

도로터널에서 수소차 위험에 관한 기초적 연구

류지오^{1*} · 이후영²

¹정회원, 신한대학교 기계자동차융합공학과 교수

²정회원, 신한대학교 대학원 ICT기계공학과 학생

A basic study on the hazard of hydrogen fuel cell vehicles in road tunnels

Ji-Oh Ryu^{1*} · Hu-Young Lee²

¹Professor, Dept. of Mechanical and Automotive Engineering, Shinhan University

²Student, Dept. of ICT Mechanical Engineering, Shinhan University Graduate School

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

Abstract

Hydrogen is a next-generation energy source, and according to the roadmap for activating the hydrogen economy, it is expected that industries to stably produce, store, and transport of hydrogen as well as the supply of hydrogen fuel cell vehicles will be made rapidly. Accordingly, safety measures for accidents of hydrogen vehicles in confined spaces such as tunnels are required. In this study, as part of a study to ensure the safety of hydrogen fuel cell vehicles in road tunnels, a basic investigation and research on the risk of fire and explosion due to gas leakage and hydrogen tank rupture among various hazards caused by hydrogen fuel cell vehicle accidents in tunnels was conducted. The following results were obtained. In the event of hydrogen fuel cell vehicle accidents, the gas release rate depends on the orifice diameter of TPRD, and when the gas is ignited, the maximum heat release rate reaches 3.22~51.36 MW (orifice diameter: 1~4 mm) depending on the orifice diameter but the duration times are short. Therefore, it was analyzed that there was little increase in risk due to fire. As the overpressure of the gas explosion was calculated by the equivalent TNT method, in the case of yield of VCE of 0.2 is applied, the safety threshold distance is analyzed to be about 35 m, and number of the equivalent fatalities are conservatively predicted to reach tens of people.

Keywords: Hydrogen tank rupture and explosion, Hydrogen gas release, Jet fire, Hydrogen fuel cell vehicle, Blast overpressure

초 록

수소는 차세대 에너지원으로서 수소경제 활성화 로드 맵에 따라 수소를 안정적으로 생산·저장·운송하기 위한 산업과 더불어 수소차의 보급이 급속도로 이루어질 것으로 예

OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and
Underground Space Association
23(1)47-60(2021)
<https://doi.org/10.9711/KTAJ.2021.23.1.047>

eISSN: 2287-4747
pISSN: 2233-8292

Received January 5, 2021

Revised January 18, 2021

Accepted January 19, 2021



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 © 2021, Korean Tunnelling and Underground
Space Association

상된다. 이에 따라 터널과 같은 반밀폐공간에서의 수소차의 사고에 대비한 안전대책이 요구되고 있다. 본 연구에서는 도로터널에서 수소차량의 안전성을 확보하기 위한 연구의 일환으로 터널 내 수소차 사고에 따른 다양한 위험요인 중 가스 누출에 따른 화재와 폭발의 위험성에 대한 기초적인 조사·연구를 수행하였으며, 다음과 같은 결과를 얻었다. 수소차 사고 시 가스누출속도는 TPRD의 오리피스직경에 의존하며, 가스가 점화되는 경우에 최대화재강도는 오리피스직경에 따라 3.22~51.36 MW (오리피스직경: 1~4 mm)에 도달하나 지속시간이 짧기 때문에 화재로 인한 위험의 가중은 거의 없는 것으로 분석되었다. 등가 TNT방법에 의해서 폭발에 따른 과도압력을 계산하였으며 폭발수율을 0.2적용하는 경우, 안전한계 거리는 대략 35 m 정도로 분석되고 등가사망자는 보수적인 관점에서 수십 명 정도에 달할 것으로 예측된다.

주요어: 수소탱크 파열·폭발, 수소가스 누출, 제트 파이어, 수소전지차, 폭발압력

1. 서론

오늘날 화석연료 중심의 에너지 시스템은 환경문제를 야기하고 2040년에는 고갈될 것으로 예상됨에 따라 에너지원으로 수소를 활용하기 위하여 이를 안정적으로 생산·저장·운송하기 위한 산업, 연료전지의 보급, 수소모빌리티 등을 주축으로 하는 수소경제 활성화 로드맵을 발표하고 있다. 이에 따르면 우리나라는 2040년까지 수소차를 620만대를 보급하고 1,200개의 수소충전소를 확충하는 계획을 수립하고 있다(MOTIE, 2019).

이에 따라 향후, 수소차의 보급이 급속도로 이루어질 것으로 예상되며, 수소차의 사고에 대응하기 위한 대책의 확립이 요구되고 있다. 특히, 터널과 같이 반밀폐공간에서의 수소가 누출되는 경우에 수소는 가연범위가 4~75%로 타 연료에 비해서 넓고, 점화에너지가 매우 작기 때문에 화재나 폭발로 인한 위험이 매우 높을 것으로 우려하고 있다. 따라서 각국에서는 연료탱크의 안전성, 충돌이나 충돌에 의한 수소누출과 이에 따른 화재·폭발 등 수소차의 안전한 사용을 위한 많은 연구를 수행하고 있다.

Wu (2008)는 도로터널에서 수소차의 연료탱크에서 수소누출로 인한 jet fire에 초점을 맞추어 CFD시뮬레이션을 통해 환기시스템이 수소차 화재 시 백레이어 현상에 미치는 영향을 검토하고 있다. 이 연구에서는 단면적이 25 m²인 터널에서 제연풍속을 2.5 m/s로 하는 경우에 화재강도를 6 MW (수소 누출량 0.05 kg/s, 누출속도 10 m/s), 화재강도 30 MW (누출유량 0.25 kg/s, 누출속도 50 m/s)로 하여 환기시스템(종류환기방식, 횡류식, 반횡류식)이 백레이어 현상에 미치는 영향을 검토하여 6 MW 화재 시에는 백레이어 현상이 완전히 제압되지만, 30 MW의 화재 시에는 백레이어 현상을 제압하지 못하며, 화염의 길이가 터널의 천정까지 도달하여 시설물에 대한 피해가 발생할 가능성이 있는 것으로 분석하고 있다.

Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2013)는 수소연료 자동차의 수소 누출 시 확산특성을 둔내 터널과 홍지문 터널을 모델로 하여 STAR-CD를 이용하여 해석적인 방법으로 검토하고 있다. 제트팬과 사고차량의 상대적 위치와 수소가스의 누설유량을 변수로 하여 수소가스의 확산현상을 해석하였으며, 제트팬의 가동여부에 따라 누출된 수소의 확산형상에 차이가 크며, 제트팬을 가동하지 않는 경우에는 가연영역의 분포가 부력에 의

하여 방사형으로 확산되며, 최소가연범위(4 Vol.%)는 수소누출차량의 인근 3 m 정도이며, 이 영역에서 화재의 위험도가 높은 것으로 보고하였다.

Sandia National Laboratories (2017) 보고서에서는 터널에서 수소연료전지 자동차의 사고와 관련된 잠재적 위험에 관한 포괄적인 검토를 수행하고 있으며, 이 보고서의 최종목적은 미국 동부의 Ted Williams Tunnel (Big dig 프로젝트에 의해서 보스턴에 건설 운영중)에 대한 구조적 안전성을 검토하는 것을 목적으로 한다. 이 보고서에서는 일반화재로 인해 TPRD (Thermal Pressure Relief Device)가 작동하여 수소가 방출되어 발화할 가능성이 가장 높은 것으로 평가하고 있으며, 5 kg의 수소 누출이 발생하는 경우에 시뮬레이션을 통해서 환기가 수행되지 않는 상황에서는 jet fire가 충돌하는 천장에서 구조체의 온도가 592~706°C까지 상승하여 국부적인 폭열현상이 있을 수 있으나, 환기가 수행되고 있는 경우에는 철골구조에 영향을 주지 않을 것으로 예측하고 있다. 또한, 도로 터널에서 수소차의 위험에 대한 평가를 위해 event tree에 의한 시나리오를 정립하고 있으며, 시나리오별 위험분석을 통해 FCEV로 인한 추가적인 위험이 발생하지 않을 확률은 99.07%로 제시하고 있다.

유럽연합의 지원 하에 영국, 독일, 프랑스 등 11개국이 참여한 Fuel Cell and Hydrogen Joint Undertaking (HyTunnel-CS, 2019)은 터널 및 이와 유사한 제한된 공간에서 수소차와 수소수송에 따른 위험에 대한 보고서에서 수소차의 보급에 따른 전반적인 위험을 검토하고 있다. 이 보고서에서 터널이나 밀폐된 공간에서 수소가스의 위험요소에 따른 인간에 대한 위해기준과 구조물 및 장비에 대한 손상기준을 제시하고 있으며, 수소차와 관련된 사고시나리오를 검토하여 안전성을 높이기 위해서 어떠한 사고에 초점을 되어야 하는지를 검토하고 있다. 또한, 이 연구에서는 TPRD의 오리피스 직경에 따른 차량화재강도를 분석하여, 직경이 3 mm인 경우, 최대화재강도는 기존 최대화재강도의 9~14배 정도에 도달하나 지속시간이 2분 이하로 짧으며, 1 mm 이하인 경우에는 기존화재강도와 비슷하거나 낮은 수준으로 폭발을 배제한 정상적인 수소누출인 경우에는 화재강도의 증가에 따른 위험은 배제할 수 있는 것으로 보고하고 있다.

Sandia National Laboratories (2020) 보고서에서는 2017년 보고서와 HyTunnel-CS (2019)를 기반으로 하여 터널 내 수소연료전지 자동차의 위험을 평가하기 위하여 다양한 위험요소에 대한 분석을 수행하여 정량적인 위험분석을 위한 시나리오를 제시하고 있다. 수소사고시나리오는 Sandia National Laboratories (2017) 보고서를 인용하여 8개의 시나리오를 제시하고 있으며, 발생확률이 0.092%로 낮으나 가스가 누출되고 가연성가스가 폭발하여 화재로 전개되거나 탱크가 파손되어 순간적으로 폭발하는 경우에 위험이 가장 높은 것으로 보고하고 있다.

Li (2019)는 단면적이 50 m²인 터널에서 수소를 비롯한 다양한 가스계 연료에 대해서 연료탱크파열시 과도압력(overpressure)을 해석적인 방법으로 제시하고 있으며, 충전 가스량이 6 kg인 수소 탱크의 파열시 과도압력은 50 m거리에서 10~15 kPa로 CNG차량의 연료탱크(충전 가스량: 10~50 kg) 파열시 과도압력은 15~29 kPa로 수소가스차량의 경우가 보다 낮은 것으로 분석하고, 가스구름을 형성하고 폭발하는 경우에는 수소는 19~38 kPa, CNG는 15~780 kPa, LPG는 136~850 kPa로 제시하고 있어 수소가스가 종전의 연료에 비해 보다 안전한 것으로 평가하고 있다.

