

철도터널내 화재시 내화성능 평가를 위한 기준 제안 및 화재 온도 평가

Standard Proposed for Fire Safety Evaluation of Railway Tunnels and Evaluation of Fire Temperature

원종필^{1)*}
Won, Jong Pil

최민정²⁾
Choi, Min Jung

이수진²⁾
Lee, Su Jin

이상우²⁾
Lee, Sang Woo

Abstract

The number of railway tunnels has been increasing rapidly. Although fires in long railway tunnels are rare, the consequences can be devastating. Prior to this study, there were no adequate time-temperature curves for the fire safety assessment of Korean railway tunnels. We studied a standard foreign time-temperature curve for which the heat rate is based on the traffic and the types of vehicles. We then proposed a hydrocarbon curve as a fire design model for railway tunnels in Korea. We examined the implications of this proposed model on railway tunnel structures using numerical analysis.

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

1. 서론

산업의 발달과 꾸준한 경제성장으로 인구이동과 물류 이동량이 증대되었고 지역간 균형발전의 일환으로 교통망의 대용량화와 고속화 및 직선화가 지속적으로 요구되고 있다. 일반적으로 철도터널내 열차화재 발생확률은 매우 적지만, 일본의 북방터널 열차화재, 유로터널 열차화재와 오스트리아 산악철도 터널화재 등에서도 알 수 있듯이 철도에서의 열차화재사고는 인명 피해와 사회적 혼란에 따른 큰 손실을 초래하는 대형 참사로 이어지고 있어, 단순히 통계에 근거한 발생가능성보다는 안전상의 심각한 위험성을 깊이 인식해야 한다(Diamantidis et. al., 2000). 우리나라는 국토의 70%가 산지인 지형의 특수성으로 인해 장대터널을 통과하는 열차운행이 지속적으로 증가하고 있는 상황이다. 특히, 경부고속철도는 총 98개의 터널이 건설되었으며 이중 3km이상의 장대 터널이 17개이고, 5km이상의 터널도 10개나 있어 이에 대한 특별관리가 요구된다(이승철 등, 2004). 더불어 장거리 고속 교통수단의 일환으로서 고속철도가 지나는 선로의 엄격한 선형 조건을 감안한다면 수십 km에 달하는 장대 철도터널을 이용한 철도망 확장은 앞으로 꾸준히 있을 전망이다. 터널은 그 특성상 타공간과 격리되어 있는 폐쇄적

인 공간이므로 화재 발생시 대량의 인명피해가 일어날 수 있는 위험을 안고 있다.

특히 장대 터널의 경우에는 그 길이가 10km 이상으로 화재열차의 자력 탈출이 불가능한 경우가 대부분이기 때문에 터널 내에 화재를 대비한 방안이 필수적으로 요구된다(왕중배 등, 2003). 그러나 국내 철도터널 구조체의 안정성을 확보하기 위한 화재설계모델에 대한 자료는 미흡한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 국내 철도터널의 화재에 따른 구조체의 안전성 확보를 위하여 내화성능평가에 대한 기준을 확보하려하며 이를 위하여 국내 철도터널의 차량별 통행량과 종류 등을 고려한 열방출율을 토대로 국내 철도터널 실정에 맞는 표준시간-온도곡선을 제안하였다. 또한 수치해석을 통하여 철도터널 화재시의 온도분포를 검토하였다.

2. 터널 화재의 특성

터널화재가 발생할 경우 터널내부는 한정되고 외부와의 통로가 고립된 공간특성을 가지기 때문에 화재로부터 발생하는 열과 연기 등의 다양한 연소생성물은 터널 사용자와 구조체의 안전에 심각한 문제를 야기하고 있음을 알 수 있다. 또한 화재시 급격한 열방출에 따른 구조체의 손

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.

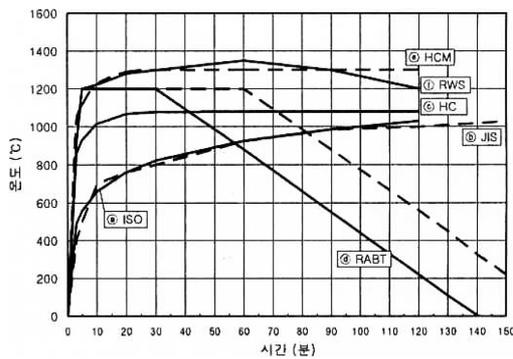


Fig. 1 Standard time-temperature curve(Haukur Ingason, 2007)

