



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 위험분석과 재해경감활동을
적용한 수소충전소의 운영안전성
강화 방안 연구



2024년 2월

국립부경대학교대학원

정보시스템학과

이 장 원

공 학 박 사 학 위 논 문

STPA 위험분석과 재해경감활동을
적용한 수소충전소의 운영안전성
강화 방안 연구

지도교수 김 창 수

이 논문을 공학박사 학위논문으로 제출함.

2024년 2월

국립부경대학교 대학원

정보시스템학과

이 장 원

이장원의 공학박사 학위논문을 인준함.

2024년 2월 16일

위원장 이 학 박사 이 경 현 (인)

위 원 경영학박사 김 하 균 (인)

위 원 공 학 박사 김 선 진 (인)

위 원 이 학 박사 김 영 섭 (인)

위 원 공 학 박사 김 창 수 (인)

목 차

표목차	iii
그림목차	v
Abstract	vii

I. 서 론

1.1 연구 배경	1
1.2 연구 목적	4
1.3 연구 내용	5

II. 수소충전소

2.1 수소산업 정책 동향	9
2.1.1 주요국의 수소관련 정책 동향	9
2.1.2 수소관련 정책 추진경과	10
2.1.3 수소충전소 안전관리	11
2.2 수소충전소 구분 및 구성	14
2.2.1 수소연료전지차	20
2.2.2 수소충전소 현황	21
2.2.3 수소충전소의 사고 및 운영중단 현황	22
2.3 수소충전소 구축절차	26
2.4 수소충전소의 안전성	28

III. 이론적 고찰 및 선행연구

3.1 수소충전소의 위험	32
3.1.1 수소의 위험	32
3.1.2 안전성(위험성) 개념	33
3.2 수소충전소의 위험성평가	35
3.2.1 정성적 위험평가	36

3.2.2	정량적 위험평가	41
3.3	STPA 위험분석 개요	45
3.3.1	위험분석 특징과 한계	45
3.3.2	STPA 위험분석 절차	47
3.4	재해경감활동	54
3.4.1	기업재난관리표준	55
3.4.2	재해경감활동 위험평가	58
 IV. 수소충전소의 위험요인 및 위험성평가 설계		
4.1	수소충전소의 위험요인	62
4.1.1	수소의 누출, 연소, 화재, 폭발	63
4.1.2	수소충전소 가동 중단	64
4.2	수소충전소의 위험성평가 설계	65
4.2.1	위험영역	65
4.2.2	수소충전소의 가동중단 위험성평가 기준	66
4.3	수소충전소 가동 중 발생 가능한 위험	70
 V. STPA 위험분석과 재해경감활동 적용		
5.1	STPA 위험분석 항목도출	71
5.2	수소충전소에 대한 STPA 및 재해경감활동 적용	73
5.2.1	STPA 위험분석	73
5.2.2	재해경감활동 위험평가 · 처리	88
5.3	개선효과 및 검증	94
5.3.1	기존연구와 비교 및 개선효과	94
5.3.2	검증	97
 VI. 결 론		
		99
 참고문헌		101

표 목 차

[표 1] 파리기후협약과 교토의정서 비교	2
[표 2] 수소연료전지차와 수소충전소 공급계획	3
[표 3] 수소모빌리티 정리	7
[표 4] 수소 공급방식에 따른 수소충전소 비교	16
[표 5] 수소연료차, 내연기관 자동차 비교	20
[표 6] 주요 수소충전소 가동중단 현황(2020.1~6)	23
[표 7] 고속도로휴게소 수소충전소의 가동중단 건수(2019~2021.8)	23
[표 8] 국내 수소충전소 장비 및 부속기기 국산화율	24
[표 9] 전통적 위험분석 기법들의 주요 특징	46
[표 10] PDCA 모델의 주요내용	56
[표 11] 재난관리 단계별 주요업무	57
[표 12] 위험발생빈도 등급(5등급)	60
[표 13] 업무영향도 등급(5등급)	60
[표 14] 수소충전소의 위험요인 및 현재 상황	64
[표 15] 수소충전소의 설치 전 단계 위험성평가 비교	70
[표 16] 수소충전소의 위험성평가와 재해경감활동 적용가능 비교	72
[표 17] STPA 위험분석 항목	72
[표 18] STPA 위험분석과정 중 분석을 위한 구성요소 추출	76
[표 19] 위험을 유발할 수 있는 불안전한 Control Action의 4가지 유형	79
[표 20] STPA 위험분석 결과정리	88
[표 21] 수소충전소의 재해경감활동 적용 위험 시나리오	89
[표 22] 조정 위험발생빈도 등급(5등급)	90

[표 23] 조정 업무영향도 등급(5등급)	91
[표 24] 위험등급 산정	92
[표 25] 위험분석 결과 처리단계	93
[표 26] 위험성평가 비교	95
[표 27] 위험 시나리오의 위험성평가등급 비교 · 분석	96
[표 28] 위험 시나리오의 재해경감활동 적용 후 안전성 비교	97



그 립 목 차

[그림 1] 연구의 흐름	6
[그림 2] 수소공급 방식에 따른 수소충전소 구분	16
[그림 3] 이동식 수소충전소	17
[그림 4] 패키지형 수소충전소 프로세스	18
[그림 5] 수소충전소 운영 매커니즘	19
[그림 6] 수소충전소 설치 민간보조 사업 일정	26
[그림 7] 일반적인 수소충전소 설치 절차	27
[그림 8] 수소충전소 설치와 관련된 규정	28
[그림 9] 기능 안전성	34
[그림 10] STPA 위험분석의 단계별 절차	48
[그림 11] STPA 위험분석 1단계	48
[그림 12] STPA 위험분석 2단계	49
[그림 13] STPA 위험분석 3단계	50
[그림 14] STPA 위험분석 4단계	51
[그림 15] 재해경감활동관리체계 적용 모델	56
[그림 16] 재해경감활동 위험성평가 절차	58
[그림 17] 위험영역 구분	66
[그림 18] 수소충전소의 위험성과 안전성 영역	68
[그림 19] 수소충전소 설치 전 단계 안전성평가 및 위험성결정	68
[그림 20] 수소충전소 가동중단 위험성평가	69
[그림 21] STPA 위험분석(Define Preconditions) 입력	74
[그림 22] STPA 위험분석(Accident, Hazard, Safety Constraint)	74

[그림 23] STPA 위험분석(Extract Components to Analyze)	75
[그림 24] STPA 위험분석(Control Structure Diagram 1)	77
[그림 25] STPA 위험분석(Control Structure Diagram 2)	78
[그림 26] STPA 위험분석(Control Structure Diagram 3)	78
[그림 27] STPA 위험분석(UCA Table) 적용	80
[그림 28] UCA Table 입력 결과	80
[그림 29] Causal Scenario 식별방법	81
[그림 30] STPA 위험분석(Hint Word Set 1)	82
[그림 31] STPA 위험분석(Hint Word Set 2)	82
[그림 32] STPA 위험분석 HCF 도출(HCF Table 0)	83
[그림 33] STPA 위험분석 HCF 도출(HCF Table 1)	83
[그림 34] STPA 위험분석 HCF 도출(HCF Table 2)	84
[그림 35] STPA 위험분석 HCF 도출(HCF Table 3)	84
[그림 36] STPA 위험분석 HCF 도출(HCF Table 4)	85
[그림 37] STPA 위험분석 HCF 도출(HCF Table 5)	85
[그림 38] An STPA Primer	86
[그림 39] STPA 위험분석(Countermeasure Table)	86
[그림 40] HCF Primer 기반 도식화	87
[그림 41] 재해경감활동 위험평가 · 처리 후 위험영역	98

**A Study on the Operation Safety Enhancement of Hydrogen Refueling
Stations Using STPA Risk Analysis and Business Continuity
Management**

Jang Won Lee

Department of Information System
The Graduate School, Pukyong National University

Abstract

The demand for eco-friendly energy has increased to overcome the global warming crisis. Hydrogen is emerging as a new energy source with eco-friendliness and efficiency. The government is pushing to expand the supply of hydrogen refueling stations in the transportation sector to achieve a "Leading Country in the Hydrogen Industry." However, due to various reasons, the expansion of the supply of hydrogen refueling stations is not proceeding as planned.

Accordingly, a plan to strengthen the operational safety of hydrogen refueling stations, one of the factors hindering the expansion of the build of hydrogen refueling stations, was studied.

If the previous studies have focused on the pre-installation stage of hydrogen refueling stations, the risk targets of this study have been expanded to possible risks from the pre-installation stage to the operation stage over time. In other words, risk factors were divided into 'Acceptable Risk Areas' and 'Allowable Risk Areas'.

In the two areas, residual risk factors that may occur during the operation of hydrogen refueling stations were derived and applied to STPA risk analysis and Business Continuity Management to compare how the risk area changes after the risk analysis · evaluation · processing.

Among the seven representative risk scenarios that can occur during the operation of hydrogen refueling stations, three were risk-cause scenarios derived through STPA risk analysis. The results of applying seven risk scenarios to Business Continuity Management can be summarized in two ways.

- 1) The risk area of seven possible risk scenarios during the operation of hydrogen refueling stations has been reduced from 'Allowable Risk Area' to 'Acceptable Risk Area'.
- 2) Seven risk scenarios were 'Reduced' or 'Transferred' as a result of applying Business Continuity Management.

Therefore, the STPA risk analysis and Business Continuity Management risk analysis · evaluation · processing procedure could be presented as a model necessary to strengthen the operational safety of hydrogen refueling stations. If the Business Continuity Management model suitable for hydrogen refueling stations is developed through follow-up research in the future, it is expected that the supply of hydrogen refueling stations will be expanded quickly.

I. 서 론

1.1 연구배경

인류가 화석연료를 사용한 이후 산업이 발달하였다. 하지만 대기오염과 지구의 온실가스 불균형으로 인하여 기온이 상승하는 지구온난화도 진행되기 시작했다. 지구의 온난화 위기를 극복하려는 노력이 20세기부터 본격적으로 시작되면서, 이산화탄소 배출 억제에서 시작한 노력이 이제는 탈탄소화 즉, 새로운 에너지 자원을 찾아 활용하는 노력으로 본격 진화하고 있는 것이다[1].

지구온난화 방지를 위해 세계 각국이 동의한 기후변화 협약의 진행과정은 이상 기후 현상이 발생하는 것을 예방하기 위해 1992년 6월 브라질 리우에서 각국의 대표들이 모여 유엔 기후변화협약을 채택한 것으로 시작된다. 이후 이산화탄소를 비롯한 6가지 종류의 온실가스 배출을 감소시키기 위하여 1997년 12월 일본 교토에서 교토의정서가 만들어져 2005년 발효되고 2020년 종료되었다. 이를 대체하기 위해 2015년 12월 프랑스 파리 유엔 기후변화협약 당사국총회에서 교토의정서가 종료되는 2020년 이후 새로운 기후체제를 출범시키기 위한 합의문을 도출하면서 우리나라를 포함한 196개의 국가가 참여하는 파리기후협약으로 체결되어 2021년 1월부터 발효되었다(표 1). 파리기후협약은 대부분의 국가가 5년마다 목표를 상향하면서 온실가스 감축을 이행해야 하며, 어길 경우 벌금 부과 등 강제력이 있어, 회원국들은 온실가스 배출 규제 및 친환경 에너지 도입 등 협약 이행을 위한 정책을 적극 추진 중이다[2].

표 1. 파리기후협약과 교토의정서 비교

구분	파리기후협약	교토의정서
채택	2015.12.12	1997.12.11
발효	2021. 1. 1	2005. 2.16
목표	산업화 전 대비 지구의 평균 온도를 +2℃ 이내로 유지	온실가스 감축목표치 제시 1차 : 1990년 대비 5.2% 감축 2차 : 1990년 대비 18% 감축
대상	참가국 만장일치 통과 온실가스배출 기준 87% 국가 참여	온실가스배출 기준 15% 국가 참여
기간	종료시점 없음	2012년까지(2020년으로 연장)

출처: 한국무역협회 전략시장연구실(2020.10)

2015년 체결된 파리기후협약 이후로 수소에너지가 미래에너지로 급부상하였다. 일본은 이미 2014년 수소사회로의 이행을 선언하고 2019년에는 단계적 수소전략을 수립 발표하였고, 중국은 2017년 연료전지자동차 발전 로드맵을 마련하였으며, 대한민국 정부는 온실가스 배출 규제 및 친환경에너지 도입 등 협약 이행의 방안으로 2020년 7월 ‘한국판 뉴딜 내 그린뉴딜계획’, 2020년 10월 ‘미래자동차확산 및 시장선점전략’을 발표하며 글로벌 기후협약에 대응하여 ‘탄소중립’ 사회를 지향점으로 전기차, 수소연료전지차 등 그린모빌리티의 확대를 추진하기로 했다(관계부처합동,2020). 그리고 세계 최초로 2020년에 ‘수소경제 육성 및 수소 안전관리에 관한 법률(이하 수소법)’을 제정하고 2022년 2월부터 시행하였다.

수소는 다른 에너지에 비해 쉽게 얻을 수 있고 배기가스를 발생시키지

않는 친환경성 에너지원이다. 정부는 수소경제 인프라 확대 목표를 2022년까지 수소연료전지차 8만1천대 보급과 수소충전소 310개 구축으로 세웠다. 그러나 2023년 6월 현재 전국에 등록된 수소연료전지차는 32,484대, 수소충전소는 169개소이다(한국수소산업협회). 수소연료전지차와 수소충전소 공급 계획에 따르면 대한민국은 2030년까지 수소연료전지차 63만대 보급계획과 수소충전소 520개소의 구축계획을 가지고 있다(표 2).

표 2. 수소연료전지차와 수소충전소 공급계획

	2025년		2030년	
	수소연료전지차	수소충전소	수소연료전지차	수소충전소
한국	3.2 만 (2023년)	169 (2023년)	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: 수소산업연감(한국수소산업협회.2020)

정부가 목표로 하는 수소경제 선도국가로 도약하기 위한 계획에 따라 수소연료전지차 보급을 확대하기 위해 선행되어야 하는 것은 수소충전소 구축이다. 그러나 수소충전소 구축은 정부의 계획보다 계속 지체되고 있다. 그 원인은 여러 가지가 있으나, 그 중 대표적인 것으로 비용문제, 장소문제, 안전성문제 등이 있다.

수소충전소의 안전성 확보에 관한 선행연구는 수소충전소 전주기(Life Cycle)의 초기 단계인 태동기에 해당하는 연구에 집중되어 있다. 주로 수소충전소 설치 단계의 안전에 관한 연구, 수소의 화학적 특성을 중심으로 위험성을 평가하고 있다. 선행연구에는 정성적 혹은 정량적 위험성 평가기법을 적용한 연구가 다수이다.

1.2 연구목적

수소에너지는 궁극적으로 수소를 이용해 동력으로 전환함으로써 에너지원으로서의 화석연료를 수소로 대체하는 것이다. 도시의 과밀화와 교통의 발달은 생활 속의 이산화탄소 배출로 자동차에서 배출하는 매연을 통해 일반 시민들이 이산화탄소를 직접 경험하고, 그 폐해를 느끼게 됨으로써 이산화탄소 배출량을 감소시키는 노력이 시작되었다. 디젤 차량을 줄이고, 하이브리드 차량의 개발, 전기자동차의 보급에서 시작한 자동차 매연 배출저감 노력은 수소차(수소연료전지 자동차, 수소연료자동차)의 개발과 보급으로 이어졌다[3].

2022년 2월 러시아가 우크라이나를 침공하면서 발발한 전쟁은 유가의 폭등을 가져왔으며, 또한 최근 각 나라의 환경문제 해결방안 중 일부분으로 수소자동차와 수소충전소의 확대정책이 사회적 관심으로 부상하고 있다. 우리나라는 국가차원으로는 처음으로 2020년 ‘수소법’을 제정하였다. 이는 수소경제의 육성과 수소의 안전관리를 최우선 관심사항으로 표현한 것이라 해석할 수 있다. 수소에너지 경쟁력을 갖추기 위해서 수소생산 및 이송, 공급과 관련된 인프라 구축이 시급하다. 해당지역 민원 대응을 포함한 수소공급 인프라 구축의 빠른 시행을 위해 2021년 7월 이후부터는 환경부가 수

소충전소의 설치계획 승인 등 인·허가권을 행사하고 있으며, 수소 차량 사용자의 편의성 제고를 위해 수소충전소의 보급 확대를 위한 정책들을 실천하고 있다. 수소충전소의 안전에 관한 연구와 정책적 노력이 필요한 이유이다.

본 연구는 안정기 또는 성장기에 해당하는 수소충전소의 운영 중에 발생 가능한 가동중단 사태에 대한 위험성평가를 통해 운영안전성 강화 방안을 연구한다. 이를 위해 기존의 위험성 평가기법이 아닌 STPA 위험분석 및 재해경감활동 위험평가, 처리과정을 적용한다. 본 연구의 목적은 수소충전소의 구축 활성화를 위한 여러 방안 중 수소충전소의 운영안전성 강화 방안을 찾는 것이다.

1.3 연구내용

연구의 흐름은 우선 최근 많은 변화가 있는 수소산업 정책 동향을 조사하고, 수소충전소에 대한 전반적인 현황과 현재 운영 중인 수소충전소의 가동중단 사례를 파악한다. 그리고 수소충전소의 안전성을 이론적 관점에서 확인한다. 발표된 논문을 바탕으로 수소충전소에 대한 위험성평가 및 안전성 향상을 위한 선행연구를 고찰한다. 수소충전소의 가동 중단 사례를 바탕으로 위험요인을 파악한다. 도출한 위험요인을 STPA 위험분석과 재해경감활동에 적용하여 그 결과를 기존 위험성평가 결과와 비교한다. 수소충전소의 사고(손실)를 예방하고 수소충전소의 안전을 강화하기 위한 방안을 탐구한다.

연구의 흐름을 정리하면 그림 1과 같다.

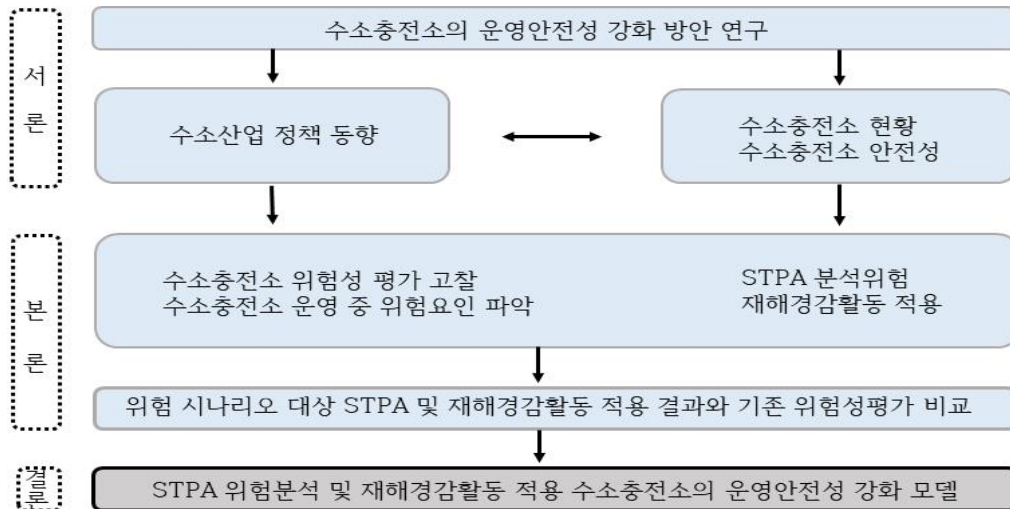


그림 1. 연구의 흐름

수소 및 수소모빌리티

수소는 기체 중에서 확산속도가 가장 빠르다. 그러나 밀도는 최소이다. 독성이 없는 가연성 가스이며, 색이 없고 냄새가 없어 누출을 즉시 확인하기가 매우 어렵다. 수소가 누출되어 확산되거나 좁은 공간에 집결되어 있으면 폭발이 일어나기도 하여 취급하기가 상당히 까다로운 물질이다. 실온에서 냄새와 색은 공기와 차이를 못 느끼고, 수소는 화재나 폭발에 필요한 발화에너지는 낮지만 화염 속도는 빨라 다른 연료보다 연소범위와 폭발범위가 넓다. 이러한 수소의 특성만으로 판단하면 수소의 폭발이나 화재의 위험성은 다른 화석연료에 비해 매우 크다[3].

(표 3)에서 수소모빌리티는 자동차, 대중교통, 수소충전소로 구분하고 대중교통은 수소택시, 수소버스, 수소트럭으로 나누고 있다. 이 외에 열차, 선박 및 드론 등 기계(건설용 장비)가 있다.

표 3. 수소모빌리티 정리

구분		목표
수소모빌리티	자동차	▪ 승용차 - 2018년 1만8천대, 2040년 620만대 - 2025년까지 연간 10만대 생산체제 구축
	대중교통	▪ 수소택시 - 2040년 8만대 (2019년 시범사업, 2040년 8만대)
		▪ 수소버스 - 2040년 4만대 (2019년 35대, 2040년 4만대)
		▪ 수소트럭 - 2040년 3만대 (2020년 개발실증, 2040년 3만대)
	수소충전소	▪ 2018년 14개, 2022년 310개, 2040년 1,200개 (각종 규제 완화를 통해 도심지 중심, 공공청사 등 주요 거점에 구축)

출처: 수소경제활성화로드맵(산업통상자원부, 2019년)

수소충전소의 안전 관련 선행연구 고찰

수소충전소 설치와 관련하여 현재 실시되고 있는 위험성 평가기준을 선행연구를 통해 확인하고 운영 중 발생 가능한 위험에 대한 평가 기준 및 시스템 오류 발생 가능성에 대하여 알아본다. 각 장비(Unit)에 포함된 부품과 소재, 설비장치, 운전장치, 안전장치, 그리고 사고에 대비한 방호장치 등에 대한 위험도 분석 및 안전강화 방안에 관하여는 선행연구 결과를 참고한다.

STPA

ICT가 발전함에 따라 EUC¹⁾ 장비와 부품들이 E/EE/PE²⁾로 진화한다. 이로 인해 시스템들의 기능과 구성이 복잡해지고, 사고의 발생 원인이 단일 장비나 부품 등 한 가지에 국한되는 경우보다는 여러 복합적 요인에 의한 사고발생 가능성이 많아진다.

2012년 MIT 대학 Nancy G. Leveson 교수는 시스템이론에 기반하여 사고발생의 다양한 원인을 고려한 새로운 관점의 STPA(System-Theoretic Process Analysis) 위험분석을 개발했다. 이 위험분석은 시스템의 하드웨어나 소프트웨어와 사람, 정책, 환경 등 외부 요소들을 포함하여 위험을 정의하고 분석할 수 있다[3].

재해경감활동

재해경감활동은 업무연속성 관리체계와 동일한 위상이다. 과학 기술 발전과 관련된 상품 및 서비스 시장에서의 경쟁이 심화됨에 따라 조직은 사고 또는 실패에 대하여 사전에 결정된 수준에서 비즈니스 활동을 계속할 수 있을 뿐 아니라 치명적인 사고가 발생했을 때에도 정상적인 활동으로 완전히 회복하기 위한 복구 목표를 미리 준비하여야 한다[52].

최근 세계적으로 빈번한 재난발생 상황에서, 위기에 대처하고 재난으로 인해 발생하는 피해를 스스로 빠른 시간 내에 복구하여 핵심 업무가 지속될 수 있도록 관리하는 능력의 중요성이 강조되고 있다[4].

1) EUC (Equipment Under Control)

2) E/EE/PE (Electrical/Electronic/Programmable Electronic)

II. 수소충전소

2.1 수소산업 정책동향

파리기후협약이 이전보다 훨씬 강력하게 온실가스 배출을 규제하도록 2021년 1월1일부터 발효되었다. 수소는 에너지로서 효율이 높고 배기가스를 발생시키지 않아 미래의 에너지원으로서 잠재력이 크다. 또한 친환경 에너지원으로서 수소로 인한 새로운 시장과 많은 일자리를 창출해 줄 수 있다는 점에서 각 국 정부는 수소산업 계획을 계속적으로 발표하고 있다. 미국 에너지부는 2022년 청정수소 생산표준(CHPS)³⁾ 지침초안에 청정수소에 대한 명확한 기준과 인센티브 제공을 밝혔다. 지침에 의하면 청정수소의 정의를 $4.0\text{kg CO}_2\text{e/kg H}_2$ 로 제안하였다[53]. 이는 수소 1.0kg 생산에 온실가스배출 4.0kg 이하 배출을 의미하며, 현재 우리나라도 산업통상자원부가 2023년 4월에 동일한 기준 적용을 발표했다.

2.1.1 주요국의 수소관련 정책동향⁴⁾

한국

2019년 1월 수소경제 활성화 로드맵을 발표하고 ‘수소차’와 ‘연료전지’를 양대 축으로 수소경제를 선도할 수 있는 산업생태계를 구축하여 2040년 수소차 누적생산량을 620만대로 확대하여 세계시장 점유율 1위 달성을 목표로 하고, 수소충전소는 1,200개 구축을 목표로 한다.

3) CHPS (Clean Hydrogen Production Standard)

4) 정귀일(2020). ITT TRADE FOCUS, 1-26, 5-11

유럽

유럽연합(EU)은 2020년 7월 ‘수소 로드맵’을 발표하였다. EU는 기후 중립 강화를 위해 미래 에너지시스템과 클린수소 계획을 수립하여, 일부 EU 국가가 추진하던 수소전략을 유럽차원으로 확대한다는 계획이다.

일본

후쿠시마 원전사고 이후 수소를 미래 에너지원으로 지목하였다. 우선 수소의 이용을 확대하고 이후 점차적으로 발전 및 공급시스템을 마련하는 전략을 채택하였다. 1단계부터 3단계까지 단계별로 수소차와 가정용 연료전지의 보급을 확대하고 수소발전과 수소공급시스템을 확립하여 최종적으로는 이산화탄소의 배출이 없는 수소공급시스템을 완성시키는 전략이다.

중국

중국은 2018년 2.7%인 수소에너지 비중을 2025년까지 4%, 2035년에는 5.9%로 그리고 2050년 까지는 10%까지 확대할 예정이다. 계획대로라면 2050년 수소전기차 판매량은 500만대, 수소충전소 설치는 1만개에 달할 예정이다.

2.1.2 수소관련 정책 추진경과

한국의 수소관련 정책 추진경과를 살펴보면 ‘수소경제 원년’을 2005년에 선포하면서 ‘친환경 수소경제 구현을 위한 마스터플랜’을 수소차와 연료전지개발 로드맵 성격으로 발표하였다. 2018년 8월 혁신성장 전략투자방향으로서 수소경제를 선정하여 관련 로드맵 마련을 결정하고, 2019년 1월 ‘수소경제 활성화 로드맵’에서 수소와 관련한 기술과 인프라에 대한 중장기적인

계획을 제시하였다. 2019년 4월에는 ‘수소경제 표준화 로드맵’을 10월에는 세계 수소시장의 국제표준 선점을 목표로 ‘수소 기술개발 로드맵’을 발표하여 국제표준화 제안 시스템 구축, 수소제품의 서비스품질 · 안전 확보, 수소의 생산, 저장 · 운송, 활용, 안전 · 환경 인프라 분야에서 세계 최고 수준의 기술력 확보 목표와 추진전략을 제시하였다. 2019년 9월 수소시범도시 사업을 발표하고, 당해 12월 울산, 안산, 완주 · 전주를 수소시범도시로 선정하였으며 삼척을 수소 R&D 실증단지로 선정하였다. 2019년 10월에는 ‘수소인프라 충전소 구축방안’을, 12월에는 수소생산시설, 수소충전소, 연료전지 시설의 안전관리를 위한 대책 수립을 위해 ‘수소안전관리 종합대책’을 발표하였다. 2020년 7월 ‘한국판 뉴딜정책’에서는 그린뉴딜사업으로서 수소차 및 관련 인프라 구축사업을 제시하였다[5].

2.1.3 수소충전소 안전관리

정부는 수소산업 초기 핵심설비인 수소충전소 안전관리를 위해 설계단계에서 안전영향평가, 시공단계에서 밸브인증제 도입, 그리고 운영단계에서 실시간 모니터링 실시 등 단계별 안전관리를 강화하였다. 최근에는 기존안전관리 대책이 수소충전소 및 연료전지 중심으로, 청정수소 생산, 수소발전, 액화수소 등 안전관리의 범위를 확대할 필요성이 있어 산업통상자원부는 2023년 5월 ‘수소안전관리 로드맵 2.0’을 발표하였다. 내용 중 수소모빌리티, 수소충전소 관련내용 일부를 요약하면 다음과 같다.

