



FAHP-HAZOP을 적용한 수소충전소의 위험성평가 방법 연구

조영광 · †한신호*

한국가스안전공사 가스안전연구원, *한국공학대학교 생명화학공학과 교수
(2023년 10월 16일 접수, 2023년 12월 25일 수정, 2023년 12월 26일 채택)

Study on Risk Assessment Method of Hydrogen Station using FAHP-HAZOP

Yeong Gwang Jo · †Sien Ho Han*

*Institute of Gas Safety R&D, Korea Gas Sasfety Corporation,
1390, Wonjung-ro, Maengdong-myeon, Eumseong-gun, Chungcheongbuk-do, Republic of Korea*

** Dept. of Chemical Engineering and Biotechnology, Tech University of Korea,
237, Sangidaehak-ro, Siheung-si, Gyeonggi-do, Republic of Korea*

(Received October 16, 2023; Revised December 25, 2023; Accepted December 26, 2023)

요약

기후변화 문제를 해결하기 위해 탄소중립은 이제 선택이 아닌 필수가 되었다. 수소는 재생에너지의 간헐적 생산을 보완할 수 있는 저장 매체일 뿐만 아니라 반응 후 이산화탄소 배출이 없어 활용 분야에서도 좋은 대안으로 여겨지고 있다. 수소 활용 분야 중 하나인 수소자동차의 활성화를 위해서는 수소충전소 인프라 구축이 선행되어야 한다. 수소충전소의 효율적인 운영과 위험성평가를 위해서는 위험요인에 대한 우선순위 선정이 필요하지만, 국내 수소충전소 운영 기간이 짧아 사고에 따른 빈도 데이터가 부족하고 그 신뢰도가 낮다. 본 연구에서는 HAZOP을 통하여 수소충전소에서 발생 가능한 이탈의 원인과 결과를 도출하고 Fuzzy-AHP를 활용하여 분석하려고 한다. 이를 통하여 수소충전소에서 발생 가능한 이탈 원인의 의사결정값을 도출하고 수소 사고사례와 위험성평가에 적용하여 데이터의 신뢰성과 효용성을 확인하고자 한다.

Abstract - To solve the problem of climate change, carbon neutrality has now become a necessity rather than an option. Hydrogen is not only a energy storage that can supplement the intermittent production of renewable energy, but is also considered a good alternative in the field of utilization as it does not emit carbon dioxide after reaction. In order to revitalize hydrogen vehicles, one of the fields of hydrogen utilization, the construction of hydrogen station infrastructure must be preceded. Prioritization of risk factors is necessary for efficient operation and risk assessment of hydrogen stations, but due to the short operation period of domestic hydrogen stations, there is a lack of frequency data on accidents and their reliability is low. In this study, we aim to identify the causes and consequences of deviations in hydrogen stations through HAZOP analysis. Additionally, we intend to analyze them using Fuzzy-AHP. Through this, we intend to derive the decision values for the causes of deviations in hydrogen stations and apply them to hydrogen accident cases and risk assessments to confirm the reliability and utility of the data.

Key words : hazard and operability study, analytic hierarchy process, fuzzy theory

†Corresponding author:han@tukorea.ac.kr

Copyright © 2023 by The Korean Institute of Gas

I. 서론

환경오염에 따른 기후변화는 인간을 비롯하여 지구 생태계에 큰 위협요소로 작용하고 있다. 이러한 기후변화는 화석연료의 사용에 따른 이산화탄소의 발생이 그 주요한 원인으로 꼽히고 있다[1]. 기후변화로 인한 문제가 심각해지면서 ‘2050년 탄소중립’이 세계적인 패러다임으로 부상했다. 탄소중립이란 온실가스의 순 배출량이 ‘0’라는 의미로, 2019년 121개국이가입한 ‘2050 탄소중립 목표 기후동맹’ 설립을 계기로 구체화 되었다. 주요국은 탄소중립 선언에 속도를 내고 있다. 2019년 12월 유럽연합(EU)을 시작으로 2020년에 중국(9월), 일본(10월), 한국(10월)이 탄소중립 선언 대열에 합류했다[2]. 전문가들은 탄소중립을 위해 태양광, 풍력 등 재생에너지의 활용은 선택이 아닌 필수라고 강조하고 있다[3]. 재생에너지는 간헐적으로 발생한다는 단점을 가지고 있는데 수소는 이를 보완할 수 있는 에너지 저장 매체일 뿐만 아니라 이산화탄소 배출이 없어 활용 분야에서도 좋은 대안으로 여겨지고 있다.

수소의 활용 분야 중 하나인 수소자동차는 연료전지에 의해 생산된 전기를 이용해 구동되는 방식으로 반응 후 물을 배출함으로 이산화탄소 발생이 없다. 또 에너지저장 밀도가 높고 전기자동차 대비 충전시간이 짧다는 장점이 있다[4]. 이러한 장점 때문에 정부에서는 수소자동차 보급의 활성화를 위한 정책을 지속하여 2022년 말 기준 2만 9733대[5]에서 2023년 말까지 1만 6920대[6]를 추가로 보급하여 총 4만 7000대를 보급할 계획을 하고 있다. 하지만 차량을 구매하는 소비자들의 반응은 좋지 않다. 수소충전소 인프라 부족 때문이다[7].

수소충전소의 인프라가 부족한 이유는 크게 2가지이다. 첫째는 경제적인 측면이다. 수소충전소의 건설비용은 약 25~30억[6] 원으로 전기자동차 충전소의 구축비용인 2천만~1.5억[8] 원과 비교하여 17배~150배 많은 재원이 필요하다. 둘째는 법적인 문제이다. 수소충전소는 고압가스 안전관리법에 적용을 받아 관련 기준을 충족하여야 하지만 건물이 밀집한 수도권에서는 안전거리를 확보하기 어렵다. 정부에서는 수소충전소 확충을 위하여 충전소 구축 비용 지원 및 부품의 국산화를 위한 노력을 지속하고 있으며 안전거리 확보가 어려운 경우 산업융합 촉진법의 규제 특례를 적용하여 수소충전소의 위험성을 평가하고 추가적인 안전조치를 시행할 경우 설치가 가능하도록 지원하였다[9].