상은 구조물의 붕괴를 야기할 수 있다(유지오 등, 2002). 터널에서 발생하는 화재의 최고온도와 최고온도 도달 및 지속시간 등은 화재의 상황에 따라 크게 달라지지만 Fig. 1과 같이 터널 화재시 시간-온도와의 관계를 나타내는 기준으로 나눌 수 있다. ①은 ISO 834 시간-온도곡선이며, 이 곡선은 건축자재들을 시험하여 얻은 결과물로서 이 곡선의 중요한 특징은 초기 5분 이내에 538°C 이상으로 급상승하며 10분 이내에는 705°C까지 상승하게 된다. 30분후에는 842°C까지 도달하게 되며 140분 이후부터는 시간당 41.5°C로 상승하며 2시간 이후에는 약 1260°C까지 도달하게 된다. ③의 JIS 시간-온도곡선은 일본에서 ISO 834 곡선을 수정하여 사용하는 곡선이다. ④의 탄화수소(HC) 시간-온도곡선은 석유화학공장의 위험물 저장지역이나 석유 및 화학물질로 기인되는 화재가 일어날 수 있는 자동차, 유조차 및 유조선 등과 같은 기기와 공장 같은 건물의 화재시 적절한 구조적인 내화능력의 필요에 의해 만들어진 곡선이다. 스웨덴에서는 RWS 곡선이 적용되지 않는 터널의 화재 방호를 위한 안전율을 결정하기 위해 최대온도 1,100°C까지 이 곡선을 사용한다. ②의 RABT 표준시간-온도곡선은 유럽에서 가장 많이 사용되고 있으며 독일의 도로터널 설비 및 운용에 관한 지침에 적용되고 있는 것으로 화재 발생 후 5분 만에 1,200°C까지 온도가 급상승하여 60분간 지속되는 형태를 띈다. ⑤의 Hydrocarbon modified 곡선은 Hydrocarbon 곡선으로부터 온도를 약 200°C 상향조정된 표준시간-온도곡선이다. ⑥의 RWS(Rijkswaterstaat) 표준시간-온도곡선은 최악의 상황에 대한 계획안으로서 연료나 석유를 채운 유조차에 화재가 일어났을 때 열방출이 300MW의 화재하중을 가지며 120분 동안 지속되는 화재를 바탕으로 두고 있으며 Runehamar 터널 실험에 따라 보완되었다(Haukur Ingason, 2007).

3. 국내 철도터널현황 및 시간-온도곡선 설계제안 모델

철도 차량은 그 용도에 따라 승객용 차량과 수송용 차

Table 1 Status of domestic railways (MLTM Key statistics, 2007)
(단위 : 개소)

구분	합계	1km 미만	1~5km 이상	5km 이상	총연장(km)
계	572	497	70	5	306.684
고속철도	47	24	20	3	77.011
일반철도	525	473	50	2	229.673

Table 2 Status of railway distance and double-tracked at domestic (MLTM Key statistics, 2007)

구분	'01	'02	'03	'04	'05	'06	'07
철도거리(km)	3,125.3	3,129.0	3,140.3	3,374.1	3,392.0	3,392.0	3,399.1
복선화거리(km)	1,003.8	1,003.8	1,028.6	1,318.2	1,355.0	1,375.7	1,403.5
복선화율(%)	32.1	32.1	32.7	39.1	39.9	40.5	41.3

Table 3 The ratio of double-tracked at advanced countries(International Union of Railways, by the end of 2007)

구분	프랑스	독일	일본
연장(km)	29,286	34,128	20,052
복선화율(%)	55.2	49.9	40.2

량으로 구분될 수 있다. 특히 수송용 차량의 경우 탱크로리와 사각형 컨테이너를 장착한 것으로 나눌 수 있다. 탱크로리 차량은 위험물과 화학약품 등을 이송하는데 주로 사용되는데 화재시 구조체에 크게 영향을 미칠 수 있다(서강천 등, 2004). Table 1은 2007년도를 기준으로 국내 철도터널 현황을 나타내고 있으며, 철도터널도 총연장이 장대화 추세를 나타내고 있다(국토해양부 주요통계, 2007).

