및 운영에 관한 법률」⁸⁾ 등 제도적 장치를 마련하고 있다.

Mckinsey & Company의 전 세계 수소 활용 산업(수소차, 연료전지 발전) 경쟁력 분석 결과를 보면 우리나라는 일본과 더불어 최고 수준의 경쟁력을 확보하고 있으나 수소 운송 및 대규모 저장과 관련된 산업 여건은 매우 취약한 실정이다⁹⁾. 그러나 지속 가능한 수소 경제 사회의 실현을 위해서는 수소의 생산, 공급, 활용의 밸류 체인(value chain) 연결이 무엇보다 중요하다¹⁰⁾. 특히 밸류 체인의 중간 단계인 수요처로의 공급은 수소 사용 시설의 안정적인 운영을 위한 핵심이기 때문에 효율적이고 안전한 수소 운송 및 저장 체계에 대한 연구가 필요하다.

국내 수소 운송 수단은 튜브 트레일러와 파이프라인으로 분류된다. 파이프라인을 통한 수소의 공급은 대용량 운송이 가능하며 저렴하여 효율적이지만 초기 건설 비용이 비싸 적절한 수요가 발생하여야 한다¹¹⁾. 반면 튜브 트레일러는 고압의 수소 기체를 압력 용기에 저장해 운전자가 직접 운송하는 방식으로 현재 국내에서 가장 보편화된 운송 수단이다¹²⁾. 튜브 트레일러의 일반적인 제원은 Table 1과 같으며 1회 운송량이 최대 340 kg에 불과하다는 단점이 존재한다¹³⁾. 따라서 대용량 수소 수요처의 경우 튜브 트레일러 수소 공급 시 안정적인 공급을 위하여 다수의 튜브 트레일러를 활용하게 된다.

현재 국내에서는 수소 50% 혼소 가스터빈의 실증 과제가 2023년 4월 착수되어 300 MW급 1기(울산 복합), 150 MW급 2기(신인천복합, 서인천복합)가 2028년까지 상업 운전을 목표로 진행 중이다¹⁴⁾. 국내에서 수행 중인 수소터빈의 실증 프로젝트의 목표를 성공적으로 달성하기 위해서는 수소의 안정적인 공급이 필수적이나 튜브 트레일러의 사용 기수가 많아지면 많아질수록 사고 발생의 빈도와 강도가 함께

증가하여 전반적인 위험도가 상승하게 될 것이다. 게다가 튜브 트레일러 공급의 경우 대규모 위험물을 항시 저장함에 따라 잠재적 위험도가 커질 수 있어 안전 관리에 더욱 유의하여야 한다. 또한 신연료 사용에 있어 안전 문제는 대중의 수용성을 저해하는 요인으로 실증 후 상용화 단계에 있어 걸림돌로 작용할 수 있다^{15,16)}.

따라서 본 연구에서는 향후 수소터빈 상용화를 위한 근본 인프라 구축의 일환으로 복합화력발전소 튜브 트레일러 수소 공급 체계의 위험 요인을 선정하고 이에 대한 안전성 제고 방안을 검증하고자 하였다. 사고영향분석(consequence analysis, CA)을 통하여 사고 시뮬레이션을 모사하고 설계안에 안전 대책을 반영하여 다시 시뮬레이션함으로써 사고의 피해 영향 범위를 정량적으로 축소하고자 하였다.

2. 연구 방법

2.1. 복합화력발전소 튜브 트레일러 수소 공급 체계

수소 복합화력발전소의 실증 단계에서는 대용량의 수소가 요구된다. 배관으로 수소를 공급하는 동시에 옥외에 수소 튜브 트레일러를 두어 비상시 언제든지 안정적으로 수소를 공급할 수 있다. 본 연구는 현재 튜브 트레일러로 수소를 공급하고 있는 국내 A 연구원을 대상으로 수행되었다. A 연구원은 항시 정차되어 있는 1개의 튜브 트레일러를 통해 수소를 공급하며 실제 취급되는 튜브 트레일러의 사양은 Table 1과 같다. 튜브 트레일러 1기는 총 9개의 실린더로 구성되어 있으며 1기당 실수소 저장량은 약 300 kg 정도이다. 단 수소 복합화력발전소의 실증 사업을 고려한다면 A 연구원보다 많은 질량의 수소 운송이 필요함에 따라 튜브 트레일러 10기를 한 번에 운송하여 저장하는 것을 가정하였다¹⁷⁾. 즉 본 연구에서는 A 연구원의 수소 튜브 트레일러 사양을 기준으로 튜브 트레일러 총 10기에 대한 사고 시나리오를 구축하고 위험 감쇄 방안을 도출하였다.

Table 1. Hydrogen tube trailer spec

Vehicle type	Tube trailer
The amount of hydrogen	340 kg
Pressure	200 bar
Cylinders type	Seamless cylinders
Volume	22.870 m ³

2.2. CA 위험성 평가

CA 위험성 평가 연구 수행 과정은 Fig. 1과 같다. 수소 공급 시스템의 위험 요인 식별, 사고 시나리오 설정, CA 위험성 평가 수행, 결과 도출 및 분석의 순서로 진행되었다. 먼저 수소는 공기(4-75 vol%)¹⁸⁾, 산소(4-95 vol%)¹⁹⁾에 비해 넓은 가연 범위, 낮은 점화 에너지(0.02 mJ)로²⁰⁾ 누출 시 점화와 폭발 위험이 높다²¹⁻²³⁾. 또한 가스터빈의 주 연료인 liquefied natural gas (LNG)와 비교하였을 때 수소의 확산 속도는 메탄 누출보다 약 1.3-2.8배 빠르고²⁴⁾ 수소의 최소 점화 에너지는 메탄에 비해 5배나 낮으며²⁵⁾ 연소 속도는 7.8배 빠르다²⁶⁾. 뿐만 아니라 수소는 무색의 불꽃으로 연소하므로 감지하기 어려우며 대부분의 일반적인 가스와 달리 고압 원천에서 누출될 때 스스로 가열된다²⁷⁾. 따라서 수소 가스 누출은 육안으로 감지하기 어려우며 누출 시 화재나 폭발 등 대형 사고로 이어질 수 있다.

이에 강도의 측면에서 사고 발생 시 영향 범위가 넓을 것으로 예상되는 최악의 사고 시나리오를 설정하고 최악의 사고 시나리오의 피해 영향 범위를 최소화하기 위한 방호 조치를 추가하여 2가지 대안의

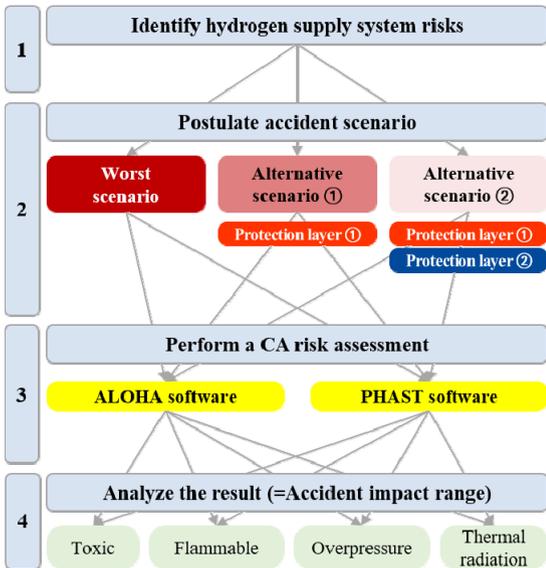


Fig. 1. The process of consequence analysis

사고 시나리오를 구축하였다. 대안의 시나리오 ①은 1개의 방호 조치(Protection layer ①)를 추가하였으며 대안의 시나리오 ②는 2개의 방호 조치(Protection layer ① and Protection layer ②)를 추가하였다.