수소안전관리 로드맵 2.0[6]

1) 자동차 외 수소모빌리티도 수소충전소에서 충전(2024년)

현재 수소자동차 외 수소모빌리티(지게차, 트램, 열차, 건설기계, 선박

등)는 안전성이 검증되지 않아 수소충전소에서 충전이 불가하다. 그러나 실증을 통해 안전성 여부를 검증하고 충전 규격에 따른 안전조치 준수 등 안전기준 개발 및 적용 예정이다.

2) 수소버스 등 상용차용 액화수소충전소 안전기준 개발(2024년)

액화수소는 그간 국내 사용사례가 없어 액화수소 충전소 시설 구축에 필요한 안전기준 부재로 충전소 구축이 불가하다. 그러나 상용차용 액화수소 보급을 위해 안전성 검증 및 안전기준 개발 예정으로 대용량 저장·충전이 가능한 액화수소 충전소 구축의 활성화가 기대된다.

3) 액화수소 운송차량 제조 및 안전기준 개발(2024년), 액화수소 자동차 및 선박 충전시스템 안전기준 개발(2025년)

현재까지 국내 액화수소 사용사례가 없어 액화수소 운송차량(탱크로리, 탱크트레일러)에 대한 안전기준 부재로 제조, 운행 불가하나 국내 환경에 맞는 액화수소 운송차량 제조 및 안전기준을 마련 중이며, 국내 기업들은 자동차와 선박에 액화수소를 기화시키지 않고 직접 충전하는 시스템을 개발 중이다. 이에 대한 안전기준도 개발 예정이다.

4) 액화수소 이·충전 장치 및 안전기준 개발(2027년)

액화수소 이·충전 작업 시 가스누출 및 화상 등 사고예방을 위해 장치의 국산화 및 안전기준 개발이 필요하여, 이·충전 중 발생된 잔가스 방출 위험성 평가, 시뮬레이션 기술 개발 및 유지관리 가이드라인을 개발 예정이다.

5) 수소충전소 안전관리자 근무범위 명확화(2023년)

수소충전소는 안전관리자를 선임하여야 한다. 그러나 안전관리자의 근무시간 등 근무범위가 불분명하여 충전소 운영에 애로가 많다. 수소충전소의 편의성 등을 고려하여 휴가, 질병 외 충전소 연장운영 시에도 안전관리자 직무대행자 지정이 가능하도록 안전관리자 근무범위 명확화

가 필요하다.

6) 수소충전소(기체수소, 액화수소) 셀프충전 도입(2024년)

국내 수소충전소는 미국이나 일본 등 외국과는 다르게 운전자의 직접충전을 금지하고 있다. 그러나 안전성을 검증하고 셀프충전용 안전장치를 추가로 설치하는 조건으로 운전자 셀프 충전을 도입 계획이다.

7) 도심형 수소충전소 안전거리 완화(2023년)

수소충전소는 사고 시 피해 저감을 위해 주택 등 주변 보호시설과 안전거리(12~32m)를 의무적으로 확보해야 한다. 이로 인해 도심 내 필요한 부지확보가 어려워 수소충전소 보급 확대의 걸림돌로 작용하고 있다. 이를 사업자가 방호벽을 설치하고, 추가적인 안전장치를 설치하면 안전거리를 확보한 것으로 인정하는 '도심형 수소충전소' 안전기준을 개발하여 적용할 계획이다.

8) 수소충전소 방호벽 유형 다양화(2025년)

수소충전소 충전소 밖의 보호시설 보호를 위한 방호벽의 경우 특정유형(철근콘크리트제)의 방호벽만 허용된다. 이를 연구개발을 통해 철근콘크리트제 방호벽과 동등한 방호능력이 검증되는 경우, 강판제 등 다양한 유형의 방호벽 설치를 허용하도록 개선예정이다. 이를 통해 동일한 안전성 확보를 전제로 수소충전소 구축비용 및 기간 단축을 기대한다.

9) 수소충전소 수소충전 국제규격 준수 의무화(2023년)

수소충전 국제규격(SAE J2601)⁵⁾은 수소충전소의 안전성 확보를 위한 핵심적인 충전기준으로, 규격 준수여부 검증이 필요하다. 국제충전규격 준수여부를 검사기관이 검사하도록 법령을 개정한다.

10) 한국형 수소충전소 안전관리 시스템 개발(2023년)

수소충전소 보급 초기단계로 ISO 등 국제기준과 동등한 수준으로 안

5) 수소차에 수소충전시 급격한 수소온도 상승으로 인한 용기파열 등을 예방하기 위한 미국자동차공학회(SAE)가 개발한 수소충전 조건

전관리 중이나, 국내 운영상황을 고려한 안전기준 및 시스템 개발이 필요하다. 상설점검과 한국가스안전공사에서 시행하는 실시간 모니터링 등을 통해 축적된 수소충전소의 안전과 관련된 데이터를 기반으로 한국형 수소충전소 안전관리 기준과 시스템 마련을 계획한다.

이처럼 정부는 ‘국민은 안전하게, 기업은 자유롭게, 수소를 사용하는 수소산업 선도국가’라는 비전을 가지고 신산업특성을 고려한 다양한 규제혁신과 수소시설 안전관리 등을 통한 수소사고 제로에 도전하는 목표를 가지고 있다. 이에 수소산업 전반 중 비록 일부이지만 수소충전소의 운영안전성 강화 방안에 대한 연구가 필요한 시기임을 최근 수소산업 정책동향을 통해 알 수 있다.

2.2 수소충전소 구분 및 구성

수소충전소는 일정한 자격을 갖춘 장소와 일정한 요건을 갖춘 시설을 통해 생산된 수소를 충전이 가능하도록 허가 받은 곳으로 정의한다. 수소충전소는 수소연료전지차를 비롯한 수소모빌리티의 확대를 위한 핵심 시설로 이용편의성, 저장 및 충전의 안전성, 공급의 효율성 등을 고려해야 한다.

수소차 이용자는 수소충전의 효율성, 충전기 작동에 대한 신뢰성, 주요 도심지로부터의 접근 편의성을 통해 효율과 만족도를 높여야 한다. 또한 수소를 저장해 두는 충전소의 경우 저장 및 충전시 안전성이 확보되어야 한다. 그리고 충전비용의 절감을 위해 생산시설의 위치와 공급망의 효율성에 대한 고려가 필요하다. 정부는 수소충전소의 안전과 이용편의성을 높이고, 적절한 시기와 장소에 적절한 수의 수소충전소를 구축해야 한다.

수소충전소 운영자는 수익성이 확보되어야 한다. 적절한 수익성이 확보되지 않으면 민간의 수소충전소 운영 참여가 현저하게 줄어들 가능성이 있기 때문이다[7].

세계적으로는 1,070개 이상의 수소충전소가 운영되고 있으며 그 중 최근 2년 내 구축된 것이 50% 이상이다. 특히 수소충전소 구축의 속도가 아시아 시장에서 빨라지고 있고 중국, 일본, 한국 등이 큰 시장을 형성하고 있다. 다만 승용차 중심의 하루 500kg미만 충전용량의 소규모충전소가 구축되고 있어 향후 중대형 트럭 및 상용차 충전이 가능한 10배 이상의 대용량 수소충전소 구축이 필요하다는 지적이 있다[54].

수소충전소를 수소의 공급방식으로 구분하면 On-Site방식과 Off-Site 방식이 있다. On-Site방식은 수소 추출기 또는 수전해장치 등을 이용하여 수소를 생산·공급받아 충전하는 방식이고, Off-Site방식은 생산된 수소를 튜브트레일러 차량을 이용하여 수소를 공급받아 충전하는 방식이다. 그리고 수소충전소를 구성 방식에 따라서 모든 장치가 방호된 건물이나 캐노피 아래 설치된 일반 수소충전소, 충전에 필요한 설비를 하나의 보호함에 장착한 패키지형 수소충전소, 그리고 구동 가능한 대형차량에 모든 장비가 설치되어 있는 이동형 수소충전소로 구분할 수 있다[8].

그림 2는 수소충전소의 수소공급 방식에 따른 수소충전소 구분으로 On-Site방식은 천연가스로부터 수소를 추출하거나(개질형), 물을 전기 분해하여(수전해형) 수소를 얻는다. 이중 수전해방식은 탄소배출이 없고, 전기만 공급되면 수소생산이 언제나 가능해 진정한 친환경 방식으로 주목받고 있다. Off-Site의 경우 일부는 파이프라인을 이용하여 수소를 공급받으

나 대부분 튜브트레일러를 통해 필요한 수소를 공급받는다. 현재 국내 대부분의 수소충전소는 수소생산시설의 제약으로 Off-Site 방식이다.

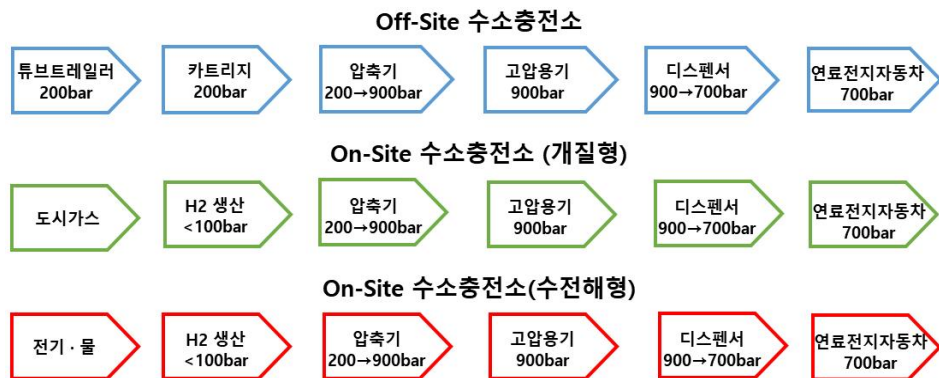


그림 2. 수소공급 방식에 따른 수소충전소 구분

출처: [네이버 지식백과] 수소충전소(에너지 지식정보, 한국에너지정보 문화재단)
<https://blog.naver.com/energyinfoplaza>,

표 4는 수소 공급방식에 따른 수소충전소 비교이다. 수소의 공급방법에 따라 구분되며 각각의 장점과 특징을 설명한다.

표 4. 수소 공급방식에 따른 수소충전소 비교

	On-Site 수소충전소	Off-Site 수소충전소
생산	O	X
장점	운송(파이프라인)비용 절감	위치(지역)제약 없음
특 례	융합성	복합형 및 패키지, 이동식
	설비 범용성 저하	운송비 부담
특징	사용자 편의성 제한적	별도 저장 공간 확보
	생산량>저장량	운용 경제성

그림 3은 이동식 수소충전소이다. 이동식수소충전소는 수소를 연료로 사

용하는 자동차에 수소를 충전하기 위하여 필요한 설비가 차량에 장착되어 있어 이동이 가능한 것으로서 처리능력이 30m³ 이상인 것으로 정의되어 있다. 2018.10.1 산업부 고시 제2018-179호 특례기준에서 정의한 이동식 수소충전소의 형태는 구동이 가능한 차량에 수소충전과 관련된 설비인 압축기(Compressor), 냉각기(Chiller), 고압용기(High Pressure Tank), 충전기(Dispenser) 등을 구비하여 이동이 가능한 수소충전소를 의미한다. 수소충전소의 저변확대를 위해서 필요한 시설이다.

다만 이동이 가능하다는 특성이 있어 예상할 수 없는 도로 및 환경 여건 등이 안전의 위험요소로 작용할 수도 있고, 초고압 수소가스가 밀폐된 공간에서 누출 발생 시 대형 화재 및 폭발사고로 이어질 수 있어 안전성 확보를 위한 위험요소 분석 등이 필요하다.

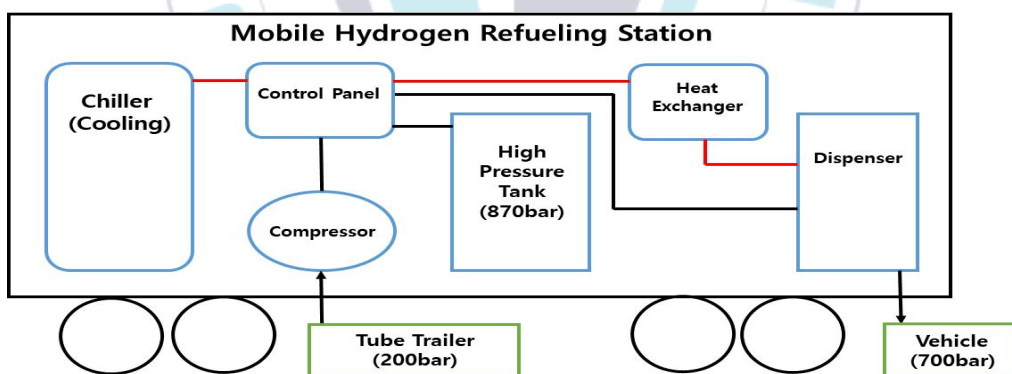


그림 3. 이동식 수소충전소(산업부고시 제2018-179호, 2018.10.1)

그림 4는 패키지형 수소충전소 프로세스로 수소자동차의 충전에 필요한 설비를 하나의 보호함에 장착한 충전시설을 일정한 장소에 배치하고 수소를 연료로 사용하는 자동차에 압축 수소를 충전하는 것을 말한다.

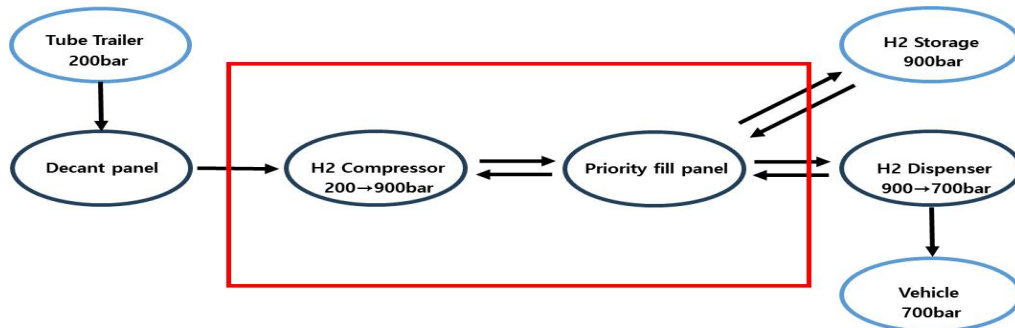


그림 4. 패키지형 수소충전소 프로세스

수소충전소의 운영 현안 해결을 위하여 기존 건설되던 수소충전소뿐 아니라 다른 형태의 수소충전소가 구축되어야 한다는 주장이 제기되고 있다. 기존 주유소, LPG주유소 등에 수소충전소를 복합 구축하는 융복합수소충전소, 액화수소충전소가 대표적이다. 융복합수소충전소의 경우 기존 주유소 등의 부지에 수소충전기기가 들어가는 것이기 때문에 부지확보 등의 어려움을 겪지 않아도 되고, 수소뿐 아니라 다른 연료도 판매하기 때문에 운영 사업자의 이익 창출이 용이하다는 장점이 있다. 환경부는 수도권의 수소충전 여건을 개선하고자 부지확보와 구축을 위해 노력 중으로 기존 LPG충전소를 수소복합충전소로 전환하기 위한 업무협약을 관련 업체들과 체결하고 있다. 2025년까지 구축사업 추진중인 복합수소충전소는 66개소이다[9].

수소는 -252.8°C 의 극저온까지 냉각하면 액화된다. 액체 수소는 표준상태의 수소가스 밀도의 800배인 $71\text{kg}/\text{m}^3$ 으로 현재 검토되고 있는 70MPa의 압축수소 가스보다 체적충전율이 높다. 체적 당 에너지 밀도로 비교해도 압축수소의 약 4~5배의 에너지 밀도를 갖는다. 액체수소는 소형으로 질량 에너지 밀도가 큰 다른 수소저장 방법보다 운송과 저장 측면에서 우수하다. 기체수소는 20MPa 이상의 고압으로 저장하지만 액체수소는 대기압으

로 저장하기 때문에 기체수소보다는 안전성 측면에서 우수하고, 저장 및 운송비용을 고려할 때 경제적 측면에서도 기체수소보다 유리하다[8]. 액화 수소충전소는 2023년 이후 14개소의 가동계획은 있으나 액화수소저장탱크, 액화수소펌프(700bar), 기화기 및 열교환기 등을 추가 설치해야 한다[9].

수소충전소의 수소 공급 장치는 천연가스 개질장치 또는 물을 전기분해하는 수전해장치를 이용하여 On-Site에서 생산하거나 파이프라인, 튜브트레일러 등을 이용하여 On-Site에서 생산한 수소를 이송 받아 공급하는 장치이다. 압축장치는 다이어프램이나 부스터를 이용하여 저압의 가스를 고압으로 압축하는 장치이다. 저장장치는 압축된 수소를 대용량의 고압용기에 저장하는 시스템이며 운전장치는 각 장치를 연결하는 고압밸브, 배관, 센서 및 통합제어 장치로 구성되어 있다[10]. 그림 5는 수소충전소 매커니즘이다. 튜브트레일러를 통해 운송된 수소를 수소충전소 내부에 공급(180~200bar)하고, 공급된 수소는 870bar의 압력으로 승압된 후 Priority panel의 제어로부터 축압기 또는 버퍼탱크에 저장된다. 저장되는 압력에 따라 고압저장탱크(870bar)와 저압저장탱크(480bar)에 분기하여 저장된다. 승압되어 저장된 수소는 870bar에서 700bar로 감압하여 Dispenser인 수소충전기를 통해 수소연료전지차에 주입된다.

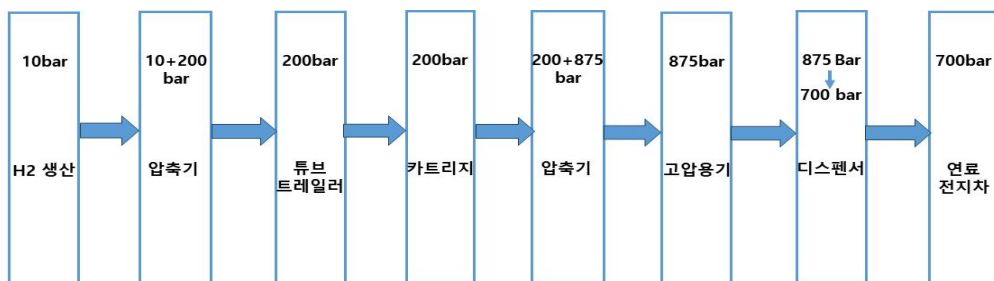


그림 5. 수소충전소 운영 매커니즘

2.2.1 수소연료전지차

수소연료전지차는 수소가 공기 중에 있는 산소와 반응해서 차량 내에서 전기를 생산하고 그 에너지로 구동하는 자동차이다. 따라서 수소연료전지차는 물 이외의 배출 가스는 발생하지 않는다. 수소연료전지 스택이 효율적으로 작동하기 위해 청정한 공기가 필요하므로 차가 달리는 동안 주변 공기를 빨아들이고 정화하여 수소연료전지에 사용한 후 다시 배기구로 깨끗한 공기를 내보내게 된다. 따라서 주변공기를 정화시키는 기능을 수행한다.

수소연료차와 내연기관자동차의 비교는 표 5와 같다.

표 5. 수소연료차, 내연기관자동차 비교

	수소연료차	내연기관 자동차
동력원	내연기관	내연기관
연료	수소연료	화석연료
구동과정	수소연료 -내연기관(엔진)구동	화석연료 -내연기관(엔진)구동
배기가스	미배출	COx, NOx, SOx 등
연비	95.9km/kg	12km/L
연료판매가격	9,726원/kg('23.7월 평균)	1,788원/L('23.10월,가솔린)
내구성	16만 km	20~25만 km

출처: 산업통상자원부 보도자료(2019년)

2.2.2 수소충전소 현황

국내 수소연료전지차 보급은 정부의 구매 보조금 지원 등에 힘입어 2023년 6월말 현재 전국의 등록된 차는 32,484대이다. 이에 반해 수소충전소는 169개소 가동 중으로 수소충전소 분담률은 평균 약 193대이다. 수소충전소당 수소소요량은 연간 약 29톤, 수소충전소당 1일 수소 충전량은 약 80kg으로 1일 평균 승용차 기준 13대이다.

2018년 2월 평창동계올림픽을 기점으로 주행거리가 이전보다 늘고 가격도 저렴해진 수소연료전지차가 시범운행을 거쳐 3월 출시된 이후 잠시나마 구매 수요가 증가했지만 수소충전소 인프라가 받쳐주지 못해 구매를 미루게 되고, 구매를 해도 충전소 부족으로 충전소를 이용하기 위해 먼 거리를 찾아야 하는 불편함이 매우 컸다. 2019년부터 2020년 상반기까지 수소 시내버스 시범사업 결과를 토대로 2021년부터 수소버스가 보급되기 시작했고, 수소화물차 시범사업 진행을 시작으로 향후 상용차로 수소차 보급이 확산될 전망이어서 수소충전소 인프라 확대가 시급한 과제가 되었다.

정부는 2019년 10월 경제성·편의성·안전성에 초점을 맞춘 ‘수소인프라 및 충전소 구축방안’을 발표하고 전국 주요도시와 고속도로에 우선 2022년 누적 310기, 2030년 누적 660기, 2040년 누적 1,200기의 수소충전소 구축 계획을 밝혔다. 로드맵에는 수소충전소의 조기 구축 및 경제성 확보를 위해 설치보조금 지원, 준주거·상업시설 내 수소충전소 허용 등 충전소 설치 관련 규제완화, 용·복합충전소(LPG, CNG, 수소) 및 이동형 충전소 설치 허용 등 다양한 제도개선과 함께 압축기·고압밸브·저장용기 등의 핵심부품 및 충전기술 국산화 개발 지원계획을 담았다[11].

정부는 수소충전소 구축 확대를 위하여 여러 방안을 추진하고, 수소충전소 특수목적법인 수소에너지네트워크를 중심으로 민간투자도 이루어졌지만 2023년 6월 현재 169기를 구축하여 2022년까지 누적 310기 확충이라는 목표는 달성하지 못했다.

2.2.3 수소충전소의 사고 및 운영중단

2020년 기준으로 최근 10년간 국내의 가스관련 사고(1,248건) 중 수소의 사고(17건)는 전체의 1.36%에 해당하며, 고압가스 사고 중 수소의 사고 비중은 12.48%이다[12]. 수소충전소의 경우 고압의 수소를 이송, 저장하고 충전하므로 압축된 가스가 누출될 때 작은 공간을 통하여 확산하는 제트누출의 형태를 가지게 되고, 정전기에 의하여 쉽게 점화되어 제트화재를 형성하는 것으로 알려져 있다. 수소의 저장압력에 비례해서 누출속도가 음속까지 증가한다. 따라서 사고주변 시설은 제트화재의 복사열 또는 직접화염에 접촉하여 사고가 확대되는 2차 사고 위험이 있다[13].

2020년 상반기에는 하루 9시간가량 수소충전소의 가동이 중단된 것으로 파악됐다. 표 6은 주요 수소충전소 가동중단시간 현황으로, 상반기 중에는 전국 수소충전소에서 156건의 고장이 발생하여 가동중단 시간은 무려 1,585시간이다[14]. 고장 건수는 국회충전소 18건, 부산대도충전소 19건, 대전학하충전소 13건, 충남내포충전소 11건 등이다.

2020년 10월 기준으로 수소충전소 10곳, 2022년 5월 기준으로 2곳이 가동 중단 상태이다. 2022년 6월에는 화물연대 파업으로 인해 수소충전소의 운송·공급문제가 확대되어 수소충전소 22곳이 가동을 중단한 적도 있었다.

표 6. 주요 수소충전소 가동중단 현황 (2020.1~6)

수소충전소 명	가동 중단 시간
안성충전소	463시간
광주동곡충전소	324시간
창원성주충전소	159시간
국회충전소	75시간

출처: dodam@gasnews.com, 2020.10. 7.

표 7은 고속도로 휴게소에서 운영하는 수소충전소 가동중단 건수로 2019년부터 2021년 8월말까지 12곳 중 1곳 정도는 한 달에 한 번 고장으로 인하여 가동을 중단하고 있는 것으로 확인되었다. 주요 고장원인은 압축기와 냉각기 이상 등이며, 수리까지는 상당한 시일이 소요되었다[15]. 안성휴게소는 9일, 언양휴게소는 5일, 춘천휴게소는 4일간 중단되었다. 참고로 연구자의 운영자 면담에 의하면 부산대도수소충전소는 기기 2개중 1기는 고장으로 2달간 가동을 중지한 적도 있다고 했다.

표 7. 고속도로휴게소 수소충전소의 가동중단 건수(2019~2021.8)

연 도	가동 중단 건수
2019년	61건
2020년	87건
2021년 8월	73건

출처: soon9@donga.com, 2020.10.19.

표 8과 같이 수소충전소의 장비 및 부속기기에 대한 국산화율은 30% 초반에서 50%초반 수준이지만 실제 수소충전소 구축시 국산화 적용율은 30% 미만이라 한다. 핵심부품이라 할 수 있는 압축, 충전부품의 경우 국산 장비의 신뢰성에 대한 실증자료가 부족하여 해외제품이 선호되고 있다[16].

표 8. 국내 수소충전소 장비 및 부속기기 국산화율

구분	국산화 부품 현황
250kg/일급 수소충전소(승용)	약 53% (국내압축기 적용시) 약 33% (해외압축기 적용시)
500kg/일급 수소충전소(버스)	약 28%

출처: 수소개발 로드맵(2019)

표 6과 표 7의 운영중단 사례와는 달리 최근에는 수소공급가의 인상으로 인한 운영 중단 사례가 늘고 있다. 국내 수소유통기업이 산업가스 충전소에 수소공급가격을 한번에 100% 올리겠다고 통보하여 충전소 입장에서는 매우 어려운 현실에 직면하고 있다고 한다. 이러한 대폭적인 가격인상에 대해 석유화학의 침체로 부생수소 생산이 줄어든 반면 정유사, 반도체생산기업의 수소 수요가 늘어나면서 갑자기 가격이 상승했다. 그리고 수소 공급에 필요한 튜브트레이일러 관련 비용도 상승한 이유라 설명하고 있다. 이러한 수소 공급가격의 인상은 이용 소비가격 인상으로 충전소와 운전자의 갈등이 심화되고 있다. 충전소의 수소판매가격은 2022년 12월부터 계속해서 오름세를 보이고 있어 kg당 9,900원으로 오른 이후 최근 12,400원에 판매하는 충전소도 있다. 반면 지자체가 자체적으로 운영하는 충전소는 7,700원에 판매하는 곳도 있어 가격차이가 많이 난다. 지역별, 충전소별 지나친 가격차이로 이용 소비자의 불만이 쌓일 수밖에 없는 구조이다.

2023년 7월 기준 수소충전소 평균 판매가격은 9,726원으로 기름세가 심상치 않다. 운전자들은 지나친 가격인상으로 수소차 구입에 대한 회의감이 늘어나고 있고, 반면 수소충전소 운영자는 현재의 가격으로 판매하면 적자가 늘어나 지속적인 운영이 어렵다는 것이다. 실제 2023년 5월까지 국내 수소차 판매량(2,633대)이 지난 해 같은 기간 4,022대 보다 34.5% 감소했다[17]. 수소충전소도 2022년 말 구축 목표인 310개소를 아직까지 달성하지 못하고 있다. 수소충전소 인프라 부족이 수소차 판매부진의 주요 원인이라는 분석이다. 즉 충전소 적자가 충전소 구축에 악영향을 미칠 뿐 아니라, 운영 중단 사태까지 초래하고 있다.

현재 수소충전소 설치시스템은 사업주가 장소를 확보하고 인·허가가 완료되면 충전소 구축비용은 정부가 지원한다. 그리고 수소충전소의 운영비용은 사업주가 부담하고 수소연료 구입비용의 일부는 정부가 보조한다. 그럼에도 불구하고 현재의 수소충전소 운영은 경제성이 떨어진다는 판단이다. 가장 큰 원인은 소비 수요가 적다는 것이다. 전기차에 비해 효율성은 높지만 소비자들은 여러 가지 이유로 수소연료전지차 구입을 아직은 주저하는 편이다. 그리고 수소충전소 구축 시 주변 주민들의 반대가 심해 도심 중심지에 설치가 어려워 대부분 변두리 외곽지역에 설치하다 보니 접근 편의성이 떨어지는 것도 소비자 불만 중 하나이다. 또한 시설설비나 주요부품 대부분을 수입품에 의존하고 있다. 이로 인해 고장 발생 시 빠른 복구를 위한 부품수급이나 A/S지원 등이 오래 걸려 그 동안은 가동중단 상태가 된다. 그리고 최근 사례로 보듯이 수소공급가 인상으로 인한 적자운영으로 더 이상 운영을 포기하고 중단하는 사태도 발생하고 있다. 아울러 새롭게 수소충전소 구축을 계획하고 있는 민간사업자들도 이러한 상황으로 인해 쉽게 사업결정을 못하고 있는 상황이다.

