

도로터널에서 수소차 사고시나리오 개발 및 위험거리에 대한 분석 연구

이후영¹ · 류지오^{2*}

¹정회원, 신한대학교 대학원 ICT기계공학과 박사과정

²정회원, 신한대학교 기계자동차융합공학과 교수

Development of FCEV accident scenario and analysis study on dangerous distance in road tunnel

Hu-Yeong Lee¹ · Ji-Oh Ryu^{2*}

¹Student, Dept. of ICT Mechanical Engineering, Shinhan University Graduate School

²Professor, Dept. of Mechanical and Automotive Engineering, Shinhan University

*Corresponding Author : Ji-Oh Ryu, geotunnel@gmail.com

Abstract

Hydrogen is emerging as a next-generation energy source and development and supply of FCEV (hydrogen fuel cell electric vehicle) is expected to occur rapidly. Accordingly, measures to respond to hydrogen car accidents are required and researches on the safety of hydrogen cars are being actively conducted. In this study, we developed a hydrogen car accident scenarios suitable for domestic conditions for the safety evaluation of hydrogen car in road tunnels through analysis of existing experiments and research data and analyzed and presented the hazard distance according to the accident results of the hydrogen car accident scenarios. The accident results according to the hydrogen car accident scenario were classified into minor accidents, general fires, jet flames and explosions. The probability of occurrence of each accident results are predicted to be 93.06%, 1.83%, 2.25%, and 2.31%. In the case of applying the hydrogen tank specifications of FCEV developed in Korea, the hazard distance for explosion pressure (based on 16.5 kPa) is about 17.6 m, about 6 m for jet fire, up to 35 m for fireball in road tunnel with a standard cross section (72 m²).

Keywords: FCEV accident scenario, Jet flame, Fireball, Hydrogen explosion, Hazard distance

초 록

수소는 차세대 에너지원으로 부각되고 있으며, 수소차(FCEV)개발 및 보급이 급속도로 이루어질 것으로 예상된다. 이에 수소차 사고에 대응하기 위한 대책이 요구되고 있으며, 수소차의 안전성에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 본 연구에서는 기존 실험 및 연구

OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and
Underground Space Association
24(6)659-677(2022)
<https://doi.org/10.9711/KTAJ.2022.24.6.659>

eISSN: 2287-4747

pISSN: 2233-8292

Received October 21, 2022

Revised November 8, 2022

Accepted November 8, 2022



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 non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Copyright © 2022, Korean Tunnelling and Underground Space Association

자료에 대한 분석을 통해 도로터널에서 수소차 안전성 평가를 위하여 국내 실정에 맞는 수소차 사고시나리오를 개발하였으며, 수소차 사고시나리오의 사고결과에 대한 위험거리를 분석·제시하였다. 수소차 사고시나리오에 따른 사고결과는 경미한 사고, 일반화재, 제트화염, 폭발로 구분되며, 각각의 발생확률을 93.06%, 1.83%, 2.25%, 2.31%로 예측된다. 표준단면(72 m²)의 도로터널에서 국내에서 시판되는 수소차량의 수소탱크제원을 적용하는 경우, 사고결과에 따른 위험거리는 폭발의 경우 약 17.6 m (폭발압력 16.5 kPa기준), 제트화염은 약 6 m, 파이어볼 형성에 따른 위험거리는 최대 35 m로 분석되었다.

주요어: 수소차 사고시나리오, 제트화염, 파이어볼, 수소차 폭발, 위험거리

1. 서론

수소는 차세대 에너지원으로 부각되고 있으며, 수소차(Hydrogen fuel cell electric vehicle, FCEV)개발 및 보급이 급속도로 이루어질 것으로 예상된다. 이에 수소차 사고에 대응하기 위한 대책의 확립이 요구되고 있으며, 특히, 터널과 같은 반밀폐공간에서 수소차의 안전성에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

우리나라는 2019년 1월 ‘수소경제 활성화 로드맵’을 발표하였으며, 수소차 양산기술을 확보하고 있는 강점을 활용하여 수소차와 연료전지를 양대 축으로 수소경제를 선도할 수 있는 산업생태계를 구축을 계획하고 있으며, 현대자동차는 2013년 세계 최초로 수소 전기차(NEXO)를 양산하고 2021년에 현재 19,170대를 보급하고, 2040년까지 50만대 생산능력을 구축하는 계획을 수립하고 있다(MOTIE, 2019).

수소는 밀도가 공기의 1/14로 대기 중에서 누출되는 경우, 부력에 의해 급격하게 상승하여 빠르게 확산되기 때문에 다른 연료보다 본질적으로 안전하다. 그러나, 수소는 최소 점화에너지가 0.011 mJ로 아주 낮고 가연농도 범위가 4~75 vol%로 매우 넓기 때문에 타 연료에 비하여 점화될 가능성이 높으며(Lee and Ryu, 2022), 대기 중에서 화염의 전파속도(약 2.7~3.5 m/s) 및 발열량(119.9 MJ/kg)이 크기 때문에 점화되는 경우에는 폭연(Deflagration)이나 폭발(Explosion)을 일으킬 가능성이 매우 높다. 특히, 환기 및 확산이 제한적인 반 밀폐공간이나 실내에서는 수소화재 시 폭발의 위험은 심각해질 가능성이 높다. 이에 따라, 수소차량은 연료탱크 등 차량 자체 안전성 뿐만 아니라 사고로 인한 차량 화재에 따른 안전성에 대해 기술적 및 사회적 관심이 집중되고 있는 실정이다. 특히, 터널은 터널 내 차량화재 시 연기의 확산이 제한되기 때문에 화재안전성 확보를 위해서 많은 방재시설을 설치하도록 하고 있으며, 수소차량의 확대에 따라 추가적인 안전성 확보의 필요성에 대한 연구가 필요한 실정이며, 이에 터널에서 수소차 화재사고에 대한 위험예측을 위한 위험도 평가기술에 대한 연구가 국가적인 프로젝트나 연구기관에 의해서 수행되고 있다(MSIT, 2006).

LaFleur et al. (2017)에서는 수소차량의 운행에 따른 전반적인 안전성 검토를 수행하고 있으며, 터널에서 수소차 사고에 대한 잠재적 위험성을 분석하기 위하여 Event tree 기법에 의한 사고시나리오를 제시하고 있으며, 사고의 결과를 경미한사고, 일반화재, 제트화염(Jet fire), 폭발(Explosion)로 구분하고 있다.

Ehrhart et al. (2020)은 터널 내 수소차 충돌사고 시 사고시나리오를 사건수목(Event tree)기법을 통해 위험을

분석하고 있으며, 제트화염, 가연성 구름에 의한 폭발(Vapor Cloud Explosion, VCE)을 가장 위험한 위험 요소로 평가하고 충돌사고 시 화재 가능성은 30%정도이며, 화재 시 추가누출사고의 확률은 10% 이하로 분석하고 있다. 또한, 화재로 인해 온도감응식 압력누출장치(Thermally activated Pressure Relief Device, 이하 TPRD)가 가동하여 제트화염으로 발생할 확률은 약 0.6%, VCE로 발전할 확률은 0.013%정도로 적용하고 있다.

