

수소 전주기 시스템의 HAZOP 수행 시 위험 요인 라이브러리 적용 연구

서두현¹ · 이광원² · 이동민² · 신단비² · 김현기² · 이충현³ · 김태훈^{4†}

¹피에스피, ²호서대학교 일반대학원 안전공학과, ³호서대학교 일반대학원 안전행정공학과, ⁴호서대학교 안전공학과

A Study on the Application of Hazard Libraries When Using HAZOP in Hydrogen Systems

DOOHYOUN SEO¹, KWANGWON RHIE², DONGMIN LEE², DANBEE SHIN², HYOUNGI KIM²,
CHUNGHYUN LEE³, TAEHUN KIM^{4†}

¹PSP, 140-9 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 Safety and Administrative Engineering, Hoseo University Graduate School, 12 Hoseodae-gil, Dongnam-gu, Cheonan 31066, Korea

⁴Department of Safety Engineering, Hoseo University, 12 Hoseodae-gil, Dongnam-gu, Cheonan 31066, Korea

†Corresponding author :
emttx@hoseo.edu

Received 20 July, 2023
Revised 4 August, 2023
Accepted 8 August, 2023

Abstract >> The risk assessment (safety assessment) must be performed to verify the risks during operation and installation of the hydrogen system and to ensure safe design and operation. Among them, hazard and operability study (HAZOP), a qualitative risk assessment, is most often used to discover risk factors and secure safety. However, in HAZOP performance, there is a difference in the level of evaluation results depending on the level and experience of the evaluator, and there is a high possibility that subjective results will be derived. This study aims to develop a risk factor library that can list and provide information on potential risk factors in order to solve these problems when performing HAZOP, reduce risk factors that are omitted or overlooked.

Key words : Hydrogen system(수소 전주기 시스템), Qualitative risk assessment(정성적 위험성 평가), HAZOP(위험 및 운전성 분석), Hazard library(위험 요인 라이브러리), Hy-KoRAM(수소 전주기 위험성 평가 프로그램)

1. 서론

수소 전주기 시스템은 기체 또는 액화수소의 생산, 저장, 운송, 충전, 활용 등 다양한 분야에서 개발되고 있다. 초고압의 기체수소 충전소를 비롯하여 기체수소를 생산하기 위한 수소 추출기, 수전해 장치 등이

개발되었고, 기체수소를 활용하기 위한 수소차, 수소 연료전지 시스템 등의 개발이 활발히 진행되었다. 특히 2019년 1월 발표된 수소경제 활성화 로드맵¹⁾에 따라 대용량 수소 공급을 위한 액화수소 도입이 시작되면서 액화수소를 활용한 액화수소 플랜트 및 액화수소 충전소 등에 대한 기술이 개발되고 있으며,

액화수소를 충전, 운송, 기화하기 위한 다양한 기술이 개발되고 있다. 하지만 수소 기술 개발은 관련 안전 기준이 부재한 경우가 많고, 실험, 실증 연구 중 사고가 발생하기도 하는 등 안전성 확보가 필요한 실정이다. 이러한 이유로 수소 전주기 시스템의 운영 및 설치 시 위험성을 검증하고 안전한 설계 및 운영을 위해 위험성 평가(안전성 평가)를 수행하여야 함이 강조되고 있다. 이를 위해 2019년 12월 발표된 수소 안전 관리 종합 대책²⁾에 따라 수소 충전소에 대한 안전성 평가 법제화가 추진되는 등 수소 전주기 시스템에 대한 위험 요인 발굴 및 안전 대책 수립이 수행되고 있다. 그리고 지난 2017년부터 미국의 샌디아 국립연구소(Sandia National Laboratory)와 한국가스안전공사 가스안전연구원, 호서대학교에서 국제 공동연구를 통하여 수소 충전소 통합 위험성 평가 프로그램인 Hydrogen Korea Risk Assessment Module (Hy-KoRAM)을 개발하였으며^{3,4)}, 현재 액화수소를 포함한 수소 전주기 시스템에 대한 통합 위험성 평가 수행을 위한 고도화 연구를 수행 중에 있다.

