

Tunnelling Technology

「도로터널 방재시설 설치 및 관리지침」 이해와 분석 - 국토해양부, 2009. 4 개정판 기준 -



신태균
유원건설(주)
대표이사

1. 서론

산업의 발전과 국민소득의 증대는 우리들로 하여금 삶의 질 향상을 한층 더 요구하게 되고, 이는 보다 안전한 생활을 영위하고자 하는 욕구가 증대하게 되어 재해에 대한 더 많은 관심을 가지게 하고 있다. 또한 현대사회의 특징이라 할 수 있는 인구의 집중화, 고밀도화 및 고속화는 복잡한 대도시화를 자연발생적으로 형성하게 되며 이는 필연적으로 주거환경의 입체화 건설을 필요로 하게 되었다.

이런 현상은 국토의 70% 정도가 산악지대인 우리나라의 지리적 조건이 국토 개발시 도로 철도터널 등의 산악지대 통과는 필연적 과제가 되었으며, 역사적 문화적 산업적 발전은 서울, 부산 등의 대도시 중심의 발전을 이루게 되어 대도시 지하화 개발을 목전에 두게 되었다.

이와 더불어 산업 경쟁력 강화에 따른 물류비용 절감은 효율적인 도로의 건설과 기존 곡선도로 선형개선 등에 대한 수요가 증가함에 따라 국내 도로터널이 약 1,000여개

에 도달하게 되었다.

이에 따라 터널운행의 안전성 및 환경성의 확보와 화재와 같은 비상시의 대처방안에 대한 관심이 고조되고 있으며 근래에 국내외에서 발생한 대형 터널화재 사고로 인하여 터널 환기 및 방재분야에 대한 광범위한 연구가 가속화 되고 있다.

표 1. 도로터널 현황(2007. 12. 31 기준)

구분	합계	500m 미만	500m~1,000m	1,000m~3,000m	3,000m 이상
계	1,064	517	365	182	9
점유율	100%	48.6%	33.4%	17.2%	0.8%
고속국도	496	210	186	93	7
일반국도	298	147	106	44	1
기타 (특별시, 도, 지방도 등)	270	160	64	45	1

※ 출처 : (사)한국터널공학회지 2009. 6월호

「도로터널 방재시설 설치 및 관리지침」 이해와 분석 - 국토해양부, 2009. 4 개정판 기준 -

본고에서는 지난 2009년 4월 국토해양부에서 개정 발표한 「도로터널 방재시설 설치 및 관리지침」의 기계분야 설계자 위치에서 부분적 분석과 설명을 통해 지침서의 이해를 돕고자 기술하였다.

이와 같은 변경 내용은 최초 제정된 내용과 비슷한 조건도 있지만 상반된 조건도 발생되어 설계자, 시공자 및 관리자 등의 다소 혼란이 발생되고 있다. 또한, 방재 고유의 소방관련 법규와 다소 다른 설치 조건을 제정하여 도로터널 특성에 맞도록 소방법규를 변경시킨 부분도 충분히 노력한 부분이라 할 수 있다.

2. 도로터널 방재시설 지침서의 이해

표 2는 소방법규상의 주요 설치조건과 도로터널에 설치되는 설치조건을 비교한 것이다.

2.1 도로터널 방재시설 지침서의 특징

비교내용을 보면 소방법규는 건축물 위주의 면적, 공간 및 층별 구분을 하여 설치기준을 제정하여 현재 시행중에 있으며 방재지침서는 터널의 종방향의 길이 공간 위주로 설치기준을 변경했음을 알 수 있다. 또한, 화재규모를 규정화 하여 그 기준범위의 설비를 설치하도록 한 점도 다른점이라 할 수 있다. 소화전의 경우 소방법규는 연면적 3,000m² 이상의 건물에 설치하며 설치 간격은 면적개념에서 반경 25m이내에 사공간 없이 설치해야만 한다.

도로터널 방재시설 설치 및 관리지침(이하 방재지침서)은 '04. 12월에 최초 제정된 후 약 5년이 경과된 지난 '09. 4월에 1차 개정을 시행 하였다.

화재시 개방되는 소화전은 5개소 130LPM의 20분 용량으로 하고 있지만 방재지침서에서는 터널연장 1,000m이상의 2등급 터널은 모두 설치해야 하며 설치간격은 50m

1차 개정의 주요내용은 방재시설물 설치조건에 대해 최초 제정된 지침내용이 다소 과잉적 설치조건을 갖고 있다는 의견이 대두 되어 터널의 연장, 통행교통량, 구조적 제원 등을 다각적으로 분석한 후 그에 따른 위험지수를 산출 후 일정규모 이상의 지수가 발생되면 그 범위 내에서 방재 시설물을 선택적으로 설치할 수 있도록 변경되었다.

표 2. 건축물과 터널의 소방시설 기준비교

방재시설	'08.12. 소방시설 설치유지 및 안전관리에 관한 법률	'09. 4. 도로터널 방재시설 설치 및 관리지침	비고
소화기구 (소화기)	<ul style="list-style-type: none"> · 각 층마다 설치 · 바닥면적 33m² 이상 · 보행거리 20m(소형) 반경 20m 	<ul style="list-style-type: none"> · 모든터널(4등급 터널 이상) · 일방터널:우측설치(단 4차로 터널은 양측에 설치) · 설치간격 50m 이내 	바닥면적에 상관없이 터널 연장에 기준한다. 소화기구의 화재안전기준(NFSC101)
소화전	<ul style="list-style-type: none"> · 연면적 3000m² 이상건물 · 직선거리(반경)25m 이내 설치 · 화재시 소화전 5개소 개방 (5개소×130LPM×20분×방수압1.7kgf/cm²이하) · 소방호스 2본(15m×2=30m) · 수조용량(13m³) 	<ul style="list-style-type: none"> · 2등급(1,000m)이상 터널 설치 · 설치간격 50m 이내 우측설치 · 화재시 소화전 2개소 개방 (2개소×190LPM×40분×방수압 0.35MPa 이하) 	터널특성을 고려하여 개방개소는 2개소로 하되 방사량 및 방사시간을 확대하였음. 옥내소화전설비의 화재안전기준(NFSC102)
연결송수관설비	<ul style="list-style-type: none"> · 5층이상 건물, 연면적6,000m² 이상 · 방수기구함은 3층 마다 설치 · 1개소×800LPM(아파트400LPM)×0.35MPa 15m 호스1본 	<ul style="list-style-type: none"> · 2등급이상 터널 의무설치 · 방수구는 소화전함내 병행설치 · 송수구는 터널 입출구 설치 · 1개소×400LPM×0.35MPa 15m 호스3본 	연결송수관설비의 화재안전기준(NFSC 502)
물분무 설비	<ul style="list-style-type: none"> · 주차장, 차고 등에 설치 · 노출분사량 1m²당 10ℓ/min 20분간 방사 	<ul style="list-style-type: none"> · 위험도 지수 1등급 터널에 설치 · 노출간격 4~5m 노출분사량 1m²당 6ℓ/min · 방수구역 12m, 3구역 동시(75m) 40분간 방수 	물분무소화설비의 화재안전기준(NFSC104)

