수소충전소 사고대응을 위한 훈련프로그램 개발 및 분석

Training Program Analysis for Incidents in Hydrogen Refueling Stations

박병직* · 김양균** · 임옥근***

Park, Byoungjik*, Kim, Yangkyun**, and Lim, Ohk Kun***

Abstract

As the number of hydrogen refueling stations has increased rapidly in recent times, evaluating their incident training programs for first responders, has gained importance. In this study, the Delphi method was used for investigating the training programs, and the importance of the consensus programs was analyzed using the analytical hierarchy process (AHP). Location and operating methods of the emergency shutdown devices, safety distance, and response procedures depending on the hydrogen refueling station and hydrogen vehicle, were deduced. The results reveal that the training regarding emergency shutdown devices is the most important, followed by the one regarding safety distance. Quantitative analysis with regard to the training programs for hydrogen refueling stations can improve the response capability of first responders.

Key words : Hydrogen Refueling Station, Incident Response Training, Delphi Method, AHP

요 지

최근 정부의 친환경정책으로 인해 수소충전소의 구축이 빠르게 증가하고 있지만 새롭게 생긴 시설로 사고대응절차에 대한 연구가 많지 않다. 수소충전소 사고발생 시 효과적으로 대응하기 위해 초기대응자가 훈련하거나 알고 있어야 할 내용에 대해 델파이기법으로 조사하고, 도출된 항목의 중요성에 대해 계층적 의사결정분석을 이용해 분석하였다. 수소충전소 구조와 긴급차단장치의 위치 및 조작방법, 위험반경과 안전거리, 수소충전소와 수소자동차의 사고시나리오에 따른 대응방안에 대한 내용이 가장 필요한 것으로 조사되었다. 긴급차단장치의 위치 및 조작방법에 대한 중요성이 가장 높게 분석되었으며, 다음으로는 수소충전소의 안전거리에 대한 것이었다. 이런 분석결과는 수소충전소나 수소자동차 사고를 수습하는 초기대응자의 대응능력을 향상시키고 안전한 수소충전 인프라를 구축하는데 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

핵심용어 : 수소충전소, 사고대응훈련, 델파이분석, 계층적 의사결정기법

1. 서 론

세계적인 기후위기로 인해 국내에서도 온실가스 감축 및 미세가스 저감을 위한 다양한 노력들이 이루어지고 있으며, 최근에는 ‘기후위기 대응을 위한 탄소중립·녹색성장 기본 법안’이 국회 본회의를 통과하는 등 관련 법안들도 제정되고 있다. 또한 ‘신에너지 및 재생에너지 개발·이용·

보급 촉진법’, ‘수소경제 육성 및 수소 안전관리에 관한 법률’ 등에 근거하여 정부에서는 수소전문기업을 육성하고 수소인프라 구축을 위해 노력하고 있다. 2021년 7월 기준으로 국내에는 총 100기의 수소충전소가 구축되어 있으며, 국토교통부, 사업자원부, 환경부 등에서 발표한 ‘수소인프라 및 충전소 구축 방안’에 따르면 수소충전소를 2022년까지 310기를, 2040년까지 1,200기를 구축하는 것을 목표로 하여

*정회원, 한국건설기술연구원 화재안전연구소 전임연구원(E-mail: templer83@kict.re.kr)

Member, Research Specialist, Fire Research Institute, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

**정회원, 한국건설기술연구원 화재안전연구소 수석연구원

Member, Senior Researcher, Fire Research Institute, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

***교신저자, 정회원, 동아대학교 경찰·소방학과 조교수(Tel: +82-51-200-8673, Fax: +82-51-200-8673, E-mail: oklim@dau.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Assistant Professor, Department of Police and Fire Administration, Dong-A University

지속적으로 수소충전소를 구축하고 있다(MOTIE, 2019; MOTIE, 2021).

