

수소 시스템에 적용 가능한 FT 라이브러리 개발

서두현¹ · 이광원² · 이동민² · 신단비² · 김현기² · 김태훈^{3†}

¹피에스피, ²호서대학교 일반대학원 안전공학과, ³호서대학교 산업안전공학과

A Study on the FT Libraries for Hydrogen System

DOOHYOUN SEO¹, KWANGWON RHIE², DONGMIN LEE², DANBEE SHIN², HYEONKI KIM²,
TAEHUN KIM^{3†}

¹PSP, Process Safety Partner, 120-16 Wolbong 4-ro, Seobuk-gu, Cheonan 31171, Korea

²Department of Safety Engineering, Hoseo University Graduate School, 20 Hoseo-ro 79beon-gil, Baebang-eup, Asan 31499, Korea

³Department of Industrial Safety Engineering, Hoseo University, 12 Hoseodae-gil, Dongnam-gu, Cheonan 31066, Korea

†Corresponding author :
sdhyoun02@naver.com

Received 28 April, 2025

Revised 4 June, 2025

Accepted 12 June, 2025

Abstract >> As research on hydrogen systems advances, robust safety methods become increasingly necessary. While risk assessments are being conducted on hydrogen systems, analyzing the frequency of accidents caused by hydrogen leaks presents significant challenges. Fault tree analysis (FTA) is a common method for analyzing accident frequency, but its reliance on evaluator expertise poses considerable challenges. In this study, we aim to develop an FT library to support FTA evaluators in performing efficient frequency assessments within Hy-KoRAM version 2, currently under development.

Key words : Hydrogen system(수소 시스템), Fault tree(결함수), FT libraries (FT 라이브러리), Hydrogen leakage(수소 누출), Hy-KoRAM(수소 위험성 평가 프로그램)

1. 서론

수소 기술에 대한 관심이 높아지고 전 세계에서는 수소에 관련된 다양한 형태의 시스템에 대한 기술 개발이 활발히 진행되고 있다. 이러한 다양한 형태의 수소 전주기 시스템은 생산, 저장, 운송, 충전, 활용 등 다양한 분야에 걸쳐 개발되고 있다. 기존의 초고압 기체수소를 활용한 자동차 및 충전소를 비롯하여 인프라 확보 및 상용화 가속을 위하여 수소를 생산하기 위한 수소 추출기, 수전해 장치 등이 다양한 기

술을 바탕으로 개발되고 있고 수소차, 수소 연료전지 시스템 등의 개발 및 안전 기준의 마련이 활발히 진행되었다. 특히 2019년에 발표된 수소경제 활성화 로드맵¹⁾에 따라 본격적인 대용량 수소 공급이 강조되었으며 액화수소 플랜트 및 액화수소 충전소 등에 대한 기술이 개발되고 실증 시험 중에 있다. 하지만 여전히 수소 기술에 대한 실험 또는 실증 연구 중 사고 발생의 위험성이 존재하므로 수소 시스템에 대한 위험성 평가(안전성 평가)가 강조되고 있다. 이에 2019년에 발표된 수소 안전 관리 종합 대책²⁾에 따라 수소

충전소를 비롯한 수소 전주기 시스템에 대한 위험 요인을 파악하고 안전 대책 마련을 강조하며 위험성 평가 수행에 대한 법제화가 추진되고 있다.

지난 2017년 한국가스안전공사는 국제 공동 연구를 통하여 미국의 샌디아 국립 연구소(Sandia National Laboratory)의 수소 충전소 위험성 평가 프로그램인 Hy-RAM을 기반으로 국내 수소 충전소 통합 위험성 평가 프로그램인 Hydrogen Korea Risk Assessment Module (Hy-KoRAM)을 개발하고 보급하였다^{3,4)}. 그러나 초기 버전인 Hy-KoRAM version 1에서는 수소 충전소에 한정된 분석을 제공함에 따라, 현재 개발된 액화수소를 포함한 수소 전주기에 대한 위험성 평가 프로그램의 기능을 고도화하는 연구를 수행하고 있다.

