

수소충전소의 경영안전성 강화를 위한 위험성평가 추가 항목 연구

A Study on the Risk Assessment for Strengthening Management Safety of Hydrogen Fueling Station

이장원¹ · 김창수^{2*}Jang Won Lee¹, Chang Soo Kim^{2*}¹Ph.D. Course, Department of Information System, Pukyong National University. Busan, Republic of Korea²Professor, Department of Information System, Pukyong National University. Busan, Republic of Korea

*Corresponding author: Chang Soo Kim, cskim@pknu.ac.kr

ABSTRACT

Purpose: Based on the risk evaluation of hydrogen fueling stations, this study aims to find a plan to strengthen management safety by examining profitability and management risk, which are major concerns of employers. **Method:** The risk evaluation was divided into 'acceptable risk' and 'allowable risk' over time from the stage of installation of hydrogen fueling stations, and compared and analyzed with the results of existing studies. **Result:** Existing studies have been appropriately applied to the risk assessment performed at the stage of installing hydrogen fueling stations. However, possible risks could be found at the operational stage. In other words, it was derived that an evaluation of management risk was also necessary. And through this, it was confirmed that the safety of hydrogen fueling stations was strengthened. **Conclusion:** The risk assessment that precedes the stage of installing hydrogen fueling stations is appropriate because significant results have been derived from the 'acceptable risk' assessment. However, the operator needs to evaluate the risks that may occur at the operating stage, that is, the 'allowable risks' and prepare countermeasures. Therefore, it is proposed to add management risk assessment items to build and operate safer hydrogen fueling stations.

Keywords: Hydrogen Fueling Station, Acceptable Risk, Allowable Risk, Management Safety, Real-time Monitoring System

요약

연구목적: 본 연구는 수소충전소의 위험성 평가를 바탕으로, 운영주의 주요 관심 사항인 수익성과 경영 위험성을 고찰함으로써 경영안전성 강화를 위한 방안을 찾고자 한다. **연구방법:** 위험성 평가를 수소충전소의 설치단계부터 시간의 흐름에 따라 '수용 가능한 위험성'과 '허용 가능한 위험성'으로 구분하여 기존의 연구결과와 비교, 분석하였다. **연구결과:** 수소충전소 설치단계에 실행하는 위험성 평가는 현재 기존의 연구가 적절하게 적용되고 있었다. 그러나 운영단계에서 발생 가능한 위험을 찾을 수 있었다. 즉 경영위험성에 대한 평가도 필요함을 도출하였다. 그리고 이를 통해 수소충전소의 안전성이 강화됨을 확인했다. **결론:** 수소충전소 설치단계에 선행되는 위험성평가는 '수용 가능한 위험성' 평가로 모두 유의미한 결과가 도출되어 적절하게 활용되고 있다. 그러나 운영주는 운영단계에서 발생 가능한 위험, 즉 '허용 가능한 위험성' 평가와 대응방안 마련이 필요하다. 따라서 보다 안전한 수소충전소 구축과 운영을 위하여 경영위험성 평가 항목 추가를 제안한다.

핵심용어: 수소충전소, 수용 가능한 위험성, 허용 가능한 위험성, 경영안전성, 실시간 모니터링시스템

Received | 21 July, 2022

Revised | 16 August, 2022

Accepted | 25 August, 2022

OPEN ACCESS



This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted noncommercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

© Society of Disaster Information All rights reserved.

서론

산업혁명과 함께 시작된 대기오염과 지구온난화의 심각성을 인식하기 시작하며 세계 각국은 화석연료 사용을 줄이기 위해 1992년 유엔기후변화협약을 채택하였다. 이산화탄소 등 6종의 온실가스 배출 감소를 위해 1997년 교토의정서가 만들어져 2005년부터 발효되어 2020년 종료되었다. 이를 대체하기 위해 세계 195개국은 2015년 신 기후체제, 즉 파리기후협약을 체결하여 2021년 1월부터 발효되었다(Table1). 파리기후협약은 대부분의 국가가 5년마다 목표를 상향하면서 온실가스 감축 의무를 이행해야 하며, 어길 경우 벌금 부과 등 강제력이 있어, 회원국들은 온실가스 배출 규제 및 친환경 에너지 도입 등 협약이행을 위한 정책을 적극 추진 중이다.

Table 1. Paris Climate Convention vs Kyoto Protocol

구분	파리기후협약	교토의정서
일시	(채택) 2015. 12.12 (발효) 2021. 1. 1	(채택) 1997. 12. 11 (발효) 2005. 2. 16
목표	지구 평균 온도를 산업화 이전 대비 +2℃ 이내로 유지	6개 온실가스 감축 목표치 제시 - 1차: 90년 수준의 5.2% 감축 - 2차: 90년 대비 18% 감축
대상	195개국 만장일치로 통과 온실가스배출 기준 87% 국가 참여	온실가스배출 15% 국가 참여
기간	종료시점 없음	2012년까지(2020년으로 연장)

출처: 한국무역협회 전략시장연구실 (2020.10)

대한민국 정부는 온실가스 배출 규제 및 친환경에너지 도입 등 협약 이행의 방안으로 2020년 7월 ‘한국판 뉴딜 내 그린뉴딜계획’, 2020년 10월 ‘미래자동차 확산 및 시장선점 전략’을 발표하며 글로벌 기후협약에 대응하여 ‘탄소중립’ 사회를 지향점으로 전기차, 수소연료전지차 등 그린모빌리티의 확대를 추진하기로 했다(관계부처합동, 2020).