하지만 수소충전소는 구축 후에도 시설의 유지 및 안전관리로 많은 운영비가 지속해서 소요되고

위험순위와 상관없이 안전관리를 하고 있어 사업장에 맞는 효율적인 운영에 어려움이 존재한다. 또 국내 수소충전소 운영 기간이 짧아 위험성평가에 필요한 사고빈도 데이터 등이 부족하고 신뢰도가 낮다.

본 연구에서는 효율적인 수소충전소 운영을 위하여 국내 시설기준을 기반으로 구성된 수소충전소를 대상으로 위험과 운전분석을 하고 설비별로 이탈의 원인과 결과를 DB화하였다. DB화된 이탈의 원인과 결과는 유형화하여 전문가 집단의 설문조사를 통해 분석하였다. 이렇게 분석된 결과는 정량적 비교가 가능한 의사결정값(Decision Value)으로 제시하여 수소충전소의 위험성평가 데이터로 이용하거나 우선순위 따른 시설유지 및 안전관리를 하는 데 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

II. 이론적 배경

2.1. 수소충전소(Hydrogen station)

수소충전소는 수소의 공급방식에 따라 온사이트 수소충전소와 오프사이트 수소충전소로 구분된다[10]. 오프사이트 수소충전소는 사업장 밖에서 수소를 공급받아 사용하고 온사이트 수소충전소는 사업장 내에서 수소를 제조하여 사용한다[11].

오프사이트 수소충전소는 저장식 수소충전소로 불리며 부생수소, 수소추출방식으로 대량 생산되는 수소를 튜브트레이러 등으로 이송하여 사업장 내 압축가스설비에 저장한 뒤 사용한다[11]. 온사이트 수소충전소는 제조식 수소충전소로 불리며 사업장 내 제조설비에서 도시가스를 개질하거나 물을 전기분해하여 수소를 추출하여 사용한다[11].

부생수소의 단가가 제조식 수소충전소의 수소 단가보다 상대적으로 저렴[12]하여 대부분의 수소충전소는 오프사이트로 운영 중이나 지역에 따라 수소의 운송비용이 생산비용 보다 많이 소요될 수 있고 생산량이 증가함에 따라 제조식 수소충전소의 수소 단가가 감소하는 경향이 있어 지역과 수요에 따라 적절한 형태의 수소충전소가 구축될 것으로 예상된다[13].

저장식 수소충전소의 주요 설비는 압축기, 압축가스설비, 칠러, 디스펜서, 안전장치이며 제조식 수소충전소의 경우 제조설비가 추가로 필요하므로 상대적으로 설비의 구축비용과 위험도가 높다.

본 연구에서는 국내 기준분석을 통하여 수소충전소 유형별로 도면을 제작하고 위험성평가를 수행하였다. 도출된 위험요인은 설비별 이탈의 원인과 결과를 분석하기 위해 활용하였다.

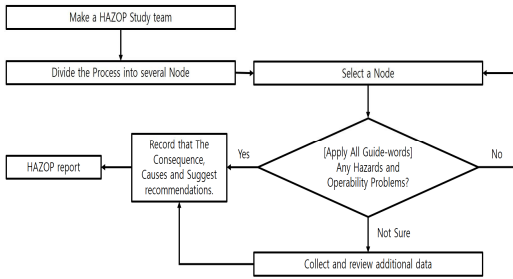


Fig. 1. Procedure diagram of HAZOP.

2.2. 위험성평가(Risk Assessment)

위험성평가는 사업장 내의 위험요인을 파악하고 해당 위험요인에 의한 피해의 발생 가능성과 치명도를 추정하여 감소 대책을 수립하는 과정으로 정성적 평가와 정량적 평가로 구분된다[14].

정성적인 평가는 전문가의 의견을 통하여 위험요인을 도출하고 안전대책을 수립하는 방법으로 다양한 분야에서 위험요인을 도출하기 위해 활용되고 있으며 Check list, What-if, HAZOP(Hazard and Operability Study), FMEA(Failure Mode and Effects Analysis) 등이 존재한다[15]. 정량적인 평가는 정성적인 위험성평가에서 도출된 위험요인의 가능성과 결과를 논리적으로 추정하고 그 결과를 정량적으로 표현하는 방법으로 FTA(Fault Tree Analysis), ETA(Event Tree Analysis), CCA(Cause-Consequence Analysis) 등이 대표적이다[16].

본 연구에서는 HAZOP를 활용하여 수소충전소 내 발생이 가능한 위험요소를 가이드 워드와 변수를 조합하여 도출하려고 한다.

2.3. 객체지향 모델링(Object-oriented modeling)

객체지향 모델링이란 소프트웨어를 개발하는 방법의 하나로 데이터와 기능을 가진 함수를 하나의 객체로 묶어 설계자가 직관적으로 인식할 수 있도록 하고 객체를 중심으로 이뤄진 모듈 간 관계를 모델링하여 이를 기반으로 소프트웨어를 제작하는 방법이다[17]. 객체지향 방법은 데이터와 기능을 단순화할 수 있고 객체를 추가하거나 삭제하기 쉬워 다양한 환경에서 대응하기 쉽다. 또 추가로 필요한 객체는 간단히 추가할 수 있어 확장성이 좋고 복잡한 시스템을 추상화하여 시스템 설계를 단순화할 수 있는 특징을 가지고 있다[18].

본 연구에서는 HAZOP에서 도출된 위험요인의 이탈 원인과 결과를 설비별로 객체화하여 설비 간 조합을 통해 다양한 위험요인을 도출하는 데 활용

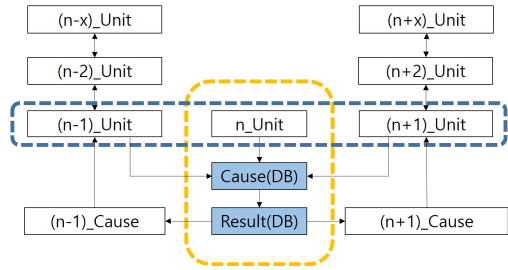


Fig. 2. Relationship between objects in HAZOP.

이 가능하도록 상대적 중요도와 의사결정값과 함께 DB화하였다.