국내 수소사고에 대한 연구로는 수소 충전소를 대상으로 수소누출사고에 대한 연구(Lee and Ryu, 2022), 제트 화재 피해범위에 대한 연구(Kang and Lee, 2017), 누출 시나리오에 따른 피해 예측 연구(Kim et al., 2014) 등이 있으며, 터널에서 수소차 사고에 대한 위험을 평가하기 위한 연구로 둔내 터널과 홍지문 터널을 대상으로 수소누출에 따른 확산에 대한 수치해석연구(Ahn et al., 2010)가 있으나, 도로터널의 수소차에 사고시나리오는 아직까지 제시되지 못하고 있으며, 각종 분기비 또는 수소차 사고확률 등은 현재 기존의 통계 데이터의 부재로 인하여 이에 대한 합리적인 연구가 필요한 실정이다.

이와 같이 국내 수소차 사고에 대한 위험도 평가를 위한 사고시나리오 및 피해예측방법에 대한 정립이 필요하며, 본 연구에서는 터널에서 수소차 화재사고 시 다양한 연구기관에 의해서 수행된 수소차 사고시나리오에 대한 분석 및 검토를 수행하여 국내 실정에 맞는 시나리오와 시나리오에 따른 피해예측방법의 정립을 목적으로 연구를 수행하였다.

2. 수소차 사고 위험

일반적으로 터널 내 화재사고는 운행 중인 차량의 추돌이나 충돌 등 교통사고에 따른 2차 사고, 차량의 자체적인 결함이나 적재화물의 자연발화에 의해서 발생한다. 수소차의 사고원인도 이와 다르지 않으며, 특히 수소연료 차량의 경우에는 수소의 누출 시 작은 에너지의 점화원에 의해서 화재로 발전할 가능성이 높으며, 수소의 누출에 따른 위험은 다음과 같이 분류할 수 있다.

2.1 수소가스의 누출에 따른 위험

수소의 누출에 따른 위험은 누출되는 수소의 발화 여부에 따라서 결과가 완전히 달라질 수 있기에 일반적으로 점화되지 않는 경우와 점화되는 경우로 구분하여 시나리오를 구분하고 있다.

2.1.1 점화되지 않은 경우

- ① 산소 고갈에 따른 질식: 수소는 인체에 무해하나 수소의 누출로 인해서 산소농도를 저감할 가능성이 있으며, 이로 인해 산소 부족 현상에 따른 증상이 나타날 수 있다.
- ② 피부 및 보호복의 절단: TPRD를 통해서 고압의 수소가 분사되는 경우, 맨살이나 보호복 손상에 의해 피부손상을 일으킬 수 있다. 20 MPa로 가압된 가스는 작업용 장갑이나 의복을 침투하여 피부손상을 유발할 가능성이 있으며, 누출지점에서 수센치미터 이격된 거리에서 0.7 MPa의 제트 분사는 피부를 관통할 수 있는 것으로

보고되고 있다(HyTunnel-CS, 2019).

- ③ 압력피킹(Pressure peaking) 현상: 밀폐공간이나 환기가 극도로 불량한 공간에서 TPRD 등을 통해 고압의 수소가 급격하게 누출되는 경우에 실내의 압력이 증가하는 현상이 발생하게 된다. 그러나 이 현상은 수소저장 저장용기의 압력이 70 MPa이고 TPRD의 직경이 2.0 mm인 경우에는 가정용 주차장에서 환기구의 크기가 벽돌 하나 정도의 크기 일지라도 압력피킹 현상은 발생하지 않는 것으로 보고되고 있다(HyTunnel-CS, 2019).
- ④ 가연성 구름의 형성: 점화되지 않은 수소의 누출은 가연성 구름을 형성하게 되며 가연성 구름의 크기와 지속시간은 방출직경, 압력 및 누출지속시간, 환기상태에 영향을 받게 된다. 특히, 터널과 같은 반밀폐공간에서 수소가스가 가연한계 이상의 농도로 구름을 형성하고 지연착화하는 경우에는 폭연 또는 폭발로 발전할 가능성이 있다. IEC 60079-10-1, NFPA 2 및 ISO/DIS 19880-1에서는 밀폐공간 내에서 수소가스 누출 시 수소농도가 1% vol 이상이 되는 것을 방지하기 위한 환기시스템을 갖추도록 하고 있으며(HyTunnel-CS, 2019), 이는 기체 수소가 있는 장비에 대한 표준으로 하고 있다. EuroCode에서는 LPG의 경우 폭발성 구름의 길이가 10 m 정도인 경우에는 폭연, 50 m 이상인 경우에는 폭발이 발생하는 것으로 제시하고 있다(Nelisse and Vrouwenvelder, 2018).

2.1.2 점화되는 경우

차량의 추돌 또는 충돌 사고 등 1차 사고로 인해 차량화재가 발생한다면 다음과 같은 위험을 예상할 수 있다.

- ① 제트화염(Jet fire): TPRD가 고장이나 손상을 입지 않은 상태에서는 TPRD의 오리피스를 통해 수소가 방출되게 되고, 이 경우에는 제트화염을 형성하게 된다. 본 연구의 일환으로 제트화염의 위험성을 실험을 통해 검토한 결과, 인체의 영향을 미치는 한계기준을 6 kW/m^2 으로 고려하는 경우, 제트화염의 중심선에서 4 m, 터널벽면으로부터 2.5 m까지 한계기준을 초과하는 것으로 보고하고 있으며, 제트화염에 정면으로 노출되는 콘크리트 구조체의 경우, 이격거리가 2 m 이내인 경우에는 화염에 직접 노출되는 반경 50~750 mm 정도에서 표면파손이 발생하며, 중심부는 최대 7 cm 깊이의 손상이 발생하는 것으로 보고하고 있다(Park et al., 2021).
- ② 화재강도의 급격한 성장: 수소연료탱크나 연료공급 라인에 크랙 또는 파손이 발생하면 크랙을 통해 수소가 누출되고 수소가스는 즉시 점화되게 된다. 크랙의 크기가 1 cm 이상인 경우에는 수초 만에 탱크에서 수소가 누출되어 화재가 급격하게 성장하나 지속시간은 약 2.2초 정도로 분석된다(Lee and Ryu, 2022).
- ③ 연료탱크의 폭발: TPRD가 고장인 경우에는 수소탱크가 화재에 의해서 소실되어 파열하게 되며, 이 경우 폭발 또는 파이어볼이 발생하게 된다. 본 과제에서 TPRD 고장 시 수소탱크 폭발실험을 수행하였으며, H사의 N차량을 대상으로 연료탱크 하부에서 화재를 지속시킨 결과, 점화 후 약 12분 정도에 수소탱크(초기압력 70 MPa, 52 L)가 폭발하는 것을 확인하였다. HyTunnel-CS (2019)는 화재로 인한 폭발 시 파이어볼 현상과 폭발파의 전파에 따른 인체의 영향이 가장 치명적이며, 폭발압력(Over pressure)이 파이어볼보다 먼저 도달하며, 파이어볼의 영향은 사람이 파이어볼 내에 존재하는 경우에 위험하며, 그렇지 않은 경우에는 큰 위험은 없는 것으로 보고하고 있다.

3. 수소차 사고시나리오

3.1 기존 수소관련 사고시나리오 분석

도로터널에 수소차량이 통과함에 따른 수소차 사고대응 계획수립 및 안전성 평가를 위한 시나리오 작성을 위해 가솔린 및 수소를 포함한 가스누출 사고시나리오를 조사·분석하였다. Table 1에 본 연구에서 분석한 안전성 평가를 위한 시나리오를 정리하여 나타냈다.

