



저작자표시 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#) 

2024학년도
석사학위논문

화재 강도에 따른 방음터널 적정 사용 재료 및 소방시설 설치 방안 연구

지도교수 : 김홍열

경기대학교 공학대학원

소방·방재전공

이 욱 범



화재 강도에 따른 방음터널 적정 사용 재료 및 소방시설 설치 방안 연구

이 논문을 석사학위논문으로 제출함

2024년 12월 일

경기대학교 공학대학원

소방·방재전공

이 욱 범



이 옥 범의 석사학위논문을 인준함

심 사 위 원 장	_____	인
심 사 위 원	_____	인
심 사 위 원	_____	인

2024년 12월 일

경기대학교 공학대학원



목 차

표 목 차	iii
그림목차	v
감사의 글	vii
논문개요	ix
제 1 장 서 론	1
1.1 연구의 배경 및 목적	1
1.2 연구의 범위 및 방법	2
1.3 기존의 연구	5
제 2 장 이론적 고찰	7
2.1 방음터널 개요	7
2.1.1 방음시설의 개요	7
2.1.2 방음시설의 종류 및 방음재료 비교	8
2.2 방음터널 및 방음벽의 현황 분석	10
2.2.1 재질별 현황	10
2.2.2 형태별 현황	11
2.2.3 주요 방음터널 운영 현황	12
2.2.4 방음터널 연장 및 방재등급 현황	14
2.3 국내외 방음터널의 소방시설 설치기준	15
2.3.1 국내 설치기준	15
2.3.2 해외 설치기준	22
2.3.3 국내외 설치기준 비교	24



제 3 장 방음터널 사고사례 분석 및 문제점 도출	25
3.1 방음터널의 화재 특성	25
3.1.1 방음터널 재료 연소 실험 결과 분석	25
3.1.2 방음터널 화재 시뮬레이션 결과	34
3.1.3 방음터널의 화재강도 및 화재하중 분석	48
3.1.4 방음터널의 화재강도, 화재하중 및 시뮬레이션 비교 분석	51
3.2 방음터널 사고사례 분석	54
3.2.1 국내 방음터널 사고사례	54
3.2.2 국외 방음터널 사고사례	59
3.3 방음터널의 문제점 도출	61
3.3.1 방음터널 사용재료에 따른 문제점	61
3.3.2 방음터널 소방시설 설치기준에 따른 문제점	64
3.3.3 방음터널 피난 문제점	69
제 4 장 방음터널 소방시설 설치방안 제시	70
4.1 사용재료 개선방안	70
4.2 소방시설 설치기준 개선방안	74
4.3 피난 대책 개선방안	76
제 5 장 결 론	79
참고문헌	81
Abstract	83



표 목 차

<표 2-1> 방음터널 재질 종류별 특징 비교	9
<표 2-2> 방음터널 재질별 현황	11
<표 2-3> 방음터널 형태별 현황	12
<표 2-4> 고속도로에 시공된 주요 방음터널	13
<표 2-5> 방음터널의 연장등급과 방재등급	14
<표 2-6> 방음시설 기준 국내외 비교	24
<표 3-1> 폴리머의 연소 과정	25
<표 3-2> 45° 연소시험 결과	27
<표 3-3> 콘 칼로리미터 시험용 시편	28
<표 3-4> 콘 칼로리미터 시험에서 발생한 연소가스의 농도	30
<표 3-5> PMMA①의 ASTM E662에 의한 연기밀도 시험 결과	32
<표 3-6> PMMA②의 ASTM E662에 의한 연기밀도 시험 결과	32
<표 3-7> PC의 ASTM E662에 의한 연기밀도 시험 결과	33
<표 3-8> PMMA①의 KS F ISO 5660-2에 의한 연기밀도 시험 결과	33
<표 3-9> PMMA②의 KS F ISO 5660-2에 의한 연기밀도 시험 결과	34
<표 3-10> PC의 KS F ISO 5660-2에 의한 연기밀도 시험 결과	34
<표 3-11> 화재 시뮬레이션 내용 요약	35
<표 3-12> 화재 시뮬레이션 해석 조건	36
<표 3-13> 재료에 따른 비교	50
<표 3-14> 시뮬레이션 결과 비교	53
<표 3-15> PMMA와 PC의 화재하중과 화재강도 비교	54
<표 3-16> 터널의 벽과 천장에 대한 온도 평가기준	62
<표 3-17> 투광부재의 내열성 평가기준	64

<표 3-18> 각국의 화재강도 기준	68
<표 4-1> 투명방음판 재료 개선(안)	67
<표 4-2> 강구조물 내화구조 개선(안)	68
<표 4-3> 국내의 방음터널 형태 개선(안)	69
<표 4-4> 방재등급 개선(안)	70
<표 4-5> 도로터널의 화재안전성능 및 기술기준 개선(안)	71
<표 4-5> 피난대책 개선(안)	73



그 립 목 차

<그림 1-1> 연구흐름도	4
<그림 2-1> 방음터널	7
<그림 2-2> 호주 멜버른의 방음터널	22
<그림 2-3> 캘리포니아주 소노마 카운티 12번 국도 소음 차단 흙둑 ..	23
<그림 3-1> 방음터널 사용재료에 대한 45° 연소시험	26
<그림 3-2> PMMA에 대한 45° 연소시험 후의 시료 상태	28
<그림 3-3> PC에 대한 45° 연소시험 후의 시료 상태	28
<그림 3-4> 콘 칼로리미터 시험에 의한 재료별 총열방출량	29
<그림 3-5> 콘 칼로리미터 시험에 의한 재료별 최대 열방출률	30
<그림 3-6> ASTM E662에 의한 연기밀도 시험 중 녹아내린 시편 ...	31
<그림 3-7> 갈현 고가교 방음터널 화재 모델링	35
<그림 3-8> PMMA 화염전파 형상	38
<그림 3-9> PC 화염전파 형상	39
<그림 3-10> 방음벽 재료 일부를 PC 적용시 화염전파 형상	40
<그림 3-11> 터널 내외부에 1m/s의 바람이 불 때 화염전파 형상	41
<그림 3-12> 터널 내외부에 2m/s의 바람이 불 때 화염전파 형상	42
<그림 3-13> 터널 내외부에 3m/s의 바람이 불 때 화염전파 형상	43
<그림 3-14> 터널 외부에 바람이 불 때 화염전파 형상	44
<그림 3-15> 각 조건별 X 방향 온도 분포	47
<그림 3-16> 화염 전파 속도	48
<그림 3-17> PMMA의 화재성장곡선	50
<그림 3-18> PC의 화재성장곡선	50
<그림 3-19> 갈현고가교 방음터널 화재	52
<그림 3-20> 갈현고가교 방음터널 화재진압 후 모습	53



<그림 3-21> 수원-용인 방음터널 화재	53
<그림 3-22> 수원-용인 방음터널 화재진압 후 모습	54
<그림 3-23> 청주 개신고가 방음터널 화재	55
<그림 3-24> 중국의 취큐오 후(水果湖) 터널형 방음시설의 내부	56
<그림 3-25> 미국 쿠파운티 로스웰 로드 남쪽 I-75 고속도로 화재	57
<그림 3-26> 온도에 따른 탄소강의 기계적 성질	59
<그림 3-27> 방음터널 연장등급과 방재등급	61
<그림 3-28> 방음터널 소방시설	63
<그림 4-1> 독일의 방음터널	68
<그림 4-2> 홍콩의 방음터널	69



감사의 글

저의 인생에서 경기대학교 공학대학원 입학은 또 다른 시작이었으며 적지 않은 나이에 도전할 수 있게 용기를 준 인생의 동반자와 사랑하는 딸들에게 감사를 전합니다.

지난 2년 동안의 대학원 생활은 인생의 활력소였으며 저의 능력을 한 단계 끌어 올릴 수 있었던 소중한 시간은 교수님들과 25기 동기들이 있었기 때문입니다.

저의 지식의 범위를 확장 시켜주시고 문제해결 능력을 끌어올릴 수 있도록 열과 성의를 다해 강의해 주신 이준성 교수님, 김홍열 교수님, 윤해권 교수님, 김우창 교수님, 최두찬 교수님께 감사의 말씀을 전합니다.

또한 저의 논문이 완성될 수 있도록 아낌없는 지지와 관심을 가지고 지도해주신 김홍열 교수님께 무한한 감사를 드립니다.

대학원에 입학하여 오랜만에 연구와 공부를 해보니 어렵기도 하고 출석에 대한 어려움도 있었지만, 참여와 봉사가 인맥과 학문을 넓히는 일이라 생각하고 열심히 대학원 생활을 할 수 있었습니다. 하지만 논문은 또 하나의 도전이었습니다. 주제는 방음터널에서 화재 사고가 발생하여 인명피해와 재산피해가 발생하여 사회적 문제가 되었지만, 발표논문이 별로 없는 것을 알고, 안전성을 검토하여 문제점이 있다면 논문을 통하여 제시하고 싶었습니다. 이에 “화재 강도에 따른 방음터널 적정 사용재료 및 소방시설 설치방안 연구”를 김홍열 교수님을 통하여 작성하게 되었고 이제 석사를 마무리하는 마침표가 되는 듯합니다.



2년 동안의 대학원 생활이 알차고 값진 시간이 될 수 있었던 건 저를 학업에 길로 인도해주시고 적극적으로 조언해주신 24기 박선용 기술사님, 4학기를 단합되게 수업에 열성적으로 참여하고 같이 할 수 있다는 믿음을 준 25기 동기들 덕분이라 생각합니다. 마지막으로 늦은 나이에 대학원에 다니는 아들을 열심히 응원해 주신 어머니 유선중 여사님과 하늘나라에 계시는 아버지(이계문) 그리고 동생인 이관 이혁범에게 감사함을 전합니다.



논 문 개 요

도시 근교 도로의 증가는 통행 차량에 의한 소음 문제를 유발하므로 쾌적한 주거환경을 위해 다양한 형태의 방음 언덕, 방음림, 방음 덮개, 방음벽과 방음터널이 설치되고 있다.

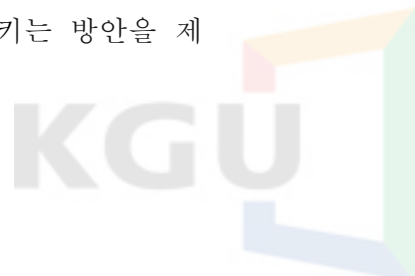
국토부의 조사에 의하면 ‘23. 1월 기준으로 전국에 170개의 방음터널과 12,118개의 방음벽이 설치되어 운영하고 있다. 방음터널 중 밀폐형 구조가 110개로 전체의 65%를 차지하고 있다. 재료 기준으로 PMMA는 58개소(34%)이고 PC는 87개소(51%), 유리 등이 25개소(15%)로 조사 되었다.

소방청의 화재통계연감에 따르면 도로가 산업시설 다음으로 4번째 화재가 자주 발생하는 장소이므로 방음터널 화재는 방음터널의 설치개수 증가, 연장구간의 증가로 그 빈도가 더욱 증가하고 있다.

“ ’22. 12. 29 제2 경인고속도로 과천 갈현고가교 방음터널(830m) 화재가 발생하여 사망 5명 등 49명의 사상자 발생” 등 방음터널 화재가 자주 발생함에 따라 국가 차원의 도로 방음시설 화재 안전 강화대책으로 2024년 8월 「도로터널 방재·환기시설 설치 및 관리지침」이 개정되기에 이르렀다. 그러나 지침에 따른 PMMA와 PC로 이루어진 투명방음판과 철골 프레임을 사용하여 설치된 방음터널의 구조는 소음을 차단하기에는 효과적이지만 투명방음판의 물리적, 화학적 특성과 강구조물의 특성상 화재 성장에 따른 내화성능이 거의 없어 화재에 매우 취약하다.

이에 본 연구에서는 국내외 방음터널 사고사례를 살펴보고 화재 시물레이션을 시행하여 화재를 분석하고, PMMA와 PC 재질 연소 실험에 대한 분석을 통하여 방음터널 사용재료의 개선방안, 소방시설 설치기준 개선방안, 피난 대책 개선방안을 제시하였다.

연구 결과, 가연성 투명방음판의 경우 내열성 기준을 강화하여 하중변형 온도를 100℃ 이상으로 높이고 용융점은 300℃ 이상으로 기준을 높여 화재 발생시 피난시간을 확보하고 인명 안전성을 향상시키는 방안을 제



시하였다. 또한 강구조물의 내화피복 및 설계에 열하중 반영하여 방음터널 구조체의 안전성 확보 및 방재등급산정 항목에 구조체의 위험성을 고려하는 평가항목을 추가할 것을 제시하였다. 또한 터널 위험도지수(X) 평가 기준(방음터널)의 경우 재료의 열분해 온도가 450℃ 미만은 8.0으로 하여 위험도지수(X) 평가시 반영하는 방안과 방음터널의 재료나 구조 등이 반영된 “방음터널의 화재 안전성능 및 기술기준”의 신설을 제안하였다. 피난 대책 개선방안으로 자동화재탐지설비와 진입 차단설비 설치대상을 확대하고 피난연결통로는 기존의 방음터널의 경우 소급 적용이 되지 않으므로 규정을 소급 적용하도록 제안하였다.

제 1 장 서 론

1.1 연구의 배경 및 목적

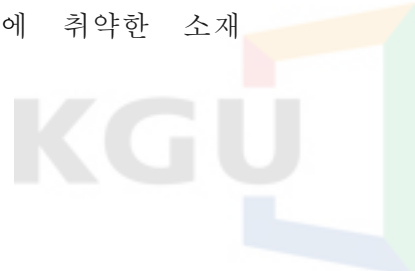
현대인의 삶은 도시를 중심으로 인구 밀집 현상을 그 특징으로 하고 있으며 도심을 통과하는 도로나 철도, 그리고 터널의 증가는 그 필요성이 더해지고 있다. 특히 도시 근교 도로의 증가는 통행 차량에 의한 소음 문제를 유발하고 있어 쾌적한 주거환경을 위해 다양한 형태의 방음 언덕, 방음림, 방음 덮개, 방음벽과 방음터널이 설치되고 있는 실정이다.

도시화에 따른 도로교통 소음증가는 인간의 건강과 쾌적한 주거환경에 밀접한 관련이 있지만, 국내의 경우는 국민의 52.7%가 도로교통 소음에 노출되어 있고 WHO(세계보건기구)에 의하면 유럽 인구의 44% 이상이 건강에 악영향을 주는 소음수준(55dB)에 노출되어 있다고 보고하고 있다.

국내의 경우, 도로교통 소음으로 인한 많은 민원이 발생하고 있어 효과적인 대책 마련이 절실한 시점이다. 현재 도로 인근 택지개발로 인한 소음 민원을 해소하고자 방음벽과 방음터널의 설치는 증가하고 있으며 국토교통부 보도자료에 따르면 “’23. 1월 기준 운영 중인 방음터널 170개소(59.3km), 방음벽 12,118개소(2,816km)”이고 이중 “170개 방음터널의 34%(58개)와 12,118개 방음벽의 14%(1,704개)가 PMMA(Polymethylmethacrylate) 소재를 사용 중인 것으로 조사”되었다. 또한 국토교통부 자료에 의하면 “방음터널의 경우 화재 대피가 어려운 밀폐형 방음터널이 110개로 전체의 65%에 해당”하여 방음터널의 화재 발생 시 화재 안전성 확보 방안이 요구되고 있는 시점이다.

국가 차원의 도로 방음시설 화재 안전 강화대책은 “’22. 12. 29 제2 경인고속도로 과천 갈현 고가교 방음터널(830m) 화재가 발생하여 사망 5명 등 49명의 사상자 발생”과 “’23. 1. 3 중부내륙고속도로 대구 성서나들목 인근에서도 방음벽 36m 전소”로 인해 화재에 취약한 PMMA 소재의 사용과 방재시설 기준 및 점검·관리 미흡 등이 문제로 지적되어 대책을 마련하는 중이다.

방음터널 화재안전성 강화대책의 설계기준으로 “화재에 취약한 소재



(PMMA 등) 사용 금지 등을 포함한 방음시설 설계기준 및 표준시방서 제·개정('24), 계획 중인 방음시설에도 적용할 '화재안전 가이드라인' 마련·배포('23.2)' 등이 마련되었다.

방재기준 강화대책으로 “『소방시설법』에 따른 소방시설 설치 의무화('23.9) 및 피난대피로, 제연설비 등 방재시설 설치기준 마련('23.6)”과 소방시설로 “소화기구(모든 터널), 옥내소화전·자동화재탐지설비(1km 이상), 비상 콘센트 설비(500m 이상) 등”이 설치되도록 하였으며 방음터널 인증평가제도가 도입되어 “화재에 안전한 자재·공법 인증제도 도입, 도로 안전도 평가 등 근거 마련[(가칭) 도로안전법 제정, '24]” 등이 마련되었다.

국내의 경우, 방음재의 종류로 열가소성 플라스틱으로 흔히 아크릴로 불리는 PMMA와 렉산으로 불리는 폴리카보네이트(PC:Polycarbonate)와 불연성인 유리가 사용되고 있다. 하지만 미국의 방음터널은 콘크리트나 암석을 사용하고 독일의 경우는 콘크리트, 프랑스의 경우는 콘크리트나 암석을 사용하여 불연성재료로 방음터널을 설치하고 있어 화재 안전성 측면에서 국내와는 매우 다르다는걸 알 수 있다. 국내의 방음터널의 경우, 재료의 열가소성이 가장 큰 문제이며 피난안전성 확보를 위한 소방시설의 설치도 부족하다는 문제점이 있다.

이에 본 연구에서는 PMMA와 PC 재질 연소 실험에 따른 화재 강도와 화재하중을 살펴보고 실험 및 시뮬레이션 결과를 분석하여 사용재료를 통한 개선방안, 소방시설의 설치기준에 따른 문제점 분석을 통한 법적 기준 개선방안, 기존 방음터널의 구조적 문제점을 분석을 통한 화재 강도에 따른 방음터널 적정 사용재료와 소방시설 설치방안을 연구하고자 한다.

1.2 연구의 범위 및 방법

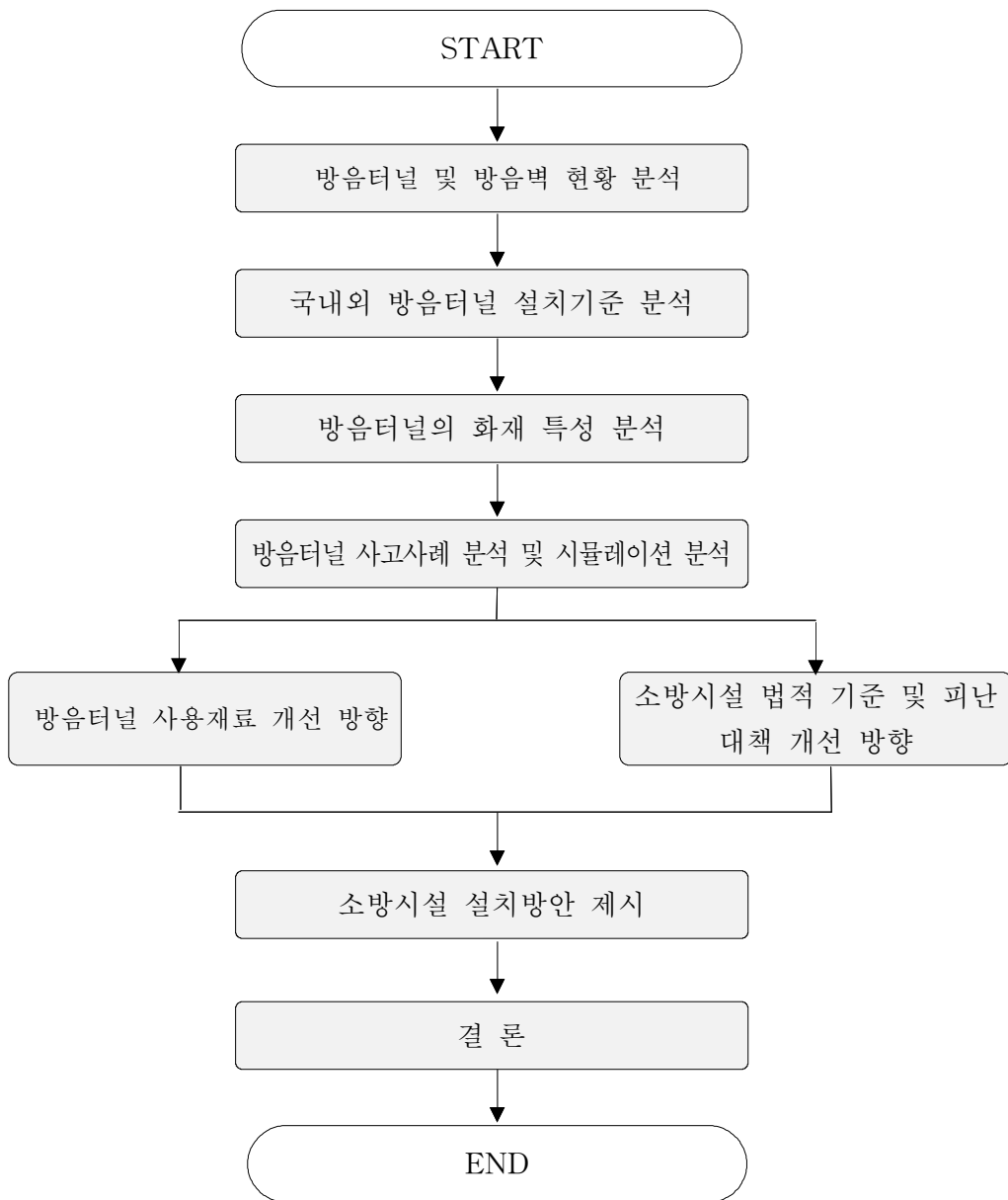
본 연구에서는 방음터널 화재 사고 직후 국토부의 방음터널 화재 안전성 강화대책에서 발표한 방음시설(터널·벽)에 대한 전수조사 자료를 활용하여 방음터널 및 방음벽의 현황을 분석하였다. 또한 국내외 방음터널의 설치기준과 방

음터널의 화재 특성을 살펴보며 더불어 기존화재 시뮬레이션 결과 분석을 통하여 화재를 분석하고자 한다.