Hy-KoRAM에는 평가 대상에 대한 위험 요인을 도출하기 위한 정성적 위험성 평가인 hazard and operability study (HAZOP) 및 failure mode and effects analysis (FMEA)와 발생 빈도 평가(frequency analysis)인 fault tree analysis (FTA) 및 event tree analysis (ETA), 피해 영향 분석(consequence analysis), 개인적/사회적 위험성 평가(individual risk/societal risk) 수행이 가능하다.

이 중 정성적 위험성 평가인 HAZOP의 수행은 위험 요인 발굴 및 안전성 확보를 위해 주로 활용되고 있다. 그러나 HAZOP 수행은 평가자의 수준 및 경험 등에 따라 평가 결과 수준의 차이가 발생하며, 주관적인 결과가 도출될 가능성이 높다. 또한 위험 요인을 간과하고 누락하는 등 평가의 질적 수준에 대한 문제가 발생할 수 있으므로 많은 노력과 시간이 소요된다. 특히 HAZOP 수행의 경험이 부족한 경우 이러한 어려움은 더욱 커진다.

이러한 이유로 본 연구에서는 Hy-KoRAM을 활용하여 HAZOP 수행 시 이러한 문제점을 해결하고 누

락 또는 간과되는 위험 요인을 줄이며 평가 수행에 편의를 제공하고자 잠재적 위험 요인의 정보를 목록화하여 제공해 줄 수 있는 위험 요인 라이브러리를 개발하고자 한다.

2. 위험 요인 라이브러리 개발

2.1 위험 요인 라이브러리 정의

일반적으로 화학 공정에 맞게 개발된 HAZOP⁵⁾은 화학물질 및 가스 등을 활용하는 다양한 분야에서 널리 사용되고 있다. 특히 HAZOP의 경우 화학물질의 유동 및 운전 압력, 운전 온도 등의 변화에 따른 위험 요인을 도출하기에 매우 체계적이라는 장점이 있다. 또한 HAZOP은 평가 수행자의 지식과 경험을 통하여 위험 요인을 도출하는 매우 창의적인 방법이며, 난상토론(brain storming)을 통하여 다양한 잠재 위험 요인을 도출할 수 있다. 하지만 HAZOP의 이러한 장점은 반대로 단점이 될 수 있다. HAZOP은 평가 수행자의 수준에 따라 평가의 질이 결정되며, 따라서 매우 주관적인 결과를 도출할 수 있다. 또한 모든 잠재 위험 요인을 도출하지 못하여 간과하고 넘어가는 사항이 있을 수 있으며, 평가 수행 시기에 따라 균일한 결과를 도출하지 못할 가능성이 높다.

따라서 발생 가능한 위험 요인을 미리 목록화하고 제공한다면 매번 평가 수행 때마다 빠뜨리는 위험 요인 없이 세밀한 평가가 가능할 것으로 예상된다. 이에 위험 요인의 목록을 일반적인 현상에 대해 표준적인 사항을 제공하여 HAZOP 수행에 도움이 되는 형태로 구성하고자 하였고, 이것을 위험 요인 라이브러리라고 명명하였다.

2.2 위험 요인 라이브러리 구성

일반적으로 HAZOP이 적용되는 화학 공정은 공정 특성에 따라 매우 다양하고 복잡하기 때문에 도출되는 위험 요인은 매우 다양하고 표준적인 데이터를 구성하지 못할 정도로 정형화되지 않는다. 이에 위험

요인의 데이터를 확보하거나 활용하기에는 어려움이 있다. 특히 HAZOP은 평가자의 창의력을 통하여 잠재 위험 요인을 도출하는 방법이기 때문에 위험 요인 라이브러리의 제공이 이를 저해하는 역효과가 발생해서는 안 될 것이다.

