

2022년도 연구용역보고서

터널 내화 설계 및 화재피해 복구 방안 연구


A Study on Tunnel Fire Protection Design and Fire
Damage Restoration Method

발주기관

한국도로공사 도로교통연구원

용역기관

강원대학교

 한국도로공사

제 출 문

한국도로공사 도로교통연구원장 귀하

이 보고서를 “터널 내화 설계 및 화재피해 복구 방안 연구” 용역 결과보고서로 제출합니다.

2022. 11.

용역기관명 강원대학교

용역책임자 박 철 우

세부책임자 김 용 재

김 승 원

이 중 한

참여연구원 정 해 국

주 민 규

Topendra Oli

장 태 진

김 기 현

최 승 원

김 동 우

하 동 수

목 차

목 차	i
표 목 차	iv
그림목차	vi
요 약 문	viii
제 1 장 서론	1
1.1 연구 배경	1
1.2 과업 목적 및 방법	2
제 2 장 국내의 기술동향	7
2.1 도로터널 화재 특성	7
2.1.1 콘크리트 재료 및 구조부재의 고온노출 시 거동특성	8
2.2 국내외 도로터널 내화설계	9
2.2.1 국내 도로터널 내화설계 기준	10
2.2.1.1 도로터널 내화지침(국토교통부, 2021)	10
2.2.1.2 도시지역 지하도로 설계지침(국토교통부, 2016)	11
2.2.1.3 고속도로 터널 내화설계 및 시공지침(안)(한국도로공사, 2009)	12
2.2.2 국외 도로터널 내화설계 기준	13
2.2.2.1 미국 NFPA 502	13
2.2.2.2 유로코드(Eurocode)	15
2.2.2.3 PIARC (2004) Fire and Smoke Control in Road Tunnels	17
2.2.2.4 Guidelines for Structural Fire Resistance of Road Tunnels (ITA 2017)	22

제 3 장 도로터널 화재위험도 분석	24
3.1 도로터널 화재사고 분석	24
3.1.1 고속도로 화재사고 분석	24
3.1.2 고속도로 화재사고의 확률밀도함수 분석	30
3.2 고속도로 화재 위험물 수송차량 운송 특성	32
3.2.1 국내 화재 위험물질 수송 현황	32
3.2.1.1 수단별 현황	32
3.2.1.2 지역별 현황	33
3.2.2 고속도로 화재 위험물질 수송차량 사고현황 분석	33
3.2.2.1 위험물질 수송차량 사고현황	33
3.2.2.2 피해유형별 사고현황	35
3.3 정량적 화재위험도(안) 분석	37
3.3.1 정량적 위험도 평가절차(안)	37
3.3.2 위험의 평가 기준(안)	39
제 4 장 화재위험도 및 내화수준별 도로터널 내화설계	41
4.1 도로터널 내화지침(국토교통부, 2021) 분석	41
4.1.1 도로터널 내화지침 해설서(안)	41
4.2 내화수준별 도로터널 내화설계	41
제 5 장 화재위험도 및 내화수준별 도로터널 내화 시공절차 개발	43
5.1 상태평가 기준 및 방법(안)	43
5.1.1 상태평가 기준	43
5.1.2 상태평가 항목 및 기준	51
5.1.3 상태평가 결과 산정방법	61
5.2 안전성평가 기준 및 방법(안)	65
5.2.1 일반	65
5.2.2 안전성 평가 기준	67
5.2.3 안전성 평가 결과 산정 방법	69
5.3 터널 콘크리트 내화품질 관리방안(안)	72

제 6 장 화재피해 진단 및 복구 매뉴얼(안)	83
6.1 내화 방안의 유지관리	83
6.1.1 일반	83
6.1.2 화재손상을 입은 후의 유지관리	84
6.1.3 진단	92
6.1.4 보수·보강	92
6.1.5 보수·보강 후의 내화 방안의 유지관리	95
6.1.6 기록	95
제 7 장 결론	96
참 고 문 헌	98

표 목 차

표 1.1 과업의 세부일정	4
표 2.1 터널화재로 인하여 터널 내부 벽면에 고려하는 온도(심재원 등, 2018)	8
표 2.2 발열량 기준표(NPFA 502)	14
표 2.3 발열량과 내화성능 등급표(국토교통부, 2017)	14
표 2.4 각국의 일반도로 터널화재 사고사례	18
표 2.5 각국의 고속도로 터널화재 사고사례	18
표 2.6 도로화재위험도 피해사례	19
표 2.7 터널 화재실험에 적용한 화재 에너지 비교	19
표 2.8 터널화재의 설계 목적에 따른 화재의 특성	20
표 2.9 터널화재 관련 차량의 종류에 따른 등급	22
표 2.10 도로터널 구조물의 내화설계기준	23
표 3.1 연도별 화재사고 원인 분석결과	25
표 3.2 화재사고 발생 이후 추가사고 분석결과	25
표 3.3 화재사고 차종 중 위험물 운반차량 분석결과	26
표 3.4 차종별 상세정의	26
표 3.5 각 연도별(2012~2016년) 교통량 및 화재사고 건수	27
표 3.6 차량 종류별 교통량 및 노선(100km) 대비 화재사고 건수 분석결과	28
표 3.7 사고발생률(도로터널 방재·환기시설 설치 및 관리지침(국토교통부, 2021))	30
표 3.8 화재사고조사 차량분류 및 화재강도	31
표 3.9 화재강도별 확률분포	32
표 3.10 고속도로 피해유형별 사고현황(최윤희 등, 2018)	36
표 4.1 터널 부대시설물에 대한 내화수준 권고사항(ITA, 2017)	42
표 5.1 터널의 기본 시설물과 부대 시설물의 종류	43
표 5.2 터널 상태평가 항목	44
표 5.3 채래식 터널(조적식 라이닝)	45
표 5.4 채래식터널(무근콘크리트 라이닝)	45
표 5.5 NATM터널(무근콘크리트 라이닝)	46

표 5.6 NATM 터널(철근콘크리트 라이닝)	46
표 5.7 TBM 터널(콘크리트 세그먼트 라이닝)	47
표 5.8 개착식 터널(BOX형 철근콘크리트 구조물)	48
표 5.9 부대시설 상태평가 항목	49
표 5.10 부대시설의 가중치	50
표 5.11 무근 콘크리트	51
표 5.12 철근 콘크리트	51
표 5.13 균열	52
표 5.14 누수	54
표 5.15 파손 및 손상	55
표 5.16 재질열화(박리, 층분리 및 박락, 백태, 재료분리, 철근노출, 탄산화, 염화물)	56
표 5.17 배수상태	57
표 5.18 지반상태	58
표 5.19 갯문(접속부)상태	58
표 5.20 공동구 상태	59
표 5.21 특수조건(추가점수)	59
표 5.22 균열	60
표 5.23 파손 및 손상	60
표 5.24 부대시설의 가중치	63
표 5.25 라이닝 결합지수 산정	64
표 5.26 라이닝 상태평가 결과 산정	64
표 5.27 터널 주변상태 결합점수 산정	65
표 5.28 터널 상태평가 결과 산정	65
표 5.29 시설물의 안전성 평가 기준	68
표 5.30 터널의 안전성 평가 결과 산정(개착터널) 예	71
표 5.31 터널의 안전성 평가 결과 산정(ASSM 터널)예	71
표 5.32 시설물 안전성 평가 결과 산정표(안전율을 도입하지 않은 경우)	72
표 5.33 정기점검시의 점검항목 및 장비	78
표 5.34 정기점검의 구분	79
표 5.35 정밀검사 시의 점검항목 및 장비	81

그 립 목 차

그림 1.1	사매2터널 내 화재사고	2
그림 1.2	상주터널 내 화재사고	2
그림 1.3	달성 내 화재사고	2
그림 2.1	차량화재 실험을 통한 터널 내부 횡단면 온도 측정결과	7
그림 2.2	차량화재 실험을 통한 터널 내부 종단면 온도 측정결과	7
그림 2.3	콘크리트의 고온노출 시 압축강도 감소	8
그림 2.4	콘크리트의 고온노출 시 탄성계수 감소	8
그림 2.5	고온노출로 인한 콘크리트 구조물의 표면 스폴링 피해 사례	9
그림 2.6	고온노출에 따른 콘크리트 구조물 거동특성	9
그림 2.7	도시지역 지하도로 설계지침(국토교통부, 2016)	11
그림 2.8	공칭 피복두께 c 및 화재노출면으로부터 가장 가까운 철근까지의 거리인 공칭 축 거리 a	17
그림 2.9	화재 실험 결과 터널 내부의 온도 측정 결과-횡단면(Fire and smoke control in road tunnels, PIARC Committee on Road Tunnels report, 1999)	20
그림 2.10	화재 실험 결과 터널 내부의 온도 측정 결과-종단면(Fire and smoke control in road tunnels, PIARC Committee on Road Tunnels report, 1999)	21
그림 2.11	터널 내부의 배출변화에 따른 최대 설계화재강도의 비교	21
그림 3.1	화재사고 원인별 분류	24
그림 3.2	차종별 화재발생 빈도 및 비율	24
그림 3.3	최근 5년간 연도별 총 화재발생건수 및 차량 화재발생 건수(소방방재청, 2021) ·	29
그림 3.4	화재강도별 확률밀도	32
그림 3.5	2011-2015년 고속도로 사고건수 및 분류	34
그림 3.6	차량사고의 주요사고 원인 비교 (과속, 졸음, 차량결함)	34
그림 3.7	위험물질 수송차량의 차량결함 사고 유형	35
그림 3.8	고속도로 화물차량 피해유형별 심각도	36
그림 5.1	부대시설 분류	48
그림 5.2	상태평가 결과 산정절차	62

그림 5.3 안전성 평가 결과 산정 방법 67

요 약 문

최근 고속도로의 도심지 통과 및 기존 고속도로 개량 등으로 지하고속도로 시공 및 설치 사례가 증가하는 추세이며, 특히 전체적인 통과 차량의 증가뿐만 아니라 가연물 등의 위험물을 적재한 대형차량의 통행량이 급증하고 있다. 이러한 터널 구조물에서 화재가 발생할 경우, 구조물의 손상과 함께 인명에 심각한 영향을 주게 된다.

도로터널 내 화재들로 인한 터널 구조물의 손상으로 도로망의 일시 폐쇄 등 사회·경제적으로도 매우 큰 손실을 초래하며, 급격한 사회발전으로 인한 교통량 증가와 함께 화재위험물질 운송차량의 증가도 이루어지고 있어, 터널 구조물을 포함하는 지하구조물의 화재 안전성에 대한 관심이 꾸준히 증대되고 있는 실정이다. 이러한 배경에 따라 이 과업의 목적은 다음과 같다

화재위험도 : 고속도로 실태를 고려한 화재위험도 설정

한계온도 : 국내 특성에 맞는 도로터널 부재 및 사용자재별 한계온도 설정

내화설계 : 화재위험도 및 내화수준별 도로터널 내화설계

내화시공 : 화재위험도 및 내화수준별 도로터널 내화 시공절차 개발

복구방안 : 화재피해 수준별 터널 상태 진단 및 복구방안 개발

과업의 목적을 달성하기 위한 과업 수행의 범위는 고속도로 실태를 고려한 화재위험도 설정, 도로터널에 사용되는 내화재료의 한계온도 설정, 화재위험도 및 내화수준별 내화설계, 도로터널 내화 시공절차 개발 및 화재피해 수준별 터널 상태 진단 및 복구방안 개발을 포함하고 있다.

도로터널 화재의 위험도 현황분석 결과, 화재사고 중 위험물 운반차량으로 인한 화재 사고 발생이 전체 화재사고의 약 5% 미만으로 분석되었다. 하지만 위험물 운송차량은 지역적 산업특성에 따라 교통량이 상당히 크게 변화하므로 위험도 분석 시 이러한 점이 반드시 고려되어야 할 것이다.

화재위험도 및 내화수준별 도로터널 내화설계 과업수행 결과, 도로터널 내화지침(국토교통부, 2021) 해설서(안)을 관련 분야 전문가들의 의견수렴 및 자문회의 등을 거쳐 작성하였다. 또한 화재 피해 진단 및 복구 매뉴얼 개발을 위해 국가·고속도로 건설기준과 연계한 품

질관리를 위한 검사법을 제시하였으며, 터널 상태평가 및 진단을 할 수 있는 화재피해 터널 진단 및 복구 매뉴얼(안)을 제시하였다.

제 1 장 서론

1.1 연구 배경

최근 고속도로의 도심지 통과 및 기존 고속도로 개량 등으로 지하고속도로 시공 및 설치 사례가 증가하는 추세이며, 특히 전체적인 통과 차량의 증가뿐만 아니라 가연물 등의 위험물을 적재한 대형차량의 통행량이 급증하고 있다. 이러한 터널 구조물에서 화재가 발생할 경우, 구조물의 손상과 함께 인명에 심각한 영향을 주게 된다. 일반적으로 화재가 발생할 경우, 온도의 상승, 복사열, 저산소, 시계의 감소 그리고 많은 유해가스의 생성 등을 유발하게 되며 모든 이러한 물리적 현상은 인체나 구조물, 기타 제연장비 및 차량들에게 치명적인 손상을 가하게 된다.

도로에서의 화재피해는 대부분이 터널, 지하도로와 같이 주로 밀폐된 공간에서 차량의 전도, 추돌 등의 사고로 인해 발생한다(서상길 등, 2014). 대표적인 터널화재로는 1999년에 발생한 Mont Blanc Tunnel 화재와 Tauern Tunnel 화재, 2001년에 발생한 Gothard Tunnel 화재가 있으며, 이들 화재로 인해 많은 인명피해와 구조물의 구조적인 손상이 발생하였다(국토교통부, 2017). 국내에서도 사매2터널(2020.2), 상주터널(2015.10) 및 달성터널(2005.11) 등에서 발생한 대형차량화재 사고로 터널 내 화재사고에 대한 사회적 불안감이 고조되고 있는 실정이다. 이러한 터널 내 화재들로 인한 터널 구조물의 손상으로 도로망의 일시 폐쇄 등 사회경제적으로도 매우 큰 손실을 초래하며, 급격한 사회발전으로 인한 교통량 증가와 함께 화재위험물질 운송차량의 증가도 이루어지고 있어, 터널 구조물을 포함하는 지하구조물의 화재 안전성에 대한 관심이 꾸준히 증대되고 있는 실정이다.

그간 건설된 도로터널은 대부분 라이닝이 하중을 직접 지지하지 않고 내화재 역할을 하는 NATM 방식으로 건설되어 화재에 안전한 것으로 인식되어왔다. 또한 화재 시 도로터널의 구조적 안정성을 확보하기 위한 내화설계는 거의 이루어지지 않고 있으며, 방재시설 위주로 대응하고 있는 실정이다. 지하고속도로나 침매터널의 경우 산악지 도로의 터널에서 사용하는 공법인 NATM 방식의 터널과는 달리, 철근콘크리트 부재가 하중에 직접적으로 저항하는 형태의 구조용 터널 비율이 높다. 이러한 터널들은 화재 시 접근성이 떨어져 피해 확산 및 터널붕괴와 같은 재난사고로 발전할 가능성이 존재하며, 화재가 발생하고 고온에 노출되

면 구조물을 구성하는 콘크리트에서는 강도 저하 및 폭렬 등의 손상이 발생하게 되고 콘크리트 및 내부의 철근이 한계온도 이상으로 노출될 경우 구조물의 안정성에 직접적으로 영향을 미치게 된다.



그림 1.1 사매2터널 내 화재사고



그림 1.2 상주터널 내 화재사고



그림 1.3 달성 내 화재사고

따라서, 터널화재로 인한 피해를 최소화하고 이용객의 안전을 확보하기 위해 고속도로 터널의 한계온도 설정, 고속도로 터널 특성에 따른 내화설계 및 시공 절차 개발을 통한 화재 안전대책 마련이 시급한 실정이다. 또한 불가피하게 고속도로 터널 내에서의 화재가 발생하였을 경우, 터널 상태평가 및 진단을 할 수 있는 화재피해 터널 진단 및 복구 매뉴얼(안) 정립이 필요한 실정이다.

1.2 과업 목적 및 방법

이 연구용역은 (1) 화재위험 : 고속도로 실태를 고려한 화재위험도 설정, (2) 한계온도 : 국내 특성에 맞는 도로터널 부재 및 사용자재별 한계온도 설정, (3) 내화설계 : 화재위험도

및 내화수준별 도로터널 내화설계, (4) 내화시공 : 화재위험도 및 내화수준별 도로터널 내화 시공절차 개발, (5) 복구방안 : 화재피해 수준별 터널 상태 진단 및 복구방안 개발을 포함한다. 이 연구용역에서 수행하는 내용 및 방법은 다음과 같다.

가. 화재위험 : 고속도로 실태를 고려한 화재위험도 설정

- 국내·외 연구 및 적용실태 조사
- 고속도로 지역, 교통량 및 사고 특성, 터널 유형, 유지관리 조건 등 분석
- 지역별 차종, 사고율, 화물차 및 위험물 수송차량 혼입률 등
- 상기 사항을 고려한 터널 화재위험도 분류(1차년도)
- 고속도로 지역, 교통량 및 사고 특성, 터널 유형, 유지관리 조건 등 상세 재분석
- 1차년도 연구결과 및 상기 사항을 고려한 터널 화재위험도 재분류 및 설정 완료

나. 한계온도 : 국내 특성에 맞는 도로터널 부재 및 사용자재별 한계온도 설정

- 터널 내부 사용재료 조사 및 열특성 등 검토
- 관련 문헌 및 화재실험 결과 등
- 재료(또는 부재 : 30종 이내 선별 결정)별 내화시험(KS 등)
- 수열온도별 상태 분류 및 잔존성능 평가(육안조사 및 물성시험(2종 이상))
- 사용조건을 고려한 부재(또는 재료별) 한계온도 설정
- 주요·내화 자재 및 부대 시설(방재시설, 대피소, 비상구 등) 등
- 내화시험(KS, RWS 등)으로 검증

다. 내화설계 : 화재위험도 및 내화수준별 도로터널 내화설계

- 화재위험도를 고려한 고속도로 터널(부재) 내화수준 분류(IPA기법, 관계자 설문 등)
- 화재규모, 지반 및 터널 유형, 하중조건 등 분류
- 내화수준별 내화범위 설정
- 내화적용을 위한 설계 절차 수립
- 화재위험도, 내화수준, 내화범위, 주요·내화 자재 한계온도 등
- 도로터널 내화설계 상세지침(안) 작성(항목별 해설 포함, 국가 및 고속도로 건설기준 연계)

라. 내화시공 : 화재위험도 및 내화수준별 도로터널 내화 시공절차 개발

- 내화공법 유형 분류 및 성능확보 방안 검토
- 공법별 성능기준 및 시공법 조사(2개소 이상 현장조사 포함)
- 공법별 시공 유의사항 및 개선방안 도출
- 내화사례 정리, 공법별 시공 유의사항 및 개선방안 도출
- 품질관리를 위한 성능확인 및 검사법 제시(국가 및 고속도로 건설기준 연계)
- 공법유형, 성능기준 및 시험법, 시공 절차 및 검사, 내구성 확보방안 등
- 공법유형별(3종 이상) 품질 검증(부착강도, 가스유해성, 동결융해저항성 등 유형별 2종 이상)

마. 복구방안 : 화재피해 수준별 터널 상태 진단 및 복구방안 개발

- 터널 상태평가 및 진단 방안 검토(시설물안전법 연계)
- 화재피해 터널 부재 손상도 분류
- 화재피해 터널 육안 및 비파괴 조사, 물성시험 등
- 터널 상태등급 및 복구(긴급 및 항구) 방안 검토
- 화재피해 터널 진단 및 복구 매뉴얼(안) 작성
- 현장조사(육안 및 비파괴), 수열온도 예측, 안전성 평가, 보수·보강, 기록 등

이 연구용역의 수행기간은 착수일로부터 총 480일간(1차년도 : 180일, 2차년도 : 300일)으로 하며, 연구용역의 세부일정은 다음 표 1.1과 같다.

표 1.1 과업의 세부일정

구분	1차년도 (60일 단위)			2차년도 (60일 단위)				
	1	2	3	1	2	3	4	5
1. 고속도로 실태를 고려한 화재위험도 설정								
• 화재 위험관련 국내외 연구 및 적용실태 조사								
• 고속도로 지역, 교통량 및 사고 특성, 터널유형, 유지관리 조건 등 분석								
- 지역별 차종, 사고율, 화물차 및 위험물 수송차량 혼입률 등								
• 고속도로 지역, 교통량 및 사고 특성, 터널유형, 유지관리 조건 등 상세 재분석								

구분	1차년도			2차년도				
	(60일 단위)			(60일 단위)				
	1	2	3	1	2	3	4	5
<ul style="list-style-type: none"> 고속도로 실태 고려한 터널 화재위험도 설정 								
2. 국내 특성에 맞는 도로터널 부재 및 사용자재별 한계온도 설정								
<ul style="list-style-type: none"> 터널 내부 사용재료 조사 및 열특성 등 검토 <ul style="list-style-type: none"> - 관련 문헌 및 화재실험 결과 등 								
<ul style="list-style-type: none"> 재료(또는 부재: 30종 이내 선별 결정)별 내화시험 (KS 등) <ul style="list-style-type: none"> - 수열온도별 상태 분류 및 잔존성능 평가(육안조사 및 물성시험(2종 이상)) 								
<ul style="list-style-type: none"> 사용조건을 고려한 부재(또는 재료별) 한계온도 설정 <ul style="list-style-type: none"> - 주요·내화 자재 및 부대 시설(방재시설, 대피소, 비상구 등) 등 - 내화시험(KS, RWS 등)으로 검증 								
3. 화재위험도 및 내화수준별 도로터널 내화설계								
<ul style="list-style-type: none"> 화재위험도를 고려한 고속도로 터널(부재) 내화수준 분류 <ul style="list-style-type: none"> - 화재규모, 지반 및 터널 유형, 하중조건 등 분류 								
<ul style="list-style-type: none"> 내화수준별 내화범위 설정 								
<ul style="list-style-type: none"> 내화적용을 위한 설계 절차 수립 <ul style="list-style-type: none"> - 화재위험도, 내화수준, 내화범위, 주요·내화 자재 한계온도 등 								
<ul style="list-style-type: none"> 도로터널 내화설계 상세지침(안) 작성 <ul style="list-style-type: none"> - 항목별 해설 포함, 국가 및 고속도로 건설기준 연계 								
4. 화재위험도 및 내화수준별 도로터널 내화 시공절차 개발								
<ul style="list-style-type: none"> 내화공법 유형 분류 및 성능확보 방안 검토 <ul style="list-style-type: none"> - 공법별 성능기준 및 시공법 조사(2개소 이상 현장조사 포함) - 공법별 시공유의사항 및 개선방안 도출 - 내화사례 정리, 공법별 시공유의사항 및 개선방안 도출 								

구분	1차년도			2차년도				
	(60일 단위)			(60일 단위)				
	1	2	3	1	2	3	4	5
<ul style="list-style-type: none"> • 품질관리를 위한 성능확인 및 검사법 제시 <ul style="list-style-type: none"> - 국가 및 고속도로 건설기준 연계 - 공법유형, 성능기준 및 시험법, 시공 절차 및 검사, 내구성 확보방안 등 - 공법유형별(3종 이상) 품질 검증(부착강도, 가스 유해성, 동결융해저항성 등 유형별 2종 이상) 								
5. 화재피해 수준별 터널 상태 진단 및 복구방안 개발								
<ul style="list-style-type: none"> • 터널 상태평가 및 진단 방안 검토(시설물안전법 연계) <ul style="list-style-type: none"> - 화재피해 터널 부재 손상도 분류 - 화재피해 터널 육안 및 비파괴 조사, 물성시험 등 								
<ul style="list-style-type: none"> • 터널 상태등급 및 복구(긴급 및 항구) 방안 검토 								
<ul style="list-style-type: none"> • 화재피해 터널 진단 및 복구 매뉴얼(안) 작성 <ul style="list-style-type: none"> - 현장조사(육안 및 비파괴), 수열온도 예측, 안전성 평가, 보수·보강, 기록 등 								

제 2 장 국내외 기술동향

2.1 도로터널 화재 특성

PIARC 보고서(Fire and Smoke Control in Road Tunnels, 1999)에 따르면 터널에 화재가 발생할 경우, 터널의 입구부에서 6m/sec로 공기가 유입되면 터널의 출구부 방향으로 약 100m 지점까지 천정의 온도가 약 400℃ 수준인 것으로 보고하고 있으며, Dutch regulations 에 따르면 용량이 50m³ 이상의 대형 유조차에 화재가 발생할 경우, 온도가 약 1,400℃까지 상승하는 것으로 보고하고 있다. 그림 2.1은 차량화재 실험을 통해 터널 횡단면 내부의 온도 측정결과를 나타내고 있으며, 그림 2.2는 차량화재 실험을 통해 터널 종단면 내부의 온도 측정결과를 나타내고 있다(심재원 등, 2018).

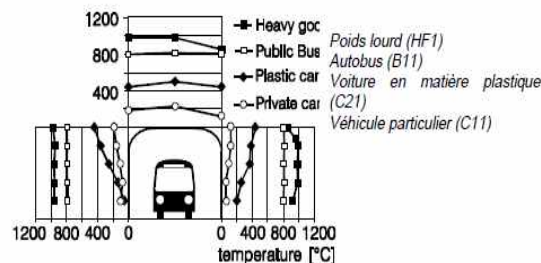


Figure 2.4.1 - Maximum temperatures in the cross-section of the tunnel during tests with road vehicles [20]

Figure 2.4.1 - Températures maximales dans la section transversale du tunnel lors d'essais avec des véhicules routiers [20]

그림 2.1 차량화재 실험을 통한 터널 내부 횡단면 온도 측정결과

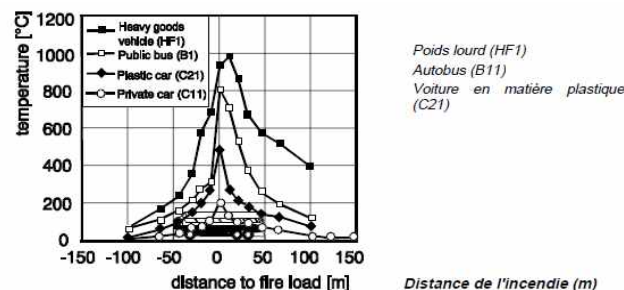


Figure 2.4.2 - Températures maximales au niveau du plafond du tunnel lors d'essais avec des véhicules routiers [20]

Figure 2.4.2 - Maximum temperatures in the ceiling area of the tunnel during tests with road vehicles [20]

그림 2.2 차량화재 실험을 통한 터널 내부 종단면 온도 측정결과

표 2.1은 터널 내에서 차량화재로 인한 터널 내부 벽면에 작용하는 최고 온도를 나타내고 있다(심재원 등, 2018).

표 2.1 터널화재로 인하여 터널 내부 벽면에 고려하는 온도(심재원 등, 2018)

천정 내부	측벽 내부
승용차	400℃
버스, 소형화물차	700℃
대형화물차 (휘발유 등의 위험물 적재 않은 경우)	1,000℃
유조차 (일반적 경우)	1,200℃
유조차 (터널의 배수나 유출량의 제한이 없는 경우)	1,400℃
만약 불꽃이 구조물을 직접 가열할 경우	더 높은 온도 고려 가능

2.1.1 콘크리트 재료 및 구조부재의 고온노출 시 거동특성

고온노출로 인한 콘크리트 내부의 수증기압으로 인한 부재의 피복에서 폭발 또는 탈락 등이 발생한다(국토교통부, 2017). 100~400℃에서는 Al_2O_3 , Fe_2O_3 및 Tobermorite계의 수화물이 탈수하여 겔 및 시멘트 수화물이 붕괴가 발생하며, 고온에 노출된 보통강도 콘크리트는 200℃ 부근에서 콘크리트 내부의 수증기가 증발하여 공극이 생기게 되며, 이 온도범위에서 변형회복 능력이 급격히 감소하고, 600℃ 이후에서는 탄성계수가 현저히 저하하는 현상이 발생한다(국토교통부, 2017).

그림 2.3 및 그림 2.4는 콘크리트가 고온노출로 인하여 탄성계수 및 압축강도가 감소하는 경향을 나타내고 있다. 고온에 노출된 콘크리트는 표면이 박리되거나 비산해서 단면결손이 발생하게 되는데 이러한 현상을 폭발현상이라고 한다(국토교통부, 2017). 이 폭발현상은 콘크리트 내부의 수분이 고열에 의해 수증기가 되어 팽창함에 따라 그에 따른 수증기압이 주원인으로 발생한다(국토교통부, 2017).

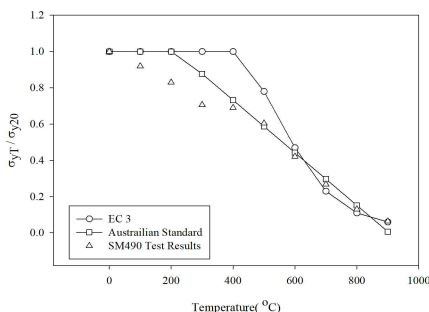


그림 2.3 콘크리트의 고온노출 시 압축강도 감소

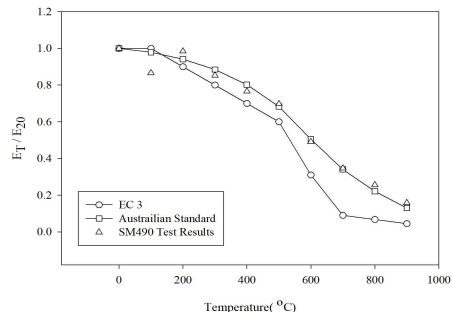


그림 2.4 콘크리트의 고온노출 시 탄성계수 감소

콘크리트 구조물은 약 650℃ 이상의 온도에 노출될 경우 기존 강도의 50%를 상실하며, 약 850℃ 이상의 온도에 노출될 경우, 그 구조적인 성능을 상실하는 것으로 알려져 있다(정대균, 2019). 고온에 노출될 경우, 열원 부근의 콘크리트 부재의 피복에서 폭렬 또는 탈락 등이 발생하여 그림 2.5와 같이 고온에 노출된 콘크리트가 폭렬 등으로 인하여 표면 피복이 박리, 탈락하여 철근이 노출된 사례를 나타내고 있으며, 그림 2.6은 고온노출에 따른 콘크리트 구조물의 거동특성을 나타내고 있다(정대균, 2019).



