

복합화력발전소 내 수소연료 적용 시 누출 사고에 대한 피해영향범위 분석: 지역별 환경 특성 영향에 기반하여

박희경¹ · 이민철^{2†}

¹인천대학교 일반대학원 안전공학과, ²인천대학교 안전공학과

Consequence Analysis on the Leakage Accident of Hydrogen Fuel in a Combined Cycle Power Plant: Based on the Effect of Regional Environmental Features

HEEKYUNG PARK¹, MINCHUL LEE^{2†}

¹Department of Safety Engineering, Incheon National University Graduate School, 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 4 October, 2023
Revised 26 October, 2023
Accepted 3 November, 2023

Abstract >> Consequence analysis using an ALOHA program is conducted to calculate the accidental impact ranges in the cases of hydrogen leakage, explosion, and jet fire in a hydrogen fueled combined cycle power plant. To evaluate the effect of weather conditions and topographic features on the damage range, ALOHA is executed for the power plants located in the inland and coastal regions. The damage range of hydrogen leaked in coastal areas is wider than that of inland areas in all risk factors. The obtained results are expected to be used when designing safety system and establishing safety plans.

Key words : Hydrogen safety(수소 안전), Consequence analysis(사고 피해영향 분석), Environmental feature(환경 특성), ALOHA program(피해영향범위 평가 프로그램), Combined cycle power plant(복합화력발전소)

1. 서론

전 세계적으로 발전에너지원 중 화석연료인 석유, 석탄 및 천연가스의 의존도는 약 85%로 매우 높은 편이다. 화석연료는 좋은 효율성을 갖고 있는 반면 이산화탄소 배출로 인한 환경오염과 기후 변화, 자원의 고갈 등의 문제가 우려되고 있다. 이에 안전하고

지속 가능한 탄소중립 사회를 이루고자 청정연료 기반의 재생에너지 및 무탄소연료로의 전환을 위한 연구가 활발히 진행되고 있다¹⁾. 자연을 활용한 신재생 에너지는 지역 편차, 간헐성 등의 문제로 근본적인 한계를 갖고 있는 반면, 신연료로 활용 가능한 수소는 전기를 이용하여 물로부터 생산 가능한 에너지라는 점에서 지역적 편중이 없는 에너지원으로 많은 관

심을 받고 있다²⁾. 국내에서는 수소경제추진위원회를 구성³⁾하고, 에너지 전환 정책 및 수소 기술개발 로드맵을 마련하는 등 수소 경제 국가로 도약하기 위한 다양한 노력을 진행 중이다.

수소는 자동차^{4,5)}, 항공기⁶⁾, 발전 플랜트⁷⁻⁹⁾ 등 다양한 산업 분야에서 신에너지원으로 그 이용률이 높아지고 있으며, 2023년에는 국내 서인천복합 및 신인천복합의 150 MW F급 가스터빈을 대상으로 50% 수소/천연가스 혼소 기술 개발 및 실증을 위한 연구가 착수되어 2027년 실증 운전을 계획하고 있다. 이와 동시에 한국동서발전과 두산에너지빌리티에서는 수소 50% 혼소가 가능한 300 MW H급 가스터빈을 울산복합에 신규로 건설하고, 2027년에 실증 운전을 계획하고 있다. 또한 한국전력공사 전력연구원에서는 가스터빈 구조 분석 및 운전 최적화 방안을 고안하여 수소 혼소(30%) 시스템 기술을 확보하였다¹⁰⁾. 국외에서는 미국, 독일, 유럽, 일본 등 세계 주요 국가¹¹⁻¹⁶⁾ 또한 수소를 새로운 친환경에너지의 핵심 자원으로 판단하고, 수소 가스터빈 개발에 많은 관심을 갖고 있다. 특히, 일본의 Kawasaki 중공업에서는 고베시에 1 MW급 가스터빈 내 수소 전소(100%) 발전의 실증을 성공하였으며¹⁷⁾, GE, Siemens, MHI 등의 가스터빈 제작사에서도 발전용 가스터빈 내 수소의 혼소 비율을 높이고, 이를 실증하기 위한 연구를 진행 중이다¹⁸⁾.

각 프로젝트 및 제작사마다 수소 혼소율을 높이기 위해 노력하고 있으나, 이로 인한 탄소 저감의 효과를 명확히 이해하기 위해서는 수소의 부피 기준 및 질량 기준에 따른 이산화탄소 저감량을 계산할 필요가 있다. 천연가스(natural gas, NG)와 수소로 구성된 전체 연료 중 수소의 부피 및 질량 기준 분율이 0-100%까지 변할 때, CO₂ 감소율을 계산하여 Fig. 1과 같이 도시하였다.

CO₂의 감소량은 부피 기준 수소의 비율이 증가할수록 아래로 볼록하게 증가하는 지수함수 증가 형태를 보였고, 질량 기준 수소의 비율이 증가할수록 위로 볼록하게 증가하는 로그함수 증가 형태를 보였다. 이는 NG와 수소의 연료 특성에 의해 그래프 형상이

달라지게 되는데, 물성치는 Table 1과 같다^{19,20)}.

수소의 저위발열량(lower heating value, LHV)은 부피당 에너지 밀도와 질량당 에너지 밀도가 각각 10.7 MJ/Nm³ 및 120.1 MJ/kg이고, NG의 LHV는 부피당 에너지 밀도와 질량당 에너지 밀도가 각각 39.08 MJ/Nm³ 및 49.3 MJ/kg의 값을 갖는다. 이는 상대적으로 낮은 수소의 밀도로 인하여 단위 부피당 발열량은 NG보다 약 0.27배 작지만, 단위 질량당 발열량은 NG보다 약 2.43배 크기 때문에 나타나는 결과이다.

예를 들어 부피 기준으로 수소를 30 vol% 혼소할 경우 9.8%의 다소 작은 CO₂ 저감 효과를 볼 수 있지만, 질량 기준으로 수소를 30 wt% 혼소할 경우 약 51.1%의 CO₂ 배출 감소 효과를 확인할 수 있다. 또한 그래프의 비선형 특성으로 인해 부피 기준에서 CO₂ 배출량을 50% 감소시키기 위해서는 약 80 vol%

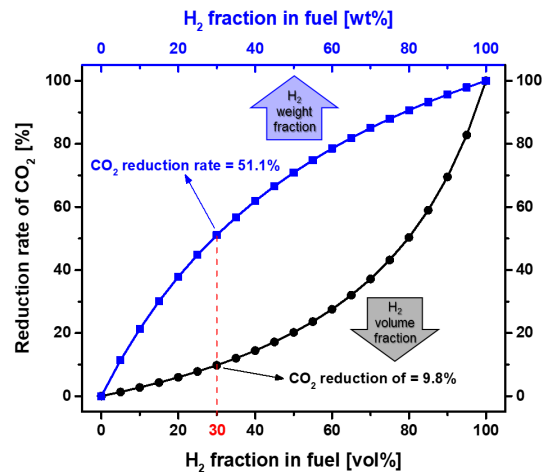


Fig. 1. CO₂ reduction rate with respect to H₂ fraction in fuel

Table 1. Properties of hydrogen and methane^{19,20)}

Property	Units	Hydrogen	Methane
Chemical formula	-	H ₂	CH ₄
Density	kg/Nm ³	0.09	0.72
LHV (per volume)	MJ/Nm ³	10.7	39.08
LHV (per mass)	MJ/kg	120.1	49.3

의 수소 혼소가 진행되어야 한다. 부피와 질량비 모두 100% 전소 시에는 CO₂ 배출량은 0에 수렴하여 수소 발전 및 무탄소 발전의 성공을 도래할 수 있다.

