방음터널의 화재안전성에 관한 국내 연구동향 분석

Analysis of Domestic Research Trends on Fire Safety of Soundproof Tunnels

김태우* · 윤명오** · 이준***

Kim, Taewoo*, Yoon, Myungo**, and Lee, Jun***

Abstract

Soundproof tunnels are attractive soundproof facilities, as they provide effective noise cancellation, natural light, safe roads during rainy weather and snowfall, and natural harmony with city aesthetics and surrounding facilities. However, plastic panels, low-strength steel structures with average temperatures of 538°C or higher, and poor standards for estimating the levels of disaster prevention in facilities are major factors that reduce the fire safety of soundproof tunnels. This study considers the problems of soundproof tunnels by analyzing domestic installation regulations and advanced research. It then proposes improvement measures based on the findings from the analysis.

Key words : Soundproof, Soundproof Tunnels

요 지

방음터널은 효과적인 소음차단, 터널 내 자연채광, 우천 및 강설 시 도로안전성 확보, 도시 미관 및 주변시설과의 자연스러운 조화 등 분명 매력적인 방음시설임에는 분명하다. 그러나 플라스틱 재질의 방음판, 평균온도 538°C 이상이 되면 강도가 급격히 저하되는 강구조체 그리고 방재시설 등급산정 기준의 미비는 방음터널의 화재안전성을 저하시키는 주요 요인이다. 본 연구는 방음터널이 가지고 있는 문제점에 대해 국내 설치규정 및 선행연구 분석을 통해 고찰하였으며, 그에 따른 개선방안을 제안하였다.

핵심용어 : 방음, 방음터널

1. 서 론

1.1 연구의 배경 및 목적

소음이란 기계·기구·시설 그 밖의 물체의 사용 및 공동 주택 등에서 사람의 활동으로 인하여 발생하는 강한 소리 또는 불쾌함을 느끼게 만드는 소리로 정의 된다. 최근 건설경기의 활성화와 한정된 토지여건에서의 신도시 개발은 도로와 인접한 곳에서의 고층건축물의 증가를 가져왔으며 이는 소음에 대한 국민적 관심을 한층 더 가중시키는 계기가 되었다. 중앙환경분쟁조정위원회 환경분쟁신청사건 피해원인별

처리현황('10~'17년)을 살펴보면 전체처리건수 1,576건 중 공사장(1,164건) 및 교통(155건)관련 소음·진동 피해건수가 전체의 84%를 차지하고 있을 정도로 우리주변에서 소음은 일상화된 문제점으로 자리 잡고 있다. 이러한 소음 분쟁의 발생을 최소화하기 위해 '환경정책기본법(ME, 2017a)'에서는 소음을 수질·대기·토양오염 등과 더불어 하나의 환경오염원으로 규정하고 있으며, '주택법(MOLIT, 2017)'에서는 주택건설사업을 시행하려는 사업주체에게 공동주택을 건설하는 지점의 소음도를 65데시벨 미만인 되도록 하되, 65데시벨 이상인 경우에는 방음벽, 방음터널, 방음림, 방음독 등의

*정회원, 서울시립대학교 재난과학과 박사과정(E-mail: tw9523@hanmail.net)

Member, Ph.D Candidate, Department of Disaster Science, University of Seoul

**정회원, 서울시립대학교 건축공학과 교수(E-mail: yoonmo@uos.ac.kr)

Member, Professor, Department of Architectural Engineering, University of Seoul

***교신저자, 정회원, 한국교통연구원 부연구위원(Tel: +82-44-211-3199, Fax: +82-44-211-3222, E-mail: junlee@koti.re.kr)

Corresponding Author, Member, Associate Research Fellow, Korea Transport Institute

방음시설 설치를 통한 소음방지대책 수립의 의무를 지우고 있다.

이러한 방음시설 중 우리가 주변에서 흔히 볼 수 있는 대표적인 시설로는 방음벽과 방음터널이 있다. 일반적으로 상부가 개방된 방음벽과 달리 방음터널은 입·출구를 제외하고 상부와 좌·우측 3면을 방음판으로 완전히 차단하기 때문에 도로에서 발생하는 직접음과 회절음의 동시차단이 가능하며 이를 통해 방음벽에 비해 약 20데시벨 이상의 소음차단효과를 기대 할 수 있다(Na et al., 1999). 따라서 높이 9 m의 투명 방음판의 설치를 기준으로 가정했을 때, 건설비용이 단위 m당 약 10배 이상 소요(KEC, 2014) 됨에도 불구하고 상대적으로 방음효과가 뛰어난 방음터널이 도로 주변 고충주거지역을 중심으로 선호되고 있다.

그러나 방음터널의 화재안전성과 관련된 설치 및 품질규정은 전무한 실정이며 선행연구 또한 소음저감 효과 등에 집중되어 있다. 이로 인해 대부분의 방음터널이 공기단축 및 시공의 편의성을 이유로 H형강의 구조체에 열가소성플라시틱인 PC (Polycarbonate) 방음판으로 시공되고 있어 터널 내 화재 등 재난상황발생 시 일반터널에 비해 상대적으로 높은 위험성을 가지게 된다. 고속국도의 경우 2017년 기준 10개소의 방음터널이 설치·운영 중에 있지만, 그 중 9개소가 H형강 구조체에 PC 방음판을 마감재로 사용하고 있어 일반터널에 비해 화재하중이 크고 터널 내 화재발생 시 가연성 방음판을 통한 연소 확대 및 H형강의 온도 상승에 따른 변형 및 붕괴 등의 위험성이 높은 실정이다. 또한 방음터널 내 방재시설 설치규정도 일반터널과 동일한 기준으로 적용하게 되어있어 초기 소방 활동 및 인명 안전 확보에 어려움이 있을 것으로 예상된다.