하지만 수소 충전소를 비롯한 수소 시스템은 주요 장치 및 설비가 대부분 일반화되어 있고, 주요 장치 및 설비 등 공정의 구조가 화학 공정과 달리 비교적 단순하며, 정형화되어 있는 편이다.⁶⁻⁸⁾ 이러한 이유로 수소 시스템에서는 위험 요인 라이브러리가 적용이 가능할 것으로 판단된다.

예를 들어, 일반적인 기체수소를 활용한 수소 충전소의 경우 Fig. 1과 같이 주요 설비 및 공정이 튜브

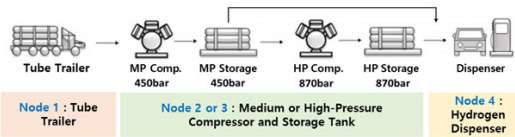


Fig. 1. Example of a typical configuration of a hydrogen filling station

트레일러, 압축기, 저장 탱크, 디스펜서로 구성된다. 즉, 평가의 노드는 3-4개 정도로 단순하게 이루어질 수 있다. 이는 튜브 트레일러 수소 공급 공정, 중압 또는 고압 압축 공정, 저장 탱크 저장 공정, 디스펜서를 통한 수소차 충전 공정으로 구분된다.

이를 HAZOP으로 평가한다면 각 주요 장치에서의 유체의 흐름, 압력의 변화, 온도의 변화 등을 고려하여 위험 요인을 도출하게 된다. 여기서 일반 화학 공정과 달리 물질의 변화, 화학적 반응, 미싱 등은 발생하지 않는다. 따라서 HAZOP을 통해 고려해야 할 deviation은 한정적이라 할 수 있다. Table 1은 일반적인 화학 공정에서 사용되는 표준적인 deviation이며, 수소 충전소에 활용될 수 있는 deviation은 회색으로 나타내었다.

즉, 수소 충전소는 화학 공정과 달리 주요 장치의 수량이 적고 매우 단순하게 이루어진다. 이러한 이유로 각 주요 장치를 중심으로 발생 가능한 현상을 미리 목록화할 수 있다.

예를 들어, 튜브 트레일러에서 20 MPa의 수소를

Table 1. General deviations used in chemical processes

| Parameter | Guide word | | | | | | |
|-------------|---------------|------------------|-------------|-----------|--------------|-----------------|-----------------|
| | MORE | LESS | NONE | REVERSE | PART OF | AS WELL AS | OTHER THAN |
| FLOW | HIGH FLOW | LOW FLOW | NO FLOW | BACK FLOW | WRONG AMOUNT | ADDED COMPONENT | WRONG COMPONENT |
| PRESSURE | HIGH PRESS | LOW PRESS | VACUUM | - | - | - | - |
| TEMP | HIGH TEMP | LOW TEMP | - | - | - | - | - |
| LEVEL | HIGH LEVEL | LOW LEVEL | NO LEVEL | - | - | - | - |
| AGITATION | TOO MUCH | TOO LITTLE | - | - | - | - | - |
| REACTION | FAST REACTION | DELAYED REACTION | NO REACTION | DECOMPOSE | INCOMPLETE | SIDE REACTION | WRONG REACTION |
| MIXING | TOO MUCH | TOO LITTLE | NONE | - | - | - | - |
| ADDITION | TOO MUCH | TOO LITTLE | - | - | - | - | - |
| COMPOSITION | HIGH CONC | LOW CONC | NONE | - | - | EXTRA COMPONENT | WRONG COMPONENT |
| PHASE | TOO MANY | TOO FEW | SINGLE | INVERSION | EMULSION | - | - |
| TIME | TOO MUCH | TOO LITTLE | - | - | - | - | - |
| STEP | STEP LATE | STEP EARLY | MISSED STEP | BACK STEP | PARTIAL STEP | EXTRA ACTION | WRONG ACTION |

*The gray cell is a gaseous hydrogen filling station.