그림 2.5 고온노출로 인한 콘크리트 구조물의 표면 스폐링 피해 사례

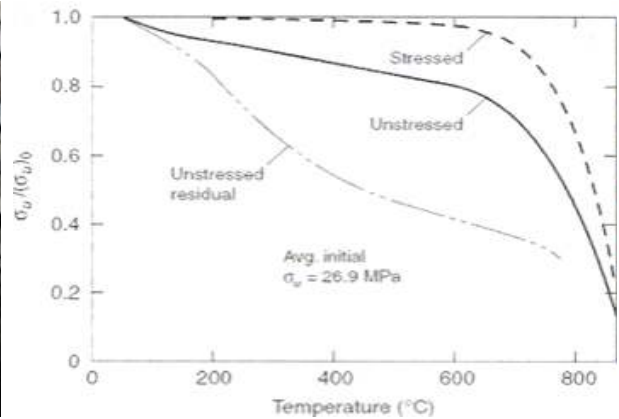


그림 2.6 고온노출에 따른 콘크리트 구조물 거동특성

2.2 국내의 도로터널 내화설계

도로터널의 내화설계는 터널 구조물 구조적 손상의 최소화, 사용자의 안전한 대피, 소방 및 구조활동이 가능한 환경의 제공 그리고 방재 및 제연장비 그리고 주위의 시설물 등의 피해를 최소화하기 목적으로 수행한다. 현재 국내외의 도로터널의 화재와 관련한 기준은 아래와 같이 정리할 수 있다.

- 도로터널 내화지침(국토교통부, 2021)
- 도로터널 방재시설 설치 및 관리지침(국토교통부, 2020)
- 내화구조의 인정 및 관리기준(국토교통부, 2019)
- 도로터널의 화재안전기준(NFSC 603, 소방청, 2017)
- 도시지역 지하도로 설계지침(국토교통부, 2016)
- 터널 내화설계 및 시공지침(안)(한국도로공사, 2009)

- Standard for Road Tunnels, Bridges, and Other Limited Access Highways (NPFA, 2015)
- Guidelines for Structural Fire Resistance of Road Tunnels (ITA, 2004)
- Fire and Smoke Control in Road Tunnels (PIARC Committee on Road Tunnels, 2005)

2.2.1 국내 도로터널 내화설계 기준

2.2.1.1 도로터널 내화지침(국토교통부, 2021)¹⁾

이 지침은 도로터널에서 발생할 수 있는 차량화재 등으로 인한 터널의 손상과 붕괴를 예방하기 위한 도로터널의 내화 기준을 규정하고 있다. 도로터널 내에서 화재 발생 시 심각한 구조손상으로 인한 인적 및 물적 피해를 예방하기 위한 목적으로 터널의 한계온도, 내화, 내화공법 및 내화시험에 대한 내용을 제시하고 있다.

이 지침에서 제시하는 도로터널의 한계온도 및 내화설계는 다음과 같다.

가. 터널의 한계온도

- (1) 콘크리트 부재는 표면을 기준으로 한계온도인 380℃ 이내로 보호해야 한다. 이 경우 내화처리된 콘크리트 부재는 내화처리를 위해 증가된 두께(내화보드 및 뽀뽀칠, 콘크리트 피복 등을 포함한다)를 제외한 콘크리트면이 온도기준면이다.
- (2) 내화가 필요한 프리캐스트 세그먼트 콘크리트 부재는 표면을 기준으로 한계온도인 250℃ 이내로 보호해야 한다. 이 경우 내화처리된 세그먼트 부재는 온도기준면을 제1항과 동일하게 적용한다.
- (3) 철근의 한계온도인 250℃ 이내로 보호해야 한다.
- (4) 기타재료의 한계온도는 터널 조건 및 사용재료 등을 종합적으로 고려하여 발주기관에서 정할 수 있다.

나. 터널의 내화설계

- (1) 터널의 내화설계는 차량유형과 지반특성 및 터널유형을 고려한 다음 내화시험 화재조건을 만족할 수 있는 성능을 확보해야 한다.
- (2) 화재 발생 시 진압을 위한 접근성이 떨어지거나 유지보수에 따른 교통차단이 곤란하

1) 국토교통부(2021) “도로터널 내화지침” 내용 참고

여 발주기관이 터널 손상의 최소화 또는 차단시간 단축이 필요하다고 인정하는 경우 대형차 유형 내화시험을 해야 한다.

- (3) 내화시험의 화재조건은 화재손상에 따른 보수 및 터널차단 비용의 절감 등을 위해 발주기관이 필요하다고 인정하는 경우 상향할 수 있으며, 유조차와 같은 가연성 물질을 실어 나르는 대형차의 교통량이 많은 경우 3시간까지 고려할 수 있다.
- (4) 터널 부재는 내화시험 시 한계온도 이내여야 하며, 이를 초과하는 경우 내화공법을 적용해야 한다.
- (5) 대피소, 비상구 등 본선터널을 제외한 부대시설물의 경우 터널에 따라 다양한 형식으로 설치되므로 별도의 내화방안을 수립해야 한다.

2.2.1.2 도시지역 지하도로 설계지침(국토교통부, 2016)²⁾

이 지침에서도 터널 등 지하도로의 설계 시 방재에 관하여 중요하게 다루고 있다. 하지만 적용하는 기준이 제연방재에 치중하고 있으며 이때 적용하는 설계화재강도를 20MW로 하고 대신 위험물 수송차량의 통과대수가 많은 경우에는 설계화재강도를 증가할 수 있도록 하고 있다.

제7장 방재

7.7 소화활동설비

7.7.1 제연설비

도시지역 지하도로의 제연설비는 본 지침의 제/배연설비 명식과 용량 적용 방법에 따라 제연 및 배연능력이 확보될 수 있도록 계획하며, 설계화재강도는 「도로터널 방재시설 설치 및 관리 지침(국토교통부)」을 준용하여야 한다.

지하도로 내에 진출입구간이 존재하는 경우에는 각 구간별로 다른 환기 및 제연방식이 적용될 수 있으므로 제연시나리오를 수립하여 구간별 운전모드를 제시하고 설계에 반영하여야 한다. 또한 연장 10km 이상의 지하도로의 경우에는 모형실험이나 실험 등을 통해서 제연설비의 성능을 충분히 검증하여야 한다.

【해설】

가. 설계화재강도 및 연기발생량

- ⊙ 지하도로 화재 시 설계화재강도는 제연권 용량 및 배연용량을 결정하는 중요한 요소이며 「도로터널 방재시설 설치 및 관리지침(국토교통부)」을 준용하여 적용하여야 한다.
- ⊙ 「도로터널 방재시설 설치 및 관리지침(국토교통부)」에 의한 차종별 화재강도 및 연기발생량은 <표 7.7.1>에 나타낸 바와 같으며 설계화재강도는 20MW 이상으로 하여야 한다.
- ⊙ 위험물 수송차량의 통과대수가 많은 경우에는 설계화재강도를 증가시킬 수 있다.

<표 7.7.1> 설계화재강도 및 연기발생량

적용기준	승용차	버스	트럭	탱크로리
화재강도(MW)	5이하	20	30	100
연기발생량(비중)	20	60 ~ 80	80	200

- ⊙ 소형차 전용 지하도로의 화재강도는 국외 기준(PIARC1995) 등을 고려할 때 승합차의 설계화재강도 15MW의 적용을 검토할 수 있지만 화재강도 축소 시 「도로터널의 화재안전기준 제9호 1항(NFSC 603, 소방방재청)」 및 「도로터널 방재시설설치 및 관리지침(국토교통부)」의 최소규정(20MW)과 상충하므로 추가 연구를 통한 기준 개정이 필요하다.

나. 제연방식

- ⊙ 터널 내 화재 시 연기의 제연은 정상시에 사용되는 환기설비에 의해서 수행되며, 제연방식은 연기를 화재공간에서 제거하는 배연(Smoke Exhaust)과 피난자가 대피하는 방향의 반대 방향으로 연기를 보내서 대피안전성을 확보하는 제연(Smoke Control)으로 대별되며, 두 방법을 제연으로 통칭하기도 한다. 전자는 횡류식, 종류식·값중배연방식 환기방식에서 사용되며, 후자는 종류식 환기방식에서 사용되므로 대상터널의 교통흐름, 교통량, 교통특성 등에 따라 중

240 | 도시지역 지하도로 설계지침

그림 2.7 도시지역 지하도로 설계지침(국토교통부, 2016)

2) 국토교통부(2016) “도시지역 지하도로 설계지침” 내용 참고

2.2.1.3 고속도로 터널 내화설계 및 시공지침(안)(한국도로공사, 2009)³⁾

이 지침은 고속도로 터널 구조물의 내화를 위한 설계, 시공, 유지관리에 적용해야 할 최소한의 일반적, 기술적 사항을 규정함으로써 터널화재 발생 시 심각한 구조손상으로 인한 대형 인명피해를 예방하는 것을 목적으로 하여 터널구조물 한계온도 및 내화설계, 화재시나리오 적용기준, 내화자재 유형별 성능기준, 내화자재 시공 그리고 터널라이닝 성능평가 시험지침에 대한 내용을 제시하고 있다.

이 지침(안)에서 제시하는 터널의 한계온도 및 내화설계기준은 다음과 같다.

- (1) 콘크리트 구조체(측벽, 천정, 칸막이, 현장타설 콘크리트 등)는 모든 부위에서 최대 380℃ 이내로 보호되어야 한다.
- (2) 프리캐스트 콘크리트 부재(고강도 콘크리트 세그먼트를 포함한 프리캐스트 세그먼트 등)는 최대 250℃ 이내로 보호되어야 한다.
- (3) 콘크리트 천정부위는 최대 380℃ 이내로 하고, 최소 2시간 동안 붕괴되지 않도록 보호하여야 한다.
- (4) 점토질 조적식 구조가 터널에 적용될 경우에는 화재로 인한 피해가 크지 않으므로 내화대책이 필요하지 않다.
- (5) 세그먼트 강재 라이너와 세그먼트 주철 라이너는 모든 부위에서 최대 550℃ 이내로 보호되어야 한다.
- (6) 세그먼트 라이너의 연결부분은 최대 200℃ 이내로 유지되어야 한다.
- (7) 터널의 세라믹 타일 마감재는 최대온도 200℃ 이내로 보호되어야 하며, 폭발성 폭발에 주의하여야 한다(신설 터널에서의 세라믹 타일마감은 지양할 것을 권고함). ※ 유럽의 기준에서는 세라믹 타일마감을 금지하고 있으나, 실험결과 타일 자체의 폭발문제는 적었고 타일파열로 인한 실제 인명피해 문제는 확인이 필요함 (가능한 의견 필요)
- (8) 강재 구조요소, 주철 구조요소, 천정부 앵커 등은 모든 부위에서 최대 550℃ 이내로 유지되어야 한다).
- (9) 스테인리스강 구조재 및 천정부 앵커는 모든 부위에서 최대 800℃ 이내로 유지되어야 한다.
- (10) 앵커 정착구(부위) 설계시 앵커정착(접착 및 고정)은 최소안전율 3.5 이상을 확보하여

3) 한국도로공사(2009) “고속도로 터널내화 설계 및 시공지침(안)” 및 심재원 등(2018) “차량화재에 대한 터널·교량의 내화방안 및 내폭특성 연구” 내용 참고

설계되어야 한다.

- (11) 에폭시 수지앵커는 가열면으로부터 6cm 깊이까지 200℃ 이내로 보호되어야 한다(프랑스의 경우 300℃ 이상의 조건에서는 에폭시 앵커의 사용을 금지함). 또한 에폭시 앵커가 설치되는 콘크리트 표면 혹은 자재로부터 6cm 이상의 접착면을 갖도록 설계되어야 한다.
- (12) 납 성분이 포함된 앵커, 황동, 아연 등과 같이 용융점이 낮은 재질의 앵커 등은 비상 장비 지지구조물(댐퍼, 송풍기 등)의 접합과 같은 구조적 접합에는 사용을 금한다.
- (13) 모든 내화재는 수분으로 인하여 접착력과 내하력이 저하되지 않도록 해야 한다.
- (14) 터널 구조재료 또는 터널 내장재들은 연소 시 독성이 없어야 하고 난연성 또는 불연성이어야 한다.
- (15) 설치되는 모든 비상용 장비는 관련규정 및 법규에 부합하여야 한다.
- (16) 비상구/대피소의 통로에서는 최대 온도가 40℃를 초과하지 않도록 설계하여야 한다.

2.2.2 국외 도로터널 내화설계 기준

2.2.2.1 미국 NFPA 502⁴⁾

내화성능등급 결정을 위한 참고문헌으로 NFPA 502 (Standard for Road Tunnels, Bridges, and Other limited Access Highways)에서 제시하는 내화성능 등급을 결정하기 위한 중요 내용은 다음과 같다

가. 구조물의 내화 보호(8.4.1)

일반적으로 하부에 도로가 있는 상부 구조물은 터널과 동일하게 간주하며, 모든 부재들은 최소 4시간의 내화성능을 보유하여야 한다(심재원 등, 2018).

화재의 열용량이 20MW 이하이거나 하부도로에 가연성 물질의 운반이 제한되는 도로의 경우 상부구조물의 내화성능은 최소 2시간으로 결정할 수 있다(심재원 등, 2018).

나. 화재 발열량 기준(PIARC Montreal Report, 1995)

화재해석을 위한 발열량 기본정보는 표 2.2와 같다.

4) NFPA 502 “Standard for Road Tunnels, Bridges, and Other limited Access Highways” 내용 참고

표 2.2 발열량 기준표(NPFA 502)

화원 종류	발열량(MW)	최대온도(°C)
일반승용차	5	400
버스/트럭	20	700
유조차	100	1,000

따라서, PIARC의 발열량 기준표에 따라 화원종류별 내화성능등급을 제안하면 표 2.3과 같다. 이 기준에서는 도로터널의 경우, RWS 시간-온도곡선 또는 적정 기준의 시간-온도곡선을 적용하고 화재지속시간이 120분일 때 다음의 구조적인 기준을 만족할 것을 제시하고 있다.

표 2.3 발열량과 내화성능 등급표(국토교통부, 2017)

화원 종류	발열량 (MW)	최대온도 (°C)	내화성능등급
일반승용차	5	400	1hr
버스/트럭	10	700	2hr
유조차	100	1,000	4hr (터널기준)

- (1) 콘크리트 구조체에서 스폐링이 발생하지 않아야 한다.
- (2) 세그먼트 강재 라이너와 세그먼트 주철 라이너는 모든 부위에서 최대 300°C 이내로 보호되어야 한다(심재원 등, 2018).

또한 내화재료가 적용된 경우에는 다음의 기준을 만족하여야 한다.

- (1) 내화재료로 보호된 콘크리트의 노출온도는 최대 380°C로 한다.
- (2) 내화재료로 보호된 보강철근의 온도는 최소피복이 25mm라 가정할 때 250°C 이하로 한다.
- (3) 내화재료는 비연소성이 이어야 한다.(ASTM E 136 또는 동등의 기준에 따름)
- (4) 내화재료의 최소 용융온도는 1,350°C이어야 한다.

2.2.2.2 유로코드(Eurocode)⁵⁾

가. Eurocode 1: Actions on Structures

(1) 일반사항

- 구조물의 화재설계 해석은 다음 단계들로 진행되어야 한다.
 - ① 적절한 설계화재 시나리오 선정
 - ② 설계화재 결정
 - ③ 구조물 내에 온도상승 계산
 - ④ 화재노출 구조부재의 역학적 거동특성 계산

구조물의 역학적 거동은 온도거동과 재료에 대한 온도영향 및 직·간접적인 역학거동에 의존하고 있다.

- 구조물의 화재해석은 온도해석과 역학적 해석을 포함하며 이는 EN1991 기준을 따른다.
- 화재에 노출된 구조물은 화재사고 행위가 발생한 것으로 간주하며 이는 EN 1990을 따른다.

(2) 설계화재 시나리오

- 화재사고 상황을 확인하기 위해서는 적절한 연관성이 있는 설계화재 시나리오 및 관련된 설계화재는 화재위험평가에 기초하여 결정해야 한다.
- 다른 화재사고에 결과로서 화재가 발생하는 특별한 경우에 대해, 이 위험성은 전반적인 안전개념으로 고려되어야 한다.
- 이러한 화재거동에 앞선 시간과 하중에 의존하는 구조거동은 2번 항이 적용되지 않는다면 고려할 필요가 없다.

(3) 설계화재 시나리오

- 화재사고 설계 상황을 확인하려면, 관련 설계화재 시나리오 및 관련 설계화재는 화재위험평가에 기초하여 결정해야 한다.
- 전반적인 안전 개념을 결정할 때는 화재의 특정 위험이 다른 화재사고의 결과로 발생하는 구조의 경우 이러한 위험도가 고려되어야 한다.

5) Eurocode2(2004) "Design of Concrete Structures", 한국도로공사 (2013) "교량하부 내화 설계 방안 연구" 및 국토교통부(2017) "국도상 교량의 화재위험도 분석기술 및 대응체계 개발 최종보고서" 내용 참고

(4) 설계화재

- 화재구간에서 각각의 설계화재 시나리오, 설계화재는 아래 3항에 따라 평가해야 한다.
- 설계화재 시나리오에서 명시하지 않는 한 설계화재는 건물의 하나의 화재구간에만 적용하여야 한다.
- 별도로 명시된 규정이 없다면, 국가당국이 명시하는 구조 내화 요건이 적절한 설계화재로서 가정될 수 있다.

(5) 온도해석

- 한 부재의 온도해석을 수행할 때, 부재에 영향을 미치는 설계화재의 위치를 고려하여야 한다.
- 외부에 노출된 부재들의 경우, 외관과 지붕 등의 화재에 노출된 부분을 고려해야 한다.
- 외벽으로 분리하는 경우, 내부에서의 화재노출(각각의 화재 구간에서)과 외부에서의 화재노출(다른 화재 구간에서)을 필요시 고려하여야 한다.
- 제3항에서 선택한 설계화재에 따라 다음 절차를 사용해야 한다.

나. Eurocode 2: Design of concrete structures

Eurocode 2에서는 기본적인 설계개념 외에 실험과 해석에서 얻어진 데이터를 바탕으로 RC 및 프리스트레스트 보와 슬래브의 화재강도별 단면 형상을 제안하고 있다.

(1) 일반 설계 규칙

- 화재발생시 화재하중에 대한 저항강도의 함수식은 다음과 같다.

$$Ed,fi / Rd,fi \leq 1,0$$

여기서, Ed,fi : 화재하에서의 설계값

Rd,fi : 화재상황하에서의 설계저항

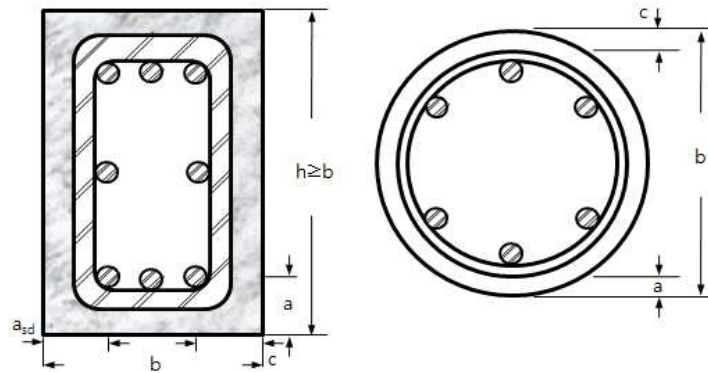


그림 2.8 공칭 피복두께 c 및 화재노출면으로부터 가장 가까운 철근까지의 거리인 공칭 축거리 a

Eurocode의 경우로 ACI 216.1과 유사하게 내화강도별 최소 단면치수를 제시하고 있다. 두 기준의 차이점은 30, 60, 90, 120, 180 및 240분으로 내화성능시간이 세분화되어 있으며, 최소폭과 주철근과의 피복두께의 조합을 통해 내화구조 단면치수를 규정하고 있는 점이 특징이다.

2.2.2.3 PIARC (2004) Fire and Smoke Control in Road Tunnels⁶⁾

터널 교통량 및 화물차량 화재발생 빈도를 분석한 결과(Elb Tunnel)는 다음과 같다.

- 분석 대상기간 : 2년
- 터널길이(램프포함) : 3.3km
- 통과 교통량 : 37,106 veh./year
- 화물차량 비율 : 15%
- 대상기간 중 승용차 화재 건수 : 13
- 대상기간 중 화물차량 화재 건수 : 9

6) PIARC (2004) "Fire and Smoke Control in Road Tunnels" 내용 참고

표 2.4 각국의 일반도로 터널화재 사고사례

Country	Tunnel	Length [m]	Years inquired	Average annual traffic [10^6 veh/year]	Cases of fires					
					Passenger cars		Lorries		All vehicles	
					Number	Rate [10^8 veh x km]	Number	Rate [10^8 veh x km]	Number	Rate [10^8 veh x km]
Canada	- Ville-Marie	2800	1988 - 1991	28.5	-	-	-	-	-	0.3
	- L. Hippolyte Lafontaine	1400	1987 - 1991	40.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0
France	- Croix Rousse	1800	1985 - 1991	29.4	6	2.0	0	0.0	6	1.8
	- Fourviere	1800	1985 - 1991	34.9	7	1.8	1	1.9	8	1.8
	- Vieux Port	600	1989 - 1994	23.9	6	2.0	0	0.0	6	1.8
Germany	- Elbe	3300 (with ramps)	1990 - 1991	37.0	13	6.3	9	24.6	22	9.0
Netherlands	- Benelux	1300	1986 - 1988	25.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0
	- Coen	1200	1986 - 1988	30.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0
Norway	- Oslo	1800	1990 - 1993	18.3	-	-	-	-	-	2.0
Sweden	- Fredhall	200	1987 - 1991	36.8	0	0.0	0	0.0	0	0.0
	- Söder	1100	1987 - 1991	25.6	-	-	-	-	-	0.7
	- Klara	500	1987 - 1991	9.6	-	-	-	-	-	15.5
	- Karlberg	500	1987 - 1991	9.6	0	0.0	0	0.0	0	0.0
United Kingdom	- Tyne	1700	1987 - 1992	9.7	-	-	-	-	-	25.0
USA	- Brooklyn	3200	1989 - 1991	21.0	-	-	-	-	-	23.0
	- Battery	2800	1989 - 1991	26.4	-	-	-	-	-	14.0
	- Queens	2500	1987 - 1991	38.3	-	-	-	-	-	15.0
	- Midtown									
- Lincoln										

표 2.5 각국의 고속도로 터널화재 사고사례

Flow of traffic	Country	Tunnel	Length [m]	Years inquired	Average annual traffic [10^6 veh/year]	Cases of fires						
						passenger cars		lorries		all vehicles		
						number	rate [10^8 veh x km]	number	rate [10^8 veh x km]	number	rate [10^8 veh x km]	
unidirectional traffic	France	Dullin	1500	1984 - 1991	7.3	1	1.6	0	0.0	1	1.3	
		Vuache	1400	1990 - 1993	4.8	1	3.0	0	0.0	1	2.0	
		Chatillon	700	1990 - 1992	6.0	1	10.4	0	0.0	1	8.0	
		St. Germain de Joux	1200	1990 - 1992	6.0	0	0.0	1	3.4	1	8.1	
	Portugal	Aguas Santas	300	1991	7.6	0	0.0	0	0.0	0	0	
Sweden	Karra	400	1987 - 1991	7.7	0	0.0	0	0.0	0	0.0		
	Sorvik	200	1987 - 1991	7.7	0	0.0	0	0.0	0	0.0		
bidirectional traffic	Austria	Askloster	300	1987 - 1991	4.0	-	-	-	-	-	19.0	
		Perjen	2900	1987 - 1991	3.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	
		Amberg	3000	1987 - 1991	5.4	0	0.0	0	0.0	0	0.0	
	France	Pfänder	6720	1985 - 1988	3.6	-	-	-	-	-	0.7	
		L'Epine	3100	1984 - 1991	5.8	1	0.6	1	40.0	2	1.1	
	Chamoise	3300	1988 - 1992	8.5	1	1.5	5	22.6	6	6.8		
	Norway	Hvaler	3800	1989 - 1990	0.2	0	0.0	0	0.0	0	0.0	
		Flekkeroy	2300	1989 - 1990	0.3	0	0.0	0	0.0	0	0.0	
		Ellingsoy	3500	1988 - 1990	1.1	0	0.0	0	0.0	0	0.0	
	Sweden	Valderoy	4500	1988 - 1990	0.9	0	0.0	0	0.0	0	0.0	
Windo		500	1987 - 1991	1.6	0	0.0	0	0.0	0	0.0		
mountain tunnels with bidirectional traffic	Austria	Arlberg	14000	1987 - 1991	1.7	-	-	-	-	-	2.5	
		Katschberg	5400	1987 - 1991	3.9	0	0.0	0	0.0	0	0.0	
		Tauern	6400	1987 - 1991	4.5	0	0.0	0	0.0	0	0.0	
	France/Italy	Frejus	12900	1980 - 1991	1.0	3	3.5	6	12.7	9	8.6	
		Mont Blanc	11600	1985 - 1992	1.9	4	1.5	17	12.9	21	5.4	
	Japan	Kan-etsu	11000	1985 - 1995	7.3	13	1.5	-	-	-	-	
		Switzerland	Gothard	16900	1981 - 1987	3.7	-	-	-	-	-	3.0
			Seelisberg	9300	1981 - 1987	4.2	-	-	-	-	-	2.0
San Bernardino	6600	1968 - 1987	1.7	-	-	-	-	-	5.0			
Belchen	3200	1978 - 1986	11.0	-	-	-	-	-	-	1.0		

표 2.6 도로화재위험도 피해사례

Year	Tunnel	Place and country	Vehicles at origin of fire	Probable cause	Duration of fire	Consequences on		
						People ⁽¹⁾	Vehicles	Tunnel
1949	Holland L = 2,550 m	New York USA	1 lorry loaded with 11 t of carbon bisulfur	load falling of lorry	4 h	66 injured smoke inhalation	10 lorries 13 cars	serious damage for 200 m
1968	Moorfleet L = 243 m	Hamburg Germany	1 lorry trailer (14 t of polyethene bags)	brakes jamming	1 h 30 mn	none	1 trailer	serious damage for 34 m
1975	Guadarrama L = 3,330 m	Guadarrama Spain	1 lorry loaded with tanks of pine resin	unknown	2 h 45 mn	none	1 lorry	serious damage for 210 m
1976	B6 L = 430 m	Paris France	1 lorry loaded with 16 t of polyester in bundles	unknown	1 h	12 slight injured smoke inhalation	1 lorry	damage for 150 m
1978	Velsen L = 770 m	Velsen Netherlands	2 lorries + 4 cars	front-back collision	1 h 20 mn	5 dead 5 injured	2 lorries 4 cars	serious damage for 30 m
1979	Nihonzaka L = 2,045 m	Shizuoka Japan	4 lorries + 2 cars	front-back collision	4 days	7 dead 2 injured	127 lorries 46 cars	serious damage for 1,100 m
1980	Kajiwara L = 740 m	Japan	1 truck (4 t) with 3,600 l paint in 200 cans + 1 truck (10 t)	collision with side wall and overturning		1 dead	1 truck (4 t) 1 truck (10 t)	damage for 280 m
1982	Caldecott L = 1,028 m	Oakland USA	1 lorry + 1 coach + 1 car 33,000 l of petrol	front-back collision	2 h 40 mn	7 dead 2 injured	3lorries+4cars + 1 coach	serious damage for 580 m
1983	Fréjus L = 12,868 m	Modane France-Italy	1 lorry loaded with plastic materials	gear box breaking	1 h 50 mn	none	1 lorry	serious damage for 200 m
1984	Felbertauern L = 5,130 m	Austria	1 bus	blocking brakes	1 h 30 mn	none	1 bus	damage to ceiling and equipment for 100 m
1984	Gotthard L = 16,321 m	Goeschenen Switzerland	1 lorry loaded with rolls of plastic	fire in engine	24 mn	none	1 lorry	serious damage for 30 m
1987	Gumefens L = 340 m	Bern Switzerland	1 lorry	mass collision on slippery road	2 h	2 dead	2 lorries 1 van	slight damage
1993	Serra Ripoli L = 442 m	Bologna Italy	1 car + 1 lorry loaded with rolls of paper	vehicle out of control and collision	2 h 30 mn	4 dead + injured	4 lorries 11 cars	serious damage to lining
1994	Gotthard L = 16,321 m	Goeschenen Switzerland	1 lorry + trailer loaded with bikes wrapped in carton and plastic	friction wheel/ loading bridge	2 h	none	1 lorry + trailer	serious damage to ceiling, pavement and equipment for 50 m, tunnel closed for 2.5 days
1995	Pfänder L = 6,719 m	Austria	1 lorry + 1 van + 1 car	collision	1 h	3 dead (by crash)	1 lorry 1 van 1 car	serious damage to ceiling and equipment, tunnel closed for 2.5 days
1996	Isola delle Femmine L = 150 m	Italy (Sicilia)	1 tanker with liquid gas + 1 little bus	wet road collision of a bus with a tanker (stopped because of a previous collision), explosion	unknown	5 dead (by fire) 20 injured	1 tanker 1 bus 18 cars	damages to the tunnel lining and lighting equipment

터널의 화재사고를 검토한 결과 발생화재의 대략적인 화재 에너지는 표 2.7과 같다.

표 2.7 터널 화재실험에 적용한 화재 에너지 비교

차량 종류	추정 화재 에너지(MJ)	비고
승용차	3,000-3,900	핀란드 화재 실험 적용
승용차(Private Car)	6,000	
승용차(Plastic Car)	7,000	EUREKA화재 실험 적용
일반 버스	41,000	
TIR 화재 하중	65,000	
화물차	88,000	
유조차 50m ³ 이상	1,500,000	네덜란드의 대형화재 가정 화재

터널 내화설계의 목적 중 터널 구조물 또는 재연설비(재연관리)의 목적에 따라 설계화재의 다른 특성이 고려되어야 한다.

표 2.8 터널화재의 설계 목적에 따른 화재의 특성

내화설계 목적	고려 화재 특성
터널구조물(Tunnel structures)	온도-시간(temperature-time curve)
재연설비(Ventilation)	Hear Release Rate (thermal power, MW) 또는 Smoke Release Rate (flow at the temperature of hot smoke, m ³ /sec)

그림 2.9는 PIARC 보고서(Fire and Smoke Control in Road Tunnels, 1999)의 실제 화재 실험을 통한 연구 결과이며, 온도의 영향이 터널의 입구부에서 6m/sec로 공기가 유입될 경우, 터널의 출구부 방향으로 약 100m 지점까지 천정의 온도가 고려할 수준인 약 400℃ 수준인 것을 알 수 있다. 하지만 네덜란드 기준에 의하면 50m³ 이상의 대형 유조차의 경우, 온도가 약 1,400℃까지 상승할 수 있다고 하고 있으며, 만약 터널의 출입차단이 이루어져야 하는 대형 화재의 경우, 더 높은 온도가 고려되어야 한다고 명시하고 있다. 따라서 최종적으로 터널의 천정과 벽체는 특정 터널구조물과 화재차량의 종류에 따라 다음의 최고 온도를 고려할 것을 명시하고 있다.