수소차량의 위험도 평가를 위한 시나리오는 대부분 사건수목 기법에 의해서 전개하고 있으며, 차량의 추돌 또는 충돌 등 1차 사고로 부터 수소누출, 화재, 폭발 등의 수소가스와 연관된 2차 사고로 발전하는 사고시나리오를 고려하고 있다.

수소가스의 누출은 고압배관이나 피팅류의 파손에 의한 것과 TPRD의 온도상승에 있으며, 누출전 화재발생 여부에 따라 하위 이벤트로 전개하고 있다. 수소가스가 누출되는 경우에는 점화지연 또는 즉시점화 여부에 따라 상이한 결과가 발생하는 것으로 분석하고 있다. 즉, 점화가 지연되는 경우에는 누출된 가스가 가스구름을 형성하고 주변의 점화원에 의해서 점화될 가능성이 높으며, 이 경우에는 파이어볼이나 폭연 또는 폭발이 발생할 가능성이 높은 것으로 전개하고 있다. 그러나, 즉시점화되는 경우에는 누출량에 따른 차이를 고려하고 있으며 대부분 누출시간이 짧기 때문에 아주 짧은 시간동안 화재강도를 급격하게 높이는 것으로 분석하고 있다.

1차 사고로 인해서 화재가 발생한 상황에서는 TPRD의 작동여부에 따라 제트화염과 수소탱크의 폭발을 고려하고 있다. 즉, 화재로 인해 TPRD가 온도상승으로 정상작동하는 경우에는 수소의 방출에 따른 제트화염이 형성되나, TPRD의 고장 등으로 인해 작동하지 않는 경우에는 탱크가 소손되어 폭발로 발전하는 것으로 분석하고 있다.

Table 1. Scenarios of safety evaluation for hydrogen accidents

No.	Research/Thesis name	Event development and quarterly ratio	Classification of consequences of accidents	Note
1	Development of Safety and Integrity Evaluation Technology for Liquefied Hydrogen Storage Vessels	Fault tree + Event tree: leakage → (instant/delayed) Ignition → pool fire → VCE, Explosion	Explosion/Fire ball/ Pool fire/VCE/ Fresh fire/No effect NE:JF:EPS = 85.5:3.1:11.4	Hydrogen container Instant ignition/Delayed ignition = 0.05/0.95 (KRISS, 2016)
2	Development on Safety Management Technique for Facilities & Processes of Hydrogen Gas	Event tree leakage → (instant/delayed) Ignition	Explosion/ Fresh fire/Jet fire/ No signification hazard	Hydrogen storage (MSIT, 2006)
3	Methodology of using CFD-based risk assessment in road tunnels	Event tree leakage (limited/medium/bulk = 66.7:22.2:11.1) → Ignition ignition:Non-Ignition = 90:10	Fuel tank rupture/ Small pool fire/No effect	Fuel leak in road tunnel (Vidmar and Petelin, 2007)

Table 1. Scenarios of safety evaluation for hydrogen accidents (continued)

No.	Research/Thesis name	Event development and quarterly ratio	Classification of consequences of accidents	Note
4	Explosions in road tunnels Part 2	Event tree LPG capacity (empty, partially, full) → Tank damage/Hole/Collapse → Whether or not there is a fire/tank damage due to fire/ignition delay (ignition delay 1%)	Gas explosion/ Gas expansion explosion/ Jet fire/Gas cloud/BLEVE	LPG vehicle accident in road tunnel (Nelisse and Vrouwenvelder, 2019)
5	Pipeline risk management manual	Event tree whether initial ignition → Delayed ignition (delay degree) → Spatial constraint	Detonation/Deflagration/ Fire ball/Jet fire/VCE/ Flash fire	Flammable gas pipeline (Muhlbauer, 1996)
6	Explosions in road tunnels Part 1	Event tree gas leak → Leakage pattern (instantaneous, continuous) → Gas amount (full/partial/empty = 33.3:33.3:33.3) → Size of leak (no hole/hole/instantaneous = 96.1, 3.5, 0.4) → Ignition (chemical explosion)	Deflagration/Explosion/ General fire/Non-fire/ Safety	Dangerous goods transport (LPG) accidents Chances of a primary accident developing into a fire: 1% (Nelisse and Vrouwenvelder, 2018)
7	A Study on Fire Explosion Impact Map and Accident Analysis Model (II)	Event tree leakage state (liquid/gas) → Ignition (immediate/delayed) → Tank heating → VC formation	Pool fire/BLEVE/ Jet fire/Fresh fire	Gas storage tanks and gas storage facilities (KOSHA, 2017)
8	Risk Assessment of Hydrogen Explosion for Private Car with Hydrogen-Driven Engine	Event tree collision accident → Space (open/close) → Collision part (front/rear)/ Fire → Pipe rupture → Ignition → Safety valve operation	Fire/Explosion (EXP1: Explosion in open air, EXP2: Explosion in semi-enclosed space, EXP3: Explosion in passenger living space, EXP4: Explosion of hydrogen tank)	EXP4: Property damage up to 80 m, serious injuries to all passengers (Andrei et al., 2011)
9	Risk assessment methodology for onboard hydrogen storage	Hydrogen tank ruptured due to event tree TPRD failure → Explosion	Explosion, Fireball	(Dadashzadeh et al., 2018)
10	Hydrogen Fuel Cell Vehicles in Tunnels	Event tree traffic accident → Fire → Hydrogen gas leak due to accident → TPRD operation → Ignition (initial/delayed)	Minor accident/ General fire/ Jet fire/Explosion	Emphasize the need for additional research (Austin et al., 2020)

3.2 도로터널 수소 사고시나리오

3.2.1 사건의 분기비

수소 사고시나리오에 대한 분석을 통해 도로터널에서 수소차 시나리오는 Fig. 1에 보인 바와 같이 1차 사고(1st accident)로 부터 전개하여 1차 사고 후에 화재발생 여부(Fire post accident)를 일차적으로 고려하였다. 화재가 발생하지 않은 상황에서는 가스누출(Gas release), 점화지연여부(Ignition), 환기상태(Ventilation)를 고려한 시나리오를 전개하였으며, 화재가 발생한 상황에서는 고압배관의 크랙 등에 의한 누출과 누출이 되지 않는 경우에는 TPRD의 작동의 여부, 점화여부, 환기상태를 고려하였다.

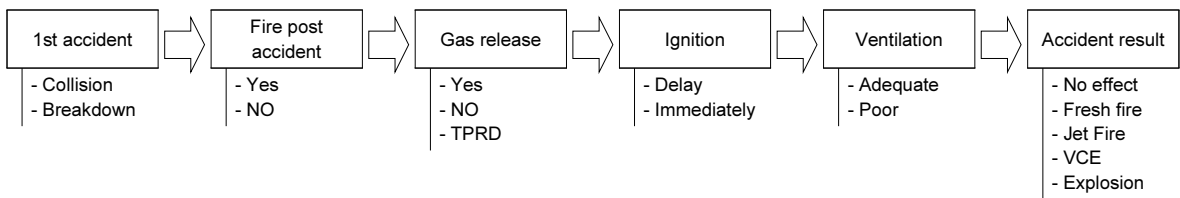


Fig. 1. Road tunnel hydrogen car accident scenario

전술한 시나리오의 전개에 따른 사고의 결과는 경미함(Not serious), 일반화재(Fresh fire), 제트화염(Jet fire), 가스 구름의 폭발(VCE), 폭발(Explosion)로 구분할 수 있다. 상세 시나리오 및 각 사건의 분기비는 Fig. 2에 나타난 바와 같다. 분기비는 Table 1에 제시한 값을 근거로 분석하였다.

