

도시철도 터널구조체의 내화안정성 평가를 위한 표준시간-온도곡선 적용

Time-Temperature Curve for Fire Safety Assessment of Metropolitan Transit Tunnels

원 종 필^{1)*}

Won, Jong Pil

최 민 정²⁾

Choi, Min Jung

이 수 진²⁾

Lee, Su Jin

이 상 우²⁾

Lee, Sang Woo

Abstract

The study presents a standard time-temperature curve to evaluate the fire performance of subway tunnel structures. The central subway section is 135km long in Korea, the fourth longest in the world. The number of subway tunnels has been increasing rapidly and fire risk is proportional to the tunnel length. However, an adequate time-temperature curve for subway tunnel fires does not exist. Therefore, we studied a proposed foreign fire design model for which the heat rate is based on the traffic, and we present an appropriate time-temperature curve for Korean subway tunnels. The ISO 834 curve was used as a fire design model and the temperature distribution in the tunnel was estimated using numerical analysis. This led to a proposal for effective measures against subway tunnel fires.

Keywords : Subway tunnel, heat rate, time-temperature curve, fire design model

1. 서론

최근 서울 및 광역시들은 근교 신도시들의 개발로 인해 늘어나는 도시 인구의 교통문제를 해결하기 위하여 도시철도의 확장을 계속적으로 추진하는 추세이다. 도시철도는 그 지리적 특성상 주로 지하를 통과하는 구간이 대부분이다. 이렇게 대부분이 터널로 이루어진 도시 지하철에서의 화재는 대도시하철 화재와 유사한 대형 참사로 발전될 가능성이 매우 높다. 또한 도시철도의 방재계획은 터널을 포함한 광범위한 선까지 그 범위를 넓히고 있으며 국내에서는 대도시하철화재 참사를 계기로 지하 공간 방재에 대한 필요성이 한층 높아지고 있다. 도시철도의 지하구간은 다른 구조물과 비교하여 화재발생시 화재진압 및 인명구조에 본질적으로 취약한 구조적 특성을 내포하고 있는 대표적인 구조물이다. 2005년까지 총연장 600km를 상회할 것으로 예상됨에 따라 도시철도와 같은 대중교통수단의 경우 지하공간의 특성상 화재 발생으로 인한 인명피해가 크고 그 피해는 상상을 초월하게 된다. 최근 국내와 해외에서 발생한 사건들을 보면 일부 극단적인 테러단체 및 정신이상자들이 대중교통수단을 목표로 매우 다양한 형태의 비인간적인 테러를 만행하고 있는 것이 현실이다. 그에 대한 대비책으로 스테인레스 재질의 불연성

(난연성) 내장재로 교체한 개조 전동차는 휘발유와 같이 유독가스와 열기로 인하여 밀폐된 전동차 객실 내부의 치명적인 피해는 피해갈 수 있을 것이라 예상된다. 하지만 방재계획의 대부분은 대피 및 소화에 대한 대책이 전부이다(소방방재청, 도로터널의 화재안전기준(NFSC 603)). 그러나 유럽 등에서의 철도사고에서 보듯이 구조물이 붕괴되어 교통차단과 같은 사회적인 혼란이 매우 크게 일어나고 있다. 특히 침매터널, 쉘드터널 등에서는 그 필요성이 크다고 할 수 있다(유지오, 2003). 본 연구에서는 국내 도시철도 터널구간 내에서 화재시 구조체의 안정성 확보를 위한 시간-온도곡선에 관한 설계화재모델을 제시하였다. 제시된 설계화재모델은 향후 도시철도 터널내 구조체의 안정성 확보에 유용한 정보가 될 것이다.

