



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공 학 박 사 학 위 논 문

STPA 기법을 활용한 패키지형  
수소충전소의 안전성 강화 모델



2022년 2월

부 경 대 학 교 대 학 원

정보시스템학과

이 석 형

공 학 박 사 학 위 논 문

# STPA 기법을 활용한 패키지형 수소충전소의 안전성 강화 모델

지도교수 김 창 수

이 논문을 공학박사 학위논문으로 제출함.

2022 년 2 월

부 경 대 학 교 대 학 원

정보시스템학과

이 석 형

이석형의 공학박사 학위논문을 인준함.

2022년 2월 25일

위원장 이 학 박사 이 경 현 (인)

위원 경영학 박사 김 하 균 (인)

위원 이 학 박사 신 상 욱 (인)

위원 공 학 박사 김 광 백 (인)

위원 공 학 박사 김 창 수 (인)

# 목 차

표 차례 .....	iii
그림 차례 .....	v
Abstract .....	vii
<b>I. 서론</b>	
1.1 연구배경 .....	1
1.2 연구목적 및 방법 .....	4
1.3 연구내용 .....	7
<b>II. 관련연구</b>	
2.1 수소 .....	10
2.1.1 수소의 누출과 확산 .....	11
2.1.2 수소의 연소 및 폭발 .....	12
2.1.3 수소에너지 .....	15
2.1.4 수소생산과 수소의 종류 .....	16
2.1.5 수소운송과 저장 .....	18
2.1.6 수소공급(충전)과 연료전지 .....	21
2.2 수소 모빌리티 .....	23
2.2.1 수소(연료)자동차 .....	25
2.2.2 수소연료전지(전기)자동차 .....	26
2.3 수소충전소(HRS) .....	28
2.3.1 해외 수소충전소 동향 .....	29
2.3.2 수소충전소 특례기준 .....	30
2.4 수소충전소 안전관련 선행연구 탐색 .....	33
2.4.1 정량적 위험성 평가연구 탐색 .....	35
2.4.2 정성적 안정성 평가연구 탐색 .....	39
2.4.3 개인적 위험성과 사회적 위험성 평가연구 탐색 .....	40
2.5 수소충전소 위험요인 .....	41

2.5.1 누출 .....	42
2.5.2 화재(제트화재) .....	46
2.5.3 폭발(폭발과압) .....	49
2.5.4 해외 수소충전소 안전관리 동향 .....	52
2.6 STPA 기법 .....	58
2.6.1 STPA 기법 소개 .....	61
2.6.2 STPA 기법의 수소충전소 적용 방안 .....	68
<b>III. 패키지형 수소충전소의 안전성 강화 모델 연구</b>	
3.1 패키지형 수소충전소 .....	70
3.2 압축시스템 대상 STPA 위험분석 .....	74
3.2.1 개요 .....	74
3.2.2 적용 대상 시스템 .....	76
3.2.3 STPA 수행 1단계 - 사고 및 위험 정의 .....	80
3.2.4 STPA 수행 2단계 - Control Structure 도식화 .....	81
3.2.5 STPA 수행 3단계 - Unsafe Control Action 도출 .....	83
3.2.6 STPA 수행 4단계 - 원인 시나리오 도출 .....	86
3.3 우선순위 패널 대상 STPA 위험분석 .....	92
3.3.1 STPA 수행 1단계 - 사고 및 위험 정의 .....	93
3.3.2 STPA 수행 2단계 - Control Structure 도식화 .....	94
3.3.3 STPA 수행 3단계 - Unsafe Control Action 도출 .....	96
3.3.4 STPA 수행 4단계 - 원인 시나리오 도출 .....	98
3.4 선행연구와 비교 .....	100
3.4.1 STPA 수행 결과 해석 .....	100
3.4.2 선행연구와 비교 .....	104
3.5 패키지형 수소충전소의 안전성 강화 모델 .....	108
3.5.1 패키지형 수소충전소의 안전성 강화 모델 연구 .....	109
3.5.2 패키지형 수소충전소의 안전성 강화를 위한 제안 .....	113
<b>IV. 결론</b> .....	114
<b>참고문헌</b> .....	117

## 표 차 례

[표 1] 수소전기차 및 수소충전소 보급계획 .....	5
[표 2] 수소의 물리화학적 성질 .....	10
[표 3] 수소의 누출특성 .....	11
[표 4] 수소의 연소특성 .....	12
[표 5] 수소의 폭발특성 .....	14
[표 6] 수소생산 기술의 분류 .....	16
[표 7] 지역별 국내 시간당 수소생산 능력 .....	17
[표 8] 튜브트레일러 현황 .....	20
[표 9] 수소 저장방법에 따른 수소저장 능력 .....	20
[표 10] 수소 저장방식에 따른 수소충전소 비교 .....	21
[표 11] 수소연료차, 전기차, 내연기관 자동차 비교 .....	25
[표 12] 수소전기차 보급계획 .....	27
[표 13] 수소충전소 보급계획 .....	29
[표 14] 수소충전소 특례기준의 특징 .....	30
[표 15] 수소충전소 관련 법령 내용정리(1) .....	31
[표 16] 수소충전소 관련 법령 내용정리(2) .....	32
[표 17] 수소충전소 관련 선행연구 현황 .....	33
[표 18] 고찰문헌의 게재시기별 분류 .....	34
[표 19] 정량적 위험성평가 문헌의 사회적 위험성평가 연구사례 .....	35
[표 20] 정량적 위험성평가 문헌의 Key Words .....	36
[표 21] 정량적 위험성평가 문헌의 안전거리 연구내용 .....	37
[표 22] 피해영향 및 피해범위를 연구한 문헌 .....	38
[표 23] 개인적 위험성과 사회적 위험성 평가 연구사례 .....	40
[표 24] 가스충전소의 사고 원인 .....	41
[표 25] 수소의 누출특성 요약 .....	42
[표 26] 수소충전소 누출 위험도평가 결과(이동식 충전소 사례) .....	44
[표 27] 수소충전소 누출크기 및 안전조치 사항 .....	45
[표 28] 수소충전소의 누출형태에 따른 제트화염 길이 .....	48
[표 29] 일본의 수소충전소 안전거리 설정 가이드라인 요약 .....	53

[표 30]	일본의 가스시설 관리체계 .....	53
[표 31]	수소에 관한 중국의 국가표준 .....	54
[표 32]	미국의 가스안전관리 법률 .....	55
[표 33]	미국의 가스시설 관리체계 .....	55
[표 34]	독일의 안전관리 법령체계 .....	56
[표 35]	국제표준 완료된 18종의 KS표준 부합화 추진일정 .....	57
[표 36]	순차적 사고모델의 위험분석기법 특징 .....	58
[표 37]	압축설비 관련 사고예방장치 .....	73
[표 38]	압축시스템의 구성요소 .....	78
[표 39]	사고/손실 및 위험 정의 .....	80
[표 40]	Leak Trip과 관련한 Control Action .....	83
[표 41]	Leak Trip과 관련한 Unsafe Control Action .....	84
[표 42]	설비운영 PC_Trip on Large Leak에 대한 UCA 도출결과 .....	85
[표 43]	WD_Trip on Large Leak에 대한 UCA 도출결과 .....	85
[표 44]	UCA1에 대한 원인(Causal Factor) 분석(1) .....	90
[표 45]	UCA1에 대한 원인(Causal Factor) 분석(2) .....	91
[표 46]	사고 및 위험 .....	93
[표 47]	우선순위 패널의 주요 구성요소 .....	95
[표 48]	Control Action ESD의 Context Table .....	96
[표 49]	ESD에 대한 UCA .....	97
[표 50]	Operator의 ESD에 대한 UCA 및 원인 시나리오 .....	98
[표 51]	Sensor의 ESD에 대한 UCA 및 원인 시나리오 .....	99
[표 52]	선행연구의 긴급차단장치(ESD) .....	105
[표 53]	STPA 분석결과에 따른 ESD 실패의 원인 .....	106
[표 54]	긴급차단장치(ESD)와 ESD System .....	109

## 그 립 차 례

[그림 1] 연구 체계 .....	6
[그림 2] 수소운송과 저장 .....	19
[그림 3] 수소연료전지의 개념도(고분자전해질) .....	22
[그림 4] 수소 모빌리티 분류 .....	23
[그림 5] 수소 모빌리티 기술 현황 .....	24
[그림 6] 수소연료전지 자동차의 구동 원리 .....	26
[그림 7] 수소충전소 구성도 .....	28
[그림 8] 수소충전소의 위험요인 개념도 .....	41
[그림 9] Hydrogen Jet Flame by HyRAM .....	46
[그림 10] Jet-Fire Distribution .....	47
[그림 11] Flame (Compressor) .....	48
[그림 12] Flame (Dispenser) .....	49
[그림 13] Flame (HPT) .....	49
[그림 14] 고압가스충전소의 누출 1분 후 폭발환경 시뮬레이션 .....	50
[그림 15] 수소충전소의 충전호스 누출 120초 후 Jet Effect 상황 .....	51
[그림 16] 수소충전소의 충전호스 누출 150초 후 VCE 상황 .....	51
[그림 17] STPA 절차 .....	61
[그림 18] STPA 절차 1단계(사고 및 위험 정의) .....	61
[그림 19] STPA 절차 2단계(Control Structure 도식화) .....	62
[그림 20] STPA 절차 3단계(UCA 도출) .....	63
[그림 21] STPA 절차 3단계(UCA 도출을 위한 Context 관계)) .....	64
[그림 22] STPA 절차 4단계(원인 시나리오 도출) .....	65
[그림 23] STPA 절차 4단계(원인 시나리오 도출[L1]) .....	66
[그림 24] STPA 절차 4단계(원인 시나리오 도출[L2]) .....	67
[그림 25] 패키지형 수소충전소 개념 .....	71
[그림 26] 패키지형 수소충전소의 패키지 구성 .....	72
[그림 27] 패키지형 수소충전소의 공정 개념도 .....	73
[그림 28] 패키지형 수소충전소의 시스템 구성 .....	75
[그림 29] 압축시스템의 수소 흐름도 .....	76

[그림 30] 패키지형 수소충전소의 안전시스템 구성 .....	77
[그림 31] 패키지형 수소충전소의 수소 및 데이터 흐름도 .....	79
[그림 32] STPA 수행절차 .....	80
[그림 33] Controller가 운전원인 경우의 Control Structure .....	81
[그림 34] Controller가 시스템인 경우의 Control Structure .....	82
[그림 35] Controller가 UCA를 행하는 경우의 Control Structure .....	86
[그림 36] Control Path 오류 Control Structure .....	87
[그림 37] Controlled Process상의 문제 Control Structure .....	88
[그림 38] Controller가 의사결정을 방해하는 Control Structure .....	89
[그림 39] 패키지형 수소충전소의 우선순위 패널 구성 .....	92
[그림 40] 우선순위 패널의 Control Structure .....	94
[그림 41] Controller가 안전관리자인 경우의 ESD Flow .....	101
[그림 42] Controller가 ESD System인 경우의 ESD Flow .....	102
[그림 43] 선행연구의 관심분야 .....	104
[그림 44] ESD와 ESD System의 제어구조 .....	110
[그림 45] 강화된 패키지의 ESD 시스템 구조도 .....	111
[그림 46] 안전성 강화 모델 Control Structure Diagram .....	112
[그림 47] 안전성 강화 모델 .....	113

# **A Study on the Safety Enhancement Model for Package Type Hydrogen Refueling Station through STPA Application**

Seok Hyung Lee

Department of Information System  
The Graduate School, Pukyong National University

## **Abstract**

In order to solve the global warming problem, the development and supply of eco-friendly energy has become an important issue in worldwide, and among eco-friendly energy, hydrogen energy is gradually expanding as a sustainable energy source. In addition, hydrogen energy is the most closely related energy source to life of citizens and is developing as a future growth engine that can be used in residential, transportation, and industrial fields. However, since most people are not sure about the safety of hydrogen energy, such as hydrogen explosion, research on the safety of hydrogen energy is absolutely necessary.

This study studies a safety enhancement model for a off-site packaged hydrogen refueling station that transports the produced hydrogen to the hydrogen refueling station. Although there are various methods for research to enhance the safety of packaged hydrogen refueling stations, this study proposes a model to which the STPA (System-Theoretic Process

Analysis) technique is applied, which can be applied to various fields related to recent safety. In order to strengthen the safety of the hydrogen refueling station, the process flow diagram of the packaged hydrogen refueling station was analyzed, and based on this, a risk analysis was derived for the compression system and priority panel of the hydrogen refueling station through the STPA implementation step-by-step process.

In this study, a safety reinforcement model applied with the STPA technique that can consider control issues between the entire system and components, not specific components, was proposed to enhance the safety of the packaged hydrogen refueling station. This thesis suggests the following safety reinforcement model compared to the basic research for improving the safety of hydrogen refueling stations.

- 1) Propose an integrated ESD system that can respond to ESD failures
- 2) Proposal of an integrated FGS (flame & gas system) that can detect hydrogen leakage, density and flame and operate firefighting equipment
- 3) Propose a safety-related system (SRS) that can meet international standards related to gas stations.
- 4) Propose a forced ventilation system that can interfere with a fire or explosion environment due to hydrogen leakage and retention, and an Independent Protection Layer (IPL) system that the proposed system can respond to ESD failures.

Although this study proposes a model to which the STPA technique is applied to enhance safety for off-site packaged hydrogen refueling stations, safety enhancement studies for on-site hydrogen refueling stations and various transportation methods should be added.

# I. 서론

## 1.1 연구배경

인류가 화석연료를 사용하면서 지구의 온실가스 균형이 깨지고 온도가 상승하면서 지구온난화가 진행되었다. 20세기부터 지구의 온난화 위기를 극복하려는 인류의 노력이 본격적으로 시작되었다. 이산화탄소 배출 억제에서 시작한 범세계적인 노력이 이제는 이산화탄소를 발생시키지 않는 새 에너지 자원을 찾아 활용하는 차원으로 본격 진화한 것이다.

피터 호프만(1981)은 *The Forever Fuel: The Story of Hydrogen*에서 “수소는 우주에서 발견할 수 있는 원소 가운데 가장 가볍고 가장 보편적이다. 수소를 에너지로 이용할 경우 ‘영구 연료’라고 주장했다[1]. 또 Jeremy Rifkin(2002)은 *The Hydrogen Economy*, 그의 저서에서 “지구 환경 변화와 오염을 막기 위한 가장 적합하고 청정한 에너지원은 ‘수소’밖에 없다”고 주장하고, 화석연료(갈탄, 석탄, 석유, 천연가스)의 시대에서 수소에너지 시대로 진입해야 함을 역설하였다[2].

수소에너지 시대를 선도하고자 우리나라에서는 국가차원에서 처음으로 “수소경제 육성 및 수소 안전관리에 관한 법률(2021)”을 제정하였다. 명칭에서 나타나듯이 이는 수소경제의 육성과 수소의 안전관리를 최우선 관심사항으로 표현한 것이라 해석할 수 있다. 수소에너지 생태계는 수소생산, 저장 및 이송, 수소공급, 수소이용으로 나눌 수 있다. 궁극적으로 수소에너지를 이용해 동력으로 전환함으로써 에너지원으로서의 화석연료를 수소로 대체하

는 것이다. 에너지로서의 수소이용 분야는 크게 가정(건물)용, 산업용과 교통 분야로 나눌 수 있다.

도시의 과밀화와 교통의 발달은 생활 속의 이산화탄소 배출로 사람들이 느끼게 된다. 자동차에서 배출하는 매연을 통해 일반 도시민들이 이산화탄소를 직접 경험하고, 그 폐해를 느끼게 됨으로써 자동차의 사용을 줄이거나, 이산화탄소 배출량을 감소시키는 노력이 시작되었다. 디젤 차량을 줄이고, 하이브리드 차량의 개발, 전기자동차의 보급에서 시작한 자동차 매연배출 저감 노력은 수소전기차(수소연료전지 전기자동차, 수소연료자동차)의 개발과 보급으로 이어진다.

수소자동차의 보급 확산은 이용자의 편의와 직접 관련된 수소충전소의 보급에 달려 있다. 수소충전소는 시민들의 생활과 직결되는 수소 모빌리티, “더 깨끗하고 건강하고 효율적인 도시에 기여”할 수소연료전지 자동차의 보급과 이용에 직결된다(수소위원회, 2018)고 볼 수 있다[3].

에너지원으로서의 수소는 생산이나 저장, 이송, 공급 분야의 기술 개발 과정에 있으므로 가격 측면에서 아직은 석유나 천연가스보다 경제성이 취약하다. 수소가 에너지 가격 경쟁력을 갖추기 위해서는 수소공급 인프라의 구축과 수소 교통수단의 보급이 주요한 경제적 선택요인으로 작용한다. 우리나라에서는 수소 차량 보급에 따른 이용자의 편의성 제고를 위해 수소충전소의 보급확대를 위한 정책을 실천하고 있다. 수소충전소의 안전에 관한 연구와 정책적 노력이 필요한 이유이다.

중앙정부와 지방정부는 수소전기차 및 충전소 보급계획을 수립하고 수소

충전소를 확대보급하여 수소차량 사용자의 불편을 줄이고, 편의성을 지원함으로써 수소 차량의 이용을 독려, 도시의 이산화탄소 배출량을 획기적으로 줄이는 정책을 시행하고 있다. 기존에 건설된 충전시설을 활용한 수소용·복합충전소와 패키지형, 이동식 수소충전소 구축이 가능하도록 현행의 입지규제를 완화하는 정책(산업통상자원부, 2018: 용·복합, 패키지형 및 이동식 자동차충전소 시설기준 등에 관한 특례기준 개정고시)을 시행하고 있다.

이 정책은 수소생산 시설과 공급시설인 수소충전소를 함께 가동하여 공간의 활용과 수송비용을 절감할 수 있는 생산과 공급을 직결하는 복합충전소와 이미 설치된 충전소에 수소 및 전기충전소를 추가하여 함께 운영할 수 있는 융합충전소로 구분한다. 패키지형 수소충전소는 “수소압축, 저장, 충전설비를 하나의 패키지 형태로 구성하여 설비를 간편”하게 한다. 이동식 수소충전소는 충전설비를 이동이 가능한 차량에 탑재하여 충전하는 형태이며, 충전 가능하도록 승인받은 장소로 이동하여 운영(가동)할 수 있다. 수소충전소의 보급확대 정책에 따라 시행 단계에 있는 패키지형 수소충전소의 안전에 대한 연구가 필요할 것으로 판단하였다.

본 연구의 범위는 수소에너지의 공급과 이용 분야 중 교통(수송)분야에서 수소의 공급에 해당하는 수소충전시설로 정하였다. 그 중에서 특례기준을 적용하여 충전에 필요한 설비를 하나의 보호함(컨테이너 등)에 설치하는 패키지형 수소충전소의 압축시스템, 우선순위 패널을 대상으로 STPA 기법을 적용하여 안전성을 강화하는 모델을 연구한다.

## 1.2 연구목적 및 방법

수소는 지구 질량 중 약 70%를 차지하고 있는 안전한 형태의 원소이다. 수소(H)가 연소(O)하면 물(H<sub>2</sub>O)의 상태로 되돌아가 생태학적으로 가장 안전한 에너지가 된다. 수소는 안전한 기체이지만, 사람들은 수소가 막연히 위험하고, 강력한 화력을 지니고 있다고 기억하거나 인식하고 있다. 특히 2010년 노르웨이 오슬로 수소충전소 폭발사고와 2019년 강원 테크노파크 실험실내 수소탱크 폭발사고로 인해 주민들은 수소의 안전성에 대해 막연한 불안감을 가지고 있다. 수소를 에너지로 전환하여 사용하려면 사람들의 수소의 안전성에 대한 부정적인 기억과 인식을 바꾸어야 한다.

수소연료전지 전기자동차(수소전기자동차)의 상용화로 건설 현장의 지게차에서부터 수소버스, 수소택시, 수소승용차가 보급되고 있다. 도시교통(수송) 분야의 에너지가 화석연료에서 수소로 대체되는 셈이다. 수송부문 에너지원이 수소로 대체되어야 하고, 이를 위해 수소충전소의 보급이 확대되어야 한다는 정책적 당위성을 확인할 수 있다.

그러나, 아직까지 에너지원으로서의 수소가격은 화석연료를 대체하기에는 경제적 한계를 지니고 있다. 에너지원으로서 수소의 가격경쟁력과 더불어 개발과 보급을 시작한 수소자동차의 가격경쟁력 또한 수소경제 시대로의 본격적인 진입에 걸림돌이 되고 있다. 수소연료 시대의 순조로운 진입을 위해서는 수소의 시장가격이 기존의 화석연료, 특히 석유나 천연가스를 대체할 수 있어야 한다. 정부는 가격의 균형을 맞추기 위해 보조금을 지급하거나, 세제감면 등 경제적 혜택을 부여함으로써 수소차량의 보급을 독려

하는 정책을 집행하고 있다. 세계 수소차·충전소 보급현황 및 계획(표 1)에 따르면 독일, 영국, 일본에 이어 한국은 2025년까지 수소차 10만대 보급과 수소충전소 310개소의 설립(2022년)을 계획하고 있다.

표 1. 수소전기차 및 수소충전소 보급계획

		2025년		2030년	
		수소전기차	수소충전소	수소전기차	수소충전소
한국		6.7 만 (2022년)	310 (2022년)	63 만	520
일본		20 만	640	80 만	900
중국		5 만	300	100 만	1,000
미국		3 ~ 6 만 (2023년)	123 (2023년)	-	-
유럽	독일	65 만	400 (2023년)	180 만	1,000
	영국	28 만	300	-	1,000

출처: 한국수소산업협회 2020 수소산업연감, 정부 및 언론 보도자료 종합 정리

수소가격의 경쟁력을 갖추기 위해서는 수소차량의 적정 판매(공급)량과 더불어 수소생산, 저장, 이송, 공급과 이용의 기술개발과 인프라 구축이 시급한 실정이다. 수소공급 인프라 구축과, 해당지역 민원에 대응하고 빠른 시행을 위해 중앙정부인 환경부가 대기환경보전법 개정을 통해 수소충전소의 설치계획 승인 등 인허가권을 행사(2021. 07)하기로 하였다.

본 연구는 수소충전소에 대한 위험분석 및 안전성 향상을 위한 선행연구를 고찰하여 위험성을 식별한다. STPA 기법을 적용하여 패키지형 수소충전소의 위험요인을 분석함으로써 우리나라의 패키지형 수소충전소의 사고(손실)을 예방하여 수소충전소의 안전을 강화하기 위한 방안을 탐구한다.

본 연구의 연구체계는 수소의 누출에 따른 위험특성을 파악하고, 수소충전소의 위험성평가에 관한 고찰을 통해 위험요인을 식별한다. 그리고 패키지에 대한 압축시스템 및 우선순위 패널을 대상으로 STPA를 적용하여 위험을 분석한다. STPA 분석결과와 선행연구의 결과를 비교한 후 패키지형 수소충전소의 안전성 강화 모델을 구상한다. 모델을 기반으로 시행 초기 단계의 패키지형 수소충전소에 대한 안전성 향상 방안을 제안한다. 연구체계를 도식화하면 (그림 1)과 같다.

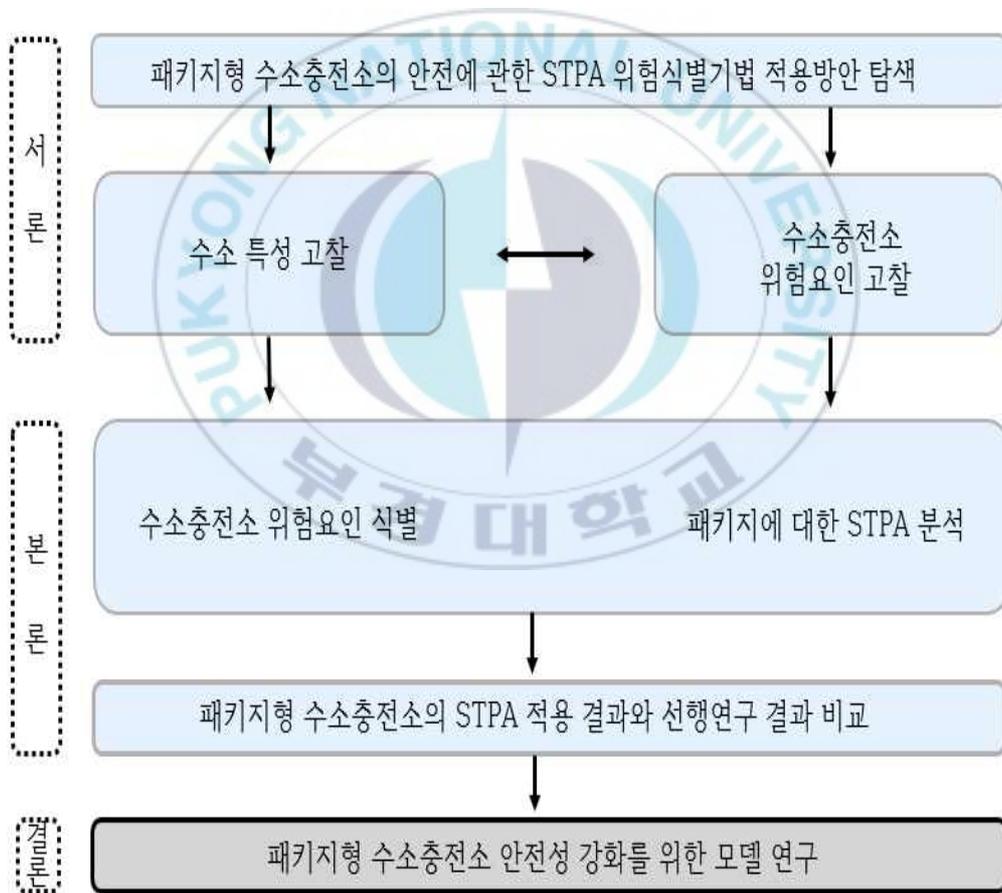


그림 1. 연구 체계

### 1.3 연구 내용

수소에 관한 특성을 살펴 안전성과 위험성에 대해 분별하고, 수소에너지 생태계를 조사한다. 수소자동차의 형태와 수소연료 사용에 관해 검토함으로써 수소충전소의 충전 프로세스를 살펴보고, 수소충전소 안전관련 선행 연구를 고찰한다. 특례기준을 통해 패키지형 수소충전소와 충전 프로세스, 시스템별 위험을 정의한다. 시스템 이론을 근거로 하는 STPA 사고(손실) 분석기법을 적용하여 패키지형 수소충전소의 위험요인을 식별한다.

#### (1) 수소의 특성

수소를 에너지원으로 사용하기 위한 수소의 물성과 특성을 파악한다. 수소의 누출로 인한 제트화염의 특성, 폭발 등에 관한 위험인자와 조성 환경(여건) 등에 대해 선행연구 결과를 통해 알아본다.

#### (2) 수소에너지

수소에너지로서의 의미와 가치를 탐색하고, 현재 사용하고 있는 도시가스 및 LPG와의 물성을 비교하여 안전성을 비교해 보고 수소에너지의 용도에 대해 국내외 자료를 알아본다.

#### (3) 수소에너지 생태계

수소에너지 생태계를 분류하여 수소생산 방식에 따른 용어를 정리한다. 수소생산원료에 따른 수소 생산방법부터 파악한 후 수소의 제조기술, 전기분해법의 종류와 방법, 고체산화물의 수전해전지의 원리를 살펴보고, 생산된 수소의 저장 및 이송과 관련한 기술과 현황을 살펴본다. 현재 수소에너지

지의 안전 사항에 관해 고찰한다. 저장 및 이송과 관련한 용기, 부품, 소재, 장비, 설비 등에 관한 포괄적 안전사항 도출 및 요구조건을 탐구한다.

#### (4) 수소에너지의 이용

수소에너지의 이용과 관련한 산업용, 발전용, 가정용, 수송(교통)용에 대한 자료와 수소에너지 가치사슬을 탐색하고 ‘더 깨끗하고 건강하고 효율적인 도시에 기여’하는 수소 모빌리티에 관하여 고찰한다.

수송용 차량 중 도시민의 일상과 직접 관련이 있는 수소(승용)자동차에 대한 정의 및 용어를 정리한다. 수소연료전지 자동차의 원리 및 특징과 전기자동차 및 내연기관 자동차를 비교, 수소연료 자동차와 수소연료전지 자동차의 개념을 정리한다.

#### (5) 수소충전소

수소충전소에 대한 각국의 규정과 입지에 관한 규제가 고압가스 법규와 연계되어 있어 이에 관한 조사가 필요하다. 주요국의 수소 관리 체계와 특징을 살펴본다. 세계적으로 수소에너지의 시대에 진입하는 초기 단계인 관계로 수소충전소에 관한 안전규정은 국제 표준안이 마련되어 있지 않은 것이 현실이다. 한국의 KS표준과 적합화하는 추진 일정에 대해 알아본다,

해외 주요국에 관한 사례연구를 살펴 수소에 관한 중국의 국가표준, 미국의 가스안전관리 법률, 미국과 일본의 가스시설 관리체계, 독일의 안전관리 법령체계를 알아본다. 수소충전소의 운영형태를 조사한다. 생산지에서 직접 수소를 공급하거나 생산지에서 파이프를 이용하여 공급하는 On-Site 방식, Off-Site 충전소의 구축 현황을 살펴본다. 특례기준에 명시한 융합수

수소충전소, 복합수소충전소, 패키지형 수소충전소와 이동식 수소충전소에 대해 알아본다.

#### (6) 수소충전소의 안전 관련 선행연구 고찰

수소충전소는 각 장비(Unit)에 포함된 부품과 소재, 장비의 설치에 따른 충전장치, 운영장치, 안전장치, 그리고 사고에 대비한 방호장치로 나눌 수 있다. 개별 부품과 소재, 장비, 설비, 운영장치, 안전장치에 관한 위험도 분석 및 안전강화 방안에 관하여는 선행연구 결과를 참고하고자 한다. 또 해외의 수소충전소 규정과 내용 등을 살펴본다. 우리나라의 수소충전소 규제 완화 내용과 패키지형 수소충전소의 구축과 관련한 규정을 알아본다.

#### (7) STPA 적용

ICT가 발전함에 따라 EUC(EUC: Equipment Under Control) 장비와 부품들이 E/EE/PE(E/EE/PE: Electrical/Electronic/Programmable Electronic)로 진화하고 있다. 이로 인해 시스템들의 기능과 구성이 복잡해지고, 사고의 발생이 단일 장비나 부품 등 한 가지 원인에 국한되는 경우보다는 여러 복합적 요인에 의한 발생 가능성이 많아진다. Nancy G. Leveson 교수의 시스템 이론에 기반한 STPA(System-Theoretic Process Analysis) 위험분석 방법은 사고발생의 다양한 원인을 고려한 새로운 관점의 사전적(proactive) 위험분석 방법이다. 이 기법은 기존의 정량적 분석에 필요한 사고빈도 등 과거 데이터가 없는 상태에서도 위험분석이 가능하다는 장점이 있다. 수소의 누출이나 사고 빈도 등 국내 데이터가 부족한, 아직 시행 단계인 패키지형 수소충전소와 관련한 안전요구사항 도출이 가능하다고 판단하여 STPA 기법을 적용하여, 안전 강화방안을 연구하고자 한다.

## II. 관련연구

### 2.1 수소

수소는 1776년 Henry Cavendish에 의해 독립된 기체물질로 밝혀지고, 1783년 Antoine Lavoisier가 hydrogen 이라는 원소명을 지었다. 수소는 대기 중에서 수소원자 상태로는 약 0.1 ppm 정도의 매우 적은 양이 존재하며, 무색(無色), 무취(無臭), 무미(無味)한 기체이다. 수소는 자연계에서 비활성 기체 이외의 모든 원소와 결합하여 다양한 수소 화합물로 존재한다. 이런 특성 때문에 질량 기준으로 환산하면 지구의 75%가 수소라고 할 수 있다. 다양한 수소화합물이 수소에너지의 자원이 되는 이유이다.

표 2. 수소의 물리화학적 성질

항목	내용	항목	내용
원자번호	1	기호	H
원자량	1.00794 g/mol	밀도	83.764 g/L
녹는점	-259.16℃	끓는점	-252.879℃
자연발화온도	(공기 중) 572℃	773~850 K	(101.3 kPa)
	(산소 중) 450℃	773~833 K	
폭굉한계	18.3~59 vol%	4.1~74.8 %(공기)	(101.3 kPa)
		4.1~94 %(산소)	폭발한계
최소발화에너지	수소 0.02 mJ	수 0.017 mJ	101.3 kPa
	탄화수소 0.24 mJ	소 0.09 mJ	5.1 kPa
		0.56 mJ	2.03 kPa
연소속도 (0.1 MPa)	공기 2.65 m/s	1.2~9 m/s	25℃, 1 atm
	산소 14.36 m/s		

### 2.1.1 수소의 누출과 확산

수소는 가연성 가스이며, 기체 중에서 가스밀도는 최소이지만, 확산속도는 가장 빠르다. 무색, 무취하여 수소의 누출을 즉시 확인하기가 어렵다. 0℃, 1 기압(atm, 101.3 kPa)에서 83.764 g/m<sup>3</sup>(g/L)의 밀도를 가지며, 공기에 대한 비중은 0.0695에 불과하다. 20℃에서의 확산계수는 0.666 cm<sup>2</sup>/s이며, 25℃에서의 확산계수는 산소의 확산계수보다 약 3.4 정도 큰 0.710 cm<sup>2</sup>/s이다. 표돈영 등 (2019)에 의하면 수소가스의 부상(浮上) 속도는 1.2 ~ 9 m/s으로 비교적 큰 편에 속한다[4]. 수소가 누출되어 확산, 집결되어 있으면 폭발이 일어나기도 하여 취급이 매우 까다로운 물질이다.