- 1차 사고가 화재사고로 발전할 확률은 Rodionov et al. (2011)은 영국에서 도로차량 사고 중 0.454%로 분석하고 있으며, LaFleur et al. (2017), Glover et al. (2020)에서는 도로터널에서 수소차 위험평가 시 5%를 적용하고 있다. 또한 국내의 경우, 도로터널방재시설 설치 및 관리지침(MOLIT, 2020)에서는 도로터널사고 중 화재사고의 비를 5%로 분석하고 있는 바, 본 연구에서는 1차 사고가 화재사고로 발전할 확률을 5%로 적용하였다.
- 사고로 인한 수소가스의 누출 가능성: 본 시나리오에서 수소가스의 누출은 차량의 추돌 또는 충돌에 의한 연료 공급관 및 수소탱크에서 누출을 의미하며, GTR13 (2013)에서는 기존 연료차량의 사고 시 연료의 누출량을 기준으로 수소의 누출량을 산정하도록 하고 있으며, 이 기준에 의하면 수소누출량은 10.7 g/min로 비교적 작은 양으로 규제하고 있다. 그러나 Lee and Ryu (2022)의 연구에 의하면 탱크내압이 70 MPa인 경우에 크랙의 등가 직경이 10 mm 이상인 경우에는 누출량은 2.5 kg/s 이상이 되는 것으로 제시하고 있으며, NHTSA (2015)는 수소차 사고 시 수소의 누출에 대한 평가를 위해서 5회의 충돌시험을 실시하였으며, 모든 실험에서 수소의 누출을 확인하지 못한 것으로 보고하고 있다. 따라서 수소차의 경우 추돌 또는 충돌이 발생하는 경우 수소의 누출확률은 아주 작을 것으로 예측된다. 그러나 본 시나리오에서는 수소의 누출확률을 LaFleur et al. (2017)에서 제시하는 바와 같이 10%로 고려하였다.

- 수소의 점화확률 : Ehrhart et al. (2020)은 점화지연 여부에 대해 누출량에 따라서 점화지연(Delay ignition) 및 즉시점화(Immediate ignition)의 비율을 Table 2와 같이 제시하고 있다. 본 시나리오에서는 표를 근거로 하여 비 점화확률 : 즉시 점화확률 : 지연 점화확률을 85.3% : 9.8%, 4.9%로 적용하였다.
- TPRD 고장확률 : Dadashzadeh et al. (2018)은 차량에 적재된 수소탱크에 대한 위험평가방법에 대한 연구에서 용량 및 압력이 2.514 kg, 70 MPa인 수소탱크의 폭발 및 파이어볼 발생시나리오에서 기존 연구결과를 정리하여 TPRD의 고장확률을 6.04×10^{-3} 으로 제시하고 있으며, Saw et al. (2016)은 Table 3에 보인 바와 같이 EU의 FireComp 프로젝트에서 화재의 종류에 따른 TPRD의 동작특성을 TPRD효율(PFD)을 정의하고 TPRD 실패확률을 고려하고 있다. 본 시나리오에서는 화재의 종류와 무관하게 TPRD의 고장확률을 보수적인 측면에서 50%로 고려하였으며, 이는 LaFleur et al. (2017)과 동일하다.
- 환기여부 : 도로터널에서는 통행하는 차량의 교동환기력으로 인하여 일정 풍속 이상의 환기량이 발생하게 된다. Lee and Ryu (2022)는 도로터널에서 수소차 사고로 인하여 수소가스가 누출되는 경우에 파이어볼의 발생을 고려하기 위해서 가연 영역에 대한 분석을 수행하였으며, 그 결과 터널 내 풍속이 1 m/s 이상인 경우에는 가연 영역의 체적 및 분포 길이에 있어서 큰 차이가 없는 것으로 분석하고 있다.

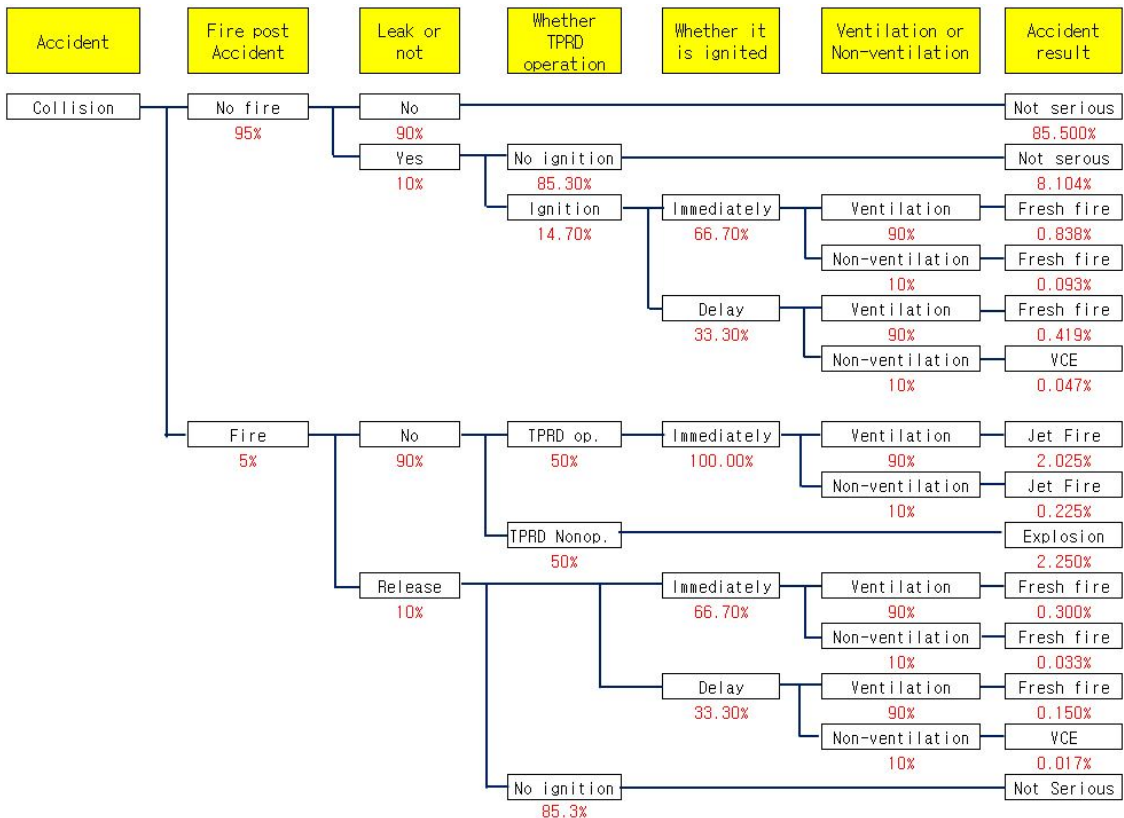


Fig. 2. Event tree of hydrogen fuel cell vehicle

Table 2. Probability of ignition for hydrogen release rate

Hydrogen release rate (kg/s)	Immediate ignition	Delay ignition	No ignition
<0.125	0.008	0.004	0.988
0.125~6.25	0.053	0.027	0.920
>6.25	0.230	0.120	0.650
Average	0.098	0.049	0.853

Table 3. Probability of failure on demand (PFD) of the TPRD

Event fire	Efficient (TPRD _{eff})	PFD ^{a)}
Engulfing fire	100.0%	6.040E-03
Local fire	33.3%	6.690E-01
Partial fire	50.0%	5.030E-01

a) $PFD = (1 - (1 - TPRD_{eff})) \times PFD_{avg} + (1 - TPRD_{eff})$

이에 본 연구에서는 제트팬이 설치된 고속도로터널을 대상으로 제트팬을 가동하지 않는 경우에 터널 내 풍속 측정자료를 분석하였으며, 누적빈도는 Fig. 3에 나타낸 바와 같다. 그림에서 터널 내 풍속이 1 m/s 미만인 경우의 누적빈도는 1.35%, 1.5 m/s인 경우는 8.75%로 분석된다. 따라서 터널 내 풍속이 1 m/s 미만일 가능성은 1.35%이나 풍속 측정의 불확실성을 감안하여 환기가 부족한 빈도를 10%로 적용하였다.