이내 이고 소화전 개방가능 개소는 2개소로 줄이는 반면 방수압, 방수량 등은 소방법규의 2배 수준으로 향상 시켰다 할 수 있다. 또한 종방향 길이를 보완하기 위해 호스도 3분을 비치 시켰다.

연결송수관 설비는 소화활동설비 즉 소방대원이 소방활동시 보조역할을 하는 설비로 소방법규에는 5층이상, 연면적 6000m²이상의 건축물에 대해 3층마다 방수구설치 기준을 하고 있으나 방재지침서는 옥내소화전 마다 소화전내 연결송수관 방수구를 설치하도록 하고 있어 옥내소화전과 더불어 소화성능을 보완하였다 할 수 있다. 송수구는 터널 입 출구부에 설치하도록 하여 소화용수 고갈시 소방차를 통해 외부의 공급을 받을 수 있도록 하였다.

또한, 물분무설비도(그림 1 참조) 소화활동설비로 소방법규에도 설비의 중요성이나 각 부품의 세부적인 규정을 간단히 기술하고 있으나 방재지침서는 위험도 기준등급 1등급 터널에 대해서만 설치하도록 하고 있으며 노즐의 간격, 노즐의 분사량, 방사구역 및 방사시간 등을 비교적 세밀히 기술되어 있다. 물분무설비는 소화기능상 화재지점에 공급산소 즉 공기의 공급을 차단시키는 질식 소화기능을 갖고 있다. 또한 터널내 대형화재 진압을 위한 목적으로 설치되며 국제적으로는 일본에서만 설치하는 방재설비이다.

국내에는 과거기준에 의거 터널연장 4,000m이상 터널

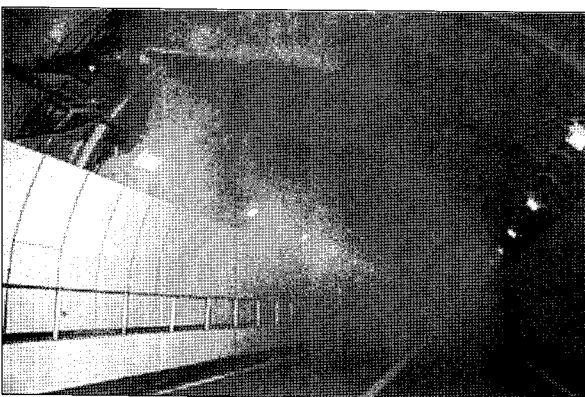


그림 1. 물분무 분사현황 사진

에만 설치하도록 되어 있어 중앙고속도로의 죽령터널(L=4,600m), 국도인 산외~산북간 도로의 능동터널(L=4,200m)에 설치 운영되고 있다. 그러나 최근 설계되고 있는 4,000m 이상의 대형 장대터널 설계시 방재지침서 기준에는 미달되지만 발주처의 의지에 따라 간혹 설치되는 터널이 있다.

2.2 소화설비

도로터널 방재지침서에 해당되는 소화설비(소화기구(소화기), 옥내소화전 설비 및 물분무설비)와 소화활동설비(연결송수관설비)는 소화기를 제외하면 모두가 물을 소화약제로 사용하는 소화설비이다. 물이 소화약제로 사용되는 경우 냉각, 질식, 유화, 희석 등의 기능을 얻을 수 있으며, 또한 가격이 저렴하고 열 흡수가 매우 크며 사용방법이 비교적 간단해 큰 효과를 얻을 수 있다.

표 3은 물 소화약제의 특성을 기술한 것이다. 물을 소화약제로 사용하는 소화설비는 그 기능과 용도에 따라 설비의 용량도 다르다.

표 3. 물 소화약제의 특성

사용 이유	<ul style="list-style-type: none"> • 가격이 싸다. • 열흡수가 매우 크다. • 쉽게 구할 수 있다. • 사용방법이 비교적 간단하다.
물의 특성	<ul style="list-style-type: none"> • 비열이 크다. • 열전도 계수가 크다. • 표면장력이 크다. • 점도가 낮다
주수형태	<ul style="list-style-type: none"> • 봉상주수: 물이 가늘고 긴 물줄기 모양을 형성 하면서 방사(옥내·외 소화전) • 적상주수: 물이 물방울 모양을 형성하면서 방사 되는 형태(스프링쿨러 헤드) • 무상주수: 물이 안개 또는 구름모양을 형성 하면서 방사되는 형태(물분무 헤드)

도로터널내 설치되는 옥내소화전(그림 2 참조), 연결송수관설비 및 물분무설비 등은 건축물 중심의 소방법규인 소방시설 설치유지 및 안전관리에 관한 법률과 다른 용량을 요구하고 있다(표 4 참조).

「도로터널 방재시설 설치 및 관리지침」 이해와 분석 - 국토해양부, 2009. 4 개정판 기준 -



그림 2. 터널내 설치된 소화전 사진

이렇게 변경된 배경은 방수구역을 축소함으로써 방수량을 줄여 일반적으로 주배관 구경(Φ250mm에서 Φ200mm 이하로 축소)을 작게 하고 이에따른 터널내 공동구를 작게 만들 수 있는 토목 구조적 장점은 있으나 물분무설비 개방을 통제하는 밸브와 함 간격이 과거보다 2배 많이 소요됨에 따라 기계설비부분의 자재는 더욱 많이 필요로 하게 된다.

2.3 제연설비

2.3.1 제연설비 개요

도로터널에서 제연설비란 화재지역에서 연기를 배기하거나 통행자의 대피 반대방향으로 연기 기류를 형성시켜 화재초기 자기구조(self rescue)단계에서 안전을 확보 할 수 있도록 통행자에게 절대적인 도움을 주는 설비이다.

여기서 제연이란 고유의 제연(smoke control)과 배연(smoke exhaust)기능을 모두 뜻하게 된다.

