



ALOHA 프로그램을 활용한 복합화력발전소 내 암모니아 연료 적용 시 NG/NH₃ 혼소율에 따른 피해영향범위 분석

최유정 · 박희경* · †이민철*,**

인천대학교 안전공학과 학부생, *인천대학교 안전공학과 석사과정

**인천대학교 소방방재연구센터/안전공학과 교수

(2024년 2월 2일 접수, 2024년 3월 26일 수정, 2024년 3월 26일 채택)

Analysis of Damage Impact Range according to the NG/NH₃ Mixing Ratio when applying Ammonia as Fuel for a Combined Cycle Power Plant using an ALOHA Program

Yoo Jeong Choi* · Hee Kyung Park* · †Min Chul Lee*,**

*Dept. of Safety Engineering, Incheon National University, Incheon 22012, Korea

**Fire Disaster Prevention Research Center, Incheon National University, Incheon 22012, Korea

(Received February 2, 2024; Revised March 26, 2024; Accepted March 26, 2024)

요약

본 연구에서는 기후변화 해결책 중 하나인 천연가스 복합화력발전소를 암모니아로 연료 전환 시 위험성을 파악하기 위해 ALOHA 전산 해석 프로그램을 이용하여 정량적 사고피해영향평가를 실시하였다. 국내 세종복합화력발전소를 대상으로 최악 및 대안의 사고 시나리오를 수립하고, 인화성, 복사열, 과압, 독성의 위험 요인에 대해 영향 범위를 산출한 결과, 암모니아 확산에 의한 독성 위험성이 가장 크게 나타났다. 특히, 천연가스-암모니아 혼소율에 따른 사고피해영향평가 분석 결과, 암모니아 저장 및 이송시스템으로부터 누출로 인한 독성의 피해 영향은 선형적 비례의 관계에 있음을 확인하였다. 정량적으로는 피어슨 상관계수가 LOC-1, LOC-2, LOC-3이 각각 0.991, 0.987, 0.989로 98% 이상의 높은 값을 나타냈으며, 선형계수는 LOC-1, LOC-2, LOC-3이 각각 133, 70, 29로 낮은 농도 기준일수록 암모니아 혼합 비율에 따른 피해 영향이 증가함을 확인하였다.

Abstract - In this study, a quantitative risk impact assessment is performed using an ALOHA program to identify the risks when applying ammonia as fuel for combined cycle power plants as one of the solutions of climate change. The worst and the alternative accident scenarios are established for the Sejong combined cycle power plant and the effective ranges are calculated in terms of flammability, thermal radiation, overpressure and toxicity. The analysis results show that the toxic risk is the most critical and the effective distance is highly proportional to the mixing ratio of natural gas and ammonia by showing the Pearson's correlation coefficient over 98% as 0.991, 0.987 and 0.989 for the Level Of Concern(LOC)-1, LOC-2 and LOC-3, respectively. In addition, the coefficients of linearity for LOC-1, LOC-2 and LOC-3 are calculated to 133, 70 and 29, respectively so it can be confirmed that the effective distance increases as the criterion decreases.

Key words : natural gas, ammonia, quantitative risk assessment, ALOHA(Areal Location of Hazardous Atmospheres), combined cycle power plant, damage impact range

†Corresponding author:LMC@inu.ac.kr

Copyright © 2024 by The Korean Institute of Gas

I. 서론

국제사회는 인류가 배출한 온실가스에 대한 심각성을 인지하고, 지구온난화 및 기후 위기에 대응하기 위한 노력으로 기후변화협약, 교토의정서 및 파리협정 채택 등을 통해 전국가적·중장기적 온실가스 감축 계획의 수립 및 이행을 추진하고 있다. 우리나라 또한 2050년까지 탄소배출량을 0으로 만들기 위한 ‘2050 탄소중립(Carbon neutrality)’ 제도를 선언하였다. 대기 중 온실가스 농도를 감축시키기 위해 청정연료 발전 및 신재생 에너지 발전 등의 에너지 핵심 기술을 개발 중이며, 이 중 화석 연료의 사용을 줄이기 위한 복합화력발전소 내 수소 및 암모니아와 같은 무탄소 연료를 적용하는 방안이 핵심 기술로 선정되었다. 따라서 기존의 발전소 연료인 천연가스(Natural Gas, NG)와 수소, 암모니아를 혼합하여 사용가능한 연료유연성이 있는(Fuel flexible) 가스터빈 연소기의 개발 연구 또한 활발히 진행 중이며, 이에 대한 수요가 급격히 확대될 전망이다[1-3].

복합화력발전소의 기존 연료로 사용되는 NG 연료와 대조적으로 무탄소 연료로 주목받는 수소[4]와 암모니아는 연료 구성 성분 중 탄소를 포함하지 않아 연소 시 탄소를 배출하지 않는 장점이 있다. 수소 및 암모니아 연료 발전에 대한 관심이 증가함에 따라, 그에 대한 위험성[5], 환경성[6], 경제성[7] 등에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[8-9]. 본 연구에서는 위험성 분석에 앞서, 수소와 암모니아를 천연가스와 혼합하여 공급함에 있어 총입열량을 동일하게 유지하는 조건에서 수소 혹은 암모니아의 연료 내 혼합비율을 변경하였을 때, 이산화탄소 감소율을 Fig. 1과 같이 비교하였다. 여기서 이산화탄소 감소율은 천연가스만을 연소시켰을 때 배출되는 이산화탄소량 대비 수소 혹은 암모니아를 10~100 vol%로 혼소하였을 때 이산화탄소량의 감축비로써 나타내었다. 특히, 수소 혹은 암모니아 혼소시 이산화탄소 배출량은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다. 즉, 식(1)을 통해 실제 발전소 가스터빈의 사양과 연료별 저위발열량(Lower Heating Value, LHV)을 기반으로 천연가스와 수소 혹은 암모니아의 부피기준 혼소율에 따른 CO₂ 저감율을 산출할 수 있다. 이산화탄소 저감을 계산 결과 Fig. 1과 같이, 암모니아의 경우 수소에 비해 다소 높은 저감율이 산출되었고, 그 저감율은 수소 혹은 암모니아가 50 vol% 혼합되어 있을 때, CO₂ 저감율이 각각 20.2%와 23.4%로서 암모니아가 15.8%정도 더 저감되는 것으로 분석된다. 또한, 암모니아는 대기압 상태에서 쉽게 액화가능하여 운반 및 저장에 용이하며 기존에 구축한 저장 및 운송 인프라 활용이 가능하기 때문에 추가적인 인

프라 구축에 필요한 비용을 저감시킬 수 있다는 장점이 있다[10].

$$CO_{2,mix} = \frac{\chi_{NG} \times LHV_{NG} \times CO_{2,NG}}{LHV_{mix}} \quad (1)$$