다음으로 CA는 Areal Location of Hazardous Atmospheres (ALOHA)와 Process Hazard Analysis Tool (PHAST)의 2가지 소프트웨어를 구동하여 수행하였다. ALOHA와 PHAST는 유해 화학 물질의 누출 사고 발생에 따른 대기 확산 시뮬레이션 프로그램으로 바람, 온도, 습도 등의 환경 요소와 화학 물질이 사용되는 설비 요소를 반영하여 누출 시 가스의 확산에 대해 예측하고 화재 및 폭발에 따른 영향 분석이 가능하다. ALOHA는 미국의 환경보호청(Environmental Protection Agency, EPA)과 해양대기국(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)에서 개발한 프로그램이며 PHAST는 노르웨이 오슬로에 본사를 둔 DNV GL에서 개발하여 현재 전 세계적으로 가장 널리 보급되어 사용되고 있는 유료 상용 프로그램이다²⁸⁾.

마지막으로 ALOHA와 PHAST 소프트웨어 구동을 통하여 각 사고 시나리오별 독성(toxic), 인화성(flammable), 과압(overpressure), 복사열(thermal radiation)의 총 4가지 위험 요소에 대한 피해 영향 범위를 산출하였다. 이를 통해 안전 방호 조치의 효과를 정량적으로 검증할 뿐만 아니라 소프트웨어 간의 교차 분석 결과를 바탕으로 추가적인 안전 시사점을 도출하고자 하였다.

2.3. CA 결과 해석 기준

가스 누출로 인한 화재 및 폭발 사고 발생 시 독성, 인화성, 과압, 복사열의 피해 우려 수준(level of concern, LOC)은 물질의 농도 및 사고 강도에 따라 상이하다. LOC는 독성, 인화성, 과압, 복사열이 사람과 시설물에 어느 정도 영향을 미치는지, 이 영향 범위가 어디까지 허용되는지를 고려하며 이에 대한 판단 기준은 이는 Table 2와 같다. Korea Occupational Safety & Health Agency (KOSHA) Guide ‘최악 및

대안의 사고 시나리오 선정에 관한 기술지침(P-107-2020)²⁹⁾, KOSHA Guide ‘화학공장의 피해 최소화 대책 수립에 관한 기술지침(P-110-2023)³⁰⁾, KOSHA Guide ‘사고 피해 예측 기법에 관한 기술지침(P-102-2021)³¹⁾, 미국 에너지부(Department of Energy, DOE)의 ‘Protective Action Criteria (PAC) Rev. 29a: Technical Document³²⁾’에 근거하여 설정하였다.

수소는 가연성 가스이자 무독성 가스로 독성과는 무관하나 질식으로 인한 피해가 존재하여³³⁾ 독성 관련 수소에 대한 끝점 농도를 제공하는 PAC 기준을 적용하였다. 농도 기준은 PAC-3 (400,000 ppm) > PAC-2 (230,000 ppm) > PAC-1 (65,000 ppm)이며 독성의 허용 범위 판단 기준은 1시간 노출 시 근로자에게 영향을 미치는 PAC-2의 농도이다.

인화성의 피해 영향 범위는 폭발 하한계(lower explosion limit, LEL)와 폭발 상한계(upper explosion limit, UEL)의 농도로 분석한다. 또한 KOSHA Guide ‘인화성 가스 검지 및 경보장치 등의 설치 및 유지보수에 관한 기술지침(P135-2018)^{34,35)}’ 및 한국가스안전공사(Korea Gas Safety Corporation, KGS) FU551 ‘도시가스 사용시설의 시설·기술·검사 기준^{36,37)}’에서 제공하는 가스 감지기의 1차 경보 알람 기준이 LEL 25%임에 해당 농도에 도달되는 거리를 참고로

추가 산출하였다. 인화성의 허용 범위 판단 기준은 LEL이다.

과압과 복사열의 피해 영향 범위 기준은 각각 70 kPa > 21 kPa > 7 kPa, 37.5 kW/m² > 12.5 kW/m² > 4 kW/m²의 강도 순이며 위험 판단 기준은 각각 7 kPa 과 4 kW/m²이다.

3. 연구 내용

3.1. 최악 및 대안의 사고 시나리오 선정

최악의 사고 시나리오와 대안의 사고 시나리오를 구축하여 Fig. 2와 같이 도시하였다. 먼저 최악의 사고 시나리오는 catastrophic rupture에 따른 수소 튜브 트레일러 10기의 수소 전량 누출 사고를 가정하였다 (누출량, 3,000 kg; 300 kg × 10 ea). 정량적 위험성 평가에서 위험(risk)은 발생빈도(frequency)와 사고로 인한 피해 영향(consequency)의 곱으로 정의된다³⁸⁾. Sandia 국립 연구소에서 제시한 튜브 트레일러의 누출 시나리오에 따른 누출공의 크기 및 누출 빈도 데이터는 Table 3과 같다³⁹⁾. 누출 시나리오는 small leak, medium leak, large leak, catastrophic rupture로 총 4가지이다. 이들 중 누출 빈도는 가장 낮으나 강도의 측면에서 사고 발생 시 피해의 영향 범위가 가장 넓게 예상되는 것이 catastrophic rupture이므로 이를 최악의 시나리오로 가정하였다.

다음으로 대안의 시나리오 ①은 수소 튜브 트레일러 1기의 수소 전량 누출 사고이다 (누출량, 300 kg; 300 kg × 1 ea). 최악의 시나리오에서 수소의 누출량을 줄이기 위하여 대안의 사고 시나리오 ①에서는 수소 튜브 트레일러 간 안전 이격 거리를 protection layer ①으로 추가하였다. 수소 튜브 트레일러 1기에서 수소가 누출됐을 때 화재 또는 폭발이 발생할 수 있고 줄지어 정차된 다른 튜브 트레일러로 사고가 연쇄적으로 확산될 경우 총 10기의 튜브 트레일러에서 수소가 전량 누출될 가능성이 있다. 따라서 연쇄적인 사고의 확산을 방지하기 위하여 튜브 트레일러 간 이격 거리를 산정하고 대안의 시나리오 ①에 이

Table 2. The criteria of concern level given KOSHA guide

Risk Factor	Level of concern (LOC)		
	LOC-1	LOC-2	LOC-3
Toxic	LOC-1	PAC-1 (=65,000 ppm)	
	LOC-2	PAC-2 (=230,000 ppm)	O
	LOC-3	PAC-3 (=400,000 ppm)	
Flammable	LOC-1	LEL 25% (=10,000 ppm)	
	LOC-2	LEL 100% (=40,000 ppm)	O
	LOC-3	UEL (=750,000 ppm)	
Overpressure	LOC-1	7 kPa	O
	LOC-2	21 kPa	
	LOC-3	70 kPa	
Thermal radiation	LOC-1	4 kW/m ²	O
	LOC-2	12.5 kW/m ²	
	LOC-3	37.5 kW/m ²	