도로터널내 제연설비는 일반적으로 환기설비와 겸용하게 되는데 횡류식 혹은 반 횡류식에서는 배기기능이 제연기능을 갖추게 되며 종류식에서도 환기팬이 환기기능과 제연기능을 겸하게 된다(표 5 참조).

표 4. 물 소화설비의 기준용량

구분	드래져 설비	스프링 물러 설비	소화용수 설비	옥내소화전 설비	옥외 소화전 설비	물분무 소화설비	
방수압	건축물	0.1MPa 이상	0.1~1.2MPa 이하	0.15MPa 이상	0.17~0.7MPa 이하	0.25~0.7MPa 이하	0.35MPa 이상
	도로 터널	(-)	(-)	(-)	0.35MPa 이하	(-)	0.35MPa
방수량	건축물 (이동)	80 l/min 이상	80 l/min 이상	800 l/min 이상 (가압송수장치 설치)	130 l/min 이상 (최대 5개) (20분 저장)	350 l/min 이상 (최대 2개) (20분 저장)	75 l/min 이상 (포워터 스프링클러 헤드)

※ 비고 : (-)표는 도로터널과 상관없음

즉, 도로터널내의 소화설비는 터널의 일반적 특성을 고려하여 터널길이 방향 중심의 기준용량으로 설정되어 있다. 옥내 소화전 설치간격은 50m이내를 요구하고 있으며 화재시 최대 사용개수는 3차로 이하 터널은 2개소, 4차로 이상 터널은 3개소 이상을 기준으로 하고 있다.

특히 함 설치간격 50m는 획일적으로 통일시키는 반면 방수량 거리를 확보하기 위해 15m의 예비호스를 3개 비치시켜 종방향 50m 길이의 단점을 보완하였다. 또한 물분무 설비는 물분무 헤드를 설치하며 밸브 및 함은 25m를 1개 구역으로 하여 화재시 3개 구역 75m 구역만 개방되는 조건으로 변경됐다.

표 5. 횡류식과 종류식의 일반사항

구분	횡류식(또는 반횡류식)	종류식
연기의 제어개념	화재지역으로부터 연기를 배연(exhaust smoke)하는 방식으로 연기 및 열기류의 방향성 제어가 곤란하여 화재규모가 큰 경우에는 적용성이 떨어진다.	화재지역으로부터 일방향으로 연기 및 열기류를 제어(제연, smoke control)하는 방식으로 열기류의 유동 방향 제어가 용이하다.
환기팬의 운전제어	급기 반횡류식의 경우, 화재시 배연모드로 전환하기 위한 대기시간과 역전운전 후 정상가동에 필요한 시간 지연이 길다.	일반적으로 30초에서 1분 이내에 제트팬 정상운전속도에 도달하지만, 터널 내 풍속이 정상상태에 도달하기 위해서 시간지연이 필요하다.

또한 환기 작동시 화재가 발생 되더라도 원래의 환기 방향을 유지하면서 제연기능을 유지하는 것이 중요하다.

제연계획은 화재발생 후 대피자가 대피하는 과정상의 제연과 대피 완료 후 터널내 소방대원 등이 진입하여 소화활동 시에도 가동 되게 된다. 화재 발생 후 대피가 시작되는 시점에는 제연팬 가동을 터널내 대피자의 유무, 대피방향 등을 충분히 확인한 후 수동작동을 원칙으로 한다. 제연설비 용량은 설계화재강도와 연기발생량에 의해 결정된다. 차량별 화재강도와 연기 발생량은 표 6과 같이 설정된다.

표 6. 설계화재강도 및 연기발생량

적용 차종	승용차	버스	트럭	탱크차량
화재강도(MW)	5 이하	20	30	100
연기발생량(m³/s)	20	60~80	80	200

임계풍속은 다음 식으로 계산하며, 보정계수(β)는 설계자가 수치시뮬레이션 등을 수행하여 신뢰성을 검증한 후에 적용함을 원칙으로 한다.

$$V_f = K_g Frc \frac{-1}{3} \left(\frac{gHQ}{\beta \rho_o C_p A_r T_f} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$T_f = \frac{Q}{\beta \rho_o C_p A_r Vrc} + T_o$$

여기서, Frc = 4.5

H: 화점에서 터널 천장까지의 높이(혹은 대표직경)다.

종단경사 보정계수는 다음 식으로 계산한다.

$$K_g = [1 + 0.014 \tan^{-1}(\text{grade}/100)]$$

제연설비 계획은 위험도지수 기준등급이 2등급 이상인 터널에 설치하며 화재에 대비한 제연설비는 화재 시 터널내 대피자의 분포특성을 고려하여 터널의 연장 및 터널의 교통특성에 따라 결정하며, 표 7에 제시한 제연방식의 적용을 권장하고있다.

표 7. 터널특성별 권장 제연방식

지역 및 통행방식	터널 길이	화재 시 적용 제연방식 및 방법
대면통행 및 도시지역	500m 이하	· 자연환기에 의한 제연
	500~1,000m 미만	· 기계환기에 의한 제연
	1,000m 이상	· 횡류 또는 반횡류식 · 약 800m 이내의 간격으로 집중배기 또는 구간배연이 가능한 시설을 설치하여 배연능력을 향상 할 수 있는 조치를 강구할 것을 권장한다. · 2,000m 이상의 터널은 배연능력을 향상하기 위해서 대배기구 방식을 권장한다.
지방지역의 일방통행	500m 미만	· 자연환기에 의한 제연
	500~3,000m 미만	· 위험도지수기준등급이 3등급 이하인 터널 : 자연환기방식 · 위험도지수기준등급이 2등급 이상인 터널 : 기계환기방식
	3,000m 이상	· 집중배기방식이나 대배기구방식 등 구간배연시스템에 의해 배연능력을 향상하기 위한 조치를 강구할 것을 권장한다.

대면통행터널 및 정체 빈도가 높을 것으로 예상되는 일방통행터널은 횡류 또는 반횡류식을 적용하는 것을 권장하며, 종류식의 적용은 정량적 위험도 평가를 수행하여 안전성을 검증한 후에 적용함을 원칙으로 하고 있다.

소형차 터널은 정량적 위험도 평가를 수행하여 안전성을 검증하여 제연설비를 계획하도록 하고 있다.