고도화로 개발되는 Hy-KoRAM version 2는 무료로 배포하여 심사자, 감독 관리자, 현장 운영자 등을 대상으로 수소 전주기 시스템의 설계 및 운영 시 안전성을 확보하기 위하여 활용될 수 있다. 그러나 프로그램이 잘 만들어진다 하여도 위험성 평가를 수행하는 평가 기술은 평가자의 위험성 평가 경험 및 관련 지식 등이 충분하여야 하며 평가자의 수준에 따라 결과가 매우 다양하게 차이가 발생할 수 있다. 즉 프로그램이 무료로 배포되어도 이를 활용할 평가자들의 대부분이 평가 활용에 어려움을 느끼고 있다. 특히 발생 빈도를 분석하기 위한 방법인 fault tree analysis (FTA)의 경우 국내에 경험이 충분한 인력이 한정되어 있기에 일반적으로 접근하기 매우 어렵다.

이러한 이유로 본 연구에서는 Hy-KoRAM version 2를 활용하여 FTA를 수행하고자 하는 평가자들을 위하여 수소 시스템 관련 FTA 라이브러리를 개발하여 프로그램에서 제공할 수 있게 함으로써 FTA의 활용성 및 이해도를 높이는데 기여하고자 한다.

2. 수소 시스템에 대한 FT 라이브러리 개발

2.1 FT 라이브러리 구성

일반적으로 FTA는 시스템의 구조를 기반으로 특정 사건이 발생할 수 있는 결함의 원인을 논리적인

연결을 통해 구조화(fault tree, FT)하고 각 결함들의 발생 확률을 대입함으로써 특정 사건의 발생 가능성을 분석하는 데에 다양한 분야에서 널리 사용된다. 그러나 FT의 구조는 평가자마다 구조의 형태가 주관적으로 다르게 표현될 수밖에 없다. 이에 따라 FT는 정형화하기 매우 어렵고 참고할 만한 자료를 확보하기에도 어려움이 있다.

하지만 수소 시스템의 대부분은 의외로 주요 설비 및 장치가 일관성 있고 비교적 공정이 복잡하지 않기에 각 주요 설비 또는 장치를 기준으로 발생할 수 있는 사고 시나리오를 기반으로 표준적인 FT 구조가 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

이에 선행 분석을 통해 도출된 수소 전주기 시스템에 대한 위험 요인 라이브러리⁵⁾를 바탕으로 FT 라이브러리를 개발하였다.

2.2 FT 라이브러리 기본 구조

수소 시스템에서 발생할 수 있는 가장 중대한 사건은 수소가스의 누출, 화재, 폭발을 가정할 수 있다. 그러나 화재 및 폭발의 경우 대부분 수소가스의 누출 이후에 발생하는 현상으로 이는 event tree를 통해 분석할 수 있으므로 FT 라이브러리에서는 수소가스의 누출을 top event로 선정하여 구조화하였다.

또한 수소 전주기 시스템에서의 수소가스 누출은 어느 시스템이든지 주요 장치 및 배관 등의 연결부에 집중되어 있기 때문에 주요 장치별로 누출이 발생할 수 있는 사고 시나리오를 바탕으로 나누어 구조를 작성할 수 있다. 그리고 수소 시스템은 설치 장소 및 주변 환경에 따라 외부 요인에 의한 사고도 고려하여야 한다.

이에 따라 기본적인 수소 전주기 시스템의 수소가스 누출에 대한 FT 구조는 Fig. 1과 같이 주요 장치들 중 한 가지 이상 누출이 발생할 수 있는 내부 요인과 주변 환경에 따른 외부 요인으로 구분하여 영향을 살펴볼 수 있다.

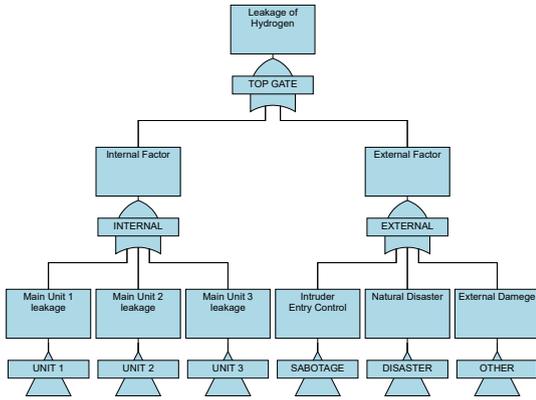


Fig. 1. FT of top event (general)

여기서 내부 요인에 해당하는 주요 장치들의 누출은 독립적으로 발생하므로 이 중 한 가지 장치 이상 누출이 발생할 경우 시스템 전체의 사고로 이어진다. 이에 수소 전주기 시스템별로 주요 장치에 따라 내부요인에 OR GATE로 추가 연결하여 FT를 작성할 수 있다.

