

터널의 내화성능 평가용 화재온도곡선과 화재모델별 내화시간에 대한 고찰

A study on the deterministic temperature-time curves and required resistance times by fire model for assessment of fire resistance of tunnel structures

김효규*¹, 박경환², 윤명오³, 이창우⁴

Kim, Hyo-Gyu · Park, Kyung-Whan · Yoon, Myong - O · Lee, Chang-Woo

Abstract

A variety of research projects have been undertaken due to the recent catastrophic tunnel fires throughout the world. Among them, more emphasis was given to full scale and scale model fire experiments, and recently the area of fire resistance of tunnel structures attract more interests. On the contrary to the cases in most of the advanced countries where design standards as well as recommendations have already been announced, no local criteria for design can be found. This paper aims at deriving the fire characteristics appropriate for the assessment criteria of fire resistance of structures in local tunnels through studying the existing fire temperature curves including ISO 834 standard temperature curve, HC curve, RWS curve, ZTV curve and EBA curve.

Keywords: Tunnel structure, fire resistance, tunnel fire, temperature-time curve

요 지

최근 전세계의 대형화재 사고이후, 터널안전에 관한 많은 연구들이 진행되고 있다. 특히 실물 및 축소모형 실험에 대한 다양한 연구가 진행되면서, 터널구조물에 대한 내화성능에도 많은 관심이 모아지고 있다. 이미 외국에서는 터널구조물의 내화성능에 대한 설계기준이나 권고안이 발표되고 있으나, 아직 국내에는 설계기준으로 마련되지 못하고 있다. 본 연구의 목적은 각 나라별 화재온도(온도-시간) 곡선, 특히 ISO 834 표준온도곡선, HC곡선, RWS곡선, ZTV곡선, EBA곡선을 분석하여 국내의 도로, 지하철 및 철도터널의 내화성능 평가 기준에 적합한 화재특성을 도출하는데 있다.

주요어: 터널 구조물, 내화성능, 터널화재, 온도-시간 곡선

*1. (주)삼보기술단 과장 (xram77@chol.com)

2. (주)영설계엔지니어링 이사

3. 서울시립대학교 도시과학대학원 방재공학과 교수

4. 동아대학교 지구환경공학부 교수

1. 서론

터널화재용 구조물의 내화성능은 신규 터널과 기존 터널 모두의 구조 설계에 핵심적인 변수가 되고 있다. 구조물 내화성능의 목적은 터널 화재시 이용자의 안전한 피난과 구조 및 진압 작업을 수행하는 소방대원들의 안전을 확보하는 것이며, 그리고 화재 이후 보수작업에 투입되는 작업자들의 안전 확보에 있다. 또한 구조물의 손실을 최소화함으로써 재공사 비용을 감소시키고, 터널 폐쇄로 인한 간접 손실을 최소화하는 것이 주된 목적이 될 것이다. 실제로 Mont Blanc 터널은 3년 동안 폐쇄되어 392 Mio. € (백만유로)의 손실을, Tauern 터널은 3개월 폐쇄되어 24.7 Mio. €의 손실을, Gotthard 터널은 2개월 폐쇄되었고, Channel 터널은 사고후 2개월만에 일반 서비스는 개시하였지만 7개월 동안 보수작업은 계속 진행되어 대략 300 Mio. €가 소요되었다 (F. Peter).

건축물의 내화성능 평가에는 섬유질계 가연성 물질인 목재, 종이, 섬유 등의 구획내 화재에 대한 실물화재 평가에서 얻어진 온도곡선에 기초한 ISO 834 표준 화재온도곡선(온도-시간 곡선)이 사용되고 있다. 이 기준에 의해 내화등급은 30분에서 4시간까지 등급화 되어 있으며, 이런 등급은 주로 건축물의 용도에 따른 화재하중에 대한 평가를 통해 이루어지고 있다. 그러나 표준 화재온도곡선은 최근 건축물 내에 존재하는 다양한 종류의 가연물의 영향을 충분히 고려하지 못하고 있다는 문제와 구조체의 열적 성능, 환기 조건, 하중의 분포 상태 등을 감안하지 못하고 있는 문제를 가지고 있다 (신병철, 2003). 마찬가지로

지로 터널화재의 가연물은 고체, 액체, 기체로 다양하고, 구조재료도 콘크리트, 쇼크리트 등 다양한 부재가 사용되고 있다. 또한 터널의 위치에 따라, 예를 들어 수면의 하부, 상부에 위치하고 있는지에 따라 요구되는 강도와 안전율이 현저히 달라진다. 따라서 이와 같은 터널의 특성을 고려하지 않고 동일한 화재온도곡선에 기초한 내화성능 평가기준은 재검토할 필요성이 있다.

2. 기존 실물화재 실험 결과 분석

도로터널을 이용하는 승용차, 버스, 트럭화재시의 온도분포를 보여주는 다음 그림은 노르웨이 Rappafjord 터널 (폭: 5.3~7.0 m, 높이: 4.8~5.5 m, 연장: 2.3 km)에서 수행된 Eureka project 에서 측정된 결과에 기초한 것이다 (Richer, 1994).