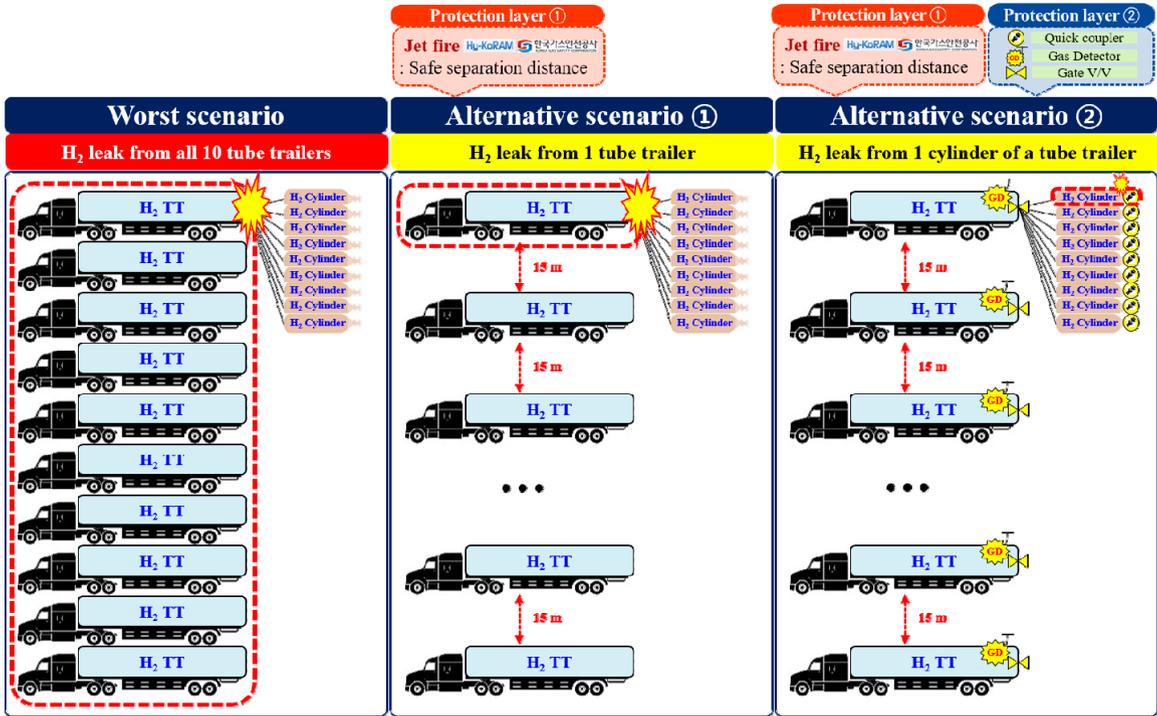


Fig. 2. The worst scenario and alternative scenarios in a hydrogen supply system using tube trailers

Table 3. Leak scenarios and frequencies of the hydrogen use facilities

Fuel	Components	Inventory			Scenario	Leak size (mm)	Leak frequency (/year)
		Pressure	Temperature	Mass, volume			
Hydrogen	Tube trailer	20 MPa	40 °C	340 kg	Small leak	0.40	1.07E-03
					Medium leak	4.02	3.21E-04
					Large leak	12.70	1.80E-04
					Catastrophic rupture	-	5.00E-07

를 위험 저감 전략으로써 반영하였다.

Hydrogen Korean Risk Assessment Module (Hy-KoRAM)을 활용하여 튜브 트레일러 간 이격 거리를 산출하였다. Hy-KoRAM은 KGS에서 제작하여 현재 수소충전소 위험성 평가에 활용되고 있는 위험성 평가 tool이다^{40,41}. 수소 온도, 압력 및 누출 크기에 따른 제트 화염의 길이 및 열 유속에 대한 데이터를 제공한다⁴². Table 3에 따라 수소의 온도는 40°C, 압력은 200 bar로 설정하였으며 누출공의 크기는 small leak의 발생 빈도가 가장 높아 small leak (0.40 mm)으로 가정하였다. 구동 결과는 Table 4에 도시하였으며

jet fire의 화염 길이는 10 m, 복사열의 피해 영향 범위는 4 kW/m² (12 m) > 12.5 kW/m² (10 m) > 37.5 kW/m² (9 m) 순으로 나타났다. 따라서 복사열의 피해 영향 범위에 근거하여 대안의 시나리오 ①의 protection layer ①로 설정한 튜브 트레일러 이격 거리는 안전의 보수성을 근거로 15 m로 반영하였다.

마지막으로 대안의 사고 시나리오 ②는 수소 튜브 트레일러 실린더 1개의 수소 전량 누출 사고이다 (누출량, 34 kg; 300 kg/9 ea). 대안의 사고 시나리오 ①에 퀵 커플러(quick coupler)와 수소 누출 감지 및 게이트 밸브(gate valve) 차단 시스템을 protection layer

Table 4. Jet flame and heat flux from small leak size

Risk factor and criteria of analysis	Accident impact range
Thermal radiation	
4 kW/m ²	12 m
12.5 kW/m ²	10 m
37.5 kW/m ²	9 m

②로 추가하였다. 실린더 9개로 구성된 튜브 트레일러 1기에 저장되는 수소의 총량은 300 kg이다. 즉 실린더 1개당 저장된 수소의 양은 34 kg이다. 9개의 실린더를 각각 독립적으로 관리할 수 있다면 사고가 발생하였을 때 수소의 누출량을 최소화하여 기존의 위험도를 감소시킬 수 있을 것으로 사료된다. 킥 커플러를 설치하면 실린더별 개별적인 수소 공급 및 차단이 가능해짐에 따라 수소 누출 감지 시 해당 실린더만 차단하여 나머지 실린더를 정상 운영함으로써 전체 시스템을 보호하고 누출량을 최소화할 수 있다.

다만 대안의 사고 시나리오 ②에 추가한 게이트 밸브는 수동 조작 장치임에 따라 시스템 차단을 위해서는 인적 자원이 투입되어야 한다. 실제 사고가 발생하였을 때 설비 내 수동 장치는 오히려 인명 피해로 이어질 가능성이 있다. 따라서 향후 위급 시 자동으로 차단할 수 있는 자동화 시스템이 구축되어야 할 것이다. 실시간 수소 누출 및 압력과 온도 감지 모니터링뿐만 아니라 이를 자동으로 차단할 수 있는 기술 개발이 필요하다.

3.2. 시나리오별 CA 구동 조건

ALOHA와 PHAST 소프트웨어를 활용하여 시나리오를 시뮬레이션하기 위해서는 시나리오별 세부 기후 조건과 설비 조건에 대한 정보가 필요하다. 먼저 기후 조건은 KOSHA Guide (P-107-2020)의 최악의 사고 시나리오 조건을 바탕으로 Table 5와 같이 입력하였다. 풍속은 1.5 m/s이며 대기 안정도는 F, 대기 온도는 40°C, 습도는 50%이다.

설비 조건은 Table 6과 같다. 튜브 트레일러의 사양 및 조건은 Table 1 및 Table 2와 같으며 ALOHA와 PHAST 모두 KOSHA Guide (P-107-2020) 최악의 사고 시나리오 구동 조건인 10분을 준수하였다. 최악의 시나리오, 대안의 시나리오 ①, 대안의 시나리오 ②, 다음의 3가지 시나리오의 차이는 누출량이다. 최악의 사고 시나리오는 catastrophic rupture 및 연쇄적 사고 확산에 따른 수소 튜브 트레일러 10기의 전량 누출로 누출량이 3,000 kg이다. 대안의 시나리오 ①은 수소 튜브 트레일러 간 안전 이격 거리를 protection layer ①으로 추가함에 따라 수소 튜브 트레

Table 5. Atmospheric condition for CA simulation

Input date categories	Criteria for worst scenario
Wind speed	1.5 m/s
Stability class	F
Air temperature	40°C
Humidity	50%

Table 6. Source condition for CA simulation

Category	Worst scenario	Alternative scenario ①	Alternative scenario ②
Source	Tube trailer		
Pressure	200 bar		
Temperature	40°C		
Peak flow rate	300 kg/m	30 kg/m	3.4 kg/m
Release duration	ALOHA	600 s	
	PHAST	Flammable averaging time, 18.75 s Toxic averaging time, 600 s	
Total amount released	3,000 kg	300 kg	34 kg

일러 1기에서만 수소가 누출되어 누출량은 300 kg가 된다. 마지막으로 대안의 사고 시나리오 ②는 대안의 시나리오 ①에 킥 커플러와 수소 누출 감지 및 차단 시스템을 protection layer ②로 추가함으로써 수소 튜브 트레일러 1기의 9개 실린더를 독립적으로 관리하고 누출 발생 시 이를 감지하고 차단할 수 있게 됨으로써 누출량은 실린더 1개 저장량인 34 kg이 된다.