표 3. 수소의 누출특성

항목	내용	항목	내용
원자번호	1	기호	H
상태	기체	밀도	83.764 g/L
부상속도	1.2~9 m/s	비중	0.0695 g/cm <sup>3</sup>
확산계수	0.666 cm <sup>2</sup> /s	0.710 cm <sup>2</sup> /s	20℃, 25℃

수소는 독성이 없는 가연성 가스이다. 상온에서 냄새와 색, 공기와 차이를 느낄 수 없다. 폭발범위가 아주 넓은(4 ~ 75 Vol%) 특성을 지니고 있다. 그러나 밀폐된 공간이 아니라면 공기 중으로 날아가 연소하한계(LFL: Lower Flammability Limits)를 벗어날 수 있다. 개방된 환경을 만들어 주면 빠르게 확산하여 수소가 집결하는 것(가스/증기운, vapor cloud)을 막아 자연발화로 인한 연소와 폭발의 위험을 벗어날 수 있다. 그러나 수소충전소의 경우, 고압의 수소를 이송, 저장하고 충전하므로 압축된 수소가스가 누

출될 때에는 작은 공간을 통하여 확산하는 제트누출의 형태를 가지게 된다. 수소의 저장압력에 비례해서 누출속도가 음속까지 증가한다. 수소가스가 누출될 때 누출공 주위의 공기를 흡수, 확산하므로 누출공에서 멀어지면서 수소의 농도는 빠른 속도로 희석된다. 수소가 연소하한(LFL) 이하의 농도가 되면 화재나 폭발 위험성은 없어지게 된다. 제트누출 길이의 산정은 수소충전소의 안전거리 설정 등의 주요 데이터로 작용한다.

### 2.1.2 수소의 연소 및 폭발

수소를 포함하여 화학물질의 화재 및 폭발특성 데이터는 국내에서는 한국산업안전보건공단에서 MSDS(Material Safety Data Sheet)로 제공한다. 미국 화학공학회(AIChE: America Institute Chemical Engineers)의 DIPPR (Design Institute for Physical Properties)에서는 실제 화학물질의 물성을 평가하여 데이터베이스를 구축하였다. CHS(Center for Hydrogen Safety) 등에서 화재 및 폭발 특성 데이터의 확인이 가능하다. (표 4)는 MSDS와 DIPPR에서 연구자가 정리한 것이다[44].

표 4. 수소의 연소특성

항목	내용	항목	내용
가연한계	4.0~75.0 vol%	4.5~94.0 vol%	(공기 중, 산소 중)
자연발화온도	(공기 중) 572℃	773~850 K	(101.3 kPa)
	(산소 중) 450℃	773~833 K	
최소발화에너지	수소 0.02 mJ	0.017 mJ	101.3 kPa
연소속도 (0.1MPa)	공기 2.65 m/s	1.2~9 m/s	25℃, 1 atm
	산소 14.36 m/s		

수소의 가연한계((Flammability Limits, 연소범위)는 공기 중 수소의 함

량이 4.0 ~ 75.0 Vol%, 산소 분위기에서는 4.5 ~ 94.0 Vol% 이다. 수소의 자연발화온도는 공기 중에서 572℃, 산소 분위기에서는 450℃로 알려져 있다. 실험 조건이나 환경에 따라 각각 773 ~ 850 K, 773 ~ 833 K로 약간의 편차는 있는 것으로 보고된다.

대표적인 화재 특성으로는 가연한계, 인화 온도, 최소 자연발화온도, 최소 발화에너지, 최소 산소농도, 연소열 등이 있다. 고압의 수소는 공기 중으로 분출될 때 충격파가 공기를 압축하며, 접촉면에서 수소를 혼합한다. 혼합된 수소와 공기는 온도가 상승하면서 발화 가능성이 커지게 된다. 분출 압력이 높을수록 자기발화(Self-Ignition) 가능성은 높아진다. 즉, 분출 압력이 높으면 충격파가 강해지고, 수소의 제트특성과 압축된 혼합공기가 만나 온도가 급격히 상승하므로 발화 가능성이 커지게 되는 것이다.

수소가스는 점화 에너지가 매우 낮다. 전대천(2014)에 의하면 특히 수소충전소의 고압 수소가 누출될 경우 정전기에 의하여 쉽게 점화되어 제트화재를 형성하는 것으로 알려져 있다. 따라서 고압 수소가스의 누출에 의한 1차적인 위험은 제트화재에 의한 피해이다. 사고지점 주변시설은 제트화재의 복사열 또는 직접 화염에 접촉하여 사고가 확대되는 2차 사고 위험이 있다[5]. 직접 인근 시설물을 가열하여 화재가 확대되어 가는 현상을 예방하기 어렵다. 따라서 제트화재의 길이는 이러한 2차 사고 위험을 대비하기 위하여 중요하다. 이는 수소충전소에서 고압수소의 누출로 인한 화재 위험에 대비하는 내부 시설물간의 안전거리 확보, 외부의 최소이격거리를 규정하는데 근거가 될 수 있다. 제트화재의 길이는 누출 직경과 저장압력의 증가에 따라 증가한다.

수소는 화학당량(chemical equivalent)비 보다 높은 농도에서 위험하다. 다른 가연성가스는 과잉 반응물이 없는 화학당량비에서 가장 폭발 위험성이 높은 특징을 가진다. 수소는 일반 가연성가스와 다른 특성을 나타내고 있다. 전대천(2014)에 의하면 수소는 공기 중에서 농도가 30 ~ 40 %에서 폭발이 일어날 때 위험하다[5]. 폭발이란 고속의 화학반응으로 상(狀)변화 등에 의해 순간적인 온도 상승 및 가스(증기)화가 발생하여, 기체가 고속으로 팽창한다고 정의한다. 폭발의 전파속도는 음속(音速) 이하이지만, 음속을 초과하는 과격한 폭발을 폭굉이라 한다. 또 폭발에서는 압력의 상승은 초압(初壓)의 약 10배 이하이지만, 폭굉에서는 수십 배에 달하는 일도 있다 (출처: 산업안전대사전, 2004, 폭발과 폭굉).

표 5. 수소의 폭발특성

항목	내용	항목	내용
가연한계	4.0~75.0 vol%	4.5~94.0vol%	(공기, 산소 중)
폭굉한계	18.3~59 vol%	4.1~74.8%(공기)	(101.3 kPa)
		4.1~94% (산소)	폭발한계
자연발화온도	(공기 중) 572℃	773~850 K	(101.3 kPa)
	(산소 중) 450℃	773~833 K	
최소발화에너지	수소 0.02 mJ	0.017 mJ	101.3 kPa
연소속도 (0.1MPa)	공기 2.65 m/s	1.2~9 m/s	25℃, 1 atm
	산소 14.36 m/s		

출처: D.R.Lide(2000), CRC Handbook of Chemistry and Physics 74th Ed., CRC Press. (출처에서 연구자가 정리)

수소의 폭발범위는 폭발한계(Explosive Limit)인 폭발하한계(LEL: Lower Explosive Limit)와 폭발상한계(UEL: Upper Explosive Limit) 사이의 범위를 말한다. 수소의 폭발특성은 폭발한계 범위와 발화에 필요한 최소한의 에너지인 최소발화에너지에 대한 값에 의존한다. 표돈영 등 (2019)에 의하면 폭

발한계는 압력과 환경에 따라 101.3 kPa 건조공기에서는 4.1 ~ 74.8 %, 수소의 최소점화에너지는 0.02 mJ을 기준으로 삼지만, 압력이 낮아질수록 최소점화에너지는 커지는 경향이 있다[4].

정리하면, 수소는 다른 연료보다 연소범위와 폭발범위가 넓다. 화재나 폭발에 필요한 최소 발화에너지는 낮다. 그리고 화염속도는 빠르다. 수소의 연소 특성만으로 판단하면 수소의 폭발, 화재 위험성은 다른 화석연료에 비해 매우 크다. 폭발위험성과 관계가 있는 폭굉위험성 역시 크다. 그러나 수소의 확산특성으로 밀폐된 공간이 아니면 다른 연료들과 폭발위험성은 비슷하다.

### 2.1.3 수소에너지

수소에너지는 물, 유기물, 화석연료 등의 화합물 형태로 존재하는 수소를 연소시켜 얻어내는 에너지를 말한다. 화학식으로는 식(1)로 표현한다.



즉, 수소에너지 H<sub>2</sub> 1몰(mol)의 값은 H<sub>2</sub> 1몰과 O<sub>2</sub> 1/2몰이 갖는 에너지와 H<sub>2</sub>O(액체) 1몰이 갖는 에너지의 차이이다. 수소는 연소열이 커 질량 1g당 발열량이 석유보다 3배 이상 높은 효율적인 에너지이다. 수소에너지가 무한의 이상적인 에너지 자원이라고 하는 이유는 수소연료전지를 통해 수소를 전기로 변환할 수 있는 무공해성과 고효율성 때문이다.

수소에너지와 관련하여 최초의 국제 학술대회인 수소에너지경제 학술대회(THEME: The Hydrogen Economy Miami Energy Conference)는 미국 마이

애미에서 1974년에 개최되었고, 이후 국제 수소에너지협회(IAHE: International Association for Hydrogen Energy)가 발족되었다.

#### 2.1.4 수소생산과 수소의 종류

수소는 자연계에서 다양한 수소화합물로 존재하고 있다. 수소생산 기술은 크게 화석연료를 이용하는 방법과 화석연료 이외에서 수소를 생산하는 방법으로 나눌 수 있다. 수소생산 기술의 분류는 (표 6)과 같다.

표 6. 수소생산 기술의 분류

구분	기술	원료	에너지원
화석 연료 이용	수증기 개질	천연가스, LPG, 나프타	열
	부분산화	중질유, 석탄	열
	자열개질	천연가스, LPG, 나프타	열
	직접개질	천연가스	열
비화석 연료 이용	전기 분해	물	전기
	열화학 분해	물	고온열
	생물학적 분해	물 또는 바이오매스	열, 미생물
	광화학적 분해	물	태양광

출처: 2016년 신·재생에너지 백서에서 정리

국내의 수소생산 기술은 현재 개질수소를 중심으로 그레이 수소를 생산하는 안정적인 기술 수준을 유지하고 있다. 탄소포집을 통한 블루수소의 생산 기술에 집중하고 있다. 수소생산 현황은 아래 (표 7)과 같다.

국내에서는 석유화학공단을 중심으로 나프타 분해공정 및 식염전해공정을 통해 수소생산에 관심을 두고 있다. 원료확보의 측면에서 석유화학 공단 중심이라는 수소생산의 지역과 업종의 제한성을 보이고 있다.

표 7. 지역별 국내 시간당 수소생산 능력

지역	생산 능력(Nm <sup>3</sup> /hr)
울산	1,206,170
여수	820,000
대산	267,000
기타	135,000
합계	2,428,770

출처: 2016년 신·재생에너지 백서

수소의 생산형태에 따라 브라운, 그레이, 블루, 그린 수소로 분류하기도 한다. 브라운(Brown)수소는 화석연료 자체인 갈탄과 석탄을 태워서 부산물로 발생하는 수소를 말한다. 수소에너지로 사용하기에는 순도와 포집 방법 등 경제성이 떨어지고, 수소발생 과정에 이산화탄소가 발생하므로 친환경적인 방법이 아니다.

그레이(Grey)수소는 석유화학 공정에서 부산물로 나오는 부생수소와 천연가스를 개질해서 만드는 수소이다. 화학공정 과정에서 수소가 부가적으로 생성되는데 이를 공정에 재투입하거나 별도로 포집하는 것이다. 하지만 이 과정에서 이산화탄소가 많이 발생한다. 그레이수소 1톤(t)을 생산하는데 이산화탄소 10톤이 배출된다. 이산화탄소 포집 기술의 발달로 경제성과 환경성을 보완하면 수소생산의 일정 부분을 담당하게 된다.

블루(Blue)수소는 그레이수소에서 이산화탄소를 포집해 저장하는 기술(CCUS)을 적용하여 생산공정에서 탄소배출을 줄여서 생산하는 수소를 말한다. 현재의 수소생산 기술로는 블루수소 이상의 단계라야 수소에너지로

유통이 가능하다. 국내에서는 그레이수소에서 블루수소로 보강(전환)하고 있는 과정이다.

그린(Green)수소는 태양광이나 풍력, 원자력, 수력 등 신재생에너지와 잉여에너지를 사용해서 수전해를 통해 만드는 수소이다. 생산과정 자체에서 이산화탄소의 배출이 없어 가장 친환경적이다. 학계에서는 자연에서 생산된 음식물 쓰레기의 처리를 통한 과정에서 생산하는 바이오 수소의 생산역시 그린수소로 분류하기도 한다. 세계 각국의 정부는 해상풍력이나 태양광 등을 이용한 그린수소 생산을 권장하고 있다.

### 2.1.5 수소운송과 저장

수소는 기체, 액체, 고체, 금속수소화합물 등 다양한 형태로 저장이 가능하다. 현재 우리나라의 운송, 저장기술은 고압 기체(High Pressure Gas Cylinders)를 이용하는 수준이다. 고체(Solid Metal Hydride)나 액체(Liquid Hydrogen)로 저장하는 방법에 비하여 단위 부피당 수소저장밀도가 낮아(83.794 g/L) 수소공급가격의 경쟁력과 운송 안정성이 떨어진다.

[그림 2]는 On-Site 수소충전소의 경우 수소가 생산되는 현장에서 10 bar로 전용 파이프라인을 통한 수소 이송이나 저장을 위한 200 bar로 1차 압축하여 실린더(튜브)에 저장한 후, 450 bar 또는 900 bar의 보관용 충전용기에 저장하여 공급하는 구조이다[46].

Off-Site 수소충전소는 200 bar로 압축 저장된 튜브트레일러에서 직접 충전기로 연결하거나, 별도 마련된 충전소 내부 저장소에 저장했다가 충전을 위한 과정을 거치는 구조이다.

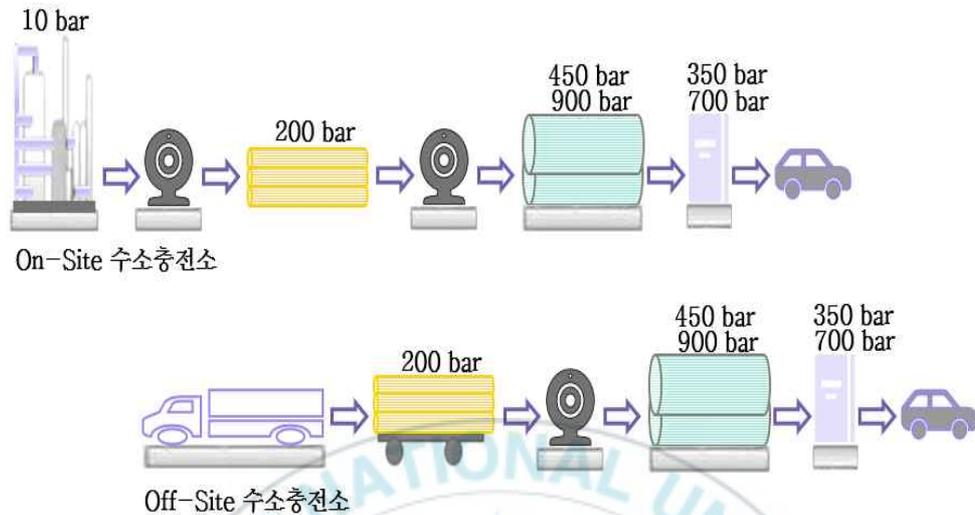


그림 2. 수소운송과 저장

한국수소산업협회의 자료에 의하면 2017년 기준, 국내 수소생산량의 약 12%(11,136만 Nm<sup>3</sup>)가 튜브트레일러로 공급되었다. 현재 국내에서의 튜브트레일러는 200기압의 2,285m<sup>3</sup> 실린더(용기 용량 150 L 이하) 10개가 1 묶음으로 구성되며, 1회 최대 수소운송량은 340 kg으로 제한하고 있다. 국내에서 약 520여대가 운용되고 있다. 1회 수송량은 3,542 Nm<sup>3</sup>(=약 298 kg)이다. 현장에서는 1회 운송에 약 250 Kg을 적재한다. 수소 생산지에서의 튜브트레일러 충전시간, 운송시간, 충전소에서의 저장 충전시간(약 1.5 분/Kg), 회차시간 등을 고려하면 이동가능 거리 240 km 이내에서 1일 1회 수소 튜브트레일러 공급이 가능하다.

해외에서는 수소의 공급거리에 따라 150 ~ 300 km에서는 튜브트레일러(기체수소), 1,600 km 이상의 거리는 액체수소로 운송하고 있다. 튜브트레일러 운용 현황을 아래 (표 8)로 정리할 수 있다.

표 8. 튜브트레일러 현황

	주요 내용
미국	500 bar 튜브트레일러 상용화 → 700 bar 튜브트레일러 실증 중 용기의 용량제한이 없음, 용량확대를 통해 대용량 운송기술 개발
일본	450 bar 튜브트레일러 상용화 용기용량 제한(350 L) → 400 kg/회 운송으로 버스용 등 대용량 충전소 이용 불가
한국	200 bar 튜브트레일러 상용화 → 340 kg/회 운송가능 (현장 250 Kg/회 운송) 용기용량 제한(150 L)

표 9. 수소 저장방법에 따른 수소 저장능력

저장방법	중량밀도 (Mass %)	부피밀도 (kg H <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> )	운전온도 (°C)	운전압력 (bar)
고압기체용기	13.8	40 이하	실온	800
액화저장	용기 종속적	70.8	-252	1
MHS*	2 이하	150	실온	1

출처: 한국수소산업협회 2020 수소산업연감

\* MHS: Metal Hydrogen Storage, 금속수소화물 저장, 수소저장합금

액체수소는 기체수소 대비 1/800의 부피비를 가지며 200 bar 고압기체수소 대비 4.5배의 저장 효율을 확보할 수 있다. 운송관점에서는 파이프라인을 통한 고압기체수소가 효율적이나 저장측면에서는 액체수소가 효율적이다. 다만 수소를 -53°C의 극저온으로 액화시키는데 소요되는 에너지가 크며 장기 저장이 어렵다는 단점이 있다. 백승욱(2019)에 의하면 액체수소충

전소는 우주기술 개발 선진국으로 액체수소 활용 및 기반 기술을 확보한 미국, 일본, 유럽 등에서 보다 적극적으로 구축되고 있다[6].

표 10. 수소 저장방식에 따른 수소충전소 비교

	기체 수소충전소	액체 수소충전소
기술	O	△
장점	운송(파이프라인)	저장(저장효율 4배 이상)
특징	(트레일러튜브) 운송비용 발생	용적(1/800 기체수소 대비)
	200bar 이상 고압기체	액화에너지 기술 및 비용
	2차 압축과 저장이 필요	저장 기간(장기) 문제 발생
	저장용기의 규격화 필요	우주기술 보유국 구축

### 2.1.6 수소공급(충전)과 연료전지

수소충전 프로토콜(SAE J2601)은 수소공급(충전)의 기준이다. 2010년 미국의 SAE(Society of Automotive Engineers)에서 세계 최초로 수소충전 기준을 만들었다. 기준에 따르면 디스펜서의 성능으로 H70(작동압력 70 MPa), T40(공급 수소온도 -40℃ ~ -33℃)의 경우 온도상승을 방지하기 위해 수소를 미리 -40℃로 냉각하여 공급하도록 한다. 일본은 2012년에 JPEC-S0003을 제정하였다. ISO의 수소기술분야 국제표준화 기술위원회에서도 ISO/TC197 Hydrogen technologies[45]를 마련하였다.

우리나라에서는 KGS FP 211, 216, 217에 충전작업에 관한 규정이 있다. 특히, FP 216과 217은 수소충전소의 충전기준이 있지만, FP 211은 충전차량용기에 관한 기준이다.

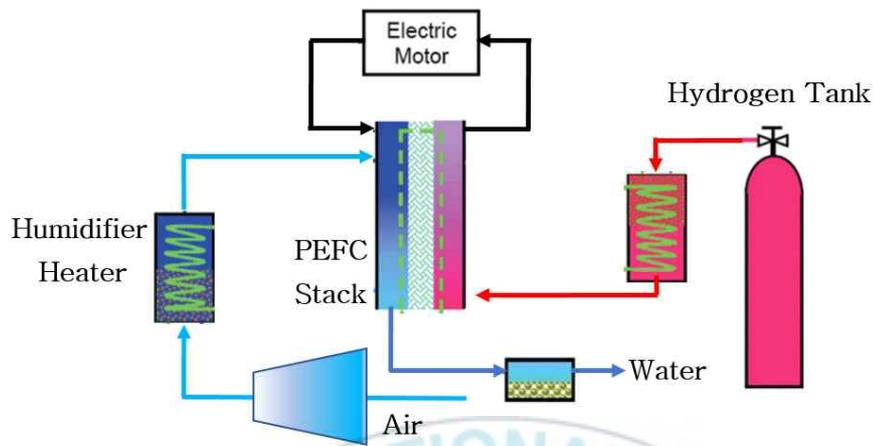


그림 3. 수소연료전지의 개념도(고분자 전해질)

(출처: 심중표 외, 2012: 전기의 세계 61(11) p. 16)

수소연료전지는 수소가 가진 화학에너지를 전기화학적 변환방법(Stack)을 이용하여 직접 전기에너지로 변환시킨다(그림 3). 수소연료전지 시스템은 수소의 공급장치, 전기에너지 변환장치인 연료전지 스택(Stack), 이를 제외한 주변장치(BOP)로 구성된다. 스택(Stack)은 전극과 전해질을 한 세트로, 세트를 여러 장 적층하여 결합한 형태이다. 수소연료전지는 수소가 공급되는 동안 전기를 계속 발생시킬 수 있는 전기에너지 공급장치이다. 심중표 등 (2012)에 의하면 수소연료전지의 특징은 ① 고효율성, ② 무공해, ③ 반응의 과정에서 발생하는 열을 이용할 수 있으므로 전기와 열을 동시에 사용하는 공정, 코제네레이션(Cogeneration)시스템에 최적화, ④ 설치의 간편성, ⑤ 연료의 다양성, ⑥ 저소음, 저진동 등으로 정리할 수 있다 [7]. 우리나라의 연료전지 기술은 자동차용과 발전 분야에서 국제경쟁력을 지니고 있다. 현재 가정용 연료전지는 연료를 제한하고 있다. 휴대용 연료전지 분야에서는 수소, LPG, 부탄, 메탄올 등 연료를 다양하게 사용하는 연료전지 기술을 개발하고 있다.

## 2.2 수소 모빌리티

산업통상자원부의 수소모빌리티 활성화 로드맵(그림 4)에 따르면 수소차와 수소충전소 그리고 수소열차, 드론 및 선박 등 기계(건설용 장비)로 구분한다. 수소차는 승용차, 택시, 버스, 트럭으로 나누고 있다.

\* ( ) : 내수

		2018년	2022년	2040년
모 빌 리 티	수소차	1.8천대 (0.9천대)	8.1만대 (6.7만대)	620만대 이상 (290만대)
	승용차	1.8천대 (0.9천대)	7.9만대 (6.5만대)	590만대 (275만대)
	택시	-	-	12만대 (8만대)
	버스	2대 (전체)	2,000대 (전체)	6만대 (4만대)
	트럭	-	-	12만대 (3만대)
	수소충전소	14개소	310개소	1,200개소 이상
	열차·선박·드론	R&D 및 실증을 통해 '30년 이전 상용화 및 수출프로젝트 추진		

그림 4. 수소 모빌리티 분류

해외의 경우 덴마크 정부가 오는 2030년부터 경유·휘발유를 사용하는 신차의 판매를 전면금지하기로 한 데 이어 최근 네덜란드 암스테르담시에서는 경유·휘발유 차량의 도심 진입을 단계적으로 줄여 2030년엔 완전히 금지하기로 했다. 브뤼셀, 함부르크, 런던, 멕시코시티, 파리, 로마, 타이페이 등 전세계 20개 이상의 도시들이 미래에 디젤 차량과 ICE를 금지할 것이라고 발표했다[3]. 서울시는 2035년부터 모든 내연기관차의 신규등록을 금지하는 규정 마련을 검토하고 있다. 미국의 캘리포니아에서는 2035년까지 모든 내연기관 자동차의 판매를 금지하는 ZEV(Zero-Emission Vehicle)

방침을 발표했다. 이와 연계해 연방정부도 2030년까지 미국에서 생산하는 신차의 절반을 무공해 차량으로 대체하겠다고 한다.

디지털 기술로 구동되는 새로운 애플리케이션에 초점을 맞춘 수소 모빌리티의 경우, VTOL(Vertical Take-Off and Landing, 수직이착륙)택시와 셔틀버스, 현재 사용하고 있는 물류용 수소지게차, 장거리 트럭, 단거리 밴, 자율 선박 및 택배 드론이 미국에서 가능하다고 여겨지고 있다[3].

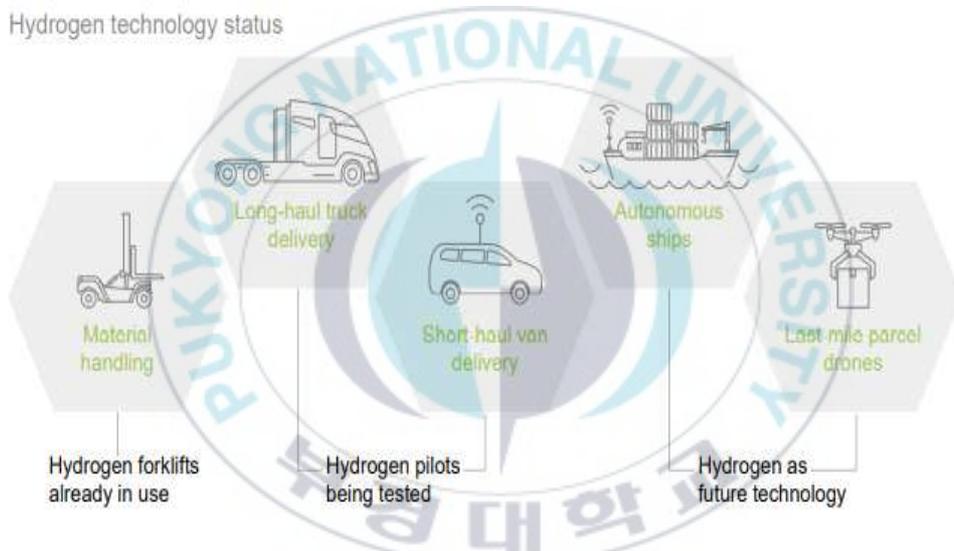


그림 5. 수소 모빌리티 기술 현황

(출처: Hydrogen Council, 2018: Hydrogen meets digital p 16)

도시 중심지에서 배출가스가 전혀 없고, 수소의 높은 에너지 밀도와 빠른 연료 주입이 가능한 디지털 수소 모빌리티 구조는 공간과 비용 효율적인 확장을 가능하게 한다. 미국에서는 2030년까지 수소연료전지로 약 110만~150만대의 자율택시와 약 30만~70만대의 자율(VTOL)셔틀차가 구동될 수 있다고 기대하고 있다.

### 2.2.1 수소(연료)자동차

수소(연료)자동차는 수소를 연료로 사용하는 자동차를 말한다. 수소연료를 휘발유나 경유처럼 내연기관(엔진)의 연료로 사용하는 방식이다. 탄소산화물, 질소산화물, 탄화수소 등을 배출하지 않는 무공해 자동차이다.

표 11. 수소연료차, 전기차, 내연기관 자동차 비교

	내연기관차	수소연료차	전기차
동력원	내연기관	내연기관	전기
연료	화석연료	수소연료	전기(외부충전)
구동과정	화석연료 - 내연기관 (엔진)구동	수소연료 - 내연기관 (엔진) 구동	전기(외부충전) - 배터리 충전 - 모터구동
배기가스	COx, NOx, SOx 등	미배출	미배출
연비	12 km/L	95.9 km/kg	6.4 km/kwh
연료판매가격	1,395 원/L(가솔린)	8,000 원/kg	313 원/KWH
1km당 연료비	116 원/km	83 원/km	49 원/km(고속)
내구성	20 ~ 25 만km	16 만km	20 ~ 25 만km

출처: 산업자원통상부 보도자료 정리

수소연료 자동차의 개념은 수소의 에너지 변환율이 화석연료에 비해 좋고 고유가에 대비하는 방안으로 자동차 선도국에서 오래전부터 연구되었다. 항공기부터 버스, 기차, 선박, 잠수함 등 모빌리티 연료로 수소를 채택하여 시제품 제작을 시도한 사례도 있다. 지구온난화 문제 이후 수소연료 자동차는 배출가스 대신 물을 방출하므로 환경오염을 방지할 수 있는 대안으로도 등장했다.

## 2.2.2 수소연료전지(전기)자동차

수소연료전지(전기)자동차는 수소를 연료로 연료전지(Stack)에서 전기에너지를 변환하여 모터를 구동하는 구조를 지닌 자동차이다. (그림 6)은 한국수소산업협회 홈페이지 수소산업정보에서 정리(현대자동차 제공)한 것이다.

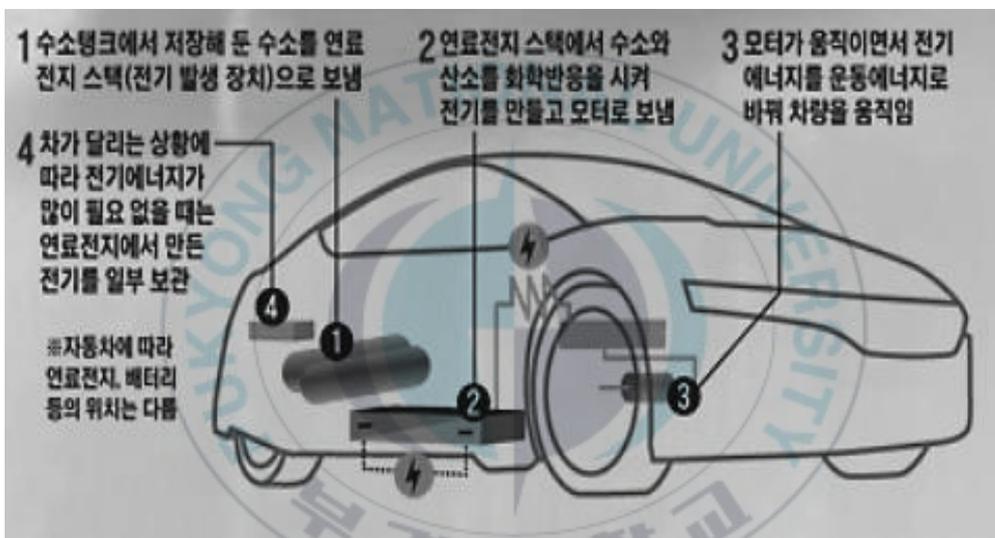


그림 6. 수소연료전지 자동차의 구동 원리

수소 연료전지 (전기)자동차는 HFCV(Hydrogen Fuel Cell Vehicle, 수소 연료전지 자동차), FCV(Fuel Cell Vehicle, 연료전지 자동차), FCEV(Fuel Cell Electric Vehicle, 연료전지 전기자동차), 수소전기차 또는 수소차로 구별없이 사용되기도 한다. 각국 정부는 수소차의 구매를 정책적으로 지원하는 방안을 시행하면서, 수소충전소의 확충도 서두르고 있는 실정이다.

HFCV 승용차 기준으로 차량 당 약 5 Kg의 수소가 충전된다. SAE

J2601 기준에 의거 충전되며 충전소에서 수소차량에 초기 충전 시에는 약 400 bar 저장용기에서 -40 ℃로 냉각한 수소를 약 350 bar로 충전을 시작해, 약 2.5 Kg이 충전된 후 800 bar 저장용기에서 약 700 bar의 압력으로 나머지 2.5 Kg이 충전되어 95% 이상 완충된다. 충전시간은 3분, 이 때 별도의 감압장치는 없고, 충전 속도로 압력을 조절한다.

충전된 차량용기 압력은 약 700 bar 이다. 차량 내에서 연료전지 스택으로 투입되는 수소의 압력은 대기압 수준으로 알려져 있다. 우리나라의 경우, 수소충전소는 넥쏘 수소차 5대를 기준으로 시간당 25 kg을 충전하고 수소충전소 운영 시간을 10시간으로 기준하여 하루 처리용량 250 kg/day 급이 가장 일반적인 수소충전소 규모이다. 우리나라를 비롯한 해외 주요 국가별 수소전기차 보급계획은 아래 (표 12)와 같다.

표 12. 수소전기차 보급계획

		2025년	2030년
한국		6.7 만(2022년)	63 만
일본		20 만	80 만
중국		5 만	100 만
미국		3 ~ 6 만(2023년)	-
유럽	독일	65 만	180 만
	영국	28 만	160 만

출처: 한국수소산업협회, 2020 수소산업연감에서 정리

## 2.3 수소충전소(HRS)

수소충전소(HRS, Hydrogen Refueling Station)는 생산된 수소를 일정한 자격을 갖춘 장소와 시설에서 충전할 수 있는 허가를 받은 곳으로 정의할 수 있다. 우리나라의 수소충전소 관련 기준은 고압가스안전법 및 도시가스사업법에 의거 가스기술기준위원회가 정한 KGS FP216, KGS FP217이다.