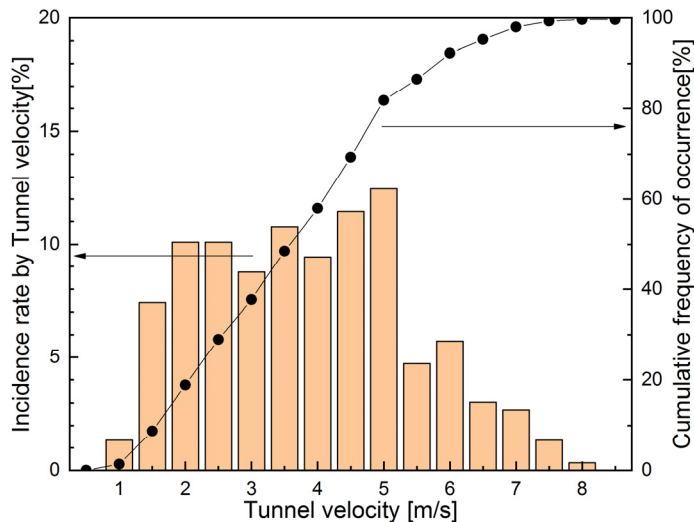


Fig. 3. Cumulative distribution of velocity in the tunnel

3.2.2 사고의 결과

사고의 결과는 전술한 바와 같이 일반화재, 제트화염, 가스구름폭발, 폭발로 구분되며, 본 시나리오에 따른 발생확률은 Table 4로 분석되었다.

Table 4. Probability of accidents

Accidents	Not serious	Fresh fire	Jet fire	VCE	Explosion
Probability	93.61%	1.83%	2.25%	0.06%	2.25%

표에서 알 수 있는 바와 같이 위험도가 가장 높을 것으로 예측되는 폭발(가스구름폭발 + 탱크폭발)확률은 2.31%로 분석되었다. 이는 LaFleur et al. (2017), Glover et al. (2020)에서 제시하는 0.88%보다는 3배 이상 높은 값으로 차량사고를 경미한 사고(94.06%)와 심각한 사고(5.94%)로 구분하고 심각한 사고인 경우에만 수소차 사고시나리오를 적용하고 있기 때문에 상대적으로 낮은 확률을 보이고 있다.

4. 위험거리에 대한 분석

본 장에서는 전술한 사고결과별 위험거리를 기존의 연구결과를 분석하여 검토하였다.

4.1 폭발압력에 따른 위험거리 분석

가스의 폭발은 누출된 가스가 가스구름을 형성하고 지연점화 되면서 폭발하는 현상과 수소탱크가 열화되어 수소가스가 회염에 노출되어 폭발하는 경우이다. Table 5는 한계압력을 16.5 kPa (Glover et al., 2020) 기준으로 하는 경우에 기존 연구결과에 제시된 한계거리를 정리한 것이다. 연구의 조건이 서로 상이하기 때문에 한계거리의 편차가 크게 발생하고 있으며, 현재 개발된 수소차의 연료탱크와 압력이 동일하고 용량이 유사한 Dadashzadeh et al. (2018)의 경우 13.4 m로 제시하고 있다.

Table 5. Limit distance to overpressure in report and paper

No.	Hazard distance (m)	Pressure criteria	Tank condition	Ref.
1	3.9	-	Hydrogen station, 82 MPa, OD: 0.05, 0.2, 1.0, 2.0 mm	Hirayama et al. (2019)
2	78	16.5 kPa (injure, 1% eardrum rupture probability)	10 m ³ , 100 MPa (stand alone)	Molkov and Kashkarov (2015)
	11		33 L, 70 MPa	
	7.5		12 L, 70 MPa	
3	7.0	14.0 kPa (5 kW/m ²)	-	Duclos et al. (2015)
4	13.4	16.5 kPa	70 MPa, 62.4 L on board tank	Dadashzadeh et al. (2018)

Ryu et al. (2021)은 표준단면적(72 m²)의 도로터널에서 수소 연료차의 수소탱크의 폭발압력에 대한 기초적 연구를 통해 수소탱크가 폭발하는 경우, 폭발파가 벽체에 도달하기 전까지는 반구형으로 전파하나 벽체에 도달한 후에 반사파가 형성되면서 복잡한 전파양상을 보이며, 거리가 터널 높이의 약 9.2배 정도에 도달하면 평면파로 변형되는 것으로 보고하고 있으며, 평면파로 전환된 후에 폭발압력은 감쇄(-0.042 kPa/m)는 아주 작은 것으로 보고하고 있다. 또한, Table 6과 같이 한계거리를 제시하고 있다. 한계압력에 따른 한계거리는 단면적이 작을수록 짧아지는 경향을 보이고 있으며, 터널단면적(40.5~95 m²)에 따라 1.2~18.9 m이며, 표준단면(72 m²)의 터널에서는 17.6 m로 분석하고 있다(Fig. 4).

Table 6. Limit distance to overpressure

Tunnel area (m ²) \ Effect	Fatality (~100 kPa)	Serious injury (~16.5 kPa)	Slight injury (16.5 kPa~)
95	2.9	18.6	52.5
72	2.9	17.6	68.5
54	3.0	15.6	130.0
40.5	3.0	11.2	250.0

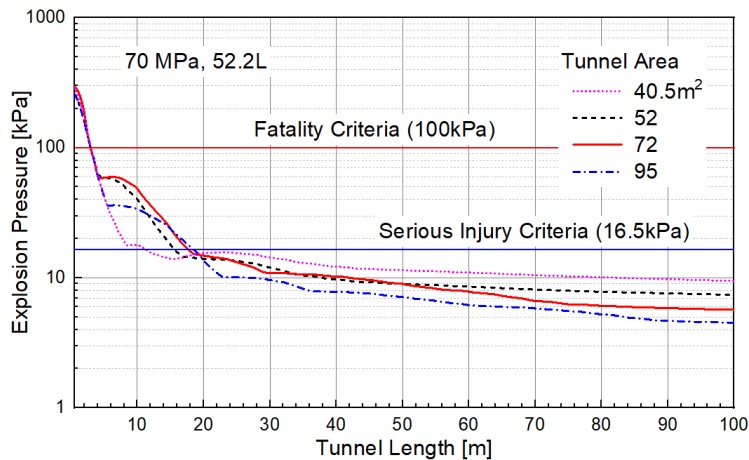


Fig. 4. Pressure wave according to tunnel location

4.2 제트화염

제트화염 길이는 수소탱크의 압력, 오리피스직경에 영향을 받으며, 또한, 주변에 있는 장애물의 위치에 크게 영향을 받으며, Molkov and Saffers (2013)는 Kalghatgi (1984)의 실험 데이터와 Mogi et al. (2005), Schefer et al. (2006; 2007), Proust et al. (2011), Studer et al. (2009) 등의 실험데이터를 정리하여 누출량(\dot{m} ; kg/s)과 누출직경 (OD; m)에 따른 제트화염의 길이(L_F ; m)를 Table 7과 식 (1)로 제시하고 있다.

$$L_F = C(\dot{m} \cdot OD)^{0.347} \quad (1)$$

여기서, C는 계수로 제트화염 평균길이 계산 시는 76, 최대길이 계산 시에는 116을 적용한다.