2. 터널 화재의 특성

터널화재가 발생할 경우 터널내부는 외부와의 통로가 한정되고 고립된 공간특성을 가지기 때문에 화재로부터 발생하는 열과 연기 등의 다양한 연소생성물은 터널 사용자와 구조물의 안전에 심각한 문제를 야기하고 있음을 알 수 있다(안주선, 2003). 도시철도 터널에서 발생하는 화재의 최고온도와 최고온도 도달시간, 지속시간 등은 화재

1) 정회원, 건국대학교 사회환경시스템공학과 교수

2) 건국대학교 사회환경시스템공학과 대학원생

* Corresponding author : jpwon@konkuk.ac.kr 02-450-3750

• 본 논문에 대한 토의를 2010년 6월 30일까지 학회로 보내주시면 2010년 9월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

의 상황에 따라 크게 달라진다. 외국에서는 식물화재실험을 통하여 얻어진 열방출율을 토대로 정립된 표준의 시간-온도곡선을 도출하여 구조체의 설계에 실제 적용하고 있다. 기존 표준시간-온도곡선에는 대략 5가지가 있는데 일반적으로 건축 재료의 화재에 대한 내력을 알기 위하여 시험용으로 표준화한 ISO 834 curve가 있다(박경환, 2005). 석유화학공장의 위험물 저장지역이나 석유 및 화학물질로 기인되는 화재가 일어날 수 있는 자동차, 유조차 및 유조선 등과 같은 기기와 공장 같은 건물의 화재 시 적절한 구조적인 내화성능의 필요에 의해 만들어진 Hydrocarbon curve 곡선이 있다. Eureka 499 프로젝트의 결과물로 독일에서 개발되었고 현재 유럽에서 가장 많이 준용되고 있는 RABT curve 화재곡선이 있는데 RABT curve는 초기 5분 내에 1,200°C까지 도달하며 30분간 지속되고 110분 동안 냉각되는 형태이며 최고온도는 특정한 경우에 따라 60분까지 연장될 수 있다. 또한 Hydrocarbon curve로부터 곡선의 온도를 상향조정한 시간-온도곡선인 Hydrocarbon modified curve가 있다. Hydrocarbon modified curve 온도곡선의 온도형상은 Hydrocarbon curve와 같지만 최고점의 온도가 200°C이상 높은 것이 특징이다. RWS curve는 45,000 l 급 대형 탱크로리의 유류화재시를 상정한 것으로서 화재 발생 후 60분 만에 최고온도가 1,350°C에 달하는 가장 엄격한 규정이다(유지오, 2002).

3. 국내 도시철도 터널현황 및 시간-온도곡선 설계모델제안

서울시 도시철도 1호선은 국내최초의 도시철도로써 1971년 착공하여 1974년에 개통하였다. 1990년대 이후 건설한 2기 도시철도 5, 6, 7, 8호선은 1986년 아시안게임, 1988년도 서울 올림픽을 거치면서 급격히 늘어난 교통량을 처리하기 위하여 5호선, 7호선의 강북구간 및 8호선 잠실구간은 1990년 착공하여 1996년까지 완전 개통하였다. 서울메트로가 운영하는 도시철도 1~4호선의 2005년 수송인원은 14억3641만4000명으로서 하루 평균 393만 5000명이 지하철을 이용했다. 이는 전년 같은 기간에 비해 0.9% 감소한 것으로 주5일 근무제 확대 실시 등이 약간 영향을 미친 것으로 분석된다. 하루 전체 수송인원 중 절반에 가까운 192만명을 실어나르는 도시철도 2호선(48.7%)과 4호선(21.3%), 3호선(18%), 1호선(12%)이 그 뒤를 이었다(국토해양부 주요통계, 2007). 서울 도시철도의 총 길이는 304km로 동경, 뉴욕, 런던 다음으로 세

계 4위로 규모면에서는 세계적이라 할 수 있다. 현재 국내에서 운영되고 있는 도시철도 전동차 길이는 1대 당 19.5m이고 운행속도는 도시철도 노선에 따라서 차이가 있으나 일반적으로 80km/h이다.