여기서, χ_{NG} : 혼합가스 내 천연가스의 물분율 (-)
 LHV_{NG} : 천연가스의 저위발열량 (MJ/Nm³)
 LHV_{mix} : 혼합가스의 저위발열량 (MJ/Nm³)
 $CO_{2,NG}$: 천연가스 완전연소시 몰당 CO₂배출량 (g/mol)
 $CO_{2,mix}$: 혼합가스 완전연소시 몰당 CO₂ 배출량 (mol)

하지만 암모니아는 타 연료에 대비하여 발열량 및 연소속도가 낮고[11], 이로 인해 화염이 유지되기 어려운 문제점(낮은 화염안정성, Low flame stability)이 존재한다. 암모니아는 분자 구조상 질소(N) 원자를 포함하고 있어 고온의 연소 환경에서 연소 시 질소산화물(NO_x)을 다량 배출한다[12]. 배출된 가스는 인체 및 환경 유해성을 갖고 있기 때문에 기존의 NG 연료만을 발전소의 연료로써 사용할 때보다 위험성이 증가하여 안정적인 발전소 운영을 위한 위험성 평가 및 분석 연구가 실시되어야 한다. 또한, 암모니아 누출 사고 발생 시 발전소 내 작업자 및 인근 주민들의 대응, 대피 방안을 수립하기 위해서는 사고 현장에서의 암모니아 누출량 및 현장 오염도와 같은 측정 수치의 데이터를 기반으로 사고대응책을 제시하여야 한다.

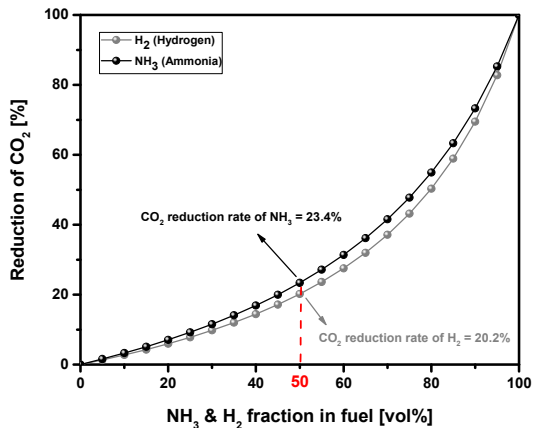


Fig. 1. CO₂ reduction rate with respect to NH₃ and H₂ fraction in fuel

2050 탄소중립 시나리오에 따라 기존의 복합화력의 천연가스 발전을 대체하기 위해 암모니아 혼소 발전의 상용화를 추진 중에 있으며, 2030년까지 암모니아 혼소 20% 발전을 추진 및 계획 중이다. 장기적으로 단계적 혼소 비율을 증가를 통해 연료 적용할 것이며 이를 통해 점진적으로 무탄소 연료 발전으로 전환될 것이다. 암모니아를 발전소 내 안정적으로 혼소·전소하기 위해서는 발전소 내 발생가능한 위험을 예측하고 안전조치를 취하기 위한 추가적인 연구가 필요하다. 따라서, 본 연구에서는 암모니아 연료 적용 시 경제성 및 환경성을 고려하여 실제 복합화력발전소 내 천연가스와 혼소시 10~50 vol%의 단계적인 혼합 비율에 따라 달라지는 위험도를 전산해석 기반의 정량적 위험성평가 프로그램인 ALOHA를 통해 분석하였다.

II. 연구방법

위험성평가 방법에는 정량적 위험성평가와 정성적 위험성평가가 있다. 본 연구에서는 정량적 위험성평가 중에서도 사고의 중대성 분석에 사용되는 CA (Consequence Analysis)를 실시하였다. 이는 사고 시나리오를 기반 피해영향범위를 분석하는 위험성평가 기법 중 하나이며, ALOHA 프로그램을 활용하여 사고 영향범위의 위험지역(Threat Zone)을 정량적으로 계산·분석하였다[13].

2.1. ALOHA 위험성평가

ALOHA는 미국의 해양대기국(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)이 개발하여 환경보호청(Environmental Protection Agency, EPA)과 공동으로 활용하는 피해예측 프로그램으로 사고 결과분석(Consequence Analysis, CA)기법이다[14-15]. ALOHA는 가상의 사고시나리오를 선정하여 정량적 사고 영향 범위 평가를 통해 설비에 대한 안전설계 및 안전거리 확보 등의 방안으로 활용하여 사업장 내 근로자를 포함하여 인근 지역 주민의 피해를 최소화한다. 확산 모델링 기반으로 일반적인 경우 Gaussian 모델을, 공기보다 무거운 가스 또는 극저온 가스 확산의 경우 DEGADIS 누출 모델을 사용하여[16] 자동적으로 누출된 화학물질의 영향범위를 산정하고, 결과를 Google Earth와 호환하여 사고 영향 범위를 지도상에 직접 표출하여 가시화 할 수 있다. ALOHA는 풍향, 풍속, 대기안정도, 표면의 거칠기 등의 기상조건을 고려하여 결과를 산출함으로써 보다 사실적인 위험의 영향 범위를 확인할 수 있다. 풍속 및 풍향은 지형에 의해 영향을 받을 수 있지만, 그러한 지형 변화까지는 고

려하지 않는다는 한계점 또한 존재한다[17]. 반면에 ALOHA 프로그램의 장점으로는 환경보호청 홈페이지에서 무료 배포하고 주기적으로 업데이트하는 등 사용자 친화적인 프로그램으로 접근성이 높다. 본 연구는 발전소에서 암모니아 누출 사고가 발생할 경우 발전소 외부로 미치는 영향을 기상조건에 따라 시각화하여 현실성 높은 결과를 도출하기 위해 ALOHA 프로그램을 사용하였다.

2.3. 암모니아 물리적 특성

유해화학물질관리법 제2조[18]에 따라 암모니아는 사고대비물질이자 주민대피 대비물질 16종에 속한다[19]. 사고대비물질이란 폭발성 및 급성 독성이 강하여 사고 발생의 가능성이 높거나 사고 발생 이후 피해 규모가 클 것으로 우려되는 유해·위험물질이다. 암모니아는 공기보다 가벼운 가스로 누출이 되면 빠르게 확산하며 위로 상승하게 된다[20]. 누출 사고 발생시 암모니아 가스에 노출될 경우 인체에 심각한 건강상의 영향을 미친다. 상온·상압에서 기체 상태로 존재하며 냄새 역치 35ppm의 자극적인 냄새를 가진 독성가스이며, 폭발 가능성이 있는 가스이다[21]. 암모니아는 고압, 인화성의 가스로 가열될 경우 폭발의 위험이 발생할 우려가 있기 때문에 취급 및 저장과정에서 열, 스파크 및 화염 등으로부터 멀리해야 하며 물과 접촉하지 않도록 해야 한다[22].

