

# 수소충전소 및 수소자동차의 사고 시나리오 개발

박병직\* · 김양균\*\* · 임옥근\*\*\*,†

## Development of Accident Scenarios for Hydrogen Refueling Station and Fuel Cell Vehicle

Byoungjik Park\*, Yangkyun Kim\*\*, Ohk Kun Lim\*\*\*,†

*Key Words:* Fuel cell vehicle(수소자동차), Hydrogen refueling station(수소충전소), Hydrogen accident scenario(수소사고시나리오), AHP(계층적 의사결정기법), First responder(조기대응자)

### ABSTRACT

The registration rate of eco-friendly vehicles, such as hydrogen vehicles, is increasing rapidly, however, few first responders have experienced related accidents. Accident scenarios at hydrogen refueling stations and hydrogen vehicles on a road were investigated, and the relative importance of each scenario was analyzed using AHP analysis. Leakage, jet flame, and explosion that occurred inside and outside the hydrogen refueling station were reviewed, and the hydrogen gas explosion in the compartment showed the highest importance value. In case of the hydrogen vehicle, traffic accident statistics and actual accidents were used. It was analyzed that the hydrogen vessel explosion on the road due to the failure of TPRD and the leakage in the underground parking area were difficult to respond. The developed accident scenarios are expected to be used for first responder training.

### 1. 서론

국내에서는 수소경제를 실현하기 위해 2019년에 ‘수소경제 활성화 로드맵’을 발표하고 수소차와 연료전지를 중심으로 수소산업 생태계를 구축하기 위한 다양한 계획들을 세우고 실현시키고 있다.<sup>(1)</sup> 최근에는 환경부 소유의 국유지에 최초로 수소충전소를 준공하여 2022년 5월 기준으로 전국에 총 170기의 충전기가 구축되는 등 수소경제 실현을 위한 노력이 꾸준히 진행되고 있다.<sup>(2)</sup>

2021년 12월에 수소충전소에 압축수소를 운반하던 자동차의 타이어 화재로 인해 튜브트레일러의 온도감응형

압력배출장치(TPRD, Thermally activated Pressure Relief Device)가 작동하여 제트화염이 상부방향으로 분출된 사례가 있었다.

그 후 정부에서는 수소배출구 방향을 개선하고 화재 시 수소용기로의 열전달을 차단하는 등 설비자체의 신뢰성을 높이는 조치들을 발표했다.<sup>(3)</sup> 하지만 효과적인 사고대응방안에 대한 내용들은 포함되지 않았다.

수소시설이나 수소자동차 등 수소를 사용하는 설비들의 사고를 예방하고 피해를 최소화하기 위해서는 설비의 안전성을 높이는 것과 함께 효과적인 사고대응방안에 대한 것도 필요하다. Li et al.은 소방관들을 대상으로 인터뷰를 실시하여 수소자동차의 안전과 사고대응방법에 대한 인식의 차이를 조사했다.<sup>(4)</sup> 일반인들은 구입비용이나 유지비와 같은 경제적인 측면에 대해 주로 생각하는데 반해 소방대원들은 조속한 사고처리를 통해 교통체증과

\* 한국건설기술연구원 전임연구원

\*\* 한국건설기술연구원 수석연구원

\*\*\* 동아대학교 경찰학과 조교수

†교신저자, E-mail: oklim@dau.ac.kr

같은 사회적인 비용을 최소화하는 것을 추가적으로 고려하는 것으로 나타났다. 또한 비가시성의 수소화염이 발생한다는 것과 용기의 폭발을 방지하기 위해 설치되는 TPRD가 화염을 발생시킬 수 있다는 인식은 낮은 편으로 조사되었다. 아직까지는 수소자동차의 비중이 높지 않기 때문에 수소자동차 사고를 실제로 경험한 소방대원이 없었으며, 사고대응 관련해서도 대부분 내연기관 자동차의 경험과 연관 지어 설명하는 경향이 있었다. 국내에서는 현재까지 수소자동차 사고가 발생하지 않았으나, 향후 사고 발생 시 소방대원의 안전하고 원활한 구조활동을 위해서는 수소자동차 사고에 대한 종합적인 훈련과 사고대응 시나리오의 개발이 필요하다.

수소충전소에서 발생할 수 있는 사고로는 수소가스의 단순누출, 고압으로 누출된 수소가스가 점화되어 생성되는 제트 화염, 그리고 누출된 수소의 지연점화로 인해 발생하는 폭발이 발생할 수 있다. Tsunemi et al.은 수소충전소의 위험성평가를 위해 3개의 사고 시나리오를 사용했는데, 외부에 설치된 충전기 인근의 배관에서 누출되는 상황, 축압기와 연결된 배관에서 누출되는 상황, 그리고 수소충전소 내부의 압축기 혹은 연결된 배관에서 누출되는 상황을 가정했다.<sup>(5,6)</sup> 미국 에너지부에서 지원하는 H2 Tool의 자료에 따르면 수소관련 사고는 파이프나 밸브와 같은 설비에서 가장 많이 발생했으며, 그 원인으로는 사람의 실수와 상황판단(situational awareness)과 관련된 것이 대부분인 것으로 나타났다.<sup>(7)</sup> 미국 화학공학회에서 제공하고 있는 수소와 연료전지자동차의 초기대응을 위한 훈련교재에는 다음의 여섯 가지 사고 시나리오를 제시하고 있다: 하나의 자동차가 강에 빠지는 사고, 주차되어 있는 하나의 자동차에서 화재가 발생하는 사고, 여러 대 자동차(수소자동차 및 내연기관 자동차)의 교통사고, 수소충전소에서의 누출 사고, 지하주차장에 주차된 수소자동차에서의 누출사고, 튜브 트레일러가 도로에서 화재 발생한 사고, 수소자동차의 경우 다양한 형태의 교통사고를 사고 시나리오로 활용했으며, 수소충전소의 경우에는 개방 및 밀폐된 공간에서 누출되는 상황을 가정했다. 그 중 튜브트레일러가 도로에서 화재가 발생하는 시나리오는 국내에서도 발생한 바 있다.