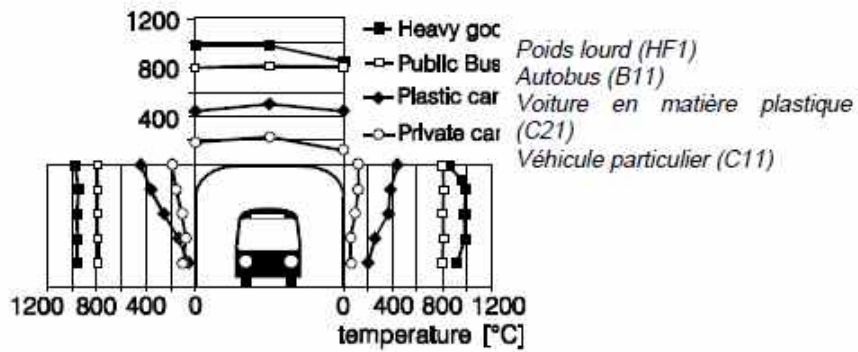
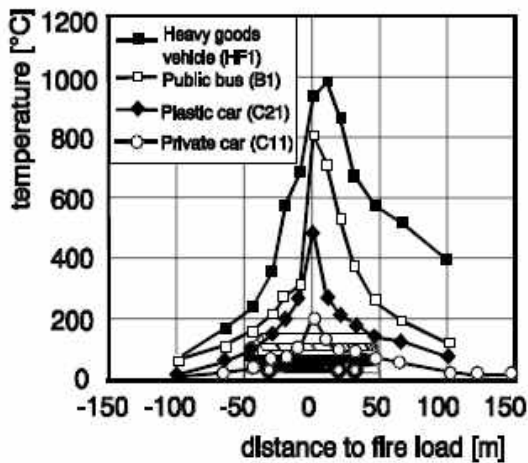


Figure 2.4.1 - Maximum temperatures in the cross-section of the tunnel during tests with road vehicles [20]

Figure 2.4.1 - Températures maximales dans la section transversale du tunnel lors d'essais avec des véhicules routiers [20]

그림 2.9 화재 실험 결과 터널 내부의 온도 측정 결과-횡단면(Fire and smoke control in road tunnels, PIARC Committee on Road Tunnels report, 1999)



Poids lourd (HF1)
Autobus (B11)
Voiture en matière plastique (C21)

Figure 2.4.2 - Températures maximales au niveau du plafond du tunnel lors d'essais avec des véhicules routiers [20]

Distance de l'incendie (m)

Figure 2.4.2 - Maximum temperatures in the ceiling area of the tunnel during tests with road vehicles [20]

그림 2.10 화재 실험 결과 터널 내부의 온도 측정 결과-중단면(Fire and smoke control in road tunnels, PIARC Committee on Road Tunnels report, 1999)

실제 중차량의 화재강도는 120MW까지 고려할 것을 권장하고 있으며, 작용하는 최대 thermal power는 차량의 종류, 위험물의 종류, 연소속도 및 재연 등에 영향을 받는다. 또한 유조차의 경우에는 차량에서 나오는 유량의 속도와 배수되는 속도 등에도 영향을 받고 아래의 표와 같이 최악의 경우에는 245MW까지 검토할 수 있다.

Table 2.4.2 - Effect of leakage diameter and drainage rate on the fire size of petrol tankers [43]

Tableau 2.4.2 - Effet du diamètre de la fuite et du taux de drainage sur la taille d'un incendie dû à un camion citerne d'essence [43]

Equivalent diameter of leakage [mm]	Leakage mass flow of petrol [kg/s]	Calorific power [MW]			
		Drainage mass flow of petrol			
		0 kg/s	1 kg/s	2 kg/s	5 kg/s
15	0.5	22	-	-	-
35	2.7	120	76	33	-
50	5.6	245	201	158	27
<i>Diamètre équivalent de la fuite [mm]</i>	<i>Débit massique de la fuite d'essence [kg/s]</i>	<i>0 kg/s</i>	<i>1 kg/s</i>	<i>2 kg/s</i>	<i>5 kg/s</i>
<i>Débit massique de drainage de l'essence</i>					
<i>Puissance thermique [MW]</i>					

그림 2.11 터널 내부의 배출변화에 따른 최대 설계화재강도의 비교

이러한 결과를 기초로 침매터널의 경우, 300MW 수준을 고려하고 프랑스의 기준에서는

유조차를 고려할 경우, 화재강도를 200MW로 할 것을 규정하고 있다.

터널구조물을 구성하고 있는 구조재료가 화재와 부적절하게 반응할 경우, 매우 나쁜 결과가 발생할 수 있다. 최악이자 가장 먼저 발생할 수 있는 현상은 연소되는 재료로 인한 화재의 이동이다. 재료의 연소로 인하여 화재로부터 발생하는 열(온도)이 상승하는 경우와 재료의 연소가 화재를 이동시키거나 열(온도)의 발생이 적다하더라도, 매우 위험한 연기를 발생시키는 경우를 포함할 수 있다.

철근콘크리트 구조물은 터널 구조물을 전체적으로 지지하고 터널의 기능을 수행하는데 사용되는 건설 재료로써 약 400℃ 이상에서 구조물의 강도감소 발생하고, 일반 강도 철근을 사용한 경우, 피복의 두께를 일반적으로 두껍게 설계 시공할 수 있다. 하지만 고강도 철근을 사용할 경우, 피복의 두께를 얇게 설계 및 시공, 이는 내화성능에 불리한 결과를 초래할 수 있다. PSC구조의 경우 강선덕트는 가장 낮은 곳에 위치하므로 표면으로부터 화재의 영향을 많이 받으므로 주의해야 한다.

2.2.2.4 Guidelines for Structural Fire Resistance of Road Tunnels (ITA 2017)⁷⁾

이 지침에서는 화재원인 차량의 종류를 표 2.9와 같이 제시하고 있다.

표 2.9 터널화재 관련 차량의 종류에 따른 등급

Classification	Type of Vehicle
Category 1	Cars only no Heavy goods vehicles (HGV)
Category 2	Heavy Lorries (HGV)
Category 3	Petrol Tankers

그리고 도로터널 구조물의 내화설계기준을 표 2.10과 같이 제시하고 있다.

7) ITA (2017) “ Guidelines for Structural Fire Protection for Road Tunnels” 내용 참고

표 2.10 도로터널 구조물의 내화설계기준

CATEGORY	NUMBER VEHICLES INVOLVED	IMMERSED TUNNEL	TUNNEL IN UNSTABLE GROUND	TUNNEL IN STABLE GROUND	CUT & COVER	AIR DUCTS	EXIT TO OPEN	EXIT TO OTHER TUBE	SHELTER
1	1-2	ISO 60 min	ISO 60 min	(i)	(ii)	ISO 60 min	ISO 30 min	ISO 60 min	ISO 60 min
1	≥ 3	ISO 60 min	ISO 60 min	(i)	(ii)	ISO 60 min	ISO 30 min	ISO 60 min	ISO 60 min
2, 3	1-2	RWS/HC _{inc} 2 hrs.	RWS/HC _{inc} 2 hrs.	(ii)	(iii)	ISO 2 hrs.	ISO 30 min	RWS/HC _{inc} 2 hrs.	RWS/HC _{inc} 2 hrs.
2, 3	≥ 3	RWS/HC _{inc} 3 hrs.	RWS/HC _{inc} 3 hrs.	(ii)	(iii)	ISO 2 hrs.	ISO 30 min	RWS/HC _{inc} 2 hrs.	RWS/HC _{inc} 2 hrs.

(Note)

(ii) 인적 안전은 기준이 아니며 내화성(진행적 붕괴 방지 제외)을 요구하지 않는다. 다른 목표(자산 보호, 화재 시 제한된 비용 등)를 고려하면 다음과 같은 요건이 발생할 수 있다.

- 대부분의 경우 ISO 60분

(iii) 안전은 기준이 아니며 내화성을 요구하지 않는다(진행적 붕괴 방지 제외). 다른 목적을 고려하면 다음과 같은 요구사항이 발생할 수 있다.

- 재산의 보호(건물 아래 터널 위치 등) 또는 도로 네트워크에 큰 영향을 미치는 보강일 경우 RWS/HC_{inc} 120분
- 대부분의 경우 ISO 120분

제 3 장 도로터널 화재위험도 분석

3.1 도로터널 화재사고 분석⁸⁾

3.1.1 고속도로 화재사고 분석

대형차(유조차 등)나 폭발물 탑재차량 등과 같이 화재위험에 대한 위험물질이 다양해지고 도로터널을 통과하는 차량의 대형화와 차량의 고장 또는 사고로 인한 대형화재의 위험성이 급증하고 있는 실정이다. 화재사고에 따른 원인별 분류 및 화재발생 비율은 그림 3.1 및 3.2 와 같다.

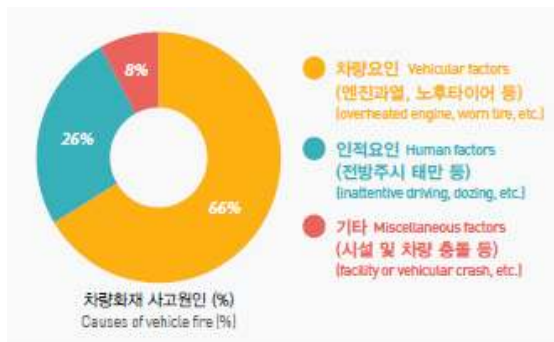


그림 3.1 화재사고 원인별 분류

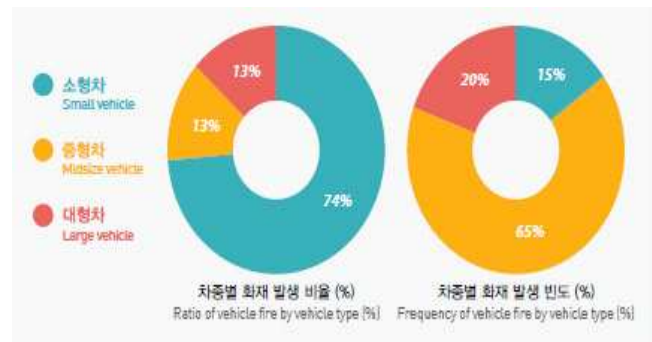


그림 3.2 차종별 화재발생 빈도 및 비율

가. 화재사고에 따른 화재유형 및 원인 분석(고속도로 사고현황 분석)

- 고속도로에서의 화재사고의 원인 중 70% 수준은 엔진과열 및 브레이크, 타이어 등 차량 과열로 인한 화재 발생이 가장 많았음.
- 운전자의 정비불량으로 인한 차량고장 등의 이유가 약 10% 이상으로 높은 수준임. 즉 화재사고의 상당부분은 차량의 결함에 기인하는 것으로 분석됨.
- 운전자의 부주의 (주시태만 및 졸음 등)의 원인도 상당한 수준임.

8) 심재원 등(2018) “차량화재에 대한 터널·교량의 내화방안 및 내폭특성 연구” 내용 참고

나. 화재사고 발생 이후, 화재사고가 발생한 차량 이외에 추가적으로 발생 사고

- 2015년 까지 화재사고가 발생한 이 후 화재사고 차량 이외의 차량으로 화재가 확산된 경우가 급격히 증가함. 하지만 2016년에는 상당한 수준으로 감소함. 이는 한국도로공사의 안전에 관한 지속적인 홍보 및 교육의 영향이었을 것으로 기대됨.

표 3.1 연도별 화재사고 원인 분석결과

화재사고원인	2012		2013		2014		2015		2016	
	총 299건		총 258건		총 274건		총 271건		총 260건	
운전자 부주의 (주시태만)	40	13.4%	8	3.1%	9	3.3%	15	5.5%	24	9.2%
운전자 부주의 (졸음)	7	2.3%	11	4.3%	15	5.5%	11	4.1%	1	0.4%
운전자 부주의 (운전미숙)	18	6.0%	25	9.7%	19	6.9%	16	5.9%	17	6.5%
운전자 부주의 (차량고장)	59	19.7%	19	7.4%	5	1.8%	4	1.5%	29	11.2%
자체 화재 (엔진 과열)	116	38.8%	116	45.0%	152	55.5%	127	46.9%	131	50.4%
자체 화재 (타이어 등 기타)	21	7.0%	61	23.6%	63	23.0%	80	29.5%	37	14.2%
외부 화원 침입	13	4.3%	4	1.6%	4	1.5%	11	4.1%	6	2.3%
지장물 충돌	0	0.0%	4	1.6%	2	0.7%	4	1.5%	0	0.0%
시설물 충돌	20	6.7%	2	0.8%	4	1.5%	2	0.7%	10	3.8%
기타	5	1.7%	8	3.1%	1	0.4%	1	0.4%	5	1.9%

표 3.2 화재사고 발생 이후 추가사고 분석결과

연고 구분	2012	2013	2014	2015	2016
추가사고 발생건수	0	9	23	33	1
차량 사고	0	3	14	18	1
인명 사고 (사망)	0	1	1	8	0
인명 사고(비사망)	0	0	0	0	0
시설물 피해	0	5	8	7	0

다. 화재의 원인이 위험물 운반차량인 경우 사고발생 현황

- 화재사고의 발생 건수 중, 위험물의 운반으로 인한 화재사고 발생은 약 5% 미만으로 분

석됨. 하지만 지역적 산업특성에 따라 위험물 운반차량의 빈도수가 증가할 수 있으므로 지역별 특성을 추후 검토할 필요 있음.

표 3.3 화재사고 차종 중 위험물 운반차량 분석결과

구분 \ 연도	2012	2013	2014	2015	2016
총 사고	10361	9704	9900	9408	9220
총 화재사고	299	258	274	271	260
위험물 운반 차량 야기 화재사고	11	5	2	4	1

표 3.4 차종별 상세정의

화재 원인 차종	종 별	차종 정의	교통량 분석자료 차종 구분
승용차, 소형버스	1	16인승 미만의 여객 수송용 차량, 미니 트럭 등 2축 1단위 차량	소형차
버스	2	16인승 이상의 여객 수송용 버스 형식으로 2축 1단위 차량	대형차
소형화물 차	A	3 화물 수송용 트럭으로 2축(6륜)의 최대 적재량 1~2.5톤 미만의 1단위 차량	소형차
	B	4 화물 수송용 트럭으로 2축의 최대적재량 2.5톤 이상의 1단위 차량	
중형화물 차	A	5 화물 수송용 트럭으로 3축 1단위 차량	중형차
	B	6 화물 수송용 트럭 형식으로 4축 1단위 차량	
	C	7 화물 수송용 트럭 형식으로 5축 1단위 차량	
대형화물 차	A	8 화물 수송용 세미 트레일러 형식으로 4축 2단위(견인차, 피견인차) 차량	대형차
	B	9 화물 수송용 풀 트레일러 형식으로 4축 2단위(견인차, 피견인차) 차량	
	C	10 화물 수송용 세미 트레일러 형식으로 5축 2단위(견인차, 피견인차) 차량	
	D	11 화물 수송용 풀 트레일러 형식으로 5축 2단위(견인차, 피견인차) 차량	
	E	12 화물 수송용 세미 트레일러 형식으로 6축이상 2단위(견인차, 피견인차) 차량	

라. 교통량 대비 화재사고 건수 분석

- 차량의 종류를 소형, 중형 및 대형으로 구분하여 교통량에 따른 화재사고 건수 분석결과, 승용차와 소형화물차를 포함하는 소형차량의 교통량이 약 85% 수준이며, 화재사고 건수는 소형차량이 약 75% 수준임.
- 전체차량 대비 차종별 화재사고 건수의 분석 결과와 달리 해당차종별 화재사고 건수 분석결과, 중형화물차의 화재사고 건수가 크게 증가함.
- 해당 차종 교통량 1백만대 대비 노선 100km당 각 차종별 화재사고 (건/백만대·100km) 분석결과, 중형차량의 경우가 약 9.0건/백만대·100km으로 소형 2.1건/백만대·100km 및 대형 차량 2.7건/백만대·100km에 비하여 상당히 높음.

표 3.5 각 연도별(2012~2016년) 교통량 및 화재사고 건수

구분		2012년	2013년	2014년	2015년	2016년	5년간
교통량 (대)							
차종별 교통량	소형	1,873,960	1,976,915	2,051,805	2,182,070	2,275,565	2,072,063
	중형	90,419	88,781	84,294	83,214	79,314	85,204
	대형	257,344	275,782	285,323	302,234	316,355	287,408
총교통량		2,221,723	2,341,478	2,421,422	2,567,518	2,671,234	2,444,675
화재사고 (건)							
소형		207	182	189	196	200	195
중형		28	37	36	47	24	34
대형		38	36	44	27	30	35
총 교통량 1백만대 대비 각 차종별 화재사고 (건/백만대)							
소형		93.2	77.7	78.1	76.3	74.9	80
중형		12.6	15.8	14.9	18.3	9.0	14
대형		17.1	15.4	18.2	10.5	11.2	14
해당 차종 교통량 1백만대 대비 각 차종별 화재사고 (건/백만대)							
소형		110.5	92.1	92.1	89.8	87.9	94
중형		309.7	416.8	427.1	564.8	302.6	404
대형		147.7	130.5	154.2	89.3	94.8	123

표 3.6 차량 종류별 교통량 및 노선(100km) 대비 화재사고 건수 분석결과

구분		2012년	2013년	2014년	2015년	2016년	5년간
교통량 (대)							
차종별 교통량	소형	1,873,960	1,976,915	2,051,805	2,182,070	2,275,565	2,072,063
	중형	90,419	88,781	84,294	83,214	79,314	85,204
	대형	257,344	275,782	285,323	302,234	316,355	287,408
총교통량		2,221,723	2,341,478	2,421,422	2,567,518	2,671,234	2,444,675
고속도로 노선 100km당 화재사고 (건/100km)							
소형		4.60	4.04	4.20	4.36	4.44	4.3
중형		0.62	0.82	0.80	1.04	0.53	0.8
대형		0.84	0.80	0.98	0.60	0.67	0.8
총 교통량 1백만대 대비 노선 100km당 각 차종별 화재사고 (건/백만대·100km)							
소형		2.07	1.73	1.73	1.70	1.66	1.8
중형		0.28	0.35	0.33	0.41	0.20	0.3
대형		0.38	0.34	0.40	0.23	0.25	0.3
해당 차종 교통량 1백만대 대비 노선 100km당 각 차종별 화재사고 (건/백만대·100km)							
소형		2.45	2.05	2.05	2.00	1.95	2.1
중형		6.88	9.26	9.49	12.55	6.72	9.0
대형		3.28	2.90	3.43	1.99	2.11	2.7

터널에서도 마찬가지로 트럭, 유조차나 폭발물 탑재차량 등 위험물이 다양해지고 터널을 통과하는 차량의 대형화와 터널 내 차량의 고장 및 사고로 인한 대형화재의 위험성이 증가하고 있다(정대균, 2019). 또한 터널은 공간 특성상 어둡고 환기가 곤란하여 화재 발생 시 대피가 어렵고 연기에 의한 질식의 위험이 상존하며, 화재와 같은 위급상황 발생 시 비상기관 또는 관리기관과의 연락이 어렵고 터널 내부에서도 상호 정보 교환이 곤란하다. 따라서 위급상황에 따른 교통사고의 위험성이 높고 특히 유조차 등의 위험물 운반차량의 사고로 이어질 때 그 피해는 심각한 수준이 될 것으로 판단된다(정대균, 2019). 터널에서 발생하는 화재는 터널의 길이, 교통량, 속도 그리고 종방향 구배 등에 많은 영향을 받으며 주요 발생 원인은 다음과 같다.

- 전기장치 문제 (대부분이 소형승용차에서 발생)
- 브레이크 과열 (유조차 화재의 약 60-70%가 이로 인하여 발생)
- 기타 차량 화재를 유발하는 손상

훨씬 낮은 빈도로 다음의 이유로 터널의 화재가 발생한다.

- 차량충돌사고
- 터널장비의 결함
- 터널 유지관리 업무

사회 전체적으로 발생하는 화재는 그 종류별로 다양한 원인들이 존재하며 화재발생 항목 또한 그 범주가 크게 분포하고 있다. 그림 3.3은 소방방재청의 2016~2020년까지 5년간 전국 화재발생 추이의 통계자료에 따르면 차량의 경우, 한 해당 약 4,400건 수준으로 약 11% 수준이다.

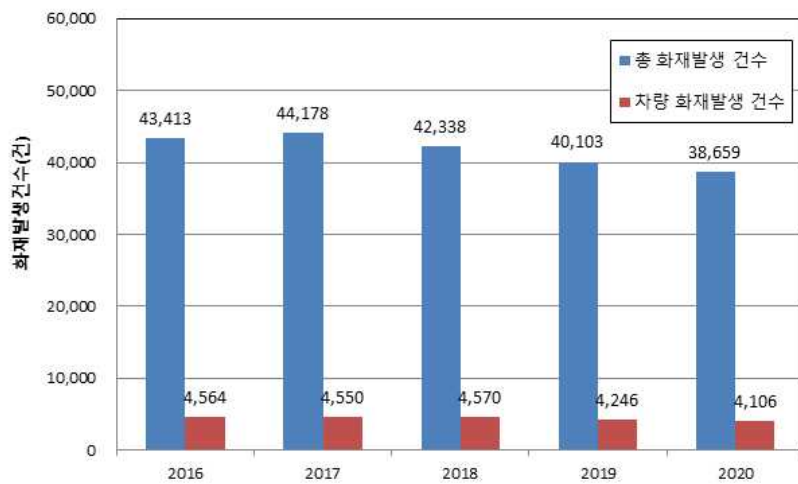


그림 3.3 최근 5년간 연도별 총 화재발생건수 및 차량 화재발생 건수(소방방재청, 2021)

표 3.7은 도로터널 방재·환기시설 설치 및 관리지침(국토교통, 2021)에 나타나 있는 사고발생률을 나타내고 있음.

표 3.7 사고발생률(도로터널 방재·환기시설 설치 및 관리지침(국토교통부, 2021))

구분	년도	승용차	버스	화물차	계
화재발생건수 (건/년)	2009	1,940	386	1,391	3,717
	2010	1,849	389	1,386	3,624
	2011	1,787	355	1,379	3,521
	2012	1,739	351	1,392	3,482
	2013	1,622	320	1,374	3,316
	2014	1,477	300	1,401	3,178
	2015	1,539	268	1,485	3,292
	2016	1,529	281	1,415	3,225
	2014년(5년간)	8,937	1,801	6,922	17,660
	2017년(5년간)	7,906	1,520	7,067	16,493
주행거리계 (106Veh·km)	2009	186,325	24,213	57,644	268,182
	2010	184,631	22,741	58,647	266,019
	2011	183,853	21,882	55,895	261,630
	2012	194,705	18,355	59,628	272,688
	2013	194,281	21,564	61,570	277,415
	2014	205,518	20,737	60,472	286,727
	2015	212,721	19,818	62,372	294,911
	2016	224,024	19,857	63,688	307,569
	2014년(5년간)	943,795	109,755	293,438	1,346,988
	2017년(5년간)	1,031,249	100,331	307,784	1,439,364
차종별 사고발생률 (건/억km·Veh)	2009	1.04	1.53	2.41	1.38
	2010	1.00	1.71	2.36	1.36
	2011	0.97	1.63	2.47	1.35
	2012	0.89	1.91	2.33	1.28
	2013	0.83	1.48	2.23	1.20
	2014	0.72	1.45	2.32	1.11
	2015	0.72	1.35	2.38	1.12
	2016	0.68	1.42	2.22	1.05
	2014년(5년간)	0.95	1.64	2.36	1.31
	2017년(5년간)	0.77	1.52	2.30	1.15

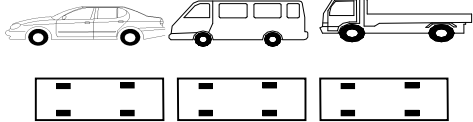
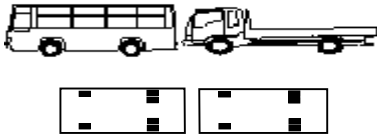
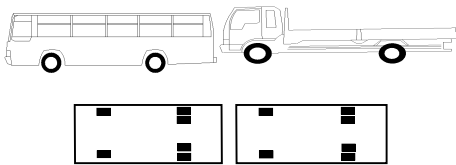

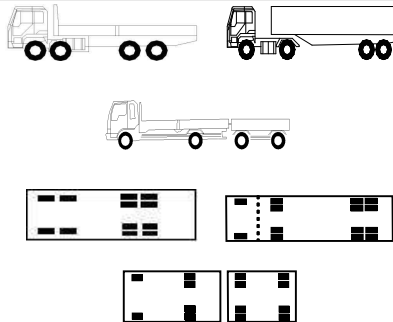
3.1.2 고속도로 화재사고의 확률밀도함수 분석⁹⁾

2007년부터 2017년도까지 고속도로에서 발생한 화재사고에 대한 전수조사를 수행하였다. 사고자료는 한국도로공사의 화재 사고조사 데이터를 기초로 활용하였으며, 발생한 차량의

9) 심재원 등(2018) “차량화재에 대한 터널·교량의 내화방안 및 내폭특성 연구” 내용 참고

종류를 표 3.8과 같이 총 5종으로 분류하여 구분하였고 이에 따른 각 차종분류 별 화재강도를 함께 가정하였다.

표 3.8 화재사고조사 차량분류 및 화재강도

구분	대상 차량	화물차 예시	화재강도
1종	경차 및 2축 차량, 유효폭 279.4mm 이하(승용, 16인이하 승합, 2.5톤미만 화물)		5MW
2종	2축 차량, 유효폭 279.4mm 초과, 운거 1,800mm 이하(17~32인 승합, 2.5톤~5.5톤 미만 화물)		15MW
3종	2축 차량, 유효폭 279.4mm 초과, 운거 1,800mm 초과(33인 이상 승합, 5.5톤~10톤 미만 화물)		25MW
4종	3축 대형화물차 (10톤~20톤 미만 화물)		50MW
5종	4축 이상 특수화물차 (20톤 이상 화물)		100MW

고속도로에서 발생한 화재사고를 각 차종별로 분류하고 이에 따른 화재강도 자료를 활용하여 통계분석을 수행하였다. 이때 이동 지수분포로 모델링하였고 확률밀도 함수 및 누적분포함수는 다음의 식을 이용하여 계산하였다. 표 3.9는 각 화재강도별 대표값과 이에 따른 표본확률과 모델확률을 나타내고, 그림 3.4는 확률밀도를 도식적으로 비교하고 있다. <식 3.1> 및 <식 3.2>는 확률밀도함수 및 누적분포함수를 나타내고 있다.

$$\begin{aligned} \text{확률밀도함수} \quad f_X(x) &= 0.047e^{-0.047(x-5)} & x \geq 5 \\ &= 0 & x < 0 \end{aligned} \quad \text{<식 3.1>}$$

$$\begin{aligned} \text{누적분포함수} \quad F_X(x) &= 1 - e^{-0.047(x-5)} & x \geq 5 \\ &= 0 & x < 0 \end{aligned} \quad \text{<식 3.2>}$$

표 3.9 화재강도별 확률분포

대꽃값	구간 하한	구간 상한	빈도	표본확률	모델확률
20	5	35	2745	0.791	0.755
50	35	65	349	0.101	0.185
80	65	95	2	0.001	0.045
110	95	125	369	0.106	0.011
140	125	155	0	0.000	0.003
170	155	185	0	0.000	0.001
200	185	215	4	0.001	0.000

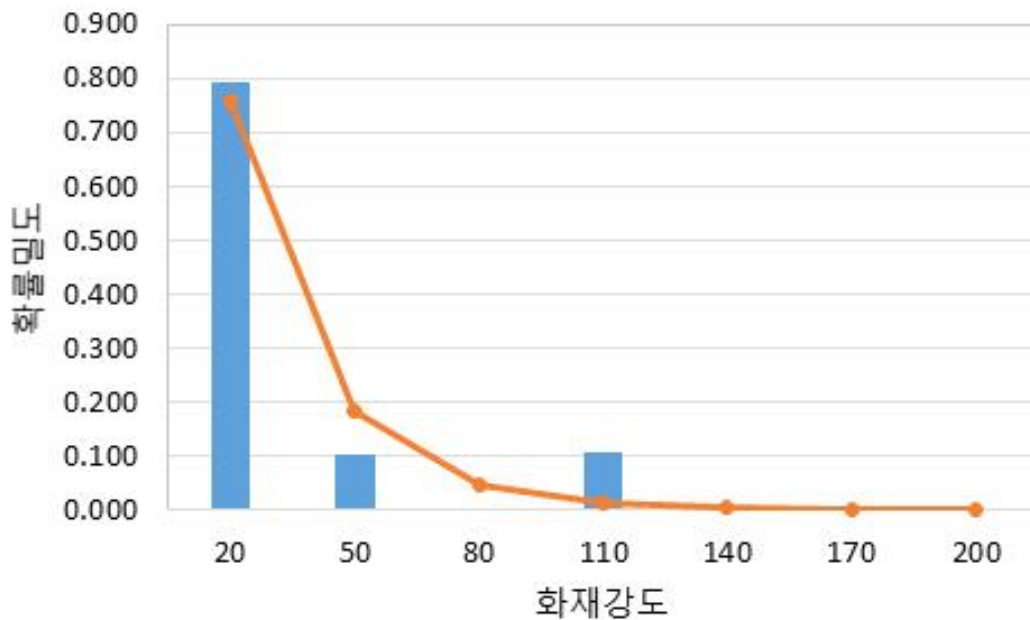


그림 3.4 화재강도별 확률밀도

3.2 고속도로 화재 위험물 수송차량 운송 특성¹⁰⁾

3.2.1 국내 화재 위험물질 수송 현황

3.2.1.1 수단별 현황

국내 화물의 약 90% 이상은 도로를 이용하여 수송되고 있으며, 지리적 여건상 국토면적이 넓은 미국, 유럽 등의 국가들과 달리 철도, 해운, 항공 등의 기타 수단에 비하여 도로를

10) 최윤혁 등(2018) “고속도로 위험물질 수송차량 관리방안 연구” 내용 참고

통한 화물수송의 의존도가 높은 편이다(최윤희 등, 2018). 2013년 기준 국내 도로 물동량은 1,546,406천 톤으로 2012년 대비 약간 감소하였으나 국내 전체 물동량 1,704,342천 톤과 비교하여, 약 90.7%의 비중으로 타 교통수단에 비하여 상당히 높다(최윤희 등, 2018). 위험물질 수송에 대한 정확한 수단별 물동량 통계는 집계되어 있지 않으나 위험물질의 상당부분을 차지하는 석유제품의 경우, 국내 수송수단별 분담률이 도로 46%, 항만 28%, 송유관 24%, 철도 2%로 집계되어 국내에서는 도로를 이용한 석유 수송 비율이 타 교통수단에 비해 높은 편임을 알 수 있다(최윤희 등, 2018).