그림 1에서 왼쪽은 터널의 천정, 벽체에서 측정된 최대 온도를 나타내고 있다. 승용차에 비해 버스나 HGV (대형화물차량)의 온도가 높게 나타난 것을 볼 수 있다. 이것은 승용차나 버스의 차체는 철재이기 때문에 연소는 환기요소에 지배되고, 개구부의 위치는 상대적으로 낮은 위치에 있기 때문일 것이다. 또한 열방출율이 상대적으로 작기 때문에 화염의 길이나 온도상승의 여유가 작을 것이다. 화재지속시간은 승용차와 HGV는 1시간 정도인데 비해 버스가 120분으로 상대적으로 길게 측정되었다. 일반 콘크리트의 박리가 발생하는 온도인 350℃이상의 온도분포를 보이는 구간길이는 버스화재의 경우 약 50 m,

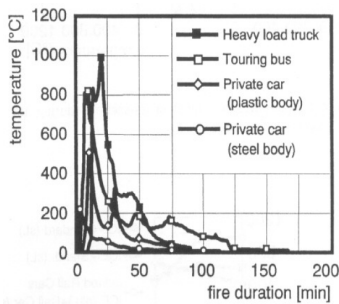
표 1. 터널 화재사고에 대한 손실비용

터널명	몽블랑 터널	타우에른 터널	고타드 터널	유로 터널	
사고일	1999.3	1999.5	2001.10	1996.11	
사망자수	39명	12명	11명	0명	
차량구분	도로차량	도로차량	도로차량	철도차량	
(추정) 화재규모	75~100 MW	120MW	120~200 MW	150~350 MW	
터널구조물 손상길이	900 m	500 m	700 m	400 m	
터널폐쇄 및 보수기간	3년	3개월	2개월	7개월 (보수기간)	
비용 (1\$≒1.2€)	복구/개선 비용	189 Mio. €	6.2 Mio. €	직접경비: 16 Mio. CHF (≒25 Mio. €)	87 Mio. €
	수입손실 비용	203 Mio. €	18.5 Mio. €		211 Mio. €
	합계	392 Mio. €	24.7 Mio. €		298 Mio. €

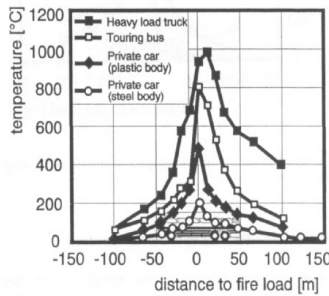
HGV는 약 150 m 정도인 것을 알 수 있다. 참고적으로 지붕으로 차폐된 차량의 화재지속시간은 만일 자동식소화설비가 설치된 곳이라면, 소화약제의 방사시간에 영향을 줄 수 있으며, 역으로 소화약제의 방사시간은 가능한 소방대의 본격 진압활동이 시작되기 전까지 지속되어야 할 것으로 보인다. 또한 종류식 환기설비는 공기흐름을 설계화재에서 발생하는 열량의 2/3이 대류열로 전환되기 때문에 추가적인 공기를 공급하여 온도를 낮추게 되는데, 온도기준은 콘크리트 종류에 따라 박리가 일어나지 않는 범위가 되어야 할 것이다.

그림 2는 알루미늄 및 철재 차체의 지하철 차량 연소에서 측정된 최고온도를 나타낸 것이다. 알루미늄 차체의 경우가 고온을 나타낸 것은 차량의 지붕이 화염으로 녹아내리면서 화염이 직접 천정에 닿게 되기 때문이다. 반

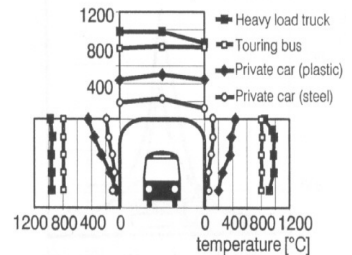
면 철재 차체는 창문과 문 등 개구부를 통해 화염이 분출하기 때문에 화염은 천정면에 직접 닿지 못하거나 간헐적으로 도달하기 때문에 상대적으로 낮은 온도 값이 기록되었다. 특히 철재 차체는 연소가 개구부에서 들어오는 신선 공기에 의해 제어되어 연소속도 및 열방출율도 상대적으로 낮게 나타났다. 현재 한국의 지하철은 대부분 스테인레스강으로 제작된 차량이므로 철재 차체와 같은 수준의 열방출과 온도를 예상할 수 있을 것이다. 알루미늄 차체는 천정, 벽면 모두 비슷한 온도분포를 보인 반면, 철재 차체는 차량의 개구부 이하의 온도가 상대적으로 매우 낮은 것을 볼 수 있다. 화재지속시간은 모두 120분 이상이였다. 350℃를 초과하는 구간의 길이는 약 100m 정도였다.