가스터빈을 활용하여 수소를 연료로써 적용할 수 있도록 관련 기술 개발을 활발히 진행 중에 있지만, 가스터빈 내 연료가 바뀌면서 연소 특성이 달라질 경우 다양한 위험성의 문제가 발생할 수 있다. 수소는 인화성 가스로서 대기압 환경에서는 연소(폭발) 범위가 4-75%로 높은 폭발의 위험성을 갖고 있다. 하지만 산소 농도 증가 시 폭발 가능한 수소 농도의 범위가 넓어지면서 약 4-94%까지 폭발의 범위가 더욱 확대될 수 있다²¹⁾. 또한 탄화수소계 연료에 비해 화염 온도가 높고, 연소 속도가 매우 빨라 폭발적인 반응을 일으킨다. 이러한 수소의 특성으로 가스터빈 연소기 내 역화, 화염의 안정성 감소 등의 위험 문제가 발생하게 되며 이는 터빈의 연소기 내 화염 온도를 높여서 질소산화물(NO_x) 배출의 문제가 동반된다. 향후 복합화력발전소 내 수소가 연료로써 적용되기 위해서는 수소 가스터빈 연소 기술 개발과 동시에 수소의 안전성 및 위험성에 대해 검토하는 연구가 동시 혹은 선행적으로 실시되어야 한다.

본 연구의 선행 연구로 Jang 등²²⁾ 및 Jeong 등²³⁾은 상용화된 연료에 비해 수소가 정량적으로 얼마나 안전하고 위험한지 확인하고자 탄화수소계 연료 성분(CH₄, C₂H₆, C₃H₈, C₄H₁₀)과 신연료의 주요 성분인 H₂, NH₃의 물성치 기반 위험성 평가를 실시하였다. 각 물질별 연소 특성과 화재 및 폭발 특성을 고려하여 상대적 위험도를 분석한 결과, 수소는 liquid natural gas (LNG)보다 위험성이 크고 liquid petroleum gas (LPG)보다 위험성이 낮게 계산되었다. 하지만 독성, 환경성을 포함하여 위험도를 비교 분석한 경우에는 수소가 가장 낮은 위험도를 나타냈다. 그러나 이 연구는 연료별 물성치 비교를 통한 연료에 대한 일반적인 위험성 평가를 실시한 결과이고, 실제 현장을 대상으로 사고 발생 시 물질 자체가 어떠한 피해 확산 경향을 가지는지에 대한 영향 분석이 실시된 위험성 평가는 아니다.

본 연구에서는 실질적인 상황과 현장 데이터를 반

영하고자 국내 운영 중인 2개의 발전소(세종, 울산) 내 30% 수소 연료 적용 시 실제 발생할 수 있는 사고 시나리오를 구축하여 수소 누출 사고 시 독성, 인화성, 폭발로 인한 충격파, 화재로 인한 열복사열의 4가지 위험 요소의 피해영향범위를 분석하였다. 시나리오 설정 시 내륙 지역에 위치한 세종과 해안 지역에 위치한 울산의 발전소 환경 및 지형적 특성을 반영하여 지역별 난기류, 풍속 그리고 주변 장애물 등이 피해 확산 모델링 결과에 미치는 영향을 확인코자 한다. 본 연구를 통해 복합화력발전소 내 수소 연료 적용 시 발생 가능한 위험 요인을 파악하고, 각 지역별 맞춤형 수소 연료의 공급 및 저장 설비, 발전소의 안전 시스템 설계 자료를 구축하고자 한다.

2. 위험성 평가 방법

2.1 사고 피해영향범위 분석(consequence analysis)

일정 규모 이상의 위험 물질을 보유하고 있는 사업소에서는 사고의 예방을 위해 산업안전보건법에 따른 공정 안전 보고서(process safety management, PSM)를 제출할 의무가 있고, 발전소의 경우 NG, 수소, 경유, 암모니아 등 다양한 위험 물질을 보유 및 사용하고 있어 위험성 평가는 물론 PSM 제출 대상에 해당된다. 위험성 평가는 크게 정성적 위험성평가와 정량적 위험성 평가로 구분되고, 본 연구에서는 객관적으로 위험 결과가 확인 가능한 정량적 위험성 평가 중에서도 사고의 강도 위험성을 평가하는 사고 피해영향범위 분석(consequence analysis, CA)을 실시하였다. 이를 통하여 사고의 크기, 강도를 분석하여 위험도의 수치적 감소를 위한 안전 방안 및 대책을 수립하고자 하였다²⁴⁾.

CA 위험성 평가는 사고 시나리오를 설정하고 누출, 화재, 폭발의 현상을 모델링하여 독성 및 인화성 가스의 농도, 화재의 복사열, 폭발에 의한 과압의 강도에 따른 피해영향범위를 시각화, 수치화하여 사고의 피해 강도를 예측할 수 있다²⁵⁾. 또한 CA를 통해 다양한 사고 결과인 vapor cloud explosion (VCE), jet fire,

boiling liquid expanding vapor explosion (BLEVE) 등을 시뮬레이션하고 위험을 분석하여 각 유해물질 및 화학물질별 저장 및 취급, 수송의 안전 방안 제시, 사고 예방을 위한 대응 시나리오 구축 등에 활용 가능한 기초 데이터를 제공하고자 하였다.

2.2 피해영향범위 분석 프로그램

CA를 위한 상용 프로그램으로는 Process Hazard Analysis Software Tool (PHAST; DNV, Bærum, Norway)²⁶⁾, Areal Location of Hazardous Atmospheres (ALOHA; United States Environmental Protection Agency [EPA], Washington, D.C., USA)²⁷⁾, Korea Off-site Risk Assessment Supporting Tool (KORA; National Institute of Chemical Safety, Cheongju, Korea)²⁸⁾ 등의 소프트웨어가 있고, 본 연구에서는 수소가스 누출 사고의 CA를 실시하기 위해 미국 EPA 및 National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)에서 개발한 ALOHA^{29,30)}를 사용하였다. ALOHA는 computer aided management of emergency operations (CAMEO)가 제공하는 물질 가운데 대기 확산의 위험성이 있는 1,800여 종의 화학 물질 물성 데이터를 가져올 수 있다³¹⁾. 사고 시나리오를 선정하여 분석하고자 하는 사고 모델링에 맞게 화학 물질의 특성, 지형 및 기상 조건, 설비 상태 등을 입력하게 되는데, 입력값을 기반으로 대기 중으로 누출되는 속도를 계산하고 누출물의 피해확산범위를 결과로 산정한다. ALOHA는 공기보다 가벼운 기체의 경우 가우시안 확산 모델(Gaussian dispersion)을 사용하며, 무거운 가스의 경우 DEGADIS 모델을 사용하기 때문에 두 가지 모델을 기반으로 계산하게 된다³²⁾. 사고 발생 시 화학 물질의 확산 형태가 각 확산 모델의 확률분포함수와 유사하다³³⁾.