외부 요인에 대해서는 시스템의 설치 위치에 따른 외부 침입에 대한 조치, 자연재해, 주변 도로 인접에 따른 차량에 대한 충돌 등을 고려할 수 있으며 이에 대해서도 기초 사건을 추가 또는 삭제하여 작성할 수 있다.

3. 시스템별 FT 라이브러리

3.1 시스템별 FT 라이브러리 구분

FT 라이브러리의 기본 구조에 따른 내부 요인으로 고려할 주요 장치는 수소 시설별로 구분하여 작성할 수 있다. 수소 전주기 시설에 대한 구분은 선행 분석된 위험 요인 라이브러리 그룹⁵⁾을 참고할 수 있다. 여기서 FT의 기본 형태는 제조식 수소 충전소와 저장식 수소 충전소를 기반으로 구분하였으며 일반적으로 제조식 수소충전소의 주요 장치 중 수소 추출기 또는 수전해 장치가 포함될 수 있다.

이러한 방법에 따라 FT 라이브러리는 기본적으로 저장식 수소 충전소에 포함된 튜브 트레일러 공급부,

압축 저장부, 차량 충전부로 주요 장치를 나눌 수 있고 제조식의 경우 저장식 수소 충전소의 주요 장치에 수소 추출기 또는 수전해 장치에 대한 라이브러리를 구성할 수 있다. 액화수소 충전소의 경우에도 액화수소 탱크로리 공급부, 액화수소 저장부, 기화 후 압축 공정 또는 액화수소 가압 후 기화 공정, 차량 충전부로 각 주요 장치를 구분할 수 있다.

3.2 저장식 수소 충전소 FT 라이브러리

수소 충전소의 경우 일반적으로 off site 방식은 매우 정형화되어 있다. 주요 장치별로 구분하였을 때 각 주요 장치의 연결 배관을 포함하여 튜브 트레일러, 압축기, 저장탱크, 디스펜서로 구성된다⁶⁾. 각 주요 장치에서의 누출이 기본 FT 구조에서의 수소가스 누출에 대한 내부 요인으로 OR GATE로 연결될 수 있다.

3.2.1 튜브 트레일러 공급부에서의 누출

튜브 트레일러 공급부는 튜브 트레일러 호스 연결 부부터 압축기 전단까지로 범위를 구분할 수 있으며 연결 배관에 구성된 밸브류, 계기류, 필터 등 장치에 대한 부품에서의 누출을 기본으로 구성할 수 있다. 또한 튜브 트레일러에서 수소가 공급되는 위치에는 수소 감지기 및 알람과 비상시 공급을 차단할 수 있는 비상 차단이 가능하도록 구성된다. 따라서 비상 차단이 되지 않는 상황을 고려하여 Fig. 2와 같이 구성할 수 있다.

여기서 부품에서의 누출은 각 사업장 또는 시설에 따라 밸브류 또는 계기류 등의 종류 및 개수, 배관 직경 및 크기에 대해서 OR GATE로 연결하여 구성할 수 있다. 사실 밸브 및 계기류의 경우 모두 독립적으로 가정하여야 하며 병렬 설계 또는 대기 구조로 설계된 시설의 경우 논리 연결은 더욱 복잡해질 수밖에 없다⁷⁾. 그러나 본 연구에서의 FT 라이브러리는 기본적인 FT 구조로 제공함으로써 FT 작성에 도움을 제공하고자 하는 것이지 모든 시설에 대한 평가를 수행하는 것은 아니다. 따라서 모든 부품은 독립

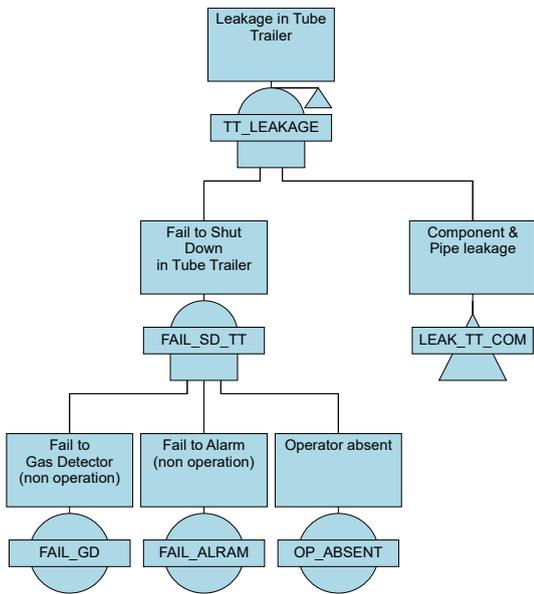


Fig. 2. FT of tube trailer loading unit leakage

적으로 설치됨을 가정하여 기본적인 형태로 개발하였다.