본 연구는 최악의 시나리오에 안전 조치를 적용하여 수소 누출량을 최소화하고 누출량의 감소에 따라 피해 영향 범위가 어느 정도 축소되는지 정량적인 결과를 확인하였다. 따라서 3가지 시나리오에서 대안의 시나리오에 추가된 protection layer 조건 외에는 기후 및 설비 조건의 모든 독립변수를 통일하였다.

3.3. ALOHA 소프트웨어 시뮬레이션 결과

ALOHA 소프트웨어의 시나리오별 시뮬레이션 상세 결과는 Fig. 3과 Table 7에 도시하였다. 10분 전량 누출을 기준으로 프로그램을 구동하기 위하여 direct source를 선택하였으며 복사열을 제외한 독성, 인화성, 과압의 피해 영향 범위를 산출할 수 있었다.

먼저 최악의 시나리오에 대한 소프트웨어 구동 결과 독성의 영향 범위는 PAC-1 (65,000 ppm), PAC-2 (230,000 ppm), PAC-3 (400,000 ppm) 농도에서 각각

431 m, 216 m, 131 m가 도출되었고 인화성의 경우 25% LEL (10,000 ppm), LEL (40,000 ppm), UEL (750,000 ppm) 기준에서 각각 1,500 m, 810 m, 165 m, 과압의 경우 7 kPa, 21 kPa 기준에서 133 m와 44 m의 피해 영향 범위가 도출되었다.

다음으로 대안의 시나리오 ①의 시뮬레이션 결과 독성의 영향 범위는 PAC-1 (65,000 ppm), PAC-2 (230,000 ppm), PAC-3 (400,000 ppm) 농도에서 각각 125 m, 65 m, 49 m가 도출되었고 인화성의 경우 25% LEL (10,000 ppm), LEL (40,000 ppm), UEL (750,000 ppm)을 기준으로 각각 495 m, 231 m, 50 m, 과압의 경우 7 kPa, 21 kPa 기준에서 229 m와 221 m의 피해 영향 범위가 도출되었다.

마지막으로 대안의 시나리오 ②의 시뮬레이션 결과 독성의 영향 범위는 PAC-1 (65,000 ppm), PAC-2 (230,000 ppm), PAC-3 (400,000 ppm)의 농도에서 각각 41 m, 22 m, 16 m가 도출되었고 인화성의 경우 25% LEL (10,000 ppm), LEL (40,000 ppm), UEL (750,000 ppm)을 기준으로 각각 152 m, 74 m, 17 m, 과압의 경우 7 kPa, 21 kPa 기준에서 72 m와 70 m의 피해 영향 범위가 도출되었다.

3.4. PHAST 소프트웨어 시뮬레이션 결과

PHAST 소프트웨어의 시나리오별 시뮬레이션 상세 결과는 Fig. 4와 Table 8에 도시하였다. Pressure vessel로 구동하였으며 독성을 제외한 인화성, 과압, 복사열의 피해 영향 범위를 산출할 수 있었다. PHAST 소프트웨어는 수소를 무독성 물질로 구분하여 독성의 피해 영향 범위를 산출하지 않는다.

먼저 최악의 시나리오에 대한 PHAST 소프트웨어의 구동 결과 인화성의 영향 범위는 25% LEL, LEL, UEL 기준에서 각각 104.7 m, 62.9 m, 1.6 m가 도출되었고 과압의 경우 7 kPa, 21 kPa, 70 kPa 기준에서 143.5 m, 112.6 m, 101.3 m, 복사열의 경우 4 kW/m², 12.5 kW/m², 37.5 kW/m²의 기준에서 각각 60.1 m, 45.5 m, 37.3 m가 도출되었다.

다음으로 대안의 시나리오 ①의 시뮬레이션 결과

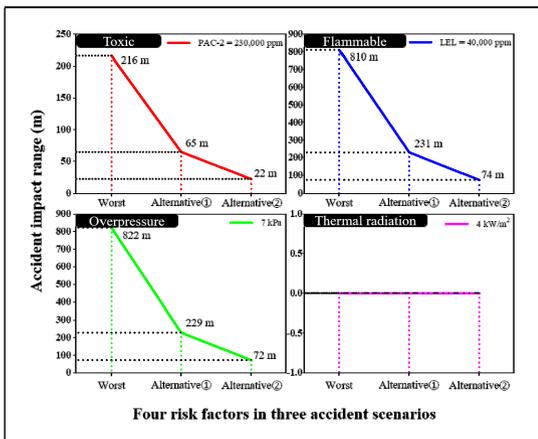
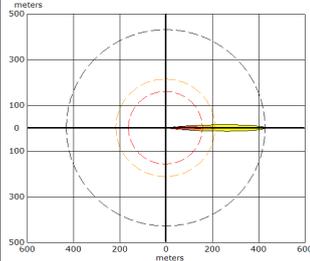
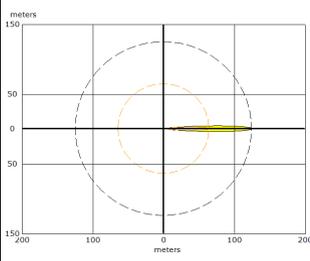
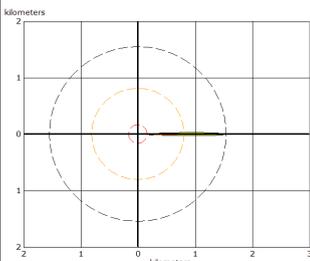
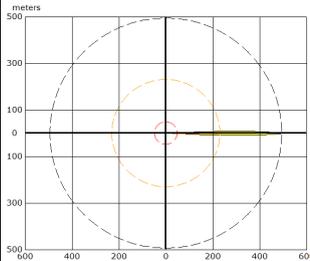
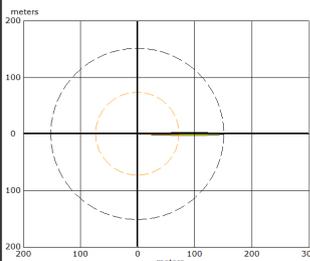
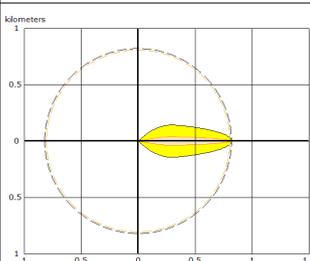
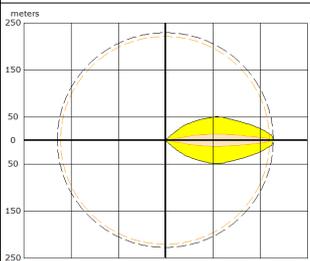
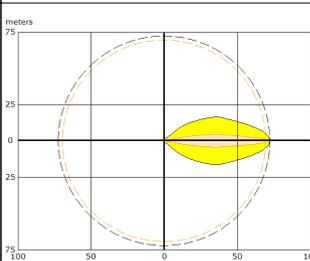