3.2.1.2 지역별 현황

2015년 기준 전국의 위험물질 수송차량(탱크로리)은 총 27,693대가 등록되어 있으며, 그 중 경기도가 5,765대로 가장 많고 경북, 경남이 각각 2,836대, 2,722대, 전남 2,668대, 충남 2,163대 순으로 많다(최윤희 등, 2018). 특히 경기도의 경우에는 위험물질 수송차량 뿐만 아니라 위험물질제조소 등이 총 23,111개로 전국의 약 20%가 위치해 있으며, 가장 밀도가 높아 화학물질 사고발생위험이 타 지역보다 높을 것으로 판단되고 있다(최윤희 등, 2018). 국내 시·도별 화학물질을 취급하는 업체 중 대규모 화학단지가 입지한 경상북도, 전라남도, 경기도, 충청남도, 울산 등 총 5개 지역에서 전체 유해화학물질 이동량의 75.8%를 차지하고 있다(최윤희 등, 2018). 2014년 기준 시·도별 화학물질 이동량은 경상북도 244,926톤, 전라남도 170,727톤, 경기도 120,744톤이었으며, 전라남도의 경우 2013년 72,894톤에서 2014년 약 170,727톤으로 약 100,000톤의 이동량이 증가하였다(최윤희 등, 2018). 경상북도 내에서는 포항시가 190,000톤의 유해화학물질 이동하였고, 이는 경상북도 전체 이동량의 약 77.6%를 차지한다(최윤희 등, 2018). 경기도 유해화학물질 이동량 중 안산시 32,381톤, 화성시 27,776톤, 이천시 21,657톤, 시흥시 12,040톤, 평택시 8,861톤, 용인시 7,909톤 순이었으며, 전라남도의 경우 광양시에 155,092톤(90.8%)의 유해화학물질 이동량이 집중되고 있다(최윤희 등, 2018).

3.2.2 고속도로 화재 위험물질 수송차량 사고현황 분석

3.2.2.1 위험물질 수송차량 사고현황

그림 3.5는 고속도로 사고건수를 나타내고 있다. 고속도로에서는 2011년부터 2015년까지 5

년간 총 46,868건으로 연평균 9,373.6건의 사고가 발생했다(최윤희 등, 2018). 이중 화물차량의 사고는 전체 교통사고의 33.9% 수준인 14,839건 발생했으며, 위험물질 수송차량의 사고는 79건 발생했다(최윤희 등, 2018).

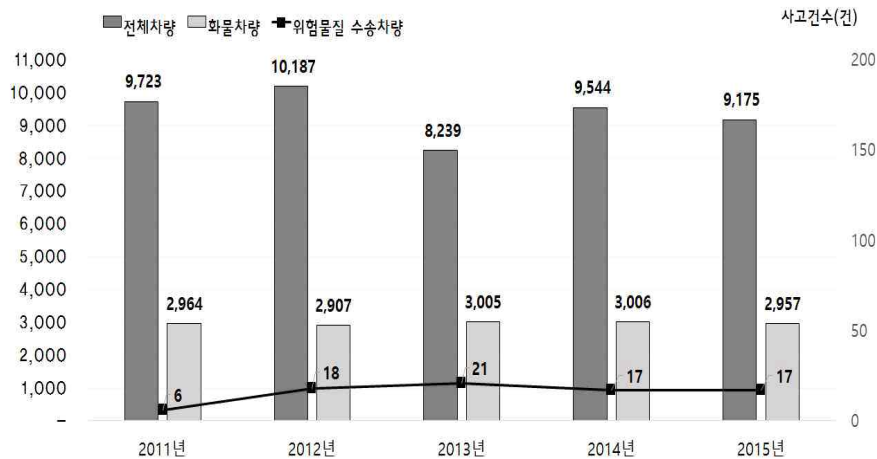


그림 3.5 2011-2015년 고속도로 사고건수 및 분류

위험물질 운반차량 사고의 경우 차량결함과 과속이 주요사고 원인으로 나타났다(최윤희 등, 2018). 차량결함과 과속으로 인한 사고는 각각 13건 발생했다. 위험물질 수송차량은 졸음으로 인한 사고가 5건으로 가장 많이 발생했으며, 그 다음으로는 차량결함으로 인한 사고가 4건 발생했다(최윤희 등, 2018). 그림 3.6은 차량사고의 주요사고 원인 비교 (과속, 졸음, 차량결함) 앞서 살펴본 바와 같이 위험물질 수송차량사고는 다른 차종에 비해 차량결함으로 인한 사고가 많이 발생하는 것으로 나타났다(최윤희 등, 2018).

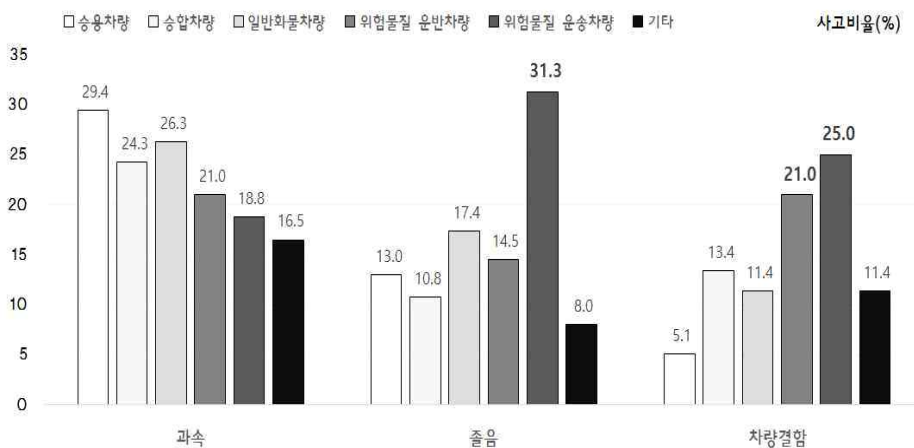


그림 3.6 차량사고의 주요사고 원인 비교 (과속, 졸음, 차량결함)

그림 3.7은 차량사고의 주요사고 원인을 비교하고 있다. 위험물질 수송차량의 차량결함으로 인한 주요 사고원인은 타이어파손이며, 11건 발생했다(최윤희 등, 2018). 다음으로 운반용기 및 탱크로리 등을 포함한 적재함파손이 4건 발생했다. 운반용기 및 탱크로리 파손의 경우 4건 모두 위험물질 유출로 이어졌다(최윤희 등, 2018).

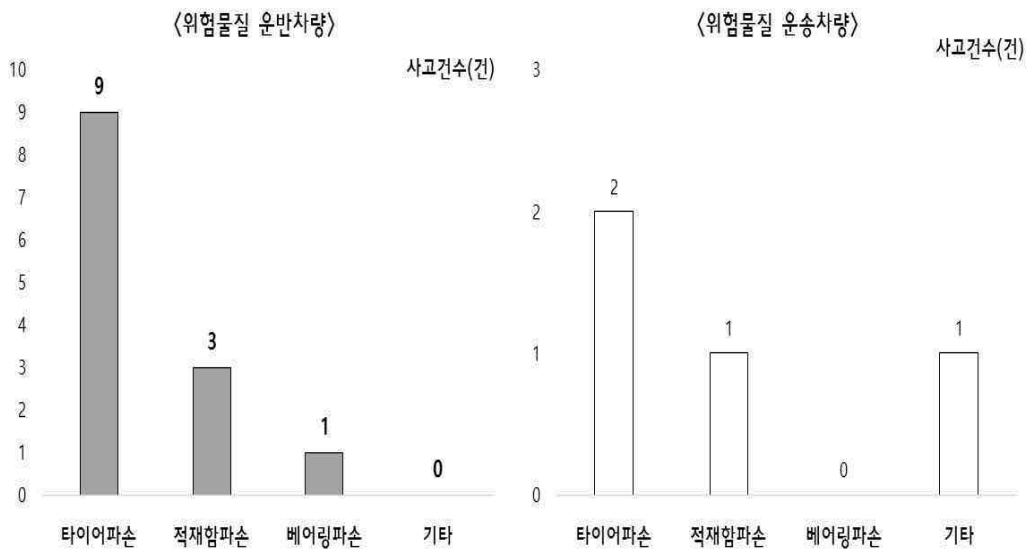


그림 3.7 위험물질 수송차량의 차량결함 사고 유형

3.2.2.2 피해유형별 사고현황

표 3.10은 고속도로 피해유형별 사고현황을 정리하고 있다. 화물차량은 화물을 적재하고 있어 사고가 발생할 경우 다양한 유형으로 사고가 발생 할 수 있다(최윤희 등, 2018). 이러한 피해의 유형을 일반사고, 화재사고, 유출사고로 구분하으며, 일반사고는 단순한 교통사고를 의미하며, 화재사고는 차량이나 수송화물에 화재가 발생한 사고로 정의했다(최윤희 등, 2018). 수송화물이 차량이나 운반용기에서 이탈하여 지면으로 낙하하는 경우는 유출사고라고 정의했다(최윤희 등, 2018). 피해의 유형을 구분하여 살펴봤을 때 위험물질 수송차량은 일반화물차량에 비해 유출사고가 많이 발생하는 것으로 나타났다(최윤희 등, 2018). 표 3.10에서 보는 바와 같이 일반화물차량의 유출사고는 일반화물차량사고에 5.5%에 해당하는 822건 발생했으나 위험물질 운반차량은 82.5%에 해당하는 52건, 위험물질 수송차량은 62.5%에 해당하는 10건이 발생한 것으로 나타났다(최윤희 등, 2018). 그림 3.8은 고속도로 화물차량 피해유형별 심각도를 나타내고 있다(최윤희 등, 2018).

표 3.10 고속도로 피해유형별 사고현황(최윤희 등, 2018)

차종		일반사고	화재사고	유출사고	화재+유출사고	합계
승용차량		28,438	557	0	0	28,995
		98.1%	1.9%	-	-	100.0%
건/천대(승용)		182.2	3.6	0.0	0.0	185.7
승합차량		2,392	115	0	0	2,507
		95.4%	4.6%	-	-	100.0%
건/천대(승합)		285.4	12.7	0.0	0.0	299.2
일반화물차량		13,235	775	822	6	14,838
		89.2%	5.2%	5.5%	0.1%	100.0%
건/천대(일반화물)		221.7	13.0	13.8	0.1	248.6
위험물질 수송차량	위험물질	1	7	52	3	63
	운반차량	1.6%	11.1%	82.5%	4.8%	100.0%
	위험물질	5	0	10	1	16
	수송차량	31.3%	-	62.5%	6.3%	100.0%
건/천대(위험물질)		1.5	1.8	15.8	0.3	19.9
기타		421	28	0	0	449
		93.8%	6.2%	-	-	100.0%
합계		44,492	1,482	884	10	46,868
		94.9%	3.2%	1.9%	0.1%	100.0%

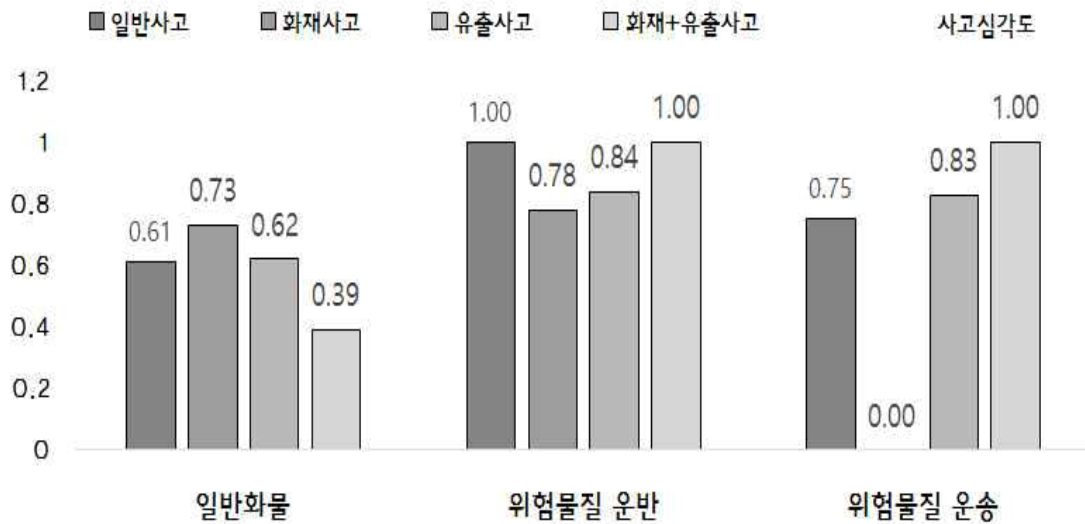


그림 3.8 고속도로 화물차량 피해유형별 심각도

3.3 정량적 화재위험도(안) 분석¹¹⁾

도로터널의 위험도를 정량적으로 분석하고 수치화함으로서 터널의 내화수준, 방재시설의 설치 또는 적정성 여부를 판단하기 위한 기준을 제시하여 도로터널의 내화 및 방재시설에 대한 성능설계를 수행하기 위한 자료로 활용함을 목적으로 한다. 도로터널의 위험은 추돌 및 충돌 등 일반사고, 붕괴, 수해, 화재 등 다양한 사고를 포함하나 정량적 위험도 평가는 화재사고에 한하여 실시한다. 도로터널의 위험도에 대한 평가는 시나리오별 사상자수(fatalities) 및 해당 사상자가 발생하는 누적빈도(frequency)에 대한 분석을 수행하여 사망자-누적빈도 선도(F/N curve)를 그래프 화하여 이를 사회적 위험도(Societal Risk) 기준과 비교함으로서 내화 및 방재시설의 규모나 적정성 여부를 판단한다.

3.3.1 정량적 위험도 평가절차(안)

- (1) 도로터널의 위험도에 대한 정량적 평가를 위해서는 화재발생 시나리오의 작성 및 시나리오별 사고발생률의 산정, 화재해석, 차량정체 및 대피해석, 유해가스가 인체에 미치는 영향의 정량화, 사상자수의 추정, 위험도 평가기준에 의한 위험 수준에 대한 분석이 필요하다.
- (2) 정량적 위험도 평가는 일반적으로 다음과 같은 단계로 수행하며, 각각에 대해서 명확한 근거 및 결과를 제시함을 원칙으로 한다.
 - (가) 화재사고 시나리오의 작성
 - (나) 화재해석
 - (다) 대피해석
 - (라) 사상자수의 추정
 - (마) 사상자수에 따른 누적빈도 선도
 - (바) 사회적 위험도평가 기준에 의한 위험도 평가
- (3) 화재발생 시나리오 작성기준
 - (가) 도로터널에서의 화재사고 발생률(건/106 Veh·km)은 국가 통계자료나 관계기관의 통

11) 국토교통부(2021) “도로터널 방재·환기시설 설치 및 관리지침” 내용 참고

계자료를 인용하여 산정하며, 최근 5년간의 평균값을 적용한다.

- (나) 도로터널 화재 시 사고의 영향은 차량 및 적재물에 따른 화재강도에 영향을 받으므로 화재발생 차종을 승용차, 버스 및 화물차량으로 구분하여 각각에 대한 사고발생률을 산정하여 작성한다.
- (다) 승용차의 화재강도는 5MW로 산정함을 원칙으로 하며, 단독화재 및 2대 연속 화재로 구분하여 시나리오를 구성할 수 있다.
- (라) 버스 및 화물차량은 화재강도(20, 30 및 100MW)별로 재분류하며 화재확대확률을 고려하여 시나리오를 작성한다.
- (마) 화재 시 교통상황은 제연팬 운전 및 화재에 따른 대피자의 분포 및 대피특성, 피해 정도에 지대한 영향을 미치므로 교통량 분석을 통해 정체정도를 확률로 분석하여 적용한다.
- (바) 제연설비가 설치되는 경우에는 제연설비 운전의 성공/실패를 고려하며, 성공/실패 확률은 기술 데이터를 활용하거나 통계적인 방법에 의해서 신뢰성이 확보된 자료를 적용한다.
- (사) 피난연결통로의 설치간격 및 화재위치에 따른 영향을 고려할 수 있도록 작성한다.
- (아) 소화설비의 작동 여부는 Fault Tree 기법에 의해서 시나리오에 반영할 수 있으며, 소화설비의 성공/실패 확률은 기술 데이터를 활용하거나 통계적인 방법에 의해서 신뢰성을 확보한 자료를 적용한다.
- (자) 화재 시 자연풍의 크기 및 방향은 터널 내 풍속에 영향을 미쳐 사고결과에 큰 영향을 미치므로 자연풍의 방향 및 크기를 고려하여 화재시나리오를 작성한다.

(4) 화재해석 일반사항

- (가) 시나리오별 화재해석 결과는 사상자수 추정에 영향을 미치므로 기술적·통계적인 방법에 의해서 신뢰성을 확보한 기술 자료를 적용한다.
- (나) 화재해석은 온도 및 연소생성물에 대해서 수행하며, 연소로 인해 발생하는 유해가스의 종류는 위험도 평가의 신뢰성을 확보할 수 있도록 연소이론에 근거하여 정한다.
- (다) 화재강도에 따른 연소생성물의 발생량은 화재 해석 틀에 따라서 상이한 입력 데이터를 요구할 수 있으므로 일반적으로 제시되는 값을 변환하여 사용할 수 있다.

(5) 대피해석 일반사항

- (가) 대피해석을 위해서는 화재로 인한 정체차량의 정체길이, 정체차량 수, 차두간격 등

차량정체 특성의 분석 및 차량정체로 인한 터널 내 대피자 수의 산정이 필요하며, 다음 항과 같이 반영한다.

- (나) 터널 내 진입 차량 수는 화재 발생 3분 이내에 차량의 진입이 차단되는 것으로 하여 산정한다.
- (다) 정체길이 산정의 경우, 정체 시 차량밀도는 150~165pcu/km·lane, 차종별 혼입률은 목표 연도의 일평균교통량의 구성비를 적용하며, 차종별 차량의 길이는 도로설계기준에 제시된 기준을 적용한다.
- (라) 대피시간은 감지시간, 반응/결정시간, 안전지역으로 이동시간을 포함하며, 감지시간 및 반응/결정시간은 터널에 설치되는 화재탐지설비 및 경보설비의 성능 또는 신속성을 반영하여 결정할 수 있다.
- (마) 대피자의 이동속도(walking speed)는 대피자 밀도, 전방 대피자와의 거리, 가시거리에 의한 보행속도의 저하를 고려하여 산정하는 것을 원칙으로 한다.

(6) 사상자수의 추정을 위한 일반사항

- (가) 대피자가 열환경 및 유해가스에 노출되어 이들로부터 받는 인체의 영향 정도는 유해가스에 대한 유효 복용 분량(Fractional Effective Dose)에 의한 평가기법 및 유효 안전 피난시간과 필요 안전 피난시간에 대한 분석기법 등 통계적인 기법에 의해서 평가할 수 있다.
- (나) 유효 복용 분량이 소정의 값을 초과하는 경우에 사상자로 판정하며, 화재영향의 경중에 따라서 등가사망자수로 고려하여 산정할 수 있다.

3.3.2 위험의 평가 기준(안)

(1) F/N 선도(추정사상자수-사고발생빈도 선도)

- (가) 추정사상자수와 추정사상자수 이상이 사망자가 발생할 수 있는 빈도(사고발생 누적빈도)를 각각 로그좌표계의 x축과 y축에 표시한 것으로 추정사상자수-사고발생누적빈도 선도(Frequency(F)/Fatalities(N))라 한다.
- (나) 정량적 위험도는 각 시나리오별로 사상자수를 추정하여 추정사상자수와 사고발생누적빈도를 분석하고 이를 사회적 위험도(societal risk) 평가 기준과 비교하여 적정수준의 여부를 판정한다.

(2) 위험도 평가기준

- (가) 정량적 위험도 평가결과는 총체적 위험도와 사상자수-사고발생 누적빈도(F/N) 선도에 의한다.
- (나) 총체적 위험도는 시나리오별 사고발생 확률과 사망자 수의 곱을 구하고 이를 누적한 결과로 나타낸다.
- (다) 사회적 위험도의 평가는 ALARP (As Low As Reasonable Practicable) 영역의 High Level 기준을 $N=10, F=10^{-4}$ 으로 Low Level 기준을 $N=10, F=10^{-6}$ 으로 할 것을 권장한다.

제 4 장 화재위험도 및 내화수준별 도로터널 내화설계

4.1 도로터널 내화지침(국토교통부, 2021) 분석

4.1.1 도로터널 내화지침 해설서(안)

도로터널 내화 지침 해설서(안) 참고

4.2 내화수준별 도로터널 내화설계

터널의 내화는 교통량, 터널유형 및 유지관리 조건 등을 종합적으로 검토하여 유관기관이 소화 및 구조활동을 원활히 수행할 수 있도록 대응시간을 확보하고, 화재로 인한 손상을 최소화하여 막대한 재산 손실을 예방하는 것이다. 유럽의 경우는 시골과 같이 교통량이 적어 교통 혼잡비용이 현저히 낮아 복구비용이 적은 경우는 내화수준을 낮추거나 내화 자체를 회피하는 경우도 있다. 반면 교통량이 많아 교통 차단에 따른 막대한 교통 혼잡비용이 발생하는 경우, 복구보다는 내화에 치중하는 것이 경제적인 수 있다. 또한 NATM 터널의 무근 라이닝 구간과는 달리 쉴드 TBM 터널의 콘크리트 세그먼트나 싱글 쉘의 경우는 라이닝 자체 지보라는 터널의 구조적 특성 때문에 반드시 내화가 적용되어야 한다.

NATM 공법을 적용한 터널에서는 표준지보패턴도에 따라 암반등급이 IV등급(지반등급 RMR 30 이하) 및 V등급 판정을 받은 구간이나 갱구부 구간에서의 콘크리트 라이닝에 철근보강을 적용한 구간에 대하여 소형차 전용 터널인 경우 KS 1시간 내화시험을 적용할 수 있으며, 대형차(유조차 등) 등 일반 터널에서는 KS 2시간 또는 RWS/HC_{inc} 2시간 내화시험을 적용할 수 있다. 또한 개착식 공법, 쉘드 공법, TBM 공법 등에 대해서도 소형차 전용 터널인 경우 KS 1시간 내화시험을 적용할 수 있으며, 대형차(유조차 등) 등 일반 터널에서는 KS 2시간 또는 RWS/HC_{inc} 2시간 내화시험을 적용할 수 있다. 다만, 구조적인 안전성 확보가 화재 후 유지보수 절차나 비용보다 심각하게 비싸고 어려운 경우 내화처리의 생략이 가능할 것으로 판단된다.

방재시설, 대피소, 비상구, 터널 연결부(joint), 풍도슬래브(airduct slab) 등의 부대시설물의

경우 화재사고 시 사고의 영향이 전파될 가능성이 있기 때문에 내화적용 여부를 검토해야 한다. 침매터널 등의 연결부, 횡류식 터널환기 시스템에 적용되는 풍도슬래브의 경우 별도의 내화성능 평가기준을 적용할 수 있다. 참고로, 표 4.1과 같이 ITA (Structural Fire Protection for Road Tunnels, 2017)에서는 다음과 같이 권고하고 있다.

표 4.1 터널 부대시설물에 대한 내화수준 권고사항(ITA, 2017)

차량유형	Air Ducts ^{주1)}	Emergency exits to open air	Emergency exits to other tube	Shelters ^{주2)}
소형차	KS 1시간	KS 0.5시간	KS 1시간	KS 1시간
대형차 (유조차 등)	KS 2시간	KS 0.5시간	RWS/ HCinc 2시간	RWS/ HCinc 2시간 ^{주3)}

주1) 횡방향 환기의 경우

주2) 대피소는 야외와 연결된 경우

주3) 가연성 물질을 운반하는 대형차의 교통량이 매우 많고, 대피소에서 2시간 이내에 대피할 수 없는 경우 더 긴 화재지속기간에 대한 검토가 필요

이와 같이 여러 가지 요소를 적절히 고려하며 터널관리 주체나 설계자는 주변 여건을 통해 그 위험도를 고려하여 화재로부터 터널 구조물을 보호하기 위해 내화 적용여부를 검토해야 한다.

제 5 장 화재위험도 및 내화수준별 도로터널 내화 시공절차 개발

5.1 상태평가 기준 및 방법(안)¹²⁾

5.1.1 상태평가 기준

가. 일반

(1) 기본시설 및 부대시설

터널의 기본시설과 부대시설의 종류는 표 5.1과 같다. 터널 부대시설 중에서 시설물의 중요도가 상대적으로 작으며 본선 구조물에 부분적으로 확폭 또는 접속된 별도 공간인 비상주차대, 대피소/변압기굴, 덕트 슬래브, 배전실/통신실/기재갱 등은 상태평가 시 기본시설에 포함하여 평가한다.

시설물의 중요도 및 규모 등이 상대적으로 큰 연직갱/경사갱, 환기구, 피난연락갱, 연결터널 등은 별도평가 후 부대시설 가중치를 적용하여 시설물을 평가한다.

상태평가 대상구간에 무근콘크리트 라이닝과 철근콘크리트 라이닝 또는 개착 터널과 NATM 터널 구간이 교호하여 시공된 경우 각각 평가 후 각 길이를 환산한 가중치를 적용한 가중산술평균 방법으로 평가한다.

표 5.1 터널의 기본 시설물과 부대 시설물의 종류

기본 시설물	부대 시설물
본선라이닝	연직갱 및 경사갱
갱문	환기구
개착터널	피난연락갱
지하차도	연결터널(환기시설)
지하정거장	갱구부옹벽

¹²⁾ 국토교통부(한국시설안전공단, 2017) “안전점검 및 정밀안전진단 세부지침” 내용 참고

(2) 상태평가 항목

터널의 상태평가는 라이닝 상태평가와 터널주변 상태평가로 구분하여 실시하며 상태평가 시 고려해야 할 주요 평가항목은 다음과 같다.

표 5.2 터널 상태평가 항목

구분		평가항목
터널상태 평가	라이닝 상태	<ul style="list-style-type: none"> - 균열 - 누수 - 파손 및 손상 - 재질열화(박리, 층분리 및 박락, 백태, 재료분리, 철근노출, 탄산화, 염화물)
	터널주변 상태	<ul style="list-style-type: none"> - 배수상태 - 지반상태 - 갱문상태 - 공동구상태 - 특수조건 : 도심지 토사터널, 전력구터널, 전차선을 설치한 터널(추가점수 부여)

나. 기본시설 결함지수 산정기준

(1) 터널별 결함지수 산정기준

터널 시설물 분류에 따른 터널별 상태평가를 위한 결함점수와 결함지수 산출방법은 다음과 같다. 여기서, 라이닝 결함지수(f)는 터널 주변 항목점수를 제외한 라이닝만의 결함점수인 총점 36점(조적식 : 26점, 무근콘크리트 : 27점)으로 계산되며, 터널 결함지수(F)는 라이닝의 결함점수 및 터널주변 결함점수를 모두 합한 총점 43점(조적식 : 33점, 무근콘크리트 : 34점, 지하차도 등 : 42점)으로 계산하여 상태평가 결과를 산정하면 된다.

(가) 재래식 터널(조적식 라이닝)

표 5.3 재래식 터널(조적식 라이닝)

평가기준		a	b	c	d	e	
		$0 \leq f < 0.15$	$0.15 \leq f < 0.30$	$0.30 \leq f < 0.55$	$0.55 \leq f < 0.75$	$0.75 \leq f$	
라 이 닝	줄눈균열	0~2	3~5	6~8	9~11	12~13	
	누수	0	1	2	3	4~5	
	파손 및 손상	0	0	1	2	3	
	재질	박 리	0	0	1	1	1
		충분리	0	0	1	2	3
	열화	및 박락 백 태	0	0	1	1	1
터 널 주 변	배수상태	오염됨 : 1					
		배수불량 또는 막힘 : 2					
	지반상태	풍화변질 및 단층파쇄대	영향범위 내 : 2~3				
			영향범위 외 : 1				
갱문상태	손상 : 0.5~1						
공동구상태	덜개파손 및 오염됨 : 0.5						
	이물질 퇴적 및 침수 : 1						
특수조건		도심지 토사 터널, 전력구 터널, 전차선을 설치한 터널에서 낙수 및 동결위험 (추가점수) : 1~3					
		라이닝 결함지수(f) = $\frac{\sum \text{결함점수}}{26}$, 터널 결함지수(F) = $\frac{\sum \text{결함점수}}{33}$					

(나) 재래식 터널(무근콘크리트 라이닝)

표 5.4 재래식터널(무근콘크리트 라이닝)

평가기준		a	b	c	d	e	
		$0 \leq f < 0.15$	$0.15 \leq f < 0.30$	$0.30 \leq f < 0.55$	$0.55 \leq f < 0.75$	$0.75 \leq f$	
라 이 닝	줄눈균열	0~2	3~5	6~8	9~11	12~13	
	누수	0	1	2	3	4~5	
	파손 및 손상	0	0	1	2	3	
	재질	박 리	0	0	1	1	1
		충분리	0	0	1	2	3
	열화	및 박락 백 태	0	0	1	1	1
터 널 주 변	배수상태	오염됨 : 1					
		배수불량 또는 막힘 : 2					
	지반상태	풍화변질 및 단층파쇄대	영향범위 내 : 2~3				
			영향범위 외 : 1				
갱문상태	손상 : 0.5~1						
공동구상태	덜개파손 및 오염됨 : 0.5						
	이물질 퇴적 및 침수 : 1						
특수조건		도심지 토사 터널, 전력구 터널, 전차선을 설치한 터널에서 낙수 및 동결위험 (추가점수) : 1~3					
		라이닝 결함지수(f) = $\frac{\sum \text{결함점수}}{27}$, 터널 결함지수(F) = $\frac{\sum \text{결함점수}}{34}$					

(다) NATM 터널(무근콘크리트 라이닝)

표 5.5 NATM터널(무근콘크리트 라이닝)

평가기준		a	b	c	d	e	
		$0 \leq f < 0.15$	$0.15 \leq f < 0.30$	$0.30 \leq f < 0.55$	$0.55 \leq f < 0.75$	$0.75 \leq f$	
라 이 닝	균열	0~2	3~5	6~8	9~11	12~13	
	누수	0	1	2	3	4~5	
	파손 및 손상	0	0	1	2	3	
		박리	0	0	1	1	1
	재질 열화	충분리	0	0	1	2	3
		및 박락	0	0	1	1	1
		백태	0	0	1	1	1
	재료분리	0	0	1	1	1	
터 널 주 변	배수상태	오염됨 : 1					
		배수불량 또는 막힘 : 2					
	지반상태	풍화변질 및 단층파쇄대	영향범위 내 : 2~3				
			영향범위 외 : 1				
갱문상태	손상 : 0.5~1						
공동구상태	덮개파손 및 오염됨 : 0.5						
	이물질 퇴적 및 침수 : 1						
특수조건		도심지 토사 터널, 전력구 터널, 전차선을 설치한 터널에서 낙수 및 동결위험 (추가점수) : 1~3					
		라이닝 결함지수(f) = $\frac{\sum \text{결함점수}}{27}$, 터널 결함지수(F) = $\frac{\sum \text{결함점수}}{34}$					

(라) NATM 터널(철근콘크리트 라이닝)

표 5.6 NATM 터널(철근콘크리트 라이닝)

평가기준		a	b	c	d	e	
		$0 \leq f < 0.15$	$0.15 \leq f < 0.30$	$0.30 \leq f < 0.55$	$0.55 \leq f < 0.75$	$0.75 \leq f$	
라 이 닝	균열	0~2	3~5	6~8	9~11	12~13	
	누수	0	1	2	3	4~5	
	파손 및 손상	0	0	1	2	3	
		박리	0	0	1	1	1
	재질 열화	충분리	0	0	1	2	3
		및 박락	0	0	1	1	1
		백태	0	0	1	1	1
	재료분리	0	0	1	1	1	
터 널 주 변	배수상태	오염됨 : 1					
		배수불량 또는 막힘 : 2					
	지반상태	풍화변질 및 단층파쇄대	영향범위 내 : 2~3				
			영향범위 외 : 1				
갱문상태	손상 : 0.5~1						
공동구상태	덮개파손 및 오염됨 : 0.5						
	이물질 퇴적 및 침수 : 1						
특수조건		도심지 토사 터널, 전력구 터널, 전차선을 설치한 터널에서 낙수 및 동결위험 (추가점수) : 1~3					
		라이닝 결함지수(f) = $\frac{\sum \text{결함점수}}{36}$, 터널 결함지수(F) = $\frac{\sum \text{결함점수}}{43}$					

(마) TBM 터널(콘크리트 세그먼트 라이닝)

TBM (Tunnel Boring Machine) 터널은 소규모 굴착장비나 발파방법에 의하지 않고 굴착에서 버럭처리까지 기계화·시스템화되어 있는 대규모 굴착기계를 말하며, 일반적으로 open TBM과 shield TBM으로 구분한다. 본 상태평가 기준은 콘크리트 세그먼트 라이닝이 설치되는 TBM터널에 적용한다.