수소충전소나 수소자동차의 사고에 효과적으로 대응하기 위해서는 사고의 진행이나 전개, 피해상황 등에 대한 구체적인 상황설정에 대한 시나리오가 필요하다. 행정안전부의 재난대비훈련 지침에 따르면 과도한 상황 설정은 재난대응역량의 달성을 어렵게 할 뿐만 아니라 역기능을 초래하기 때문에 도전적이지만 실현이 가능한 조건으

로 설정하는 것을 권장하고 있다. 본 연구에서는 국내에서 발생한 수소가스 관련사고 현황과 교통사고통계자료를 활용하여 수소충전소와 수소자동차 사고의 대응훈련에 효과적으로 활용하기 위한 사고 시나리오를 개발하고자 한다.

## 2. 국내 수소자동차 보급 현황

국내에서는 2010년 서울 양재동에 연구용 수소충전소가 설치된 이래로 2019년에 전국에 39기의 수소충전기가 설치되었고, 2021년에는 인천공항 제2터미널에 국내 100번째 수소충전소를 구축했다.<sup>(8)</sup> 인천시에서는 2030년까지 전체 시내버스를 수소버스로 전환하는 목표를 발표하여 정부와 민간이 협력하기 위한 협약을 체결한 바 있으며, 인천 서구의 국유지에 수소충전소를 구축하는 등 적극적으로 수소인프라를 구축하고 있다.<sup>(9)</sup> 부산광역시, 울산광역시, 경상남도에서는 광역노선을 수소버스로 운행하는 시범사업을 추진하고 있다.

Table 1에서와 같이 하이브리드, 전기 및 수소자동차와 같은 친환경 자동차의 등록대수는 내연기관 자동차를 포함한 전체 자동차 대비 4.7%로 아직 그 비율이 높지 않은 실정이다. 하지만 친환경 자동차의 등록대수는 지속적으로 증가하는 추세를 보이며 2021년 말에는 전년대비 41.3% 증가하여 116만대의 누적등록수를 보였다.<sup>(10)</sup> 수소자동차의 경우 아직까지 상대적으로 등록대수는 적지만 전년대비 77.9% 증가하는 등 증가추세는 친환경 자동차 중에서 가장 빠른 편이다.

전기자동차의 경우 2018년 5월에 처음 화재가 발생한 이후로 2021년까지 총 17건이 발생했다.<sup>(11)</sup> 전기자동차의 등록대수가 수소자동차 대비 약 12배 높은 것을 감안할 때 지금처럼 수소자동차의 공급이 가파르게 증가하면 이와 관련된 사고가 발생할 위험성도 증가할 것으로 예상된다. 질식소화포나 간이수조와 같이 전기자동차 사고에

Table 1 Registered numbers of eco-friendly vehicle<sup>(10)</sup>

Vehicle type	2017	2018	2019	2020	2021
Hybrid	313,856	405,084	506,047	674,461	908,240
Electric	25,108	55,756	89,918	134,962	231,443
Hydrogen	170	893	5,083	10,906	19,404
Proportion in total vehicle	1.5%	2.0%	2.5%	3.4%	4.7%

대응하기 위한 다양한 연구들은 활발하게 수행되고 있지만 수소자동차 사고대응에 대한 연구는 아직까지 많지 않은 실정이다.

### 3. 수소시설 및 자동차 사고분석을 통한 사고 시나리오 도출

#### 3.1. 수소충전소 사고 시나리오

수소가스연감에 따르면 2017년부터 2022년 6월까지 지난 5년여간 국내에서 발생한 수소관련 사고는 Figure 1에서와 같이 총 14건이 발생했다.<sup>(12)</sup> 단순누출사고는 1건이었으며, 누출된 가스가 지연점화되어 폭발로 이어진 사례가 3건, 나머지 10건은 모두 화재로 이어진 사고였다. 최근 10년간 수소가스로 인해 보고된 사고가 총 16건인 것을 볼 때 양산형 수소자동차가 시판된 이후 수소충전소가 지속적으로 보급되면서 수소가스와 관련된 사고가 증가했음을 알 수 있다.