따라서 현재의 방음터널이 가지고 있는 근본적인 문제점에 대한 해결방안의 필요성이 요구 되고 있으며, 이에 따라 본 연구에서는 방음터널과 관련된 국내 설치규정 및 선행연구를 바탕으로 방음터널의 위험성을 예측하고 문제점 분석을 통해 개선방안을 제안하고자 한다.

1.2 연구의 범위 및 방법

본 연구는 한국도로공사가 관리하는 고속국도에 설치되어 운영 중인 방음터널을 대상으로 한정하였으며, 방음판, 구조체, 방재시설을 중심으로 방음터널의 위험성을 도출하기 위해 우선 고속국도에 설치되어 운영 중인 방음터널의 연장, 구조, 방재시설 등 특이사항에 대한 현황분석을 시행하였다. 다음으로 관련 법령에서 규정하고 있는 방음터널의 설치 및 품질기준과 방재시설의 설치기준의 문제점을 분석하기 위해 ‘방음시설의 성능 및 설치기준’, ‘도로설계편람’, ‘화재예방, 소방시설 설치·유지 및 안전관리에 관한 법률’, ‘도로터널의 화재안전기준(NFSC 603)’ 및 ‘도로터널 방재시설 설치 및 관리지침’에서의 방음터널 관련규정을 분석하였다.

방음터널 관련 선행연구 추이는 국회전자도서관과 한국도로공사 홈페이지를 통해 분석하였으며, 방음판에 대해서는 방음벽에 사용되는 방음판 자체의 연소저항특성을 중심으로, 구조체에 대해서는 강박스형 교량의 하부 화재 시 변형특성을 참고하여 추론하였다. 또한 방재시설에 대해서는 제연 및 피난방안에 대한 선행연구와 관련규정을 중심으로 방음터널 내 화재대응능력 향상방안을 고찰하였다.

2. 이론적 고찰

2.1 방음터널의 정의 및 현황

방음터널이란, 터널형 방음시설로서 소음을 차단하거나 감소시키는 지붕이 있는 구조물로 정의 할 수 있다. 산악지 지하공간에 주로 위치하는 일반 터널과는 달리 주로 고층건물이 밀집한 도심지 구간을 관통하는 도로의 상부에 설치된다.

고속국도에서 운영 중인 방음터널은 Table 1 및 Fig. 1과 같으며 전체 10개소 중 8개소가 2010년 이후 개통 되었다. 구조체는 10개소 모두 H형강을 사용하고 있으며, 방음판은 1개소를 강화유리로, 나머지 9개소는 투명 PC 방음판을 사용하고 있다. 상부 및 측면 중 일부가 개방된 곳이 각 2개소씩 전체 4개소이며 나머지 6개소는 입·출구부만 개방된 반밀폐형식으로 되어있다. 소화기 또는 옥내소화전 등의 소화설비가 없는 곳이 4개소이며 피난설비가 설치되어 있지 않은 곳도 4개소가 있다. 영동고속도로 37.7K (Gwanggyo) 방음터널의 경우 연장이 1,352 m로 가장 길고 10개소의 방음터널 중 유일하게 제연설비(제트팬)가 설치되어 있다.

2.2 방음터널의 위험 요소

2.2.1 방음판

열가소성플라스틱의 일종인 PC를 주로 투명 방음판의 재료로 사용하는 이유는 Table 2에서 알 수 있듯이 강화유리에 비해 가볍고 85%이상의 광투과율을 가지면서도 내열점, 용융점, 인화점 등이 일반 플라스틱에 비해 높고 충격강도 및 시공성도 우수하면서 자기소화성이라는 연소저항 특성을 일부 가지고 있기 때문이다.

건축법과 소방시설법에서는 연소저항 특성을 불연, 준불연, 난연, 방염의 4단계로 구분하고 있으며 자기소화성에 대해서는 별도의 규정은 없지만, ‘재활용 플라스틱 차음벽 패널 품질인증기준(GR M 3048, 2016; 국가기술표준원 제 2016-141호)’에서는 ‘열경화성 플라스틱 일반 시험 방법(KS M 3015, 2003)’의 A법을 기준으로 수평연소시험을 실시하고 불꽃을 제거한 후 30초 이내에 자연소화가 되면 자기소화성을 가진 물질로 정의하고 있다. 난연재료 이상의 연소저항 특성은 ‘건축물 마감재료의 난연성능 및 화재 확산 방지구조 기준(MOLIT, 2015a; 국토교통부고시 제2015-744호)’에서 규정하고 있으며, 콘칼로리미터법에 의한 시험으로 불연,

Table 1. Installation Status of Soundproof Tunnels (KEC, 2016a)

