

특집

02

장대터널의 안전관리 실태와 대책

장대터널의 화재위험과 인명안전 대책

1. 머리말

국내 산업기술 및 경제의 고도성장으로 인한 위성도시나 수도권으로 집중되는 인구를 적절하게 제어하기 위해 신도시를 개발하고 있음에도 불구하고, 수도권의 인구집중화 현상은 개선되지 않고 있는 실정이다. 이와 같이 수도권 및 주변 위성도시로의 인구집중화 현상으로 인한 가장 심각한 사회문제는 경제활동 지역으로의 안전한 접근성이라 할 수 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위한 대책으로 정부나 관계 지자체에서는 전철 및 도시철도, 경전철, 기타 도로망을 확충하기 위하여 많은 예산을 사용할 수밖에 없다. 따라서 환경적 측면과 공간의 제약이라는 도시지역의 특성은 물론 수송시스템(Mass Transit System)의 첨단화, 철도, 도로의 원활한 확충을 위한 방안으로 지하공간의 활용은 앞으로 더욱 활발해질 것이다.

우리나라는 인구밀도가 매우 높고 도로에 필요한 활용공간의 절대적인 부족과 산악지형으로 외국에 비하여 지하공간을 많이 이용할 수밖에 없는 환경적인 요소를 가지고 있기 때문에 터널을 많이 건설하게 된다. 예를 들면 수도권에 건설된 전철은 지하구간이 상당 부분 존재하게 되고 노선에 따라서는 해저터널을 지나는 전철구간도 있다. 또한 지방 주요도시를 연결하는 고속철도 구간의 터널 부분에는 십수 킬로미터 이상이 되는 구간(예 : 천성산 구간)도 건설 중에 있다. 이와 같이 도로망을 구축하는데 필연적으로 발생하게 되는 터널은 지상에 노출되어 있는 일반 도로에 비하여 근원적으로 화재 등 안전을 위협하는 여러 잠재위험요소를 가지게 된다.

따라서 터널의 안전성능을 확보하기 위한 종합안전대책을 수립하기 위해서는 다양한 변수에 대한 공학적인 분석이 필요하겠지만 본고에서는 화재가 발생할 경우에 대한 안전대책으로 일반인들이 쉽게 이해할 수 있도록 기본적인 측면에서 터널의 화재안전에 대하여 기술하고자 한다.



일반적으로 긴 일방향성의 형상을 가진 터널의 구조는 화재 및 각종 사고 발생시 정보나 피난동선의 확보가 제한되어 인명피해 우려가 높은 특수한 방호공간이다. 따라서 터널의 화재 위험 및 관리실태를 점검하여 과학적이고 체계적인 종합 안전 대책을 수립하여야 한다.



글 | 손봉세
전국대학소방학과 교수협의회장, 소방기술사

2. 국내 터널의 건설 현황

국내 대도시의 규모 및 경제생활패턴의 변화에 따른 가장 심각하게 대두되고 있는 사회적인 이슈가 교통수요 급증에 대한 대책과 도로의 한 축인 터널에서 발생하는 각종 사고에 대한 안전성을 확보하는 문제라 할 수 있다. 새로운 도로를 건설하기 위해서는 기본적으로 교통량 분석, 지형 및 지질 조사, 터널 구조, 화재분석, 터널자동감시체계 등에 대한 종합적인 검토와 평가가 필요하다. 그러나 최근에 발생하고 있는 터널사고 사례에서 알 수 있듯이 화재사고에 대한 대책은 매우 미흡한 것으로 나타났다. 물



■ 그림 1. 지하터널 공사



■ 그림 2. 대구지하철 화재사고

론 교통량의 엄청난 증가로 차량의 안전장치 및 운송 시스템의 첨단화에도 불구하고 터널에서 사고가 발생할 가능성은 더욱 증가하고 있다. 우리나라의 경우 지하철, 고속도로, 고속철도의 건설로 인해 1980년대부터 터널건설이 급격한 증가를 보이고 있으며, 향후 30년간은 지금의 증가율보다 훨씬 높은 증가율을 보일 것으로 예상된다. 최근에는 자연환경 훼손의 최소화를 위한 환경친화적 도로 및 철도 건설정책 추진으로 1km 이상의 장대터널 건설이 급증하고 있는 추세이다.