공급하는 공정에서 LOW FLOW가 발생할 수 있는 주요 상황은 밸브의 차단 현상, 배관 막힘, 누출, 공급 성능 저하 등으로 구분할 수 있다. 여기서 밸브의 차단 현상은 수동 밸브의 경우 작업자의 실수로 인한 밸브 잠금 또는 밸브 자체의 고장이 있을 수 있다. 구동 밸브(actuator valve)의 경우 밸브 구동의 신호 이상, 밸브 구동 유체의 공급 불량, 밸브 자체의 결합 등을 파악하여야 한다. 이러한 사항은 모든 수소 충전소에서 동일하게 파악해야 할 위험 요인이다.

이와 같이 주요 장치에서 발생하는 물리적인 요인이 위험 요인 라이브러리를 구성할 수 있다. 따라서 기존에 수행한 30여 개의 수소 충전소 HAZOP 결과 내용을 분석하여 주요 장치별 위험 요인에 대한 표

준화 데이터를 수집 및 분석하였다. Table 2는 위험 요인 데이터 목록화의 일부 예시이다.

이러한 위험 요인 라이브러리는 평가 대상 node의 주요 장치에 대하여 제공되며, 이탈 상태별로 위험 요인을 선택할 수 있도록 할 예정이다. 이때 위험 요인 라이브러리는 이탈 상태가 발생할 수 있는 표준적인 상황에 대해 제공되며, 구체적인 사항에 대해서는 평가 팀이 토론을 통해 창의적으로 작성하면 된다. 만일 평가 수행자가 상세 원인을 확인하고 싶거나 구체적인 설명이 필요하다면, 옵션 선택을 통하여 확인할 수 있도록 제공하고자 한다.

프로그램 내에서 라이브러리 데이터의 적용 방안은 Fig. 2와 같다. 예를 들어 튜브 트레일러에서 수소

Table 2. The partial example of cataloging hazard factor library data

| Parameter | Deviation | Library | Cause |
|---|--------------------------------|---------------------------------------|--|
| FLOW | NO/LOW FLOW (NONE /LESS) | Block | Manual valve opening failure or non-opening due to operator error |
| | | | Maintenance valve not open after maintenance |
| | | | Failure to open due to malfunction of the actuation valve itself |
| | | | Insufficient supply of working fluid to the fluid actuation valve |
| | | | Filter blocking due to particles accumulate |
| | | | Blocked of flow control valve or flow meter |
| | | Fail to control | Fail to control the flow control valve (setting below the standard value) |
| | | | Fail to control the pressure control valve (setting below the standard value) |
| | | | Low flow rate supply due to failure of the flow control device itself |
| | | Leak | leak of piping/valve connection and fitting unit |
| | | | Poor connection and failure of tube trailer hose |
| | | | Fail to close of tube trailer ventline valve |
| | | | Fail to close of tube trailer drain valve |
| | | Decrease in supply | Insufficient supply or replacement delay of tube trailers |
| | Fail to hydrogen supply system | | |
| | HIGH FLOW (MORE) | Fail to control | Fail to control the flow control valve (setting over the standard value) |
| | | | Fail to control the pressure control valve (setting over the standard value) |
| | | | High flow rate supply due to failure of the flow control device itself |
| | | | Damage to the flow control device or regulator (in the case it can not reduce pressure when damaged) |
| | | Leak | Fail to close of process outlet ventline valve |
| Fail to close of process outlet drain valve | | | |
| Wrong supply | | High pressure tube trailer connection | |
| | | Hydrogen supply side oversupply | |

를 공급하는 공정에서 “LOW FLOW”의 이탈 상태를 평가한다면, 라이브러리는 Fig. 2와 같이 라인 누출(Leak), 라인 막힘(block), 방출 라인 열림(vent line open), 기능 오류(fail to control), 공급 잔량 부족(decrease in supply) 등으로 제공된다. 이를 통해 HAZOP 평가자는 라이브러리의 내용을 참조하여 라인 누출 또는 라인 막힘이 발생할 수 있는 다양한 원인에 대해 난상토론을 하고 위험 발생 시나리오를 도출할 수 있다. 만일 제공된 라이브러리 용어의 의미를 알지 못하거나 구체적인 상세 원인을 확인하고 싶을 경우 옵션 선택을 통하여 수동 밸브의 열림 실패, 유량 조절 밸브의 열림 실패 등의 원인을 확인하거나 용어의 의미를 확인할 수 있도록 구성할 예정이다.