수소는 배기가스를 발생시키지 않으며, 쉽게 얻을 수 있고, 다른 에너지에 비해 효율이 높아 친환경성·보편성·효율성을 갖춘 에너지원이다. 전기를 발생시키는 과정에서 온실가스와 오염물질을 배출하지 않고, 우주의 75%를 구성할 정도로 많이 존재할 뿐만 아니라, 휘발유의 3배, 배터리의 100배 수준의 높은 에너지 밀도를 갖고 있다(Chung, 2020). 정부는 2022년까지 수소연료전지차 6만대 보급과 수소충전소 310개 구축을 목표로 인프라 확대를 추진 중에 있지만 2021년 12월 현재 수소연료전지차 19,404대 등록, 2022년 3월말 현재 수소충전소 95개소 구축 중이다(한국수소산업협회). 정부가 목표로 하는 수소경제 선도국가로 도약하기 위한 계획에 따라 수소연료전지차 보급을 확대하기 위해 선행 되어야 하는 것은 수소충전소 구축이다. 그러나 수소충전소 구축이 계획보다 늦어지는 것은 비용, 장소, 안전성에 대한 주민의 불안감 등 여러 가지 원인이 있다. 이에 본 연구는 수소충전소 설치에 따른 기존연구의 결과를 살펴보고, 이를 중심으로 운영주의 주요 관심사항인 수익성과의 관계를 고찰함으로써 위험성평가를 통한 경영안전성 강화 방안을 찾고자 한다.

이론적고찰

수소 및 수소모빌리티

수소는 독성이 없는 가연성 가스이며, 기체 중에서 가스 밀도는 최소이지만, 확산 속도는 가장 빠르다. 무색, 무취하며 수소의 누출을 즉시 확인하기가 매우 어렵다. 수소가 누출되어 확산, 집결되어 있으면 폭발이 일어나기도 하여 취급이 매우 까다로운 물질이다. 상온에서 냄새와 색, 공기와 차이를 느낄 수 없으며, 수소는 다른 연료보다 연소범위와 폭발범위가 넓다. 화재나 폭발에 필요한 최소 발화에너지는 낮지만 화염속도는 빠르다. 수소의 연소 특성만으로 판단하면 수소의 폭발, 화재위험성은 다른 화석연료에 비해 매우 크다(Lee, 2022).

산업통상자원부의 수소모빌리티 활성화 로드맵에 따르면 Table 2와 같이 수소연료전지차와 수소충전소 그리고 수소연료전지열차, 드론 및 선박 등 기계(건설용 장비)로 구분한다. 수소연료전지차는 승용차, 버스, 트럭으로 나누고 있다.

Table 2. Hydrogen mobility theorem

구분	목표
자동차	<ul style="list-style-type: none"> ■ (승용차) '18년 1만8천대에서 '40년 620만대(내수 290만대, 수출 330만대)로 확대하고, 세계시장 점유율 1위 달성 - 2025년까지 年 10만대의 상업적 양산체계를 구축하여 수소연료 전지차 가격을 내연기관차 수준으로 하락 유도
모빌리티	
대중교통	<ul style="list-style-type: none"> ■ '40년 수소택시 8만대, 수소버스 4만대, 수소트럭 3만대 보급 - (택시) '19년 시범사업을 시작으로 '40년 8만대로 확대 - (버스) '19년 35대, '40년 4만대로 확대 - (트럭) '20년 개발실증 후 '40년 3만대로 확대
충전소	<ul style="list-style-type: none"> ■ '18년 14개 '22년 310개, '40년 1,200개 구축 - 규제 완화를 통해 도심지, 공공청사 등 주요 도심 거점에 충전소구축

출처: 수소경제활성화 로드맵(산업통상자원부, 2019년) 정리

수소충전소

수소충전소는 일정한 자격을 갖춘 장소와 시설을 통하여 생산된 수소를 충전할 수 있는 허가를 받은 곳으로 정의한다. 수소충전소는 수소연료전지차와 미래 수소 모빌리티의 확산을 위한 핵심 인프라로 편의성, 저장·충전 안전성, 공급 네트워크의 효율성을 모두 고려해야 한다. 수소모빌리티 이용자의 관점으로는 수소 충전 및 대기시간의 단축, 충전기 작동에 관한 신뢰성 확보, 주요 도심지로부터의 접근성 강화를 통해 수소 모빌리티의 효율과 사용자의 만족도를 높여야 하며, 또한 다량의 수소를 저장해 두는 충전소의 안전성 및 충전 과정에서의 안전성을 확보해야 한다. 그리고 수소충전 비용의 절감을 위해 생산시설의 위치 및 공급망 효율성에 대한 고려가 필요하다. 정부의 관점은 수소충전소 안전과 이용자의 편의성, 그리고 계획에 맞는 적절한 충전소 확충에 있다. 그러나 수소충전소 운영자의 관점은 수익성 확보이다. 수소충전소 설치 및 운영에 따른 경제성이 확보되지 못하면 민간의 수소충전소 운영참여가 줄어들 것이다.

수소충전소의 운용장비 및 그 부속기기에 대한 국산화율은 Table 3과 같이 30~50% 수준이지만, 수소충전소 구축시 국산화 적용율은 30% 미만으로 판단된다. 핵심모듈이라 할 수 있는 압축모듈, 충전모듈의 경우 국산장비의 내구성, 신뢰성에 대한 실증자료의 미흡으로 해외제품이 보다 선호되고 있다(Lee, 2020).