2.3 수소충전소 구축 절차

수소충전소는 연도별 계획에 따라 설치되어야 하지만, 몇 가지 문제점으로 인해 설치가 지연되고 있다. 가장 기본적으로 수소충전소의 시공기술력이 향상되어야 하고, 운영 현장의 안전성이 담보되어야 하는데, 설치 초기 단계이다 보니 현실적으로는 그렇지 못하다. 그림 6과 같이 수소충전소의 구축을 위해 소요되는 기간은 대체로 16개월 전후이다. 설비의 수입기간 단축을 위해 외산설비(디스펜서, 압축기, 저장용기)의 경우 제작 및 수급의 소요기간(6~10개월)이 필요하므로 조기 발주의 가능 여부를 검토하여 사전 발주를 시행하는 경우도 있다.

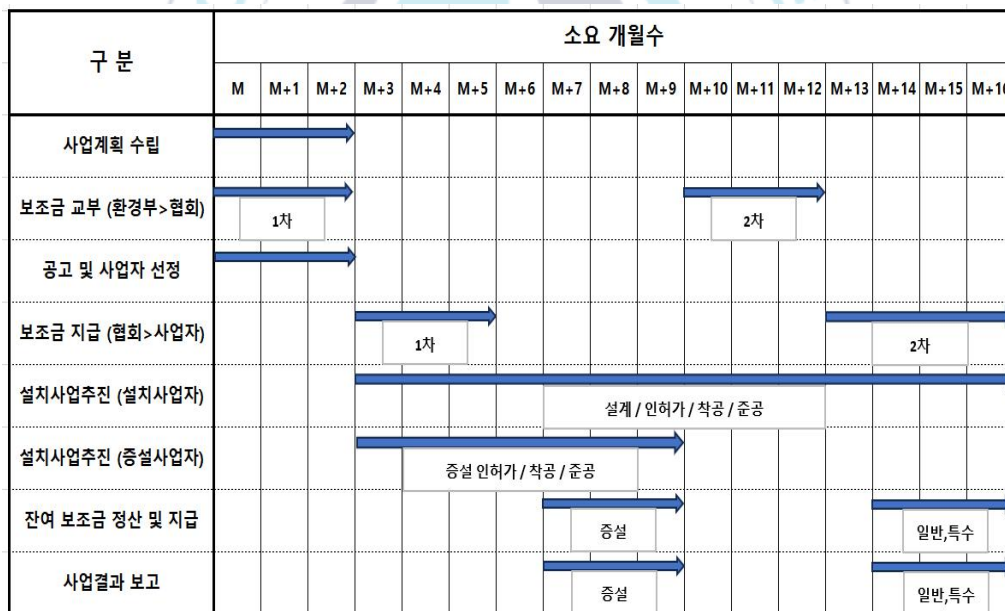


그림 6. 수소충전소 설치 민간보조 사업 일정

출처: 수소충전소 구축 · 운영 매뉴얼(환경부,2021)

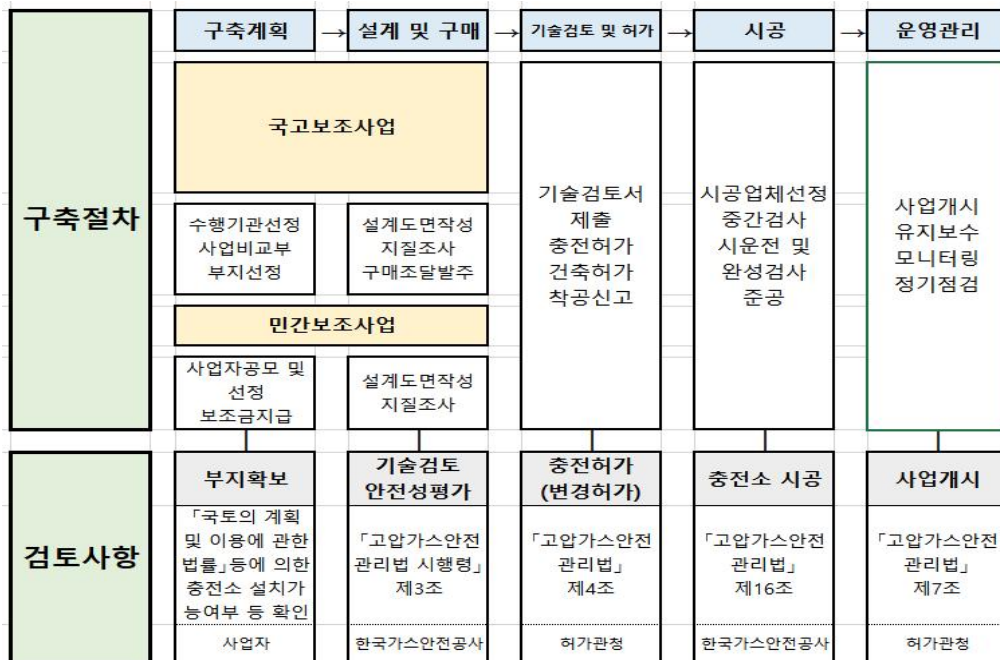


그림 7. 일반적인 수소충전소 설치 절차

출처: 수소충전소 구축·운영 매뉴얼(환경부, 2021)

그림 7과 같이 부지확보를 위한 입지심사 후, 설계단계의 기술검토와 안전성평가를 자체 심의, 결정하여 그 결과서(기술검토서)를 가스안전공사에 제출하여 평가를 받는 것으로 수소충전소 구축 사업이 시작된다.

수소충전소의 설치를 위한 인허가는 크게 건축, 가스, 전기 분야로 나눌 수 있다. 시공 전에 해야 할 건축분야의 규정은 해당 입지의 적정성 검토와 공사를 위한 가설건축물 축조 신고, 사업장폐기물 배출 신고, 건축도면을 포함한 건축허가 신청, 착공신고서 접수이다. 가스분야는 사업계획서와 기술검토서를 작성, 기술검토 신청서를 가스안전공사에 접수, 승인 받아야 한다. 이때, 규정에서 정한 기법으로 안전성평가를 해야 한다.

2.4 수소충전소의 안전성

2023년 7월 18일(현지시간) 캘리포니아 베이커스필드의 수소충전소에서 충전 중이던 수소버스에서 화재가 발생하여 고속도로 한 구간이 폐쇄되었다. 부상자는 보고되지 않았지만 충전 중이던 버스 차량 한 대가 폭발로 전소하고 디스펜서 일부가 파손된 것으로 나타났다[18].

우리나라는 2019년 5월 23일 강원도 강릉시 테크노파크 시험단지에서 실증 시험 수소저장탱크 4기가 폭발하여 2명이 사망하고 6명이 부상을 당하는 사고가 발생했다. 2022년 1월에는 서울소재 모 수소충전소에서 수소튜브트레일러가 충전소 측 노즐 연결 후 밸브 개방과정에서 수소가 누출되어 폭발하는 사고가 발생하였다. 이 사고로 2명이 부상을 입는 등 수소와 관련된 안전 사고가 빈발하고 있다. 그림 8은 수소충전소 설치와 관련된 각종 규정을 정리한 것이다.



그림 8. 수소충전소 설치와 관련된 규정

현재 우리나라 수소충전소의 안전관리 규정은 해외의 기준과 사고경험을 근거로 하여 안전기준을 설정하고 있다. 안전성 확보 목표, 그러나 지나치게 까다로운 규제로 인해 수소충전소의 설치가 어려운 것은 현실이다. 이런 현실적인 이유로 특례기준이 만들어지고 허가주관부서를 지자체에서 환경부로 이관하여 관리 이행 중이다.

수소충전소의 안전성평가와 관련한 규정으로는 고압가스 안전관리법 제 13조의 2항에 근거한 위임행정규칙 산업통상자원부 고압가스 안전관리 기준 통합고시(2019.11.15.) 제2-2-4조에 안전성평가기법을 명시하고, 위와 동등 이상의 기술적 평가기법을 선정하여야 한다고 규정되어 있다. 제2-2-4조에 의하면 ① 사업자는 다음의 안전성평가기법 중 한 가지 이상을 선정하여 안전성평가를 실시하되 당해시설에 가장 적합한 안전성평가기법을 선정하여야 하며, 선정한 평가기법의 선정근거 및 그와 관련된 기준을 안전성평가서에 명시하여야 한다. 이 규정은 KGS FP211, 고압가스 용기 및 차량에 고정된 탱크충전의 시설, 기술, 검사, 안전성평가 기준에 의한 안전성평가기법과 동일하며 그 내용은 아래와 같다.

- 1) ‘체크리스트(Checklist) 기법’이란 공정 및 설비의 오류, 결함상태, 위험 상황 등을 목록화한 형태로 작성하여 경험적으로 비교함으로써 위험성을 정성적으로 파악하는 안전성평가기법을 말한다.
- 2) ‘상대위험순위결정(Dow And Mond Indices) 기법’이란 설비에 존재하는 위험에 대하여 수치적으로 상대위험순위를 지표화 하여 그 피해정도를 나타내는 상대적 위험순위를 정하는 안전성평가기법을 말한다.

- 3) ‘작업자실수분석(Human Error Analysis, HEA) 기법’이란 설비의 운전원, 정비보수원, 기술자 등의 작업에 영향을 미칠만한 요소를 평가하여 그 실수의 원인을 파악하고 추적하여 정량적으로 실수의 상대적 순위를 결정하는 안전성평가기법을 말한다.
- 4) ‘사고예상질문분석(WHAT-IF) 기법’이란 공정에 잠재하고 있으면서 원하지 않은 나쁜 결과를 초래할 수 있는 사고에 대하여 예상 질문을 통해 사전에 확인함으로써 그 위험과 결과 및 위험을 줄이는 방법을 제시하는 정성적 안전성평가기법을 말한다.
- 5) ‘위험과 운전분석(Hazard And Operability Studies, HAZOP) 기법’이란 공정에 존재하는 위험요소들과 공정의 효율을 떨어뜨릴 수 있는 운전상의 문제점을 찾아내어 그 원인을 제거하는 정성적인 안전성평가기법을 말한다.
- 6) ‘이상위험도분석(Failure Modes, Effects, and Criticality Analysis, FMECA) 기법’이란 공정 및 설비의 고장의 형태 및 영향, 고장형태별 위험도 순위 등을 결정하는 기법을 말한다.
- 7) ‘결함수분석(Fault Tree Analysis, FTA) 기법’이란 사고를 일으키는 장치의 이상이나 운전사 실수의 조합을 연역적으로 분석하는 정량적 안전성평가기법을 말한다.
- 8) ‘사건수분석(Event Tree Analysis, ETA) 기법’이란 초기사건으로 알려진 특정한 장치의 이상이나 운전자의 실수로부터 발생하는 잠재적인 사

고결과를 평가하는 정량적 안전성평가기법을 말한다.

9) ‘원인결과분석(Cause-Consequence Analysis, CCA) 기법’이란 잠재된 사고의 결과와 이러한 사고의 근본적인 원인을 찾아내고 사고결과와 원인의 상호관계를 예측·평가하는 정량적 안전성평가기법을 말한다.

10) 다만, 제1호부터 제9호까지와 동등 이상의 기술적 평가기법만 법규에 명시하고 있다.

위험요인을 식별하는 정성적 기법으로는 체크리스트(Checklist), 사고예상질문분석(WHAT-IF), 위험과 운전분석(Hazard And Operability Studies, HAZOP) 기법의 세 가지가 있다. 작업자실수분석(Human Error Analysis, HEA), 결함수분석(Fault Tree Analysis, FTA), 사건수분석(Event Tree Analysis, ETA), 원인결과분석(Cause-Consequence Analysis, CCA) 기법 등은 정량적 기법에 해당한다[19].

Ⅲ. 이론적 고찰 및 선행연구

3.1 수소충전소의 위험

3.1.1 수소의 위험

수소는 화염의 전파속도가 매우 빠르고 폭발범위가 넓은 가연성 가스로서 수소를 제조하거나 운송, 저장 시에 누출로 인한 화재나 폭발 등 많은 위험성을 지니고 있다. 따라서 수소시스템의 설계와 운전 시를 고려한 안전기술이 적용되어야 한다.

수소를 사용할 때 문제점은 크게 4가지로 요약 할 수 있다. 첫째, 수소는 화재 또는 폭발의 위험성이 높다. 둘째, 수소는 가장 가벼운 기체로서 공기에서 연소될 경우 열에너지보다 물질의 확산이 3배 정도 빨리 진행된다. 따라서 화염 면으로 유입되는 화학에너지가 전도를 통해서 손실되는 열에너지보다 크기 때문에 일단 연소가 진행될 경우 초과 엔탈피현상에 의해서 화염을 소멸시키기 매우 어렵다. 셋째, 수소는 누출 즉시 부양 확산되므로 개방 공간에서는 증기운이 매우 빠르게 소진되지만 폐쇄 공간에서는 천장 쪽에 증기운이 축적되어 큰 화재나 폭발로 이어질 수 있다. 끝으로 수소는 다른 물질과 결합이 쉬워 수소와 접촉하는 장치들은 부식의 위험성이 매우 크다. 수소의 흡수와 방출이 계속되면 장치의 팽창과 수축이 일어나 장치의 변형을 일으키고, 그 결과 수소 누출의 원인이 될 수 있다. 이러한 수소의 문제점들을 극복하고, 효율적인 에너지원으로 이용하기 위해서는 수소에 대한 위험성을 파악하고 안전성을 평가하여야 한다.

수소 생산 및 이용설비에 적합한 위험성평가 기법을 이용하고 적용함으로써, 수소 설비에 대한 위험성 감소 및 최적관리 시스템 구축을 위한 기반 기술을 확보해야 한다[8].

3.1.2 안전성(위험성) 개념

국제안전규격을 위한 가이드인 ISO/IEC GUIDE 51의 안전성의 정의는 “수용할 수 없는 위험성이 없는 것(freedom from unacceptable risk)”이라고 표현되어 있다. ‘수용할 수 없는 위험성’이 없다는 것은 ‘설계자의 의도를 벗어난 위험성’이 없다는 것으로 해석할 수 있다. 즉, 사람 또는 재산에 대한 위험성이 설계자의 의도한대로 수용 가능한 수준(대책 수립이 가능한)으로 억제되어 있는 상태라 할 수 있다.

위험성평가는 위험요인을 식별하고 사고 발생 확률과 사고 크기를 분석하여 사고발생으로 인한 영향을 정량화하여 대책을 세우는 과정이다[7]. 이때 위험요인(Hazard)은 정성적 기법으로 찾아내고, 위험성(Risk)의 대상인 사고발생확률과 사고 크기는 정량적 기법으로 찾아낸다[20]. 공정이나 설비의 안전 기능은 설계자의 의도대로 시스템 또는 올바르게 작동하는 장치로 구성되며, 예측 가능한 유해 사건을 방지하거나 유해 사건의 결과를 감소, 방지하기 위하여 제어기기 및 장치를 활성화하는 대책도 수립하게 된다. 즉, 잠재적으로 발생 가능한 위험한 상황을 사전에 검출하는 활성화된 기능이다. 안전 설비 및 사전 정의된 환경에서 작동하도록 만들어진 안전 기능인 제어 시스템의 주요 위험원은 설계자, 분석자, 운전자 또는 개발자에 의한 위험요소 분석을 통해 사전에 식별 되어야 한다[7].

그림 9는 기능 안전성을 설명한 것으로 안전기능 요구사항은 위험분석과

위험성평가를 통해 도출된다. 위험분석은 위험요인을 식별하는 것으로 기능 안전성은 시공 전 설계를 통해 고유의 안전성을 확보하는 것처럼 위험요인을 제거하거나 감소시키는 것이 중요하다. 기능 안전성은 위험성평가 결과에 따라 설계를 통해 위험이 제거되거나 경감되는 공정 및 설비로 제한된다.

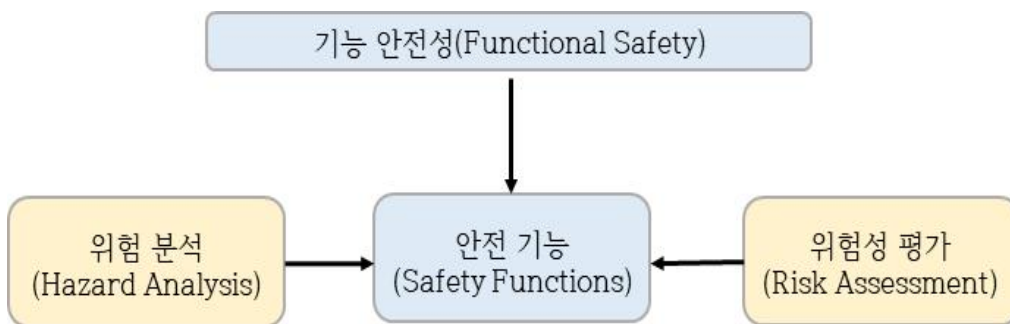


그림 9. 기능 안전성

위험분석 범위는 하드웨어 및 소프트웨어를 포함하여 다양하고 광범위하다. 따라서 안전하다는 것이 절대적으로 안전하다는 뜻은 아니다. 반드시 어느 정도 크기의 위험성이 남아 있고 사고는 항상 일어날 수 있기 때문이다. 기능상 문제가 없다 하더라도 시스템들의 상호작용 및 시스템과 외부요인들(환경, 정책, 사람 등)의 상호작용, 인적오류 등을 포함한 복합적인 요인에 의해서도 사고가 발생 가능하다는 것을 전제로 위험요인을 분석해야 한다.

해외 수소충전소 안전관리 동향

수소충전소 해외 안전관리 기준 역시 우리나라의 충전소 관리에 적용하는 고압가스 안전관리법 또는 천연가스, 도시가스 관련한 제 규정에 준하여 수소를 관리하고 있다. 세계적으로 수소충전소에 관한 안전규정은 국제

표준안이 마련되어 있지 않다. 다만 미국의 충전 프로토콜인 SAE J2601의 디스펜서(충전기)의 성능 기준 등은 국내 수소충전소 기준이 되고 있고, 수소충전소의 성능, 안전성 평가에도 기준으로 제시되고 있다.

일본의 경우 수소충전소 보급이 본격화된 2015년 이후부터 사고가 증가하고 있다. 2016년까지 누적 사고현황에 따르면, 충전소당 사고 발생 확률이 수소충전소는 78%, LPG는 6.9%, CNG는 52%의 비율을 보인다. 사용하는 압력이 높을수록 사고의 비율도 높게 나타나고 있어, 고압의 가스를 사용할수록 더욱더 주의를 기울여 철저한 안전관리가 필요하다는 것을 알 수 있다.

3.2 수소충전소의 위험성평가

우리나라의 수소충전소에 대한 위험성평가는 설립절차에 따라 진행된다. 기술검토는 현장을 확인하지 않고 서류와 도면을 통해서 법적인 기준에 대한 적합성 여부를 판단한다. 특정제조, 일반제조, 일반충전, 일반저장 등 모든 허가시설의 기술검토가 이러한 절차를 따른다. 이 과정에 안전성평가 기법을 적용한다. 즉 수소충전소의 안전성평가는 설치 전에 예측 가능한 공학적 위험성평가에 기반을 두고 있다.

수소충전소를 주제로 발표된 논문과 관련된 자료를 조사하고, 학술컨텐츠 플랫폼인 DBpia를 이용해 수소충전소의 안전성(위험성)평가 연구결과를 분석하였다. 검색기간은 2000년부터 2023년까지로 하였다.

박우일 외(2021)는 수소충전소의 잠재적 위험에 대한 연구로 가스사고

전문해석 프로그램인 FLACS⁶⁾를 이용하여 주요시설 및 설비의 설계사양, 수소충전소 주변 환경 등을 반영한 잠재적 위험요인에 대한 안전성을 해석하고 누출 시 정전기 발생 방지를 위한 수소배관 트렌치의 우회설치와 차량 휠에 접지 바이스 체결을 개선방안으로 제안했다[21].

한옥민 외(2018)는 수소충전 플랫폼 패키지에 대한 모델개발과 검증을 통해 환기시스템 설치를 제안했다[22].

박병직 외(2021)는 수소충전소 사고 발생 시 효과적인 대응으로 긴급차단장치 위치 및 작동방법과 안전거리 숙지 등 초기대응 훈련프로그램 개발을 제안했다[23].

황순일 외(2019)는 패키지형 수소충전소의 환기구 위치와 가스차단장치, 패키지 시스템과 충전설비 사이의 방호벽 설치 등을 제안했다[24].

표돈영 외(2019)는 수소충전소의 수소누출 시 확산 및 폭발에 대한 시뮬레이션을 통하여 피해 최소화를 위한 수소가스 누출원의 위치별 피해대책 마련과 인터록시스템 구축을 제안했다[25].

이진우 외(2021)는 수소충전소 실시간 이중 모니터링 시스템 운영을 통한 안전성 향상연구에서 실시간 모니터링 시스템의 효과에 대한 검증과 규정에 입각한 시공과 가스안전공사의 철저한 검사 및 점검을 제안했다[26].

3.2.1 정성적 위험평가

정성적 위험평가는 경험적 지식, 직관, 전문가의 의견 등을 이용하여 위험의 정도를 평가하는 방법으로, 경험이나 데이터가 부족한 상황에서 사용되며 가치평가 및 계산이 필요 없어, 비교적 쉽고 빠른 결과 도출이 가능

6) FLACS (Flame Acceleration Simulator) 산업 안전 및 위험 평가 분야에서 폭발 모델링 및 대기 분산 모델링에 광범위하게 사용되는 상용 전산 유체 역학(CFD) 소프트웨어

한 장점이 있는 반면 주관적 평가에 치우치기 쉬운 단점도 있다. 정성적 위험평가기법은 시스템에 영향을 미치는 전체 요소의 고장에 대해 형태별로 분석한다. 시스템 또는 서브시스템이 가동 중에 기기나 부품의 고장에 의해서 재해나 사고를 일으키게 할 우려가 있는가를 해석하는 기법이다[7]. 정성적 위험평가의 대표적인 연구기법은 FMEA(Failure Mode and Effect Analysis), HAZOP(Hazard and Operability Analysis) 위험성 평가기법이 있다.

FMEA

1) FMEA 개요

FMEA는 이상위험도 분석으로 제품과 프로세스 그리고 시스템의 잠재적 결함과 그 영향을 분석하는 평가이다. 이 평가는 주로 제품개발, 프로세스설계, 품질관리 단계에 사용되어 제품이나 프로세스의 결함을 찾아 이 결함으로 인한 잠재적 위험을 최소화하는 방법을 찾는 것이다. FMEA 절차는 먼저 분석대상을 정의하고 범위를 확정된 후 전문가로 팀을 구성하여 작업을 진행한다. 잠재적인 결함모드를 식별하고 그 원인을 파악한다. 결함모드가 시스템이나 제품에 미치는 영향을 평가하고 위험우선순위(RPN: Risk Priority Number)를 결정한다. 가장 위험한 결함모드에 대한 개선사항이나 조치사항을 식별하여 이를 통한 위험을 감소시키는 방법을 찾는다. FMEA는 상위수준의 기능적 제품에 미치는 영향을 연구하는 데 적합하기 때문에 고장형태와 영향분석, 공정리스크 평가를 수행하는 사업장에 적용이 가능하다[27].

2) FMEA 선행연구

서두현 외(2020)는 패키지형 수소충전소의 각각 설비와 부품에 대한 고장형태와 영향분석을 FMEA 평가를 통해 분석하였다.

연구의 대상은 튜브 트레일러(Tube Trailer), 압축기(Compressor), 선별패널(Priority Panel) 등 설계도면상 파악이 가능한 주요부품 23종 141개 부품을 선정하였다. 그 결과는 우선 각 부품에 대한 683개의 고장형태와 그 원인 및 영향을 예측하고, 피해의 심각도와 발생도 혹은 검출도로 5점법을 이용해 우선순위(RPN)를 도출하였다. 이 중 우선적으로 조치를 해야 할 RPN값 40점 이상인 10개의 고장형태 목록과 심각도 5점인 고장형태 목록을 파악, 분석하였다. 평가를 통해 도출된 주요 고장형태는 외부 또는 내부의 누출로 인한 폭발, 구조적 결함으로 인한 파손, 열림과 단힘 실패로 인한 긴급 상황 발생, 밸브나 배관의 막힘으로 인한 파열 등이 있다. 권고조치사항으로 ① 수소누출 및 폭발로 인한 경고문구 표시나 보호가드 설치확인 ② 밸브 및 배관 파열 방지를 위한 제품의 설치 전 검사 강화 ③ 작업자 대상 공정 매뉴얼과 정기교육의 필요성을 제안했다[28].

유승훈(2017)은 FMEA 평가를 통해 패키지형 수소충전소의 각 부품에 관한 고장형태와 고장원인 그리고 그 영향을 예측하고, 그로 인한 피해에 대한 심각도와 발생도 혹은 검출도로 구분하여 5점법 기준으로 위험우선순위(RPN) 값을 산출하였다. 총 1,485개 항목의 RPN값 중 41점 이상의 항목 4개를 선정하여 설계도면상 예측되는 위험에 대한 우선조치사항으로 도출했다. 주요부품 중 고위험 부품으로 도출된 것은 안전밸브(Pressure Safety Valve)와 유량조절밸브(Needle Valve)로 대부분의 고장형태는 누출이다. 따라서 개선조치사항으로 밸브와 배관의 연결 상태를 확인하고, 시운전을 통한 밀봉의 정상유무를 점검하는 것을 권고했다[27].

이대희 외(2009)는 수소충전소의 안전성에 관한 연구에서 FMEA 평가를 적용하여 발생 가능한 위험을 작업절차 미준수로 인한 상해와 화재 및 폭

발 가능성으로 예측하고 감지센서 설치와 작업자의 안전보호구 비치를 대응방안으로 제안했다[29].

안정진 외(2019)는 FMEA 평가를 적용하여 고압의 수소설비에 사용되고 있는 비금속부품 소재의 위험요소를 파악하고 부품의 안전성과 신뢰성 확보를 위해 인증기준 도입을 제안했다[30].

HAZOP

1) HAZOP 개요

HAZOP은 프로세스나 시스템 그리고 설비에서 발생 가능한 위험성(Hazard)과 운영가능성(Operability)을 식별하고 평가하는 것이다. 이는 주로 화학공정, 석유화학, 원자력발전소와 같은 고위험 산업분야에서 활용된다. 위험성평가는 시스템이나 프로세스에서 발생 할 수 있는 잠재적인 위험요소를 평가하여 피해를 최소화 하는데 목적이 있으며, 운영가능성 평가는 개선점을 식별한다. HAZOP은 먼저 다양한 전문가로 구성된 팀을 구성하여 시스템이나 프로세스를 분석한다. 이는 도면, 기록, 운영절차 등을 기초로 이루어진다. 시스템이나 프로세스를 세분화하여 각 분할된 부분을 검토한다. 이때 가이드 워드(Guide Word)를 사용한다. 가이드 워드는 분할된 각 부분의 특성을 나타내는 용어이다. 가능한 모든 위험을 검토 후 위험 발생 시 미치는 영향에 대한 분석을 수행한다. 다양한 위험 식별 후 분석 결과에 대한 대응 및 개선조치를 개발한다. 이로 인해 위험을 최소화하고 운영가능성을 향상시킨다.

2) HAZOP 선행연구

변윤섭(2021)은 위험과 운전분석을 통한 이동식 수소충전소의 안전성 강

화 방안을 연구하였다. 위험성평가는 HAZOP 평가를 이용하였다. 연구 대상은 튜브트레일러(Tube Trailer), 압축기(Compressor), 충전기(Dispenser)로 구성된 이동식 수소충전소의 연결 시스템(배관 및 부속품)과 부속 설비로 선정하고 위험분석을 실시하여 그 결과로 7가지의 안전조치 사항을 제안하였다. ① Tube Trailer와 Compressor의 연결 배관에 설치되어 있는 긴급차단밸브 2개 중 1개는 Tube Trailer 가까운 곳으로 이동 설치한다. ② Vent 배관은 Vent header로 연결하고, Vent header 배출구에는 정전기를 방지할 수 있는 링을 설치한다. ③ 감압밸브는 이중으로 설치하고, 배관에는 유량과 압력이 정상 수치를 벗어날 때 이상 상태를 알려 줄 Flow alarm과 Pressure alarm을 설치한다. ④ 배관의 앞부분에 Check Valve를 설치하고, 외부로 노출된 모든 밸브의 끝에는 플러그나 캡을 체결한다. ⑤ 이동식 수소충전소 차량에 탑재된 튜브트레일러, 압축기, 충전기 각각의 영역에 가스검지기를 각각 설치하고, 3개중 2개 이상이 이상 수치를 나타낼 때 긴급차단밸브가 닫히도록 연동한다. ⑥ 튜브트레일러 및 수소차의 정차 장소에 가스검지기를 설치하고, 관리자가 있는 곳 가까이에 경보기를 설치한다. ⑦ 가스배기설비는 항상 작동하도록 하거나 수소 농도가 일정한 수치를 나타낼 때 작동하도록 검지기와 연동한다[31].