2.3.2 제연용 환기 용량 설계

횡류식은 천장에 설치된 덕트를 통해 배연을 수행하는 방식으로 배기구에 대한 개폐조정이 불가능한 균일배기 방식과 배기구에 전동댐퍼를 설치하여 화재 시 배연구간을 선택적으로 선정하여 배연을 수행할 수 있는 그림 3과 같은 대배기구방식으로 구별할 수 있다.

화재 시 배연이 주행 공간에서 이루어지기 때문에 연기



그림 3. 대배기구 설치사진

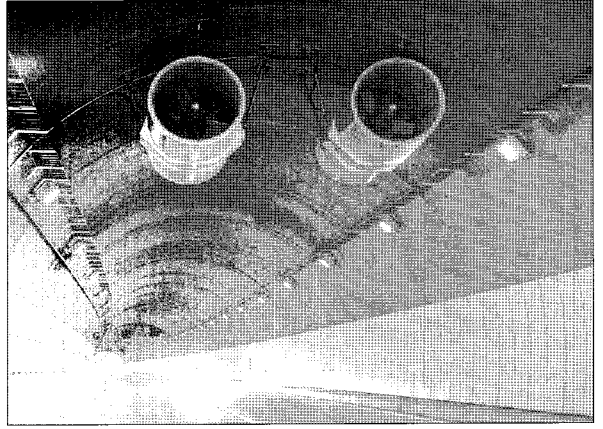


그림 5. 제트팬 사진

뿐만 아니라 주변의 공기가 유입되므로 배연량은 연기발생량(화재강도 : 20MW 기준, $80\text{m}^3/\text{s}$)보다 현저히 증가하므로 배연풍량(Q_E)은 터널 내 유속과 연기발생량(Q_s)을 근거로 산정한다.

특정조건에서의 배연풍량 산정은 다음과 같다.

- 균일배기방식(회류/반회류식)

$$: Q_E = 80 + 3.0Ar$$

(단, 배연구간연장 600m 이하, 터널풍속 1m/s 이하)

- 대배기구방식

$$: Q_E = 80 + 1.5Ar \text{ (단, 터널풍속 1m/s 이하)}$$

일반적으로 화재 발생지점으로부터 대칭적으로 200~300m 정도로 하며 배연효율은 터널 내 풍속 및 단면형상에 영향을 받기 때문에 그림 4와 같이 수치시물레이션을 통해서 검증 후 적용한다.

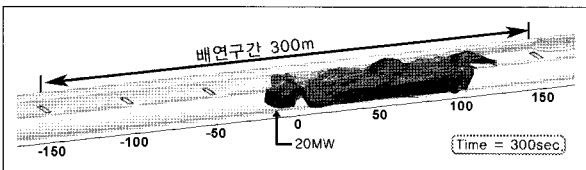


그림 4. 수치 시물레이션(배연)

종류식 터널의 화재시 화점부근의 연기가 역류하는 것

을 방지하기 위한 최소풍속인 임계풍속을 유지할 수 있도록 시스템을 계획되어야 하며 화재 시 제트팬(그림 5 참조) 대수는 임계풍속을 만족할 수 있도록 선정한다. 따라서 화재 시 제트팬 대수는 터널단면적, 터널 내 차량 수, 자연풍에 의한 환기저항 등을 충분히 고려해야 한다.

제연용 제트팬만 설치하는 경우에는 환기 시 제트팬의 승압효율 확보를 위해 제트팬 설치기준을 변경하여 적용할 수 있으며, 이에 따라 효율저하가 예상되는 경우에는 이를 고려하여 제트팬 대수를 산정한다.

방재용 제트팬은 화재 시 가압 및 화재안전성을 위해서 터널의 입출구부에 분산하여 설치함을 원칙으로 한다. 분산설치가 곤란한 경우에는 성층화 교란방지 및 제트팬의 소선을 최소화할 수 있도록 설치위치를 정하며, 이를 검증한 후에 설치할 것을 권장한다.

2.3.3 화재 시 제연기기 운영요령

제연설비가 설치되는 터널은 기본적으로 터널연장이 1km 이상 되므로 부대적으로 소화전설비와 자동화재 탐지설비가 설치되어야 하며, 이에 따른 관리사무소 설치가 필수가 된다. 즉 제연설비가 설치되는 터널은 연장 1km 이상급 터널에 해당되는 경보설비, CCTV, 교통량 감지설

비 등이 설치되어야 하며, 또한 관리사무소에 관리자가 항상 상주하게 된다.

따라서 터널 중앙 제어실에서 관리자가 해야 하는 기기 작동요령 및 일련의 행동요령이 비상시 관리자의 실수 등을 최소화시키기 위한 수동, 자동 작동요령을 포함한 제어로직이 작성되어야 한다. 그러나 제연설비 조작의 우선 순위는 터널내 현장상황을 충분히 파악하고 작동 시킬 수 있도록 수동조작을 원칙으로 해야 한다.

■ 종류식 터널의 제연기기 운영

원활 교통시 일방통행 터널의 화재초기에는 차량주행 방향으로 임계풍속을 유지할 수 있도록 제연설비를 운전하기 위해서는 터널 내 풍속제어를 위해서 풍속제어로직 및 제연팬 운전모드의 설정이 필요하다.

화재위치, 화재 발생차종에 따른 제연팬 운전모드를 작성하여 비차운영하며 상대터널의 제트팬 또는 환기시설은 피난연결통로로 연기유입을 방지하기 위해서 가압운전모드로 운전되도록 한다.

화재터널의 제트팬이 터널입구 및 터널 출구부에 분산 설치된 경우에는 터널 출구의 제트팬을 가동하여 화재터널의 압력이 부압이 되도록 운전하는 것이 바람직하다.

또 화재에 근접한 제트팬의 가동은 연기의 성층화를 교란하게 되므로 가동하지 않는다.

대면통행 터널 및 일방통행 터널에서 교통이 정체된 경우, 초기단계에는 화재 전후방에 대피자가 존재하게 되므로 최대한 낮은 풍속을 유지할 수 있도록 제트팬의 기동을 정지하여, 성층화를 교란하지 않도록 하여야 하며 대피자가 안전한 장소에 대피한 것이 확인된 후에는 형성된 기류의 방향으로 임계풍속을 유지할 수 있도록 운전한다.

■ 횡류식 터널의 제연기기 운영

횡류환기 특성상 평상시 급기를 수행하고 화재 시에 배기운전으로 전환하는 균일배기방식을 적용하는 경우, 급기구는 풍량조정을 통해서 환기효율이 저하할지라도 배

기 시 균일한 풍량이 발생할 수 있도록 급기구의 개도를 조정하여 운영한다.