본 연구에서는 실제 복합화력발전소를 대상으로 수소연료를 공급하는 가상의 설계 시나리오를 적용하여 사고 강도 측면의 ALOHA 위험성 평가를 진행하였다. 먼저 확산 모델링 시뮬레이션 구동을 위하여 사고 시나리오를 선정하게 된다. 발전소가 위치한 지역에 따라 지형 및 기후 조건을 입력하고 수소 공급

및 저장 설비를 대상으로 공정 시나리오를 설계한다. 사고 발생 지점으로부터 피해영향범위가 가장 넓은 가상의 사고인 최악의 사고 시나리오 및 사업장 내 현실적으로 발생 가능성이 높은 가상의 사고인 대안의 사고 시나리오를 선정³⁴⁾하여 내륙과 해안의 각 지역별 2가지 시나리오에 대한 CA를 실시했다.

3. 위험성 평가 시나리오 설정

3.1 환경 및 지형 특성 기반 시나리오 설정

사고 시나리오 설정을 위해 내륙(세종)과 해안(울산)의 각 위험성 평가 대상지의 위치와 주변 환경 및 지형, 건물 특성을 Table 2와 같이 입력하였다. 지리적으로 내륙과 해안 지역은 고도의 차이가 존재한다. 또한 건물과 나무가 많은 도시 지형(sheltered surroundings, SS)과 평탄하고 해안가 인근에 위치한 전원 지형(unsheltered surroundings, US)으로 구분하여 각 지역의 환경 특성을 사고 시나리오의 입력값으로 설정하였다. 도시 지형은 풍향 방향의 건물 주변에 다른 건물, 나무, 숲 등의 장애물에 의해 바람의 확산 흐름을 방해받는 경우를 말하고, 전원 지형은 풍향 방향의 건물 주변에 장애물이 없어 해당 건물이 직접적으로 바람을 받는 경우에 해당한다. 환경 특성 중 하나인 환기율, 침투율은 건물 내 유해가스의 유입 정도와 연관되어 있기 때문에 바람에 직접적인 영향을 받는 US가 SS보다 피해영향범위가 더 넓게 나타나게 된다³⁵⁾.

또 다른 환경 특성으로 인근 지표면의 굴곡도, 거칠기 역시 확산에 중요한 요소로 작용한다. ALOHA

Table 2. Environmental options by regional accident scenarios

Title	Environmental option	
	Inland (Sejong)	Coastal (Ulsan)
Building surroundings	Sheltered surroundings	Unsheltered surroundings
Ground roughness	Urban or forest	Open water

의 확산 모델링은 지면의 거칠기(roughness)에 따라 가스 유체가 통과하는 지형의 불균일성 정도를 구분하고, 누출된 가스가 지면 위로 확산될 때, 주변 장애물(나무, 건물 등)을 통과하며 공기 사이의 마찰로 인해 공기의 흐름이 방해받고, 이는 대기 난기류의 형성 정도를 결정한다. 난기류를 통해 누출 가스가 주변 공기와 혼합되어 피해 우려 수준(level of concern, LOC)의 농도 및 강도 아래로 희석될 수 있는데, 대기 난류가 증가할수록 누출 가스는 더욱 빨리 희석되며 사고의 피해 영역은 작아지게 된다³⁶⁾. ALOHA에서는 지형의 유형에 따라 ‘urban or forest’, ‘open country’, ‘open water’의 3가지 유형으로 구분할 수 있으며, 이 중 ‘urban or forest’의 경우 지형의 거칠기 값이 가장 크고 난기류가 높아 다른 유형에 비해 피해확산거리의 결과가 작게 나타난다. 3가지 유형 외에도 같이 특정 지면의 거칠기의 길이(Z_0)³⁷⁾를 알고 있는 경우에는 이에 대한 상세한 입력값을 적용하여 계산할 수 있다(Table 3).

본 연구에서 고찰하고자 하는 내륙과 해안지역의 지면 거칠기는 각각 ‘urban or forest’, ‘open water’로 선택하여 피해영향범위를 산정하였다.

3.2 기후 특성 기반 시나리오 설정

위험성 평가 대상지의 위치, 환경 및 지형적 특성 조건 입력 후 기상 조건을 설정하게 되는데 이는 최

악/대안 사고 시나리오별 입력값이 달라지며, 최악의 사고 시나리오의 경우 대안의 사고 시나리오보다 보수적이며 피해 강도가 크게 나타나는 조건으로 설정된다. 각 입력값에 대해서는 기상청 국가기후데이터센터(National Climate Data Service System, NCDSS)의 기상관측자료³⁸⁾를 활용하였으며, 그 외 자료에 대해서는 KOSHA guide³⁴⁾ 및 화학물질안전원³⁹⁾의 ‘최악 및 대안의 사고 시나리오 선정에 관한 기술지침’에 따라 각 시나리오에 따른 조건을 Table 4와 같이 설정했다.

기상 조건 중에서도 풍속은 누출 가스가 바람을 타고 확산되는 속도에 직접적인 영향을 미친다. 구름의 양은 태양 복사량의 정도를 의미하는데, 태양열과 기온의 값에 따라 화학 물질의 방출 및 증발 속도를 높이기 때문에 액체 누출 사고 발생 시 중요한 요소로 작용한다. 대기 안정도는 Pasquill-Gifford 안정도 기준⁴⁰⁾에 따라 앞서 입력한 풍속, 구름의 양, 태양의 고도 조건을 조합하여 난기류의 정도를 계산하고, ALOHA는 이를 기반으로 가장 적절한 대기 안정성 등급을 자동으로 판별하여 입력값을 설정한다. 기상학에서 정의한 extremely unstable (A)부터 stable (F)까지 총 6개의 대기 안정도 등급은 ALOHA의 피해영향범위 결과 예측에 큰 영향을 준다. 안정도 등급 중 매우 불안정한 조건(A)에서 대기난류가 증가하여 누출 가스는 주변 공기와 빠르게 혼합 및 확산되어 유해 물질이 희석되는 속도 또한 빨라진다. 따라서

Table 3. Examples of roughness length (Z_0)

Surface description	Z_0 (cm)	Surface description	Z_0 (cm)
Mud flats, ice	0.001	Grass (with bushes, trees)	4-5
Smooth tarmac (airport runway)	0.002	1-2 m high vegetation	20
Large water surfaces (average)	0.01-0.06	Savannah scrub (trees, grass, sand)	40
Grass (lawn to 1 cm high)	0.1	Trees (10-15 m high)	40-70
Grass (airport)	0.45	Large city (Tokyo)	165

Table 4. Atmospheric options by accident scenarios

Title	Atmospheric option	
	Worst	Alternative
Wind speed	1.5 m/s	3.0 m/s
Measurement height	10 m	
Cloud cover	5 tenths	
Air temperature	40°C	Average of annual temperature
Stability	F (stable)	D (neutral)
Humidity	50%	Average of annual humidity

정반대인 안정한 조건(F)은 최악의 사고 시나리오의 대기 안정도로 적용되며, 대기가 불안정할 때(A)보다 누출 가스의 희석이 느리게 진행되어 더 넓은 피해영향범위를 나타낼 수 있음을 알 수 있다.

