

인접 건물 간 최소 안전거리를 고려한 군부대 내 수소충전소 위치선정 연구

A Study on the Selection of Hydrogen Refueling Station Locations within Military Bases Considering Minimum Safe Distances between Adjacent Buildings

김 동 연¹ 권 혁 진^{1*}
Dong-Yeon Kim Hyuk-Jin Kwon

요 약

수소에너지 기술은 4차 산업 시대에서 주목받는 중요한 분야로 수소와 산소를 활용하여 전기 에너지를 생성하는 기술이다. 이 기술을 군사 차량에 적용할 경우, 온실가스 감소, 무소음, 저 진동 및 낮은 발열량의 효과로서 군사적으로 전략적 이점을 얻을 수 있어 다국에서 수소 군사 차량을 위한 연구 중이다. 우리나라 또한 미래 군사 차량에 수소를 적용하고 소형화 및 AI를 통한 스마트화 시키는 미래를 대비한 전략인 Army Tiger4.0 계획을 수립하였다. 또한 국방부는 군용 수소충전소 설치에 따라 군 내 수소차 보급에도 단력이 붙을 것으로 예상하여 환경부와의 협력으로 군용 수소충전소를 전국적으로 확충하기 위한 계획을 수립하였다. 하지만 수소는 화재와 폭발 위험물질로 안전한 충전소 구축과 효과적인 관리를 위한 체계적인 제도가 필요하다. 현재 군에서는 지정한 수소충전소 시설의 분류와 설치 조건을 군 시설 설계지침서를 통해 확인하였다. 그 결과, 충전소는 주유 시설로 분류되며 인접 건물과의 최소 안전거리를 2m 이상으로 이격시키는 것만 명시되어 있을 뿐 안전거리에 대한 그 외의 내용은 명시되지 않았다. 폭발의 규모가 큰 수소의 특성을 고려하여 과학적 기법을 통해 사고 피해 범위를 정량적으로 파악하고 피해 거리 밖으로 최소 안전거리를 제시하였다.

☞ 주제어 : 제트화재, 증기운폭발, 안전, 수소충전소

ABSTRACT

Hydrogen energy technology is gaining importance in the era of the Fourth Industrial Revolution, offering military advantages when applied to military vehicles due to its characteristics such as reduced greenhouse gas emissions, noise, and low vibration. Korea's military has initiated the Army Tiger 4.0 plan, focusing on hydrogen application, downsizing, and AI-based smart features. The Ministry of National Defense plans to collaborate with the Ministry of Environment to expand hydrogen charging stations nationwide, anticipating increased deployment of military hydrogen vehicles. However, considering the Jet Fire and VCE(Vapor Cloud Explosion) nature of hydrogen, ensuring safety during installation is crucial. Current military guidelines specify a minimum safety distance of 2m from adjacent buildings for charging stations. Scientific methods have been employed to quantitatively assess the accident damage range of hydrogen, proposing a minimum safety distance beyond the affected area.

☞ keyword : Jet fire, Vapor Cloud Explosion, Military Safety, Hydrogen Charging Station

1. 서 론

수소 연료셀 에너지 기술은 4차 산업 시대의 중요한 기술 중 하나로, 수소와 산소를 활용하여 전기 에너지를 생성하는 기술이다. 이 기술은 이동성장비 및 군사 분야

에서 매우 각광받고 있다. 수소 연료셀 에너지의 적용으로 온실가스 감소, 무소음, 저 진동 및 고밀도 에너지 저장 등으로 전략적 이점을 얻을 수 있어 군사 분야에서 필수적으로 적용되고 있다. 이에 따라 국내 및 국제 방위산업 기업들은 수소연료 셀을 자율 무인 무기체계 및 군사 기동 차량에 적극적으로 도입하고 효율성을 높이는 연구에 투자하고 있다. 수소연료 셀을 기반으로 한 군사 기동체계의 급증은 두 가지 주요 과제를 해결해야 한다. 첫째로 군이 자체적인 수소충전소 확충으로 독자적인 작전 수행 능력을 갖추는 것이고 두 번째로, 안전성 확보인

¹ Dept of Defense protection engineering, Seoul National University of Science and Technology, Seoul, 01811, Korea

* Corresponding author(kwonhj@seoultech.ac.kr)

[Received 16 October 2023, Reviewed 24 October 2023(R2 06 November 2023), Accepted 08 December 2023]

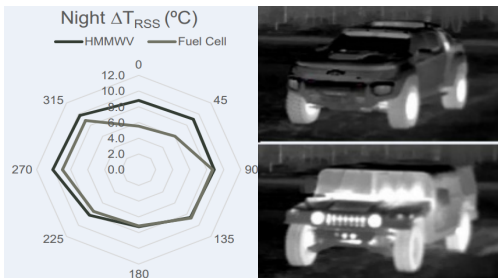
데 수소는 화재 및 폭발성이 높기 때문이다. 현재 민간에서 수소와 관련된 연구가 활발히 진행 중이지만, 군사 부문에서는 아직 충분한 수소 관련 인프라가 구축되지 않아 안전에 관한 연구가 부족한 실정이다. 또한 민간에서 연구되고 적용되는 안전기준은 제한된 부지 내에 위험물 취급시설 및 다양한 시설을 갖춘 군부대 특성상 무조건 적용할 수 없다. 본 연구에선 군부대 내 수소 인프라 시설을 가상으로 적용하고 사고가 발생했음을 가정하여, 사고 피해를 예측한 결과를 기반으로 최소 안전 거리를 제시하였다.