2022년 상반기에 보고된 수소가스 관련 사고는 모두 수소충전소에서 발생한 것으로 수소 튜브트레이일러와 연결된 충전호스가 파단되거나 고압호스 체결부가 파손되는 등 수소저장용기와 연결된 배관 및 부속품의 파손으로 인해 누출된 가스가 점화되어 최종적으로 화재로 이어진 경우였다. 2021년에는 당진-영덕 고속도로에서 수소충전소로 향하던 튜브 트레일러의 타이어에서 발생한 화재로 인해 수소저장용기의 TPRD가 작동하여 제트화염이 생성된 사례가 있었고, 2020년에도 튜브트레이일러와 충전호스의 연결부에서 누출된 수소가스로 인한 화재사고가 발생한 바 있다.

도심지에 구축된 수소충전소의 6가지 주요설비로부터 누출한 상황을 가정하여 수행한 위험성평가에서는 수소

누출의 가능성이 가장 높게 평가된 튜브트레이일러와 자동차에 수소를 충전하는 충전기의 위험도가 큰 값을 보였다.<sup>(13)</sup> 개별 설비의 위험성 뿐만 아니라 발생확률과 사망자수를 토대로 분석한 사회적 위험성평가에서도 충전기, 튜브트레이일러, 충전소 운전장치(priority panel)가 다른 설비들보다 상대적으로 위험성이 높은 것으로 분석되었다.

국내 수소충전소는 압축수소를 튜브트레이일러로 운송하는 방식으로 충전소에서 고압으로 압축한 뒤 자동차에 공급하는 off-site 방식이 대부분이다. 고압가스를 사용하는 수소충전소에서의 사고는 누출로부터 시작되어 점화유무 및 점화시기에 따라 단순누출로부터 제트화염 및 폭발사고로 이어지게 된다. 국내 수소가스 사고사례 및 위험성평가 결과를 토대로 튜브트레이일러를 사용하는 off-site 방식의 수소충전소에서 발생할 수 있는 사고 시나리오를 Table 2에 나타냈다. 폭발사고는 수소가스가 체류할 수 있는 조건이 필요하므로 수소충전소 내부에서 발생하는 것으로 가정했고, 수소충전소 내부에서의 누출은 위험성이 높게 평가된 튜브트레이일러, 압축기 및 이와 연결된 배관과 부속품에서 시작될 가능성이 높아 용기, 배관 및 부품 등에서 발생하는 것으로 설정했다. 수소충전소 건물 내부에서의 제트화염은 높은 압력하에서 누출될 때 위험성이 증가하기 때문에 압축기 및 그와 연결된 배관에서 발생하는 것으로 시나리오를 작성했다.

중기밀도가 낮은 수소가스는 외부공간에서의 체류 위험성이 낮기 때문에 수소충전소 외부에서는 충전기 및 이와 연결된 부속과 배관에서 발생할 수 있는 제트화염에 의한 사고를 고려했고, 누출이나 누출된 가스로 인한 폭발 사고는 상대적으로 발생확률이 낮아 시나리오에서 제외했다. 수소충전소 외부에서는 충전중인 수소자동차에서 누출되는 상황을 가정하여 충전기 인근에서의 제트화염이 발생하는 것으로 가정했다.

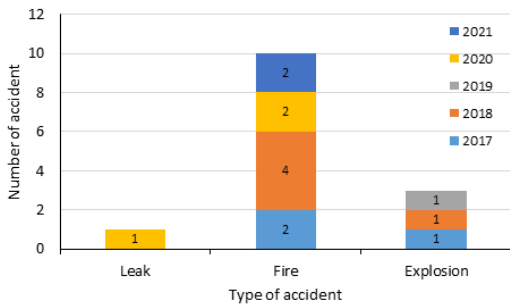


Fig. 1 Hydrogen gas accident

Table 2 Accident scenarios for hydrogen refueling station

No.	Accident scenario
1	Hydrogen gas leaks from the tank and piping (parts) inside the hydrogen station
2	Hydrogen jet flame occurs from the compressor and piping (parts) inside the hydrogen station
3	Explosion occurs due to delayed ignition at the accumulated hydrogen gas inside the hydrogen station
4	Hydrogen jet flame occurs around dispenser at the outside of the hydrogen station

### 3.2. 수소자동차 사고 시나리오

수소자동차의 보급률이 높지 않은 현재까지는 수소자동차의 교통사고에 대한 자료가 존재하지 않지만 향후 수소자동차의 사용이 증가하게 되면 소방대원과 같은 초기 대응자들도 기존의 내연기관이나 전기자동차와는 다른 특징을 가진 수소자동차 사고를 직면하게 될 수 있다. 국외에서 일부 소방관들을 대상으로 한 인터뷰에서 전기자동차 사고를 경험해 본 소방대원은 있었지만 수소자동차 사고를 대응해 본 경험은 거의 없는 것으로 조사된 바 있었다.<sup>(4)</sup>