화재 시뮬레이션에서 화재성장곡선에 따른 화재 강도와 화재하중을 알아보고 방음터널 사용재료의 열적 특성을 통해 실제 화재 발생 시 어떠한 소방시설의 설치가 필요한지 살펴보고자 하였다.

또한 방음터널 국내외 화재사례를 분석하고 방음터널의 재료 및 설치기준의 문제점을 알아보고 PMMA와 PC 재질 연소 실험에 대한 분석을 통하여 방음터널의 재료에 따른 화재 특성을 분석하고 방음시설 설치재료의 방향을 제시하고자 한다. 더불어 기존 방음터널에 시공된 소방시설에 대해 분석하고, 방음터널 내부 화재 발생 시 해당 재질의 연소 특성과 연소시 유해가스 발생 여부를 검토하여 터널 내부 대피자들의 안전한 대피를 위한 소방시설과 피난 기준제시를 연구 범위로 설정하였다.





<그림 1-1> 연구흐름도

1.3 기존의 연구

김민정[1]은 「터널형 방음시설의 화재위험도 분석을 통한 대안 방안에 관한 연구」에서 터널형 방음시설의 위험도를 입증하기 위하여 화재 시뮬레이션을 통해 정량적으로 분석하였으며 국내에 설치되어 운영 중인 터널 구조의 방음시설을 조사하여 시뮬레이션의 조건으로 적용하였다. 분석 결과에 의하면 철골과 투명방음판으로 이루어진 터널형 방음시설의 구조는 차량의 복사열을 견디기에 한계가 있는 것으로 나타났다. 따라서, 구조적인 화재위험 특성을 고려하여 기준적인 측면과 성능적인 측면에서 개선방안을 제시하였다.

김태우외 2인[2]은 「방음터널의 화재 안전성에 관한 국내 연구 동향 분석」에서 방음터널은 효과적인 소음 차단, 터널 내 자연채광, 우천 및 강설 시도로 안전성을 확보하는 방음시설이다, 그러나 평균온도 538℃ 이상이 되면 강도가 급격히 저하되는 강 구조체이고 방재시설 등급산정 기준의 미비는 방음터널의 화재 안전성을 저하하는 주요 요인으로 보고 방음터널의 문제점에 대해 국내 설치규정 및 선행연구 분석을 통해 고찰하였으며, 그에 따른 개선방안을 제시하고 있다.

손정줄[3]은 「도로 방음시설 계획절차와 대안 결정에 관한 사례 연구」에서 방음벽은 소음저감 목표치도 20dB까지는 불가능하며 방음벽이 조망권을 침해하므로 방음터널을 설치하는 것이 효과적인 소음 차단 방법이며 소음과 층수와의 상관관계를 분석하고 방음터널이 시공성, 경제성, 구조적 안전성, 조망권 확보에 적합하다고 말하고 있다

한국도로공사[4]는 「고속도로 방음터널 제연 및 피난 방안에 관한 연구용역」에서 최근 고속도로 인접지 택지개발 등으로 인해 도로 소음 피해 최소화를 위해 터널형 방음시설(방음터널) 설치가 증가하고 있는 상황이나 이용객 안전을 위한 안전(방재)시설 기준이 부재한 상태이다. 따라서 적절한 방음터널 방재기준을 수립하기 위하여 현재 운영 중 방음터널의 현황을 조사하고, 관련 규정을 분석하였으며, 3차원 시뮬레이션을 통하여 방음터널 형태별 적절한 최적 제연(배연) 및 피난시설 설치방안 제시로 설계 및 유지관리 방향을 제시하였다.



기존의 연구를 조사 분석한 결과 “화재강도에 따른 방음터널 적정 사용재료 및 소방시설 설치방안 연구”를 제시하는 학위 논문은 미흡한 것으로 조사되었다. 이에 본 연구에서는 방음터널 사용재료의 기존 연소 실험과 화재 시뮬레이션을 분석하여 방음터널 사용재료에 따른 소방시설 설치방안을 제시하고자 한다.



제 2 장 이론적 고찰

2.1 방음터널 개요

2.1.1 방음시설의 개요

국토교통부의 「도로터널 방재 환기시설 설치 및 관리지침」에 의하면 “방음터널(터널형 방음시설)이란, 교통소음을 흡음 또는 차단하여 도로 주변의 교통소음을 저감 하기 위한 시설 중 터널과 형상이 유사한 구조의 방음시설”이라고 되어 있다. 따라서 터널 내부의 소음을 최소화하기 위해 설계된 터널, 도로 인근 택지개발 과정에서 발생하는 소음을 해소하기 위해 설치하는 방음터널, 도심 지상차도 또는 지하차도 및 철도 등 교통 통행 집중이 과도한 지역에서 발생하는 소음을 줄이기 위하여 설치되는 방음시설 등을 말한다.



<그림 2-1> 방음터널

방음터널은 음향성능 원리에 따른 반사형, 흡음형, 간섭형, 공명형으로 구분하며 사용재료에 따라서 투명형, 금속형, 목재형, PVC형, 콘크리트형, 혼합형으로 구분할 수 있다. 또한 지붕의 밀폐 정도에 따라 밀폐식과 개방식으로 구분하며 방음터널의 구조는 일반적으로 지붕재와 강재, 그리고 외장재로 구성

되어 있다.

방음시설의 재질 및 성능은 환경부 고시인 “방음시설의 성능 및 설치기준”을 준용하여 가급적 방음 효과가 우수하고 사후관리가 편리하며 내구성, 내화성이 좋은 것으로 한다고 되어 있으며, 일반터널과 같은 기준으로 방재등급 산정 및 그에 따른 방재시설을 설치해야 하며 방음터널의 특수성을 고려하여 방재시설 설치기준을 적용하기 어려운 경우 수치 시뮬레이션을 통한 안전성 검토와 “건설기술진흥법”에 따른 설계심의를 거쳐 다르게 적용할 수 있다.

방음터널을 설치할 것인가를 결정하는 선정기준은 고층건축물이 밀집하여 방음벽 설치로 환경목표치를 만족하기 어려운 때에만 도시경관, 유지관리, 경제성 등을 고려하여 설치하게 된다.

2.1.2 방음시설의 종류 및 방음재료 비교

방음터널(터널형 방음시설)은 교통량이 증가하여 도로가 확장되면 고층화된 인접 주거지역이 방음벽 형태로는 소음저감 효과를 기대하기 어려운 경우 설치하게 된다. 또한 방음터널을 적용하면 재질은 도시의 미관과 터널의 특성을 고려하여 대부분 투명방음판을 적용하여 채광 효과와 동시에 방음 성능을 확보하고 있다.

1) 방음시설의 종류

방음시설의 종류는 크게 다섯 가지로 나눌 수 있으며 첫 번째 가장 일반적인 형태로 터널 벽면에 방음재를 적용한 방음터널로 터널 벽면에 적용한 특수 방음재가 소음을 외부로 발산시키지 않고 내부로 흡수하거나 차단하는 것이다.

두 번째 캐비티형 방음터널로 터널배부에 캐비티를 형성하여 소음이 흡수되도록 설계한 것으로 빈공간이나 구멍이 캐비티 역할을 하며 소음은 캐비티 안에서 반사되거나 흡수된다.

세 번째 역률형 방음터널로 터널 내부 공기와 외부 공기의 압력 차이를 이용하여 소음을 차단하는 원리로 역률형 방음터널은 벽면에 구멍을 뚫지 않아도 소음을 감소시킬 수 있다는 장점을 지닌다.

네 번째 섬유질 패널을 사용한 방음터널로 다공성 섬유질 패널이 소음을 흡수하는 원리로 섬유질 패널을 벽면에 부착하거나 내부 구조물에 적용하여 소음을 흡수하도록 하는 방법이다.

다섯 번째 진동 저감형 방음터널로 터널 내부 진동을 감소시키는 기술을 적용하여 소음을 감소시키며 소음감소를 위해 터널 내부에 진동 저감 재료를 적용하거나, 터널의 구조를 일부 변형하여 진동을 완화시키는 방식이 사용된다.

2) 방음재료 비교

국내 방음터널의 일반적인 재료는 폴리머 계열인 폴리메틸메타크릴레이트(PMMA), 폴리카보네이트(PC), 폴리에틸렌 테레프탈레이트(PET)와 유리 계열인 강화유리로 구분할 수 있다.

<표 2-1> 방음터널 재질 종류별 특징 비교

구분	폴리머 계열			유리 계열
	PC	PMMA	PET	Tempered Glass
명칭	폴리카보네이트	폴리메틸메타크릴산	폴리에틸렌 테레프탈레이트	강화유리
비중	1.2	1.18	1.4	2.5
m ³ 당 질량(kg/m ³)	7.1	7.1	7.6	25
굴절률	1.59	1.62	1.66	1.54
투과율	90%	93%	88%	93%
아이조드 충격 강도(kgf · cm/cm ²)	12	3.2	4.3	0.4
내열성	120°C	95°C	150°C	200°C
용융점	230°C	224°C	265°C	650°C
인화점	450°C	280°C	350°C	-
대표 연소생성물	CO, CO ₂	CO, CO ₂ , CH ₄	CO, CO ₂ , CH ₄	-

폴리메틸메타크릴산은 흔히 “아크릴”이라고 불리며 무색투명한 비결정 열가소성 플라스틱이다. 광선투과율이 높고 성형도 용이하나 시간이 경과 됨에 따라 황변이 발생하고 오염물질 등으로 투명도가 저하된다.

폴리카보네이트는 흔히 “렉산”으로 투명 무색의 무정형 열가소성 플라스틱이다. 우수한 내충격성과 내열성이 좋으며 기계적 물성이 우수하고 가공성과 내구성이 뛰어나지만, 온도변화에 약하며 가격이 비싸고 스크래치 발생이 쉬운 단점이 있다.

폴리에틸렌 테레프탈레이트는 흔히 “페트”로 불리며 결정성 열가소성 플라스틱 소재이다. 투명도가 높고 단열성이 좋으나 충격강도가 떨어지고 산에 매우 약하다.

유리는 단단하고 깨지기 쉬운 비결정질 고체로 투명하고 매끄러우며 비가연성 소재이다. 투명성이 높고 친환경 재료이며 방음 성능이 우수하나 파손시 날카로운 조각이 생기고 가격이 비싸고 무거우며 열충격에 취약하다.

2.2 방음터널 및 방음벽의 현황 분석

2.2.1 재질별 현황

방음터널의 재질은 터널 특성과 도시 미관적인 측면, 밀폐공간의 채광효과를 고려하여 선택한다. 현재 국내에서 방음터널에 사용되는 대표적인 재질은 폴리머 계열인 폴리메틸 메타크릴산(PMMA:Polymethylmethacrylate)와 렉산으로 불리는 폴리 카보네이트(PC:Polycarbonate), 그리고 유리계열의 강화유리이다.

서울 외곽순환 고속도로 성남 판교 택지개발 구간에 있는 방음터널은 2012년 풍성 신미주 아파트의 소음저감을 위해 시공되었으며 터널 측면은 흡음판, 상판은 PMMA로 시공되었으며 폭이 41.8m, 높이가 7.5m. 연장 길이가 600m에 달하는 방음터널이다.

죽전 동백간 도로의 죽전 4교의 경우 2011년 도담마을에서 꽃메로까지 투명



판 PC구조로 설치한 방음터널이다. 재원은 폭 20.1m, 높이 6.7m, 연장 675m로 주변에 이노스빌 아파트 등 여러 단지의 아파트와 고등학교, 초등학교 등의 소음저감을 위해 설치하였다.

영동고속도로의 광고 방음터널은 강화유리로 시공되었으며 폭 22.5m, 높이 8.5m, 연장 1,352m인 밀폐형 터널로 주변에 택지개발로 다 수의 아파트의 소음감소를 위해 설치되었다.

2023년 2월 국토교통부 보도자료에 따르면 방음터널 재질별 현황은 아래 <표 2-2>와 같다.

<표 2-2> 방음터널 재질별 현황

구분	PMMA (폴리메틸메타크릴산)	PC (폴리카보네이트)	유리 (강화유리)	합계
방음터널	58개소	87개소	25개소	170개소
방음벽	1,704개소	944개소	9,470개소	12,118개소

현재 PMMA 재질의 경우 전체 34%, PC 재질 51%, 강화유리는 15%의 비율로 설치되어 있다.

2.2.2 형태별 현황

방음터널을 형태별로 구분하면 밀폐형과 부분 개방형, 그리고 혼합형으로 나눌 수 있다. 부분 개방식은 개방 부분에 따라 측벽개방, 상부 개방, 상부와 측벽 동시 개방으로 구분할 수 있다.

김효규의 “방음터널 관련 도로터널 방재지침개정(안) 마련”에 의하면 방음터널 형태별 현황은 다음 <표 2-3>과 같다.

<표 2-3> 방음터널 형태별 현황

연 장(m)	개소	밀폐형	부분개방	혼합형	기타
0~500	165	105	41	9	10
500~1000	33	19	10	2	2
1000~2000	16	8	5	2	1
2000~3000	1	0	1	0	0
합 계	215	132	57	13	13

2.2.3 주요 방음터널 운영 현황

국내의 방음터널은 1993년 부산광역시 진구에 최초로 설치되기 시작해 현재에 이르기까지 설치개수가 눈에 띄게 증가하고 있다. 방음터널 중 최고 연장터널은 2016년에 완공된 수원시 영통구 영동 고속도로상에 있는 광교 신도시 구간에 설치되어 있다.

방음터널의 설치 목적상 도로상의 소음을 차단하기 위해 설치하므로 주요 방음터널은 외곽순환고속도로, 영동고속도로, 당진영덕고속도로, 순천완주고속도로, 무안광주고속도로, 통영대전고속도로, 부산울산고속도로 등에 설치되어 있다.

다음은 주요 방음터널 운영 현황이다.

<표 2-4> 고속도로에 시공된 주요 방음터널

노선명	위치	연장	준공시기
가야터널형 방음터널	부산 부산진구 개금동 가야고가	568m	2001
옥구고가터널형 방음터널	경기도 시흥시 정왕3동 옥구고가3거리	568m	2004
용인서울고속도로	경기도 성남시 분당구 운중동	781m	2009
서울 외곽순환선 중동 IC 부근	서울 부천시 원미구	640m	2009
죽전~동백간 도로	경기도 죽전지구 죽전4교	675m	2011
서울 외곽순환선 양방향	경기도 성남시 수정구 시송	600m	2012
부산울산고속도로	부산 해운대구 좌동 대천공원 인근 상산고가교	600m	2015
행정중심 복합도시 3-1 생활권	세종시 대평동	827m	2015
행정중심 복합도시 3-3 생활권	세종시 소담동	962m	2015
행정중심 복합도시 3-2 생활권	세종시 보람동	1,044m	2015
영동선 38km 양방향	경기도 수원시 영통구 영동고속도로 광교신도시	1,360m	2016

2.2.4 방음터널 연장 및 방재등급 현황

방음터널은 터널의 길이에 따라 연장등급을 구분하고 있고 일반 도로터널과 같은 기준으로 방재등급을 산정하여 그에 따른 방재시설을 설치하도록 하고 있다.

<표 2-5> 방음터널의 연장등급과 방재등급

연장(m)	연장 등급	연장등급 개소 수	방재 1등급	방재 2등급	방재 3등급	방재 4등급	방재등급 합계
0~500	4등급	165	4	3	1	74	82
500~1000	3등급	33	3	1	2	9	15
1000~3000	2등급	17	2	3	1	2	8
합계		215	9	7	4	85	105

<표 2-5>에서 보는 바와 같이 방음터널의 연장등급이 1등급인 경우는 현재 없으며 2등급은 8%, 3등급은 15%, 4등급은 77%이다. 방재등급의 경우 1등급은 8%, 2등급은 7%, 3등급은 4%, 4등급은 81%이다.

대부분의 방음터널은 방재 4등급에 해당하여 소화설비 중 소화기만 설치대상이므로 화재시 초기소화에 인명 안전이 확보되기 어려움을 알 수 있다.

2.3 국내외 방음터널의 소방시설 설치기준

2.3.1 국내 설치기준

1. 도로터널 방재·환기시설 설치 및 관리지침

국내의 방음터널에 관한 기준은 국토교통부에서 「도로터널 방재·환기 시설 설치 및 관리지침」에서 방재와 환기 시설 편으로 구분하여 정하고 있으며 2024년 8월 지침이 개정되었다.

개정이유는 “제2 경인고속도로 과천 갈현고가교 방음터널에서 화재 사고가 발생(‘22.12.29)하여 사망 5명 등 사상자 49명이 발생했으며, 사고 이후 방음터널 내 방재시설 기준 미흡 등이 주요 문제점으로 지적되어 방음터널의 화재 안전성 제고를 위해 도로 방음터널 특성을 고려한 방음판(반사형, 흡음형)에 따른 성능 기준을 마련하려는 것”이라고 밝히고 있다. 개정 주요 내용은 터널형 방음시설 방음판 재료의 방화성능 기준을 신설하고 도로터널 방재·환기시설 설치 및 관리지침의 목적을 명확히 제시하였다.

제1장 통 칙		
1.1 목적	이 지침은 「도로법」 제50조, 「도로의 구조·시설에 관한 규칙」 제42조 제2항, 제43조2 제3호 및 제48조에 따라 도로터널 방재시설의 계획, 설계, 시공 및 관리 시 적용해야 할 최소한의 기술기준을 규정함을 목적으로 한다.	
1.2 적용 범위	(1) 본 지침은 「도로법」 제10조에서 규정하고 있는 고속국도, 일반국도, 특별시도, 광역시도, 지방도, 시도, 군도, 구도의 터널에 적용함을 원칙으로 한다. (2) 본 지침의 적용대상인 ‘도로터널’은 자동차의 통행을 목적으로 지반을 굴착하여 지하에 건설한 구조물, 개착공법으로 지중에 건설한 구조물 (BOX형 지하차도), 기타 특수공법(침매공법 등)으로 하저에 건설한 구조물(침매터널 등)과 지상에 건설한 터널형 방음시설(방음터널)을 말한다.	
1.3 정의	터널등급	터널에 방재시설 설치를 위한 터널 분류 등급으로 연장등급과 위험도지수 평가에 의한 방재 등급으로 구분
	터널형 방음시설(방음터널)	교통소음을 흡음 또는 차단하여 도로 주변의 교통소음을 저감하기 위한 시설 중 터널과 형상이 유사한 구조의 방음시설을 말한다.

제1장 통칙은 목적과 적용범위, 각종 용어의 정의에 대하여 기준을 제시하고 있다.

제2장은 도로터널의 방재시설에 관한 내용으로 방재시설의 분류, 설치계획, 터널 등급구분, 터널의 연장등급 및 방재등급별 기준, 방음터널 방재시설 설치 기준 등을 표로 보여주고 있다.



2.3.1 터널 등급구분

(1) 방재시설 설치를 위한 터널등급은 터널연장(L)을 기준으로 하는 연장 등급과 교통량 등 터널의 제반 위험인자를 고려한 위험도 지수(X)를 기준으로 하는 방재등급으로 구분하며, 등급별 범위는 <표 1.2.1>과 같다.

<표 1.2.1> 연장등급 및 방재등급별 기준

등급	터널연장(L) 기준		위험도지수 (X)기준
	일반도로터널 및 소형차전용터널	방음터널	
1	3,000m 이상 ($L \geq 3,000$ m)	3,000m 이상 ($L \geq 3,000$ m)	$X > 29$
2	1,000m 이상, 3,000m 미만 ($1,000 \leq L < 3,000$ m)	1,000m 이상, 3,000m 미만 ($1,000 \leq L < 3,000$ m)	$19 < X \leq 29$
3	500m 이상, 1,000m 미만 ($500 \leq L < 1,000$ m)	250m 이상, 1,000m 미만 ($250 \leq L < 1,000$ m)	$14 < X \leq 19$
4	연장 500m 미만 ($L < 500$)	연장 250m 미만 ($L < 250$)	$X \leq 14$

<표 1.2.2(c)> 터널 위험도지수(X) 평가기준(방음터널)

세부평가항목		위험		위험도지수
터널 특성	방음판 재료의 성능기준 ⁽¹⁾	불연재료		0.0
		준불연재료		0.5
		난연재료		1.0
		기타재료의 열분해온도	450℃ 이상	2.0
			그 외	4.0
	중앙분리벽	설치		0.0
		미설치		2.0
	화재 확산 방지구역	있음		0.0
		없음		1.0
	인접민가와 이격거리 ⁽²⁾	50m 이상		0.0
		30m 이상 50m 미만		1.0
		10m 이상 30m 미만		1.5
		10m 미만		2.0

(1) 방음판의 재질 및 성능은 “2.5.3 방화성능기준”과 「방음시설의 성능 및 설치기준을 준용한다.