2.4. 계층화분석법(Analytic Hierarchy Process)

계층화분석법은 다양한 대안들의 우선순위를 체계적으로 평가하기 위한 의사결정 지원기법 중 하나로 Satty(1971)에 의해 개발되었다[19]. AHP는 의사결정 목표가 다수이며 복잡한 경우 이를 계층화하고 기준들을 쌍대비교하여 중요도를 산출한다. 계층화분석법은 간결한 절차와 넓은 범용성 및 이론의 단순성 때문에 여러 가지 최적의 대안을 선정하는 방법으로 널리 사용되고 있다.

본 연구에서는 HAZOP을 통해 도출된 이탈의 결과를 쌍대비교로 평가하고 상대적 중요도(Weight)를 산정하는 데 활용하였다.

2.5. 퍼지이론(Fuzzy Theory)

퍼지이론은 불명확한 정보나 불확실한 인간 판단의 모호한 현상을 수학적으로 표현하기 위해 제시된 이론으로 언어 등의 애매함을 정량적으로 표현하기 위해 Zadeh(1965)에 의해 제안된 이론이다[20]. 퍼지집합은 기존 크리프집합의 “0” 또는 “1” 중 하나에 속해야 하는 개념과 다르게 원소의 모호한 경계를 가지고 있다. 인간의 의사결정에서 “0” 또는 “1” 중에 하나를 선택해야 하는 경우 정확한 평가자의 의견을 반영하는 데 한계가 존재하는데 퍼지이론은 이러한 단점을 보완할 수 있어 설문조사뿐만 아니라 많은 분야에서 활용되고 있다.

본 연구에서는 수소충전소 전문가 집단의 설문조사 결과를 통해 도출된 이탈 결과의 상대적 중요도와 Likert scale로 평가된 이탈의 원인이 결과에 미치는 영향의 정도를 퍼지이론으로 분석하여 전문가 집단의 평가 의견을 이탈 원인의 의사결정값을 통해 정량적으로 표현하기 위하여 도입하였다.

2.6. 퍼지-계층화분석법(Fuzzy-AHP)

쌍대비교에 사용되는 척도는 특정한 수치이고 평가에 이용되는 데이터는 주로 언어적인 표현이 많다. 따라서 계층화분석법만으로 의사결정을 내리기에 부족절하다는 단점이 존재한다. 퍼지-계층화분석법(FAHP)은 이러한 단점을 보완하기 위해 Larhoven and Pedrycz(1983)이 개발하였다[21].

퍼지-계층화분석법은 계층화분석법을 통해 도출된 결과를 퍼지화하고 다시 비퍼지화 하는 과정을 통하여 사용이 가능한 정량적인 데이터로 산출한다. Chang(1996)은 삼각퍼지수를 적용한 방법을 제시하였으며[22], Buckley(1984)는 사다리꼴 퍼지수를 이용한 방법을 제시하였다[23]. 신지에 등(2014)은 Fuzzy-AHP 기법을 적용하여 평가 항목 및 세부 항목에 대한 가중치를 산정하고 멤버십 함수를 이용하여 내수 침수위험도를 평가하는 연구를 진행하였고[24], 김정섭(2020)은 AHP에서 산출된 상대적 중요도와 퍼지이론에 의해 도출된 무게중심값을 통합지표로 하는 의사결정값을 도출하는 방법을 제시하여 장치 라인 공정관리인자의 CTP 선정평가를 수행하였다[25]. 최우철 등(2022)은 국부적 미세먼지 관측을 위한 영상분석용 CCTV 입지 선정을 위해 Fuzzy-AHP 분석 방법을 적용하여 수학적 의사결정 모델 의사결정값으로 분석하였다[26].

본 연구에서는 이탈의 결과에 대한 상대적 중요도와 무게중심값을 활용하여 이탈의 원인이 결과에 미치는 영향을 수학적 의사결정 모델 의사결정값으로 도출해 분석하였다.

III. 연구 방법

3.1. 연구대상 선정

연구대상인 수소충전소의 도면을 제작하기 위하여 제조식 수소충전소와 저장식 수소충전소의 시설 기준인 FP216, FP217 및 도시가스사용시설 기준인 FU551에서 정하고 있는 필수 설비(체크밸브, 수동 밸브, 긴급차단장치, 공기흡입방지장치 등)와 수소충전소의 기능을 위한 필수 설비(압축기, 압축가스 설비, 디스펜서, 칠러, 조절기, 정압기 등)의 조합을

통하여 설치 가능한 설비의 도면을 제작하고 연구 대상의 위험성평가를 위한 도면으로 선정하였다.

3.2. 위험성평가 및 이탈의 객체화

제작된 수소충전소의 연구도면을 대상으로 위험과 운전분석 연구를 수행하였다. 수소충전소의 노드는 9가지로 구분하였다. 노드1A는 튜브트레일러에서 압축가스설비 까지, 노드1B는 도시가스 배관에서 수소추출설비 전단까지, 노드2A는 압축가스설비에서 1차 압축기 전단까지, 노드2B는 수소추출설비에서 1차 압축기 전단까지, 노드2C는 수전해설비에서 1차 압축기 전단까지, 노드3는 1차 압축기에서 압축가스설비 전단까지, 노드4는 압축가스설비에서 2차 압축기 전단까지, 노드5는 2차 압축기에서 압축가스설비 전단까지, 노드6는 압축가스설비에서 충전설비까지로 하였다.

각 노드의 위험요인을 도출하기 위하여 가이드 워드와 변수를 조합하여 이탈을 도출하고 이탈의 원인과 결과를 분석하여 KGS Code FP216, FP217, FU551에서 정하고 있는 안전조치 외의 권고사항을 제시하였다. 또한, HAZOP의 결과를 효율적으로 활용할 수 있도록 서술형 자료를 기호로 단순화하여 이탈의 원인과 결과를 객체화하였다. 예를 들면 압축기설비에 Flow라는 변수와 Less라는 가이드 워드로 인한 이탈이 발생하였고 그 원인은 가스의 누출로 인한 설비 후단 공정의 압력감소라고 할 때 이탈은 Flow(-), 원인은 Leakage, 결과는 S_Pressure(-)로 표현하고 설비의 이탈 원인에 의해 발생하는 결과를 하나의 객체로 저장하였다.