국내 전체 철도는 2000년 영업선로 총연장 3,123km에서 2006년에 총연장 3,392km로 증가하였다. 이 중에서 터널이 차지하는 비중은 2000년 455개소, 213km(총연장중 6.8%)에서 현재에는 577개소 358km(총연장중 10.6%)로 1.7배 이상 증가하였다(국토해양부 주요통계, 2007). 예전의 철도가 지형을 따라 굴곡과 경사가 심한 철도라면 최근에는 철도의 고속화와 직선화가 추진되고 지형적인 특성에 의해 장대터널의 수요가 증가하는 경향이 있어 차후 철도에서 터널이 차지하는 비중은 점차적으로 증가될 것이다(이승철 등, 2004). 철도터널은 세계적으로 도로터널에 비해 화재발생빈도가 낮기 때문에 연구 및 규정의 제정이 늦어지고 있다. 하지만 앞서 언급한 세계 각국의 철도터널 화재사태에서 볼 수 있듯이 최근 철도의 고속화와 장대화된 철도터널의 수요가 증가하는 현실을 고려할 때 터널에서 열차 화재가 발생할 가능성이 증가하고 있다. Table 2는 국내 철도거리현황을 나타내고 있다.

철도의 거리와 복선화는 열차운영 횟수 증가 및 고속화

에 따른 선로용량 확충으로 수송능력 증강, 물류비용 절감을 위해 추진하고 있으며, 철도기반시설에 대한 질적 수준을 나타내는 지표로 활용되고 있음을 나타낸다. Table 2와 같이 2007년도 말 현재 철도의 복선화율은 약 41.3%이며 6년 동안 연평균 약 1.5%씩 증가하였다. 2010년에는 55.8%, 2015년에는 64.1%를 목표로 추진 중에 있다. Table 3은 선진국의 복선화율을 나타내고 있다.

국토해양부에서 제공하는 우리나라 객차와 화차 보유현황을 살펴보면 다음과 같다. 객차는 1907년도에 국내최초로 초량공장에서 객차 4량을 제작하였으며 2006년까지의 객차 보유 총 합계는 1,183대로 통계된다. 국내 화물차는 1960년대 제 1차 경제개발 5개년계획의 일환으로 차관에 의한 화물차를 도입하기 시작하여 대량수송 및 속도향상을 위하여 1971년도에는 50톤 화차 595량을 제작하였다. 이에 2006년까지의 화차 총 보유합계는 13,178대로 나타났다. 1996년부터 2006까지 화차는 지속적으로 증가와 감소를 반복하는 현상을 볼 수 있고 객차와의 보유량을 비교하여 보았을 때 그 수치가 현저히 많은 것을 알 수 있다. 그에 반해 객차의 보유량은 2000년 11월 1일 비둘기호의 열차운행 종료와 2004년 4월 1일 KTX 개통에 따른 통일호 운행의 종료로 인해 그 숫자가 감소하고 있는 추세이다(국토해양부 주요통계, 2007).

철도터널의 시간-온도 곡선은 유류물질의 수송현황이 증가함에 따라 이에 가장 적합한 탄화수소(HC) 시간-온도곡선을 적용하는 사례가 많아지고 있다(박경환, 2005). 또한 국내 열차의 몸체는 대부분 스테인리스로 구성되어 있으며 그 용융점이 높아(약 1427~1540°C) 고온에서 견딜 수 있다(유지오 등, 2002). 따라서 화재가 일어나도 내화성을 충분히 발휘할 수 있으며 화재 발생시 그 최고 내열온도는 900°C에 달한다. 반면 상대적으로 용융점이 낮은 (약 659°C) 알루미늄 몸체인 경우 내부의 화염은 천장의 알루미늄을 녹여 개방상태를 조성한다. 따라서 화염은 창문을 통해 배출되지 않고 직접 터널의 천장으로 배출되어 높은 온도를 기록하게 된다(Koichi, 2002). 국내에서는 객차 실물실험이 이루어지지 않아 위에서 검토한 국외의 실물실험을 토대로 하였으며 국내의 객차용 열차의 수송량과 화물수송용 열차현황을 비교해보았을 때 화물 열차의 수송량과 차량이 상당히 많고 그 추세가 점점 증가하고 있다. 그러나 철도터널과 관련하여 국제철도연맹(UIC)은 아직까지 내화성능에 대한 구체적인 요구사항은 제시하고 있지 않지만 위험성이 높은 물질을 수송하는 경우 탄화수소(HC) 시간-온도 곡선을 사용하도록 권고하고 있는 수준이다(Peacock et. al., 1999).