(2) 인접민가란 방음터널 주변의 상가나 저주용 건축물을 말함.

<표 1.2.3(c)> 등급별 방재시설 설치기준(방음터널)

방재시설 \ 터널등급		1등급	2등급	3등급	4등급	비 고
소화 설비	소화기구	●	●	●	●	
	옥내소화전설비	●○	●○	△		연장등급, 방재등급 병행
	원격제어살수설비		△			
	물분무설비	○				
경보 설비	비상경보설비	●	●	●		
	자동화재탐지설비	●	●			
	비상방송설비	○	○	○		
	긴급전화	○	○	○		
	CCTV	○	○	○	△	
	자동사고감지설비	△	△	△		
	재방송설비	○	○	○	△	
	정보표지판	○	○			
	진입차단설비	○	○	△		
피난 대피 설비	비상조명등 ⁽¹⁾	△	△	△	△	
	유도등	○	○	○	○	
	대피시설	●	●	● ○ ⁽²⁾	△	연장 250m 이상: 필수설치, 250m 미만: 권장설치
소화 활동 설비	제연설비 ⁽³⁾	○	○	△		
	무선보조통신설비	●	●	●	△ ⁽⁴⁾	
	연결송수관설비	●○	●○	△		연장등급, 방재등급 병행
	(비상)콘센트설비	●	●	●		
비상전 원설비	무정전전원설비	●	●	●	△ ⁽⁵⁾	
	비상발전설비	●○	●○	△		연장등급, 방재등급 병행

●기본시설 : 연장등급에 의함 ○ 기본시설 : 방재등급에 의함 △권장시설 : 설치의 필요성 검토에 의함

(1) 터널형 방음시설(방음터널)의 내부에서 주간시 채광에 의한 조도 확보가 불가능하거나, 야간시 ‘도로의 구조·시설 기준에 관한 규칙’에 의한 조도를 유지하는 조명시설이 없는 경우 비상조명등을 설치함. (2) 연장등급이 4등급이나 방재등급 3등급인 터널은 방재등급에 의해서 설치.

2.5 터널형 방음시설(방음터널)

2.5.1 일반사항

- (1) 터널형 방음시설(방음터널)은 교통소음의 저감을 목적으로 흡음 또는 차단효과를 얻을 수 있도록 설치하는 방음시설 중 형상이 터널과 동일하거나 유사한 구조를 갖는 방음시설을 의미한다.
- (2) 일반터널과 같이 반밀폐된 터널형 방음시설(방음터널)에서는 화재시 연기의 배출이 제한되어 인명피해가 예상되므로 방재시설의 설치를 검토하여야 한다.
- (3) 터널형 방음시설(방음터널)의 방음판 재질 및 성능은 “2.5.3 방화성능기준”과 「방음시설의 성능 및 설치기준」을 준용한다.

2.5.3 방화성능기준<신설>

구 분	내 용
(1) 반사형 방음판	KS M ISO 11358-2에 따른 시험 결과 열분해 온도가 450℃ 이상이거나, 「건축자재 등 품질인정 및 관리기준」에 따른 난연재료 이상의 성능기준을 충족하여야 한다.
(2) 흡음형 방음판	다음 각호의 성능기준을 모두 충족하여야 한다. ① 외장판(전·후면판) : 「건축자재 등 품질인정 및 관리기준」에 따른 난연재료 이상의 성능기준을 충족할 것 ② 흡음재 : 「건축자재 등 품질인정 및 관리기준」에 따른 준불연재료 이상의 성능기준을 충족할 것

방음터널에 설치되는 방재설비인 소화설비, 경보설비, 피난대피설비, 소화활동설비, 비상전원설비는 화재안전성능 및 기술기준(NFPC, NFTC)에 준하도록 되어 있다.



2. 도로터널의 화재안전성능 및 기술기준(NFPC 603, NFTC 603)

도로터널의 화재안전성능 및 기술기준(NFPC 603, NFTC 603)은 「화재예방, 소방시설 설치·유지 및 안전관리에 관한 법률」이 「소방시설 설치·유지 및 안전관리에 관한 법률」로 전부개정 되어 2022년 12월 1일 시행됨에 따라 ‘화재안전성능기준’을 마련하기 위하여 현행 ‘화재안전기준’을 ‘화재안전성능기준’과 ‘화재안전기술기준’으로 전부 개정하였다.

본 논문에서는 ‘화재안전성능기준’과 ‘화재안전기술기준’이 유사하므로 화재안전성능기준을 기준으로 제시하고자 한다.

도로터널의 화재안전성능기준(NFPC 603)	
구분	내용
제1조 (목적)	「소방시설 설치 및 관리에 관한 법률」(이하 “법”이라 한다)제2조제1항제6호가목에 따라 소방청장에게 위임한 사항 중 도로터널에 설치해야 하는 소방시설 등의 성능기준을 규정함을 목적으로 한다.
제2조 (적용범위)	소방시설 설치 및 관리에 관한 법률 시행령」(이하 “령”이라 한다) 제11조 제1항에 따라 도로터널에 설치해야 하는 소방시설 등의 설치 및 관리에 대해 적용한다.
제3조 (정의)	1. “도로터널”이란 「도로법」 제10조에 따른 도로의 일부로서 자동차의 통행을 위해 지붕이 있는 구조물을 말한다.

이 기준에 의하면 「소방시설 설치 및 관리에 관한 법률」에 의해 도로터널에 설치하는 소방시설 등은 ‘화재안전성능기준’과 ‘화재안전기술기준’에 적합하여야 하고 방음터널에 설치되는 소방시설 역시 이 기준에 적합하게 설치되어야 한다.

2.3.2 국외 설치기준

해외의 경우 소음 차단을 위한 방음벽, 방음터널 등이 설치되기 시작한 것은 미국에서 1970년대 초 소음규제가 도입되면서 시작되었다. 미국에서 20세기 중반부터 차량 통행이 급증하며 방음벽이 건설되기 시작하였고 미국 최초의 방음벽은 캘리포니아 밀리타스의 I-680 이다. I-680은 음향분석 기술을 이용하여 특정 도로의 방음벽이 얼마나 효과적인지를 수학적으로 분석하여 설계되었다. 또한 덴마크와 호주, 서유럽 등에서는 1990년대부터 투명한 재료로 방음벽을 설계하고 있다.



<그림 2-2> 호주 멜버른의 방음터널

미국의 경우 해당 도로의 소음을 측정한 후 컴퓨터 모델링 기술을 활용하여 방음벽이나 방음터널을 설계하는데 도로지형, 차량부피, 차량속도, 통과차량 종류, 도로표면 및 미시적 기상의 영향까지 고려한다.

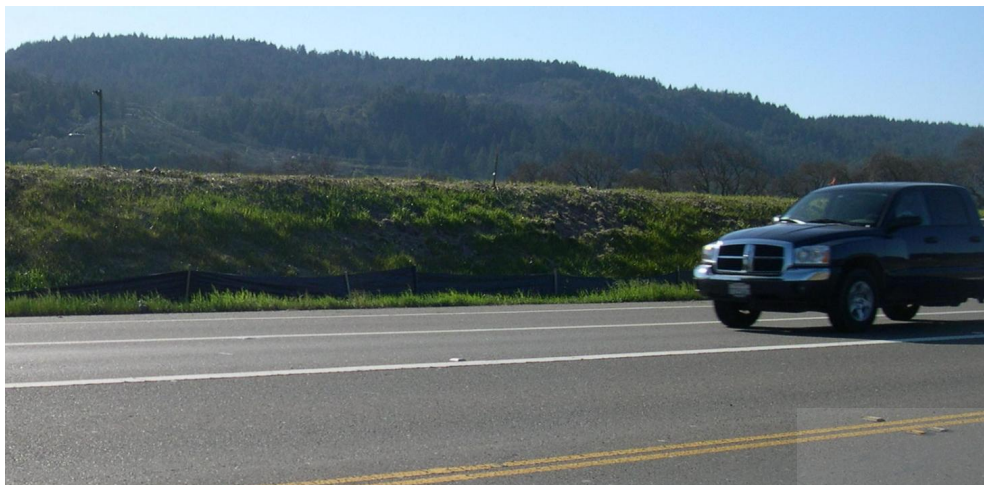
이렇게 과학적으로 설계한 최초의 연구는 캘리포니아주 로스알토스의 Foothill Expressway에 관한 연구이며 초기의 방음벽은 캘리포니아 새크라멘토의

Caltrans 본사, 캘리포니아 서니베일의 ESL Inc, 매사추세츠주 케임브리지의 Bolt, Beranek and Newman 그룹, 플로리다대학 연구팀 등이 미국 전역의 사례 연구를 통해 설계하였다.

1970년에 제정된 미국의 국가 환경정책 법은 도로의 소음에 대한 정량적 분석을 의무화하여 방음벽 모델을 개발하여 적용하도록 하였으며 1972년에는 소음 통제법이 통과되어 방음벽과 방음터널의 수요는 급증하게 된다. 방음벽에 대한 수요의 증가로 1970년대 후반부터 12개 이상의 연구그룹이 컴퓨터 모델링 기술을 적용하여 매년 200개 이상의 방음벽 또는 방음터널을 설치하고 있으며 현재 이 기술이 고속도로 소음공해 평가의 표준이 되었다.

또한 소음 차단 설계시 소음 소스의 음파 이동을 차단하며 회절을 고려하고 엔진 소음, 타이어소음, 공기 역학적 소음이 포함되는데, 이는 차량의 유형과 속도에 따라 다르다. 이러한 방법으로 소음 소스를 모델링 하여 방음벽이나 방음터널을 설계하게 된다.

소음 차단을 위한 방음벽과 방음터널의 재료는 석조, 흙, 강철, 콘크리트, 목재, 플라스틱 등이 사용되고 있으며 양모가 포함된 복합재료도 사용된다. 단단한 표면과 다르게 흡수성재료는 소음 완화 효과가 뛰어나며 태양광 패널을 이용하여 소음을 차단하고 교통소음을 줄이는 방법도 사용되고 있다.



<그림 2-3> 캘리포니아주 소노마 카운티 12번 국도 소음 차단 흙둑

이러한 재료는 다공성 표면으로 이루어져 소음 감쇠 성능이 있는 재료의 경우 소음이 반사되지 않지만, 석조구조나 콘크리트의 경우 단단한 표면에 의해 소음원이 반사되는 성질이 있다.

미국 경우 대부분의 방음벽과 터널에는 화재에 대비하여 근처 소화전에 접근하여 소방호스를 끌어 올 수 있게 틈새를 설치하고 가장 가까운 교차로를 나타내는 표지판과 소화전 그림문자가 표시되어 있다.

2.3.3 국내외 설치기준 비교

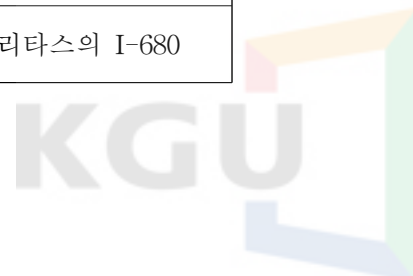
국내의 방음터널에 관한 기준은 국토교통부에서 「도로터널 방재·환기시설 설치 및 관리지침」과 「도로터널의 화재안전성능 및 기술기준」이 있으며 관련 기준에 방음터널의 재료, 설계기준, 소방시설 설치기준 등이 제시되어 있다.

국외의 경우 각 나라마다 기준이 조금씩 다르겠지만 본 논문에서는 미국의 경우를 기준으로 살펴보았다.

다음 <표 2-6>은 국내와 미국의 방음벽 또는 방음터널의 차이점을 비교해 놓은 것이다.

<표 2-6> 방음시설 기준 국내외 비교

구분	국내기준	국외기준(미국)
관련법령	○ 도로터널 방재·환기시설 설치 및 관리지침 ○ 도로터널의 화재안전성능 및 기술기준	○ 국가환경정책법 ○ 소음 통제법 ○ 연방규정
설계방법	관련법령에 따라 설계	컴퓨터 모델링으로 설계
사용재료	PMMA, PC, 강화유리	콘크리트, 석조, 플라스틱, 흙
최초 설치시기	1981년	1970년
구조	기초, 지주, 방음판	기초, 강재, 방음판
최초 방음벽	원효대교 남단의 높이 3.5m 길이 200m의 아연철판	캘리포니아 밀리타스의 I-680



제 3 장 방음터널 사고사례 분석 및 문제점 도출

3.1 방음터널의 화재특성

3.1.1 방음터널 재료 연소실험 결과 분석

국내 방음터널의 재료는 폴리머계열인 PMMA, PC와 강화유리를 사용하고 있다. 방음벽으로 환경기준은 만족하지만, 소음저감 효과가 부족할 경우 도시의 미관적인 측면과 터널의 밀폐공간이라는 특성으로 인해 채광 효과를 고려하여 방음터널을 설치하게 되므로 빛 투과율이 90% 이상인 재료들을 사용하게 되는 것이다.

높은 투과율은 큰 장점이지만 폴리머계열의 경우 내열성이 120℃ 이하이고 용융점이 230℃ 이하이며 인화점의 경우 PMMA는 450℃, PC는 280℃이므로 화재에 취약한 재료이다. 강화유리의 경우 충격강도가 0.4kgf·cm/cm²에 불과하여 충격에 매우 취약하다. 폴리머의 연소 과정은 다음 <표 3-1>과 같다.

<표 3-1> 폴리머의 연소 과정

단계	과정	연소특징
1	가열 (Heating)	온도가 높아짐. 물리적인 변화 없음
2	분해 (Decomposition)	폴리머 대부분의 결합이 끊어지는 단계임, 연소하기 쉬운 물질로 변함 (가연성 가스, 불연성 가스, 액체, 고체)
3	점화 (Ignition)	가연성 가스가 산소 속에서 점화되어 연소가 시작됨 (인화점, 발화점, 한계산소농도)
4	연소 (Combustion)	일정한 양의 열을 발생함, 연소열은 가연성 및 불연성 가스 생성물의 온도를 높임, 최성기 연소를 나타냄
5	연소 확대 (Propagation)	화염이 주변으로 전파됨

폴리머 계열의 경우 내열성이 다소 우수하나 대형 화재발생시 화염의 온도가 1,000℃ 이상이 되므로 용융 되어 전소가 예상되고 방음재가 불완전 연소시 유해가스인 CO, CO 등이 발생하는데 질식가스로 인해 터널 대피자 들의 피해가 발생할 수 있다. 강화유리의 경우 내열성이 폴리머 계열보다 좋고 용융점이 650℃로 높아 전소되지 않고 유해가스 발생도 없어 화재 발생시 피난에 유리한 불연성재료이다.

본 연구에서는 한국도로공사 도로교통연구원의 “고속도로 방음자재의 연소 특성 및 방염성능 기준에 관한 연구”에서 실시한 방음벽 재료에 대한 방염성능시험(45° 연소시험), 콘칼로리미터 시험, 연기밀도시험을 인용하여 PMMA, PC의 연소 특성을 살펴보고자 한다.

1. 방염성능시험(45° 연소시험)

방염성능시험은 방염대상 물품에 대한 방염성능을 측정하는 것이며 방음터널과 같은 옥외 재료에 대한 것은 아니지만 방음터널 사용재료의 연소 특성을 파악하기 위해 PMMA 4종류, PC 3종류, 목재(방부 처리된 미송) 1종류에 대해 방염성능시험을 소방방재청 고시에 의해 실시한 시험을 참고하였다.



<그림 3-1> 방음터널 사용재료에 대한 45° 연소시험

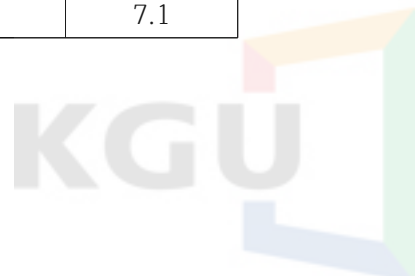
방염시험 결과는 <표 3-2>와 같다. PMMA의 경우 모두 전소되어 방염성능에 미달하였고 PMMA①은 넓은 면적에 고르게 탄화되었으나 PMMA②는 연소시 용융 적하가 발생하였다. 기능성 코팅 처리 제품의 경우 코팅층이 탄

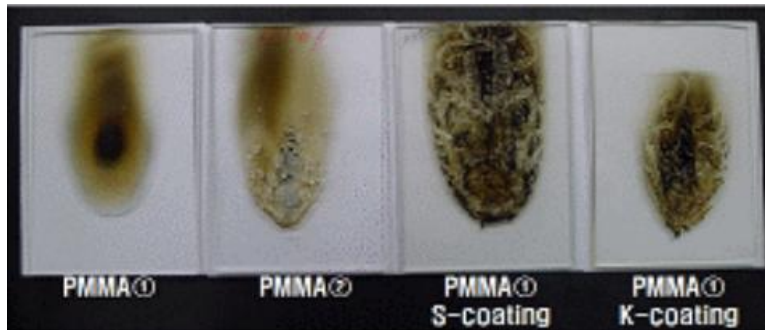
화되면서 탄화 형상이 원판과 차이를 보였다.

PC의 경우 3개의 시험체 중 1개만 잔염 기준 시간에 미달하였고 나머지는 모두 방염성능 기준을 만족하였다. 기능성 코팅처리 제품의 경우 탄화현상이 원판과 차이는 있지만, 방염성능결과는 비슷한 것으로 나타났다.

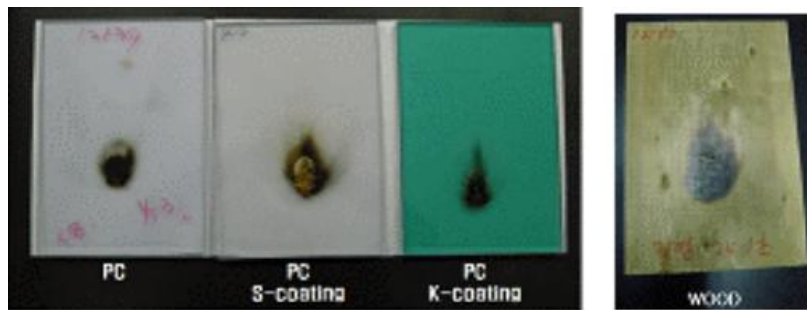
<표 3-2> 45° 연소시험 결과

구분		잔염시간(s)	잔신시간(s)	탄화면적(㎢)	탄화길이(cm)		
PMMA①		1	전소	전소	전소		
		2	전소	전소	전소		
		3	전소	전소	전소		
PMMA②	일반	1	192.8	0	54.1	10.6	
		2	전소	전소	전소	전소	
		3	전소	전소	전소	전소	
	S사 코팅	1	300이상	0	257.8	23.5	
		K사 코팅	1	90이상	-	90	16
			2	90이상	-	100	16
			3	90이상	-	110	16
PC	일반	1	6.2	0	16.0	5.5	
		2	4.3	0	12.3	4.3	
		3	1.8	0	12.6	4.4	
	S사 코팅	1	10	0	17	7	
		2	4	0	16	7	
		3	14	0	16	7	
	K사 코팅	1	0	0	18	6	
		2	1	0	18	6	
		3	0	0	17	6	
WOOD		1	26.4	0.0	35.1	9.0	
		2	24.1	0.0	32.6	8.6	
		3	0	10.1	8.6	7.1	





<그림 3-2> PMMA에 대한 45° 연소시험 후의 시료 상태



<그림 3-3> PC에 대한 45° 연소시험 후의 시료 상태

2. 콘칼로리미터 시험

콘칼로리미터 시험은 화재 진행 과정의 연소경로와 발열량을 시간에 따라 추적하는 장비로 시험실 환경은 온도 $23\pm 2^{\circ}\text{C}$, 상대습도 $50\pm 5\%$ 에서 수행되었다.

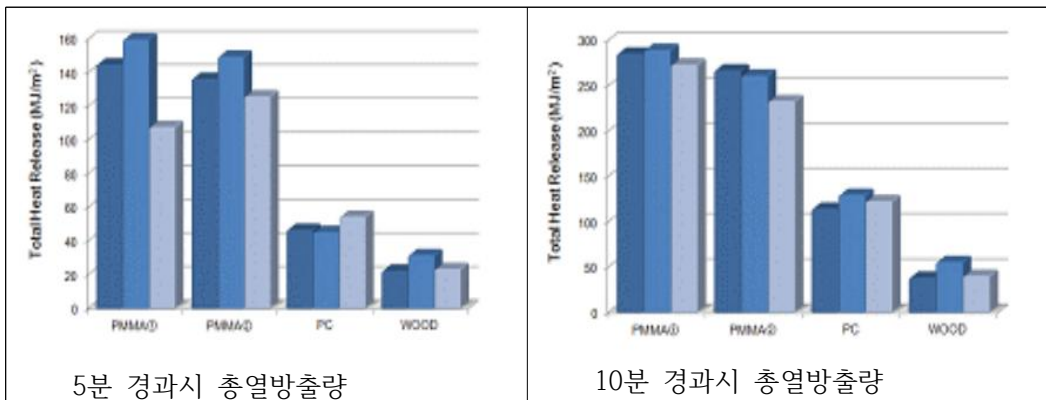
실제 화재에서 열 방출량을 파악하기 위해 PMMA 2종류, PC 1종류, 목재(방부 처리된 미송) 1종류에 대하여 KS F ISO 5660-1(연소성능시험-열방출률, 연기발생량, 질량감소율)에 따라 시험이 진행되었다.