Table 1의 NFPA 704 코드는 미국 소방청(National Fire Protection Association, NFPA)에서 응급대응 시 물질의 위험성을 규정하기 위한 표준시스템으로, 이는 물질의 유해성과 위험성을 쉽게 알 수 있도록 건강 위험성(Health), 인화성(Flammability), 반응성(Instability)과 기타(물 반응성, 방사선)을 0-4의 정수로 표기한 것이다. 이 코드에 따른 암모니아의 건강위험성은 3등급으로 매우 짧은 신체적 노출로도 일시적 혹은 만성적 부상을 야기할 수 있기에 주의를 필요로 한다. 인화성은 1등급으로 높은 온도로 가열해야 발화하는 물질로 인화점이 93.3°C 이상인 물질에 해당하며, 반응성은 0등급으로 화기에 노출되어도 일반적으로 안정하며, 물과 반응하지 않는 특징을 가진다[23].

Table 1. Hazard identification code of ammonia and natural gas according to NFPA 704

Gas	Health	Flammability	Instability
Ammonia	3	1	0
Natural Gas	0	4	0

천연가스의 건강위험성은 0등급으로 노출시 건강상의 위협이 되지 않고, 반응성은 0등급으로 화기에 노출되어도 일반적으로 안정하며, 물과 반응하지 않는다. 반면, 인화성은 4등급으로 상온 및 대기압 상태 등 정상적인 대기환경에서 연소하기 쉬운 물질로 인화점이 22.8℃ 이하인 물질에 해당한다. 이와 같이 암모니아의 물리적 특성상 천연가스보다 인화성은 낮으나, 건강위험성이 매우 크게 나타나고, 넓은 범위에 많은 인명 피해를 유발할 수 있다. 그러나, 이러한 물리적 특성에 기반한 분석만으로는 실제 현장에 적합한 시나리오별 위험성 평가가 불가하기에 본 연구에서는 ALOHA 프로그램을 이용하여 사고영향평가 위험분석을 실시하였다.

2.4. 대상지 선정 및 암모니아 공급 계통 설계

(1) 대상지 선정

본 연구는 국내 세종시에 위치한 복합화력발전소를 대상으로 암모니아 연료를 적용하기 위해 암모니아 공급·저장 시스템을 설계하여 사고 시나리오를 구축하고, 이에 대한 피해영향범위 분석 및 위험성평가를 실시하였다. 선정된 발전소 인근 내 대형마트, 고등학교 및 주거지역 등이 존재함으로써, 발전소에서 암모니아 누출 사고 발생 시 연쇄적이고 복합적인 피해 확산의 우려가 높다. 또한, 세종시는 내륙에 위치한 지리적 특성으로 인해 암모니아 운송 시 튜브 트레일러를 이용하여 암모니아를 운반 및 충전하며, 다량의 암모니아를 액화 상태로 저장탱크 내에 저장한다. 따라서 주기적인 튜브 트레일러의 암모니아 운반, 저장, 공급하는 공정단계에 사고에 대한 위험도가 클 것으로 판단되어, 이에 대해 정량적 위험성 평가를 실시하였다.

(2) 암모니아 공급 계통 설계

사고 예상 공정은 세종복합화력발전소 내 기존 NG 연료 공급 계통 내 암모니아를 혼소하기 위한 저장 및 공급 계통을 설계하였으며, 암모니아 튜브 트레일러를 통해 액화 암모니아가 저장탱크로 운반되어 저장된다. 암모니아의 특성상 가스터빈의 요구 압력보다 낮은 배관 압력 상태로 운반하고 승압 후 가스터빈에 공급된다. 각 배관의 과압 위험이 있는 곳에는 PSV(Pressure Safety Valve)를 설치하였고, 압축기(Compressor)와 기화기(Vaporizer)를 이용하여 암모니아와 천연가스를 혼소하기 위한 환경을 조성하고 공급 계통의 누출사고를 방지하고자 다양한 안전장치를 부가적으로 설치하였다. 암모니아는 독성가스이므로 중화처리설비를 이용해 허용농도 이하로 낮춘 뒤 대기중으로 방출해야 하므로 플레어스택(Flare Stack)을 함께 설계하였다. 이는 독성가스의 가연성을 이용해

여 연소 처리하는 방식과 가연성가스의 연소화재와 함께 연소 처리하는 방식으로 발전소에서 방출하는 폐가스 성분 중 독성 및 유해 성분을 연소시켜 무해화하기 위한 소각탑으로도 불린다. 또한 배관상의 압력 등의 변화를 발전소 현장 및 제어실에서 파악하기 위해 PI(Pressure Indicator), PT(Pressure Transmitter), PG(Pressure Gauge), PRV(Pressure Relief Valve) 등의 장치를 설치하였다[24].

2.3. 사고 시나리오 선정 및 운전조건

KOSHA Guide는 산업안전보건법령에서 정한 최소한의 수준이 아닌, 사업장의 자율 예방체계의 확립을 지원하고 보다 높은 수준의 안전보건 향상을 위한 자율적 안전보건가이드로, 법률과 같이 강제성을 띠지 않는 권고 기술수준으로써 한국산업안전보건공단에 의해 제·개정되는 지침이다. 사고 시나리오의 선정은 KOSHA Guide 중 「최악 및 대안의 누출 시나리오 선정에 관한 기술 지침」 및 화학물질안전원에서 제공하는 화학물질안전원지침 중 「사고 시나리오 선정 및 위험도 분석에 관한 기술지침」에 따라 선정하였다 [25-26]. 선정된 최악 및 대안의 사고 시나리오에 대해 Fig. 2와 같이 사고 시나리오 모델링을 도시하였다.

(1) 최악의 사고 시나리오 선정

최악의 사고 시나리오는 누출, 화재 및 폭발의 발생으로 영향범위가 사업장 외부로 미치거나, 외부로 영향을 미치지 않는 근로자에게 심각한 영향을 줄 수 있는 사고이다. 본 연구는 유해위험물질을 최대 수량 저장한 단일 저장용기 또는 배관 등에서 누출 및 화재, 폭발의 발생으로 사람 및 환경에 미치는 영향 범위가 최대인 사고 시나리오를 선정하였다.

따라서 저장량이 가장 많은 액화암모니아 저장탱크에서의 누출 및 화재·폭발을 사고 시나리오로 선정하였으며, 이때 액화암모니아 저장탱크의 저장량은 50 ton으로 설계하였다.