Table 3. Localization rate of hydrogen fueling station operating equipment and accessories in Korea

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

출처: 수소기술개발 로드맵 자료정리

수소충전소의 사고 및 운영중단 현황

수소충전소 사고 및 안전성

최근 10년간 국내의 가스관련 사고(1,248건)중 수소의 사고(17건)는 전체의 1.36%에 해당하며, 고압가스 사고 중 수소의 사고 비중은 12.14%이다. 가스관련 사망사고로 비교하면 사망자(133명) 중 고압가스(29명), 수소(4명)으로 전체 사망자의 2.48% 고압가스 사망사고 중 수소의 사망사고 비중은 13.79% 이다(Kim, 2021). 수소충전소의 경우 고압의 수소를 이송, 저장하고 충전하므로 압축된 가스가 누출 될 때에는 작은 공간을 통하여 확산하는 제트누출의 형태를 가지게 되고, 정전기에 의하여 쉽게 점화되어 제트화재를 형성하는 것으로 알려져 있다. 수소의 저장압력에 비례해서 누출속도가 음속까지 증가한다. 따라서 사고지점 주변시설은 제트화재의 복사열 또는 직접 화염에 접촉하여 사고가 확대되는 2차사고 위험이 있다(Jun, 2014).

수소충전소의 운영 중단

2020년 상반기 수소충전소가 하루 9시간을 운영 중단한 것으로 파악됐다. Table 4의 주요 수소충전소 운영중단시간 현황을 포함하여, 1월부터 6월까지 전국 수소충전소에서 156건의 고장이 발생했으며 운영중단 시간은 무려 1,585시간이다. 고장 건수는 부산대도충전소 19건, 국회충전소 18건, 대전학하충전소 13건, 충남내포충전소 11건 등이다. 2020년 10월 기준으로 수소충전소 50곳 중 10곳이 운영 중지 상태였다. 참고로 2022년 5월 기준 2곳이 운영 중지 상태이다.

Table 4. Discontinuation of operation of major hydrogen fueling stations (2020. 1 ~ 6)(Choi, 2020)

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

Table 5는 2019년부터 2021년 8월말까지 고속도로 휴게소에서 운영하는 수소충전소 12곳 중 1곳 꼴로 한 달에 한번 고장으로 운영을 중단하고 있는 것을 알 수 있다. 주요 고장원인은 냉각기와 압축기 이상 등이며 고장 후 수리까지 상당한 시일이 소요되었다. 안성휴게소수소충전소는 9일, 언양휴게소수소충전소는 5일, 춘천휴게소수소충전소는 4일간 중단되었다. 참고로 본 연구자의 수소충전소운영자 면담에 의하면 부산대도수소충전소는 최근 기기 2기중 1기는 고장으로 약 2달간 운영을 중지하였다고 했다.

Table 5. Status of suspension of highway operation hydrogen fueling station by year (2019 ~ 2021. 8) (Jung, 2020)

연도	운영 중단 건수
2019년	61건
2020년	87건
2021년 8월	73건

현재 수소충전소 설치 및 운영시스템은 장소를 확보하면 충전소 건축 및 설비구축 비용은 전액 정부가 지원한다. 운영비용은 운영주 부담인데 수소구입비용의 일부는 정부가 보조한다. 그럼에도 불구하고 수소충전소 활성화의 가장 큰 장애요인은 무엇인가에 대하여 충전소 운영자 3명(부산학장수소충전소, 창원수소충전소, 언양휴게소수소충전소) 및 한국수소산업협회 관계자 2명을 통해 아직은 수소충전소의 경제성이 현저하게 낮다는 것을 알 수 있었다. 그 이유로는 우선 수소연료전지차의 보급율이 낮기 때문에 충전수요가 적고, 도심지 설치에 대한 주변 시민들의 반감으로 접근성이 떨어지는 외곽지역에 설치할 수밖에 없어서 접근편의성이 떨어진다. 그리고 무엇보다 설비기기의 주요부품이 수입에 의존하여 고장이 났을 때 부품조달 및 기술지원 등 수리하기까지 시간이 오래 걸리고, 그동안 운영을 할 수 없는 운영 중단 상태가 되기 때문이다.

선행연구

위험평가 개념

위험평가는 ‘위험요인을 찾아내어 사고 발생 확률과 사고 크기를 분석하여 그때 발생하는 영향을 정량화하여 대책을 세우는 과정’이다. 이때 위험요인은 정성적 기법으로 찾아내고, 위험성의 대상인 사고발생확률과 사고 크기는 정량적 기법으로 찾아낸다. 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 대비책도 수립하게 된다. 즉, 잠재적으로 발생 가능한 위험한 상황을 사전에 검출하는 활성화된 기능이다(National IT Industry Promotion Agency, 2016). 위험평가에 있어서 첫 번째 절차인 위험 시나리오 도출이 누락 없이 적합하게 시행되어야 다음단계인 위험분석과 위험평가를 진행하게 되고, 대응 계획을 수립하는 절차를 진행 할 수 있다(Kim et al. 2020).

수소충전소의 위험평가

우리나라의 수소충전소에 대한 위험평가는 설립 절차에 따라 기술검토는 현장을 확인하는 절차 없이 서류와 도면으로 법적기준에 대한 적합성 여부를 확인하며, 특정제조, 일반제조, 일반충전, 일반저장 등 모든 허가시설의 기술검토가 이러한 절차를 따른다. 이 과정에서 정해진 안전성 평가기법이 적용된다. 따라서 수소충전소의 안전성 평가는 설립 전에 예측할 수 있는 공학적 위험성 평가에 기반을 둘 수밖에 없다.

수소충전소를 주제로 발표된 논문과 투고 등을 살펴보고, 학술컨텐츠 플랫폼인 DBpia를 이용해 수소충전소의 안전성평가(위험성평가) 연구 결과를 분석한다. 검색기간은 2010년부터 2022년까지로 하였다.