표 5.7 TBM 터널(콘크리트 세그먼트 라이닝)

평가기준		a	b	c	d	e	
		$0 \leq f < 0.15$	$0.15 \leq f < 0.30$	$0.30 \leq f < 0.55$	$0.55 \leq f < 0.75$	$0.75 \leq f$	
라 이 닝	균열 누수	0~2	3~5	6~8	9~11	12~13	
	파손 및 손상	0	0	1	2	3	
	재질	박리	0	0	1	1	1
		층분리 및 박락	0	0	1	2	3
	열화	백태	0	0	1	1	1
		재료분리	0	0	1	1	1
		철근노출	0	1	2	3	4
		탄산화 염화물	0	1	2	3	-
		염화물	0	1	1	2	-
	터 널 주 변	배수상태	오염됨 : 1				
배수불량 또는 막힘 : 2							
지반상태		풍화변질 및 단층과쇄대	영향범위 내 : 2~3				
			영향범위 외 : 1				
갱문상태	손상 : 0.5~1						
공동구상태	덜개파손 및 오염됨 : 0.5						
	이물질 퇴적 및 침수 : 1						
특수조건		도심지 토사 터널, 전력구 터널, 전차선을 설치한 터널에서 낙수 및 동결위험 (추가점수) : 1~3					
		라이닝 결함지수(f) = $\frac{\sum \text{결함점수}}{36}$, 터널 결함지수(F) = $\frac{\sum \text{결함점수}}{43}$					

(바) 개착식 터널(BOX형 철근콘크리트 구조물)

개착식 터널에 대한 상태평가는 철근콘크리트 구조물의 평가방법에 준하며, 본 상태평가 기준을 적용하는 경우 철근콘크리트 구조물에 대한 평가방법을 적용한다.

표 5.8 개착식 터널(BOX형 철근콘크리트 구조물)

평가기준		a	b	c	d	e	
		$0 \leq f < 0.15$	$0.15 \leq f < 0.30$	$0.30 \leq f < 0.55$	$0.55 \leq f < 0.75$	$0.75 \leq f$	
라이닝	균열 두께	0~2	3~5	6~8	9~11	12~13	
	파손 및 손상	0	0	1	2	3	
	재질 및 박락	박리	0	0	1	1	1
		충분리	0	0	1	2	3
	열화	백태	0	0	1	1	1
		재료분리	0	0	1	1	1
		철근노출	0	1	2	3	4
		탄산화	0	1	2	3	-
		염화물	0	1	1	2	-
	터널 주변	배수상태	오염됨 : 1				
배수불량 또는 막힘 : 2							
지반상태		풍화변질 및 단층파쇄대	영향범위 내 : 2~3				
			영향범위 외 : 1				
공동구상태	갭문상태	손상 : 0.5~1					
		덮개파손 및 오염됨 : 0.5					
특수조건	공동구상태	이물질 퇴적 및 침수 : 1					
		도심지 토사 터널, 전력구 터널, 전차선을 설치한 터널에서 낙수 및 동결위험 (추가점수) : 1~3					
		라이닝 결함지수(f) = $\frac{\sum \text{결함점수}}{36}$, 터널 결함지수(F) = $\frac{\sum \text{결함점수}}{43}$					

다. 부대시설 결함지수 산정기준

(1) 터널 부대시설 분류

터널 부대시설 중에서 중요도 및 규모가 상대적으로 큰 별도평가 부대시설을 기능 및 구조물의 재질에 따라 분류하면 그림 5.1과 같다.

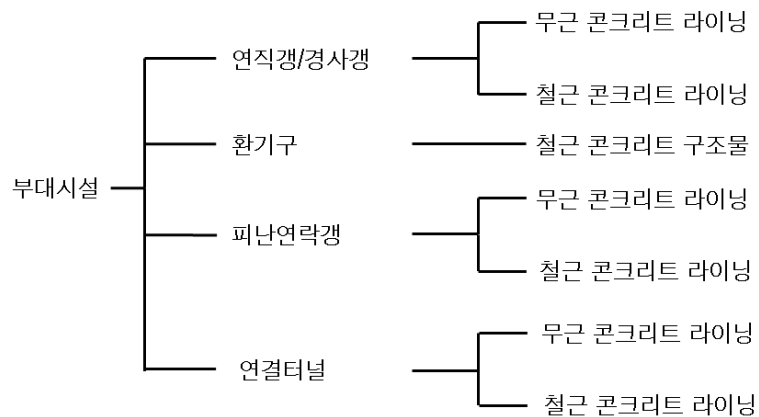


그림 5.1 부대시설 분류

(2) 부대시설 상태평가 항목

터널 부대시설은 기본시설과 같이 무근 및 철근콘크리트로 구성되어 있으므로 상태 평가 시 고려해야 할 주요 평가항목은 표 5.9와 같다.

부대시설 중에 숏크리트, 록볼트 등으로 터널의 안전성이 확보되거나 지반이 견고하여 풍화의 우려가 없고 사용상 지장이 없어 콘크리트 라이닝을 생략한 경우에는 책임기술자가 현장여건을 고려하여 상태평가 항목 및 평가기준을 조정할 수 있다. 환기구 덮개의 경우 유지관리 조사 항목 및 내용은 건축물 세부지침을 준용하며, 환기구 덮개의조사결과는 관리주체의 유지관리방안 제시에 활용한다.

표 5.9 부대시설 상태평가 항목

구 분	평 가 항 목
부대시설 상태평가	- 균 열 - 누 수 - 파손 및 손상 - 재질열화(박리, 층분리 및 박락, 백태, 재료분리, 철근노출, 탄산화, 염화물)

(3) 부대시설 가중치

부대시설 평가 결과를 기본시설을 포함한 전체시설물의 상태평가 결과에 반영하기 위한 방법으로 다음과 같이 기본시설과 별도로 부대시설 결함점수에 따른 가중치를 정하였으며, 부대시설 평가 기준은 기존의 산정 개념과 유사하게 보수적인 관점에서 하위상태에 비중을 두어 산정한다.

부대시설 가중치 적용은 기본시설 결함지수(F)에 부대시설 가중치(W)를 곱하여 전체 시설물의 결함지수(F)를 산정하고, 시설물 상태평가 결과를 5단계(A, B, C, D, E)로 매긴다.

$$\text{시설물의 결함지수(F)} = \text{기본시설 결함지수(F)} \times \text{부대시설 가중치(W)} \quad \text{<식 5.1>}$$

표 5.10 부대시설의 가중치

가중치(W)	1.0	1.00	1.02	1.05	1.10
부대시설 결합지수	$0 \leq f < 0.15$	$0.15 \leq f < 0.30$	$0.30 \leq f < 0.55$	$0.55 \leq f < 0.75$	$0.75 \leq f$
시설물 상태평가	문제점이 없는 최상의 상태	기능수행에 영향이 없으나 일부 보수가 필요한 상태	부재의 손상이 있으나 기본시설 기능수행에 문제가 없는 상태	부재의 손상이 중대하여 기본시설에 영향을 주는 상태	기본시설의 기능수행에 문제를 일으켜 즉각적인 조치가 필요한 상태

부대시설의 상태평가는 개별 부대시설을 각각 평가한 후 산술평균하여 부대시설 결합지수를 산정하고 부대시설 상태평가 결과를 5단계(A, B, C, D, E)로 매긴다.

$$\text{부대시설의 결합지수}(f) = \frac{\sum(f_n)}{N} \quad \langle \text{식 5.2} \rangle$$

여기서, f_n : 개별 부대시설의 상태평가 결합지수

N : 개별 부대시설의 개수

부대시설 상태평가 결과 산정

- A등급(우수) : 터널 결합지수(f) $0.00 \leq f < 0.15$
- B등급(양호) : 터널 결합지수(f) $0.15 \leq f < 0.30$
- C등급(보통) : 터널 결합지수(f) $0.30 \leq f < 0.55$
- D등급(미흡) : 터널 결합지수(f) $0.55 \leq f < 0.75$
- E등급(불량) : 터널 결합지수(f) $0.75 \leq f$

(4) 부대시설 결합지수 산정기준

터널 부대시설 구조물 분류에 따른 상태평가를 위한 결합점수와 결합지수 산출방법은 다음과 같다.

(가) 무근 콘크리트

표 5.11 무근 콘크리트

평가기준	a	b	c	d	e
	$0 \leq f < 0.15$	$0.15 \leq f < 0.30$	$0.30 \leq f < 0.55$	$0.55 \leq f < 0.75$	$0.75 \leq f$
균열 누수	0~2	3~5	6~8	9~11	12~13
파손 및 손상	0	1	2	3	4~5
재질 열화	박리	0	1	2	3
	층분리 및 박락	0	0	1	2
	백태	0	0	1	1
	재료분리	0	0	1	1
부대시설 결함지수(f) = $\frac{\sum \text{결함점수}}{27}$					

(나) 철근 콘크리트

표 5.12 철근 콘크리트

평가기준	a	b	c	d	e
	$0 \leq f < 0.15$	$0.15 \leq f < 0.30$	$0.30 \leq f < 0.55$	$0.55 \leq f < 0.75$	$0.75 \leq f$
균열 누수	0~2	3~5	6~8	9~11	12~13
파손 및 손상	0	1	2	3	4~5
재질 열화	박리	0	1	2	3
	층분리	0	0	1	1
	및 박락	0	0	1	2
	백태	0	0	1	1
	재료분리	0	0	1	1
	철근노출	0	1	2	3
	탄산화 염화물	0	1	2	3
부대시설 결함지수(f) = $\frac{\sum \text{결함점수}}{36}$					

5.1.2 상태평가 항목 및 기준

가. 기본시설 상태평가 항목 및 기준

평가항목은 5단계로 세분하였고, 평가항목별 상태평가 기준은 터널 상태평가 결과와의 차이를 두기 위하여 소문자 a, b, c, d, e로 표기한다.

세부 기준은 기존 국내 기준과 국외 기준을 참고하여 결정하였으며, 설문조사를 통한 실무자들의 의견과 현실적인 여건을 고려하여 정하였다. 또한, 각각의 평가항목에 대한 상태평가는 가장 대표적인 것을 기준으로 하여 결정하도록 하며, 여러 개소에서 조사될 경우에는 하향 평가한다. 터널 라이닝의 상태평가 단위길이는 일반적으로 30m를 기준으로 한다. 상태

평가 단위길이는 터널 라이닝의 신축이음(약 20~30m)을 고려하여 책임기술자의 판단에 따라 조정할 수 있다.

(1) 균열

표 5.13 균열

구분		평가기준				
		a	b	c	d	e
콘크리트 라이닝	무균(균열)	0.1mm 미만	0.1mm 이상 0.3mm 미만	0.3mm 이상 1.0mm 미만	1.0mm 이상 3.0mm 미만	3.0mm 이상
	철근(균열)	0.1mm 미만	0.1mm 이상 0.3mm 미만	0.3mm 이상 0.5mm 미만	0.5mm 이상 0.7mm 미만	0.7mm 이상
개착터널	BOX(균열)	0.1mm 미만	0.1mm 이상 0.3mm 미만	0.3mm 이상 0.5mm 미만	0.5mm 이상 0.7mm 미만	0.7mm 이상
조적식 라이닝	줄눈균열	없음	아주 경미한 줄눈깨짐	벽돌 2개소 이하	벽돌 2~5 개소	벽돌 5개소 이상

주) 진행성 균열의 경우 상태평가 결과가 "d" 이하 또는 고정 균열의 경우 면적율 20% 이상으로 "e" 이면 2.1.4 절의 중대한 결함으로 본다.

<해설>

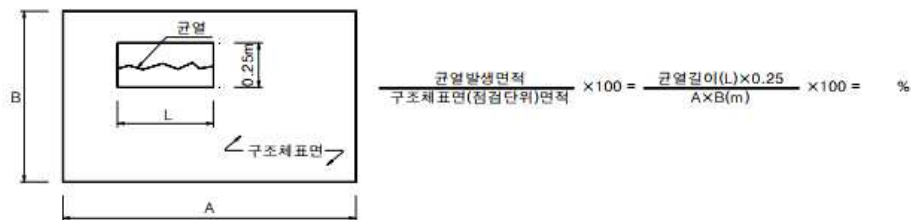
① 진행성의 유무가 확인되지 않은 경우에 적용하며 진행성이 확인되는 경우 평가는 하향 조정하고 정밀안전진단을 실시하여 정기적으로 관찰하도록 한다.

※ 진행성 여부의 판별은 주기적인 점검(정기점검) 결과를 활용해 판단한다.

② 균열형상은 종균열, 횡균열, 경사균열, 망상균열로 구분하며 횡균열을 제외한 균열은 평가는 하향 조정할 수 있다.



- ③ 균열이 다음 스펀에 연속적으로 이어져 있는 경우 평가는 하향 조정할 수 있다.
 - ④ 구조적 균열은 설계 오류로 인한 균열, 외부 하중에 의한 균열, 단면 및 철근량의 부족에 의한 균열 등이 있다. 콘크리트 구조의 구조적 균열은 콘크리트와 철근사이의 응력, 변형률, 미끄러짐(slip), 부착응력 등에 따라 균열형성단계와 균열안정화 단계의 2단계로 형성된다. 구조적 균열발생시 면적율에 관계없이 평가는 1단계 하향조정하고, “d” 이상으로 발생하였을 경우에는 안전성평가를 통하여 과하중의 양상과 그 결과의 분석을 실시하도록 한다.
 - ⑤ 조적식 라이닝의 경우 줄눈깨짐의 연속성 정도에 따라 평가는 하향 조정하도록 한다.
 - ⑥ 보수·보강부위는 기존의 균열폭과 길이의 변화, 새로운 균열 및 들뜸의 진행성 유무 등을 주기적인 점검(정기점검) 결과를 활용하여 평가할 수 있다.
 - ⑦ 면적율이 20% 이하일 경우는 해당 상태평가 결과를 기재하고, 면적율 20% 이상과 구조적균열 및 단차균열일 경우의 평가는 a→b, b→c, c→d, d→e, e→e로 하향 조정할 수 있다.
- 균열의 발생면적은 균열길이당 0.25m의 폭을 차지하는 것으로 한다.



(2) 누수

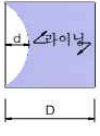
표 5.14 누수

평가기준	a	b	c	d	d
누수	없음	스며 있음	떨어짐	흐름	분출
누수					
해설	<p>1) 누수 발생부위는 아치부와 측벽부, 노면으로 구분하며, 아치부에 누수가 발생하여 차량통행에 지장을 주는 경우 평가는 하향 조정하도록 한다.</p> <p>2) 아치부에 발생된 누수가 얼어 고드름이 형성된 경우와 측벽부에 발생된 누수가 얼어서 건축한계를 초과하여 차량통행에 지장을 주는 경우에는 평가는 하향 조정하도록 한다.</p> <p>3) 노면에 토사유출 또는 동결이 발생되어 차량통행에 지장이 될 경우에는 평가는 하향 조정하고, 그 원인을 정밀조사하도록 한다.</p> <p>4) 누수가 배수공과 시공이음, 신축이음의 결합, 균열, 배면공동, 수맥 등의 영향으로 인하여 발생될 경우에는 수압 등에 의한 구조적 결함을 유발시킬 수 있는지의 여부 등을 검토할 수 있다.</p> <p>5) 누수는 건기 시와 우기 시에 따라 계절별로 차이가 발생할 수 있으므로 계절적 요인을 반영하여 평가할 수 있다.</p> <p>6) 보수·보강부위는 누수상태(수질, 수량, 물흐름)의 변화 유무 등을 주기적인 점검(정기점검) 결과를 활용하여 평가할 수 있다.</p>				

주) 상태평가 결과가 "d" 이하이며, 토립자와 함께 나와 구조적 결함을 유발시킬 수 있거나 고드름 및 측빙 등으로 차량통행에 현저한 지장을 주는 경우 2.1.4절의 중대한 결함으로 본다.

(3) 파손 및 손상

표 5.15 파손 및 손상

구분		평가기준				
		a	b	c	d	e
콘크리트 라이닝	손상도	없음	1/6 미만	1/6 이상 1/3 미만	1/3 이상 1/2 미만	1/2 이상
	손상면적	없음	아주 경미한 상태	경미한 손상 (10cm×10cm미만)	중간 손상 (10cm×10cm이상, 30cm×30cm미만)	극심한 손상 (30cm×30cm이상)
조적식 라이닝	손상두께	없음	벽돌부분 손상	벽돌 1개 이하	벽돌 1~2개	벽돌 2개 이상
해설		<p>1) 손상도는 콘크리트 라이닝에 대한 것으로 라이닝 두께에 대한 손상된 두께를 말하며, 일반적으로 라이닝 설계두께를 기준으로 하고, 라이닝 측정두께가 있는 경우 이를 기준으로 한다.</p>  <p>2) ※ 손상도 = d (파손 및 손상두께) / D (라이닝두께)</p> <p>3) 조적식 라이닝에서 파손 및 손상두께는 벽돌두께를 기준으로 적용한다.</p> <p>4) 조적식 라이닝인 경우 파손 및 손상면적은 벽돌크기를 기준으로 하여 산정하도록 한다.</p> <p>5) 지반탐사 등으로 측정된 라이닝 두께가 설계두께에 못 미치는 경우에는 이를 손상으로 평가 할 수 있다.</p> <p>6) 파손 및 손상발생부위는 아치부와 측벽부로 구분하며, 아치부에 파손 및 손상이 발생하여 낙하위험이 있는 경우 평가는 하향 조정한다.</p> <p>7) 면적율이 20% 이하일 경우는 해당 상태평가결과를 기재하고, 면적율 20% 이상일 경우의 평가는 a→a, b→c, c→d, d→e, e→e로 하향 조정할 수 있다.</p>				

주) 파손 및 손상에 대한 면적율이 20%이상으로 상태평가 결과가 "d" 이하이면 중대한 결함으로 본다.

(4) 재질열화(박리, 층분리 및 박락, 백태, 재료분리, 철근노출, 탄산화, 염화물)

표 5.16 재질열화(박리, 층분리 및 박락, 백태, 재료분리, 철근노출, 탄산화, 염화물)

평가기준 구분	a	b	c	d	e
박 리	없음	0.5mm 미만	0.5mm 이상 ~ 1.0mm 미만	1.0mm 이상 ~ 25mm 미만	25mm 이상 이거나 조골재 손실 박락이
층분리 및 박락	없음	깊이 12mm 미만 또는 직경 75mm 미만	깊이 12~25mm 미만 또는 직경 75~150mm 미만	깊이 25mm 이상 또는 직경 150mm 이상	극심하여 즉시 보수를 요하는 상태
백태, 재료분리	없음	면적을 5% 미만	면적을 5~10%	면적을 10~20%	면적을 20% 이상
철근노출	없음	면적을 1% 미만	면적을 1~3% 미만	면적을 3~5% 미만	면적을 5% 이상
탄산화 잔여깊이	30mm 이상	10mm 이상 ~ 30mm 미만	0mm 이상 ~ 10mm 미만	0mm 미만	-
전염화물 이온량	0.3kg/m ³ 이하	0.3kg/m ³ 초과 ~ 1.2kg/m ³ 미만	1.2kg/m ³ 이상 ~ 2.5kg/m ³ 미만	2.5kg/m ³ 이상	-
해 설	1) 박리, 층분리 및 박락, 백태, 재료분리는 콘크리트의 재질에 대한 평가로서 경년이나 주변환경영향 등에 따라 열화되는 특성을 나타낸다. 2) 박리는 콘크리트 라이닝의 박리된 깊이를 기준으로 하며, 층분리 및 박락은 콘크리트 박락된 깊이, 직경, 상태 등을 고려하여 판단하도록 한다. 3) 박리·층분리 및 박락이 심한 경우에는 다른 변상조건들과 비교·검토하여 그 원인을 조사하도록 한다. 4) 백태 및 재료분리의 경우 발생범위와 정도로부터 판단하도록 한다. 5) 철근노출은 철근콘크리트 라이닝인 경우에 적용하며, 심한 부식이 우려되는 경우에는 부식도를 측정하여 철근의 부식상태를 평가하도록 한다. 또한, 철 근노출 발생 면적은 철근 노출 길이당 0.25m의 폭을 차지하는 것으로 한다. 6) 탄산화 깊이에 대한 평가는 철근으로부터 탄산화의 남은 깊이를 지표로 하 여 탄산화에 의한 강재부식 가능성을 나타낸 것으로 탄산화에 의한 단독 열 화에 대하여 적용하며, 콘크리트 품질평가 기준인 탄산화는 직접적인 손상항 목이 아닌 철근부식을 유발할 수 있는 환경에 관한 항목으로써 상태평가 기				

	<p>준 범위를 “a~d”로 한다. 평가는 철근의 피복은 조사 위치에서의 실측치를 기준으로 한다.</p> <p><일본구조물진단기술협회 「비파괴시험을 이용한 토목 콘크리트구조물의 건전도 진단 매뉴얼」 (2003년)></p> <p>7) 채취 코어의 전염화물 이온 시험결과에서 염화물에 의한 강재부식 가능성을 평가하며, 염화물 함유량은 직접적인 손상항목이 아닌 철근부식을 유발할 수 있는 환경에 관한 항목으로써 상태평가 기준 범위를 “a~d”로 한다. 염화물 함유량 분석은 철근 깊이까지 깊이별(10mm 또는 20mm)로 단계를 구분하여 염화물 분포를 파악함을 원칙으로 하며, 염화물 이온농도의 분포를 도시한다.</p> <p><일본구조물진단기술협회 「비파괴시험을 이용한 토목 콘크리트구조물의 건전도 진단 매뉴얼」 (2003년)></p> <p>8) 박리, 층분리 및 박락의 면적율이 20% 이하일 경우는 해당 상태평가 결과를 기재하고, 면적율이 20% 이상일 경우의 평가는 a→a, b→c, c→d, d→e, e→e 로 하향 조정할 수 있다.</p>
--	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

주) 탄산화 잔여깊이 또는 전염화물 이온량에 대한 상태평가 결과가 "d"등급이고, 철근노출의 상태평가 결과가 "e"등급이면 중대한 결함으로 본다.

(5) 배수 상태

표 5.17 배수상태

구분	오염됨	배수불량 및 막힘(배수시설 작동불량)
결함점수	1	2
해설	<p>1) 배수상태는 지하수를 유도하여 배수를 허용하는 배수형 터널의 경우에 한하며, 배수형터널이 아닌 경우에는 전문가의 판단에 따라 별도로 적용하도록 한다.</p> <p>2) 배수된 물의 함유성분에 의한 오염이 우려되는 경우에는 수질을 조사하여 오염의 원인을 평가하도록 한다.</p> <p>3) 배수된 물에 토사가 섞여 나오는 경우에는 지속적인 토사유출로 라이닝 배면에 문제가 발생할 가능성이 있으므로 토사유출량과 터널안정성에 대해 정밀 조사하도록 한다.</p> <p>4) 집수정이 설치된 경우 배수시설(펌프설비 등)의 작동유무, 정착상태, 전원설비 상태 등을 점검하고 작동이 안되거나 정착이 불량한 경우 관리주체에 통보하여 교체 또는 수리 등의 조치가 가능하도록 하여야 한다.</p>	

(6) 지반 상태

표 5.18 지반상태

구 분	풍화변질 및 단층과쇄대			
	풍화변질	단층과쇄대		
		영향범위 외	영향범위 내	
결함점수	1	1	중·소규모 단층 2	대규모 단층 3
해 설	1) 기시공된 터널에서는 주변지반상태를 육안으로 확인하는 것이 쉽지 않으므로 설계 및 시공자료를 참고하여 판단하도록 하며, 안전성 평가시 지반조사를 실시하여 지반상태를 평가하도록 한다. 2) 지반상태가 터널에 영향을 미치는 범위는 0.5D를 기준으로 한다. 3) 지반의 풍화변질상태는 육안으로 확인할 수 있는 갱구부 주변의 지반이나 노출된 암반으로부터 평가하도록 한다. 4) 터널에 직접적인 영향을 주는 지질구조(단층, 습곡, 선구조선)의 영향은 지질도나 시공자료, 지표지질조사결과 그리고 필요시 인공위성사진, 항공사진 등을 이용하여 검토하도록 한다. 5) 이완토압, 편토압, 소성압 등으로 인하여 내공변위가 발생한 경우에는 단층과쇄대의 영향범위 내에 해당하는 점수를 부여한다. 6) 도심지 터널의 경우 낮은 심도로 인하여 불량지반, 복합지반에 위치하는 경우에 지반상태를 평가하고 영향범위에 따른 점수를 부여한다.			

(7) 갱문(접속부) 상태

표 5.19 갱문(접속부)상태

구 분	손 상	
	보통인 상태 0.5	불량한 상태 1
해 설	1) 갱구부는 터널의 입출구부로서 차량의 통행에 직접적인 영향을 주기 때문에 갱문(접속부)상태를 반영하여 손상여부를 평가한다. 2) 갱문(접속부)의 평가방법은 일반 콘크리트 구조물에서의 평가방법에 준하며, 특히 주변지반의 변화상태 등에 유의하여야 한다. 3) 갱문(접속부)에 심각한 손상이 발생한 경우, 주변 지반조사를 실시하여 손상원인을 규명 하도록 한다.	

(8) 공동구 상태

표 5.20 공동구 상태

구 분	뒹개파손 및 오염됨	이물질 퇴적 및 침수
결합점수	0.5	1
해 설	1) 통신케이블, 신호용케이블, 전기케이블 등의 보호를 위해 터널내에 설치되는 공간을 가리키며, 일반적으로 배수구와 병행하여 시공된다. 2) 공동구의 오염상태, 뒹개파손, 이물질의 퇴적이나 침수 등을 조사하여 상태를 평가하도록 한다.	

(9) 특수조건(추가점수)

표 5.21 특수조건(추가점수)

구 분	도심지 토사터널		전력구터널, 전차선을 설치한 터널		
	주의범위 (1D~2D)	제한범위 (1D 미만)	측벽부 낙수	아치부 낙수	동결위험
결합점수	1	2	1	2	3
해 설	1) 도심지 토사터널은 터널심도, 인접시설물(건축물, 철도, 도로 등)과의 거리 등을 검토·분석하고 터널에 영향을 미치는 범위를 고려하여 이를 반영한다. 2) 전력구터널, 전차선을 설치한 터널은 전기를 사용하므로 누전문제에 대한 위험성을 상태평가에 추가 반영하도록 하고, 특히 전차선을 설치한 터널은 동결시 차량운행에 지장을 초래할 수 있으므로 이를 반영한다. 3) 기타 일반적인 터널조건과 다른 특수터널인 경우, 조사자의 판단에 따라 상태평가에 특수조건을 부과하여 가점하도록 한다.				

나. 부대시설 상태평가 항목 및 기준

(1) 균열

표 5.22 균열

평가기준		구 분				
		a	b	c	d	e
무근 콘크리트 라이닝	손상도	0.1mm 미만	0.1mm 이상	0.3mm 이상	1.0mm 이상	3.0mm 이상
		0.3mm 미만	0.1mm 이상	1.0mm 미만	3.0mm 미만	
철근 콘크리트 라이닝	손상면적	0.1mm 미만	0.1mm 이상	0.3mm 이상	0.5mm 이상	0.7mm 이상
		0.3mm 미만	0.5mm 미만	0.7mm 미만		
철근 콘크리트 구조물 (개착 구조물)	손상두께	0.1mm 미만	0.1mm 이상	0.3mm 이상	0.5mm 이상	0.7mm 이상
		0.3mm 미만	0.5mm 미만	0.7mm 미만		

주) 진행성 균열의 경우 상태평가 결과가 “d” 이하 또는 고정 균열의 경우 면적을 20% 이상으로 “e” 이면 중대한 결함으로 본다.

(2) 누수

기본시설 누수 참조

(3) 파손 및 손상

표 5.23 파손 및 손상

평가기준		구 분				
		a	b	c	d	e
콘크리트 라이닝	손상도	없음	1/6 미만	1/6 이상 1/3 미만	1/3 이상 1/2 미만	1/2 이상
	손상면적	없음	아주 경미한 상태	경미한 손상 (10cm×10cm 미만)	중간 손상 (10cm×10cm 이상, 30cm×30cm 미만)	극심한 손상 (30cm×30cm 이상)
조적식 라이닝	손상두께	없음	벽돌부분 손상	벽돌 1개 이하	벽돌 1~2개	벽돌 2개 이상

주) 파손 및 손상에 대한 면적율이 20%이상으로 상태평가가 “d” 이하이면 중대한 결함으로 본다.

(4) 재질열화(박리, 층분리 및 박락, 백태, 재료분리, 철근노출, 탄산화, 염화물)

기본시설 재질열화 참조

5.1.3 상태평가 결과 산정방법

가. 기본시설 상태평가결과 산정

(1) 1단계 : 라이닝 결함지수(f) 산정

(가) 라이닝 단위길이별 평가항목에 대해 최저의 결함점수를 부여한다. 균열의 결함점수는 일반적으로 평균값으로 취하며 단차, 폭, 깊이 등을 고려하여 결정한다.

(나) 라이닝 단위길이별 결함지수를 구한다.

(다) 라이닝 전체에 대한 결함지수(f)를 구한다. 이때 라이닝 단위길이별 평가항목에 대한 결함점수를 산술평균하여 구한다.

(2) 2단계 : 라이닝 상태평가 결과 산정

(가) 라이닝 단위길이별 평가항목과 결함지수에 대한 평가를 5단계(a, b, c, d, e)로 매긴다.

(나) 라이닝 전체의 평가항목(산술평균값)과 결함지수(f)에 대한 평가를 5단계(a, b, c, d, e)로 매긴다.