2. 관련 연구

2.1 연구 배경

2.1.1 수소에너지에 대한 군의 활용

전 세계는 현재 수소 군용차를 활발히 개발 중이다. 미국의 U.S Army Combat Capabilities Development Command (미 육군 전투능력개발사령부)에서 내연기관 차량과 수소연료 차량이 시간당 10마일의 속도로 운행 시 발생하는 소음을 비교하였다 그 결과 수소연료 군사 차량이 100m 거리에서도 소음이 측정되지 않았으며 이는 소음 성능이 내연기관 차량의 75~90% 향상된 결과이다. 발열량 또한 눈에 띄게 낮아진 효과를 파악할 수 있었으며 아래 그림1에 참고하였다.



(그림1) 수소연료 군사 차량의 성능

(Figure 1) Performance Comparison of Hydrogen Fuel Military Vehicles

이러한 특성으로 우리 육군 또한 미래전(戰)을 대비하여 Army Tiger4.0 전략을 추진 중이며 아래 그림2에 국방기술품질원에서 미래 군사기술 발전을 위한 연구 추진 방향을 나타냈다.[1] 초기 단계는 내연기관과 기계식 제

어, 이후 전기 에너지 원격조종, 최종단계는 친환경 전기 에너지와 소형화 및 AI 탑재 순으로 추진할 계획이다. 또한, 국방부는 군용 수소충전소 확충에 따라 군용 수소차 보급에도 탄력이 붙을 것으로 예상하여 환경부와의 협업을 통해 군용 수소충전소를 전국적으로 보급하기 위한 계획을 수립 중으로 그림3에 보도자료를 참고하였다.



(그림 2) 미래 군사기술 발전 및 연구 추진방향 계획
(Figure 2) Future Military Technology Development and Research Direction Plan

또한 국방부는 군용 수소충전소 확충에 따라 군용 수소차 보급에도 탄력이 붙을 것으로 예상하여 환경부와의 협업을 통해 군용 수소충전소를 전국적으로 보급하기 위한 계획을 수립 중이다.

국방부 Ministry of National Defense		보도 자료		환경부 Ministry of Environment	
발표 일시	2021. 10. 26 (목)	이 자리는 바로 사용가능합니다.	총 6석(물류 3석 포함)	발표부	국방부 군사기술품질원(국립기술품질원)
배포 일자	2021. 10. 26 (목)	모 도 보 시	국방부 (47)환경부(47)국립기술품질원(47)국립기술품질원(47)	발표부	국립기술품질원(47)국립기술품질원(47)
담당 국장	국립기술품질원 청송원(02-746-5800) 국립기술품질원 김승희(044-201-6890)	담당 과장	국립기술품질원 박종우(02-746-5890) 국립기술품질원 김승희(044-201-6890)	담당 과장	국립기술품질원 박종우(02-746-5890) 국립기술품질원 김승희(044-201-6890)

- 민군 협업으로 전국 최초 국방부 부지에 수소충전소 구축**
- 대전 자운대, 1호 민·군 겸용 수소충전소 준공식 개최
- 민·군 협력, 탄소중립 사회로 가기 위한 대표적인 본보기
- 국방부는 민·군 겸용 수소충전소를 전국적으로 확대 보급하기 위해 수소충전소 설치 가능한 군용지 50곳을 추가로 환경부에 제안했다.
 - 민·군 겸용 수소충전소 설치에 따라 군 내 수소차 보급에도 탄력이 붙을 것으로 예상
 - 국방부는 2019년 수소 승용차(SUV) 1대를 시작으로, 2020년에 수소 승용차 4대를 보급했으며, 올해에는 수소 버스 12대와 수소 승용차 20대를 확대 보급하고 있다.
 - 또한, 앞으로 국내에서 양산 예정인 수소 트럭과 수소 지게차에 대한 시범 운영도 추진하고 있어 군에 보급되는 수소차의 종류도 더욱 다양해질 전망이다.
 - 서울 국방부 장관은 “국방 고위급의 직위와 주연을 통해 ‘2050년 탄소중립 비전 실현을 가속화 하기 위한 군의 역할과 책임을 다할 것’”이라고 밝혔다.

(그림 3) 제1호 민·군 겸용 수소충전소 설치 보도자료
(Figure 3) Future Military Technology Development and Research Direction Plan

2.1.2 군 위험물질 적용법령

군에 수소충전소를 구축할 시 안전 문제를 고려하기 위해 국방 안전 관련 규정을 찾아본 결과 군은 군사시설 내에서 취급하는 위험물의 정의 및 분류를 군법으로 명시하지 않고 위험물질의 종류에 따라 민간법령을 적용하여 규정하고 있으며 아래 표1에 나타내었다.