일방통행터널에서 비정체 시에 화재가 발생하는 경우에는 구역제어 또는 대배기구에 의한 선택배기를 하는 경우, 차량의 주행방향으로 기류가 형성될 수 있도록 배연계획을 수립하고 운전하여야 한다.

대면통행터널 및 일방통행터널(정체시)은 차량의 정체에 의해서 화재 상하류에 대피자가 존재할 가능성이 있으므로 화재 지점의 풍속을 최대한 낮게 유지할 수 있도록 환기기 운전계획을 수립하여 운전한다.

2.3.4 제연시설의 온도저항 값

연기를 주행공간으로부터 직접 배출시키는 제연용 제트팬은 250℃의 온도에서 60분 이상 정상 가동상태를 유지할 수 있어야 하며 화재에 간접 노출되는 횡류식 또는 반횡류식 및 대배기구 방식의 배연용 팬은 덕트의 길이 등에 따라서 노출온도가 차이가 있으므로 수치해석 등을 통해서 내열온도 등을 검토한 후에 필요시 냉각설비를 적용한다. 대배기구의 개폐용 전동모터는 250℃ 이상의 온도에서 60분 이상 정상 가동되어야 하며, 정전 등 전원이 차단되는 경우에도 조작된 상태를 유지할 수 있어야 한다. 주행 공간 내의 전원 공급라인과 제트팬과 전원연결 장치들은 250℃의 온도에서 60분 이상 운전상태를 유지할 수 있도록 하며 이와 같은 열에 대한 조건은 한국도로공사의 터널환기 설계기준에도 규정화 되어있다.

2.4 터널위험도 평가

2.4.1 터널방재시설 등급 분석

터널에 대한 방재계획을 수립하기 위해서는 터널제원 수집, 등급산정 및 등급별 시설물결정 순서로 계획을 수립하게 된다(표 8 참조).

표 8. 방재등급 결정 순서

1단계	터널제원 수집	<ul style="list-style-type: none"> 연장 교통량 표고차, 경사도 내공높이, 터널곡선 반경, 감시 시스템 유도시스템, 통행방식 등
2단계	터널등급 산정	<ul style="list-style-type: none"> 터널연장에 따른 기준등급 산정 위험도 지수(X) 기준등급산정
3단계	등급별 시설물 결정	<ul style="list-style-type: none"> 연장 기준등급에 의한 시설물 위험도지수 기준등급 시설물, 시설물 결정 및 권장시설물 결정

또한 터널 방재시설 설치를 위한 터널등급 결정은 터널 연장을 기준으로 하는 연장 기준등급과 터널의 교통량, 연장 등의 제반 위험요소를 고려한 위험도 지수 기준등급으로 표 9와 같이 결정한다.

표 9. 터널등급 기준

등급	터널연장(L) 기준등급	위험도지수(X) 기준등급
1	3,000m 이상 ($L \geq 3,000m$)	$X > 29$
2	1,000m 이상, 3,000m 미만 ($1,000 \leq L < 3,000m$)	$19 < X \leq 29$
3	500m 이상, 1,000m 미만 ($500 \leq L < 1,000m$)	$14 < X \leq 19$
4	연장 500m 미만 ($L < 500$)	$X \leq 14$

위험도 평가 시 각 지수의 기준은 표 10과 같으며 터널의 특성에 따라 각 항목별 해당지수를 책정한다.

2.4.2 터널등급 결정과 문제점

터널방재 시설은 연장기준등급에 의해서 설치되는 시설과 위험도 지수 기준등급에 의해서 설치되는 시설로 구분되며 설치기준은 표 11과 같다.

표 10의 산정에 항의 값을 비교하면 도로터널에 대한 방재시설 설치를 위한 등급산정은 터널연장을 기준으로 하는 연장기준등급과 교통량, 터널 제반조건 등의 위험인자를 고려한 위험도지수 기준등급으로 표 9와 같이 분류된다.

표 10. 터널 위험도 평가 기준

세부평가항목	범위	위험도 지수	적용 예				
			U	JR	SI		
사고 확률	주행거리계 (교통량×연장) (Vehkm/tube/day)	8,000 미만	1.5	244,377 (382%)	87,278 (136%)	12,400 (19.4%)	
		8,000 이상~16,000미만	2.5				
		16,000 이상~32,000미만	5.0				
		32,000 이상~64,000 만	7.5				
터널 특성	표고차 및 경사도	10 미만	0.5	213.82	-	13.81	
		10 이상~20 미만	1.0				
		20 이상~30 미만	1.5				
		30 이상	2.0				
	진입부 경사도(%)	3.0 미만	0.5	1.95	0.5	0.5388	
		3.0 이상	1.0				
	터널높이(m)	7.5 이상	1.0	7.357	7.015	7.333	
		5.0 이상~7.5 미만	2.0				
		5.0 미만	3.0				
	터널곡선반경(m)	1,800m 이상	0.5	2,024	-	4,000	
1,800m 미만		1.0					
대형 차량	대형차 혼입률 (%)	10 미만	0.5	25.18	17.28	25.34	
		10 이상~17.5 미만	1.0				
		17.5 이상~25 미만	1.5				
		25 이상	2.0				
	위험물 수송 관련	500 미만	0.5	44,573 (892%)	10,394 (208%)	2,554 (51.1%)	
		500 이상~1,000 미만	1				
		1,000 이상~2,500 미만	2				
		2,500 이상~5,000 미만	4				
	감시 시스템	있음	0	없음	없음	없음	
		없음	1				
유도 시스템		있음	0				
유도 시스템	없음	1	없음	없음	없음		
	있음	0					
	없음	1					
정체 정도	서비스 수준	LOS A ~ LCSC	1	서비스 수준 "D"	서비스 수준 "C"	서비스 수준 "C"	
		LOS D	2				
		LOS E ~ LOS F	3				
	대면통행	3					
터널 내 합류/분류	없음	0	없음	없음	없음		
	있음	2					
	교차로/신호등 /TG 등	없음				0	
통행 방식	구분	시설	-	-	-	-	
		길어깨	중분대				
	일방통행	○	-	1	일방 통행	일방 통행	
		×	-				2
	대면통행	○	○	3	-	-	-
		×	○				
○		×	5				
×		×	6				
계				2등급	2등급	3등급	