유럽의 경우 화물용 열차의 실물실험결과에 의하여 얻어진 화재강도 및 화재하중은 35MW이다(Research results passenger trains, phase I). 외국의 경우 차량의 재질이 알루미늄 재질로써 우리나라의 스테인레스 재질보다 용융

점이 낮아 실물실험시 높은 열방출율을 기록한다. 따라서 우리나라의 화물용 열차의 화재강도는 이보다 낮은 30MW로 최고온도는 약 700~900°C, 화재 지속시간은 120분으로 제안하였다. 그러나 국제철도연맹에서 권고하고 있는 탄화수소(HC) 시간-온도곡선보다 최고 온도가 낮지만 그보다 조금 덜 가혹한 고온 환경인 ISO 834곡선의 보다는 높고 화재 경향도 탄화수소(HC) 곡선에 더 가까운 것으로 보아 탄화수소(HC) 곡선이 국내 철도터널의 표준시간-온도곡선으로 가장 적합하다고 할 수 있다.

4. 철도터널 화재 제안곡선에 의한 철도터널내 구조체의 온도분포

철도터널의 화재시 온도분포를 산정하기 위하여 30cm 두께의 콘크리트라이닝과 7cm의 슛크리트, 방수시트와 락볼트로 형성되어있는 터널내부의 수치해석을 실시하여 내부 구조체의 온도 분포를 예측해 보았으며 그 단면 형상은 Fig. 2와 같다. 수치해석은 유한요소해석 프로그램인 Visual FEA를 사용하였으며 화재 시작 후 5분, 10분, 20분, 30분, 40분, 90분 후의 터널내부 온도분포를 예측해 보았다.

해석시작 후 시간이 경과하면서 구조체 표면온도와 터널내 부근의 온도가 점차 증가하는 현상을 보였다. Table 4와 같이 터널 천장부의 온도는 5분후 약 547.2°C까지 상승하였고 10분 후에는 약 572.1°C, 90분후에는 약 922.7°C까지 도달하였다. 터널 천장부로부터 10cm 지점의 콘크리트라이닝 부근은 26분 후에 평균 600.7°C에 도달하였으며 이 온도는 콘크리트의 폭발이나 폭렬을 일으킬 수 있는 온도인 600°C에 근접한 온도로 화재 후 26분 후부터 폭렬을 일으킬 것이다. 그 후 터널 천장부로부터 20cm, 30cm 되는 콘크리트 라이닝 지점 부근도 화재시작 26분 후 약 10분 간격으로 600°C에 도달하였다. 따라서 터널 천장부근의 콘크리트라이닝 폭렬은 화재발생 후 40분 이내에 발생하며 화재로 인한 피해 가능성을 예측할 수 있었다. 또한 일반적으로 철도터널에서 사용되는 방수층의 경우 고온에 노출시 녹는점이 150°C이고 락볼트는

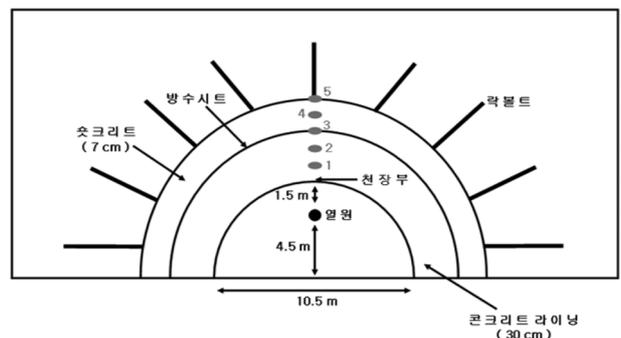


Fig. 2 Railway tunnel structure

Table 4 Internal temperature of railway tunnel by numerical analysis

시간	가열온도(°C)	천장부온도(°C)	10cm(°C)	20cm(°C)	30cm(°C)	34cm(°C)	37cm(°C)	암반부온도(°C)
0:00	0	0	0	0	0	0	0	0
0:05	743	547.2	540.2	526.3	528.0	441.9	428.6	116.5
0:10	1034	586.3	580.2	719.6	571.9	482.7	437.3	124.5
0:20	1059	621.8	597.6	756.3	580.6	534.5	471.2	154.2
0:30	1098	863.0	624.7	618.3	602.5	599.7	492.6	167.2
0:40	1100	867.6	859.3	807.1	667.3	600.9	600.7	183.4
0:50	1100	871.3	857.0	811.3	672.9	620.9	600.9	245.8
1:00	1100	899.6	883.4	824.2	679.9	626.3	618.2	273.5
1:10	1100	909.3	887.2	834.2	683.4	628.1	619.2	296.1
1:20	1100	916.4	904.2	876.3	706.1	633.4	623.6	297.2
1:30	1100	922.7	914.9	882.6	710.4	638.3	629.4	316.7
1:40	1100	943.9	927.3	904.3	716.9	639.4	638.4	318.2
1:50	1100	952.8	934.7	951.9	731.9	638.8	638.1	312.2
2:00	1100	979.3	957.3	986.7	731.8	654.4	647.2	312.9