3.3. 전문가 집단 설문조사 및 결과 분석

이탈 결과의 상대적 중요도를 도출하기 위하여 AHP 쌍대비교를 실시하였다. 평가 점수는 1-5까지로 구성하였고 7개의 이탈의 결과 유형을 대상으로 하였다. 평가의 결과는 평가자 별로 비교행렬매트릭스로 정리하고 쌍대비교행렬과 표준행렬을 통하여 일관성 측도를 산정하였다. 평가의 신뢰도를 검증을 위하여 일관성지수(CI)와 일관성비율(CR)을 통해 평가자의 일관성 정도를 검증하였다. 통상적

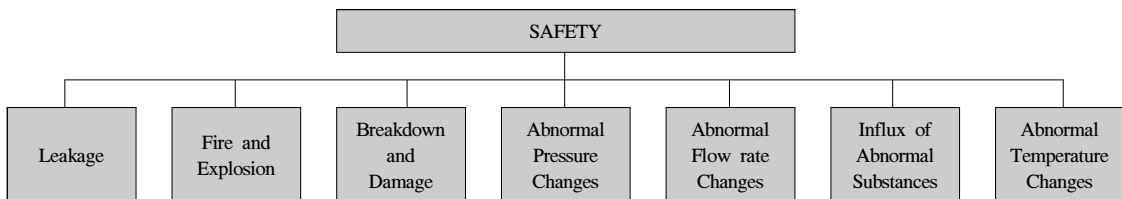


Fig. 3. Hierarchy of Deviation Consequences.

으로 일관성비율이 0.1보다 작으면 일관성에 문제가 없는 것으로 본다[27].

$$CI = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1) < 0.1 \quad (1)$$

$$CR = CI / RI < 0.1$$

일관성이 검증된 자료의 상대적 중요도 산출을 위하여 평가자들의 쌍대비교매트릭스 원소에서 기하평균값을 산출하여 통합행렬매트릭스를 도출하였다. 또 통합행렬매트릭스에서 결과매트릭스를 산출하여 고유벡터 값을 계산하고 상대적 중요도를 도출하였다.

이탈의 결과를 유발하는 원인 12가지 유형에 대한 의사결정값을 도출하기 위하여 각 이탈의 원인이 결과에 미치는 영향을 Likert Scale을 이용하여 5점 척도(Table 1)로 평가하였다. 평가된 결과는 삼각 퍼지수를 적용하여 평가항목별로 취합하였다. 퍼지화된 평가값은 무게중심법을 이용하여 의사결정값을 도출하는 데 활용하였다.

$$A = (\sum_1^n a, \sum_1^n b, \sum_1^n c) / n = (a, b, c) \quad (2)$$

A: Fuzzification Value

$$g = c - \sqrt{(c-a)(c-b)} / 2 \quad (3)$$

g: Center of gravity

Table 1. Likert Scale and Triangular Fuzzy Number

Likert Scale	Verbal expression	TFN
1	No impact at all	(0, 0, 0.2)
2	No impact	(0, 0.2, 0.4)
3	Moderate impact	(0.3, 0.5, 0.7)
4	Impact	(0.4, 0.8, 1)
5	Significant impact	(0.8, 1, 1)

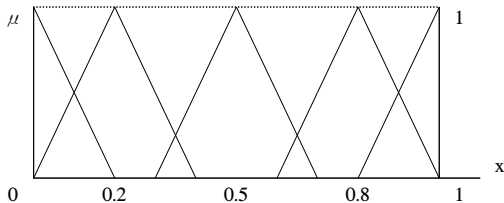


Fig. 4. Triangular Membership Function.

3.4. 사고사례분석 및 의사결정값 적용

수소로 인해 발생한 사고데이터와 도출된 의사결정값을 비교하여 이탈의 원인과 실제 사고의 원인을 비교하였다. 또 수소충전소의 위험성평가 결과에 상대적 중요도와 의사결정값을 적용하여 기존 위험도순위와 비교하였다. 사고데이터는 미국 에너지부에서 설립한 HYDROGEN Safety Panel에서 제작한 1969년부터 2020년까지 발생한 주요 수소 사고를 정리한 수소 사고 사례[28]를 참조하였고 수소충전소의 위험성평가 결과는 신단비 외 6명의 선형 연구 결과[29]를 활용하였다.

IV. 연구 결과

4.1. 연구도면 제작

연구도면은 9가지 노드별로 설치 가능한 설비의 구성을 조합하여 63개의 도면으로 제작하였다. 노드1A는 저장식 수소충전소의 튜브트레일러와 압축가스설비까지로 자동차단장치와 체크밸브, 수동차단장치의 조합을 통하여 3개의 도면을 제작하였다. 노드1B는 제조식 수소충전소 중 도시가스를 이용하여 수소를 추출하는 충전소에 해당하며 사업자대지 경계에서 수소추출장치 전단까지로 배관의 재질, 압축기, 정압기, 조정기의 조합에 따라 10개의 도면을 제작하였다. 노드2A는 압축가스설비에서 1차 압축기 전단까지로 공기흡입방지장치, 체크밸브, 자동차단장치의 조합에 따라 6개의 도면을 제작하였다. 노드2B는 수소추출장치에서 1차 압축기 전단까지로 공기흡입방지장치, 체크밸브, 자동차단장치의 조합에 따라 6개의 도면을 제작하였다. 노드2C는 수전해 설비에서 1차 압축기 전단까지로 공기흡입방지장치, 체크밸브, 자동차단장치의 조합에 따라 6개의 도면을 제작하였다. 노드3는 1차 압축기에서 압축가스설비 전단까지로 안전밸브, 체크밸브, 우선순위패널, 수동차단장치에 조합에 따라 12개의 도면을 제작하였다. 노드4는 압축가스설비와 2차 압축기 전단까지로 공기흡입방지장치, 체크밸브, 자동차단장치의 조합을 통하여 6개의 도면을 제작하였다. 노드5는 2차 압축기에서 압축가스설비 전단까지로 안전밸브, 체크밸브, 우선순위패널, 수동차단밸브의 조합에 따라 12개의 도면을 제작하였다. 노드6은 압축가스설비에서 충전설비까지로 자동차단장치, 우선순위패널의 조합에 따라 2개의 도면을 제작하였다.