「도로터널 방재시설 설치 및 관리지침」 이해와 분석 - 국토해양부, 2009. 4 개정판 기준 -

표 11. 등급별 방재시설 설치기준

방재시설	터널등급	등급				비고	
		1등급	2등급	3등급	4등급		
소화 설비	소화기구	●	●	●	●		
	옥내소화전설비	●	●				
	물분무설비	○					
경보 설비	비상경보설비	●	●	●			
	자동화재탐지설비	●	●				
	비상방송설비	○	○	○			
	긴급전화	○	○	○			
	CCTV	○	○	△			
	영상유고감지설비	△	△	△			
	라디오재방송설비	○	○	○	△	△: 200m 이상 4등급터널	
	정보표시판	○	○				
	진입차단설비	○	○				
피난 대피 설비 및 시설	비상조명등	●	●	●	△	△: 200m 이상 4등급터널	
	유도표지등	○	○	○			
	피난 대피 시설	피난연결통로	●	●	●		
		피난대피터널 ⁽¹⁾	○	△			
		피난대피소 ⁽¹⁾	○	△			
비상주차대		○	○				
소화 활동 설비	제연설비	○	○				
	무선통신보조설비	●	●	●	△ ⁽²⁾		
	연결송수관설비	●	●				
비상전 원설비	비상콘센트설비	●	●	●			
	무정전전원설비	●	●	●	△ ⁽³⁾		
	비상발전설비	●	●				

● 기본시설 : 연장기준등급에 의함

○ 기본시설 : 위험도지수기준등급에 의함

△ 권장시설 : 설치의 필요성 검토에 의함

(1) 피난연결통로의 설치가 불가능한 터널에 설치

(2) 4등급 터널의 경우, 라디오재방송설비가 설치되는 경우에 병용하여 설치함

(3) 4등급 터널은 방재시설이 설치되는 경우에 시설별로 설치함

위험도 지수 산정은 표 10과 같이 세부평가 기준이 분류되어 있으며 각 항의 범위 내에서 위험도지수를 결정하게 된다.

여기서 주목 할 것은 터널연장과 교통량과의 관계를 갖는 사고확률의 주행거리계(대·km/[tube·day])와 대형차량에 대한 위험물 수송관련 대형차 주행거리계(대·km/[tube·day])이다.

최근 한국도로공사에서 건설중인 춘천-양양, 울산-포항 및 함양-울산 건설공사 구간에는 대형터널이 계획되고 있어 터널연장과 연관된 지수값 산정이 불균형을 이루고 있다고 판단한다. 표 10의 산정에 항의 값을 비교해보면 문제점을 찾을 수 있다.

특히 지난 2월에 기본설계가 완료되어 현재 실시설계중인 춘천-양양 구간의 IJ터널(L=10.6km)에 물분무 설비 설치기준을 만족하지 못하는 것은 이해하기 어렵다. 주행거리계 점수를 분석해보면 위험도지수 최고 점수 10점을 3.82배 이상 되지만 이에 해당되는 점수 배분이 충분하지 못해 위험도 지수값을 많이 얻지 못한 결과가 된다. 즉, 동일교통량 조건에서 인제터널 연장이 10.6km이지만 터널연장 2.9km 수준의 터널과 동일한 값을 얻게 되었고, 대형차 주행거리계에서도 최고점인 6점의 계수 5000보다 무려 8.92배 되지만 6점 이상의 충분한 점수를 얻지 못했다. 즉, 동일 교통량(대형차 혼입률) 조건에서 터널연장 1.23km 수준의 터널과 동일한 값을 얻은 것이라 할 수 있다.

이와 같은 방법으로 2000년에 준공되어 공용중인 중앙고속도로상의 JR터널(L=4.6km)인 경우는 위험도 점수 25.5를 받아 위험도지수 기준 1등급 터널이 되지 못해 물분무 설비가 해당되지 않는 것으로 산정 되었다. 또한 SI터널(L=2.5km수준)의 경우는 연장기준 2등급이 충분하지만 위험도지수 16.5점으로 위험도지수 기준등급은 3등급에 해당되어 표 11의 등급별 방재설치기준에 기술되어 있는 제연설비 설치가 제외되는 경우가 발생된다. 이런 현상이 발생되게 된 이유는 현저히 적은 교통량이 원인이다.

SI터널의 준공 후 20년 되는 해인 2034년의 교통량 수준이 서비스 수준 A등급에 해당되어서 교통량관련 주행거리계와 대형차 주행거리계 지수 최고점수 값에 19.4%, 51.1%수준에 못미치는 것을 분석된다.

2.5 정량적 위험도 평가

정량적 위험성 평가기법 QRA(Quantitative Risk As-

「도로터널 방재시설 설치 및 관리지침」 이해와 분석 - 국토해양부, 2009. 4 개정판 기준 -

essment)는 지난 20여년에 걸쳐 주로 항공우주, 원자력 발전소 등의 산업분야에서 발전해 왔다.

특히, 원자력 발전소에서는 그 특성상 QRA 기법을 이용한 안전성 관리기법의 연구개발이 가장 활발하게 이루어져 현재는 확률적인 위험성 평가가 일반화 되어있다.

정량적 위험성 평가기법의 기본이 되는 개념을 4가지 항목으로 정리하면 다음과 같다.

- ① 무엇이 잘못될 것인가?
- ② 원인은 무엇인가?
- ③ 결과는 어떠한 것인가?
- ④ 가능성은 얼마나 되는가?

위험성은 사고가 일어날 확률에 사고의 크기를 곱한 값으로 표현될 수 있으며 위험의 단위는 단위시간당 발생할 수 있는 사상자 수로 표시된다.

$$\text{위험(Risk)} = \text{확률(Frequency)} \times \text{사고크기(Severity)}$$

즉, 모든 과정에서 발생할 수 있는 중대사고에 대한 잠재 위험들을 찾아내고 원인 분류와 그에 따르는 각각의 경우별 정량적인 크기를 갖는 위험성을 발생빈도(Frequency)와 사고결과(Consequence)의 함수로 평가하는 기법이며, 분석흐름도는 그림 6과 같다.