수소는 매우 가벼울 뿐만 아니라 연소열이 상대적으로 높은 물질로 이런 수소가스를 충전하는 인프라는 안전하게 구축되어야 한다. 2019년 노르웨이 오슬로에서는 수소충전소 폭발사고가 발생하여 인근에 주차된 차량의 에어백이 터지면서 2명이 경상을 입은 사고가 있었다. 사고원인은 수소탱크와 연결된 플러그체결의 불량이었다(Adomaitis, 2021). 이와 같이 사소한 실수로도 큰 사고로 이어질 수 있기 때문에 수소충전소는 사고가 발생하지 않도록 설계하고 관리해야 하며 사고가 발생하는 경우에도 그 피해를 최소화할 수 있는 조치들이 필요하다.

수소충전소 사고 발생 시 이를 수습하기 위한 초기대응자들의 역할이 중요하지만, 긴급구조 대응활동에 사용되는 ‘재난현장 표준작전절차 수립운영에 관한 규정’에 따르면 수소충전소 사고에 대한 표준작전절차는 아직 마련되지 않은 실정이다. 수소충전소 사고 시 활용할 수 있는 유사한 표준작전절차로는 ‘가스저장시설 화재 대응절차’나 ‘친환경 차량사고 대응절차’가 있지만 수소충전소에 대응하기 위한 절차가 아니기 때문에 수소충전소의 사고 대응에는 한계가 있다. 미국의 에너지부(Department of Energy, DOE)에서는 HydrogenTools 웹사이트를 통해 수소사고 대응을 위한 현장요원들에 대한 교육자료를 제공하고 있으며, 유럽에서는 HyResponse 과제를 통해 현장대응요원들의 교육과 함께 수소사고대응에 대한 훈련을 실제로 할 수 있는 플랫폼을 2016년에 구축한 바 있다(Hyresponse project, 2021). 국내 수소충전소 관련된 연구논문의 키워드 네트워크 분석결과를 보면 최근에 수소충전소 안전 관련된 주제들의 연구가 많아진 했지만 전체에서 차지하는 비율은 크지 않았다(Lim, 2021).

본 논문에서는 수소충전소 사고발생 시 효과적인 대응을 위해 현장대응요원들이 알아야 하는 사항들에 대해 델파이 분석과 계층적 의사결정기법(Analytical Hierarchy Process, AHP)을 이용하여 사고 대응 시의 중요 요소를 분석하고

초기대응자의 대응능력을 향상시키기 위한 방향을 제시하고자 한다.

2. 연구범위 및 방법

2.1 수소충전소 사고대응 교육훈련 현황

유럽에서는 HyResponse project라는 이름으로 수소사고 초기대응에 투입되는 대원들을 훈련하기 위한 프로그램을 개발하기 위해 2013년 6월부터 2016년 9월까지 총 40개월 간 2,503,522유로의 연구비를 투입하여 영국, 프랑스, 이탈리아의 총 6개 기관이 공동으로 연구를 수행했다. HyResponse project는 수소사용의 위험성에 대한 기초교육자료를 개발할 뿐만 아니라 실물크기의 모형으로 구성된 훈련시설 플랫폼을 구축하고 다양한 시나리오를 적용한 가상현실을 이용한 훈련프로그램을 개발하는 것으로 구성되어 있다. 훈련을 총괄하는 Technical platform을 구성했으며, 다양한 종류의 사고에 대응하는 훈련을 위해 Fig. 1에서와 같이 jet fire platform, 700 bar hydrogen car explosion platform 등의 시설을 구축하여 활용하고 있다.

미국에서는 미국화학공학회(American Institute of Chemical Engineers, AIChE)와 수소안전센터(The Center for Hydrogen Safety, CHE)가 공동으로 수소충전소 안전을 위한 초기대응자에 대한 교육프로그램을 개발하고 온라인으로 운영하고 있다(AIChE Academy, 2021). 수소충전소의 형태와 비상정지장치, 수소검지기, Thermally activated pressure relief device (TPRD) 등 수소충전소에 설치된 안전장치, 그리고 수소충전소 사고 시의 가이드라인에 대한 내용들이 포함되어 있다.