(3) 3단계 : 터널 주변 상태 결함점수 산정

(가) 터널 주변 상태에 대한 배수, 지반, 갱문, 공동구 상태의 결함점수를 부여한다.

(나) 특수조건에 해당될 경우에는 추가점수를 부여한다. 터널 결함지수(F) 산정시 분모에 대한 영향은 고려하지 않는다.

(4) 제4단계 : 터널 상태평가 결과 산정

(가) 제1단계의 라이닝 결함지수(f) 산정시 사용한 평가항목별 결함점수 산술평균 값과 제3단계의 터널 주변상태 평가 결함점수를 합한다.

(나) 터널 결함지수(F)를 산정하고, 터널 상태평가 결과를 5단계(A, B, C, D, E)로 매긴다.

(다) 터널 상태평가 결과 산정

- A등급(우수) : 터널 결함지수(F) $0.00 \leq F < 0.15$
- B등급(양호) : 터널 결함지수(F) $0.15 \leq F < 0.30$
- C등급(보통) : 터널 결함지수(F) $0.30 \leq F < 0.55$
- D등급(미흡) : 터널 결함지수(F) $0.55 \leq F < 0.75$
- E등급(불량) : 터널 결함지수(F) $0.75 \leq F$

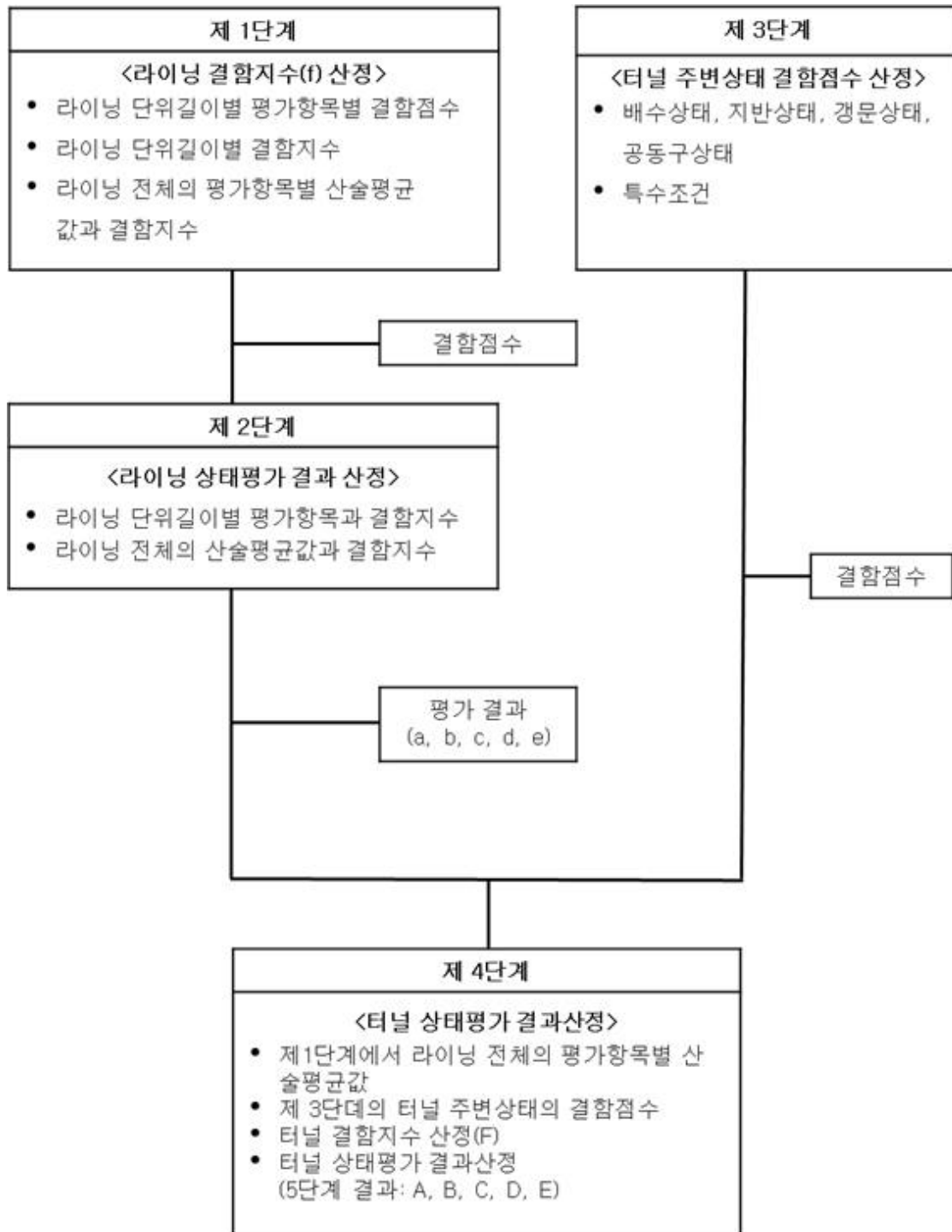


그림 5.2 상태평가 결과 산정절차

나. 부대시설 상태평가결과 산정

(1) 제1단계 : 부대시설 결합지수(f) 산정

(가) 부대시설 평가단위별 평가항목에 대해 최저의 결합점수를 부여한다. 균열의 결합점수는 일반적으로 평균값으로 취하며 단차, 폭, 깊이 등을 고려하여 결정한다.

(나) 부대시설 평가단위별 결합지수를 구한다

(다) 부대시설에 대한 결합지수(f)를 구한다. 이때에 부대시설 평가항목에 대한 결합점 수를 산술평균하여 구한다.

(2) 2단계 : 전체 부대시설 상태평가 결과 산정

(가) 부대시설별 평가항목과 결합지수에 대한 평가를 5단계(a, b, c, d, e)로 매긴다.

(나) 평가항목(산술평균값)과 결합지수(f)에 대한 평가를 5단계(a, b, c, d, e)로 매긴다.

(다) 개별 부대시설을 각각 평가한 후 산술평균하여 부대시설 결합지수를 산정하고 전체 부대시설 상태평가 결과를 5단계(A, B, C, D, E)로 매긴다.

$$\text{부대시설의 결합지수}(f) = \sum(f_n) / N \quad \text{<식 5.3>}$$

여기서, f_n : 개별 부대시설의 상태평가 결합지수

N : 개별 부대시설의 개수

(3) 3단계 : 전체 시설물 상태평가 결과 산정

(가) 기본시설 결합지수(F)에 부대시설 가중치(W)를 곱하여 전체 시설물의 결합지수 (F)를 산정하고, 시설물 상태평가 결과를 5단계(A, B, C, D, E)로 매긴다.

$$\text{시설물의 결합지수}(F) = \text{기본시설 결합지수}(F) \times \text{부대시설 가중치}(W) \quad \text{<식 5.4>}$$

표 5.24 부대시설의 가중치

가중치(W)	1.00	1.00	1.02	1.05	1.10
부대시설 결합지수	$0 \leq f < 0.15$	$0.15 \leq f < 0.30$	$0.30 \leq f < 0.55$	$0.55 \leq f < 0.75$	$0.75 \leq f$
시설물 상태평가	문제점이 없는 최상의 상태	기능수행에 영향이 없으나 일부 보수가 필요한 상태	부재의 손상이 있으나 기본시설 기능수행에 문제가 없는 상태	부재의 손상이 중대하여 기본시설에 영향을 주는 상태	기본시설의 기능수행에 문제를 일으켜 즉각적인 조치가 필요한 상태

다. 상태평가 결과 산정 예시

상태평가의 근거자료 확인을 위해 결합점수가 부여된 결합물량 집계표는 외관망도 또는 부록에 수록하여야 한다.

무근 콘크리트 라이닝의 터널 상태평가 결과 산정(예)는 단계별로 구분하여 예시하였다.

(1) 제1단계 : 라이닝 결합지수 산정

표 5.25 라이닝 결합지수 산정

SPAN No.	균열	파손 및 손상	누수	재질열화			결합점수 합계	라이닝 결합지수
				박리	충분리 및 박락	백태		
1	7	1	3	1	2	1	15	0.58
2	4	1	4	1	1	1	12	0.46
3	4	1	2	1	1	0	9	0.37
4	7	1	5	1	1	1	16	0.61
5	4	0	1	1	2	0	8	0.31
산술평균	5.2	0.8	3.0	1.0	1.4	0.6	12.0	0.46

- ① "SPAN No 1"의 평가항목에 대한 최저등급의 결합점수를(균열 c-7, 파손 및 손상c-1, 누수 c-3, 박리 d-1, 충분리 및 박락 d-2, 백태 e-1) 부여한다. 라이닝의 결합점수 15점을 구한다.
- ② "SPAN No 1"의 라이닝의 결합지수를 구한다. 이때에 무근콘크리트 라이닝 결합지수(Σ 결합지수(15점)/26=0.58)를 구한다.
- ③ 상기 1) 2)와 같은 방법으로 나머지 SPAN에 대하여 구한다. 라이닝 5개 SPAN의평가항목에 대한 산술평균값을 구한후 라이닝 결합지수를 구한다.
 - 평가항목 결합점수 : 균열 5.2, 파손 및 손상 0.8, 누수 3.0, 박리 1.0, 충분리 및박락 1.4, 백태 0.6, 결합점수 합계 12점
 - 라이닝 결합지수(f) : $0.46(12/26=0.46)$

(2) 제2단계 : 라이닝 상태평가 결과 산정

표 5.26 라이닝 상태평가 결과 산정

SPAN No.	균열	손상	누수	재 질 열 화			라이닝 등급
				박리	박락	백태	
1	c	c	c	d	d	e	d
2	b	c	d	e	c	e	c
3	b	c	b	d	c	b	c
4	c	c	e	d	c	e	d
5	b	b	a	b	d	b	c
산술평균	b	c	c	d	c	e	c

- ① 라이닝 스팬별 평가항목과 결합지수에 대한 등급을 5단계(소문자 a, b, c, d, e)로 매긴다.
- ② 라이닝 5개 스팬의 평가항목에 대한 산술평균값과 결합지수에 대한 등급을 5단계(소문자 a, b, c, d, e)로 매긴다.

(3) 제3단계 : 터널 주변상태 결함점수 산정

표 5.27 터널 주변상태 결함점수 산정

항목	배수상태	지반상태	갱문상태	특수조건	합계
결함점수	1	2	1	1	5

- ① 배수상태가 오염되었으므로 1점, 지반상태는 풍화변질 및 단층파쇄대가 영향범위 내에 위치하였으므로 2점, 갱문상태는 손상되어 있으므로 1점을 부여한다.
- ② 특수조건은 전차선을 설치한 터널에서 낙수 및 동결위험이 있으므로 1점을 부여 한다.

(4) 제4단계 : 터널 상태평가 결과 산정

표 5.28 터널 상태평가 결과 산정

항목	라이닝						터널주변				합계
	균열	손상	누수	재질열화			배수상태	지반상태	갱문상태	특수조건	
				박리	박락	백태					
결함점수	5.2	0.8	3.0	1.0	1.4	0.6	1	2	1	1	17.0

결함지수	0.53
터널 상태평가 결과	C

- ① 제1단계의 라이닝 결함지수 산정시 사용한 평가항목별 결함점수 산술평균값과(결 함점수 : 균열 5.2, 파손 및 손상 0.8, 누수 3.0, 박리 1.0점, 백태 0.6점, 합계12점), 터널주변 상태평가 결함점수(결함점수 : 1+2+1+1=5점)을 합하여 17점을 구한다.
- ② 터널 결함지수(결함지수(F) : \sum 결함점수(17점)/32=0.53)를 구한후 결함지수에 대한 5단계(A, B, C, D, E)등급 중 해당등급(C급)을 매긴다.

5.2 안전성평가 기준 및 방법(안)13)

5.2.1 일반

가. 일반

터널의 안전성 평가는 외관조사 및 비파괴 현장시험에 의한 터널 부재별 상태평가를 분석하고, 필요시 지형 및 지질조사, 지반탐사(GPR 등), 누수탐사, 각종 계측 등의 실시결과를 고려하여 이론적 계산과 해석적 검증을 통하여 터널에 대한 안전성을 평가한다.

13) 국토교통부(한국시설안전공단, 2017) “안전점검 및 정밀안전진단 세부지침” 내용 참고

나. 안전성 평가를 위한 과업

시설물의 안전성 평가의 목적은 시설물이 제 기능 및 역할을 유지할 수 있는 구조적 및 운영상의 안전성 확보 여부를 평가하는데 있으므로 현장조사부터 시설물의 현황과 상태 및 특성을 충분히 파악하여 제반 문제점을 도출하고 기초자료 분석 및 구조 검토·해석 등에 의해 문제점에 대한 원인을 규명함과 더불어 안전성 여부를 판단하여야 한다.

안전성 평가를 위하여 기본과업 이외의 필요한 계측, 측정, 조사 및 시험 등의 선택과업을 시설물 종류 및 구조적 특성에 따라 책임기술자는 관리주체와 협의하여야 하며, 이를 위해서는 설계자료 검토, 시공방법과 사용재료의 검토, 기록을 통한 운영이력의 분석, 부재별 상태평가 결과 및 각종 계측·측정·조사·시험 등을 통하여 충분한 기초자료를 확보하는 것이 중요하며, 안전성 평가 시 검토할 사항은 다음과 같다.

- ① 비파괴 시험결과 분석
- ② 지질조사 등의 결과 분석
- ③ 시설물의 변형/변위 및 거동 등의 측정결과 분석
- ④ 구조물의 구조검토·해석결과 분석
- ⑤ 기타 안전성평가를 위하여 필요한 사항

다. 안전성 평가 방법

터널의 안전성 평가 방법은 일반적으로 주변지반의 응력상태를 고려한 해석적 방법에 의해 이루어진다.

해석적 방법에 의해 구조물의 안전성을 평가하는 경우 현장조사 및 수집자료에 의해 얻어진 구조물의 치수, 시공상세도, 재료의 성질 및 구조물의 결함, 주변 지반조건 등을 종합하여 실제 상태에 대한 해석을 통해 올바른 평가를 기대할 수 있으므로 관련 설계 및 안전에 관한 제반기준을 적용하고 공인된 신뢰도가 있는 해석방법에 의해 평가되어야 한다.

구조물의 해석 시 안전 여유율이 고려되어 있으므로 현재상태의 구조물에 대한 구조해석 결과가 “콘크리트시방서”의 안전도 기준에 미흡하다고 해서 구조물이 불안전하다는 것이 아니라 단지, 구조물의 안전 여유율이 적다는 것을 의미한다.

따라서 구조해석에 의한 구조물의 안전성 평가는 현재상태의 구조물이 얼마나 안전 여유율을 확보하고 있는지의 정도를 평가하는 것이 합리적이라 할 수 있다.

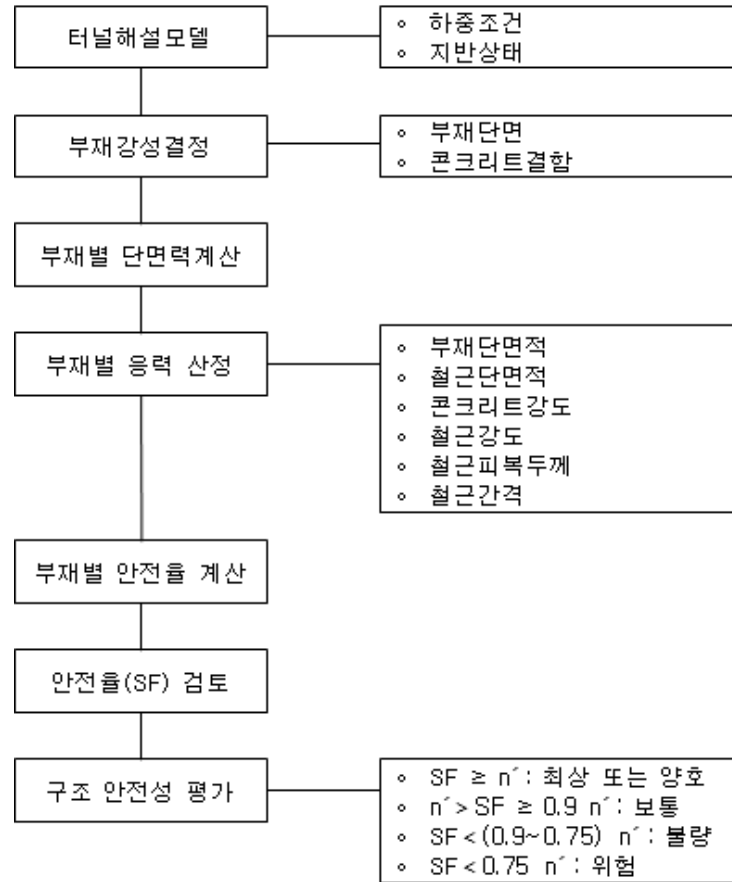


그림 5.3 안전성 평가 결과 산정 방법

즉, 구조해석 결과 안전 여유율이 등가 안전율(n') 이상인 경우는 안전성이 충분히 확보된 구조물로 평가하고 등가 안전율 미만이나 안전 여유율이 등가 안전율의 약 75% 이상일 때는 안전성은 있지만 충분치 못한 상태로서 구조물의 상태를 주기적으로 점검 및 과대하중 재하억제 등의 관리가 필요한 상태로 평가하며, 안전 여유율이 등가 안전율의 약 75% 미만인 경우에는 사용제한 여부의 판단이 요구되거나 사용금지를 요하는 안전성이 결여된 구조물이라고 평가할 수 있다.

구조물의 안전성평가 방법을 그림으로 도시하여 표현하면 그림 5.3과 같다.

5.2.2 안전성 평가 기준

정밀점검(필요시)이나 정밀안전진단 시에는 안전성 평가 결과를 산정한다.

정밀점검의 경우에는 라이닝 상태평가 시 터널 안전성에 직접 관련된 주요 구조 부재의 손상항목이 D급 이하로 판정되거나 혹은 전문가에 의해 안전성 평가 요구가 있을경우 원인

분석을 위한 구조검토 결과에 따라 안전성 평가 결과를 산정한다.

터널은 대부분 지표면 아래에 축조되는 구조물로서 지하수의 부력, 지반의 부등침하 및 누수에 의한 지반함몰 등의 영향을 받는다.

따라서 터널의 설계·준공도서 및 기존의 안전점검 또는 정밀안전진단 보고서 등을 검토하여 구조물의 안전성을 판단하거나 실제 주요부재의 상태평가 결과가 불량하게 나타나 현장 조사 시 문제점이 발생한 부위를 대상으로 안전율(safety factor, SF) 검토를 수행하여 구조물의 안전성을 판단하는 것이 필요하다.

국내에서의 구조물 안전성 평가는 평가대상 항목의 안전율을 이용하여 수행하고 있으며, 안전율 검토는 허용응력설계법(부재의 발생응력과 허용응력의 비)이나 강도설계법(부재의 소요강도와 설계강도의 비)에 따라 구조물의 각 부재에 작용하는 외력에 의한 응력을 산정하여 이루어지고 있다.

일반적으로 터널은 지반과의 상호작용을 바탕으로 구조적 거동이 이루어지므로 구조해석에 필요한 경계조건, 지반상수 등은 설계·준공도서 또는 지반조사에 의해 얻거나 구조물의 설계기준 등에 나와 있는 값을 참고로 하여 구한다.

상기와 같은 내용을 근간으로 검토한 휨, 전단, 압축 등의 구조적 최저 안전율 정도에 따라 구조물의 안전성에 대한 평가기준을 설정하면 다음 표 5.29와 같다.

표 5.29 시설물의 안전성 평가 기준

기준	내 용
A	안전율(SF)이 1.0 이상이고 주부재에 손상이 없는 경우
B	안전율(SF)이 1.0 이상이고 주부재에 손상(단면손실)이 있는 경우
C	안전율(SF)이 1.0 미만~0.9이상
D	안전율(SF)이 0.9 미만~0.75이상
E	안전율(SF)이 0.75 미만

안전성 평가 결과의 산정은 가급적 상태평가 기준과 균형을 맞추도록 등급 분류체계를 구성하여 설계가 적절하게 된 신설 터널에서 B등급이 나오는 모순을 없애기 위하여 안전하게 설계된 경우는 A등급으로 평가되도록 하였다.

보수·보강 혹은 사용제한 등 검토가 필요한 D, E등급 안전율 개념을 이용하였다.

5.2.3 안전성 평가 결과 산정 방법

가. 기본시설 상태평가 항목 및 기준

(1) 개착 터널(cut and cover : BOX, 지하차도), Shield 터널

구조물의 해석방법에는 강도설계법과 허용응력설계법이 있으며 이 중 강도설계법을 원칙으로 하지만 특별한 경우에는 허용응력설계법을 적용할 수 있다.

강도설계법에서는 구조물의 안전여유를 두 가지 측면에서 고려하는데 하나는 하중의 변경, 구조해석 시의 가정과 계산을 간단하게 함으로써 야기될지 모르는 초과하중의 영향을 고려한 하중계수이며, 다른 하나는 설계계산상의 불확실성, 부재의 다양한 형식에 대한 상대적 중요도, 재료의 설계강도 및 실제 단면치수와 제작 시공기술 등에 관련된 다소의 불리한 오차들이 개별적으로는 허용한계에 있더라도 총체적으로 결합 시 부재의 강도감소를 초래할 가능성에 대비한 강도감소계수이다.

이러한 하중계수와 강도감소계수에 의한 설계상의 구조물 안전 여유율을 증가 안전율이라 하며 <식 5.5>로 표현된다. 이의 값은 활하중/고정하중의 비(L/D)와 휨부재 혹은 전단부재의 여부에 따라 차이를 갖는데 휨응력에 대해서는 약 1.5~2.0이고, 전단응력에 대해서는 1.7~2.5정도의 값을 갖는다.

$$n' = \frac{\gamma_D + \gamma_L L/D}{\Phi(1 + L/D)} \quad \text{<식 5.5>}$$

여기서, n' : 증가 안전율

γ_D : 고정하중계수

γ_L : 활하중계수

L/D : 활하중과 고정하중의 비

Φ : 강도감소계수

일반적으로 설계개념의 안전율을 도입하는 개착 터널(cut and cover), Shield 터널 등은 안전율 산정이 가능하므로 표 5.29와 같은 방법으로 안전성 평가 결과를 산정한다.

- ① 안전성 평가는 일반적으로 수치해석을 통한 부재의 응력 크기로 평가
- ② 안전율 SF=1 이상인 경우 : A 등급으로 표현
- ③ 안전율 SF=1 이상이거나 같은 경우로서 손상이 있는 경우 : B 등급으로 표현
- ④ 안전율 SF=1보다 작은 경우 : C, D, E 등급으로 표현

- C급 : $0.90 \leq SF < 1.0$
- D급 : $0.75 \leq SF < 0.90$
- E급 : $SF < 0.75$

여기서, 강도설계법 안전율 : $SF = \frac{\text{설계강도}}{\text{소요강도}} = \frac{\Phi M_n}{M_u}$

허용응력설계법 안전율 : $SF = \frac{\text{허용응력}}{\text{발생응력}} = \frac{f_a}{f_a + f_l}$

(2) 굴착 터널(Mined Tunnel : 채래식, NATM 터널)

굴착 터널에 대한 안전성 평가는 설계개념의 안전율을 도입했을 경우에는 안전율 산정이 가능하므로 표 5.29와 같은 방법으로 안전성 평가 결과를 산정한다. 그러나 설계개념의 안전율을 도입하지 않은 경우에는 터널 상태평가 시 지반상태와 라이닝변상 등을 기 반영하였고, 안전성 평가를 정량화하여 A, B, C, D, E 등급으로 분류하기가 곤란하므로 안전, 불안전 여부만을 평가할 수 있다.

일반적으로 터널은 지반조건이 서로 다르기 때문에 대표단면 선정의 타당성, 지반 정수의 정확성, 단층 및 절리 등의 불연속면 특성의 포함 여부, 해석방법 등에 따라 안전성 평가 결과가 좌우된다. 산악터널과 도심지 터널의 주변 지반조사의 어려움으로 인해 지반 정수의 가정을 통한 터널해석에는 많은 오차를 포함하고 있으며, 설계개념의 안전율을 도입하지 않은 경우 터널해석은 각종 변상과 변위에 따라 수치해석 및 역해석을 실시하여 보수·보강 범위를 산정하고 있으므로 안전성 평가를 정량화하여 A, B, C, D, E 등급으로 분류하기가 곤란하여 반영하지 않고 안전, 불안전 여부만을 평가할 수 있다.

다만, 터널의 수치해석에 의한 안전성 평가 시에는 수치해석에 필요한 지반 정수가 지반 조사에 의하여 획득될 경우, 터널의 라이닝에 작용하는 하중조건과 터널 라이닝의 변상상태를 역해석적 방법이나 일반적인 라이닝 구조해석 방법으로 터널의 안전성을 제시할 수 있다.

이런 경우 콘크리트 라이닝의 강도특성과 지반특성을 수치해석에 반영하여 터널 라이닝의 설계기준강도와 대비하여 안전율을 판단하여 안전성 여부를 평가하는데 참고자료로 활용한다.

나. 안전성평가 결과 산정 방법

(1) 안정율을 도입한 경우의 방법

개착 터널(cut and cover)과 굴착 터널(Mined Tunnel)중 설계 당시 안전율을 도입한 경우에는 안전성 평가 결과 산정 방법을 표 5.30 및 표 5.31과 같이 예시하였다.

표 5.30 터널의 안전성 평가 결과 산정(개착터널) 예

시설물 안전성 평가 결과 산정표			
시설물명	○○○ 터널		표번호 TS. NO.3
부재구분	안전율(SF)	평가결과	비 고
상부슬래브(횡방향) 휨모멘트	1.08	a	
상부슬래브(종방향) 휨모멘트	0.92	c	
상부슬래브 전단력	1.03	b	손상(단면감소)발생
⋮			
안전성평가 결과	최저 안전성평가 결과 = C		

표 5.31 터널의 안전성 평가 결과 산정(ASSM 터널)예

시설물 안전성 평가 결과 산정표			
시설물명	○○○ 터널		표번호 TS. NO.4
부재구분	안전율(SF)	평가결과	비 고
콘크리트라이닝 전단응력	2.5	a	
콘크리트라이닝 압축응력	1.8	a	
⋮			
안전성평가 결과	최저 안전성평가 결과 = A		

(2) 안전율을 도입하지 않을 경우의 방법

안전율을 도입하지 않은 경우 수치해석에 의한 안전성 평가 방법은 표 5.32와 같다.

표 5.32 시설물 안전성 평가 결과 산정표(안전율을 도입하지 않은 경우)

시설물 안전성 평가 결과 산정표			
시설물명	○○○ 터널	표번호	TS. NO.5
부재구분	변위 또는 응력	안전성 여부 (안전, 불안전)	비 고
• 변위발생경향	(단위 : mm)		정성적표현
- 천단변위	0.78	안전	
- 내공변위	2.89	안전	
• 응력발생경향	(단위 : kgf/cm ²)		정성적표현
- 횡압축응력	12kgf/cm ²	안전	
- 전단응력	5.19kgf/cm ²	안전	
안전성 평가 결과	○ 안전성 평가결과 : 안전 ※ 일반터널(Mined Tunnel)에서 안전성평가를 정량적으로 표시할 수 없는 경우는 정성적으로 표시함.		

5.3 터널 콘크리트 내화품질 관리방안(안)

가. 목적

최근 고속도로의 도심지 통과 및 기존 고속도로 개량 등으로 지하고속도로 시공 및 설치 사례가 증가하는 추세이며, 특히 전체적인 통과 차량의 증가뿐만 아니라 가연물 등의 위험물을 적재한 대형차량의 통행량이 급증하고 있다. 이러한 터널 구조물에서 화재가 발생할 경우, 구조물의 손상과 함께 인명에 심각한 영향을 주게 된다. 일반적으로 화재가 발생할 경우, 온도의 상승, 복사열, 저산소, 시계의 감소 그리고 많은 유해가스의 생성 등을 유발하게 되며 모든 이러한 물리적 현상은 인체나 구조물, 기타 제연장비 및 차량들에게 치명적인 손상을 가하게 된다.

터널 구조물에 있어 내화 기능은 매우 중요한 문제이다. 제대로 대처하지 못할 경우, 터널 내 화재는 터널 이용자의 생명을 위협하고 경제적 손실을 초래할 수 있다. 터널구조의 내화

성능을 고려할 때 해결해야 할 많은 문제들은 다음과 같다.

- 화재발생 시 차량에 탑승한 사람들은 콘크리트가 폭발(폭렬)하거나 터널이 부분적으로 붕괴되는 등의 상황에서 안전한 장소로 탈출해야 한다.
- 화재 발생 시 비상조명, 연기추출 시스템 등의 서비스 기능을 극한의 온도에서도 유지할 수 있어야 한다.
- 중요한 것은 터널을 사용하지 못하게 됨으로써 발생하는 사회적, 경제적 피해가 예상된다는 것이다. 이러한 경제적 비용은 구조물의 보수나 재시공에만 관련된 것이 아니라, 대개는 지역사회에 가장 큰 비용을 초래하는 사업상 손실의 연쇄적인 영향을 가져온다.
- 터널 화재는 매우 다양할 수 있지만, UPTUN 프로젝트와 관련하여 수행된 Runehamer 터널 대규모 화재시험을 비롯한 여러 연구에서는 운반하는 물품의 종류에 관계없이 화재가 발생할 경우 온도가 1,350℃까지 상승하고, 열유속이 최대 300kW/m²에 이를 수 있다고 보고하고 있다.
- 대형수송차(heavy goods vehicle, HGV)의 점화 시, 화재부하가 크고 강도가 높으며, 일반적으로 교통량이 증가하고 연료부하가 여전히 높은 위험물질 수송이 증가함에 따라 화재와 관련된 사고의 위험성이 증가하고 있다.

나. 터널의 한계온도¹⁴⁾

도로터널 내화지침(국토교통부, 2021)에서는 콘크리트 및 철근에 대한 한계온도를 제시하고 있다.

14) 국토교통부(2021), “도로터널 내화지침” 및 심재원 등(2018) “차량화재에 대한 터널·교량의 내화방안 및 내폭 특성 연구” 내용 참고

제 4조(한계온도 일반사항)

- ① 도로터널의 한계온도 설정은 터널화재 시에 도로 이용자가 스스로 피난, 대피 등을 하거나 도로관리청 및 경찰, 소방청 등 유관기관이 소화 및 구조 활동을 원활히 수행할 수 있도록 대응시간을 확보하고, 화재로 인한 손상을 최소화하여 터널을 보호하는 것을 목적으로 한다.
- ② 터널 화재 시 터널부재의 최대온도를 한계온도 이내로 유지하여 각 부재의 성능을 유지할 수 있도록 한다.