(a) 시간에 따른 최고온도

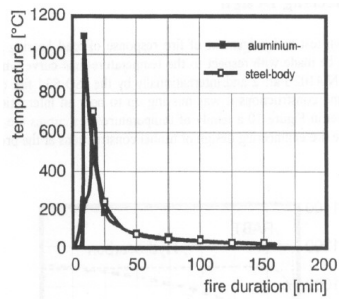


(b) 거리에 따른 최고온도

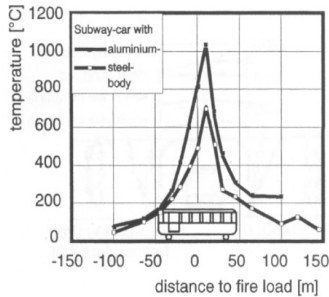


(c) 터널단면상의 최고온도

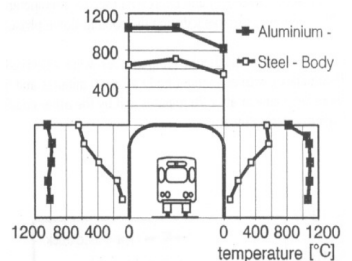
그림 1. 화재시 도로터널 차량의 온도 분포



(a) 시간에 따른 최고온도



(b) 거리에 따른 최고온도



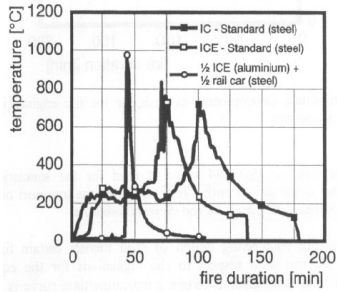
(c) 터널단면상의 최고온도

그림 2. 화재시 지하철 차량의 온도 분포

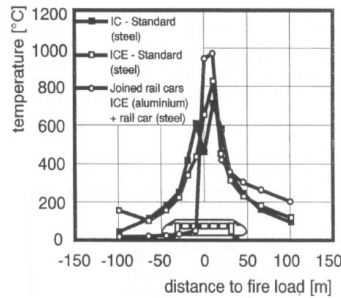
그림 3은 여객용 철도차량의 연소시험에서 측정된 온도를 보여준다. 지하철 차량과 마찬가지로 알루미늄 차체를 가진 경우 높은 온도를 기록하고 있음을 알 수 있다. ICE 차량이 IE 차량에 비해 상대적으로 높은 온도를 기록하고 있는 것은 동일한 개구조건이지만 전체 화재하중은 ICE 차량이 높기 때문에 높은 열방출율과 관계되는 것으로 판단된다. 일반적으로 화재에서 측정된 온도는 화재하중과 관계되고 있음을 알 수 있다. 화재지속시간은 100~180분까지 분포하고 있다. 알루미늄 차체와 결

합된 차량이 열방출율이 높고, 높은 온도분포를 보인 반면 연소지속시간은 상대적으로 작게 나타났다. 350℃ 이상이 되는 구간도 약 50~70 m 정도이다. 참고적으로 지하철터널과 철도터널은 단면을 차지하는 차량비율이 매우 높고 천정과 벽면은 차량과 근접하여 있기 때문에 환기시스템이 설치되어 작동하더라도 강력한 복사열로 인한 온도상승을 피하기는 힘들 것으로 예상된다.

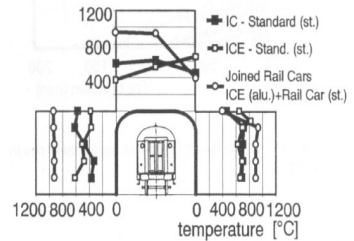
그림 4는 최근 SP 스웨덴 국립 연구소에서 수행된 Runehamar 터널의 대형 HGV 모사실험에서 측정된



(a) 시간에 따른 최고온도

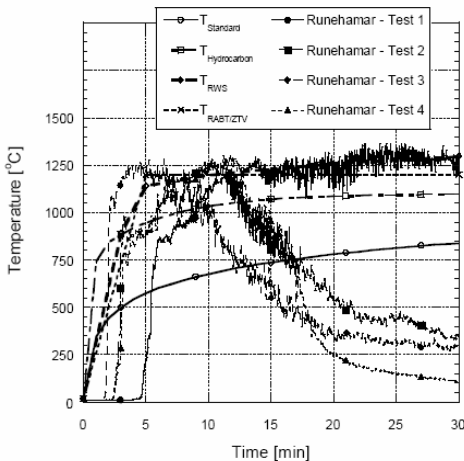


(b) 거리에 따른 최고온도

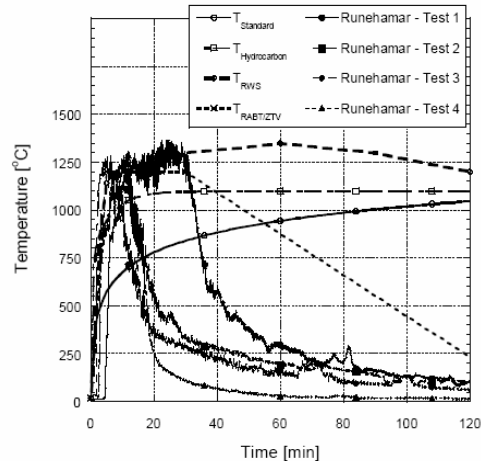


(c) 터널단면상의 최고온도

그림 3. 화재시 철도터널 차량의 온도 분포



(a) 30분 동안의 온도분포 비교



(b) 120분 동안의 온도분포 비교

그림 4. Runehamar HGV 모사실험의 온도곡선(Ingason, Lonnermark, 2004)

온도분포 결과를 보여주고 있다 (SP Report, 2004). 강한 환기에 의해 촉진된 화재는 Test 1에서 최고 열방출율이 203MW에 도달하면서 화재실험 결과로부터 최고 온도는 1,365°C가 측정되었다. Test 2, 3, 4도 1,281~1,305°C가 측정되었다. 이 온도계측은 터널의 안전을 위해 보호 판넬을 부착한 상태에서 실험이 행하여졌다. 따라서 내공단면 (폭: 7.3 m, 높이: 5.0 m)은 일반적인 터널보다 작아 실제 터널의 결과와는 차이가 있을 수 있다. 대형 HGV 모사실험 결과는 RWS 곡선의 최고 온도인 1,350°C와 비슷한 분포를 보이고 있다.

최근의 연구결과를 바탕으로 PIARC (국제상설도로회의)는 다음과 같은 온도조건을 터널의 벽과 천정에 대한 평가기준으로 적용할 수 있음을 제시하고 있다 (PIARC, 1999).