(표 1) 군내 취급 위험물질 유형별 적용법령
(Table 1) Applicable Regulations for Hazardous Materials within the Military by Type

군내 취급 위험물질	적용법령
탄약 및 폭약	총포화약법
휘발유, 질산, 윤활유, 경유, 아세톤, 등유 등	위험물안전관리법
LNG(액화천연가스)	도시가스사업법
LPG(액화석유가스)	액화석유가스 안전관리 및 사업법
산소, 수소, 액화브롬화메탄, 액화산화에틸렌	고압가스 안전관리법

따라서, 군에 수소충전소를 구축 할 경우 고압가스 안전관리법에 따라 안전관리 및 설치를 실행해야 한다.

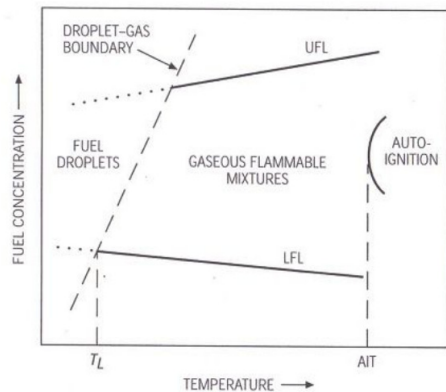
2.1.3 군 안전관리자 선임

군에서 수소충전소 설치 및 안전관리를 하기 위한 관리자를 선임하기 위해선 고압가스 안전 관리법에 따라 지자체에 신고를 해야 한다. 우선, 군부대가 가스안전공사에 기술 검토의뢰를 요청하여 기술검토 필증을 교부받은 뒤, 지자체에 저장소 허가 신고를 제출한 이후 지자체에서 저장허가 필증을 교부 받은 뒤 가스안전공사에 중간검사 및 완성검사를 신청하고 그에 대한 필증을 교부받아 지자체에 안전관리자 선임 신고를 해야하는 절차를 거쳐야 한다. 이러한 체계적인 절차가 있지만, 군에서는 특수성으로 인해 지자체와의 협의하에 통보만으로 허가를 받으며 법의 사각지대에 있어 성능검사, 완공검사를 부대 내 자체적으로 판단하고 있다. 또한 민간에서는 고압가스류 위험물질에 전문적인 지식을 갖춘 자를 선임하는 반면 군에서는 각급 부대 내 간부를 선임하고 이 또한 보직 순환제도에 의해 일정 기간 근무 후 보직이 전환되기 때문에 전문성을 갖고 지속적인 안전관리를 할 수 없는 실정이다. 결과적으로 군에서는 전문가를 고용하기 어려워 전문적인 안전관리를 기대하기 어려운 실정이다.

2.2 수소의 위험성

2.2.1 수소의 화학적 특성

수소는 공기보다 가벼워 누출 시 빠르게 확산하며 무색, 무취, 무미의 특성을 갖춰 인간의 감각으로 감지하기 어렵다는 특징이 있다. 또한 공기 중 산소와 결합 될 경우, 화재 및 폭발 분위기를 조성하며 폭발한계 범위가 매우 넓어 누출될 경우 폭발 가능성이 매우 크다. 폭발한계 범위란 연소 상한계와 연소 하한계의 사이의 범위이다. 그림4에 나타내었으며 UFL(연소상한계)은 수소가 연소할 수 있는 최대 농도이고 LFL (연소하한계)은 수소가 연소할 수 있는 최저 농도를 뜻한다.[2] 이 범위가 넓을수록 폭발이 발생할 가능성이 높다고 해석할 수 있다. 표 2에 타 가연성 기체와 수소와의 폭발한계 범위를 비교하여 나타내었다.



(그림 4) 폭발한계 그래프

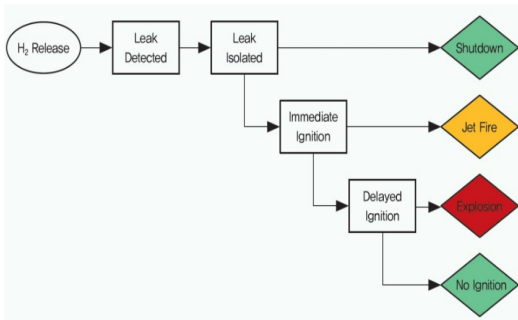
(Figure 4) Performance Comparison of Hydrogen Fuel Military Vehicles

(표 2) 수소와 인화성 기체의 폭발한계 비교
(Table 2) Comparison of Explosion Limits between Hydrogen and Inflammable Gases

물질	화학적식	폭발한계	
		하한점	상한점
수소	H ₂	4	75
메탄	CH ₄	5	15
프로판	C ₃ H ₈	2.2	9.5
부탄	C ₄ H ₁₀	1.9	8.5
톨루엔	C ₇ H ₈	1.3	6.7
벤젠	C ₆ H ₆	1.4	6.7

2.2.2 수소가스 사고유형

수소의 위험성을 평가하기 위해 개발된 미국의 HyRAM 프로그램의 데이터를 통해 파악했으며 수소가 누출되어 즉각 점화된다면 Jet화재가 발생하고 지연점화가 된다면 증기운 폭발이 일어나는 것을 확인하였다. 아래 그림5에 문헌조사[3] 및 HyRAM에서 제시한 데이터를 참고하여 수소 사고의 event tree를 나타내었다.