또한 평가 수행자는 제공된 라이브러리의 내용을 수정 또는 삽입하여 평가 시트(sheet)를 작성할 수 있으며, 제공된 용어 이외에도 평가자가 자유롭게 작성할 수 있는 기능을 제공한다.

2.3 수소 전주기 시스템의 위험 요인 라이브러리

위의 방법을 통하여 대부분의 수소 전주기 시스템에 대한 HAZOP 수행 시 라이브러리 적용이 가능할 것으로 판단된다. 이를 위해 수소 전주기를 8가지 그룹으로 구분하였다.

수소 전주기 시스템은 특성에 따라 기체수소 충전소, 액화수소 충전소, 액화수소 제조, 수소 추출기(steam methan reforming, SMR), 수전해, 수소 연료전지(polymer

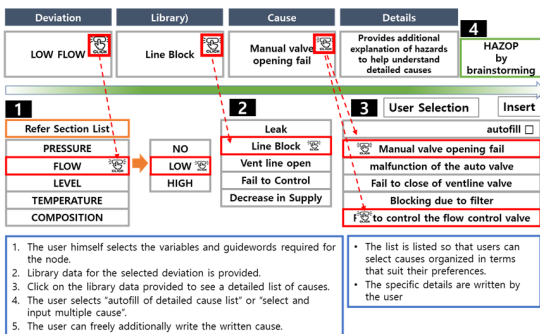


Fig. 2. How to apply hazard factor library data within the program

electrolyte membrane fuel cell [PEMFC], solid oxide fuel cell [SOFC]), 수소 공급 배관으로 구분할 수 있으며, 각 시스템에 대한 주요 설비 및 장치를 기준으로 평가의 node를 표준화 하였다. 수소 전주기 시스템의 8개 그룹과 각 그룹의 주요 프로세스는 Fig. 3과 같다.

각 시스템에 대해 구체적으로 살펴보면, 기체수소 충전소의 경우 튜브 트레일러 수소 공급 공정, 중압 또는 고압 압축 저장 공정, 수소차 충전 공정으로 구분할 수 있다. 여기에 충전되는 차량의 종류별로 위험 요인이 다를 수 있으며, 이를 고려하여 라이브러리를 구성하였다.

액화수소 충전소의 경우 액화수소 저장 탱크의 초기 공정을 위한 질소 퍼지 공정, 수소 치환 및 쿨다운 공정과 기화기 활용 방식에 따른 액화수소 기화 후 압축 저장 공정(이와타니 방식), 액체수소 가압 후 기화 저장 공정(린데 방식) 및 수소차 충전 공정으로 구분할 수 있다.

액화수소 제조 설비 및 플랜트의 경우 초기 질소 퍼지 공정, 수소 치환 및 쿨다운 공정, 수소 액화 공정, 저온 수소 공급 공정, 열 교환(cold box) 공정, 액화수소 저장 공정, 액화수소 공급 공정(pressure build