지하철과 관련하여 국내에서 발생한 사고를 중심으로 원인을 분석한 결과 승객이 있는 지하철 차량 자체 내부 문제로 인하여 발생한 화재사고는 발생하지 않은 것으로 나타났다(유지오, 2003, Steinert C., 1994). 대구지하철 화재를 비롯한 국내 대표적인 화재원인을 구분하여 분석한 결과 방화에 의한 화재는 대구지하철 화재가 처음이며 근원적인 문제점은 전동차의 안전성 및 역사 설계시 화재, 피난안전에 필요한 공간적인 특성을 설계에 반영시키지 않았다는 것이다. 다른 화재의 발생원인 중 가장 많은 분포를 보인 것은 전기적 원인 및 공사로 인한 화재로 나타났으며 또한 사고발생의 주요인으로 주로 케도나 작업자의 부주의에 의한 터널굴착공간에서 발생하는 사고가 대부분을 차지하고 있다.(차철현 등, 1999, 서강천 등, 2004) Table 1 및 2는 각각 지하철로의 거리, 연도별 지하철 사고통계를 나타내고 있다. 1996년부터 2006년까지 꾸준히 증가하고 있으며 2003~2004년은 대폭 증가한 것을 볼 수 있다.

최근 세계 각국에서 설계 또는 개통한 도시철도의 설계에 적용한 화재강도를 살펴보면 영국 Jubilee line의 경우 12km의 단선터널로 17.6MW의 화재강도를 적용하고 있으며 노선의 본선 및 승강장의 화재에 대해서는 기본적으로 push-pull 방식으로 대처하도록 하고 있으며 댐퍼 및 환기팬의 작동에 matrix 구조의 제어를 실시하는 환기방식이 특징이다. 미국 Boston transit way 노선의 경우 2.5km의 노선으로 4개의 역사를 가지고 있다. 화재강도는 20MW를 적용하고 있으며 환기방식은 20MW의 화재규모를 적용시킨 제트팬을 시공하고 push-pull 방식으로 환기 제어시스템을 구성하였다. 미국의 LA 노선은 29km의 노선에 16개의 역사를 가지고 있으며 적용화재 강도는 21.4MW로 push-pull 방식 및 배기만 하는 경우 등 다수의 방안에 대해 환기 검토를 실시하였다. 또한 홍콩 MTR 노선의 경우 길이 43.2km의 신공항 노선으로 적용 화재강도는 14MW이며 push-pull 방식의 환기방식을 적용하였다(서강천 등, 2004).

도시철도 터널에 대한 열방출율에 관한 연구는 활발히 진행되고 있지 않는 상황이다. 그 중 신뢰성이 높은 식물실험 중의 하나는 1970년대 독일에서 도시철도 객차의 열방출율을 측정된 실험이다(박경환, 2005). Fig. 1은 독일 지하철 객차의 열방출율을 나타내고 있다. 도시철도

Table 1 Length of railroad(국토해양부 주요통계, 2007)

Years	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
Length of railroad	1,473	1,608	1,659	1,714	1,726	1,727	1,724	1,779	4,636	4,835	5,354

Table 2 Subway accident by year(국토해양부 주요통계, 2007)

	Total	1998	1999	2000	2001	2002
Total	38	7	6	7	14	4
Subway accident	3	-	-	1	1	1
Equipment accident	17	3	-	4	9	1
Fire accident	18	4	6	2	4	2

Table 3 Heat release rate results of subway by actual test(Road Safety on tunnel)

	Heat release rate (MW)	Maximum temperature (°C)	Continuous time of Max.temperature (min.)
EUREKA 499 (German Intercity-passenger railway car)	13	720	25
EUREKA 499 (German subway aluminum car)	35	1050	-
EUREKA 499 (German subway steel car)	NA	680	-

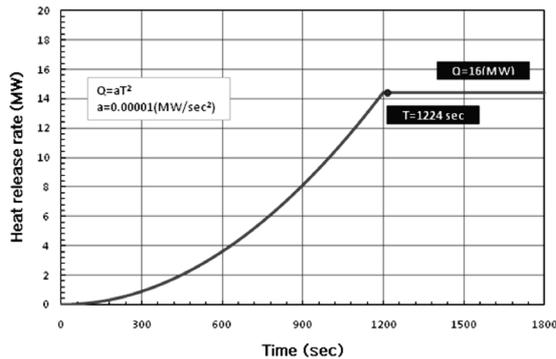


Fig. 1 Heat release rate time-curve by actual test results in Germany subway(박경환, 2005)