(그림 5) 수소 사고 이벤트 트리
(Figure 5) Hydrogen Accident Event Tree

또한 사고사례를 분석하는데 군에서는 아직 수소 기술을 적용한 사례가 적어 군 내 수소 사고에 관한 자료는 잠수정 수소 폭발 사고 외 다른 사고사례를 찾는데 한계점이 있는 관계로 국내·외 민간에서 발생한 수소 사고[4]에 대한 사례 몇 가지를 찾아 다음 표3에 정리하였다.

(표 3) 수소가스 사고사례
(Table 3) Hydrogen Gas Accident Cases

구분	유형	원인
진해군항 잠수정	폭발	잠수함 수리 작업 중 잠수정 해치를 개방한 순간 사고 발생. 폭발 원인은 불분명
노르웨이 수소충전소 폭발 사고	폭발	원인불명, 충전소 내 저장 용기가 폭발한 것으로 추측
美오탰이오주 무스킨검 발전소	폭발	환기시스템 오류로 천막에 증기운 형성, 이후 원인 모를 점화원으로 폭발
여수 산업단지 공장	화재 폭발	원인 불명

사례 분석 결과, 점화원을 추정하기 어렵다는 특징이 있었다. 이는 수소 특성상 작은 에너지에도 폭발하기 때

문으로 추측되었다. 폭발 및 화재가 발생하는 환경이 조성되는 요인은 수소와 산소의 결합이며 이 원인은 수소 시스템 내 결합 발생, 작업 현장 등에서 수소가 누설되어 외부 공기와 혼합될 때 발생한다. 이는 발화원도 중요하지만, 수소가 누설되는 순간 사고가 일어날 확률이 매우 높다는 것으로 파악되었다.

2.3 연구 방법

2.3.1 연구 도구

Hy-KoRAM과 e-CA 2가지 프로그램을 사용하였다. Hy-KoRAM은 수소가스 누출에 따른 피해 범위를 예측하기 위한 프로그램[5]으로서 수소만을 전문적으로 다뤄 전문성이 높아 가장 우선적으로 선택하였다. 또한 연구 대상의 공정을 분류할 수 있다는 점과 수소의 화재 복사열의 강도 및 피해 거리를 도표로 나타내어 가시성을 보장할 수 있어 이해가 편하다는 특징점을 갖추고 있다.

e-CA 프로그램 또한 위험물질의 사고 피해를 예측하는 프로그램으로 다양한 화학물질의 정보를 제공한다는 점과 폭발과압의 강도 및 범위를 도표로 나타내고 위성 지도 지원으로 현장에 적용이 가능하다는 장점을 갖추고 있어 Hy-KoRAM으로는 Jet화재의 피해범위를, e-CA프로그램으로 증기운폭발 피해범위를 분석하였다.

2.3.2 연구 대상

연구 대상으로 사용될 충전소는 가장 대중적으로 사용되는 충전소로 선정하였다. 충전소는 Off-Site 형식과 On-Site 형식 2가지 타입으로 나뉘는데, On-Site 방식의 충전소는 현재 민간에서도 대중적으로 설치하기 어려운 문제를 갖고 있어 군부대 내에 구축하기에도 제한사항이 많다. 그러한 이유로 연구 대상을 가장 대중적으로 사용되는 Off-Site 형식의 패키지형 수소 충전소로 선정하였다

2.3.3 연구 절차

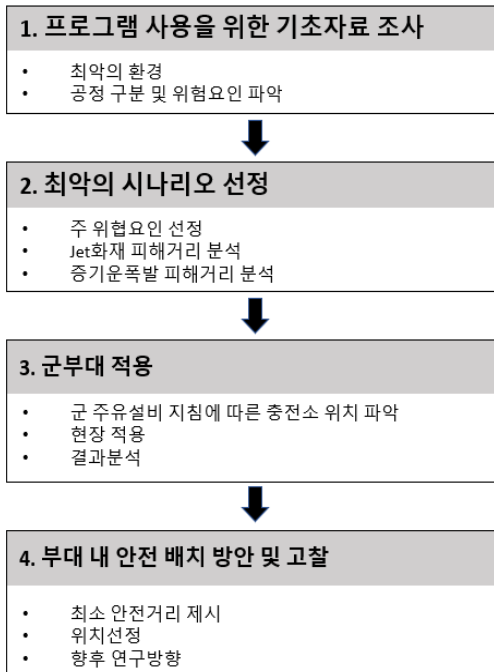
연구 절차는 다음과 같으며 그림6에 나타내었다. 첫째, e-CA, Hy-KoRAM 프로그램에서 입력값으로 필요한 충전소 내 위험요인들의 사양과 사고가 발생할 수 있는 사고환경을 파악했다. 이후 충전소 도면을 대상으로 공정을 구분하여 충전소 내 공정마다 존재하는 위험요인들을 파악했다.

둘째, 최악의 사고시나리오를 파악하기 위해 위의 기초자료를 통하여 프로그램을 구동하여 위험요인들의 피

해 규모를 분석 및 비교하여 피해 규모가 가장 큰 요인을 지정하고 주 위험요인에서 사고가 발생하는 것을 최악의 사고 시나리오로 지정하였다.