유승훈(2017)은 HAZOP 평가를 통해 패키지형 수소충전소의 위험성을 평가하여 검토구간(NODE)별 2등급 이상의 위험상태에 대하여 3가지 대책을 제안했다. ① 수소공급시스템에서 압축기 고장으로 인한 가동중지위험에 대해 압력 감지기의 정기점검 및 유지보수 ② 저장시스템에서 압축기 운전 시 압축기와 튜브트레일러 사이에 발생 할 수 있는 진공발생위험에 대한 저압경고알람 설치 ③ 질소시스템에서 질소가스통의 완전 소진 시 공정정지가 예상되므로 질소가스통의 주기적 관리가 필요함이다[27].

3.2.2 정량적 위험평가

정량적 위험평가는 수치적 데이터와 분석에 기반 하여 위험을 측정하고 평가하는 방법이다. 찾아낸 위험요소를 확률적으로 분석, 평가하는 것으로 객관적이고 논리적으로 평가되어 이해가 쉽다. 그러나 비용과 시간이 많이 소요되며, 통계데이터의 확보와 신뢰성이 확보되어야 실효성 있는 평가가 가능하다. 정량적 위험평가는 시설에서 발생가능한 각각의 위험정도를 수치화하여 나타내주는 방법으로 개별 공정 사이의 위험도를 수치적으로 표현해서 공정 간의 위험도 비교 또는 위험도 개선 결과와 같은 값을 정량적으로 보여준다[7].

HyRAM / Hy-KoRAM

1) Hy-KoRAM 평가 개요

HyRAM 3.0은 미국 SNL⁷⁾에서 개발한 위험평가 프로그램으로 수소와 관련된 시스템의 구조와 작동 방식을 모델링하고 분석하는데 사용된다. 이는 수소의 생산, 공급, 저장, 이용 등 다양한 부분에서 안전성을 평가할 수 있다. HyRAM 3.0은 이용자가 지정한 위험지점(Risk Point)에서의 개인적 위험도를 산출한다. 따라서 여러 가지 위험도를 산출하기에는 한계가 있다. 또한 F-N 커브를 산출하는 기능이 없으므로 사회적 위험도 산출에는 어려움이 있어 추가적인 위험평가가 필요하다. Hy-KoRAM(정량적 위험평가 프로그램)은 정량적 위험평가 시 수소충전소 전체의 개인적 위험성과 사회적 위험성평가를 할 수 있다. 특히 개인적 위험성평가 시 위험도를 지도상 등고선 형태로 나타낼 수 있어 수소충전소 주변의 위치 또는 거리별로 위험도를 산출하고 어디에 안전조치가 필요한지 알 수 있다.

7) SNL (Sandia National Laboratory) 미국 에너지부 국가핵안보국의 연구소 중 하나로 과학기반 기술개발 및 국가안보 발전을 주요 목표로 하는 연구소

사회적 위험성평가 시에는 수소충전소 주변의 인구분포를 감안한 F-N 커브를 산출하여 설치 허용여부를 판단할 수 있다[32].

2) Hy-KoRAM평가 선행연구

김혜림, 강승규(2020)는 제조식 수소충전소의 사고에 따른 피해 범위와 영향을 정량적 위험평가방법인 Hy-KoRAM을 이용하여 분석하였다. 연구 대상은 수도권 근처에 위치하고 고정된 탱크에서 고압가스를 충전할 수 있는 설비를 갖추고 있는 충전소이다. 위험을 분석하기 위해 IEC⁸⁾에서 제시한 2차 누출 조건을 적용하고 사고에 따른 피해범위와 영향을 확인하였다. 그리고 결과를 2가지로 요약하였다. ① 압축기와 압축가스설비가 방호벽 내 한 공간에 배치되어 있어 하나의 설비에서 사고가 발생하면 다른 설비까지 사고가 전이될 수 있어 격벽설치 등 방호조치로 안전성을 강화한다. ② 개인적 위험도 분석결과 작업장 내 근무자와 작업장 외 일반대중에 대한 허용불가구역은 나타나지 않음을 확인하고, 사회적 위험도 분석결과 충전소 주변 인구분포는 허용가능 구역에 분포하는 것으로 확인했다[33].

정량적 위험평가 선행연구

강승규 외(2017)는 패키지형 수소충전소의 구성요소를 분석하고 위험요인을 파악하였다. 그리고 파악된 위험요인과 관련한 사고시나리오를 구성하여 정량적 위험성평가를 진행하였다. 사고시나리오는 기존 충전소 사고를 기반으로 구성하여 사고의 대부분을 차지하는 누출(leak)로 선정하였다. 누출의 크기별 3단계(small leak, medium leak, large leak)로 구성하여 연구한 결과 안전성 향상 방안을 2가지 도출하였다. ① 패키지형 수소충전소의 사고발생 빈도와 피해발생 영향을 고려한 위험성평가 결과 가장 큰 위

8) IEC (International Electro-technical Commission) 국제전기표준회의

험요소로 분석된 것은 튜브트레일러(Tube Trailer)의 누출이다. 따라서 이에 대한 안전조치 강화가 필요하다. 인적오류로 인한 사고를 예방하기 위해 운전매뉴얼을 상시 비치한다. 그리고 정기점검을 통한 사고예방 노력이 필요하다. ② 사고발생 빈도가 높은 저장탱크의 소규모 누출 시 안전성 확보를 위해 패키지 내부에 환기장치를 마련하고, 가스 검지시스템을 설치하여 사고빈도를 낮추는 노력이 필요하다. 사고 발생 시 피해확산 방지를 위해 설치하는 방호벽은 폭발의 압력 및 복사열의 확산을 방지하여 위험도를 낮추는데 크게 기여 할 수 있다[10].

김필중 외(2019)는 정량적 위험성평가를 통해 LPG 복합 이동식 수소충전소의 안전성 분석에 관한 연구로 위험성평가 결과 개인적, 사회적 위험성은 없다는 결과를 도출했다[34].

김동환 외(2020)는 이동식 수소충전소의 정량적 위험성평가 결과 개인적, 사회적 위험도 대부분 허용가능 구간범위에 해당하고 있음을 확인했다. 다만 위험기여도가 가장 높은 누출에 대하여 주기적 관리의 필요성을 제안했다[35].

김희진 외(2021)는 고속도로 휴게소의 수소충전소에 대하여 정량적 위험성평가를 통한 안전 가이드라인을 연구했다[36].

해외 연구사례를 보면 Yuxuan, et al.,(2022)은 도시 수소충전소의 전형적인 사고를 조사하기 위해 전 공정 수소사고모델 (PHARA모델)을 제안했다. 수소충전소의 사고에 대해 수소사고 및 비수소사고의 핵심 제어요소를 식별하고, 다양한 기능단위의 위험관리 우선순위를 결정했다. 또한 사고 영

향의 범위를 분석하기 위해 고위험 단위의 결과분석을 수행했다[55].

Nilesh, et al.,(2020)은 수소충전소의 위험분석이 정량적 위험평가 코드 및 기준에 따라 결정되고 있어 안전측면에서 과도하게 설계될 가능성이 있다고 보고 경제성을 고려하는 수소충전소의 설계를 위한 통합 접근 방식을 제안했다[56].

다만 해외연구 사례도 수소충전소 구축 단계 중 설계단계에서의 위험분석을 통한 설계 반영에 대한 연구가 대부분임을 알 수 있었다. 정성적 위험평가방법인 FMEA 평가를 통해 수소충전소 설비와 부품의 고장형태와 영향분석 및 그 결과로 우선적으로 조치해야 할 사항을 보여줌으로써 설계상 부족한 부분을 찾아 낼 수 있었다. 그리고 HAZOP 평가를 통해서도 수소충전소 연결시스템과 부속설비에 대한 분석 및 7가지 안전조치 사항이 보다 강화된 안전기준 마련의 기초자료로 활용될 수 있을 것이라 판단했다. 그리고 Hy-KoRAM 평가는 수소충전소 사고에 따른 피해 범위와 영향을 확인하여 그 결과를 2가지로 요약하여 설명했다.

정량적 위험평가방법을 통해서도 사고발생 빈도와 피해발생 영향을 고려한 결과 가장 큰 위험요소를 튜브트레일러 누출사고로 분석했다. 따라서 사고발생 시 피해확산 방지를 위한 안전조치 강화, 충전소 구축 시 방호벽 설치 및 유효한 이격거리기준 등의 결과를 도출했다[7].

위 선행연구들은 수소충전소와 관련한 정성적 위험평가와 정량적 위험평가에서 모두 유의미한 결과를 나타내었다. 따라서 설치 단계에서는 필요한 절차이고, 안전성 강화 차원에서 필수적인 요소라 판단된다.

3.3 STPA 위험분석 개요

STPA는 사고원인의 확장된 모델을 기반으로 하는 비교적 새로운 위험 분석기술이다. STPA는 구성요소 오류 이외에도 시스템, 구성요소 모두 정상 작동한다 하더라도 시스템, 구성요소의 불안정한 상호작용으로 인하여 사고가 발생할 수 있다고 본다. 기존의 위험분석 방법과 비교하여 평가한 결과로는 STPA는 전통적인 분석방법에서 발견된 모든 원인시나리오를 도출하였을 뿐만 아니라, 더 많은 시나리오를 식별하였고, 때로는 전통적인 방법에서는 도출하지 못한 소프트웨어 관련 원인시나리오를 도출하고, 고장이 아니더라도 사고로 이어지는(non-failure) 시나리오도 도출하였다. 몇몇 경우에는 분석가들이 들은 바가 없었던 사고에 대해 오직 STPA만이 사고의 원인을 발견했다[37].

3.3.1 위험분석 특징과 한계

‘STPA를 활용한 위험분석 가이드’에서는 위험분석 기법의 특징과 한계에 대해서 다음과 같이 설명하고 있다. 위험분석이란 사고(피해)를 발생시킬 가능성이 있는 시스템의 상태나 조건을 파악하고 그 원인을 분석하는 과정이라 할 수 있다. 즉, 위험분석은 사고를 줄이기 위해 관리해야 할 위험과 그 위험의 원인을 미리 파악하는 활동으로써 안전을 보장하기 위한 출발점이라 할 수 있다.

위험분석은 위험의 기반이 되는 사고 모델(Accident Model)에 따라 분류될 수 있으며, 대표적으로 순차적 사고 모델(Sequential Accident Model)과 시스템 이론 모델(System Theory Model)이 있다.

순차적 사고 모델은 하나 이상의 구성요소 오작동이 시스템 전체의 실패나 위험을 초래한다는 것을 기본 전제로 한다. 기존 위험분석은 FTA, FMEA, ETA 등이 있다. 그러나 기존 위험분석은 최근 시스템의 규모나 복잡성이 확대되고, 사고의 유형은 복합적인 양상을 띠는 등 변화로 인한 한계점이 나타나기 시작했으며, 이에 새롭게 나온 것이 시스템 이론에 기반한 사고 모델이다. 순차적 사고 모델에서는 시스템을 구성요소들의 합이라는 개념으로 이해한다. 반면 시스템 이론 모델은 시스템을 구성요소 간 유기적 상호관계로 이루어진 통합적인 개체라는 관점에서 이해한다. 따라서 사고원인을 어느 특정한 구성요소의 문제라기보다는 안전에 영향을 미치는 잘못된 제어에 있다고 본다. 반면 기존의 위험분석은 기본적으로 사고 혹은 위험은 기술·기계적 고장이나 실패, 인적 오류에 있다고 가정한다. 따라서 특정한 위험에 영향을 미치는 오류나 고장을 찾거나, 특정한 오류나 고장에 의해 발생할 수 있는 사고나 위험을 밝히는 것에 초점을 맞춘다. 표 9는 전통적 위험분석 기법인 FTA, FMEA, HAZOP, ETA의 특징을 간략히 정리한 것이다.

[표 9] 전통적 위험분석 기법들의 주요 특징

기법	개발시기	정량/정성	귀납/연역	적용시기	위험식별
FTA	1961년	정량/정성	연역적	설계	불가능
FMEA	1949년	정량/정성	귀납적	설계	일부가능
HAZOP	1970년대	정성	귀납적	설계	가능
ETA	1970년대	정량/정성	귀납적	설계	불가능

출처: STPA를 활용한 위험분석 가이드(과학기술정보통신부, 2018)

오늘날의 시스템은 예전과는 비교할 수 없을 정도로 거대한 규모와 높은 복잡성을 가지며, 하드웨어보다는 소프트웨어가 시스템을 제어하는 비율이 훨씬 높아졌다. 이로 인하여 기존의 전통적 위험분석 기법을 현대 시스템에 그대로 적용하는 데 대한 한계를 극복하기 위하여 시스템 이론 모델을 기반으로 STPA 위험분석이 제안되었다[37].

STPA 위험분석 범위는 다양하고 광범위하다. STPA의 장점으로는 시스템을 운영해야만 발견되었던 ‘알 수 없는 무언가’의 위험에 대해 개발 프로세스 초기에 파악하여 제거하거나 경감할 수 있다는 것이다.

STPA 위험분석은 개념분석부터 시작하여 안전 요구사항 및 안전 제약사항을 파악하는 데 도움을 준다. STPA는 사고 원인의 확장 모델을 기반으로 하는 새로운 위험분석이다. 개발단계에서 사고의 잠재적 원인을 분석하여 위험을 제어하기 위한 사전적인 분석방법이다[37].

이러한 특성으로 수소충전소의 사고데이터가 부족해도 시스템 중심으로 위험을 분석할 수 있다.

3.3.2 STPA 위험분석 절차

‘STPA를 활용한 위험분석 가이드’를 참조하여 STPA 분석절차를 설명하면 다음과 같다. 그림 10은 기본적인 STPA의 단계별 절차를 도식화한 것이다. STPA를 활용한 위험분석은 4단계로 이루어진다.

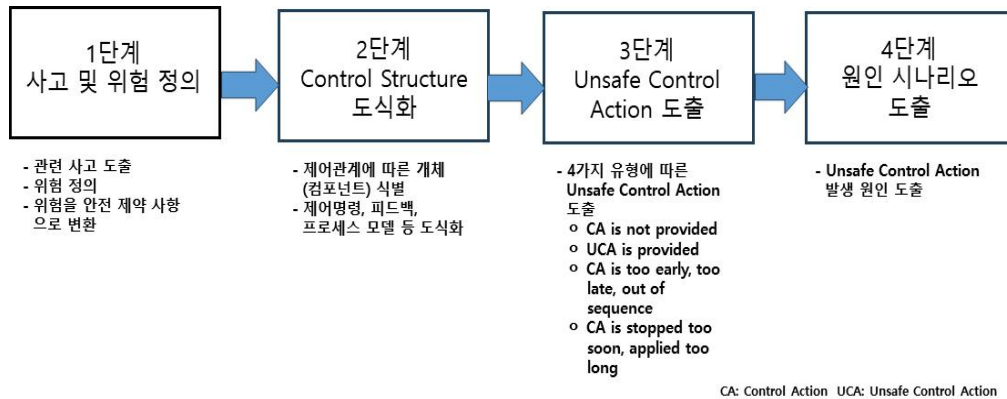


그림 10. STPA 위험분석 단계별 절차

출처: STPA를 활용한 위험분석 가이드(과학기술정보통신부,2018)

1) 1단계: 사고 및 위험 정의

그림 11은 STPA 1단계 절차이다. 사고 및 위험정의 단계로 위험분석 목적이 어떤 종류의 사고를 예방하기 위한 것인지를 결정하고 분석대상 시스템의 범위를 결정하는 단계이다.

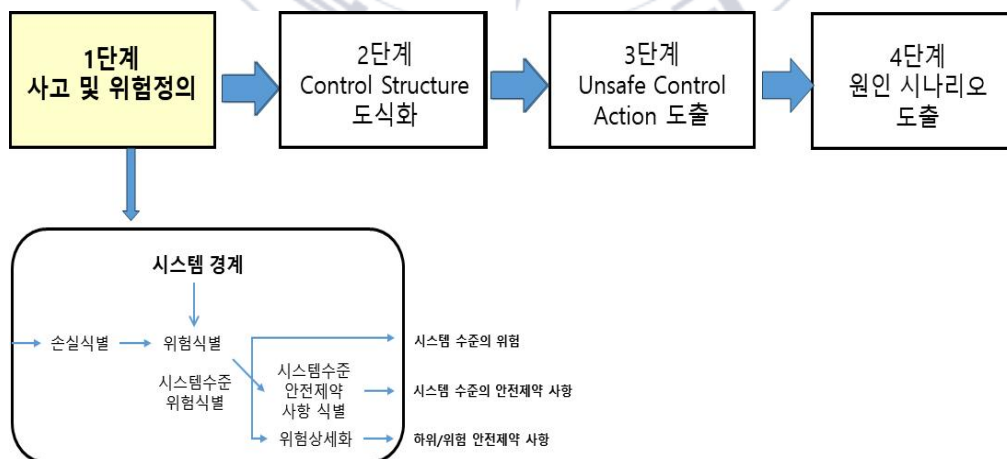


그림 11. STPA 위험분석 1단계

출처: STPA HANDBOOK, Nancy G. Leveson (MIT,2018)

2) 2단계: Control Structure 도식화

그림 12는 STPA 2단계 절차이다. Control Structure를 도식화 하는 단계로 Control Structure는 제어의 관점으로 주체(Controller)와 객체(Control Process), 제어(Control Action)와 반응(Feedback)으로 구성된다. Control Structure 모델링은 위험을 미리 예방하고 안전 제약(Safety Constraint) 유지를 위해 필요한 서브시스템을 파악하여 수행한다. 복잡한 서브시스템을 보다 쉽게 파악하기 위해서는 시스템을 추상화하여 모델링하는 것이 필요하다.

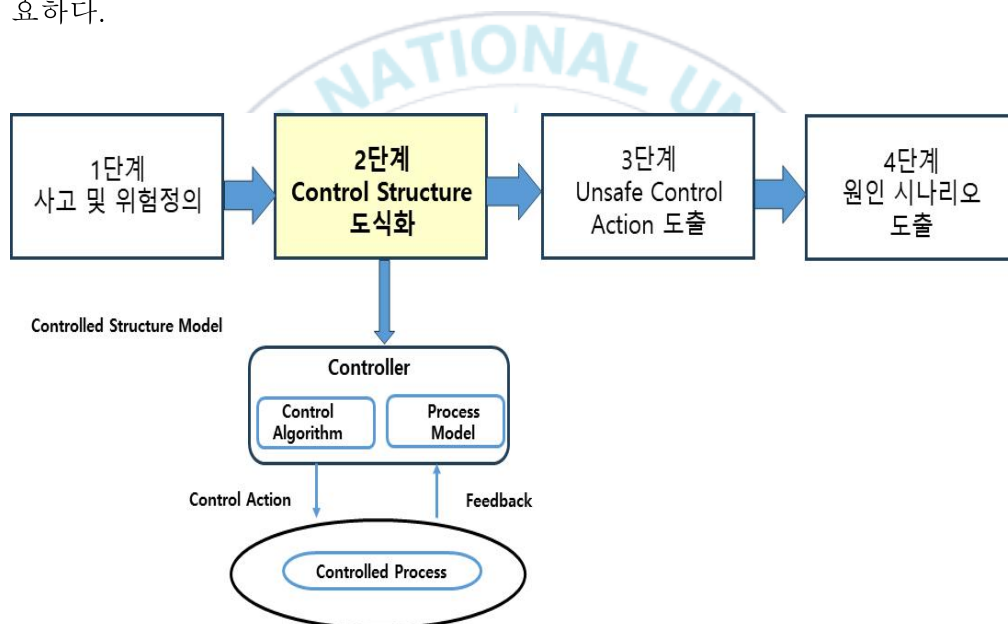


그림 12. STPA 위험분석 2단계

출처: STPA HANDBOOK, Nancy G. Leveson (MIT,2018)

3) 3단계: UCA (Unsafe Control Action) 도출

그림 13은 STPA 3단계 절차이다. UCA((Unsafe Control Action) 도출 단계로 UCA는 시스템의 위험을 초래할 수 있는 제어(Control Action)의 불안정한 형태를 의미하며, 모든 제어(Control Action)는 UCA 도출대상이

될 수 있다. 위험분석의 목적과 범위에 따라 특정한 제어(Control Action)를 대상으로 UCA를 도출할 수도 있다. Control Action에서 UCA를 도출하기 위해서는 크게 두 가지 요소가 필요하다. Controller의 Control Action 제공형태와 해당 Control Action의 이행상황이나 조건이다.

시스템 위험은 단순히 Control Action 제공형태에 따라 발생하지는 않고, Control Action이 제공되는 시점의 시스템 및 시스템 주변 환경에 따라 발생할 수 있다. 이러한 정보를 Context로 정의하고 4가지 타입의 Control Action을 조합하여 UCA를 도출한다.

4가지 타입의 유형은 ‘Not Providing Causes Hazard’, ‘Providing Causes Hazard’, ‘Too Late, Too Soon, Out of order’, ‘Stopped Too Soon / Applied Too Long’이다.

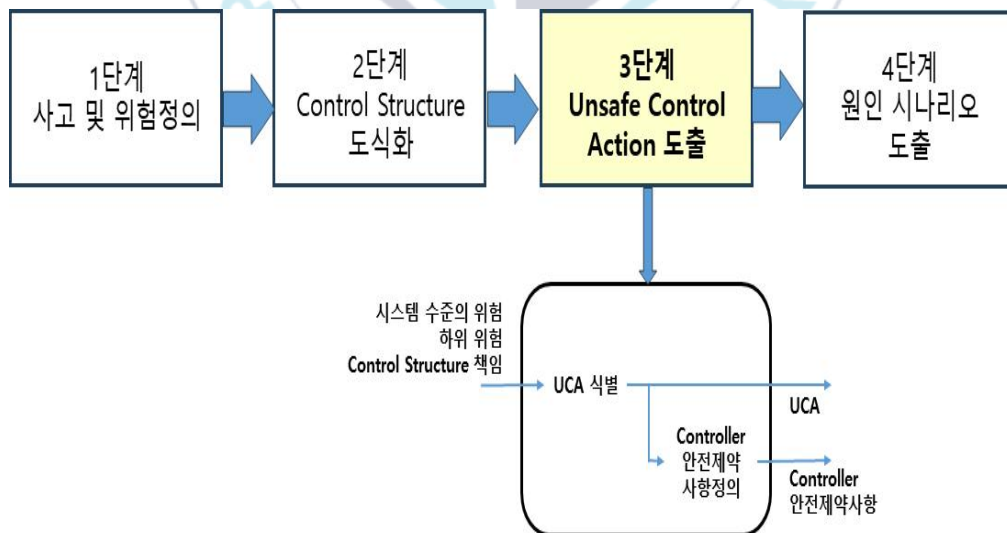


그림 13. STPA 위험분석 3단계

출처: STPA HANDBOOK, Nancy G. Leveson (MIT,2018)

4) 4단계 : 원인 시나리오 도출

그림 14는 STPA 4단계 절차이다. 원인시나리오 도출단계로 3단계에서 이행 상황이나 조건과 4가지 타입의 Control Action을 바탕으로 UCA를 도출하였다. 4단계에서는 위험을 유발할 수 있는 UCA가 발생하는 원인들을 분석한다. 원인(Causal Factor)들은 두 가지 유형으로 구분할 수 있다. 첫 번째는 Control Action이 왜 불안전(Unsafe)하게 제공되었는지, 즉 Controller가 UCA를 제공한 원인이 무엇인지를 도출하는 것이다. 두 번째는 제공한 Control Action이 부적절하게 수행되거나 수행되지 못한 원인이다. UCA를 유발하는 원인은 고장이나 잘못된 Control Algorithm 등 Controller 자체에 존재하는 원인과 부적절한 피드백 또는 잘못된 정보가 원인이 될 수 있다. Control Action이 부적절하게 수행되거나 Control Action의 수행이 되지 못한 경우는 Control Path나 Control Process에서 Control Action이 부적절하게 수행되거나 Control Action이 수행되지 못한 경우가 있을 수 있다. 최종적으로 이러한 원인(Causal Factor)을 토대로 원인시나리오를 작성한다.

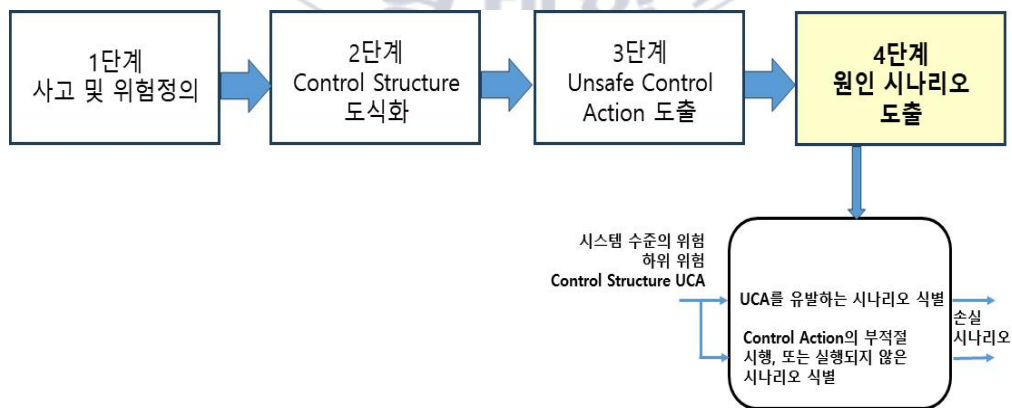


그림 14. STPA 위험분석 4단계

출처: STPA HANDBOOK, Nancy G. Leveson (MIT,2018)

이석형(2022)은 STPA 기법을 활용한 패키지형 수소충전소의 안전성 강화모델에서 STPA 분석을 통해 압축시스템과 우선순위 패널에 대한 부적절하거나 불안정한 형태의 UCA(Unsafe Control Action)를 도출하고 UCA의 Causal Factor를 찾아내었다. 결과로 도출된 ESD 실패의 원인을 제어함으로써 패키지형 수소충전소의 안전성을 강화하는 모델 4가지를 제안하였다. ① ESD(Emergency Shutdown) System 구축이 필요하다. 압력, 유량, 온도의 이상 상황에 긴급차단장치(ESD) 작동을 서로 연계하고, 다중제어함으로써 ESD 기능을 강화하여 ESD 실패 및 수소누출을 방지할 수 있다. ② FGS(Flame & Gas System, 화재 및 가스시스템)를 구축할 때, 패키지와 충전소의 검지기, 경보기를 통합시키는 것이 필요하다. 검지 대응 시간을 줄일 수 있고, 운전원의 능동적인 대처를 가능하게 한다. ③ 국제규격에 합당한 수소충전소 통합 SRS 구축이 필요하다. 수소의 누출이 발생하면 허용된 시간 내에 ESD가 작동되어야 함으로 작동이 늦거나, 작동되지 않는 상태를 대비하는 것이 안전성 강화 방안이 된다. ④ 강제환기배출 시스템 구축이 필요하다. 밀폐된 공간에서 누출사고가 발생한다면 수소의 체류를 막고, 가연한계를 벗어나는 환경을 조성해야 한다.

위 4가지 제안된 모델은 안전성 강화에 기여할 것으로 기대는 하지만 무결점 안전상황을 보장할 수는 없다[3].

해외연구사례는 Jixin, et al.,(2023)는 DEMATEL⁹⁾-STPA 기법을 적용하여 수소충전소에 대한 위험평가 및 분석을 수행했다. 이 기법은 운전 중에 발생할 수 있는 위험요소를 제거하고 시스템안전의 안정성과 유지 보수

9) DEMATEL(Decision Making Trial & Evaluation Laboratory), 1971년 스위스 소재 바텔(Battelle) 연구소에서 개발된 문제에 대해 전문가 집단의 의견조사를 토대로 데이터를 수집 및 분석하여 전체적인 구조를 규명하는 시스템 분석기법

성을 향상시켜 기존 정성적 평가에 비해 시간과 전문가 자원을 절약하고 충전소의 안전을 극대화 한다고 했다[57].

Takatomo, W & Makoto, I (2022)는 운전 중 비상정지(Emergency Stop)의 안전성에 관한 STPA연구를 했다[58]. STPA 적용 해외연구도 설치 전, 운전과 관련한 부품, 설비에 관련한 연구에 집중되고 있음을 파악하였다.