3.3 공정 설비 시나리오 설정

복합화력발전소 내 수소연료 적용 시 발생할 수 있는 위험성을 평가하기 위해 내륙(세종)과 해안(울산) 지역에 위치한 각 발전소의 공정 및 P&ID, 설비 배치도 등을 분석하여 수소의 저장 및 공급 시스템을 설계하고자 하였다. 수소의 공급 배관이나 저장 용기와 같은 공정 설비의 사양 및 위치를 선정하고, 이를 사고 시나리오의 공정 설비 조건으로 반영하여 Table 5와 같이 최악/대안 그리고 내륙/해안 지역의 수소 누출 사고의 총 4가지 시나리오를 모델링하였다.

지역별 발전소 인근 현장의 현실적인 공급 및 저장 설비 요소와 장외 영향 요소를 반영하여 사고 시나리오를 설정했다. 내륙(세종)의 경우, 인접 지역 내 화학 공장 및 수소가스 제조업체가 부재하여 발전소 내 수소 생산 설비를 구축하거나, tube trailer를 통해 운송하여 고정식 수소 저장탱크로 공급해야 한다. 하

지만 새로운 설비를 구축할 때, 수소가스의 위험성, 설비의 유지 및 관리 용이성 등으로 발전소 인근 주민들의 수용성 문제가 발생할 수 있다. 따라서 tube trailer로 이송하여 고정식 H₂ gas storage tank 내 공급하는 것으로 설계 자료를 구축하였다. 반면, 해안(울산)의 경우 산업단지 내 발전소가 위치하고 있으며 인근에 국내 최대 수소 생산업체 및 화학 공장이 존재하여 제조된 수소 가스를 파이프를 통해 공급받을 수 있어 경제성, 안전성 측면을 고려하여 해당 방안으로 시나리오를 설계하였다. 해당 자료에서 위험도가 가장 클 것으로 예상되는 최악의 사고 시나리오와 현실에서 발생 가능성이 높은 대안의 사고 시나리오를 Table 5와 같이 산정할 수 있었다.

3.3.1 최악의 사고 시나리오 공정 설비 입력값

최악의 사고 시나리오는 수소 승압소(H₂ boosting station) 내 수소가스 저장용기(gas storage vessel)를 대상으로 선정하였다. 저장용기의 전량 누출 사고가 모든 공정 중에서 수소가스 저장량이 가장 많고, 누출 사고 발생 시에도 누출량이 가장 많은 것으로 예상된다. 또한 수소가스는 대량 혹은 고압의 상태로 저장되어야 하기 때문에 압축기, 정압기, 저장소 등

Table 5. Schematics of risk source options for the worst and alternative accident scenarios

Scenario	Regional options	
	Inland (Sejong)	Coastal (Ulsan)
Worst accident scenario	<p>H₂ Gas Storage Vessel V=1.3 Nm³ x 65EA at 19 MPa 19.6 MPa, 4,502 Nm³</p>	<p>H₂ Gas Storage Vessel V=1 Nm³ x 30EA at 47 MPa From H₂ supply line (2.1 MPa)</p>
Alternative accident scenario	<p>100A 80S STS316 19.6 MPa, 4,502 Nm³ at 19MPa 19.6 MPa, 4,502 Nm³</p>	<p>50 MPa 2.1 MPa From H₂ supply line (2.1 MPa) (Gas Compressor) F=7,000 Nm³/s</p>

이 추가적으로 필요한데, 다양한 설비가 추가됨에 따라 수소가스의 누출 사고가 연쇄적으로 발생할 수 있으며 사고의 위험성 또한 높아지기 때문에 안전성에 대한 검토가 필요한 실정이다. 따라서 ‘수소가스 저장용기의 전량 누출 사고 시나리오’를 최악의 사고 시나리오로 설정하여 위험성 평가를 실시하였다. ALOHA 구동을 위한 세부 공정 조건은 Table 6과 같이 하였으며, 저장량의 경우 American Society of Mechanical Engineers (ASME) 저장용기 표준 코드에 따른 ASME 1300, ASME 1000 저장용기의 규격과 실제 발전소 연료 공급 설비 및 가스터빈 설비의 제원을 반영하여 산정한 값이다.

3.3.2 대안의 사고 시나리오 공정 설비 입력값

대안의 사고 시나리오의 경우 발생 가능성이 높은 사고를 기반으로 설정하기 위해 2018년부터 2022년까지 최근 5년간 발생한 고압가스 사고 사례의 현황을 분석하였다. 공급자의 취급 부주의 사고의 원인별로 살펴보면 ‘이충전 및 치환 작업 실수’가 가장 높은 점유율을 보였으며, 시설 미비 사고의 세부 원인으로는 ‘호스 및 배관 관련 사고’가 가장 높은 비율로 발생하는 것을 알 수 있었다⁴¹⁾. 실제 가스 누출, 폭발, 화재 사고 사례 분석을 통해 수소 공급 및 안전 시스템 설계 시 반영해야 하는 시사점 및 대안의 사고 시나리오를 도출할 수 있다.

내륙의 발전소는 수소를 tube trailer로 이송하여 저장탱크 내 충전하게 되는데, 탱크로 공급 및 충전

하는 과정에서 누출되는 사고를 모델링하였다. 해안의 발전소의 경우 화학 공장에서 제조된 수소 가스를 파이프를 통해 공급받게 되는데, 발전소 내 저장을 위해 압축기(compressor)를 통해 고압의 상태로 수소를 가압하는 과정을 거치게 된다. 가압 시 압축기에 진동이 크게 발생하며 이에 따라 압축기 전후 단 볼트 및 플랜지 등의 체결부에 이상이 생겨 파이프 누출 사고가 발생할 수 있다. 이 경우를 반영하여 시나리오를 설정하였고, 각 대안의 시나리오별 세부 공정 조건은 Table 7과 같다.

4. 위험성 평가 결과 및 분석

4.1 피해영향범위 산정 기준

ALOHA 프로그램을 통해 독성⁴²⁾, 인화성, 폭발의 과압, 화재 발생으로 인한 열복사율⁴³⁾의 4가지 위험 요소에 대한 피해영향범위를 분석할 수 있다. 유해 물질 및 화학 물질별 위험 요소의 LOC 기준은 상이하며, 이를 정의하는 국가 또는 기관별로도 차이가 존재한다. 본 연구에서 준수한 수소에 대한 위험 농도 및 강도 기준은 Table 8과 같다.

위험 독성 농도의 경우 emergency response planning guideline (ERPG), acute exposure guideline level (AEG), temporary emergency exposure limits (TEEL) 등으로 다양하게 정립되어 있어 기준 적용의 혼선, 명확하지 않은 책임 범위 및 오해의 우려가 있다. 따라서 미국의 Department of Energy (DOE)에서는 각 기 다른 독성 농도 기준들을 적절하게 조합하여 pro-

Table 6. Source options for worst accident scenario

Title	Inland (Sejong)	Coastal (Ulsan)
Source	Tank	Tank
Volume	84.5 Nm ³ (1.3 Nm ³ × 65 EA)	30 Nm ³ (1 Nm ³ × 30 EA)
Pressure	19 MPa	47 MPa
Temperature	Unknown (assume ambient)	Unknown (assume ambient)
Diameter	4 inch (100A, 80S)	4 inch (100A, 80S)
Total amount released	1,227 kg	1,084 kg

Table 7. Source options for alternative accident scenario

Title	Inland (Sejong)	Coastal (Ulsan)
Source	Gas pipeline	Gas pipeline
Diameter	4 inch (100A, 80S)	4 inch (100A, 80S)
Pressure	19 MPa	2.1 MPa
Release duration	5 min	5 min
Total amount released	305 kg	32.1 kg

tective action criteria (PAC)⁴⁴⁾를 제시하고 있으며 AEGL, ERPG, TEEL 순으로 우선 적용하도록 한다⁴⁵⁾. 수소의 경우 독성 가스에 해당하지 않지만 PAC에 따라 피해영향범위를 분석하여 수소 누출 사고 시 질식 및 건강 손상 등을 일으킬 수 있는 농도에 대한 비상 대응 계획 및 보호 조치가 필요한 거리에 대하여 고찰하였다.