셋째, 군의 지침인 주유 설비 시공 규정에 따라 실제 사단급 군부대에 충전소를 가상으로 적용하여 최악의 사고가 발생하는 것을 가정해서 군부대에 미칠 피해 영향을 파악하였다.

넷째, 부대 내 안전하게 배치하기 위한 방안을 고려하였다.



(그림 6) 연구 절차
(Figure 6) Research Procedure

3. 피해 거리 분석 및 현장 적용

군에서는 현재 사고 피해 예측을 위한 연구자료가 밝혀진 것이 없어 최악의 환경조건 및 누출공 크기를 선정하기 위한 참고자료는 민간의 자료를 참고하였다.

3.1 연구를 위한 기초자료 조사

3.1.1 최악의 환경 설정

최악의 환경조건은 문헌조사를 통해 한국원자력연구

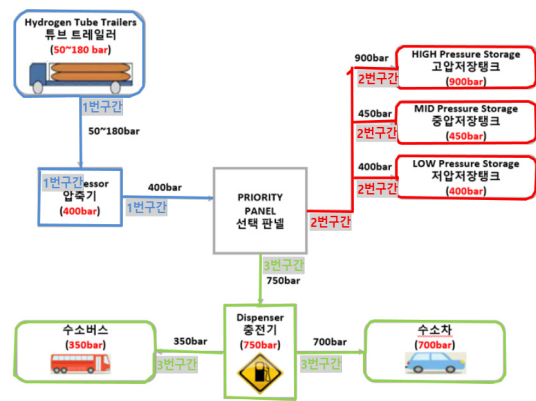
원에서 지정한 최악의 누출 시나리오 분석 변수 보고서들[6] 기반으로 작성하였으며 다음 표4에 나타내었다.

(표 4) 최악의 시나리오 환경 조건
(Table 4) Worst-Case Scenario Environmental Conditions

풍속	대기안	대기온도	습도	누출원 높이
1.5m/s	F등급	40도	50%	지표면에서누출

3.1.2 공정 구분 및 위험요인 파악

패키지형 수소충전소의 도면을 대상으로 공정을 구분하여 아래 그림7에 나타내었다. 구분된 공정은 수소 공급과정, 충전과정, 저장과정 3가지로 나누었으며 1번 구간은 외부 트레일러에서 충전소 내 압축기로 수소가 공급되는 구간이고 2번 구간은 선택판넬에서 3종류의 저장탱크로 수소가 저장되는 구간이며 마지막으로 3번 구간은 선택판넬에서 충전기(Dispenser)로 수소를 공급하는 구간이다.



(그림 7) 공정 구분
(Figure 7) Process Classification

추가로 각각의 공정마다 존재하는 주 부품을 위험요인으로 선정하였고 각각의 요인별 사양을 아래 표5에 나타냈다.

(표 5) 공정별 위험 요소 및 각각의 사양
(Table 5) Key Factors and Characteristics by Process

구분	주요소	저장압력	온도	저장 질량
1공정	압축기	400 bar	15 °C	45.0 kg
2공정	저압 저장탱크	400 bar	15 °C	35.6kg
	중압 저장탱크	450 bar	15 °C	35.6kg
	고압 저장탱크	900 bar	15 °C	50.6kg
3공정	충전기	750 bar	-40 °C	48.6 kg

3.2 최악의 시나리오

충전소 내 다양한 위험요인들의 피해 범위 분석과 비교를 통해 피해 규모가 가장 큰 요인을 주 위험요인으로 지정하였으며 그 결과, 피해 규모가 가장 큰 위험요인은 고압 저장탱크로 확인되었다. 이에 따라 충전소 내 고압 저장탱크에서 사고가 발생하는 경우를 최악의 시나리오로 지정하였다. 아래 표6에 충전소 내 위험요인들의 사고 피해 범위를 분석한 내용을 정리하여 나타내었다.

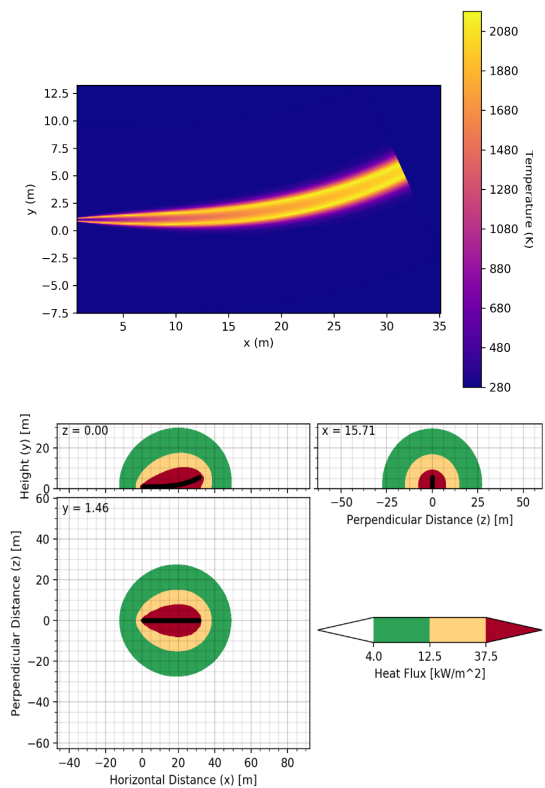
(표 6) 위험요인의 사고 피해 범위 비교
(Table 6) Key Factors and Characteristics by Process