김상덕 외(2020)는 위험 시나리오 도출을 위해 STPA기법을 적용하여 위험 시나리오 분석체계 순서에 따른 위험 분석 절차를 진행하여 업무연속성 확보에 영향을 주는 위험요소의 누락을 최소화할 수 있는 위험평가 절차를 정립해 나가는 방법을 제시했다. 위험평가 첫 번째 단계인 핵심 업무의 중단을 유발하는 위험 시나리오 도출에 STPA 위험평가에 의한 위험 원인시나리오를 도출하는 절차를 적용하여 14개의 위험 시나리오와 18개의 대비책을 강구했다[38].

양현수, 권기현(2019)은 STPA의 4단계 절차인 사고원인 시나리오 식별 절차에서 기존 가이드만으로는 부족한 제어 알고리즘의 오류로 인한 위험 시나리오를 식별하기 위해 기존연구를 테이블로 표현한 시나리오 테이블 이용을 제안했다[39].

이준우 외(2021)는 항공분야 STPA 적용에 관한 고찰 연구로 국내에서도 항공기의 안전성 평가 분야에 STPA 적용을 제안했다[40].

김은비 외(2015)는 STPA의 체계적인 위험 식별을 위해 태스크표기법인 CTT(Concur Task Trees)를 접목한 위험식별 프로세스를 제안했다[41].

3.4 재해경감활동

국내 재해경감활동관리체계(이하 재해경감활동)는 ISO22301 국제표준에 따라 정의되는 업무연속성관리체계(Business Continuity Management System, 이하 BCMS)와 동일한 위상을 갖는 것으로써, 각 기업 및 기관이 재해경감활동계획을 수립하고 실행 및 운영하는 등 경영시스템 전반에 걸쳐 시행하는 것으로 정의된다[42].

전 세계적으로 테러와 기상이변 등 재난이 발생하는 상황에서, 위기상황에 대처하고 기업이나 공공기관이 스스로 재난으로 인한 피해를 빠른 시간 내에 복구하고 기본적인 기능을 지속할 수 있도록 관리하는 능력의 중요성은 높아지고 있다. 이에 따라 다국적 기업 등을 중심으로 BCMS를 도입하여 운영하고 있고, 미국을 비롯한 몇몇 국가에서는 공공기관에서도 도입하여 실행하고 있다.

BCMS의 중요성이 환기된 계기는 2011년 911테러로 인해 당시 투자은행인 모건스탠리는 본사가 완파되는 피해에도 불구하고 BCMS 운영으로 24시간 만에 업무를 재개하여 기업 성장의 발판을 마련하였다.¹⁰⁾ 우리나라에서도 대형 금융기관들을 중심으로 자체적인 BCMS 도입을 시작하여 대기업들과 일부 공공기관에서 BCMS 국제규격인 ISO22301 인증을 획득하고 있다. 그러나 아직까지 그 중요성과 국제적 추세에 비해서는 활성화가 부족한 실정이다[4].

행정안전부 ‘재해경감활동 교재’는 재해경감활동을 “기업이 재해 발생 시에

10) 국민안전처 보도자료(2016. 3.11)

도 핵심 업무 기능을 계획된 수준 또는 중대한 변경 없이 지속할 수 있도록 전사적인 정책 및 절차를 수립하여 시행하는 것”[43]이라고 설명하고 있다.

재해경감활동의 대상 리스크는 기업의 핵심 업무가 중단되어 손실을 발생시킬 수 있는 요인이나 상황 등이다. 따라서 이러한 요인이나 상황을 미리 방지하거나, 발생 시 빠르게 대응하고 복구할 수 있는 방안을 사전에 준비해야 한다. 재해경감활동은 예방-대비-대응-복구라는 절차를 따른다.

3.4.1 기업재난관리표준

기업재난관리표준에서는 재해경감활동을 다음과 같이 세분화 하여 정의한다. ① 재해경감활동 : 재해경감활동관리체계를 통해 재해경감활동계획을 수립하고 이행하는 총체적인 관리 프로세스이다. ② 재해경감활동계획 : 기업의 잠재적 위협 및 위협 발생 시(재난 등) 업무 운영에 미치는 영향을 식별하고, 주요 이해관계자의 이익, 명성, 브랜드와 가치창조 활동 보호를 위한 효과적인 조직의 탄력성 구축체계를 제공하기 위해 수립하는 전략계획, 경감계획, 사업연속성확보계획, 대응계획 및 복구계획 등 이다. ③ 재해경감활동관리체계 : 재해경감활동계획을 수립, 실행, 운영, 감시, 검토, 유지관리 및 개선하는 전반적인 시스템이다[44].

그림 15는 재해경감활동 관리체계 적용 모델이다. 기업재난관리표준은 재해경감활동관리체계의 수립, 운영 및 실행, 교육과 훈련, 감시 및 검토, 유지관리 및 지속적 개선 등을 위한 프로세스 접근방법으로 P(Plan) - D(Do) - C(Check) - A(Act) 모델을 적용한다.

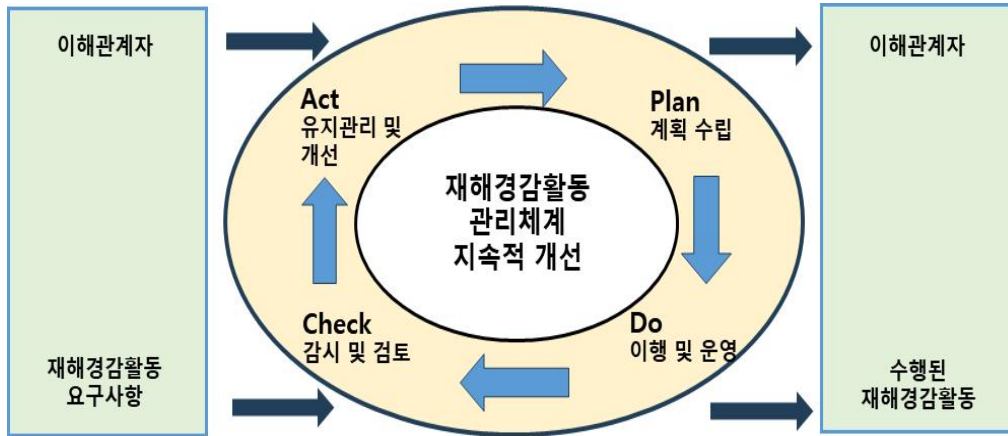


그림 15. 재해경감활동관리체계 적용 모델

출처: 기업재난관리표준(행정안전부 고시 제 2017-1호, 2017. 7.26)

표 10은 PDCA모델의 절차와 주요 내용이다.

표 10. PDCA 모델의 주요내용

구 분	주 요 내 용
Plan (계획수립)	기업의 정책 및 목표, 이해관계자의 요구에 따라 결과를 도출하는데 필요한 재해경감활동 목표 및 프로세스 실행
Do (운영 및 실행)	재해경감활동 목표 및 프로세스 절차의 실행
Check (감시 및 검토)	재해경감활동 정책 및 목표의 성과를 평가하고 검토하여 관리자에게 시정 및 개선 활동사항을 결정하도록 권한 위임
Act (유지관리 및 개선)	관리자 검토, 재해경감활동관리체계의 범위, 정책 및 목표에 대한 재검토와 시정조치를 통한 지속적인 개선

출처: 기업재난관리표준(행정안전부 고시 제 2017-1호, 2017. 7.26)

재난 및 안전관리기본법에서는 재난관리 단계별 주요업무를 표 11과 같이 정리하고 있다.

표 11. 재난관리 단계별 주요업무

구분	주요업무	법률조항
예방단계	- 재난의 예측과 정보의 이용 및 소통체계의 구축 - 재난 발생에 대비한 교육훈련과 재난예방에 관한 홍보 - 재난이 발생할 위험성에 대한 안전관리체계 구축 및 안전관리 제정 등 관리대상 업무분야에서 재난을 예방하기 위한 조치	제25조의 2제1항
대비단계	- 기능별 재난대응 활동계획의 작성 및 활용 - 재난유형에 따라 위기관리 매뉴얼, 위기대응 실무매뉴얼, 현장조치 행동매뉴얼 등 위기관리 매뉴얼을 작성, 운영하여야 하며, 이 경우 재난대응활동계획과 위기관리 매뉴얼이 서로 연계되도록 하여야 함	제34조의 5제1항
대응단계	- 재난이 발생할 우려가 있거나 재난이 발생하였을 때에는 즉시 관계법령이나 재난대응활동계획 및 위기관리 매뉴얼에서 정하는 바에 따라 소방·진화 구조 및 구난, 그 밖에 재난 발생을 예방하거나 피해를 줄이기 위하여 필요한 응급조치를 하도록 함 - 재난으로 인하여 사람의 생명·신체 및 재산에 대한 피해가 예상되면 그 피해를 예방하거나 줄이기 위하여 재난의 위험수준에 따라 관심·주의·경계·심각으로 구분하여 재난에 관한 예보 또는 경보를 발령	제37조 제1항 제38조
복구단계	- 재난관리책임기관의 장이 신고된 재난피해조사를 마치면 자체복구계획을 지체 없이 수립·시행하도록 함	제59조 제1항

출처: 재난 및 안전관리기본법

재난관리는 최근 예방과 대비 중심으로 변화하고 있다. 우선적으로 재난의 발생을 최대한 방지하고, 재난 발생 시 통제와 수습의 체계를 명확하게 하여 신속하게 수습과 복구가 이루어져야 한다.

3.4.2 재해경감활동 위험평가

ISO 31000:2018에서 재해경감활동관리체계의 위험평가는 “위험 식별, 위험 분석 및 위험 관정의 총괄적인 프로세스”라고 한다. 기업재난관리표준에서는 “위험을 식별, 분석 및 평가하고 처리방법을 도출하는 활동”이라고 설명하고 있고, ISO 22301:2019에서는 위험평가 운영이 프로세스와 조직의 우선순위 활동, 정보, 시스템, 자산, 인력, 공급업체 그리고 이를 지원하는 다양한 자원의 중지위험을 시스템적으로 분석, 식별 및 평가하는 공적인 위험평가 프로세스를 이행하고 유지관리를 해야 한다고 제시하고 있다[45].

그림 16은 재해경감활동의 위험평가 절차이다. 위험시나리오는 모든 발생 가능한 위험이 대상이 될 수 있다.

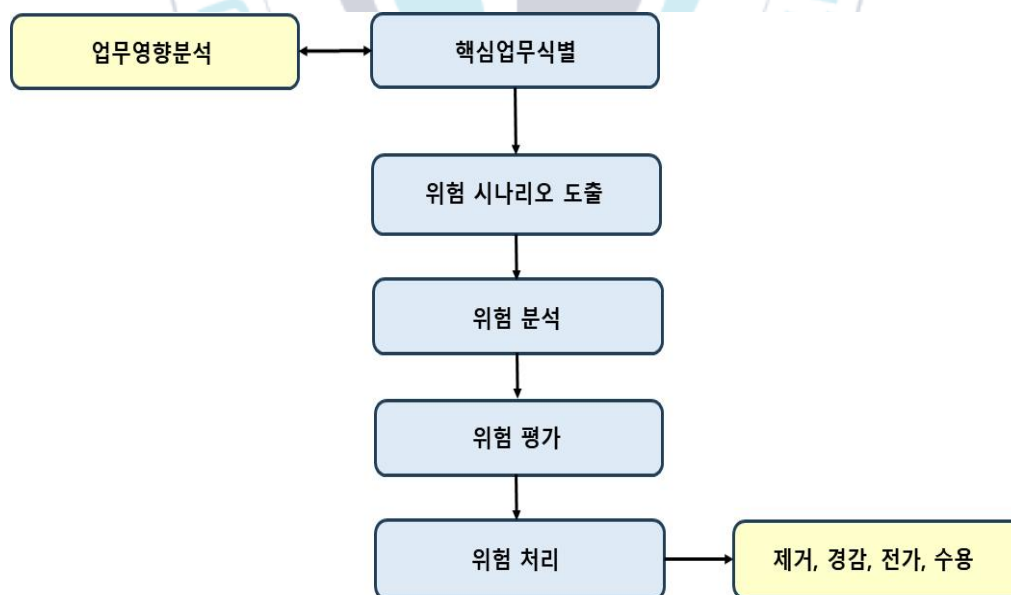


그림 16. 재해경감활동 위험평가 절차

재해경감활동에서 위험평가는 위험의 크기를 정량화한다. 이는 발생 빈도와 영향에 대해 평가하고 우선순위 화하여 위험 등급을 결정한다.

$$R = F + S \pm a$$

R: 위험등급 F: 위험발생빈도 S: 업무영향도 a: 보정계수

위험분석기법은 결과-빈도 매트릭스(Consequence-Probability Matrix) 기법으로 재해별 빈도와 영향도에 따른 평가가 가능하며, 위험수준 순위에 대한 정렬이 가능하다. 산식과 같이 위험발생빈도와 업무영향도의 합에 보정계수를 가감하면 최종 점수가 산출되고 이를 등급으로 변환한다.

최종등급은 A~D 4단계로 A단계(8~10점)는 위험이 매우 높음, B단계(6~7점)는 높음, C단계(4~5점)는 보통, D단계(2~3점)는 낮음 단계이다.

A단계는 발생가능성이 높고 심각한 업무영향을 미칠 수 있어 즉각적인 대응책이 필요한 수준이다. B단계는 재해의 발생 가능성과 업무영향이 다소 클 수 있으며, 장기적인 보완 및 대응책이 필요한 수준이다. C단계는 재해의 발생가능성과 이에 따른 업무영향이 존재하나 꾸준한 위험관리 활동으로 보완이 가능한 수준이다. D단계는 위험이 존재하나 회사 위험정책 수준에 의해 무시할 수 있는 수준이다.

취약 요인으로 인한 재해 발생사례, 발생 통계자료, 발생예측 등을 통해 위험발생 빈도를 I ~ V 등급으로 구분한다. 표 12는 위험발생빈도 등급표이다.

표 12. 위험발생빈도 등급(5등급)

등급	산식	설명
I	$10-2/\text{yr} < F$	100년 초과시 1회 정도 발생
II	$(5 \times 10)-1/\text{yr} < F \leq 10-2/\text{yr}$	50년 초과 100년 이하에 1회 정도 발생
III	$10-1/\text{yr} < F \leq (5 \times 10)-1/\text{yr}$	10년 초과 50년 이하에 1회 정도 발생
IV	$1/\text{yr} < F \leq 10-1/\text{yr}$	1년 초과 10년 이하에 1회 정도 발생
V	$F \geq 1/\text{yr}$	1년에 1회 정도 발생

출처: 재해경감활동 교재(행정안전부)

업무영향도는 업무재개까지의 소요 시간에 따라 I ~ V등급으로 구분한다. 즉, 업무중단 시간을 기준으로 5단계 등급으로 구분한다. 표 13은 업무영향도 등급이다.

표 13. 업무영향도 등급(5등급)

등급	산식	설명
I	$S \leq 3\text{시간}$	재해발생 후 업무재개까지의 소요시간이 3시간 이내
II	$3\text{시간} < S \leq 12\text{시간}$	재해발생 후 업무재개까지의 소요시간이 3시간 초과 12시간 이내
III	$12\text{시간} < S < 24\text{시간}$	재해발생 후 업무재개까지의 소요시간이 12시간 초과 1일 이내
IV	$24\text{시간} < S < 1\text{주일}$	재해발생 후 업무재개까지의 소요시간이 1일 초과 1주일 이내
V	$S > 1\text{개월}$	재해발생 후 업무재개까지의 소요시간이 1개월 초과

출처: 재해경감활동 교재(행정안전부)

보정계수는 리스크 발생 빈도와 수준에 따라 각 사업장의 고유 특성을 반영하기 위해 적용한다. 위험수준에 가(+), 감(-)하는 요소를 적용한다.

김상덕, 김창수(2019)는 재난상황을 수용하고 복구 중심으로 관리되던 이전과 달리 최근에는 자연적 재난이 사회적 재난 요인과 병합이 되어 그 피해규모가 확대되는 경향이 있어, 사전에 위험요인을 제거하거나 예측하는 기술의 개발이 필요하고, 재해를 경감시키기 위해서는 예방활동이 중요하다는 것을 강조했다[46].

박수열 외(2016)는 시설물의 구조적, 기능적 특성을 잘 이해하여 외력에 대한 대응능력을 강화하는 SOC 시설물 재난대응 및 관리시스템 개발 방향에 대하여 연구했다[47].

손정식 외(2017)는 공공기관 특성을 반영한 업무연속성 관리체계 모델을 제안했다[48].

이상수(2020)는 소기업·소상공인 재해경감활동 관리체계 모델 개발에 대한 연구를 통해 소기업·소상공인이 재해경감활동관리체계의 수립 및 운영을 자체적으로 할 수 있도록 쉽게 접근할 수 있는 간소형 표준을 전문가 집단패널들의 의견수렴 기법을 적용하여 재난관리표준 최소모델을 개발했다[49]. 그러나 소상공인 모델이 다양한 산업에 적용되기에는 한계가 있다.

해외연구사례로는 Böđvar, T.(2021)은 BCM을 재난상황에 대한 회복력과 사회적 안전을 높일 수 있는 기반으로 국가차원에서의 사용을 제안했다[59].

IV. 수소충전소의 위험요인 및 위험성평가 설계

연구 설계는 수소의 위험특성과 수소충전소의 가동중단 사례를 통해 수소충전소의 위험요인을 식별한다. 그리고 수소충전소의 설치단계부터 운영 단계까지 발생 가능한 위험요인을 시계열 흐름에 따라 ‘수용 가능한 위험 영역’과 ‘허용 가능한 위험영역’으로 구분한다. 도출된 위험시나리오를 STPA 위험분석과 재해경감활동 위험분석·평가·처리과정에 적용한다. 그 결과를 바탕으로 기존 위험평가와 비교하여 위험성에 어떤 변화가 있는지, 그리고 위험영역은 어떻게 변화하는지 검증한다.

4.1 수소충전소의 위험요인

수소충전소의 위험요인은 우선 기체 수소의 누출, 연소, 화재, 폭발 등 수소의 화학적 특성에서 찾을 수 있다. 본 연구에서는 화학적 특성의 위험요인에 대해서는 선행 연구를 참고하여 간략히 정리하였다.

연구자가 생각하는 수소충전소의 중요한 위험 요인 중 하나는 수소충전소 운영 중 발생 하는 가동중단 사태라 생각한다. 수소충전소 운영 중 빈번하게 발생하고 있는 가동중단 사태가 운영주의 입장에서는 수익성을 떨어트리며, 소비자의 입장에서는 편의성을 떨어뜨려 수소연료전지차 확산에 큰 걸림돌이 되고 있다. 또한 이로 인하여 정부의 입장에서는 수소경제 선도국가 건립에 제동이 걸리고 있는 상황이다. 따라서 본 연구는 빈번하게 발생하고 있는 가동중단을 유발하는 위험 요인들과 발생할 확률은 적지만 발생한다면 큰 영향을 미치는 위험요인까지 포함하여 위험을 식별한다.

4.1.1 수소의 누출, 연소, 화재 및 폭발

수소의 누출은 가연성 물질이 저장, 운반, 반응이 진행되고 있는 용기 또는 관 등에서 파손, 균열, 열화, 헐거움 등과 같은 틈이 발생하였을 때 발생한다. 내부에 존재하는 물질이 이 틈으로 내압과 외압의 차에 의해 유출이 발생하는 것이다.

연소는 물질이 빛과 열 혹은 불꽃을 내면서 산소와 빠르게 결합하는 반응이다. 어떤 물질이 연소하기 위해서는 연료, 점화원, 일정량 이상의 산소가 필요하다. 이를 연소의 3요소라 하며, 세 가지 요소 중 어느 한 가지 요소라도 충족되지 않으면 연소반응은 일어나지 않는다.

화재란 불로 인해 발생하는 재해로서 사람의 의도에는 반하는 현상, 즉 불에 의한 피해라 할 수 있고, 제어되지 않은 연소과정이며 감지될 수 있는 충분한 양의 빛과 에너지를 발산하는 화학반응을 의미한다. 수소는 일반적으로 다른 화석연료에 비해 빨리 연소한다. 수소차량과 가솔린 차량의 화재 실험 시 일반적인 가솔린 차량의 화재시간이 20~30분 정도 진행됨에 비해 수소차량의 경우 1~2분 안에 연료가 다 연소되어 화재가 종결된다.

수소 가스의 폭발 범위는 공기 중 4.0~75% 및 밀폐된 공간에서는 18~59%로 다른 기체와 비교하여 넓은 범위의 농도에서 대기 산소와 가연성 또는 폭발성 혼합물을 형성한다. 폭발의 강도는 저장 및 방출되는 환경에 따라 달라지며 강도에 따라 주위의 건물과 사람들에게 피해를 줄 수 있는 돌풍을 일으킬 수 있다. 수소충전소 및 저장소를 설치, 운영하기 위해서는 수소폭발을 예방하기 위한 조치가 필요하다[8].

4.1.2 수소충전소 가동중단

선행연구를 통해 기존에 실시하고 있는 위험성평가는 설치 전 단계의 위험성평가로 수소의 화학적 특성 위주의 위험에 대한 예방에 치중되어 있음을 알 수 있었다. 우선은 수소의 누출로 인한 화재나 폭발에 대한 위험이 크기 때문에 그 부분에 집중한 위험성평가로 각종 규제와 허가가 이루어지고 있는 것이 사실이다. 지금까지는 수소충전소에 관한 많은 운영데이터가 축적되지 않은 초기 단계였기 때문에 운영 중 발생 가능한 위험 영역까지는 생각하지 못한 것이라 할 수 있다. 그러나 한국가스안전공사가 ‘수소충전소 실시간 모니터링 시스템’을 2021년 8월 구축하여 가동 중으로 이제는 많은 데이터가 축적되어 있으니 가동중단에 대한 위험요인 분석 및 평가가 필요한 것으로 판단된다.

표 14. 수소충전소의 위험요인 및 현재 상황

위험 요인	현재 상황
주요 설비 고장	가동 중단, 고장 수리
안전관리자 부재	가동 중단
불규칙적인 수소공급	가동 불규칙
소모성 부품 수급 불균형	부품 표준화 진행 중
수소 공급가 인상	수익성 저하, 가동 중단
운송관리자 파업	가동 불규칙, 가동 중단
자연 재난, 재해	가동 중단

표 14는 수소충전소의 위험요인과 현재 상황이다. 운영주의 관점으로는 위험 시나리오가 누출로 인한 화재, 폭발 사고도 중요하지만, 빈번하게 발생하고 있는 각종 부품 고장 및 부품수리 지연으로 인한 가동중단, 그리고 공급 가격인상으로 인한 운영 위험 등도 매우 중요한 항목이다. 그러나 현재는 이 부분에 대한 위험성평가가 이루어지지 않기 때문에 빈번한 가동중단으로 경영상 어려움을 겪고 있는 것이 사실이다.

4.2 수소충전소의 위험성 평가 설계

4.2.1 위험영역

위험(Risk)은 대중들이 사회적으로 위험수준을 수용할 수 없을 때 위험하다고 인식한다. 반면 개인이나 조직 또는 사회의 적극적인 노력으로 위험수준이 사회적으로 수용될 수 있는 수준까지 감소된다면 사람들은 ‘어느 정도 안전하다.’ 라고 인식한다.

$$S = R \leq SARL$$

S: Safe R: Risk SARL: Socially Acceptable Risk Level

위험영역은 ‘위험성 결정’이라 하여 위험의 크기가 허용이 가능한 범위 내에 있는지 여부를 판단하는 것이다. 그림 17과 같이 위험은 ‘허용 가능한 위험영역’(불안영역)과 ‘허용 불가능한 위험영역’(위험영역)으로 구분 할 수 있으며, ‘허용 가능한 위험영역’에서 합리적으로 실천 가능한 범위 안에서 설계자의 의도까지 가능한 낮은 수준으로 감소되어 있는 위험영역을 ‘수용 가능한 위험영역’이라 할 수 있다[50].

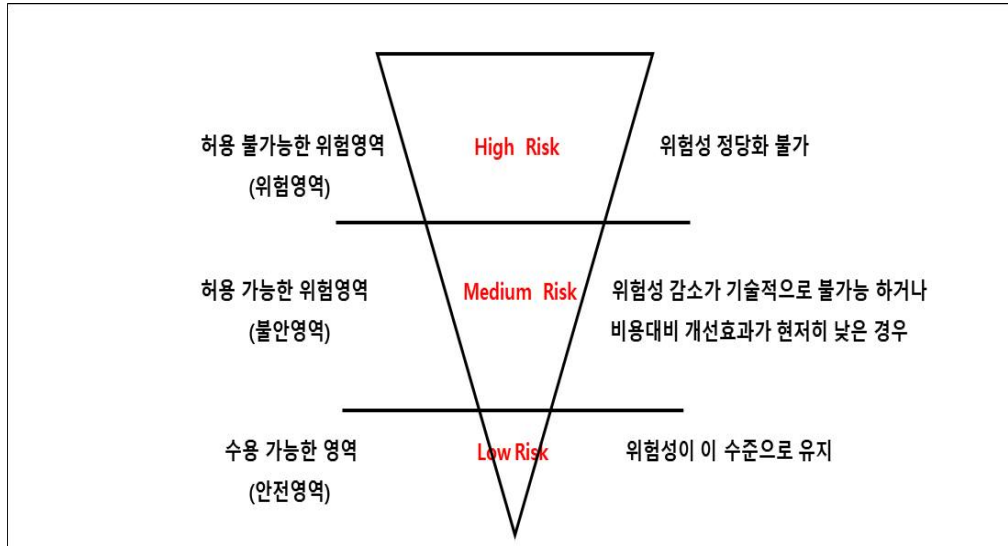


그림 17. 위험영역 구분

수소충전소 설치단계에서 ‘수용 가능한 위험영역’은 설계자가 설계단계에서 인지하고 대처할 수 있는 영역으로, 위험성의 크기는 줄어들었으나 위험의 크기는 여전히 변함없다. 따라서 ‘허용 가능한 위험영역’ 보다 더욱 엄격한 기준으로 평가하여야 한다. 그리고 ‘허용 가능한 위험영역’은 ‘수용 가능한 위험영역’에 추가하여 위험성을 감소시킬 수 있는 있는 영역이다 . ‘허용 가능한 위험영역’에 대한 모든 안전대책을 수립하기에는 비용이나 방법문제가 상당하겠지만 가능한 한 위험을 낮추기 위해 적극 노력해야 한다. 현실적으로 절대 안전은 존재하지 않기 때문이다[7].

4.2.2 수소충전소의 가동중단 위험성평가 기준

본 연구에서는 김홍철(2021)이 제안한 시공 전에 실시하는 안전성평가가 매우 합리적이라는 것을 전제로 한다. 시공 전 평가의 장점은 같은 부지

내에서 설비의 배치를 변경하거나 위치를 이동시키는 것만으로도 안전성을 높일 수 있다는 것이다. 시공 전에 실시하는 위험성평가 결과의 설계반영은 비용, 시간 등 수소충전소 사업자의 부담을 최소화 시킬 수 있다는 결론[12]을 토대로 연구의 틀을 설계하였으며, 수소충전소의 가동 중단 및 운영상 발생되고 있는 몇 가지 위험 시나리오를 바탕으로 STPA 위험분석을 진행하여 그 결과를 재해경감활동에 적용함으로써 ‘허용 가능한 위험영역’의 일부가 ‘수용 가능한 위험영역’으로 위험성이 감소되는 효과가 있는지 분석한다.

가동중단 위험시나리오에 대하여 STPA 위험분석을 적용하는 사유는 부품 등 개별요소에 대한 위험성평가는 기존 위험성평가기법을 적용하고 있어 본 연구에서는 수소충전소 전체적인 운영시스템이나 가동시스템의 문제점은 없는지 확인하고자 STPA 위험분석을 적용한다. STPA 위험분석은 시스템들의 연결, 시스템과 외부 요인(사람, 정책, 환경 등)들 사이 다양한 상호작용 또는 시스템의 기능상 문제가 없더라도 복합적인 요인에 의해 예상 못한 사고가 발생할 수 있음을 찾아낼 수 있기 때문이다.

그림 18은 수소충전소의 위험성과 안전성 영역을 나타낸 것이다. 가로는 위험성으로 이는 위험의 크기라 할 수 있고, 세로는 안전성으로 잔류위험성에 대한 안전성 강화영역이다. 사선은 시간의 흐름을 나타낸다. 수소충전소의 운영단계를 표현한 것이다. 남아있는 잔류 위험성에 대하여 합리적으로 실천 가능한 범위 내에서 최대의 안전성을 확보한다면, 즉 ‘허용 가능한 위험영역’이 줄어들고 ‘수용 가능한 위험영역’이 커진다면 안전성의 크기도 커진다는 것을 전제로 수소충전소의 설치단계부터 가동단계까지 시간의 흐름을 바탕으로 설계하였다.