제5조(한계온도)

- ① 콘크리트 부재는 표면을 기준으로 한계온도인 380℃ 이내로 보호해야 한다. 이 경우 내화처리된 콘크리트 부재는 내화처리를 위해 증가된 두께(내화 보드 및 뿔철, 콘크리트 피복 등을 포함한다)를 제외한 콘크리트면이 온도기준면이다.
- ② 내화가 필요한 프리캐스트 세그먼트 콘크리트 부재는 표면을 기준으로 한계온도인 250℃ 이내로 보호해야 한다. 이 경우 내화처리된 세그먼트 부재는 온도기준면을 제1항과 동일하게 적용한다.
- ③ 철근은 한계온도인 250℃ 이내로 보호해야 한다.
- ④ 기타재료의 한계온도는 터널조건 및 사용재료 등을 종합적으로 고려하여 발주기관에서 정할 수 있다.

또한 고속도로 터널 내화설계 및 시공지침(안)(한국도로공사, 2009)에서는 터널의 한계온도 및 내화설계기준을 제시하고 있다.

- (1) 콘크리트 구조체(측벽, 천정, 칸막이, 현장타설 콘크리트 등)는 모든 부위에서 최대 380℃ 이내로 보호되어야 한다.
- (2) 프리캐스트 콘크리트 부재(고강도 콘크리트 세그먼트를 포함한 프리캐스트 세그먼트 등)는 최대 250℃ 이내로 보호되어야 한다.
- (3) 콘크리트 천정부위는 최대 380℃ 이내로 하고, 최소 2시간 동안 붕괴되지 않도록 보호하여야 한다.
- (4) 점토질 조적식 구조가 터널에 적용될 경우에는 화재로 인한 피해가 크지 않으므로 내화대책이 필요하지 않다.
- (5) 세그먼트 강재 라이너와 세그먼트 주철 라이너는 모든 부위에서 최대 550℃ 이내로 보호되어야 한다.
- (6) 세그먼트 라이너의 연결부분은 최대 200℃ 이내로 유지되어야 한다.
- (7) 터널의 세라믹 타일 마감재는 최대온도 200℃ 이내로 보호되어야 하며, 폭발성 폭발에 주의하여야 한다 (신설 터널에서의 세라믹 타일마감은 지양할 것을 권고함). ※ 유럽의 기준에서는 세라믹 타일마감을 금지하고 있으나, 실험결과 타일 자체의 폭발문제는 적었고 타일파열로 인한 실제 인명피해 문제는 확인이 필요함 (가능한 의견 필요)
- (8) 강재 구조요소, 주철 구조요소, 천정부 앵커 등은 모든 부위에서 최대 550℃ 이내로 유지되어야 한다.
- (9) 스테인리스강 구조재 및 천정부 앵커는 모든 부위에서 최대 800℃ 이내로 유지되어야 한다.
- (10) 앵커 정착구(부위) 설계시 앵커정착(접착 및 고정)은 최소안전율 3.5 이상을 확보하여 설계되어야 한다.
- (11) 에폭시 수지앵커는 가열면으로부터 6cm 깊이까지 200℃ 이내로 보호되어야 한다(프랑스의 경우 300℃ 이상의 조건에서는 에폭시 앵커의 사용을 금지함). 또한 에폭시 앵커가 설치되는 콘크리트 표면 혹은 자재로부터 6cm 이상의 접착면을 갖도록 설계되어야 한다.
- (12) 납 성분이 포함된 앵커, 황동, 아연 등과 같이 용융점이 낮은 재질의 앵커 등은 비상장비 지지구조물(댐퍼, 송풍기 등)의 접합과 같은 구조적 접합에는 사용을 금한다.
- (13) 모든 내화재는 수분으로 인하여 접착력과 내하력이 저하되지 않도록 해야 한다.
- (14) 터널 구조재료 또는 터널 내장재들은 연소 시 독성이 없어야 하고 난연성 또는 불연성이어야 한다.
- (15) 설치되는 모든 비상용 장비는 관련규정 및 법규에 부합하여야 한다.
- (16) 비상구/대피소의 통로에서는 최대 온도가 40℃를 초과하지 않도록 설계하여야 한다.

다. 터널의 내화공법¹⁵⁾

터널 화재발생 시 터널의 손상방지를 위한 내화공법은 ① 부재 자체내화(섬유혼입콘크리트 등), ② 내화뿔칠(또는 도료), ③ 내화보드(또는 패널), ④ 그 밖에 화재로 인한 터널의 손상을 방지하기 위한 공법 으로 분류한다.

라. 성능기준 및 시험법¹⁶⁾

각 내화공법별 내화재는 내화시험시간 동안 한계온도 이내로 보호해야 하며, 도로터널 내화지침(국토교통부, 2021)의 터널 내화시험을 통해 확인한다.

표면에 부착하는 내화재와 콘크리트 부재와의 부착강도는 KCS 41 48 01의 기준값 이상을 확보해야 하며, 부착강도는 KS F 2762의 시험을 통해 확인한다.

내화재는 터널 화재로 인한 유해가스, 타일 비산 등 부차적 피해를 최소화해야 하며, 가스 유해성은 KS F 2271의 시험으로 확인한다.

연중 온도의 편차가 크거나 강우, 강설에 의한 대기변화가 심한 외기 노출형 터널에 내화재를 설치하는 경우에는 기후저항성능이 확보된 자재를 사용해야 하며, 기후저항성능은 KS F 2456의 시험으로 확인한다. 다만, 상기 시험법으로 시험이 곤란한 경우 내화재의 특성을 고려하여 발주기관이 정한 방법에 따라 확인한다.

그 밖에 성능은 내화공법의 유형 및 내화재의 특성을 고려하여 발주기관이 정한 방법에 따라 확인한다.

마. 시공 절차¹⁷⁾

부재 자체내화(섬유혼입콘크리트 등)의 경우, 폭발방지 및 내화성능 확보를 위해 결정된 적정 혼입량을 사용해야 하며, 섬유 사용에 따른 물성변화가 없어야 한다.

내화뿔칠(또는 도료) 방식의 경우, 뿔칠의 반발량을 적게 하고, 호스의 막힘이 없도록 해야 하며, 두께불량 및 결손 등이 발생하지 않아야 한다.

내화보드(또는 패널) 방식의 경우, 보드 간 이음새와 앵커 등 고정 장치는 화재 발생 시 열침투가 최소화되어야 한다.

표면에 부착하는 내화재는 부착 전 부재의 먼처리 및 세척 등을 실시하여 공용 중에 낙하지 않도록 부착되어야 한다.

15) 16) 17) 국토교통부(2021), “도로터널 내화지침” 내용 참고

터널의 누수, 수분비산 및 물청소 등의 영향으로 내화재의 성능저하가 우려될 경우에는 별도의 발수(發水) 또는 차수(遮水) 성능을 확보해야 한다.

그 밖에 내화방식의 경우에는 내화성능을 확보할 수 있도록 시공성을 확인한 후에 시공해야 한다.

바. 점검¹⁸⁾

점검의 종류는 자료조사와 환경조사를 기본적으로 시행하되, 정기점검과 정밀점검, 긴급점검, 정밀안전진단으로 나뉘는 현장조사 시에는 다음과 같은 항목들을 중심으로 조사를 실시한다.

(1) 정기점검

정기점검은 경험과 기술을 갖춘 자에 의한 세심한 육안검사 수준의 점검으로서 간단한 점검기수(손전등, 망치 등)에 의하여 터널에 발생한 결함과 기능적 상태를 판단하고 시설물이 현재의 사용요건을 계속 만족시키고 있는지 확인하기 위하여 실시하는 관찰로 이루어지는 순찰과 유사한 성격의 점검을 가리킨다.

(가) 정기점검시 점검자는 시설물의 전반적인 외관형태를 관찰하여 심각한 손상·결함의 가능성을 발견할 수 있도록 세심한 주의를 기울여야 하며, 이상이 발견되는 경우 즉시 보고하여야 한다. 육안조사시에는 시설물의 상태를 주로 육안에 의해 판단하고 터널의 안정상태를 평가하는 것으로서 육안검사시의 유의점은 다음과 같다.

- ① 라이닝의 각 부위에 박락의 흔적이 보이지는 않는지? 혹은 바닥면에 라이닝 콘크리트 조각이 떨어져 있지는 않는가?
- ② 이제까지 보이지 않았던 균열이나 다량의 누수가 생기지는 않았는가?
- ③ 라이닝의 열화정도는 어떠한가?(가는 균열이 망상으로 펼쳐져 있다. 혹은 다른 부분과 비교하여 변색하고 있다. 또는 다공질 형태로 표면이 부술부술 하게 보인다. 백색의 생성물이 표면에 나타나 있다. 등의 경우는 라이닝이 상당히 열화하고 있다고 판단해도 좋다.)
- ④ 아치부에 균열 혹은 줄눈에 따라 큰 어긋남이 생기고 있지는 않는가?(단차가 생기고 있는 경우는 지압대책도 겸해 검토할 필요가 있다.)
- ⑤ 아치부에 들뜸현상이 보이지 않는가?(일반적으로 압좌, 전단균열이 있으면 균열에 걸쳐 들뜸현상이 발생하고 박락되기 쉽다.)
- ⑥ 보수·보강된 부위의 재료는 안정한가?(누수대책용으로 시공된 모르타의 정착, 보

18) 건설교통부(2001), “터널유지관리 매뉴얼” 내용 참고

강판 Net의 Anchor, 보강 Saddle의 썬기 등)

(나) 간단한 기구를 이용한 정기점검은 일반적으로 점검기구로 시설물에 타격을 가했을 때의 반발정도나 소리, 반응형태 등으로 시설물의 안전상태를 평가하는 것으로서 그 유의점은 다음과 같다.

- ① 점검망치에 의한 타격시 청음을 내면 라이닝재료는 건전하다고 판단할 수 있고, 둔탁한 음이나 공명이 나타나는 경우는 라이닝이 열화하고 있거나 배면에 공극이 있을 가능성이 높다.
- ② 점검망치타격에 의한 반발이 좋을 경우 라이닝 재료는 건전하다 판단할 수 있다.
- ③ 점검망치 타격시 망치가 라이닝 표면에 박히거나 표면에 균열이 발생하거나 벽돌이 흔들거리는 경우는 라이닝이나 줄눈재가 열화되었다고 판단할 수 있다.
- ④ 라이닝 재료의 박락 등 낙하 가능성이 있는 곳은 두드려 떨어뜨릴 것(사고예방). 정기점검을 실시하는 경우의 구체적인 점검항목과 활용장비는 아래표와 같은데 특히, 육안조사 시에 점검자는 시설물의 양호 및 불량한 상태를 쉽게 판정할 수 있는 기준을 숙지하고 있어야 하고, 이러한 판정기준을 기호나 적정한 용어를 사용한 문장으로 표기, 서술할 수 있어야 한다.

표 5.33 정기점검시의 점검항목 및 장비

점검부위	점검항목	점검장비
입·출구부	- 균열 - 누수 - 백태 - 박리·박락·함몰 - 철근부식 여부(표면 노출) - 부등침하	- 망원경 - 카메라 - 필기도구 - 줄자 - 망치 - 손전등
측벽부(좌우)	- 균열 - 누수 - 백태 - 박리·박락·함몰 - 철근부식 여부(표면 노출)	- 망원경 - 카메라 - 필기도구 - 줄자 - 망치 - 손전등
천정부	- 균열 - 누수 - 백태 - 박리·박락·함몰 - 철근부식 여부(표면 노출) - 조명상태	- 망원경 - 카메라 - 필기도구 - 줄자 - 망치 - 손전등
바닥부	- 배수시설, 배수상태 - 노면상태(침하, 융기 등)	- 카메라 - 필기도구

(다) 정기점검은 다시 계측조사와 육안조사 및 기술적 유추에 의한 조사 등으로 세분할 수 있으며 그 내용은 표 5.34에 나타낸 바와 같다.

표 5.34 정기점검의 구분

종류	방법	비고
계측조사	기존 계측기가 설치된 지점에 대한 계측기를 가지고 양호, 불량상태를 파악한다.	
육안조사	육안관찰에 의해서 양호, 불량을 판정한다.	
기술적 유추에 의한 조사	육안 판단이 어려운 부분에 대해 기존의 경험 등을 바탕으로 양호, 불량 등을 판정한다.	

(라) 일반적으로 토목구조물은 계측조사의 결과에 대해 양호, 불량을 단독으로 판정하는 값은 정해져 있어도 전체적인 판정을 위한 절대적 기준치는 없지만 반면, 결과에 대한 어떠한 경향이나 원인을 추정하는 대표적인 사례는 있다. 이는 터널의란 구조물의 기능을 양호, 불량한 상태라 함은 한 가지 요소로 판정되는 것이 아니라 재질, 구조, 환경이란 측면에서 종합적인 판단과 분석이 필요하고, 각기 개별성이 강하여 일률적이니 기준치를 적용하기 어렵기 때문이다. 따라서 계측조사는 육안으로 하되 기존의 계측장치가 설치되어 있을 때는 그 계측장치를 활용하며, 계측된 측정치가 표준치를 상회함에도 불구하고 결함이 있다고 인정되는 경우가 있으므로 잠재적 결함을 파악할 수 있도록 지속적인 관찰을 필요로 한다.

(마) 육안조사는 실제로 경험이 풍부한 기술자의 지식과 경험을 토대로 시각, 청각을 사용하여 시설물의 양호, 불량상태를 판정하는 것이다. 그러나 이러한 판정은 점검자의 주관적인 견해로 인한 개인차가 커서 조사할 때마다 점검자의 심리적 상태의 영향을 받기 쉽다.

(바) 기술적 유추에 의한 조사 또한 점검자의 경험적인 측면의 요소가 판정에 중요하게 작용하므로 개인의 능력 차에 의한 오차를 줄이기 위해서는 직접적인 검사를 통한 조사양식을 만들고, 이 양식에는 다른 유사한 실례를 참고로 하여 그상태를 유추할 수 있도록 내용이 수록되어야 한다. 특히 조사대상 시설물의 내하성, 내구력에 영향을 미칠 우려가 있는 결함상태를 중심으로 먼저 조사가 시행되어야 한다.

(사) 일반적으로 정기점검의 육안조사는 가장 손쉽게 수행할 수 있는 조사방법으로서, 시설물의 결함을 찾아낼 수 있는 일차적인 조사에 해당된다. 그러나 다른 조사방법에

비해 정밀도가 낮으므로 정밀진단 단계에서의 육안조사시에 실시되는 측정장비에 의한 정밀한 측정과는 달리 균열, 백태, 변형 등을 포함한 단순항목에 대한 조사 위주로 진행된다. 즉, 터널의 입·출구부에서는 누수량, 수질, 수온 등을 조사하게 되고 터널 본체에서는 바닥면 상태 및 주행성, 조명·환기 등의 부속시설의 상태 및 안전성을 조사하게 된다. 이 밖에도 사용성에 간접적인 영향을 미치는 청결상태, 퇴적물 적재상태 등의 조사와 터널내 환기 및 조명상태 및 부속시설의 안전상태와 기존 보수부위에 대해 세밀한 조사를 실시하여야 한다.

- (아) 육안조사는 정도가 떨어지고 주관적인 경향이 강한 조사이므로 반드시 반복조사를 원칙으로 하되 의심나는 곳은 표기해 두었다가 추후 세밀하게 다시 조사하도록 하는 것이 좋다. 특히 육안조사시에는 앞에서 열거한 바와 같이 사전에 지반조사 설계 및 시공관련 자료들과 전문적인 조사항목들을 숙지하고 이들 항목을 중심으로 한 조사가 이루어지도록 해야 한다. 또 측벽부는 보행으로, 천정부는 작업시간을 별도로 확보하여 작업대를 설치하고 그 위에서 시행한다. 조사방법은 손전등을 이용하여 육안 및 해머 등을 사용한 타격검사로 수행한다. 조사과정은 라이닝부와 바닥부, 부속시설, 터널 주변환경 등으로 나누어 시행하고, 조사항목은 라이닝에 대해서는 단면변형, 압출, 균열, 바락, 줄눈부 단차 누수, 열화 등을, 바닥부에 대해서는 측구변형, 노반팽창, 침하 등을 부속시설에 대해서는 작동상태, 오염등을 환경조건에 대해서는 터널주변의 지형조건, 지표수 분포 및 흐름패턴, 토지이용 상황 등에 대해 조사한다.

(2) 정밀점검

- (가) 정밀점검은 일정한 주기로 계획된 정기적 점검으로서 시설물의 현 상태를 정확히 판단하고 최초 또는 이전에 기록된 상태로부터의 변화를 확인하며, 구조물이 현재의 사용요건을 계속 만족시키고 있는지 확인하기 위해 필요한 육안검사와 간단한 측정기구에 의한 측정으로 이루어진다.
- (나) 터널의 경우 편토압이나 침하, 지질상태에 의한 터널 시설물의 결함 상태를 고려하여야 하며 콘크리트의 풍화나 철근부식 등 시간경과와 함께 발생할 수 있는 재료의 열화에 기인한 변상여부를 관찰, 분석해야 한다. 면밀하고 지속적 감시가 필요한 시설물 부위는 사전현장조사, 구조해석 및 구조계산을 통하여 시설물의 안전성을 결정하는데 정밀점검의 구체적 점검항목과 장비는 표 5.35와 같다.

표 5.35 정밀검사 시의 점검항목 및 장비

점검부위	점검항목	점검장비
입·출구부	<ul style="list-style-type: none"> - 균열(균열폭, 길이, 깊이, 균열의 진전여부) - 누수, 백화 - 박리, 박락, 함몰 - 철근 부식여부 - 부등침하 - 배수처리 - 콘크리트 강도(반발경도) 	<ul style="list-style-type: none"> - 슈미트 해머 - 균열경 및 균열측정기 - 망치, 엔빌, 카메라, 손전등, 필기도구, 줄자 등
측벽부(좌우)	<ul style="list-style-type: none"> - 균열(균열폭, 길이, 깊이, 균열의 진전여부) - 누수, 백화 - 박리, 박락, 함몰 - 철근 부식여부 - 조명상태 - 콘크리트 강도(반발경도) 	<ul style="list-style-type: none"> - 슈미트 해머 - 균열경 및 균열측정기 - 망치, 엔빌, 카메라, 손전등, 필기도구, 줄자 등
천정부	<ul style="list-style-type: none"> - 균열(균열폭, 길이, 깊이, 균열의 진전여부) - 누수, 백화 - 박리, 박락, 함몰 - 철근 부식여부 - 콘크리트 강도(반발경도) 	<ul style="list-style-type: none"> - 슈미트 해머 - 균열경 및 균열측정기 - 망치, 엔빌, 카메라, 손전등, 필기도구, 줄자 등
바닥부	<ul style="list-style-type: none"> - 배수시설 - 노면상태(침하, 균열 등) - 용수 	

(3) 긴급점검

(가) 손상점검

① 손상점검은 비계획적인 점검으로서 재해나 사고에 의해 비록된 구조적 손상을 평가하는 것이다. 점검자는 점검대상 범위의 긴급한 사용제한이나 사용금지의 필요성이 있는지의 판단과 보수를 수행하는데 있어 필요한 작업량의 정도를 신속하게 결정할 수 있어야 하며 하중제한, 통행제한 등 사용제한 여부를 결정할 수 있도록 현장에서의 판단 능력이 요구된다.

② 손상점검은 정밀점검의 보완수단으로서 손상의 정도와 보수의 긴급성 그리고 보수작

업의 규모를 파악할 수 있어야 하므로 시험장비의 의한 현장측정 및 사용제한 기간에 대한 해석이 필요하다.

(나) 특별점검

- ① 특별점검은 관리주체가 판단하여 행하는 정밀점검 수준의 점검이다. 이 점검은 기초 침하 또는 세굴과 같은 결함이 의심되는 경우나 하중제한, 통행제한 중인 시설물의 지속적인 사용여부를 판단하기 위한 점검으로서 점검시기는 결함의 심각성을 고려하여 결정한다.
- ② 일반적으로 시설물이 신설되면 초기에 결함이 발생하기 쉬운데, 이러한 문제가 발생한 시설물은 문제해결 후 안전한 상태를 유지하다가 시간의 경과와 함께 서서히 노후화가 진행된다. 이때 복합적인 원인으로 인해 판단하기 어려운 변상형태가 많이 발생할 수 있는데, 이러한 변상상태를 그대로 방치하게 되면 그 상태를 촉진하는 결과를 초래하게 되어 시설물의 변상이 급속하게 진행되고 궁극적으로는 시설물의 내부성에 직접적인 영향을 미칠 수 있다. 이때 실시하는 긴급점검의 점검항목과 장비는 점검을 실시할 당시의 변상종류가 점검항목이 되는 것으로서 점검장비 등은 정기점검과 정밀점검에서 언급한 변상종류에 해당하는 장비를 동일하게 사용한다.

(4) 정밀안전진단

- ① 정밀안전진단을 위한 점검은 정밀점검과정을 통해서 쉽게 발견하지 못하는 결함부위를 발견하기 위하여 행해지는 정밀한 육안조사 및 측정장비에 의한 조사를 포함하는 근접 점검이다. 필요한 경우 차량통제나 단수 등을 실시하여야 하며 점검용 접근장비, 비계, 작업선과 같은 특수장비 및 특수기술자가 필요하다.
- ② 먼저, 육안조사의 결과는 전체 구조물의 표면에 대하여 도면에 기록하여야 하며, 구조물 전체에 대한 조사결과 분석 및 상태평가가 파괴시험과 비파괴 현장시험 및 기타 필요한 재료시험 등의 실내시험을 병행해야 하며, 콘크리트 재료의 열화정도, 배면지반의 상태 등 정량적인 판단을 주로 한다. 또한 정밀안전진단에서는 노후화 또는 손상정도에 따라 구조물의 성능이나 잔존수명을 평가하기 위한 안전성 평가가 포함되어야 한다. 안전성 평가를 위하여 시설물의 안정과 내하력, 내진성 등을 결정하는데 필요한 조사나 시험을 실시할 수 있다. 정밀안전진단을 실시한 결과, 시설물의 재해예방 및 안전성의 확보가 필요한 경우에는 적절한 보수·보강공법을 제시하여야 한다.

제 6 장 화재피해 진단 및 복구 매뉴얼(안)

6.1 내화 방안의 유지관리

6.1.1 일반

- (1) 화재손상이 발생하지 않은 경우에는 내화 방안을 터널 구조물의 일부 또는 부속물로서 상시 유지관리를 한다
- (2) 구조물에 화재손상이 발생하였을 경우, 신속히 내화 방안의 화재 진단 및 보수 등의 유지관리를 한다.
- (3) 화재손상을 입은 후 화재진단 및 보수 등의 유지관리가 완료된 후에는 경과 관찰을 거쳐, 내화 방안을 터널 구조물의 일부 또는 부속물로서 상시 유지관리한다.

【해설】

터널 구조물의 내화 방안은 상시에 구조물의 일부 또는 부속물로서 유지관리되는 것이 많다. 화재손상이 발생하지 않은 평상시에는 섬유혼입 콘크리트의 경우, 터널 구조물의 일부로서 상시 유지관리가 이루어지고 있다. 다만, 섬유혼입 콘크리트는 소규모 화재일지라도 내부의 유기섬유가 용융될 가능성이 있기 때문에 규모 크기에 상관없이, 화재손상이 발생했을 때는 화재손상 조사를 실시하는 것이 바람직하다. 또한 2차 라이닝을 시공한 경우에는 라이닝 콘크리트로서 상시 유지관리가 이루어지고 있다. 그 외의 내화 방안은 주로 내장재로 상시 유지관리가 이루어지고 있다.

그러나 내화 방안의 내화성에 관한 상시 확인은 현재, 육안 조사 외에는 확인이 어렵기 때문에 육안으로 변형이 없음을 확인함으로써 내화 방안의 내화성이 유지되고 있다고 판단한다. 또한 내화 방안의 종류에 따라서 장기 사용된 실적이 충분하지 않은 것도 있어, 평상시의 장기 사용에 따른 내화 방안의 내화성 저하에 대해서는 향후 더욱 검증을 거듭해 갈 필요가 있다.

이상으로 화재손상이 발생하지 않은 경우, 내화 방안은 터널에서 상시 유지관리가 이루어지고 있는 것으로 보고 여기에서는 대상으로 하지 않고, 내화 방안의 유지관리로서 화재손상이 발생한 것으로 판단되는 경우에 대해 기술하기로 한다.

6.1.2 화재손상을 입은 후의 유지관리

가. 일반

- (1) 터널에 화재손상이 발생하였을 경우, 신속하게 조사, 진단, 진단 결과를 바탕으로 한 보수의 필요 여부 판단 및 대책 실시, 기록 작성을 해야 한다.
- (2) 화재손상을 입은 후의 유지관리는 내화 방안뿐만 아니라, 터널 구조물도 대상으로 삼는다.

【해설】

터널에 화재손상이 발생했다고 판단될 경우, 신속히 조사하고 조사 결과를 바탕으로 한 진단 및 진단 결과에 근거한 대책의 필요 여부 판정과 필요한 대책의 실시 및 이러한 기록을 작성해야 한다. 화재손상의 정도에 따라서는 터널 구조물에도 손상을 입힐 가능성이 있으므로, 화재손상 후의 유지관리 대상에는 내화 방안뿐만 아니라 터널 구조물도 포함한다.

콘크리트 구조물은 내화성이 뛰어나 화재로 인한 피해가 다른 재료를 사용한 구조물에 비하여 작다고 여겨져 왔으나, 화재 등으로 고온에 노출되었을 경우 콘크리트의 압축강도나 탄성계수 등은 저하된다. 압축강도의 저하 비율은 콘크리트가 받은 온도에 따라 다르며, 수열 온도가 높을수록 이 저하 비율은 커진다. 따라서 콘크리트가 어느 정도의 온도에 노출되었는지를 파악해야 한다. 콘크리트의 압축강도와 수열 온도의 관계는 콘크리트의 배합 등에 따라 다르다. 따라서 압축강도가 저하되기 시작하는 온도의 경계치는 여러 가지라 일률적으로 말할 수 없으나, 400℃를 넘는 값에서 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 가 CaO 로 변하고, 800℃ 부근에서 CaCO_3 가 CaO 와 CO_2 로 분해될 것으로 보인다. 또한 시멘트 경화체와 골재의 화학 변화는 500℃ 정도까지는 탈수(脫水)는 있지만 큰 변화가 없어, 콘크리트 내구성에 대한 수열의 영향을 무시할 수 있을 것으로 판단된다. 철근의 경우, 수열 중에는 300℃ 정도부터 강도가 저하되지만, 상온으로 떨어진 후에는 600℃ 정도까지는 가열되지 않은 것과 동등한 강도를 갖는 것으로 알려져 있다. 한편, <건물의 화재피해 진단 및 보수·보강 방법 지침(안) 동(同)해설 (일본건축학회)>에서는 콘크리트는 500℃를 넘으면 냉각 후의 잔존강도가 50% 이하로 떨어지지만, 300℃ 이하면 냉각 후의 잔존 압축강도나 부착강도는 수열 전의 70% 이상이고, 철근은 500℃ 정도까지의 수열이라면, 냉각 후의 잔존강도는 수열 전과 동등하다고 보고하고 있다.

상기 내용을 통해, 수열 온도가 300℃ 정도까지는 콘크리트 압축강도에 미치는 온도의 영향은 작고, 500℃ 정도까지는 냉각 후 철근의 물성에 영향이 없다고 봐도 무방하다.

나. 조사

화재손상 조사에서는 다음의 조사를 실시하고, 내화 방안 혹은 내화 방안 및 터널 구조물의 화재손상으로 인한 손상 상황을 정확하게 파악해야 한다.

- ① 예비 조사
- ② 1차 현장 조사
- ③ 2차 현장 조사
- ④ 상세 조사

조사 결과를 바탕으로 화재손상으로 인한 손상 정도를 판정하고, 이후의 보수 보강의 필요 여부를 판단해야 한다.

【해설】

터널 구조물의 수열 온도가 낮은 경우는 그 화재손상의 정도도 작아지기 때문에, 구조물은 극히 소규모 보수(내화 방한 교체 포함)를 통해 터널을 재사용할 수 있는 경우도 있다. 이에 반해 수열 온도가 높을 경우에는 화재손상의 정도도 커진다. 이때, 내화 방한뿐만 아니라 모재 콘크리트에 손상이 일어날 수 있다. 대규모 화재손상이 발생했을 경우, 보수나 보강과 같은 대책을 실시하지 않으면 터널의 성능 기능을 회복할 수 없다.

터널에 화재손상이 발생했을 경우 필요한 조사를 실시하고, 그 결과를 바탕으로 화재손상 손상도를 평가한다. 나아가 그 평가를 근거로 보수·보강의 필요 여부를 판단하고, 적절한 대책을 실시해야 한다.

화재손상이 발생했을 경우의 조사는 i) 예비조사, ii) 1차 현장 조사, iii) 2차 현장 조사, iv) 상세 조사의 4단계로 나눌 수 있다. 그러나 반드시 4단계의 모든 조사를 실시하는 것은 아니며, 화재손상 상황에 맞게 필요한 조사를 하면 된다.

콘크리트(섬유혼입 콘크리트, 2차 라이닝, 터널 구조물)에 대한 화재 손상도는 해설 표 6.1의 4단계로 평가한다.

해설 표 6.1 콘크리트의 화재손상 손상도

화재손상 손상도	화재손상 상황
A	- 무(無) 피해 ① 콘크리트 표면의 추정 수열 온도가 300℃ 미만임. ② 그을음은 보이나, 균열이나 박리는 보이지 않음.
B	- - 경우에 따라 보수가 필요한 피해 ① 콘크리트 표면의 추정 수열 온도가 300℃ 이상 500℃ 미만임. ② 콘크리트의 표면적 균열 또는 표면적 박리가 보임.
C	- 보수가 필요한 피해 ① 콘크리트 내부의 추정 수열 온도는 500℃ 이상이나, 부재의 내력(耐力)은 설계상 필요한 내력을 유지하고 있음, 또는 부재의 변형이 허용되는 범위에 그침. ② 내구성 확보 상 허용되지 않는 균열이 보임. ③ 철근에 달하는 들뜸 또는 박리가 보임.
D	- 보강 교체가 필요한 피해 ① 콘크리트 내부, 철근, PC 강재 모두, 혹은 일부의 추정 수열 온도가 500℃ 이상으로, 부재의 내력이 설계 상 필요한 내력보다 떨어짐. ② 부재에 허용되지 않는 변형이 발생함.

(1) 예비 조사

예비 조사에서는 화재손상을 입은 터널에 관한 화재 상황 정보의 수집, 터널의 피해 경력 조사, 상세한 설계 도서의 준비와 함께 차량의 통행 여부와 화재 대책이 필요할 때에는 응급조치의 필요 여부를 판단한다.

【해설】

콘크리트(섬유혼입 콘크리트, 2차 라이닝, 터널 구조물)에 대한 화재 손상도는 해설 표 6.1의 4단계로 평가한다.