경찰청의 교통사고 분석자료에 따르면 교통사고의 유형은 차량과 차량간의 사고가 78.8%로 가장 많은 비중을 차지했고, 다음으로는 차량과 사람간의 사고 17.3%, 차량 단독사고 4.2%의 순이었다. 차량과 차량간의 사고에서는 차량의 옆부분과 충돌하는 측면충돌이 44.6%, 뒤의 차량이 앞의 차량과 충돌하는 추돌이 22.9%를 차지했으며, 차량단독사고의 경우에는 공작물에 충돌하는 것이 38.3%로 가장 흔한 유형의 사고였고 차량이 비스듬히 기울어진 전도 및 완전히 뒤집혀진 전복이 두 번째로 많은 13.8%를 나타냈다.<sup>(14)</sup>

국내 교통사고 발생현황을 바탕으로 한 수소자동차 사고 시나리오를 Table 3에 나타냈다. 교통사고 비중이 가장 높은 차량과 차량 간의 사고에서는 국내 수소자동차 등록률을 고려하여 내연기관 자동차와 수소자동차가 충돌하여 화재 혹은 수소가스가 누출되는 경우를 설정했으며, 이런 차량간의 충돌로 인하여 수소가스의 누출, 화재로 인한 제트화염의 생성, 그리고 TPRD의 고장으로 인해 수소저장용기가 폭발하는 사고를 시나리오로 적용했다. 수소저장용기에는 TPRD가 설치되어 있어 약 110°C에 이를 경우 용기의 폭발을 방지하기 위해 외부로 수소가스를 방출하는 안전장치가 설치되어 있다. 수소가스는 최소 점화에너지가 작아 화재로 인해 TPRD가 작동하는 경우 방출되는 수소가스가 점화되어 제트화염이 생성될 가능성이 높기 때문에 화재를 동반한 수소자동차 사고 시에는 수소저장용기에서 제트화염이 발생하는 것으로 설정했다. 또한 전기자동차나 수소자동차와 같은 친환경자동차는 고전압용 배터리가 장착되어 있기 때문에 장시간 및 급격한 연소의 위험성을 인식해야 하며 모든 시나리오에는 운전자가 탑승하고 있는 것으로 가정했다. 일반적인 도로나 교차로에서 발생하는 교통사고는 사고현장이 외부에 누출된 상황이기 때문에 폭발보다는 누출과 제트화염의 위험성이 높은 반면, 터널이나 지하주차장과 같이 구획

된 공간에서 사고가 발생하는 경우에는 누출된 수소가스가 천장에 체류하게 되고, 점화될 경우 폭발사고로 이어지게 된다. 따라서 개방된 공간인 도로에서의 화재, 폭발 및 누출사고와 터널이나 주차장에서의 누출사고, 그리고 실제 사고사례인 튜브트레일러의 화재사고를 Table 3에서와 같이 시나리오에 적용했다.

Table 3 Accident scenarios for hydrogen fuel cell vehicle

No.	Accident scenario	
5		Fire occurs at engine vehicles after the FCEV collides with the side of the engine vehicle.
6	Road accident	Hydrogen tank explodes due to the TPRD failure of the FCEV in a fire after traffic accidents.
7		Hydrogen leaks after colliding with the rear side of the FCEV.
8		Hydrogen leaks at road tunnels after traffic accidents.
9	Underground parking lot	Hydrogen leaks from the FCEV at the underground parking lot.
10	Tube trailer fire	A tire fire at the hydrogen tube trailer leads to jet flames from the TPRD at hydrogen vessels.

## 4. 사고 시나리오 분석

### 4.1. 계층적 의사결정 기법(AHP)

다기준 의사결정(Multi-Criteria Decision Making, MCDM)이란 평가기준이 여럿일 때 여러 대안 중 하나를 고르거나 대안들의 우선순위를 결정하는 것을 말하며, 다기준의사결정 문제를 해결하기 위하여 계층화분석과정(Analytic Hierarchy Process, AHP)이 활용되고 있다.<sup>(15)</sup> AHP 기법은 행정학, 정책학의 분석기법으로 사용되면서 사업시행 타당성을 판별하기 위해 널리 활용 되다가 최근에는 철도,<sup>(16,17)</sup> 도로<sup>(18)</sup>, 건설<sup>(19,20)</sup> 등의 기반시설의 투자 우선순위 등을 분석하는데 사용되었다. AHP 기법에서는 일관성비율(Consistency Ratio, CR), 일관성지수(Consistency Index, CI), 그리고 무작위지수(Random Consistency Index, RI)가 중요한 지수이며, 식 (1)과 같은 관계를 갖는다.

$$CR = \frac{CI}{RI} \tag{1}$$

일관성지수(CI)는 각각의 항목에 대한 중요도(weight)를 분석하기 위하여, 설문지를 쌍대비교행렬로 만들고 매우 중요하다(3점), 중요하다(2점), 보통이다(1점), 중요하지 않다(1/2점), 전혀 중요하지 않다(1/3점)로 구분하여 의견을 수렴하였으며, 각 설문지의 분석값을 기하평균( $\sqrt[n]{a_1 \times a_2 \times \dots \times a_n}$ )으로 계산하고 아래 식 (2)를 활용하여 일관성지수(CI)를 도출하였으며, 각 설문결과와 중요도(weight)는 산술평균( $\frac{a_1 + a_2 + \dots + a_n}{n}$ )으로 계산하여 문항별로 산출하였다. 무작위지수(RI)는 비교요소의 수(n)가 5개의 경우에는 1.12를 적용하며, 7개의 경우에는 1.32를 적용했다.<sup>(21)</sup>