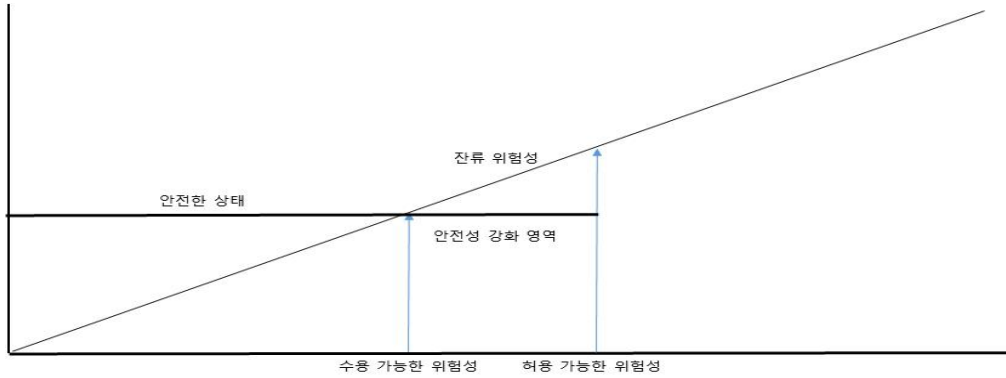


그림 18. 수소충전소의 위험성과 안전성 영역

그림 19는 수소충전소 설치 전 단계부터 실시하는 안전성평가와 위험성 결정을 나타낸다. 수소충전소의 설치 전 단계에서는 위험성은 가능한 ‘수용 가능한 위험영역’까지 위험성을 결정하고 안전성을 확보한다. 선행연구를 통해 현재는 설치 전 단계의 위험성평가에 집중되어 최대한 안전성 확보를 위한 각종 인·허가가 이루어지고 있음을 확인하였다. 가로의 위험성과 세로의 안전성을 통해 수소충전소 설치 전 단계의 위험성평가는 ‘수용 가능한 위험영역’까지로 이는 평가의 대상이 예측 가능한 위험요인 위주로 될 수밖에 없음을 알 수 있다.

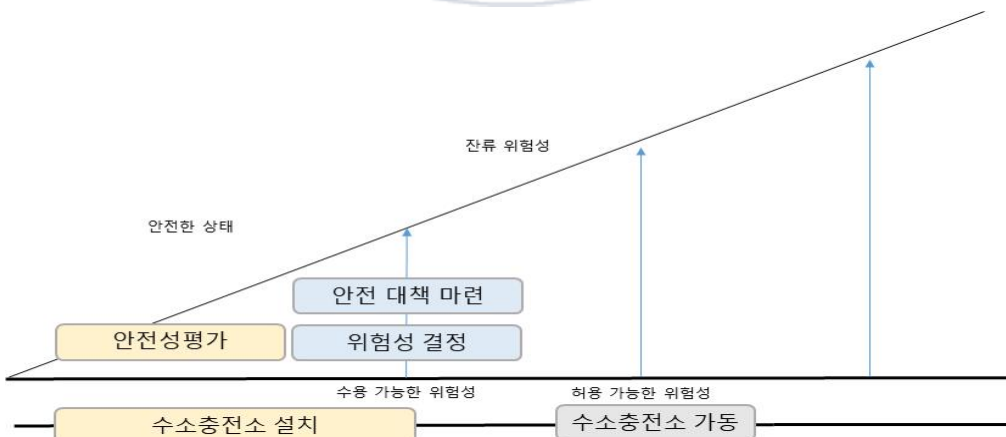


그림 19. 수소충전소 설치 전 단계 안전성 평가 및 위험성 결정

그림 20은 설치 후 가동 단계에서 발생 가능한 위험성이다. 가로는 위험의 크기이고 세로는 안전성으로 이는 ‘수용 가능한 위험영역’ 외 추가적으로 잔류위험성을 감소시킬 수 있는 ‘허용 가능한 위험영역’을 나타낸다. 가동단계에서 발생 가능한 가동중단으로 인한 운영주의 경제적 손실과 소비자의 이용 편의성 저하로 인한 불만 등을 사유로 현재 발생하고 있거나 또는 발생 가능한 시나리오를 바탕으로 안전대책을 마련해야 하는 위험영역이다. 위험분석을 적용하여 위험성을 결정한다.

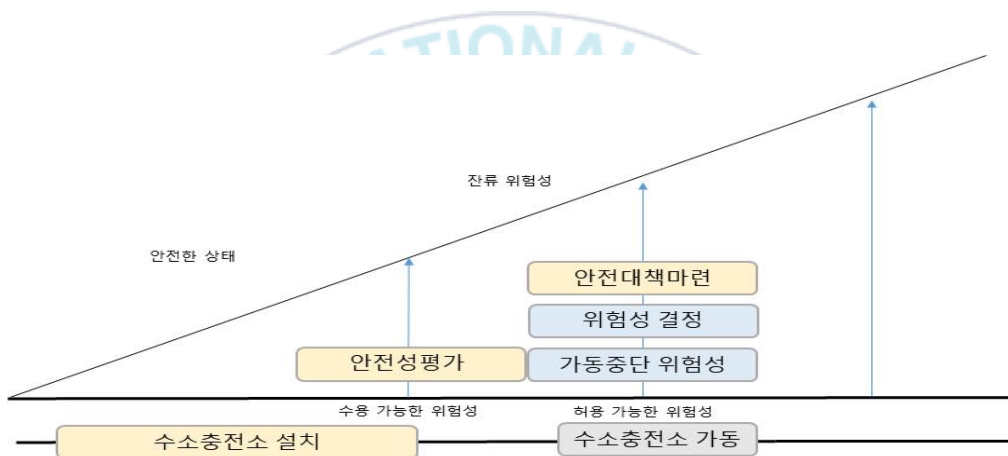


그림 20. 수소충전소 가동중단 위험성 평가

안전성평가 시기상 가동 중에 발생 가능한 가동중단을 포함한 사고에 대한 대응방안에 관하여 현재로서는 표준이나 매뉴얼이 없는 상태이다. 그러나 가동 중 발생 가능한 위험에 대해서도 위험분석과 재해경감활동 적용으로 위험성의 감소효과가 있는지 확인한다. 현재 시행중인 위험성평가는 사고예방 즉 설계자의 의도를 벗어난 위험이 없는 공학적 위험성을 평가하는 한계를 가지고 있다. 따라서 가동 중 발생하거나 발생 가능한 시나리오에 대한 위험분석과 재해경감활동 적용은 업무연속성의 강화에 어떠한 영향을 주는지 확인하고자 한다.

4.3 수소충전소 가동 중 발생가능한 위험

수소충전소 가동 중 발생하는 또는 발생 가능한 여러 가지 가동 중단 사유가 있다. 표 15는 표 14의 수소충전소의 위험요인 및 위험 영향을 시나리오로 하여 현재 실시하고 있는 설치 전 단계 위험평가와 비교해 보았다. 결과에서 나타나듯이 수소충전소 가동 중 발생 가능한 각종 위험 시나리오에 대하여 설치 전 단계 위험성평가에서는 평가가 거의 이루어지지 않고 있다. 따라서 선제적 예방대책이나 체계적인 대응방안을 갖추지 못하고 있는 부분이 많이 있다. 이러한 결과는 더욱 확장 시킬 수 있는 ‘수용 가능한 위험영역’이 있음에도 ‘허용 가능한 위험영역’으로 남아 있는 위험이 여러 가지 있다는 것을 나타낸다. 이러한 위험 중 일부분이지만 위험분석과 재해경감활동 적용을 통해 ‘수용 가능한 위험영역’으로 분류 할 수 있는지를 검증하고자 한다.

표 15. 수소충전소의 설치 전 단계 위험성 평가 비교

위험 요인	위험 영향	설치 전 단계 위험성 평가 비교
주요 설비 고장	가동 중단, 고장 수리	일부 평가
안전관리자 부재	가동 중단	일부 평가
불규칙적인 수소공급	가동 불규칙	미평가
소모성 부품 수급 불균형	부품 표준화 진행 중	미평가
수소 공급가 인상	수익성 저하, 가동 중단	미평가
운송관리자 파업	가동 불규칙, 가동 중단	미평가
각종 재해 등 외부 요인	가동 중단	일부 평가

V. STPA 위험분석과 재해경감활동 적용

5.1 STPA 분석항목 도출

수소충전소는 재해경감활동을 위한 ‘기업의 자율 활동 지원에 관한 법 제 2조 1항’의 규정에 의해 기업재난관리표준을 기반으로 기업의 재해경감 활동을 위해 노력해야 하는 대상기업이지만 실질적으로는 재해경감활동계획수립을 하고 있는 수소충전소는 현재는 없다.

재해경감활동은 업무의 연속성을 의미한다. 그러나 현재 수소충전소 운영 중 빈번하게 발생하는 가동 중단 사례는 업무의 연속성을 저해할 뿐 아니라 운영주의 입장에서 운영의 안전성을 확보하지 못하고, 사용자 입장에서는 이용소비의 불편함을 초래하고 있다. 이에 수소충전소 설치 전 단계의 위험성 평가 항목에서 적용하지 않는 가동 중 발생 가능한 위험요인을 업무연속성이라는 재해경감활동의 개념을 적용하여 STPA 분석항목을 도출하였다.

표 16에 나타나듯이 7가지 위험 요인은 위험 발생 시 대부분 그 영향이 가동중단 사태를 초래하고 있다. 재해경감활동은 업무의 연속성을 목표로 한다. 그리고 그 계획단계에서 실시하고 있는 위험성평가에는 각종 업무중단 가능성이 있는 위험 시나리오를 선정하여 평가·분석·처리 계획을 준비한다. 따라서 본 연구는 재해경감활동의 업무연속성을 적용하여, STPA 위험분석 항목을 가동중단 사태를 유발하는 위험 요인으로 한정하고 그 중에서 현재는 미평가 중이나 부품표준화가 진행 중인 ‘소모성부품

수급불균형'을 제외한 3가지 항목에 대하여 STPA 분석을 활용하여 위험 평가·분석하고자 한다.

표 16. 수소충전소의 위험성평가와 재해경감활동 적용가능 비교

위험 요인	위험 영향	현재 위험성 평가	재해경감 활동 적용
주요 설비 고장	가동중단 (고장수리)	일부평가	가능
안전관리자 부재	가동중단	일부평가	가능
불규칙적인 수소공급	가동 불규칙	미평가	가능
소모성 부품 수급 불균형	가동중단 (고장수리)	미평가	가능
수소 공급가 인상	가동중단, 수익성 저하	미평가	가능
운송관리자 파업	가동중단, 가동 불규칙	미평가	가능
각종 재해 등 외부 요인	가동중단	일부평가	가능

표 17는 STPA 분석항목과 위험영향, 그리고 기존평가 분석여부이다.

표 17. STPA 분석 항목

STPA 분석 항목	위험 영향	기존 평가
불규칙적인 수소공급	가동 불규칙	X
수소 공급가 인상	수익성 저하, 가동 중단	X
운송관리자 파업	가동 불규칙, 가동중단	X

따라서 본 연구에서는 도출된 3가지 위험 시나리오와 기존의 평가에서 적용하고 있는 가동 중단을 초래하는 4가지 위험을 재해경감활동 위험분석 · 평가 · 처리과정을 적용하여 운영안전성이 강화되는지 검증한다.

5.2 수소충전소에 대한 STPA 및 재해경감활동 적용

5.2.1 STPA 위험분석

STPA 기반 위험분석은 사고정의에서 시작하여 원인 시나리오 도출을 수행하는 분석체계를 가지며, 또 다른 특징 중 하나는 분석 과정에서 안전 제약사항(Safety Constraint)과 안전 요구사항(Safety Requirement)을 도출할 수 있다는 것이다.

안전 제약사항은 위험을 발생시키지 않도록 하기 위한 시스템 수준의 요건을 의미하며 안전 요구사항은 구성요소(Component) 수준의 요건을 의미한다[37].

1) STPA 1단계

STPA 준비 1단계로 전제 조건을 결정해야 한다. STEP 0 ▶ Preparation 1 ▶ Define Preconditions 입력단계로 분석대상 시스템을 명확히 하는 작업이며 분석 범위 내 시스템의 프로세스 및 전제조건을 결정한다. 연구자는 전제조건을 ‘수소충전소는 항상 적정량의 수소연료를 보유하고 충전가능상태를 유지하여야 하며, 이용 소비자는 적정 가격수준으로 상시 이용이 가능하여야 한다.’라고 설정하였다(그림 21).

ID	Name
Pre-1	수소충전소는 항상 적정량의 수소연료를 보유하고 충전 가능상태를 유지하여야 하며, 이용소버저는 적정가격 수준으로 상시 이용이 가능하여야 한다.

그림 21. STPA 위험분석(Define Preconditions)

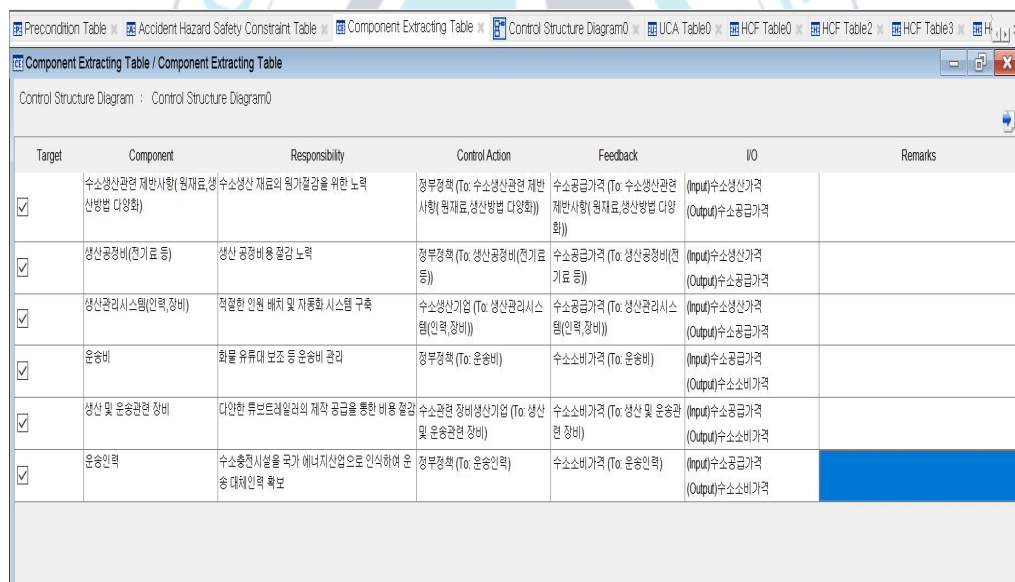
STPA 1단계의 다음절차는 STEP 0 ▶ Preparation 1 ▶ identifying Accidents, Hazard, Safety Constraints 입력단계이다. 분석대상 시스템을 이해하고, 가정이나 전제조건을 결정한 후, 어떤 사고에 대해 분석 할 것인지 명확히 하는 단계이다. 먼저, 어떤 사고를 분석 할 것인지 결정하고 위험, 즉 사고를 유발하는 시스템 조건을 추출한다. 그리고 사고를 방지하기 위해 대상의 안전을 유지하기 위한 제한사항을 추출한다.

Accident ID	Accident	Hazard ID	Hazard	Safety Constraint ID	Safety Constraint
A1	수소충전소의 일시적 가동 중단	H1	수소공급이 불규칙적이다.	SC1	수소공급은 수소충전소 운영자 요청시 즉시 공급되어야 한다
A1	수소충전소의 일시적 가동 중단	H2	수소공급가격이 갑자기 인상했다	SC2	수소공급가격은 적정수준을 유지하여감작스러운 소비가격 급등을 초래하지 않아야 한다
A1	수소충전소의 일시적 가동 중단	H3	운송관리자의 파업으로 수소공급이 중단되었다	SC3	운송관리자 파업이나 대업과 같은 사고 발생시 대체운송인력을 확보하여 공급에 차질이 없도록 한다

그림 22. STPA 위험분석(Accident, Hazard, Safety Constraint)

연구자는 발생 가능한 Hazard를 ‘수소 공급의 불규칙, 수소공급 가격의 인상, 운송관리자의 파업’으로 설정하고, Accident를 ‘수소충전소의 일시적 가동중단’으로 설정하였다. 그리고 Safety Constraint를 ‘수소공급은 수소충전소 운영자 요청 시 즉시 공급이 이루어져야 한다. 수소공급가격은 적정 수준을 유지하여 갑작스러운 소비가격의 급등을 초래하지 않아야 한다. 운송관리자 파업이나 태업 시 대체운송 인력을 확보하여 공급에 차질이 없도록 한다.’라고 입력하였다(그림 22).

다음은 분석할 성분 추출단계이다. STPA 절차에서 STEP 0► Preparation 1► Exactract Components to Analyze를 입력한다.



Target	Component	Responsibility	Control Action	Feedback	I/O	Remarks
☒	수소생산관련 제반사항(원재료, 생산/수소생산 재료의 원가절감을 위한 노력 산방법 다양화)		정부정책 (To: 수소생산관련 제반 사항(원재료, 생산방법 다양화))	수소공급가격 (To: 수소생산관련 제반사항(원재료, 생산방법 다양화))	(Input)수소생산가격 (Output)수소공급가격	
☒	생산공정비(전기료 등)	생산 공정비용 절감 노력	정부정책 (To: 생산공정비(전기료 등))	수소공급가격 (To: 생산공정비(전기료 등))	(Input)수소생산가격 (Output)수소공급가격	
☒	생산관리시스템(인력, 장비)	적절한 인력 배치 및 자동화 시스템 구축	수소생산기업 (To: 생산관리시스템(인력, 장비))	수소공급가격 (To: 생산관리시스템(인력, 장비))	(Input)수소생산가격 (Output)수소공급가격	
☒	운송비	화물 유통대 보조 등 운송비 관리	정부정책 (To: 운송비)	수소소비가격 (To: 운송비)	(Input)수소공급가격 (Output)수소소비가격	
☒	생산 및 운송관련 장비	다양한 튜브트레이러의 제작 공급을 통한 비용 절감 및 운송관련 장비	수소관련 장비생산기업 (To: 생산 및 운송관련 장비)	수소소비가격 (To: 생산 및 운송관련 장비)	(Input)수소공급가격 (Output)수소소비가격	
☒	운송인력	수소충전시설을 국가 에너지산업으로 인식하여 운송 대체인력 확보	정부정책 (To: 운송인력)	수소소비가격 (To: 운송인력)	(Input)수소공급가격 (Output)수소소비가격	

그림23. STPA 위험분석(Exactract Components to Analyze)

연구자는 분석대상 Component를 6가지 선정하여 입력하였다. 그리고 그 Responsibility에 대하여 간략하게 정리하였다. Control Action은 정부의

정책 시스템과 기업의 운영 시스템으로 크게 2가지로 구분하였다. 그리고 Feedback은 수소충전소와 수소이용 소비자이고 Feedback 대상은 수소공급 가격과 수소소비가격이다. 실질적으로 가장 정확한 Feedback을 할 수 있는 대상이라 생각했기 때문이다. 그림 23은 수소생산과정부터 소비과정까지 하나의 시스템으로 가정하고 분석과정을 진행하였다.

표 18은 그림 23을 간략하게 정리한 것이다.

표 18. STPA 분석과정 중 분석을 위한 구성요소 추출

Component	Responsibility	Control Action	Feedback
수소생산관련 제반사항 (원재료, 생산방법 다양화)	수소생산 재료의 원가절감을 위한 노력	정부정책	수소공급가격
생산공정비 (전기료 등)	생산 공정비용 절감 노력	정부정책	수소공급가격
생산관리시스템 (인력, 장비)	적절한 인원 배치 및 자동화 시스템 구축	수소생산기업	수소공급가격
운송비	화물 유류대 보조 등 운송비 관리	정부정책	수소소비가격
생산 및 운송관련 장비	다양한 튜브트레일러의 제작 공급을 통한 비용 절감	수소관련 장비생산기업	수소소비가격
운송인력	수소충전시설을 국가에너지산업 으로 인식하여 운송대체인력 확보	정부정책	수소소비가격

2) STPA 2단계

입력한 1단계가 그림 24와 그림 25의 다이어그램 형태로 나타난다. 다이어그램은 입력한 구성요소별로 각각 생성되었다. 연구자는 분석하고자 하는 수소충전소의 위험요인 특성 상 하드웨어나 소프트웨어 운영 중 발생 가능한 위험이 아닌 조직이나 제도적인 시스템 구성요소를 반영하기에 다이어그램 각각의 구성요소를 수소충전소 운영시스템 전체의 구성에 반영하여 제어 구조 다이어그램을 생성하였다.

전체 구조도가 시스템을 이해하고 위험요인을 식별하기가 용이하다는 판단이기 때문이다. 그리고 이는 그림 24와 그림 25의 과정을 거쳐 그림 26으로 도식화 할 수 있다.

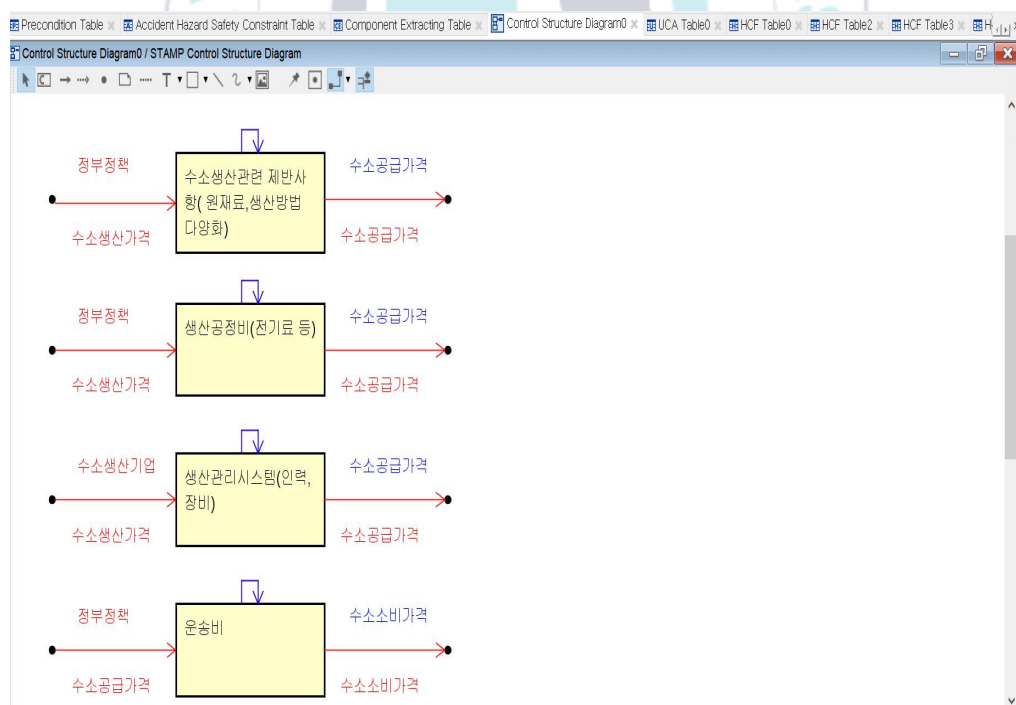


그림 24. STPA 위험분석(Control Structure Diagram 1)

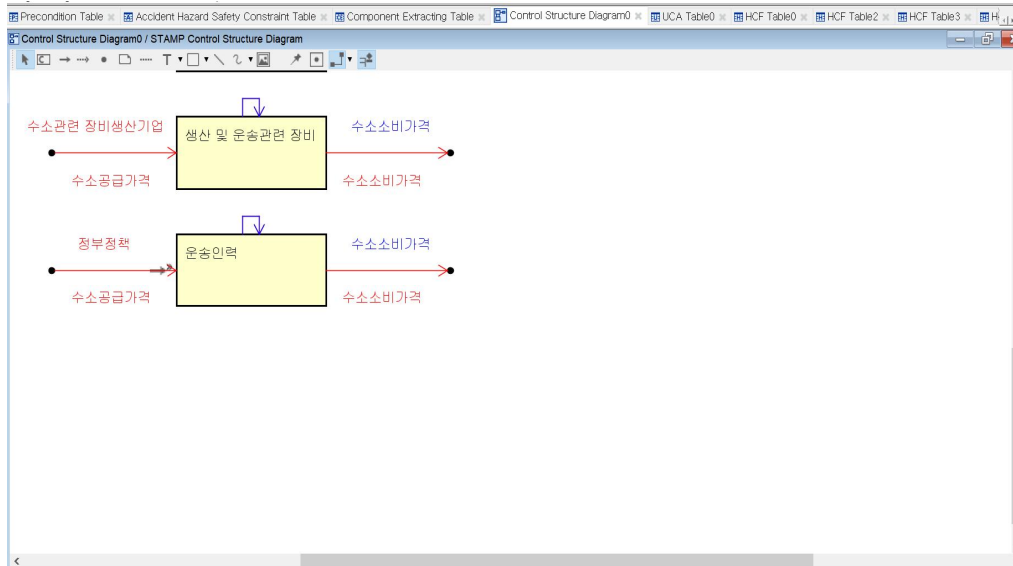


그림 25. STPA 위험분석(Control Structure Diagram 2)

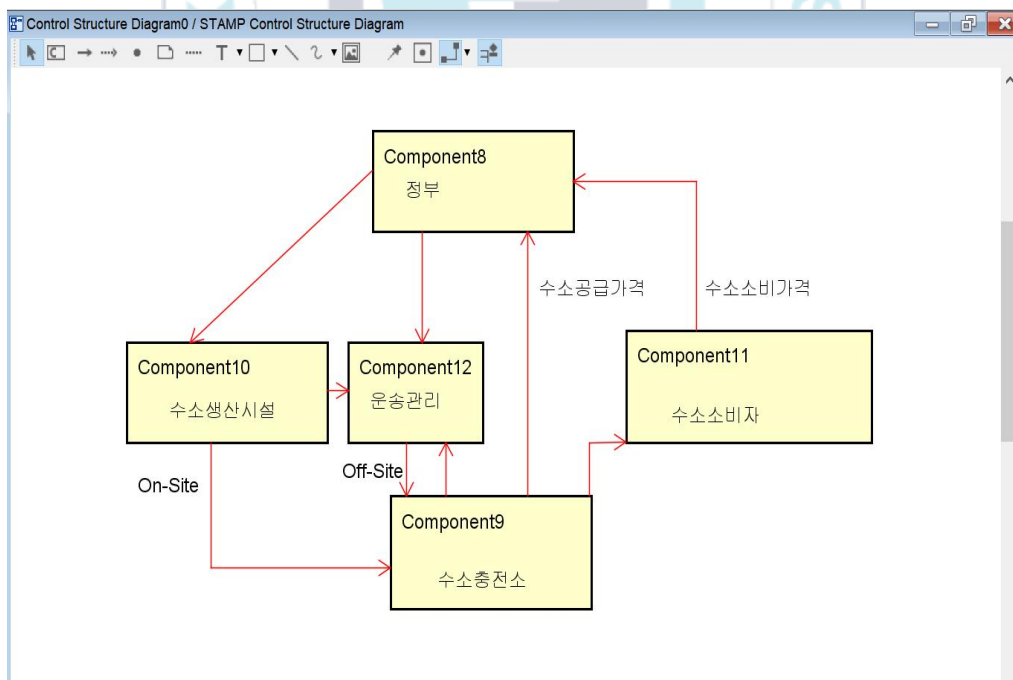


그림 26. STPA 위험분석(Control Structure Diagram 3)

3) STPA 3단계

다음은 STPA 절차 STEP 1 UCA(Unsafe Control Action) 추출 단계이다. UCA는 시스템의 위험을 유발할 수 있는 Control Action의 불안전한 형태를 의미한다. 연구자는 Control Action을 ‘정부정책과 수소관련 기업’ 2가지로 구분하였다. 수소관련기업에는 수소생산기업과 수소관련 장비생산 기업을 포함한다. 그리고 Control Action에서 UCA를 도출하기 위해서는 두 가지 요소가 필요한데 Controller가 Control Action을 제공하는 형태와 해당 Control Action이 행해지는 상황, 조건이다. Control Action이 불안전할 수 있는 형태는 표 19와 같이 크게 4가지 유형으로 구분되어 있다. 연구자는 4가지 불안전한 유형 중 ‘Not Providing Causes Hazard’ 유형을 적용하였다.