- 400°C, 승용차 화재 (만일 화염이 벽에 도달하면 더욱 높아질 것임)
- 700°C, 버스나 소형 짐차 (만일 화염이 벽에 도달하면 더욱 높아질 것임)
- 1,350°C, 연소 물품을 가진 HGV (가솔린 탱크차량은 아님)
- 1,350°C, 가솔린 탱크차량 (일반적인 경우)
- 1,400°C, 가솔린 탱크차량 (심각한 경우, 배수가 불량한 터널의 붕괴방지 목적)

3. 기존 터널화재 온도곡선 분석

각 유럽 국가들에서는 터널 증축부와 추가 방화벽 (Thermal barrier)을 화재로부터 방호하는 차원에서 다음의 ‘온도-시간 곡선 (Temperature-Time Curve)’을 사용하고 있다.

- RWS (Rijkswaterstaat)곡선은 네덜란드 터널의 운영을 맡고 있는 Rijkswaterstaat의 기준이다. 네덜란드에서 이 곡선은 위험물 수송차량의 통과가 허용된 터널에 적용한다. 이 곡선은 독일의 ZTV (Zust-zliche Technische Vorschriften; 추가기술규정) 곡선에 비해 터널 구조물에 더 높은 화재온도와 지속 시간을 적용하도록 고안되었다. 스웨덴은 수중터널 (submerged tunnels)이나 상부 증축용 커버가 작은 터널을 통과해도 좋다는 승인을 얻고자 할 때, 터널피복부의 화재방지 정도를 측정하기 위해 RWS 곡선을 사용한다 (약 1,300°C). 참고적으로 네덜란드는 국토 전체가 해수면보다 아래에 있다. 따라서 터널은 해수면 아래에 놓이게 되므로 터널 구조물의 작은 훼손에도 큰 피해를 입을 수 있는 지리적인 약점을 가지고 있다.
- HC (Hydrocarbon; 탄화수소)곡선은 석유화학 공장의 위험물 저장지역이나 분배 지역 및 주유소의 화재

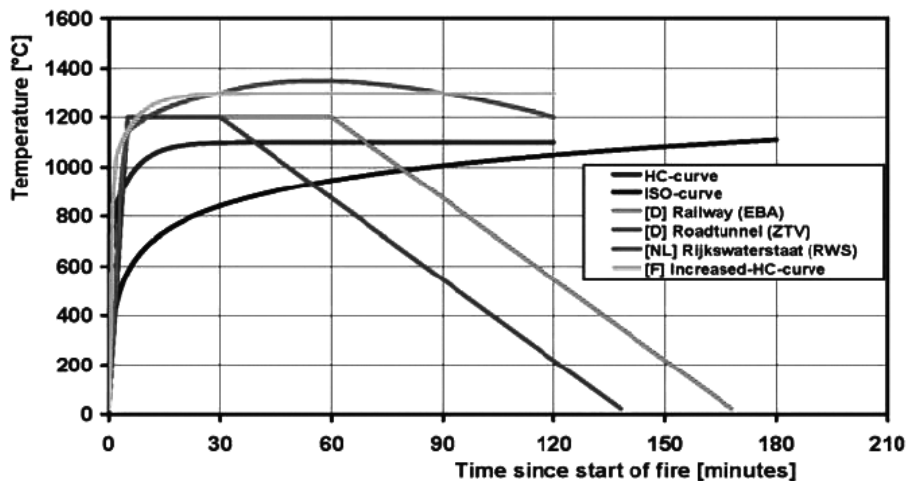


그림 5. 온도곡선 (HC, ISO, EBA, ZTV, RWS, HCinc) 비교 (Haack, Estefania, 1999)

시 적절한 구조적인 내화성능의 필요에 의해 1970년대에 만들어졌다. 스웨덴에서는 RWS곡선이 적용되지 않는 터널의 화재 방호를 위한 안전율을 결정하기 위해 최대온도 1,100C까지의 HC 곡선을 사용한다. 이 곡선의 그래프는 위험물 화재 경우에도 사용되는데, 위험물의 종류는 화재지속시간에 따라 최소 60~180분을 선정하고 있다. 프랑스에서는 터널 피복부의 화재 방호를 위한 안전율을 결정하는데 위험물과 무관하게 단기간에 급속도로 번지는 화재 시나리오를 기초로 할 때 HC 곡선을 사용하고 있다.

- HC 상승곡선 (Increase HC or HCinc)은 프랑스에서 터널 피복부의 화재로부터 방호를 위해 설계 화재시 위험물의 연소속도를 고려한다. 즉 위험물로 인해 짧은 시간에 대형화재가 발생할 수 있는 터널의 경우에 최대온도 1,300°C의 HCinc 곡선을 사용한다. 특별한 화재의 경우는 최대 온도부하의 시간은 달라지는데, 즉 상부가 증축된 터널은 1,300°C에서 90분, 수중터널은 1,300°C에서 120분과 같이 다르게 적용하고 있다.
- 독일의 경우, ZTV 곡선과 EBA 곡선은 RABT (Richtlinien fuer die Ausstattung und den Betrieb von Strassentunne; 도로터널의 장비와 운영에 관한 규정)에서 규정하는 터널의 증축부와 추가 방화벽 (Siding)을 화재예방기술적 차원에서 시험기준

으로 측정할 때, ZTV에 명시된 온도 곡선을 사용한다. ZTV 온도곡선은 일반 규정이기 때문에, 위험물과 비위험물 화재를 구분하지 않고 모두 적용하고 있다. 일반적으로 EBA 곡선은 화재지속시간이 ZTV 곡선에 비해 길다. 그리고 EBA와 ZTV 곡선에서 중요한 요소는 냉각속도이며, 상대적으로 높은 내화성을 가지는 재료들도 냉각에 의해서 균열과 파열이 급격하게 발생할 수 있다는 것이다. 따라서 소방대의 진압 작업시 주수 (注水)작업으로 인해서 급격한 구조물의 냉각이 가능하므로 냉각속도에 대한 고려가 필요할 것이다. 참고로, 독일의 Weser 터널, Elb 터널과 같이 수중의 Single pan 구조로 된 터널일 경우에는 화재방지 판넬 (siding)을 사용하도록 되어 있다.