Molkov and Dery (2020)는 터널에서 수소차량의 탱크가 폭발하는 경우, 거리에 따른 폭발압력을 검토하고

있다. 폭발파(Blast wave)의 전파는 3차원 전파특성을 보이는 폭발지점에 근접한 영역과 평면파가 천이되어 1차원 전파를 하는 영역으로 구분하고 있으며, 전자는 폭발파가 터널의 벽체에서 반사하는 복잡한 특성을 보이며, 거리증가에 따른 압력감쇄율이 큰 반면에 후자는 파면이 평면이 되며, 거리증가에 따른 과도압력의 감쇄율이 감소하는 것으로 보고하고 있다. 또한 이 연구에서는 Fluent를 이용하여 다양한 조건에서 폭발파의 전파에 대한 해석 결과를 파이정리(Buckingham's π theorem)를 이용하여 거리에 따른 과도압력에 대한 상관관계식을 제시하고 있으며, 이에 의하면 수소탱크의 압력이 75 MPa이고 체적이 150 L (수소가스의 질량 5.2 kg)일 때 50 m 이격한 지점에서 과도압력을 40~50 kPa 정도로 제시하고 있다.

전술한 바와 같이 수소차의 보급에 따라 도로터널에서 수소차량의 안전성을 확보하기 위해서 가스누출에 따른 위험요인을 분석하고 이에 대한 대책의 수립여부를 검토하기 위해서 많은 연구가 수행되고 있다. 이에 본 연구에서는 기존의 연구자료를 분석하여, 향후, 수소차의 위험을 고려한 도로터널의 정량적 위험도 평가를 위한 시나리오 및 평가방법의 개발을 위해서 터널 내 수소차 사고에 따른 다양한 위험요인 중 가스누출에 따른 화재와 폭발의 위험성에 대한 기초적인 연구를 수행하였다.

2. 수소차 사고 위험

터널에서 수소차의 사고시나리오는 사고(충돌, 추돌 등)로부터 이어지는 가스의 누출, 사고가 화재로 발전하여 연료탱크의 안전장치인 TPRD의 작동으로 인해 Jet Fire가 발생하는 경우, 단순화재, 폭발을 수반하는 화재로 구분될 수 있다.

2.1 가스누출

차량에서 수소의 방출은 사고로 인하여 연료공급시스템의 배관파손, 탱크파열 또는 예기치 못한 TPRD의 개방으로 인해 발생할 수 있다. 이와 같은 가스누출의 경우, 주변에 점화원이 있으면 대량누출의 경우에는 화재폭발로 이어지게 되며, TPRD에 의한 정상누출은 jet fire를 형성할 가능성이 높다. 그러나 점화가 지연되는 경우에는 가연성 구름이 형성되고 지연 후에 일시 점화되어 폭연(deflagration) 또는 폭발(detonation)이 발생하게 된다. 이와 같이 폭발이 발생하는 경우에는 인명이나 구조물에 큰 피해를 유발할 가능성이 높으며, 가연성 구름은 밀폐공간의 구조나 환기상태에 영향을 받게 된다.

단순누출사고에 의한 위험은 산소결핍, 저온화상, 과도압력 피크현상 등이 있을 수 있다. 산소의 결핍현상은 수소는 무색, 무취, 비독성 가스로 인체에 미치는 영향은 없으나 수소의 체적분율이 증가하면 산소의 체적농도가 감소하여 산소 결핍에 의한 증상이 나타날 수 있다. Fig. 1 및 Table 1은 수소농도와 산소농도의 관계 및 산소농도에 따른 인간에게 미치는 증상을 나타낸 것이다(HyTunnel-CS, 2019). 저온화상은 점화되지 않은 수소가스의 누출 시 수소의 온도는 방출직후의 -200°C까지 강하하며, 고속으로 분출되는 분류에 피부가 직접 노출되면 피부조직의 손상이나 동상이 발생할 우려가 있다.

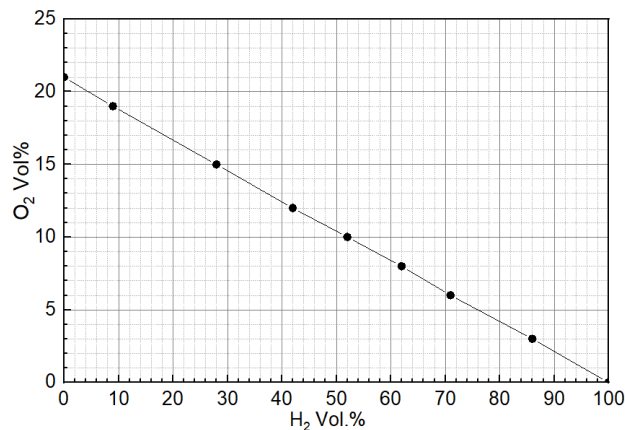


Fig. 1. Oxygen concentration according to hydrogen concentration (conc.) in normal conditions

Table 1. Human response to oxygen depletion (HyTunnel-CS, 2019)

H ₂ Vol%	O ₂ Vol%	Physiological effect
0~9	19~21	No specific symptoms
9~28	15~19	Early symptoms in people with cardiopulmonary acclimatization problems
28~42	12~15	Deeper respiration, faster pulse, poor coordination
42~52	10~12	Dizziness, poor judgement, blue lips. Risk of death below 11%, tolerance time 30 min
52~62	8~10	Nausea, vomiting, unconsciousness, ashen face, fainting, mental failure, with a tolerance of 5 min
62~71	6~8	Unconsciousness in 3 min, death in 8 min.
71~86	3~6	Coma in 40 s, convulsions, respiration ceases, death or permanent brain damage
86~100	0~3	Death within 45 s

2.2 Jet Fire

수소차의 수소탱크는 온도상승으로 인한 폭발을 방지하기 위해서 온도 및 압력상승 시 TPRD가 작동하여 자동으로 수소를 방출하도록 안전장치를 마련하고 있다. 수소탱크는 사용압력의 2.25배에서 파열이 없어야 하며, 화재에 노출되는 경우에 600°C에서 8분간 국부화염에 노출된 후에 800°C 화염에 완전히 휩싸이는 조건에서 TPRD가 정상적으로 작동하여 탱크의 파열을 초래하지 말아야 하는 것으로 규정하고 있다(ECE, 2013). 화재상황에서 TPRD가 작동하면 Jet fire가 형성되며, Kim et al. (2011)의 연구에 의하면 사용압력이 70 MPa인 탱크의 경우, 탱크전체에 화염 속에 노출된 후에 약 30~60초 만에 수소를 방출하기 시작하여 65~95초 정도 지속되는 것으로 보고하고 있다. 또한, 이때 Jet fire의 길이는 5 m, 직경은 1 m정도, 화염의 온도는 최대 900°C에 도달하는 것으로 보고하고 있다. 따라서 TPRD를 통해 수소가스가 누출되는 경우, 인접차로 화재가 전파될 가능성이 매우 높은 것으로 판단된다.