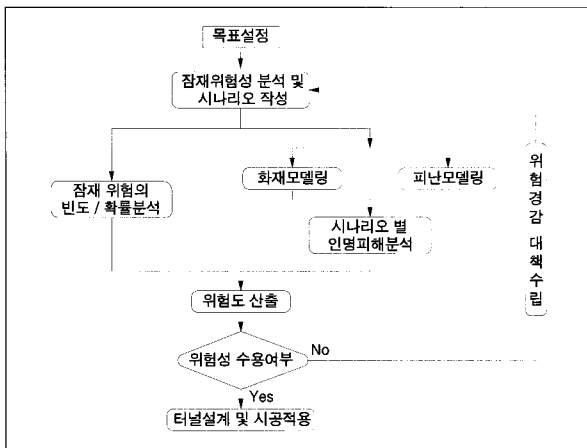


그림 6. 정량적 위험도 분석 흐름도

■ 도로터널의 QRA 실시조건

도로터널 방재에 대한 정량적 위험도 평가를 위해서는 화재발생 시나리오의 작성 및 시나리오별 사고 발생률의 산정, 화재해석, 차량정체 및 대피해석, 유해가스가 인체에 미치는 영향의 정량화, 사상자수의 추정, 위험도 평가 기준에 의한 위험 수준에 대한 분석 등이 필요하다.

방재지침서상의 정량적 위험도 평가를 시행해야 하는 경우는 연장기준 3등급(500m이상) 이상 터널에서 연장기준등급 대비 위험도 지수등급을 상향 및 하향 조정해야 하는 경우 시행한다.

즉, 연장기준 2등급(1000m이상 터널) 이상인 터널중 위험도지수기준등급이 3등급이하로 평가되는 경우에는 정량적 위험도 평가를 실시하여 터널의 안전성이 확보가 되는 경우에 등급을 하향 조정하게 된다.

■ 사고발생 시나리오

정량적 위험도 평가에 적용되는 사고발생률은 표 12와 같이 적용한다.

즉 2006년도에 터널내에서 화재사고가 발생할 확률은 1.7건/[억km.Veh] 가 된다는 뜻이며 이는 매우 작은 값이 된다.

그림 7은 승용차와 화물차의 화재구분 및 각 차량에 대한 화재 시나리오의 산정에 이다.

■ 대피시간 산정

대피시간은 감지시간, 반응/결정시간, 이동시간으로 구분하며 이들의 합을 대피시간으로 한다. 대피 결정시간은 차량을 버리는 시간과 대피를 결정하는 시간으로 구분되며 화재감지 시간은 감지기의 감지결정 소요시간을 1분으로 한다.

■ 사상자수 추정

화재시 인체에 영향을 미치는 유해가스는 일산화탄소, 이산화탄소, HCN(시안화수소 고도합성수), 산소저감 등

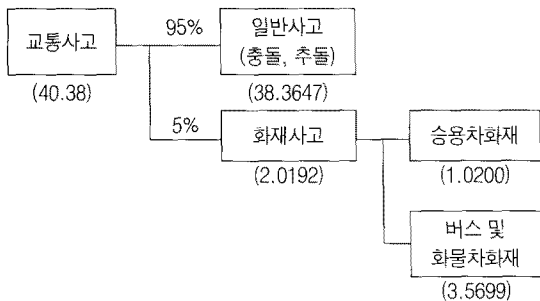
표 12. 사고발생률

연도	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	
자동차등록 대수 (100만 대)	12.1	12.9	13.9	14.6	14.9	15.4	15.9	
연간 총 주행거리 (10억 Veh·km)	290	300	310.8	317	324	328	331	
일반도로에서 일반사고 발생건수(A)	290,481	280,579	231,026	240,832	220,755	214,171	213,745	
터널 사고 건수 (건/yr)	일반 사고 발생 건수 (B)	301	292	299	453	392	549	567
	화재 사고 (주1) 발생 건수 (C)	12	8	13	13	4	7	32
일반사고 발생 건수비(B/A) [%]	0.10	0.11	0.11	0.19	0.17	0.26	0.27	
화재사고 발생 건수비(C/B) [%]	3.99	2.74	5.02	2.87	1.05	1.28	5.64	
터널사고 발생률 (건/억 km.Veh)	일반사고 (주2)	53.0	45.8	34.0	45.4	35.9	34.4	34.1
	화재사고 (주3)	2.65	2.29	1.70	2.27	1.80	1.72	1.70

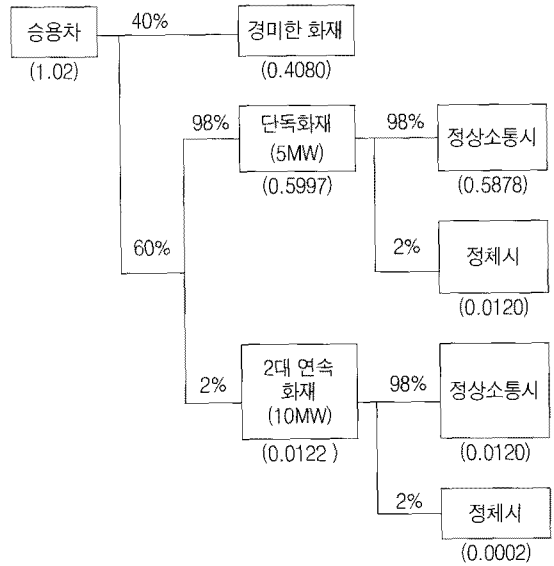
(주1) 정부 DB에서 검색되지 않는 자료로, 소방방재청, 국정감사자료, 한국도로공사 통계자료 및 각종 언론매체 등에 제시된 자료를 재정리한 것임.

(주2) 일반도로의 사고발생률(=사고 건수/연간 총 주행거리=건/10⁶Veh·km) 중 터널에서 발생할 수 없는 사고(횡단보도사고 등)에 대한 감소율(47.2%)을 고려하여 적용한 결과임.

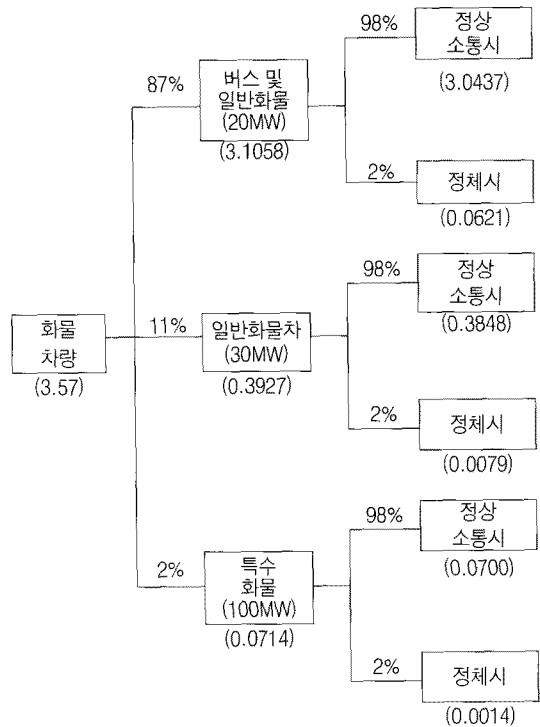
(주3) 터널에 대한 일반사고 중 화재사고의 비(C/B비율)를 적용하여 화재사고 건수로 환산한 결과임.