<표 3-3> 콘 칼로리미터 시험용 시편

구분	PMMA①	PMMA②	PC	목재(미송)
시험편 규격(mm)	100×100×8	100×100×8	100×100×8	100×100×38
심재의 밀도(kg/m³)	1,185.6	1,174.5	1,173.3	713.2

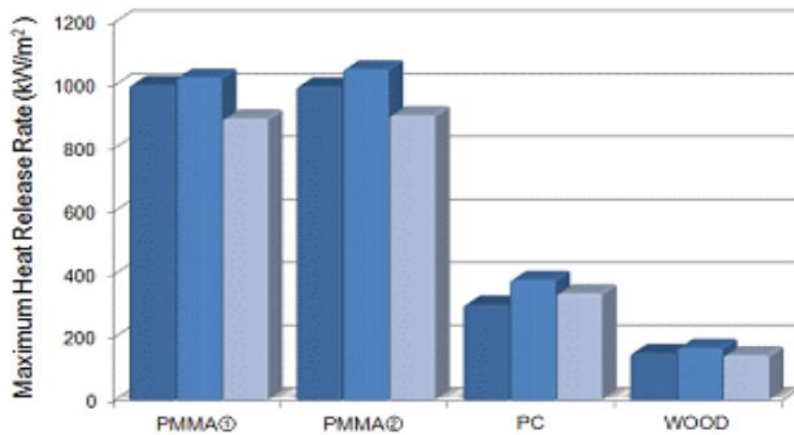
시험 결과 5분 경과시 총 열방출량은 PMMA①과 PMMA②는 총 열방출량이 107.8~159.8 MJ/m², 126.0~149.6 MJ/m²로 나타났고 PC는 45.3~54.5 MJ/m², 목재(미송)는 22.3~31.6 MJ/m²로 PMMA의 열방출률이 PC의 두 배, 목재의 5배 정도에 해당하여 화재시 훨씬 위험하다는 것을 알 수 있다.

10분 경과시 총열방출량은 PMMA①과 PMMA②는 총 열방출량이 273.1~289.3 MJ/m², 233.0~266.9 MJ/m²로 나타났고 PC는 114.2~129.6 MJ/m², 목재(미송)는 38.2~55.5 MJ/m²로 나타났다.



<그림 3-4> 콘 칼로리미터 시험에 의한 재료별 총열방출량

“건축물 마감재료 난연성능기준”에서는 KS F ISO 5660-1에 의한 가열시험에서 최대 열방출률을 8MJ/m² 이하를 요구하며 최대 열방출률은 10초 이상 연속으로 200kW/m² 을 초과하지 말 것을 요구하고 있다. 이 시험에서 목재를 제외한 모든 재료가 최대 열방출률 기준을 초과하며, 총열방출률 기준은 모든 재료가 초과함을 알 수 있다.



<그림 3-5> 콘 칼로리미터 시험에 의한 재료별 최대 열방출률

콘 칼로리미터 시험에서 발생한 연소가스는 CO, CO₂ 외의 가스는 검출되지 않았으며 다음<표 3-4>과 같다.

<표 3-4> 콘 칼로리미터 시험에서 발생한 연소가스의 농도

구분	PMMA①	PMMA②	PC	목재	비고
CO	109.15ppm	109.15ppm	109.15ppm	109.15ppm	최대값
CO ₂	109.15ppm	109.15ppm	109.15ppm	109.15ppm	최대값
NO, NO ₂	검출안됨	검출안됨	검출안됨	검출안됨	
SO ₂	검출안됨	검출안됨	검출안됨	검출안됨	
HCl, HCN	검출안됨	검출안됨	검출안됨	검출안됨	

3. 연기밀도시험

연기밀도 시험은 화재시 발생하는 연기의 양에 따라 빛의 투과율이 변화함을 이용하여 PMMA①와 PMMA② 그리고 PC를 ASTM E662에 의한 시험을 시행하였다. PMMA①와 PMMA②, PC 모두 8mm 두께의 방음판 재료를 75×75mm로 절단 가공하여 가염(flamming mode)과 비가염(non-flaming mode)

으로 시험하였다.

각 재료에 대해 ASTM E662에 의한 연기밀도 시험에 의하면 최대연기 밀도는 가염 조건하에서 PC가 432.9와 313.4로 가장 높게 나타났고, 비가염 조건하에서는 PMMA①이 56.2, 64.0, 64.0으로 높게 나타났다. 그러나 PMMA②와 PC의 경우 시험중 시료가 녹아내리는 것이 관찰되었다. 이러한 경우 즉, 수직시험 방법인 ASTM E662에 의한 시험에서 시료가 녹아내리는 경우 시료를 수평으로 설치하는 KS F ISO 5660-2에 의한 연기밀도를 측정할 것을 소방청고시 “방염성능기준”에서 정하고 있다.



<그림 3-6> ASTM E662에 의한 연기밀도 시험 중 녹아내린 시편

각 재료에 대하여 KS F ISO 5660-2에 의한 시험시 가염조건 하에서 최대 연기밀도는 PMMA①이 306.80~348.65, PMMA②가 295.25~393.83, PC의 경우 시험편 1에서만 924.00으로 높은 값을 나타냈고 비가염 조건하에서 최대연기 밀도는 PMMA①이 180.32~347.02, PMMA②가 548.14~660.89, PC는 182.33~260.33으로 나타났다.

<표 3-5> PMMA①의 ASTM E662에 의한 연기밀도 시험 결과

Property	flaming mode		Non flaming mode			Test Method
	1	2	1	2	3	
Maximum specific optical density	84.2	82.3	56.3	64.4	64.3	ASTN E662 2009(25kW/ m ²)
Time to Maximum specific density	357	442	1200	1200	1196	
Clear beam transmission	71.5	67.7	99.7	99.3	99.6	
Clear beam specific optical density	19.2	22.3	0.2	0.4	0.3	
Corrected Maximum specific optical density	65.0	60.0	56.2	64.0	64.0	

<표 3-6> PMMA②의 ASTM E662에 의한 연기밀도 시험 결과

Property	flaming mode		Non flaming mode			Test Method
	1	2	1	2	3	
Observations During Test	melted material overflowing the sample holder trough					ASTN E662 2009(25kW/ m ²)
Maximum specific optical density	24.2	24.5	35.9	22.7	18.8	
Time to Maximum specific optical density	1044	1110	1114	1200	1200	
Clear beam transmission	88.6	88.6	98.4	98	98.9	
Clear beam specific optical density	7.0	6.9	0.9	1.2	0.6	
Corrected Maximum specific optical density	17.2	17.5	35.0	21.5	18.2	

<표 3-7> PC의 ASTM E662에 의한 연기밀도 시험 결과

Property	flaming mode		Non flaming mode			Test Method
	1	2	1	2	3	
Observations During Test	melted material overflowing the sample holder trough					ASTN E662 2009(25kW/ m ²)
Maximum specific optical density	488.3	358.8	18.0	18.0	19.1	
Time to Maximum specific optical density	717	613	1200	1200	1200	
Clear beam transmission	38.0	45.2	99.9	100.0	100.0	
Clear beam specific optical density	55.4	45.5	0.1	0.0	0.0	
Corrected Maximum specific optical density	432.9	313.4	17.9	18.0	19.0	

<표 3-8> PMMA①의 KS F ISO 5660-2에 의한 연기밀도 시험 결과

구분	flaming mode			Non flaming mode			Test Method
	1	2	3	1	2	3	
두께(mm)	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	KS M ISO 5659-2(25kW /m ²)
가열 전 무게(g)	54.3	54.6	54.4	55.0	54.9	54.6	
가열 후 무게(g)	12.8	24.7	16.2	23.3	16.8	12.5	
가열감량(g)	41.5	19.9	38.2	32.7	38.1	42.1	
최대 연기밀도 (Max Ds)	393.83	311.50	306.80	180.32	347.02	285.86	

<표 3-9> PMMA^a의 KS F ISO 5660-2에 의한 연기밀도 시험 결과

구분	flaming mode			Non flaming mode			Test Method
	1	2	3	1	2	3	
두께(mm)	7.9	8.0	8.0	7.9	7.9	7.9	KS M ISO 5659-2(25kW /m ²)
가열 전 무게(g)	53.7	54.1	53.9	53.8	54.0	53.6	
가열 후 무게(g)	11.8	13.5	11.6	10.3	9.5	8.2	
가열감량(g)	41.9	40.6	42.6	43.5	44.5	45.4	
최대 연기밀도 (Max Ds)	348.65	295.25	336.70	548.14	598.69	660.89	

<표 3-10> PC의 KS F ISO 5660-2에 의한 연기밀도 시험 결과

구분	flaming mode			Non flaming mode			Test Method
	1	2	3	1	2	3	
두께(mm)	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	KS M ISO 5659-2(25kW /m ²)
가열 전 무게(g)	54.7	54.7	54.8	54.7	54.5	54.9	
가열 후 무게(g)	40.9	52.8	49.8	53.3	51.8	51.5	
가열감량(g)	13.8	1.9	5.0	1.4	2.7	3.4	
최대 연기밀도 (Max Ds)	924.00	176.59	117.13	182.33	261.58	263.30	

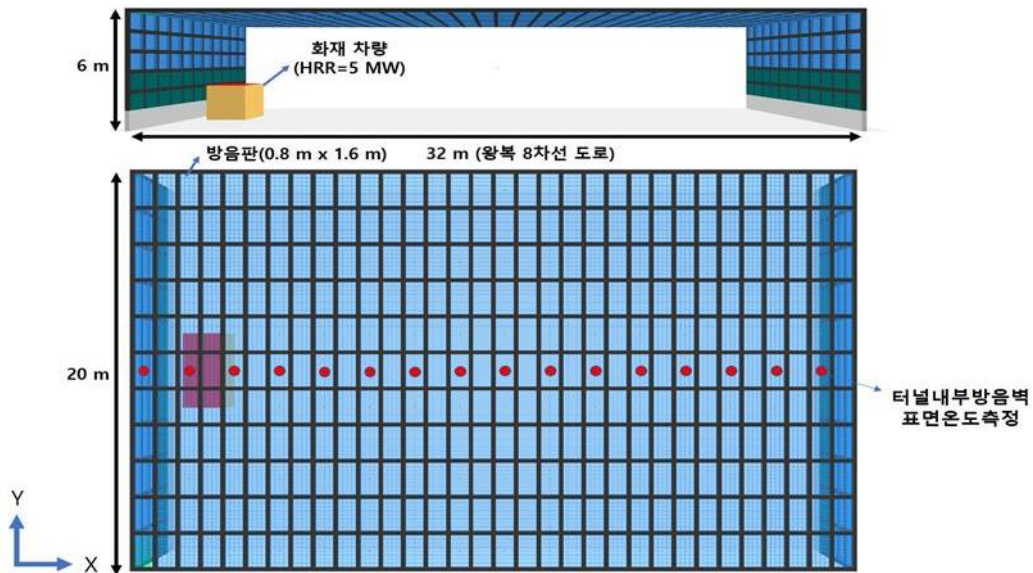
연소 독성지수 시험의 경우 CO, CO₂, NO_x 이외의 독성가스는 검출되지 않았다.

3.1.2 방음터널 화재 시뮬레이션 결과

방음터널 화재가 어떠한 특성을 가지고 전파되는지 건설기술연구원이 시뮬레이션을 수행하여 분석한 자료를 인용하여 방음터널 화재전파 특성을 분석하고자 하였다. 2022년 12월 29일 갈현 고가교 방음터널에 발생한 화재를 대상으로 모델링 하였으며 주요 사항은 다음 <표 3-11>과 같다.

<표 3-11> 화재 시뮬레이션 내용 요약

구분	모델링 내용
모델링 대상	왕복 8차선 방음터널, 폭: 32m 총길이: 840m 높이: 6m
입력변수	방음터널 사용재료, 바람의 속도
화재특성	폐기물 수집 짐게 트럭 엔진룸에서 화재발생 방음터널의 방음판으로 옮겨붙음
화재강도	짐게트럭에 대한 화재강도 5MW
기타	최초 화원이 최대열방출률까지 도달하는 시간은 고려하지 않음



<그림 3-7> 갈현 고가교 방음터널 화재모델링

본 연구의 화재모델링에서 주요 입력변수는 방음터널 사용재료와 바람의 효과이다. 대표적인 방음터널 사용재료인 PMMA, PC와 강화유리 중 PMMA는 인화점이 380℃이고 PC는 인화점이 약 500℃이다. 본 화재모델링의 경우 방음판의 표면 온도가 인화점에 도달시 열방출률 곡선에 따르도록 설정하여 화재전과를 확인하였다.

실제 갯현고가교 화재시 사고 현장에 바람이 불어 연기가 주위 바람으로 한쪽으로 기울어 흘러갔기 때문에 입력변수로 풍속을 1, 2, 3m/s로 적용하여 바람이 터널 내외부에 불 때와 터널 외부에만 불 때로 적용하여 모델링을 실시하였다.

<표 3-12> 화재 시뮬레이션 해석 조건

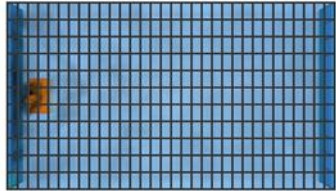
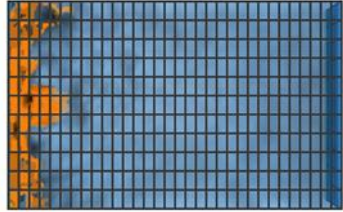
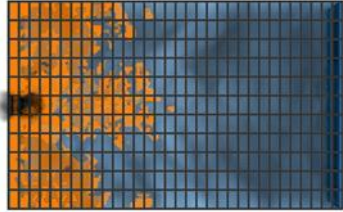
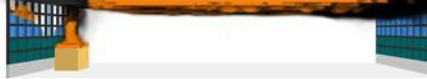
Case number	Simulation condition
test 1	PMMA_380도
test 2	PC_500도
test 3	PMMA + PC 1단
test 4	PMMA + PC 2단
test 5	PMMA + PC 3단
test 6	터널 및 상부 풍속 1m/s
test 7	터널 및 상부 풍속 2m/s
test 8	터널 및 상부 풍속 3m/s
test 9	상부 풍속 1m/s
test 10	상부 풍속 2m/s
test 11	상부 풍속 3m/s

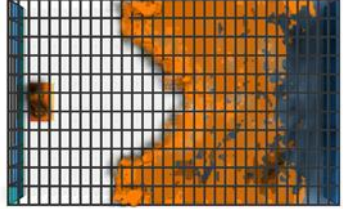
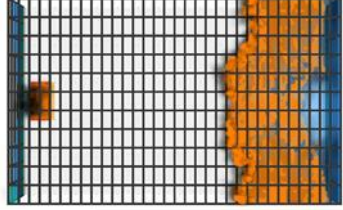
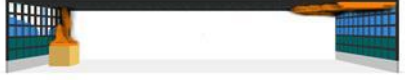
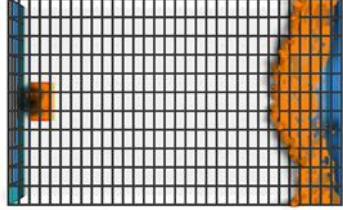
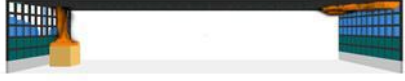
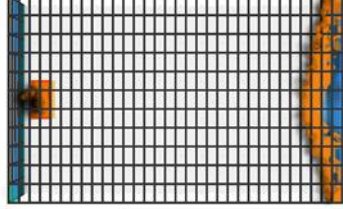
1. 방음판 재료가 PMMA일 때(Test 1)

집게 차량으로 인한 화재 발생 약 4분 후 천장 방음판에 불이 옮겨붙으며 6분 후 수직 상하 방향으로 화염이 전파되었다. 8분 후 수평 방향으로 화염전파가 시작되고 10분 후 방음판 천장이 모두 타고 불이 소멸하기 시작하였지만 용융상태로 불이 붙어 바닥으로 떨어지는 현상은 구현할 수 없었다.

12분 후부터 천장 대부분의 방음판에 화염전파가 발생하였고 20분 후 천장 대부분은 화재로 소멸되는 것으로 나타났다.



시간	정면	상부
2분		
6분		
8분		
10분		
12분		

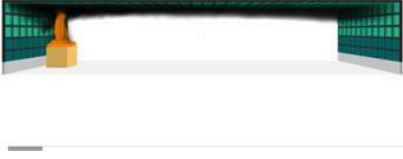
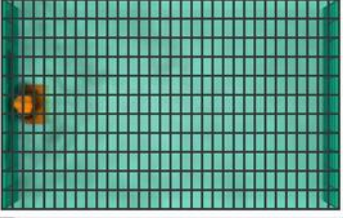
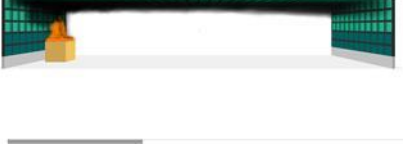
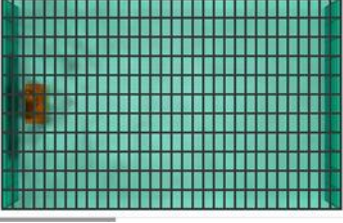
시간	정면	상부
14분		
16분		
18분		
20분		

<그림 3-8> PMMA 화염전파 형상

2. 방음판 재료가 PC일 때(Test 2)

방음판 재료가 PC일 경우 PMMA보다 작고 화재의 열방출률도 작고 인화점도 높아져 차량 화재 발생 후 5분이 지나면 차량 위쪽 방음판에 불이 옮겨붙

지만, PC 방음판의 열방출률이 작아 화염온도가 상승되지 않고 시간이 지나도 화염전파가 발생하지 않는 것으로 나타났다.

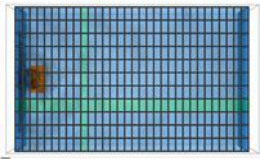
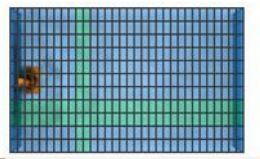
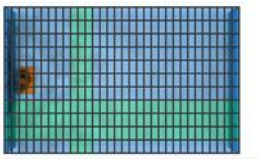
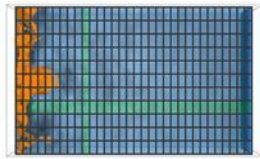
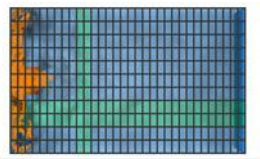
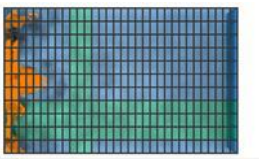
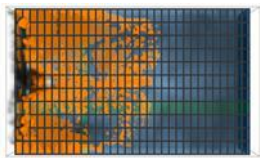
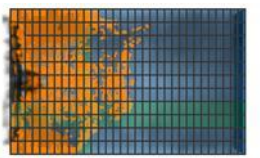
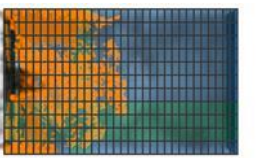
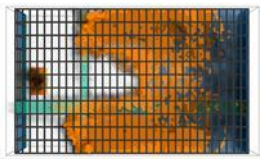
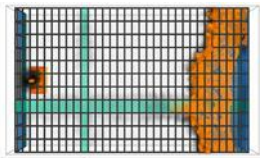
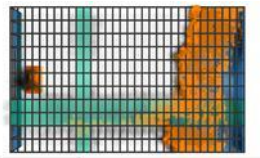
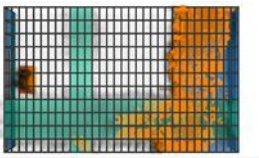
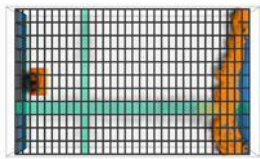
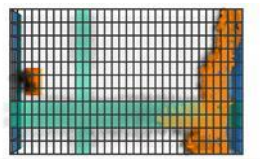
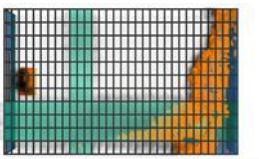
시간	정면	상부
5분		
20분		

<그림 3-9> PC 화염전파 형상

3. 방음판 재료로 PMMA와 PC를 일부 적용(Test 3, 4, 5)

방음터널 천장에 불이 옮겨붙을 경우 화재확산을 늦출 수 있는지를 확인하기 위해 방음벽 일부를 PC(그림에서 녹색 부분)를 적용하여 시뮬레이션을 시행하였다. 화재 발생 후 약 10분까지는 화염전파 형상이 PMMA 재료만 적용할 경우와 유사하나 PC 재료를 적용한 면적이 클수록 동일한 시간대에서 화염전파 면적(그림에서 주황색)이 작은 것을 알 수 있다.