2.3 수소가스의 폭발

수소가스는 가연범위는 하한계(LFL; 4%)~상한계(UFL; 75%)로 넓고 최소점화 에너지가 $17 \mu\text{J}$ 로 아주 작기 때문에 점화 가능성이 매우 높다. 수소의 가연범위는 화염전파방향에 따라 약간 달라지며, 수평 화염 전파의 경우, LFL은 6.0~7.15%, UFL은 65.7~71.4%, 하향 화염전파의 경우, LFL은 8.5~9.45%, UFL은 68~74.5%로 변경된다(Coward and Jones, 1952). 점화한계는 온도 상승에 따라 선형적으로 확장되며, 온도가 20°C 에서 400°C 로 상승하면 가연범위가 1.5~87.5%로 확장된다.

국내에서 생산되는 소형 수소차의 경우, 수소탱크의 수소량 최대 충전 시 6.3 kg으로 이 가스가 20°C 의 대기중으로 방출되는 경우, 체적이 75.2 m^3 으로 체적비를 LFL (Vol 4%)로 가정하는 경우, 수소가스구름(gas cloud)의 체적은 $1,504 \text{ m}^3$ 으로 매우 크며, 터널에 확산되는 경우에 터널전체영역에 확산될 가능성이 크다. 따라서 누출된 가스가 가스구름을 형성하는 경우, 폭연(deflagration)이 발생하고 폭굉(detonation)으로 이어질 가능성이 매우 높을 것으로 판단된다.

3. 도로터널 수소차 사고 시 위험평가

본 연구에서는 TPRD를 통해 수소가스가 방출되는 경우에 위험성을 검토하기 위해서 누출량 및 화재강도, 폭발에 따른 위험성을 검토하였다.

3.1 누출량 및 화재강도

TPRD를 통해 정상적으로 수소가 누출되는 경우, TPRD의 오리피스 직경에 따른 누출량 및 화재강도를 검토하였다.

누출량 및 화재강도에 대한 검토는 국내 수소차를 대상으로 하였으며, 수소탱크의 제원은 다음과 같다.

- 국내 수소차(N Car)의 수소탱크 제원

국내 승용 수소차는 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 3개의 수소탱크를 장착하고 있으며, 제원은 다음과 같다.

- 수소탱크의 총체적 : $52.2 \text{ L} \times 3 \text{ EA} = 156.6 \text{ L}$

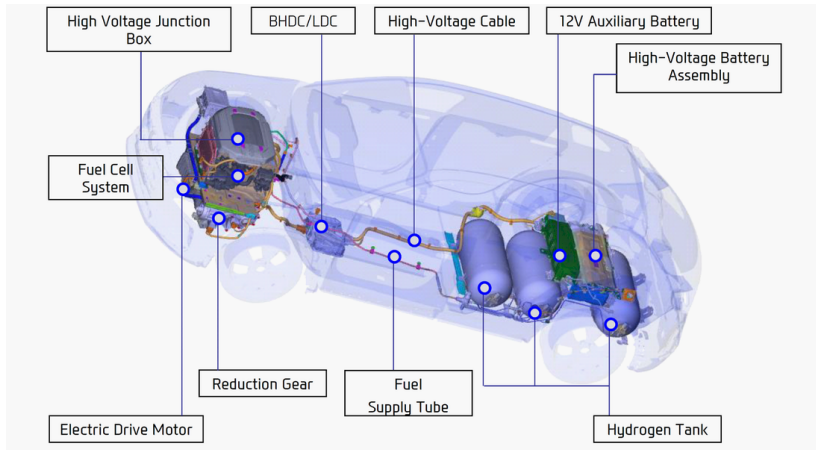
- 수소 총충전량 : 6.3 kg, 체적 75.2 m^3 (표준공기상태; 101.325 kPa , 20°C)

Fig. 3은 TPRD의 오리피스 직경별로 시간경과에 따른 (a) 수소 누출량, (b) 총누출량, (c) 탱크내압, (d) 화재강도를 나타낸 것이다. 오리피스 직경에 따른 누출량은 FCH2 Education (Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking)에서 제공하는 툴을 이용하여 계산한 결과이다.

TPRD가 작동하면 오리피스의 직경이 2.25 mm 이상인 경우에는 초기에 급격하게 방출되며, 직경이 1 mm 인 경우에는 상당히 긴 시간 동안 방출되는 것으로 나타나고 있다.



(a) Hydrogen fuel tank (Sisajournal-e, 2018)



(b) Schematic diagram of the hydrogen fuel supply system (IFA)

Fig. 2. On board hydrogen tank and hydrogen fuel system

Fig. 3(a)에서 누출유량은 직경이 2.25 mm 이상인 경우에는 약 90초까지는 급격하게 감소하며, 시간이 경과하면 감소현상은 점차 둔화되고 있다. 그러나 오리피스 직경(D_o)이 1 mm인 경우에는 급격하게 감소하지는 않으며, 비교적 오랜 시간 동안(6분 이상) 천천히 감소하는 것으로 나타나고 있다.