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (2)$$

여기서  $n$ 은 비교요소의 수,  $\lambda_{\max}$ 는 쌍대비교행렬에서의 최대고유값을 의미하며, 일관성비율(CR)이 낮을수록 조사결과와 신뢰성을 가지며, 0.1 이하의 경우에는 신뢰성이 높으며, 0.2 이하까지 유효한 결과로 사용할 수 있는 것으로 알려져 있다.<sup>(22)</sup> 본 연구에서는 5년 이상의 경력을 가진 화재안전분야 연구원 6명, 20년 이상 현장경험을 가진 소방공무원 3명, 그리고 소방학과 교수 2명을 통해 AHP설문조사를 실시했고, 총 11명의 의견을 바탕으로 수소설비 및 자동차 사고 시나리오들의 대응의 난이도에 대해 분석했다.

#### 4.2. 사고 시나리오 분석

Table 2에 제시된 수소충전소의 사고 시나리오 중 대응하기 상대적으로 어려운 것에 대해 분석한 결과, 일관성지수(CI)는 0.065, 일관성비율(CR)은 0.058로 계산되었으며, 수소자동차 사고에 대해 Table 3에 제시된 수소자동차 사고 시나리오 분석에서는 일관성지수(CI)와 일관성비율(CR)이 각각 0.175와 0.133으로 계산되었다. 수소충전소와 수소자동차 사고 시나리오에 대한 일관성비율(CR)이 모두 0.2 이하의 값으로 유효하게 계산되었다.

수소충전시설에서 사고가 발생했을 때 대응하기 어려운 사고에 대해 Table 2에 제시된 사고 시나리오 번호를 기준으로 쌍대비교한 결과를 Table 4에 나타냈다. Table 5에 도출된 중요도(Weight)값에서 보듯이 3번, 2번, 1번, 4번 사고 시나리오의 순서로 대응하기 까다로운 것으로 분석되었으나 그 차이가 크지는 않았다. 수소충전소 내부의 수소 제트화염 및 폭발 사고가 수소충전소 내부의 수소

누출 사고에 비해 상대적으로 예상되는 피해가 크고 대처하기 어렵기 때문에 이에 대한 훈련의 필요성이 높다고 인식하고 있었다. 수소충전시설의 내부 혹은 외부에서 고압의 수소가 분출되면서 제트화염이 발생하는 경우에 이미 누출된 수소가스로 인한 폭발의 위험성은 낮지만 비가시성의 화염으로 인해 접근이 어렵고, 인근의 자동차 혹은 건축물로 화재가 확산될 우려가 있어 사고 상황이 복잡하게 전개될 수 있어 사고대응에 있어 가장 어려운 것으로 분석된다.

AHP조사에 응답했던 소방공무원들은 가장 대응하기 어려운 시나리오로 '수소충전소 외부의 충전기 인근에서 용기 및 배관에서 수소가스가 누출되고 즉시 점화되어 제트화염이 생성되는 경우'인 4번 사고 시나리오를 선택했으며, 수소자동차에서 제트화염 사고가 발생하는 경우에는 차량의 내외부로 화재가 빠르게 확산될 뿐만 아니라 인근의 수소충전소까지 화염이 전파될 가능성이 있어 연쇄적으로 화재가 확산되는 경우를 가정할 때 대응이 어려울 것으로 예상했다. 특히 수소저장용기의 폭발을 방지하기 위해 장착된 TPRD의 작동시기를 예측하기 어려워 급격한 제트화염의 발생 시 구조나 소화작업 등 사고대응상의 위험성이 증가할 수 있다. 화재안전관련 연구자들은 수소충전소 내부에서 수소가 누출되고 지연점화로 인하여 폭발이 발생하는 경우에 내부의 수소 누출량을 예측하기 어렵고 폭발 시기도 예상하기 어렵기 때문에 '수소충전소 내부의 용기 및 배관에서 수소가스가 누출되고 지연점화되어 폭발이 발생한 경우'인 3번 사고 시나리오가 대응하기 어려울 것으로 판단했다. 폭발사고는 과압의 생성과 비산물로 인해 상대적으로 대규모의 피해가 짧은 시간에 발생하지만, 순간적으로 과압이 발생하기 때문에 사고 발생 직후에 대응하는 것보다는 사전에 예방하는 것이 중요하다.