인화성의 피해 영향 범위는 폭발하한계(lower explosion limit, LEL)와 폭발상한계(upper explosion limit, UEL)의 농도에 따라 분석된다. 해당 농도 범위 내에서는 점화 분위기를 형성하고, 폭발 가능성이 존재한다. 또한 60% LEL의 기준을 추가로 관찰하였는데, 이는 화염 주머니(flame pocket)가 형성되는 농도이며 ALOHA 프로그램을 제작한 NOAA에서 제시하는 농도 기준이다. 물질이 누출되어 방출될 때 농도가 불균일하게 확산되고 평균 농도보다 높거나 낮은 영역이 존재하게 된다. 일부 평균 농도가 높은 영역에서는 LEL 기준 이하에서도 화재 및 폭발의 위험성이 존재하게 되므로 60% LEL을 추가로 관심 농도로 설정하여 피해영향범위를 산정하였다.

폭발에 의한 과압과 화재에 의한 복사열은 농도가 아닌 강도별 인체 및 설비에 영향을 미치는 정도에 따라 기준을 두고 피해영향범위를 산정했다. 먼저 본 연구에서 준수한 과압 70, 21, 7 kPa의 강도는 순서대로 대다수의 건축물 전파, 건축물의 철 구조물 손상, 주택 일부 및 유리창 파손의 피해 영향 결과를 가져온다. 다음으로 복사열 37.5, 12.5, 4 kW/m²의 강도는 순서대로 장치 및 설비 손상, 목재 또는 플라스

틱 튜브의 착화, 20초 내 통증 유발의 피해 위험이 나타난다. 설비 및 건축물, 구조물에 대한 영향 평가를 실시하여 누출, 폭발, 화재 사고 발생 시 연쇄적으로 발생할 수 있는 2차 사고의 위험을 예방해야 한다. LOC 농도 및 강도 기준은 변경이 가능하기 때문에 분석하고자 하는 값에 따라 피해영향범위를 산정할 수 있다.

4.2 최악의 사고 시나리오

내륙과 해안 지역 발전소를 대상으로 한 최악의 사고 시나리오 기반 위험성 평가 결과 및 피해 범위는 Table 9와 같다. 각 발전소에서 실제 취급하는 유해 및 화학 물질의 저장 및 공급량을 기반으로 누출원(source)을 입력하였고, 그 결과 Table 6에서와 같이 수소 저장탱크의 누출량은 내륙 지역에서는 1,227 kg, 해안 지역에서는 1,084 kg으로 계산되었다. 피해 범위는 누출량과 비례하여 산출되지만, ALOHA 확산 모델링을 통해 피해영향범위를 분석한 결과에서는 독성, 인화성, 과압, 복사열 4가지 모든 위험 요소에서 총 누출량이 더 작은 해안 지역의 발전소에 대한 피해영향범위가 더 넓게 나타났으며, 모든 LOC 기준에서 확산 범위의 동향은 같았다.

해안 지역은 해안가와 인접하여 있기 때문에 내륙 지역에 비해 상대적으로 낮은 지형의 거칠기 값을 갖게 되어 대기 난기류가 낮게 형성된다. 이는 누출된 수소가스의 희석이 느리게 진행되는 것을 모사한다. 또한, 해안 지역은 인근에 장애물(나무, 건물 등)이 부재하여 바람의 직접적인 영향을 받게 된다. 이러한 환경 특성에 의해 해안 지역에서의 수소 누출 사고 발생 시 희석이 되지 않은 높은 농도의 가스가 바람을 타고 넓게 확산되어 넓은 피해영향범위 결과가 계산되었다.

발전소의 환경적, 기후적 요소(풍속, 기온, 대기 안정도 등)는 물질이 확산되는 정도에 대한 영향 요소로 크게 작용함을 알 수 있다. 따라서 각 발전소의 위치 특성을 반영한 정확한 위험성 평가가 실시되어야 한다.

Table 8. The international standards of hydrogen criterion for the risks of toxicity, flammability, overpressure and thermal radiation

No.	LOC - 3	LOC - 2	LOC - 1
Toxicity	PAC-3 (400,000 ppm)	PAC-2 (230,000 ppm)	PAC-1 (65,000 ppm)
Flammability	100% UEL (750,000 ppm)	100% LEL (40,000 ppm)	60% LEL (24,000 ppm)
Overpressure	70 kPa	21 kPa	7 kPa
Thermal radiation	37.5 kW/m ²	12.5 kW/m ²	4 kW/m ²

LOC-2 기준 최악의 사고 시나리오는 다음과 같다.

- 1) 독성: 내륙 (276 m) < 해안 (456 m)
- 2) 인화성: 내륙 (682 m) < 해안 (1.1 km)
- 3) 과압: 내륙 (733 m) < 해안 (1.2 km)
- 4) 복사열: 내륙 (48 m) < 해안 (55 m)

4.3 대안의 사고 시나리오

실제 발생 가능성과 사고의 피해 영향 강도가 높은 사고 사례에 대해 대안의 사고 시나리오를 설정하였다. 내륙 지역의 경우 수소 저장탱크로 공급 및 충전하는 과정에서 305 kg의 수소가스가 누출되는 사고였으며, 해안 지역의 경우 압축기 전후단의 체결 이상으로 배관에서 약 32.1 kg의 수소가스 누출이 발생하는 사고였다. 이는 실제 발전소가 위치한 지역에 따라 수소가스를 공급받고 저장하는 공정 과정에 기반한 것으로, 두 시나리오별 누출량의 값은 큰 차이가 존재한다.

대안의 사고 시나리오의 CA 결과는 Table 10과

같다. 몇몇 위험 농도 및 강도에 대해서는 영향범위가 산출되지 않았는데, 이는 ALOHA 프로그램 특성상 피해 범위가 50 m 이하로 계산될 시 유의미한 결과를 해석할 수 없다고 판단하여 위험 영역에 대한 그래프가 산출되지 않았다.

본 연구에서 고찰하고자 하는 바는 지역별 환경 및 기후적 요소에 의한 피해영향범위 산출 결과를 비교하는 것이었다. 이는 대안의 사고 시나리오 결과보다 최악의 사고 시나리오를 분석하는 것이 적절하다고 판단되었다. 본 연구의 대안의 사고 시나리오 분석 결과에 대해서는 파이프에서 누출 사고가 발생한 경우, 혹은 유사하거나 동일한 공정 과정에서 위험 사고가 발생할 때 어느 정도의 피해 범위가 산정되는지 예측하는 데 도움이 될 것으로 판단된다.