Fig. 3(b)는 총누출량을 나타낸 것으로 95%까지 방출되는데, 소요되는 시간은 오리피스직경에 따라 96.1초($D_o = 4.0$ mm), 123초($D_o = 3.0$ mm), 219초($D_o = 2.25$ mm), 1,110초($D_o = 1.0$ mm)로 오리피스 직경이 1 mm인 경우에는 오랜 시간동안 비교적 천천히 누출되는 것으로 나타나고 있다.

Fig. 3(c)는 탱크내압을 나타낸 것으로 90초 경과 시 탱크내압은 오리피스 직경이 1 mm인 경우에는 약 50%, 2.25 mm인 경우에는 8%, 3 mm인 경우에는 2%, 4 mm인 경우에는 0.4%수준까지 감소하는 것으로 나타나고 있다.

Fig. 3(d)는 누출량에 따른 화재강도를 나타낸 것으로 수소의 발열량은 120 MJ/kg을 적용한 결과이다. 최대화재강도는 오리피스직경에 따라 3.22 MW ($D_o = 1.0$ mm), 16.28 MW ($D_o = 2.25$ mm), 28.94 MW ($D_o = 3.0$ mm), 51.36 MW ($D_o = 4.0$ mm)로 오리피스 직경이 증가할수록 방출량이 증대하기 때문에 화재강도가 증가한다. 그러나 화재강도는 누출유량감소와 함께 급격히 감소하며, 1 MW에 도달하는데 소요되는 시간은 오리피스직경에 따라서 240초($D_o = 1.0$ mm), 143초($D_o = 2.25$ mm), 104초($D_o = 3.0$ mm), 73.8초($D_o = 4.0$ mm)로 나타났다.

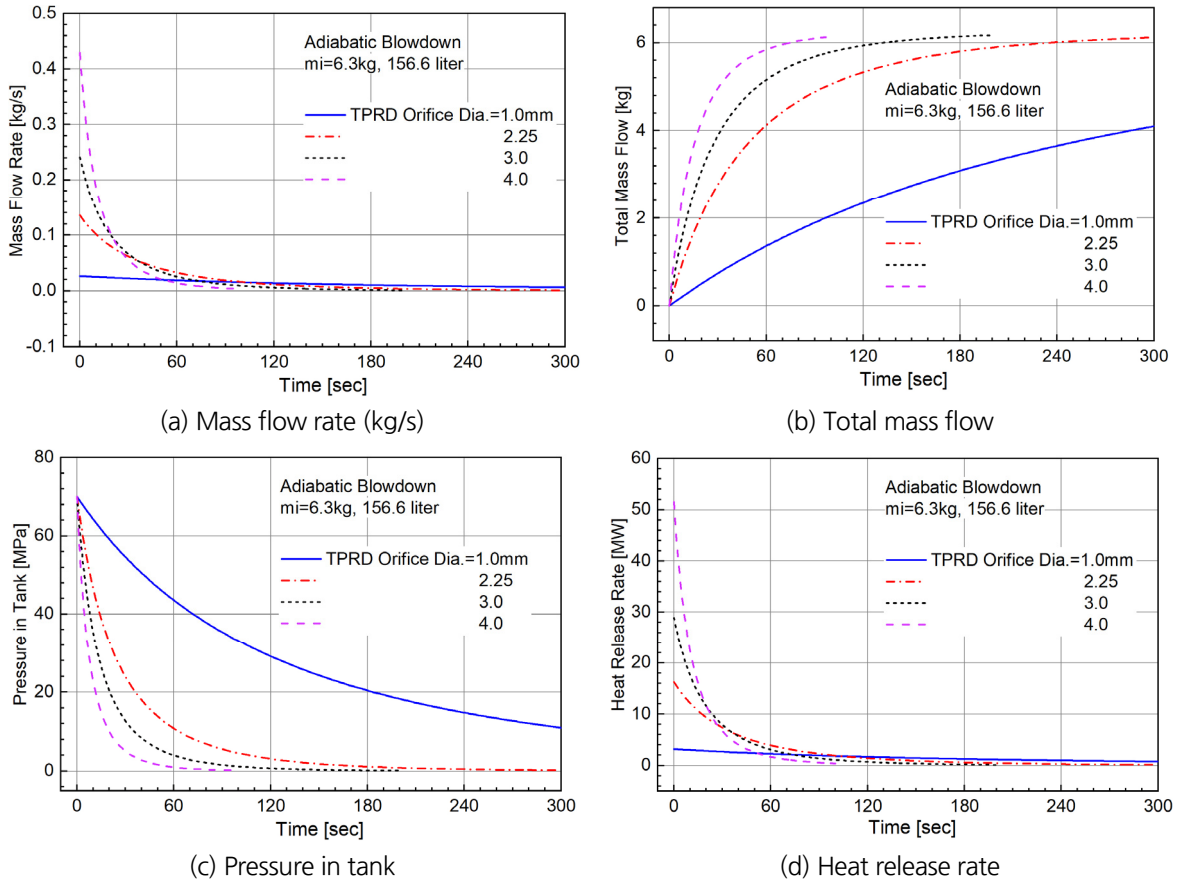


Fig. 3. Hydrogen release characteristics at TPRD for the adiabatic blowdown model

Fig. 4는 승용차의 설계화재강도(최대값 5 MW)에 수소누출에 따른 화재강도를 중첩하여 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 수소가스가 TPRD가 정상 작동하여 누출되는 경우, 오리피스 직경에 따라서 최대화재강도의 차이는 아주 크지만, 지속시간은 수십~수백 초 이내로 짧은 것으로 나타나고 있다. 일반적으로 도로터널의 방재시설에 대한 성능위주 설계를 위한 “도로터널 방재시설 설치 및 관리지침”(National Statute Information Center, 2016)에서 제시하는 정량적 위험도 평가기법에 의하면, 화재강도가 20 MW가 적용되는 시나리오(승용

차 및 버스화재)에서는 사망자가 거의 발생하지 않기 때문에 터널 내 수소차 화재 시 정상적인 수소누출 시나리오에 따른 jet fire를 고려하는 경우, 화재강도 증가에 따른 위험은 가중되지 않을 것으로 예측된다.