수소충전소의 정성적 위험평가

정성적 위험평가란 수소충전소에 어떠한 위험요소가 있는지 찾아내는 방법으로, 가치평가 및 계산이 필요 없어, 비교적 쉽고 빠른 결과 도출이 가능한 장점이 있는 반면 주관적 평가에 치우치기 쉬운 단점도 있다. 정성적 위험평가기법은 시스템

에 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. 정성적 위험평가의 대표적인 연구기법은 FMEA (Failure Mode and Effect Analysis), HAZOP(Hazard and Operability Analysis) 위험성 평가기법이 있다.

(1) FMEA

선행 연구자들은 FMEA기법을 활용하여 패키지형 수소충전소의 각각의 설비와 부품별 고장형태와 영향을 분석하였다. 평가기준에 따른 심각도, 발생도, 검출도를 5점법을 사용하여 RPN을 도출한 후 패키지형 수소충전소의 설계도면상 파악할 수 있는 총 23종 141개 부품을 평가하였고, 683개 고장형태와 이들의 원인 및 영향을 분석하여 각각의 1,485개의 RPN값을 도출하였다. 이중 보완조치가 필요하다고 사료되는 RPN값 40점 이상인 10개의 고장형태를 도출하였고, 그 외에 심각도 5점인 고장형태의 목록 파악 및 분석을 하였다. 평가를 통해 도출된 주요 고장형태로는 외부/내부 누출로 인한 수소누출 및 폭발, 구조적 결함으로 인한 수소누출 및 밸브파손, 열림/닫힘 실패로 인한 긴급 상황 발생 및 폭발, 막힘으로 밸브 및 배관 파열 등이 있다. 이를 위한 경고문구 표시 또는 보호가드 설치 확인과 밸브 및 배관 파열로 인한 설치 전 제품, 밸브 검사를 철저히 해야 한다. 긴급 상황 시 대처가 가능한 작업자에 대한 공정매뉴얼과 정기교육이 필요함을 제안했다(Seo et al., 2020).

(2) HAZOP

HAZOP은 위험성(Hazard)과 운전성(Operability)을 결합한 용어로 공정에 존재하는 위험요인과 공정의 효율을 떨어뜨릴 수 있는 운전상의 문제점을 찾아내어 그 원인을 제거하는 평가기법이다. 다른 연구자는 HAZOP기법을 이용하여 이동식 수소충전소의 연결배관 및 배관부속품의 위험과 위험분석을 실시하여 그 결과로 안전조치 사항을 7가지 제안하였다. 1) 수소튜브트레일러와 압축설비의 연결 배관에 설치되어 있는 긴급차단밸브 2개 중 1개는 수소튜브트레일러에 근접한 곳으로 이동하여 설치한다. 2) Vent 배관은 vent header로 연결하고, vent header 배출구에는 정전기 방지링을 설치한다. 3) 압력릴리프밸브는 이중으로 설치하고, 배관에는 유량과 압력이 정상 운전조건을 벗어날 때 관리자에게 이상 상태를 알려 줄 flow alarm low/high와 pressure alarm low/high를 설치한다. 4) 배관(PIPE 04)의 BV 04 전단에 check valve를 설치하고, 대기로 노출된 모든 밸브의 말단부에는 플러그나 캡을 체결한다. 5) 이동식 수소충전소 탑재 차량의 3영역에 각각 가스검지기를 3개 설치하고, 3개중 2개 이상이 설정 값을 나타낼 때 긴급차단밸브가 닫히도록 연동한다. 6) 수소튜브트레일러 및 수소연료차정차 시점에 가스검지기를 설치하고, 관리자가 상주하는 곳에 가스경보기를 설치한다. 7) 배기설비는 항상 작동하도록 설정하거나 수소 농도가 일정한 값을 나타낼 때 배기설비가 작동하도록 가스검지기와 연동한다(Byun, 2021).

수소충전소의 정량적 위험평가

정량적 위험평가란 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.

선행 연구자들은 위험요인에 대한 시나리오를 구성하여 범용 위험성 평가 프로그램을 통해 정량적 위험성 평가를 진행하였다. 시나리오는 기존 충전소 사고의 대부분을 차지하는 누출(leak)로 누출원의 크기(leak size)별로 3단계(small, medium,

large)로 구성하여 연구하였으며, 다음의 안전성 향상 방안을 도출하였다. 1) 패키지 충전소에 대한 위험성 평가 결과 피해영향 및 위험성 기여도 측면에서 가장 큰 위험요소로 분석된 튜브트레일러에 대한 안전조치 강화가 필요하다. 튜브트레일러 사고 가능성을 줄이기 위해 설비 운전 매뉴얼을 상시 비치하여 인적오류로 인한 사고를 예방하고 정기적인 점검으로 사고를 예방하는 노력이 필요하다. 2) 저장탱크의 소규모 누출 사고시 안전성 확보를 위한 패키지 내부 환기 장치 마련 및 가스 검지 시스템을 통한 사고빈도의 저감 노력이 필요하다. 사고 발생시 피해영향 확산 방지를 위한 방호벽 설치, 폭발압력 및 복사열의 확산을 방지하여 위험도 저감에 크게 기여 할 수 있다(Kang et al., 2017).