건설교통부 통계자료에 의하면 2003년 현재 사용 중인 도로터널은 총 583개로 이중 고속도로터널은 총 272개이고 고속도로 터널 중 양방향 터널이 26개, 나머지는 일방향 터널이 있는 것으로 보고하고 있다. 양방향 터널 26개 중 1km 이상은 5개소로 19.2%이며, 242개 일방향 터널 중 길이 1km 이상은 44개소로 18.2%정도이다. 또한 국도터널 총 219개소 중 양방향 터널이 39개소로 17.8%를 차지하고, 양방향 터널 39개소 중 1km 이상은 5개소로 12.8%, 일방향 터널 180개 중 1km 이상은 29개소로 16%를 차지한다. 그중에는 경북 영주의 죽령터널처럼 4.6km의 장대터널도 있으며 천성산터널처럼 10km가 넘는 터널도 건설 중에 있다.

그러나 최근 한국도로공사에서 발표한 통계자료에 의하면 2005년 현재 한국도로공사가 관리하는 터널은 총 328개소, 총 연장은 238,326m로, 이중 1,000m 이상 터널이 56개소, 3차로 이상 터널이 56개소이며 1중 시설물로 구분되는 터널(연장 1,000m 이상 혹은 3차로 이상)은 102개소로서 정밀안전진단 시행 등 특별관리를 하고 있다. 특히 1995년 10월 준공된 서울외곽순환도로의 청계터널은 국내 최초의

4차로 단면터널로서 터널 폭이 17.6m로 시공되었으며 연도별 터널의 건설현황 및 길이는 다음 <표 1>과 같다.

■ 표 1. 국내 터널 현황

구분	'00	'01	'02	'03	'04	'05
터널 (개소/m)	140/ 83,962	166/ 97,996	251/ 170,284	266/ 182,098	268/ 182,918	328/ 238,326

3. 터널 화재 사고 현황

우리나라 화재사고의 특징은 화재발생 건수 및 재산피해는 상대적으로 적고 인명피해는 선진국에 비하여 약 6배 이상으로, 일본 및 미국의 경우는 약 500건의 화재가 발생하여 한 명의 사망자가 발생한 것에 비하여 많은 인명피해가 발생한다. 이러한 결과는 화재안전성을 고려하지 않고 기능위주나 편의성 또는 경제논리에 밀려 소방·방재설비의 설치를 소홀히 하고 있다는 증거이다.

도로에서 발생하는 사고발생 빈도는 건설교통부 2003년 교통안전연차보고서에 의하면 도로 1km당 사고율은 약 2.4건으로 이는 단순 길이와 사고수를 비교한 것이며 상세한 자료는 없다. 그러나 전기·

기계적인 문제나 충돌로 인해 일단 궤도를 이탈하면 대형 사고의 가능성이 매우 높아지는 특징을 가지게 된다. 국내 화재통계 항목(소방방재청)에 터널 화재 통계가 별도로 구분되어 있지 않기 때문에 터널 화재에 대한 정확한 통계를 분석할 수가 없으나, 지난 2003년 대구지하철 사고로 인하여 국내 지하철에서 발생한 화재통계는 어느 정도 정리가 되어 있는 실정이다. 따라서 본 고에서는 국내 및 해외에서 발생한 주요 터널화재에 대한 사고원인 및 피해규모를 요약하여 정리하였으며 그 내용은 <표 2>와 같다.

4. 터널의 화재 위험성 및 관리 실태

일반적인 터널의 구조는 세장비가 긴 일방향성의 형상을 가지고 있으며 입구와 출구의 일부가 개방된 폐쇄공간으로 다른 방호공간에 비하여 화재 등 각종 사고가 발생할 경우 화재 위치에 대한 정보나 진압활동 및 피난동선의 확보가 제한되어 있기 때문에 인명피해의 우려가 높은 특수한 방호공간이라 할 수 있다. 따라서 터널에서 발생할 수 있는 화재현상을 중심으로 화재특성에 대하여 간단하게 정리하면 다음과 같다.