Division	Seoul & Gyeonggi						Daejeon & Chungcheong	Gwangju & Jeonnam	Busan & Gyeongnam	
	Seoul Ring Expressway			Yeongdong Expressway			Dangjin-Youngdeok Expressway	Muan-Gwangju Expressway	Daejeon-Tongyeong Expressway	Busan-Ulsan Expressway
Location	① 86.0K (Incheon)	② 87.0K (Incheon)	③ 114.5K (Siheung)	④ 1.6K (Dongseoul)	⑤ 37.7K (Gwanggyo)	⑥ 39.5K (Gwanggyo)	⑦ 79.0K (Gongju)	⑧ 39.2K (Hampyeong)	⑨ 51.8K (Sancheong)	⑩ 0.0K (Ulsan)
Opening	2010.09	2010.09	2011.12	2012.09	2015.11	2015.11	2014.02	2008.05	2011.04	2008.02
Length	334m	300m	87m	600m	1,352m	400m	292m	90m	433m	363m
Width	10m	10m	45m	40m	45m	22.5m	23.4m	11.9m	11.5m	12.7m
Height	5.6m	5.6m	7.5m	7.5m	8.5m	8.5m	6m	6.5m	6m	5.5m
Median strip	X	X	○	○	○	○	○	X	○	X
Structure	H-beam, PC	H-beam, PC	H-beam, PC	H-beam, PC	H-beam, PC	H-beam, PC	H-beam, Tempered glass	H-beam, PC	H-beam, PC	H-beam, PC
Structure Opening	○ (Top)	○ (Top)	X	X	X	○ (Side)	X	X	○ (Side)	X
Fire fighting equipment	X	X	X	Fire extinguisher & hydrant	Fire extinguisher & hydrant	X	Fire extinguisher	Fire extinguisher & hydrant	Fire extinguisher	Fire extinguisher
Evacuation facility	X	X	○	○	○	○	○	X	○	X
Ventilation equipment	X	X	X	X	○	X	X	X	X	X

(a) 114.5K(Siheung)

Entrance and Internal structure

(b) 1.6K(Dongseoul)

Entrance and Internal structure

(c) 37.7K(Gwanggyo)

Entrance and Internal structure

Fig. 1. Soundproof Tunnels in Operation (Daum, Naver)**Table 2.** Comparison of Physical Properties of Transparent Soundproofing Materials (KEC, 2016a)

Division	Specific gravity	Light transmittance	Heat resistant point	Melting point	Flash point	Impact strength	Fire retardant
PMMA	1.17~1.21	93%	95℃	224℃	280℃	Middle-Weak	Combustibility
PC	1.19~1.23	85~91%	120℃	230℃	450℃	Strong	Self-Extinguishing
Tempered Glass	2.5	93%	200℃	650℃	-	Weak	Non-Combustible

준불연, 난연재료를 판단하게 되어있다. 이중 난연재료의 경우 가열시험 개시 후, 5분간 총방출열량이 8 MJ/m² 이하이며, 5분간 최대 열방출율이 10초 이상 연속으로 200 kW/m²를 초과하지 않고, 5분간 가열 후 시험체(복합소재인 경우 심재 포함)를 관통하는 균열, 구멍 및 용융 등이 없어야 한다고 규정하고 있다. 이에 반해 실내장식 등의 목적으로 설치 또는 부착하는 물품을 대상으로 하는 방염성능은, ‘방염 성능의 기준(NFA, 2017; 소방청고시 제2017-1호)’에서 합성 수지판의 경우 잔염시간 5초 이내, 잔신시간 20초 이내, 탄화면적 40 cm² 이내, 탄화깊이 20 cm 이내의 연소저항 특성을 요구하고 있다.

실제 사용되고 있는 PC 방음판 시료를 이용한 콘칼로리미터시험 결과, 총방출열량은 45.3~54.5 MJ/m²로 기준의 5배 이상, 최대 열방출을 또한 301.95~380.71 kW/m²(착화 후 218~511초)로 난연재료 판정 기준의 1.5배를 초과했으며, 목재의 총방출열량 22.3~31.6 MJ/m², 최대열방출률 141.82~164.81 kW/m²(착화 후 31~35초)보다도 높은 열방출을 값을 가짐을 알 수 있었다(KEC, 2012). 따라서 방음터널 내 화재발생 시, 차량의 화재로 발생하는 열량 외에 가연성 플라스틱 방음판의 열량이 더해진다면, 단위면적당 목재의 질량으로 환산된 가연물의 질량을 나타내는 화재하중이 증가하게 되고, ‘최고온도×지속시간’으로 정의되어 화재의 규모와 정도를 판단하는 기준이 되는 화재가혹도 또한 커지게 되는 원인이 될 것이다.

2.2.2 구조체

방음터널의 구조체를 형성하고 있는 H형강은 대부분 열간압연 공정을 통해서 만들어 지며 두 개의 수평부재인 플랜지(Flange)와 한 개의 수직부재인 웹(Web)의 결합으로 단면형상이 H모양을 가짐으로 일반적으로 H형강으로 칭한다. 동일한 단면적 대비 더 큰 구조적성능을 얻을 수 있고, 시공 및 조립성 또한 우수해서 초기에는 토목구조용 말뚝으로 사용되다가 최근에는 고층건축물의 기둥, 보 등의 건축구조용으로 주로 사용되고 있다(doopedia, 2018).

‘건축구조부재의 내화시험방법-보의성능조건(KS F 2257-6, 2014)’에서는 ‘표준시간-온도곡선에 준해서 보를 가열하고, 내화성능기준은 각 단면별 강재의 평균 온도가 538℃를 넘지 않아야 하며 온도가 측정된 어느 곳에서도 649℃를 넘지 않아야 한다.’라고 규정되어 있다. 또한 미국강조물학회에서도 최대허용설계응력을 항복강도 대비 60%로 제한하고 있는데, 이는 강재의 경우 538℃ 부근에서 항복강도가 상온 대비 60% 수준으로 떨어지게 되고 이때 견딜 수 있는 내력과 가해지는 외력이 거의 동일하게 되기 때문이다(KEC, 2016b). 다시 말해 강재의 평균온도가 538℃를 초과할 경우에는 강재가 견딜 수 있는 한계를 벗어나 변형 및 붕괴의 가능성이 높아진다는 것이다. 입구와 출구만 개방된 터널과 같이 반밀폐형 구조에서 화재가 발생할 경우, 평균 5분 이내

에 1,000℃이상 온도가 상승(Park et al., 2008)하기 때문에 화재가혹도가 커질수록 구조체인 H형강의 안전성은 저하될 것이다.