표 19. 위험을 유발할 수 있는 불안전한 Control Action의 4가지 유형

유형	설명
Not Providing Causes Hazard	Control Action을 제공하지 않아서 위험이 발생 할 수 있음
Providing Causes Hazard	Control Action을 제공하여 위험이 발생 할 수 있음
Too Late, Too Soon, Out of order	Control Action을 제공 하였으나, 너무 늦게 또는 너무 빨리, 또는 잘못된 순서로 제공하여 위험이 발생 할 수 있음
Stopped Too Soon/Applied Too Long	Control Action이 너무 이른 시점에 제공이 종료되거나 너무 오랫동안 제공하여 위험이 발생 될 수 있음

출처: STPA를 활용한 위험분석 가이드(과학기술정보통신부,2018)

분석대상의 구조를 제어구조로 구축한 후, 제어행위에 대한 관점에서 해당 제어행위가 위험행위로 이어질 수 있는지 여부를 분석한다.

그림 27은 UCA Table을 이용하여 분석한 것이다.

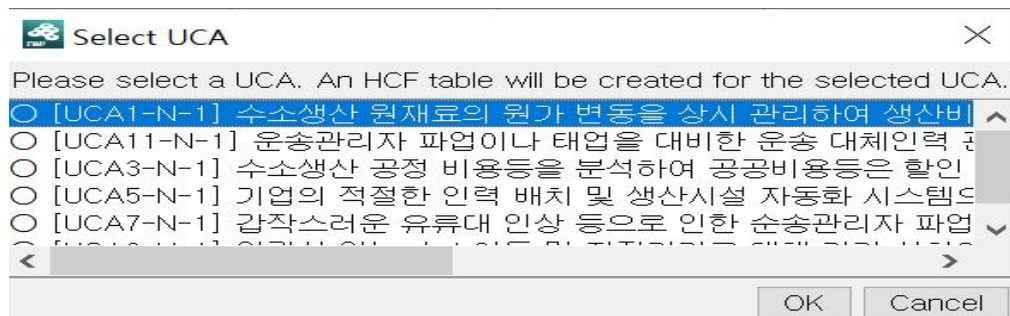


그림 27. STPA 위험분석(UCA Table)

연구자는 각 제어 조치에 대하여 ‘Not Providing Causes Hazard’의 관점에서 분석을 하였다. 그 입력 결과는 그림 28과 같다.

No	CA	From	To	CA Providing Condition	Not Providing	Providing causes hazard	Too early / Too late	Stop too soon / Applying too long
1	정부정책	수소생산관련 제반사항(원재료, 생산방법 다양화)	수소생산관련 제반사항(원재료, 생산방법 다양화)	정부는 정책적으로 수소생산 원가절감을 위해 액화수소, 미생물 추출 수소, 암모니아 수소 등 다양한 형태의 수소생산시스템을 개발하고 적극 지원해야 한다.	(UCA1-N-1) 수소생산 원재료의 원가 변동을 상시 관리하여 생산비용시스템을 모니터링 시스템 구축 [SC2]			
2	정부정책	생산공정비(전기료 등)	생산공정비(전기료 등)	정부는 수소생산 원가 절감을 위하여 생산공정과 관련한 공공비용 등에 대하여는 적극 지원해야 한다.	(UCA3-N-1) 수소생산 공정비용등을 분석하여 공공비용등은 할인 할 수 있도록 비용분석 시스템 구축 [SC2]			
3	수소생산기업	생산관리시스템(인력, 장비)	생산관리시스템(인력, 장비)	수소생산 기업은 적절한 인력 배치 및 기계화 작업을 통하여 생산 안전성을 관리하여야 한다.	(UCA5-N-1) 기업의 적절한 인력 배치 및 생산시설 자동화 시스템으로 인력 파업이나 태업 등으로 생산 간헐 등이 발생하지 않도록 관리시스템을 구축 [SC1][SC2]			
4	정부정책	운송비	운송비	정부는 운송비 급등에 따른 판매가 상승을 관리하기 위하여 보조금 지급 등 운송시스템 관리를 적극 지원해야 한다.	(UCA7-N-1) 갑작스러운 유류대 인상 등으로 인한 운송관리자 파업 등에 대비하여 운송관리 시스템 구축 [SC1]			
5	수소관련 장비생산기업	생산 및 운송관련 장비	생산 및 운송관련 장비	수소생산 장비관련 기업은 보다 다양하고 안전한 장비의 개발에 적극 노력해야 한다.	(UCA9-N-1) 일관성 없는 수소 이동 및 저장기기로 대체 기기 설치의 어려움이 있어 빠른 시일 내 규격화 및 다양한 기기 생산 [SC1]			
6	정부정책	운송인력	운송인력	정부는 수소충전소를 국가에너지 산업의 일부로 인식하고 운송관리자 파업시 대체인력 투입을 적극 검토하여야 한다.	(UCA11-N-1) 운송관리자 파업이나 태업을 대비한 운송 대체인력 관리 시스템 구축 [SC1][SC3]			

그림 28. UCA Table 입력 결과

4) STPA 4단계

다음 단계는 원인 시나리오 도출 단계이다. 3단계에서 Control Action을 바탕으로 위험을 유발할 수 있는 UCA를 도출하였다. 이번 단계에서는 위험을 유발할 수 있는 UCA가 왜 발생하는지 그 원인을 분석한다. 그 원인 (Causal factor)들은 크게 두 가지 유형으로 분류할 수 있다. 첫 번째는 Control Action이 왜 불안전하게 제공 되었는지, 즉 Controller가 UCA를 제공한 원인이 무엇인지를 도출하는 것이고, 두 번째는 Control Action 이 부적절하게 수행되거나 수행되지 못한 것에 대한 원인이다. 연구자는 첫 번째 유형의 질문에서 Controller가 적절한 Control Action을 제공하지 않아서라는 원인에 초점을 맞추었다. 즉 Controller 자체에 존재하는 부적절하거나 미흡한 Process Model 등이 원인이라 판단하고, 최종적으로 이러한 원인을 토대로 시나리오를 작성한다. 그림 29는 원인 시나리오 식별 방법이다.

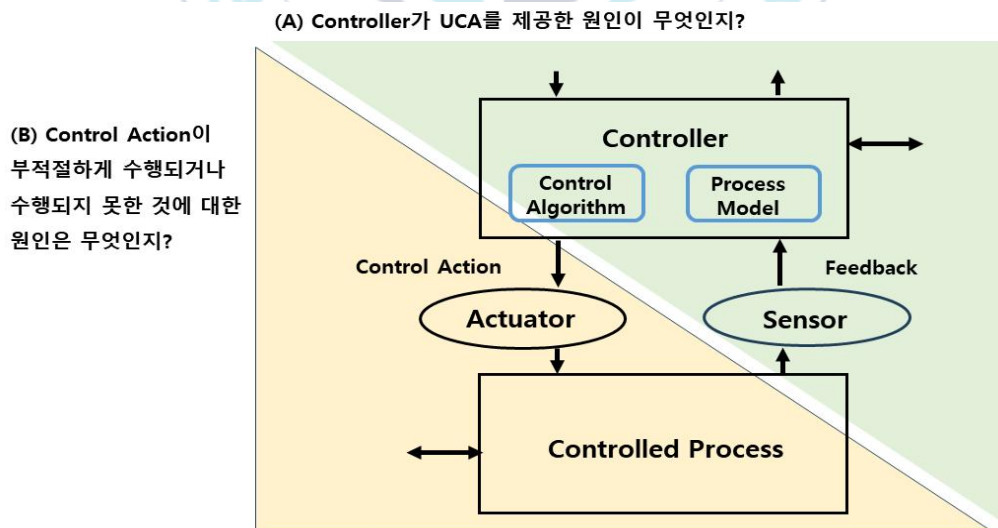


그림 29. Causal Scenario 식별 방법

출처: STPA HANDBOOK, Nancy G. Leveson (MIT,2018)

다음 절차는 STEP 2의 HCF 추출 - Control Loop Diagram 단계이다. UCA가 추출되면 UCA로 간주되는 각 제어 조치에 대한 위험요인을 식별한다. Control Loop Diagram의 분석방법 중 힌트 단어를 참조하여 HCF를 분석하는 방법이 있다. Control Loop Diagram에서 Tool Bar▶Hint Word Set을 이용한다. 그러면 그림 30, 그림 31와 같은 힌트 단어가 표시된다.

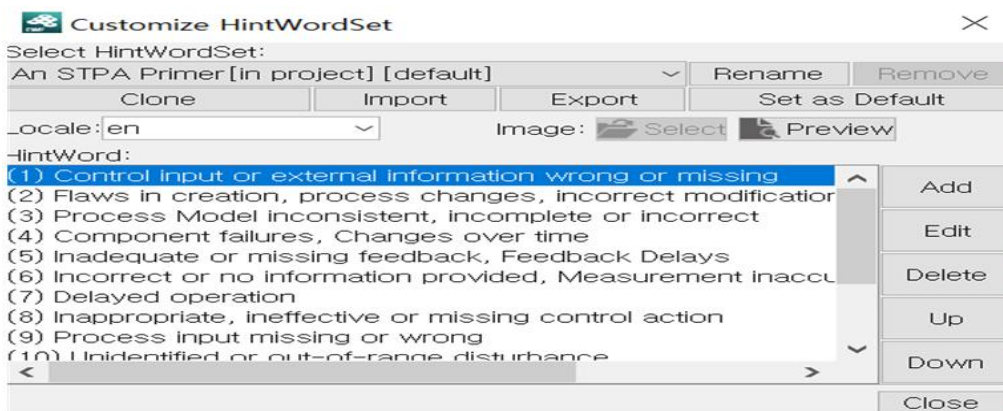


그림 30. STPA 위험분석(Hint Word Set 1)

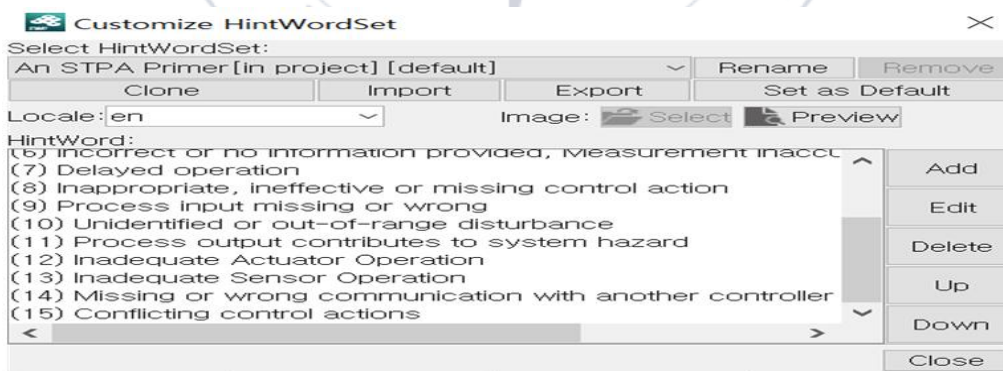
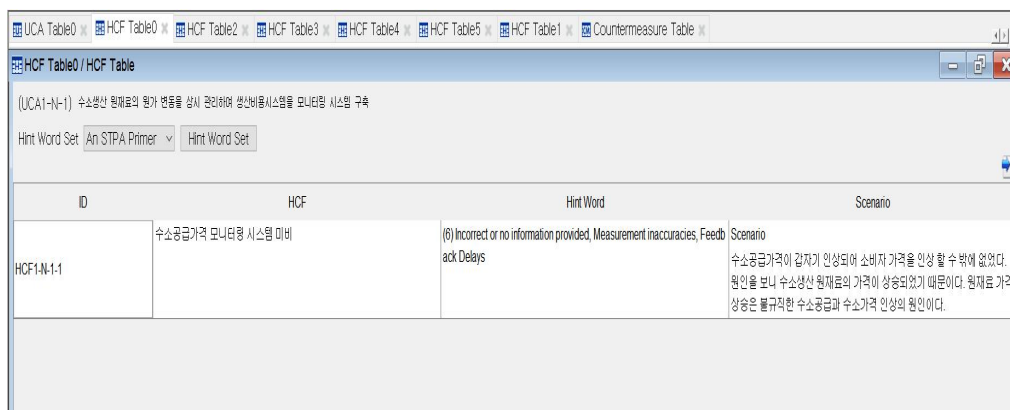


그림 31. STPA 위험분석(Hint Word Set 2)

위 절차에 따라 추출된 HCF를 HCF Table로 정리한다. 그림 32부터 그림 37은 UCA 각각의 HCF를 입력하는 과정이다.

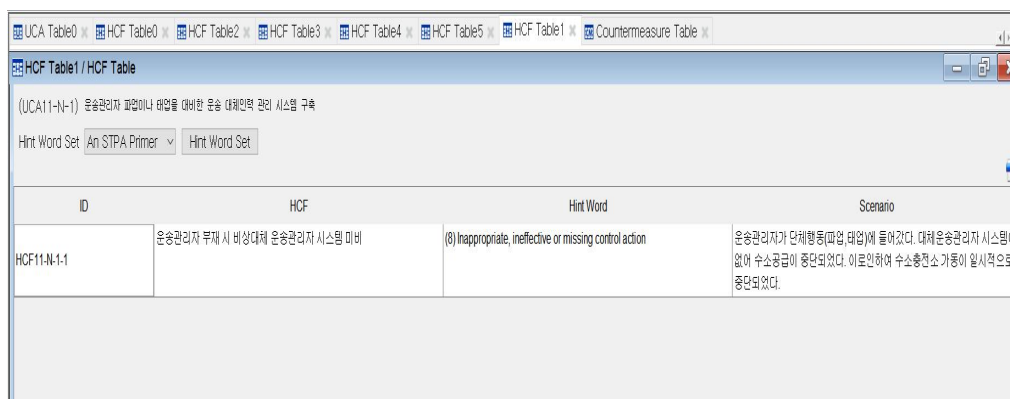
그림32는 수소공급가격 관련 HCF에 Incorrect or information provided, Measurement inaccuracies, Feedback Delays라는 Hint Word를 적용하여 시나리오를 도출한 것이다.



ID	HCF	Hint Word	Scenario
HCF1-N-1-1	수소공급가격 모니터링 시스템 미비	(8) Incorrect or no information provided, Measurement inaccuracies, Feedback Delays	수소공급가격이 갑자기 인상되어 소비자 가격을 인상 할 수 밖에 없었다. 원인을 보니 수소생산 원재료의 가격이 상승되었기 때문이다. 원재료 가격 상승은 불규칙한 수소공급과 수소가격 인상의 원인이다.

그림 32. STPA 위험분석 HCF 도출(HCF Table 0)

그림33은 운송관리자부재 관련 HCF에 Inappropriate ineffective or missing control action 이라는 Hint Word를 적용하여 시나리오를 도출한 것이다.



ID	HCF	Hint Word	Scenario
HCF11-N-1-1	운송관리자 부재 시 비상대체 운송관리자 시스템 미비	(8) Inappropriate, ineffective or missing control action	운송관리자가 단체행동(파업, 퇴업)에 들어갔다. 대체운송관리자 시스템이 없어 수소공급이 중단되었다. 이로인하여 수소충전소 가동이 일시적으로 중단되었다.

그림 33. STPA 위험분석 HCF 도출(HCF Table 1)

그림34는 수소생산 공정비용 관련 HCF에 Incorrect or information provided, Measurement inaccuracies, Feedback Delays라는 Hint Word를 적용하여 시나리오를 도출한 것이다.

ID	HCF	Hint Word	Scenario
HCF3-N1-1	수소생산 공정비용 분석 및 관리시스템 미비	(6) Incorrect or no information provided, Measurement inaccuracies, Feedback Delays	수소생산 제반 공정비용이 상승하였다. 전기세 인상 및 인건비 인상에 주요 원인이다. 이는 공급가격의 인상을 초래하고 또한 소비가격의 인상을 야기한다.

그림 34. STPA 위험분석 HCF 도출(HCF Table 2)

그림35는 수소생산기업의 시스템관련 HCF에 Inappropriate ineffective or missing control action 이라는 Hint Word를 적용하여 시나리오를 도출한 것이다.

ID	HCF	Hint Word	Scenario
HCF5-N1-1	수소생산 기업의 적절한 인력관리 시스템 및 설비 자동화 시스템 미구축	(8) Inappropriate, ineffective or missing control action	생산시설 인력의 파업 및 대업 사태가 발생하였다. 이로 인하여 수소생산량이 적정 수준에 미치지 못하였다. 그리고 그 결과 불규칙한 수소공급을 유발하고 수소충전소의 일시적인 가동 중단사태를 초래하였다.

그림 35. STPA 위험분석 HCF 도출(HCF Table 3)

그림36은 운송과정관련 HCF에 Inappropriate ineffective or missing control action 이라는 Hint Word를 적용하여 시나리오를 도출한 것이다.

ID	HCF	Hint Word	Scenario
HCF9-N-1-1	수소운송과정 모니터링 시스템 미비	(8) Inappropriate, ineffective or missing control action	유류다 인상으로 인한 운송량이 상승하였다. 이로 인해 수소공급가격이 인상되었다. 이는 수소충전소의 수익성 저하 및 소비가격 인상을 초래하였다. 또한 수소차 판매의 급감이라는 결과를 가져왔다.

그림 36. STPA 위험분석 HCF 도출(HCF Table 4)

그림37은 설비 및 장비의 규격화, 가격관련 HCF에 Incorrect or information provided, Measurement inaccuracies, Feedback Delays라는 Hint Word를 적용하여 시나리오를 도출한 것이다.

ID	HCF	Hint Word	Scenario
HCF9-N-1-1	수소생산 및 운송 관련 설비 및 장비의 규격화 및 가격관리시스템 미비	(6) Incorrect or no information provided, Measurement inaccuracies, Feedback Delays	각종 장비의 비규격화 및 대체장비 부족사태는 장비의 가격 상승요인이다. 이는 수소공급 및 소비 가격의 상승을 유발한다.

그림 37. STPA 위험분석 HCF 도출(HCF Table5)

HCF 도출 과정 중 Hint Word를 적용하면 그림 38과 같은 An STPA Primer를 제공한다.

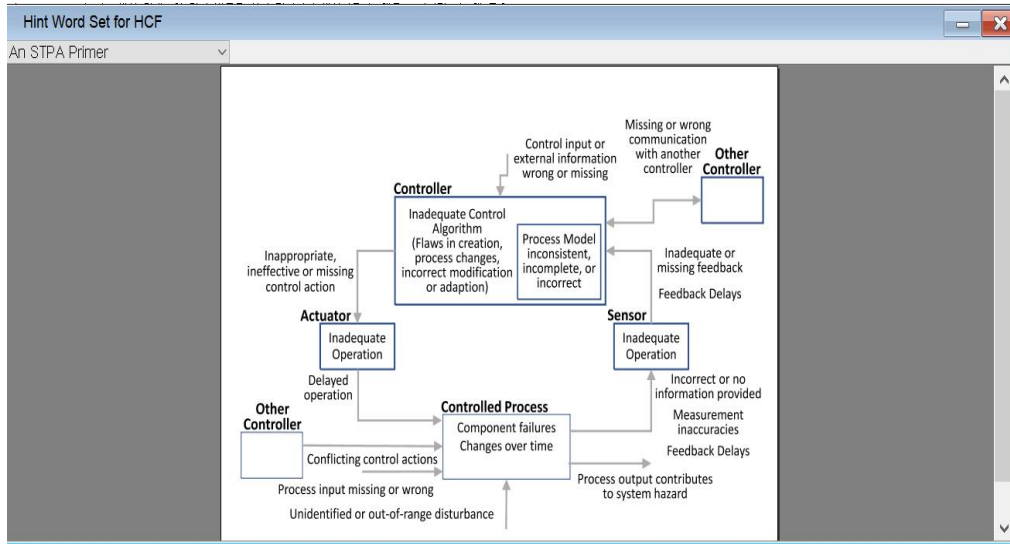


그림 38. An STPA Primer

위 과정이 완료되면 STPA 절차의 마지막 단계인 STEP 3 대응책을 고려하는 과정이다. STPA 절차에서 Countermeasure 단계이다. 그림 39는 Countermeasure 입력 후 결과이다.

HCFID	HCF	CountermeasureID	Countermeasure	UCA	Components	Remarks
HCF1-N-1-1	수소공급가격 모니터링 시스템 미비	M1	정무 정책	(UCA1-N-1) 수소생산 원재료의 원가 변동률 상승 관리하여 생산비용시스템을 모니터링 시스템 구축 [SC2]	생산공정비(전기료 등) 생산관리시스템(인력, 장비) 수소생산관련 제반사항(원재료, 생산방법 다양화) 운송인력	
HCF11-N-1-1	운송관리자 무재 시 비상대처 운송관리자 시스템 미비	M1	정무 정책	(UCA11-N-1) 운송관리자 피임이나 태만을 대비한 운송 대체인력 관리 시스템 구축 [SC1][SC3]	생산공정비(전기료 등) 생산관리시스템(인력, 장비) 수소생산관련 제반사항(원재료, 생산방법 다양화) 운송인력	
HCF3-N-1-1	수소생산 공정비용 분석 및 관리시스템 미비	M1	정무 정책	(UCA3-N-1) 수소생산 공정 비용들을 분석하여 공공비용들은 할인 할 수 있도록 비용 분석시스템 구축 [SC2]	생산공정비(전기료 등) 생산관리시스템(인력, 장비) 수소생산관련 제반사항(원재료, 생산방법 다양화) 운송인력	
HCF5-N-1-1	수소생산 기압의 적절한 인력관리 시스템 및 설비 자동화 시스템 구축	M2	수소관련 기업 운영지침	(UCA5-N-1) 기압의 적절한 인력 배치 및 생산시설 자동화 시스템으로 인력 피로이나 태만 등으로 생산 연속률이 발생하지 않도록 관리시스템을 구축 [SC1][SC2]	생산 및 운송관련 장비 생산관리시스템(인력, 장비)	
HCF7-N-1-1	수소운송과정 모니터링 시스템 미비	M1	정무 정책	(UCA7-N-1) 간접생산 유통에 이상으로 인한 운송관리자 피로 등에 대비하여 운송관리 시스템 구축 [SC1]	생산공정비(전기료 등) 생산관리시스템(인력, 장비) 수소생산관련 제반사항(원재료, 생산방법 다양화) 운송인력	
HCF9-N-1-1	수소생산 및 운송 관련 설비 및 장비의 규격화 및 가력관리시스템 미비	M2	수소관련 기업 운영지침	(UCA9-N-1) 일관성 없는 수소이동 및 저장기기로 대체 기기 설치와 어려움이 있어 빠른 시일 내 규격화 및 다양화 기기 생산 [SC1]	생산 및 운송관련 장비 생산관리시스템(인력, 장비)	

그림 39. STPA 위험분석(Countermeasure Table)

Primer를 기반으로 HCF를 도식화 하면 그림 40으로 정리할 수 있다.

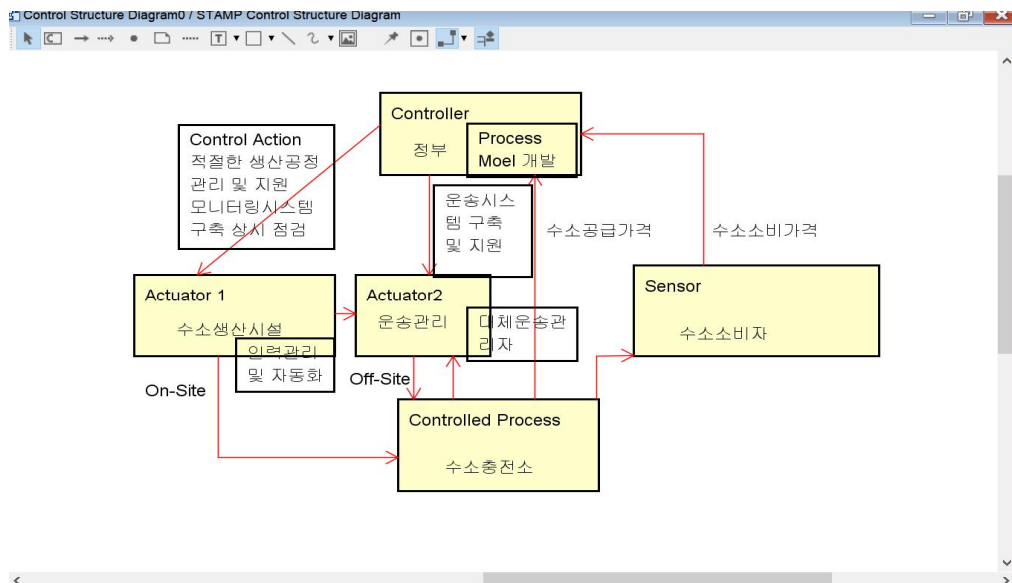


그림 40. HCF Primer 기반 도식화

STPA 위험분석 과정을 정리하면 ‘수소충전소는 항상 적정량의 수소연료를 보유하고 충전가능상태를 유지하여야 하며, 이용 소비자는 적정 가격 수준으로 상시 이용이 가능하여야 한다.’라는 전제조건하에 3가지 Hazard와 ‘수소충전소 가동중단’이라는 Accident를 설정하였다. 다음 분석대상 Component 6가지와 Control Action 2가지를 설정하고, 이를 ‘Not Providing Cause Hazard’ 관점에서 UCA를 도출하였다. 도출된 UCA를 Hint Word를 적용하여 HCF를 추출하고 마지막 단계로 Countermeasure를 입력하였다.

표 20은 STPA 분석 결과이다. 3가지 위험요인에 대하여 위험영향을 분석하고 위험원인요소를 찾았다. 결과에 나타나듯이 대부분 위험원인요소는

운영과 관련된 시스템미비라 할 수 있다. 사업의 초기단계라는 점을 감안한다면 지금이라도 정부와 수소생산관련 기업은 운영과 관련된 제반시스템을 구축해야 할 것으로 판단된다.

표 20. STPA 분석결과 정리

위험요인	위험영향	위험원인요소	대책
수소공급 불규칙	수소충전소 가동 일시중단	- 수소생산 비용분석 및 관리시스템 미비 - 수소생산기업의 적절한 인력관리시스템 및 설비자동화시스템 미흡 - 수소연료 운송모니터링 시스템 미비	정부의 정책 수립 및 수소생산기업의 시스템 구축
수소공급 가격인상	수익성 저하 수소충전소 가동 일시중단	- 수소공급가격 관리 모니터링시스템 미비 - 수소생산 및 운송과 관련된 설비와 장비의 규격화 및 가격관리 시스템 미비	정부의 정책 수립 및 수소관련 장비의 표준화와 수입 산 대비 가격 경쟁력 있는 제품개발
운송관리자 파업	수소충전소 가동 일시중단	- 운송관리자 부재 시 대체 운송관리시스템 미비	정부의 정책을 기반으로 정부와 기업의 비상운송 관리 시스템 구축

5.2.2 재해경감활동 위험평가 · 처리

STPA 분석을 적용한 3가지 시나리오와 기존의 위험성 평가단계에서 일부 평가가 이루어지고 있는 4가지 항목을 더해 총 7가지 항목에 대하여 재해경감활동계획의 위험평가 · 처리단계를 적용한다(표 21).

표 21 수소충전소의 재해경감활동 적용 위험 시나리오

위험 시나리오	위험 영향	위험 분석
수소충전소의 수소공급이 적절하게 이루어지지 않는다.	가동 일시중단 (공급가격상승)	STPA
수소충전소의 수소공급 가격이 갑자기 급등하였다.	가동 일시중단 (수익성 저하)	STPA
수소공급차량의 운송관리자가 파업으로 공급이 중단되었다.	가동 일시중단	STPA
수소충전소의 주요 설비(압축기, 디스펜서 등)가 고장이 났다.	가동 일시중단 (고장 수리)	설치 전단계 (운영 매뉴얼)
수소충전소의 주요 소모품의 수급이 적절하게 이루어지지 않는다.	가동 일시중단	표준화 진행중
수소충전소의 안전관리자의 부재사태가 발생했다.(휴가, 파업 등 근무지 이탈)	가동 일시중단	설치 전단계 (운영 매뉴얼)
외부적 요인에 의한 재난·재해가 발생하였다.	가동 일시중단	설치 전단계

수소충전소의 상시충전업무가 핵심 업무라는 전제 조건으로 위험성평가를 했기 때문에 업무영향분석을 통한 핵심업무 식별은 생략하고 재해경감활동의 위험평가, 그리고 처리과정까지 진행한다.

재해경감활동 처리과정을 진행하기 전 먼저 위험의 크기를 정량화 한다. 발생빈도와 업무영향도에 대한 평가를 하고 우선순위화하여 위험등급을 결정한다. 연구자는 기존의 평가표를 적용하지 않고 평가기준을 일부 조정하여 적용하였다.. 수소산업협회 관계자와 수소충전소 종사자, 수소생산업체 관계자 면담을 통해 기존의 평가기준이 일부분 과도한 결과가 산출 될 수 있음을 파악하고 기준을 조정하였다. 조정한 표는 표 22와 표 23이다.