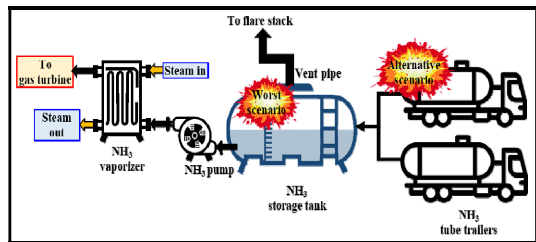


Fig. 2. Process flow diagram for ammonia supply system

ALOHA 프로그램을 활용한 복합화력발전소 내 암모니아 연료 적용 시 NG/NH₃ 혼소율에 따른 피해영향범위 분석

Table 2. Tank source options with respect to ammonia volume fraction in fuel

NH ₃ fraction in fuel	10%	20%	30%	40%	50%
P _{working}	12.5 barg				
Volume	50 ton				
Chemical mass	2.47 ton	5.34 ton	8.71 ton	12.72 ton	17.60 ton
Leaked Diameter	4 inch (100A 80S)				
Total Amount Released	2,241 kg	4,844 kg	7,902 kg	11,539 kg	15,966 kg

Table 2와 Table 3는 암모니아와 천연가스 혼소 시 위험성 평가 시나리오의 입력값이다. ALOHA 입력값은 KOSHA Guide, 튜브 트레일러 및 저장탱크의 표준 규격과 발전소 설비 실측에 의거하여 설정하였다. 암모니아 혼소 비율에 따라 필요한 암모니아의 질량을 산출하여 저장량 및 사용량을 계산하고자 하였으며, 천연가스 대비 암모니아의 10~50% 혼소를 가정하여 필요한 유량을 산정하였다. 이는 향후 100% 암모니아 전소를 위한 암모니아 발전 시스템 구축에 있어 매우 중요한 과정으로, Table 2의 혼소율에 따른 암모니아의 필요 질량은 식 (2)~(7)에 따라 설정하였다.

$$\chi_{NH_3} + \chi_{NG} = 1 \quad (2)$$

$$\chi_{NH_3} = \frac{\dot{V}_{NH_3}}{\dot{V}_{NH_3} + \dot{V}_{NG}} \quad (3)$$

$$\chi_{NG} = \frac{\dot{V}_{NG}}{\dot{V}_{NH_3} + \dot{V}_{NG}} \quad (4)$$

여기서, χ_{NH_3} : NH₃의 몰분율(-)

χ_{NG} : NG의 몰분율(-)

\dot{V}_{NH_3} : NH₃의 체적유량(Nm³/hr)

\dot{V}_{NG} : NG의 체적유량(Nm³/hr)

$$HV_{NH_3} = \dot{V}_{NH_3} \times LHV_{NH_3} \quad (5)$$

$$HV_{NG} = \dot{V}_{NG} \times LHV_{NG} \quad (6)$$

$$HV_{Tot} = constant \quad (7)$$

여기서, HV_{NH_3} : NH₃의 발열량(MJ/Nm³)

HV_{NG} : NG의 발열량(MJ/Nm³)

HV_{Tot} : Total 발열량(MJ/Nm³)

LHV_{NH_3} : NH₃의 저위발열량(MJ/Nm³)

Table 3. Atmospheric options of the worst and alternative accident scenarios

Title	Atmospheric option	
	Worst	Alternative
Wind speed	1.5 m/s	3.0 m/s
Wind direction	SW	
High	10 m	
Ground Roughness	Urban or forest	
Cloud cover	5 tenths	
Air temperature	40°C	Mean of annual temperature
Stability	F	D
Humidity	50%	

(2) 대안의 사고 시나리오 선정

대안의 사고 시나리오는 현실적으로 발생 가능성이 높은 시나리오 중 사람이나 환경에 미치는 영향이 최대인 사고 시나리오를 선정하였다[27-28]. 대안의 사고 시나리오는 암모니아 튜브 트레일러에서의 누출 및 화재·폭발을 사고 시나리오로 선정하였으며, 이때 튜브 트레일러의 용량은 국내에서 운행되고 있는 암모니아 튜브 트레일러의 용량을 기반으로 하여 18 ton으로 설정하였으며 가용 용량은 「Property Risk Consulting Guidelines」의 지침[29]에 따라 암모니아가 튜브 트레일러 내에서 팽창 우려가 있으므로 튜브 트레일러 저장량의 최대 85% 저장하였다. 따라서 15% 정도의 증기 공간을 비워 15.3 ton으로 설계하였다.

(3) 사고 시나리오의 기상 및 공정 조건 선정

사고 시나리오의 기상 조건은 Table 4와 같이 설정하였다. 최악 및 대안의 사고 시나리오의 기상 조건은 KOSHA Guide P-107-2020과 실제 세종 지역의 조건(풍향, 풍속, 지형 등)을 고려하여 설정하였다. 최악의 사고 시나리오에는 10 m 높이에서 초당 1.5 m/s의 풍속으로 제시하였으며, 대기안정도 측면에서는 40 °C, F 등급으로 기상 조건을 설정하였다. 대안의 사고 시나리오에서는 10 m 높이에서 초당 3.0 m/s로 설정하였으며, 대기안정도는 25 °C, D 등급으로, 최악의 사고 시나리오에 비해 풍속이 빠르고 온도가 낮은 안정적인 대기 설정을 기준으로 하였다.

대상 지역 및 발전소 공정 조건 입력값 등을 바탕으로 구성된 확산 모델링을 통해 실제 발전소에서 사고 발생 시 발전소 내외부에 미치는 영향을 확인할 수 있다는 현실성 높은 결과를 도출하였다.

III. 시뮬레이션 결과 및 분석

3.1. 영향 분석 산정 기준

LOC(Level of Concern) 기준은 위험(독성, 인화성, 과압, 복사열)의 임계값으로 일반적으로 사람 및 재산에 대한 위험이 존재할 수 있는 값으로 물질별 위험 요소의 LOC 기준은 상이하다. 본 연구에서는 사고영향분석에 있어, Table 4에 제시된 암모니아에 대한 위험 농도 및 강도를 사용하였다. 각 위험요소의 영향 범위 기준은 한국산업안전보건공단의 KOSHA Guide P-102 지침을 토대로 설정하였다[30].

독성(Toxicity)의 영향 분석 산정 기준은 미국산업 위생학회(American Industrial Hygiene Association, AIHA)에서 발표한 기준으로 비상대응계획수립지침(Emergency Response Planning Guideline, ERPG)을 기준으로 한다. ERPG는 관심의 우선순위, 취급 및 저장 평가, 누출 시 확산 지역의 파악 및 지역 사회의 비상대응계획을 수립하는 데 사용되는 지침으로, 공기 중의 농도에 따라 ERPG-1, ERPG-2, ERPG-3으로 구분한다[31].