2.2.3 방재시설

현재까지 방음터널 내에서 화재사고가 발생하였다는 공식적인 자료는 없지만, 고속국도 일반터널의 경우 Table 3과 같이 매년 평균 12건의 화재가 발생하고 있다. 화재 초기 신속한 진압은 인명의 안전을 확보하고 물적피해를 최소화할 수 있는 필수요소이다. 특히 방음터널의 경우 일반터널에 비해 화재하중이 크고 구조적 안전성이 취약하기 때문에 방재설비의 설치규정 또한 더 강화될 필요가 있지만 현행규정은 일반터널과 동일한 기준을 적용하게 되어있다. 그러나 이러한 규정 또한 2016년 ‘도로터널 방재시설 설치 및 관리지침(MOLIT, 2016, 국토교통부예규 제139호)’이 개정 되면서 방음터널에 대한 방재시설 설치가 최초로 의무화되었고, 지침 개정 이전에 건설되었거나 건설 중이었던 방음터널의 경우 각 기관별 자체기준에 의해 방재시설이 설치 및 관리되어져 왔기 때문에 화재안전성 확보에 한계가 있을 수밖에 없을 것이다.

Table 3. Tunnel Fire Status [Highway] (MOLIT, 2015b)

Year	2010	2011	2012	2013	2014	Mean
Number of fire	10	10	20	9	11	12

3. 방음터널 설치규정

3.1 방음시설의 성능 및 설치기준

소음·진동관리법 제40조제2항의 규정에 의한 ‘방음시설의 성능 및 설치기준’(ME, 2017b)을 살펴보면 다음과 같다. 방음시설의 설계 시 기본적인 고려사항(제10조)으로 주민 의견수렴, 주변경관과 조화 및 친환경성, 파손된 방음판의 쉬운 교체가 가능한 구조, 대피·청소·유지관리를 위한 통로, 강풍·강우·진동에 의하여 변형 또는 파괴되지 않는 안전한 구조, 방음효과가 우수하고 사후관리가 편리하며 내구성이 좋을 것 등의 6개 항목으로 규정하고 있지만, 구조체 및 방음판의 안전성을 고려한 구체적인 성능기준은 없다. 방음판의 재료, 시험방법 및 재질기준(제9조)에서도 ‘한국산업규격(KS)에서 정하는 방음판 종류별 규격에 적합하거나 동등이상의 재료로 하여야 한다.’라고만 규정되어 있고 관련된 KS규격[방음판-금속재(KS F 4770-1, 2017), 방음판-컬러 금속재(KS F 4770-2, 2015), 방음판-비금속재 컬러(KS F 4770-3, 2013), 방음판-목재(KS F 4770-4, 2018)]을 살펴봐도 방음판의 내부 흡음재의 방염성능기준과 전면판(2 mm 이상) 및 후면판(2.5 mm 이상)에 사용되는 플라스

틱 판재의 두께 기준만 규정되어 있을 뿐, 가연성인 투명 플라스틱 방음판의 화재안전성을 고려한 품질기준은 찾아 볼 수 없다.

3.2 도로설계편람

1999년 초판 및 2012년에 개정판이 발행된 ‘도로설계편람’은 총칙, 도로계획 및 기하구조, 토공 및 배수, 도로포장, 교량, 터널, 지하차도, 환경시설, 안전시설, 부대시설 순으로 총 10편으로 구성되어있다. 도로설계 기술자들에게 실무적인 도움이 될 수 있도록 도로의 계획부터 설계까지 전 과정을 체계적으로 정리했으며, 방음시설에 대해서는 제10편 부대시설편에서 다루고 있다(MLTM, 2012). Table 4에서는 초판과 개정판의 방음시설 관련 주요 내용에 대해서 비교 정리했으며, 주목해 볼 부분은 다음과 같다.

첫째, 초판에서는 방음벽을 중심으로 다루었다면 개정판에서는 방음벽을 기본으로 하면서 방음터널에 대한 내용이 다수 추가 되었다. 이는 증가하는 방음터널에 비해, 설계에 대한 명확한 기준이 없기 때문에 실무에 도움을 주기 위함일 것이다. 두 번째로, 구조제 부분에 대해서는 방음터널의 구조설계 예시를 수록했으며 고려해야 될 설계하중으로는 고정하중, 풍하중, 설하중 등을 제시하고 있다. 이때 온도변화는 ‘도로교설계기준(MLTM, 2010)’에 준해서 $-10^{\circ}\text{C} \sim 50^{\circ}\text{C}$ 를 표준으로 하게 되어 있을 뿐, 화재 발생 시 화열에 의한 급격한 온도상승을 고려한 설계하중 항목은 존재하지 않는다. 마지막으로, 초판에 있었던 방음판의 재질기준 ‘방음벽에 사용되는 재료 중 외부는 불연성 또는 준불연성이어야 하고 내부의 흡음재료는 자기 소화성으로 연소 시 화염을 발생하지 않아야 한다.’ 이 2012년 개정판에서는 삭제되었다는 것이다. 따라서 설계자는 방음터널의 화재안전보다는 주변 경관과의 조화 및 디자인 등에 더 중점을 두고 설계하게 되었을 것이다.