Table 9. Accidental Impact range of risk factors for the worst scenarios

	Risk factor			
	Toxicity	Flammability	Overpressure	Thermal radiation
Inland (Sejong)				
LOC-2	PAC-2: 276 m	LEL: 682 m	21 kPa: 733 m	12.5 kW/m ² : 48 m
Coastal (Ulsan)				
LOC-2	PAC-2: 456 m	LEL: 1.1 km	21 kPa: 1.2 km	12.5 kW/m ² : 55 m

■ : LOC-3, greater than top level of risk
■ : LOC-2, greater than middle level of risk
■ : LOC-1, greater than low level of risk
 ----- : wind direction confidence lines (toxic, flammable, overpressure)

5. 결론

5.1 지역별 사고 시나리오에 대한 CA 결과 비교

수소를 복합화력발전소 내 안정적으로 혼소, 전소 하기 위해서는 기술 개발에 있어 발생 가능한 위험을 예측하고, 위험 요소를 고려하여 취급량 및 공급 방법의 안전성을 높일 수 있는 방안을 수립해야 한다. ALOHA를 이용하여 누출 및 폭발, 화재 사고 모델링의 시뮬레이션을 통해 사고 시나리오를 재현함으로써 발전소 내 수소 공급 및 저장 설비에 대한 강도 측면의 위험성을 평가했다. 수소의 누출 사고 발생 시 내륙과 해안 지역에 위치한 발전소의 지형 및 기후적 특징을 반영하여 결과로 산출된 피해영향범위는 Fig. 2와 같이 비교 요약된다.

수소의 4가지 위험 요소는 모두 내륙 지역에 비해 해안 지역에 위치한 발전소를 대상으로 한 CA 결과가 높게 산출되었다. 연구 결과에 따르면 내륙의 발전소에서 누출된 수소 가스의 양이 많았지만, 지형

및 기후적 요소에 의해 해안의 발전소의 피해영향범위가 더 크게 나타났다.

수소는 저장 및 공급 특성상 발전소 내 기체 상태의 높은 압력으로 보관되어야 하기 때문에 폭발의

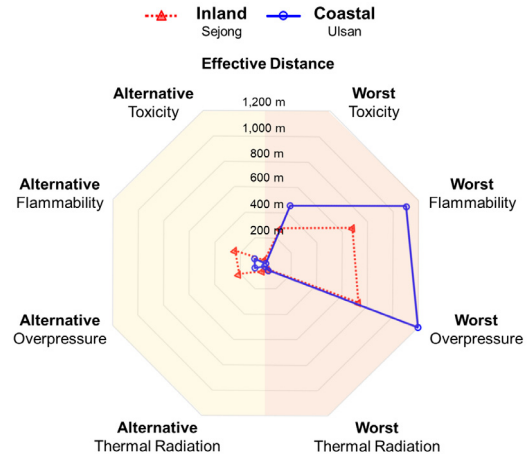


Fig. 2. Result summary of the effective distance for an accident scenario (LOC-2)

Table 10. Accidental Impact range of risk factors for the alternative scenarios

	Risk factor			
	Toxicity	Flammability	Overpressure	Thermal radiation
Inland (Sejong)				
LOC-2	PAC-2: 61 m	LEL: 208 m	21 kPa: 242 m	12.5 kW/m ² : 25 m
Coastal (Ulsan)	Threat zone was not drawn (< 50 m)			
LOC-2	PAC-2: 24 m	LEL: 84 m	21 kPa: 87 m	12.5 kW/m ² : Less than 10 m

■ : LOC-3, greater than top level of risk
■ : LOC-2, greater than middle level of risk
■ : LOC-1, greater than low level of risk
 ----- : wind direction confidence lines (toxic, flammable, overpressure)

위험성이 높다. 본 연구 결과에서도 4가지 위험 요소 중 폭발에 의한 과압의 피해영향범위가 가장 넓게 산정되었으며, 이는 발전소 외부까지 확산되어 인근 사업소 및 주민에게도 피해 영향을 미칠 수 있다. 결과를 통해 발전소 내 과압으로 인한 폭발, 화재 사고를 예방하기 위한 방안을 우선적으로 마련하는 등의 집중적인 안전 관리가 필요함을 알 수 있다.

5.2 지역별 환경 특성 조건의 결과 영향도 분석

본 연구에서는 환경 특성이 피해영향범위 결과에 어느 정도 반영되는지 영향을 고찰하고자 하였다. 이를 위해 해안(울산) 지역의 사고 시나리오를 대상으로 지형의 변수를 2가지로 하여 해안의 ‘open water’와 내륙의 ‘urban or forest’의 조건으로 CA 위험성 평가를 재 실시하였다. 그 결과 본 연구에서 확인한 것과 마찬가지로 내륙 조건을 입력한 피해영향범위가 더 작게 계산되었다. 해안과 내륙 지형에 따라 확산 범위의 결과에 미치는 영향을 확인하기 위해 식 (1)을 이용하였다. ‘Open water’에서 ‘urban or forest’로 환경 특성 조건을 변경했을 때의 결과의 변화율(감소율)을 계산하였고, Fig. 3에 최악과 대안의 사고 시나리오별 영향도(감소율)를 나타내었다.

$$Reduction\ rate = - \left(\frac{ED_w - ED_u}{ED_w} \right) \cdot 100(\%) \quad (1)$$

ED_w : The effective distance of ‘open water’

ED_u : The effective distance of ‘urban or forest’

해안 지역의 ‘open water’ 결과에 비해 내륙 지역의 ‘urban or forest’에서 더 좁은 피해영향범위가 산출되는데, 앞서 말했듯이 도시 지형에 위치한 주변 장애물에 의해 거칠기의 값이 크고, 대기 난류가 증가하여 누출된 수소 가스가 빠르게 LOC 농도 기준 아래로 희석되기 때문이다. Fig. 3에 따르면 3가지 위험 요소(toxicity, flammability, overpressure)에 대해 지표면의 변화에 따라 16.6-41.5%까지 결과값이 감소하게 되며, thermal radiation은 해안 지형과 내륙 지형의 영향 범위 결과값이 동일했다. 이는 화염으로부터 방출되는 복사열 에너지는 대기 투과율에 의한 영향을 실제로는 미미하게 받기 때문이며⁴⁶⁾, 대기 환경의 조건과 공기의 유무와 관계없이 radiation 에너지가 인체 및 설비, 건물에 대해 피해 영향을 나타낸다.

CA 위험성 평가 시 최악과 대안의 사고 시나리오를 가정하고 피해영향범위를 산출한다. 이때 최악의 사고 시나리오란 가장 보수적인 시나리오를 의미하며 동시에 피해가 가장 큰 사고를 말한다. 하지만 국내에서 시행된 대다수의 PSM 자료의 최악의 사고 시나리오 조건을 자세히 분석한 결과, 모든 발전소를 대상으로 각 지역별 환경 특성을 고려하지 않은 채 ‘urban or forest’의 지표면을 입력하여 위험성 평가를 진행하고 있었다. 이는 본 연구의 고찰과 같이 ‘open water’ 지표면보다 덜 위험한 결과를 도출한다. 따라서 최악의 사고 시나리오 설정에 오류가 있음을 알 수 있다.