| Standard STUDY NODE for each of 8 groups (categorized by major equipment/facility) | |
|--|---|
| Steam Methane Reforming 1. NG Supply Facility 2. Steam generator 3. Desulfurization & Steam Reforming 4. CO conversion process (Water Gas Shift) 5. gas-liquid separator 6. tail gas return process 7. Pressure Swing Adsorption system | Hydrogen Liquefaction Plant 1. Nitrogen purge in LH2 liquefier (initial process) 2. Hydrogen purge and cool-down in liquefier (initial process) 3. Hydrogen liquefaction process (LH2 liquefier) 4. low-temperature hydrogen supply pipe 5. Heat Exchange in cold box 6. Liquefied hydrogen storage to LH2 tank 7. Liquid Hydrogen supply to trailer (Pressure Build-Up unit) |
| Water Electrolysis facility 1. Feed water supply 2. Stacks and SOP(Balance of Plant) 3. Hydrogen production, dryer process 4. Oxygen Production and Emission Process | Hydrogen filling Station using Liquefied 1. Nitrogen purge in LH2 storage tank (initial process) 2. Hydrogen purge and cool-down in LH2 tank (initial process) 3. Liquefied hydrogen storage unit (LH2 storage tank) 4. Vaporization compression storage unit (vaporizer-compressor-storage tank) 5. BOG(Boil Off Gas) reliquefaction process 6. Liquid compression vaporization storage unit (liquefaction pump-vaporizer_storage tank) |
| Fuel Cell - PEMFC 1. Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell 2. Hydrogen Supply line 3. Air Supply line 4. Stack Exhaust line 5. Stack Cooling system 6. Atmospheric radiation or waste heat recovery 7. Cascade Composite Exhaust system | Hydrogen filling Station using Gaseous 1. hydrogen Tube Trailer 2. Medium or High-Pressure Compressor and Storage Tank 3. Hydrogen filling for vehicles 4. Hydrogen filling for ships 5. Hydrogen filling for trains and trams 6. Hydrogen filling for construction equipment vehicle 7. Hydrogen filling for Bicycle/Drone vessel |
| Fuel Cell - SOFC 1. solid oxide fuel cell 2. Hydrogen Supply line 3. Air Supply line 4. Stack Exhaust line 5. Stack Cooling system 6. Atmospheric radiation or waste heat recovery 7. Cascade Composite Exhaust system | Piping system to Hydrogen Supply 1. Hydrogen Pressure Regulator or Gas Governor facility 2. Hydrogen supply buried piping 3. Hydrogen supply above ground piping |

Fig. 3. The 8 groups of hydrogen systems and the main processes of each group

up 공정) 등으로 구분할 수 있다.

수소 추출 설비(SMR)는 natural gas 공급 공정, 스팀 발생 및 공급, 탈황 및 개질 공정, CO 전환 공정(WGS), 미반응 수분 제거 공정(separator), tail gas 회수 공정, 수소 정제(PSA) 공정으로 구분되며, 수전해 설비는 feed water 공급, 스택 및 BOP, 수소 생산 및 정제(dryer) 공정, 산소 생산 및 배출 공정으로 구분할 수 있다.

수소 연료전지의 경우에는 PEMFC와 SOFC가 대표적이며, 각각 수소 공급 공정, 공기 공급 공정, 스택 배기 공정, 쿨러 공정, 대기 방열 또는 폐열 회수 공정으로 구분된다.

이 외에도 직접 수소 공급 배관망 설비에 대한 정압 또는 감압 설비, 지하 매설 공급, 지상 공급 배관 등으로 각 시스템의 공정을 구분하고 위험 요인 라이브러리를 정리할 수 있다.

본 연구에서는 이와 관련하여 선행 연구로 수행된 수소 전주기 시스템에 대한 다수의 HAZOP 수행 및 결과를 정리하여 위험 요인을 그룹 및 목록화하였다. 또한 현재 신규 기술 개발을 위해 지원하고 있는 규제 특구 또는 규제 샌드박스 사업을 통해 신규 개발 및 실증에 관한 다양한 형태의 수소 모빌리티 및 시설에 대한 HAZOP 수행을 하고 평가 결과를 포함하여 위험 요인 데이터를 정리하였다. 이에 따라 수소 열차, 수소 트램, 건설 기계(굴착기, 로더, 지게차 등), 수소 자전거, 수소 드론 등에 수소를 충전하는 공정에 대한 사항을 별도로 분석하여 목록에 포함하였다.

3. 결론

본 연구에서는 다양한 수소 시스템에 대한 HAZOP 수행 시 위험 요인 라이브러리 데이터를 구축하는 방안에 대하여 연구하였다. 이러한 위험 요인 라이브러리 데이터는 HAZOP 수행자에게 효율적인 평가가 이루어질 수 있도록 도움을 줄 것이다. 이는 HAZOP 수행자의 실수 및 망각 등으로 인한 위험성 확인 노력을 방지할 수 있고, 균일한 결과를 도출하기 용이하게 해줄 것이다.