또 다른 연구자들은 제조식 수소충전소에 대해 정량적 위험평가기법인 Hy-KoRAM을 이용하여 수소충전소 사고에 따른 피해 범위와 영향을 확인하여 2가지를 제안하였다. 1) 한 설비에서 사고 발생 시 다른 설비로 사고가 전이될 수 있어 격벽 등의 방호조치로 안전성을 강화한다. 2) 개인적 위험도 분석결과 작업자 및 일반대중에 대한 허용불가영역 확인 및 충전소 주변 인구분포도를 적용한 사회적 위험도 평가결과 허용가능 구역을 확인하였다(Kim et al., 2020).

연구설계

위험성은 ‘허용불가 위험’영역과 ‘허용 가능한 위험’영역으로 구분할 수 있으며, ‘허용 가능한 위험’영역에서 합리적으로 실천 가능한 범위 내 가능한 한 낮은 수준까지 감소되어 있는 위험성을 ‘수용 가능한 위험’영역이라 할 수 있다(Chung, 2017). 수소충전소 설치단계에서 ‘수용 가능한 위험’은 설계자가 공학적으로 인지하여 대응 할 수 있는 위험영역으로, 위험성의 크기는 줄어들었지만 여전히 위험의 크기는 변함없다. 따라서 ‘허용 가능한 위험’보다 더욱 엄격한 기준으로 평가하여야 한다. 그리고 ‘허용 가능한 위험’은 ‘수용 가능한 위험’ 영역에 추가하여 위험을 최소화 할 수 있는 영역이다. ‘허용 가능한 위험’영역까지 모든 안전대책을 마련하기에는 비용 및 수단이 마땅치 않을 수 있지만 가능한 한 위험을 낮추기 위해 노력해야 한다. 절대 안전은 존재하지 않기 때문이다.

Fig. 1은 위험성과 안전성의 관계이다. 가로축은 위험성으로 이는 위험성의 크기라 할 수 있으며 세로축은 안전성이다. 합리적으로 실천 가능한 범위에서 최대의 안전성 확보를 위해 가능한 위험성 영역까지 대책을 마련해야함을 전제로 본 연구는 수소충전소의 설치단계부터 운영단계까지 시간의 흐름을 바탕으로 설계를 하였다.

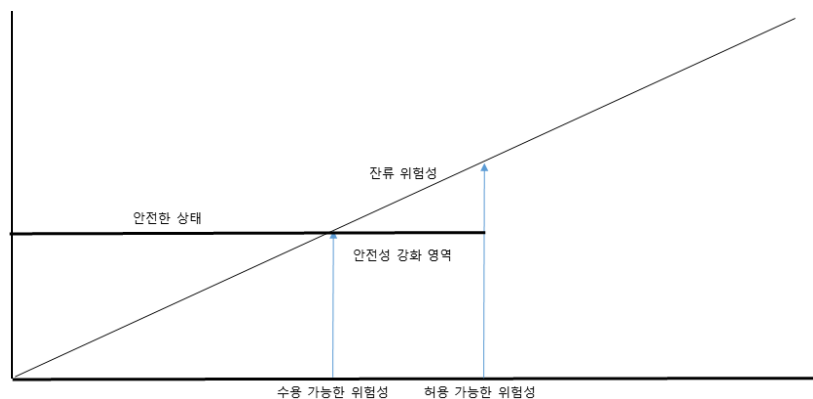


Fig. 1. Risk and safety

Fig. 2는 수소충전소 설치 전 단계부터 시간의 흐름을 바탕으로 실시하는 안전성평가 및 위험성 결정이다. 수소충전소의 설치단계에서는 위험성은 ‘수용 가능한 위험성’으로 위험성을 결정하고 안전대책을 마련해야 한다. 선행연구를 통해 현재는 설치단계의 위험성 평가에 집중되어 있음을 확인하였다. 가로축의 위험성 크기와 세로축의 안전성 정도를 통해 현재는 수소충전소 설치단계에서 ‘수용 가능한 위험’ 영역까지 대책 마련이 되고 있음을 알 수 있다.

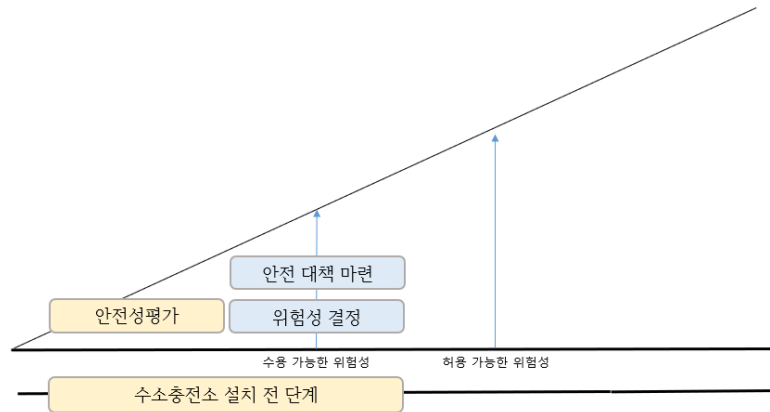


Fig. 2. Risk assessment of hydrogen fueling station installation stage

Fig. 3은 설치 후 운영단계의 위험성이다. 가로축은 위험성 크기이고 세로축은 안전성이다. 이는 ‘수용 가능한 위험’ 영역 외 추가적으로 합리적인 실천방법을 통하여 위험수준을 더욱 낮출 수 있는 ‘허용 가능한 위험’ 영역을 나타낸다. 운영단계에서 사업주의 주요관심사는 수익성으로 여러 가지 원인으로 발생할 수 있는 수소충전소의 운영중단으로 인한 경제적 손실이 주요 관심사항이다. 따라서 운영단계에 발생 가능한 5가지 운영중단 시나리오를 바탕으로 설치단계 위험성평가와 비교하여 대응 방안을 마련하고, 이를 통해 수소충전소의 안전성이 강화되는지 살펴보고, 경영위험성 평가의 필요성을 검증하고자 한다.