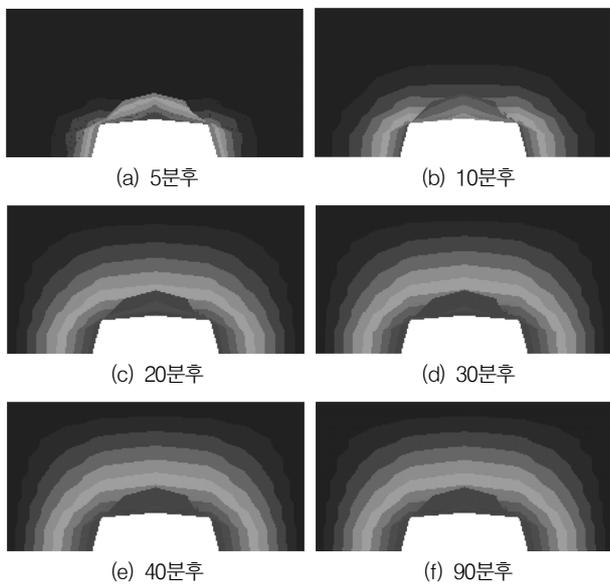


Fig. 3 Railway tunnel temperature distribution of the design proposed model for railway tunnels with time

약 500~600°C이다. 따라서 화재 발생시 방수층의 경우 초기 5분 이내에 녹기 시작할 것이며 락볼트는 암반부근의 온도가 300°C이하로 추정되므로 화재의 영향에는 노출되지 않을 것이다. 터널내부로 들어갈수록 화재의 영향을 적게 받게 되는데 슛크리트의 경우 터널천장부에서 34cm떨어진 지점은 약 15분 후에 역학적인 기능을 상실하게 되는 임계온도인 600°C에 도달하게 된다. Fig. 3은 철도터널 설계제안모델 적용시 시간에 따른 온도분포를 나타낸다.

5. 결론

본 연구에서는 국내 도로의 통행량, 차량 종류 등을 고

려한 열방출율을 기초로 외국에서 제시된 시간-온도 곡선을 검토해 보았으며 설계화재 모델을 제시하였다. 철도터널의 설계화재모델은 탄화수소(HC) 시간-온도곡선이 제시되었으며, 제시된 곡선에 따른 유한요소해석을 통하여 터널 구조체의 열에 따른 구조안전성능을 검토하였다. 결과를 정리하면 다음과 같다.

1. 터널구조체의 특성과 여러 설비 및 장비의 손상으로 인한 연소 생성물을 고려하여 터널내화 시험을 건축물의 내화성능평가 기준인 ISO 834 시간-온도곡선에 의해 규정되어왔다. 하지만 보, 기둥, 벽체의 내화 기준용으로 쓰이는 이 곡선이 터널에서의 실제 위험성을 적절히 수용하지 못할 수도 있으며 실제로 몽블랑 터널과 고타드 터널 화재의 경우 약 5분 이내에 1000°C를 초과하여 철도터널에는 ISO 834 곡선이 적합하지 않은 것으로 나타났다.

2. 국내 철도터널의 경우 충돌이나 접촉사고 외에 화재로 번지는 사고는 거의 일어나지 않았다. 하지만 철도 선형의 직선화율이 점점 높아져 철도터널의 장대화가 이루어짐에 따라 향후 터널 내 사고발생의 위험성은 상대적으로 높아질 것으로 예상된다. 객차용 열차의 수송량과 화물수송용 열차현황을 비교해보았을 때 화물 열차의 수송량과 차량이 상당히 많고 점점 증가하는 추세이다. 화물차에 따른 국외의 실물실험을 토대로 한 화물용 열차의 화재강도 및 화재하중을 국내 철도의 통행량, 차량 종류에 따른 열방출율, 최고온도 도달 및 지속시간 등을 고려하였을 때 국내의 철도터널 시간-온도곡선으로 탄화수소(HC) 곡선이 가장 적합하다고 할 수 있다.