중앙소방학교에서는 소방공무원 신규임용자를 대상으로 소방전술에 대한 교육을 실시하고 있으나, 수소충전소 사고를 대비한 교육은 없는 실정이다. 다양한 사고유형에 적용 가능한 기본적인면서 필수적인 절차인 표준작전절차 중 ‘유해화학물질 대응절차’에서는 액화석유가스(Liquefied Petroleum Gas, LPG) 등 가스누출 시 냄새·소리 등을 주의

(a) Jet fire

(b) 700 bar hydrogen car

Fig. 1. Training Platform (Hyresponse project, 2021)

깊게 경계하고 누출부분에 대한 누출차단 조치를 취하고 가스가 소진되어 화염이 사라질 때까지 계속 냉각시킨 후 공급측 부분의 밸브를 차단시키도록 명시하고 있다. 수소화염의 경우 일반 가솔린화재나 LPG 화재와는 다르게 낮에는 육안으로 식별하기 어려운 특성이 있으며 이런 수소화염의 특성에 대한 기초적인 내용부터 화재, 폭발, 실내확산의 위험성 등 실제적인 위험에 대응하기 위한 교육이 필요하다.

2.2 분석방법

2.2.1 델파이 기법

델파이 기법은 고대 그리스에서 신탁을 받는 아폴로 신전이 있는 지역의 이름인 델포이에서 유래된 이름으로 전문가 집단의 통일된 의견을 조사하는데 사용되기 위해 개발된 방법이다(Lee, 2020). 개개인의 의견이 권위 있는 일부에 의해 방해받지 않고 독립적으로 제시되고 이렇게 제시된 의견들이 하나로 수렴되는 경우 전문가집단의 합리적인 의견이 도출된다는 논리적 추론에 의한 것으로 다중이용업소의 화재안전 평가지표를 도출하거나(Kim et al., 2019), 사용자의 특성이나 사용형태 등을 고려하여 특정소방대상물을 재분류 하는데 사용되는 등(Choi and Choi, 2021) 다양하게 활용되고 있다.

신뢰성 있는 결과를 도출하기 위해서는 전문가 집단의 선정이 매우 중요하며, 본 논문에서는 화재안전분야에 종사하는 다양한 직업군으로 포함한 총 14명으로 구성했다. 세부적으로는 소방공무원 4명, 산업계 전문가 3명, 소방관련학과 교수 3명, 화재안전분야 연구원 4명으로 전문가패널을 구성했다. 이 중 소방공무원 1인을 제외하고는 모두 관련분야 업무경력 10년 이상이었으며, 익명성을 담보하기 위해 선정된 전문가들 간의 소통은 없었으며, 델파이 조사는 조사담당자와 일대일로 진행되었다.

델파이 조사는 총 3회에 걸쳐 진행되었다. 첫 번째 설문에서는 개방형 질문을 통해 수소충전소 누출 및 화재에 대응하기 위해 학습하거나 훈련해야 할 사항들에 대해 다섯 가지 정도 제시해주기를 요청했다 이렇게 조사된 내용들을 중복된 사항을 제거하고 정리한 뒤, 이를 바탕으로 Likert 5점 척도를 사용하여 각 항목의 필요성에 대해 2차 및 3차 설문조사를 수행했다. 2차와 3차 델파이 조사에서는 전문가들이 평가한 점수를 토대로 산술평균과 표준편차를 분석했다. 전문가패널의 수에 따른 합의도를 평가하기 위해 내용타당성비(Content Validity Ratio, CVR)를 사용했다. 설문에 참여한 전문가들이 필요하다고 판단한 것이 많아질수록 합의에 가까워진다는 것을 표현하는 지표로 전체 응답결과 중 절반 이상이 필요하고 판단한 경우에는 양의 값을 나타내고, 절반만 필요하다고 판단한 경우에는 0을, 절반 이상이 필요하지 않다고 조사된 경우에는 음의 값을 가지게 된다. 조사에 참여한 전문가가 14명인 경우 CVR이 0.51 이상일 때 타당성이 인정된다고 판단하며 이는 다음과 같이 계산한다(Lawshe, 1975).

$$CVR = \frac{n_e - N/2}{N/2} \quad (1)$$

여기서 n_e 는 중요하다고 응답한 패널의 수(4점 이상), N 은 전체 패널의 수를 의미한다.