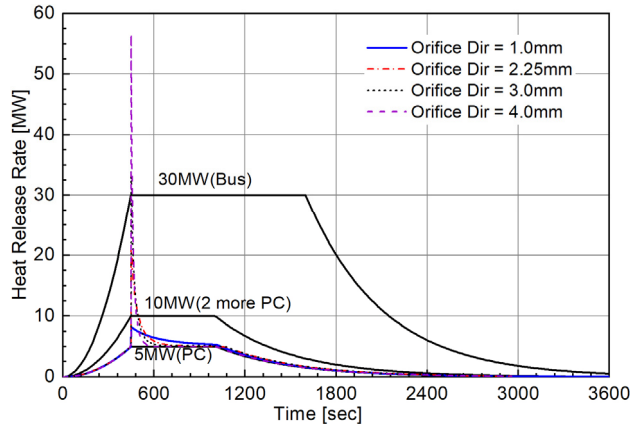


Fig. 4. Heat release rate according to orifice diameter of TPRD

3.2 폭발에 따른 위험예측

본 연구에서는 수소탱크 폭발에 따른 과도압력의 위험을 검토하기 위하여 수소차의 수소탱크 폭발 시 거리에 따른 과도압력을 등가 TNT모형을 적용하여 구하였다.

TNT량에 따른 과도압력계산은 UN SaferGuard의 계산틀을 이용하여 계산하였으며, 국내 수소차의 수소탱크는 Fig. 2에 나타난 바와 같이 3개(버스는 6개)가 설치되어 있으며, 화재로 인한 폭발 시 탱크 3개가 동시에 폭발할 우려는 거의 없으나, 본 연구에서는 3개가 동시에 폭발하는 것으로 가정하여 등가 TNT량을 산정하고 이에 따른 과도압력변화를 예측하여 위험성을 검토하였다.

등가 TNT량은 식 (1)로 계산한다.

$$M_{TNT} = \eta M_f \frac{Q_{H_2}}{Q_{TNT}} \quad (1)$$

여기서, Q_{H_2} 는 수소의 발열량으로 119.93 MJ/kg, Q_{TNT} 는 TNT의 발열량으로 4.6 MJ/kg, η 는 가스구름중에 폭발에 기여하는 폭발수율(Yield of the VCE)로 연구자마다 다르게 적용하고 있으며, Yoon (2016)은 0.01~0.1, Klomfass et al. (2016)은 0.05~0.1, Kim and Kwon (2020)은 0.03, Soman and Sundararaj (2012)은 0.1, Molkov and Dery (2020)은 0.01~0.1, Kwon and Park (2015)은 탄화수소계 연료에 대해서 0.03~0.042를 적용하고 있다. 또한, Lopes and Melo (2011)는 수소폭발에 따른 과도압력을 TNT등가모형을 이용하여 예측하는 연구에서 0.04를 적용하고 있다.

이에 본 연구에서는 전술한 결과를 근거로 $\eta = 0.015, 0.04, 0.1, 0.2$ 를 적용하여, 등가 TNT량을 산정하고 과도압력을 구하였다. η 값에 따른 등가TNT량을 Table 2에 나타낸 바와 같다.

Table 2. Equivalent TNT mass

η : Yields of the VCE	M_{TNT}
0.015	2.465
0.04	6.903
0.1	16.435
0.2	32.870

Fig. 5는 수소탱크 폭발 시 등가 TNT량에 따른 거리별 과도압력 계산결과를 나타낸 것이다. 그림에서 과도압력은 등가TNT량에 따라 13 m ($M_{TNT} = 2.465$ kg), 17 m ($M_{TNT} = 6.903$ kg), 20 m ($M_{TNT} = 16.435$ kg), 25 m ($M_{TNT} = 32.87$ kg) 정도의 거리까지 급격하게 감소하며, 거리가 증가하면 점차적으로 감소하는 것으로 나타나고 있다. Table 3에 과도압력이 인체에 미치는 영향을 나타냈으며, 연구자마다 차이가 있으나, KOSHA (2017)에서 제시하는 값을 주로 하여 나타낸 값이다. 인체에 미치는 영향이 없는 과도압력을 12.3 kPa로 하는 경우에 등가 TNT량에 따른 한계이격거리는 15.6, 22.2, 29.4, 37.5 m ($M_{TNT} = 2.465, 6.903, 16.435, 32.87$ kg)로 분석된다. 또한, 인체에 미치는 영향에 따른 한계거리는 경증부상의 경우, 등가 TNT량에 따라 2.7~6.3 m, 중증부상은 2.4~5.6 m, 사망은 0.9~2.1 m로 분석되고 있다. 따라서 중상 이상에 대한 한계거리는 등가 TNT량에 따라 큰 차이가 없는 것으로 판단되며, 일반적으로 수소폭발시 5 m범위 안에 있는 경우, 중증부상을 당할 가능성이 있는 것으로 판단된다.