- ISO (표준화재온도)곡선은 건축물의 목재계구획화재의 시험을 통해 1917년에 작성된 곡선이다. 프랑스에서는 화재발생 후 대형화재로 성장하는데 매우 긴 시간이 필요한 가연물이 통과하는 터널의 경우에 적용하는 곡선이다.

이러한 온도곡선은 예상화재의 크기와 온도에 따라 그리고 터널의 위치와 중요도에 따라 달리 적용될 수 있는데, 실제 터널구조물의 재료 물성치와 중요한 연관이 있다. 그림 6은 다양한 구조물 재료의 내화성과 온도곡선과의 관계를 보여주고 있다. 또한 그림 7은 콘크리트의 내

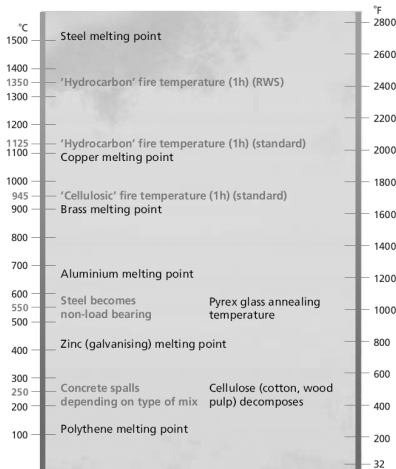


그림 6. 재료와 온도곡선의 비교
(<http://www.cafcointl.com> 참고)

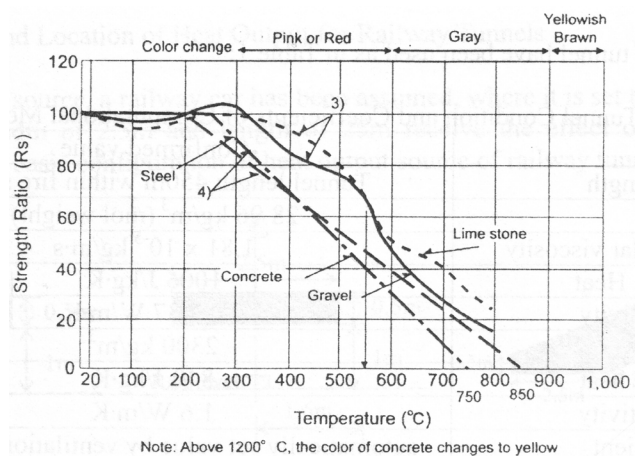


그림 7. 콘크리트의 내화강도비교
(Ota et al, 2001)

화온도에 대한 상대적인 강도비를 나타내고 있다. 일반적으로 콘크리트는 혼합비율이나 재료에 따라 다소 차이가 있지만 250℃에서 박리가 발생하기 시작한다. 반면 금속구조재료는 550℃에서 항복강도에 도달하므로 터널 피복재는 열전달을 지연할 수 있는 구조적 특성을 가져야 할 것으로 보인다.

4. 터널형태에 따른 온도곡선 제한

4.1. 기존 내화성능 권고기준 검토

각국은 실제 화재실험의 결과와 화재사고 경험을 통해 다양한 터널 내화성능의 기준을 제시하고 있다. 먼저 각국의 내화성능에 대한 관련 규제기준을 살펴보면 표 2와 같다.

각 나라별로 다소 다른 규정으로 내화기준을 정의하고

있지만, 크게 화재온도 곡선 및 지속시간, 내화피복층의 두께 그리고 화재하중 등으로 구분하고 있다. 먼저 독일(ZTV)은 일반적인 내화 피복층의 두께를 6 cm 이상 확보하도록 규정하고 있으며, 프랑스(Circ2000-63A2)는 각 피난 구조물별로 화재 온도곡선 및 지속시간을 상세히 규정하고 있다. 이러한 규정은 구조물 자체의 물리적 특성뿐만 아니라 피난 및 소방을 위한 인명특성을 고려하고 있다는 점에서 다른 나라들의 기준들 보다 상당히 강화된 내화기준으로 평가되어 진다. 그리고 오스트리아(RVS)는 90분 내화지속시간을, 영국(BD78/99)은 환기방식 등을 고려한 화재영향 분석후 피복재라든지 구조물의 화재온도에 대한 박리가 일어나지 않을 대책을 강구하도록 규정하고 있다. 반면 노르웨이(Road Tunnels)는 구조물에 대하여 교통량(AADT)에 따른 설계 화재하중(MW)에 준하는 내화기준으로 적용하도록 되어 있는데, 이는 구조물에 대한 별도의 내화기준이 없는

표 2. 각국의 내화성능 기준 비교(N.P. Hoj, 2004)