Fig. 3. Comparison of ALOHA software's four impact ranges of toxic, flammable, overpressure, and thermal radiation for each accident scenario

Table 7. The CA results from ALOHA software

Risk factor and criteria of analysis	Accident impact range				
	Worst scenario	Alternative scenario ①	Alternative scenario ②		
	No protection layer	Protection layer ①	Protection layer ① and ②		
Toxic			<p>Model Run: Gaussian Red : 16 meters --- (400000 ppm = PAC-3) Note: Threat zone was not drawn because effects of near-field patchiness make dispersion predictions less reliable for short distances. Orange: 22 meters --- (230000 ppm = PAC-2) Note: Threat zone was not drawn because effects of near-field patchiness make dispersion predictions less reliable for short distances. Yellow: 41 meters --- (65000 ppm = PAC-1) Note: Threat zone was not drawn because effects of near-field patchiness make dispersion predictions less reliable for short distances.</p>		
	PAC-1 (65,000 ppm)	431 m		125 m	41 m
	PAC-2 (230,000 ppm)	216 m		65 m	22 m
	PAC-3 (400,000 ppm)	161 m		49 m	16 m
Flammable					
	25% LEL (10,000 ppm)	1,500 m	495 m	152 m	
	LEL (40,000 ppm)	810 m	231 m	74 m	
	UEL (750,000 ppm)	165 m	50 m	17 m	
Overpressure					
	7 kPa	822 m	229 m	72 m	
	21 kPa	809 m	221 m	70 m	
	70 kPa	*N/E	*N/E	*N/E	
Thermal radiation	No analysis				
4 kW/m ²					
12.5 kW/m ²					
37.5 kW/m ²					

*N/E, never exceeded

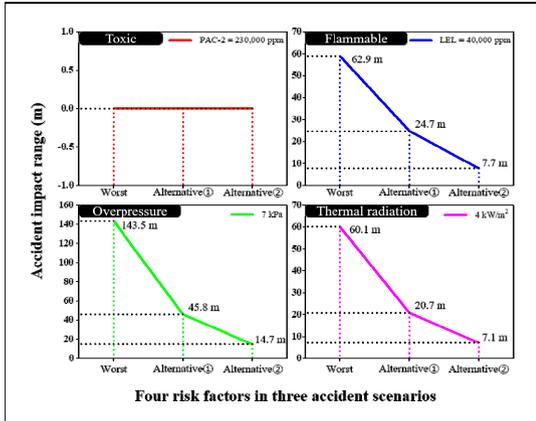
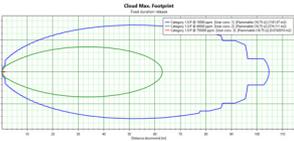
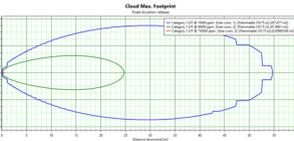
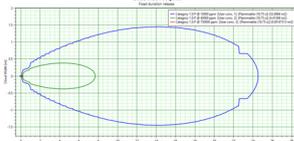
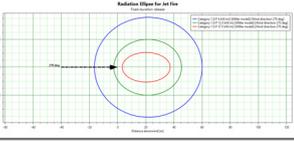
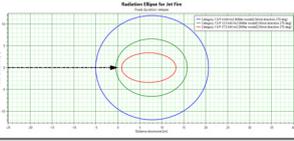
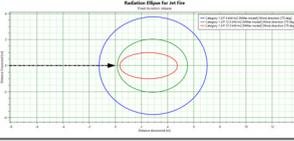


Fig. 4. Comparison of PHAST software's four impact ranges of toxic, flammable, overpressure, and thermal radiation for each accident scenario

인화성의 영향 범위는 25% LEL, LEL, UEL 기준에서 각각 54.7 m, 24.7 m, 0.6 m가 도출되었고 과압의 경우 7 kPa, 21 kPa, 70 kPa 기준에서 45.8 m, 36.8 m, 33.4 m, 복사열의 경우 4 kW/m², 12.5 kW/m², 37.5 kW/m²의 기준에서 각각 20.7 m, 15.8 m, 13.3 m가 도출되었다.

마지막으로 대안의 시나리오 ②의 시뮬레이션 결과 인화성의 영향 범위는 25% LEL, LEL, UEL 기준에서 각각 24.6 m, 7.7 m, 0.3 m가 도출되었고 과압의 경우 7 kPa, 21 kPa, 70 kPa 기준에서 14.7 m, 12.0 m, 11.0 m, 복사열의 경우 4 kW/m², 12.5 kW/m², 37.5 kW/m²의 기준에서 각각 7.1 m, 5.6 m, 4.7 m가 도출되었다.

Table 8. The CA results from PHAST software

Risk factor and criteria of analysis	Accident impact range		
	Worst scenario	Alternative scenario ①	Alternative scenario ②
	No protection layer	Protection layer ①	Protection layer ① and ②
Toxic PAC-1 (65,000 ppm) PAC-2 (230,000 ppm) PAC-3 (400,000 ppm)	Non toxic		
Flammable 25% LEL (10,000 ppm) LEL (40,000 ppm) UEL (750,000 ppm)	 104.7 m 62.9 m 1.6 m	 54.7 m 24.7 m 0.6 m	 24.6 m 7.7 m 0.3 m
Overpressure 7 kPa 21 kPa 70 kPa	 143.5 m 112.6 m 101.3 m	 45.8 m 36.8 m 33.4 m	 14.7 m 12.0 m 11.0 m
Thermal radiation 4 kW/m ² 12.5 kW/m ² 37.5 kW/m ²	 60.1 m 45.5 m 37.3 m	 20.7 m 15.8 m 13.3 m	 7.1 m 5.6 m 4.7 m

4. 결과 및 고찰

대용량의 수소 운송 및 저장 시스템의 사고 피해 영향 범위를 축소하기 위해서는 수소의 누출량을 최소화하여야 한다. 이에 본 연구에서는 누출량을 줄이기 위한 protection layer를 설정하였으며 안전 조치 적용에 따른 피해 영향 범위의 정량적 축소를 확인

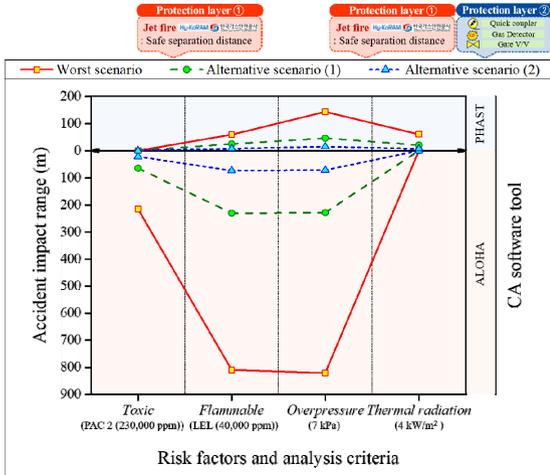


Fig. 5. Comparison of reduced impact range per scenario as a result of running ALOHA and PHAST software

하였다. 먼저 전량 누출(3,000 kg)을 최악의 시나리오로 가정하였다. 다음으로 최악의 시나리오에 protection layer ① (이격 거리)을 추가하여 누출량을 300 kg으로 축소하였고 이를 대안의 시나리오 ①로 가정하였다. 또한 대안의 시나리오 ①에 protection layer ② (퀵 커플러 및 수소 감지기와 차단 밸브)를 추가하여 누출량을 34 kg으로 축소하였고 이를 대안의 시나리오 ②로 가정하였다.