하지만 개발된 위험 요인 라이브러리는 HAZOP 수행에 보조 역할을 할 뿐이기 때문에 구체적인 위험 원인과 시나리오에 대해서는 HAZOP 수행자가 면밀하게 검토하고 파악하여야 한다. 특히, 라이브러리에서 제공되는 상세 원인의 경우 제공된 표준 단어만으로는 구체화되지 못하므로 평가 대상 사업장 및 공정 특성에 따라 알맞게 수정, 검토되어야 한다. 또한 라이브러리에서 제공하지 않는 잠재 위험 요인에 대해서도 검토하도록 노력하는 등 HAZOP 평가팀의 난상토론을 통한 창의적 평가 수행이 요구된다. 즉 라이브러리 적용이 HAZOP 평가 수행 자체를 완성시켜 주지는 못한다. 또한, HAZOP 평가 수행자의 창의력 및 난상토론을 저해할 수 있는 요인을 검토하고 배재하여 HAZOP 수행의 본질을 유지하면서 평가의 편의를 제공하는 것이 본 라이브러리의 역할임을 인지하여야 한다.

현재 HAZOP 위험 요인 라이브러리는 프로그램 개발 및 적용 단계이며 수정 보완에 대한 연구가 지속될 예정이다. 향후 프로그램에서는 사용자 편의성 및 정량적 위험성 평가와의 연계성 등에 대한 연구가 진행될 예정이며, 라이브러리의 내용은 지속적인 업데이트 및 수정 보완을 통해 관리할 수 있도록 하고자 한다.

Acknowledgement

본 연구는 산업통상자원부의 수소충전인프라 안전관리 핵심기술개발(수소 전주기 통합 위험성평가 프로그램 및 액화수소 안전기준 개발, 20215810100060)의 지원으로 수행되었습니다.

References

1. Ministry of Trade, Industry and Energy (MOTIE), "Hydrogen economy revitalization roadmap", MOTIE, 2019. Retrieved from http://www.motie.go.kr/motie/nc/press/press2/bbs/bbsView.do?bbs_seq_n=161262&bbs_cd_n=81¤tPage=221&search_key_n=title_v&cate_n=&dept_v=&search_val_v=%EC%88%98%EC%86%8C.

2. Ministry of Trade, Industry and Energy (MOTIE), "Comprehensive measures for hydrogen safety management", MOTIE, 2019. Retrieved from http://www.motie.go.kr/motie/ne/presse/press2/bbs/bbsView.do?bbs_seq_n=162502&bbs_cd_n=81¤tPage=191&search_key_n=title_v&cate_n=&dept_v=&search_val_v=%EC%88%98%EC%86%8C.
3. D. M. Lee, K. 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", Journal of The Korean Institute for Gas, Vol. 2018, No. 5, 2018, pp. 290. Retrieved from <https://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE07459124>.
4. D. Kwon, S. K. Choi, S. k. Kang, and C. H. 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. Korea Occupational Safety and Health Agency (KOSHA), "Technical guidelines on hazard and operability (HAZOP) analysis for continuous processes (P-82-2012)", KOSHA, 2012. Retrieved from <https://www.kosha.or.kr/kosha/info/searchTechnicalGuidelines.do>.
6. Y. S. Byun, "A study on safety improvement for mobile hydrogen refueling station by HAZOP analysis", Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 32, No. 5, 2021, pp. 299-307, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2021.32.5.299>.
7. D. Shin, D. Seo, T. Kim, K. Rhie, D. Lee, H. Kim, and S. Hong, "Qualitative risk assessment of hydrogen compression reforming process", Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 33, No. 1, 2022, pp. 61-66, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2022.33.1.61>.
8. S. H. Yu, "Hazard analysis on package type hydrogen station [master's thesis]", Asan: Hoseo University; 2017.