화재손상 손상도나 화재손상 진단 결과에 근거한 대책의 필요 여부를 판정할 때, 터널에 관한 화재손상 상황의 정보 수집은 중요하다. 예비 조사에서 수집하는 정보로는 출화 원인, 가연물의 종류와 양, 화재 지속 시간, 재해 손상 범위 등이 있다. 이러한 정보는 소방서나 목격 정보에서 일부 얻을 수 있다. 한편, 화재손상 부위에 가능한 한 접근하고, 접근이 불가능한 경우는 쌍안경 등을 이용해 육안으로 재해 상황을 조사한다. 이러한 결과를 통해 재해 손상 범위, 터널 붕괴 내화 방안 낙하의 위험성, 차량 통행에 미치는 영향 등을 신속히 파악하여, 차량 통행 여부와 응급조치의 필요 여부를 판단한다. 이와 동시에 터널의 피해 경력과 상세한 설계 도서를 터널 관리자에게 받아두는 것도 좋다.

응급조치는 ① 터널 붕괴의 위험성이 있는 경우, ② 내화 방안의 낙하로 제3자에게 영향을 끼칠 것이라 예상되는 경우, ③ 교통 개방을 위해 필요한 경우에 실시하는 것이 좋다.

(2) 1차 현장 조사

(가) 1차 현장 조사에서는 육안으로 내화 방안, 또는 내화 방안 및 콘크리트로 화재 상황을 조사하고 손상 정도를 기록함과 동시에 화재 온도와 부재의 수열 온도를 추정한다.

(나) 1차 현장 조사 결과를 통해 보다 상세한 2차 현장 조사의 필요 여부를 판단하고, 조사 대상 및 장소를 결정한다.

【해설】

콘크리트 자체의 내화성을 기대하는 내화 방안이 적용되어 있는 경우, 내화 방안인 콘크리트를 육안으로 조사한다. 콘크리트의 수열로 인한 표면 변상(變狀)에는 변색, 균열, 박리, 휨, 콘크리트의 들뜸 박리, 철근 노출 등이 있다. 1차 현장 조사에서 육안을 통한

콘크리트의 외관 조사는 다음의 항목에 주목하면 좋다.

- 콘크리트 표면의 변색
- 균열 (폭, 길이) 유무
- 들뜸, 박리 유무
- 철근 노출의 유무

또한 내화 방안으로 섬유혼입 콘크리트가 사용된 경우, 수열 온도가 300℃ 이하에서도 섬유가 녹기 때문에 물질 침입 저항성이 저하된다. 따라서 유기섬유 혼입 콘크리트에서 관해서는, 내구성의 관점에서 표면에 균열이나 박리가 생기지 않았어도 2차 현장 조사에서 코어 채취를 실시하여 수열 범위 및 깊이를 확인하는 것이 바람직하다.

콘크리트 표면의 변색과 수열 온도의 관계는 대략 해설 표 6.2와 같다. 300℃ 이상의 수열이라도 화력이 약해져 콘크리트 표면에 그을음이 묻는 경우가 있기 때문에, 그을음을 제거하고 나서 육안으로 조사하는 것이 좋다. 다만, 그을음을 제거할 때 물로 표면을 세척하면 콘크리트의 광물 조성에 변화가 생길 가능성이 있으므로, 추후의 2차 현장 조사나 상세 조사를 고려하면, 물로 세척하지 않는 편이 좋다.

해설 표 6.2 콘크리트 표면의 변색 상황과 수열 온도

콘크리트 표면의 변색 상황	수열 온도의 범위(℃)
표면에 그을음 등이 묻은 상태	300 미만
분홍색	300~600
회백색	600~950
담황색	950~1,200
용융됨	1,200 이상

내화 방안으로 내화 피복이 설치된 경우, 해설 표 6.3에 나온 부대설비 등에 사용되는 재료와 그때의 상태를 참고로 내화 방안의 수열 온도를 추정하는 것이 좋다. 또한 부대설비 등에 사용되는 재료는 다양하기 때문에 사전에 온도와 그때의 상태를 확인해 두는 것이 좋다.

화재손상의 정도에 따라 터널 구조물에도 손상이 가해졌다고 생각되는 경우에는 가능한 한 내화 피복을 제거하고, 내측 터널 구조물에 대한 외관 조사(변색 상황, 균열·박리의 유무·철근 노출의 유무 등)를 실시하는 것이 좋다.

이상의 조사 결과로 콘크리트 자체의 내화성을 기대하는 내화 방안 또는 터널 구조물의 화재 손상도가 큰 경우B 이상인 경우, 2차 현장 조사나 상세 조사를 실시하는 것이 좋다. 섬유혼입 콘크리트에서 유기 섬유의 용융이 예상되는 경우에는 2차 현장 조사나 상세 조사를 하는 것이 좋다. 내화 피복이 설치되어 있는 경우, 1차 현장 조사 결과를 통해 보다 상세한 조사가 필요하다고 판단되면 2차 현장 조사나 상세 조사를 실시한다.

해설 표 6.3 해설 표 6.3 부대설비 등에 사용되는 재료의 각 온도별 상태

재료	상태	온도(°C)	재료	상태	온도(°C)	
유리	연화	650	알루미늄	연화	600 이상	
	용융	800		용융	650 이상	
	원형 유지 불가	900 이상		납	무서리가 등 무게 변화거나 액체방울이 생김 (용융)	300~350
도료	그늘음과 기름막 붙음	100 이하	금속	아연	액체 방울이 생김 (용융)	400
	갈라짐과 박리	100~300		은	무서리가 등 무게 변화거나 액체방울이 생김 (용융)	950
	녹막이 도료는 건전	300 이하		놋쇠	무서리가 등 무게 변화거나 액체방울이 생김 (용융)	900~1,000
	녹막이 도료가 변색	300~600		청동	무서리가 등 무게 변화거나 액체방울이 생김 (용융)	1,000
	녹막이 도료가 강재에 탄화되어 잔존	600 이하		구리	무서리가 등 무게 변화거나 액체방울이 생김 (용융)	1,100
	도료가 강재에서 소실	600 이상		주철	액체 방울이 생김 (용융)	1,100~1,200
글라스 울	부피 수축	600 이상	열가역성수지	비닐류	연화 (연속가열로 인한 내열온도)	50~100
	용융	650 이상		아크릴	연화 (연속가열로 인한 내열온도)	60~95
아스팔트	연화	100 이하		폴리스티렌	연화 (연속가열로 인한 내열온도)	60~100
	가연성 가스 발생, 인화점	200 이상			용융	100 이상
나일론	용융	200 이상		폴리에틸렌	착화	150 이상
	착화	250 이상			연화 (연속가열로 인한 내열온도)	80~135
열경화성수지	폴리에스테르	연화 (연속가열로 인한 내열온도)		실리콘	연화 (연속가열로 인한 내열온도)	200~315
	폴리우레탄	연화 (연속가열로 인한 내열온도)		플루오르화수소 플라스틱	연화 (연속가열로 인한 내열온도)	150~290
	에폭시	연화 (연속가열로 인한 내열온도)				

(3) 2차 현장 조사

- (가) 1차 현장 조사 결과를 바탕으로 2차 현장 조사가 필요하다고 판단된 대상 부위에 적절한 조사 방법을 선정하여 실시한다.
- (나) 2차 현장 조사 결과에서 상세 조사의 필요 여부를 판단하여 상세 조사 대상을 결정한다.

【해설】

2차 현장 조사는 1차 현장 조사 결과를 보고, 필요하다 판단된 경우 실시한다. 내화 방안으로 섬유혼입 콘크리트가 사용된 경우, 수열 온도가 300℃ 이하라도 유기 섬유가 용융하여 물질 침입 저항성이 저하되므로, 현장에서 콘크리트 코어를 채취하여 실험실과 같은 실내에서 압축강도와 탄성계수 등을 조사하고, 동시에 유기 섬유의 용융 범위 및 깊이를 조사한다.

내화 방안으로 2차 라이닝이 시공된 경우, 상기와 같이 콘크리트 코어를 채취하여 압축강도, 탄성계수, 중성화된 깊이를 조사한다. 동시에 철근도 채취해 철근의 물성(인장강도 등)도 조사한다.

내화 방안으로 뿔칠형 재료가 사용된 경우에는 뿔칠부의 시료는 채취할 수 없기 때문에 적절한 방법으로 뿔칠부의 박리를 조사하는 것이 바람직하다.

내화 방안으로 내화보드가 사용된 경우, 조사 대상 부위의 내화보드를 제거하는 등 내화보드 성능이 열로 인해 저하되지 않았는지 조사한다.

또한 터널 구조물에 대해서도 조사가 필요하다고 판단되었을 경우, 2차 현장 조사에서 콘크리트 코어 및 철근의 채취 시험을 실시하는 것이 좋다. 이러한 조사 항목은 반드시 전부 다 하는 것이 아닌 필요에 따라 실시한다.

① 콘크리트 코어 채취 시험(압축강도, 탄성계수, 중성화 깊이, 섬유 용융의 유무) 조사 대상 부위의 콘크리트 코어를 채취하여 실험실과 같은 실내에서 압축강도 시험을 실시하여 압축강도를 구한다. 또한 콘크리트의 강성이 문제가 될 경우에는 탄성계수 구한다. 코어 표면에 페놀프탈레인 용액을 분무하면 중성화된 깊이를 구할 수 있다. 중성화는 대기 중에서 자연스럽게 진행되기 때문에 조사한 중성화 깊이가 화재로 인한 것인지, 자연스럽게 진행된 것인지 신중히 판단할 필요가 있다. 섬유혼입 콘크리트의 경우, 압축강도, 탄성계수, 중성화 깊이 외에 혼입된 유기섬유의 용융 상태를 확인한다.

② 철근의 채취 시험은 조사 대상 부위의 철근을 채취해, 실험실과 같은 실내에서 인장 시험을 실시하여 철근의 물리 특성(항복점, 인장강도 등)을 구한다.

(4) 상세 조사

(가) 1차 현장 조사 및 2차 현장 조사 결과, 추가로 상세 조사가 필요하다고 판단될 경우 상세 조사를 실시한다.

(나) 상세 조사는 주로 구조물터널 구조물을 대상으로 한다.

【해설】

상세 조사에서 실시하는 조사 항목은 이 해설 표 6.4와 같다. 이 항목은 필수로 모두 하는 것이 아니라, 필요에 맞게 실시한다. 표의 No. 1 및 2는 2차 현장 조사에서 실시하는 경우가 있으나, 보다 상세히 실시할 필요가 있다고 판단될 경우에는 추가적으로 실시한다. 조사 대상은 터널 구조물이다.

해설 표 6.4 상세 조사에서 실시되는 조사 항목

No.	시험	개요
1	압축강도 중성화 깊이	2차 현장 조사 해설을 참조
2	철근 인장강도	2차 현장 조사 해설을 참조
3	UV 스펙트럼법(GBRC법)	콘크리트에 사용된 화학 혼합제에 착안한 분석으로, 흡광도와 가열 온도와의 관계로 콘크리트가 받은 수열 온도를 추정한다. 주로 리그닌술폰산 계열 화학 혼합제에 적용할 수 있고, 수열 온도를 600℃까지 추정할 수 있다.
4	과망간산칼륨을 이용한 산소 소비량 정량 분석	유기계 화합물인 탄소를 대상으로 한 분석으로, 콘크리트에 사용된 화학 혼합제 종류에 상관없이 유기계 화합물을 정량할 수 있고, 300~500℃의 수열 온도를 추정할 수 있다.
5	마이크로파 특성값 측정	콘크리트의 마이크로파 특성값(감쇠 계수와 위상 정수)을 조사하여 고온 시의 열화도(잔존 강도)로 수열 온도를 추정할 수 있다. 단, 깊이 방향의 온도 분포 파악이 어려운 점, 또한 콘크리트의 함수율에 의해 측정오차가 발생한다는 점에 유의해야 한다.
6	초음파 전파 속도 추정	콘크리트의 초음파 전파 속도로 콘크리트의 강도를 추정하는 방법이다. 600℃ 이상의 수열 온도에도 적용할 수 있다.
7	초음파 분광학법	수열로 인해 열화된 콘크리트 주파수를 이용한, 초음파 감쇠량으로 열화의 정도를 추정할 수 있다. 수열 온도 600℃ 이상에서도 적용할 수 있다.
8	X선 회절 분석	콘크리트를 X선 회절하여 그 회절 각도로 광물을 동정(同定)하고, 결정형의 변화로부터 수열 온도를 추정할 수 있다. 결정형의 미묘한 변화를 판별하는 고도의 기술이 필요하다. 수열 온도 825℃ 이상에서도 적용 가능하다.
9	탄산가스 재흡수량 측정	가열 온도와 탄산가스 흡수량의 관계가 대략 직선 관계라는 점을 이용해 콘크리트의 수열 온도를 추정하는 방법이다. 600℃ 이상의 수열 온도를 추정할 수 있다.
10	유리 석회량 분석	가열 온도와 유리 석회량이 거의 비례 관계에 있다는 점을 이용해 콘크리트의 수열 온도를 추정하는 방법이다.
11	시차열천평 분석	건전한 콘크리트를 가열해, 자유수·결정수의 탈수, SiO ₂ 의 변화, 탄산가스의 방출 변화를 조사하고 화재 피해를 입은 콘크리트와 비교해 수열 온도를 추정하는 방법이다. 수열 온도 825℃ 이상에서도 적용할 수 있다.

6.1.3 진단

예비 조사, 1차 현장 조사, 2차 현장 조사 및 상세 조사의 각 결과를 종합하여 화재 피해를 진단한다.

【해설】

화재가 발생한 콘크리트의 화재 피해 진단은 예비 조사, 1차 현장 조사, 2차 현장 조사 및 상세 조사의 각 결과를 바탕으로 화재 피해 손상도를 평가한다. 콘크리트의 화재 손상도는 해설 표 6.1의 4단계로 평가한다.

화재 손상도 A에서 콘크리트의 수열 온도로 300℃를 경계치로 한 것은, 300℃ 미만이면 콘크리트의 압축강도에 미치는 수열 온도의 영향이 작기 때문이다.

화재 손상도 C 및 D에서 콘크리트의 수열 온도로 500℃를 경계치로 한 것은 수산화칼슘의 열분해가 450~550℃ 부근에서 이루어지고, 이로 인해 콘크리트는 중성화가 진행되는 데, 500℃를 넘으면 콘크리트의 잔존 강도(냉각 후)가 상온일 때보다 50% 이하로 떨어져 철근의 강도(냉각 후)도 저하되기 때문이다. 또한 콘크리트의 중성화 깊이를 조사하면 500℃ 부근에 달한 영역을 판정할 수 있다는 점에서 500℃를 경계치로 정하였다.

6.1.4 보수·보강

- (1) 내화 방안 및 터널 구조물의 화재 피해를 조사 진단한 결과, 보수·보강이 필요하다고 판단되었을 경우에는 그 범위를 정하고, 적절한 재료·공법을 선정하여 보수·보강을 실시하여야 한다.
- (2) 보수 보강의 방법 및 재료는 터널 구조물의 안전성, 사용성, 제3자 영향도, 미관·경관, 내구성을 화재손상을 입기 전의 필요한 성능으로 회복 또는 화재 피해를 입기 전보다 더욱 성능을 향상시킬 수 있는 것으로 선정한다.

【해설】

(1)에 대해 내화 방안의 보수 보강 방법은 대상으로 삼은 내화 방안에 따라 다르다. 터널 구조물은 손상 없이 내화 방안에만 손상이 발생한 것으로 판단될 경우, 각 내화 방안에 따라 대응이 달라진다.

내화 방안으로 섬유혼입 콘크리트가 사용된 경우, 조사 결과에 따라 보수·보강이 필요

한 부분을 결정하여 적절한 보수·보강을 실시한다. 또한, 유기 섬유는 소규모 화재라도 열로 인해 용융되는 경우가 있기 때문에 섬유의 용융 부분을 보수·보강 부분으로 정하는 것이 좋다.

내화 방안으로 2차 라이닝이 시공된 경우, 조사 결과로 화재 손상도 (해설 표6.1)를 평가한다. 화재 손상도 A로 평가된 경우는 기본적으로는 보수·보강이 불필요하다. 다만, 미관 및 경관의 관점에서 그을음 제거, 표면 도장, 표면 피복 등의 작업을 실시할 수 있다. 화재손상 손상도 B로 평가되었을 경우, 내부 철근에는 영향이 없기 때문에 터널의 내력이나 강성 저하는 미미하다고 판단된다. 그러나 콘크리트의 일부는 수열로 인해 손상된 것으로 판단된다. 균열과 박리의 유무를 보고 제3자 영향도, 미관·경관, 내구성 관점에서 보수 보강의 필요 여부를 판단하고 범위를 정한다. 화재 손상도 C로 평가된 경우, 콘크리트 내부 압축강도의 저하와 철근의 인장강도가 저하되었다고 판단할 수 있다. 다만, 터널의 내력이나 강성은 현저하게 떨어지지 않을 것이라 판단된다. ‘내구성을 확보하는 데 있어 허용할 수 없는 균열이 보인다’라는 판단에서 해설 표 6.1 및 해설 표 6.2를 참고로 보수·보강의 필요 여부를 판정하고, 제3자 영향도, 미관·경관, 내구성의 관점에서 보수 보강 범위를 결정하는 것이 좋다. 화재 손상도 D로 평가된 경우, 콘크리트의 가열 열화와 함께 내부 철근의 성능이 현저하게 저하되었다고 판단한다. 터널의 안전성, 사용성, 제3자 영향도, 미관·경관, 내구성의 관점에서 보수 보강 범위를 결정한다.

내화 방안으로 뿔칠형 재료가 사용된 경우, 조사 결과를 통해 보수·보강할 부위를 결정하여 적절한 보수·보강을 실시한다. 특히 뿔칠 재료의 성능 저하나 터널 구조물에서 박리된 부분은 손상부의 뿔칠 재료를 제거하고 재시공한다.

내화보드의 성능이 저하되지 않아도 고정장치 등이 화재로 인하여 성능이 저하되는 경우가 있다. 또한 그을음으로 미관·경관을 해치는 경우도 생각할 수 있다. 따라서 보수·보강의 범위는 내화 방안의 안전성 제3자 영향도, 미관·경관의 관점에서 정하는 것이 좋다. 보수·보강 부분이 결정된 후에는 그 손상 상황에 맞게 고정장치 혹은 내화 방안 자체를 보수·보강한다.

내화 방안뿐만 아니라, 터널 구조물에게까지 손상이 미치는 경우는 ① 내화 방안의 성능이 불충분하거나 또는 ② 예상을 넘는 화재가 발생한 것 중 하나가 원인이라 판단된다. 이러한 경우, 내화 방안의 설계 수정을 포함해 보수 보강을 실시한다.

해설 표 6.5 강제 부식의 관점에서 이 균열이 부재 성능에 미치는 영향

환경 조건		염해 부식 환경	일반 야외 환경	땅속 실내 환경
균열 폭 : ω (mm)	$0.5 < \omega$	대(20년 내구성)	대(20년 내구성)	대(20년 내구성)
	$0.4 < \omega \leq 0.5$	대(20년 내구성)	대(20년 내구성)	중(20년 내구성)
	$0.3 < \omega \leq 0.4$	대(20년 내구성)	중(20년 내구성)	소(20년 내구성)
	$0.2 < \omega \leq 0.3$	중(20년 내구성)	소(20년 내구성)	소(20년 내구성)
	$\omega \leq 0.2$	소(20년 내구성)	소(20년 내구성)	소(20년 내구성)

*평가 결과 ‘소’, ‘중’, ‘대’의 의미는 다음과 같다.

소: 균열이 성능 저하의 원인이 되지 않으며, 부재가 요구 성능을 만족함.

중: 균열이 성능 저하의 원인이 되나, 경미(간이)한 대책으로 대처 가능.

대: 균열로 인한 성능 저하가 현저하며, 부재가 요구 성능을 만족하지 못함.

**괄호 안의 수치는 내구성 평가 결과를 보증할 수 있는 기간의 기준 연수를 나타내며, 20년 내구성은 균열 평가 시점으로부터 15~25년 후 정도의 내구성 평가 결과를 보증할 수 있는 기간 기준으로 설정한 것으로, 15~25년의 평균을 잡아 나타낸 것이다.

해설 표 6.6 방수성 수밀성의 관점에서 이 균열이 부재 성능에 미치는 영향

환경 조건		상시 수압 작용 환경		상시 수압 작용 외 환경	
부재 두께 (mm)		180 미만	180 이상	180 미만	180 이상
균열 폭 : ω (mm)	$0.20 < \omega$	대	대	대	대
	$0.15 < \omega \leq 0.20$	대	대	대	중
	$0.05 < \omega \leq 0.15$	중	중	중	소
	$\omega \leq 0.05$	소	소	소	소

*평가 결과 소, 중, 대의 의미는 다음과 같다.

소: 균열이 성능 저하의 원인이 되지 않으며, 부재가 요구 성능을 만족한다.

중: 균열이 성능 저하의 원인이 되나, 경미(간이)한 대책으로 대처가 가능

대: 균열로 인한 성능 저하가 현저하며, 부재가 요구 성능을 만족하지 못함.

터널 구조물에 손상이 가해진 경우, 내화 방안에 2차 라이닝을 시공한 경우와 마찬가지로 조사 결과를 바탕으로 해설 표 6.1을 참고로 화재손상 손상도를 4단계로 평가하여 보수 보강을 판단한다. 이 경우, 앞에서 기술한 내화 방안에 2차 라이닝을 적용한 경우와 동일한 대응을 하면 된다.

(2)에 대해 보수 보강 범위가 필요하다고 판단된 콘크리트 자체의 내화성을 기대하는 내화 방안 또는 터널 구조물의 경우, 결정된 보수·보강 범위에 터널 구조물의 안전성, 사용성, 제3자 영향도, 미관·경관, 내구성을 필요한 성능으로 회복 가능한지가 확인된 적절한 보수·보강 재료·공법을 적용해야 한다.

6.1.5 보수·보강 후의 내화 방안의 유지관리

보수·보강이 실시된 후에는 경과 관찰을 통해 안전성을 확인하고, 화재손상을 입기 전의 통상적인 유지관리를 실시하기로 한다.

【해설】

화재가 발생한 터널 구조물의 보수·보강이 완료된 후에는 내화 방안의 성능이 화재 전 성능으로 회복된 것을 확인하는 것이 바람직하나, 보수·보강 시의 사용재료 및 방법, 시공 후의 완료 검사 결과 등으로 보수 보강의 효과(내화 방안의 성능 회복)를 판단해도 좋다. 또한 보수·보강한 부분은 시공 후 1~2년간은 내화 방안과 콘크리트에 균열이나 박락 등이 발생하지 않았는지 경과를 관찰해야 한다. 그 후, 문제없음을 확인한 후 통상적인 유지관리 단계로 이행한다.

6.1.6 기록

- (1) 상시의 유지관리, 화재 후의 유지관리를 실시할 때는 그 점검 내용, 조사 내용, 보수·보강 내용과 각각의 결과를 기록, 보관한다.
- (2) 보관된 기록은 이후의 점검이나 조사 등의 작업에 참고하기로 한다.
- (3) 유지관리 기록은 구조물을 사용하는 기간에는 보관하는 것을 원칙으로 한다.
- (4) 사용 기간이 지난 후에도 타 구조물의 유지관리 자료로 활용하기 위해 보관하는 것이 좋다.

【해설】

터널 구조물을 사용하는 기간에는 유지관리에 관한 모든 점검 내용, 조사 내용, 보수·보강 내용과 각각의 결과를 기록, 보관한다. 보관된 내용은 그 구조물의 관리자뿐만 아니라 점검원 등 모든 작업원에게 공개되는 것이 바람직하다.

제 7 장 결론

터널화재로 인한 피해를 최소화하고 이용객의 안전을 확보하기 위해 고속도로 터널의 한계온도 설정, 고속도로 터널 특성에 따른 내화설계 및 시공 절차 개발을 통한 화재안전대책 마련이 시급한 실정이다. 또한 불가피하게 고속도로 터널 내에서의 화재가 발생하였을 경우, 터널 상태평가 및 진단을 할 수 있는 화재피해 터널 진단 및 복구 매뉴얼(안) 정립이 필요한 실정이다. 이에 이 과업의 연구수행 결과를 바탕으로 다음의 결론을 도출하였다.

○ 도로터널의 화재사고의 위험도 기초분석 결과

- 엔진과열 및 브레이크, 타이어 등의 차량의 과열로 인한 화재 발생이 약 70% 수준으로 가장 많고 운전자의 정비불량으로 인한 차량고장 등의 이유가 약 10% 이상으로 높은 수준임.
- 위험물의 운반차량의 화재 사고 발생이 전체교통량 대비 약 5% 미만으로 분석되었지만 지역적 산업특성에 따라 위험물 운반차량의 빈도수가 변화함.
- 화재사고 발생건수는 소형차량에서 제일 많으나 차종별 교통량 대비 화재사고 건수는 중형화물차의 경우가 약 9.0건/백만대·100km으로 소형 2.1건/백만대·100km 및 대형차량 2.7건/백만대·100km에 비하여 상당히 높은 것으로 분석됨.
- 1차 화재사고 발생 이후, 추가적으로 차량화재사고 발생사례는 2015년까지 급격히 증가하다 2016년에는 상당한 수준으로 감소함.
- 도로터널의 화재위험도는 추돌 및 충돌 등 일반사고, 붕괴, 수해, 화재 등 다양한 사고를 포함하나 정량적 위험도 평가는 화재사고에 한하여 실시함.

○ 내화수준별 도로터널 내화설계

- 터널의 내화는 유관기관이 소화 및 구조활동을 원활히 수행할 수 있도록 대응시간을 확보하고, 화재로 인한 손상을 최소화하여 막대한 재산 손실을 예방하는 것임.
- 유럽의 경우는 시골과 같이 교통량이 적어 교통 혼잡비용이 현저히 낮아 복구비용이 적은 경우는 내화수준을 낮추거나 내화 자체를 회피하는 경우도 있음.
- 반면 교통량이 많아 교통 차단에 따른 막대한 교통 혼잡비용이 발생하는 경우, 복구보다는 내화에 치중하는 것이 경제적인 수 있음.

- 또한 NATM 터널의 무근 라이닝 구간과는 달리 쉴드 TBM 터널의 콘크리트 세그먼트나 싱글 쉘의 경우는 라이닝 자체 지보라는 터널의 구조적 특성 때문에 반드시 내화가 적용되어야 함.
- NATM 공법을 적용한 터널에서는 암반등급이 IV등급(지반등급 RMR 30 이하) 및 V등급 판정을 받은 구간이나 갱구부 구간에서의 콘크리트 라이닝에 철근보강을 적용한 구간에 대하여 소형차 전용 터널인 경우 KS 1시간 내화시험 및 대형차(유조차 등) 등 일반 터널에서는 KS 2시간이나 RWS/HC_{inc} 2시간 내화시험을 적용할 수 있음.
- 또한 개착식 공법, 쉘드 공법, TBM 공법 등에 대해서도 소형차 전용 터널인 경우 KS 1시간 내화시험을 적용할 수 있으며, 대형차(유조차 등) 등 일반 터널에서는 KS 2시간이나 RWS/HC_{inc} 2시간 내화시험을 적용할 수 있음.
- 다만, 구조적인 안전성 확보가 화재 후 유지보수 절차나 비용보다 심각하게 비싸고 어려운 경우 내화처리의 생략이 가능할 것으로 판단됨.
- 방재시설, 대피소, 비상구, 터널 연결부(joint), 풍도슬래브(airduct slab) 등의 부대시설물의 경우 화재사고 시 사고의 영향이 전파될 가능성이 있기 때문에 내화적용 여부를 검토해야 함.

참 고 문 헌

1. 강승구, 김세중, 김동준, 권영진, “장대터널의 성능적 화재안전설계를 위한 국내·외 터널 화재사례분석“, 한국화재소방학회 학술대회 논문집, pp. 341-346, 2009.
2. 건설교통부, ”터널유지관리 매뉴얼“, 2001.
3. 권영진, 김용로, 장재봉, 김무한, “고온을 받은 콘크리트의 공학적 특성“, 한국 화재소방학회 논문집, 제 18권 1호, pp. 31~36, 2004.
4. 국토교통부, “국도상 교량의 화재위험도 분석기술 및 대응체계 개발”, 최종보고서, 2017.
5. 국토교통부, “도로터널 내화 지침”, 2021.
6. 국토교통부, “도로터널 방재·환기시설 설치 및 관리지침(전부개정예규(안))”, 2021.
7. 국토교통부, “도시부 소형차 전용터널 방재시설 설치 및 관리지침”, 2019.
8. 국토교통부, “도시지역 지하도로 설계지침”, 2016.
9. 국토교통부(한국시설안전공단), “안전점검 및 정밀안전진단 세부지침”, 2017.
10. 김장호, 박해균, 원종필, 임윤묵, “신개발 시멘트계 내화재료를 코팅한 콘크리트 터널 라이닝의 내화성능에 관한 연구”, 대한토목학회 정기 학술대회, pp. 4274-4277, 2006.
11. 김화중, “콘크리트 구조물의 내화설계”, 콘크리트학회지, 제 14권 제 2호, pp. 30-36, 2002.
12. 김홍열, “고온 영역에서 고강도 콘크리트의 역학적 특성에 관한 실험적 연구”, 건국대학교 대학원 박사학위논문, 2002.
13. 김홍열, 신현준, 우용호, 김형준, “도로터널 구조물 내화설계기준 확립방안에 관한 연구”, 한국화재소방학회 학술대회 논문집, pp. 416-421, 2008.
14. 박시현, 윤태국, 오영석, 안상로, “화재에 의한 터널 거동특성 및 내화대책 기술”, 한국시설안전공단 동향/연구보고서, pp. 113-123, 2005.
15. 서상길, 설운호, 곽석환, 배병훈, 박영준, 임기섭, “고속도로 교량 내화설계 방안 연구”, 2014 대한토목학회 정기학술대회 논문집, pp. 709-710, 2014.
16. 심재원, 김낙영, 이지영, 장태순, “차량화재에 대한 터널·교량의 내화방안 및 내폭특성 연구”, 한국도로공사 2018년도 연구보고서, 2018.
17. 정대균, “도로터널 내 위험물질 수송차량 화재 시 터널 라이닝 및 벽체 콘크리트의 온도 분포 특성 분석”, 강원대학교 석사학위논문, 2019.

18. 최윤혁, 권순민, “고속도로 위험물질 수송차량 관리방안 연구”, 한국도로공사 2018년도 연구보고서, 2018.
19. 한국도로공사, “경부고속도로 직선화공사 지하차도 내화설계 기준개발 연구용역 최종보고서”, 2015.
20. 한국도로공사, “고속도로 터널내화 설계 및 시공지침(안)”, 2009.
21. 한국도로공사, “고속도로 위험물 운송차량 관리방안 연구”, 2016.
22. 한국도로공사, “차량화재에 대한 터널·교량의 내화방안 및 내폭특성 연구”, 2018.
23. ACI 216.1/TMS-0216, “Code Requirements for Determining Fire Resistance of Concrete and Masonry Construction Assemblies”, 2007.
24. PIARC, “Fire and Smoke Control in Road Tunnels”, 1999.
25. ITA, “Guidelines for Structural Fire Protection for Road Tunnels”, 2017.
26. EUROCODE 2, “Design of Concrete Structures-Part 1-2 : General rules- Structural Fire Design”, 2004.