4.2. 위험요소 및 운전분석 결과

HAZOP의 결과 위험요인은 5717건 도출되었다.

이탈의 결과는 가스누출, 화재 및 폭발, 고장 및 손상, 비정상적 압력의 변화, 비정상적 유량의 변화, 비정상적 물질의 유입, 비정상적 온도의 변화로 7가지 유형으로 분류하였다. 이탈의 원인은 해당 설비의 고장 및 손상, 해당 설비의 유량차단, 해당 설비의 가스누출, 해당 설비의 오작동, 해당 설비의 비정상적 온도의 변화, 해당 설비 전후 공정의 유량감소, 해당 설비 전후 공정의 유량증가, 해당 설비 전후 공정의 유량차단, 해당 설비 전후 공정의 압력감소, 해당 설비의 전후 공정의 압력증가, 해당 설비 전후 공정의 비정상적 온도변화, 해당 설비 전후 공정에서 공급된 비정상적 물질의 유입으로 12가지 유형으로 분류하였다. 또 설비의 이탈, 원인, 결과를 단순화하여 하나의 객체로 저장하였다. 설비의 구성에 따라 객체 간의 조합을 통하여 객체가 새롭게 추가될 경우에도 유동적으로 사용할 수 있게 하였다. 또한, 전후 설비 사이 이탈의 관계를 통하여 다양한 위험요인이 도출될 수 있도록 이탈의 결과가 전후 설비 공정에 미칠 수 있는 영향을 P(Preceding), S(Subsequent)로 표현하였다.

4.3. Fuzzy-AHP 설문조사 분석 결과

이탈의 결과에 대한 설문조사는 수소충전소의 검사, 점검, 위험성평가 등을 수행 중인 한국가스안전공사 직원 20명 및 수소충전소를 운영하는 실무자 22명을 대상으로 실시하였다.

AHP 설문조사 분석은 일관성이 검증되지 않은 (CI, CR ≥ 0.1) 평가자 8명의 데이터와 경력이 5년 이하인 평가자 8명의 데이터를 제외하고 실시하였다. 그 결과 상대적 중요도는 화재폭발, 가스누출, 비정상적 압력의 변화, 비정상적 물질의 유입, 비정상적 온도의 변화, 고장 및 손상, 비정상적 유량의 변화 순

Table 2. Ranking of Weights

Deviation Consequences	Weights	Rank
Leakage	0.154957038	2
Fire and Explosion	0.243903622	1
Breakdown and Damage	0.11585353	6
Abnormal Pressure Changes	0.136584475	3
Abnormal Flow rate Changes	0.10416904	7
Influx of Abnormal Substances	0.126394853	4
Abnormal Temperature Changes	0.118137443	5

으로 도출되었다(Table 2).

의사결정값을 도출하기 위하여 이탈의 원인이 7가지 이탈의 결과를 발생시킬 수 있는 정도를 Likert scale 5점 척도로 평가하였다. 총 84개의 문항으로 구성하였으며 평가자 중 AHP 설문조사에서 일관성이 검증되지 않은 8명은 제외하고 성실하게 참여가 가능한 평가자 16명을 대상으로 실시하였다. 그중 경력이 5년 이하인 평가자 3명의 데이터는 제외하였다.

평가데이터는 삼각퍼지수를 활용하여 퍼지화 하였다. 평가 결과를 퍼지화 하고 평가항목별로 취합한 퍼지값을 비교 평가가 가능한 형태로 전환하기 위해 무게중심값을 적용하여 비퍼지화 하였다. 비퍼지화된 84개의 무게중심값을 통하여 12개의 원인에 대한 의사결정값을 산출하였다. 의사결정값의 순위는 해당 설비의 고장 및 손상, 해당 설비의 가스누출, 해당 설비의 오작동, 해당 설비 전후 공정의 압력증가, 해당 설비 전후 공정에서 공급된 비정상적 물질의 유입, 해당 설비의 비정상적 온도변화, 해당 설비 전후 공정의 비정상적 온도변화, 해당 설비 전후 공정의 유량증가, 해당 설비의 유량차단, 해당 설비 전후 공정의 압력감소, 해당 설비 전후 공정의 유량감소, 해당 설비 전후 공정의 유량차단 순이었다 (Table 3).

4.4. 수소 사고사례 검토 결과

HYDROGEN Safety Panel에서 제작한 1969년부터 2020년까지의 수소 사고사례[28]를 요약하여 검토하고 본 연구에서 제시한 이탈의 원인과 결과를 기반으로 정리하였다. 수소 사고사례는 67건으로 사고의 결과는 화재 17건, 폭발 16건, 누출 26건, 고장 및 손상 4건, 비정상적 유량의 변화 2건, 비정상적 물질의 유입 1건, 니어미스가 1건이 존재하였다. 사고의 원인은 고장 및 손상 27건, 가스누출 14건, 오작동 9건, 비정상적 물질 유입 8건, 압력증가 4건, 비정상적 온도변화 2건, 유량차단 1건, 원인 불명 1건, 니어미스 1건이 존재하였다.

4.5. 사고사례와 이탈의 상대적 중요도 비교 결과

수소 사고의 결과는 화재 및 폭발(Weight Rank 1) 33건, 가스누출(Weight Rank 2) 26건, 고장 및 손상(Weight Rank 6) 4건, 비정상적 유량의 변화(Weight Rank 7) 2건, 비정상적 물질의 유입(Weight Rank 4) 1건, 니어미스 1건 순으로 많았다. 화재 및 폭발과 가스누출은 상대적 중요도 순위와 사고결과의 순위가 1순위와 2순위로 같았고 고장 및 손상은 상대적 중요도는 순위는 낮으나 사고결과는 3순위에 해당하였다. 비정상적 온도의 변화, 비정상적 압력변화의