수소충전소는 일반적으로 수소공급시스템, 압축시스템, 저장시스템, 충전시스템, 운전시스템으로 구성된다. 수소생산지에서 충전까지를 동일 공간에서 소화할 수 있는 On-Site형(제조식 수소충전소)과 저장용기(튜브 등)를 이용해 수송하여 별도로 저장해서 충전하는 Off-Site형(저장식 수소충전소)으로 크게 분류할 수 있다.



그림 7. 수소충전소 구성도

### 2.3.1 해외 수소충전소 동향

2010년 세계 최초로 미국의 SAE(Society of Automotive Engineers)에서 수소충전 프로토콜(SAE J2601)을 마련하였다. 이어 일본이 SAE J2601을 기반으로 하는 JPEC-S 0003을 2012년에 제정하였고, 국제표준화기구인 ISO의 수소기술분야 국제표준화 기술위원회에서도 ISO/TC 197 Hydrogen technologies를 발표하였다.

유럽은 연간 900 만톤의 수소를 생산한다. 수소의 운송, 저장은 천연가스 파이프라인을 통해 이루어진다. 900여대의 수소전기차와 106개의 수소충전소가 운영되고 있다(2017년 4월 기준). EU에서는 개별 국가 차원이 아니라 유럽 전체의 측면에서 합리적인 수소충전소의 방식과 배치를 고민하고 있다.

표 13. 수소충전소 보급계획

		2025년	2030년
한국		310 (2022년)	520
일본		640	900
중국		300	1,000
미국		123 (2023년)	1,000 (2023년, CA)
유럽	독일	400 (2023년)	1,000
	영국	300	1,000

출처: 한국수소산업협회 2020 수소산업연감에서 정리, 단위: 개

### 2.3.2 수소충전소 특례기준

국내 수소충전소 대표기준으로는 KGS FP216(제조식 수소자동차 충전의 시설·기술·검사 기준)과 FP217(저장식 수소자동차 충전의 시설·기술·검사 기준)이 있다. 각 기준은 수소충전소의 보호시설·화기·다른 설비·사업소경계·도로경계·철도와의 이격거리, 설비의 재료, 구조, 사고 예방설비, 피해 저감설비 기준 등을 제시하고 있다. “용·복합 및 패키지형 자동차충전소 시설기준 등에 관한 특례기준 제정 고시”를 통해 일반 주유소 등과 함께 수소충전소를 구축할 수 있도록 하고 있다. 이처럼 국내 수소충전소 보급 확대를 위해 특례를 개정하는 등 국내 기준은 지속적으로 개정되고 있다.

표 14. 수소충전소 특례기준의 특징

관련 법령(규정)	특례 조항
용·복합, 패키지형 및 이동식 자동차충전소 특례기준	수소, 압축천연가스, 액화석유가스, 전기충전소의 복합 주유소를 설치하는 경우, 거리유지 조건 완화

현행 우리나라 수소충전소의 안전관리 규정은 해외 기준과 사고 경험을 근거로 규정적인 안전기준을 설정하고 있다. 안전거리 산정은 최악의 사고, 최대 피해거리와 직간접적인 피해거리를 도출한다. 각 설치물의 작업공간을 위한 최소이격거리 산정 등은 사고 피해규모 등에 대해 과학적인 근거를 바탕으로 산출하여야 한다. 피해거리는 평가산정 기준과 설정기준에 따라서 큰 차이가 날 수 있다. 수소충전소의 입지와 관련된 규정을 살펴봄으로써 수소충전소 특례기준의 안전관리, 안전거리 완화의 내용을 살펴볼 수 있다.

(표 15)와 (표 16)은 수소충전소 설치와 관련한 국내 제규정(법률 포함)의 내용을 정리한 것이다. 토지의 이용에 관한 규정부터 특정 시설 및 환경과 관련한 규정, 도로 및 철도와 관련한 거리 규정, 고압가스관리와 관련한 규정 등이 포함된다.

표 15. 수소충전소 관련 법령 내용정리(1)

관련 법령(규정)	관련 조항
① 국토의 계획 및 이용에 관한 법률 시행령	제71조(용도지역 안에서의 건축제한)
② 개발제한구역의 지정 및 관리에 관한 특별조치법 시행령	[별표 1] 건축물 또는 공작물의 종류, 건축 또는 설치의 범위
③ 교육환경보호에 관한 법률	제9조(교육환경보호구역에서의 금지행위 등)
④ 문화재보호법 제13조(역사문화환경 보존지역의 보호)	시행령 제2조(건설공사시 문화재 보호)
⑤ 주택법 시행령 제45조 주택건설기준 등에 관한 규정(대통령령)	제9조의2(소음 등으로부터의 보호)
⑥ 도로법 제52조(도로와 다른 시설의 연결), 도로법 시행령 제56조, 도로법 시행규칙 제18조	별표 4(교차로 연결 금지구간 산정 기준)
⑦ 철도안전법	제45조(철도보호지구에서의 행위제한 등)
⑧ 고압가스 안전관리법 제22조의2에 따른 KSG CODE FP216, FP217	보호시설과의 거리
	사업소 경계와의 거리
	화기와의 거리
	도로경계와의 거리

표 16. 수소충전소 관련 법령 내용정리(2)

관련 내용		
①	<p>토지이용규제 정보서비스(www.eum.go.kr), luris.go.kr에서 확인 가능.</p> <p>[불허] 제1, 2종 전용주거지역</p> <p>[허용] 제1, 2, 3종 일반주거, 준주거, 중심·일반·근린·유통·상업, 전용·일반 공업, 준공업, 생산녹지지역 [조례 허용] 보전·자연녹지, 보전·생산관리, 농림, 자연환경보전지역 [조례 불허] 계획관리지역</p>	
②	<p>2. 개발제한구역을 통과하는 선형시설과 필수시설 과. 버스 차고지 및 그 부대시설</p> <p>3. 개발제한구역에 입지해야만 그 기능과 목적이 달성되는 시설 자. 자동차 천연가스 공급시설 며. 택시공영차고지 및 그 부대시설 버. 수소연료공급시설 서. 전세버스 및 화물자동차 차고지(부대시설을 포함한다) 저. 전기자동차 충전시설</p> <p>5. 개발제한구역 주민의 주거·생활편익 및 생업을 위한 시설 마. 주민 공동이용시설 10) 휴게소, 주유소 및 자동차용 액화석유가스 충전소</p>	
③	학교경계로부터 직선거리 200m 범위내 설치 어려움(별도 심의 필요)	
④	문화재 외곽경계로부터 500m 이상 이격 (문화재심의위원회 심의 필요)	
⑤	공동주택·어린이놀이터·의료시설(약국은 제외한다)·유치원·어린이집 및 경로당(이하 이 조에서 “공동주택등”이라 한다)은 충전소 시설로부터 수평거리 50미터 이상 떨어진 곳에 배치	
⑥	접도구역에서 허용되는 행위: 가스공급시설, 교차로 연결금지구간 산정 국도(국토관리청), 지방도 및 시군도(지방자치조례)	
⑦	철도경계선으로부터 30m 이내 구축시 별도 신고	
⑧	보호시설과의 거리	1종 보호시설 17m, 2종 12m 이상 유지 처리/압축 설비는 방호벽 설치(보호시설 30m)
	사업소 경계와의 거리	10m 이상(방호벽 설치시 5m 이상)
	화기와의 거리	8m 이상 유지
	도로경계와의 거리	충전설비는 5m 이상 유지

## 2.4 수소충전소 안전관련 선행연구 탐색

수소충전소 안전관련 선행연구를 탐색하기 위하여 수소충전소를 주제로 발표된 논문과 투고 등을 살펴보고, 위험분석한 결과를 분석한다. 학술컨텐츠 플랫폼인 DBpia를 이용해 전체 검색 키워드를 수소, 수소충전소로 하고, 검색기간은 2000년부터 2021년까지로 하였다(표 17).

표 17. 수소충전소 관련 선행연구 현황

	2000년~2018년	2019년~2021년
학술대회자료	82	92
학술저널	36	36
연구보고서	5	6
전문잡지	5	17
KCI 등재	28	30
한국가스학회	46	26
한국수소 및 신에너지학회	14	11
한국에너지학회	14	27

검색 키워드에서 위험과 안전을 추가하여 검색한 결과는 총 18건으로 나타났다으며, 18건 중 2008년, 2009년, 2011년, 2012년, 2013년은 각 1건, 2017년 2건 외 11건은 2019년 이후에 발표되었다.

본 연구에서는 정부가 수소경제 활성화 로드맵을 발표한 2019년을 기준으로 2019년 이전과 2020년까지 발표된 문헌을 정리해 보았다(표 18).

표 18. 고찰문헌의 게재시기별 분류

고찰문헌	저자
(2007)수소충전소 [25]	서동주, 윤왕래
(2008)국내 수소충전소의 안전성 평가 [26]	서두현, 이광원, 김태훈, 오규형, 김영규
(2013)전산해석을 이용한 고압가스충전소 가스누출 확산 해석 및 위험성 평가 [15]	강승규, 방효중
(2014)수소경제로의 이행을 위한 안전관리정책연구 [5]	전대천
(2017) 위험성평가를 통한 패키지형 수소충전소 안전성 향상에 관한 연구 [19]	강승규, 허운실, 문종삼
국내·외 충전소사고 현황분석 및 가스누출 피해거리 평가 [10]	김혜림, 강승규, 허운실
(2019)수소충전소의 안전성 평가 연구 [4]	표돈영, 김양화, 임옥택
고압수소설비용 비금속부품 소재의 FMEA 평가를 통한 실험적 연구 [28]	안정진, 김완진, 김래현
모델링 및 시뮬레이션을 통한 수소충전 프로토콜 영향인자 평가 [32]	채충근, 강수연, 김한나, 채승빈, 김용규
LPG-수소복합충전소 운영데이터 모니터링 분석 [23]	박승현, 김동환, 구연진, 김필중, 허운실
수소충전소의 보급과 기술개발 [6]	백승욱
수소-LPG 복합충전소 정량적 위험성평가에 관한 연구 [17]	강승규(b)
수소충전소 안전거리 설정을 위한 수소제트 및 화염특성 분석[12]	강승규(a)
LPG 복합 이동식 수소충전소 안전성 분석에 관한 연구 [11]	김필중, 강승규, 유명중, 허운실
CFD 틀을 활용한 패키지형 수소충전시스템의 안전성 향상 연구 [13]	황순일, 강승규, 허운실
(2020) 정량적 위험성평가 프로그램(Hy-KoRAM)을 이용한 제조식 수소충전소 피해범위 및 영향 분석 [22]	김혜림, 강승규
수소-CNG 복합충전소 정 위험성평가에 관한 연구 [18]	강승규, 허운실
정량적위험성평가기반 수소충전소 위험요소 분석연구 [29]	이재용, 이지은, 송형운
수소충전소 설비 증설에 따른 안전성 해석 [14]	박우일, 강승규
이동식수소스테이션 정량적 위험성평가에 관한 연구 [21]	김동환, 이수민, 조충희, 강승규, 허운실
Off-Site 패키지형 수소충전소의 FTA 분석 [26]	서두현(b), 김태훈, 이광원, 최영은
패키지형 수소충전소의 고장형태별 영향 분석 [8]	서두현(a), 이광원, 김태훈

본 연구에서는 2007년부터 2018년까지의 6편과 2019년 이후 발표된 16편의 문헌을 중심으로 고찰한다. 이 중, 4편은 수소충전소의 포괄적 안전에 관한 문헌이고 정량적 위험평가를 다루는 문헌이 주를 이루고 있으며, 서두현 등 (2020a)은 고장형태별 영향을 분석한 정성적 위험성 평가를 연구하였다[8].

#### 2.4.1 정량적 위험성평가 연구 탐색

정량적 위험성 평가(QRA: Quantitative Risk Assessment)는 시설에서 발생 가능한 각각의 위험정도를 수치화하여 나타내주는 방법으로 개별 공정 간의 위험도를 수치적으로 표현해서 공정 간의 위험도 비교 또는 위험도 개선 결과와 같은 값을 정량적으로 보여준다(표 19). 사고시나리오에 대한 기본 데이터 중 우리나라의 사고 데이터는 없다.

표 19. 정량적 위험성평가 문헌의 사회적 위험성평가 연구사례

고찰문헌	개 인	사 회
위험성평가를 통한 패키지형 수소충전소 안전성 향상에 관한 연구(강승규 외, 2017) [19]	-	0
정량적 위험성평가 프로그램(Hy-KoRAM)을 이용한 제조식 수소충전소 피해범위 및 영향 분석(김혜림 외, 2020) [22]	0	0
이동식수소스테이션 정량적 위험성평가에 관한 연구(김동환 외, 2020) [21]	0	0
수소-CNG 복합충전소 정량적 위험성평가에 관한 연구(강승규 외, 2020) [18]	0	0
정량적 위험성평가 기반 수소충전소 위험요소 분석 연구(이재용 외, 2020) [29]	-	-
수소충전소 설비 증설에 따른 안전성 해석(박우일 외, 2020) [14]	0	0
수소-LPG 복합충전소 정량적 위험성평가에 관한 연구(강승규, 2019b) [17]	0	0
LPG 복합 이동식 수소충전소 안전성 분석에 관한 연구(김필중 외, 2019) [11]	0	0

표 20. 정량적 위험성평가 문헌의 Key Words

고찰문헌 Key Words
Packaged hydrogen filling station(패키지 수소충전소), Risk analysis(위험성 평가), Leak frequency(누출사고 발생빈도), Consequence(사고피해영향), Phast/safety(위험성 평가 프로그램) [19]
Hydrogen station(수소충전소), FLACS (flame acceleration simulator), Computational fluid dynamics(전산유체역학) [4]
Hydrogen station(수소충전소), FTA(결함수분석), Packaged(패키지형), Reliability data(신뢰성 데이터), THERP(휴먼에러확률예측기법) [26]
Hydrogen(수소), On-site hydrogen fueling station(제조식 수소충전소), Damage range(피해범위), Hazard distance(위험거리), Risk assessment(위험성 평가) [22]
Mobile hydrogen refueling station(이동식수소스테이션), Fuel cell electric vehicle (FCEV, 수소전기차), Risk assessment(위험성평가), Safety standards(안전기준), Individual/societal risk(개인적/사회적 위험도) [21]
complex refueling station, hydrogen-CNG, risk assessment, individual risk, societal risk [18]
hydrogen, station, quantitative risk assessment, HyRAM [29]
hybrid charging station, hydrogen, electrical power, renewable energy, demonstration [14]
복합충전소, 수소-LPG, 위험성평가, 개인적 위험도, 사회적 위험도 [17]
이동식 수소충전소, 수소차, 정량적 위험성평가, 위험도 [11]

문헌의 핵심 주제어(Key Words)별로 살펴보면(표 20), 위험성(위험)이 10회 이며, Risk Assessment(6), Risk Analysis(1), Individual & Social Risk(3)로 표현되어 있다. 안전과 관련한 안전거리 또는 이격거리에 관한

표현은 Consequence(사고피해영향), Damage range(피해범위), Hazard distance(위험거리), Safety standards(안전기준)의 4회이다.

수소충전소의 각 설비별 위험거리나 수소충전소와 외부 및 주유소 내부의 위험거리를 산출한 연구문헌은 6편으로 아래 (표 21)과 같다.

표 21. 정량적 위험성평가 문헌의 안전거리 연구내용

연구내용의 특징
즉시점화, 지연점화 Tube Trailer (33 m), High pressure Storage Tank (23 m, 복사열 24 m), 폭발과압(화구와 압력) 799~108 m [19]
압축기, 충전기 누출, 폭발과압 연구 (압축기)jet effect 35 m, 120 sec의 경우 70 m 이상 (충전기) 2초 후 점화 건물내부 폭발 범위 형성(인터록시스템) [4]
사례, On-site hydrogen fueling station(제조식 수소충전소), Damage range(피해범위 복사열 10.6 m), 충전기 제트화염 7.5 m Hazard distance(위험거리), ALARP(IR/SR) [22]
단위 구성요소별 위험성 평가, 수소추출기 후단부터 공정 사이의 가스누출. 충전기(10%) 4.5 m~7 m, (100%) 50 ~ 90 m 수소농도감지센서, ESD 시스템, 방화벽(누출시간이 길어질 위험) [26]
압력센서, 온도센서, 비상정지시스템 조치의 전제. FN Curve(ALARP) 압축기 16 m, 충전기 8.5 m, 복사열 높이 4.6~12 m, 길이 7.5~22 m, HST 8 m, Low pressure Storage Tank 6 m(화염길이) [14]
이동식 수소충전소 표준모델 설계, 가연성지역(비방폭 구역)과 격벽설계, 저장 용기의 급격한 파열, 누출(과류차단밸브) 누출지속시간 15초 TT 68 m, HST 86 m, 압축기 47 m, SL 1 m, ML 5~6 m, LL 17 m 과압거리 TT 156 m, HST 78 m, 운전자 교육, 매뉴얼 비치 [11]

연구에서 고압의 수소가 분출하는 경우 자기발화의 위험성이 있으므로 누출 즉시 감시할 수 있는 안전장치가 필요하고, 운전원의 빠른 대응이 필

요하다. 누출량 최소화를 위한 인터록시스템을 마련해야 한다고 주장한다.

표 22. 피해영향 및 피해범위를 연구한 문헌

고찰문헌	저자
(2014)수소경제로의 이행을 위한 안전관리정책연구 [5]	전대천
(2017) 위험성평가를 통한 패키지형 수소충전소 안전성 향상에 관한 연구 [19]	강승규, 허윤실, 문종삼
국내·외 충전소사고 현황분석 및 가스누출 피해거리 평가 [10]	김혜림, 강승규, 허윤실
(2018)장외영향평가 F-N Curve 적용에 관한 연구 [9]	이동혁, 유병태
(2019)수소충전소의 안전성 평가 연구 [4]	표돈영, 김양화, 임옥택
수소-LPG 복합충전소 정량적 위험성평가에 관한 연구 [17]	강승규 (b)
수소충전소 안전거리 설정을 위한 수소제트 및 화염특성 분석 [12]	강승규 (a)
LPG 복합 이동식 수소충전소 안전성 분석에 관한 연구 [11]	김필중, 강승규, 유명종, 허윤실
CFD 툴을 활용한 패키지형 수소충전시스템의 안전성 향상 연구 [13]	황순일, 강승규, 허윤실
(2020) 정량적 위험성평가 프로그램(Hy-KoRAM)을 이용한 제조식 수소충전소 피해범위 및 영향 분석 [22]	김혜림, 강승규
수소-CNG 복합충전소 정 위험성평가에 관한 연구 [18]	강승규, 허윤실
정량적위험성평가기반 수소충전소 위험요소 분석연구 [29]	이재용, 이지은, 송형운
수소충전소 설비 증설에 따른 안전성 해석 [14]	박우일, 강승규
이동식수소스테이션 정량적 위험성평가에 관한 연구 [21]	김동환, 이수민, 조충희, 강승규, 허윤실

(표 22)의 선행연구에 의하면 수소충전소의 위험인자는 수소가 누출되는 부위의 크기와 누출시간, 누출량(Small Leak, Medium Leak, Large Leak), 압력이며, 용기의 파열, 즉시 또는 지연발화 및 과압폭발에 따라 피해의 거리가 달라진다. 피해영향 평가를 기준으로 확보해야 할 안전거리가 산출된다. 즉 피해영향 평가를 기준으로 이격거리, 안전거리 및 방호벽 등 방호조치를 마련할 수 있다.

## 2.4.2 정성적 안정성평가 연구 탐색

정성적 위험성 평가 기법인 고장형태 영향분석(FMEA, Failure Mode and Effect Analysis)은 시스템에 영향을 미치는 전체 요소의 고장을 형태별로 분석한다. 시스템 또는 서브시스템이 가동 중에 기기나 부품의 고장에 의해서 재해나 사고를 일으키게 할 우려가 있는가를 해석하는 방법이다 (산업안전대사전(2004), 네이버 지식백과).

선행연구 대상 문헌에서 유일하게 정성적 안정성을 연구한 서두현 등 (2020a)은 공정흐름 및 이에 따른 부품을 분류하고, 기능을 분석하여 위험 우선순위(RPN, Risk Priority Number)를 산출하였다[8]. 총 23종, 141개 부품에 대하여 Needle valve 등 6그룹의 밸브와 압력, 온도, 유량, 압축, 저장 용기, 필터 및 Pre Cooler와 Chiller, 필터 등 17그룹으로 나누어 정교하게 분석하였다.

분석결과 패키지형 수소충전소의 설계도면 상에서 예측할 수 있는 위험 원인을 찾았고, 그 중 우선적으로 조치해야 하는 RPN 40 이상의 부품과 관련한 10개의 원인을 선정하였다. 고장형태로는 부품의 막힘과 열림 실패가 있고, 수소의 누출과 관련한 원인으로는 밸브와 배관의 체결, 특히 실링(sealing)의 부실로 해석하였다.

연구자가 제시한 해결방안은 수소누출 및 폭발과 관련한 (안전)경고문구 표시, 보호가드 설치 확인과 설치 전 부품의 철저한 검사, 긴급상황 발생 시 대처가 가능하도록 작업자에 대한 공정 매뉴얼 제공과 정기 교육의 필요성 등 이다.

### 2.4.3 개인적 위험성과 사회적 위험성평가 연구 탐색

사회적 위험성을 나타내는 재해발생 가능성의 표현방법 중 하나인 F-N 커브는 많은 사람들에게 해를 입힐 수 있는 재해가 발생하는 건수를 1년 단위로 환산하여 수치상으로 표현한다. 빈도수는 일반적으로 F로 나타내며, 사망자 수는 N으로 표시한다(산업안전보건공단, 산업안전보건 용어사전).

표 23. 개인적 위험성과 사회적 위험성 평가 연구사례

고찰문헌	개인	사회
위험성평가를 통한 패키지형 수소충전소 안전성 향상에 관한 연구 [19]	-	0
정량적 위험성평가 프로그램(Hy-KoRAM)을 이용한 제조식 수소충전소 피해범위 및 영향 분석 [22]	0	0
이동식 수소스테이션 정량적 위험성평가에 관한 연구 [21]	0	0
수소-CNG 복합충전소 정량적 위험성평가에 관한 연구 [18]	0	0
수소충전소 설비 증설에 따른 안전성 해석 [14]	0	0
수소-LPG 복합충전소 정량적 위험성평가에 관한 연구 [17]	0	0
LPG 복합 이동식 수소충전소 안전성 분석에 관한 연구 [11]	0	0

선행연구 사례에 의하면 7편의 문헌에서 사회적 위험성(societal risk)을 다루고 있다(표 23). 사회적 위험성은 한 집단의 사람들이 동시에 사고의 영향에 노출되는 위험도를 나타낸다. 예상되는 사고빈도와 인구밀도 등 사업장의 특성을 반영한다. 사고결과에 따른 예상 사망자 수(number of fatalities) 사이의 관계를 표시한다. 사고의 영향범위를 사업장 밖으로 나가 지 못하도록 예방하는 장외영향평가 F-N Curve 적용을 연구한 이동혁, 유병태(2018)의 사례도 있다[9].

## 2.5 수소충전소의 위험요인

수소충전소에서의 위험요인은 공급시스템, 압축시스템, 저장시스템, 충전 시스템에서의 수소누출이다. 수소충전소의 위험요인에 관한 개념도는 아래 (그림 8)과 같다.

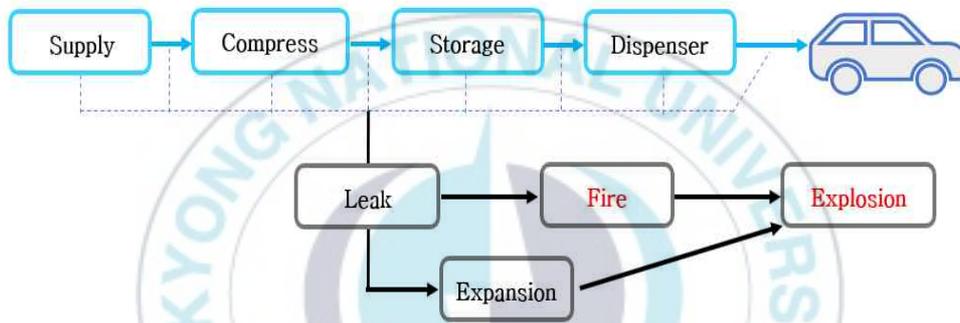


그림 8. 수소충전소의 위험요인 개념도

김혜림 등(2017)에 의하면 사고발생 원인으로는 배관, 밸브, 충전호스, 인적오류, 저장용기, 차량추돌 등이며 인적오류 및 저장용기 취급 부주의에서 오는 사고가 매우 높은 비중을 차지하고 있다[10].

표 24. 가스충전소의 사고 원인

	Leak	Fire	Explosion	Etc	Sum
H <sub>2</sub>	-	2	1	-	3
LPG	12	6	7	3	28
CNG	3	-	3	1	7

2000년부터 2016년까지 국내 가스충전소의 사고원인을 조사한 결과는 (표 24)와 같다. 수소충전소의 위험요인에 관한 연구는 국내 수소충전소의 운영 및 사고사례가 부족하다. 선행연구에서 인용한 수소충전소 누출사고 데이터는 미국 SNL(Sandia National Laboratory, USA)의 사고빈도 데이터를 인용한다. Leak Database는 천연가스 및 석유가스 분야의 축적된 자료를 구축하고 있는 HCRD(Hydro Carbon Release Database, UK), 또는 OGP(Oil & Gas Producers, USA)에서 운영하는 PRFD(Process Release Frequencies Database)를 차용하여 수소충전소의 위험성연구 기초자료로 활용하고 있다.

### 2.5.1 누출

수소충전소의 수소누출위험과 직접 관련이 있는 조건은 압력과 누출부위의 크기, 누출 시간이다. 수소충전소의 수소누출 연구결과에 따르면 시스템 구성부품의 결함과 시스템 사이 연결부위의 부실체결, 작업자 오류로 나눌 수 있다. 누출부위는 배관, 부실체결에 따른 연결부위, 저장용기, 충전기 사용에 따른 작동부위 등 이다. 수소의 부상속도와 확산계수를 통해 수소누출의 특성을 파악할 수 있다(표 25).

표 25. 수소의 누출특성 요약

항목	내용	비고
비중	0.0695	-
부상속도	1.2 ~ 9 m/s	-
확산계수	0.666 cm <sup>2</sup> /s	20℃
	0.710 cm <sup>2</sup> /s	25℃

누출의 위험을 분석하기 위해서 사고 시나리오를 구성한다. 이때 누출부

위와 누출부위의 크기에 따라 대·중·소의 3단계로 구분한다. 저장용기의 파열로 인한 누출도 있으므로 용기에는 대·중·소 외에 파열을 포함한 4단계로 나누어 데이터를 작성한다. 수소충전소의 누출부위는 튜브트레일러, 저장용기, 압축기, 충전기, 제어패널로 나눌 수 있다.

다만, 누출빈도의 유효한 데이터가 국내에는 없으므로 주로 미국의 SNL 자료를 사용하는 형편이다. 용기파열에 대한 사고빈도 데이터는 영국 HSE의 HCRD 및 미국 OGP의 PRFD 데이터를 활용하여 위험도를 산출하는 경우가 많다. 선행연구 문헌의 인용 항목의 내용이 조금씩 차이가 나는 것은 출처의 데이터가 각기 다른 조건이기 때문이다. 데이터의 결과를 해석할 때 유의해야 할 부분이다.

아래의 (표 26)은 이동식 수소충전소의 누출위험도를 평가한 김필중 등(2019)의 연구 결과이다[11]. 이 연구 결과에서는  $3.32E-06$ 의 튜브트레일러 중규모누출의 위험도가 가장 큰 것으로 나타났다. 그 다음이 고압 수소저장용기의 중규모누출이다. 그러나 강승규(2019b)의 연구결과에 의하면 고압 수소저장용기의 대규모 누출이  $4.37E-05$ , 사고 발생 확률은 32.40%로 산출되었다. 그 다음이 저압(중압) 수소저장용기의 대규모 누출로  $3.67E-05$ , 27.18%로 연구되었다[17].

각각의 다른 연구 결과의 수치에서 차이가 나는 것은 신뢰성이나 연구방법의 문제가 아니라 인용한 기준 데이터가 다르기 때문이다. 수소충전소의 사고에 대한 기본 데이터가 없는 상황에서 사고 및 안전성에 관한 평가가 어려운 이유이기도 하다.

표 26. 수소충전소 누출 위험도평가 결과(이동식 수소충전소 사례)

	시나리오	사고빈도/년	평균 사망자수	위험도/년
튜브트레일러 (T/T)	S/L	1.07E-03	5.83E-05	6.24E-08
	<b>M/L</b>	3.21E-04	1.03E-02	<b>3.32E-06</b>
	L/L	-	-	-
	C/R	5.00E-07	1.50E+00	7.49E-07
고압 저장용기 (HPT)	S/L	3.47E-03	6.99E-05	2.42E-07
	M/L	2.09E-04	1.14E-02	2.39E-06
	L/L	-	-	-
	C/R	5.00E-07	3.96E-01	1.98E-07
충전기 (Dispenser)	S/L	7.06E-04	6.90E-05	4.87E-08
	M/L	1.85E-04	1.05E-02	1.94E-06
	L/L	-	-	-
압축기 (Compressor)	S/L	2.76E-03	6.98E-05	1.93E-07
	M/L	2.62E-05	1.05E-02	2.74E-07
	L/L	4.24E-06	1.27E-02	5.39E-08
제어판넬 (P/P)	S/L	1.20E-03	7.08E-05	8.50E-08
	M/L	8.32E-05	1.14E-02	9.47E-07
	L/L	-	-	-

주) S/L(Small Leak), M/L(Medium Leak), L/L(Large Leak), C/R(Catastrophic Rupture)

위험성(Risk)은 피해영향(사망자 수)와 발생빈도(Frequency)의 곱으로 산출한다. 여기서 사용한 사고 당 평균 사망자 수와 1년 단위의 년평균 사망자 수의 차이가 존재하므로 위험성에 관한 수치에 차이가 발생한다.

수소충전소의 누출위험도에는 위 (표 26)의 항목에 저압(중압) 수소저장용기(LPT)의 데이터를 추가하면 된다. 참고로 저압저장용기의 누출위험도

가 L/L일때 3.67E-05라는 강승규(2019b)의 연구결과가 있다[17].

수소충전소의 누출 위험 부위에 관한 누출크기(Leak Size) 및 안전조치에 관한 내용을 아래의 (표 27)로 정리하였다. 명기된 안전조치 사항은 검지기와 ESD(긴급차단밸브 및 과류차단밸브)에 의존하고 있다.

표 27. 수소충전소의 누출크기 및 안전조치 사항

	시나리오	누출크기(mm)	안전조치 사항
튜브트레일러 (T/T)	S/L	0.40	가스검지기, 긴급차단밸브
	M/L	4.02	가스검지기, 긴급차단밸브
	L/L	12.70	과류차단밸브
	C/R	-	-
고압 저장용기 (HPT)	S/L	0.23	가스검지기, 긴급차단밸브
	M/L	2.26	가스검지기, 긴급차단밸브
	L/L	7.16	과류차단밸브
	C/R	-	-
저압 저장용기 (LPT)	S/L	0.25	가스검지기, 긴급차단밸브
	M/L	2.50	가스검지기, 긴급차단밸브
	L/L	7.92	과류차단밸브
	C/R	-	-
충전기 (Dispenser)	S/L	0.23	가스검지기, 긴급차단밸브
	M/L	2.26	가스검지기, 긴급차단밸브
	L/L	7.16	과류차단밸브
압축기 (Compressor)	S/L	0.23	가스검지기, 긴급차단밸브
	M/L	2.26	가스검지기, 긴급차단밸브
	L/L	7.16	-
제어패널 (P/P)	S/L	0.23	가스검지기, 긴급차단밸브
	M/L	2.26	가스검지기, 긴급차단밸브
	L/L	7.16	과류차단밸브

## 2.5.2 화재(제트화염)

수소충전소에서 발생할 수 있는 사고는 화재 및 용기파열에 의한 폭발로 나눌 수 있다. 화재는 발화 시점에 따라 위험의 크기 및 형태가 바뀐다. 수소의 최소발화에너지는 0.02 mJ에 불과해 정전기와 같은 작은 에너지에서도 화재의 가능성이 매우 높다. 수소가스가 누출될 때에는 누출지점을 통하여 제트누출의 양상을 가지게 된다. 이때 누출수소는 외부의 압력이 낮으므로 수소의 부상속도가 증가하다가, 누출지점에서 거리가 멀어짐에 따라 급격히 희석되며 연소하한(4 %Vol, LFL) 이하의 농도에 도달하면 화재나 폭발 위험성은 사라지게 된다. 그러나 주변 구조물이 제트누출에 의하여 형성되는 수소의 연소범위 농도 내에 존재한다면, 구조물 내에 가연범위의 수소가스가 체류하여 화재나 폭발 위험성이 있게 된다. 따라서 제트누출의 길이는 화재나 폭발 위험성이 사라지는 지점인 연소하한 농도까지 정의할 수 있다. 수소누출에 따른 제트화염의 길이는 누출크기와 압력에 비례하는 경향을 보이고 있다. 아래 (그림 9)는 김혜림 등 (2017)의 연구 결과로 게재된 것이다[10].