3.3 방재시설 설치규정

터널에 방재시설을 설치하도록 규정된 법령은 크게 3가지로 나누어 볼 수 있다.

‘화재예방, 소방시설 설치·유지 및 안전관리에 관한 법률(NFA, 2016)’에서는 소방시설을 설치해야 하는 특정 소방대상물 중, 지하가 부분에 터널을 포함하고 있으며 터널의 길이 또는 위험도지수에 따라 각각의 소방시설의

설치의무를 규정하고 있다. 그러나 방음터널이 소방시설을 설치해야 될 특정소방대상물에 해당된다는 규정은 찾아 볼 수 없다.

‘도로터널의 화재안전기준(NFSC 603, 2017)’에서는 터널을 ‘도로의 일부로서 자동차의 통행을 위해 지붕이 있는 지하 구조물’로 정의하고 있으며, 터널 내 설치되어야 하는 소방시설별 설치 수량, 간격, 용량 등을 규정하고 있다. 그러나 대부분의 방음터널이 지하 구조물이 아닌 지상 구조물로 설치되기 때문에 엄격히 말해 방음터널은 화재안전기준에서 규정하는 터널에는 해당되지 않는 것이다. 따라서 도로터널의 화재안전기준을 방음터널에 그대로 적 용하기에는 어려움이 있을 것으로 판단된다.

마지막으로, 도로터널 내 방재시설의 계획·설계·시공 및 관리 시 적용해야 할 기준을 규정하고 있는, ‘도로터널 방재시설 설치 및 관리지침(MOLIT, 2016; 국토교통부예규 제139호)’에서는 방재시설 설치대상인 도로터널에 방음터널을 처음으로 추가했으며, 방음터널의 재질 및 성능은 ‘방음터널의 성능 및 설치기준’을 준용하도록 했다. 터널 내 방재시설은 터널 연장등급(길이)과 방재등급(위험도지수)에 준해서 설치하도록 규정하고 있으며, 예외규정으로는 직상부가 시설 폭원의 1/2이상 개방된 경우, 한쪽 이상의 측벽부가 최대 시설 높이만큼 개방된 경우, 모형실험 또는 수치시뮬레이션 등을 통해 안전성이 확인되는 경우와 일시적으로 사용할 목적으로 설치하는 경우에는 방재시설의 설치를 면제할 수 있도록 규정하고 있다.

4. 선행연구 분석

4.1 방음터널 관련 선행연구 추이

국회전자도서관(<http://dl.nanet.go.kr/>) 및 한국도로공사 홈페이지(<http://www.ex.co.kr/>)를 통해 선행연구 추이를 조사했으며, ‘방음터널’과 ‘터널형 방음시설’로 검색한 결과 학위논문 5건, 등재(후보)학술지 18건, 한국도로공사 연구보고서 7건 등 전체 30 건의 방음터널 관련 선행연구가 검색되었다(Fig. 2). 이중 소음관련 연구 12건(40%), 토목시설관련 연구 8건(27%), 조도관련 연구 4건(13%), 환기관련 연구 3건(10%), 디자인관련 연구 1건(3%) 및 화재안전관련 연구 2건(7%)으로 조사되었다.

따라서 지금까지의 방음터널 관련 선행연구 대부분이

Table 4. Road Design Manual 1999, 2012 Edition (MCT, 1999; MLTM, 2012)

Division	Major soundproof facilities	Structure	Soundproof material
1999 (First Edition)	Soundproof wall	H-beam	Non-Combustible or Semi-Non-Combustible
2012 (Revised Edition)	Soundproof wall, Soundproof Tunnel	H-beam	-

Fig. 2. Research Trends of Soundproof Tunnels

소음저감과 토목시공 분야에 집중되어 왔다는 것을 알 수 있으며, 화재안전관련 선행연구는 전체 30건 중 2건에 불과하고 2건 모두 한국도로공사의 자체 연구보고서였다. 이러한 결과는 방음터널의 위험성에 대한 국민적 공감대가 아직 형성되지 못했고, 학자들의 관심에서도 멀어져 있다는 하나의 방증일 것이다.

4.2 방음판의 위험성

차량화재의 확산으로 인한 다수의 방음벽 화재사고(Fig. 3)로 한국도로공사는 한국산업규격(KS)에서 규정하고 있지 않는 투명 플라스틱 방음판에 대한 방염기준 정립을 위한 ‘고속도로 방음자재의 연소특성 및 방염성능기준에 관한 연구(KEC, 2012)’를 시행했다. 방음벽에 대표적으로 사용되는 가연성 방음판을 선정[폴리카보네이트(PC), 폴리메틸메타크릴레이트(PMMA), 고밀도폴리에틸렌(HDPE), 목재 등 4종]하고, 재질별 기초 연소 특성시험[방염성능시험(방염성능의 기준), 내연성 A법 시험(KS M 3015, 2003), 콘칼로리미터시험(KS F ISO 5660-1, 2008), 가스유해성시험(KS F 2271, 2006), 수평연소시험(UL 94HB, 2004), 수직연소시험(UL 94V, 2004), 산소지수시험(KS M ISO 4589-2, 2011), 연기밀도시험(ASTM E662, 2012), 연소독성지수시험(BS 6853, 1999)], 방음판 연소시험(ISO 9705, 1993), 방음벽 실물 시험체 연소시험(시험대상: 높이 4 m, 길이 12 m, 지주간격 4 m에 대하여 PMMA 및 PC 방음판을 부착한 방음벽) 및 시뮬레이션(화재규모: 9 MW)을 실시했다. 다양한 시험결과 중 재질별 기초 연소 특성시험에서 주목해 볼 부분은 PC재질의 방음판 시험체 3개 중 2개만이 방염성능 기준을 만족했으며, 콘칼로리미터를 이용한 난연성능 기준은 시험체 3개 모두 만족하지 못했다는 것이다.