Kim et al. (2011)은 TPRD의 오리피스직경이 2.25 mm일 때 제트화염의 길이를 Table 7의 $L_{F,MAX}$ 와 근사한 6.0 m (70 MPa), 5 m (35 MPa)로 측정하고 있다. 따라서, 현재 국내에서 개발되는 수소차량(70 MPa, ϕ 1.8 mm)의 연료탱크를 기준으로 하는 경우, 제트화염의 길이는 5.53 m 정도로 평가된다.

Table 7. Jet flame length according to OD and tank pressure

Tank pressure (MPa)	OD (mm)	Release rate (kg/s)	$L_{F,AVG}$ (m)	$L_{F,MAX}$ (m)
35	1.80	0.0487	2.97	4.54
	2.25	0.0761	3.75	5.72
	3.00	0.1353	5.06	7.72
	4.00	0.2405	6.82	10.41
70	1.80	0.0863	3.62	5.53
	2.25	0.1357	4.58	6.99
	3.00	0.2412	6.18	9.43
	4.00	0.4289	8.34	12.73

Table 8은 기존의 연구결과에 제시된 제트화염의 길이를 나타낸 것으로 제트화염의 길이는 최소 4.9~35 m로 편차가 크게 나타나고 있으나, 방출구의 직경(OD; m)이 클수록 방출량이 증가하기 때문에 제트화염의 길이가 증가하는 것을 알 수 있다(Fig. 5).

Table 8. Jet flame length

No.	Hazard distance (m)	Condition	Ref.
1	8.8	OD 1 mm:3.3 m / 2 mm:5.0 m / 5 mm:8.8 m (open space)	Jo (2012)
2	5.2~10.9	0.4 mm:1.0 m / 0.8 mm:1.5 m / 2.0 mm:4.0 m / 3.1 mm:5.5 m@20 MPa	HyResponder (2021)
3	20	4.7 kW/m ² , OD: 5 mm	LaChance (2007)
	35	4.7 kW/m ² , OD: 10 mm	
4	4.9	82 MPa, OD: 0.05, 0.2, 1.0, 2.0 mm, Hydrogen refueling station	Hirayama et al. (2019)
5	11.8~12.2	80 MPa, OD: 7 mm	Lee et al. (2022)
	10.4~11.3	40~70 MPa, OD: 2 mm	
6	12	Radiative intensity 5 kW/m ²	Kang and Lee (2017)
7	8	14.0 kPa, 5 kW/m ²	Duclos et al. (2015)

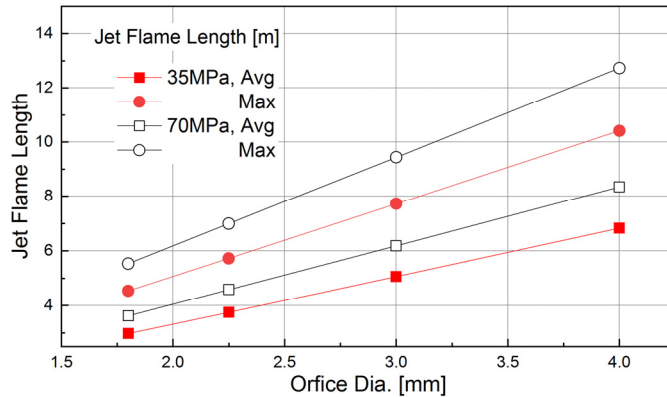


Fig. 5. Jet flame length according to orifice diameter

4.3 파이어볼

파이어볼은 가연성 기체가 급격하게 연소할 때 구형의 화염이 형성되는 현상으로 본 시나리오에서는 수소탱크 폭발 시 발생하게 된다. 수소탱크 폭발 시 압력파가 생성된 후에 형성되기 때문에 압력파의 영향이 먼저 나타나고 다음에 파이어볼의 영향이 나타나게 된다.

Fig. 6은 한국건설기술연구에 의해 수행된 국내 H사의 N차량의 수소탱크(내압 : 70 MPa, 수소충전량 : 2.11 kg) 폭발 시 발생한 파이어볼을 보여주고 있다, 그림에서 화염은 차량부근에 설치한 방벽으로 인해서 정확하게 구체를 형성하지는 않으며, 차체 구조물의 저항으로 인하여 방향별로 확산되는 크기에 차이가 있으나, 파이어볼의 최대크기는 약 17.2 m로 나타났다.



Fig. 6. Fireball ($p_{H_2} = 70$ MPa, $V = 52.2$ L, $m_{H_2} = 2, 11$ kg)

파이어볼의 크기에 대한 연구는 1964년 Zabetakis의 연구로 부터 많은 연구가 수행되어 왔으며, 가장 최근의 연구로 Makarov et al. (2021)의 연구가 있다. 연구에 따르면 파이어볼의 크기는 연소하는 수소가스의 질량의 1/3 제곱에 비례하고 또한 생성되는 형태에 따른 영향을 받는 것으로 보고되고 있다.

파이어볼의 이론적인 크기는 가연물질의 총연소 생성물의 체적($V_b; \text{m}^3$)을 구하고 파이어볼의 형상에 따라서 크기를 구할 수 있으며, 파이어볼의 형상을 반구체로 가정하는 경우에 파이어볼의 직경은 식 (2)와 같이 정리된다.

$$\text{탱크용량이 } V \text{ (m}^3\text{)인 수소의 질량}(m_{H_2}; \text{kg}) : m_{H_2} = V \frac{p_{H_2}}{(p_{H_2}b + R_{H_2}T_{H_2})} \quad (2)$$

여기서, 수소압력($p_{H_2}; \text{MPa}$), 미반응 고체가 차지하는 부피($b; \text{m}^3$), 수소분자량($R_{H_2}; \text{kg/kmol}$), 수소온도($T_{H_2}; \text{K}$)이다.

대기 중에서 수소의 체적($V_{H_2}; \text{m}^3$)과 연소에 필요한 공기량($V_{air}; \text{m}^3$)은 식 (3)과 같다.

$$V_{H_2} = 22.4 \frac{m_{H_2}}{M_{H_2}}, V_{air} = 2.38 V_{H_2} \quad (3)$$

연소생성물의 총체적($V_b; \text{m}^3$)는 팽창계수(E_i)를 고려한 수소와 공기의 혼합기체로 식 (4)와 같다.

$$V_b = E_i (V_{H_2} + V_{air}) = 6.85(1 + 2.38) \frac{22.4}{2.016} m_{H_2} = 257.26 m_{H_2} \quad (4)$$

연소생성물 총체적에 대한 파이어볼의 직경($D_{h,sp}; \text{m}$)은 식 (5)에 나타난 것과 같으며, 식 (4)를 대입하여 수소 질량에 따른 이론적인 파이어볼의 직경은 식 (6)과 같이 구할 수 있다.

$$D_{h,sp} = 2(3V_b/2\pi)^{1/3} \quad (5)$$

$$D_{h,sp} = 9.8(m_{H_2})^{1/3} \quad (6)$$

Makarov et al. (2021)은 기존의 연구결과를 정리하여 수소 질량에 따른 파이어볼 직경을 Fig. 6과 같이 제시하고 있으며, 그림에서 ☆는 한국건설기술연구원의 실험결과이며, ★는 식 (6)에 의한 계산 결과이다. 또한 Fig. 7에서 실선은 $D_{h,sp} = (19.5m_{H_2})^{1/3}$ 를 적용하여 보수적으로 평가한 파이어볼의 직경을 나타내고 있다. 한국건설기술연구원의 실험조건과 동일한 조건으로 하여 이 식에 의해서 파이어볼의 직경을 구하면 25.0 m가 된다.