Table 4 Pairwise comparison matrix

	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3	Scenario 4
Scenario 1	1.00	0.80	0.72	0.93
Scenario 2	1.25	1.00	0.80	1.25
Scenario 3	1.39	1.25	1.00	1.57
Scenario 4	1.08	0.80	0.64	1.00

Table 5 Weight values

	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3	Scenario 4
Weight	0.23	0.25	0.31	0.21

수소자동차의 사고 시나리오에 대한 쌍대분석 결과를 Table 6에 나타냈다. 각 시나리오별 중요도를 분석한 결과 Table 7에서와 같이 6번, 9번, 8번, 10번, 5번, 7번 사고 시나리오의 순서로 높게 도출되었다. 가장 대응하기 어려운 사고는 6번 시나리오로 '수소자동차와 내연기관 차량의 교통사고로 인해 발생한 화재에서 수소자동차의 TPRD 고장으로 수소저장용기가 폭발한 경우'였다. 연료 전지자동차의 수소저장용기에 설치된 TPRD는 약 110°C로 온도가 상승하는 경우 내부의 수소가스를 바닥면을 향하여 방출하게 되는데 이 때 바닥면에 부딪친 제트화염이 주로 차량의 양옆면과 후면으로 퍼지게 된다. 수소제트화염의 온도는 약 1700°C 이상의 고온이기 때문에<sup>(23)</sup> 직접적으로 노출된 경우 심각한 피해를 유발할 있어 수소자동차의 TPRD 작동여부가 파악되지 않는 경우 구조대상자를 구출하거나 화재진압 시 추가적인 피해 발생의 위험성이 높다.

유사한 중요도를 나타낸 것으로 분석된 9번 사고 시나리오는 '지하주차장에 주차되어 있는 수소자동차에서 누출이 발생한 경우'였다. 수소가스는 증기비중이 낮아 외부에서 누출된 경우 빠르게 상승하여 폭발의 위험성이 높지 않지만 지하주차장과 같은 밀폐된 공간에서 누출되어 실외로 배출되지 않는 경우 천장에 축적되어 폭발로 이어질 수 있다. 밀폐된 공간에서 수소저장용기가 폭발하는 실험 연구에 따르면 차량에서 약 7m 떨어진 곳에서도 90%의 확률로 고막이 파손되는 84kPa 이상의 압력이 발생한다.<sup>(24)</sup> 밀폐공간에서 수소가스가 누출되는 경우 누출된 범위와 폭발시기를 알 수 없기 때문에 사고현장으로의 안전한 접근이 어려워 대응이 어려울 것으로 판단된다. 이런 사고에 효과적으로 대응하기 위해서는 원거리에서 수소가스 유무를 파악할 수 있는 장비의 적극적인 활용이 필요하다.

세 번째로 대응하기 어려운 사고는 '도로터널에서 수소자동차를 포함한 추돌사고로 인해 누출이 발생한 경우'인 8번 사고 시나리오였다. 지하주차장에서 수소가스가 누출되는 사고와 유사하게 반밀폐공간인 도로터널에서 누출될 경우에도 폭발의 위험성으로 인해 원활한 대응이 어려운 것으로 분석되었다.

국내에서 실제로 사고가 발생한 적이 있는 튜브트레일러 차량의 화재로 인해 수소용기의 TPRD가 작동하는 사고인 시나리오 10번과 교통사고로 인해 TPRD가 작동되는 5번 시나리오는 생성된 제트화염으로 인해 인근으로 화재가 전파될 가능성이 있지만 실내에서의 사고가 아니기 때문에 폭발의 위험성은 현저하게 낮아 중요도가 낮게 분석되었다. 교통사고로 인해 수소가스가 누출된 7번 사

고 시나리오도 외부공간에서의 단순 누출은 낮은 증기밀도로 인한 빠른 확산으로 인해 상대적으로 위험성이 낮게 평가되었다.

Table 6 Pairwise comparison matrix

	Scenario 5	Scenario 6	Scenario 7	Scenario 8	Scenario 9	Scenario 10
Scenario 5	1.00	0.55	0.83	0.70	0.63	0.80
Scenario 6	1.81	1.00	1.49	1.10	0.93	1.51
Scenario 7	1.21	0.67	1.00	0.60	0.51	0.64
Scenario 8	1.43	0.91	1.68	1.00	0.88	1.22
Scenario 9	1.60	1.08	1.97	1.13	1.00	1.30
Scenario 10	1.26	0.66	1.57	0.82	0.77	1.00

Table 7 Weight values

	Scenario 5	Scenario 6	Scenario 7	Scenario 8	Scenario 9	Scenario 10
Weight	0.13	0.22	0.12	0.18	0.21	0.15

### 4.3. 수소사고 대응전략 및 전술

수소설비나 수소자동차에서의 사고사태가 많지 않아 계층적 의사결정기법(AHP)를 활용하여 대응하기 어려운 사고 시나리오를 도출했고, 도출된 사고 시나리오에 따른 단계적 대응절차를 소방학교 교관 5명의 전문가 그룹 인터뷰를 통해 분석했다. 사고지역 내의 구조대상자의 존재 여부, 화원 주변의 가연물 유무, 수소용기나 고용량 배터리의 발화여부, 화재상황 등을 고려하여 공격적(Aggressive), 한계적(Marginal), 방어적(Defensive) 대응전략으로 분류할 수 있다. 공격적 대응전략은 소방력이 화세보다 우세한 상황에서 화재진압을 목표로 위험요인을 적극적으로 제거하여 피해를 최소화하는 전략이다. 한계적 대응전략은 공격적 전략에서 방어적으로 태세를 전환하는 시점에 주로 적용되며, 구조대상자의 생존가능성이 높지 않거나 강력한 화세가 주변 가연물로 확산되었거나 고압의 수소용기가 화염에 휩싸여 진압이 어려운 상황에서 위험요인을 적절하게 제거하며 일부 피해를 감수할 수 밖에 없을 때의 대응전략이다. 방어적 대응전략은 소방력이 화세보다 약한 상황에서 화재확대방지에 초점을 맞춘 전략이다.