객차는 길이 18m, 폭 2.8m, 높이 3m이며 좌석의 수는 40개이며 폴리우레탄 폼으로 피복되어 만들어졌다. 도시철도 객차의 열방출율은 발화 후 5분 정도에서 최고 15 MW에 도달하였으며 화재지속시간은 약 180분 정도였다. Table 3은 EUREKA 499에서 지하철을 대상으로 실험한 결과를 나타내고 있다.

위의 내용을 토대로 다음과 같은 국내 도시철도 터널 화재시 시간-온도곡선을 제안하여 보았다. 도시철도 터널에 설계화재강도로 화재환경을 모사했을 때 발화 후 20분 이내 최고 열방출율인 25MW에 도달하는 것으로 나타났다. 이는 500~600°C 정도의 온도를 나타내며 120분까지 온도가 지속되는 경향을 나타냈다. 외국의 경우 차량의 재질이 용융점(약 659°C)이 낮은 알루미늄인데 비해 우리나라의 열차는 그보다 높은 용융점(약 1427~1540°C)을 갖는 스테인레스 재질이 대부분이다. 따라서 용융

점이 낮은 알루미늄은 차량의 지붕이 녹아 개방상태가 되어 화염이 천장부에 직접 닿는 반면 스테인레스의 경우 차량 지붕이 용융되기 전에 창문, 문 등의 개구부로 화염이 분출되거나 천장부에 직접 닿지 못하기 때문에 알루미늄에 비해 낮은 열방출율을 가지므로 국내 실정에 맞게 수정하였다.

이에 본 연구에서는 위에 기술한 국내 도시철도 터널구간의 통행량과 현황을 고려한 열방출율, 최고온도 도달시간 및 지속시간 등을 기초로 국내의 도시철도 터널내 표준시간-온도곡선으로 화재발생 후 대형화재로 성장하는데 긴 시간이 필요한 ISO 834 curve가 가장 적합하다고 판단된다.

4. 도시철도터널내 화재시 구조체의 온도분포 평가를 위한 수치해석적 검토

도시철도 터널 단면은 저면부가 10.5m이며 터널저면에서 천정부까지의 높이는 5.5m로 결정하였다. 열원은 천정부에서 1.5m 아래의 위치이며 저면부에서 4m 위에 열원위치를 설정하였다. 또한 터널내부 콘크리트 라이닝은 0.3m로 하였으며 방수시트 층과 숏크리트 층 0.07m을 설정하였다.

구조체의 온도분포는 콘크리트 라이닝(0.3m), 숏크리트(0.07m), 암반부근, 락볼트와 방수시트에 대하여 나타내보았다. ISO 834 curve에 의한 해석시작 후 터널 천장부근의 온도는 301.8°C까지 상승하였으며 10분 후에는 약 471.9°C, 30분후에는 약 665.2°C까지 도달하였다. 천정부로부터 10cm 부근의 콘크리트 라이닝은 30분 후에 평균 약 600.7°C에 도달하였는데 이 온도는 콘크리트가 구조적인 성능을 상실하는 온도인 600°C에 근접한 온도로 화재 후 30분 이내에 콘크리트 라이닝이 구조적인 성능을 상실할 것이다. 그 후 콘크리트 라이닝의 20cm, 30cm부근도 화재시작 30분 후 약 10분 간격으로 600°C에 도달하였으며 콘크리트라이닝의 천정부근은 화재발생 후 45분 안에 그 구조적인 성능을 상실하여 화재로 인한 피해 가능성을 예측할 수 있었다. 숏크리트의 경우도 마찬가지로 역학적인 기능을 상실하게 되는 임계온도인 600°C에 약 40분후에 도달하게 된다. 방수층의 고온 노출시 녹는점은 150°C이고 락볼트의 녹는점은 약 500~600°C이므로 방수층의 경우 화재 발생시 초기 5분 이내에 녹기 시작할 것이며 락볼트는 암반부근의 온도가 300°C이하로 추정되므로 화재의 영향에는 노출되지 않을 것이다. 터널 내부로 들어갈수록 화재의 영향을 적게 받게 되는데 Table 4는 국내 도시철도터널의 표준시간-온도곡선으로 제안된 ISO 834 curve에 의한 수치해석을 통한 도시철도터널 내부온도를 나타내고 있으며 해석 시작 후 5분, 10분, 20분, 30분, 40분, 90분 후의 터널구조체내의 온도분포