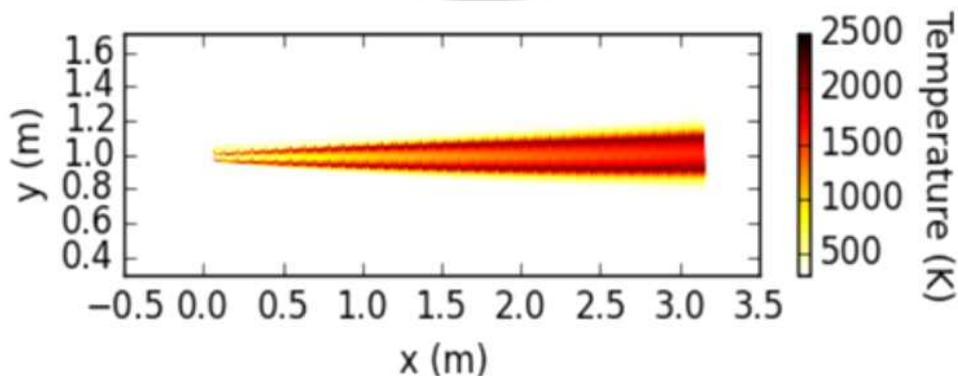


그림 9. Hydrogen Jet Flame by HyRAM

위 (그림 9)는 일본의 사고 데이터를 기반으로 제안하는 규격, 즉 누출공 (100% 관통 원형홀) 직경 1.0 mm를 기준으로 수소의 제트특성을 분석하였으며, 수소의 경우 87 MPa의 사용압력을 적용하여 피해거리를 예측하였다. 누출원은 지상으로부터 1m 지점에 위치하도록 하고 즉시 점화가 일어난다는 조건으로 해석을 수행한 결과이다.

황순일 등 (2019)의 연구에 의하면 모듈패키지 내부의 수소가스 누출 시 즉시 점화에 따른 제트화염이 발생할 경우를, 패키지 내부 전체에 형성된 화염 시뮬레이션을 통해 아래의 (그림 10)으로 확인할 수 있다[13].

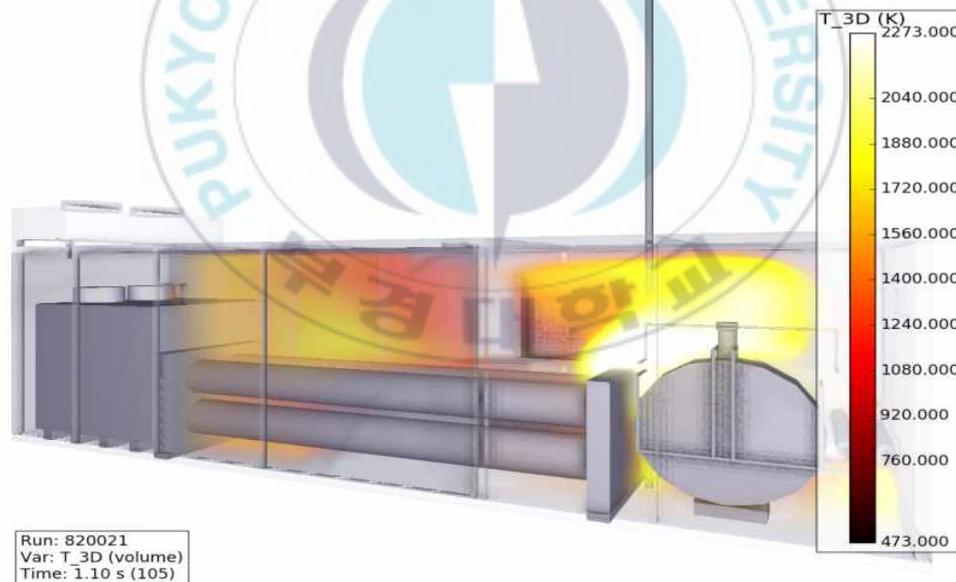


그림 10. Jet-fire Distribution

김필중 등 (2019)의 연구에 따른 제트화염 길이를 아래의 (표 28)로 정리하였다[11].

표 28. 수소충전소의 누출형태에 따른 제트화염 길이

	시나리오	화염길이(Flame Length) [m]
튜브트레일러 (T/T)	Small Leak	0.6994
	Medium Leak	5.6957
고압 저장용기 (HPT)	Small Leak	0.7498
	Medium Leak	6.0319
충전기 (Dispenser)	Small Leak	0.7411
	Medium Leak	5.9111
압축기 (Compressor)	Small Leak	0.7498
	Medium Leak	6.0319
	<b>Large Leak</b>	<b>16.7600</b>
제어패널 (P/P)	Small Leak	0.7498
	Medium Leak	6.0319

박우일, 강승규(2020)의 연구에 따르면, 아래 그림에서와 같이 압축기의 화염길이는 16 m (그림 11), 충전기 8.5 m (그림 12), 고압 수소저장용기 8 m (그림 13)으로 산출하였다[14].

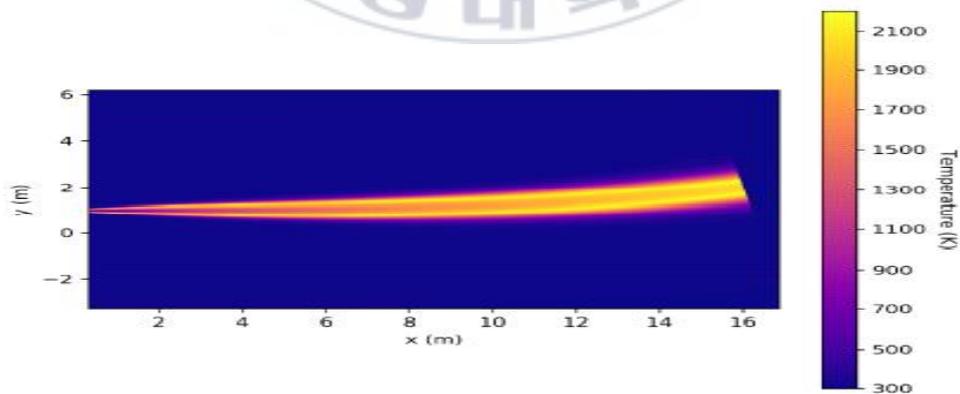


그림 11. Flame (Compressor)

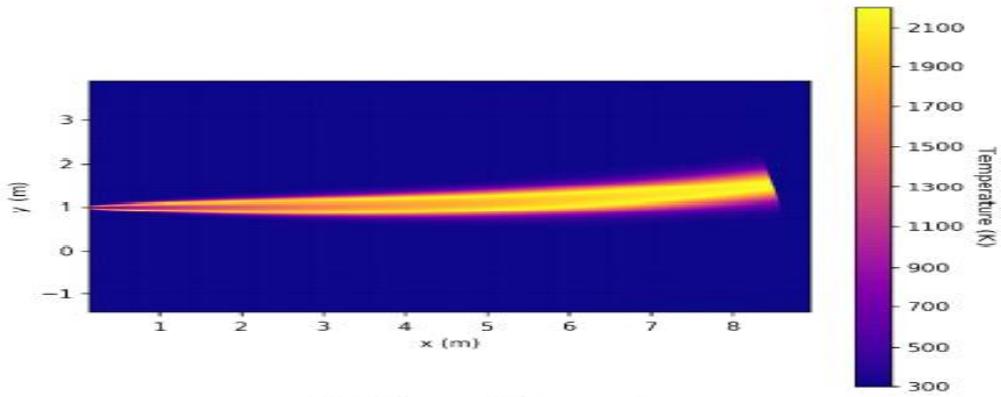


그림 12. Flame (Dispenser)

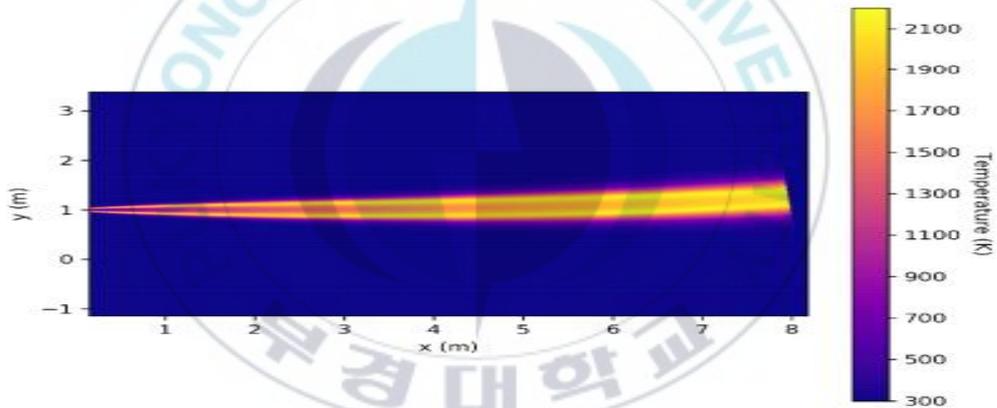


그림 13. Flame (HPT)

수소충전소 내외부의 안전거리를 산출함에 있어서 제트화염의 길이 범위에 포함되는 것으로 나타났다.

### 2.5.3 폭발(폭발과압)

수소충전소에서 폭발위험요인은 용기파열 및 충전호스의 파열에 의한 수소누출이 주를 이룬다. 폭발위험은 누출시간과 누출량에 따라 피해의 범

위가 달라진다. 누출시간을 최대한 줄여서 대응하는 것이 중요하다. 누출 후 일정시간이 지나면 증기운(가스운, Vapour Cloud)의 형성이 달라지기 때문이다. 과압에 의한 증기운 폭발(VCE: Vapour Cloud Explosion)의 피해가 발생하면 대형사고로 이어질 확률이 높다.

강승규, 방효중 (2013)의 연구에 의하면 아래 (그림 14)와 같이 고압가스 누출 후 1분이 경과하면 충전소의 일부 바닥면을 제외하고 충전소 전체가 폭발위험 환경에 속한다[15].

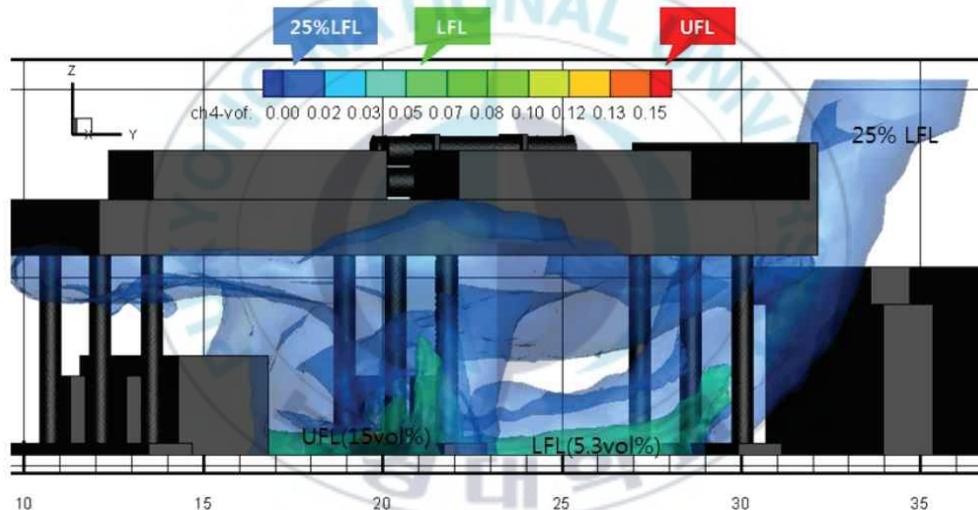


그림 14. 고압가스충전소의 누출 1분 후 폭발환경 시뮬레이션

아래 (그림 15, 16)은 전산유체역학(CFD)을 이용한 표돈영 등 (2019)의 충전호스 누출에 따른 Jet Effect, VCE 시뮬레이션이다[4].

디스펜서 충전호스 파열로 인한 수소누출 후 약 150 sec 경과 시점부터 폭발한계범위에 있는 수소 증기운이 지속적으로 축적, 증기운 폭발(VCE)이 발생되는 것이다(그림 16).

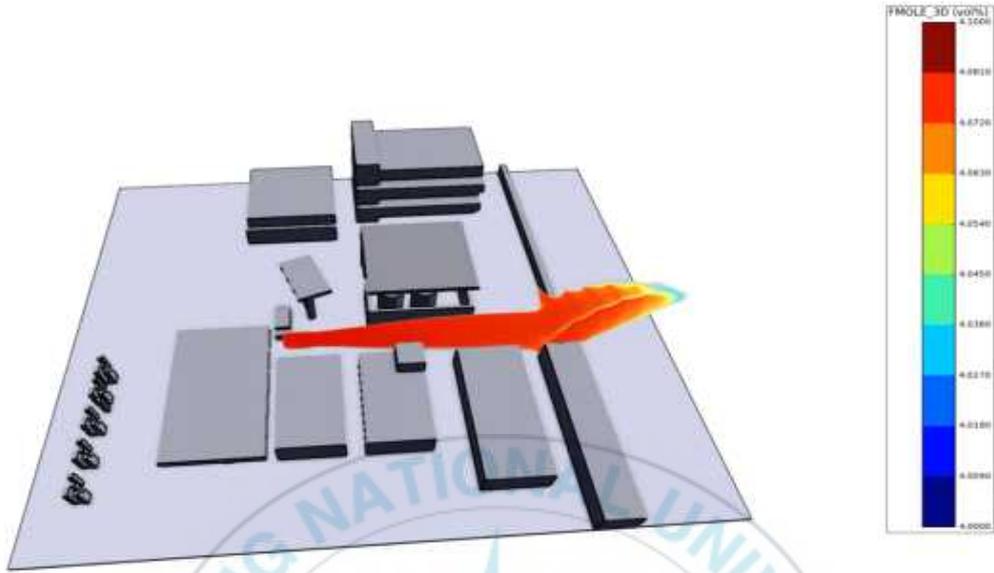


그림 15. 수소충전소의 충전호스 누출 120초 후 Jet Effect 상황

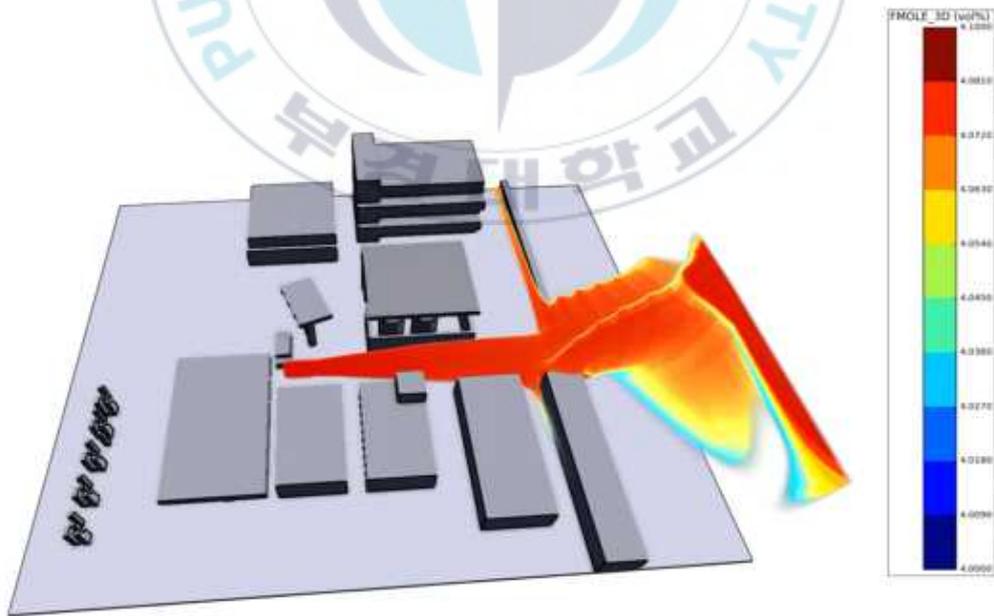


그림 16. 수소충전소의 충전호스 누출 150초 후 VCE 상황

따라서 누출 후 점화가 어느 시점(즉시발화와 지연발화, 지연발화의 경우 발화 시점)에 발생하는가에 따라 폭발로 인한 영향에 큰 차이가 있다. 또, 수소누출 후 6분이 경과하면 수소충전소의 1/2 정도가 폭발한계범위에 포함되는 것으로 연구되었다. 이 시뮬레이션은 디스펜서 충전호스 3/8" (내경 10 mm)의 파열을 전제로 했다. 유동해석을 위하여 수소 증기운 확산조건은 대기온도 15℃, 대기 안정도 "D", 풍속 3.0 m/s로 적용했으며, FLACS(Flame Acceleration Simulator, 노르웨이 기업 Gexcon) code를 활용했다.

#### 2.5.4 해외 수소충전소 안전관리 동향

수소충전소 해외 안전관리 기준 역시 우리의 충전소 관리에 적용하는 고압가스안전관리법 또는 천연가스, 도시가스 관련한 제 규정에 준하여 수소를 관리하고 있는 실정이다. 세계적으로 수소충전소에 관한 안전규정은 국제 표준안이 마련되어 있지 않다. 다만 충전프로토콜인 SAE J2601의 디스펜서(충전기)의 성능 기준 등은 국내 수소충전소 기준이 되고 있다. 수소충전소의 성능, 안전성 평가에도 충전 기준으로 제시되고 있다.

일본의 수소충전소는 2002년 오사카에서 처음으로 설치되어 2016년까지 79개소가 설치, 운영되고 있으며 총 62건의 사고가 발생하였다. 수소충전소는 상용 충전소의 보급이 본격화된 2015년 이후 사고가 증가하는 추세를 보이고 있다. 2016년까지 누적 사고현황에 따르면, 충전소당 사고 발생 확률이 수소충전소는 78%, LPG는 6.9%, CNG는 52%의 비율을 보인다. 사용압력이 높은 연료일수록 사고비율이 높게 나타나고 있어, 고압의 가스를 사용할수록 더욱 심도 있는 안전관리가 필요하다. 일본의 수소충전소에 대한 안전거리 설정 가이드라인을 요약하면 아래 (표 29)와 같다. 일본의 가

스시설 관리체계는 아래 (표 30)과 같으며 경제산업성을 중심으로 민간의 협회에 관리업무가 분산되어 있다.

표 29. 일본의 수소충전소 안전거리 설정 가이드라인 요약

항목	적용기준
화기취급시설	LFL 1/4 이하가 되는 거리
부지 경계	폭풍압 : 부지경계에서 1 kPa 이하 화염길이 : 부지경계까지의 거리 이하 복사열 : 부지경계에서 1,080 kcal/m <sup>2</sup> h
도로와 충전기의 이격거리	폭풍압 : 도로경계에서 1 kPa 이하 화염길이 : 도로경계까지의 거리 이하 복사열 : 도로경계에서 1,080 kcal/m <sup>2</sup> h
설비간 거리	폭풍압 : 설비경계에서 1 kPa 이하 화염길이 : 설비경계까지의 거리 이하

표 30. 일본의 가스시설 관리체계

가스안전업무	안전관리기관
가스시설의 설치 인허가 및 관리	경제산업성, 도도부현, 고압가스보안협회
용기, 냉동기, 특정설비 등 가스제품관리	경제산업성, 보안센터
가스보일러 및 가스렌지 등 연소기류	경제산업성, 가스기기협회, LP가스기기협회

수소에 관한 중국의 국가표준 제정은 아래 (표 31)과 같다. 수소에 관한 중국의 국가표준은 2006년부터 시작하여 2010년 이후로 국가 표준 제정이 가속화되고 있다.

표 31. 수소에 관한 중국의 국가표준

NO (GB/T)	명칭	발표일	시행일
3634.1-2006	수소가스 제1부분 : 공업 수소	06.01.23	06.11.01
3634.2-2011	수소가스 제2부분 : 순수소, 고순도 및 초고순도 수소	11.12.30	12.10.01
24499-2009	수소가스, 수소에너지 및 수소시스템 전문용어	09.10.30	10.05.01
31138-2014	자동차용 수소 디스펜서	14.09.03	15.01.01
31886.1-2015	반응가스의 불순물이 프로톤 교환막 연료전지 성능에 미치는 영향에 대한 측정 방법 제1부분 : 공기 중의 불순물	15.09.11	16.04.01
31886.2-2015	제1부분 : 수소가스 중의 불순물	15.09.11	16.04.01
34542.1-2017	수소가스 저장운송시스템 제1부분 : 일반요구	17.10.14	18.05.01
34542.2-2018	제2부분 : 금속재료와 수소환경의 친화성 시험방법	18.05.14	18.12.01
34542.3-2018	제3부분 : 금속재료의 수소취화 민감도 시험방법	18.05.14	18.12.01
34593-2017	연료전지 엔진의 수소방출 시험방법	-	-
34537-2017	차량용 압축수소 및 천연가스의 혼합가스	17.10.14	18.05.01
35544-2017	자동차용 알루미늄 라이너에 탄소섬유 감아 붙이는 강화 강철실린더	17.12.29	18.07.01
35178-2017	연료전지 전기자동차 수소 소비량 측정방법	17.12.29	18.07.01
37154-2018	연료전지 전기자동차 완성차의 수소가스 방출 측정 방법	18.12.28	19.07.01
37244-2018	프로톤 교환막형 연료전지차용 연료 수소	18.12.29	19.07.01

(출처: JBIC 2019, 중국레포트 2019년 제1호)

미국은 민간이 제정한 수소충전소의 충전프로토콜(SAE J2601)이 있지만 미국의 가스안전관리 법률은 아래 (표 32)와 같이 구성되어 있다. 천연가스 법은 에너지규제위원회에서, 배관안전법 및 위험물질수송법은 교통부에서 제정 및 관리하고 있다.

표 32. 미국의 가스안전관리 법률

안전관리대상	관련법	관계부처
배관	배관안전법	교통부
천연가스	천연가스법	에너지규제위원회
위험물질수송	위험물질수송법	교통부
용기·압력·용기제조	위험물질수송법	교통부

또, 미국의 가스시설 관리체계는 아래 (표 33)으로 나타낼 수 있다. 가스배관의 공사승인 및 가스공급의 안전성 업무는 에너지부(DOE: United States Department of Energy)에서, 가스의 운반시설에 대한 안전관리는 교통부(DOT: United States Department of Transportation) 및 위임받은 공공검사기관에서, LPG 및 도시가스의 공급과 안전관리는 지방정부에서 담당하고 있다.

표 33. 미국의 가스시설 관리체계

가스안전업무	안전관리기관
가스배관의 공사승인, 가스공급의 안전성 담당	에너지부(DOE)
가스용기, 가스배관 등 운반시설 안전관리	교통부(DOT) 공공검사기관
LPG 및 도시가스의 공급·사용시설 안전관리	지방 정부

독일의 안전관리 법령체계는 아래 (표 34)와 같이 법, 시행령, 시행규칙

을 근간으로 검사와 안전 분야에 관계된 각종 (민간)협회의 기술규정과 연계관계를 갖고 기술참여와 지원을 받고 있다.

표 34. 독일의 안전관리 법령체계

기본법				
법 령				
공장법		제품안전법		노동재해보험법
시행령			자치권리규정	
가연성액체	작업장소	위험물질	산재보험조합 재해 예방규정	
시행규칙			재해예방 규정 시행지침	
근로감독			기술감독	
↑				
연계관리				
↓				
일반적으로 인정된 기술규정				
독일 공업규격협회	독일 전자기술자협회	독일 공학자협회	기술감독조합 기술규정	가스 및 수도협회
검사 전문가			안전 관계자	

한편, 우리나라에서는 수소충전소에 대한 완료된 국제표준 18종에 대한 국내 KS표준을 합치시키는 계획(국가기술표준원 표준화 전략 로드맵 정리)을 수행하고 있다(표 35).

수소충전소 요구사항 ISO 19880-1과 수소검지장치 ISO 26142의 KS표준

합치는 수소충전소의 안전과 직접 관련이 있다.

표 35. 국제표준 완료된 18종의 KS표준 부합화 추진일정

구분		2020년 (10종)	2021년 (8종)
활 용	모 빌 리 티	수소차	① ISO 23273 수소차 안전제원 ② ISO23828 수소차 에너지소비측정 ③ IEC 62282-3-400 가정용 열병합 연료전지시스템
		충전소	④ ISO 19880-1 충전소 요구사항
		선박, 열차, 드론, 기계 등	⑤ IEC 62282-4-102 산업용 트럭 연료전지 성능
	에 너 지	발전용, 가정용, 이동형 등	- ② IEC 62282-6-100 마이크로 연료전지시스템 -안전 ③ IEC 62282-6-300 마이크로 연료전지시스템 -카트리지 호환
수 소 공 급	생 산, 저 장, 운 송	⑥ ISO 16110-1 연료처리기술 수소발생기-안전 ⑦ ISO 16110-2 연료처리기술 수소발생기-성능 ⑧ ISO 26142 수소검지장치-고정형 ⑨ ISO 19881 육상차량용 저장용기 ⑩ ISO 19882 수소차 연료저장 용기용 압력방출장치	④ ISO 14687-1 수소연료 제품사양 -PEM용 차량外 용도 ⑤ ISO 14687-2 수소연료-제품사양 -PEM용 차량용 ⑥ ISO 14687-3 수소연료-제품사양 -PEM용 고정형 ⑦ ISO 22734-1 물분해 수소발생기 -산업용·상업용 ⑧ ISO 22734-2 물분해 수소발생기 -주거용

## 2.6 STPA 기법

위험분석이란 사고(피해)를 유발할 가능성이 있는 시스템 상태나 조건들을 식별하고 그 발생 원인을 분석하는 일련의 과정을 의미한다. 즉, 위험분석은 사고(피해)가 일어나지 않도록 하거나 그 피해를 경감하기 위해 관리해야 할 위험과 그 원인들을 미리 식별하는 활동이다. 안전을 확보하기 위한 시작점이라 할 수 있다.

전통적 위험분석 기법에서는 사고의 원인을 바라보는 관점에 따라 방법을 달리한다. 사고유발 원인과 시나리오를 개념적으로 모델화한 순차적 사고모델(Accident Model)의 분류에 따른 FMEA(Failure Modes & Effect Analysis), FTA(Fault Tree Analysis), ETA(Event Tree Analysis) 등이 있다. 관련한 소프트웨어 분석 방법으로는 SFMEA(Software Failure Modes & Effects Analysis), SFTA(Software Fault Tree Analysis)가 있다(표 36).

표 36. 순차적 사고모델의 위험분석기법 특징

	개발시기	정량/정성	연역/귀납	위험식별	S/W 분석
FMEA	1949년	정량/정성	귀납	일부가능	SFMEA
FTA	1961년	정량/정성	연역	불가능	SFTA
ETA	1970년대	정량/정성	귀납	불가능	일부가능

2012년 미국 MIT 대학의 Nancy G. Leveson 교수는 “STPA (System-Theoretic Process Analysis)”라는 위험분석 방법을 창안, 발표하였다. 설비 등의 시스템이 복잡해짐에 따라 사고의 발생 원인을 단순히 특정

컴포넌트나 기능의 문제로 규정하기 어려워지고, 시스템 자체의 문제를 식별하기가 어려워졌기 때문이다. 시스템들의 연결 또는 시스템과 외부 요소들(사람, 정책, 환경 등) 사이의 다양한 상호작용으로 시스템의 기능상 문제가 없다고 하더라도 복합적인 요인에 의해 예기치 못한 사고가 발생할 수 있음을 찾아내었다. STPA는 사고가 특정 컴포넌트의 실패(Component Failure)에도 원인이 있지만, 시스템 또는 컴포넌트 사이의 제어문제(Control Problem)가 원인이 되어 사고가 발생할 가능성이 있다는 것에 대해서도 인정한다. 이런 이유로 개별 컴포넌트보다는 안전에 영향을 미치는 제어(Control) 관계를 중심으로 시스템을 구조화하여 이해하고 위험을 분석한다. STPA의 위험분석 범위는 하드웨어, 소프트웨어를 포함하여 사람, 정책, 개발, 운영 프로세스까지 다양하고 광범위하다.

STPA의 장점으로는 시스템을 운영해야만 발견되었던 “알 수 없는 무언가”의 위험(사고)에 대해 개발 프로세스 초기에 식별하여 제거하거나 완화할 수 있다. STPA의 분석기법은 개념분석에서 시작하여 안전 요구사항 및 안전 제약사항을 식별하는 데 도움을 준다. 특히 분석과정에 소프트웨어 및 운영자가 포함되어 있으므로 위험분석 과정에서 손실의 잠재적 요인까지 분석할 수 있는 장점이 있다.

STPA는 사고 원인의 확장된 모델을 기반으로 하는 비교적 새로운 위험(Hazard) 분석 기법이다. STPA는 개발단계에서 사고의 잠재적 원인을 분석하여 위험을 제거하거나 제어하기 위한 사전적인(Proactive) 분석 방법이다. 이런 특성상 수소충전소의 과거 사고데이터가 없어도 시스템 중심으로 위험을 분석할 수 있다.

STAMP(System-Theoretic Accident Model and Processes)란 시스템이론에 기초한 새로운 사고(Accident) 인과관계 모델의 이름으로 STPA에 대한 이론적 토대를 제공한다. STAMP는 전통적인 인과관계의 모델을 직접 관련된 실패 이벤트 체인이나 컴포넌트 실패로 확장하여 시스템 컴포넌트간의 복잡한 프로세스 및 안전하지 않은 상호작용을 포함시킨다. STAMP에서 안전은 실패(Failure)예방 문제가 아닌 동적제어 문제로 취급된다. STAMP 모델은 실패방지에서 시스템 동작에 제약을 가하는 것으로 관점이 바뀌므로, 어떤 원인도 누락되지 않고 더 많은 원인들이 포함되어 있다. 시스템 이론(System Theory)에서는 발현(Emergence)과 커뮤니케이션 및 제어(Communication & Control)의 개념이 중요하다. 시스템을 부분들의 합으로서가 아닌 전체로서 취급한다. “전체가 그 부분의 합보다 더 크다”. 개별 컴포넌트의 합이 아니고 컴포넌트가 상호작용할 때 “발현(Emerge)”하는 특성이 발현속성이다. 발현속성은 모든 기술적 측면과 사회적 측면을 고려하여야만 적절하게 처리될 수 있다. 발현속성은 시스템의 각 부분간의 관계, 즉, 어떻게 상호작용하고 조화하는지에 따라 발생한다. 개별 컴포넌트 동작과 컴포넌트간의 상호작용에서 발현속성이 나타난다면 안전(Safety), 보안(Security), 유지보수가능성(Maintainability), 운영가능성(Operability)과 같은 발현속성을 제어하기 위해서는 개별 컴포넌트의 동작과 컴포넌트간의 상호작용을 제어해야 한다. 컨트롤러는 시스템에 컨트롤 액션을 제공하고 피드백을 받아 컨트롤 액션에 따른 영향을 판별한다. 컨트롤러는 시스템의 동작에 안전 제약사항을 가한다. 안전은 정부 규제, 문화, 법 및 개인의 사적이익을 포함한 사회적 제어를 사용하여 컨트롤 될 수 있다고 본다. 사람의 행동은 사회적 또는 조직적 인센티브 구조의 설계를 통해 부분적으로 컨트롤 될 수 있다고 전제한다.

### 2.6.1 STPA 기법 소개

STPA를 활용한 위험분석은 4단계로 이루어진다. STPA의 절차는 아래 (그림 17), STPA 수행 절차 1단계는 (그림 18)과 같다.

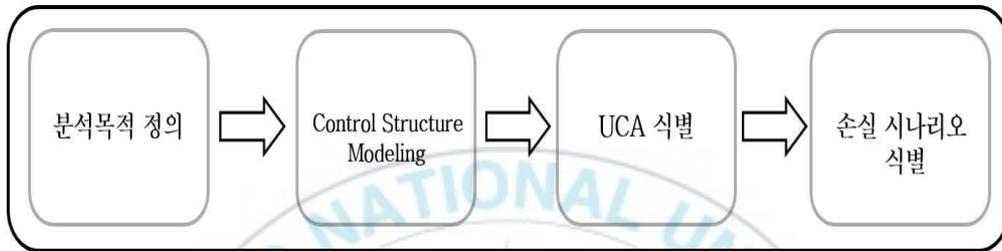


그림 17. STPA 절차

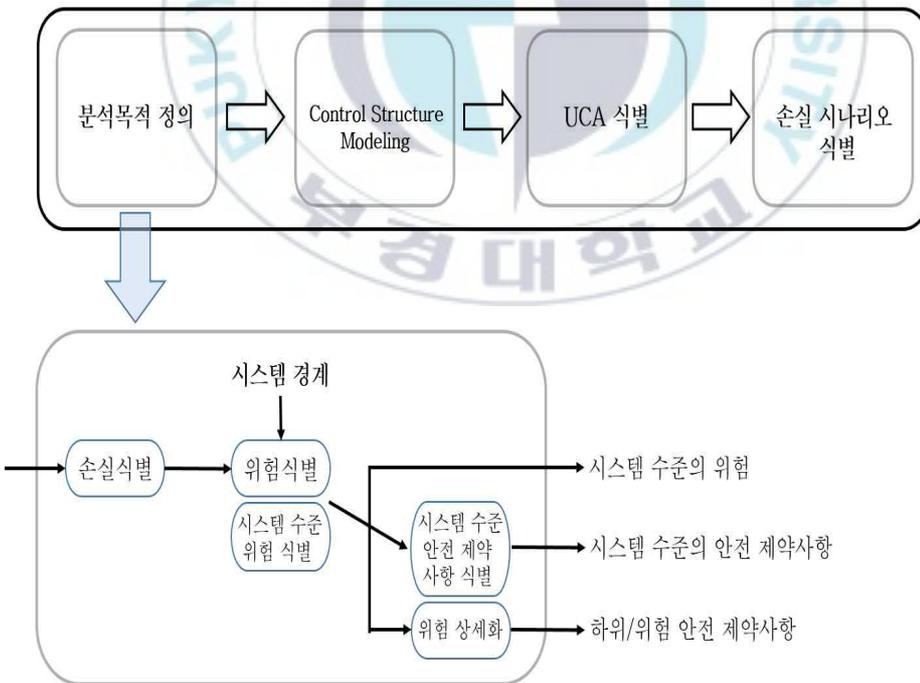


그림 18. STPA 절차 1단계(사고 및 위험 정의)

**(1) 1단계: 사고 및 위험 정의**

위험분석 목적이 어떠한 종류의 사고(인명피해, 환경오염, 임무실패, 재산손실 등)를 예방하기 위함인지를 결정하고, 분석대상이 되는 시스템 범위를 결정하는 단계이다. 분석목적에 대한 정의는 사고 정의, 시스템 수준 위험 정의, 시스템 수준 안전제약사항 도출 등 세부 단계로 구분된다.