- ① ERPG-1: 아주 가벼운 가역적 증상 이상을 겪지 않거나 심한 냄새를 인지하지 않고 노출될 수 있는 한 시간의 최고 농도
- ② ERPG-2: 자기 구조 능력을 손상시킬 만한 비가역적 또는 심각한 건강 손상이나 증상을 경험하지 않고 노출될 수 있는 한 시간의 최고 농도
- ③ ERPG-3: 생명에 위협을 주는 건강 손상을 겪지 않고 노출될 수 있는 한 시간의 최고 농도

인화성의 영향 분석 산정 기준은 암모니아의 UEL(Upper Explosive Limit), LEL 100%(Lower Explosive Limit)와 LEL 60%로 LOC 농도를 설정하여 피해 영향 범위를 분석하였다. 인화성의 피해 영향 범위는 LEL과 UEL의 농도 범위 내에서 형성되며, 이 범위 내에 도달할 경우 점화 분위기와 폭발 가능성이 존재한다. 가연성 증기운이 분산될 경우 공기 중 연료의 농도는 균일하지 않게 되며, 이때 농도가 평균 이상인 영역과 평균 이하인 영역이 발생한다. 이것을 Concentration patchiness라고 한다. 농도가 고르지 않아 평균 농도 이상인 일부 영역(LEL 60%)에서 Flame pocket이 형성된다. 따라서 LEL 100% 이하인 LEL 60% 농도에서도 화재 및 폭발의 위험성이 존재하므로 이에 대한 피해 영향 범위를 산정하였다.

과압의 영향 분석 산정 기준은 과압에 의한 피해 영향을 기준으로 7,000 Pa, 21,000 Pa, 70,000 Pa로 구분된다.

- ① 7,000 Pa: 유리창이 부서지며 일부 창틀 파손, 주택의 일부 파손, 고막 파열 피해
- ② 21,000 Pa: 건축물의 철 구조물이 손상되며 기초에서 이탈, 신체부상 피해
- ③ 70,000 Pa: 대부분의 건축물이 전파

복사열의 영향 분석 산정 기준은 복사열에 의한 인체 및 설비 영향을 기준으로 4 kW/m², 12.5 kW/m², 37.5 kW/m²로 구분된다.

- ① 4 kW/m²: 20초 내에 보호되지 않으면 통증을 느끼며 피부가 부풀어 오르는 영향
- ② 12.5 kW/m²: 목재 또는 플라스틱 튜브의 착화를 유도하는데 충분한 최소의 에너지
- ③ 37.5 kW/m²: 장치 및 설비가 손상되는 영향

Table 4. Level of Concern(LOC) for ammonia

	Toxicity	Flammability	Overpressure	Thermal Radiation
LOC-3	ERPG-3 (1,500 ppm)	UEL (280,000 ppm)	70,000 Pa	37.5 kW/m ²
LOC-2	ERPG-2 (150 ppm)	LEL 100% (150,000 ppm)	21,000 Pa	12.5 kW/m ²
LOC-1	ERPG-1 (25 ppm)	LEL 60% (90,000 ppm)	7,000 Pa	4 kW/m ²

ALOHA 프로그램을 활용한 복합화력발전소 내 암모니아 연료 적용 시 NG/NH₃ 혼소율에 따른 피해영향범위 분석

Table 5. Impact range diagrams and distance for the worst accident scenario with respect to volume fraction of ammonia in fuel

Volume fraction of NH ₃ in fuel		10%	20%	30%	40%	50%
Risk factor						
Toxicity	Effective range diagrams					
	Effective distance	2,100 m	3,000 m	3,700 m	4,400 m	4900 m
Flammability	Effective range diagrams					
	Effective distance	128 m	161 m	184 m	202 m	220 m
Overpressure		N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Jet fire	Effective range diagrams					
	Effective distance	17 m	23 m	25 m	25 m	25 m
Fire ball	Effective range diagrams					
	Effective distance	92 m	118 m	137 m	155 m	171 m

3.2. 최악의 사고 시나리오 영향 범위 분석

Table 5는 최악의 사고 시나리오를 대상으로 하여 천연가스와 암모니아 혼소 비율을 10~50 vol%까지 증가시켰을 때의 ALOHA를 통해 도시되는 독성, 인화성, 과압, 복사열의 사고 영향 범위이다. 과압의 영향 분석 결과는 LOC 1~3 기준 농도에 모두 도달하지 않아 영향 범위가 도출되지 않아 N.D.(Not Determined)로 표기하였다.

최악의 사고 시나리오 결과 분석을 통해 혼소 비율 간의 위험도 상관관계를 알아보고자 Table 6의 LOC-2

기준을 바탕으로한 독성, 인화성 및 복사열(Fire ball, Jet fire)의 혼소 비율 증가에 따른 변화 추이를 Fig 3의 그래프로 확인하였다. 누출량은 저장량에 따라 다르게 나타나며[32], 암모니아의 혼소율이 증가함에 따라 사고 영향 범위는 비례적으로 증가하는 경향을 보였다. 근로자와 인근 지역에 미치는 장의 영향 범위 크기는 독성, 인화성, 복사열(Fire ball), 복사열(Jet fire) 순으로 나타났다. Jet fire의 영향 범위는 일정 혼합비 이상(30 vol%)이 되면 혼소율이 증가하여도 영향 범위가 25 m로 동일하여 영향 범위가 증가하지 않고 일

정한 것을 확인하였다. 암모니아의 기본 물성치에 따라 독성의 영향 범위는 가장 큰 피해 영향 범위로 혼소율 10% 대비 혼소율 50%의 영향 범위는 약 2.3배 커졌으며 인화성은 10% 대비 50% 피해 영향 범위가 약 1.7배, Jet fire는 10% 대비 50% 피해 영향 범위가 약 1.4배, Fire ball은 10% 대비 50% 피해 영향 범위가 약 1.9배 증가하였다. 따라서 혼소율이 증가할 경우 인명피해 및 외부로의 환경피해 등의 영향력이 함께 증가하는 것을 확인하였다. 또한 국내 2050 탄소로드맵에 따라 우리나라는 2030년까지 암모니아 20% 혼소를 추진하고 있는 실정므로, 혼합연료 내 암모니아를 20% 혼소 시 독성의 장외 영향 위험도를 Google earth를 이용해 Fig. 4로 가시화하였다. 20% 혼소 시 암모니아가