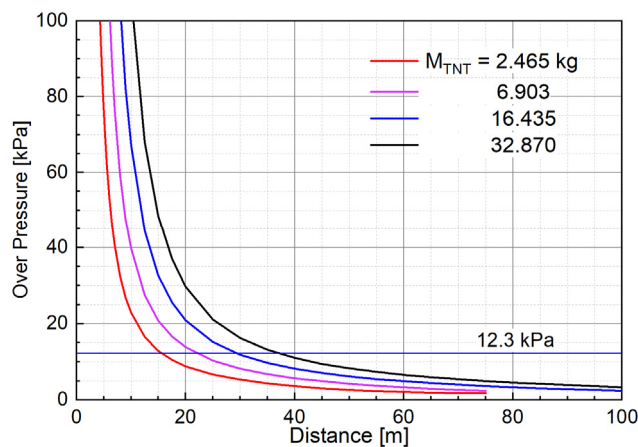


Fig. 5. Overpressure vs separation distance according to equivalent TNT mass

Table 3. Effects on human according to overpressure and distance for human effect

Overpressure (kPa)	Effect on human	Hazard distance for equivalent TNT (m)			
		2.465 kg	6.903 kg	16.435 kg	32.87 kg
12.3	No harm	15.6	22.2	29.3	36.9
19.6 (23.5 NFPA)	1% of eardrum rupture	11.3	15.7	21.1	26.5
34.3	5% of eardrum rupture	7.8	11.1	14.6	18.5
41.2	Lung haemorrhage	6.9	9.8	13.2	16.6
49.0	10% of eardrum rupture	6.3	8.9	12.0	14.9
98.1 (110 NFPA)	50% of eardrum rupture	4.4	6.2	8.3	10.5
294.2	Light fatalities	2.7	3.8	5.0	6.3
392.3	Serious fatalities	2.4	3.3	4.4	5.6
411.9	50% of death	2.3	3.2	4.3	5.5
3,138.1	Instant death	0.9	1.2	1.7	2.1

HyTunnel-CS (2019)은 과도압력에 따른 사망자수 추정방법으로 인체에 미치는 정도에 따라 등가사망자수를 적용하는 방안을 제시하고 있으며, 과도압력에 따른 등가사망자수 산정기준은 Table 4에 나타낸 바와 같다. 즉, 100 kPa을 초과하는 과도압력에 노출되면 사망으로 산정하고, 100~16.5 kPa의 범위에 있는 경우에는 10명을 1명으로 16.5~1.35 kPa의 범위에 있는 경우에는 100명이 노출되는 경우에 사망자가 1명으로 산정하고 있다.

Table 4. Equivalent fatality and fatalities

Pressure range (kPa)		≥ 100	100~16.5	16.5~1.35	Fatalities
Effect of humman		Fatality	Serious injury	Slight injury	
Equivalent fatalities		1	0.1	0.01	
Eq. TNT mass	-				
32.87 kg	Distance	10.4	29.7	36.9	34.5
	Evacuees	31	34	12	
16.435 kg	Distance	8.2	23.8	29.3	27.7
	Evacuees	25	25	21	
6.903 kg	Distance	6.1	17.6	22.2	20.7
	Evacuees	17	36	6	
2.465 kg	Distance	4.3	12.5	15.6	16.6
	Evacuees	14	25	12	

Fig. 6은 수소차 사고 시 폭발지점(250 m)을 기준으로 거리에 따른 누적 대피인원을 나타낸 것이다. 대피자수는 현행 “도로터널 방재시설 설치 및 관리지침”의 9장 정량적 위험도 평가기준에 따라 터널 내 정체 차량수를 구

하고 차종별 탑승인원은 75%를 고려하여 위치별로 대피자를 배치시킨 후에 누적인원을 구한 것으로 2차로 터널에서 단위길이당 대피자 분포는 약 1명/m정도이다.

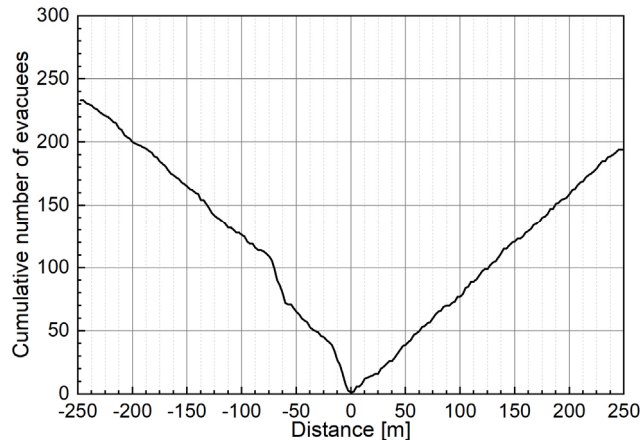


Fig. 6. Cumulative number of evacuees at tunnel fire (fire position = 250 m)

상기의 기준을 적용하는 경우, 등가 TNT량에 따라서 등가사망자수는 34.5, 27.7, 20.7, 16.6명($M_{TNT} = 32.87, 16.435, 6.903, 2.465$ kg)으로 예측된다.

따라서 터널 내 수소차 화재 시 화재로 인한 사망은 거의 없을 것으로 예측되나 가스구름의 형성으로 폭발이 발생하는 경우에는 약 16~35명 정도의 사망자가 발생할 가능성이 있는 것으로 평가된다. 그러나 본 논문의 검토결과는 터널을 개방된 공간으로 가정하여 검토된 결과로 향후, 터널에서 압력전파특성을 고려한 연구를 통해 신뢰성 있는 결과를 도출할 필요가 있는 것으로 판단된다.