**(2) 2단계: Control Structure 도식화**

위험(Hazard)을 예방하고 Safety Constraint를 유지하기 위해 필요한 서브시스템을 식별하여 수행한다. 복잡한 서브시스템을 보다 쉽게 식별하기 위해서는 시스템을 추상화하여 모델링하는 것이 필요하다. 추상화 대상은 Controller와 Controlled Process를 비롯하여 Control Action 및 Feedback 까지 포함한다(그림 19).

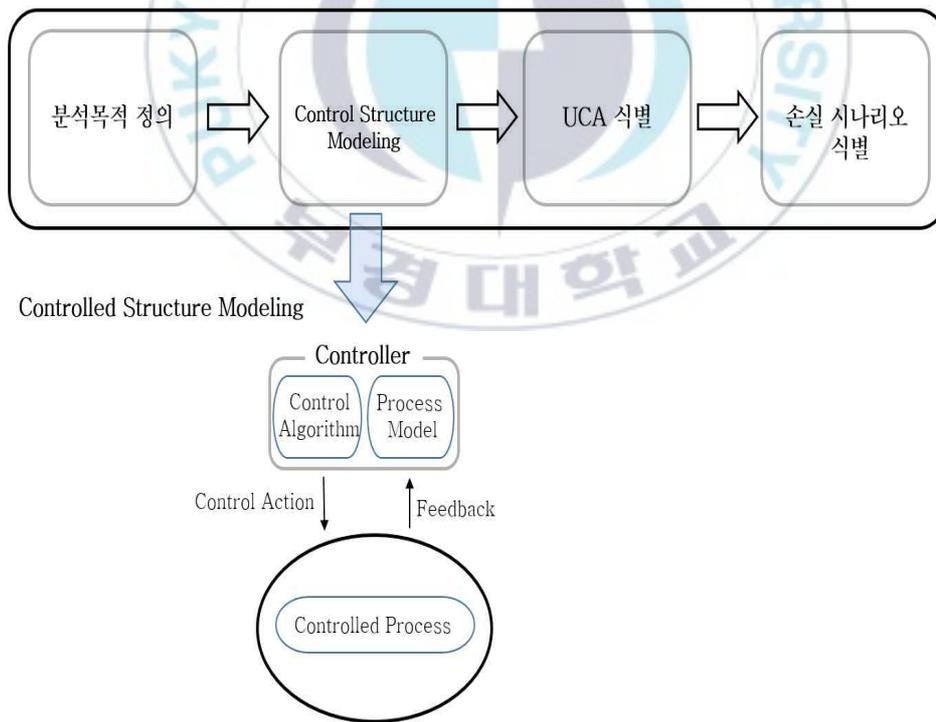


그림 19. STPA 절차 2단계(Control Structure 도식화)

### (3) 3단계: UCA 식별

UCA(Unsafe Control Action)는 시스템의 위험을 유발할 수 있는 Control Action의 불안전한(Unsafe) 형태를 의미한다. 2단계에서 정의한 모든 Control Action이 UCA 도출의 대상이 될 수 있으며, 분석 목적 및 범위에 따라 특정 Control Action만을 대상으로 UCA를 도출할 수 있다. (그림 20)은 UCA를 도출하는 3단계 수행절차이다. (그림 21)은 UCA 도출을 위한 context 관계를 표현하였다.

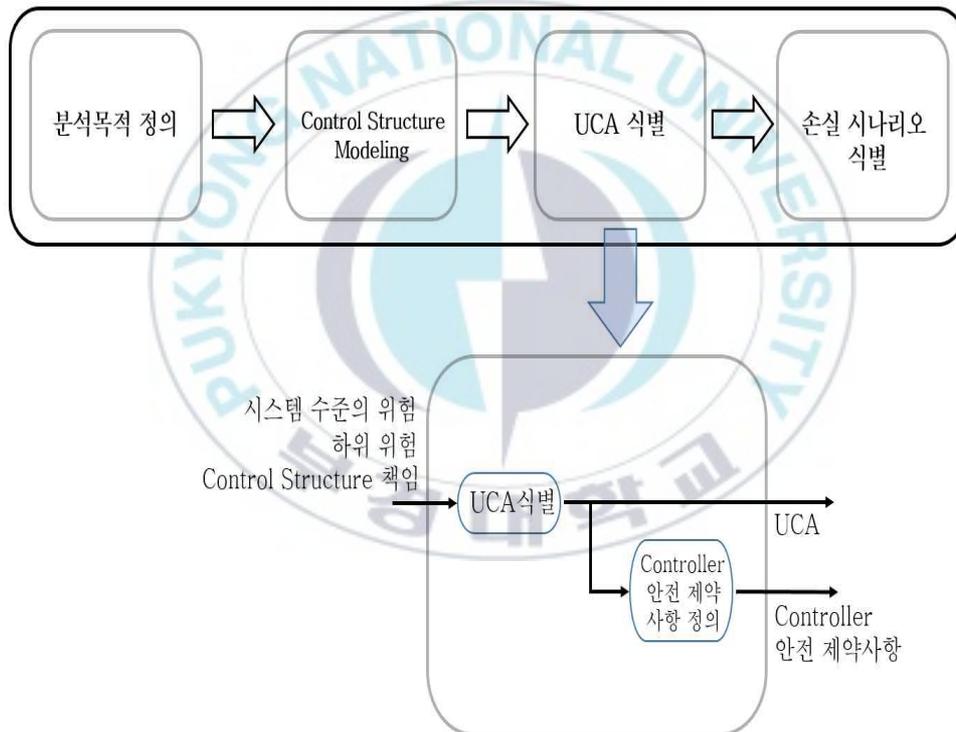


그림 20. STPA 절차 3단계(UCA 도출)

UCA는 Controller가 Control Action을 제공하는 형태와 특정상황 또는 조건(Context)에 따라 4가지 타입으로 분류할 수 있다. Control Action을 제공하지 않아서 위험이 발생하는 경우(Not Providing Causes Hazard),

Control Action을 제공해서 위험이 발생하는 경우(Providing Causes Hazard)와 시기적으로 Control Action이 너무 빠르거나 늦게 제공되어서 위험이 발생하는 경우(Too Late, Too Soon, Out of Order)와 Control Action의 제공이 빨리 종료되거나 너무 오래 제공되어 위험이 발생하는 경우(Stopped Too Soon, Applied Too Long)이다. 시스템의 위험은 단순히 Control Action의 제공 형태에 따라 발생하지 않으며 Control Action이 제공되는 시점에 시스템 주변의 환경조건에 따라 새로운 위험이 발생할 수 있다. 이러한 정보를 Context로 정의하고, 위 4가지 타입의 Control Action과 조합하여 UCA를 도출한다. Context는 Control Action을 제공하는 Controller의 Process Model과 밀접한 관련이 있다.

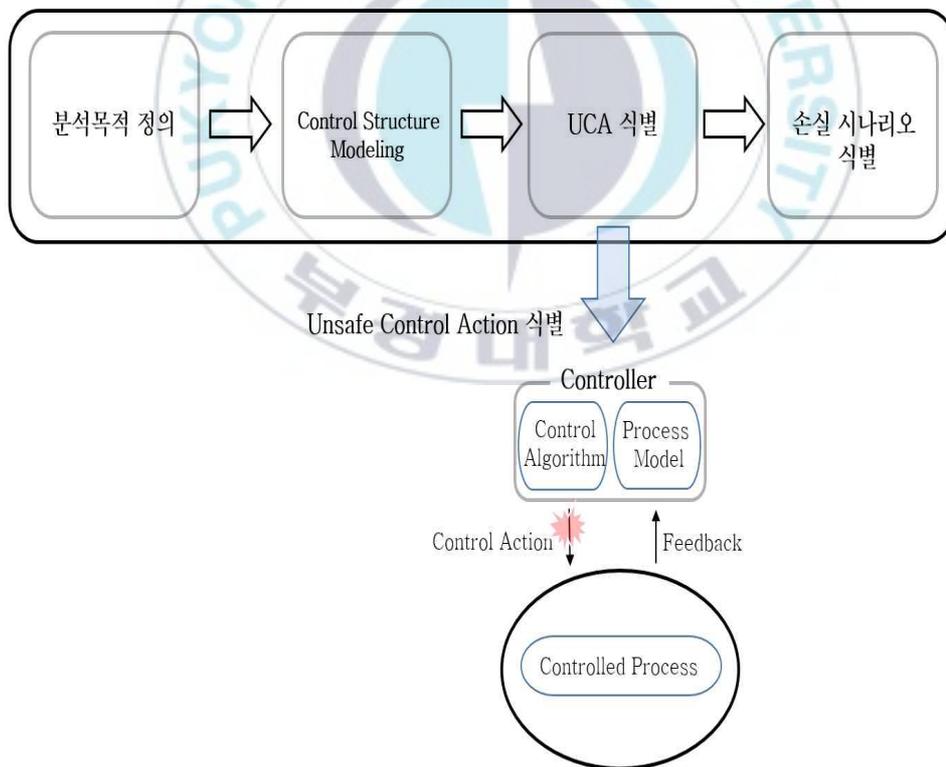


그림 21. STPA 절차 3단계(UCA 도출을 위한 Context 관계)

(4) 4단계: 원인 시나리오(Causal Scenario) 도출

‘Why would Unsafe Control Actions Occur?’

위험을 유발할 수 있는 UCA가 발생하는 원인들을 분석한다. 1) Control Action이 왜 불안전(Unsafe)하게 제공되었는지, 즉 Controller가 UCA를 제공한 원인이 무엇인지를 도출하는 것이다. 2) 제공한 Control Action이 부적절하게 수행되거나 수행되지 못한 원인을 찾으려 한다. 이러한 원인(Causal Factor)을 토대로 원인 시나리오를 작성한다(그림 22).

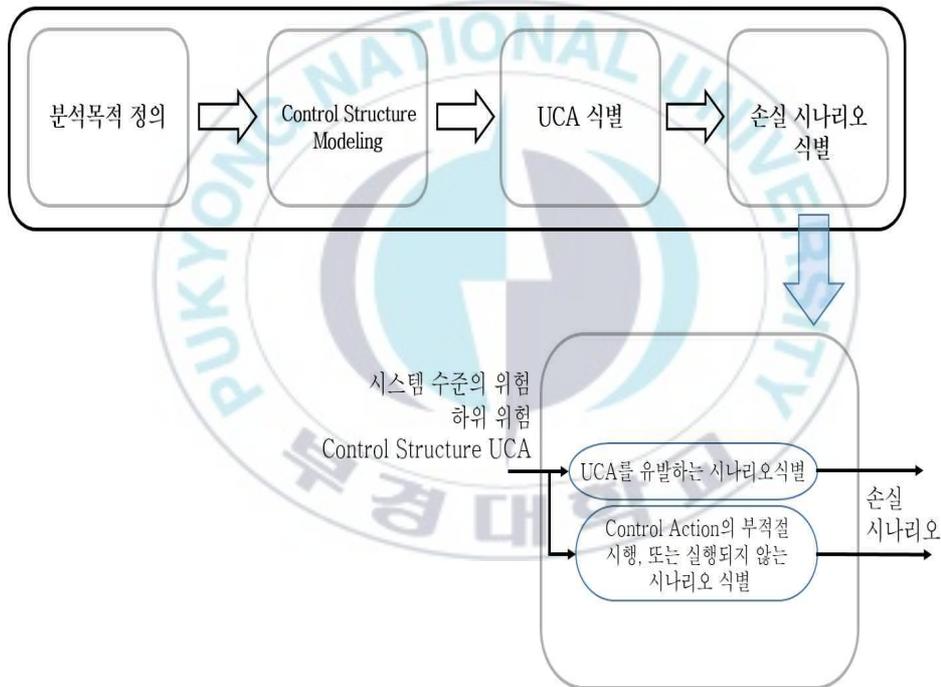


그림 22. STPA 절차 4단계(원인 시나리오 도출)

1) Controller가 UCA를 제공한 원인(안전하지 않은 컨트롤러 동작)으로는 Controller와 관련된 실패(물리적 Controller의 경우), 부적절한 Control 알고리즘, 다른 Controller로부터 안전하지 않은 Control 입력과 부적절한 프로세스 모델 형태가 있다.

부적절한(inadequate) Control Algorithm도 UCA를 유발할 수 있다. Control Algorithm은 Controller의 Process Model, 이전 Control 입출력 및 다른 요인에 기반하여 어떤 Control Action이 선택될지를 결정한다.

휴먼 Controller의 경우 이런 Control Algorithm을 의사 결정이라고 부르기도 하며, 교육, 절차, 과거의 경험과 같은 서로 다른 요소에 의해 형성될 수 있다. 정리하면 아래 (그림 23)과 같다. [L 1]은 Controller가 UCA를 제공한 원인이다.

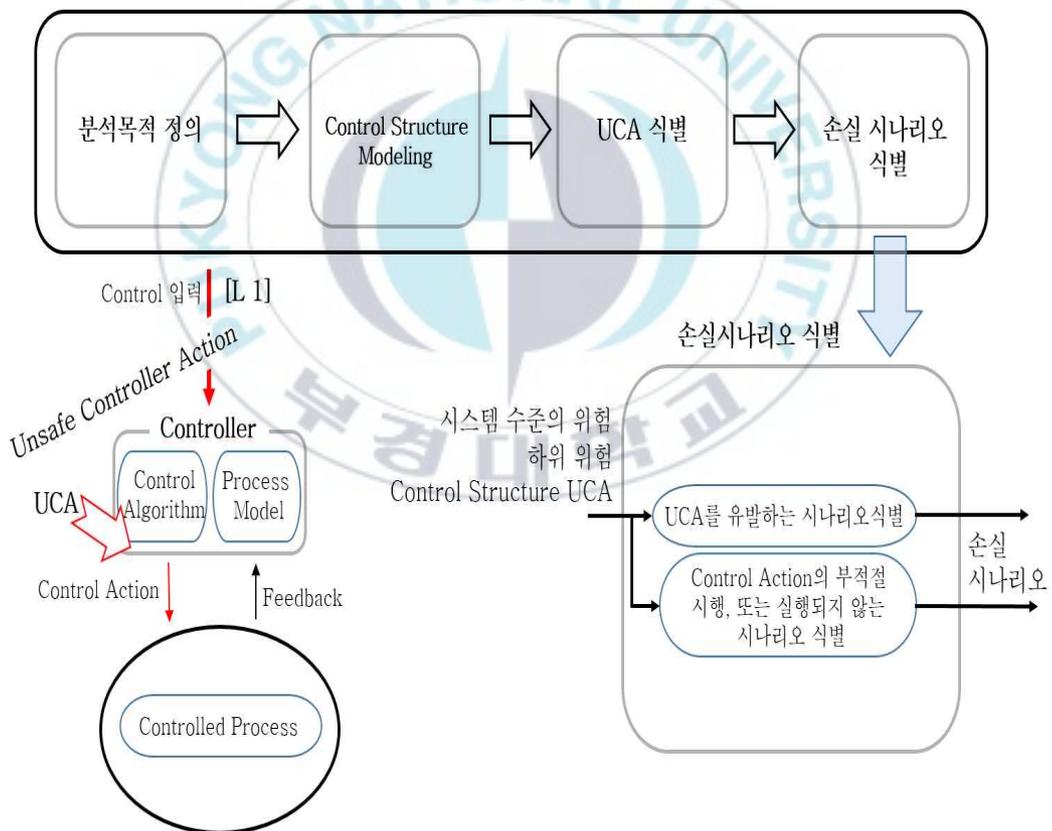


그림 23. STPA 절차 4단계(원인 시나리오 도출[L1])

2) 부적절한 피드백 및 정보의 원인을 식별할 때, 문제를 일으킬 수 있는 원인에 대한 피드백/정보의 출처를 조사할 필요가 있다. 피드백은 컨트롤러 프로세스로부터(일반적으로 센서를 통해) 발생한다. 다른 정보는 다른 프로세스, 다른 컨트롤러 또는 시스템 또는 환경 안에 있는 다른 위치에서 발생한다. 그림에는 [L 2]로 표시하였다(그림 24).

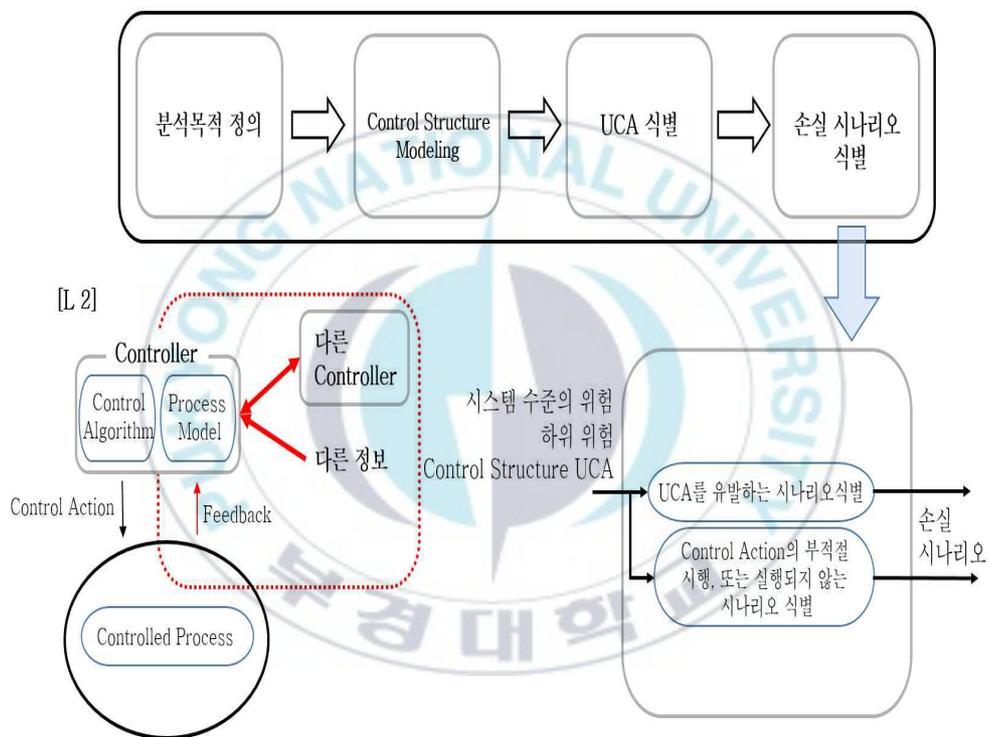


그림 24. STPA 절차 4단계(원인 시나리오 도출[L2])

일반적으로 부적절한 피드백 및 정보와 관련된 시나리오에는 수신되지 않는 피드백 또는 정보, 부적절한 피드백 수신 등이 있다. 작동의 지연이나 작동지연의 정보가 전달되지 않는 상태도 이 경우에 포함된다.

## 2.6.2 STPA 기법의 수소충전소 적용 방안

도시 환경문제 해결방안의 일환으로 수소자동차와 수소충전소의 보급 확대 정책이 사회적 관심 사안으로 부상하고 있다. 그러나 과거 스웨덴의 수소충전소 폭발사고와 국내 수소저장 탱크의 화재사고로 인해 시민사회는 수소충전소에 대해 막연한 불안감을 가지고 있다. 이 불안감이 수소충전소 설립 반대 민원의 근원적인 이유이다. 이를 해소하기 위해서는 수소충전소의 사고를 줄이거나 막아야 한다.

STPA(System-Theoretic Process Analysis) 위험분석 기법은 사고의 발생 원인을 시스템들 사이의 상호작용 및 시스템과 외부 요소들(사람, 정책, 환경 등) 사이의 다양한 상호작용으로 시스템의 기능상 문제가 없다하더라도 복합적인 요인에 의해 예기치 못한 사고가 발생할 수 있음을 전제로 위험 분석을 시작한다. STPA의 위험분석 범위는 하드웨어, 소프트웨어를 포함하여 사람, 정책, 개발, 운영 프로세스까지 다양하고 광범위하다. 수소충전소의 개별 Component에 대한 품질 및 기능, 작동 등에 관한 규정이나 기준에 대해서도 위험분석이 가능하다. 안전거리, 화기 관리, 긴급 차단장치, 설비의 보호, 전기방폭, 밀폐 구조물 및 건축물, 환기, 소음 및 진동, 전력 및 유틸리티 등에 대한 UCA를 식별하고, 손실시나리오를 작성할 수 있다. 다른 위험분석 방법과 달리 STPA의 장점은 Control Action이 제공되는 시점에 시스템 주변의 환경조건에 따라 새로운 위험이 발생할 수 있다는 전제에서 4가지 타입의 Control Action과 조합하여 다양한 UCA를 도출할 수 있다. STPA는 개발단계에서 사고의 잠재적 원인을 분석하여 위험을 제거하거나 제어하기 위한 사전적인(Proactive) 분석방법이다.

수소충전소의 위험요인은 내부의 수소누출과 수소의 외부 누출이다. 외

부로 누출된 수소는 확산, 화재 및 폭발의 위험이 있다. 용기의 파열로 인한 폭발 역시 수소의 일시 과다누출 범위에 포함시킬 수 있다. 수소충전소의 위험은 화재 및 폭발이라는 2가지 위험요인으로 정리할 수 있다.

STPA는 수소충전소의 압축, 저장, 충전, 운영 및 안전시스템에 대한 개별시스템 수준의 위험을 식별할 수 있다. Control Action의 불안정한 형태인 UCA(Unsafe Control Action)을 도출한다. 또, STPA 기법에서는 시스템과 시스템 경계에서의 위험분석에서 출발한다. 이러한 특징을 바탕으로 시행 초기의 수소충전소를 대상으로 사전적인(Proactive) 위험분석 방법인 STPA 기법을 적용한다는 것은 위험을 경감하고, 안전성을 강화하려는 연구목적에 부합한다. 궁극적으로 STPA 분석을 통해 수소의 누출에 따른 위험요인을 경감하거나 제거하는 방안을 마련하는 데 있다.

본 연구에서는 아직 시행 초기 단계인 패키지형 수소충전소의 압축시스템과 우선순위 패널을 대상으로 STPA 위험분석 기법을 적용해 안전 제약 사항을 도출하고, UCA를 제거하거나 제어하는 방안을 찾아 수소충전소의 안전성을 향상하는 모델을 제안하고자 한다.

### Ⅲ. 패키지형 수소충전소의 안전성 강화 모델 연구

#### 3.1 패키지형 수소충전소

패키지형 수소충전소 구축을 위한 특례기준의 제정 배경은 충전소 설립에 따른 안전거리 확보 등 공간 규정과 수소의 압축과 이송에 따른 현재의 기술과 장비, 관련 규제 때문이다. 현행 가스충전소의 구축과 관련된 법규 중 고압가스 안전관리법에 의한 신규 수소충전소 설치 대상지를 도시권에서 선정하기에는 매우 어렵다. 기존 충전소에 병행하여 설치할 경우에도 설비간의 충분한 안전거리를 유지하기가 어려우므로 수소충전소 건립에 가장 걸림돌이 되는 규정은 공간확보 규정이다. 공간확보 규정 중 사업장 부지경계와의 안전거리 확보에 관해서는 현행의 규정에서도 철근콘크리트 방호벽을 설치하는 조건으로 부지경계와의 거리조건을 완화해 주고 있다.

이와는 별도로 산업통상자원부에서는 수소충전소를 구축하는 경우에 부지확보의 어려움, 고비용, 설치기간의 단축을 위해 2016년과 2017년, 2018년, 2020년에 특례기준을 제정·개정하였다. 용·복합 수소충전소는 기존 연료 공급시설의 남는 공간을 활용함으로써 부지확보의 어려움을 해소할 수 있다. 패키지형 수소충전소는 공장에서 설비를 이미 구축한 상태로 사업장 부지경계 내에 설치(배치)하여 현장에서 가동하므로 공간활용과 구축기간을 단축할 수 있는 장점을 갖도록 규정을 완화하였다.

패키지형 수소충전소는 제한된 공간에 압축기, 냉각기(chiller), 충전기 등이 밀집 배치되며, 압축수소의 누출로 인한 사고가 발생할 경우 다른 설비에 직접 영향을 미칠 수 있는 공간적 위험요인을 내포하고 있다. 따라서 패키지형 수소충전소에 대해 정밀한 안전조치 사항을 마련할 필요가 있다.

패키지형 수소충전소의 ‘패키지’에 대한 규정을 ‘수소자동차의 충전에 필요한 설비(필요한 경우 충전기는 제외할 수 있다)를 하나의 보호함에 장착’하는 것으로 엄격하게 제한하지 않음으로써 기존 충전소의 공간(형편)에 맞도록 패키지 규모를 구성할 수 있다(그림 25).

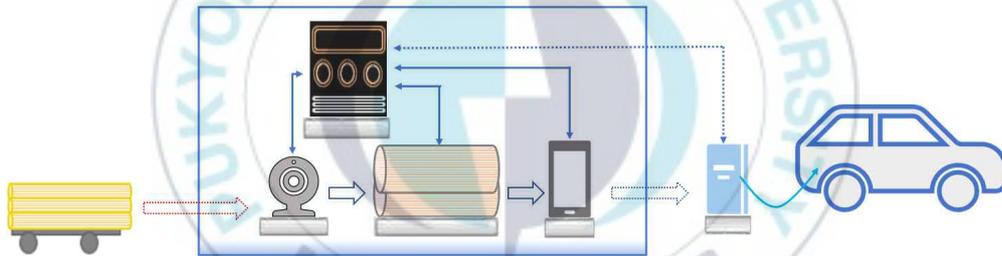


그림 25. 패키지형 수소충전소 개념

본 연구에서는 ‘수소충전에 필요한 설비’를 Off-Site 방식(저장식 수소충전소), 튜브트레일러로부터 수소를 공급받기 위한 Decant Panel(공급패널)을 제외한, 압축시스템(설비), Priority Panel(우선순위 패널)을 대상으로 STPA 분석기법을 적용한다.

“패키지형 수소자동차충전소”란 특례기준의 용어정의에 의하면 “수소자동차의 충전에 필요한 설비(필요한 경우 충전기는 제외할 수 있다)를 하나의 보호함에 장착한 충전시설을 일정한 장소에 배치하고 수소를 연료로 사용하는 자동차에

압축수소를 충전하는 것”을 말한다. 패키지형 수소충전소는 튜브 트레일러 (Tube Trailer) 및 수소저장탱크(H<sub>2</sub> Storage), 충전기(Dispenser) 등에 연결하여 사용이 가능하다. 특례기준의 패키지형 수소충전소에 관한 시설기준에는 ‘압축장치와 충전설비 사이, 압축가스설비와 충전설비 사이에 설치하는 방호벽은 두께 12 cm 이상의 철근콘크리트제 방호벽 또는 이와 동등 이상의 강도를 가지는 구조물’로 할 수 있다.

패키지형 수소충전소의 최소 형태 패키지는 압축시스템과 우선순위 패널, 밸브 작동과 관련한 질소시스템으로만 구성할 수 있으며, 여기에 더하여 공급패널(Decant Panel)과 저장설비(저장탱크), 충전기(Dispenser), 냉각기(Pre Cooler, Chiller)를 포함하는 구성까지 포함하는 최대 형태의 패키지로도 구성할 수 있다. 아래 (그림 26)은 최소 형태와 최대 구성의 패키지 형태를 나타낸 것이며, (그림 27)은 공정 흐름에 대한 개념도이다.

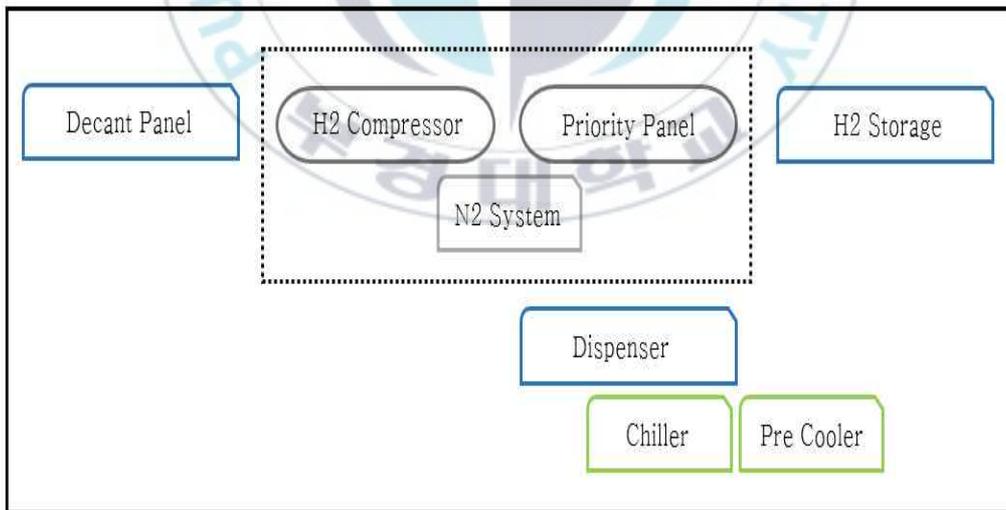


그림 26. 패키지형 수소충전소의 패키지 구성

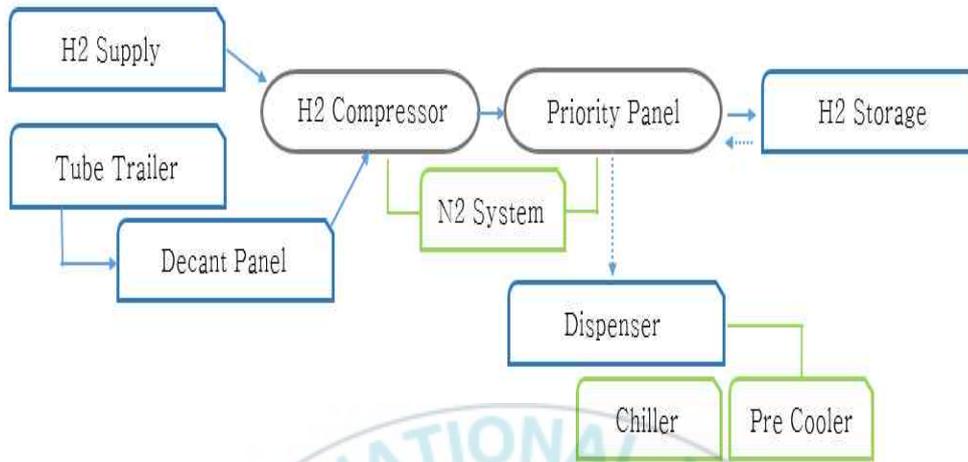


그림 27. 패키지형 수소충전소의 공정 개념도

수소충전소 특례기준과 별도로 환경부의 ‘수소연료공급시설, 수소충전소의 구축, 운영 매뉴얼’에 따르면 패키지에 포함된 “압축기유닛은 수소연료공급시설 운전의 안전성과 안전성을 보장할 수 있는 계기류 일체와 제어장치 일체를 포함하는 패키지로 제공하여야 한다”고 명기되어 있다. 기존 충전소의 안전시스템과는 별도로 패키지 설비들의 안전제어장치를 갖추어야 하는 의미로 해석할 수 있다. (표 37)은 사고예방설비의 적용설비 중 긴급차단장치와 위치를 정리하였다.

표 37. 압축설비 관련 사고예방장치

기준항목	적용설비	위 치
사고예방 설비	과류방지장치	압축설비 출구 방향
	긴급차단장치	압축설비 배관
	체크밸브	압축설비 배관
	안전밸브	압축설비의 가장 가까운 위치
	역류방지밸브	상용압력이 다른 압축가스설비

(출처: KGS FP217에서 정리)

## 3.2 압축시스템 대상 STPA 위험분석

패키지형 수소충전소는 밀폐형 공간 내에 공급패널, 압축시스템과 우선순위 패널, 저장용기 등을 구성하고 하고 있으며, 환기시스템, 수소가스검지 센서와 불꽃감지기, 긴급차단(ESD)장치를 배치하고 있다.