또한 액화수소 탱크로리 역시 비슷한 구조로 표현이 가능하다.

3.2.2 압축 저장부에서의 누출

압축 저장부는 압축기를 가동하면 저장탱크에 수소를 저장하는 공정까지 이루어지며 압축기부터 저장탱크까지의 범위에 해당된다. 부품에서의 누출은 압축기와 저장탱크에 연결된 연결 배관과 이에 포함된 밸브류, 계기류, 필터 등을 고려할 수 있다. 마찬가지로 수소 누출에 대비한 수소 감지기 및 알람과 비상 차단 장치 등으로 구성되기에 이를 고려하여 Fig. 3과 같이 구성할 수 있다.

여기서 부품에서의 누출은 앞서 구상한 바와 같이 각 사업장 또는 시설에 따라 밸브류 또는 계기류 등의 종류 및 개수, 배관 직경 및 크기에 대해서 OR GATE로 연결하여 구성할 수 있으며 압축기의 타입 및 저장탱크의 구성에 따라 독립적으로 가정하여 연결할 수 있다. 압축기의 타입 등에 따라 추가 장치 및 누출에 대한 시나리오가 달라질 수는 있으나 앞서

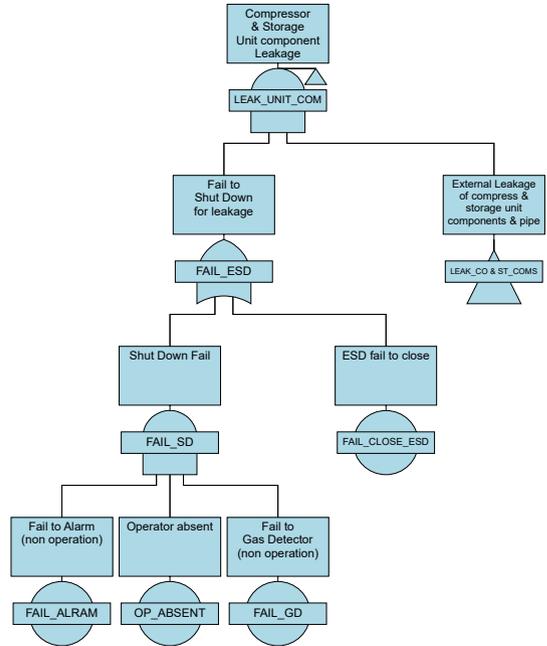


Fig. 3. FT of compressor & storage unit component leakage

설명한 바와 같이 가장 기본이 되는 형태로 FT 라이브러리가 제공되고 이에 대한 상세한 부분은 평가자가 논리적 판단을 하여야만 한다.

3.2.3 충전부에서의 누출

충전부는 수소차 등에 수소를 충전하는 공정으로 저장탱크 후단부터 디스펜서 노즐까지의 범위에 해당되며 다른 주요 장치와 같이 디스펜서에 포함된 연결 배관과 밸브류, 계기류, 필터 등을 고려할 수 있다. 마찬가지로 수소 누출에 대비한 수소감지기 및 알람과 비상 차단 장치 등으로 구성되고 충전 프로토콜에 따른 유량 조절을 위한 charging control unit (CCU) 장치 등을 고려하여 Fig. 4와 같이 구성할 수 있다.

여기서 디스펜서부에서의 추가로 고려하여야 할 부분은 충전 중에 발생할 수 있는 차량 노즐 연결 실패, 과충전 또는 차량 운전자의 실수로 노즐 연결 상태로 출발하는 사고가 일반적으로 알려져 있으므로 충전 중 실수에 대한 구조가 추가되어야 한다.