위 3가지 시나리오에 대하여 ALOHA와 PHAST 소프트웨어를 활용하여 사고 시뮬레이션을 수행하였으며 피해 영향 범위의 종합적인 결과를 Fig. 5와 Table 9에 도시하였다. 전량 누출 최악의 사고 시나리오에 protection layer ① (이격 거리)을 추가한 결과 다음과 같이 피해 영향 범위가 축소되었다.

ALOHA 소프트웨어 구동 결과 독성은 216 m에서 65 m로 약 70% 감소하였고 인화성은 810 m에서 231 m로 약 72% 감소하였으며 과압은 822 m에서 229 m로 약 73% 감소하였다.

PHAST 소프트웨어 구동 결과 인화성은 62.9 m에서 24.7 m로 약 61% 감소하였고 과압은 143.5 m에서 45.8 m로 약 68% 감소하였으며 복사열은 60.1 m

Table 9. The Comparison of CA results from ALOHA and PHAST programs

Risk factor and criteria of analysis		Accident impact range					
		Worst scenario		Alternative scenario ①		Alternative scenario ②	
		No protection layer		Protection layer ①		Protection layer ① and ②	
		ALOHA	PHAST	ALOHA	PHAST	ALOHA	PHAST
Toxic	PAC-1 (65,000 ppm)	431 m	Non toxic	125 m	Non toxic	41 m	Non toxic
	PAC-2 (230,000 ppm)	216 m		65 m		22 m	
	PAC-3 (400,000 ppm)	131 m		49 m		16 m	
Flammable	25% LEL (10,000 ppm)	1,500 m	104.7 m	495 m	54.7 m	152 m	24.6 m
	LEL (40,000 ppm)	810 m	62.9 m	231 m	24.7 m	74 m	7.7 m
	UEL (750,000 ppm)	165 m	1.6 m	50 m	0.6 m	17 m	0.3 m
Overpressure	7 kPa	822 m	143.5 m	229 m	45.8 m	72 m	14.7 m
	21 kPa	809 m	112.6 m	221 m	36.8 m	70 m	12.0 m
	70 kPa	*N/E	101.3 m	*N/E	33.4 m	*N/E	11.0 m
Thermal radiation	4 kW/m ²	**N/D	60.1 m	**N/D	20.7 m	**N/D	7.1 m
	12.5 kW/m ²		45.5 m		15.8 m		5.6 m
	37.5 kW/m ²		37.3 m		13.3 m		4.7 m

*N/E, never exceeded. **N/D, not displayed.

에서 20.7 m로 약 66% 감소하였다.

또한 대안의 사고 시나리오 ①에 protection layer ② (퀵 커플러 및 수소 감지기와 차단 밸브)를 추가한 결과 다음과 같이 피해 영향 범위가 축소되었다.

ALOHA 소프트웨어 구동 결과 독성은 65 m에서 22 m로 약 67% 감소하였고 인화성은 231 m에서 74 m로 약 68% 감소하였으며 과압은 229 m에서 72 m로 약 69% 감소하였다.

PHAST 소프트웨어 구동 결과 인화성은 24.7 m에서 7.7 m로 약 69% 감소하였고 과압은 45.8 m에서 14.7 m로 약 68% 감소하였으며 복사열은 20.7 m에서 7.1 m로 약 66% 감소하였다.

그리고 ALOHA와 PHAST 소프트웨어를 활용하여 산출한 피해 영향 범위를 바탕으로 안전 시사점을 추가로 도출할 수 있었다. Table 9과 같이 ALOHA 소프트웨어 최악의 사고 시나리오의 구동 결과가 두드러지게 넓게 나타났다. 과압 LOC-1 (7 kPa)의 강도는 초기 타격으로 건물이 복구 불가능한 상태로 파괴되거나 고막 파열 정도의 피해 수준으로 822 m가 산출되었으며 가연성이 높은 수소가 짧은 시간 대량 누출되어 화재로 이어진 만큼 인화성의 피해 영향 범위 또한 810 m로 넓게 나타났다.

물론 대형 폭발 사고 수준인 최악의 사고 시나리오 발생 가능성은 매우 희박하다. 그러나 사고 발생 시 대규모 인명 피해 및 재산 피해가 발생할 수 있는 만큼 안전에는 보수성이 요구되며 사고의 예방, 완화, 대응의 각 단계별로 안전 방안을 마련하여 안전을 강화하는 것이 무엇보다 중요하다. 따라서 피해 영향 범위가 넓게 나타난 인화성과 과압에 대하여 다음과 같은 안전 조치 방안을 제안하고자 한다.

첫째, 화재 및 폭발을 예방하기 위해서는 점화원을 제거하여야 한다. 열적 점화원 제거를 위하여 화염 방지기를 설치하고 흡연 구역을 작업 구역과 엄격하게 분리하여야 한다. 또한 전기적 점화원 제거를 위하여 정전기나 스파크 방지 설비가 필요하며 국내외 방폭 기준을 준수한 방폭 설비를 사용하여야 한다. 기계적 점화원 통제를 위해서는 배관 내 압력 및 온도를 모니터링할 수 있는 시스템 구축이 필요하다.

뿐만 아니라 수소의 누출을 조기에 감지할 수 있는 감지기를 설치하여야 하고 일정 농도 초과 시 자동으로 차단할 수 있는 시스템 구축과 적절한 환기 시스템이 요구된다.

둘째, 사고 발생 시 피해 영향을 최소화하기 위한 완화적 측면에서의 안전 요소도 고려하여야 한다. CA 피해 영향 범위를 반영한 안전 이격 거리 확보뿐만 아니라 화재 사고 발생 시 확산을 막기 위해서는 자동 소화 시스템을 구축하여야 한다.

셋째, 사고 발생 시 대응적 측면에서는 비상 대응 체계 매뉴얼을 구축하고 발전소 내부뿐만 아니라 외부 영향 범위까지 고려하여 주민 소개(public evacuation) 계획을 수립하여 지역사회 전체가 참여하는 비상 대응 훈련을 시행하여야 한다.

특히 본 연구에서 제시한 안전 이격 거리(protection layer ①), 퀵 커플러와 수소 누출 감지기 및 자동 차단 시스템(protection layer ②)은 수치해석 결과 사고 영향 저감에 효과적인 것으로 나타났다. ALOHA 및 PHAST 소프트웨어 분석을 통해 해당 조치들이 위험 범위 축소에 기여함이 확인되었으며 이는 수소 공급 시스템의 초기 대응력 향상과 피해 최소화에 중요한 역할을 할 수 있음을 시사한다. 따라서 이러한 조치들은 수소 공급 시스템 내 필수 안전대책으로 적용될 필요가 있다.

마지막으로 산업안전보건법 36조 위험성 평가의 실시에 따라 매년 정기적으로 위험성 평가를 실시하여야 하는데⁷⁾ 위험성 평가 시 매년 다른 프로그램을 활용하여 CA 결과를 산출함으로써 다양성을 제시할 수 있다. 본 연구에서는 ALOHA와 PHAST 프로그램을 활용하여 CA를 수행하였다.

PHAST 프로그램은 수소를 무독성 물질로 취급하여 독성의 영향 범위를 산출하지 않으나 ALOHA 프로그램은 질식의 영향을 고려하여 미국 DOE의 PAC 기준 독성의 영향 범위를 산출할 수 있었다. 또한 ALOHA 프로그램을 10분간 누출량을 기준으로 구동하기 위하여 direct source를 선택하였는데 이 경우 복사열의 피해 영향 범위는 산출이 불가하다는 제약이 존재하였다. 즉 CA 프로그램별 기능 및 특성이

상이하기 때문에 복수의 CA tool을 활용한다면 상호 보완적 기능을 통해 결과의 신뢰성을 향상시킬 수 있을 것이다.