압축시스템은 압축기 및 동력장치, 쿨링시스템, 제어장치, 안전장치로 구성된다. 안전장치는 온도 및 압력이 설정된 운전조건 범위 밖으로 초과하거나 허락하지 않아야 한다. 설정값을 벗어나면 즉시 압축기가 정지하여야 한다. 압축시스템의 전반부에 릴리프 프로그램 또는 안전밸브가 구비되어 안전을 확보해야 한다. 압축기의 진동이 배관에 전이되지 않아야 한다. 압축기 내부 수소누출의 경우는 오일 손실, 결합 및 실링의 불량으로 인해 압축기 내부로 오일이 유입되거나, 압축기 모터 과부하, 진공 발생, FCV(유량컨트롤밸브)의 노후화로 인한 공정효율 저하 등이 원인이다. 압축기의 수소 외부누출은 누출감지시스템의 오류로 인해 폭발을 일으킬 수 있는 심각한 손실로 이어진다. 배관 플랜지의 체결 불량은 운전원의 실수가 원인이 되며, 기계적 결합으로는 Sealing의 불량이 원인이 된다.

### 3.2.1 개요

본 연구에서 STPA 분석기법을 적용할 패키지형 수소자동차충전소는 크게 압축시스템과 우선순위 패널(Priority Panel), 압축수소 저장시스템으로 구성된다. 폐쇄 분위기의 동일 공간 내에 집약하여 배치하므로 엄격한 특례기준을 적용하여야 안전을 담보할 수 있다. 충전시스템(Dispenser)을 제

외한 패키지형 수소충전소에는 자동환기시스템과 검지센서, 경보기를 포함한 제어시스템 및 사고예방설비, 피해저감설비가 포함된 안전시스템으로 구성한다(그림 28).

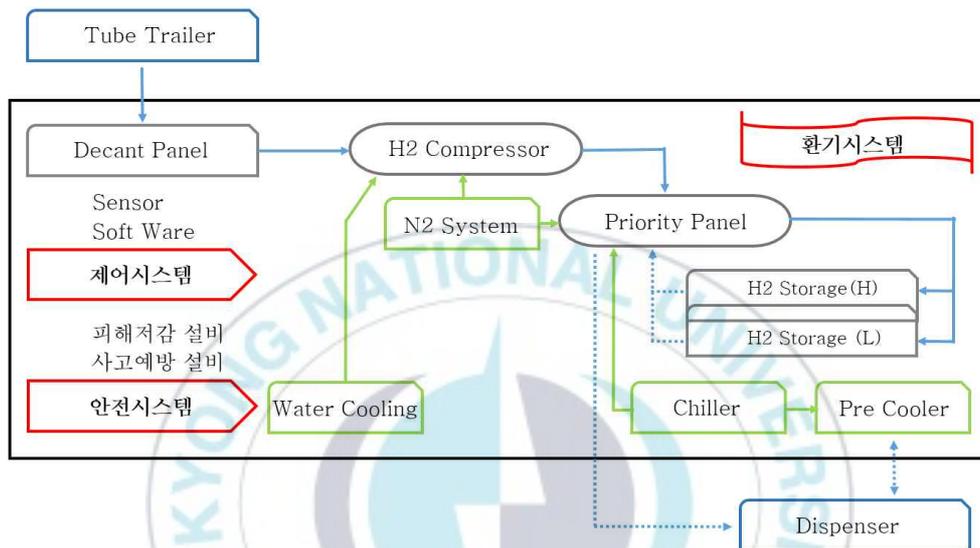


그림 28. 패키지형 수소충전소의 시스템 구성

압축시스템의 수소 흐름은 다음과 같다. Water Cooling, N<sub>2</sub> System 등 설비의 가동과 관련한 밸브 등 부품 및 압력계, 온도계, 유량계의 활동이 정상적인 경우에 튜브트레일러(Tube Trailer)에서 수소를 받아 수소압축기(Compressor)에서 1차 압축과 2차 압축 과정을 거쳐 우선순위 패널(Priority Panel)을 통해 수소 저장용기(High Pressure H<sub>2</sub> Storage, Medium(Low) Pressure H<sub>2</sub> Storage)에 저장된다.

저장용기에 있는 수소를 충전기(Dispenser)로 토출하는 경우는 우선순위 패널(Priority Panel)에서 Pre-Cooler를 통해 수소의 온도를 조절하여 수소 자동차에 충전한다(그림 29).

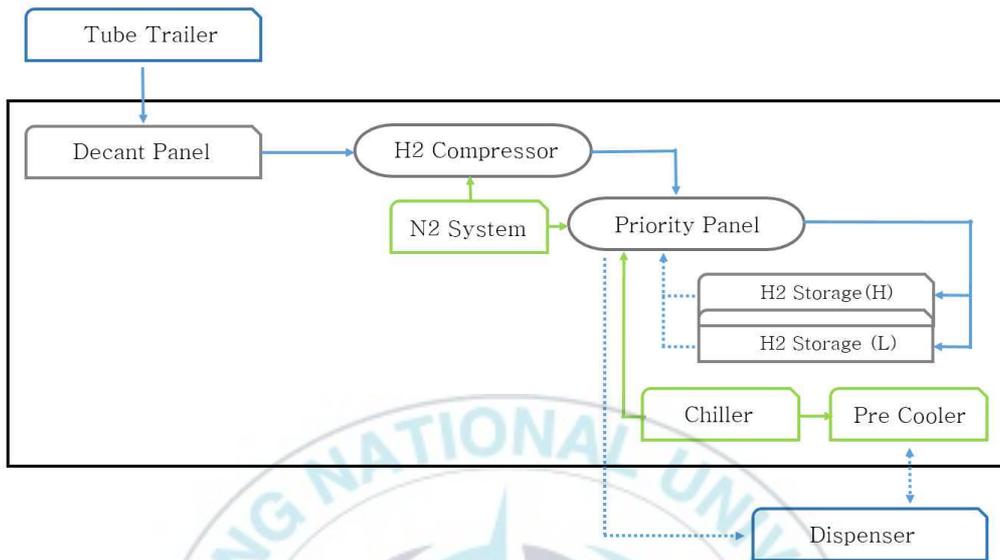


그림 29. 압축시스템의 수소 흐름도

### 3.2.2 적용 대상 시스템

패키지형 수소자동차충전소의 운전정지란 동일한 공간 내에 배치되어 있는 압축시스템과 우선순위 패널, 압축수소 저장시스템의 이상이 발생한 경우 충전소의 운전을 긴급 정지시키는 것으로 충전소의 운영 컴퓨터에서 긴급차단(ESD)시스템을 작동하거나, 한국가스안전공사 종합상황실에서 통합 모니터링센터를 통하여 긴급차단(ESD)시스템을 작동하는 경우이다.

패키지형 수소충전소 내부에 설치된 수소누출검지기, 수소농도검지기, 불꽃 감지기 등의 신호가 충전소 운전조건의 한계범위를 초과하는 상황이 발생하는 경우 압축시스템을 수동으로 정지하거나, 긴급차단(ESD)시스템을 이용해 신속하게 자동으로 충전소 시스템을 정지한다(그림 30).

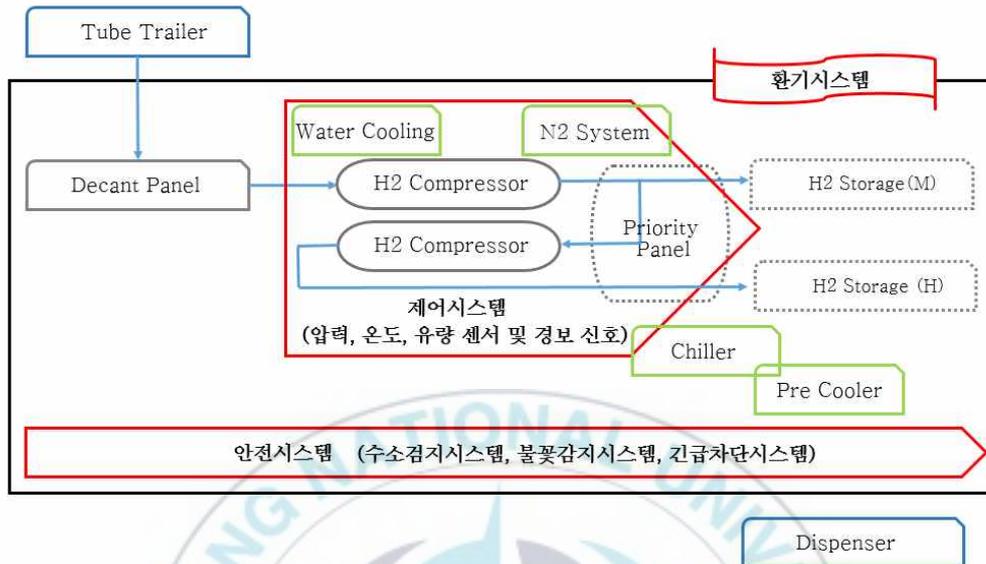


그림 30. 패키지형 수소충전소의 안전시스템 구성

패키지형 수소충전소의 압축시스템은 크게 튜브트레일러로부터의 수소인입 파이프라인, 압축기, 압축기의 상태를 감지/전송하는 센서로 구성되며, 충전소의 설비운영 PC와 연결되고, 인터넷을 통해 안전관리자와 운전원의 휴대전화나 Tablet PC에 센서 및 설비 운전데이터를 전송, 공유한다. 압축기에는 압축기의 상태 정보를 수집할 수 있는 다양한 센서들이 설치되어 있으며, 센서들이 수집한 정보들은 설비운영 컴퓨터에 전달된다. 설비운영 컴퓨터는 각 채널에서 핵심적인 운영 로직 Controller 역할을 수행하는데, 압축기에 이상이 발생했다고 판단하는 경우, ESD를 발생시킨다. 이때, 로직 서브시스템은 센서 신호를 판단하여 SIL(Safety Integrity Level, 안전 무결성 수준) 단계에 따라 운전원과 안전관리자, 설비운영 컴퓨터에 전달하며, 운전원은 긴급차단(ESD)시스템을 통해 압축기 정지와 해제를 수행한다. 이러한 결정은 상황실 운영 PC에도 전달된다.

압축시스템의 구성요소들과 기능을 정리하면 아래 (표 38)과 같다.

표 38. 압축시스템의 구성요소

구분	내용
<b>설비운영 Computer</b>	트립여부를 결정하는 Controller 역할 수행 긴급차단(ESD)시스템, 수소충전소 운영정보 취합 Tablet PC에 수집된 충전소 정보 전달 설비의 교정 및 로직 컴포넌트 자체 검증
<b>Compressor</b>	1차 압축기, 2차 압축기를 통해 수소저장용기로 이송. PP를 통해 Medium, High Pressure Buffer Storage로 수소를 이송, 저장된 수소를 Dispenser로 이송
<b>Sensor</b>	압력, 온도, 유량센서로 정보를 수집, 수소누출(농도)검지 및 불꽃감지센서 등 센서가 수집한 정보는 설비운영 컴퓨터 를 통해 통합모니터링 시스템(상황실 운영 컴퓨터)으로 전송
<b>Tablet PC (Mobile Phone)</b>	설비운영 컴퓨터로부터 설비의 설계 및 성능데이터를 수신 충전소 운전원과 설비운영 컴퓨터 사이의 인터페이스 역할 설비운영 컴퓨터에서 Tablet PC로 전송되는 모든 정보를 Mobile Phone에 표시
<b>Push Button/ Key Switch</b>	(Push Button) 운전원이 현장에서 직접 트립의 명령, 해 제 등 제어 (Key Switch) 운전원이 현장에서 직접 디스플레이/테스트 컴퓨터에 명령을 전송할 수 있는 물리적 장치
<b>Operator</b>	Tablet PC에 표시된 정보를 기반으로 제어 행위 수행 설비운영 컴퓨터에 현장 정보 전달, 통신 활성화 및 해제 ESD를 해제할 경우 운전정지 해제

패키지형 수소충전소의 수소 흐름과 데이터 흐름을 정리하면 아래 (그림 31)과 같다.

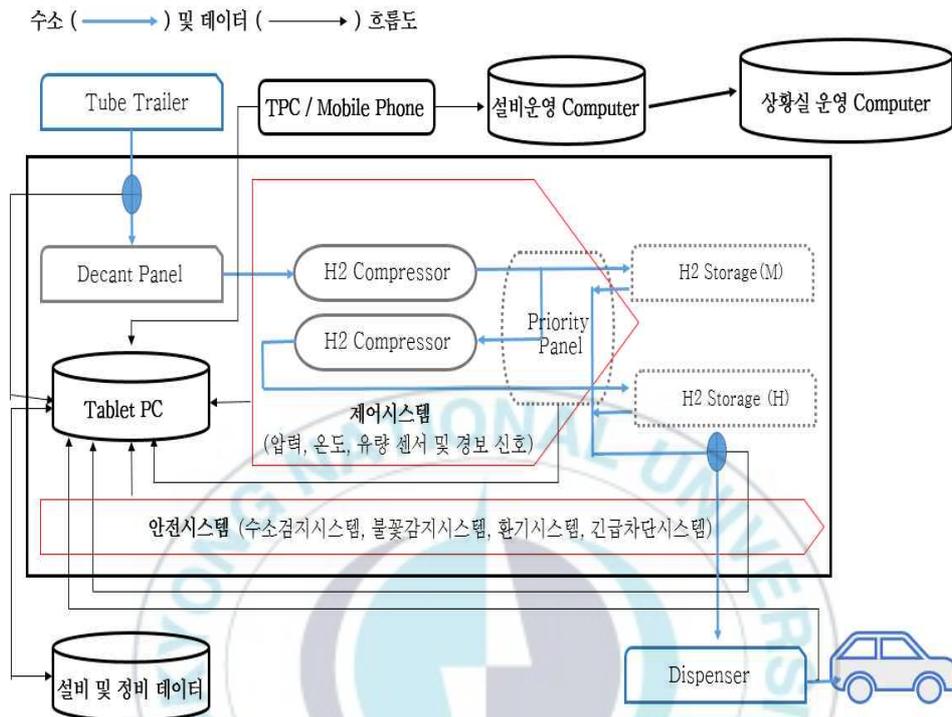


그림 31. 패키지형 수소충전소의 수소 및 데이터 흐름도

패키지형 수소충전소의 수소 흐름(파란색 선)은, 튜브트레일러에 저장된 수소를 Decant Panel을 통해 압축기로 이송한다. 압축기에서 2차례 압축을 통해 우선순위 패널을 거쳐 충전을 위한 압축수소 저장용기에 보관된다. 보관된 수소를 우선순위 패널과 충전기를 거쳐 수소연료 차량에 충전한다. 데이터의 흐름(검은색 선)은 수소가 인입될 때, 인입량에 대한 정보가 입력된다. 압축기를 통과할 때 수소의 온도 및 압력 데이터가, 우선순위 패널을 통과할 때 유량 및 압력, 온도 데이터가 입력된다. 충전기에서 충전량과 충전차량의 온도 등의 데이터가 입력되고 충전 데이터는 POS를 통해 상황실 운영 컴퓨터까지 전달된다.

### 3.2.3 STPA 수행 1단계(사고 및 위험 정의)

STPA 수행 절차는 크게 4가지 단계로 구성된다(그림 32). 본 연구의 STPA 적용 방법 역시 수행 절차에 따른 4단계 분석을 적용한다. 분석 목적을 정의하는 1단계는 사고 및 위험을 정의한다.

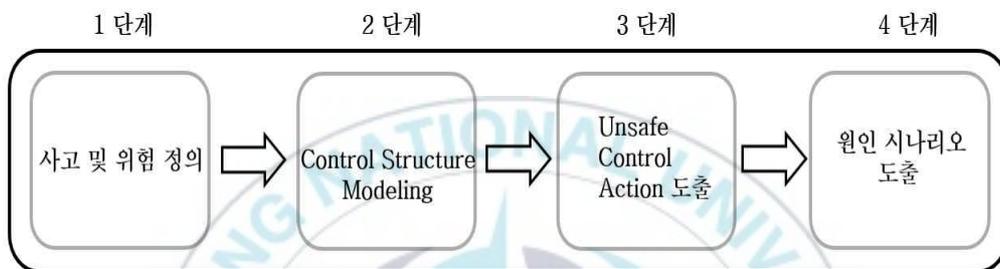


그림 32. STPA 수행 절차

패키지형 수소충전소에서 가장 치명적인 사고는 수소의 누출로 인한 폭발이며, 이로 인한 인명피해, 재산손실, 환경오염 등의 피해가 발생하는 것이다. 같은 맥락에서 압축시스템의 사고와 위험을 정의하면 아래 (표 39)와 같다.

표 39. 사고/손실 및 위험 정의

구분	내용
Accident	패키지형 수소충전소가 폭발함
Loss	폭발로 인한 인명피해, 재산손실, 환경오염 등
Hazard	수소누출이 요구시간 내에 정지되지 않아 체류함
Safety Constraints	수소누출이 요구시간 내에 정지되고 체류하지 않아야함

### 3.2.4 STPA 수행 2단계(Control Structure 도식화)

압축시스템에 관한 Control Structure를 도출하기 위해 압축시스템을 구성하는 컴포넌트(Components)를 식별하고 각각의 주된 역할과 책임, 관계를 정의한다. 압축시스템에서 Controller는 운전원과 시스템으로 나누어 생각할 수 있다. 본 연구에서는 분석편의성을 위해 Controller가 운전원인 경우(그림 33)와 시스템인 경우(그림 34)로 나누어 도식화 하였다.

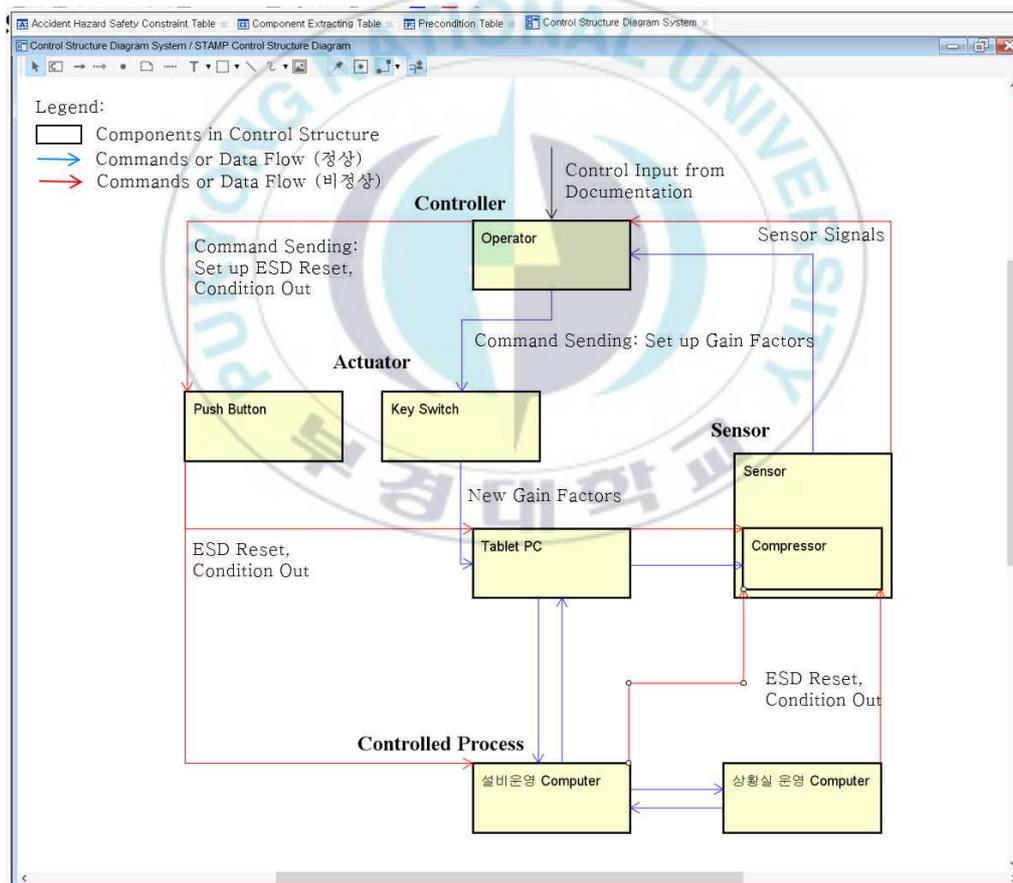


그림 33. Controller가 운전원인 경우의 Control Structure

Controller가 운전원인 경우 Actuator는 Key Switch와 Push Button이며, 센서는 안전시스템과 압축기 내부 센서, Controlled Process는 운전원의 Tablet PC 및 설비운영 Computer로 구성된다.

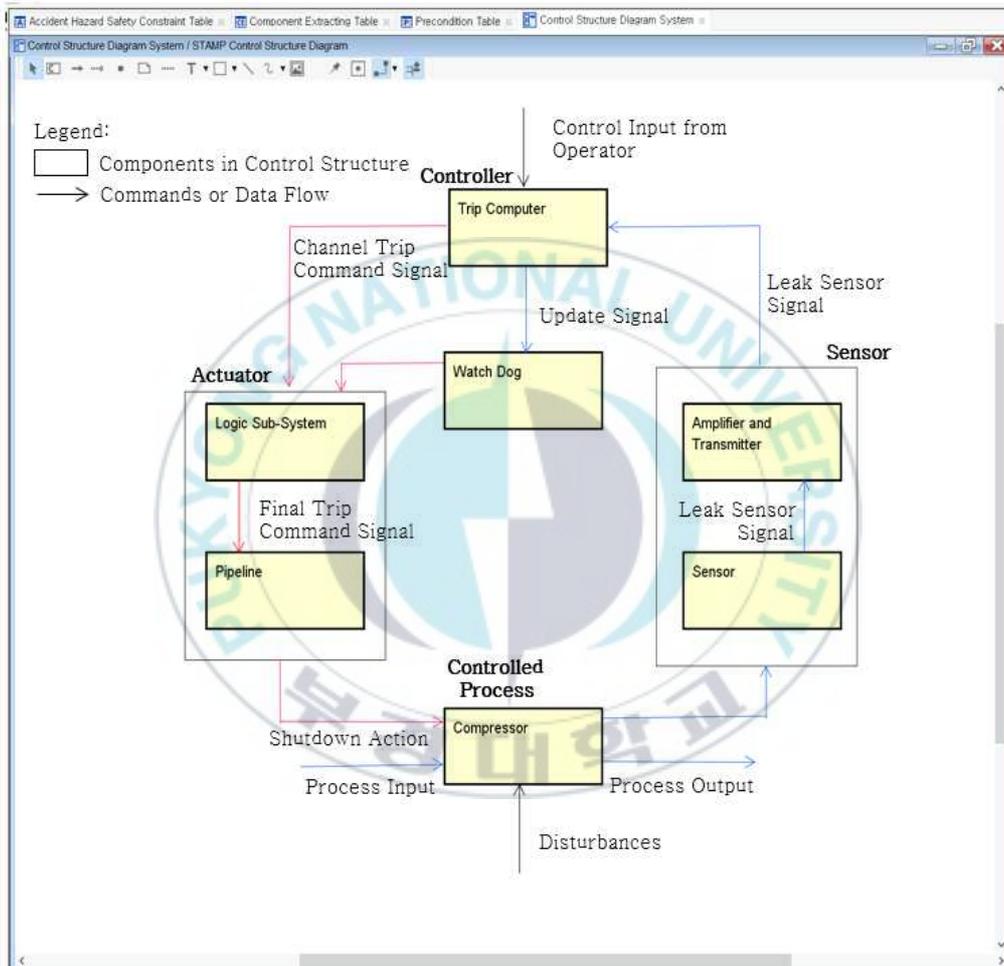


그림 34. Controller가 시스템인 경우의 Control Structure

Controller가 시스템인 경우 Control Structure는 설비운영 PC(Trip Computer)와 Watchdog이 Controller, Actuator는 Logic Sub System과 Pipeline이, Controlled Process는 Compressor로 구성된다.

설비운영 PC(Trip Computer)가 센서로부터 다양한 압축시스템의 상태 정보를 수신하여 이상상태를 판단하고 압축시스템의 정지 제어를 내리는 구조를 시스템의 상위수준에서 도식화한 것으로 일부 Component 또는 Sub System에 추가적으로 Control Structure를 도식화할 수 있다. 설비운영 PC는 압축시스템의 이상상태가 판단된 경우 ESD를 발생시킨다.

### 3.2.5 STPA 수행 3단계(Unsafe Control Action 도출)

STPA는 위험이 부적절 하거나 안전하지 않은 Control Action에 원인이 있음을 전제로 한다. 위험을 식별하는 것은 부적절한 Control Action을 식별하는 과정이라고 할 수 있다. 1단계와 2단계에서 식별한 Control Action을 기반으로 4가지 유형에 따른 Unsafe Control Action을 식별한다. 긴급 차단시스템의 Trip과 관련한 Control Action은 설비운영 PC에 의한 긴급 차단지시와 Watchdog에 의한 차단지시가 있다.

표 40. Leak Trip과 관련한 Control Action

Control Action	From	To	설명
설비운영 PC_ Trip on Large Leak	설비운영 PC	Compress System	Large Leak Trip 발생 시, 설비 운영 PC가 운전원에게 압축시스 템 정지를 지시
Watchdog_ Trip on Large Leak	Watchdog	Compress System	Watchdog 타임아웃 발생 시, 설 비운영 PC가 운전원에게 압축시 스템 정지를 지시

압축시스템 긴급차단(Trip)에 미치는 영향을 정리하면 (표 40)이 된다. 설비운영 PC\_on Large Leak, Watchdog\_on Large Leak의 두 가지 경우 각각에 Not Providing, Providing, Too Soon or Too Late, out of

Sequence와 Stopped Too Soon or Applied Too Long 등을 적용함으로써 UCA(Unsafe Control Action)을 도출할 수 있다.

표 41. Leak Trip과 관련한 Unsafe Control Action

Control Action	Not Providing causes hazard	Providing causes hazard	Too soon, too late, Out of sequence	Stopped too soon, applied too long
설비운영 PC_ Trip on Large Leak	수소누출이 허용기준을 초과하는 경우인데, Computer가 ESD 명령전송 실패 (UCA1)	설비운영 PC_ Trip on Large Leak 명령 대신 Watchdog_ Trip on Large Leak 명령전송 (Not Hazard)	수소누출이 허용기준 이하인데, 설비운영 PC 가 Parameter Trip을 명령 (UCA2)	압축시스템이 ESD Signal을 수신하지 못한 상태에서 너무 빨리 설비운영 PC_ Trip on Large Leak 명령이 종료 (UCA3)
Watchdog - Trip on Large Leak	Time-out이 발생했지만 Watchdog에서 Trip전송 실패 (UCA4)	Watchdog_ Trip on Large Leak 명령 대신 설비운영 PC_ Trip on Large Leak 명령전송 (Not Hazard)	Watchdog이 타임아웃 발생하지 않았는데 WD_Trip을 전송 (UCA5)	압축시스템이 ESD Signal을 수신하지 못한 상태에서 WD_Trip이 너무 빨리 중지 (UCA6)

Control Action별로 Unsafe Control Action 도출 결과를 (표 41)로 정리 하면, Unsafe Control Action이 발생하지만 위험을 초래하지 않는 경우 (Not Hazard)를 발견하게 된다. (표 42)와 (표 43)은 설비운영 PC와 WD의

Large Leak 대한 UCA 도출 결과이다.

표 42. 설비운영 PC\_Trip on Large Leak에 대한 UCA 도출 결과

구분	내용
Controller → Controlled Process	설비운영 PC → Compress System
Control Action	설비운영 PC_Trip on Large Leak
Not Providing causes hazard	UCA1, 수소누출이 허용기준을 초과하는 경우인데, 설비운영 PC가 Trip 명령 전송 실패
Providing causes hazard	N/A(Not Accident)
Too soon, too late, Out of sequence	UCA2, 수소누출이 허용기준 이하인데, 설비운영 PC가 Parameter Trip을 명령
Stopped too soon, applied too long	UCA3, 압축시스템이 ESD Signal을 아직 수신하지 못 한 상태에서 너무 빨리 설비운영 PC_Trip on Large Leak 명령이 종료

표 43. WD\_Trip on Large Leak에 대한 UCA 도출 결과

구분	내용
Controller → Controlled Process	Watchdog → Compress System
Control Action	WD_Trip on Large Leak
Not Providing causes hazard	UCA4, Time-out이 발생했지만 Watchdog에서 WD_Trip전송 실패
Providing causes hazard	N/A(Not Accident)
Too soon, too late, Out of sequence	UCA5, Watchdog이 타임아웃 발생하지 않았는데 WD_Trip을 전송
Stopped too soon, applied too long	UCA6, 압축시스템이 ESD Signal을 수신하지 못한 상 태에서 WD_Trip이 너무 빨리 중지

### 3.2.6 STPA 수행 4단계(원인 시나리오 도출)

(그림 35)는 Unsafe Control Action이 발생하는데 영향을 미칠 수 있는 원인을 구조적인 관점에서 분석하기 위한 Control Structure 이다.

Control Algorithm은 제어명령을 내리기 위한 의사결정 프로세스로서 본 연구의 대상이 되는 압축시스템, 우선순위 패널, 충전기 등의 압력, 온도, 유량 sensor, indicator, transmitter, alarm 등이 해당된다. Process Model은 Controller가 제어명령을 내리는데 판단의 근거가 되는 다양한 정보를 의미한다. Feedback되는 압력, 온도, 유량의 setting 값 정보 등이 해당되며, Solenoid Valve에 의한 ESD 작동 값(정보)도 Process Model에 해당된다.

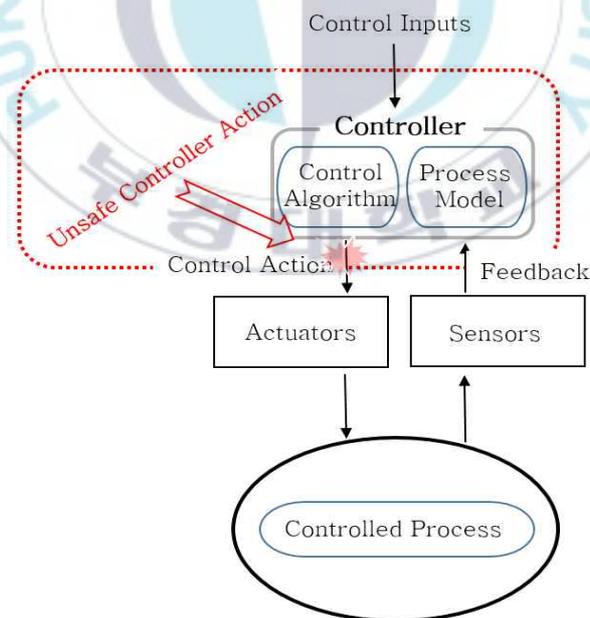


그림 35. Controller가 UCA를 행하는 경우의 Control Structure

(그림 36)은 Actuator가 Control Action을 전달받아 Controlled Process를 제어하는 과정(Control Path)에 문제를 일으켜 Unsafe Control Action이 발생하는 경우의 Control Structure이다. 제어하는 과정의 문제는 크게 Control Action을 제공하지 않아서 위험을 유발하는 경우와, Control Action을 제공하는 것이 위험을 유발하는 경우이다. 또 잠재적으로 안전한 Control Action을 제공하지만 너무 일찍 또는 너무 늦게, 잘못된 순서로 제공하는 경우이다. 또 Control Action이 너무 오래 지속되거나 너무 빨리 중지하는 경우도 해당된다. Control Action이나 Feedback은 두 객체 간에 주고받는 일종의 정보를 의미한다.

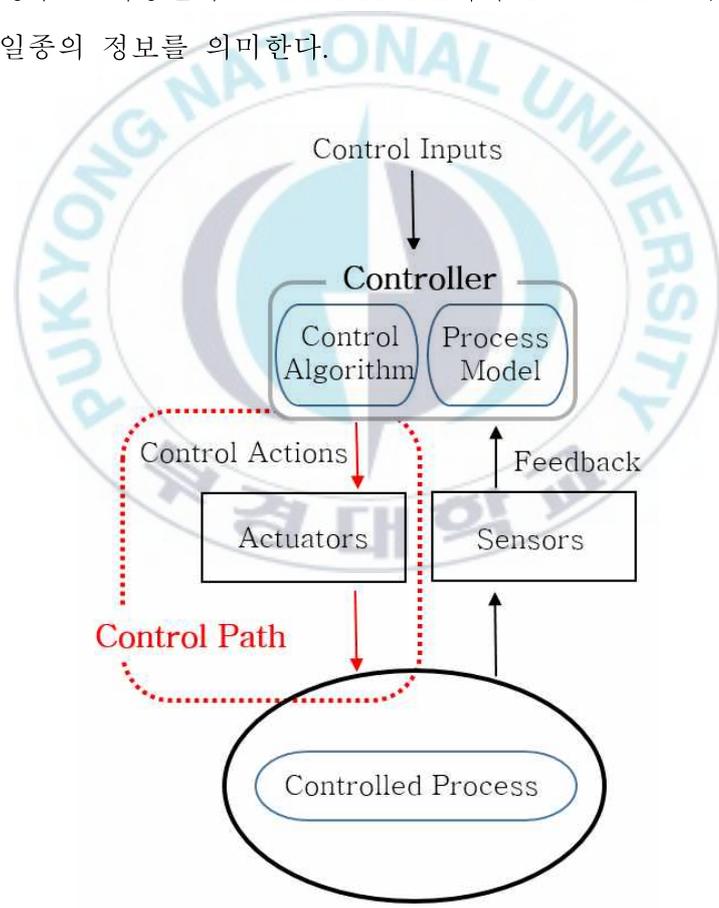


그림 36. Control Path 오류 Control Structure

(그림 37)은 Controlled Process 상의 부적절한 입력이나 다른 정보의 입력오류, 다른 Controller(상위의 관리기관이거나, 여러 관리자가 존재하는 경우)의 개입이나 입력오류 등의 경우에 대한 Control Structure 이다. Actuator에 의해 Control Action이 Controlled Process에 전송되거나 적용되었음에도 불구하고 Control Action이 효과를 발휘하지 못하는 경우이다. 즉, Controlled Process가 반응하지 않거나, 부적절하게 반응하는 경우와 Control Action을 수신하지 못했음에도 수신된 것처럼 반응하는 경우도 있다. 원인으로서는 잘못된 구성과 부적절한 입력정보, 컴포넌트 장애, 프로세스의 응답지연, 프로세스 오류 및 오동작, 다른 Controller로부터 받은 모순 가능성이 있는 명령 등을 찾을 수 있다.