표 22. 조정 위험발생빈도 등급(5등급)

등급	산식	설명
I	$5년 < F$	5년 초과시 1회 정도 발생
II	$3년 < F \leq 5년$	3년 초과 5년 이하에 1회 정도 발생
III	$1년 < F \leq 3년$	1년 초과 3년 이하에 1회 정도 발생
IV	$6개월 < F \leq 1년$	6개월 초과 1년 이하에 1회 정도 발생
V	$F \geq 6개월$	6개월 이하에 1회 정도 발생

출처: 재해경감활동 교재(행정안전부) 연구자 재구성

평가기준 조정 내용은 기존의 위험발생 빈도 기준이 너무 장기적 관점으로 설계되어 있어 현재 수소충전소의 산업특성과는 다소 괴리가 있다는 전문가의 의견을 반영하여 일부분 조정하였다. 취약요인으로 인한 재해 발생사례, 발생 통계자료, 발생예측 등을 통해 위험발생 빈도를 I ~ V등급으로 구분한다.

업무영향도는 업무재개까지의 소요 시간에 따라 I ~ V등급으로 구분한다. 즉, 업무중단 시간을 기준으로 5단계 등급으로 구분한다. 이 평가기준도 기존의 평가기준이 아직은 산업초기단계인 수소충전소운영 현실과는 다소 차이가 있다는 전문가의 의견을 반영하여 일부분 조정하였다.

표 23. 조정 업무영향도 등급(5등급)

등급	산식	설명
I	$S \leq 12\text{시간}$	재해발생 후 업무재개까지의 소요시간이 12시간 이내
II	$12\text{시간} < S \leq 24\text{시간}$	재해발생 후 업무재개까지의 소요시간이 12시간 초과 24시간 이내
III	$24\text{시간} < S < 1\text{주일}$	재해발생 후 업무재개까지의 소요시간이 24시간 초과 1주일 이내
IV	$1\text{주일} < S < 1\text{개월}$	재해발생 후 업무재개까지의 소요시간이 1주일 초과 1개월 이내
V	$S > 1\text{개월}$	재해발생 후 업무재개까지의 소요시간이 1개월 초과

출처: 재해경감활동 교재(행정안전부) 연구자 재구성

보정계수는 리스크 발생 빈도와 수준에 따라 각 사업장의 고유 특성을 반영하기 위해 적용한다. 위험수준에 가(+), 감(-)하는 요소를 적용한다.

최종등급은 A~D 4단계로 A단계(8~10점)는 위험이 매우 높음, B단계(6~7점)는 높음, C단계(4~5점)는 보통, D단계(2~3점)는 낮음 단계이다.

표 24는 위 산식을 분석 대상 위험 시나리오에 적용한 것이다. 발생의 빈도는 수소충전소의 운영기간이 비교적 짧은 편이고, 또한 그 수도 많지가 않아 운영 경험 부족으로 인한 데이터의 쓸림 현상이 있을 수 있음을 감안하였다.

위험의 빈도는 외부적 요인의 재해를 제외한 항목에서는 거의 Ⅲ~Ⅳ등급 수준이었다. 아직 10년 이상 운영한 사례는 없지만 거의 대부분의 수소충전소가 비슷한 이유로 가동 중단 경험을 하고 있다. 업무영향도는 조사한 사례에 의하면 몇몇 수소충전소는 고장 수리 지연으로 1개월 이상 중단 사태를 겪기도 하였으나 그 기간에 ‘코로나 19’ 사태라는 요소가 있어 V단계 적용이 아닌 Ⅲ단계를 적용하였다. 그리고 보정계수는 수소충전소가 안전 우선 시설이라는 점을 감안하여 위험수준 상향조정(+1) 하였다.

표 24. 위험 등급 산정

위험 시나리오	위험평가 산식적용	등급
수소충전소의 수소공급이 적절하게 이루어지지 않아 가동이 일시적으로 중단되었다	$7=3+3+1$	B
수소충전소의 수소공급 가격이 갑자기 급등하여 수익성이 저하되었다	$7=3+3+1$	B
수소공급차량의 운송관리자 파업으로 수소공급이 일시적으로 중단되었다.	$7=3+3+1$	B
수소충전소의 주요 설비(압축기, 디스펜서 등)가 고장이 나서 가동이 일시적으로 중단되었다	$7=3+3+1$	B
주요 소모품의 수급이 적절하게 이루어지지 않아 부품을 교체하지 못해 가동이 일시적으로 중단되었다	$7=3+3+1$	B
수소충전소의 안전관리자 부재사태가 발생하여 가동이 일시적으로 중단되었다	$7=4+2+1$	B
외부적 요인에 의한 재난·재해가 발생하여 가동이 중단되었다	$7=1+5+1$	B

표 25는 위험분석 결과와 처리단계이다.

표 25. 위험분석 결과 처리단계

위험 시나리오	대응방안	위험처리
수소충전소 수소공급이 적절하게 이루어지지 않아 가동이 일시 중단되었다	- 정부의 정책을 통한 수소 생산 · 공급 관리시스템 구축 - 수소공급처 다변화 및 정책적 지원	경감, 전가
수소공급 가격이 갑자기 급등하여 수익성이 저하되었다	- 정부의 저비용 수소생산시설 적극 지원 - 수소 공급가격 안정화 정책 추진 - 수소공급처 다변화	경감, 전가
수소공급차량의 운송관리자 파업으로 수소공급이 중단되어 가동이 일시적으로 중단되었다	- 정부와 기업의 비상운송 관리 시스템 구축 - 대체운송관리자 확보	경감
수소충전소의 주요 설비(압축기, 디스펜서 등)가 고장이 나서 가동이 일시적으로 중단되었다	- 운영중인 상시모니터링시스템의 모니터링 항목 추가 및 상시 A/S 시스템 구축 - 장비 및 부품의 표준화와 수입산 대비 가격 경쟁력 있는 제품개발	경감
수소충전소 주요 소모품의 공급이 적절하게 이루어지지 않아 부품을 교체하지 못하고 가동이 일시적으로 중단되었다	- 수소관련 장비의 표준화와 수입산 대비 가격 경쟁력 있는 제품개발 - 부품 공급업체 다변화	경감
수소충전소 안전관리자의 부재사태가 발생하여 가동이 일시적으로 중단되었다	- 안전관리자 근무규정 및 대체 근무자 근무규정 명확화	경감
외부적 요인에 의한 재난·재해가 발생하여 가동이 중단되었다	- 재난발생시 비상근무체계 구축 및 비상근무 시나리오 작성	경감, 수용

위험 처리단계는 위험을 ‘제거’, ‘경감’, ‘전가’, ‘수용’할 것인지를 결정하는 단계이다. 위 시나리오의 경우 대응방법을 STPA 분석과정과 설치 전 단계 위험평가 분석 결과를 통해 마련하였다. 대부분의 결과가 위험을 ‘경감’하거나 ‘전가’할 수 있었다. 그리고 ‘전가’ 대상은 정부의 정책적 지원으로 수소충전소의 운영안전성을 강화하기 위해서는 정부의 역할도 중요함을 알 수 있었다.

5.3 개선효과 및 검증

5.3.1 기존연구와 비교 및 개선효과

연구를 통해서 수소충전소 운영 중에는 발생 가능한 위험요인이 다수 존재하고 있다는 것을 알 수 있었다. 그리고 기존에 실시하고 있는 설치 전 단계의 위험성평가에서는 운영 중 발생 가능한 위험요인에 대한 평가 항목이 대부분 누락되어 있는 것으로 확인되었다.

따라서 수소충전소의 구축 확산을 위하여 운영 중 발생 가능한 위험요인에 대한 평가와 대응책 마련도 필요하다는 것을 파악했다.

위험 시나리오에 대하여 STPA 위험분석을 통한 원인을 파악해보니 정부의 정책적인 지원이 절실함을 알 수 있다. 다양한 부분의 모니터링시스템 구축 등이 필요함을 알 수 있다.

또한 수소충전소 운영자는 수소 공급처의 다변화, 안전관리자 부재시 대체 근무자 운영지침 마련, 주요설비의 소모성 부품에 대한 구매처 다변화, 한

국가가스안전공사에서 구축·운영 중인 수소충전소 모니터링시스템에 적극적인 업무협조를 통한 운영 데이터 축적 및 통합 A/S 시스템 구축 등 다양한 노력이 필요함을 알 수 있었다.

수소충전소의 운영 중 가동중단 사태를 유발하는 위험 시나리오 7가지를 대상으로 기존 위험성평가와 비교한 결과는 표 26과 같이 정리할 수 있다.

표 26. 위험성 평가 비교

위험 시나리오	기존 위험성 평가[51]	제안된 STPA 위험분석 재해경감활동 적용
불규칙한 수소공급으로 가동 일시중단	일부평가	평가
수소공급가격 급등으로 수익성저하	일부평가	평가
운송관리자의 파업으로 공급중단	미평가	평가
주요 설비, 부품 고장으로 가동 일시중단	미평가	평가
주요 소모품 수급 차질로 가동 일시중단	미평가	평가
안전관리자 부재로 가동 일시중단	미평가	평가
외부적 요인의 재난·재해발생	일부평가	일부평가

기존 위험성 평가에서는 누락되어 있는 일부항목은 STPA 위험분석과 재해경감활동 적용을 통해 보완할 수 있었다.

표 27은 분석대상 위험시나리오의 기존 위험성평가 등급이 재해경감활동 위험평가 및 처리 적용 후 어떻게 변화하였는지를 나타낸다.

보정계수는 기존 위험성평가와 동일하게 위험수준 상향조정(+1)을 적용했다. 결과는 대부분 위험시나리오의 위험점수가 하락되고 일부는 위험등급도 하향되었음을 알 수 있다. 따라서 STPA 위험분석 및 재해경감활동 위험분석·평가·처리적용이 위험성감소의 개선효과가 있음을 확인했다.

표 27. 위험 시나리오의 위험성평가등급 비교·분석

위험 시나리오	제안된 재해경감활동		제안된 재해경감활동	
	위험평가·처리 전		위험평가·처리 후	
	위험평가	등급	위험평가	등급
수소충전소의 수소공급이 적절하게 이루어지지 않아 가동이 일시적으로 중단되었다	7=3+3+1	B	5=2+2+1	C
수소충전소의 수소공급 가격이 갑자기 급등하여 수익성이 저하되었다	7=3+3+1	B	6=2+3+1	B
수소공급차량의 운송관리자 파업으로 수소공급이 일시적으로 중단되었다.	7=3+3+1	B	5=2+2+1	C
수소충전소의 주요 설비(압축기, 디스펜서 등)가 고장이 나서 가동이 일시적으로 중단되었다	7=3+3+1	B	6=3+2+1	B
주요 소모품의 수급이 적절하게 이루어지지 않아 부품을 교체하지 못해 가동이 일시적으로 중단되었다	7=3+3+1	B	6=3+2+1	B
수소충전소의 안전관리자 부재사태가 발생, 가동이 일시적으로 중단되었다	7=4+2+1	B	5=3+1+1	C
외부적 요인에 의한 재난·재해가 발생하여 가동이 중단되었다	7=1+5+1	B	6=1+4+1	B

5.3.2 검증

표 28은 대부분의 위험시나리오가 STPA 위험분석과 재해경감활동의 위험평가·처리 과정을 통해 위험성이 감소되어 위험 영역이 ‘허용 가능한 위험영역’에서 ‘수용 가능한 위험 영역’으로 이전되는 효과를 검증 할 수 있다.

표 28. 위험 시나리오의 재해경감활동 적용 후 안전성 비교

위험 시나리오	설치 전 단계 위험성 평가		재해경감활동 적용 후	
	위험처리	위험영역	위험처리	위험영역
불규칙한 수소공급으로 가동일시중단	수용	허용 가능한 위험영역	경감, 전가	수용 가능한 위험영역
수소공급가격 급등으로 수익성저하	수용	허용 가능한 위험영역	경감, 전가	허용 가능한 위험영역
운송관리자의 파업으로 공급중단	수용	허용 가능한 위험영역	경감	수용 가능한 위험영역
주요 설비, 부품 고장으로 가동일시중단	수용	허용 가능한 위험영역	경감	수용 가능한 위험영역
주요 소모품 수급 차질로 가동일시중단	수용	허용 가능한 위험영역	경감	수용 가능한 위험영역
안전관리자 부재로 가동 일시중단	수용	허용 가능한 위험영역	경감	수용 가능한 위험영역
외부적요인의 재난·재해발생	수용	허용 가능한 위험영역	경감, 수용	허용 가능한 위험영역

그림 41은 재해경감활동 적용 전 ‘허용 가능한 위험영역’의 잔류 위험성 일부가 재해경감활동 적용 후 ‘수용 가능한 위험영역’으로 이전하는 것을 나타낸다.

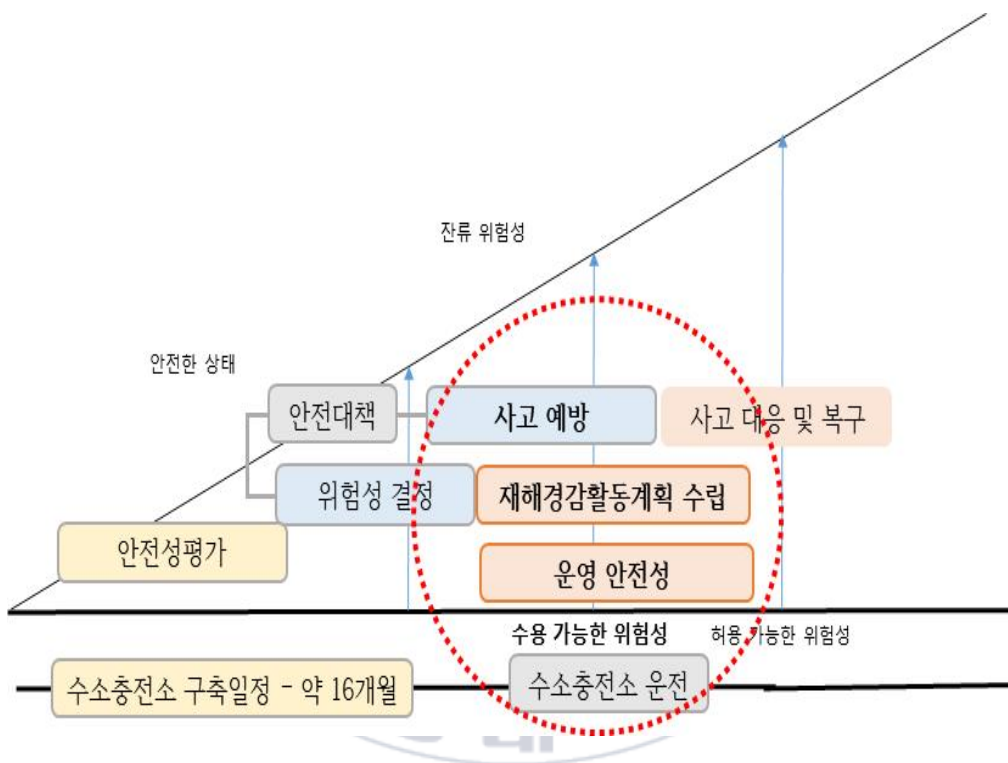


그림 41. 수소충전소의 재해경감활동 위험평가 · 처리 후 위험영역

업무의 연속성을 목표로 하는 재해경감활동은 사전적으로 위기로인을 제거하거나 감소시켜 손실 발생을 억제한다. 따라서 수소충전소의 운영 중 발생 가능한 가동중단 위험 시나리오를 STPA 위험분석과 재해경감활동 위험평가 · 처리 과정에 적용하면 운영안전성의 개선효과가 있음이 검증되었다.

VI. 결 론

본 연구는 수소충전소의 운영단계에서 발생가능한 일시적 가동중단 사태를 유발하는 위험요소를 찾아 가동 연속성을 확보하고자 하였다. 위험요인 항목에 대해서는 STPA 분석을 통한 위험원인 시나리오를 도출하고, 도출된 위험 시나리오를 재해경감활동의 위험평가·처리 과정에 적용하여 수소충전소 운영의 안전성이 강화되는지 검증하였다.

STPA 위험분석을 통하여 도출된 3가지 위험원인 시나리오를 포함하여 수소충전소 가동 중 발생가능한 대표적인 위험 7가지 시나리오를 재해경감활동에 적용한 결과는 다음과 같다.

첫째, 불규칙한 수소공급 위험은 ‘경감’되고 일부는 ‘전가’ 되었다. 위험영역은 ‘수용 가능한 위험영역’ 으로 감소되었다.

둘째, 공급가격 급등 위험은 ‘경감’ 되고 일부 ‘전가’ 되었다. 위험영역은 일부 감소되었으나, 수익성 문제는 ‘수용가능한 위험영역’ 까지는 감소하지 못한 것으로 나타났다.

셋째, 운송관리자 파업 위험은 ‘경감’ 되었다. 위험영역은 ‘수용 가능한 위험영역’ 으로 감소되었다.

넷째, 주요 설비부품 고장 위험은 ‘경감’ 되었다. 위험영역은 ‘수용 가능한 위험영역’ 으로 감소되었다.

다섯째, 주요 소모품 수급 차질 위험은 ‘경감’ 되었다. 위험영역은 ‘수용 가능한 위험영역’ 으로 감소되었다.

여섯째, 안전관리자부재 위험은 ‘경감’ 되었다. 위험영역은 ‘수용 가능한 위험영역’ 으로 감소되었다.

일곱째, 외부적 요인의 재난·재해 발생 위험은 ‘경감’ 되거나 ‘수용’ 되었다.
위험영역은 ‘수용 가능한 위험영역’ 까지 감소하지는 못한 것으로 나타났다.

7가지 위험 시나리오에 대한 위험성평가 및 재해경감활동 적용 후 결론은 다음과 같이 요약할 수 있다.

첫째, 수소충전소 설치 전(前)단계에서 위험을 ‘수용’ 하고 있으나, 적용 후 위험이 ‘경감’ 되었다. 일부위험은 ‘전가’ 되기도 하였다.
둘째, 수소충전소 설치 전(前)단계에서 위험영역이 ‘허용 가능한 위험영역’이었으나, 적용 후 5가지 시나리오에서 ‘수용 가능한 위험영역’으로 감소되었다.

본 연구의 결과에 의하면 STPA 위험분석과 재해경감활동 위험평가 · 처리 적용이 수소충전소의 운영 안전성 강화에 새로운 모델이 될 수 있음을 검증할 수 있었다.

수소충전소의 보급 확대와 안전성 강화를 위해 예방 · 대비 · 대응 · 복구라는 재해경감활동 모든 과정을 수소충전소의 위험분석에 적용한다면 안전성이 더욱 강화 될 것으로 기대된다. 그러나 현실적으로 국내 수소충전소의 경영환경이 재해경감활동 모든 과정을 적용하기가 쉽지 않다는 한계가 있다. 따라서 우선 예방 · 대비 단계라 할 수 있는 재해경감활동계획의 위험평가 · 처리과정 적용을 제안한다. 향후 후속 연구를 통해 수소충전소에 적합한 재해경감활동 모델이 개발된다면 수소충전소의 안전성 강화와 보급 확대에 기여할 것으로 기대한다.

참 고 문 헌

1. 이장원, 김창수 (2023). 수소충전소의 사업연속성 강화를 위한 기업재해 경감활동 적용 연구, 한국재난정보학회 논문집 19(2), 411-420
2. 정귀일 (2020). 앞으로 다가올 수소경제의 미래, IIT TRADE FOCUS 38호, 1-26
3. 이석형 (2022). STPA 기법을 활용한 패키지형 수소충전소의 안전성 강화 모델, 부경대학교 박사학위 논문
4. 김정숙, 엄영호, 장석진, 최성열 (2016). 재해경감활동 활성화를 위한 제도적 방안 모색, 국가정책연구 논문집 31(3), 101-124
5. 윤은주 (2021). 국내·외 수소도시 정책 동향과 시사점, 국토연구원, 국토 이슈리포트, 1-12
6. 수소 안전관리 로드맵 2.0 (2023. 5. 9), 산업통상자원부 에너지안전과
7. 이장원, 김창수 (2022). 수소충전소의 경영안전성 강화를 위한 위험성평가 추가 항목 연구, 한국재난정보학회 논문집 18(3), 520-531
8. 유정근. 수소충전소 적자해결 방안은, 투데이에너지, 2022. 9.19
9. 문일, 김은정, 이광희 (2019) 수소안전개론. 서울: 청송미디어
10. 강승규, 허윤실, 문종삼 (2017). 위험성평가를 통한 패키지형 수소충전소 안전성 향상에 관한연구, 한국수소 및 신에너지학회 논문집 28(6), 635-641
11. 이종수. 수소충전소 200기 돌파, 월간수소경제, 2022.11.30
12. 김홍철 (2021). 안전성 향상을 위한 수소자동차충전소 위험성평가제도 도입에 관한 연구, 대구대학교 박사학위 논문
13. 전대천 (2014). 수소경제로의 이행을 위한 안전관리 정책 연구, 한국수소 및 신에너지학회 논문집 25(2), 161-172

14. 최인영. 수소충전소 잦은 고장으로 26곳 운영중단, 가스신문 2020.10. 7
15. 정순구. 고속도로수소차충전소 한달 한번 꼴 고장, 동아일보 2020.10.19
16. 이호길(2020). 수소모빌리티의 성패를 좌우할 수소충전소 기술, 모빌리티 인사이트 9월호
17. 유정근. 수소가격 인상으로 충전소·운전자 갈등 심화, 이투뉴스, 2023. 7.20
18. 성재경. 미 캘리포니아서 수소버스 충전 중 화재로 전소, 월간수소경제, 2023. 7.21
19. KGS FP211(2021) 고압가스 용기 및 차량에 고정된 탱크 충전의 시설·기술·검사·안전성 평가 기준, 가스기술위원회
20. SW 안전성 공통 개발 가이드(2016), 정보통신산업진흥원
21. 박우일, 김동환, 강승규 (2021). 수소충전소 잠재적 위험에 대한 안전성 해석, 한국가스학회지 25(4), 43-48
22. 한옥민, 오진우, 이호성 (2018). 수소충전 플랫폼 패키지 개발과 안전성 평가, 대한기계학회 춘추학술대회, 148-149
23. 박병직, 김양균, 임옥근 (2021). 수소충전소 사고대응을 위한 훈련프로그램 개발 및 분석, 한국방재학회 논문집 21(6), 103-110
24. 황순일, 강승규, 허윤실 (2019). CFD를 활용한 패키지형 수소충전시스템의 안전성 향상 연구, 한국수소 및 신에너지학회 논문집 30(3), 243-250
25. 표돈영, 김양화, 임옥택 (2019). 수소충전소의 안전성 평가 연구, 한국수소 및 신에너지학회 논문집 30(6), 499-504
26. 이진우, 박종희, 김대현, 탁승수, 양병조 (2021). 수소충전소 실시간 모니터링 시스템 운영을 통한 안전성 향상, 한국가스학회지 25(6), 92-97
27. 유승훈 (2017). 패키지형 수소충전소의 정성적 위험성 평가, 호서대학교

석사학위 논문

28. 서두현, 이광원, 김태훈 (2020). 패키지형 수소충전소의 고장 형태별 영향분석, 한국수소 및 신에너지학회 논문집 31(1), 65-72
29. 이대희, 정인희, 고재욱 (2009). 수소충전소의 안전성에 관한 연구, 한국가스학회지 13(1), 45-51
30. 안정진, 김완진, 김래현 (2019). 고압 수소설비용 비금속부품 소재의 FMEA 평가를 통한 실험적 연구, 에너지공학 28(3), 10-17
31. 변윤섭 (2021). 위험과 운전분석을 통한 수소충전소 안전성 향상에 관한 연구, 한국수소 및 신에너지학회 논문집 32(5), 299-301
32. 임재용, 권대환, 최슬기, 유철희 (2021). HyRAM 3.0을 이용한 수소충전소 정량적 위험성평가 분석에 관한 연구, 에너지공학 논문집 31(1), 38-46
33. 김혜림, 강승규 (2020). 정량적 위험성평가 프로그램(Hy-KoRAM)을 이용한 제조식 수소충전소 피해범위 및 영향분석, 한국수소 및 신에너지학회 논문집 31(5), 459-466
34. 김필중, 강승규, 유영중, 허은실 (2019). LPG 복합 이동식 수소충전소 안전성 분석에 관한 연구, 에너지공학 28(4), 48-60
35. 김동환, 이수민, 조충희, 강승규, 허은실 (2020). 이동식수소스테이션 정량적 위험성평가에 관한 연구, 한국수소 및 신에너지학회 논문집 31(6), 605-613
36. 김희진, 장경민, 김수현, 김기범, 정은상 (2021). 정량적 위험성평가를 통한 고속도로 휴게소 수소 충전소 안전 가이드라인 연구, 한국수소 및 신에너지학회 논문집 32(6), 551-564
37. STPA를 활용한 위험분석 가이드(2018.12), 과학기술정보통신부 한국정보통신기술협회

38. 김상덕, 이석형, 김창수 (2020). 재해경감활동계획 수립에 위험시나리오 도출을 위한 STPA기법 도입, 한국재난정보학회 논문집 19(2), 411-420
39. 양현수, 권기현 (2019). 시나리오 테이블을 이용한 STPA에서의 사고원인 식별, 정보과학회논문지 46(8), 787-799
40. 이준우, 남경재, 이병남 (2021). 항공 분야 STPA 적용에 관한 고찰, 한국항공우주학회 2021 추계학술논문집, 248-249
41. 김은비, 오승원, 한종대, 한혁수 (2015). CTT기반의 STPA를 활용한 Hazard 식별 프로세스, 한국정보과학회 학술발표논문집, 511-513
42. 김민지, 김도연, 이미선 (2016). 공공기관 재해경감활동관리체계 구축 지원프로그램 설계 및 개발을 위한 필요기능 연구, 한국재난정보학회 논문집 12(1), 32-39
43. 재해경감활동 실무교재, 행정안전부
44. 기업재난관리표준, 행정안전부고시 제2017-1호
45. 장근영 (2021). 재해경감활동관리체계(BCMS)의 위험평가(RA)가 위험관리를 매개로 경영성과에 미치는 영향, 숭실대학교 박사학위 논문
46. 김상덕, 김창수 (2019). 재난 예방활동 강화를 위한 재해경감활동체계 모델 제안, 한국재난정보학회 논문집 15(4), 502-513
47. 박수열, 오은호, 최봉혁, 김진만 (2016). SOC 시설물 재난대응 및 관리시스템 개발방향, 한국건설관리학회 논문집 17(3), 134-142
48. 손정석, 정종수, 김도연 (2017). 공공기관 특성을 반영한 업무연속성관리체계 모델 제안, 한국방재학회 논문집 17(6). 121-126
49. 이상수 (2020). 소기업·소상공인 재해경감활동 관리체계(BCMS) 모델 개발, 숭실대학교 박사학위 논문
50. 위험성평가 이행·점검 매뉴얼(2023. 7), 한국산업안전보건공단
51. 수소충전소 구축·운영 매뉴얼(2021. 5), 환경부

52. Svetlana,V.A., Mark,N.A., Victor,A.V. (2018). Business Continuity Management System. IEEE International Conference (IT&QM&IS), 2018.09.24.-28, St.Petersburg Russia.
53. Hydrogen Council. (2023). Hydrogen Insights May 2023. Mckinsey & Company
54. Clean Hydrogen Production Standard (CHPS) Draft Guidance. 2022.09.23., Department of Energy US
55. Yuxuan, X., Jiansong, W., Yiping, B., Jitao, C., Xiaoping, Z. (2022). All-process risk modelling of typical accident in urban hydrogen refueling stations. Process Safety and Environment Protection, 166, 414-429
56. Nilesh, A., Benjamin, W., Henry, G. (2020). An integrated approach for safer and economical design of Hydrogen refueling stations. International Journal of Hydrogen Energy, 45, 32713-32729
57. Jixin, Z., Shihao, Z., Zhengwei, L., Xiaosong, L., Minghao, S., Jianyu, Q., Jiahui, W., Haoyuan, D., Jian, K. (2023). A risk assessment method based on DEMATEL-STPA and its application in safety risk evaluation of hydrogen refueling stations. International Journal of Hydrogen Energy, 2023. 7.25.
58. Takatomo, W., & Makoto, I. (2022)., Validity and Considerations of the Safety Analysis Method STAMP/STPA on Emergency Stop. Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers, 2022. 9. 6 - 9, Kumamoto Japan
59. Bőđvar, T. (2021). Using business continuity methodology disaster risk management. Journal of Contingencies & Crisis Management, 31, 134-148