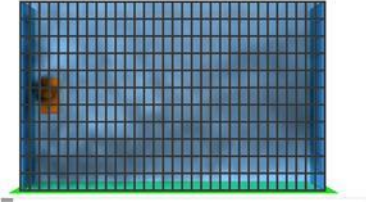
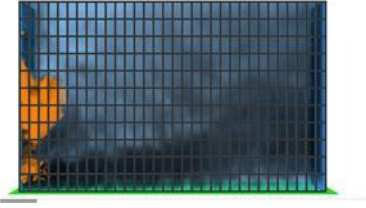
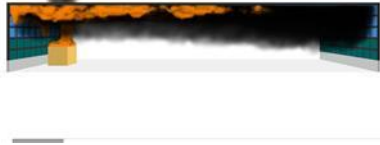
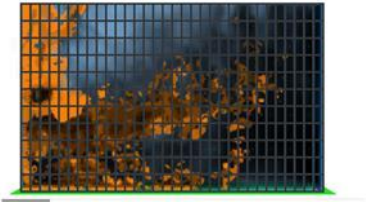
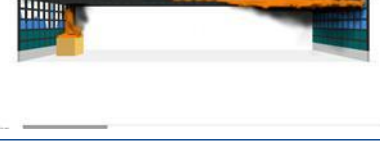
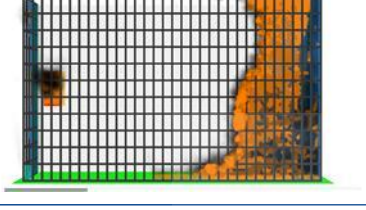
시간	Test 3	Test 4	Test 5
2분			
6분			
10분			
14분			
18분			
20분			

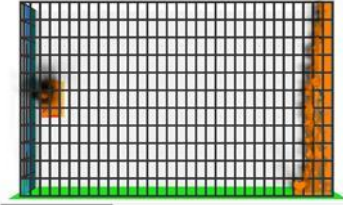
<그림 3-10> 방음벽 재료 일부를 PC 적용시 화염전파 형상

4. 터널 내외부에 바람이 불 때(Test 6, 7, 8)

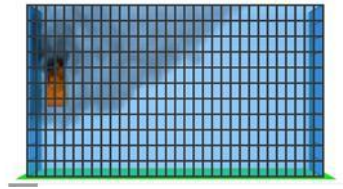
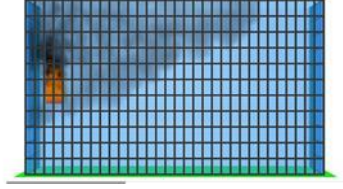
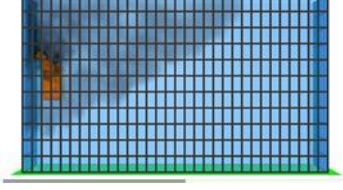
터널 내외부에 1m/s의 바람이 불 경우 8분 후 천장의 방음벽 전체로 빠르게 화재가 전파되었고 14분 후 천장 절반이 소실되었으며 18분이 지나자 천장 대

부분이 소실되었다. 약한 바람이 불 경우 바람이 부는 방향으로 빠르게 화염이 전파됨을 알 수 있다.

시간	정면	상부
2분		
6분		
8분		
12분		
14분		

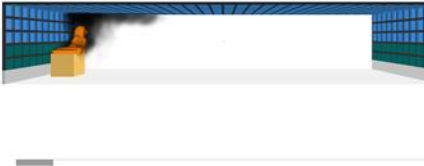
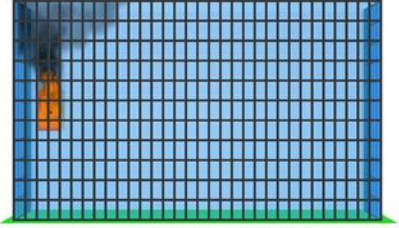
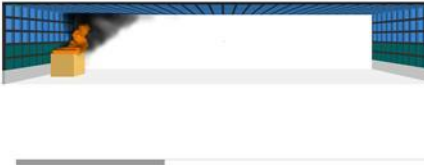
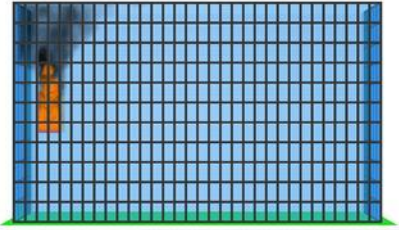
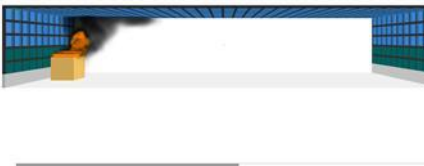
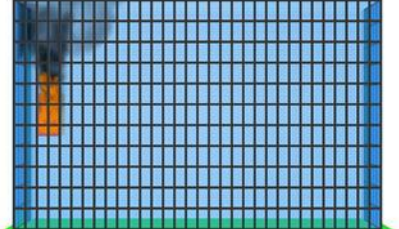
시간	정면	상부
20분		

<그림 3-11> 터널 내외부에 1%의 바람이 불 때 화염전파 형상

시간	정면	상부
5분		
20분		
30분		

<그림 3-12> 터널 내외부에 2%의 바람이 불 때 화염전파 형상

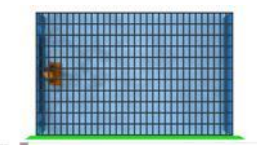
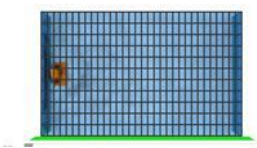
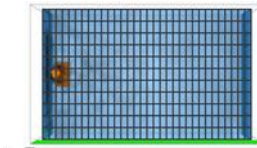
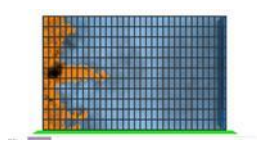
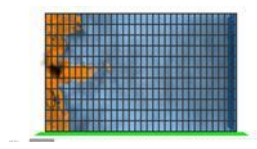
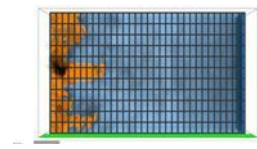
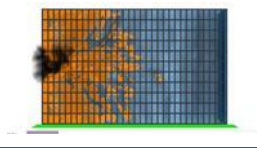
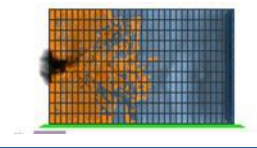
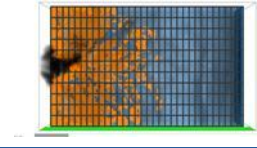
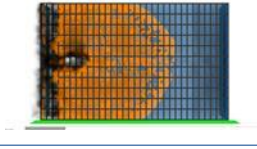
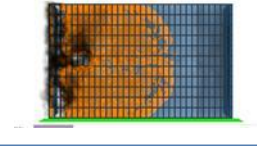
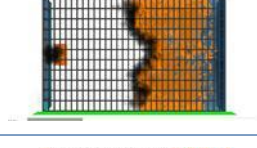
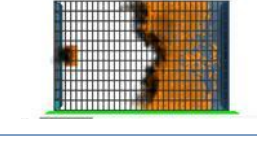
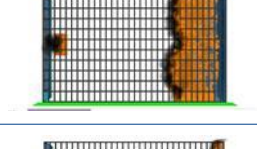
풍속이 2%와 3%의 경우 화염이 바람과 같은 방향으로 기울어져 천장과 벽 부분으로 화염이 전파되지 않았다.

시간	정면	상부
5분		
20분		
30분		

<그림 3-13> 터널 내외부에 3m/s의 바람이 불 때 화염전파 형상

5. 터널 외부에서 바람이 불 때(Test 9, 10, 11)

화염은 터널 내부에서 전파가 대부분 이루어지므로 터널 외부에만 바람이 부는 경우 풍속과 관계없이 전파 형상은 비슷하였다. 천장이 왼쪽 끝단에서 소실되고 천장까지 올라가지만, 풍속은 화염전파에 큰 영향은 없는 것으로 나타났다.

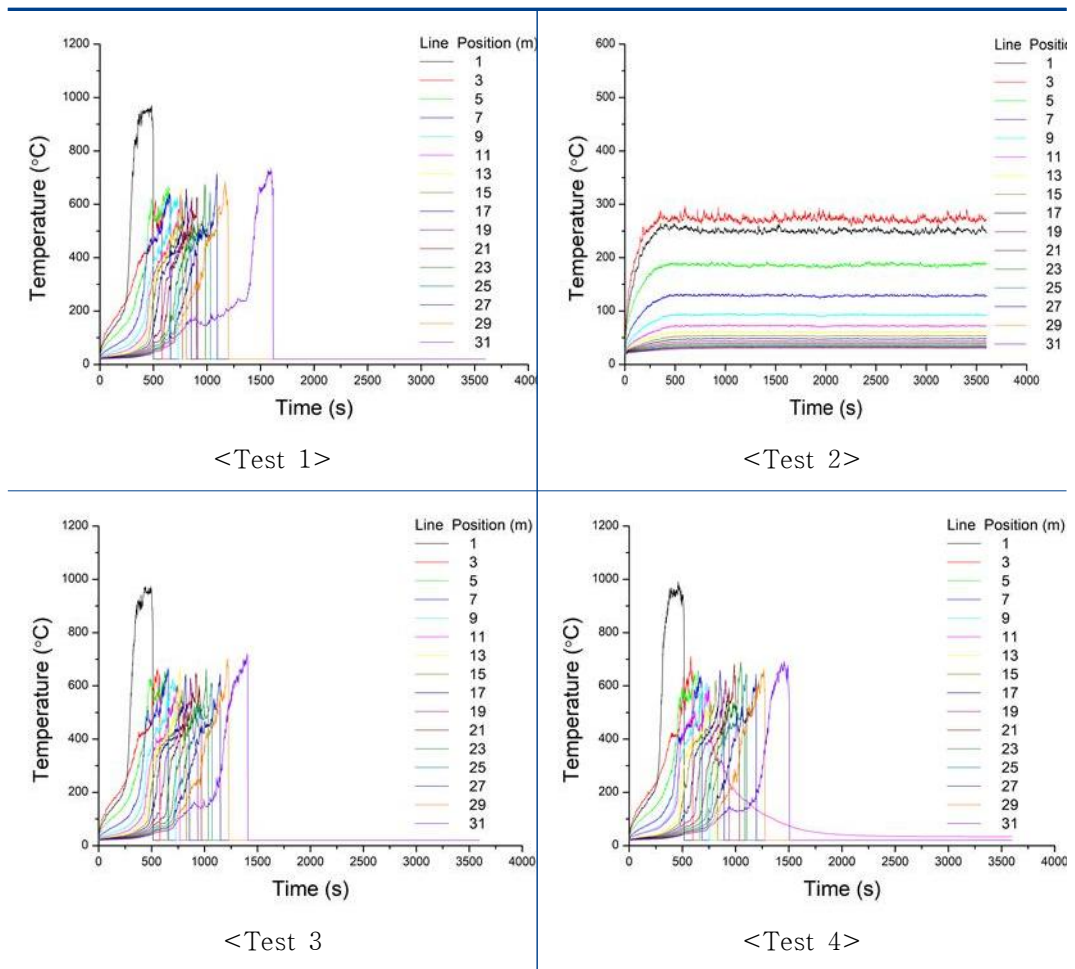
시간	풍속		
	1㎞	2㎞	3㎞
2분			
6분			
8분			
10분			
14분			
16분			
20분			

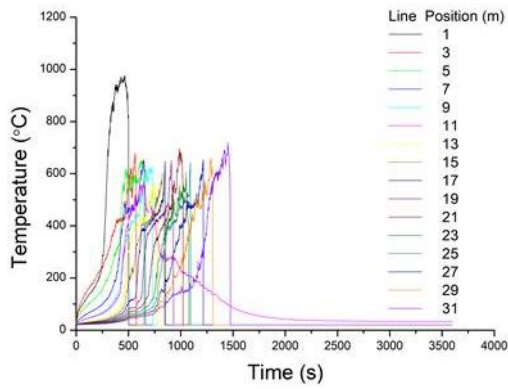
<그림 3-14> 터널 외부에 바람이 불 때 화염전파 형상

6. 방음벽의 온도 분포

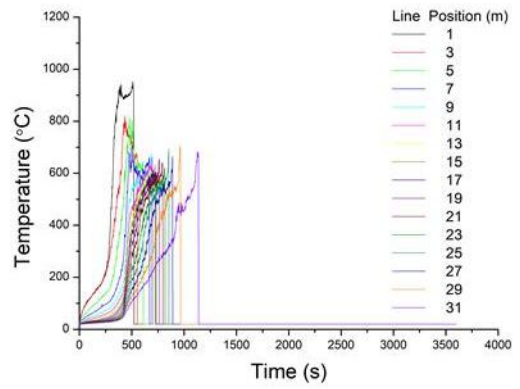
방음벽의 온도 분포는 <그림 3-7>에 표시된 방음터널 내부 방음벽 표면에서 측정된

것으로 바닥으로부터 1m 위치에서 측정하여 실제 위치와 유사한 위치로 선정하였다. 아래 온도 분포곡선 그림에서 온도 곡선은 화재가 전파됨에 따라 서서히 증가하다가 방음판이 화재로 소실되어 순간적으로 급격히 감소하게 된다. 또한 방음판에 화염전파가 이루어지지 않는 상황에서도 터널 내부의 고온 연기 층에 의해 일정온도를 형성하고 있다.

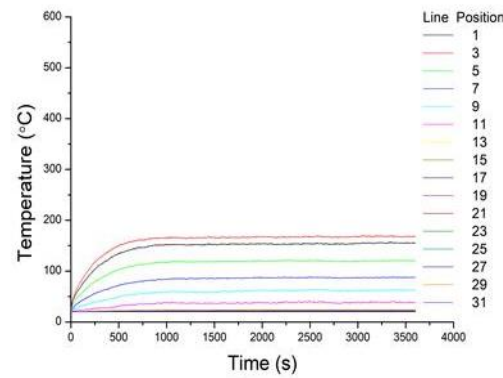




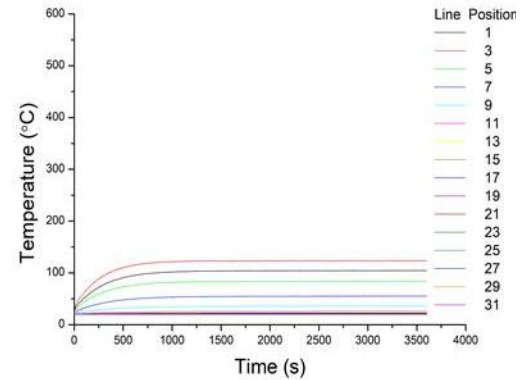
<Test 5>



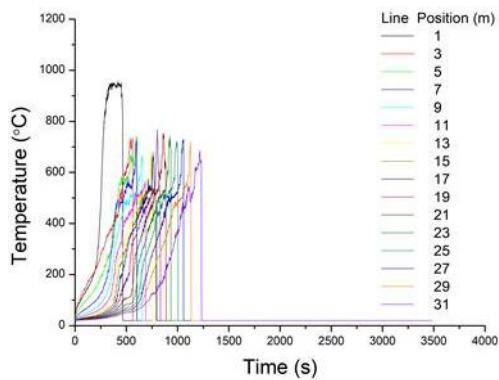
<Test 6>



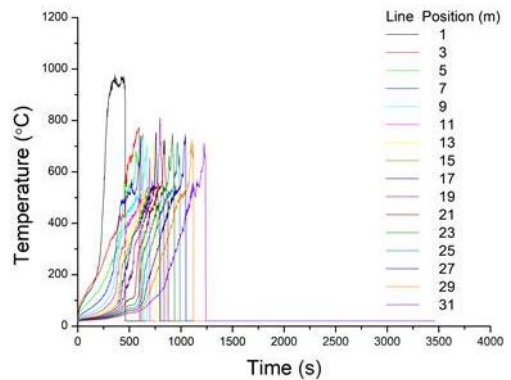
<Test 7>



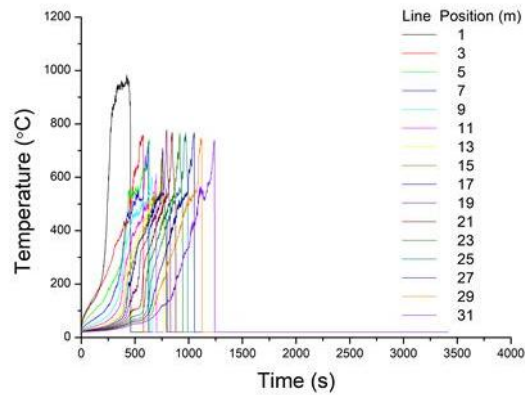
<Test 8>



<Test 9>



<Test 10>



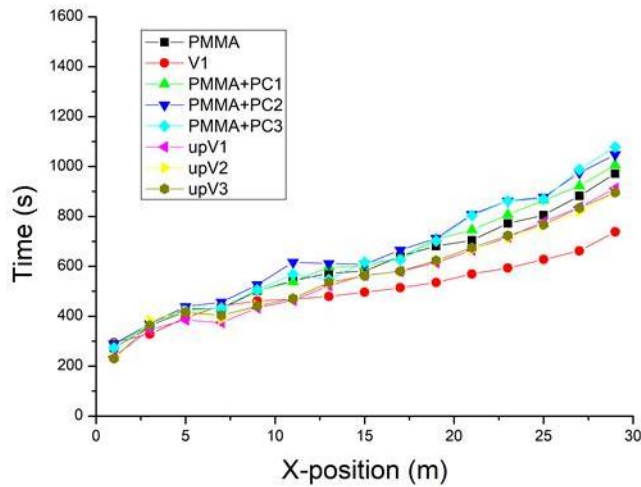
<Test 11>

<그림 3-15> 각 조건별 X 방향 온도 분포

7. 화염 전파 속도

화염전파가 시작되는 시간을 X방향 위치에 따라 계산하여 화염전파속도를 도출하였고 터널 내부에 1%의 풍속으로 바람이 불 때 천장 방음벽에 빠르게 화염전파가 발생하였다.

방음터널 외부에만 바람이 불 경우 풍속과 관계없이 전파속도는 비슷하였지만 바람이 불지 않는 경우보다는 화염전파 속도가 빨랐다. 또한 천장 방음벽 일부에 PC 구조가 적용된 경우 화염전파속도는 느려짐을 알 수 있었다.



<그림 3-16> 화염 전파 속도

3.1.3 방음터널의 화재강도 및 화재하중 분석

화재강도와 화재하중은 화재가혹도를 결정하는 요소로 식(1)과 같이 화재가혹도란 화재가 발생한 화재실에서 화재에 의해 발생하는 최고온도와 해당 온도가 유지되는 지속시간의 곱으로 정의된다.

$$\text{화재가혹도} = \text{최고온도} \times \text{지속시간} \text{-----(1)}$$

여기서 최고온도는 화재강도와 관련이 있고 지속시간은 화재하중과 관련이 있다.

일반적으로 화재 강도란 단위 시간당 축적되는 열의 양으로 단위는 kW며 화재 강도의 주요소로 가연물의 연소열, 가연물의 비표면적, 공기의 공급, 화재실의 벽이나 천장 바닥의 단열성을 들 수 있다.

화재 강도가 클수록 화재실에 축적되는 열로 인한 온도 상승이 빠르게 일어나고 전도에 의한 플래시오버(Flash over)가 빠르게 발생하게 된다. 또한, 화재 강도가 높을수록 축적되는 열로 인하여 온도 상승률이 가파름과 동시에 화

재실의 최고온도도 같이 상승하게 된다.

화재하중이란 화재실의 바닥면적당 가연물질의 양을 의미하며 다음 식(2)와 같다.

$$\text{화재하중} = \frac{\sum G_i H_i}{H \cdot A} = \frac{\sum Q}{4,500A} \text{-----} (2)$$

G_i : 가연물별 질량(kg)

H_i : 가연물별 단위발열량(kcal/kg)

H : 목재의 단위발열량(kcal/kg) (4,500kcal/kg)

A : 화재실의 면적

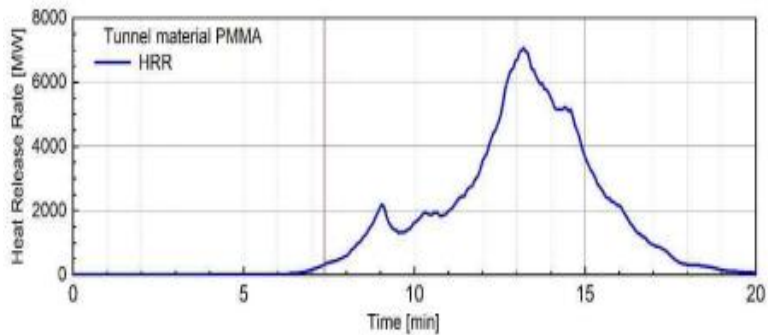
가연물마다 목재의 발열량을 기준으로 발열량을 비교한 후 질량에 가중치를 두어 적용한다. 화재하중 값으로 특정소방대상물에 화재가 발생했을 때 연소할 수 있는 가연물의 총량을 파악하며 이는 화재의 규모를 판단하는 척도이다.

방음터널의 재료 중 PMMA의 화재하중은 다음 식(3)과 같다.