선행연구결과를 바탕으로 방음터널 방음판의 위험성을 고찰해보면, 건물 내부 실내 장식품의 연소저항 성능을 나타내는 방염기준도 100% 만족하지 못하는 PC 방음판이 대부분의 방음터널의 마감재로 시공되어있음을 알 수 있다. 반밀폐공간의 특성을 가지고 있는 방음터널 내에서 화재가 발생하여 부력에 의해 상승한 화염 및 연소생성물질 등이 터널의 천장면을 따라 흐르는 Ceiling jet flow를 형성해서 방음판을 연소시킬 경우, 불이 붙은 상태로 녹아내려 주변차량 및

피난하는 인명의 안전에 심각한 위험을 가할 수 있음은 물론 소방 활동에도 장애를 초래할 것이다.

(a) Gyeongbu Expressway

(b) Gyeongin 2nd Highway

(c) Seoul Outer Circular Expressway

Fig. 3. Soundproof Wall Fire Accident (KEC, Yonhap)

4.3 구조체의 위험성

‘부천고가교 화재복구 설계와 시공(KEC, 2011)’에 의하면, 2010년 12월 서울외곽순환고속도로 부천고가교 하부에 불법 주차되어 있던 유조차에 불꽃이 점화 되면서 발생한 화재로 인근 주차차량 39대 및 컨테이너박스 등이 전소되었다. 화재는 2시간여 만에 진화되었으나 이로 인하여 교량 하부 강박형 거더의 손상(73.3 m) (Fig. 4) 및 상부 노면 슬래브의 과다 처짐(최대 35 cm) 등 구조물 주요부재의 손상과 더불어 방음판(1,164 m² 전소) 및 광케이블의 소실 등 부속시설물의 피해도 발생했다.

(a) Bucheon bridge under fire

(b) Bridge fire damage

(c) Steel box damage

Fig. 4. Bucheon Elevated Bridge Fire (KEC, Gisulln)

교량하부 화재의 위험성을 인지한 한국도로공사는 화재안전 확보를 위해 교량 하부 가연성 물질의 화재위험도 평가기준 정립을 위한 ‘교량하부 외부적치물 화재 안전관리 방안’(KEC, 2016b)에 관한 연구를 시행했다. 고속도로 교량하부 적치물 현황조사를 실시하고 대표적인 적치물(플라스틱 팔레트, 포장용종이박스)에 대해서는 대형열량계(Large Scale Calorimeter, LSC)를 통한 가연물의 최대열방출률 및 총열방출량을 측정했다. 그리고 강재 및 콘크리트 교량하부의 화재 시 열에 의한 피해정도를 예측하기 위해 의류, 타이어, 목재, 플라스틱팔레트, 승용차, 버스, 대형화물차의 적재높이와 차량대수를 증가시켜가면서 화재시뮬레이션(Fire Dynamics Simulator, FDS)을 실시했다. 시뮬레이션 결과 중, 방음터널의 천장고 최대높이(약 9 m 내외)와 유사한 교량하부 형하고

10.5 m에서의 결과를 살펴보면, 강재 평균온도 538℃를 초과하여 교량하부 강박스의 강도 및 강성이 급격히 감소되는 화재의 규모는, 가연물의 가로×세로의 크기가 4×4 m로 일정한 조건에서 의류의 경우 높이 3 m부터, 타이어의 경우 높이 4 m부터, 목재의 경우 높이 2 m부터, 플라스틱팔레트는 높이 1 m부터, 그리고 차량의 경우 대형화물차 2대가 동시에 연소(화재규모 73.7MW) 할 경우인 것으로 나타났다.

본 선행연구를 분석한 목적은 천정이 막히고 좌·우가 개방된 강교의 현장조건이 방음터널과 유사하고, 강박스 강재의 변형특성을 바탕으로 방음터널에 사용되고 있는 H형강의 화재안전성을 추론해볼 수 있기 때문이다.

4.4 방재시설의 한계성

‘고속도로 방음터널 제연 및 피난방안에 관한 연구’(KEC, 2016a)를 살펴보면, 우선 국내외의 방음터널 설치사례에 대해 조사를 실시했으며 방음터널 내 중앙분리대 격벽의 유무에 따른 제연 및 배연방식으로, 격벽이 있는 경우 방음터널 내부에 설치되는 제트팬 방식을, 격벽이 없는 경우에는 방음터널 상부에 설치되는 배연창 방식을 제안하고 있다. 피난 및 연기확산 시뮬레이션을 이용한 피난안전성 검토에서는 피난문의 안전한 설치 간격을 100m로 제안했다.