■ 표 2. 최근 10년간 국내 및 국외 터널사고 현황

연도	국가	역사/터널명	사고원인	피해상황
1996. 08	노르웨이	이케버그터널	버스 화재	버스완전전소
1996. 11	프랑스, 영국	Channel터널	-	터널 600m 손실
1999. 03	프랑스	몽블랑터널(11.6km)	트럭의 냉동장치에서 발생	40명 사망, 차량 40대 전소
1999. 05	오스트리아	Touern터널(6.4km)	페인트 수송 트럭 충돌	12명 사망, 차량 34대 전소
2000	오스트리아	산악열차터널	터널 내부의 윤활유에 의한 화재	170명 사상
2001	독일	베를린 Deutsche Oper역	열차 2량에서 발화	열차 1량 전소, 40여명 부상
2003	한국	대구지하철	침입자에 의한 방화	사망 197명, 부상 146, 실종 286명
2003. 6	한국	홍지문터널 화재 성산방향 750m 지점	미니버스 승용차 추돌화재	승객 등 40여 명 중경상
2005. 11	한국	대구 달성터널	미사일 탑재차량 화재	브레이크 라이닝 과열

가. 장대터널은 지형이 매우 높은 산을 관통하는 관계로 지열로 인한 터널 내의 기온이 외기보다 높은 경우가 많으며, 반 밀폐된 공간이어서 화재로 인한 기온의 상승과 연기의 확산이 종 방향으로 신속히 진행되기 쉽다.

나. 트럭의 대형화 및 교통량의 증가로 왕복 2차선 터널로 추돌현상이 자주 발생하는 추세로 대형화재사고가 발생할 가능성이 증대되고 있다.

다. 콘크리트는 섭씨 350℃에 이를 때까지 그 초기 강도를 유지하며 그 이상에서는 강도가 감소하여 섭씨 600℃에서는 초기 강도의 50% 수준이고, 섭씨 800℃에 이르면 폭열현상으로 콘크리트가 균열 파괴된다.

라. 외기 공기유입이 한정되어 있으므로 시간이 경과함에 따라 연소가 불완전하므로 대량의 연기 및 유독 등 화재가스가 발생할 가능성이 높은 방호공간이다.

마. 길이 방향으로 자연풍 및 차량에 의한 바람의 영향이 크기 때문에 화재의 확산이 비교적 빠르고 연기와 열 기류가 급속하게 확산될 가능성이 높다.

바. 본 방호공간은 인도가 아닌 차량 전용으로 화재하중이 높고 피난대피경로가 한정되어 있어 공간적 대응이 어렵다.

사. 터널 화재에서 발생하는 다량의 열 및 연기 등 화재가스 유동 및 확산현상은 터널의 구배에 영향을 받을 수 있다. 즉, 터널의 고도차 및 화재 열에 의한 부력효과(Buoyancy Effect)에 의한 Ceil Jet현상을 지배하게 된다.

아. 일부가 폐쇄되어 있어 빛 환경이 매우 열악하고 화재로 인한 연기층의 형성이 신속하게 진행되기 때문에 Panic현상으로 돌입하는 시간이 매우 빠르다.

자. 차량에서 화재가 발생할 빈도는 매우 낮지만 화재하중은 약 20~30MW으로 화재강도가 매우 높다.

차. 지하심도가 지형조건에 따라 매우 다양하기 때문에 터널이 위치한 장소의 특성을 반드시 고려한 소방안전대책을 수립하여야 한다.

또한 최근 국내 지하철 화재, 도로터널에서 발생한 화재로 인한 관계기관에서 조사 분석한 안전관리 실태에 대하여 간단하게 정리하면 다음과 같다.

가. 소방시설의 설치 및 유지관리 상태가 불량한 경우가 많은 것으로 나타났다.

- (1) 경보설비 : 감지기 미비, 수신기 회로 단선 등
- (2) 피난설비 : 유도등 미점등, 화재하중을 고려한 제연설비 미설치 및 작동불량
- (3) 기타 전기등 : 누전차단기 미비, 접시시설 불량 등
- (4) 통합관리시스템 미구축
- (5) 비상피난구 및 대피소 설치가 매우 미흡