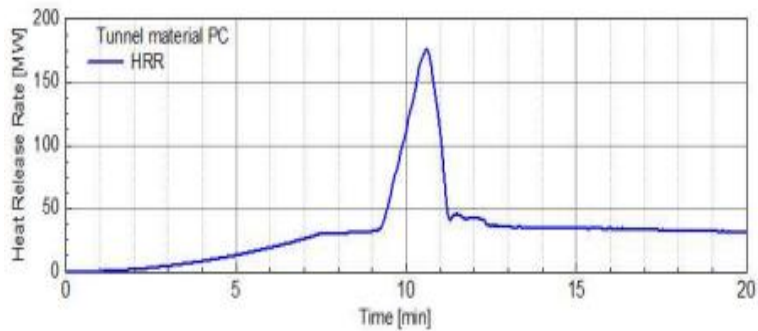
$$\text{화재하중} = \text{가연물의 체적(m}^3\text{)} \times \text{밀도(kg/m}^3\text{)} \times \text{발열량(kJ/kg)} \text{----} (3)$$

PMMA의 경우 100m 기준으로 1,065GJ/100m의 발열량이 발생하며 PC의 경우 1,124GJ/100m가 발생한다. 다음은 PMMA와 PC의 화재성장곡선이다.





<그림 3-17> PMMA의 화재성장곡선



<그림 3-18> PC의 화재성장곡선

PMMA와 PC의 재료에 따른 화재를 비교해 보면 다음 <표 3-13> 과 같다.

<표 3-13> 재료에 따른 비교

방음판 재료	천정에 구멍이 뚫리는 시간(sec)	최대화재강도 (MW)	최대화재강도 도달시간(sec)	화재지속시간 (분)
PMMA	442	7,070	762	20
PC	632	176	637	13

위 표에 의하면 최대화재 강도가 PMMA의 경우 7,070MW이고 PC의 경우

176MW으로 나타나 PMMA의 경우가 PC의 경우보다 약 40배나 화재 강도가 큰 것으로 나타났다.

3.1.4 방음터널의 화재강도, 화재하중 및 시뮬레이션 비교 분석

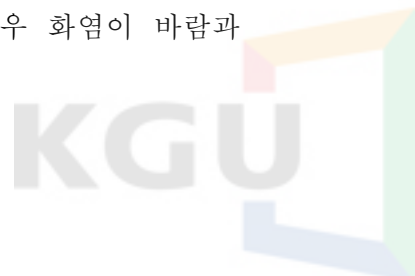
본 논문에서는 실제 갯현고가교 화재시 화재양상에 대한 정확한 데이터를 구하기 어려우므로 왕복 8차선이며 방음터널의 폭이 32m, 총길이는 840m, 높이는 6m인 방음터널을 건설기술연구원에서 모델링하여 얻은 결과를 이용하여 방음터널 사용재료와 바람의 속도가 화재에 미치는 영향을 분석하였다.

실제 갯현고가교 화재시 집게트럭에서 최초 발화 후 약 22분이 경과하여 대응 1단계를 발령하였고 방음터널 840m 중 650m가 전소되었는데 화재지속시간은 2시간이었다.

집게트럭에 대한 화재강도 5MW를 적용하여 PMMA는 인화점 380℃, PC는 인화점이 약 500℃에 도달했을 때 열방출률 곡선에 따르도록 설정하여 시뮬레이션한 결과 방음판 재료가 PMMA일 때 화재 발생 약 4분 후 천장 방음판에 불이 옮겨붙으며 12분 후부터 천장 대부분의 방음판에 화염전파가 발생하였고 20분 후 천장 대부분은 화재로 소멸되는 것으로 나타났다. 방음판 재료가 PC일 경우 화재 발생 후 5분이 지나면 차량 위쪽 방음판에 불이 옮겨붙지만, PC 방음판의 열방출률이 작아 화염온도가 상승되지 않고 시간이 지나도 화염전파가 발생하지 않는 것으로 나타났다.

방음판 재료로 PMMA와 PC를 일부 적용한 경우 화재 발생 후 약 10분까지는 화염전파 형상이 PMMA 재료만 적용할 경우와 유사하나 PC 재료를 적용한 면적이 클수록 동일한 시간대에서 화염전파 면적이 작은 것을 알 수 있었다.

터널 내외부에 1㎥의 바람이 불 경우 8분 후 천장의 방음벽 전체로 빠르게 화재가 전파되었고 14분 후 천장 절반이 소실되었으며 18분이 지나자 천장 대부분이 소실되었다. 약한 바람이 불 경우 바람이 부는 방향으로 빠르게 화염이 전파됨을 알 수 있었다. 하지만 풍속이 2㎥와 3㎥의 경우 화염이 바람과



같은 방향으로 기울어져 천장과 벽 부분으로 화염이 전파되지 않았다.

터널 외부에서 바람이 불 때 화염은 터널 내부에서 전파가 대부분 이루어지므로 터널 외부에만 바람이 부는 경우 풍속과 관계없이 전파 형상은 비슷하였다. 천장이 왼쪽 끝단에서 소실되고 천장까지 올라가지만, 풍속은 화염전파에 큰 영향은 없는 것으로 나타났다.

따라서 바람의 영향을 분석하면 터널 내부에 1㎧의 풍속으로 바람이 불 때 천장 방음벽에 빠르게 화염전파가 발생하였고 방음터널 외부에만 바람이 불 경우 풍속과 관계없이 전파속도는 비슷하였지만 바람이 불지 않는 경우보다는 화염전파 속도가 빨랐다.

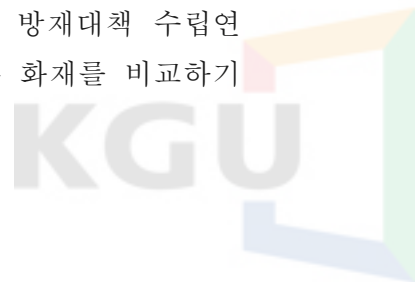
다음은 시뮬레이션 결과를 <표 3-14>에 나타내었다.

<표 3-14> 시뮬레이션 결과 비교

구분		내용
갈현고가 방음터널 실제 화재		- 집게트럭에서 최초 발화 후 약 22분이 경과하여 대응 1단계를 발령 - 방음터널 840m 중 650m가 전소 - 화재지속시간은 2시간
시 물 레 이 션	PMMA	- 인화점 380℃ - 화재 발생 약 4분 후 천장 방음판에 불이 옮겨붙음 - 12분 후부터 천장 대부분의 방음판에 화염전파가 발생 - 20분 후 천장 대부분은 화재로 소멸
	PC	- 인화점이 약 500℃ - 화재 발생 후 5분후 차량 위쪽 방음판에 불이 옮겨붙음 - PC의 열방출률이 작아 화염온도가 상승되지 않음 - 시간이 지나도 화염전파가 발생하지 않음
	PMMA+PC	- 화재 발생 후 약 10분까지는 화염전파 형상이 PMMA 재료만 적용할 경우와 유사 - PC 재료를 적용한 면적이 클수록 동일한 시간대에서 화염전파 면적이 작음
	바람의 영향	- 내외부에 1%의 바람이 불 경우 8분 후 천장의 방음벽 전체로 빠르게 화재가 전파 - 14분 후 천장 절반이 소실되었으며 18분이 지나자 천장 대부분이 소실 - 방음터널 외부에만 바람이 불 경우 풍속과 관계없이 전파속도는 비슷 - 바람이 불지 않는 경우보다는 화염전파 속도가 빠름

방음터널의 화재강도와 화재하중은 화재가혹도를 결정하는 요소이며 화재강도란 단위 시간당 축적되는 열의 양으로 단위는 kW며, 화재하중이란 화재실의 바닥면적당 가연물질의 양을 의미한다.

한국도로공사의 “고속도로 터널형 방음시설 화재안전 및 방재대책 수립연구”에 의하면 화물차 화재성장곡선을 적용하여 재료에 따른 화재를 비교하기



위해 시뮬레이션했을 때 PMMA와 PC의 화재하중을 살펴보면 PMMA의 경우 100m 기준으로 1,065GJ/100m의 발열량이 발생하며 PC의 경우 1,124GJ/100m가 발생한다.

하지만 최대화재 강도가 PMMA의 경우 7,070MW이고 PC의 경우 176MW으로 나타나 PMMA의 경우가 PC의 경우보다 약 40배나 화재 강도가 큰 것으로 나타났다.

따라서 PMMA와 PC의 화재하중은 큰 차이가 없지만 화재강도는 PMMA의 경우가 PC의 경우보다 약 40배나 크므로 PMMA의 화재지속시간이 길고 화재가혹도 또한 큰 것으로 나타났다.

<표 3-15> PMMA와 PC의 화재하중과 화재강도 비교

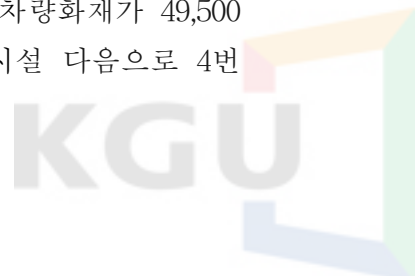
방음판 재료	화재하중	최대화재강도 (MW)	화재지속시간 (분)	질량감소율 (%)
PMMA	1,065GJ/100m	7,070	20	약300℃ 이후 90
PC	1,124GJ/100m	176	13	약450℃ 이후 40
유리	-	-	-	약800℃ 이후 5

3.2 방음터널 사고사례 분석

3.2.1 국내 방음터널 사고사례

국토부의 조사에 의하면 '23. 1월 기준으로 전국에 170개의 방음터널과 12,118개의 방음벽이 설치되어 운영하고 있다. 방음터널 중 밀폐형 구조가 110개로 전체의 65%를 차지하고 있다. 재료 기준으로 PMMA는 58개소(34%)이고 PC는 87개소(51%), 유리 등이 25개소(15%)로 조사 되었다.

소방청의 화재통계연감에 따르면 2012년부터 2021년까지 차량화재가 49,500여 건이며 이는 전체화재의 12%에 해당한다. 도로가 산업시설 다음으로 4번



째 화재가 자주 발생하는 장소이므로 방음터널 화재는 방음터널의 설치 갯수 증가, 연장구간의 증가로 그 빈도가 더욱 증가할 것이다.

1. 과천 갈현 고가교 방음터널에 화재

최근 '22년 12월 29일 제2 경인고속도로 과천 갈현 고가교 방음터널에 화재가 발생하였다.

(1) 화재발생 장소 현황

- 발생장소 : 제2 경인고속도로 과천 갈현 고가교
- 발생일시 : 2022년 12월 29일
- 발화장소 : 폐기물을 싣고 가던 5t 폐기물 짐게 트럭

(2) 화재원인 및 연소확대 경로

- 화재 원인 : 터널 시작 지점 280m 지점에서 폐기물 짐게 트럭 엔진에서 발화
- 연소 확대 : 소화기로 초기소화 실패 후 트럭 뒤의 폐기물로 불이 옮겨붙으며 PMMA 소재인 방음벽과 터널 천장까지 빠르게 확산



<그림 3-19> 갈현고가교 방음터널 화재

이 화재는 폐기물을 싣고 가던 5t 폐기물 짐게 트럭에서 시작되었는데 터널 시작 지점으로부터 280m 지점에서 엔진에서 불이나 정차하였다. 운전자가 소화기로 진화를 시도하였지만 꺼지지 않고 트럭 뒤의 폐기물로 옮겨붙으며 PMMA 소재인 방음벽과 터널 천장까지 빠르게 확산하였다. 이 화재로 5명이 사망하고 49명의 사상자가 발생하였고 소방당국은 대응 2단계를 발령하고 소방차와 화재 진압장비 등 77대를 투입하여 화재 발생 2시간 만에 화재를 진압하였다.



<그림 3-20> 갈현고가교 방음터널 화재진압 후 모습

2. 수원-용인 방음터널 화재

신대호수 사거리에 있는 수원-용인 방음터널 화재는 '20년 8월 20일 오전 4시경에 주행 중이던 BMW 승용차에서 화재가 발생하였다.



<그림 3-21> 수원 - 용인 방음터널 화재

(1) 화재발생 장소 현황

- 발생장소 : 신대호수 사거리에 있는 수원 - 용인 방음터널
- 발생일시 : 2020년 8월 20일 오전 4시경
- 발화장소 : 주행 중이던 BMW 승용차에서 화재가 발생

(2) 화재원인 및 연소확대 경로

- 화재 원인 : 방음터널을 주행하던 BMW 승용차에서 화재가 발생
- 연소 확대 : BMW 승용차 화재가 차량이 전소되며 PMMA 소재 방음터널에 옮겨 붙으며 터널 50m가량 태움

불에 의해 차량은 전소되고 방음터널 벽으로 확대되어 터널 500m 구간 중 50m가량을 태우고 40분 만에 진화되었으나 PMMA소재 터널의 화재 구간은 뼈대만 앙상하게 남았으나 현재는 복구되었다. 이 화재로 운전자가 다치고 60억 이상의 복구 비용이 발생하였다.



<그림 3-22> 수원 - 용인 방음터널 화재진압 후 모습

3. 청주 개신 고가 방음터널 화재

2022년 2월 17일 청주시 흥덕구 충북대병원 앞 개신 고가도로에서 SM3 차량이 운전 부주의로 중앙선을 넘어 마주 오던 코란도 승용차와 충돌하여 화재가 발생하였다. 이 사고로 두 차량의 운전자가 다치고 방음터널 일부가 화재로 손상되었으나 30분 만에 초기 진화되어 대형화재로 확대되지는 않았다.



<그림 3-23> 청주개신고가 방음터널 화재

(1) 화재발생 장소 현황

- 발생장소 : 청주시 흥덕구 충북대병원 앞 개신고가도로
- 발생일시 : 2022년 2월 17일
- 발화장소 : 운전 부주의로 중앙선을 넘어 마주 오던 코란도 승용차와 충돌한 SM3차량

(2) 화재원인 및 연소확대 경로

- 화재 원인 : 운전 부주의로 중앙선을 넘어 마주 오던 코란도 승용차와 충돌한 SM3차량에서 화재가 발생
- 연소 확대 : PC구조 방음터널 일부가 화재로 손상되었으나 30분 만에 초기 진화

청주 개신고가 방음터널은 재질이 PC구조여서 화재가 크게 확대되지 않았을 것으로 추정된다.

3.2.2 국외 방음터널 사고사례

해외의 경우도 방음터널의 성격상 빛의 투과를 위해 투명방음판을 사용하는 경우가 있긴 하지만 선진국의 경우 강화유리를 사용하여 설치하고 있다.

1. 중국의 취큐오 후 방음터널의 화재

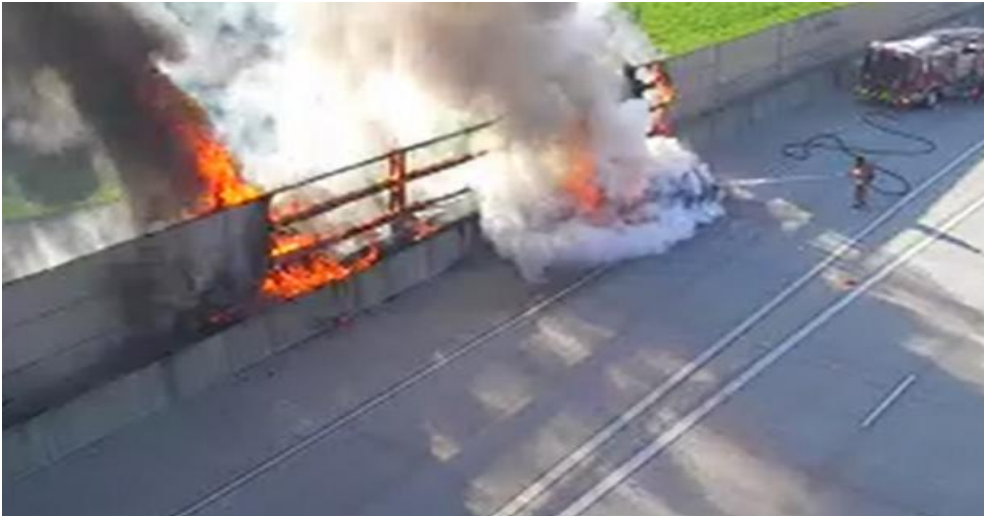
2015년 12월에 발생한 중국의 취큐오 후 방음터널의 화재는 승용차 1대에 화재가 발생해 그 화염이 벽 측면과 천장면까지 옮겨붙어 천장 전체로 확산하여 PC가 녹아 인근 도로에 불뚱이 떨어지며 확산하였다. 녹아서 불이 붙어 떨어지는 PC 가연물에 의해 인근 도로의 자동차까지 화재가 확산하여 피해가 커졌다.



<그림 3-24> 중국의 취큐오 후(水果湖) 터널형 방음시설의 내부

2. 미국 쿠파운티 로스웰 로드 남쪽 I-75 고속도로 화재

2023년 9월 18일 미국 쿠파운티 로스웰 로드 남쪽 I-75 고속도로에서 저녁 퇴근길이 절정에 달할 때 차량 화재가 발생해 방음벽에 옮겨붙어 소방관들이 화재를 진압하였다.



<그림 3-25> 미국 쿡카운티 로스웰 로드 남쪽 I-75 고속도로 화재

3.3 방음터널의 문제점 도출

3.3.1 방음터널 사용재료에 따른 문제점

국내 방음터널 대부분은 PMMA와 PC로 이루어진 투명방음판과 철판프레임을 사용하여 설치되고 있다. 이러한 방음터널의 구조는 소음을 차단하기에는 효과적이지만 투명방음판의 물리적, 화학적 특성과 강구조물의 특성상 화재 성장에 따른 내화성능이 거의 없어 화재에 매우 취약하다.

갈현고가교 방음터널에 사용된 PMMA의 경우 내열성이 95℃이고 224℃에서 녹기 시작해 280℃가 되면 불이 붙을 수 있다. PC는 내열성이 120℃이고 230℃에서 녹기 시작해 450℃가 되면 불이 붙을 수 있다.

강화유리의 경우 용융점이 650℃이고 불연재여서 가연성재료인 PMMA와 PC보다는 화재위험도는 낮으나 가격이 비싸 세 가지 투명방음판 중 사용률이 15%로 가장 적게 사용되었다. 또한 온도변화 때문에 깨지기 쉽고 깨진 유리가 낙하하므로 구조물의 높이가 6m 전·후인 점을 고려하여 방음판을 고정하

는 고정장치, 고정구, 고정틀에 대한 온도 기준이 필요한 실정이다.

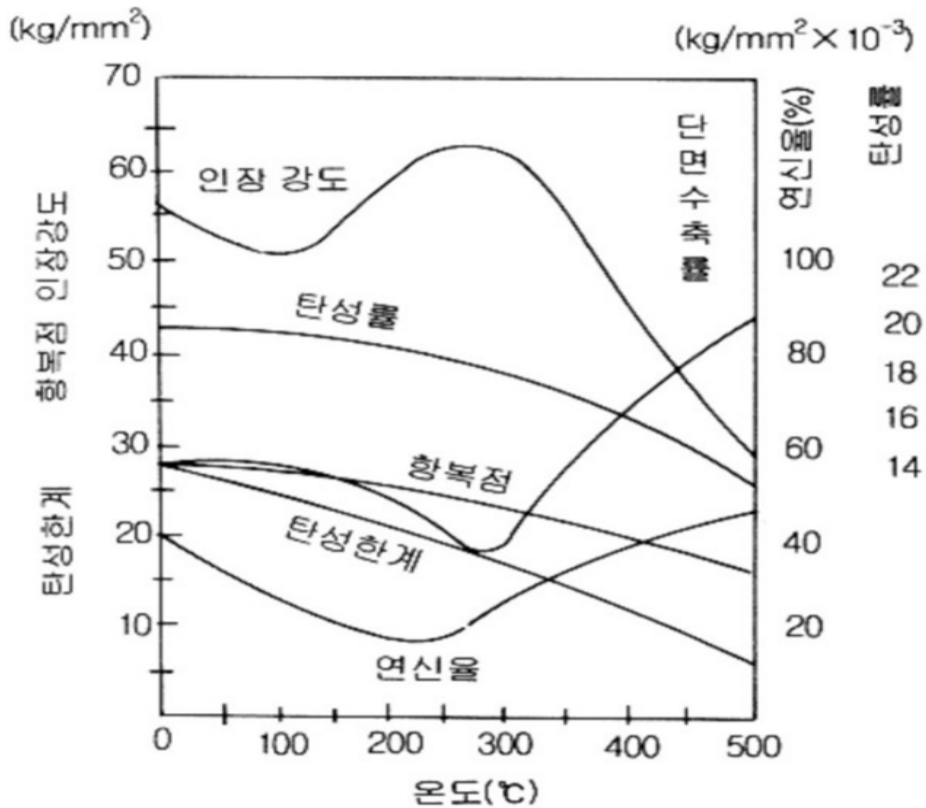
터널 내 화재발생시 안전성 확보를 위해 PIARC(국제상설도로회의)에서 제시한 터널의 벽과 천장에 대한 평가기준은 다음 <표 3-16>와 같다.