선행연구의 조사 내용 중, 국외 일부 방음터널(Fig. 5)의 경우 불연재 방음판을 기본으로 부분 채광을 위한 개방 또는 투명 방음판을 시공했으며 구조체도 대부분 철골콘크리트 구조임을 알 수 있다. 이는 터널 내 화재하중을 낮추고 구조체 내부의 강제로 직접적인 열전달을 차단함으로써 방음터널의 화재저항성을 강화하는 효과가 있을 것이다.

다음으로, 2016년 개정된 ‘도로터널 방재시설 설치 및 관리지침’의 주요내용 중 방재시설 설치의 기준이 되는 터널 등급 산정기준을 살펴보면, 터널연장을 기준으로 하는 ‘연장등급(L)’과, 교통량 등 터널의 제반 위험인자를 고려한 위험도지수를 기준으로 하는 ‘방재등급(X)’으로 구분되며, 터널 등급(Table 5)에 따라 방재시설의 종류가 결정된다. 그러나 위험도지수를 산정하는 위험인자[주행거리계(터널연장×교통량), 터널제원(종단경사, 터널높이, 곡선반경), 대형차 혼입률, 위험물의 수송에 대한 법적규제(대형차통과대수, 위험물수송차량에 대한 감시시스템, 위험물수송차량에 대한 유도시스템), 정체정도(터널 내 합류/분류, 터널전방 교차로(IC, JCT/신호등/TG), 통행방식(대면통행, 일방통행)]에 방음터널의 구조체 및 방음판에 대한 위험성을 고려할 수 있는 평가항목은 존재하지 않는다.

일반터널에 비해 상대적으로 위험성이 높은 방음터널의 경우, 위험을 저감시킬 수 있는 방재시설의 추가 설치가 필요하지만 현재의 법 규정에서는 강제할 수 있는 규정이 없기 때문에 한계가 있을 수밖에 없다.

(a) Germany Bavarian Northern Highway

(b) Japan Metropolitan Diverline Highway

(c) Hong Kong Tsing Yi North Coastal Road

Fig. 5. Overseas Soundproof Tunnels (KEC, 2016a)

Table 5. Tunnel Rating Standard

Tunnel rating	Length rating (L)	Disaster prevention rating (X)
1	$L \geq 3,000 \text{ m}$	$X > 29$
2	$1,000 \text{ m} \leq L < 3,000 \text{ m}$	$19 < X \leq 29$
3	$500 \text{ m} \leq L < 1,000 \text{ m}$	$14 < X \leq 19$
4	$L < 500 \text{ m}$	$X \leq 14$

5. 결론 및 제언

본 연구에서는 방음터널의 화재안전성과 관련하여 법령에서 규정하는 설치기준의 문제점 및 방음터널을 구성하는 방음판, 구조체, 방재시설에 대하여 국내 선행연구 동향을 분석하였으며, 이를 바탕으로 개선방안을 제안하고자 한다.

방음터널의 설치와 관련된 법령 분석결과, ‘방음시설의 성능 및 설치기준’에서는 방음시설 설계 시 기본적인 고려사항(변형 또는 파괴되지 않는 안전한 구조 등)만 규정되어 있을 뿐 방음판 및 구조체의 화재안전성을 고려한 정량적인 설계 및 품질기준(재료 시험방법 및 재질기준 등)은 없었으며, ‘도로설계편람’에서는 1999년 제정당시 규정되어 있었

던 방음판의 재질기준(불연재, 준불연재)이 2012년 개정판에서는 삭제되었음을 확인했다. 방음터널 내 방재시설 설치의 경우에도 2016년 ‘도로터널 방재시설 설치 및 관리지침’이 개정되면서부터 의무화하는 규정이 신설되었음을 알 수 있었다.

선행연구 분석 결과, 방음터널 방음판의 경우 주로 투명의 PC 방음판을 사용하고 있지만, 방염시험에서는 방음판 시험체 3개 중 2개만이 방염성능기준을 만족했을 뿐, 콘칼로리미터를 이용한 난연성능 시험에서는 시험체 3개 모두 기준을 만족하지 못했다. 구조체의 경우 대부분 H형강이 사용되고 있으며 화재시물레이션 결과, 가연물의 가로×세로의 크기가 4×4 m로 일정한 조건에서 의류는 높이 3 m부터, 타이어는 높이 4 m부터, 목재는 높이 2 m부터, 플라스틱팔레트는 높이 1 m부터, 차량의 경우 대형화물차 2대가 동시에 연소할 경우 강재의 평균온도가 임계온도 538℃를 초과하는 것으로 나타났다. 방재시설의 경우에도 일반터널과 동일한 기준과 등급에 의해서 설치되고 있는 것으로 분석되었다.

이러한 문제점을 개선하기 위한 제언은 다음과 같다. 첫째, 플라스틱 방음판의 위험성을 제거하기 위해 방음터널의 마감재는 불연재 사용을 원칙으로 하고, 채광 등을 위해 투명 방음판을 사용할 경우에는 ‘건축물의 피난·방

화구조 등의 기준에 관한 규칙'(MOLIT, 2018)에서 규정하고 있는 지붕재의 내화구조 규정을 준용해서 철재로 보강된 유리블럭 또는 망입유리로 제한할 것을 제안한다. 둘째, 구조체의 안전성을 확보하기 위해 구조설계 시 고려하는 설계하중에 방음터널 내 화재 시 예상되는 열하중을 추가하고 안전성을 검토해서 구조체를 보강하는 방안과, 건축물의 인증내화구조 규정을 준용해서 철골의 표면에 두께 6 cm 이상의 철망모르타르 또는 두께 5 cm 이상의 콘크리트로 피복할 것을 제안한다. 마지막으로, 방음터널의 방재시설 설치의 기준이 되는 위험도지수 산정 시, 구조체 및 방음판의 위험성을 고려할 수 있는 위험인자에 대한 평가항목의 추가를 제안한다.