그리고 복합화력발전소 내 수소연료의 적용 가능성과 친환경 안전 시스템 기술을 확보하고자 지역 발전소별 환경 특성을 반영한 현실적인 위험도를 평가하였다. 평가 결과, 수소 설비의 공정 시나리오뿐만 아니라 지역 특성을 반영한 지표면, 대기와 난류 등의 다양한 변수 시나리오를 고려하여 CA 위험성

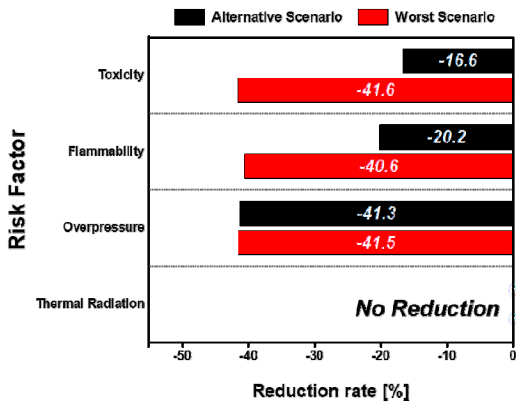


Fig. 3. Rate of reduction in an effective distance for coastal power plants when changing region conditions from ‘open water’ to ‘urban or forest’

평가를 해야 함을 알 수 있었다. 끝으로 본 연구 결과들은 복합화력발전소 내 수소연료의 실증을 위한 각 지역별 맞춤형 안전 데이터베이스를 구축하고, 안전 매뉴얼의 개발 및 비상 대응 계획 수립은 물론 수소 공급 시스템의 안전 설계 시 기초 자료로 활용 가능할 것으로 기대된다.

후 기

이 논문은 2023년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 00236869, 300 MW급[H급] 가스터빈 50% 수소 혼소 변환 기술 개발 및 실증).

References

1. Y. Joo, M. Kim, J. Park, S. Park, and J. Shin, "Hydrogen enriched gas turbine: core technologies and R&D trend", *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 31, No. 4, 2020, pp. 351-362, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2020.31.4.351>.
2. 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>.
3. Ministry of Trade, Industry and Energy (MOTIE), "The 1st hydrogen economy implementation plan", MOTIE, 2021. Retrieved from https://www.motie.go.kr/motie/ms/nt/announcement2/bbs/bbsView.do?bbs_seq_n=67130&bbs_cd_n=6.
4. Y. Hames, K. Kaya, E. Baltacioglu, and A. Turksoy, "Analysis of the control strategies for fuel saving in the hydrogen fuel cell vehicles", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 43, No. 23, 2018, pp. 10810-10821, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.12.150>.
5. Y. Manoharan, S. E. Hosseini, B. Butler, H. Alzahrani, B. T. F. Senior, T. Ashuri, and J. Krohn, "Hydrogen Fuel Cell Vehicles; Current Status and Future Prospect", *Applied Sciences*, Vol. 9, No. 11, 2019, pp. 2296, 2019, doi: <https://doi.org/10.3390/app9112296>.
6. G. Romeo, F. Borello, G. Correa, and E. Cestino, "ENFICA-FC: design of transport aircraft powered by fuel cell & flight test of zero emission 2-seater aircraft powered by fuel cells fueled by hydrogen", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 38, No. 1, 2013, pp. 469-479, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.09.064>.
7. S. H. Park, C. Park, S. Lee, and C. Kim, "A study on the combustion characteristics of a generator engine running on a mixture of syngas and hydrogen", *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers B*, Vol. 35, No. 7, 2011, pp. 693-699, doi: <https://doi.org/10.3795/KSME-B.2011.35.7.693>.
8. M. Hussain, A. Abdelhafez, M. A. Nemitallah, A. A. Araooy, R. Ben-Mansour, and M. A. Habib, "A highly diluted oxy-fuel micromixer combustor with hydrogen enrichment for enhancing turndown in gas turbines", *Applied Energy*, Vol. 279, 2020, pp. 115818, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115818>.
9. W. H. Cho, H. S. Yi, S. J. Lee, and E. S. Kim, "A study on the in-cylinder injection type hydrogen fueled S. I. engine", *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers*, Vol. 19, No. 7, 1995, pp. 1702-1708. Retrieved from <https://www.osti.gov/etdeweb/biblio/378479>.
10. Korean Electric Power Research Institute (KEPRI), "2050 carbon neutral strategic technology-fuel transition", *KEPRI News*, Vol. 302, 2022. Retrieved from [https://www.keei.re.kr/web_keei/d_results.nsf/0/ECA152A4463C693F4925884800196265/\\$file/ef2203.pdf](https://www.keei.re.kr/web_keei/d_results.nsf/0/ECA152A4463C693F4925884800196265/$file/ef2203.pdf).
11. A. Hernandez, "5 hurdles facing Europe's hydrogen plans: Building a hydrogen economy is going to be a long and dirty process", *Politico*, 2020. Retrieved from https://www.politico.eu/article/5-hurdles-facing-europes-hydrogen-plans/?utm_source=rss_feed&utm_medium=rss&utm_campaign=rss_syndication.
12. Federal Ministry for Economic Affairs and Energy (FMEAE), "The national hydrogen strategy", FMEAE, 2020. Retrieved from https://www.bmbf.de/bmbf/shareddocs/downloads/files/bmwi_nationale-wasserstoffstrategie_eng_s01.pdf?_blob=publicationFile&v=2.
13. European Commission (EC), "A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe", EC, 2020. Retrieved from <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52020DC0301>.
14. Ministry of Economy, Trade and Industry (METI), "Japan: basic hydrogen strategy", METI, 2017. Retrieved from <https://policy.asiapacificenergy.org/node/3698>.
15. Committee on Climate Change (CCC), "Hydrogen in a low-carbon economy", CCC, 2018. Retrieved from <https://www.theccc.org.uk/publication/hydrogen-in-a-low-carbon-economy/>.
16. S. Bruce, M. Temminghoff, J. Hayward, E. Schmidt, C. Munnings, D. Palfreyman, and P. Hartley, "National hydrogen roadmap: an economically sustainable hydrogen industry in Australia", *Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation*, 2018. Retrieved from <https://www.csiro.au/en/work-with-us/services/consultancy-strategic-advice-services/csiro-futures/energy-and-resources/national>