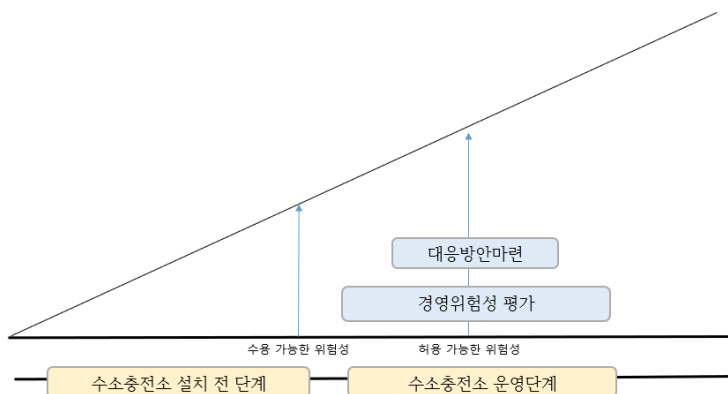


Fig. 3. Risk assessment of operation phase of hydrogen fueling station

비교·분석

수소충전소의 '허용 가능한 위험성' 분류 및 위험성평가 비교

수소충전소의 위험성은 매우 다양하다. Fig. 2에서 볼 수 있듯이 설치 단계에서 실행하고 있는 위험성평가로 위험성 결정 및 안전대책 마련이 기존의 연구를 통해 적절하게 적용되고 있음을 확인하였다. 그러나 설치 후 단계인 운영단계에서 운영주의 사업연속성을 위협하는 대표적인 경영위험성을 Table 6과 같이 5가지로 분류하여 위험발생 영향과 설치전 단계 위험성평가와 비교하였다. 그 결과 Fig. 3의 현재 수소충전소 운영단계에서의 위험성, '허용 가능한 위험성' 즉 경영위험성에 대한 평가는 미흡함을 알 수 있다.

Table 6. Risk types and effects of hydrogen fueling stations and comparison of risk assessment

위험 종류	위험발생 영향	설치전 단계 위험성평가 비교
주요설비 고장	운영중단	일부 평가
안전관리자 부재	운영중단	일부 평가
불규칙적인 수소공급	수익성 저하	미평가
소모성부품 수급 불균형	부품수급의 장기화 및 대량 구입요구로 인한 비효율성	미평가
각종 재해 등 내,외부적 요인	운영중단, 수익성 저하	일부 평가

운영주 관점의 경영위험성 관련하여 Table 6의 주요 5가지 위험을 대상으로 기존의 위험성평가기법 결과를 적용해보면 기존의 위험성평가는 그 위험 시나리오가 주요 부품의 누출로 인한 폭발 사고에 맞춰져 있어 운영중 설비부품고장 및 부품교체 지연으로 인한 운영중단을 감안하지 않고 있다. 인적문제는 기존 정성적 위험평가기법을 통해 운영매뉴얼 준비 등을 언급했으나 안전관리자 부재시에 대한 위험과 수소공급 불균형으로 인한 위험은 아직 기존의 위험성평가 항목에 없고, 자연재해, 인적재해 등 각종 재해, 재난에 대한 위험성평가도 현재 이루어지지 않고 있다. 발생된 재해에 대한 복구계획 수립시 재발방지계획의 일환으로 추진되는 활동이 통상적인 예방활동에 속한다면 발달된 첨단기술을 적용한 데이터 및 기술기반 예측역량의 지속적인 발굴 노력을 통한 재해경감활동이 향후 나아가야 할 바람직한 재난관리활동이다(Kim et al., 2019).

'허용 가능한 위험성'의 위험 종류에 따른 대응방안

운영단계에서 발생 할 수 있는 '허용 가능한 위험성'의 주요 5가지 위험 종류와 대응방안을 Table 7과 같이 정리하였다.

Table 7. Classification and countermeasures of operational risk of hydrogen fueling stations

위험 종류	대응 방안
주요설비 고장	부품의 표준화 및 국산화, 부품관리의 시스템화
안전관리자 부재	종사자 전원 시설안전관리자 교육 이수
불규칙적인 수소공급	수소공급업체 다변화, 수소 저장시설 확충
소모성부품 수급 불균형	거래업체 다변화, 부품의 표준화 수소충전소 실시간 모니터링시스템
각종 재해 등 내,외부적 요인	기업재해경감활동 계획수립 및 기업재난관리시스템 도입

주요설비 고장위험의 대응방안은 부품의 표준화 및 국산화와 부품관리의 시스템화이다. 처음 수소충전소 설치 당시에는 설비 부품에 대한 정보가 전혀 없고 체계화된 시스템 없이 운영주체 각자의 방식으로 수입에 의존하여 설치를 하다 보니 제품의 개별 특성을 파악 할 수가 없었다. 그러나 지금은 수년간의 운영노하우가 축적이 되어있어 제품마다 특성을 파악한 정보가 축적되어 있다. 이 정보를 바탕으로 부품의 표준화 및 국산화를 이루어야 할 것이다. 현재는 국내 부품생산기업의 수익성 문제로 많은 부품을 수입에 의존하다 보니 겪는 어려움이 많다. 이는 정부가 수소충전소 소재 관련 생산기업에 대한 과감한 지원을 통해 해결 해 나가야 할 것이다.