주요 요소	사고 유형	
	Jet화재 복사열 범위	증기운폭발 과압 범위
압축기	- 23m까지 37.5kw의 복사열 방출 - 35m까지 4.0kw의 복사열 방출	- 40m까지 21kPa의 과압 - 103m까지 7kPa의 과압
저압, 중압 저장 탱크	- 25m까지 37.5kw의 복사열 방출 - 37m까지 4.0kw의 복사열 방출	- 37m까지 21kPa의 과압 - 95m까지 7kPa의 과압
고압 저장 탱크	- 33m까지 37.5kw의 복사열 방출 - 37m까지 12.5kw의 복사열 방출 - 50m까지 4.0kw의 복사열 방출	- 42m까지 21kPa의 과압 - 107m까지 7kPa의 과압
충전기	- 30m까지 37.5kw의 복사열 방출 - 45m까지 4.0kw의 복사열 방출	- 35m까지 21kPa의 과압 - 90m까지 7kPa의 과압

3.2.1 주 위험요인의 Jet화재 피해 범위

Jet화재는 고압의 수소가 누출되며 점화될 경우, 고압으로 나오는 가스로 인해 불기둥을 형성하며 분출되는 화재이다.[7]

충전소 내 고압 저장탱크에서 Jet 화재가 발생할 경우, 37.5kw의 복사열을 약 35m까지 방출하고 12.5kW의 복사열을 37m까지 방출하며 최대 50m까지 4.0kW의 복사열을 방출한다. 아래 그림8에 Jet 화재 피해 범위를 나타냈다.

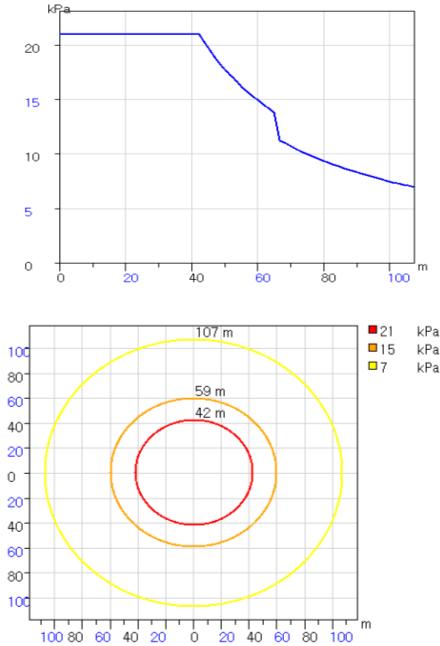


(그림 8) Jet화재 피해결과
(Figure 8) Damage Results of Jet Fire

3.2.2 주 위험요인의 증기운폭발 피해 범위

증기운폭발은 가연성 가스가 누출되어 공기와 섞이면서 구름 형태로 축적된 후 발화원에 의해 과압을 발생시키며 폭발하는 사고이다.[8] 고압 저장탱크에서 증기운폭발이 발생할 경우, 42m까지 21kPa의 폭발과압이 전달되고 59m까지 15kPa의 폭발과압이 전달되며 최대 107m

까지 7kPa의 폭발과압이 전달되는 것을 확인 할 수 있었다. 아래 그림9에 증기운 폭발 피해 범위를 나타냈다.



(그림 9) 증기운폭발 피해결과
(Figure 9) Damage Results of VCE

3.3 군부대 적용

군에서 규정한 충전소 시공지침대로 수소충전소를 군부대에 적용하여 최악의 사고가 발생한다고 가정했을 때 군부대에 미칠 피해 영향력을 파악하였다.

3.3.1 군에서 규정한 주유 설비 위치 조건

국방부의 유류 저장시설 시공지침서[9]는 주유시설을 영내, 영외로 구분하여 각각 설치 규정을 명시했다. 영내에 설치할 경우, 개구부가 없는 건축물 벽과의 최소 안전거리는 1m 이상, 개구부가 있는 건축물 벽과의 최소 안전거리는 2m 이상을 유지하여 한다. 영외에 주유 시설을 설치할 경우, 도로경계선에서는 4m 이상의 거리를 유지해야 하고 군 담벼락과의 거리는 2m 이상을 유지해야 한다고 나타냈으며 군부지 경계선 이내로 2m 이상의 거리를 유지해야함 으로 명시되어 있다.

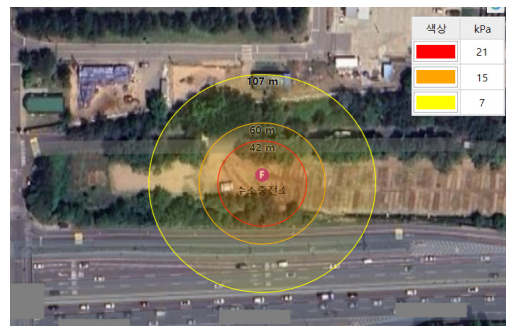
3.3.2 현장 적용

우선 영내에 가상의 수소충전소를 적용하였으며 군의 규정대로 인접한 건물 간 최소 이격거리 1~2m 이상을 준수하여 약 10m 거리를 이격시켜 배치하였다. 이후 충전소에서 최악의 사고가 발생했음을 가정하여 시뮬레이션을 한 결과, 주변의 건물에 21kPa의 폭발 과압이 전달되며 군 장병들이 운동하는 공간까지 7kPa의 과압의 영향이 미친다는 것을 가시적으로 확인할 수 있으며 그림9에 나타내었다.