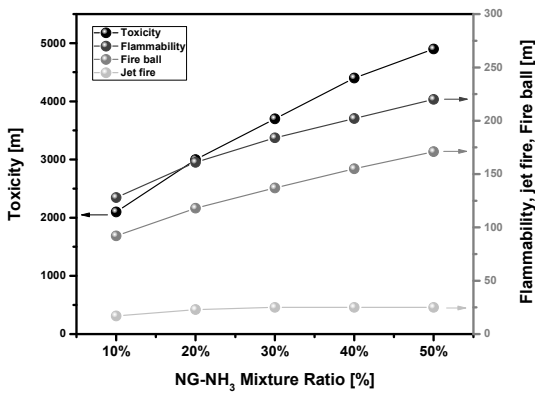


Fig. 3. NG/NH₃ Mixture Ratio of worst case scenarios

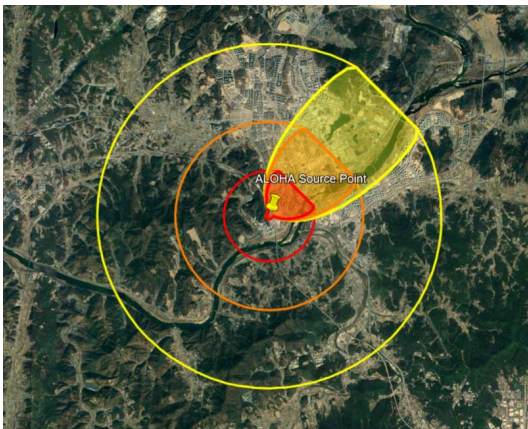


Fig. 4. 20% NG/NH₃ Mixing rate Google Earth visualization of worst case scenario

누출될 경우 독성의 사고 영향 위험도는 ERPG-3 기준으로 생명의 위험을 느끼지 않는 수준 1,300m, ERPG-2 기준으로 회복 불가능하거나 심각한 건강상의 영향이 나타나지 않는 수준 3000 m, ERPG-1 기준으로 건강상의 이상이 나타나지 않는 수준 5700 m의 장외 영향을 미쳤으며 넓은 영향 범위로 인해 발전소 인근 민가와 근로자에게 심각한 독성 영향을 미칠 가능성이 높은 것을 확인하였다.

3.3. 대안의 사고 시나리오 영향 범위 분석

Table 6과 Table 7는 대안의 사고 시나리오를 대상으로 하여 암모니아를 운송하는 튜브 트레일러에서의 사고 시나리오를 선정하여 분석하였다. 독성, 인화성, 복사열(Jet fire, Fire ball)은 다음과 같이 도시하였으나 BLEVE(Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion)는 LOC 기준 농도에 도달하지 않아 결과값이 도출되지 않았다. Fig. 5를 통해 가시화하여 비교 결과 독성의 피해 영향 범위는 LOC-2 기준 인화성에 비하여 약 18배, 복사열(Jet fire)에 비하여 약 129배, 복사열(Fire ball)에 비하여 약 20배 넓은 영향 범위를 나타내었다. 이는 그래프에서 확인할 수 있듯이

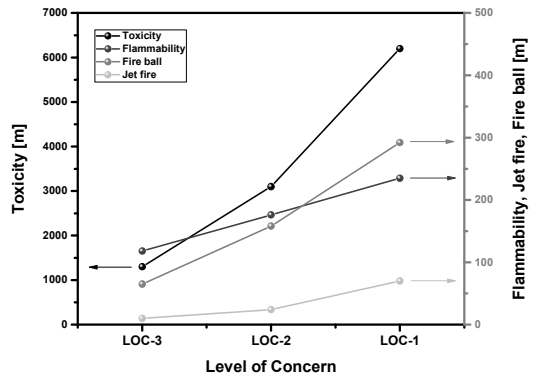


Fig. 5. LOC of alternative accident scenarios

Table 6. Alternative accident scenarios impact range of based on LOC standard

	LOC-3	LOC-2	LOC-1
Toxicity	1,300 m	3,100 m	6,200 m
Flammability	118 m	176 m	235 m
Jet fire	10 m	24 m	70 m
Fire ball	65 m	158 m	292 m

암모니아는 분자량 17, 증기밀도 0.597로 공기보다 가벼워 LOC-1에서 피해영향범위가 비선형적으로 크게 증가하는 것을 확인하였다. 암모니아의 물성치에 의하여 독성이 가장 높게 나타났으며 암모니아 탱크 크로리에서 암모니아가 누출될 경우의 독성의 장외 영향 위험도를 Google Earth를 이용해 Fig. 6으로 가시화하였다. 대안의 사고 시나리오는 최악의 사고 시나리오 중 20% 혼소 Fig. 4와 비교했을 때 보다 큰 영향범위를 나타내었다. 영향범위는 누출량과 온도 및 풍속에 비례한다. 따라서 누출량이 적을 경우에는 풍속이 빠른 조건에서 물질의 농도가 희석되면서 위험범위가 줄어들고, 누출에 따른 최고확산거리는 누출량이 많고, 풍속이 빠르며 온도가 높은 환경에서 발생된다[33]. 최악 및 사고 시나리오의 기온은 40°C, 25°C이며 풍속은 1.5 m/s, 3.0 m/s로 설정하였다. 이에 혼소 20%의 누출량(4,844 kg)은 대안의 사고 시나리오의 누출량(10,705 kg)대비 적은 양이 누출되었으며 풍속에 의해 독성 농도가 희석되어 비교적 짧은 피해 영향범위가 나타났다. 혼소 30%의 누출량(7,902 kg)이 대안의 사고 시나리오의 누출량보다 적은 양이지만 확산되기 충분한 양으로 온도와 풍속에 의해 대안의 사고 시나리오보다 더 넓은 피해 영향 범위를 나타내었다. 즉, 튜브 트레일러에 저장되는 암모니아가 탱크에 20% 혼소비로 암모니아를 저장하는 것보다 높은 장외 위험도를 가진다는 것을 의미한다.

3.4. 최악/대안의 사고 시나리오 독성 영향 비교 분석

최악 및 대안의 시나리오의 독성의 피해 영향 범위를 Fig.7로 비교 분석하였다. 대안의 사고 시나리오의 독성 영향 범위는 ERPG-3 기준 1300 m, ERPG-2 기준 3100 m, ERPG-1 기준 6200 m의 범위로 다음과 같이 혼소율 50% > 40% > 30% > 대안의 사고 시나리오 > 20% > 10% 순으로 피해 영향 범위가 나타났다. 대안의 사고 시나리오 대비 각 최악의 사고 시나리오의 독성

피해 영향 범위를 비교 분석한 결과, 대안의 사고 시나리오 대비 혼소율 10%의 LOC-2 기준 독성 피해 영향 범위는 약 0.7배, 혼소율 20%는 약 1.0배, 혼소율 30%는 약 1.2배, 혼소율 40%는 약 1.4배, 혼소율 50%는 약 1.6배의 독성 피해 영향 범위가 나타났다. 이를 통해 최악의 사고 시나리오의 10% 와 20% 혼소율은 대안의 사고 시나리오에 대비하여 낮거나 유사한 위험도임을 확인하였다.

최악의 사고 시나리오 분석 결과, 천연가스와 암모니아의 혼합 비율이 증가할수록 사고 영향 범위는 증가한다. 그러나 여기서 주목할 점은 증가의 경향성은 확인되지만, 수치상 정확히 선형적 비례의 관계에 있지는 않다. 이는 혼합 비율 변화에 따른 혼합물의 물리 화학적 특성 변화와 환경 조건이 요인으로 작용하여 나타났다. 이에 혼소율 증가에 따른 독성영향의 선형성 분석(Linearity Analysis)을 통해 최적합 선형방정식을 도출하고, Fig. 7에 적색 그래프로 도시하였다.