또한 Table 9에 도시한 인화성과 과압의 피해 영향 범위 결과를 살펴보면 ALOHA와 PHAST 프로그램 간에 큰 차이가 확인되었다. 따라서 복수의 CA tool을 활용하는 경우 산출된 여러 결과 가운데 예측한 사고 시나리오 환경에 가장 적합한 구동 결과를 객관적으로 판단하고 수용할 수 있어야 한다. 신뢰성 있는 판단을 위해서는 향후 프로그램별 시나리오 구동에 사용된 변수 조건 및 계산 구동 방식(계산식 등)을 비교 검토하는 연구가 필요할 것이다.

5. 결론

- 1) 수소 복합화력발전소의 수소 공급 시스템(10기의 튜브 트레일러)을 대상으로 최악의 사고 시나리오를 선정하고 안전 이격 거리(Protection layer ①), 쿼 커플러와 수소 누출 감지기 및 차단 시스템(Protection layer ②)을 추가하여 안전성을 강화하고자 하였다. ALOHA와 PHAST 소프트웨어를 활용한 사고 영향 분석 결과 각각 91%, 89%의 위험 저감 효과가 나타났다. 이러한 수치해석을 통해 본 연구에서 제시한 안전성 제고 방안이 유효함을 검증할 수 있었다.
- 2) ALOHA CA 구동 상세 결과 독성은 216 m에서 22 m로 약 90% 감소하였고 인화성은 810 m에서 74 m로 약 91% 감소하였으며 과압은 822 m에서 72 m로 약 92% 감소하였다. PHAST CA 구동 상세 결과 인화성은 62.9 m에서 7.7 m로 약 88% 감소하였고 과압은 143.5 m에서 14.7 m로 약 90% 감소하였으며 복사열은 60.1 m에서 7.1 m로 약 89% 감소하였다.
- 3) 사고 시뮬레이션의 결과 과압과 인화성의 영향 범위가 가장 넓게 나타나 폭발과 화재에 대한 안전 강화 전략이 요구되었다. 따라서 사고의 예방(점화원 통제 및 제거 등), 완화(안전 이격 거리 설정, 자동 소화 설비 구축 등), 대응(비상

대응 체계 매뉴얼, 주민 소개 등)의 단계별로 수소 공급 시스템 전반에 다중 안전 조치를 적용하는 것이 바람직하다.

- 4) 본 연구에서는 CA 수행 시 tool로 ALOHA와 PHAST를 사용하였는데 복수의 tool을 활용하여 독성과 복사열의 결과를 상호 보완할 수 있었다. 그러나 인화성과 과압의 피해 영향 범위는 두 프로그램 간 차이가 크게 나타나 연구자의 판단이 요구되었다. 따라서 향후 프로그램별 변수에 따른 민감도 분석과 계산 방식에 대한 비교 분석 연구가 수행되어야 할 것이다.
- 5) CA 기반 수소 공급 체계의 위험 저감 전략 수립은 수소 연료 사용 발전소 내 안전 데이터베이스를 구축하고 안전 매뉴얼의 개발 및 비상 대응 계획 수립은 물론 수소 공급 시스템의 안전 설계를 위한 기초 자료로써 활용될 수 있다. 따라서 지속적인 후속 연구를 통하여 본 연구의 한계를 보완하고 가능성을 확대하는 것이 필요하다.

후 기

본 연구는 2023년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2023-00270080, 수소터빈 연소기 시험평가 기술개발, 기여율 50%). 본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제임(RS-2025-02603127, 무탄소 연료 가스터빈 설계, 제작, 안전 혁신연구센터).

References

1. O. Q. F. Araújo and J. L. de Medeiros, "How is the transition away from fossil fuels doing, and how will the low-carbon future unfold?," *Clean Technologies and Environmental Policy*, Vol. 23, 2021, pp. 1385-1388, doi: <https://doi.org/10.1007/s10098-021-02123-x>.
2. X. Li, "How can we make an orderly transition away from fossil fuels? A global tour of modern energy," *Energy & Environment*, Vol. 35, No. 6, 2023, pp. 2959-2974, doi:

- <https://doi.org/10.1177/0958305X231161300>.
3. A. Kalair, N. Abas, M. S. Saleem, A. R. Kalair, and N. Khan, "Role of energy storage systems in energy transition from fossil fuels to renewables", *Energy Storage*, Vol. 3, No. 1, 2021, pp. e135, doi: <https://doi.org/10.1002/est2.135>.
 4. C. Yang and K. Lim, "Suggestion to build a decentralized hydrogen supply hub facility for a hydrogen city", *Journal of Digital Contents Society*, Vol. 24, No. 9, 2023, pp. 2037-2045, doi: <https://doi.org/10.9728/dcs.2023.24.9.2037>.
 5. D. Tasić, "A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe", H₂GreenTECH, 2021. Retrieved from <https://www.h2greentech.eu/a-hydrogen-strategy-for-a-climate-neutral-europe/>.
 6. Ministry of Trade, Industry and Energy(MOTIE), "Hydrogen economy activation roadmap", MOTIE, 2019. Retrieved from <https://www.motie.go.kr/kor/article/ATCLf724eb567/210222/view>.
 7. Ministry of Government Legislation, "Hydrogen economy promotion and hydrogen safety management act", Korean Law Information Center, 2022. Retrieved from <https://law.go.kr/%EB%B2%95%EB%A0%B9/%EC%88%98%EC%86%8C%EA%B2%BD%EC%A0%9C%EC%9C%A1%EC%84%B1%EB%B0%8F%EC%88%98%EC%86%8C%EC%95%88%EC%A0%84%EA%B4%80%EB%A6%AC%EC%97%90%EA%B4%80%ED%95%9C%EB%B2%95%EB%A5%A0/%2816942,20200204%29>.
 8. Ministry of Land, Infrastructure and Transport, "Draft Act on the Construction and Operation of Hydrogen Cities", MOLIT, 2020. Retrieved from https://www.molit.go.kr/mtc/USR/law/m_37141/dtl.jsp?r_id=6900.
 9. B. I. Choe, "How to build the infrastructure for a liquid hydrogen society", *Superconductivity and Cryogenics*, Vol. 22, No. 1, 2020, pp. 9-12. Retrieved from <https://koreascience.or.kr/article/JAKO202001466879910.pdf>.
 10. J. E. Shin, "Hydrogen technology development and policy status by value chain in South Korea", *Energies*, Vol. 15, No. 23, 2022, pp. 8983, doi: <https://doi.org/10.3390/en15238983>.
 11. M. Park, S. Yang, Y. Hwang, H. Hwang, and G. Kim, "Hydrogen pipeline life cycle evaluation: from cradle to gate", *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 36, No. 1, 2025, pp. 1-8, doi: <https://doi.org/10.7316/JHNE.2025.36.1.1>.
 12. S. Choi, H. Park, and J. Han, "Optimization of hydrogen supply network design for fuelling hydrogen fuel cell vehicles", *Korean Management Science Review*, Vol. 38, No. 2, 2021, pp. 75-88, doi: <https://doi.org/10.7737/KMSR.2021.38.2.075>.
 13. W. I. Park, Y. H. Kim, I. W. Lee, and S. K. Kang, "A study on the safety enhancement of hydrogen tube trailer", *Journal of the Korean Institute of Gas*, Vol. 26, No. 6, 2022, pp. 59-64, doi: <https://doi.org/10.7842/kigas.2022.26.6.59>.
 14. D. H. Kim, H. K. Park, and M. C. Lee, "Barriers and strengthening strategies on the Korea safety laws for the application of hydrogen and ammonia as power generation fuels based on the expert survey", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 70, 2024, pp. 568-578, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.05.126>.
 15. J. A. Gordon, N. Balta-Ozkan, and S. A. Nabavi, "Gauging public perceptions of blue and green hydrogen futures: is the twin-track approach compatible with hydrogen acceptance?", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 49, Pt. D, 2024, pp. 75-104, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.06.297>.
 16. S. Moon, K. Kim, and J. Kim, "A study on public acceptance of hydrogen portfolio standard for renewable energy expansion: comparative analysis of hydrogen production mix plans", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 49, Pt. D, 2024, pp. 538-552, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.09.224>.
 17. J. H. Ha, H. J. Park, and M. C. Lee, "Quantitative risk assessment on the hydrogen fuel storage and supply facility for hydrogen combustor test: based on the analysis results of ALOHA and e-CA Program", *Journal of the Korean Institute of Gas*, Vol. 28, No. 4, 2024, pp. 30-42, doi: <https://doi.org/10.7842/Icigas.2024.28.4.30>.
 18. Y. D. Jo, "Hazard distance from hydrogen accidents", *Journal of the Korean Institute of Gas*, Vol. 16, No. 1, 2012, pp. 15-21, doi: <https://doi.org/10.7842/kigas.2012.16.1.15>.
 19. A. Ursua, L. M. Gandia, and P. Sanchis, "Hydrogen production from water electrolysis: current status and future trends", *Proceedings of the IEEE*, Vol. 100, No. 2, 2012, pp. 410-426, doi: <https://doi.org/10.1109/JPROC.2011.2156750>.
 20. Q. Ma, Y. He, J. You, J. Chen, and Z. Zhang, "Probabilistic risk assessment of fire and explosion of onboard high-pressure hydrogen system", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 50, Pt. A, 2024, pp. 1261-1273, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.10.157>.
 21. Y. D. Jo, S. Tak, K. S. Choi, J. R. Lee, and K. S. Park, "Analysis of hydrogen accident in Korea", *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 15, No. 1, 2004, pp. 82-87. Retrieved from <https://koreascience.kr/article/JAKO200430360539725.pdf>.
 22. 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/KHNE.2019.30.6.499>.
 23. H. Lee, Y. Woo, and M. J. Lee, "The needs for r&d of ammonia combustion technology for carbon neutrality - part i background and economic feasibility of expanding the supply of fuel ammonia", *Journal of The Korean Society of Combustion*, Vol. 26, No. 1, 2021, pp. 59-83, doi: <https://doi.org/10.15231/jksc.2021.26.1.059>.
 24. C. Zhou, Z. Yang, G. Chen, Q. Zhang, and Y. Yang, "Study on leakage and explosion consequence for hydrogen blended natural gas in urban distribution networks", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 47, No. 63, 2022, pp. 27096-

