

도로터널 화재안전기준 기반 항만 지역 도로터널 화재 안전성 분석

하 예 진 · 전 준 호*

부경대학교 소방공학과

Evaluation of Fire Safety for Road Tunnels in Port Area based on Fire Safety Guidelines

Yejin Ha · Joonho Jeon*

*Department of Fire Protection Engineering, Pukyong National University, Busan 48513, Korea
(Received 2021. 11. 01. / Accepted 2021. 11. 16.)*

Abstract : Recently, the fire safety of road tunnels has been important issues in South Korea. However, proper fire safety regulations has not made for road tunnels. Due to geographical challenges in South Korea, road tunnels should be constructed to secure stable traffic flows. In the Guidelines for Installing and Managing Disaster Prevention Facilities of Road Tunnels (NFSC 603), main target vehicles are passenger cars. This guidelines cannot support big fires from larger vehicles such as cargo, oil trucks. In this study, fire safety for a road tunnel in port area was analyzed with fire dynamics theory under cargo truck fire scenario. Sujunsan road tunnel in Busan city was chosen as a target tunnel, which links between Busan port and highways to increase cargo shipping. The results show the limitations of present guidelines (NFSC 603) for road tunnel from large fire situations.

Key words : road tunnel(도로터널), cargo truck(화물차), fire safety(화재안전), NFSC 603, concrete(콘크리트)

1. 서 론

터널은 지형적 특성을 극복하여 교통 및 물류 이동의 원활함을 향상시킬 수 있는 구조물이다. 대한민국 지형은 산지가 약 70%를 차지하고 있을 만큼 산악지형으로 이루어져 있으며¹⁾ 이를 극복하기 위하여 도로터널, 철도터널, 해저터널 등의 다양한 터널을 구축하였다. 최근 터널굴착 및 구축 기술 향상으로 터널의 길이가 1 km 이상인 장대 터널과 5 km 이상의 초장대 터널 건설과 계획이 확대되고 있다. 2020년 12월 기준 전국 터널 수는 2,742개소이며 2011년 대비 87.2%가 증가하였다. 터널의 길이 또한 2,157 km로 2011년 대비 104.8% 증가하였다²⁾.

부산광역시는 해안가에 접해있는 도시로 산악지

형이 다수로 이루어져 있으며 물류의 이동을 위한 도로와 철도 터널이 발달해 있다. 해운 물류를 육상교통을 통해 이동함에 있어 터널 구축 수요가 증가하고 있으며 장대터널을 통한 지형적 불리함을 해소하고 있다. 터널의 수요 증가와 기술력 향상은 지속적으로 높아지고 있으나 안전에 대한 대비와 보완책은 부족한 실정이다. 터널사고 발생시 마다 장대터널의 문제와 안전성에 대한 문제 제기는 되고 있으나 이에 대한 근본적인 해결방안 제시는 이루어지지 못하고 있다.

터널 사고는 차량 충돌, 엔진과열 등 화재 사고로 이어지는 경우가 많으며 화재 발생시 반 밀폐형 구조로 대형사고로 이어질 가능성이 크다. 화물운송 트럭의 경우 승용차량에 비하여 차량이 크고 화재시 열방출률도 높아 화재위험성이 크고 적재물의 종류에 따라 대형 화재가 발생할 수 있는 위험이 있다. 터널 화재 안전을 위해서 필수적인 소방시설에 대한 도로터

*Corresponding author, E-mail: jeonj@pknu.ac.kr

널의 화재안전기준에 따라 설비를 설치하나 터널의 특성이나 화재규모에 따른 반영이 되지 못하는 한계가 있다³⁾.

본 논문은 항만 지역에 위치한 물류이동이 많은 터널인 부산광역시의 수정터널을 대상으로 화물차량 화재시 고려해야할 안전성 평가를 분석하였다. 화재현상을 가정하여 화재역학을 이용하여 도로터널의 화재안전기준에 대한 제안을 제시한다.