또한 Fig. 5의 충전 중 누출은 충전이 이루어지는

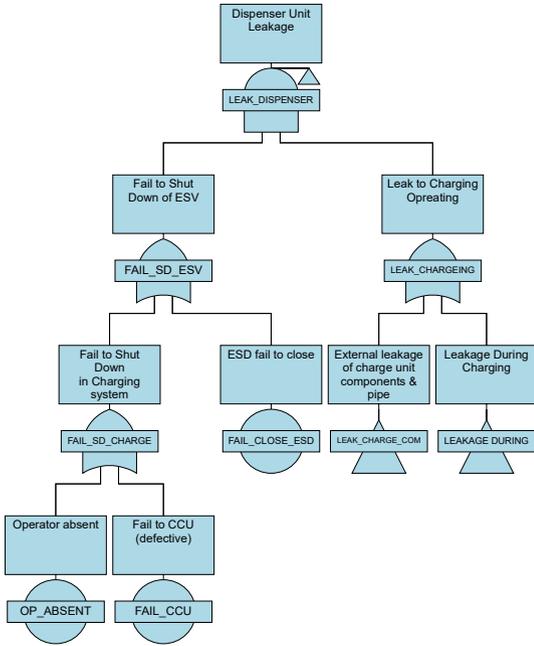


Fig. 4. FT of dispenser unit leakage

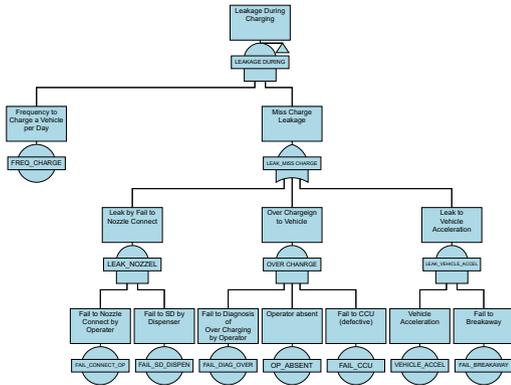


Fig. 5. FT of leakage during charging

순간에만 발생하는 시나리오이므로 평균 충전 횟수에 대한 가중치가 고려되어야 한다. 이때 충전 시간은 통상 사건으로 고려될 수 있고 24시간을 기준으로 충전이 이루어지는 평균 시간을 적용할 수 있다. 이는 FT 라이브러리에서 제공하는 예시적인 부분으로 실제 평가자의 판단에 의하여 변경 및 삭제하여 적용할 수 있다.

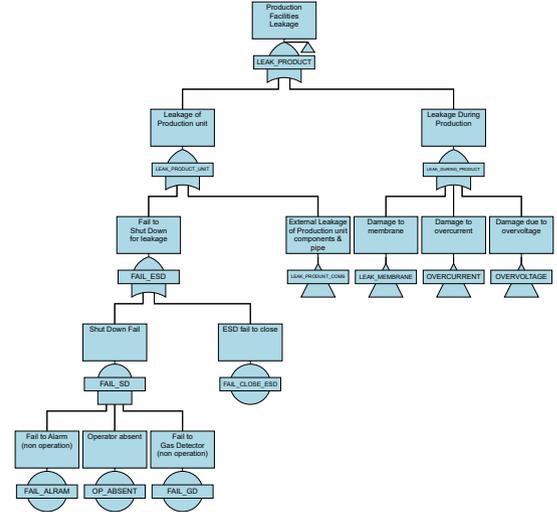


Fig. 6. FT of electrolysis unit leakage

3.3. 제조식 수소 충전소에서의 누출

제조식 수소 충전소의 경우 저장식 수소 충전소와 동일한 구조를 활용할 수 있으며 튜브 트레일러 공급부 대신 수소 추출기 또는 수전해 장치가 추가되어 FT를 활용할 수 있다.

구조적으로는 수소 추출기와 수전해 장치는 서로 다르다. 하지만 위의 방법에 따라 기본 구조는 동일하게 유지하고 세부적으로 부품에서의 누출과 제조 장치 가동 중 수소 생산 부분에서 발생할 수 있는 사고 시나리오를 구분하여 FT를 작성할 수 있다.

이에 따른 수전해 장치에 대한 FT 라이브러리 예시는 Fig. 6과 같다.

수전해 장치의 경우 제조 중 누출에 대한 시나리오의 선형 분석된 위험성 평가를 참조하여 FT 라이브러리의 기본 구조를 작성하였으며 각 사고 시나리오의 수전해 설비의 타입 및 제조사에 따라 서로 다를 수 있다. 기본적으로는 분리막의 손상, 과전류, 과전압 등의 원인으로 구성하였다.