나. 화재·재난의 조기발견 및 주요기능 부서 간 유기적 대응 부실

다. 위험관리 전문가로 구성된 전담기구 운영 미흡

5. 터널 소방방재시설

도로나 철도를 건설하는 데 터널 없이 원활한 교통망을 구축할 수 없기 때문에 터널은 반드시 필요한 동시에 안전하게 설계 및 시공, 관리되어야 한다는 전제가 필수이다. 따라서 터널의 본체는 물론 각종 부속시설도 안전성능이 확보되어 있어야 한다. 예를 들면 소방시설, 환기시설, 조명 및 비상용 시설 등이 일반 건축물의 안전성능보다 더욱 강화되게 설

치되어야 하며 이들은 상호 관련된 시설로서 통합관리시스템으로 구축되어야 한다. 특히, 소방시설 및 환기설비는 화재 진압은 물론 터널 건설공사와 개통 후 운영비의 대부분을 차지하기 때문에 완벽한 설계에 의한 공사가 이루어져야 한다. 각종 차량에서 배출되는 매연, 부유분진과 같이 가시거리 등 안전·쾌적성에 영향을 미치는 입자상 물질과 운전자에게 생리적 영향을 미치는 일산화탄소(CO), 질소산화물(NOx), 탄화수소(HC), 황산화물(SOx) 등의 유해물질에 대한 대책은 성능위주 설계에 의한 종합적인 대책을 마련하여야 한다.

최근 5년 간의 터널 내 치명적 재해가 발생하기 전까지는 일반 대중의 관심을 끌지 못하였던 것이 사실이나 39명의 사망자를 낸 1999년의 Monte-Blanc Tunnel(프랑스/이탈리아), 12명의 사상자를 낸 Tauern Tunnel(1999년 오스트리아), 1명의 사상자를 낸 St-Gotthard Tunnel(2001년 스위스), 155명의 사상자를 낸 Kitzsteinhorn(2000년 오스트리아)를 넘어 한국의 대구 지하철 방화사고(198명 사망, 2003년)로 인해 터널안전대책에 대한 관심이 증폭되고 있다. 따라서 국내에서도 건설교통부를 중심으로 터널 화재 등 안전에 대한 관련 기준을 제정하여 운영하고 있으며 미진한 시설기준의 개정 및 보완을 위하여 연구가 진행되고 있다.

6. 터널 화재 안전대책의 기본

국내에서는 화재안전에 대한 실험 및 공학적 연구가 매우 미진하여 터널 화재에 대한 정량화된 이론적 근거는 없으나, 방재 선진국가에서 각국별로 화재규모 실측 실험 등의 방법으로 얻은 연구결과가 있다. 이러한 외국의 자료를 바탕으로 국내에서는

한국도로공사의 『고속도로터널 환기시설 설계기준(2002. 10)』에서 적정 화재 규모를 30[MW]로 설정하여 경우에 따라 증감 적용토록 하여 설계에 반영하고 있는 실정이다.

특히 연기를 제거하는 가장 효과적인 방법은 연기를 가능한 화재지점에 잡아두고서 밖으로 배출하는 일점배출방식(Single Point Extraction)이 유용하다. 실제 화재에 있어서는 화재하중 및 화재성장 속도가 매우 중요한 요소로 작용하며, 화재가 최성기에 이르기까지의 시간에 따른 화재성상은 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

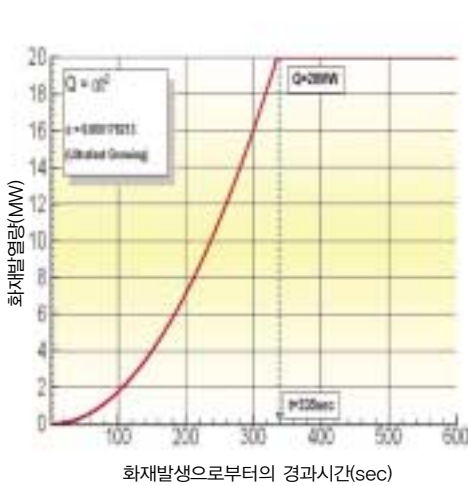
$$Q = \alpha t^2$$

Q = Heat Release Rate [MW],
t = Time from Ignition [sec]

NFPA 72에 의하면, α 값에 의한 화재성장 속도는 [그림 1]과 같다. 특히 이러한 공학적 해석을 위해서는 별도의 수치적인 연구와 실험적인 연구가 병행되는 것이 바람직하지만 모든 터널의 경우에 대한 실험을 통해 설계 자료를 제공하는 것은 불가능하므로 이미 선진국에서 개발하여 사용하고 있는 프로그램을 이용하여 해석하는 것이 바람직하다. 예를 들면 도로터널 내의 화재확산 현상을 컴퓨터를 이용하여 해석결과를 나타낸 것이 [그림 2]와 같다.