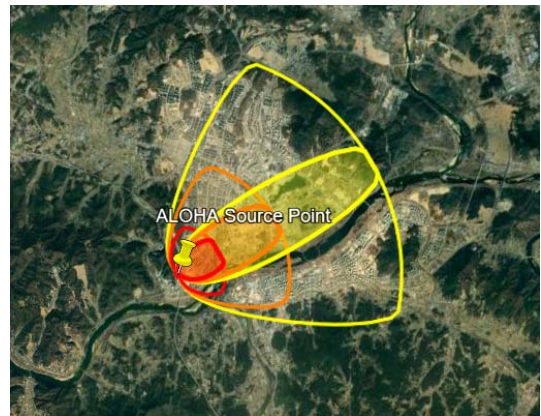


Fig. 6. Toxicity impact range Google Earth visualization of alternative case scenario

Table 7. Alternative accident scenarios

	Toxicity	Flammability	Jet fire	Fire ball
Effective range diagrams				
Effective distance	3100 m	176 m	24 m	158 m

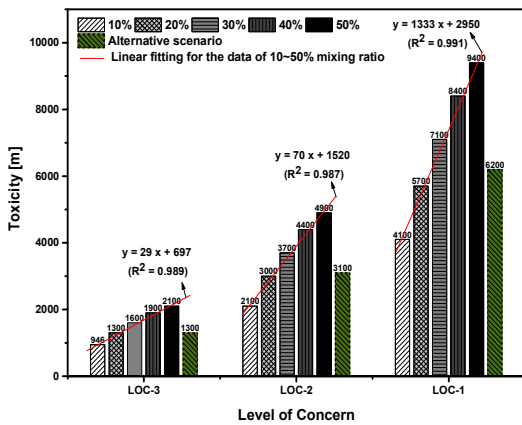


Fig. 7. Impact distance of the toxicity with respect to level of concern

LOC-1, LOC-2, LOC-3의 선형적합선 기울기는 각각 133, 70, 29으로 LOC-1 > LOC-2 > LOC-3 순으로 나타났다. 이를 통해 LOC-1이 혼소율 변화에 크게 영향을 받는 것이 확인되었다. 이는 기준 농도가 낮은 경우 넓은 영향거리를 갖게 되고, 고농도의 암모니아가 더 낮은 농도가 될 때까지 확산되는 거리가 더 넓게 분포하기 때문이다.

또한 선형성 측면에서는 피어슨 상관계수(Pearson Correlation Coefficient, R^2)로 확인할 수 있는데, 그 값은 LOC-1, LOC-2, LOC-3의 경우 각각 0.991, 0.987, 0.989로 모두 98% 이상의 높은 값이 확인되었다. 이에 정확한 선형관계는 아니지만, 천연가스와 암모니아의 혼합 비율과 사고 영향 범위는 매우 높은 선형적 관계에 있다는 것을 입증할 수 있다.

V. 결론 및 제언

본 연구에서는 복합화력발전소 내 안전한 암모니아 공급 계통을 구축하기 위한 정량적 위험성 평가를 실시하였다. ALOHA 기법을 활용하여 설정한 사고를 바탕으로 최악의 사고 시나리오의 사고 영향 범위를 평가하여 발전소 연료로써 암모니아 혼소 시 위험의 중대성을 파악하였으며, 10~50% 혼소율에 대해 암모니아의 위험성 영향 범위를 비교·분석하고, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 최악의 사고 시나리오 분석 결과, 천연가스와 암모니아의 혼합 비율이 증가할수록 사고 영향 범위는 증가하였다. 혼소율과 사고 영향 범위는 완전한 선형적 비례는 아니었으나 피어슨 상관계수가 LOC-1,

LOC-2, LOC-3의 경우 각각 0.991, 0.987, 0.989로 98%의 이상의 높은 값을 나타내며 높은 선형적 관계가 있음을 확인하였다. 또한 각 LOC 기준의 선형적합선 기울기 비교를 통해 혼소율의 변화에 따른 기울기 변화 정도는 LOC-1 > LOC-2 > LOC-3 순으로 나타났다.

(2) 또한 암모니아 연료의 50% 혼소 기준, 최악의 시나리오에 대한 위험성의 순위는 독성(4900 m) > 인화성(220 m) > Fire ball(171 m) > Jet fire(25 m) 순으로 나타났다. 암모니아 발전 연료 독성의 확산 범위는 인화성 대비 약 22.3배, Fire ball 대비 약 28.7배, Jet fire 대비 약 196배로 타 피해 영향 범위 대비 크게 나타났다. 따라서 독성의 장외 영향 범위 가시화 및 분석 결과를 통해, 예측되는 사고 피해 정도와 강도를 파악하여 사고 발생 시 근로자 및 인근 주민들에게 끼치는 인체 및 환경 유해성 피해가 높게 나타날 시 대피를 요하는 비상행동계획 수립 및 비상대응행동요령을 제시할 수 있다.

(3) 대안의 사고 시나리오 분석 결과, LOC-2 기준으로 위험도가 큰 순위를 확인하였다. 독성(3,100 m) > 인화성(176 m) > Fire ball(168 m) > Jet fire(24 m) 순으로 나타났다. 독성의 피해 영향 범위는 LOC-2 기준 인화성에 대비 약 18배, Jet fire 대비 약 129배, Fire ball 대비 약 20배 넓은 영향 범위를 나타내었다. 이는 그래프에서 확인할 수 있듯이 암모니아는 가벼운 기체로, LOC-1 농도 범위에서 피해영향범위가 비선형적으로 크게 증가하였다.

(4) 대안의 사고 시나리오 대비 최악의 사고 시나리오의 독성 피해 영향 범위 분석 결과, 천연가스와 암모니아의 혼소율 20%는 위험의 영향범위를 크게 확대하지 않는 조건에서 운영 가능한 혼소 비율이다.