Table 3. Ranking of Decision Values

Deviation Causes	Center of gravity values for Deviation Consequences							Decision values	Rank
	Leakage	Fire and Explosion	Breakdown and Damage	Abnormal Pressure Changes	Abnormal Flow rate Changes	Influx of Abnormal Substances	Abnormal Temperature Changes		
Breakdown and Damage	0.837694855	0.789766902	0.84820615	0.835920748	0.858997671	0.800771164	0.800167303	0.82009923	1
Flow blockage	0.639232702	0.546321149	0.534654635	0.650402995	0.627326072	0.511577712	0.523076923	0.574883606	9
Leakage	0.924631085	0.864139202	0.825129227	0.835920748	0.871283073	0.604249149	0.650402995	0.807784356	2
Malfunction	0.68547274	0.77769424	0.802052304	0.823848087	0.823848087	0.731540394	0.77769424	0.77150393	3
Abnormal temperature change	0.661705765	0.77769424	0.719633765	0.754013457	0.71927002	0.592474995	0.835920748	0.727142049	6
Reduced flow rate(P/S)	0.523076923	0.453846154	0.523076923	0.684782688	0.523076923	0.500000000	0.592307692	0.533539727	11
Increased flow rate(P/S)	0.638628842	0.684782688	0.707859611	0.811941457	0.765787611	0.603885404	0.673116174	0.694507235	8
Flow blockage(P/S)	0.476923077	0.476923077	0.500000000	0.685386548	0.673479919	0.407692308	0.453846154	0.51706797	12
Pressure reduction(P/S)	0.488499249	0.442345403	0.580806942	0.719633765	0.638628842	0.500000000	0.592307692	0.548861873	10
Pressure increase(P/S)	0.765787611	0.707859611	0.742710688	0.84692501	0.84692501	0.626962327	0.707859611	0.744129066	4
Abnormal temperature changes(P/S)	0.684782688	0.707859611	0.719633765	0.742346943	0.71927002	0.603885404	0.812843825	0.710807565	7
Inflow of abnormal substances(P/S)	0.650402995	0.696556842	0.812843825	0.812843825	0.731540394	0.812843825	0.684798639	0.735713428	5

경우 사고결과에는 존재하지 않았다. 사고의 피해가 상대적으로 높다고 평가된 화재 및 폭발과 가스누출은 사고의 빈도 또한 높았으며 고장 및 손상의 경우 사고의 피해는 상대적으로 낮다고 평가되었지만 사고의 빈도는 높았다.

4.6. 사고사례와 이탈의 의사결정값 비교 결과

수소 사고의 원인을 본 연구에서 도출한 이탈 원인의 유형별로 분류하면 해당 설비의 고장 및 손상은 27건, 해당 설비의 가스누출 14건, 해당 설비의 오작동 9건, 해당 설비 전후 공정에서 공급된 비정상적 물질 유입 8건, 해당 설비 전후 공정의 압력증가 4건, 해당 설비의 비정상적 온도변화 2건, 해당 설비의 비정상적 온도변화 2건이었다. 사고원인의 건수로 정렬한 결과 해당 설비의 고장 및 손상(DV Rank 1), 해당 설비의 가스누출(DV Rank 2), 해당 설비의 오작동(DV Rank 3), 해당 설비 전후 공정에 공급된 비정상적 물질의 유입(DV Rank 5), 해당 설비 전후 공정의 압력증가(DV Rank 4), 해당 설비의 비정상

적 온도변화(DV Rank 6), 해당 설비의 유량 차단(DV Rank 9) 순이었다. 해당 설비의 고장 및 손상, 해당 설비의 가스누출, 해당 설비의 오작동, 해당 설비의 비정상적 온도변화의 경우 이탈 원인의 의사결정값 순위와 사고원인의 순위가 같았고 해당 설비 전후 공정의 비정상적 물질 유입, 해당 설비 전후 공정의 압력증가는 순위는 달랐지만 의사결정값과 사고원인 모두 5순위 내에 존재하였다. 이탈의 원인 중 해당 설비 전후 공정의 비정상적 온도변화, 해당 설비 전후 공정의 유량증가, 해당 설비 전후 공정의 압력감소, 해당 설비의 전후 공정의 유량감소, 해당 설비 전후 공정의 유량차단은 사고원인에 존재하지 않았다.

사고원인의 유형과 이탈의 의사결정값을 비교한 결과 본 연구에서 제시한 사고유형이 실제 사고원인의 유형을 모두 포함하였고 사고원인의 순위와 전문가 집단의 평가를 통해 도출된 의사결정값 순위가 유사한 경향을 보인다는 것을 알 수 있었다. 수소 사고유형에 없는 이탈의 원인인 해당 설비 전후

Table 4. Risk Grading Guide(Proposal)

Risk Grade	Guide(Proposal)	W&DV Risk Level
High Risk	Work Interruption (Work after Removal of Risk Factors)	Grade1(More than 0.20)
		Grade2(0.19 ~ 0.20)
		Grade3(0.18 ~ 0.19)
		Grade4(0.17 ~ 0.18)
		Grade5(0.16 ~ 0.17)
		Grade6(0.15 ~ 0.16)
Moderate Risk	Conditional Work (Risk Factor Removal)	Grade7(0.14 ~ 0.15)
		Grade8(0.13 ~ 0.14)
		Grade9(0.12 ~ 0.13)
		Grade10(0.11 ~ 0.12)
Low Risk	Conditional Work (Timely Removal of Risk Factors)	Grade11(0.10 ~ 0.11)
		Grade12(0.09 ~ 0.10)
		Grade13(0.08 ~ 0.09)
	Risk Factor Monitoring	Grade14(0.07 ~ 0.08)
		Grade15(0.06 ~ 0.07)
	Self-operation	Grade16(Less than 0.06)

공정의 비정상적 온도변화, 해당 설비 전후 공정의 유량증가, 해당 설비 전후 공정의 압력감소, 해당 설비의 전후 공정의 유량감소, 해당 설비 전후 공정의 유량차단은 잠재적인 사고의 원인으로 작용할 것으로 예상된다.

4.6. 위험등급 가이드(안) 제작

피해의 정도를 의미하는 상대적 중요도와 사고원인의 순위와 유사한 경향을 보이는 의사결정값을 이용하여 위험도 매트릭스를 제작하고 16개의 위험도로 구분하였다. 또한, 위험도에 따른 위험등급과 가이드를 제시한 위험등급 가이드(안)를 제작하였다(Table 4). 고위험은 6개의 위험도를 포함하며 작업을 중단하고 위험요인을 제거하도록 제시하였다. 중위험은 4개의 위험도를 포함하며 위험요인의 제거를 진행하면 조건부로 작업을 허용하도록 제시하였다. 저위험은 6개의 위험도를 포함하며 일정 기간 내 위험요인 제거를 통한 조건부 작업, 위험요인 모니터링, 자체 운영 관리를 하도록 제시하였다.