국가	기준	요구사항
독일	ZTV 1	10,3 아치형 혹은 원형 터널구조물에 대한 방호 필요성은 구조물에 대한 최소한의 요구사항과 계산서에 준해서 확보되어야 한다. 일반적으로 다른 화재방호가 없다면 6cm 정도의 (터널내) 피복이 요구된다.
독일	ZTV 2	9.31 사각단면 터널구조물에 대한 방호 필요성은 구조적 최소 요구사항과 계산서에 준해서 확보되어야 한다. 9.32 구조물 대책으로 철근(load bearing reinforcement)은 300℃ 이상의 온도에서 보호되어야 한다. 아연 도금된 철망이 (벽면으로 부터) 떨어져 나오는 현상에 대한 보호로써 피복내에 배치되어야 하며, ... 철근에 대한 최소한의 피복은 6 cm 이다.
프랑스	Circ2000-63A2	4.2.2 구조물로 요구되는 내화성능은 다음의 주요 목표를 달성하도록 설계되어야 한다. - 피난 시설로 진입한 이용자들의 보호는 그들이 출구로 나갈 수 있도록 요구되는 시간은 60분 ... - 셸터(Shelter)내 ... 이용자들의 보호는 120분 ... - 화재 진압팀을 곤경에 빠뜨리지 않기 위해서 20분 정도 ... 모든 환경에서, 화재의 최대지속 시간은 표준 온도곡선에 대해 240분, 추가 HC 곡선에 대해서는 120분에 맞추어져야 한다.
영국	BD78/99	8.56 터널 구조물이나 관련된 덕트 그리고 수직갱 등에 대한 화재효과는 주위 깊게 평가되어야 한다. 8.57 화재설계에 의존해서 ... 구조물에 대한 추가적인 화재방호 피복층(layers)은 요구되지 않을 수 있다. ... 5.68 ... 150℃의 콘크리트 천정으로부터 콘크리트의 박리(spalling)를 감소할 대책이 적용되어야 한다.
노르웨이	Road Tunnels	605.2 구조물에 대해 요구되는 화재하중 ... 터널은 AADT가 10,000 미만에서는 5MW, AADT가 10,000 이상에서는 20MW에 대한 화재하중으로 설계되어야 한다. 구조적 붕괴의 위험을 가진 터널에 있어 설계화재하중은 별도로 평가되어야 한다.
오스트리아	RVS	9.234 중간 천정(Intermediate ceilings)은 화재등급 F90(90분 내화)에 따른 내화성능을 가져야 한다.

국내의 설계실정과 비슷한 내화설계 경향을 보여준다.

표 3은 국제도로상설회의 (PIARC, Permanent International Association of Road Congresses)의 설계 기준용 지침이다 (PIARC, 1999). 이 표는 교통형식과 터널구조물의 형태에 따른 온도곡선과 내화시간을 규정하고 있다. 그러나 PIARC의 권고안에는 다중차량 화재에 대한 언급이 없다. Ingason(2001)은 실제 터널 화재사고는 PIARC에서 제시하는 값보다 2~3배 큰 HRR 값을 보일 수 있으며 이에 따라 인접한 중차량으로 화재가 쉽게 확산되는 잠재적 위험을 지적하고 있다.

국제터널협회 (ITA, International Tunnelling Association)도 PIARC의 기준과 각국의 기준들을 비교한 결과를 표 4와 같은 성능을 제안하고 있다(ITA, 2004). 참고적으로 차량타입에 따른 유형구분에서, 구분1은

HGV가 없는 승용차만의 화재사고를, 구분2는 대형 로리 (Lorry)와 같은 HGV 화재사고를 의미한다.

PIARC 이나 ITA의 권장사항을 고려할 경우, 대체적으로 낮은 화재규모 (승용차량 화재)로 계획되는 터널의 내화시간은 60분 정도, 상대적으로 높은 화재규모 (트럭 화재)로 계획되는 터널은 내화시간 120분 정도로 나타나고 있다. 그러나, 대피안전환경이 좋은 경우 (즉, 터널본선에서 외부로 연결되는 탈출구가 있을 경우는) 내화시간이 낮아져 ISO 30분을 권장하고 있다. 반면 PIARC의 권장사항은 단일차량 화재특성을 고려한다면, ITA의 권장사항은 다중차량 화재특성을 고려하고 있는데, 수중 (침매)터널이나 불안정한 지반상태의 터널일수록 상대적으로 높은 3시간 정도의 내화시간을 권장하고 있다.

더불어 최근 ITA에서 제시하고 있는 터널 구조물의 각

표 3. 내화성능에 대한 PIARC 권고 (PIARC, 1999)

교통형식	주요 구조물				2차 구조물 ⁴			
	침매터널 혹은 구조물하부 통과형터널	불안정 지반의 터널	안정 지반의 터널	개착식 터널	환기덕트 ⁵	외부로 연결된 비상탈출구	상대터널로 연결된 비상탈출구	셀터 ⁶
승용차 /밴	ISO 60분	ISO 60분	2	2	ISO 60분	ISO 30분	ISO 60분	ISO 60분
트럭/ 탱커	RWS/ HCinc 120분 ¹	RWS/ HCinc 120분 ¹	3	3	ISO 120분	ISO 30분	RWS/ HCinc 120분	RWS/ HCinc 120분 ⁷

¹ 가연성 물품을 수송하는 HGV의 교통량이 매우 많으면 180분이 요구될 것이다.

² 안전은 기준이 아니고, (연속붕괴를 회피하기 위해) 어떤 내화성능도 요구하지 않는다. 다른 목적들을 설명하기 위해 다음이 요구될 것이다.

- 대부분 ISO 60분을 적용한다.
- 수입에 비해 화재로 인한 수리비용이 상대적으로 크다면 모든 방호는 요구되지 않는다.

³ 안전은 기준이 아니고, (연속붕괴를 회피하기 위해) 어떤 내화성능도 요구하지 않는다. 다른 목적들을 설명하기 위해 다음이 요구될 것이다.