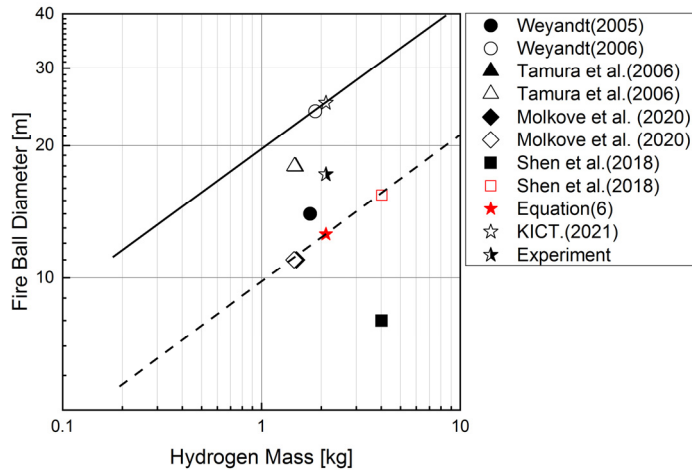


Fig. 7. Fireball distance according to the related formula

Table 9는 기존연구 결과를 정리하여 나타낸 것으로 파이어볼의 직경은 최소 7 m에서 최대 35 m의 범위에 있는 것으로 나타나고 있다. 이에 파이어볼의 위험거리를 상관관계식에서 직경으로 표현되나 폭발 시 가스의 확산이 차량이나 터널 벽면에 의해서 제한되는 점을 고려하여 보수적인 관점에서 계산되는 직경을 위험거리로 적용하는 것이 타당한 것으로 판단된다.

Table 9. Hazard distance for fireball

No.	Hazard distance (m)	Condition	Ref.
1	7.7	Stand alone tank	HyResponder (2021)
	24	SUV hydrogen tank	
2	18	70.23 MPa (1.37 kPa)	Makarov et al. (2021)
	18	70.69 MPa (1.406 kg)	
	7~8	35 MPa (3.9 kg, 165 L)	
3	14 ± 2	35.7 MPa, 72.4 L, 1.64 kg	Weyandt (2005)
	24	34.5 MPa, 88.0 L, 1.87 kg	Weyandt (2006)
	18	94.54 MPa, 36 L, 1.46 kg	Tamura et al. (2006)
	18	99.47 MPa, 35 L, 1.367 kg	
	7~8	35 MPa, 168 L, 3.9 kg	Shen et al. (2018)
4	8.0	Hydrogen station, 82 MPa, OD : 0.05, 0.2, 1.0, 2.0 mm	Hirayama et al. (2019)
5	7.7	Stand-alone, 34 MPa, 1.654 kg	Zalosh (2007)
	24	Under-vehicle (SUV), 31.8 MPa, 1.866 kg	
6	35	70 MPa, 62.4 L on board tank	Dadashzadeh et al. (2018)

4. 결론

본 연구에서는 터널에서 수소차 화재 사고의 위험을 평가하기 위해서 다양한 연구기관에 의해서 연구된 수소차 사고시나리오를 분석하여 국내 도로터널의 실정에 적합한 수소차 사고시나리오를 개발하였으며, 시나리오별 위험요소에 따른 위험거리를 수치해석적 연구와 기존의 실험 및 연구자료를 통해 분석·검토하였다.

1. 도로터널에서 수소차 위험평가를 위한 사고시나리오를 환기특성을 반영하여 사건수목 기법에 의해서 제시하였다.
2. 사고시나리오에 따른 사고결과는 경미한 사고, 일반화재, 제트화염, 폭발로 구분하였으며, 각각의 발생확률을 93.06%, 1.83%, 2.25%, 2.31%로 예측하였다.
3. 표준단면의 터널에서 현재 국내에서 시판되는 H사의 N차량을 기준으로 위험요소별 위험거리는 폭발의 경우는 17.6 m (폭발압력 16.5 kPa기준), 제트화염의 경우에는 약 6 m, 파이어볼 형성에 따른 위험거리는 35 m로 분석되었다.

감사의 글

본 논문은 소방청의 ESS·수소시설 화재 안전기술 연구개발사업(20011645)의 지원을 받아 작성함.

저자 기여도

이후영은 데이터 수집 및 데이터 해석, 데이터 분석, 원고작성을 하였고, 류지오는 연구 개념 및 계획, 데이터 분석, 원고 작성 및 원고 검토를 하였다.

References

1. Ahn, H.J., Jung, J.H., Hur, N.K., Lee, M.K., Yong, G.J. (2010), "The numerical simulation of hydrogen diffusion for the hydrogen leakage in tunnel", Journal of Computational Fluids Engineering, Vol. 15, No. 2, pp. 47-54.
2. Dadashzadeh, M., Kashkarov, S., Makarov, D., Molkov, V. (2018), "Risk assessment methodology for onboard hydrogen storage", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 43, No. 12, pp. 6462-6475.
3. Duclos, A., Proust, C., Daubech, J., Verbecke, F. (2015), "Engineering safety in hydrogen-energy applications", Proceedings of the 6th ICHS (International Conference on Hydrogen Safety), Yokohama, pp. 1-13.
4. Ehrhart, B.D., Brooks, D.M., Muna, A.B., LaFleur, C.B. (2020), "Risk assessment of hydrogen fuel cell electric vehicles in tunnels", Fire Technology, Vol. 56, No. 3, pp. 891-912.
5. Glover, A.M., Baird, A.R., LaFleur, C.B. (2020), Hydrogen fuel cell vehicles in tunnels, SAND2020-4507 R,