4.7. 상대적 중요도와 의사결정값 적용 결과

상대적 중요도와 의사결정값을 기존 선행연구 데이터에 적용하여 비교하였다. 신단비 외 6인이 선행

연구한 “수소 압축 개질공정의 정성적 위험성평가”에서는 수소 개질공정을 HAZOP을 통하여 위험요인을 도출한 뒤 빈도와 치명도를 통하여 Risk Level을 도출하였다[29]. 이 중 도출한 Risk Level이 동일한 3건의 이탈에 대하여 상대적 중요도와 의사결정값을 이용한 위험등급을 적용하였다.

첫 번째 위험요인은 TK 전후단 벤트의 열림으로 인하여 수소 또는 CO₂가 대기로 방출되는 시나리오이다. 이탈의 원인과 결과를 본 연구의 이탈의 유형 중 해당 설비의 전후 공정 압력 증가로 인한 가스누출과 오작동에 의한 가스누출을 적용하여 위험도를 산출하였다. 해당 설비의 전후 공정 압력증가에 따른 가스누출의 경우 위험도 값은 0.115308036으로 위험등급은 중위험에 해당하며 위험도는 10급에 해당하였다. 오작동에 의한 가스누출의 경우 위험도 값은 0.119549964로 위험등급은 중위험에 해당하며 위험도는 10급에 해당하였다.

두 번째 위험요인은 벨브와 배관의 이음부와 피팅에서 가스가 누출하여 대기 중으로 방출되는 시나리오이다. 이탈의 원인과 결과를 본 연구의 이탈의 유형 중 해당 설비의 가스누출로 인한 가스누출을 적용하여 위험도를 산출하였다. 해당 설비의 가스누출로 인한 가스누출의 경우 위험도 값은 0.125171871로 위험등급은 중위험에 해당하며 위험도는 9급에 해당하였다.

세 번째 위험요인은 PSA에서 수소추출설비로 가는 환류 라인에 역류가 발생하여 수소추출설비 전단에 고압이 형성되는 시나리오이다. 이탈의 원인과 결과를 본 연구의 이탈의 유형 중 해당 설비의 전후 공정 압력증가로 인한 비정상적 압력변화와 해당 설비의 오작동에 의한 비정상적 압력변화를 적용하여 위험도를 산출하였다. 해당 설비의 전후 공정 압력 증가로 인한 비정상적 압력변화의 경우 위험도 값은 0.101636478로 위험등급은 저위험에 해당하며 위험도는 11급에 해당하였다. 해당 설비의 오작동에 의한 비정상적 압력변화의 경우 위험도 값은 0.105375459로 위험등급은 저위험에 해당하며 위험도는 11급에 해당하였다.

Risk Level이 동일한 이탈에 상대적 중요도와 의사결정값을 적용한 결과 Leak of joint and fitting of valve and pipe에 의해 Released into the atmosphere가 발생하는 경우, Front and rear Vents of TK are open에 의해 Hydrogen and CO₂ released into the atmosphere가 발생하는 경우, Back flow from PSA vent line에 의한 High pressure at front end의 경우 순으로 위험순위가 결정되었다(Table 5).

Table 5. Applying the Risk Grading Guide(Proposal) to the results of the risk assessment[29]

No.	Deviations	Causes	Consequences	Risk Level			W&DV Risk Level
				Frequency	Criticality	Level	
1	No/low flow	Front and rear Vents of TK are open	Hydrogen and CO ₂ released into the atmosphere	1	1	1	Grade 10
2	No/low flow	Leak of joint and fitting of valve and pipe	Released into the atmosphere	2	1	1	Grade 9
3	Back flow	Back flow from PSA vent line	High pressure at front end	2	1	1	Grade 11

V. 결론

본 연구에서는 수소충전소의 유형별 도면을 제작하여 HAZOP을 수행하고 전문가 집단 설문조사 결과를 Fuzzy-AHP를 통하여 분석하였다.

수소충전소에서 발생 가능한 이탈의 결과는 7가지의 유형으로 분류하였으며 화재폭발, 가스누출, 비정상적 압력의 변화, 비정상적 물질의 유입, 비정상적 온도의 변화, 고장 및 손상, 비정상적 유량의 변화 순으로 상대적 중요도가 도출되었다.

이탈의 결과를 발생시키는 원인은 12가지의 유형으로 분류하였으며 해당 설비의 고장 및 손상, 해당 설비의 가스누출, 해당 설비의 오작동, 해당 설비 전후 공정의 압력증가, 해당 설비 전후 공정에서 공급된 비정상적 물질의 유입, 해당 설비의 비정상적 온도변화, 해당 설비 전후 공정의 비정상적 온도변화, 해당 설비 전후 공정의 유량증가, 해당 설비의 유량차단, 해당 설비 전후 공정의 압력감소, 해당 설비 전후 공정의 유량감소, 해당 설비 전후 공정의 유량차단 순으로 의사결정값이 도출되었다.

수소 사고사례를 분석하여 의사결정값과 비교한 결과 사고를 발생시키는 원인의 유형은 7가지였으며 사고원인의 순위와 의사결정값 순위의 유사성을 확인할 수 있었다. 본 연구에서 제시한 이탈의 원인은 12가지에서 실제 사고의 원인 7가지를 제외한 5가지 이탈의 원인은 잠재적인 사고의 원인으로 작용할 것으로 예상된다.

상대적 중요도와 의사결정값을 통해 제시한 위험도를 선형 위험성평가 연구에 적용한 결과 동일한 Risk Level를 가진 이탈에 우선순위를 차등하여 부여할 수 있었다.