- hydrogen-roadmap.
17. N. Tekin, M. Ashikaga, A. Horikawa, and H. Funke, "Enhancement of fuel flexibility of industrial gas turbines by development of innovative hydrogen combustion systems", *Gas for Energy*, No. 2, 2018. Retrieved from https://www.kawasaki-gasturbine.de/files/Hydrogen_as_fuel_for_GT.pdf.
 18. D. S. Kim, "Review on the development trend of hydrogen gas turbine combustion technology", *Journal of The Korean Society of Combustion*, Vol. 24, No. 4, pp. 1-10, 2019, doi: <https://doi.org/10.15231/jksc.2019.24.4.001>.
 19. H. L. Yip, A. Srna, A. C. Y. Yuen, S. Kook, R. A. Taylor, G. H. Yeoh, P. R. Medwell, and Q. N. Chan, "A review of hydrogen direct injection for internal combustion engines: towards carbon-free combustion", *Applied Sciences*, Vol. 9, No. 22, 2019, pp. 4842, doi: <https://doi.org/10.3390/app9224842>.
 20. Y. Shin and E. S. Cho, "Numerical study on H₂ enriched NG lean premixed combustion", *Journal of The Korean Society of Combustion*, Vol. 26, No. 1, 2021, pp. 51-58, doi: <https://doi.org/10.15231/jksc.2021.26.1.051>.
 21. R. C. West, M. J. Astle, W. H. Beyer, "CRC handbook of chemistry and physics," 64th ed, CRC Press, USA, 1985.
 22. 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. 109-114, doi: <https://doi.org/10.3795/KSME-B.2022.46.2.103>.
 23. S. Y. Jeong, D. Jang, and M. C. Lee, "Property-based quantitative risk assessment of hydrogen, ammonia, methane, and propane considering explosion, combustion, toxicity, and environmental impacts", *Journal of Energy Storage*, Vol. 54, 2022, pp. 105344, doi: <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.105344>.
 24. J. W. Lee and C. S. Kim, "A study on the risk assessment for strengthening management safety of hydrogen fueling station", *Journal of the Society of Disaster Information*, Vol. 18, No. 3, 2022, pp. 520-531, doi: <https://doi.org/10.15683/kosdi.2022.9.30.520>.
 25. N. Khakzad, F. Khan, P. Amyotte, and Valerio Cozzani, "Risk management of domino effects considering dynamic consequence analysis", *Risk Analysis*, Vol. 34, No. 6, 2014, pp. 1128-1138, doi: <https://doi.org/10.1111/risa.12158>.
 26. M. S. Yarandi, M. Mahdinia, J. Barzandeh, and A. Soltanzadeh, "Evaluation of the toxic effects of ammonia dispersion: consequence analysis of ammonia leakage in an industrial slaughterhouse", *Medical Gas Research*, Vol. 11, No. 1, 2021, pp. 24-29, doi: <https://doi.org/10.4103/2045-9912.310056>.
 27. N. S. Anjana, M. V. H. Nair, K. S. Sajith, A. Amarnath, and I. Indu, "Accidental release of ammonia from a storage tank and the effects of atmosphere on the affected area using ALOHA", *Indian journal of scientific research*, Vol. 21, No. 1, 2018, pp. 1-7, 2018. Retrieved from <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:198418759>.
 28. H. E. Lee, J. R. Sohn, S. H. Byeon, S. J. Yoon, and K. W. Moon, "Alternative risk assessment for dangerous chemicals in South Korea regulation: comparing three modeling programs", *International Journal of Environmental Research and Public Health*, Vol. 15, No. 8, 2018, pp. 1600, doi: <https://doi.org/10.3390/ijerph15081600>.
 29. R. Jones, W. Lehr, D. Simecek-Beatty, and R. M. Reynolds, "ALOHA® (areal locations of hazardous atmospheres) 5.4.4: technical documentation", National Oceanic and Atmospheric Administration, 2013. Retrieved from https://response.restoration.noaa.gov/sites/default/files/ALOHA_Tech_Doc.pdf.
 30. R. M. Reynolds, "ALOHA™ (areal locations of hazardous atmospheres) 5.0: theoretical description", National Oceanic and Atmospheric Administration, 1992. Retrieved from http://calliope.dem.uniud.it/CLASS/ENV-TRANSP/ALOHA_Theoretical_Description.pdf.
 31. P. Patel and N. Sohani, "Hazard evaluation using ALOHA tool in storage area of an oil refinery", *International Journal of Research in Engineering and Technology*, Vol. 4, No. 12, 2015, pp. 204-209. Retrieved from <https://ijret.org/volumes/2015v04/i12/IJRET20150412040.pdf>.
 32. J. A. Havens and T. O. Spicer, "Development of an atmospheric dispersion model for heavier-than-air gas mixtures", U. S. Department of Transportation, 1985. Retrieved from <https://apps.dtic.mil/sti/citations/ADA171522>.
 33. T. E. Son and E. J. Lee, "Dispersion model of initial consequence analysis for instantaneous chemical release", *Journal of the Korean Society of Safety*, Vol. 37, No. 2, 2022, pp. 1-9, doi: <https://doi.org/10.14346/JKOSOS.2022.37.2.1>.
 34. Korea Occupational Safety & Health Agency (KOSHA), "Technical guidelines for selection of worst and alternative accident scenarios (P-107-2020)", KOSHA, 2020. Retrieved from <https://kosha.or.kr/kosha/data/guidanceP.do>.
 35. EPA (Environmental protection administration) & NOAA (National Oceanic and atmospheric Administration), "ALOHA User's manual", Seattle, Washington, 1999. Retrieved from <https://response.restoration.noaa.gov/>.
 36. D. C. Thoman, K. R. O'Kula, J. C. Laul, M. W. Davis, and K. D. Knecht, "Comparison of ALOHA and EPIcode for safety analysis applications", *Journal of Chemical Health & Safety*, Vol. 13, No. 6, 2006, pp. 20-33, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jchas.2006.02.003>.
 37. W. Brutsaert, "Evaporation into the atmosphere: theory, history, and applications", Springer, USA, 1982, doi: <https://doi.org/10.1007/978-94-017-1497-6>.
 38. Korea Meteorological Administration (KMA), "2020 ann-

- ual climatological report”, KMA, 2020. Retrieved from https://www.kma.go.kr/download_01/yearbook_2020.pdf.
39. Korea Testing & Research Institute (KTR), “Technical guidelines for the selection of accident scenarios”, KTR, 2021. Retrieved from http://reach.ktr.or.kr/gnu/bbs/board.php?bo_table=law&wr_id=582.
 40. F. Pasquill, “The estimation of the dispersion of windborne material”, *The Meteorology Magazine*, Vol. 90, No. 1063, 1961, pp. 33-61. Retrieved from https://archive.org/details/sim_meteorological-magazine_1961-02_90_1063/page/n1/mode/2up.
 41. Korea Gas Safety Corporation (KGS), “2021 gas accident yearbook”, KGS, 2021. Retrieved from <https://www.kgs.or.kr/kgs/abca/board.do>.
 42. C. G. L. Salcedo, L. Whitehead, J. L. Perkins, S. Upegui-Rincón, J. Guarguati-Ariza, R. Quinchía, and C. J. Espinosa-Guerra, “Management of acute exposure to toxic gases in the oil & gas industry -a practical approach”, *Archives of Environmental & Occupational Health*, Vol. 76, No. 7, 2021, pp. 385-392, doi: <https://doi.org/10.1080/19338244.2020.1860875>.
 43. Technica, Ltd., “Techniques for assessing industrial hazards: a manual”, World Bank Technical Paper, No. 55, 1988. Retrieved from <https://documents1.worldbank.org/curated/en/557481468740681645/pdf/multi0page.pdf>.
 44. Department of Energy (DOE), “Protective action criteria (PAC) rev. 29a based on applicable 60-minute AEGLs, ERPGs, or TEELs (chemicals listed by CASRN)”, DOE, 2016, pp. 1-186. Retrieved from https://edms3.energy.gov/pac/docs/Revision_29A_Table3.pdf.
 45. W. Hwang, “A study on the prediction of damage ranges by leakages of seaport-stored substances”, *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 21, No. 2, 2021, pp. 23-31, doi: <https://doi.org/10.9798/KOSHAM.2021.21.2.23>.
 46. Y. C. Shin, H. S. Yeo, S. Y. Park, D. H. Choi, and K. W. Park, “Estimation of radiation heat flux in open pool flames for application of fire protection walls”, *Fire Science and Engineering*, Vol. 36, No. 6, 2022, pp. 22-38, doi: <https://doi.org/10.7731/KIFSE.921a0c62>.