4. 결 론

수소는 차세대 에너지원으로서 수소경제 활성화 로드 맵에 따라 수소를 안정적으로 생산-저장-운송하기 위한 산업과 더불어 수소차의 보급이 급속도로 이루어질 것으로 예상되며, 이에 따라 터널과 같은 반밀폐공간에서의 수소차의 사고에 대비한 대책이 요구되고 있다. 본 연구에서는 도로터널에서 수소차량의 안전성을 확보하기 위한 연구의 일환으로 터널 내 수소차 사고에 따른 다양한 위험요인 중 가스누출에 따른 화재와 폭발의 위험성에 대한 기초적인 조사·연구를 수행하였다.

1. 수소차 사고 시 가스누출은 TPRD의 오리피스 직경 사이즈에 의존하며, 전체 가스량을 95%까지 방출되는데, 소요되는 시간은 96.1초($D_o = 4.0$ mm), 123초($D_o = 3.0$ mm), 219초($D_o = 2.25$ mm), 1,110초($D_o = 1.0$ mm)로 분석된다.

2. TPRD를 통한 누출 시 점화되는 경우, 화재강도는 누출량에 의존하며, 최대화재강도는 오리피스직경에 따라 3.22~51.36 MW (1~4 mm)에 이르며, 지속시간은 화재강도가 높을수록 감소하며, 지속시간이 짧기 때문에 화재로 인해 대피자에 미치는 위험의 가중은 거의 없는 것으로 판단된다.
3. 수소차의 수소탱크가 폭발 시 과도압력을 등가 TNT방법에 의해서 계산하였으며, 터널에서 폭발압력파의 전파가 개방공간과 동일하다고 가정하는 경우, 안전한계거리는 대략 35 m 정도로 분석되었다.
4. 전형적인 2차로 단면의 터널에서 완전정체 상황에서 수소차사고로 인한 폭발이 발생하는 경우, 폭발압력에 의한 등가사망자는 폭발수율을 0.2로 적용하는 경우에 약 35명 정도로 평가된다.

감사의 글

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

저자 기여도

류지오는 연구개념, 자료분석, 원고 작성 및 검토를 수행하였으며, 이후영은 자료수집, 폭발압력 및 TNT등가 모델 데이터를 정리하고 원고를 작성하였다.

References

1. Coward, H.F., Jones, G.W. (1952), Limits of flammability of gases and vapors, United States Government Printing Office, Washington, pp. 15-19.
2. ECE (2013), Addendum 13: Global technical regulation No. 13, United Nations, pp. 82.
3. Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking, <https://elab-prod.iket.kit.edu/> (September 25, 2020).
4. 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.
5. IFA, What to do when hydrogen vehicles burn?, <https://www.ifa-swiss.ch/en/magazine/detail/what-to-do-when-hydrogen-vehicles-burn> (December 22, 2020).
6. Kim, M.J., Kwon, S.K. (2020), "Calculation of the TNT equivalent mass of the possible explosion of CO, CH₄, and C₂H₄", Journal of Korean Society of Explosives and Blasting Engineering, Vol. 38, No. 1, pp. 1-13.
7. 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.
8. Klomfass, A., Stolz, A., Hiermaier, S. (2016), "Improved explosion consequence analysis with combined CFD and damage models", Chemical Engineering Transactions, Vol. 48, pp. 109-114.
9. KOSHA (2017), Fire explosion impact and accident analysis model study (Ⅱ), pp. 23-26.

10. Kwon, S., Park, J.C. (2015), “A review of TNT equivalent method for evaluating explosion energy due to gas explosion”, *Journal of Korean Society of Explosives and Blasting Engineering*, Vol. 33, No. 3, pp. 1-13.
11. Li, Y.Z. (2019), “Study of fire and explosion hazards of alternative fuel vehicles in tunnels”, *Fire Safety Journal*, Vol. 110, pp. 1-20.
12. Lopes, K.B., Melo, P.F.F.F. (2011), “Analysis of the effects of explosion of a hydrogen cylinder on the transfer of radioactive liquid wastes at nuclear power stations”, *Proceedings of the International Nuclear Atlantic Conference (INAC)*, Brazil, pp. 1-15.
13. Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2013), *Fuel cell electric vehicle safety evaluation technology development research report*, pp. 242-484.
14. Molkov, V., Dery, W. (2020), “The blast wave decay correlation for hydrogen tank rupture in a tunnel fire”, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 45, No. 55, pp. 31289-31302.
15. MOTIE (2019), *Future automotive industry development strategy -2030 national roadmap-*, pp. 12-13.
16. National Statute Information Center (2016), *Road tunnel disaster prevention facility installation and management guidelines*, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, pp. 40.
17. Sandia National Laboratories (2017), *Hydrogen Fuel Cell Electric Vehicle Tunnel Safety Study*, SAND2017-11157, Albuquerque, New Mexico, pp. 36-71.
18. Sandia National Laboratories (2020), *Hydrogen fuel cell vehicles in tunnels*, SAND2020-4507 R, Albuquerque, New Mexico, pp. 54-59.
19. Sisajournal-e (2018), [Site] I went to the Hyundai-Kia Motors R&D Motor Show... Focused on the naked hydrogen car “Nexo” , <http://www.sisajournal-e.com/news/articleView.html?idxno=191555> (October 6, 2020).
20. Soman, A.R., Sundararaj, G. (2012), “Consequence assessment of vapour cloud explosion involving hydrogen release”, *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, Vol. 2, No. 11, pp. 291-297.
21. UN SaferGuard, Kingery-Bulmash blast parameter calculator, <https://unsaferguard.org/un-saferguard/kingery-bulmash> (January 4, 2021).
22. Wu, Y. (2008), “Assessment of the impact of jet flame hazard from hydrogen cars in road tunnels”, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol. 16, No. 2, pp. 246-254.
23. Yoon, Y.K. (2016), “Evaluation of peak overpressure and impulse induced by explosion”, *Journal of Korean Society of Explosives and Blasting Engineering*, Vol. 34, No. 4, pp. 28-34.