- pp. 54-59.
6. GTR13 (2013), Global technical regulation on hydrogen and fuel cell vehicles_UN_gtr013.
 7. Hirayama, M., Ito, Y., Kamada, H., Kasai, N., Otaki, T. (2019), "Simplified approach to evaluating safety distances for hydrogen vehicle fuel dispensers", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 44, No. 33, pp. 18639-18647.
 8. HyResponder (2021), Lecture 9 Hazard distances from hydrogen flames and fire fighting LEVEL III, *Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking*, pp. 5-18.
 9. HyTunnel-CS (2019), Deliverable 1.2 Report on hydrogen hazards and risks in tunnels and similar confined spaces, *Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking (FCH JU)*, pp. 13-136.
 10. Jo, Y.D. (2012), "Hazard distance from hydrogen accidents", *Journal of the Korean Institute of Gas*, Vol. 16, No. 1, pp. 15-21.
 11. Kalghatgi, G.T. (1984), "Lift-off heights and visible lengths of vertical turbulent jet diffusion flames in still air", *Combustion Science and Technology*, Vol. 41, No. 1-2, pp. 17-29.
 12. Kang, B.W., Lee, T.H. (2017), "An investigation of hazard distance in a series of hydrogen jet fire with the HyRAM tools", *Transactions of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 28, No. 2, pp. 166-173.
 13. Kim, S.H., Choi, Y.M., Hang, K.H., Shim, J.H., Hang, I.C., Lim, T.W. (2011), "The evaluation of fire reliability for the high pressure hydrogen storage system of fuel cell vehicle (I)", *Transactions of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 22, No. 4, pp. 520-526.
 14. Kim, T.H., Oh, Y.D., Lee, M.S. (2014), "Study on the consequence analysis about leakage scenarios for hydrogen gas", *Journal of the Korea Safety Management & Science*, Vol. 16, No. 4, pp. 159-165.
 15. KOSHA (2017), A study on fire explosion impact map and accident analysis model (II), *Korea Safety and Health Agency*, pp. 1-92.
 16. KRISS (2016), Development of safety and integrity evaluation technology for liquefied hydrogen storage vessels, *Korea Research Institute of Standards and Science*, pp. 221-290.
 17. LaChance, J.L. (2007), Risk-informed separation distances for hydrogen refueling stations, SAND2007-2613C, pp. 1-12.
 18. LaFleur, C.B., Bran Anleu, G.A., Muna, A.B., Ehrhart, B.D., Blaylock, M.L., Houf, W.G. (2017), Hydrogen fuel cell electric vehicle tunnel safety study, SAND2017-11157, pp. 36-71.
 19. Lee, H.Y., Ryu, J.O. (2022), "Risk analysis of flammable range according to hydrogen vehicle leakage scenario in road tunnel", *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 24, No. 4, pp. 305-316.
 20. Lee, K.M., Kwon, M., Kang, S., Choi, J.Y., Kim, Y.K., Lim, O.K. (2022), "The safety of hydrogen jet-flame suppression training", *Fire Science and Engineering*, Vol. 36, No. 3, pp. 31-36.
 21. Makarov, D., Shentsov, V., Kuznetsov, M., Molkov, V. (2021), "Hydrogen tank rupture in fire in the open atmosphere: hazard distance defined by fireball", *Hydrogen*, Vol. 2, No. 1, pp. 134-146.
 22. Mogi, T., Nishida, H., Horiguchi, S. (2005), "Flame characteristics of high-pressure hydrogen gas jet", *Proceedings of the 1st International Conference on Hydrogen Safety, Pisa, Italy*, pp. 1-9.

23. MOLIT (2020), Road tunnel disaster prevention facility installation and management guidelines, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, pp. 60.
24. Molkov, V., Kashkarov, S. (2015), "Blast wave from a high-pressure gas tank rupture in a fire: Stand-alone and under-vehicle hydrogen tanks", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 40, No. 36, pp. 12581-12603.
25. Molkov, V., Saffers, J.B. (2013), "Hydrogen jet flames", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 38, No. 19, pp. 8141-8158.
26. MOTIE (2019), Research on establishing a roadmap for revitalizing the hydrogen economy, Ministry of Trade, Industry and Energy, pp. 202-204.
27. MSIT (2006), Development on safety management technique for facilities & processes of hydrogen gas, Ministry of Science and ICT, pp. 41-65.
28. Muhlbauer, W.K. (1996), *The Basic Risk Assessment Model Pipeline Risk Management Manual*, Gulf Professional Publishing, Houston, pp. 1-164.
29. Nelisse, M., Vrouwenvelder, A.C.W.M. (2018), "Explosions in road tunnels Part 1: A study into the explosion scenarios according to the Eurocode", *Proceedings of the International Symposium on Tunnel Safety and Security*, Boras, Sweden, pp. 1-16.
30. Nelisse, M., Vrouwenvelder, A.C.W.M. (2019), "Explosions in road tunnels, Part 2: A quantitative risk analysis", *Proceedings of the Ninth International Symposium on Tunnel Safety and Security*, Munich, Germany, pp. 279-292.
31. NHTSA (2015), Hydrogen fuel cell vehicle electrical protective barrier option: fuel system safety, National Highway Traffic Safety Administration, pp. 1-116.
32. Park, J., Yoo, Y., Kim, W. (2021), "Analysis of effect of hydrogen jet fire on tunnel structure", *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 23, No. 6, pp. 535-547.
33. Proust, C., Jamois, D., Studer, E. (2011), "High pressure hydrogen fires", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 36, No. 3, pp. 2367-2373.
34. Rodionov, A., Wikenning, H., Moretto, P. (2011), "Risk assessment of hydrogen explosion for private car with hydrogen-driven engine", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 36, No. 3, pp. 2398-2406.
35. Ryu, J.O., Ahn, S.H., Lee, H.Y. (2021), "A basic study on explosion pressure of hydrogen tank for hydrogen fueled vehicles in road tunnels", *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 23, No. 6, pp. 517-534.
36. Saw, J.L., Flauw, Y., Demeestere, M., Naudet, V., Blanc-Vannet, P., Hollifield, K., Wilday, J. (2016), "The EU firecomp project and risk assessment of hydrogen composite storage applications using bow-tie analysis", *Proceedings of the IChemE HAZARDS XXVI in association with Mary Kay O'Connor Process Safety Centre* at Edinburgh, Scotland, UK, pp. 1-12.
37. Schefer, R.W., Houf, W.G., Bourne, B., Colton, J. (2006), "Spatial and radiative properties of an openflame hydrogen plume", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 31, No. 10, pp. 1332-1340.
38. Schefer, R.W., Houf, W.G., Williams, T.C., Bourne, B., Colton, J. (2007), "Characterization of high-pressure, underexpanded hydrogen-jet flames", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 32, No. 12, pp. 2081-

2093.

39. Shen, C., Ma, L., Huang, G., Wu, Y., Zheng, J., Liu, Y., Hu, J. (2018), "Consequence assessment of high-pressure hydrogen storage tank rupture during fire test", *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Vol. 55, pp. 223-231.
40. Studer, E., Jamois, D., Jallais, S., Leroy, G., Hebrard, J., Blanchetière, V. (2009), "Properties of large-scale methane/hydrogen jet fires", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 34, No. 23, pp. 9611-9619.
41. Tamura, Y., Takahashi, M., Maeda, Y., Mitsuishi, H., Suzuki, J., Watanabe, S. (2006), "Fire exposure burst test of 70 MPa automobile high-pressure hydrogen cylinders", *Proceedings of the Society of Automotive Engineers of Japan Annual Autumn Congress*, Issue 115-06, Japan, pp. 7-10.
42. Vidmar, P., Petelin, S. (2007), "Methodology of using CFD-Based risk assessment in road tunnels", *Thermal Science*, Vol. 11, No. 2, pp. 223-250.
43. Weyandt, N. (2005), Analysis of induced catastrophic failure of a 5000 psig type IV hydrogen cylinder, Southwest Research Institute Report 01.0639.01.001, pp. 625-630.
44. Weyandt, N. (2006), Catastrophic failure of a 5000-psig hydrogen cylinder installed on a typical SUV, Southwest Research Institute Report 01.06939.01.005, pp. 1-9.
45. Zalosh, R. (2007), "Blast waves and fireballs generated by hydrogen fuel tank rupture during fire exposure", *Proceedings of the 5th International Seminar on Fire and Explosion Hazards*, Edinburgh, UK, pp. 23-27.