- 도로망과 재산에 큰 영향을 주기 때문에 강력한 보호가 요구된다면 RWS/HCinc 120분을 적용한다.
- 대부분의 경우 ISO 120분이 재산상의 손실을 줄이기 위해 합리적으로 제공된다.
- 수입에 비해 화재로 인한 수리비용이 상대적으로 크다면 모든 방호는 요구되지 않는다.

⁴ 다른 2차적인 구조물은 목적에 기초해서 정해진다.

⁵ 횡류식 환기방식의 경우

⁶ 대피소(셀터)는 외기와 연결되어야 한다.

⁷ 만약 가연성 물품을 운반하는 HGV 통행이 많은 경우와 대피소에서 120분내에 피난이 어려운 경우 더 긴 시간이 사용될 수 있다.

표 4. 내화성능에 대한 ITA 권고 (ITA, 2004)

구분	화재차량 대수	침매터널	불안정 지반의 터널	안정 지반의 터널	개착식 터널	환기덕트	외부 연결 탈출구	상대터널 연결 탈출구	셀터
1	1-2	ISO 60분	ISO 60분	2	2	ISO 60분	ISO 30분	ISO 60분	ISO 60분
1	>3	ISO 60분	ISO 60분	2	2	ISO 60분	ISO 30분	ISO 60분	ISO 60분
2	1-2	RWS/ HCinc 2시간	RWS/ HCinc 2시간	3	3	ISO 2시간	ISO 30분	RWS/ HCinc 2시간	RWS/ HCinc 2시간
2	>3	RWS/ HCinc 3시간	RWS/ HCinc 3시간	3	3	ISO 2시간	ISO 30분	RWS/ HCinc 2시간	RWS/ HCinc 2시간

² 안전은 기준이 아니고, (연속붕괴를 회피하기 위해) 어떤 내화성능도 요구하지 않는다. 다른 목적들을 설명하기 위해 다음이 요구될 것이다.

- 대부분 ISO 60분을 적용한다.
- 수입에 비해 화재로 인한 수리비용이 상대적으로 크다면 모든 방호는 요구되지 않는다.

³ 안전은 기준이 아니고, (연속붕괴를 회피하기 위해) 어떤 내화성능도 요구하지 않는다. 다른 목적들을 설명하기 위해 다음이 요구될 것이다.

- 도로망과 재산에 큰 영향을 주기 때문에 강력한 보호가 요구된다면 RWS/ HCinc 120분을 적용한다.
- 대부분의 경우 ISO 120분이 재산상의 손실을 줄이기 위해 합리적으로 제공된다.
- 수입에 비해 화재로 인한 수리비용이 상대적으로 크다면 모든 방호는 요구되지 않는다.

재료들에 대한 내화온도 조건을 살펴보면 다음과 같이 요약된다 (Russell, 2004).

- 콘크리트 (벽면, 천정, 분리벽, 캐스트인플레이스 콘크리트 등)의 표면은 최대 380℃ 이내로 보호되어야 한다.
- 프리캐스트 콘크리트 (높은 강도의 콘크리트 세그먼트, 프리캐스트 보드 등)는 최대 200~250℃ 이내로 보호되어야 한다.
- 콘크리트 천정은 표면온도 380℃에서 최소한 2시간 동안 붕괴되지 않도록 적절히 보호되어야 한다.
- 점토질 벽돌이나 애쉬어 (asher) 스톤은 중요하게 고려될 필요가 없으며, 보호될 필요는 없다.
- 세그먼트 스틸 라이너는 표면최대 온도가 550℃ 이내로 보호되어야 한다.
- 세스먼트 라이너의 유도 조인트는 최대 200℃ 이내로 보호되어야 한다.
- 발화성 세라믹 타일 마감은 최대 200℃ 이내에서 폭발적으로 쪼개지는 현상으로부터 보호되어야 한다. (주, 신규터널에는 회피되어야 한다.)
- 세그먼트 캐스트 강철 라이너는 최대 표면온도 550℃

이내로 보호되어야 한다.

- 스틸 구조물과 천정의 행거 로드 (hanger rods)는 최대온도 550℃ 이내로 보호되어야 한다.
- 캐스트 강철 구조물과 천정의 행거 로드는 최대 550℃ 이내로 보호되어야 한다.
- 스텐레스 스틸 구조물과 천정의 행거 로드는 최대 800℃ 이내로 보호되어야 한다.
- 앵커리지 (Anchorage)는 양카 고정시 최소 안전율 3.5 이상으로 설계되어야 한다. 고정방법은 토대에 묶는 방법과 부착하는 방법을 의미한다.
- 에폭시 레진 양카는 표면온도 200℃ 부터 6cm 깊이에서 보호되어야 한다 (주, 프랑스에서는 300℃ 이상이 될 수 있는 환경에서는 에폭시 양카의 사용을 금지하고 있다.).
- 모든 에폭시 양카는 양카가 설치되는 곳의 콘크리트나 재료의 표면으로부터 6cm 보다 짧지 않는 바운드 존 (bond zone)을 가지고 설계되어야 한다.
- 리드 쉴드 양카나 납 성분을 가진 양카는 구조적으로나 비상장비의 지지용으로는 허용되지 않는다 (예, 댐

- 퍼, 환기팬 등)
- 황동, 아연 혹은 낮은 녹은점을 가지는 양키는 구조적으로나 비상장비의 지지용으로는 허용되지 않는다 (예, 댐퍼, 환기팬 등)
- 모든 내화성 재료는 부착물이 퇴화되거나, 물로부터 내화성능율이 저하되어서는 않된다.
- 터널 구조물내 혹은 터널내 연관되어 있는 모든 재료는 비독성, 불연성이어야 한다.
- 설치되는 모든 비상장비는 PIARC의 기준이나 개별 국가적 코드, 법령 그리고 규정 등에 적합하게 따라야 할 것이다.
- 비상 진입로/탈출구 지역은 PIARC의 기준이나 개별 국가적 코드, 법령 그리고 규정 등에 따라 통로의 최대온도가 40℃를 초과하지 않도록 설계되어야 할 것이다.