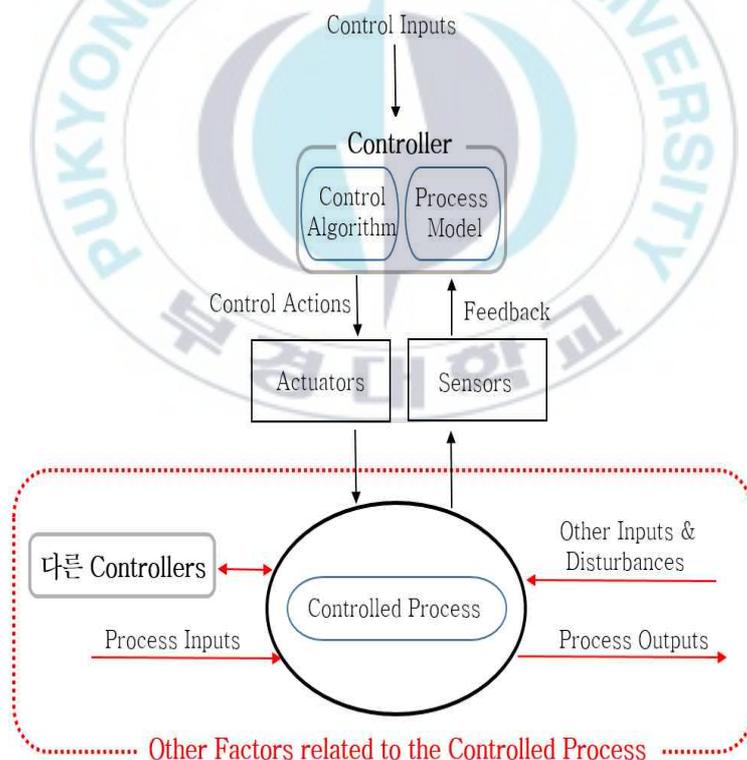


그림 37. Controlled Process 상의 문제 Control Structure

(그림 38)은 Controller에게 부적절한 정보가 투입되거나, 다른 Controller(상위의 관리기관이거나, 여러 관리자가 존재하는 경우)의 의견이나 명령이 전달되는 경우, 또는 전혀 다른 정보가 전달되어 Controller의 의사결정 과정에 개입하는 경우, Sensors의 오작동이거나 정보가 전달되지 않은 경우의 Control Structure 이다. Feedback은 Controlled Process에서 제어명령을 이행한 결과로서, Controlled Process의 상태 값 등의 정보를 말한다. 부적절한 프로세스 모델, 프로세스 모델의 결함 원인으로서는 컨트롤러가 잘못된 피드백 정보를 수신하는 경우와, 컨트롤러가 바른 피드백 정보를 받았지만 잘못 해석하거나 무시하는 경우가 있다. 또는 피드백 정보가 지연되거나 수신하지 못하는 경우와 필요한 컨트롤러의 피드백 정보가 존재하지 않은 경우도 있다.

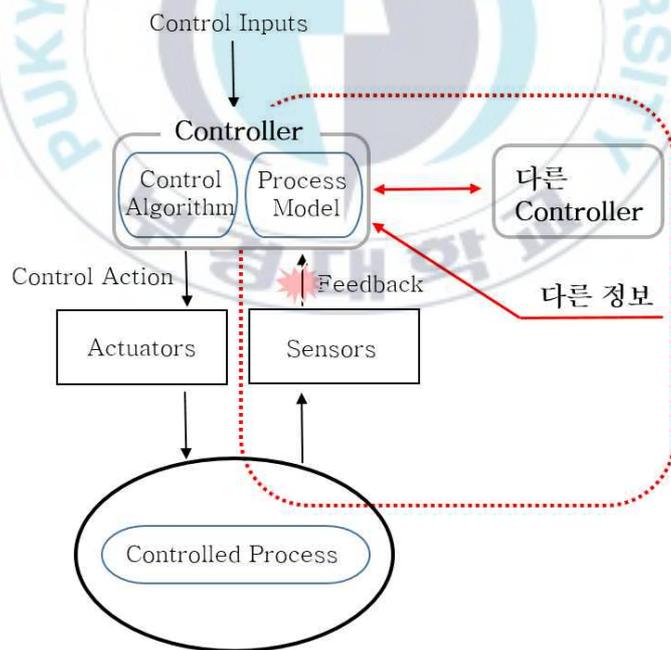


그림 38. Controller의 의사결정을 방해하는 Control Structure

UCA 1에 대한 원인을 분석한 (표 44, 45)는 아래와 같다.

표 44. UCA1에 대한 원인(Causal Factor) 분석(1)

구분	내 용		
Controller → Controlled Process	설비운영 PC → Compress System		
Control Action	설비운영 PC_Trip on Large Leak		
Unsafe Control Action	UCA1, 수소누출이 허용기준을 초과하는 경우인데, 설비운영 PC가 ESD명령 전송 실패		
Causal Factor			
설비운영 PC	운전원으로부터 잘못된 명령수신 또는 누락	운전매뉴얼 오류 또는 누락	-
	부적절한 Control Algorithm 동작	누출감지기의 신호가 매우 낮음	(S/W) Algorithm Module 오류
	부정확한 Logic Model	누출감지기의 허용범위가 매우 높음	(S/W) Algorithm Module 오류
	Component H/W 동작실패	T/C 출력실패 T/C 입력실패	AI/DI Card오류 IO bus 오류
설비운영 PC ↔ Sensor	부정확한 피드백	피드백 전송신호 너무 낮음	전송채널 오류
	피드백 누락	피드백 전송신호 상실	
	피드백 지연	피드백 전송신호 지연	
설비운영 PC ↔ Actuator	ESD 명령누락	ESD 명령상실	전송채널 오류

표 45. UCA1에 대한 원인(Causal Factor) 분석(2)

구분	내용		
Controller → Controlled Process	설비운영 PC → Compress System		
Control Action	설비운영 PC _Trip on Large Leak		
Unsafe Control Action	UCA1, 수소누출이 허용기준을 초과하는 경우인데, 설비운영 PC가 ESD 명령 전송 실패		
Causal Factor			
Sensor, Amplifier	센서/증폭기 동작 오류	부정확한 상태 입력신호 생성	센서/증폭기 오류
	Transmitter 동작 오류	압축시스템 상태 입력신호 손실	Transmitter 오류
Actuator	Actuator 동작 오류	Logic System 실패로 ESD 미발생	Logic System 오류
		Pipeline 체결불량으로 ESD 실패	압축시스템 인입 Component 입력 오류
Compress System ↔ Sensor	부정확한 상태 정보 전송	전송신호 너무 낮음	전송채널 오류
	상태 정보 누락	전송신호 상실	
	상태 정보 지연	전송신호 지연	
Actuator ↔ 설비운영 PC	Compressor 제어 지연	ESD 신호 지연	전송채널 오류 (지연)

### 3.3 우선순위 패널 대상 STPA 위험분석

우선순위 패널(Priority Panel)은 압축기에서 압축된 수소를 수소저장탱크(Storages)에 분배하는 기능과 저장된 압축수소를 충전기(Dispenser)로 이송하는 역할을 담당한다(그림 39). 패키지형 수소충전소의 핵심 제어기능을 담당하고 있다. 동일한 공간에 있는 압축기, 수소저장탱크, 충전기 공급 프로세스를 1차적으로 현장에서 자동제어하고, 경보를 통해 환기시스템, 수소가스검지 센서와 불꽃검지기, 긴급차단장치(ESD)를 2차적으로 제어한다.

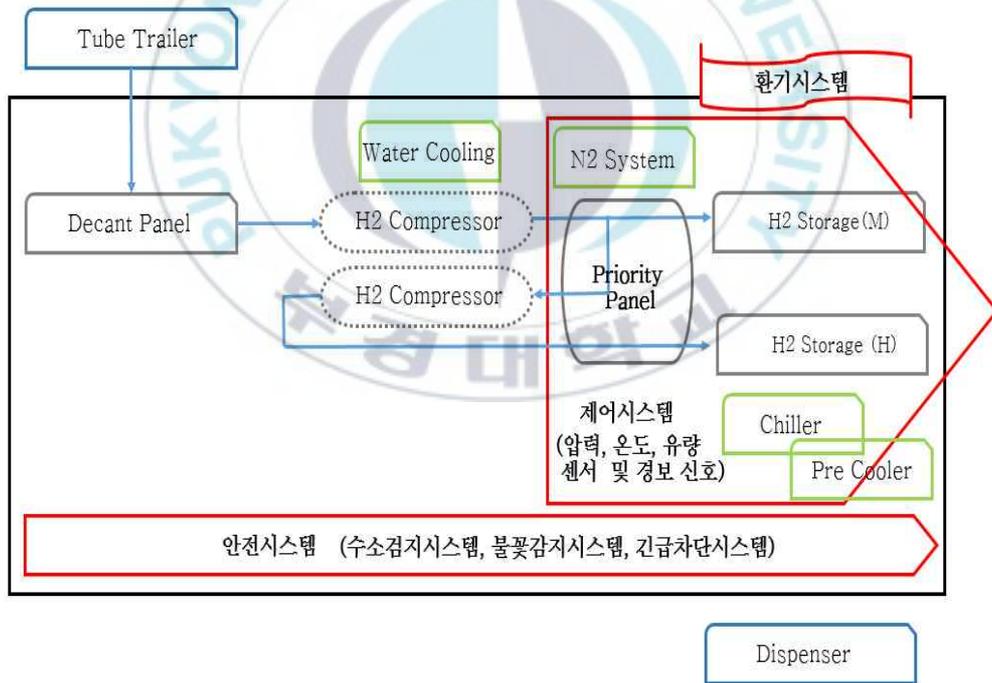


그림 39. 패키지형 수소충전소의 우선순위 패널 구성

### 3.3.1 STPA 수행 1단계(사고 및 위험 정의)

우선순위 패널과 관련하여 패키지형 수소충전소에서 발생 가능한 사고와 잠재적 위험상태는 아래 (표 46)과 같다.

표 46. 사고 및 위험

구분	내 용	비고(관련사고)	
Accident	A1	인명피해(사망, 부상 등)	
	A2	설비손실	
	A3	충전중단	
	A4	환경오염	
Hazard	H1	수소누출	[A1, A3, A4]
	H2	온도상승(과열)	[A1, A2, A3]
	H3	설비한계치 초과 운행	[A2, A3]
	H4	충전시스템 운전 정지	[A3]

우선순위 패널에서의 수소 외부누출은 배관 체결 불량과 부품의 실링(Sealing) 불량이거나 결합의 비정상 문제로 발생하고, 과전류나 정지실패 역시 외부 유출로 인한 폭발로 이어질 수 있다. 우선순위 패널의 내부 유출이나 구동 실패, 불규칙한 출력 등은 밸브의 오작동, 충전기에 대한 수소 공급의 실패, 즉 충전 중단의 사고로 이어진다. 우선순위 패널은 단독 ESD는 없으나, 압축기, 충전기 등 타 설비와 연동하도록 구성되어 있다. 즉, 압축기의 ESD가 진행되면 우선순위 패널의 Valve Failure Position이, 충전기의 ESD에는 우선순위 패널 측과 충전기 ESD Valve가 동시에 작동하는 구조이다.

### 3.3.2 STPA 수행 2단계(Control Structure 도식화)

우선순위 패널에 관한 Control Structure를 도출하기 위해 우선순위 패널을 구성하는 컴포넌트(Components)를 식별하고 각각의 주된 역할과 책임 관계를 (그림 40)과 같이 정의한다.

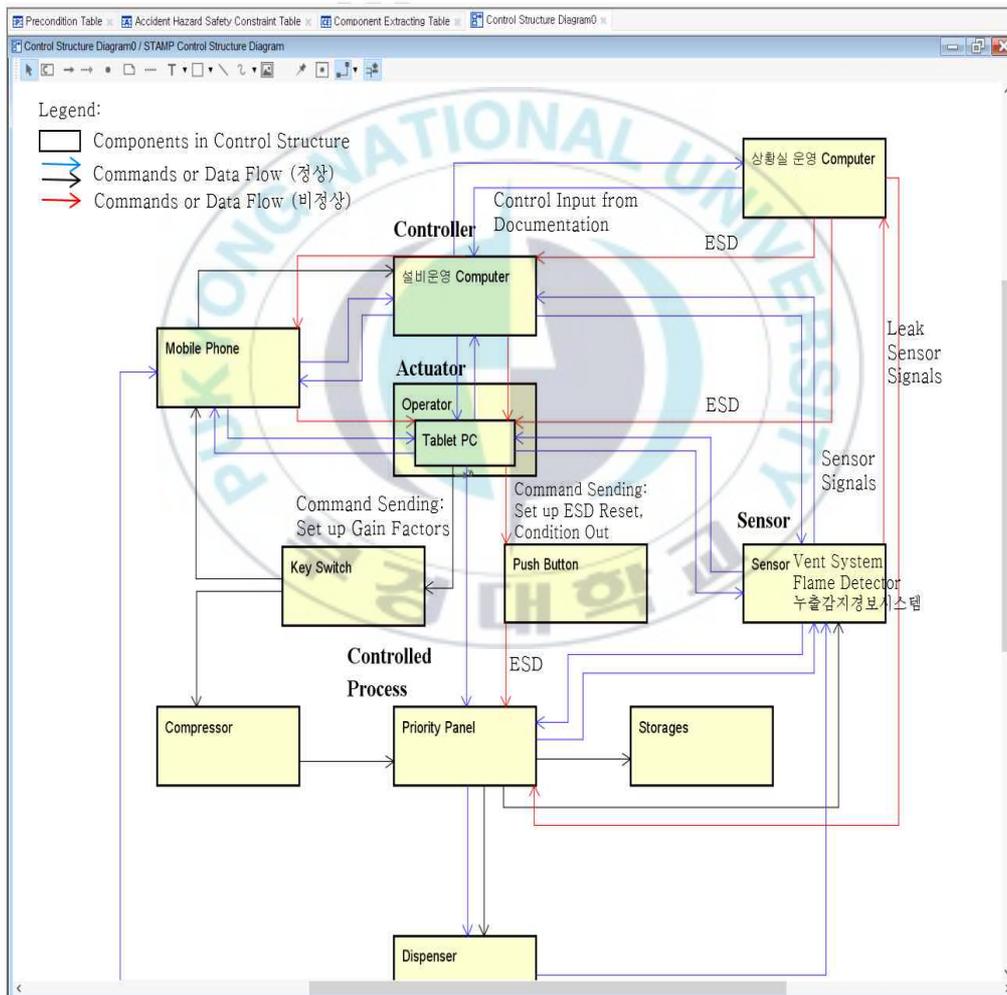


그림 40. 우선순위 패널의 Control Structure

우선순위 패널의 주요 구성요소와 기능은 아래 (표 47)과 같다.

표 47. 우선순위 패널의 주요 구성요소

구분	내용
통합 모니터링 시스템 센터	ESD여부를 결정하는 Controller 역할 수행 긴급차단(ESD)시스템, 수소충전소 운영정보 취합 Mobile Phone, Tablet PC에 수집된 충전소 정보 전달
설비운영 PC	ESD여부를 결정하는 Controller 역할 수행 수소충전소 운영정보 취합, Mobile Phone에 수집된 충전 소 정보 전달, 설비의 교정 및 로직 컴포넌트 자체 검증
안전시스템	Vent System, Flame Detector, 누출감지경보시스템 등 Sensor를 통해 통합모니터링시스템 센터 등에 상태 전송
Priority Panel	압축기에서 압축된 수소는 PP를 통해 Medium, High Pressure Buffer Storage로 압축된 수소를 이송, 저장하 고, 저장된 수소를 Dispenser로 이송
Sensor	압력, 온도, 유량센서로 정보를 수집, 수소누출(농도)검지 및 불꽃감지센서 등 센서가 수집한 정보는 트랜스미터를 통해 통합모니터링 시스템 센터와 설비운영 PC로 전송
Mobile Phone	설비운영 PC로부터 설비의 설계 및 성능데이터를 수신
Tablet PC	충전소 운전원과 트립컴퓨터 사이의 인터페이스 역할 설비운영 PC에서 Mobile Phone으로 전송되는 모든 정보 를 Tablet PC에 표시
Push Button/ Key Switch	(Push Button) 운전원이 현장에서 직접 ESD의 명령, 해 제 등 제어 (Key Switch) 운전원이 현장에서 직접 Tablet PC에 명령 을 전송할 수 있는 물리적 장치
Operator	Tablet PC에 표시된 정보를 기반으로 제어 행위 수행 설비운영 PC에 현장 정보 전달, 통신 활성화 및 해제 ESD가 해제될 경우 ESD 해제

### 3.2.3 STPA 수행 3단계(Unsafe Control Action 도출)

(표 48)은 우선순위 패널(PP)의 긴급차단(ESD)시스템의 UCA를 도출하기 위해 작성된 Context Table이다. Process Model이 가지는 모든 경우의 수를 고려하여 Control Action의 위험여부를 판단한다.

표 48. Control Action ESD의 Context Table

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	CA	S	PL	F	SS	CAH	Late	Early	NP
1		N. R	N. L	N. L	적	H4	H4	H4	No
2		R	N. L	N. L	적	No	H1~4	H3,4	H1~4
3		N. R	L	N. L	적	No	H2~4	No	H2,3
4		N. R	N. L	L	적	No	H2~4	No	H2,3
5		R	L	N. L	적	No	H1~4	H3,4	H1~4
6		N. R	L	L	적	No	H2~4	No	H2,3
7		R	N. L	L	적	No	H1~4	H3,4	H1~4
8		R	L	L	적	No	H1~4	H3,4	H1~4
9	ESD	N. R	N. L	N. L	부	H2,4	H2,4	H2,4	No
10		R	N. L	N. L	부	H1~4	H1~4	H1~4	H1~4
11		N. R	L	N. L	부	H1~4	H1~4	H1~4	H2,3
12		N. R	N. L	L	부	H1~4	H1~4	H1~4	H2,3
13		R	L	N. L	부	H1~4	H1~4	H1~4	H1~4
14		N. R	L	L	부	H1~4	H1~4	H1~4	H2,3
15		R	N. L	L	부	H1~4	H1~4	H1~4	H1~4
16		R	L	L	부	H1~4	H1~4	H1~4	H1~4

CA = Control Action, S = H<sub>2</sub> Storages, PL = PipeLine, F = Flange,  
 SS = Support Systems, CAH = Control Action Hazardous, Late = Control Action Hazardous if Too Late, Early = Control Action Hazardous if Too Early  
 NP = Not Providing Control Action Hazardous

(표 49)는 모든 경우 중 위험을 유발할 수 있는 Control Action만 선별하고, 선별한 Control Action을 UCA로 도출한 결과이다. 6열(CAH = Control Action Hazardous)의 2~8행에서 Process Model(2~4열 / S = H<sub>2</sub> Storages, PL = PipeLine, F = Flange,) 중 파열(Ruptured)과 누출(Leak)이 하나라도 있는 경우 동일 계열로 묶어 [UCA1]으로 기술하였다.

표 49. ESD에 대한 UCA

ESD의 Unsafe Control Actions	
Controller	Control Action → Controlled Process
Operator	ESD → Priority Panel
Not Providing causes hazard	UCA1, 다른 시스템이 적절하게 운행 중인 상황에서 수소저장탱크가 파열되거나 파이프라인에서 누출이 발생한 경우 ESD가 작동하지 않음 [H1~H4]
	UCA2, 다른 시스템이 적절하게 운영 중이지 않은 상태에서 누출 발생했으나 ESD가 작동하지 않음 [H1~H4]
Providing causes hazard	UCA3, 다른 시스템이 적절하게 운영 중이지 않은 상태에서 수소저장탱크의 파열로 ESD 작동함 [H1~H4]
Too soon, too late, out of Sequence	UCA4, 온도가 상승하는 상황에서 너무 일찍 ESD 작동 [H2, H3]
	UCA5, 수소저장탱크가 파열되거나 파이프라인에서 누출이 발생했는데 ESD를 너무 늦게 작동함 [H1~H3]
	UCA6, 파열 또는 누출이 없는 상태에서 ESD 작동함 [H4]
Stopped too soon, Applied too long	해당사항 없음

### 3.3.4 STPA 수행 4단계(원인 시나리오 도출)

3단계에서 Unsafe Control Action을 도출하고 나면 4단계에서는 UCA의 발생원인을 분석한다. 2단계에서 도출한 UCA 중 [UCA1]과 [UCA3]에 대한 원인 시나리오 도출 결과를 아래 (표 50, 51)로 정리하였다.

표 50. Operator의 ESD에 대한 UCA 및 원인 시나리오

Operator의 [UCA1]에 대한 원인 시나리오	
Controller	Control Action
Operator	ESD
Controlled Process	
Priority Panel	
Unsafe Control Action	UCA1, 다른 시스템이 적절하게 운영 중인 상황에서 수소저장탱크가 파열되거나 파이프라인에서 누출이 발생한 경우 ESD가 작동하지 않음 [H1~H4]
원인 시나리오	(패키지형 수소충전소 공간적 측면) 이벤트가 너무 느리게 진행되어 이상 상황이 발견되지 않음
	(프로세스 피드백 측면) 온도계, 압력계 설정값이 부정확함 온도계, 압력계 정보를 늦게 혹은 부정확하게 전달함 안전시스템이 정상적으로 동작하지 않음 센서, 통신선, 전원의 고장 피드백이 손실, 지연되거나 부정확함
	(외부 정보 측면) 부적절하게 조합된 계기정보가 제공됨
	(Operator 측면) Operator가 잘못 인식함 Operator가 다음 조치 행위를 혼돈함

Controller가 Operator인 경우와 Sensor인 경우로 나누어 원인을 분석한 결과이다.

표 51. Sensor의 ESD에 대한 UCA 및 원인 시나리오

안전시스템의 [UCA3]에 대한 원인 시나리오	
Controller	Control Action
안전시스템	ESD
Controlled Process	
Priority Panel	
Unsafe Control Action	UCA3, 다른 시스템이 적절하게 운행 중이지 않은 상황에서 수소저장탱크가 파열되어 ESD가 작동함[H1~H4]
원인 시나리오	(패키지형 수소충전소 공간적 측면) 자연 환기가 지나치게 잘 되거나 환기시스템이 독자적으로 가동되면 누출감지기에서 누출을 감지하기 어려움
	(프로세스 피드백 측면) 온도계, 압력계 값이 틀림 온도계, 압력계 정보를 제공하지 않음 상황을 반대로 표시하는 데이터 발생 센서 고장
	(외부 정보 측면) 압력을 낮게 보내거나 압력의 손실 안전 개시 신호의 오류
	(안전시스템 측면) 센서 정보의 충돌로 다른 시스템의 불능상태를 알지 못함 누출이 발생했지만 감지하지 못함 안전시스템의 알고리즘이 잘못됨 AOV 오작동 물리적 손상 발생 제조적 결함으로 오류 발생

## 3.4. 기존 연구와 비교 분석

### 3.4.1 STPA 수행 결과 해석

패키지형 수소충전소는 외부에서 제작한 패키지된 설비를 제한된 공간 내에 배치하여 충전소 현장에 설치, 기존의 충전소 시스템과 연동하여 사용한다. 패키지형 충전소의 위험요인을 분석함에 있어 수소충전소 전체를 대상으로 위험유발 요인을 분석해야 안전성을 향상시킬 수 있다. 수소충전소의 위험은 수소누출에서 비롯된다. ESD는 수소누출을 차단하기 위한 긴급차단장치를 말한다. 관련한 지침으로는 ‘패키지형 수소충전소의 패키지 구성에 따른 압축기유닛의 계기류 및 제어장비 일체 또한 패키지로 제공하여야 한다’(환경부 매뉴얼, 2021, p. 111)가 있다[42]. STPA 기법을 적용하여 패키지형 수소충전소의 압축시스템과 우선순위 패널시스템에 대한 ESD System의 ESD 실패 위험분석 결과를 정리하면 다음과 같다.

인적오류로 인한 ESD 실패 사례는 내용 측면에서 약간의 차이가 있지만, 선행연구의 결과에서도 찾을 수 있다. STPA 분석을 통해 선행연구 결과와는 다른 ESD의 실패 원인을 중심으로 살펴본다. 정량적 분석 방법에 의한 선행연구 결과에서는 찾기 어려운 STPA 분석에서만 나타나는 결과라고 생각한다. ESD 관련 UCA로는 ESD의 작동(실행), ESD의 작동 실패(비실행), ESD의 동시 발생의 사례와 충전소 운영(운전, 가동)중의 수소누출과 비운전(비가동) 중의 수소누출에 따른 ESD, 그리고 마지막으로 통신장애 등 통신으로 인한 ESD 문제가 발생하는 것으로 분석되었다.

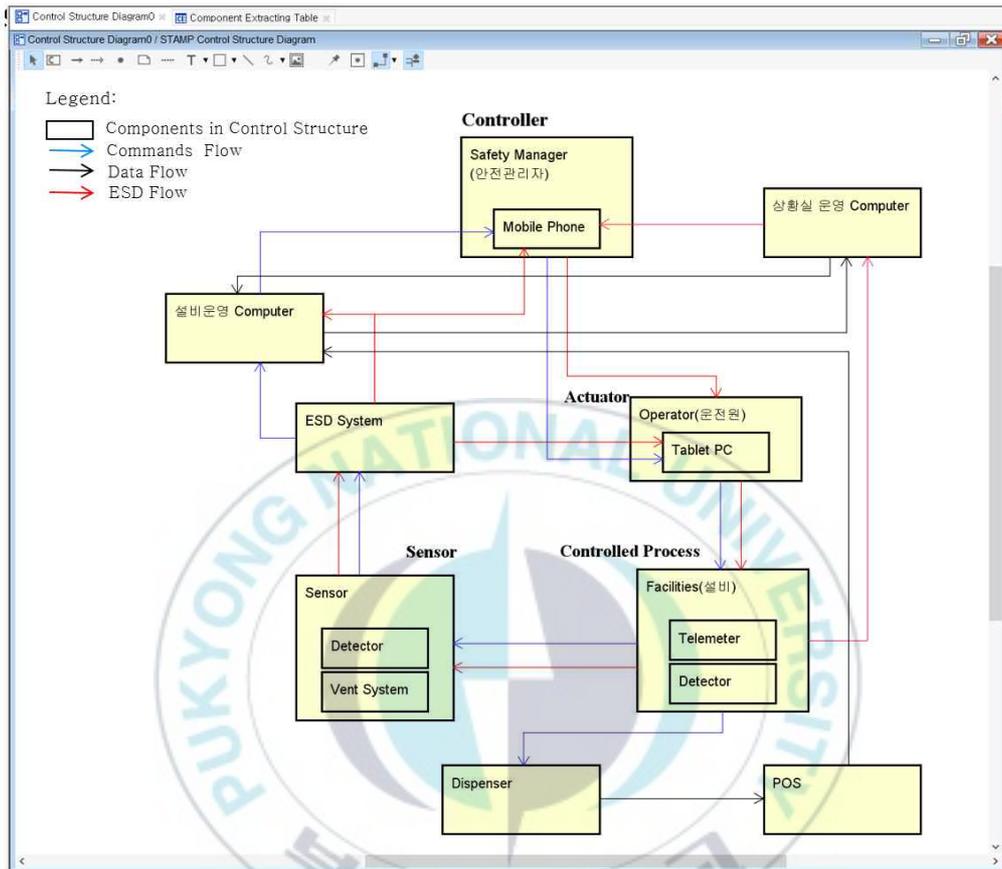


그림 41. Controller가 안전관리자인 경우의 ESD Flow

(그림 41)은 Controller가 안전관리자인 경우, 운전원 부재 또는 모듈 및 유닛에서 여러 건의 1차 ESD가 동시에 발생하는 경우에 현장에서 직접 대응하는 환경이 만들어지지 않아 2차 ESD가 작동하지 않을 수 있다는 결과를 도출한다. 특히, 수소충전소에서 250 Kg의 수소를 압축하여 저장하는데 최소 6시간 이상이 소요되므로 안전관리자 및 운전원의 관심 소홀이나 5분 이상의 현장 이탈 가능성이 있다. 포괄적인 인적오류 저감을 위한 ESD System의 강화 필요성이 STPA 결과로 해석될 수 있다.

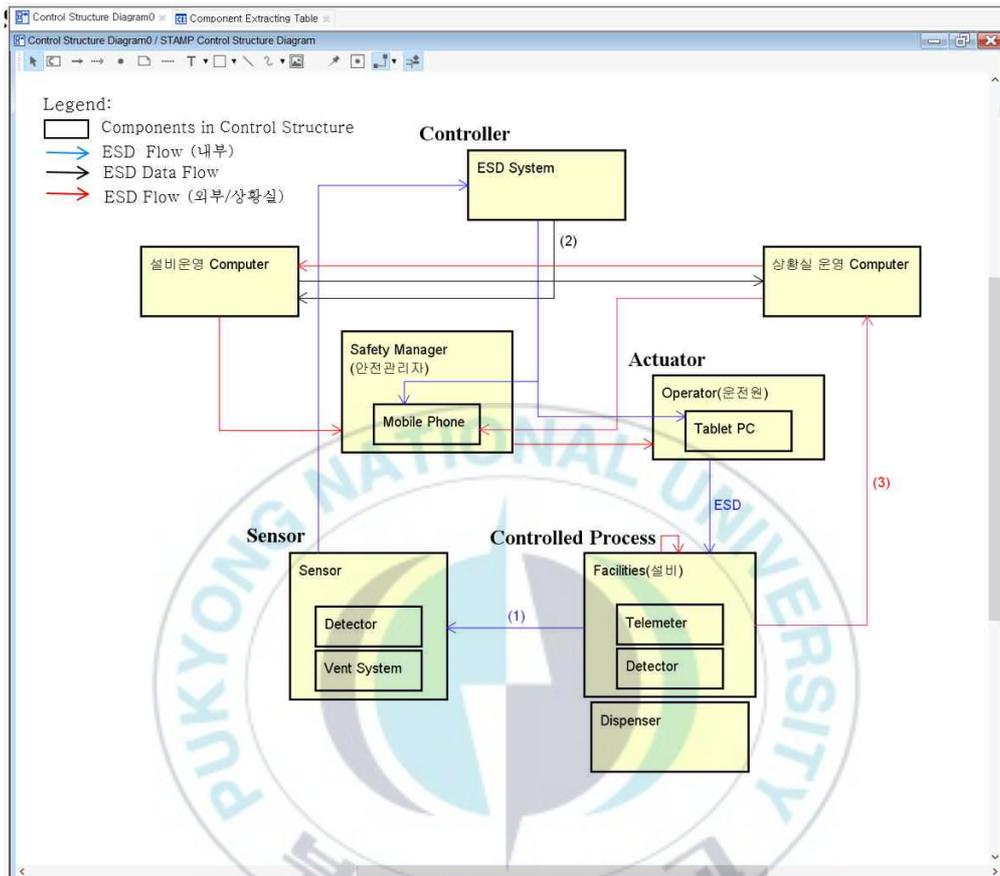


그림 42. Controller가 ESD System인 경우의 ESD Flow

(그림 42)는 Controller가 ESD System인 경우의 ESD 실패 원인을 보여 준다. 센서 및 시스템 사이의 트랜스미터 오류, 또는 시스템 경계에서의 전송채널 오류, 로직 시스템 오류 등으로 CS UCA1, UCA3와 PP UCA1, UCA3를 발생시킬 수 있다는 결과가 도출된다. 또, Compress System이 가동되지 않은 상태에서 패키지 내 수소누출이 발생할 경우 센서나 검지기 작동결과의 적시 전송에 문제가 발생해 ESD가 지연, 실패할 가능성이 있음을 STPA 분석 결과를 통해 해석할 수 있다.

STPA 위험분석 중 ESD System과 관련한 ESD 실패 결과를 해석하면 다음과 같다. 운전 중인 패키지 내 모듈과 유닛에서의 ESD 1차 실패에 대해서는 패키지 제작사가 제공하는 PLC를 통해 운전원에게 이상신호를 전달하여 2차로 ESD를 작동하는 안전조치가 행해질 수 있다. 그러나 운전원이 없는 충전소 마감 이후의 상황에서 저장용기의 수소누출에 따른 ESD 1차 실패의 경우 등에 대한 대비도 필요함을 추론할 수 있다. 또, 지나친 환기로 인해 누출검지기가 수소의 누출을 인식하지 못하는 경우도 발생할 수 있음이 ESD의 비실행의 결과로 나타났다.