<표 3-16> 터널의 벽과 천장에 대한 온도 평가기준

온도(°C)	대상	특징
400	승용차 화재	만일 화염이 벽에 도달하면 더욱 높아질 것임
700	버스나 소형 화물차	만일 화염이 벽에 도달하면 더욱 높아질 것임
1,350	연소물품을 가진 HGV	가솔린 탱크 차량은 아님
1,350	가솔린 탱크 차량	일반적인 경우
1,400	가솔린 탱크 차량	심각한 경우, 배수가 불량한 터널의 붕괴 방지 목적

일반적으로 도로터널 화재는 화재 발생 후 5분이 지나면 급격히 온도가 상승하여 최성기 온도에 도달하고 화재 지속시간도 120분에 달할 정도로 길다. 또한 소형 승용차 화재와 달리 대형차나 화물차의 경우 최고온도가 1,000℃에 달하게 된다.

일반 도로 터널 화재와는 좀 다르지만, 방음터널의 경우 철골이 노출되어 있어 강재의 강도가 낮으면 붕괴의 위험이 존재한다. 또한 PMMA와 PC의 온도특성은 PIARC 온도 기준에 훨씬 미치지 못함을 알 수 있다.



<그림 3-26> 온도에 따른 탄소강의 기계적 성질

화재시 노출된 철골구조에 화염이 닿으면 철골의 인장강도는 <그림 3-26>에서 보는 바와 같이 100°C에서부터 떨어지며 500°C가 되면 인장강도는 원래 인장강도의 1/2이 되어 구조체로서 역할을 하지 못하고 붕괴할 수 있음을 알 수 있다.

국가건설기준 표준시방서에서 교통소음 저감을 위해 설치되는 터널형 방음시설의 방음판 재질은 흡음형 방음판과 투명형 방음판으로 구분하고 있다. 투명형 방음판의 경우 내열성을 만족해야 하는데 그 기준은 다음 <표 3-17>과 같다.

<표 3-17> 투광부재의 내열성 평가기준

구분	평가기준	비고
플라스틱 수지	하중변형온도 85℃ 이상	KS M ISO 75-2 PC 수지: 방법A PMMA 수지: 방법B
접합유리	내열성 시험 후 시료의 유리 부분에 균열이 생기는 것은 허용하나 시료의 가장자리 또는 균열된 곳으로부터 13mm를 초과하는 곳에 사용상 지장이 있는 기포 또는 그 밖의 결점이 없을 것	

위 표에 의하면 플라스틱 수지인 PMMA와 PC 하중 변형온도 85℃ 이상이면 기준을 만족하게 되어 평가기준 온도가 너무 낮다는 문제점이 있다.

또한 가연성 PMMA와 PC의 경우 불연성 강화유리와는 달리 연소시 CO, CO₂ 등의 유독가스가 발생하여 피난을 방해하고 질식 등 인명피해를 발생시키는 원인이 된다.

3.3.2 방음터널 소방시설 설치기준에 따른 문제점

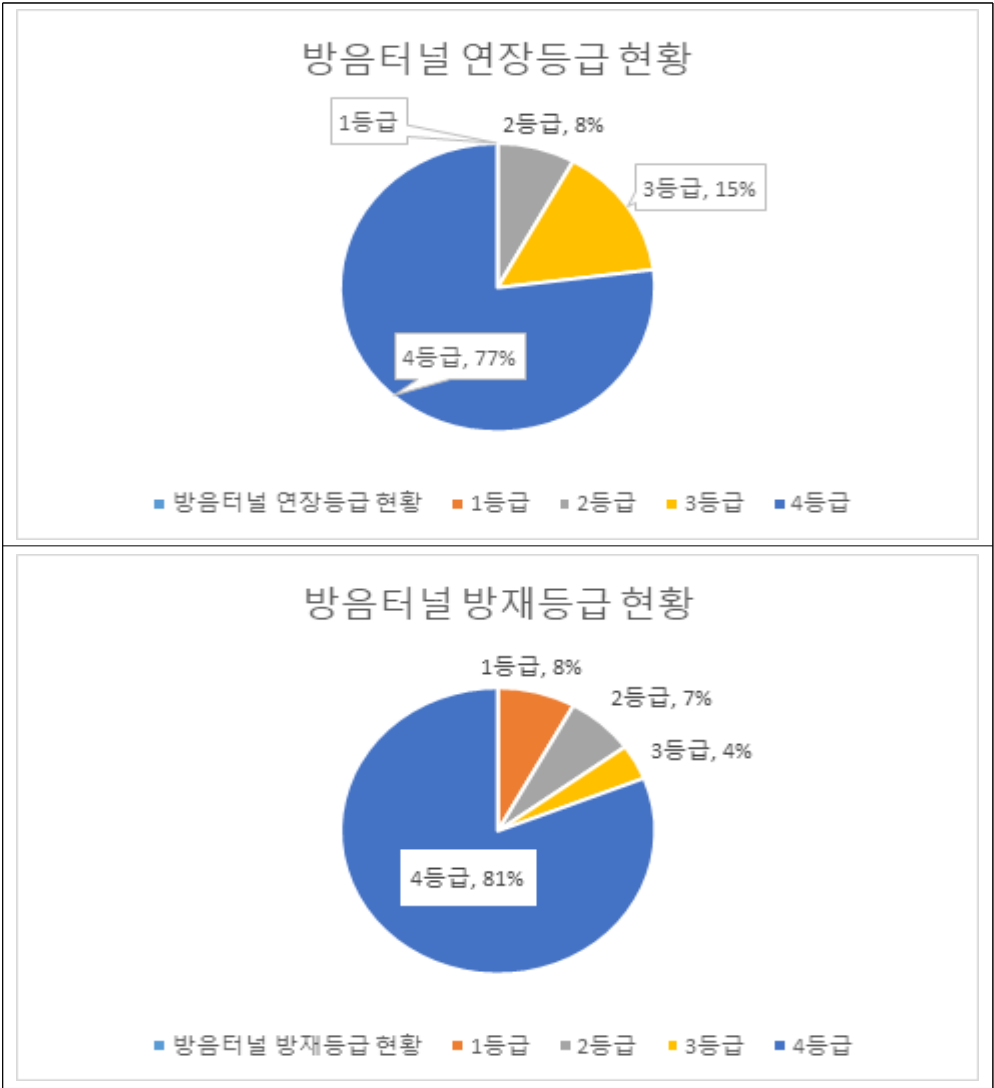
현재 방음터널 설치기준에 따른 문제점은 「도로터널 방재 환기시설 설치 및 관리지침」과 「도로터널의 화재안전성능 및 기술기준(NFPC 603, NFTC 603)」으로 크게 두 개로 나누어 볼 수 있다.

1. 도로터널 방재 환기시설 설치 및 관리지침의 문제점

「도로터널 방재 환기시설 설치 및 관리지침」에 의한 연장기준등급에 의하면 국내에 설치된 방음터널은 1등급은 없으며 2등급은 17개소로 8%, 3등급은 33개소로 15%, 4등급은 77%이다. 방음터널 대부분은 3등급이나 4등급이고 전체의 92%를 차지하고 있다.

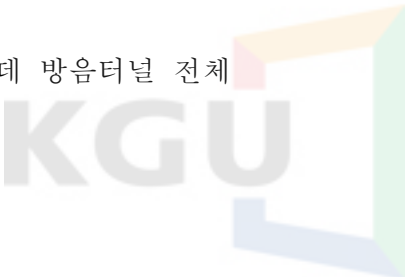


연장등급과 별도로 위험도 지수에 따라 방재등급을 정하는데 방재등급의 경우 1등급은 9개소로 8%이며 2등급은 7개소로 7%, 3등급은 4개소로 4%, 4등급은 81%이다. 방재등급 또한 3등급과 4등급의 합이 85%를 차지한다.



<그림 3-27> 방음터널 연장등급과 방재등급

방재등급 3등급 이하는 위험도 지수가 19 이하에 해당하는데 방음터널 전체



의 85%가 3등급 이하에 해당한다. 방재등급은 방재시설 설치와 연결되고 현재 기준으로 방재 3등급은 소화기구, 비상경보설비, 비상방송설비, 긴급전화, CCTV, 재방송설비, 유도등, 대피시설, 무선통신보조설비, 비상콘센트설비, 무정전전원 설비 등이 설치된다. 방재 4등급의 경우 소화기구와 유도등만이 설치대상이다.

방재 3등급의 연장은 긴 경우 1,000m에 달하는데 불을 끄는데 필요한 물을 공급할 수 있는 옥내소화전 설비나 원격살수설비, 제연설비 등이 설치대상이 아니어서 화재시 초기소화 하기가 매우 어렵다는 문제점이 있다. 또한 방재 4등급의 경우 연장이 250m 이하로 기존의 방음터널의 경우 대피시설 설치대상이 아니어서 피난연결통로가 설치되지 않아 화재시 피난안전성 확보가 어려우며 CCTV도 설치할 필요가 없어 화재시 다른 차량의 진입을 막을 수 있는 감시기능이 부족하다.



	
소화전함	소화기
	
소화전호스	피난문
	
피난구 유도등	피난문 외부계단

<그림 3-28> 방음터널 소방시설

소화기구의 경우 50m마다 수동식소화기를 설치하는데 방음터널 재료의 특성상 빠른 화재확산이 이루어지므로 보행거리 기준을 일반터널보다 많이 강화해야 한다. 더불어 전기자동차 운행 대수가 많이 증가하였으므로 소화기도 전기차 화재에 적응성 있는 소화기를 비치하도록 관련법 제정이 필요한 시점이다.

2. 도로터널의 화재안전성능 및 기술기준(NFPC 603, NFTC 603)의 문제점

도로터널의 화재안전성능 및 기술기준은 일반 도로터널에 대한 소방시설 설치에 관한 기준이며 방음터널의 특수성을 고려한 기준은 아니다. 따라서 방음터널의 구조적 특수성, 방음판의 재질 특성을 고려한 화재안전성능 및 기술기준 마련이 필요하다.

특히 제연설비의 경우 설계화재강도가 20MW로 정해져 있지만, 화재 시물레이션에 의하면 PMMA 재질의 최대화재강도가 7,070MW에 달하고 PC의 경우 176MW에 달하므로 실제 화재시 제연설비로서의 연기배출 기능을 발휘할 수 없다는 문제점이 있다. <표 3-18> 각국의 화재강도 기준에서 보는 바와 같이 설계화재 강도가 차종별 최대열방출을 고려한다는 취지에 맞게 설계화재 강도를 100MW 정도로 강화할 필요가 있다.

<표 3-18> 각국의 화재강도 기준

구분	PIARC '95 (유럽)	RABT(독일)	CETU(프랑스)	NFPA 502 (미국)
승용차 1대	5MW	-	2.5MW	5MW
승용차 2-3대	8MW	-	8MW	-
승합차 1대	15MW	-	15MW	-
대형버스 1대	20-30MW	20-30MW	20MW	20MW
대형트럭 1대	-	-	30MW	-
가솔린 탱크롤리	100MW	50-100MW	200MW	100MW

소화기구도 “A급 화재는 3단위 이상, B급 화재는 5단위 이상 및 C급 화재에 적응성이 있는 것으로 할 것”이라는 기준은 대부분의 방음터널 재질이 폴리머 계열인 것을 고려 할 때 A급 화재는 5단위 이상, B급 화재는 10단위로 강화하여 적용할 필요가 있다. 왜냐하면 일반 도로터널의 경우 콘크리트나 암석 등 불연재

로 건설되지만, 방음터널은 사용재료 자체가 가연성재료이므로 이를 고려하여 소화 단위에 반영해야 하기 때문이다.

3.3.3 방음터널 피난 문제점

방음터널 화재시 폴리머 계열의 경우 재질이 연소하며 녹아서 떨어지는 불뚱에 의해 일반 도로터널보다 피난이 더욱 어렵다.

방재시설 중 화재를 알려 주는 경보설비 중 자동화재탐지설비는 연장 1등급과 2등급에 설치하고, 진입 차단설비의 경우 방재 1등급과 2등급에만 설치되게 되어 있다. 하지만 연장 1등급과 2등급에 해당하는 터널은 전체 8%이고, 연장 3등급과 4등급이 92%를 차지하고 있어 방음터널 중 8%만 자동화재탐지설비가 설치되어 있고 15%만 진입 차단설비가 설치되어 있다.

피난을 도와주는 피난 대피 시설의 경우, 2024년 8월 9일부터 피난연결통로를 100m 이내로 설치하도록 개정되었지만, 기존에 설치된 방음터널의 경우 이전기준에 의해 설치되어 피난통로의 간격도 250m로 길고 피난문의 터널 바깥쪽 계단의 폭도 좁으며, 터널 외부 측에 피난로 및 별도 피난 공간이 설치되지 않은 곳이 많은 것으로 조사 되었다. 또한 화재 발생 시 노약자, 어린이 등 교통약자의 피난 출구 측 대피가 쉽도록 발판 개선 필요하고 피난 표지판을 설치하여 시인성 확보가 요구된다.

피난에 있어 연기의 이동속도는 인명 안전성에 많은 영향을 끼치므로 연기의 제어는 인명 안전성과 직결된다. 연기를 제어하기 위한 제연설비는 방재등급 1등급과 2등급은 설치대상이나 방재 3등급의 경우 대피자의 밀도, 전방 대피자와의 거리, 연기농도에 의한 가시도의 영향에 의한 정량적 위험도 평가를 통해 설치여부를 결정하는 권장 설비에 해당하고 4등급은 자연환기에 의존한다. 이는 전제 방음터널의 85%는 제연설비가 설치되지 않았다는 것이므로 피난시 연기 흡입에 의한 사상자 수의 증가가 우려된다.



제 4 장 방음터널 소방시설 설치방안 제시

4.1 사용재료 개선방안

사용재료의 개선방안을 살펴보면 투명판 재료, 강구조물의 내화피복 및 설계에 열하중 반영, 해외 방음터널 형태 도입 등을 고려할 필요가 있다. 이에 따른 개선방안은 아래와 같다.

1. 투명방음판 재료

사용재료에 따른 개선방안을 알아보고자 한국도로공사의 도로교통연구원에서 발행한 연구보고서의 자료를 참고하고자 한다. 이 보고서의 화재 시뮬레이션 해석 결과에 따르면 PMMA는 100초에 착화가 시작되고 초기에 화재가 빠르게 성장하며 1,000초가 넘어가는 시점에서 열방출률이 20MW에 이르며 소화가 시작되는데 PC의 경우는 500초에 착화가 시작되어 1,700초 즈음에 최성기에 도달하는 것으로 나타난다. 또한 3,600초까지 시뮬레이션한 결과 최대 열방출률은 PMMA가 PC보다 높은 것으로 나타났다.

건설기술연구원에서 갯현고가교 방음터널화재를 모델링하여 얻은 결과에 의하면 방음판 재료가 PMMA일때 화재 발생 약 4분 후 천장 방음판에 불이 옮겨붙으며 12분 후부터 천장 대부분의 방음판에 화염전파가 발생하였고 20분 후 천장 대부분은 화재로 소멸되는 것으로 나타났다. 방음판 재료가 PC일 경우 화재 발생 후 5분이 지나면 차량 위쪽 방음판에 불이 옮겨붙지만, PC 방음판의 열방출률이 작아 화염온도가 상승되지 않고 시간이 지나도 화염전파가 발생하지 않는 것으로 나타났다. 또한 PMMA와 PC의 화재하중은 큰 차이가 없지만 화재강도는 PMMA이 PC의 경우보다 약 40배나 크므로 PMMA의 화재지속시간이 길고 화재가혹도 또한 큰 것으로 나타났다.

따라서 열가소성 플라스틱중 PMMA보다는 PC를 사용하도록 하는 법적규정이 필요하며 투명형 방음판 재질의 내열성 기준에 대한 개선이 필요하다.

국가건설기준 표준시방서에서 투명형 방음판 재질의 내열성 기준은 플라스틱 수지의 경우 KSM ISO 75-2에 의해 하중 변형온도 85℃ 이상이면 만족하

는 것으로 평가하고 있다. 그러나 터널 내 화재발생시 안전성 확보를 위해 PIARC(국제상설도로회의)에서 제시한 터널의 벽과 천장에 대한 온도 평가기준은 승용차 화재의 경우 400℃이고 버스나 소형집차의 경우 700℃, 가솔린 차량의 경우 1,350℃를 평가기준으로 하는 점을 고려할 때 방음터널의 국내 기준은 최소한의 기준에도 미달함을 알 수 있다.

따라서 가연성 투명방음판의 경우 내열성 기준을 강화하여 하중변형 온도를 100℃ 이상으로 높이고 용융점은 300℃ 이상으로 기준을 높여 화재 발생시 피난시간을 확보하고 인명 안전성을 향상시켜야 한다.

또한 강화유리의 경우 용융점이 650℃이고 불연재이나 가격이 비싸 사용률이 15%밖에 되지 않으므로 강화유리를 투명방음판으로 사용하도록 하고 천장의 경우는 온도변형에 의한 파손을 고려하여 망입유리로 설치하도록 제도적 보완책이 필요하다.

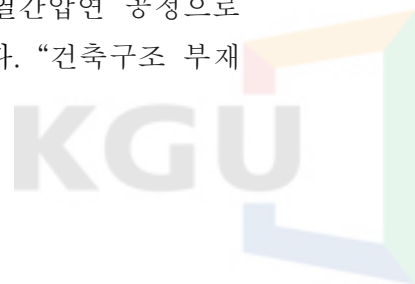
더불어 가연성 투명방음판과 강화유리의 단점을 보완하는 ETFE(에틸렌 테트라플루오로에틸렌)로 투명방음판 재료를 대체 하도록 해야 한다. ETFE는 용융점이 270℃이며 녹아도 화재하중이 적고 연소 확대가 일어나지 않는 장점이 있으며 화학적 손상도 적고 바람에도 잘 견디 강한 내구성이 뛰어나고 연소 시에는 불소계 생성물이 발생하여 화염이 더 이상 확대되지 않는 자소성도 지니고 있다. 이에 표4-1과 같이 재료개선을 제언한다.

<표 4-1> 투명방음판 재료 개선(안)

구분	현재	개선(안)	비고
내열성 기준	하중변형온도 85℃	하중변형온도 100℃ 이상, 용융점 300℃ 이상	국가건설기준 표준시방서
사용재료	PMMA,PC /강화유리	강화유리(망입형), ETFE	

2. 강구조물의 내화피복 및 설계에 열하중 반영

방음터널의 구조체를 형성하고 있는 H형강이며 대부분 열간압연 공정으로 만들어 지고 단면 형상이 H모양으로 H형강이라 부르고 있다. “건축구조 부재



의 내화시험방법-보의성능조건(KS F 2257-6, 2020)에서 “표준시간-온도곡선에 준해서 보를 가열하고, 내화성능기준은 각 단면별 강재의 평균온도가 538℃를 넘지 않아야 하며 온도가 측정된 어느 곳에서도 649℃를 넘지 않아야 한다.

2020)”라고 규정되어 있다.

이는 화재로 인해 강재의 평균온도가 538℃를 초과하면 강재가 견딜 수 있는 한계를 벗어나 변형 및 붕괴의 위험이 있다는 것이다. 방음터널의 경우 입구와 출구만 개방되어 있으므로 화재가 발생하면 평균 300초 이내에 1,000℃에 달할 수 있으므로 H형강 구조체에 내화도료 또는 철골 표면 두께를 6cm 이상의 철망모르타르, 두께 5cm 이상의 콘크리트로 내화피복 하여 피난자의 안전을 확보하고 소방대원들이 안전한 소화 활동을 할 수 있도록 해야 한다.

방음터널 구조체의 안전성 확보를 위해서는 구조설계시 설계하중에 방음판의 열 하중을 고려하여 구조체의 안전성을 보장하도록 해야 한다. 또한 방재등급산정 항목에 구조체의 위험성을 고려하는 평가항목을 표4-2와 같이 추가할 것을 제언한다.

<표 4-2> 강구조물 내화구조 개선(안)

구분	현재	개선(안)
강재내화구조 적용	비내화 구조	내화구조 1시간 - 내화피복공법 - 내화도료공법
방음터널 구조체 평가항목	구조체 평가항목 부재	방재등급 산정 항목 - 구조체의 위험성 평가 항목추가

3. 해외의 방음터널 형태 도입

국내는 H형강 구조체와 PMMA와 PC를 사용한 일률적인 방음터널을 설치하고 있는데, 반해 해외는 구조적 안전성과 채광성이 확보된 다양한 형태의 방음터널을 설치하고 있다.

다음은 독일과 홍콩의 방음터널 사진이다.





<그림 4-1> 독일의 방음터널



<그림 4-2> 홍콩의 방음터널

해외 사례를 볼 때 터널의 형태는 붕괴 방지를 위하여 구조적 안전성 및 채광성을 고려하여 도로의 상태 및 지리적 위치 특성을 고려하여 표4-3과 같이 방음터널 형태 개선을 제언한다.

<표 4-3> 국내의 방음터널 형태 개선(안)

구분	현재	개선(안)
방음터널 형태	- PC, PMMA등을 사용한 일률적인 형태	- 구조적 안전성 반영 - 채광성이 확보된 다양한 형태

4.2 소방시설 설치기준 개선방안

소방시설 설치기준 개선방안은 「도로터널 방재 환기시설 설치 및 관리지침」과 「도로터널의 화재안전성능 및 기술기준(NFPC 603, NFTC 603)」으로 크게 두 개로 나누어 볼 수 있다.