4. 결론

본 연구에서는 수소 시스템에 대한 FTA 분석에

도움을 제공하기 위하여 FT 작성 시 기본 구조로 활용될 수 있는 FT 라이브러리 개발 연구를 수행하였다. 이러한 FT 라이브러리는 사업장 및 주요 장치의 타입별로 추가 또는 삭제를 통하여 활용할 수 있도록 제공하고자 하며 기본적인 주요 장치별로 모듈화되어 이를 활용하여 전체 시스템에 대한 FT 작성이 가능하도록 개발하였다.

기본 구조로는 수소 충전소를 기반으로 저장식 수소 충전소와 제조식 수소 충전소에 대한 FT 라이브러리를 개발하였으며 개발 중인 Hy-KoRAM version 2에서 제공함으로써 프로그램 활용 및 FT 작성에 대한 교육적 참고로 활용될 수 있을 것이다.

하지만 개발된 FT 라이브러리는 FT 작성에 보조 역할을 할 뿐이기에 주요 장치별 상세한 사고 시나리오에 대해서는 평가자가 추가로 작성하여야 하는 문제가 남아 있다. 또한 기초 사건의 발생 빈도 역시 문헌 또는 통계적 자료, 공학적 판단 등을 통해 평가에 활용하여야 하므로 본 FT 라이브러리에서는 별도 제공하지 않는다. 특히 모든 부품에서의 누출이 독립적으로 판단하여 제공되기에 공정 특성상 종속적인 사건 또는 제품의 특허적 기술 부분에 대해서는 실제 평가자의 추가적 작성이 필요할 수밖에 없다.

즉 본 FT 라이브러리는 참고 사항으로 개발된 기본 구조일 뿐 모든 시스템에 대해 FTA 분석 자체를 제공하는 것이 아니며 FT의 경험이 부족한 사용자의 교육적 목적이 더 크다. 만일 FT의 경험이 풍부한 사용자의 경우에는 다른 방식의 구조로 FT 분석이 가능하다.

또한 현재 개발된 FT 라이브러리는 기존에 알려진 시설 및 장치에 대해서만 개발되었기 때문에 향후 수소 전주기 시스템의 범위가 확대됨에 따라 추가적 보완 등이 이루어져야 할 것이다. 이에 따라 지속적인 연구 및 업데이트 등을 통해 관리할 수 있도록 하고자 한다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부의 수소 충전 인프라 안전관리 핵심 기술 개발(No. 20215810100060, 수소 전주기 통합 위험성 평가 프로그램 및 액화수소 안전기준 개발)의 지원으로 수행되었습니다.

References

1. Ministry of Trade, Industry and Energy (MOTIE), "Hydrogen economy revitalization roadmap", MOTIE, 2019. Retrieved from <https://www.motie.go.kr/kor/article/ATCLf724eb567/210222/view>.
2. Ministry of Trade, Industry and Energy (MOTIE), "Comprehensive measures for hydrogen safety management", MOTIE, 2022. Retrieved from <https://www.motie.go.kr/kor/article/ATCL3f49a5a8c/165661/view>.
3. D. M. Lee, H. W. Kim, Y. E. Choi, K. W. Rhie, D. H. Seo, and T. H. Kim, "Development of the program for qualitative risk assessment of a packaged hydrogen charging station", In: 2018 Korean Institute of Gas Spring Conference; 2018 May 31-Jun 1, Busan, Korea. Seoul: Korean Institute of Gas, c2018, pp. 290. Retrieved from <https://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE07459124>.
4. 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>.
5. D. Seo, K. Rhie, D. Lee, D. Shin, H. Kim, C. Lee, and T. Kim, "A study on the application of hazard libraries when using HAZOP in hydrogen systems", *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 34, No. 4, 2023, pp. 381-387, doi: <https://doi.org/10.7316/JHNE.2023.34.4.381>.
6. D. H. Seo, T. H. Kim, K. W. Rhie, and Y. E. Choi, "A study on FTA of off-site packaged hydrogen station", *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 31, No. 1, 2020, pp. 73-81, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2020.31.1.73>.
7. D. H. Seo, "A study of the sensitivity analysis for hydrogen station with FTA [Master's thesis]", Asan: Hoseo University, 2009.