Table 4 Internal temperature distribution of subway tunnel by numerical analysis

Time	Heating temperature (°C)	0cm (°C)	10cm (°C)	20cm (°C)	30cm (°C)	34cm (°C)	37cm (°C)	Rock (°C)
0:00	0	0	0	0	0	0	0	0
0:05	349	301.8	271.2	243.2	208.2	179.9	153.2	116.5
0:10	576	471.9	462.7	492.3	427.3	397.3	351.6	124.5
0:20	650	580.6	523.1	507.3	497.1	476.2	437.5	154.2
0:30	842	665.2	592.5	526.3	509.3	487.3	457.1	167.2
0:40	850	743.6	667.3	643.7	587.9	546.1	462.3	183.4
0:50	925	853.7	735.8	682.3	658.5	581.6	509.6	245.8
1:00	945	884.2	779.9	709.3	682.3	608.8	554.2	273.5
1:10	1000	891.3	783.4	716.3	602.4	601.5	583.6	296.1
1:20	1049	907.2	805.3	753.2	683.4	667.2	607.6	297.2
1:30	1060	952.6	827.3	792.3	751.2	687.1	622.1	316.7
1:40	1080	974.4	843.4	802.3	779.4	724.3	653.6	318.2
1:50	1082	982.4	857.2	829.2	800.9	754.2	703.6	312.2
2:00	1110	996.6	897.1	834.3	814.6	768.2	745.6	312.9

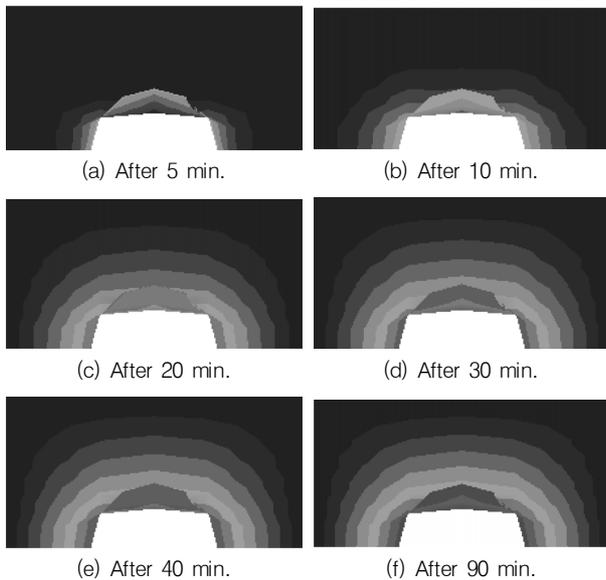


Fig. 2 Temperature distribution of subway tunnel under proposed standard curve

결과는 Fig. 2와 같다.

도시철도 터널에서 제안했던 설계화재모델은 화재시 발생하는 발열량은 약 20MW로 추정되며 최고온도는 약 500~600°C이며 초기 5분 안에 20MW(400~500°C) 정도 발열된다. 또한 화재지속시간은 약 120분이다.

5. 결론

본 연구에서는 국내 도시철도 터널의 통행량, 차량 종류 등을 고려한 열방출율을 기초로 외국에서 제시된 시간-온도 곡선을 검토하였으며 국내 실정에 맞는 설계화재 모델을 제시하였다. 또한 제시된 설계화재모델에 대해 수

치해석을 통하여 화재시 도시철도 터널 구조체의 온도분포를 산정하였다. 결과를 정리하면 다음과 같다.