본 연구 결과는 궁극적으로 발전소내 암모니아 연료 적용 시 위험요소를 분석하고, 암모니아의 취급 및 저장·공급 시스템의 안전성을 고려한 설계방안 도출 및 연료공급비율의 결정 등에 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 또한, 위험범위 등을 고려한 천연가스/암모니아 혼소 발전플랜트의 안전관리매뉴얼의 개발 및 공정안전분석 등을 통한 사고대비전략의 수립에도 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 한국전력공사의 2022년 착수 기초연구 개발 과제 연구비 지원으로 수행되었으며, 지원에 감사드립니다. (과제번호 : R22XO02-06)

또한 이 논문은 2023년도 정부(산업통상자원부)의

재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(00236869, 300MW급(H급) 가스터빈 50% 수소혼소 변환 기술개발 및 실증)

REFERENCES

- [1] 한국에너지기술연구원, 탄소중립 연료: 암모니아 정책 및 산업 동향, p. 0.7, (2021)
- [2] Kim, D. S., "Review on the Development Trend of Hydrogen Gas Turbine Combustion Technology", *J. Korean Soc. Combust.*, 24(4), 1-10, (2019)
- [3] Okafor, E. C., Somarathne, K. D. K. A., Ratthanana, R., Hayakawa, A., Kudo, T., Kurata, O., Iki, N., Tsujimura, T., Furutani, H., Kobayashi, H., "Control of NO_x and other emissions in micro gas turbine combustors fuelled with mixtures of methane and ammonia", *Combustion and Flame*, 211, 406-416, (2020)
- [4] Woo, K. T., Kim, B. G., So, Y. S., Baek, M. S., Park, S. S., Jung, H. J., "Analysis of CO₂ Emission and Effective CO₂ Capture Technology in the Hydrogen Production Process", *KIGAS*, 27(3), 77-83, (2023)
- [5] Jang, D. J., Kim, S. Y. and Lee, M. C., "Property based Quantitative Risk Assessment of Hydrogen", *Trans. Korean Society of Mechanical Engineers.*, 46(2), 103-114, (2022)
- [6] Jeong, S. Y., Jang, D. J. and Lee, M. C., "Property-based quantitative risk assessment of hydrogen, ammonia, methane, and propane considering explosion, combustion, toxicity, and environmental impacts", *Journal of Energy Storage*, 54(1), 1-11, (2021)
- [7] Dias, V., Pochet, M., Contino, F. and Jeanmart, D., "Energy and Economic Costs of Chemical Storage", *Frontiers in Mechanical Engineering*, 6(21), 1-17, (2020)
- [8] Jeong, S. Y., Park, H. K., Lee, M. C., "Accident Impact Assessment Using the ALOHA Program for the Application of Hydrogen and Ammonia as Fuels of a Combined Cycle Power Plant", *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, 47(12), 647-661, (2023)
- [9] Park, H. K., Lee, M. C., "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*, 34(6), 698-711, (2023)
- [10] Jang, Y. H., Park, C. W., Kim, Y. R., Choi, Y., Min, C. K., Lee, S. W., Baek, H. K., Lee, J. W., "Comparison of Combustion, Emissions and Efficiency Characteristics as Varying Spark Timings and Excess air ratios in an Ammonia-fueled Direct Injection Spark Ignition Engine", *KIGAS*, 27(3), 1-10, (2023)
- [11] Kim, S. I., Kwak, H. G., Yang, W., "Process Simulation of the Effect of Ammonia Co-firing on the Supercritical Boiler System for Reduction of Greenhouse Gas", *J. Korean Soc. Combust.*, 26(4), 1-12, (2021)
- [12] Lee, H. K., Woo, Y. M., Lee, M. J., "The Needs for R&D of Ammonia Combustion Technology for Carbon Neutrality - Part II R&D Trends and Technical Feasibility Analysis", *J. Korean Soc. Combust.*, 26(1), 84-106, (2021)
- [13] Kim, J. H., Jung, S. H., "Offsite Consequence Modeling for Evacuation Distances against Accidental Hydrogen Fluoride (HF) Release Scenarios", *Korean Chem. Eng. Res.*, 54(4), 582-585, (2016)
- [14] R. Jones, W. Lehr, D. Simecek-Beatty, and R. M. Reynolds, *ALOHA® (areal locations of hazardous atmospheres) 5.4. 4: tech*, National Oceanic and Atmospheric Administration, (2013)
- [15] R. M. Reynolds, *ALOHA™ (areal locations of hazardous atmospheres) 5.0: theoretical description*, National Oceanic and Atmospheric Administration, (1992)
- [16] T. E. Son and E. J. Lee, "Dispersion model of initial consequence analysis for instantaneous chemical release", *Journal of the Korean Society of Safety*, 37(2), 1-9, (2022)
- [17] Yoon, S. K., Yu, J. Y., Han, J. Y., Jung, S. H., "Risk Analysis of Transporting Hazardous Substances in Harbor Using Modeling Program", *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 32(4), 272-278, (2018)
- [18] 유해화학물질관리법 제 2조 6항
- [19] Kim, H. S., Jeon, B. H., "A Study on Development of Damage Impact Distance Calculation Formula to Determine Evacuation and Notification of Residents in Case of Ammonia Release Accident", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, 21(10), 308-316, (2020)
- [20] Yoo, B. T., Moon, M. H., "Development of Emer-

- gency Response Plan for Chemical Accident Using ALOHA Program: Focusing on Evacuation Plan”, *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, 18(3), 311-319, (2018)
- [21] 한국산업안전보건공단, 물질안전보건자료, CAS_No. 7664-41-7
- [22] Jeong, Y. S., Woo, I. S., Lim, J. W., “Risk Management for Ammonia Unloading and Storage Tank Facility”, *Journal of the Korean Institute of Gas*, 21(5), 95-103, (2017)
- [23] İSKENDER, H., *HAZOP and ALOHA Analysis of Acetone, 4th International Symposium on Natural Hazards and Disaster Management*, (2020)
- [24] 한국산업안전보건공단, KOSHA GUIDE P-110 화학공장의 피해최소화대책 수립에 관한 기술지침, (2023)
- [25] 한국산업안전보건공단, KOSHA GUIDE P-107 최악 및 대안의 누출 시나리오 선정에 관한 기술지침, (2020)
- [26] 화학물질안전원, 제2021-3호 사고시나리오 선정 및 위험도 분석에 관한 기술지침, (2016)
- [27] Jeong, G. S., Baik, E. S., “Damage Effects Modeling by Chlorine Leaks of Chemical Plants”, *Fire Sci. Eng.*, 32(3), 76-87, (2018)
- [28] Park, K. S., “Offsite Risk Assessment on Chloric Acid Release”, *Korean Chem. Eng. Res.*, 54(6), 781-785, (2016)
- [29] ALXA XL, Property Risk Consulting Guidelines
- [30] 한국산업안전보건공단, KOSHA GUIDE P-102 사고 피해예측 기법에 관한 기술지침, (2021)
- [31] AIHA Guideline Foundation, “2013 ERPG/WEEL Handbook”, AIHA (2013)
- [32] Lim, H. J., Kwak, S. L., Jung, J. H., Ryu, T. K., Choi W. S., Lee, J. E., Lee, J. S., Lee, Y. H., Kim, J. K., Yoon, J. H., Ryu, J. S., “A Study on the Factors Affecting the Influence Ranges of Ammonia Leakage by Using KORA Program”, *KIGAS*, 22(3), 38-44, (2018)
- [33] Hwang, W. Y., “A Study on the Prediction of Damage Ranges by Leakages of Seaport-Stored Substances”, *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, 21(2), 23-31, (2021)