제시된 시나리오에서 볼 수 있는 사고는 크게 수소 누출과 제트화염, 그리고 폭발로 분류할 수 있다. 자동차에는 운전자가 타고 있기 때문에 구조대상자가 있는 것으로 가정할 때 인근 가연물로의 연소확대, 누출된 수소가스의 폭발 등의 2차 사고 발생가능성에 따라 대응전략을 Table 8에서와 같이 분류할 수 있다.

Table 8 Hydrogen incident response tactics

Accident type	Number of the accident scenario	Possibility of secondary accident	Response strategy	Response tactic
Leakage	1, 7, 8, 9	High	Marginal	A
		Low	Aggressive	
Jet flame	2, 4, 5, 10	High	Marginal	B
		Low	Aggressive	
Explosion	3, 6	High	Marginal	C
		Low	Aggressive	

대응전술 A에서는 우선적으로 수소가스가 누출이 예상되는 공간을 파악하여 긴급차단장치를 작동시키고 ‘가스 누출 예상 구역’을 설정해야 한다. 그 설정된 구역에서 점화원, 가연물, 전자기기 등과 같은 인근의 위험물을 제거하여 화재나 폭발과 같은 2차 피해를 예방하는데 초점을 두어야 한다. 수소가스 누출사고에서 구조대상자가 있는 경우에는 Table 8에서처럼 현장의 상황을 고려하여 2차사고 발생 가능성이 높은 경우에는 한계적 대응전략을, 그렇지 않은 경우에는 공격적 대응전략으로 신속히 ‘가스누출 예상 구역’ 내의 인명을 구조한다. 하지만 구조대상자가 없는 경우에 2차 사고 발생가능성이 높다면 방어적 전술로 인근지역으로의 피해가 확산되지 않는 전략이 타당하다.

대응전술 B에서는 ‘수소 제트화염생성 예상구역’을 파악하고 예상구역 내에 위험물을 제거함으로써 화염 전파로 인한 2차 피해를 예방하는데 초점을 두고 활동을 해야 한다. 수소제트화염은 주간에는 시각적으로 식별이 어렵고 직접적으로 접촉하는 경우 높은 온도로 인해 피해가 커질 수 있다. 구조대상자가 없고 인근으로의 화염전파 가능성이 낮은 경우에는 주위로의 확산을 저지하는 방어적 전략 전략을 사용하는 것이 적절하나 구조대상자가 있는 경우라면 2차 사고 발생가능성을 고려하여 한계적 혹은 공격적으로 대응하는 전략이 타당하다. 특히 사고시나리오 5번이나 10번과 같이 인근에 발생된 화재로 인해 TPRD가 작동하는 경우 제트화염의 생성시기를 예측하기 어렵

기 때문에 공격적인 전술을 사용할 때에는 수소화염이 발생한다고 가정하고 활동해야 한다.

대응전술 C에서는 2차 폭발에 대비하여 모든 인명은 폭발사고가 발생한 곳에서 멀리 떨어진 곳이나 차폐 벽이 있는 장소 등 안전한 곳으로 신속히 이동하되 수소폭발의 발원지, 구조대상자의 유무, 현장 내 화염지속 여부를 주의 깊게 관찰하여 ‘2차 수소폭발 예상 구역’을 파악하는 것이 중요하다. 구조대상자가 있는 경우에는 추가적인 폭발 가능성이 낮을 때에만 신속히 구조활동을 하되 2차 피해의 위험성이 높은 경우에는 현장 상황을 판단하여 한계적 전술을 적용할 필요가 있다.

## 5. 결론

정부의 친환경 정책으로 인해 친환경 자동차의 사용이 늘어나고 있으며 그 중 수소자동차의 증가추세는 가장 가파른 편이다. 수소자동차의 활성화와 함께 수소충전소와 같은 관련 기반시설의 구축도 증가하고 있지만 국내에서는 수소관련 시설이나 자동차의 사고에 대한 체계적인 대응전략에 대한 연구가 많지 않은 편이다. 본 논문에서는 수소충전소에서의 사고 시나리오 4건과 수소자동차의 사고 시나리오 6건을 도출하여 관련 전문가들의 AHP분석을 토대로 대응이 어려운 사고 시나리오를 분석했다. 수소충전소에서는 구획된 공간 내에서의 누출, 제트화염, 폭발, 그리고 외부에 충전중인 자동차에서 제트화염이 발생하는 사고가 있을 수 있으며, 대응의 난이도는 폭발이 높은 것으로 나타났다. 수소자동차의 경우 도로에서의 교통사고로 인해 수소저장용기가 폭발하는 사고, 지하주차장 혹은 도로터널에서 수소가스 누출되는 사고의 대응에 대한 중요성이 높은 것으로 분석되었다. 도출된 사고 시나리오는 수소충전소 및 수소자동차 운행 시에 발생할 수 있는 구체적인 상황을 고려한 것으로 보다 소방공무원과 같은 초기대응자들의 실제적인 대응훈련에 적용될 수 있다.