1. 도로터널 방재 환기시설 설치 및 관리지침

방재시설 설치를 위한 터널 등급은 터널연장(L)을 기준으로 하는 연장등급과 교통량 등 터널의 제반 위험인자를 고려한 위험도 지수(X)를 기준으로 하는 방재등급으로 구분하며, 등급에 따라 소화설비, 경보설비, 피난대피설비, 소화활동설비, 비상전원설비 등이 설치된다.

이러한 방재시설은 터널길이에 따른 연장등급과 위험도지수에 따른 방재등급으로 설치하므로 투명판 재질의 가연성을 위험도 지수에 반영하여 방재등급을 선정할 필요가 있다.

터널 위험도지수(X) 평가기준(방음터널)의 경우, 터널특성에 따른 세부 평가항목 방음판 재료의 성능 기준에서 불연재료는 위험도 지수가 0.0, 준불연은 0.5, 난연은 1.0, 재료의 열분해 온도가 450℃ 이상은 2.0, 재료의 열분해 온도가 450℃ 미만은 4.0으로 되어 있다. 이는 가연성 난연재료를 사용하여도 불연재료보다 위험도 지수가 1.0밖에 높지 않아 가연성 투명방음판의 화재시 위험을 제대로 반영하지 않았다고 볼 수 있으므로 난연재료와 불연재료의 위험도 지수 차이를 2.0 이상 두고 재료의 열분해 온도가 450℃ 미만은 8.0으로 하여 위험도지수(X) 평가 때 반영되도록 개선이 필요하다.

또한 제연설비의 경우 방재등급에 의해서만 설치하고 있으며 방재 1, 2등급의 경우 설치하고 방재 3등급의 경우 권장 시설이다. 이는 방재등급이 1, 2등급인 터널의 개소가 16개소로 15%를 차지하고 있으므로 85%의 방음터널에는 제연설비가 설치되지 않았음을 의미한다.

<표 4-4> 방재등급 개선(안)

구분	도로터널 방재 환기시설 설치 및 관리지침
현재등급기준 (길이기준)	- 1등급 : 3,000m이상 - 2등급 : 1,000m이상~3,000m미만 - 3등급 : 250m이상~1,000m미만 - 4등급 : 250m미만
개선(안)등급기준 (길이기준)	- 1등급 : 3,000m이상 - 2등급 : 1,000m이상~3,000m미만 - 3등급 : 500m이상~1000m미만 - 4등급 : 250m이상~500m미만 - 5등급 : 250m미만

제연설비가 화재 초기 대피자 자력으로 대피할 때 안전 확보를 위해 꼭 필요한 시설임을 고려할 때 방재등급 구간을 세분화하여 더 많은 터널에 제연설비를 설치해야 한다. 이에 따라 표4-4와 같이 소방시설 설치기준을 개선을 제안하며 표 4-4와 같이 터널 방재등급을 4단계에서 5단계로 세분화하고 4등급 시설에 소방방설을 강화해야 한다.

2. 도로터널의 화재안전성능 및 기술기준(NFPC 603, NFTC 603)

현재 도로터널의 화재안전성능 및 기술기준은 일반 도로터널에 대한 기준이며 방음터널의 특수성이 반영된 기준이 아니다. 따라서 방음터널의 재료나 구조 등이 반영된 “방음터널의 화재안전성능 및 기술기준”의 신설이 필요하다.

소화기구도 “A급 화재는 3단위 이상, B급 화재는 5단위 이상 및 C급 화재에 적응성이 있는 것으로 할 것”이라는 기준은 대부분의 방음터널 재질이 가연성 PMMA와 PC 등 폴리머 계열인 것을 고려할 때 A급 화재는 5단위 이상, B급 화재는 10단위로 강화하여 적용하고 전기차 화재에 적응성 있는 소화기 비치를 강제할 필요가 있다.

<표 4-5> 도로터널의 화재안전성능 및 기술기준 개선(안)

구분	현재	개선(안)
방음터널 적용기준	일반도로터널 기준	- 방음터널 화재안전성능 및 기술기준 신설(안)
소화기구 적용	“A급 화재는 3단위 이상, B 급 화재는 5단위 이상 및 C 급 화재에 적응성이 있는 것	A급 화재는 5단위 이상, B급 화재 는 10단위로 강화하여 적용하고 전기차 화재에 적응성 있는 소화 기 비치

4.3 피난 대책 개선방안

방음터널은 PC 및 PMMA 등의 가연성 재질을 많이 사용하고 화염에 대한 구조적 강도를 확보하지 못한 실정으로 자동화재탐지설비와 진입 차단시설, 피난 연결통로, 제연설비, 피난문의 설치와 시인성 강화 등의 항목으로 피난 대책이 필요하다.

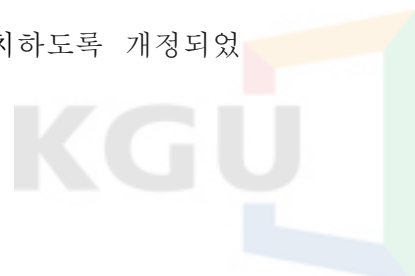
1. 자동화재탐지설비와 진입 차단설비

방음터널에 화재 발생시 화재발생을 음성과 시각 경보를 통해 알리는 자동화재탐지설비의 설치는 매우 중요하다. 하지만 자동화재탐지설비는 연장 1등급과 2등급에만 설치하도록 「도로터널 방재 환기시설 설치 및 관리지침」에 규정되어 있는 실정이다. 따라서 자동화재탐지설비를 연장등급이 아닌 방재등급에 의해 설치하도록 하고 대상도 방재 3등급까지 확대할 필요가 있다.

진입 차단설비도 방재 3등급의 경우 권장 설치 하도록 되어 있어 개선이 필요하다. 진입 차단설비는 화재가 발생했을 경우 추가 피해를 방지하고 빠른 소방활동을 위해 다른 차량이 터널에 진입하지 못하도록 하는 설비이므로 모든 터널에 적용해서 인명과 재산피해를 최소화할 수 있도록 해야 한다.

2. 피난연결통로

피난연결통로는 2024년 8월 9일부터 100m 이내마다 설치하도록 개정되었



다. 하지만 기존에 설치된 방음터널의 경우 피난통로의 간격도 250m로 길고 피난문 바깥쪽 계단의 폭도 좁으며, 터널 외부 측에 피난로 및 별도 피난 공간이 설치되지 않은 곳이 많은 것으로 조사되어 새로운 규정의 소급 적용을 제언한다.

3. 제연설비

안전한 피난을 위해 연기의 제어는 중요하므로 제연설비의 설치는 반드시 필요하다. 2024년 8월 9일 자로 「도로터널 방재 환기시설 설치 및 관리지침」이 개정되었으나, 제연설비는 방재 3등급 터널에 설치의 필요성 검토에 의하는 권장 시설로 되어 현재 방재 3등급이 4%임을 고려할 때 추가로 설치되는 방음터널에 제연설비가 설치되는 경우는 극소수일 것으로 보여 개정이 미흡하다. 따라서 방재등급을 세분화하여 더 많은 터널에 제연설비가 설치되도록 개선이 필요하다.

4. 피난문의 설치와 시인성 강화

「도로터널 방재 환기시설 설치 및 관리지침」의 피난문 설치기준과 한국도로공사의 「방음시설 설치 및 관리지침」에 의한 유지관리용 출입문 설치 규정은 피난문 설치기준을 준용하여 설치하는 것이 필요하다. 피난문을 통해 피난시 터널 외부의 충분한 폭을 확보한 대피로, 대피공간, 안전난간, 조명시설, 미끄럼방지, 피난안전 유도장치 등이 추가로 설치되어야 한다. 또 화재 발생시나 야간의 경우 대피자가 피난문을 쉽게 발견하여 빨리 피난 할 수 있도록 축광식 피난문 표지나 피난구유도등을 설치하여 시인성을 강화하고 문이 열리는 방향은 피난 방향이 되도록 해야 한다.

<표 4-6> 피난대책 개선(안)

구분	현재	개선(안)
자동화재 탐지설비 및 진입차단설비	- 1등급 및 2등급 설치	- 1등급, 2등급, 3등급 설치
피난연결통로	- 100m 이내	- 50~100m 이내
제연설비	- 1,000m 이상 설치	- 500m이상
피난문 설치 및 시인성	- 기준 없음	- 피난문 설치기준 및 피난 방향으로 개방되 는 축광식 피난문 또는 피난유도등 설치

제 5 장 결 론

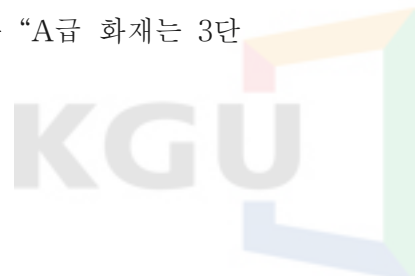
방음터널은 도시 근교 도로의 증가와 통행 차량에 의한 소음 문제를 해결하여 쾌적한 주거환경을 유지하는 방안 중 하나이다. 하지만 가연성 폴리머 계열인 PMMA와 PC를 방음판으로, H형강을 구조체로 사용하기 때문에 화재시 발생하는 문제점을 화재 시뮬레이션과 화재 사고사례를 분석하여 살펴본 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, PMMA와 PC의 화재하중은 큰 차이가 없지만 화재강도는 PMMA이 PC의 경우보다 약 40배나 크므로 열가소성 플라스틱중 PMMA보다는 PC를 사용하도록 하는 법적 규정이 필요하며, 방음판의 내열성 기준을 강화하여 하중 변형온도를 100℃ 이상으로 높이고, 불연재인 강화유리 사용을 권장하며 천장의 경우 망입유리로 설치하도록 제도적 보완책이 필요하다. 더불어 가연성 투명방음판과 강화유리의 단점을 보완하며 화재하중이 적고 연소 확대가 일어나지 않는 ETFE(에틸렌 테트라플루오로에틸렌)로 투명방음판 재료를 대체 하도록 해야 한다.

둘째, 방음터널 구조체인 H형강 구조체의 철골 표면 두께를 6cm 이상의 철 망모르타르나 두께 5cm 이상의 콘크리트로 내화피복 하여 구조적 안전성을 확보하고, 구조 설계시 설계하중에 방음판의 열하중을 고려하여 구조체의 안전성을 보장하도록 해야 한다.

셋째, 「도로터널 방재 환기시설 설치 및 관리지침」에서 방재등급 산정시 터널 위험도지수(X) 평가기준(방음터널)의 경우 터널 특성에 따른 세부 평가항목 방음판 재료의 성능 기준을 난연재료와 불연재료의 위험도지수 차이를 2.0 이상 두어 위험도지수(X) 평가시 반영되도록 개선되어야 한다. 또한 재료의 열분해 온도가 450℃ 미만은 4.0에서 8.0으로 하여 위험도지수(X) 평가시 반영되도록 개선이 필요하다.

넷째, 현재 방음터널에 준용하는 「도로터널의 화재안전성능 및 기술기준(NFPC 603, NFTC 603)」을 방음터널의 특수성을 반영한 “방음터널의 화재 안전성능 및 기술기준”의 신설이 필요하고, 소화기구의 경우 “A급 화재는 3단



위 이상, B급 화재는 5단위 이상 및 C급 화재에 적응성이 있는 것으로 할 것”은 “A급 화재는 5단위 이상, B급 화재는 10단위 이상, C급 화재 및 전기차 화재에 적응성 있는 것으로 할 것”으로 개선되어야 한다.

다섯째, 현재 연장 1등급과 2등급에만 설치하게 되어 있는 자동화재탐지설비를 연장등급이 아닌 방재등급에 의해 설치하도록 하고 대상도 방재 3등급까지 확대할 필요가 있다. 진입 차단설비도 방재 3등급의 경우 권장설치 하게 되어 있으나 차량이 터널에 진입하지 못하도록 하는 설비이므로 모든 터널에 적용해야 한다.

여섯째, 피난문의 시인성 강화하고 피난문을 통해 피난시 터널 외부의 충분한 폭을 확보한 대피로 확보, 대피공간, 안전난간, 조명시설, 미끄럼방지, 피난 안전 유도장치 등이 추가로 설치되어야 한다.

참고문헌

- [1] 김민정 “터널형 방음시설의 화재위험도 분석을 통한 대안방안에 관한 연구” 석사학위논문 서울시립대학교 도시과학대학원, 2019
- [2] 김태우 외 2인 “방음터널의 화재안전성에 관한 국내연구 동향” 국내 학술논문. 2019
- [3] 손정줄 “도로 방음시설 계획절차와 대안 결정에 관한 사례 연구” 석사학위논문 부경대학교 대학원. 2009
- [4] 한국도로공사 도로교통연구원 “고속도로 방음 차재의 연소특성 및 방염성능 기준에 관한 연구”, 2012
- [5] Wagner, Kate(2016년 12월 8일). "Building the Wall: Highway Sound Barriers and the Evolution of Noise". 99 Percent Invisible.
- [6] Benz Kotzen 및 Colin English(1999) Environmental Noise Barriers: A Guide to Their Acoustic and Visual Design, Taylor & Francis 출판, ISBN 0-419-23180-3, 165페이지
- [7] John Shadely, Acoustical analysis of the New Jersey Turnpike widening project between Raritan and East Brunswick, Bolt Beranek 및 Newman, 1973
- [8] C.M. Hogan 및 Harry Seidman, Design of Noise Abatement Structures along Foothill Expressway, Los Altos, California, Santa Clara County Department of Public Works, ESL Inc., Sunnyvale, California, 1970
- [9] Public Law No. 92-574, 86 Stat. 1234(1972) 1972년 소음공해 및 저감법, 42 U.S.C. 4901-4918(1988)에서 개정된 법전화
- [10] Public Resource Org(2010-07-31), 고속도로 소음 차단 설계, 2021



- [11] Wagner, Kate (2016년 12월 8일). "Building the Wall: Highway Sound Barriers and the Evolution of Noise". 《Building the Wall: Highway Sound Barriers and the Evolution of Noise》 2017
- [12] OSHA. 1989. Carbon Dioxide, Industrial Exposure and Control Technologies for OSHA Regulated Hazardous Substances, Volume I of II, Substance A - I. Occupational Safety and Health Administration. Washington, DC: U.S. Department of Labor, March.
- [13] 국가화재안전(성능·기술)기준(시행 2022. 12. 1), 도로터널의 화재안전성능 및 기술기준(NFPC 603, NFTC 603). 2023
- [14] 소방시설 설치 및 관리에 관한 법률, (2023) 국가법령정보센터 (<https://www.law.go.kr>)
- [15] 소방시설 등의 성능위주설계 방법 및 기준, (2017) 국가법령정보센터(<https://www.law.go.kr>)
- [16] 소방시설 설치·유지 및 안전관리에 관한 법률 시행령[국민안전처, 2016.8]
- [17] 도로터널 방재시설 설치 및 관리지침[국토교통부, 2024.8]
- [18] 구조물 유지관리시설 설치기준[한국도로공사, 1999. 12]
- [19] 방음시설 설치 및 관리지침[한국도로공사, 2014.8]
- [20] 고속도로 터널 환기시설 설계기준[한국도로공사, 2012.4]
- [21] 영동고속도로 광교신도시 구간 방음시설 관련 친환경 기술조사 국외 출장 보고서[한국도로공사, 2011.6]
- [22] 한국도로공사 “고속도로 방음터널 제연 및 피난 방안에 관한 연구용역”, 2016
- [23] 김효규 “ 방음터널 관련 도로터널 방재지침개정(안) 마련”, 2023
- [24] 한국도로공사 “고속도로 터널형 방음시설 화재안전 및 방재대책 수립연구”, 2018



Abstract

MS.Thesis

Study on the appropriate materials to use in soundproof tunnels and firefighting facility installation methods according to fire intensity

Lee, Uk Beom

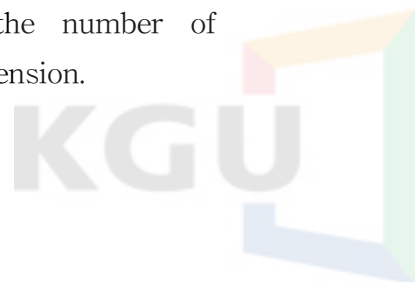
Major of Fire Protection and Disaster Management

Graduate School of Engineering

Kyonggi University

The increase in suburban roads causes noise problems due to passing vehicles, so various types of soundproof hills, soundproof forests, soundproof covers, soundproof walls, and soundproof tunnels are being installed to create a pleasant living environment.

According to the Ministry of Land, Infrastructure, and Transport's survey, as of January 23, 170 soundproof tunnels and 12,118 soundproof walls were installed and operated nationwide. Among the soundproof tunnels, sealed structures account for 110, or 65% of the total. In terms of materials, PMMA accounted for 58 (34%), PC accounted for 87 (51%), and glass accounted for 25 (15%). According to the National Fire Agency's Fire Statistics Yearbook, roads are the fourth most common place for fires after industrial facilities, so the frequency of soundproof tunnel fires is increasing due to the increase in the number of soundproof tunnels installed and the increase in their extension.



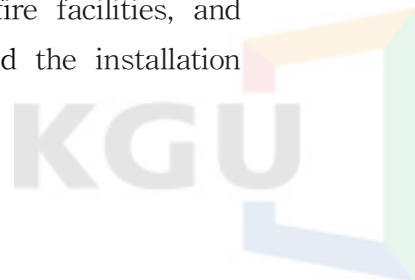
As soundproof tunnel fires occur frequently, the national road soundproofing facility fire safety reinforcement measures were revised in August 2024 in relation to the “2022. 12. 29 Gwacheon Galhyeon Overpass Soundproof Tunnel (830m) Fire, 49 casualties including 5 deaths”.

The structure of the soundproof tunnel installed using transparent soundproof panels made of PMMA and PC and steel frames is effective in blocking noise, but due to the physical and chemical properties of the transparent soundproof panels and the characteristics of the steel structure, it has almost no fire resistance according to fire growth, making it very vulnerable to fire.

According to the extension criteria grades according to the “Guidelines for Installation and Management of Road Tunnel Disaster Prevention Ventilation Facilities,” there are no grade 1 soundproof tunnels installed in Korea, 17 grade 2 tunnels (8%), 33 grade 3 tunnels (15%), and 4 grade 77%. Most soundproof tunnels are grade 3 or 4, accounting for 92% of the total.

In addition to the extension grade, the disaster prevention grade is determined based on the risk index. In the case of the disaster prevention grade, grade 1 is 9 grade 8%, 7 grade 2 tunnels (7%), 4 grade 3 tunnels (4%), and 81% of the total. The sum of grades 3 and 4 also accounts for 85% of the disaster prevention grade. Disaster prevention grades of grade 3 and lower correspond to a risk index of 19 or lower, and 85% of all soundproof tunnels correspond to grade 3 or lower.

In this study, we will examine the fire intensity and fire load according to the combustion experiment of PMMA and PC materials, analyze the experimental results, and study the improvement plan through the materials used, the improvement plan for the legal standard through the analysis of the problems according to the installation standards of fire facilities, and the appropriate materials used for soundproof tunnels and the installation



plan for fire facilities according to the fire intensity through the analysis of the structural problems of the existing soundproof tunnels.

In addition, we will examine domestic and international soundproof tunnel accident cases, conduct a fire simulation to analyze the fire, and present the direction of the materials used for soundproof tunnels, the direction of the improvement of the fire facility installation standards, and the improvement plan for the evacuation measures through the analysis of the combustion experiment of PMMA and PC materials.

As an improvement plan according to the materials used, in the case of combustible transparent soundproofing panels, the heat resistance standard should be strengthened to increase the load deformation temperature to 100°C or higher and the melting point to 300°C or higher to secure the evacuation time in the event of a fire and improve the safety of life. In addition, the transparent soundproofing panel material should be replaced with ETFE (ethylene tetrafluoroethylene), which complements the shortcomings of combustible transparent soundproofing panels and tempered glass.

In order to secure the safety of the soundproof tunnel structure by reflecting the thermal load in the fireproof coating and design of the steel structure, the safety of the structure should be reinforced by considering the thermal load of the soundproof panel in the design load during the structural design. In addition, it is suggested to add an evaluation item that considers the risk of the structure to the disaster prevention grade calculation items.

As for the improvement plan for the fire facility installation standards, in the case of the tunnel risk index (X) evaluation criteria (soundproof tunnel) in the “Road Tunnel Disaster Prevention Ventilation Facility Installation and Management Guidelines,” the difference in the risk index between flame retardant materials and non-combustible materials should be set to

2.0 or more, and when the thermal decomposition temperature of the material is less than 450℃, it should be 8.0, so that it is reflected in the risk index (X) evaluation. In addition, the current “Road Tunnel Fire Safety Performance and Technical Standards (NFPC 603, NFTC 603)” needs to be newly established as the “Soundproof Tunnel Fire Safety Performance and Technical Standards” that reflects the materials and structures of the soundproof tunnel.

As a measure to improve evacuation measures, the target of automatic fire detection equipment and entry blocking equipment should be expanded to quickly notify of fire occurrence and block entry to reduce damage. Evacuation connecting passages were revised to be installed every 100m from August 9, 2024, but since the existing soundproof tunnels are not retroactively applied, the regulations should be applied retroactively.

In addition, smoke exhaust equipment is a recommended facility for disaster prevention level 3 tunnels, so the number of installation targets is very small, so it needs to be improved so that it can be installed as a basic facility. In addition, it is necessary to install evacuation doors, enhance visibility, and install additional evacuation facilities for the transportation vulnerable.