1. 국내 도시철도 터널의 설계화재강도는 약 20MW로 제안되었으며 이것은 500~600°C정도의 온도를 나타내며 120분까지 지속되는 경향을 볼 수 있었다. 이에 본 연구에서는 국내 도시철도의 통행량과 현황 등을 고려한 열방출율, 최고온도 도달시간, 지속시간 등을 기초로 국내의 도시철도 터널의 시간-온도 곡선으로 ISO 834 curve가 가장 적합하다고 할 수 있다.

2. 제안한 국내 도시철도의 표준시간-온도곡선인 ISO 834 curve에 따른 수치해석을 실시하였다. 도시철도터널 내부 온도분포를 측정하기 위하여 천장부의 콘크리트라이닝부분을 10cm간격으로 3등분하였고, 숏크리트 부분은 천정으로부터 약 33cm, 37cm 떨어진 곳에서 각각의 온도분포를 측정하였다. 콘크리트라이닝과 숏크리트는 화재 후 약 600°C의 온도에서 기능을 상실하게 되는데 대부분 20~40분 안에 이 온도에 도달하게 된다. 따라서 도시철도 터널내 화재시 터널내 구조체의 안정성에 영향을 미칠수 있어 그에 알맞은 내화대책을 수립하는 것이 필요하다.

감사의 글

이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임. (No. 2009-0071039).

참고문헌

- 소방방재청, “도로터널의 화재안전기준(NFSC 603)”
- 차철현, “최근의 터널내 화재사고와 대책”, 한국터널공학회지,

-
- Vol. 4, No. 3, 1995, pp.50-57.
3. 국토해양부, 주요통계 2007년
 4. 유지오, 김윤선, 김치경, 이동호, “터널사고 조사 연구”, 2002, pp.191-196.
 5. 박경환, “터널화재 설계강도 기준 및 영향요인에 관한 연구”, 서울시립대학교 석사학위논문, 2005.
 6. 차철현, 김진국, “지하철 터널에서의 제연”, 공기 조화, 위생 공학 논문집, 제28권, 제6호, 1999, pp.425-431.
 7. 안주선, “지하철 차량 화재에 관한 연구”, 호서대학교 안전공학과 석사 학위 논문, 2003, pp.1-18.
 8. 유지오, “국내외 지하철 사고사례”, 대한설비공학회, 대구지하철 설비관련 기술토론회, 2003, pp.5-14.
 9. 서강천, 우종태. “지하철 터널구조물의 유지관리”, 한국구조물진단학회 제8권, 제1호, 2004, pp.15-23.
 10. PIARC, “Road Safety on Tunnel”, PIARC Committee on Road Tunnel, 1995.
 11. Steinert C., “Smoke and heat production in tunnel fires”, The international conference on fires in tunnels Boras, Sweden, October 1994.
- (접수일자 : 2010년 1월 19일)
(심사완료일자 : 2010년 2월 4일)

요 지

본 연구는 도시철도 터널내 화재시 구조체의 내화성능을 평가하기 위한 기준을 제시하고자 실시하였다. 현재 국내 도심의 지하철 터널 구간은 135km로써 그 규모가 세계 4위이며 대도시들의 도시철도 터널건설의 증가와 그 연장이 길어짐에 따라 터널 내 화재사고가 갈수록 높아지고 있는 상황이다. 하지만 국내에는 도시철도 터널 화재에 대한 내화성능평가에 기본적으로 적용되는 시간-온도 곡선이 없다. 따라서 본 연구에서는 국내 도시철도 터널의 통행량, 차량 종류 등을 고려한 열방출율을 기초로 외국에서 제시된 시간-온도 곡선을 검토하였으며 국내 실정에 맞는 설계화재 모델을 제시하였다. 또한 제시된 설계화재모델에 대해 수치해석을 통하여 화재시 도시철도 터널 구조체의 온도분포를 산정하였다.

핵심 용어 : 도시철도 터널, 열방출율, 시간-온도곡선, 내화설계모델