2. 대상 터널 및 화재안전기준

2.1 대상터널 특징

본 논문에서는 부산광역시 동구 좌천동과 부산진구 가야동을 연결하는 수정산터널을 대상 터널로 선정하였다. 수정산터널은 기존 경로의 30분이 걸리던 거리를 3분으로 단축시키며 항만 물류 수송이 가능하여 물류비용 절감 효과를 가져왔다가 평가 받고 있다. 부산항에서 육지로 향하는 통로를 제공하며 컨테이너 선적량 기준으로 세계에서 5번째 규모인 부산항의 주요 교통시설로 사용되고 있다. 터널의 길이는 2.3 km, 폭은 9.9 m, 높이 7.4 m이며 편도 2차로 (왕복 4차선) 쌍굴씩 터널로 주 건설 재료는 콘크리트이다. 터널 안전설비로는 소화기(소화전)이 50 m 간격으로 피난 연결통로는 600 m 간격으로 설치되어 있다. 제연 시스템으로는 내부 환기를 위하여 세정식 전기집진 방식을 이용한 2개의 제연 설비가 설치되어 있다. 본 설비는 화재안전기준을 따른 설비가 아닌 터널내 오염도인 일산화탄소 50 PPM 이하로 유지하기 위한 설비로 구성되어 있다.

2.2 도로터널의 화재안전기준 (NSFC 603)³⁾

도로터널의 화재안전기준은 화재예방, 소방시설 설치·유지 및 안전관리에 관한 법률에 따른 도로터널에 설치해야 하는 소방시설 등의 설치기준과 유지 및 안전 관리에 필요한 사항을 규정한다. 화재안전기준은, 소화기, 옥내소화전설비, 물분무소화설비, 비상경보설비, 자동화재탐지설비, 비상조명, 제연설비 등에 따른 기준을 제시하고 있고 이를 준용하여 도로터널 안전설비를 구축할 것을 명시하며 이외 소방시설은 개별 화재안전기준을 준용할 것을 권고한다.

NSFC 603에서는 화재 크기에 대한 설계화재강도를 설정하도록 되어 있으며 이는 소화설비 및 제연설



Fig. 1 Tunnel locations and regions.

비의 용량을 산정하기 위해 적용하는 차종별 최대 열방출률(Heat release rate, HRR)로 선정한다. NSFC 603의 제9조 제연설비의 1호에 따르면 설계화재강도 20 MW를 기준으로 하고 연기 발생률은 80 m³/s로 선정하도록 되어 있고 2호에 설계화재강도 보다 높은 경우 위험도분석을 통하여 설계화재강도를 설정하도록 명시하고 있다. 하지만 이에 대한 정확한 세부 규정은 제시되어 있지 않다.

3. 화재시나리오

화재 발생시 인명 피해 문제는 화재 발생에 의한 연기 확산으로 인한 질식사자가 많으므로 이를 예측하기 위해서는 열방출률을 고려한 환기설비를 설계하는 것이 중요하다. 터널 내 화재 및 연기 확산을 평가하고 제연설비 용량을 결정하기 위해서는 차량 종류에 따른 적절한 HRR을 선택해야 한다. 아래 Table 1에는 미국 NFPA (National Fire Protection Association) 502에 수록된 각 차량에 대한 최대 HRR이 표시되어 있다⁴⁾.

터널 설계 화재강도를 설정할 때 유조차를 포함한 위험물 적재 가능성이 높은 트럭의 비율이 낮은 경우 대체적으로 설계 화재강도를 낮게 선정한다. 이에 화재 평가가 과소평가 될 수 있는 한계가 있다.

본 논문에서 사용된 화재시나리오는 수정산터널 내부에서 컨테이너 차량 화재 발생을 가정하여 연기의 온도를 측정하고 화재로 인한 터널구조 안전성을 평가한다. 터널을 직육면체로 가정하여 해석하였으며 폭 9.9 m, 높이 7.4 m, 길이 2.3 km 이며 이 중 검사체적(control volume, CV)은 길이방향으로 50 m로 설정

Table 1 The peak HRR and time to peak HRR for various vehicles⁴⁾

Vehicles	Peak heat release rate(MW)	Time to peak HRR(min)
Passenger car	5-10	0-30
Multiple passenger cars	10-20	13-55
Bus	20-30	7-10
Heavy goods truck	70-200	10-18
Tanker	200-300	-