그러나 본 연구는 관련규정 및 선행연구 분석을 통해 이루어졌으므로 실제 방음터널 내에서의 화재성상과 위험도를 예측하기에는 부족한 부분이 많다. 따라서 제안사항에 대해서는 실물 또는 축소모형연소실험 및 화재시뮬레이션 등을 통한 검증과 국외 연구, 설치규정 및 사례 등에 대해서도 향후 후속연구를 통한 추가적인 보완이 필요 하겠다.

References

- Ahn, H.S., Kim, I.H., Park, J.B., Lee, J.H., and Kim, K.S. (2012). Analysis of research trend and development direction on domestic and international noise barriers. *J. Kor. Soc. Environ. Eng.*, Vol. 34, No. 12, pp. 847-854.
- ASTM E662. (2012). *Standard test method for specific optical density of smoke generated by solid materials*. American Society for Testing and Materials, USA.
- BS 6853. (1999). *Code of practice for fire precautions in the design and construction of passenger carrying trains*. British Standards Institution, UK.
- Doopedia. (2018). *H-steel*. Retrieved from http://www.doopedia.co.kr/doopedia/master/master.do?_method=view&MAS_IDX=101013000744565
- GR M 3048. (2016). *Recycled plastic sound barrier panel*. Korean Agency for Technology and Standards.
- ISO 9705. (1993). *Fire tests - Full-scale room test for surface products*. International Organization for Standardization, Switzerland.
- Korea Expressway Corporation (KEC). (2011). *Design and construction of Bucheon bridge fire repair*.
- Korea Expressway Corporation (KEC). (2012). *The combustion properties and flammability requirements for soundproof panels in expressway*.
- Korea Expressway Corporation (KEC). (2014). *A study on expressway noise abatement by effective installing of noise mitigating facilities*.
- Korea Expressway Corporation (KEC). (2016a). *A study on smoke control measures and evacuation services of highway soundproofing tunnel*.
- Korea Expressway Corporation (KEC). (2016b). *Development of fire safety management method for stock-piles under bridge*.
- KS F 2257-6. (2014). *Method fire resistance test for elements of building construction - Specific requirement for beam*. Korean Agency for Technology and Standards.
- KS F 2271. (2006). *Testing method for gas toxicity of finish materials of buildings*. Korean Agency for Technology and Standards.
- KS F 4770-1. (2017). *Soundproof pannel - Metallic*. Korean Agency for Technology and Standards.
- KS F 4770-2. (2015). *Soundproof pannel - Metallic colored*. Korean Agency for Technology and Standards.
- KS F 4770-3. (2013). *Soundproof pannel - Non-metallic color*. Korean Agency for Technology and Standards.
- KS F 4770-4. (2018). *Soundproof pannel - Wood*. Korean Agency for Technology and Standards.
- KS F ISO 5660-1. (2008). *Reaction-to-fire tests - Heat release, smoke production and mass loss rate - Part 1: Heat release rate (cone calorimeter method) and smoke production rate (dynamic measurement)*. Korean Agency for Technology and Standards.
- KS M 3015. (2003). *Testing methods for thermosetting plastics*. Korean Agency for Technology and Standards.
- KS M ISO 4589-2. (2011). *Plastics - Determination of burning behaviour by oxygen index - Part 2: Ambient-temperature test*. Korean Agency for Technology and Standards.
- Ministry of Construction and Transportation (MCT). (1999). *Road design manual*.
- Ministry of Environment (ME). (2017a). *Framework Act on Environmental Policy*.
- Ministry of Environment (ME). (2017b). *Performance and installation standards of soundproofing*. Notification 2017-159, ME.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT). (2015a). *Flame resisting performance and fire prevention structure standard of building finishing materials*. Notification 2015-744, MOLIT.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT). (2015b). *Study on revision of 'Guidelines for installing and managing road tunnel emergency facilities*.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT).

- (2016). *Guidelines for installing and managing road tunnel emergency facilities*.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT). (2017). *Housing Act*.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT). (2018). *Regulations on standards for evacuation and fire protection of buildings*.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MLTM). (2010). *Road design standards*.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MLTM). (2012). *Road design manual*.
- Na, H.S., Kim, Y.G., and Seong, T.R. (1999). Reduction of traffic noise using soundproof tunnel. *Proceedings of the Autumn Conference*, The Korean Society for Noise and Vibration Engineering, pp. 75-80.
- National Fire Agency (NFA). (2016). *Act on Fire Prevention and Installation, Maintenance, and Safety Control of Fire-Fighting Systems*.
- National Fire Agency (NFA). (2017). *Resist printing performance standard*. Notification 2017-1, NFA.
- NFSC 603. (2017). *Fire safety standards for road tunnels*. National Fire Agency, Korea.
- Park, K.H., Kim, H.Y., and Kim, H.J. (2008). Evaluation on the thermal damage of steel embedded in concrete in tunnel fire (Modified hydrocarbon curve). *Proceedings of the Korea Concrete Institute Conference*, Vol. 20, No. 2, pp. 485-488
- UL 94. (2004). *Standard for tests for flammability of plastic materials for parts in devices and appliances*. Underwriters Laboratory, USA.

Received	November 6, 2018
Revised	November 12, 2018
Accepted	January 3, 2019