3. 수치해석을 통하여 철도터널내부 온도분포를 산정하였다. 시간이 경과함에 따라 표준시간-온도곡선의 온도가 증가와 함께 표면온도와 터널내 구조체 부근의 온도가 점차 증가하는 현상을 보였다. 또한 콘크리트라이닝과 슛크리트는 화재 후 약 20~40분 이내에 그 역학적 기능을 상

실하는 임계온도인 600℃에 도달하게 된다. 그러므로 그에 알맞은 내화 대책의 도입이 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

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

참고문헌

1. 국토해양부, 주요통계, 2007.
2. 박경환, “터널화재 설계강도 기준 및 영향요인에 관한 연구”, 서울시립대학교 석사학위논문, 2005.
3. 서강찬, 우종태, “지하철 터널구조물의 유지관리”, 한국구조물진단학회 제 8권, 제 1호, 2004, pp. 15-23.
4. 왕중배, 홍선호, 김상암, 박옥정, “철도터널 및 지하구간에서의 화재사고 위험성 분석 연구”, 한국철도학회 학술대회 논문집, 2003, pp. 271-276.
5. 유지오, 김윤선, 김치경, 이동호, “터널사고 조사 연구”, 2002, pp. 191-196.
6. 이승철, 이승호, 김낙영, 이상표, 박양수, “철도터널 화재 시 화재강도에 따른 터널 내 대피환경에 관한 수치해석적 연구”, 대한토목학회 정기학술대회 논문집, 2004, pp. 1545-1550.
7. 최석원, “고강도 내화 시멘트 모르타르의 개발 및 평가”, 건국대학교 대학원 석사학위 논문, 2005.
8. D. Diamantidis, F. Zuccarelli, WesthUser, “Safety of long railway tunnels”, Reliability Engineering & System Safety, 67, 2000, pp. 135-145.
9. Haukur Ingason, “Model scale railcar fire tests”, Fire safety journal, 42, 2007, pp. 271-282.
10. Koichi. Ono, “Fire Safety to Concrete Structure”, Concrete Journal, Vol. 30, No. 7, 2002, pp. 10-15.
11. Magret, O. and Vauquelin, O., “A Model to Evaluate Tunnel Fire Characteristics”, For Safety Journal, Vol. 34, No. 4, 2000, pp. 393-401.
12. Parsons Brinckerhoff Quade & Douglas Inc., Subway Environment Simulation (SES) Computer Program, Version 4, Prepared for the U.S. Departments of Transportation, 2003.
13. Peacock RD, Braun E., Fire safety of passenger trains, phase I: material evaluation, (cone calorimeter), NIST, NISTIR 6132, Gaithersburg, MD, USA, 1999.
14. U.S DOT., Research results-passenger train fire safety. In RR03-02, US Department of Transportation-Federal Railroad Administration, 2003.
15. Visual FEA, (주)사이텍이엔씨, www.sy-tec.co.kr, 서울 광진구 자양동 796.

(접수일자 : 2010년 1월 19일)
(심사완료일자 : 2010년 3월 16일)

요 지

본 연구에서는 철도터널내 화재시 터널내 구조체의 내화성능을 평가하기 위한 시간-온도곡선의 기준을 제시하고자 실시하였다. 현재 국내에서는 철도터널건설과 터널의 수가 빠른 속도로 증가하고 있으며, 터널연장이 길어짐에 따라 터널 내 화재사고가 갈수록 높아지고 있는 상황이다. 철도터널의 화재빈도수는 적지만 화재시 인명과 교통차단으로 인한 사회적 피해는 막대하다. 하지만 우리나라에서는 철도터널 화재에 대한 적합한 시간-온도 곡선을 규정하지 못하고 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 국내 철도의 통행량, 차량종류 등을 고려한 열방출율을 기초로 외국에서 제시된 시간-온도 곡선을 검토해 보았으며 국제 실정에 가장 적합한 설계화재 모델을 제시하였다. 탄화수소(HC) 시간-온도 곡선이 국내 철도터널의 설계화재모델로 가장 적합하였으며, 탄화수소 시간-온도곡선에 의한 철도터널 구조체의 온도분포를 예측하기 위하여 유한요소해석을 통하여 콘크리트터널 구조체의 구조성능을 검토하였다.

핵심 용어 : 내화설계모델, 열방출률, 철도터널 화재, 시간-온도곡선