전문가패널의 의견일치를 평가하기 위해 변이계수(Coefficient of Variation, CV)를 사용하였다. 이는 전문가들이 평가한 점수들의 표준편차가 작을수록 합의에 이른다는 것을 바탕으로 한 것으로 0.5 이하의 값을 가질 때 합의가 이루어진 것으로 판단하며 다음과 같이 계산된다(von der Gracht, 2012).

$$CV = \frac{SD}{Mean} \quad (2)$$

여기서 SD 는 표준편차, $Mean$ 은 산술평균을 의미한다.

2.2.2 계층적 의사결정기법(AHP)

AHP 분석 기법은 각 기준지표에 비교지표를 바꾸어가며 비교하여 중요도를 확인하는 의사결정 방법이다. 척도를 기준으로 지표의 우열 정도를 점수화하고, 점수 합계에서 차지하는 비율로 가중치를 결정하게 되며, 지표별 기하평균 값을 최종 가중치로 결정하게 된다(Park, 2009; Kinoshita and Ohoya, 2012). 다수의 의사가 반영된 계획 수립이 필요한 초기 연구논문에서 사용되었으며(Kang et al., 2011; Park et al., 2015), 소방 및 건설안전 분야에서도 교육·훈련 시 지표의 중요도를 반영한 상대적 우선순위를 제시하는데 AHP 기법이 사용되고 있다(Cha, 2018; Ha, 2019).

분석결과와 신뢰도는 응답결과와 일관성을 나타내는 CR (Consistency Index)계수를 통해서 측정이 되며, CR계수 값이 0.1 이하의 경우에는 신뢰성이 높은 편에 속하며, 0.2 이하의 경우에는 유효한 결과라 할 수 있다. 본 연구에서는 델파이 조사에서 합의가 이루어진 항목 중에 전문가 패널 전원이 필요하다고 평가한 5가지 항목에 대한 중요도를 AHP 기법을 사용하여 분석했다. 총 9명(산업계 전문가 3명, 소방관련학과 교수 2명, 화재안전분야 연구원 4명)의 설문지를 회수하였다. AHP 분석에서는 매우 중요하다(3점), 중요하다(2점), 보통이다(1점), 중요하지 않다(1/2점), 전혀 중요하지 않다(1/3점)로 구분하여 쌍대비교행렬을 만들어, 각 설문지의 점수를 입력하고 열(Column)을 합산하여 기하평균($\sqrt[n]{a_1 \times a_2 \times \dots \times a_n}$)을 계산하였다. 마지막으로 행(Row)의 산술평균($\frac{a_1 + a_2 + \dots + a_n}{n}$)을 계산하여 상대적 중요도를 알 수 있는 최종 가중치 값을 산출했다. 아래와 같은 관계를 가지는 일관성지수(Consistency Index, CI), 일관성비율(Consistency Ratio, CR), 그리고 무작위지수(Random Consistency Index, RI)를 사용하여 평가했다.

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (3)$$

여기서 CI 는 일관성지수, n 은 비교요소의 수, $\lambda_{\max}$ 는 쌍대 비교행렬의 최대고유값을 의미한다.

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (4)$$

여기서 CR 은 일관성비율, RI 는 무작위지수를 의미하여 본 연구에서는 변수가 5개로 1을 적용하였다.

3. 분석 결과

3.1 델파이 분석

개방형 설문으로 진행된 1차 델파이 조사에서는 Table 1에서와 같이 수소충전소 누출 및 화재에 대응하기 위해 학습하거나 훈련해야 할 사항들에 대해 총 13가지가 도출되었다. 수소가스배관이나 이와 연결된 제어밸브 현황, 고압 및 저압 수소저장탱크의 위치 등 수소충전소의 전체적인 구조에 대해 가장 많은 전문가들이 교육이 필요하다고 언급했다. 이는 수소충전소가 구축되기 시작하지 오래되지 않아 일반적인 형태나 구조에 대해 익숙하지 않기 때문인 것으로 판단된다. 그 다음으로는 주변으로의 화재 확대나 혹은 주변에서 수소충전소로 화재가 전이되는 것에 대한 것을 파악하기 위해 수소충전소의 위험반경이나 안전거리, 주변의 시설물현황에 대한 사항들을 알고 있어야 하는 것으로 조사되었다. 그 외에도 수소충전소의 사고유형, 사고시나리오에 따른 대응절차, 수소가스 긴급차단장치의 위치 및 조작방법, 수소의 물성과 화염의 특성, 수소자동차 사고의 유형과 대응방안

등에 대한 교육이 필요한 것으로 조사되었다.