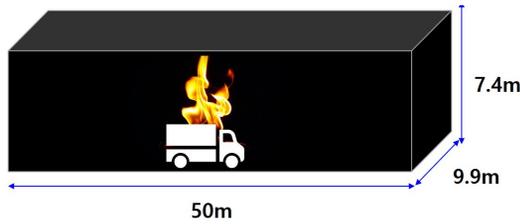


Fig. 2 Control volume for the target tunnel

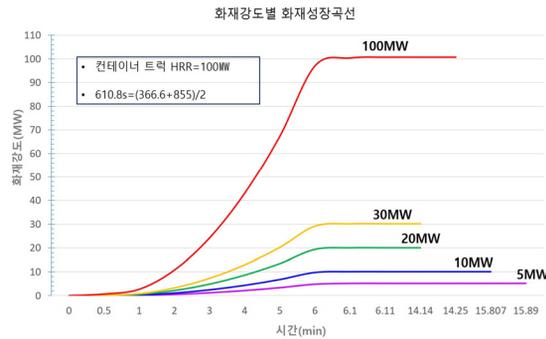


Fig. 3 Designed heat release rate

하여 Fig. 2와 같이 사용하였다. 검사체적의 길이를 50 m로 선정할 이유는 도로터널 방재시설 설치 및 관리 지침에 따른 소방기구 설치 간격 50 m으로 설정되어 있기 때문이다.

Table 1에 나타난 차량 종류별 화재강도에 따른 화재 성장곡선은 Fig. 3과 같이 나타난다. 컨테이너 차량의 경우 최대 열방출률을 100 MW로 사용하였으며 최대 열방출률까지 도달 시간은 610.8초로 설정하였다³⁾.

3. 화재시나리오 분석 결과

본 연구에서는 Enclousre Fire Dynamics⁶⁾ 책의 Chapter 6장에 수록된 Gas Temperature in Ventilated Enclosure

Fires의 화재실 온도 평가와 열전달 기법을 활용하여 화재 시나리오를 분석하였다. 화재실 온도 예측을 위한 에너지 보존 식으로부터 유도된 방정식은 다음과 같다.

$$\Delta T = \frac{\dot{Q}}{\dot{m}_g c_p + h_k A_T} \quad (1)$$

where $\Delta T = T_g - T_a$

T_g, T_a : upper layer and ambient gas temperature (K)

\dot{Q} : energy release rate (kW)

\dot{m}_g : mass flow rate out through the opening (kg/s)

c_p : specific heat of the gases (kJ/kg·K)

h_k : effective heat conduction (kJ/m²·K)

A_T : boundary surface area (kJ/kg·K)

위 수식은 직접적으로 풀 수 없어 무차원 변수화를 활용하여 실험 데이터와 통계학적 분석을 통해 Eq. (2)로 정리하여 터널의 온도를 예측할 수 있다.

$$\Delta T = 6.85 \left(\frac{\dot{Q}^2}{A_o \sqrt{H_o} h_k A_T} \right)^{1/3} \quad (2)$$

where H_o : height of the opening (m)

A_o : area of the opening (m²)

$$h_k = \sqrt{\frac{k\rho c}{t}} \quad (\text{for } t \leq t_p) \quad (3)$$

where t_p : thermal penetration time (s)

 Table 2 Typical Values of Thermal Properties⁶⁾

Material	k (W/mK)	c (J/kgK)	ρ (kg/m ³)	$k\rho c$ (W ² s/m ⁴ k ²)	α (m ² /s)
Aluminium	218	890	2700	$5.2 \cdot 10^8$	$9.1 \cdot 10^{-5}$
Copper	395	385	8920	$1.4 \cdot 10^9$	$1.2 \cdot 10^{-4}$
Brick	0.69	840	1600	$9.3 \cdot 10^5$	$5.2 \cdot 10^{-7}$
Concrete	0.8-0.14	880	1900-2300	$2 \cdot 10^6$	$5.7 \cdot 10^{-7}$

$$t_p = \frac{\delta^2}{4\alpha} \quad (4)$$

where δ : thickness of the solid (m)

α : thermal diffusivity (m²/s)

위 Eq.(1)-(4)를 활용하여 터널에서 발생하는 컨테이너 트럭의 화재로 인한 터널 콘크리트의 열화능력 성능을 평가해 본다.