- 27115, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.06.064>.
25. F. Yang, T. Wang, X. Deng, J. Dang, Z. Huang, S. Hu, Y. Li, and M. Ouyang, "Review on hydrogen safety issues: incident statistics, hydrogen diffusion, and detonation process", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 46, No. 61, 2021, pp. 31467-31488, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.07.005>.
 26. M. C. Lee, S. B. Seo, J. Yoon, M. Kim, and Y. Yoon, "Experimental study on the effect of N₂, CO₂, and steam dilution on the combustion performance of H₂ and CO synthetic gas in an industrial gas turbine", *Fuel*, Vol. 102, 2012, pp. 431-438, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.05.028>.
 27. D. A. Crowl and Y. D. Jo, "The hazards and risks of hydrogen", *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Vol. 20, No. 2, 2007, pp. 158-164, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2007.02.002>.
 28. D. H. Kim and M. C. Lee, "Comparison of consequence analysis results for a hydrogen fueled combined cycle power plant using ALOHA, E-CA and Hy-KoRAM Programs", *Journal of the Korean Institute of Gas*, Vol. 28, No. 4, 2024, pp. 90-104, doi: <https://doi.org/10.7842/kigas.2024.28.4.90>.
 29. Korea Occupational Safety and Health Agency (KOSHA), "Technical guideline on the selection of worst-case and alternative accident scenarios (P-107-2020)", KOSHA, 2020. Retrieved from <https://www.kosha.or.kr/kosha/info/searchTechnicalGuidelines.do>.
 30. Korea Occupational Safety and Health Agency (KOSHA), "Technical guideline on the establishment of damage minimization measures for chemical plants (P-110-2023)", KOSHA, 2023. Retrieved from <https://www.kosha.or.kr/kosha/info/searchTechnicalGuidelines.do>.
 31. Korea Occupational Safety and Health Agency (KOSHA), "Technical guideline on accident damage prediction methods (P-102-2021)", KOSHA, 2021. Retrieved from <https://www.kosha.or.kr/kosha/info/searchTechnicalGuidelines.do>.
 32. Department of Energy (DOE), "Protective Action Criteria (PAC) Rev. 29a. Technical documentation", DOE, 2018. Retrieved from https://edms3.energy.gov/pac/docs/Revision_29A_Table3.pdf.
 33. N. Sazali, "Emerging technologies by hydrogen: a review", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 45, No. 38, 2020, pp. 18753-18771, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.05.021>.
 34. Korea Occupational Safety and Health Agency (KOSHA), "Technical guideline on the installation and maintenance of flammable gas detection and alarm systems (P-135-2018)", KOSHA, 2018. Retrieved from <https://www.kosha.or.kr/kosha/info/searchTechnicalGuidelines.do>.
 35. T. Jeong, D. H. Lim, M. S. Kim, J. G. Lee, B. T. Yoo, and J. W. Ko, "Optimization of gas detector location by analysis of the dispersion model of hazardous chemicals", *Journal of the Korean Institute of Gas*, Vol. 26, No. 2, 2022, pp. 39-48, doi: <https://doi.org/10.7842/kigas.2022.26.2.39>.
 36. Korea Gas Safety Corporation (KGS), "Facility/technical/inspection code for urban gas using facilities (KGS FU551)", KGS, 2020. Retrieved from https://cyber.kgs.or.kr/codesrc/kgscode_pdf/2023/FU551_230825.pdf;cyberJSESSIONID=jcgrfwLzYNxgEqLnbMyW8RU445JfcN3orrnd0y3VBt5KJ0KIPYKmJ!526383705!6550063.
 37. S. H. Choi and H. G. Choi, "A numerical study on installation location of a urban gas detector by using equivalent leak diameter", *Journal of Computational Fluids Engineering*, Vol. 26, No. 2, 2021, pp. 94-100, doi: <https://doi.org/10.6112/kscfe.2021.26.2.094>.
 38. S. Kang, Y. Huh, and J. Moon, "A study on safety improvement for packaged hydrogen refueling station by risk assessment", *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 28, No. 6, 2017, pp. 635-641, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2017.28.6.635>.
 39. S. K. Kang, "A study on the quantitative risk assessment of hydrogen-LPG combined refueling station", *Journal of Energy Engineering*, Vol. 28, No. 4, 2019, pp. 29-34, doi: <https://doi.org/10.5855/ENERGY.2019.28.4.029>.
 40. D. Kwon, S. Choi, S. Kang, and C. Yu, "The analysis on quantitative risk assessment of the package type H₂ station using Hy-KoRAM and PHAST/SAFETI", *Journal of Energy Engineering*, Vol. 29, No. 4, 2020, pp. 16-25, doi: <https://doi.org/10.5855/ENERGY.2020.29.4.016>.
 41. H. Kim and S. Kang, "Analysis of damage range and impact of on-site hydrogen fueling station using quantitative risk assessment program (Hy-KoRAM)", *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 31, No. 5, 2020, pp. 459-466, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2020.31.5.459>.
 42. 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>.