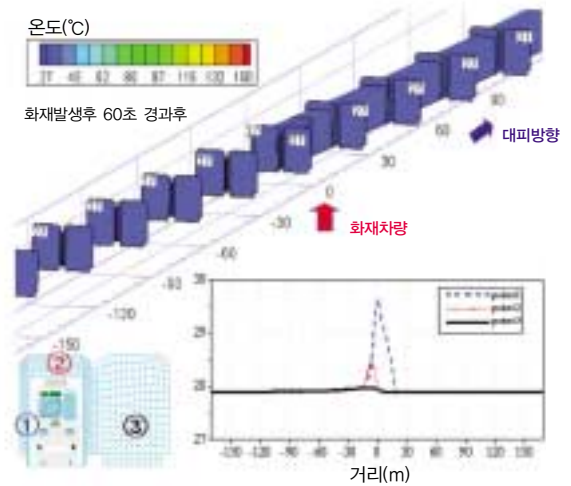
터널에서 화재가 발생할 때 인명과 구조체의 피해 및 재가동에는 많은 시간이 필요하므로 초기에 빠른 진압과 대응이 필수적이다. 이상에서 언급한 내용을 중심으로 터널의 화재안전대책에 대하여 간단하게 정리하면 다음과 같다.

가. 성능위주 설계에 의한 과학적이고 체계적인 종합안전대책을 수립하여야 한다.



■ 그림 1. 화재성장곡선

- 나. 화재강도는 터널의 종류에 따라 다소 차이는 있을 수 있으나 30MW로 하여 소방시설 및 관련 부속시설을 설치하여야 한다.
- 다. 연기를 제거하는 가장 효과적인 방법은 연기를 가능한 한 화재발생 지점에 잡아 두고서 밖으로 배출하는 일 점 배출 방식 (Single Point Extraction)으로 하여야 한다. 또한 피난동선에 특수 장비(산소호흡기 등)가 보강되어야 한다.
- 라. 비상대피소 및 피난구를 유효적절하게 설치하여 원활한 피난 및 구조 활동이 이루어지도록 하여야 한다. 몽블랑터널은 길이 방향에 따라 600m 마다 막다른 대피소가 설치되어 있는데 각각 신선한 공기와 2시간을 버틸 수 있는 방화벽을 갖



■ 그림 2. 화재 발생 1분 후의 화재현상

- 추고 있었음에도 대피소에서 인명피해가 발생한 관계로 화재 후의 권장사향은 300m 간격으로 대피소를 설치할 것을 요구하였다.
- 마. 터널 내부를 실시간 감시제어할 수 있는 통합관리시스템을 구축하여야 한다.
- 바. 도로 운송차량 보안구획을 개정, 모든 차량의 소화기 비치를 의무화하고 특수위험물 차량, 가스 저장탱크 차량 등은 별도로 통행시간을 지정하여 운행하도록 하여야 한다.
- 사. 교통통제의 신속과 중장비 지원(견인차 등), 구급지원 등 관계기관의 협조체계가 확립되어야 한다. (㉞)

참고문헌

1. 김진국, 철도터널 화재사례와 제연, 방재와 보험 2. 김복윤, 몽블랑터널 화재참사의 제연, 터널과 지하공간 3. 손봉세, 지하터널 화재에 대한 소방시설의 일반, 소방검정 4. 오해진, 터널의 화재, 터널기술 5. 손봉세, 지하철 화재 안전성능 확보대책에 관한 소고, 소방학과 교수협의회 6. 최준석 외, 터널내의 자동차 화재와 풀화재의 비교 분석, 한국화재·소방학회 7. 터널 화재, 한국건설기술연구원 8. 한국도로공사 도로터널 시설기준 9. 대구지하철 참사 대책 수립을 위한 토론회 자료, 한국방재학회 10. 서울지하철 합동점검결과 보고서, 서울 소방방재본부 11. 최춘배, 터널 피난 안전성 검토에 고려할 사항에 대한 고찰, 응도 엔지니어링(주)