모듈과 유닛 내부의 1차 ESD 외에도 패키지 내 누출검지기와 불꽃검지기 등과도 연계하는 2단계 ESD도 작동해야 한다. 온도, 압력, 유량의 부적합에 대한 모듈(유닛) ESD 1차 경보와 누출, 화재 경보에 의한 2단계 ESD 요구 등이 한꺼번에 작동하는 경우 운전원이 잘못 인식하거나, 다음 조치해야 할 행위를 혼동함으로써 발생하는 ESD 실패의 사례도 대비해야 함을 알 수 있다.

그리고, 패키지가 기존의 충전소에 배치되면, 패키지의 PLC와 기존의 충전소에서 운영하고 있는 운영시스템 및 안전시스템과 연계되어야 한다. 이때 발생할 수 있는 interface의 오류로 인한 ESD 실패 위험도 STPA 분석을 통해 찾아내었다. 패키지형 수소충전소의 경우 패키지 내 압축기의 규모와 압축 방식 등이 제작사, 충전소마다 다르다. 이런 이유로 EUC로 구성되는 패키지 내 설비와 패키지의 PLC, 특히 ESD System과 기존 충전소의 안전시스템과의 연계에 대해 발주할 때부터 충분한 사전협의를 필요하다는 해석을 도출할 수 있다.

### 3.4.2 선행연구와 결과 비교

선행연구에서는 사고의 발생빈도 등을 적용하여 사고 발생의 피해영향 등을 중심으로 안전성 평가를 수행하였다. 수소충전소의 안전성을 평가하기 위한 사고의 발생빈도 등 국내의 기초데이터가 부족한 조건을 극복하기 위해 선행연구 14편에서는 미국의 SNL, 영국의 HSE 데이터를 차용하거나, 보정해서 연구 데이터로 사용했다(그림 43).

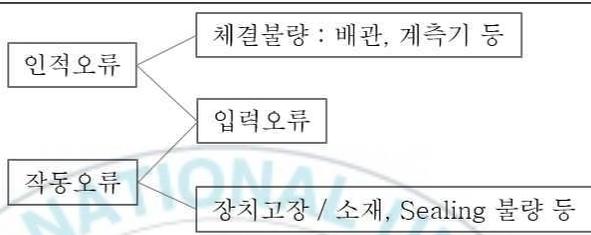


그림 43. 선행연구의 관심분야

본 연구의 STPA 기법 적용 결과와 선행연구의 결과는 다르게 도출될 수 있다. 비록 선행연구들의 연구내용 및 원인 분석의 방법과 관심 항목은 다르지만 수소누출 방지와 대응을 위한 ESD 관련 내용들을 추려 본 연구의 결과와 비교 분석하였다.

선행연구는 인적오류와 부품 및 Components를 대상으로 모듈과 유닛의 고장에서 ESD 실패의 원인을 찾았다(표 52).

표 52. 선행연구의 긴급차단장치(ESD)

	주요 내용
누출부위	튜브트레일러, 압축장치, 저장장치, 충전장치, 배관
누출원인	
누출대응	유량, 압력, 온도(Sensor, Indicator, Transmitter, Alarm)이상 발생시 Solenoid Valve를 이용하는 공학적 설계로 1차 ESD 작동 Sensor Alarm으로 운전원이 2차 ESD 조치 또는 ESD Reset
ESD 실패원인	

선행연구에서 ESD 실패 방지를 위한 방안으로 인적오류에 대한 견해로 운전원에 대한 교육과 지침서 마련, 운전 및 공정 매뉴얼 비치와 주기적인 점검을 제시하고 있다(강승규 등, 2017 ; 김 필종 등, 2019 ; 김혜림 등, 2017 ; 서두현 등, 2020a, 2020b). 작동오류와 관련한 부품 및 소재에 관한 연구에서는 부품의 규격화(표준화)를 지적한다(박우일 등, 2020 ; 서두현 등, 2020a, 2020b ; 안정진 등, 2019). 부품 및 소재에 대한 인증과 표준화를 피력하고, 안전밸브의 setting 값 변경에 따른 설비 이상을 거론한 이영철(2021)의 견해도 있다[16].

본 연구에 적용한 STPA 분석기법에서는 제어의 불안정한 행위를 도출하여 사고(손실)의 원인이 되는 ESD 실패를 찾아 그 원인을 도출하였다. 아래 (표 53)은 ESD 실패의 원인에 대해 STPA 분석 결과를 정리한 것이다.

표 53. STPA 분석결과에 따른 ESD 실패의 원인

	주요 내용
누출부위	튜브트레일러, 압축장치, 저장장치, 충전장치, 배관
ESD 실패원인	<pre> graph LR     A[인적오류] --- B[Operator 부재(비가동, 근무 종료시)]     A --- C[Operator 혼돈(동시다발의 ESD 발생시)]     D[작동오류] --- E[입력오류]     D --- F[장치고장 / Valve 등]     G[통신오류] --- H[입출력오류(Module, Unit 내부 및 시스템 사이)]     G --- I[전송채널 오류 등]     G --- J[전송시간 오류 등]     G --- K[Logic System 오류 등]     L[비실행오류] --- M[지나친 환기로 누출검지기 인식 불가]     N[입력오류] --- O[입출력오류(Module, Unit 내부 및 시스템 사이)]     </pre>

선행연구의 결과에서는 인적오류와 작동오류에서 ESD의 실패 원인을 찾았다면 STPA 분석 결과에서는 통신오류와 비실행오류라는 새로운 ESD 실패의 원인을 찾을 수 있었다. 인적오류에서는 새로운 상황, 즉 충전소의 비가동 시간, 또는 운전원의 근무시간 외에 발생할 수 있는 ESD 실패 역시 운전원의 부재에 따른 ESD의 실패로 분류하고 있음을 알 수 있다. 또 충전소 내에서 동시다발적으로 ESD가 발생할 경우, 운전원의 혼돈에 의한 ESD 실패의 가능성도 찾을 수 있다.

또 다른 결과로는 지나친 환기(배출)로 인한 누출검지 인식불가의 환경 역시 사고의 유무와 무관하게 STPA에서는 비실행 오류, ESD의 실패로 분류하였다. 그렇지만 ESD 관련 선행연구 가운데 수치해석 FLACS를 활용, 반밀폐 공간인 패키지형 수소충전소의 환기 효과에 관한 연구에서 천정부의 환기구를 통해 5분간의 지속적인 환기로 잔류수소가 없어지는 환경을 찾아내 충전소의 ESD(긴급차단)상황에서도 환기장치는 지속적으로 작동하여야 한다는 황순일 등 (2019)의 견해도 있다[13].

ICT가 발전하고, 많은 장비들이 EUC로 제작된다. 압축시스템 등 수소충전소의 설비들이 E/EE/PE로 구성되어 있다. 유량(유속), 압력, 온도와 관련한 Sensor, Indicator, Transmitter와 밸브 등이다. 인적오류와 작동오류에 공통적으로 적용된 입력오류의 경우가 해당된다. 선행연구에서 부품의 기능과 고장과 관련한 ESD에 관해 분석했다면 본 연구에서는 선행연구에서는 볼 수 없는 Communication과 Control 오류에 의한 ESD 실패 가능성 사례를 도출하였다. 또, 선행연구가 ESD의 실패를 예방하기 위해 부품 및 장치들의 고장 방지에 주안점을 둔 연구라면 본 연구는 ESD 실패의 원인을 찾아 2중, 3중의 ESD 실행 방안을 통해 수소의 누출을 차단하여 손실(사고)의 원인을 제거하는데 주안점을 둔다.

새로운 ESD 실패의 원인을 찾아낸 것은 본 연구에서 적용한 STPA 분석기법의 특징 때문이다. 선행연구에서는 부품이나 Components에 대한 분석 방법을 사용했지만 본 연구에서는 시스템 Control Action 및 시스템 수준의 안전제약사항을 도출하고, 안전제약사항을 제거하거나 제어하는 데 주안점을 둔 STPA 분석의 결과라 사료된다.

### 3.5 패키지형 수소충전소의 안전성 강화 모델

과거에는 재난이 발생하면, 재난에 대응하여 피해를 줄이고 복구의 과정을 거친다. 복구를 마치면 재난대비 예방책을 수립해 재난에 대비하는 방안을 마련하는 것이 최선이였다. 그러나 최근에는 미래재난을 예측하여 예방책을 미리 수립함으로써 재난을 최소화하는 방향으로 노력하고 있다. 수소충전소의 재난은 수소의 누출에서 시작된다. 패키지형 수소충전소에 대한 안전성 강화의 의미는 사전적 위험분석 방법인 STPA를 적용해 사고의 원인을 다양한 방법으로 추론하고 수소누출요인에 미리 대응함으로써 최종적으로 수소충전소에서 발생할 수 있는 수소누출에 따른 위험을 줄이려는 노력으로 해석할 수 있다.

패키지형 수소충전소의 안전관련 기준으로는 사고예방설비 기준이 있다. 본 연구에서는 가스누출검지경보장치, 긴급차단장치(ESD)와 환기설비, 화염검지기 등 안전관련 시스템을 중심으로 살펴본다. 수소의 누출을 차단하는 사고예방설비인 ESD는 압력, 온도, 유량 관련 모듈 ESD와 압축시스템, 우선순위 패널과 배관, 저장시스템, 충전시스템의 유닛 ESD, 모든 검지경보기와 연계된 ESD System으로 구분할 수 있다. 가스 및 화염검지경보설비와 환기설비는 수소누출 이후의 대응설비로 구분할 수 있다.

패키지의 압축시스템(CS)과 우선순위 패널(PP)에서 발생할 수 있는 ESD System에 대한 Unsafe Control Action을 도출한 결과를 통해 ESD 실패에 따른 수소누출의 위험을 제거하거나, 완화하는 패키지형 수소충전소의 안전성 강화 모델을 구상하고자 한다.

### 3.5.1 패키지형 수소충전소의 안전성 강화 모델 연구

수소충전소의 위험은 수소의 누출에 따른 화재나 폭발에 있다. 패키지형 수소충전소는 압축설비 등을 외부에서 제작해 제한된 밀폐형 공간에 배치하여 기존의 충전소 내에 설치한다. 밀폐된 공간에서의 ESD 실패는 수소의 체류로 인한 폭발성 분위기가 형성되어 화재 및 폭발의 위험이 크다. 이런 이유로 ESD의 실패를 줄이거나, 누출발생 시 신속한 대응방안을 마련하는 것이 패키지형 수소충전소의 안전성을 강화하는 모델이 될 수 있다.

선행연구의 결과와 STPA 분석을 통해 ESD의 실패나 오류에 대한 위험이 존재함을 파악하였다. ESD 실패 감쇄를 위한 2중의 안전조치는 초기 패키지형 수소충전소의 안전성 향상을 위해 필요하며, 이의 실현을 위해 ESD System부터 구성해야 한다. (표 54)는 긴급차단장치 ESD와 ESD System에 대해 STPA 분석 과정에서 연구자가 정리한 것이다.

표 54. 긴급차단장치(ESD)와 ESD System

		ESD	ESD System
범위	1단계	모듈, 유닛(설계 반영)	○
	2단계	패키지 내부 경보	○
	3단계	-	충전소 외부 경보 포함
명령	1단계	(1차) 설계 반영	○
		(2차) 운전원(안전관리자)	+ 운영 PC
	2단계	운전원(안전관리자)	+ 운영 PC
	3단계	-	+ 운영 PC + 모니터링 PC
대상		DP, CS, PP, SS, DS, 배관	+ 검지기 + 경보기

아래 (그림 44)는 현재의 ESD 제어구조(상)와 개선된 ESD System 제어 구조도(하)이다. 패키지의 압축시스템을 중심으로 압력, 유량, 온도 이상에 의해 개별 작동하는 ESD 장치들의 Control Structure를 하나의 긴급차단장치 작동 시 서로 연계하여 작동하고, 운전자나 안전관리자의 부재 또는 동시다발의 ESD 작동 환경이 발생하는 경우에도 운영 PC에 의해 ESD가 작동할 수 있는 다단계의 ESD System 제어구조를 나타낸다.

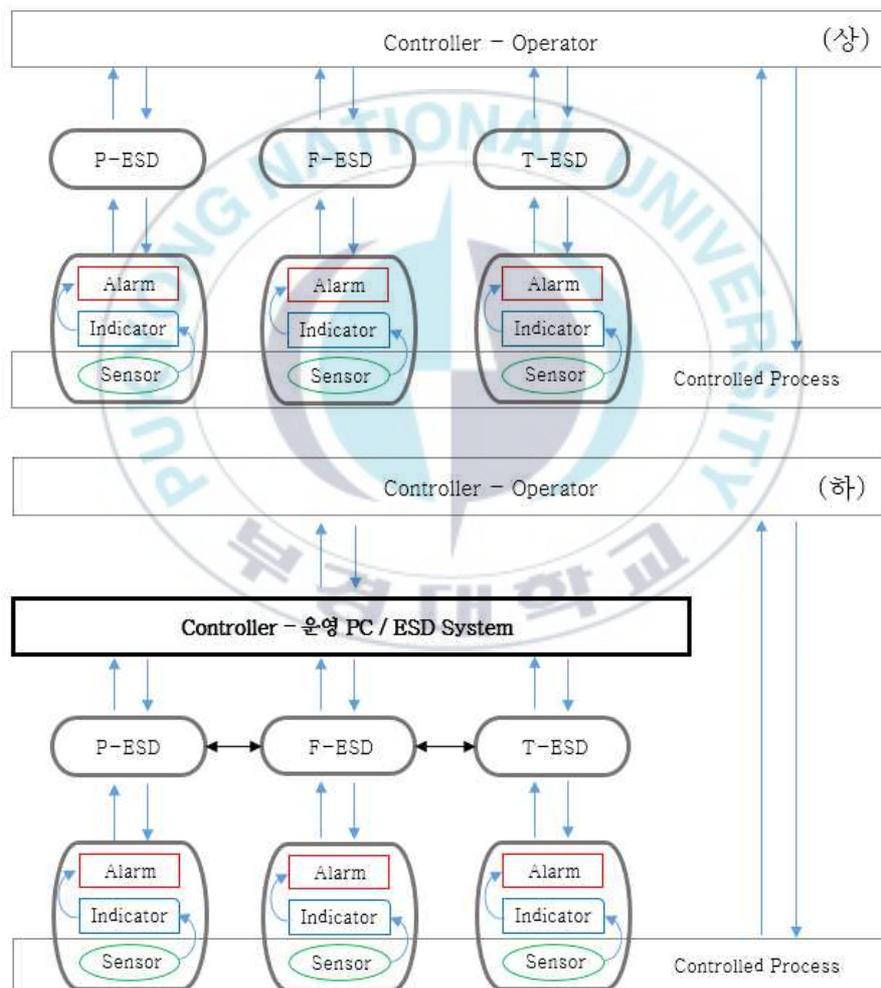


그림 44. ESD와 ESD 시스템의 제어구조

패키지형 수소충전소에 납품되는 압축기 Unit은 제어가 가능한 EUC로 구성되어 있다. 패키지형 Unit의 설비들은 제작특성과 환경부 지침에 의해 자체 설비 프로세스 제어시스템을 확보하고 있다. 나아가서 EUC의 안전한 상태를 달성하거나, 유지하는데 필요한 안전기능을 구현하기 위해서는 개별 Unit의 긴급차단장치와 더불어 패키지 전체를 대상으로 하는 ESD System 모델을 구상할 필요가 있다(그림 45). 이 때, 비상감압(EDP)시스템을 포함하는 SSS(Safety Shutdown System)을 채택하는 것이 안전성을 강화하는데 더 유리할 것으로 판단된다. 또, 패키지형 Unit의 ESD를 포함한 PLC는 기존 충전소의 안전장치들이나 Dispenser와 연계된 POS 등과 통합되거나 연계되어 작동해야 한다.

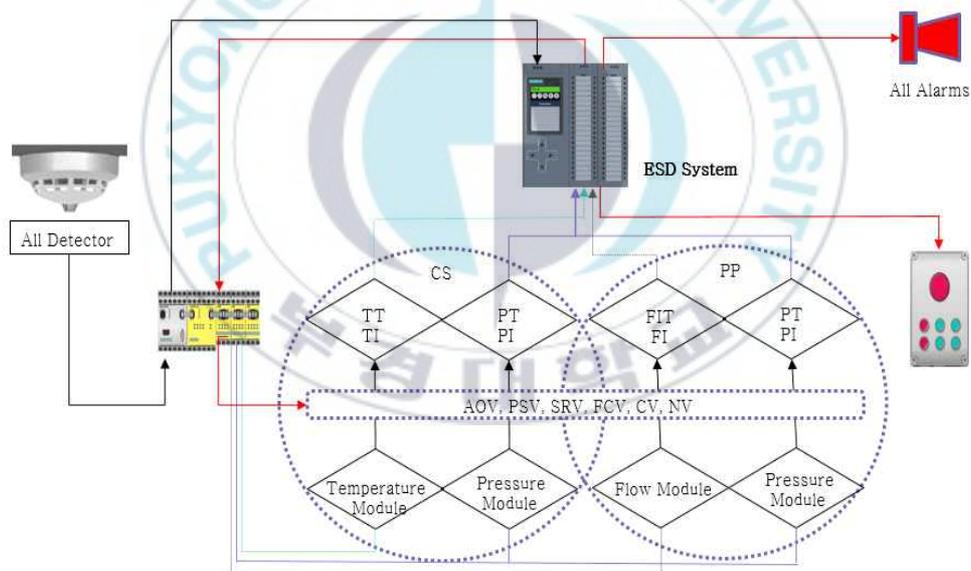


그림 45. 강화된 패키지의 ESD 시스템 구조도

다음 단계로 ESD 시스템을 포함하여 FGS(누출 및 화재, 불꽃검지기), 강제환기배출시스템 등 통합 Safety-Related System(SRS, 안전관련 시스템) 구현이 필요하다.

FGS(Flame & Gas System, 화재 및 가스시스템)은 가연성 가스의 누출 및 농도감지와 불꽃감지, 경보 기능을 갖추고 2개 이상의 감지기가 트리거되면 공기를 차단하고, 배기 시스템을 시작하는 통합 검지경보시스템이다. 패키지 내부와 충전소 전체 검지기와 경보기의 통합을 통해 안전성을 향상시킬 수 있다. (그림 46)은 SRS가 Controller인 안전성 강화 모델 구상을 위한 Control Structure Diagram이다.

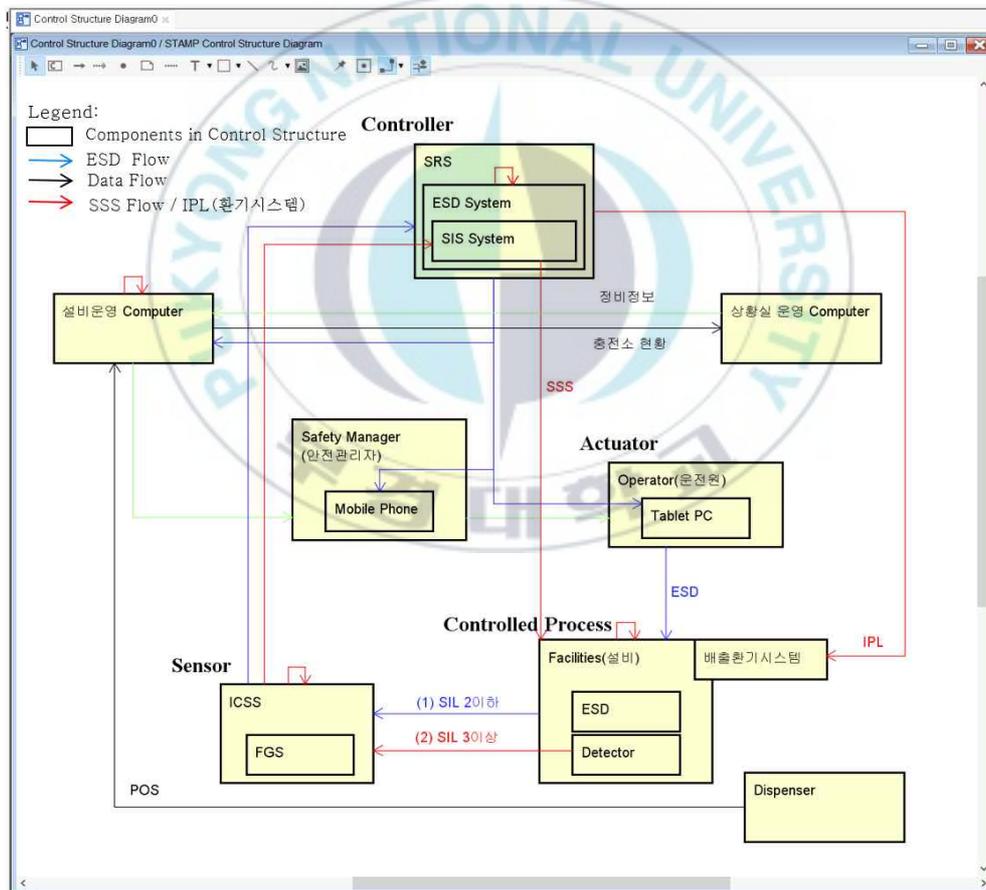


그림 46. 안전성 강화 모델 Control Structure Diagram



## IV. 결 론

패키지형 수소충전소는 아직 시행 초기이다. 일반 도시민들이 가지고 있는 수소충전소의 안전에 대한 막연한 불안감을 해소하는 유일한 방법은 수소충전소의 화재나 폭발사고의 위험을 발생시키지 않는 것이다. 이를 위해 패키지형 수소충전소 사고의 원인을 예측하여, 완화하거나 제거해야 한다.

본 연구는 수소충전소의 공간문제 해결과 보급 확대를 위해 특례기준으로 시행하는 패키지형 수소충전소의 안전을 위해 STPA 기법을 적용하여 패키지의 위험을 분석하였다. STPA 위험분석을 위해 수소의 위험특성과 화석연료를 대체할 연료로서의 수소와 수소(연료)자동차, 수소충전소의 종류와 실태, 해외의 수소충전소 현황에 대해 살펴보았다. 수소충전소의 안전에 관한 정량적, 정성적 위험성평가 선행연구를 탐색하였다. 패키지형 수소충전소의 정의와 구성에 대해 알아보고, 안전 기준과 위험성 분석 등 선행 연구 결과를 검토하였다.

STPA 분석을 통해 패키지의 압축시스템과 우선순위 패널에 대한 부적절하거나 불안정한 형태의 UCA(Unsafe Control Action)를 도출, UCA의 Causal Factor를 찾아내었다. STPA 위험분석 결과와 선행연구의 안전성평가 결과를 비교분석하여 긴급차단장치(ESD)의 기능과 ESD 실패의 원인을 식별하였다. ESD 시스템을 강화하여 수소누출의 위험요인을 완화하고, 강제환기배출시스템을 연계함으로써 화재 및 폭발 환경을 제거할 수 있는 모델을 구상하여 패키지형 수소충전소에 대한 안전성 강화 모델을 마련하고자 하였다.

본 연구결과에서 도출된 ESD 실패의 원인을 제어함으로써 패키지형 수소충전소의 안전성을 강화하는 모델은 다음과 같다.

1. ESD System 구축이 필요하다. 압력, 유량, 온도의 이상 상황에 긴급차단장치(ESD)작동을 서로 연계하고, 다중 제어함으로써 ESD 기능을 강화하여 ESD 실패 및 수소누출을 방지할 수 있다.
2. FGS(Flame & Gas System, 화재 및 가스시스템)를 구축할 때, 패키지 와 충전소의 검지기, 경보기를 통합시키는 것이 필요하다. 검지 대응시간을 줄일 수 있고, 운전원의 능동적인 대처를 가능하게 한다.
3. 국제규격에 합당한 수소충전소 통합 SRS 구축이 필요하다. 수소의 누출이 발생하면 허용된 시간 내에 ESD, SSS가 작동되어야 한다. 특히 ESD의 작동이 늦거나, 작동되지 않는 상태를 대비하는 것이 수소의 누출에 대한 안전성을 강화하는 방안이 될 것이다.
4. 강제환기배출시스템 구축이 필요하다. 밀폐형 공간 내에서 수소의 누출 사고가 발생한다면 수소누출 후의 대응 방안으로 수소의 체류를 막고, 가연한계를 벗어나는 환경을 조성해야 한다. 이런 이유로 강제환기배출 시스템은 IPL 체계로 운영할 것을 권유한다.

본 연구에서 제안한 ESD System, FGS, SRS 등과 IPL 체계로 운영되는 강제환기배출시스템을 포함한 패키지형 수소충전소 모델은 수소충전소의 안전성 강화에 기여할 것으로 기대한다. 그러나 이 제안 모델이 패키지형 수소충전소의 무결점 안전상황을 보장할 수는 없다.

아직 패키지형 수소충전소의 설치(운영)은 본격적으로 시행되기 이전의 단계이다. 운영에 앞서 본 연구 결과로 제안하는 강화된 안전 모델로 패키지형 수소충전소가 보급된다면 수소누출로 인한 사고의 위험은 제어가 가능하다고 판단된다. 특히 패키지형 수소충전소 보급 초기의 수소누출로 인한 화재 및 폭발사고를 방지할 수 있다고 기대한다.

본 연구에서는 제안 모델의 실행에 따르는 경제성은 검토하지 않았다. 제안 모델의 구축에 따른 충전소 운영자의 추가 경제적 부담이 있다. 그러나 제안하는 모델로 패키지형 수소충전소를 설치, 보급한다면 중장기적인 관점에서 충전소 설치지역 주민들이 가지고 있는 수소충전소의 안전성에 대한 막연한 불안감을 해소시키는 효과가 있을 것으로 기대한다. 나아가 안전성 향상 모델 연구 결과를 통해 수소충전소의 보급확대와 수소모빌리티 인프라 구축 정책에 기여할 것으로 기대한다.

본 연구에서 STPA 기법을 적용해서 패키지형 수소충전소의 위험을 분석하고, 그 원인을 찾아 안전성을 강화시키는 대안을 제시한다고는 하였으나, 분석 대상이 패키지의 일부 시스템과 Unit에 국한되어 정밀도가 떨어질 수 있는 개연성을 가지고 있다.

향후 수소충전소 전체 시스템에 관한 정밀한 STPA 분석 연구와 수소충전소 통합 관제 모니터링 시스템과 연계되는 개별 충전소의 보안 방안, 수소충전소 전용 ESD 단계 및 SIL에 대한 기준 설정(표준)에 관한 추가연구가 필요하다. 추가연구를 통해 수소충전소의 안전성을 더욱 강화할 필요가 있을 것으로 생각된다.

## 참 고 문 헌

1. Peter Hoffmann(2003). **에코에너지**(강호산 역). 서울: 생각의 나무.  
(원전은 1981년에 출판)
2. Jeremy Rifkin,(2003). **수소혁명**(이진수 역). 서울: 민음사. (원전은 2002년에 출판)
3. Hydrogen Council(2018). Hydrogen meets digital. DMB881 Hydrogen Digital report EYA, 1-34
4. 표돈영, 김양화, 임옥택(2019). 수소충전소의 안전성 평가 연구. 한국수소 및 신에너지학회 논문집 30(6). 499-504
5. 전대천(2014). 수소경제로의 이행을 위한 안전관리 정책 연구. 한국수소 및 신에너지학회 논문집 25(2), 161-172
6. 백승욱(2019). 수소충전소의 보급과 기술개발. 오토저널 41(2), 28-32.
7. 심중표, 이창래, 이흥기(2012). 신재생에너지원인 수소연료전지의 원리와 응용. 전기의 세계 61(11), 15-22
8. 서두현, 이광원, 김태훈(2020a). 패키지형 수소충전소의 고장형태별 영향 분석. 한국수소 및 신에너지학회 논문집 31(1), 65-72
9. 이동혁, 유병태(2018). 장외영향평가 F-N curve 적용에 관한 연구. 한국가스학회지 22(5), 31-37
10. 김혜림, 강승규, 허윤실(2017). 국내·외 충전소 사고 현황 분석 및 가스누출 피해거리 평가. 에너지공학 26(4), 7-13
11. 김필중, 강승규, 유명종, 허윤실(2019). LPG 복합 이동식 수소충전소 안전성 분석에 관한 연구. 에너지공학 28(4), 48-60
12. 강승규(2019a). 수소충전소 안전거리 설정을 위한 수소제트 및 화염 특성 분석. 한국가스학회지 23(6), 74-80

13. 황순일, 강승규, 허윤실(2019). CFD 툴을 활용한 패키지형 수소충전시스템의 안전성 향상 연구. 한국수소 및 신에너지학회 논문집 30(3), 243-250
14. 박우일, 강승규(2020). 수소충전소 설비 증설에 따른 안전성 해석. 한국가스학회지 24(6), 83-90
15. 강승규, 방효중(2013). 전산해석을 이용한 고압가스 충전소 가스누출 확산 해석 및 위험성 평가. 유체기계 연구개발 발표회 논문집, 77-78, 11월 28일. 제주: 그랜드호텔
16. 이영철(2021). 수소인프라 이슈 및 과제. 공업화학 전망 24(4), 36-51
17. 강승규(2019b). 수소-LPG 복합충전소 정량적 위험성평가에 관한 연구. 에너지공학. 28(4), 29-34
18. 강승규, 허윤실(2020). 수소-CNG 복합충전소 정량적 위험성평가에 관한 연구. 한국가스학회지, 24(1), 41-48
19. 강승규, 허윤실, 문종삼(2017). 위험성평가를 통한 패키지형 수소충전소 안전성 향상에 관한 연구. 한국수소 및 신에너지학회 논문집 28(6), 635-641
20. 고윤기, 하진욱, 이평찬, 이현욱(2020). 안전한 수소전기차를 약속하는 수소저장용기 국산화. 모빌리티 인사이트(Mobility Insight) 통권 5, 5-10
21. 김동환, 이수민, 조충희, 강승규, 허윤실(2020). 이동식 수소스테이션 정량적 위험성평가에 관한 연구. 한국수소 및 신에너지학회 논문집 31(6), 605-613
22. 김혜림, 강승규(2020). 정량적 위험성평가 프로그램(Hy-KoRAM)을 이용한 제조식 수소충전소. 한국수소 및 신에너지학회 논문집, 31(5), 459-466

23. 박송현, 김동환, 구연진, 김필중, 허윤실(2019). LPG-수소복합충전소 운영데이터 모니터링 분석. 에너지공학 28(4), 1-7
24. 박진남(2018). 수소충전소 기술 및 정책현황. 공업화학 전망 21(3), 10-19
25. 서동주, 윤왕래(2007). 수소충전소, 설비저널 36(9), 36-41
26. 서두현, 김태훈, 이광원, 최영은(2020b). Off-Site 패키지형 수소충전소의 FTA 분석. 한국수소 및 신에너지학회 논문집 31(1호), 73-81
27. 서두현, 이광원, 김태훈, 오규형, 김영규(2008). 국내 수소충전소의 안전성 평가. 한국가스학회 학술대회 논문집, 9-14, 11월 28일. 충북: 충주대학교.
28. 안정진, 김완진, 김래현(2019). 고압 수소설비용 비금속부품 소재의 FMEA 평가를 통한 실험적 연구. 에너지공학 28(3), 10-17
29. 이재용, 이지은, 송형운(2020). 정량적 위험성평가 기반 수소충전소 위험요소 분석 연구. 한국가스학회지 24(6), 70-76
30. 이호길(2020). 수소모빌리티의 성패를 좌우할 수소충전소 기술. Mobility Insight 통권 9, 14-20
31. 정길성(2020). 새로운 에너지를 맞이할 준비를 하다\_수소경제. 그린에너지 기술저널 통권 58, 14-17
32. 채충근, 강수연, 김한나, 채승빈, 김용규(2019). 모델링 및 시뮬레이션을 통한 수소충전 프로토콜 영향인자 평가. 한국수소 및 신에너지학회 논문집 30(6), 513-522
33. 길형배, 오승훈, 김희태, 김철후, 이지은(2021). 수소산업의 글로벌 기술동향 및 정책 전망. 기계기술정책 103호, 한국기계연구원, 1-34
34. (FP211\_2017)고압가스 용기 및 차량에 고정된 탱크 충전의

시설·기술·검사 · 안전성평가 기준

35. (FP217\_2017)저장식 수소자동차 충전의 시설·기술·검사기준
36. (FP216\_2017)제조식 수소자동차 충전의 시설·기술·검사기준
37. 이원욱 · 이승훈(2019). **수소에너지 백과사전**. 서울: KP Books
- 38 정보통신산업진흥원(2016). **SW 안전성 공통 개발 가이드**. 충청북도: NIPA
39. 한국수소산업협회(2020). **수소산업연감 2020**. 울산: KHIA
40. 한국에너지공단(2016). **신·재생에너지 백서**. 세종: 산업통상자원부
41. 한국정보통신기술협회(2018). **STPA를 활용한 위험분석 가이드**. 경기도: TTA
42. 환경부(2021). **수소충전소 운영 매뉴얼**. 세종: 환경부
43. IRS Global(2019). **Hydrogen Market Report 2019-21**. 인천: IRS Global
44. <https://www.aiche.org/> (2021. 08. 10, AM 08:10)
45. <https://www.iso.org/committee/54560.html>
46. <https://news.hmgjournal.com/Group-Story/%EC%88%98%EC%86%8C%EC%B6%A9%EC%A0%84%EC%86%8C%EC%9D%98-%EC%A2%85%EB%A5%98%EC%99%80-%EB%B3%B4%EA%B8%89-%ED%98%84%ED%99%A9>