(a) 승용차화재 및 버스와 화물차화재 구분



(b) 승용차 화재 시나리오



(c) 화물차화재 발생 시나리오

그림 7. 차량별 화재구분 화재시나리오

「도로터널 방재시설 설치 및 관리지침」 이해와 분석 - 국토해양부, 2009. 4 개정판 기준 -

이 있으며 일산화탄소 가스를 기준으로 한다. 유해가스에 따른 유효복용분량 산정은 표 13과 같이 산정한다. 일반적으로 유효복용분량(FEDI)이 0.3이상인 경우에는 사상자로 판단한다.

표 13. 유효 복용분량 산정식

$$F_{ICO} = \frac{\%COHb}{D} = \frac{8.2925 \times 10^{-4} (\text{ppmCO})^{1.036} t}{D}$$

$$F_{IO_2} = \frac{t}{e^{8.13 - 0.54(20.9 - \%O_2)}}$$

$$F_{ICO_2} = \frac{t}{e^{(6.1623 - 0.5189\%CO_2)}}$$

$$F_{IHEAT} = \frac{t}{e^{5.1849 - 0.0273T}}$$

$$F_{IRAD} = \frac{q''^{1.33}}{80} t$$

$$FED_1 = F_{ICO} \times V_{CO_2} + F_{ICO_2} + F_{IO_2} + F_{IHEAT} + F_{IRAD}$$

여기서 D : 의식불명에 이르게 하는 COHb% 농도(%) ≈ 30%
 t : 시간(min)
 %O₂ : 산소농도(%)
 %CO₂ : 일산화탄소 농도
 T : 온도(°C)
 q'' : 복사강도(Radiative Intensity : kW/m²)

■ 사회적 위험도 평가기준

사회적 위험도 평가기준은 경제협력기구(OECD; Organization for Economic Cooperation and Development)와 국제상설 도로협회(PIARC; Permanent International Association of Road Congresses) 및 다수의 국가에서 제시하고 있으며, 방재지침서에서는 그림 8과 같이 제시하였다.

3. 결론

방재지침서중 기계설비관련 소화설비, 제연설비 및 위험도분석에 대해 설계자 입장에서 분석해 보았다.

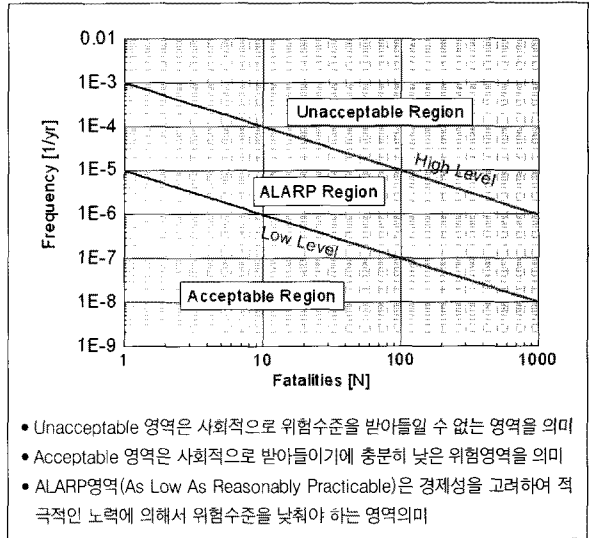


그림 8. 사회적 위험도 평가기준

터널내 사고나 화재발생 확률이 매우적인 입장에서 많은 초기투자비와 지속적인 관리비를 투자하면서 설치되어야 하는 방재설비는 양면성을 갖고 있다.

사고가 없는 경우는 낭비적 요소가 되지만 사고가 발생되어 초기에 사고를 수습했다면 그보다 다행스러운 것은 없을 것이다.

터널내 방재시설물이 많다 적다하는 것은 각 기계, 전기, 건축, 토목 등의 분야별로 각기 다르게 판단될 수 있다.

따라서 터널을 건설하고 관리하는 입장에서 통행자에게 편리하고 안전한 통행 서비스를 제공한다는 대원칙에서 생각한다면 방재시설 지침서에 대한 견해를 달리 해야 할 것이다.

즉, 차량통행이 현저히 많고 고속통행을 요구하는 대도시 혹은 수도권 주변의 고속도로상의 터널에서는 현재의 방재시설 지침서 이상의 안전성이 필요하므로 방재시설물 설치를 더욱 권장하도록 하고 차량통행이 매우적인 지방 산악터널인 경우는 현재의 방재시설 지침서를 고집할 것이 아니라 그 상황에 맞게 터널 관리자가 수정된 방재 지침을 수립하는 것이 바람직하다고 생각한다.

동일한 기준과 잣대로 모든 조건을 맞추려 하면 과부족 현상 발생되기 마련이다.

소방법규내 도로터널의 화재안전기준 NFSC603과 같이 중앙부처의 소방법규에서는 원칙적이고 기본적인 내용을 기술하고 있고 운영상 세부적이고 융통성이 필요한 부분에서 대해서는 행정자치부령 혹은 터널관리 관청에서 상황에 적합한 세부기준을 수립하는 것이 현재로서는 현명한 판단이라 생각한다.

방재시설 설치 지침은 나름대로 많은 연구와 수정을 통해 터널성격에 적합한 기준을 수립하였다는 것을 이해할 수 있으며 향후 더욱더 안전한 터널을 위한 연구 노력이 지속되기를 기대한다.

참고문헌

1. 국토해양부, 2009. 4. “도로터널 방재시설 설치 및 관리지침”.
2. 건설교통부, 2004. 12. “도로터널 방재시설 설치지침”.
3. 소방방재청, 2008. 12. “소방시설 설치유지 및 안전관리에 관한 법률”.
4. 한국도로공사, 2002. 10. “고속도로터널 환기시설 설계기준”.
5. 한국도로공사, 2009. 2. “인제터널 기본설계 보고서”.
6. 한국도로공사, 2000. 12. “죽령터널 실시설계 보고서”.
7. (사)한국터널공학회, 2009. 6. “터널공학회지(P47~58)”.