따라서 본 연구 결과를 통하여 도출된 상대적 중요도와 의사결정값은 수소충전소의 위험성평가에

필요한 데이터가 부재할 경우 위험도를 대체하는 데이터로 사용하거나 신뢰도가 낮은 데이터를 보완하는 자료로 활용이 가능할 것으로 여겨지며 충전소의 유지보수 및 안전관리의 우선순위를 선정하는데 적용하여 효율적인 수소충전소 운영을 위한 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

감사의 글

이 논문은 2021년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(2021400000090, 수소에너지산업 고도화 인력양성)

REFERENCES

- [1] Lee, S.G., "Studies of French policies and urban planning for responding to climate change and carbon reductions", *KIEAE Journal*, 12(1), 65-71, (2012)
- [2] Lee, G.Y., Lee, M.A., "Major Countries' Trends in Carbon Neutrality Technology Policie", *Green Technology Center*, 2(1), (2021)
- [3] Carbon Neutrality Green Growth Commission, *2050 Carbon Neutrality Scenario*, The Government of the Republic of Korea, (2021)
- [4] Han, T. H., Im, D. S., Kim, J. T., "Analyzing the Environmental and Economic Impact of the Spread of Electricity and Hydrogen Vehicles: Application of the Computable General Equilibrium Model (CGE)." *Environmental and Resource Economics Review*, 28(2), 231-276, (2019)
- [5] Ministry of Environment, *Hydrogen Vehicle Ex-*

- pansion, *Actively Promoting Collaboration with Local Governments*(Press Release), The Government of the Republic of Korea, (2023)
- [6] Ministry of Environment, *Guidelines for Grant Processing in the 2023 Subsidy Program for Hydrogen Vehicle Deployment and Station Installation*, The Government of the Republic of Korea, (2023)
- [7] An, G.W., Jin, K.S., Kim, B.I., Shin, H.C., *Strategies for Activating Private Investment in Expanding Hydrogen and Electric Vehicle Charging Infrastructure*, Korea Transport Institute, (2022)
- [8] Ministry of Environment, *Guidelines for Subsidy Program, Funding, and Installation·Operation of Fast Charging Infrastructure for Electric Vehicles in 2023*, The Government of the Republic of Korea, (2023)
- [9] Ministry of Trade, Industry and Energy, *Promoting Green and Digital Economy through Regulatory Easing Targeted at People's Daily Lives!*(Press Release), The Government of the Republic of Korea, (2021)
- [10] Park, J.N., *Current Status of Hydrogen Station Technology and Policy*, Korean Industrial Chemistry News, 21(3), (2018)
- [11] Lee, M.Y., Kim, S.G., Tak, S.S., Kim, D.T., "Analysis of the Effectiveness of the Pre-Consultation System for Hydrogen Stations in Expanding Hydrogen Mobility Infrastructure", *Journal of the Korean Institute of Gas*, 25(6), 85-91, (2021)
- [12] Kim, G.B., Kim, T.K., *Hydrogen Production*, KISTEP Technology Trends Brief, Vol.2, (2021)
- [13] Hong, S.A., Kim, H.J., Park, C.H., Lee, J.G., *Analysis Study on the Domestic Hydrogen Production, Consumption, and Distribution Status*, Gwangju Institute of Science and Technology, (2017)
- [14] Industrial Accident Prevention Support Division, *Guidelines for Risk Assessment at Workplaces*, Ministry of Employment and Labor, (2020)
- [15] Song, J.T., Lee, W.J., *Risk assessment and analysis techniques*, Sungandang, Seoul, (2019)
- [16] Tae, C.H., Lee, H.S., Byun, C.H., Yang, J.M., Park, C.H., Ko, J.W., "A Study on Risk Analysis of Manufacturing Process Using the Bow-Tie Method", *Journal of the Korean Institute of Gas*, 17(3), 33-38, (2013)
- [17] Lee, S.G., "UML Modeling Object-Oriented Analysis and Design" Hongpub, Seoul, (2020)
- [18] Kim, C.S., "Easy Learning Software Engineering", Hanbit Academy, Seoul, (2015)
- [19] Saaty, T.L., "The Analytic Hierarchy Process", MacGraw-Hill, New York, (1980)
- [20] Zadeh, L.A., "Fuzzy sets", *Information and control*, 8, 338-353, (1965)
- [21] Laarhoven, P.J.M., Pedrycz, W., "A Fuzzy Extension of Saaty's Priority Theory", *Fuzzy Sets and Systems*, 11, 229-241, (1983)
- [22] Chang, D.Y., "Applications of the extent analysis method on fuzzy AHP", *European Journal of Operational Research*, 95(3), 649-655, (1996)
- [23] Buckley, J.J., *The Multiple-judge, Multiple-criteria Ranking problem*, *Fuzzy Sets and Systems*, 13, (1984)
- [24] Shin, J.Y., Park, Y.J., Kim, T.Y., "Evaluation of Inland Inundation Risk in Urban Area using Fuzzy AHP", *Journal of Korea Water Resource Association*, 47(9), 789-799, (2014)
- [25] Kim, J.S., *Development of CTP Selection Methodology for Device Lines Using AHP and Fuzzy Decision Models*, Ph.D. Dissertation, Kumoh National Institute of Technology, (2020)
- [26] Choi, W.C., Cheong, K.S., "A Study on Selection of Image Analyzing CCTV Location For Local Fine Dust Observation based on Fuzzy AHP", *Journal of Korea Planning Association* 57(3), 150-160, (2022)
- [27] Triantaphyllou, E., Kovalerchuk, B., Mann, L., Knapp, J., "Determining the most important criteria in maintenance decision making", *Quality in Maintenance Engineering*, 3, 16-28, (1997)
- [28] HYDROGEN Safety Panel, "Hydrogen Incident Examples", U.S. Department of Energy, PNNL-29731, (2020)
- [29] Shin, D.B., Seo, D.H., Kim, T.H., Lee, G.W., Lee, D.M., Kim, H.G., Hong, S.C., "Qualitative Risk Assessment of Hydrogen Compression Reforming Process", *Korean Hydrogen and New Energy Society*, 33(1), 61-66, (2022)
- [29] Shin, D.B., Seo, D.H., Kim, T.H., Lee, G.W., Lee, D.M., Kim, H.G., Hong, S.C., "Qualitative Risk Assessment of Hydrogen Compression Reforming Process", *Korean Hydrogen and New Energy Society*, 33(1), 61-66, (2022)