안전관리자 부재 위험의 대응방안은 종사자 전원의 시설안전관리자 교육 이수이다. 현재는 최소 안전총괄자 1명, 안전관리자 1명으로 규정되어 있으나 시설 종사자에 대하여 의무적으로 시설안전관리자 교육을 이수하도록 규정을 만들어 법정안전관리자 부재시 일어날 수 있는 안전공백을 대비할 수 있어야 한다.

수소 공급의 불균칙 위험의 대응방안은 생산 및 출하센터 구축 등 공급업체 다변화, 수소저장시설 확충 및 정부의 주요산업에 대한 우선공급관리이다. 파업 등으로 인한 공급 중단, 생산 및 가격 불균형으로 인한 공급 문제 등 다양하게 발생 할 수 있으므로 대비가 필요하다.

소모성부품 수급 불균형 위험의 대응방안은 부품공급의 표준화 및 다변화이며, 궁극적으로는 국산화이다. 코로나19의 영향으로 해외 기술자들의 국내 출장이 어려워 그 시기에 부품수급 및 고장수리 문제로 운영중단이 된 수소충전소의 경우 수개월 동안 운영중단상태가 지속되어 큰 경제적 손실을 감수해야 했고, 최근에는 해외 각 국에서 수소충전소 설치를 활성화 하여 주요부품의 주문 및 배송이 개별주문이 아닌 몇 개씩 묶음으로 하다 보니 시간 및 비용부담이 증가되고 있는 추세이다. 한국가스안전공사는 2021년 8월 ‘수소충전소 실시간 모니터링 시스템’ 구축을 완료해서 가동 중에 있다(Lee et al., 2021). 현재는 여러 가지 사유로 전국의 모든 수소충전소가 연결되어 있지는 않지만 보안을 강화하여 의무적으로 모니터링 시스템과 연결 된다면 안전성 강화에 큰 도움을 줄 수 있다. 이 모니터링 시스템에 고장이나 이상신호 뿐 아니라 A/S시스템과 연계하여 부품 교체시 시간이 소요되는 주요 부품에 대하여 교체시기를 미리 통지할 수 있다면 고장 및 부품교체로 인한 영업중단 시간을 크게 줄일 수 있을 것이다.

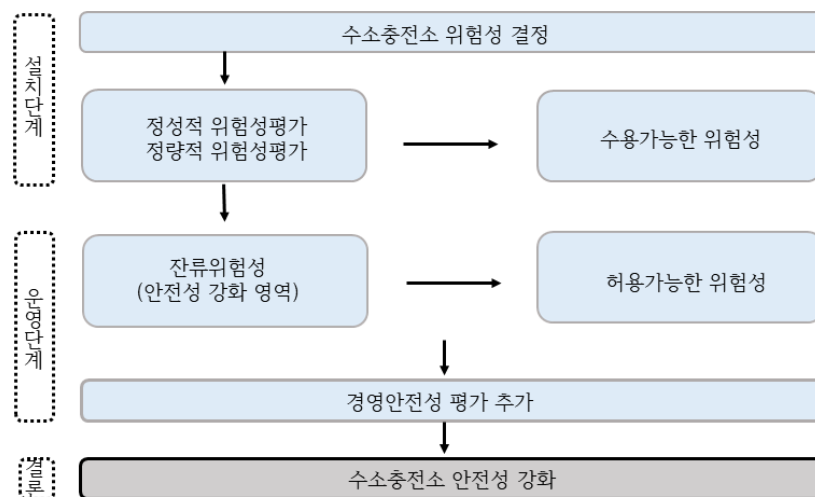


Fig. 4. Risk assessment of hydrogen fueling stations by stage

위험 중 자연, 인적 등 각종 재난, 재해로 인한 위험에 대해서는 본 연구에서는 기업재난관리시스템 도입 제안으로 정리하고, 세부적인 내용은 후속연구가 필요할 것으로 생각한다.

본 연구는 Fig. 4와 같이 수소충전소의 설치단계에서 실행하는 위험성 평가와 운영단계에서 경영위험성 평가의 필요성을 기존 연구결과와 비교하여 찾아보고 대응방안을 마련하여 보았다.

정성적 위험평가기법인 FMEA 평가기법을 통해 우선적으로 개선해야 할 사항을 보여줌으로써 설계상의 부족한 부분을 채울 수 있었다. 그리고 HAZOP 평가기법을 통해서 안전조치 사항으로 보다 강화된 안전기준 마련의 기초자료로 활용 할 수 있을 것으로 판단했다. 정량적 위험평가기법을 통해서 사람에게 가장 큰 피해를 일으키는 사고는 튜브트레이러의 파열 사고로 분석했다. 따라서 사고발생시 피해확산 방지를 위한 튜브트레이러의 안전조치 강화, 충전소 설치시 유효한 이격거리 기준 등의 결과를 도출하고, 안전방안을 제시하였다.

수소충전소 위험성을 식으로 표현하면 다음과 같다.

$R \simeq R(AC) + R(AL)$	R: risk, AC: Acceptable Risk, AL: Allowable Risk
$R(AC) / \{ \sum(X) + \sum(Y) \} = S_1$	X: Qualitive Risk Assessment, Y: Quantitive Risk Assessment
$R(AL) / M(X+Y) = S_2$	S ₁ : Safe Disign and Installation, S ₂ : Safe Operation
$S_1 + S_2 \leq SS$	M: Management, SS: Strengthening Safety

수소충전소의 위험은 ‘수용가능한 위험’과 허용가능한 위험으로 나눌 수 있다. ‘수용가능한 위험’은 기존 연구결과인 정 성적 평가와 정량적 평가를 통해 안전한 설계 및 설치를 하고 있다. 그러나 ‘허용가능한 위험’은 경영위험성 평가를 통해서 잔류위험 요인인 운영단계 위험을 줄일 수 있었다. 두 단계의 위험성평가가 필요함을 알 수 있으며, 이를 통해 수소충전소의 안전성이 보다 강화됨을 확인하였다. 따라서 경영안전성 평가가 필요함을 파악 할 수 있다.