1차 델파이 조사에서 도출된 13가지 교육 및 훈련사항에 대해 매우 필요하지 않다(1점), 필요하지 않다(2점), 보통이다(3점), 필요하다(4점), 그리고 매우 필요하다(5점)로 각 항목에 대한 필요성에 대해 조사한 결과를 Table 2에 나타내었다. 4번 수소충전소 주변 시설물 현황, 8번 수소의 물성, 9번 수소설비를 구분할 수 있는 인식방법, 12번 수소자동차 충전 시 주의사항을 제외하고는 모두 평균 4점 이상으로 필요성이 있는 것으로 조사되었다. 또한 13가지 항목 모두의 CV값이 0.5 이하로 필요성에 대한 전문가패널의 의견이 일치하였다.

3차 델파이 조사에서는 각 항목에 대한 2차 조사의 결과를 함께 제시하여 설문에 응한 전문가들이 이전 조사에서의 다른 전문가들의 의견을 참고할 수 있도록 설문지를 구성했다. 조사결과, Table 3에서와 보는바와 같이 2차 조사에서와 동일하게 4번, 8번, 9번, 11번 항목을 제외하고는 CVR값이 0.51 이상으로 각 항목에 대한 필요성이 인정된다고 전문가패널의 의견이 일치하였다. 또한 2차 조사와 비교할 때 각 항목별로 조사된 전문가패널의 평균값이 4% 이하로 변동됨을 볼 때 전문가들이 각 항목의 필요성에 대해 일관된 의견을 유지하고 있다는 것을 확인할 수 있다.

3.2 계층 분석

3차 델파이 분석에서 설문에 참여한 모든 전문가가 필요하다(4점) 혹은 매우 필요하다(5점)로 평가하여 CVR값이 1인 5가지 항목들을 대상으로 AHP 기법을 통해서 상대적인 필요성에 대해 분석했다. 1번 수소충전소 구조, 3번 수소충전소의 위험반경 및 안전거리, 6번 수소충전소 사고시나리오에 따른 대응절차, 7번 수소가스 긴급차단장치 위치 및 조작방법, 11번 수소자동차 사고 시나리오와 적절한 대응방법을 지표

Table 1. The First Delphi Survey Data Regarding Training Items for Hydrogen Refueling Station

No.	Contents
1	Hydrogen refueling station layout
2	Fire protection facilities in hydrogen refueling station
3	Safety distance in hydrogen refueling station
4	Structure and facilities nearby hydrogen refueling station
5	Type of accident in hydrogen refueling station
6	Response procedure depending on scenario of hydrogen refueling station accident
7	Location and operating method of emergency shutdown device
8	Hydrogen properties
9	Identification method of hydrogen facilities
10	Hydrogen flame properties
11	Response procedure depending on scenario of hydrogen vehicle
12	Precautions of fueling hydrogen
13	Type of hydrogen vehicle accident

Table 2. The Second Delphi Survey Data Regarding Training Items for Hydrogen Refueling Station

No.	Mean	SD	CVR (>0.51)	Necessity	CV (<0.5)	Consensus
1	4.57	0.49	1.00	Essential	0.108	Agree
2	4.14	0.74	0.86	Essential	0.179	Agree
3	4.64	0.48	1.00	Essential	0.103	Agree
4	3.71	0.45	0.43	Inessential	0.122	Agree
5	4.21	0.56	0.86	Essential	0.132	Agree
6	4.93	0.26	1.00	Essential	0.052	Agree
7	4.79	0.41	1.00	Essential	0.086	Agree
8	3.64	0.72	0.29	Inessential	0.197	Agree
9	3.71	0.70	0.43	Inessential	0.188	Agree
10	4.00	0.76	0.71	Essential	0.189	Agree
11	4.79	0.41	1.00	Essential	0.086	Agree
12	3.64	0.89	0.29	Inessential	0.246	Agree
13	4.14	0.52	0.86	Essential	0.124	Agree