(그림 10) 영내 수소충전소 적용
(Figure 10) Application of In-site Hydrogen Charging Station

영외에 적용할 경우, 부대 벽과의 거리는 약 15m, 도로경계선과는 50m를 이격시켰으며 군부대 부지경계선까지의 거리는 20m를 이격시켜 적용하였다. 그 결과 사고가 발생할 경우 민간의 차량이 달리는 도로까지 7kPa의 폭발과압을, 군부대 내부까지 21kPa의 과압에 노출되는 것을 확인할 수 있다.



(그림 11) 영내 수소충전소 적용
(Figure 11) Application of Off-site Hydrogen Charging Station

3.3.3 피해 영향 분석

피해 영향을 분석하기 위해 문헌조사로 파악한 폭발 피해 영향 표를 참고하였다.[10] 군에서는 피해 영향을 분석하기 위한 자료가 없는 관계로 민간의 자료를 통해 실시하였으며 표7에 폭발과압에 의한 피해 영향력을 나타냈다.

(표 7) 폭발과압이 미치는 피해 영향
(Table 7) Impact of Explosion Overpressure

폭발과압	영향
21 kPa	지치대 없는 철재 구조물, 유류 저장탱크 파손
15 kPa	건물 벽, 지붕이 약간 파손
9 kPa	철 구조물의 미미한 손상
7 kPa	건물 일부 파손(복구 불가능한 수준)
3 kPa	구조물의 가벼운 손상

영내에 설치된 수소충전소에서 증기운 폭발이 발생할 경우 인접한 건물 및 차량들이 대부분 파괴되는 것을 확인 할 수 있었다. 근처에 활동하고 있는 인원은 사망까지의 피해를 입을수 있다. 영외에 설치된 수소충전소에서 사고가 발생할 경우엔 담벼락이 방폭 재질이 아닐 경우 담벼락이 파괴되며 군부대 내부까지 영향을 미치고 차도위를 달리는 민간 자동차가 전복될 수 있으며 내부 탑승자가 부상 및 사망할 수 있다고 우려된다.

4. 군부대 내 안전 배치 방안 및 고찰

수소충전소를 구축할 때 인근 건축과의 거리를 과학적 이격 할 경우 영토 활용 효율성이 저하될 수 있다. 그로 인해 충전소와 인접 건물 간 최소 안전거리를 최악의 사고 피해 거리인 107m로 지정할 경우 최악의 사고가 발생하여도 안전성을 확보할 수 있다고 사료 된다. 아래 그림에 실제 군부대를 대상으로 안전한 위치를 예시로 선정하여 나타내었다.

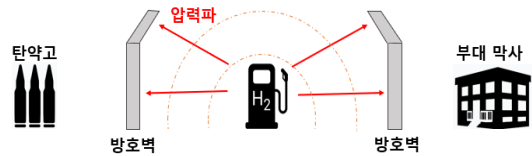
4.4 향후 연구방향

군부대는 한정된 부지 내에 위험물 취급시설 외에도 여러 가지 시설들이 밀집되어 있으며, 부대마다 영토 크기 차이와 시설들의 위치 변경 제한으로 인해 안전거리 유지에 제약이 있다. 수소충전소를 보다 효과적으로 배치하기 위해 충전소 외측에 방호벽을 설치하면 안전거리

를 최소화하여 충전소를 안전하게 설치할 수 있다. 방호벽을 설치하기 위해서 예시 그림 12와 같이 폭발, 고속충돌 등 동적인 상황을 정확하게 시뮬레이션하는 LS-Dyna와 같은 프로그램을 활용하여 수소충전소에서 발생하는 폭발 압력과의 크기를 파악하여 방호벽의 적절한 높이를 결정하고 21kPa의 폭발 과압과 37.5kw의 복사열을 견딜 수 있는 재질 및 구조로 설치해야 한다.



(그림 12) 안전한 배치 예시
(Figure 12) Safe Arrangement Example



(그림 13) 방호벽 예시
(Figure 13) Example of Blast Wall

5. 결 론

본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 내렸다.

첫째, Hy-KoRAM 및 e-CA도구를 통해 충전소 내 존재하는 여러 가지 위험요인들에서 사고가 발생 할 경우 나타나는 Jet화재 및 증기운 폭발의 사고 피해 범위를 추정할 수 있었다.

둘째, 수소충전소에서 사고가 발생 할 경우 피해규모가 가장 큰 주요 요인은 고압 저장탱크로 나타났다. 따라서 수소충전소 내 고압 저장탱크에서 사고가 발생하는 경우를 최악의 시나리오로 지정하였다.