외부 공기 온도를 20°C로 가정하고 컨테이너차량의 열방출률을 100 MW로 하여 Fig. 3과 같이 열방출률이 발생한다. Table 2의 콘크리트의 특성 값을 사용하여 tp 값을 도출한다. 콘크리트 두께를 1 m로 가정하여 열투과 시간을 계산하면 438,596 s가 되고 이때 열방출률이 최대 값에 도달하는 시간 610.8 s와 비교하여 매우 크므로 Eq.(3)을 사용하여 열전달계수를 도출할 수 있다. 검사체의 면적과 개구부의 높이를 고려하면 다음과 같다.

$$A_o = 2 \times 9.9 \text{ m} \times 7.4 \text{ m}$$

$$H_o = 7.4 \text{ m}$$

$$A_T = 2 \times 50 \text{ m} \times 9.9 \text{ m} + 50 \text{ m} \times 7.4 \text{ m} + 9.9 \text{ m} \times 7.4 \text{ m} - 2 \times 9.9 \text{ m} \times 7.4 \text{ m}$$

Eq. (2)를 이용하여 터널 상부의 가스 온도를 도출하면 다음과 같다.

$$\Delta T = T_g - T_a = 433^\circ\text{C}$$

$$T_g = 453^\circ\text{C}$$

위의 가정에 따르면 화재 초기에 터널 상단에 도달하는 연기의 온도는 약 453°C가 된다. 이와 비교하여 콘크리트의 용융온도는 약 380°C 밖에 되지 않는다. 100 MW의 컨테이너 화재에서 화재 초기 연기의 온도는 콘크리트 용융온도와 비교하여 초과하는 값을 가진다.

5. 결 론

본 논문은 터널 설계에 있어서 화재안전기준을 기반으로 대형화재 발생시 터널의 안전성을 확보할 수 있을지에 대한 평가를 화재역학을 기반으로 진행하였다. 터널은 항만과 인접한 부산광역시 동구에 위치한 수정산터널을 선정하였다. 차량 화재는 물류이동에 활용되는 컨테이너 차량을 기준으로 선정하였으며 최

대 열방출률은 100 MW로 선정하였다.

콘크리트로 건설된 터널의 경우 컨테이너 화재 초기부터 콘크리트 재료의 한계 온도를 넘는 열기류가 형성되기 때문에 지속적인 노출로 인하여 화재 상부 터널에서는 콘크리트 폭열 현상으로 대형 화재로 인한 위험성이 높아 질 수 있다. 화재안전기준에서는 제연설비와 소화설비를 위한 기준만을 제시하고 있으나 구조물의 안전성에 대한 기준에 대한 내용은 제시되어 있지 않다. 본 연구 결과를 통해 콘크리트의 폭열 가능성이 보이며 이를 기반으로 화재안전기준에 대한 추가적인 보완대책이 필요함을 보이며 항만 터널과 같이 대형 물류 운반 차량, 위험물 차량의 이동량이 많은 곳에 cc대해서는 강한 규제를 통한 화재 안전성 확보가 필요성이 제기된다.

Acknowledgement

본 연구결과는 부산인재평생교육진흥원의 2021 지역현안해결 대학수업지원프로젝트의 도움을 받아 “부산광역시 장대터널 화재안전성 확보를 위한 제연시스템 개발방안 마련” 프로젝트의 결과로 도출되었습니다.

References

- 1) NGII (National Geographic Information Insitute), The Geography of Korea 2008
- 2) e- 나라지표, 도로교량 및 터널현황, 국토교통부 (도시시설안전과), https://www.index.go.kr/potal/main/EachDtlPageDetail.do?idx_cd=1213.
- 3) Ministry of Land, Infrastructure and Transport, “Guidelines for Installing and Managing Disaster Prevention Facilities of Road Tunnels” (NFSC 603), 2017.
- 4) National Fire Protection Association, “NFPA 502, standard for road tunnels, bridge, and other limited access highways”, Quincy, MA, USA, 2017.
- 5) J.O. Yu, “도로터널 제연설비 설계 및 운영방안 소개”, The Magazine of the Korean Society of Hazard Mitigation, Vol. 10, No. 3, pp. 43-50, 2010.
- 6) B. Karlsson and J. Quintiere, “Enclosure Fire Dynamics”, CRC press, 2002.