Table 3. The Third Delphi Survey Data Regarding Training Items for Hydrogen Refueling Station

No.	Mean	SD	CVR (>0.51)	Necessity	CV (<0.5)	Consensus	Stability
1	4.71	0.45	1.00	Essential	0.096	Agree	3%
2	4.36	0.61	0.86	Essential	0.140	Agree	4%
3	4.71	0.45	1.00	Essential	0.096	Agree	1%
4	3.64	0.61	0.14	Inessential	0.168	Agree	1%
5	4.21	0.56	0.86	Essential	0.132	Agree	0%
6	4.93	0.26	1.00	Essential	0.052	Agree	0%
7	4.86	0.35	1.00	Essential	0.072	Agree	1%
8	3.71	0.80	0.29	Inessential	0.214	Agree	1%
9	3.50	0.73	0.00	Inessential	0.209	Agree	4%
10	4.07	0.80	0.71	Essential	0.196	Agree	1%
11	4.93	0.26	1.00	Essential	0.052	Agree	3%
12	3.79	0.77	0.43	Inessential	0.204	Agree	3%
13	4.21	0.67	0.71	Essential	0.160	Agree	1%

Table 4. Pairwise Comparison Matrix Regarding Training Items for Hydrogen Refueling Station

	Factor 1	Factor 3	Factor 6	Factor 7	Factor 11
Factor 1	1	1.035	1.035	0.637	1.000
Factor 3	0.966	1	1.231	0.840	1.384
Factor 6	0.966	0.812	1	0.500	1.189
Factor 7	1.569	1.191	2.000	1	1.889
Factor 11	1.000	0.722	0.841	0.529	1

로 설정하였다. 분석의 일관성을 유지하기 위해 Table 4의
 각 Factor 번호는 1차 델파이 조사에서 도출된 Table 1의

항목별 번호와 동일하게 정의했다.

본 연구에서 CR계수는 0.178로 유효한 신뢰 수준으로

Table 5. Weight Values of the Selected Training Items for Hydrogen Refueling Station

No.	Contents	Weight
1	Hydrogen refueling station layout	18.1%
3	Safety distance in hydrogen refueling station	20.8%
6	Response procedure depending on scenario of hydrogen refueling station accident	16.7%
7	Location and operating method of emergency shutdown device	28.8%
11	Response procedure depending on scenario of hydrogen vehicle	15.5%

(a) Dispenser

(b) Facility

Fig. 2. Emergency Shutdown Device (ESD)

분석되었으며, 중요도(Weight)는 Factor 7 (28.8%), Factor 3 (20.8%), Factor 1 (18.1%), Factor 6 (16.7%), Factor 11 (15.5%) 순으로 분석되어 수소가스 긴급차단장치 위치 및 조작방법(Factor 7)의 중요도가 다른 지표에 비해 상대적으로 높게 확인되었으며, 다른 지표는 Table 5에서와 같이 중요도가 비슷한 수준으로 계산되었다.

4. 고 찰

미국의 AIChE와 CHE가 공동으로 개발한 수소충전소 사고대응 교육프로그램에는(AIChE Academy, 2021) 수소의 물성에 대한 것부터 저장식, 제조식, 이동식 등 수소충전소의 종류와 충전노즐과 국제표준기구에 따른 충전프로토콜에 대한 내용이 포함되어 있다. 수소충전소에 설치된 가스검지기, CCTV, 불꽃검지기, 안전거리, 긴급차단장치, 긴급분리장치 등에 대한 내용과 함께 수소자동차를 식별하고 사고에 대응하는 방안 또한 포함하고 있다. 델파이조사를 통해 교육의 필요성이 높다고 도출된 다섯 가지 항목들 중 3번 수소충전소의 위험반경 및 안전거리 항목을 제외하고는 모두 미국의 교육프로그램의 내용과 중복된다. 국내의 경우 현재까지는 외곽지역에 수소충전소가 설치되어 있지만, 앞으로는 도심지역으로 구축을 확대하고 있기 때문에 사고발생 시