결론

수소충전소 설치단계에 선행되는 위험성 평가는 ‘수용 가능한 위험성’ 평가로 모두 유의미한 결과가 도출되어 설립 허가 의 자료로 활용되고 있다. 그러나 운영주의 관점으로 운영단계에서 발생 가능한 위험, 즉 ‘허용 가능한 위험성’ 평가는 현재 부족한 것으로 분석 되었다. 따라서 수소충전소의 운영중단 시 발생 가능한 경영위험성 평가와 이에 대한 대응방안 마련이 필요하다는 결론을 도출 하였고, 이에 대한 대응방안을 다음과 같이 정리하였다.

- 1) 주요설비 고장위험의 대응방안은 주요 소재 및 부품의 표준화 및 국산화이다. 국내 소재 및 부품생산기업에 대한 정부의 과감한 지원정책이 있어야 할 것이다.
- 2) 안전관리자 부실 또는 부재에 관한 경영위험성은 종사자 전원에 대한 시설 안전관리자 교육 이수 등으로 법정안전관리자 부재로 인한 운영 위험요인을 줄일 수 있다.
- 3) 수소공급 불규칙 위험은 파업 등으로 인한 공급망 파괴, 수소가격 변동에 따른 공급량 불균형 등 다양한 위험이 존재하

므로 공급망 다변화와 수소저장시설 확충 및 정부의 주요산업 보호육성 정책 확대 등이 필요하다.

- 4) 소모성부품 수급 불균형 위험은 부품의 표준화 및 공급업체의 다변화가 필요하다. 아울러 ‘수소충전소 실시간 모니터링시스템’의 활용을 제안한다. 주요부품의 위험감지 뿐 아니라, 수소충전소 별 주요부품의 교체시기 등을 A/S시스템과 연계하여 운영한다면 고장율 및 운영 중단기간을 상당히 감소시킬 수 있을 것이다.
- 5) 자연재해, 인적재해 등 각종 재난, 재해로 인한 영업중단에 대한 위험평가는 하나의 연구과제로 보고 본 연구에서는 기업재난관리시스템 도입을 제안한다. 이와 관련하여 보다 깊이 있는 후속연구가 필요한 것으로 판단된다.

References

- [1] Byun, Y.-S. (2021). “A study on improvement for mobile hydrogen refueling station by HAZOP analysis.” *Transaction of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 32, No. 5, pp. 299-307.
- [2] Choi, I.-Y. (2020). *dodam@gasnews.com* 7. October.
- [3] Chung, G.-I. (2020). “The future of the hydrogen economy in the future.” *Institute For International Trade, Trade Focus*, Vol. 38, p. 2.
- [4] Chung, J.-W. (2017). *Risk Evaluation. Assessment Manual*, www.kosha.or.kr.
- [5] Jun, D.-C. (2014). “A study on safety policies for a transition to a hydrogen economy.” *Transaction of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 25, No. 2. pp. 161-172.
- [6] Jung, S.-K. (2020). *soon9@donga.com*. 19. October.
- [7] Kang, S.-G., Huh, Y.-S., Moon, J.-S. (2017). “A study on safety improvement for packaged hydrogen refueling station by risk assessment.” *Transaction of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 28, No. 6, pp. 635-641.
- [8] Kim, H.-C. (2021). *A Study on the Introduction of Hydrogen Vehicle Fueling Station’s Risk Assessment System to Improve Safety*. Ph.D. Dissertation, Daegu University.
- [9] Kim, H.-L., Kang, S.-K. (2020). “Analysis of damage range and impact of on-site hydrogen fueling station quantitative risk assessment program (Hy-KoRAM).” *Transaction of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 31, No. 5, pp. 459-466.
- [10] Kim, S.-D., Lee, S.-H., Kim, C.-S. (2020). “Introduction of the STPA mechanism to derivation of risk scenarios for establishment of disaster reduction activity plan.” *Journal of the Society of Disaster Information*, Vol. 16, No. 4, pp. 784-795.
- [11] Kim, S.-D., Kim, C.-S. (2019). “A proposal of the disaster mitigation activity management system model for strengthening disaster prevention activities.” *Journal of the Society of Disaster Information*, Vol. 15, No. 4, pp. 502-513.
- [12] Lee, H.-G. (2020). “Hydrogen charging station technology that will determine the success or failure of hydrogen mobility.” *KATECH Technology Review*, Vol. 9, p. 17.
- [13] Lee, J.-W., Park, J.-H., Kim, D.-H., Tak, S.-S., Yang, B.-J. (2021). “Status of the real-time safety monitoring system of hydrogen refueling station according to the operation.” *Journal of the Korean Institute of Gas*, Vol. 25, No. 6, pp. 92-97.
- [14] Lee, S.-H. (2022). *A Study on the Safety Enhancement Model for Package Type Hydrogen Refueling Station through STPA Application*. Ph.D. Dissertation, Pukyong National University.
- [15] National IT Industry Promotion Agency (2016). *SW Safety Common Development Guide*.
- [16] Seo, D.-H., Lee, K.-W., Kim, T.-H. (2020). “A Study On Hazard Factor Of Packaged Hydrogen Station By Failure Mode & Effects Analysis.” *Transaction of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 31, No. 1, pp. 65-72.