## 후 기

본 연구는 소방청 ESS·수소시설 화재안전기술 연구개발사업(과제번호: 20019150)의 연구비지원으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

- (1) 산업통상자원부, “세계 최고수준의 수소경제 선도

- 국가로 도약”, 보도자료 2019. 1. 17.
- (2) 환경부, “환경부 소유 국유지에 첫 수소충전소 구축…탄소중립 박차”, 보도자료 2022.1.22
  - (3) 산업통상자원부, “안전한 수소 유통을 위한 수소 운송업계 간담회 개최”, 보도자료 2022.1.22.
  - (4) H. Li, R. Welsh, An. Morris, 2021, “Emergency responders' perceptions of Hydrogen Fuel Cell Vehicle: A qualitative study on the U.K. fire and rescue services”, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 46, Issue 65, pp. 32750~32761.
  - (5) K. Tsunemi, K. Yoshida, T. Kihara, T. Saburi, K. Ono, 2018, “Screening-Level Risk Assessment of a Hydrogen Refueling Station that Uses Organic Hydride”, *Sustainability*, 10(12):4477.
  - (6) K. Tsunemi, T. Kihara, E. Kato, A. Kawamoto, T. Saburi, 2019, “Quantitative risk assessment of the interior of a hydrogen refueling station considering safety barrier systems”, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 44, Issue 41, pp. 23522~23531.
  - (7) Hydrogen Tools, [https://h2tools.org/lessons?search\\_api\\_fulltext=](https://h2tools.org/lessons?search_api_fulltext=), accessed 30 Aug. 2022
  - (8) 환경부, “수소충전소 100호기 구축 기념 온라인 준공식 개최”, 보도자료 2021.7.29.
  - (9) 환경부, “2030년까지 인천시 시내버스 모두 수소버스로 전환한다.”, 보도자료 2022.3.30.
  - (10) 국토교통부, “자동차 누적등록대수 2,535만대…전기차 30만대 돌파”, 보도자료 2022.10.28.
  - (11) National Fire Research Institute of Korea, Electric vehicle fire response guide, 2021.12.31. [http://nfire.go.kr/board/boardView.do?menu\\_id=534&board\\_id=480&board\\_type\\_id=BBS\\_0000000209](http://nfire.go.kr/board/boardView.do?menu_id=534&board_id=480&board_type_id=BBS_0000000209), accessed 15 Sep. 2022.
  - (12) 한국가스안전공사, 가스사고연감 2021.
  - (13) B. Park, Y. Kim, K. Lee, S. Paik, C. Kang, 2021, “Risk Assessment Method Combining Independent Protection Layers (IPL) of Layer of Protection Analysis (LOPA) and RISKCURVES Software: Case Study of Hydrogen Refueling Stations in Urban Areas”, *Energies*. 14(13):4043.
  - (14) 경찰청, TASS교통사고분석시스템, <http://taas.koroad.or.kr/>, accessed 12 Sep 2022.
  - (15) 키노시타 에이조, 오오야 타카오, 2012, “전략적 의사결정기법 AHP”, 도서출판 청람, 서울시 마포구, pp. 3~54.
  - (16) 신영호, 김정현, 2015, “철도 노선설계 모형의 AHP 평가”, *대한토목학회 논문집*, Vol. 35, No. 1, pp. 165~172.
  - (17) 한수민, 원종운, 정태우, 이석, 2020, “AHP를 이용한 블록체인 철도분야 적용 우선도에 대한 연구”, *한국전자거래학회지*, Vol. 25, No. 4, pp. 111~124.
  - (18) 정병두, 2002, “AHP를 이용한 도로사업의 우선순위 분석”, *대한교통학회지*, Vol. 20, No. 5, pp. 45~54.
  - (19) 이문호, 윤영근, 오대근, 2022, “AHP 분석기법을 이용한 건설현장 취약시간대 안전관리에 관한 연구”, *국제문화기술진흥원, The Journal of the Convergence on Culture Technology (JCCT)*, Vol. 8, No. 5, pp. 597~602.
  - (20) 이우연, 이승훈, 차용운, 현창택, 2020, “건설프로그램 종결단계 업무프로세스의 상대적 중요도 분석”, *한국건설관리학회 논문집*, Vol. 21, No. 4, pp. 62~71.
  - (21) 민재형, 2018, “스마트 경영과학(Smart Management Science)”, 생능출판사, 경기도 파주시, pp. 414~492.
  - (22) 박용성, 2009, “AHP에 의한 의사결정 이론과 실제”, 교우사, 서울시 동대문구, pp. 91~118.
  - (23) X. Yu, W. Yan, Y. Liu, P. Zhou, B. Li, C. Wang, 2022, “The flame mitigation effect of vertical barrier wall in hydrogen refueling stations”, *Fuel*, Vol. 315, 123265.
  - (24) J. Park, Y. Yoo, H. Kim, 2021, “An Experimental Study on the Explosion of Hydrogen Tank for Fuel-Cell Electric Vehicle in Semi-Closed Space”, *Journal of Aito-vehicle Safety Association*, Vol. 13, No. 4, pp. 73~80.