피해범위를 최소화시키기 위한 방안에 대한 중요성이 강조되고 있다. 따라서 수소충전소 화재 및 폭발사고에 따른 초기대응자의 대응 매뉴얼은 Table 5에서와 같이 도출된 항목들이 포함되어야 하며, 특히 수소충전소에 설치하는 설비들의 위험반경 및 안전거리 등 국내의 밀집된 환경을 고려해야 할 것이다. 수소충전소의 위험반경 및 안전거리 항목은 시뮬레이션을 이용한 분석 논문과(Kang, 2019; Kim and Kang, 2020) 실험 실험 논문을 통하여 안전율을 감안한 복사열 및 최대과압에 대한 정량적인 안전거리가 제시된 바 있어(Kim and Park, 2021; Park et al., 2021), 이에 대한 교육을 통하여 수소충전소 사고발생시 관계자 및 초기대응자의 안전을 확보하는 것이 필요하다.

AHP분석 결과 가장 중요도가 높은 항목인 긴급차단장치는 가스가 누출될 경우 이를 신속히 검지하여 자동적으로 가스통로를 차단하는 설비로 수동으로도 조작이 가능하다. 저장식 수소자동차 충전의 시설·기술·검사 기준에 따르면(Gas Technical Standards Committee, 2020) 수소충전시설에는 충전설비 근처 및 충전설비로부터 5 m 이상 떨어진 장소에 가스의 누출을 효과적으로 차단할 수 있는 긴급차단장치를 설치하도록 규정하고 있다. 주로 압축기나 충전기 주변과 사무실에 설치하고 있으며, 현장조사 결과 Fig. 2에서와 같이 충전기 옆면에 설치되어 있기도 하고 압축기실

출입구에 설치되어 있기도 했다. 가스사고 발생 시 우선적으로 연료의 공급을 차단하는 것이 중요한데, 충전설비로부터 5 m 이상 떨어진 장소에 설치하는 경우 수소충전소의 구조나 형태에 따라 설치장소가 달라 효과적인 사고대응을 위해서는 가능한 일관된 장소에 설치하는 것이 필요하다. 이와 함께 수소충전소의 형태별 일반적인 구조형태에 대한 교육을 통해 사고발생 시 지체 없이 대응할 수 있어야 할 것이다.

국내에 많이 구축되어 있는 튜브트레일러를 사용한 저장식 수소충전소에는 보통 충전기가 1대가 설치되어 있어 한번에 1대의 차량을 충전할 수 있기 때문에 여러 대의 자동차가 충전을 위해 대기하는 경우가 있다. 이런 경우 수소자동차에서 사고가 발생한 경우 인근에 충전을 대기하고 있는 자동차로 쉽게 전파될 수 있다. 따라서 수소자동차 사고를 포함하여 발생가능성이 높은 다양한 사고시나리오에 대한 교육 또한 필요할 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 논문에서는 수소충전소 사고 발생 시 효과적으로 대응하고 피해를 최소화하기 위한 초기대응자의 훈련 프로그램에 대해 국내외 문헌자료와 관련전문가들을 대상으로 델파이 및 계층분석기법을 활용하여 조사했다. 중요성이 높으면서 필요한 것으로 분석된 항목은 수소가스 긴급차단장치 위치 및 작동방법, 수소충전소의 위험반경 및 안전거리, 수소충전소의 구조, 수소충전소 사고시나리오에 따른 대응절차, 수소자동차 사고 시나리오와 적절한 대응방안이었다. 수소충전소의 위험반경 및 안전거리를 제외하고는 현재 미국화학공학회에서 온라인으로 제공하고 있는 수소충전소 사고대응 교육프로그램의 내용과 대부분 일치했다. 이런 연구결과를 토대로 수소충전소 및 수소자동차 관계자와 소방공무원과 같은 초기대응자의 훈련프로그램을 개발한다면 안전한 수소충전 인프라를 구축하는데 도움을 줄 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 소방청 ESS·수소시설 화재안전기술 연구개발사업(과제번호: 200011579)의 연구비지원에 의해 수행되었습니다.