셋째, 군의 주유시설 설비 지침을 준수하여 실제 사단급 군부대에 적용하였다. 그 결과, 사고 피해가 상당한 것으로 확인되었으며 이를 통해 군은 주유시설과 주변

건물 간의 최소 이격거리에 대한 규정을 더 명확하게 제시해야 할 필요성이 있다.

넷째, 최악의 피해 범위를 발생시킬 수 있는 고압 저장탱크의 증기운 폭발 사고 피해거리는 107m로 나타났으며 이를 최소 안전거리로 지정할 경우 안전을 보장할 수 있다고 판단하였다.

군부대는 지리적으로 제한된 부지에 다양한 시설을 구축해야 한다. 향후 피해거리를 최소화 시키는 동시에 안정성을 보장할 수 있는 대안으로 방호벽 설치 등에 대한 추후 연구를 고려할 수 있다. 방호벽은 21kPa의 폭발 과압과 37.5kW복사열을 견딜 수 있는 내구성을 가져야 한다는 지침의 적용시 제약조건을 고려한 최적화 방안도 고려할 수 있다. 또한 폭발과 고속충돌과 같은 동적 사고를 정확하게 시뮬레이션하는 LS-Dyna와 같은 프로그램을 활용하여 폭발 압력과 크기를 분석하여 방호벽의 높이를 결정하는 것도 가능할 것이다. 이러한 연구들을 통해 군부대 내에 효과적이고 안전하게 수소충전소 등을 구축할 수 있을 것으로 기대한다.

참고문헌(References)

- [1] Kyoungah Kim, Changhyun Sung, MinHo Son, Joonwon Min, & Sangbin Jeong, "Application and Development Direction of Hydrogen Powered Military Maneuver System," A collection of papers from the academic conference of the Korea Automobile Engineering Association, p.87, 2022.
<https://www-dbpia-co-kr-ssl.libproxy.seoultech.ac.kr/pdf/pdfView.do?nodeId=NODE11149254>
- [2] Kim Won Gil, Kim Jung Hoon, Ryu Jong Woo, Choi Jae Wook, "Measurement of explosion limit and minimum oxygen concentration of gasoline according to octane change," Chemical engineering, p.619, 2017.
<https://doi.org/10.9713/KCER.2017.55.5.618>
- [3] Lee Gong-hoon, "Hydrogen Liquefied Plant Accident Tree Analysis," Korea Institute of Machinery and Materials, p.58, 2012.
<https://doi.org/10.23000/TRKO201300021617.78>
- [4] Nam Seunghoon, "The Case of Hydrogen Accidents in Foreign Countries," p.247~248, 2019.
<https://doi.org/10.23000/TRKO201700012196.256>
- [5] Kim Hye-rim, Kang Seung-gyu, "Analysis of Damage Range and Impact of On-Site Hydrogen Fueling Station Using Quantitative Risk Assessment Program (Hy-KoRAM)," p.460, 2020.
<https://doi.org/10.7316/KHNES.2020.31.5.459>
- [6] Gujeonghoe, "Development of Pyroprocessing Hot Cell Facility Design and Safety Enhancing Technology," Korea Atomic Energy Research Institute, p.135, 2015.
<https://doi.org/10.23000/TRKO201800009465>
- [7] Kang Byungwoo, Lee Taekhong, "An Investigation of Hazard Distance in a Series of Hydrogen Jet Fire with the Hynam Tools," p.167, 2017.
<https://doi.org/10.7316/KHNES.2017.28.2.166>
- [8] Yoon Yong Kyun, Joo Eunhye, "Probabilistic Assesment of the Effects of Vapor Cloud Explosion on a Human Body," p.53, 2021.
<https://doi.org/10.7474/TUS.2021.31.1.052>
- [9] Defense and Military Facility Standards, "DMFC 5-60-80: Design and Construction Guidelines for Fuel Storage Facilities," p.200, 2014.
http://dmfc.mnd.go.kr:8180/maindata/md_view.jsp?cd=031900&seq=2319&sSearchScope=&sSearchKeyword=&sListNum=15&sOrder=DATE
- [10] Lee Ik-mo, "Risk Characteristics Evaluation and Reduction Technology Report by Laboratory Sector", Inha University, p.95, 2014.
<https://doi.org/10.23000/TRKO201500002524>

● 저 자 소 개 ●



김 동 연(dong-yeon Kim)

2021년 학점은행제 항공정비공학과(공학사)

2022년~현재 서울과학기술대학교 일반대학원 국방방호공학과 재학(공학석사)

관심분야 : 국방, 방호공학

E-mail : kimdy2820@seoultech.ac.kr



권 혁 진(Hyuk-jin Kwon)

2000년 성균관대학교 공과대학 산업공학과(공학박사)

2017년~2020. 국방부 정보화기획관

1991년~2021. 한국국방연구원 책임연구위원

2021년~현재. 서울과학기술대학교 국방방호학과 주임교수

2023년~현재 서울과학기술대학교 국방인공지능응용학과 주임교수

2016년~현재. ISO27001 국제인증 선임심사원

관심분야 : 국방정보화, 국방사이버안보, 국방인공지능 etc.

E-mail : kwonhj@seoultech.ac.kr