References

Adomaitis, N. (2021). *Norway fines Nel units \$3 million over 2019 blast at hydrogen fuel station*. Retrieved September 12, 2021, from <https://www.reuters.com/article/us-nel-blast-idUSKBN2AG2N4>

AICHE Academy. (2021). *Introduction to Hydrogen Safety*

for First Responders. Retrieved October 1, 2021, from <https://www.aiche.org/academy/courses/ela253/introduction-hydrogen-safety-first-responders>

Cha, J. (2018). Study on firefighting education and training applying virtual reality. *Fire Science and Engineering*, Vol. 32, No. 1, pp. 108-115.

Choi, J., and Choi, J. (2021). A study on the technical feasibility evaluation index of aged apartment remodeling through delphi method: Focused on vertical and horizontal extension remodeling. *Journal of the Architectural Institute of Korea*, Vol. 37, No. 2, pp. 25-33.

Gas Technical Standards Committee. (2020). *Code for facilities, Technology and inspection for vehicle refueling by delivery of compressed hydrogen*, KGS FP217.

Ha, J. (2019). A study on the effectiveness of construction safety education through the AHP, *Journal of the Korean Society of Disaster Information*, Vol. 15, No. 4, pp. 597-606.

Hyresponse project. (2021). *European hydrogen emergency response training program for first responders*. Retrieved August 10, 2021, from <http://www.hyresponse.eu/index.php>

Kang, K., Park, B., and Lee, K. (2011). A study on the vulnerability assessment of high rise buildings in Korea for protecting from vehicle bomb attack. *Journal of the architectural institute of Korea : Planning & design*, Vol. 27, No. 11, pp. 125-133.

Kang, S. (2019). A study of jet dispersion and jet-fire characteristics for safety distance of the hydrogen refueling station, *Journal of the Korean institute of gas*, Vol. 23, No. 6, pp. 74-80.

Kim, H., and Kang, S. (2020). Analysis of damage range and impact of on-site hydrogen fueling station using quantitative risk assessment program (Hy-KoRAM). *Transactions of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 31, No. 5, pp. 459-466.

Kim, M., Kim, H., Park, K., Youn, H., and Lee, S. (2019). Analysis of fire risk assessment indicators of publicly-used establishments using Delphi/AHP. *Fire Science and Engineering*, Vol. 33, No. 6, pp. 87-94.

Kim, Y., and Park, B. (2021). Experimental and analytical study on hydrogen-air deflagrations in open atmosphere. *Journal of the Korean Society of Safety*, Vol. 36, No. 1, pp. 64-71.

Kinosita, A., and Ohoya, T. (2012). *Analytic hierarchy process*. Seoul: Chungnam books.

Lawshe, C.H. (1975). A quantitative approach to content

- validity. *Personnel Psychology*, Vol. 28, No. 4, pp. 563-575.
- Lee, J.S. (2020). *Delphi method*. Paju, Korea: Kyoyookbook.
- Lim, O. (2021). Keyword network analysis of domestic research articles for determining recent trends of hydrogen refueling stations. *Fire Science and Engineering*, Vol. 35, No. 4, pp. 83-96.
- Ministry of Trade, Industry and Energy (MOTIE). (2019). *Plans for constructing hydrogen infrastructures*. Retrieved October 22, 2019, from https://www.molit.go.kr/mtc/USR/N0201/m_36770/dtl.jsp?id=95082944
- Ministry of Trade, Industry and Energy (MOTIE). (2021). *Action plans for "2050 Carbon Neutrality Joint Declaration"*. Retrieved July 14, 2021, from <https://eiec.kdi.re.kr/policy/materialView.do?num=216051>
- Park, B., Kim, Y., and Hwang, I. (2021). An experimental study on the explosion hazards in the fuel cell room of residential house. *Journal of the Korean Society of Safety*, Vol. 36, No. 4, pp. 71-79.
- Park, J., Yoo, Y., and Park, B. (2015). An analysis study for reasonable installation of tunnel fire safety facility, *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 17, No. 3, pp. 243-248.
- Park, Y. (2009). *Analysis hierarchy process*. Seoul: Kyowoo.
- von der Gracht, H.A. (2012). Consensus measurement in delphi studies review and implications for future quality assurance. *Technological Forecasting and Social Change*, Vol. 79, No. 8, pp. 1525-1536.

Received	October 7, 2021
Revised	October 14, 2021
Accepted	October 25, 2021