철도터널과 관련하여 UIC (국제철도연맹)은 아직까지 내화성능에 대한 구체적인 요구사항은 제시하고 있지 않지만, 위험성이 높은 물질을 수송하는 경우는 HC 곡선을 사용하도록 권고하고 있는 수준이다.

4.2. 국내 내화성능 기준에 관한 제안

반면 국내에서는 아직 내화성능에 대한 기준이 마련되어 있지 못한 상태이다. 이것은 기존터널이나 새로운 터널이 화재에 저항하는 능력이 전혀 갖지 못한다는 것을 의미하지는 않는다. 다만 내화성능의 목적과 수준에 대한 합의가 없는 상태에서 요구되는 각 터널의 실제적인 내화성능에 대한 신뢰성을 가질 수 없다는 것이다. 따라서 향후 이에 대한 심도 있는 실물 및 이론연구가 필요할 것으로 보인다.

외국의 기존 외국 내화성능평가 기준을 고려하여 다음과 같이 터널별 화재온도곡선과 내화시간을 제안하고자 한다. 제안은 각국의 터널특성, 교통특성, 지리(지반)특성 등에 기초한 내화성능 평가기준을 고려한 분석 결과이다.

도로터널과 관련하여, HGV 차량이나 위험물 수송차량이 통과하지 않는 터널의 경우는 ISO 834 표준 화재 온도곡선에 의한 1시간 이상의 내화성능이 필요할 것으로 분석된다. 이는 일반적인 승용차량의 화재시험의 결과에서 제시된 온도 및 지속시간이 모든 실험에서 60분 이내에서 관측되고 있으므로 ISO 표준곡선의 1시간 내화로 충분할 것으로 보인다.

반면 이러한 HGV 나 위험물 수송차량이 통과할 경우는 HC 곡선에 의한 2시간 이상의 내화성능이 필요할 것으로 분석된다. 실제 Eureka 프로젝트 및 Runehamar 터널 화재실험에서 모두 의미있게 지속되는 화재지속 시간은 1시간 미만이었다. 그러나 위험물 탱크차량의 경우 화재지속시간은 위험물의 방출시간에 의존하며 대략 100MW 정도의 화재시 연소율은 약 2.7 kg/s 정도로 보고되고 있으며, 20톤의 액체가 방출되는데 소요되는 시간은 약 2시간 (= 20,000/2.7 = 7,407초) 정도이다. 참고적으로 PIARC에서 제시하는 가솔린 탱크차량의 누출율과 배수율에 따른 화재크기는 표 5와 같다.

그리고 침매 혹은 하저터널 형태의 수중터널인 경우는 차량형태에 관계없이 RWS 곡선에 기초한 2시간 이상의 내화성능이 필요할 것으로 분석된다. 이는 수중터널이 붕괴의 위험과 접근성의 문제가 동시에 발생하는 곳으로 더 높은 안전율을 가져야 할 것으로 보인다. 특히 그 형상이 아래로 굽은 U자 형상이므로 접근성이 매우 어려운 곳이라고 볼 수 있다.

표 5. 가솔린 탱커의 화재크기에 대한 상당누설직경과 누출율의 영향 (PIARC, 1999)

상당누설직경 [mm]	가솔린의 누출율 [kg/s]	열방출율 혹은 화재강도 (HRR) [MW]			
		배수구를 통한 가솔린의 배수율			
		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

다음으로 지하철 터널인 경우는 ZTV 곡선에 기초한 1시간 이상의 내화성능이 필요할 것으로 분석된다. 이는 대부분의 지하철이 도심지내에서 운행하고 있으므로 소방대의 접근성이 용이하다는 점과 현재 출고되는 대부분의 차량이 난연성(불연성) 재료에 의한 철재본체로 구성되어 있어 기존의 알루미늄 차량보다는 화재온도 상승이 크지 않은 점을 고려한 것이다. 그러나 대구지하철 화재 처럼 다중차량을 포함하는 화재가 예상되는 경우는 이보다 긴 내화시간이 적용되어야 할 것으로 보인다.

끝으로 일반적인 철도터널 차량의 경우는 지하철 차량보다 상대적으로 긴 차량길이 특성을 보이므로 ZTV 곡선보다는 지속시간이 긴 EBA 곡선에 기초한 2시간 이상의 내화성능이 필요할 것으로 분석된다. 이는 차량 특성상 차량의 편성길이가 길다는 점 이외에도 화재시 화재온도가 최고 정점에 도달하는 시간(Flash over time)이 길고 화재지속시간이 지하철 차량에 비해 길다는 점을 고려한 것이다. 또한 지리적 특성상 소방대의 접근이 지연될 것으로 예상되므로 지하철 터널보다는 긴 내화지속시간이 요구되어 진다. 반면 철도터널은 사고발생 확률이 도로터널이나 지하철 터널에 비해 극히 낮은 편이므로 경제성 등을 고려하여 RWS 곡선은 요구되지 않는다. 그러나 교행운전이 요구되는 단선터널은 다중차량에 의한 화재가 예상되므로 이때는 이보다 긴 내화시간이 적용되어야 할 것으로 보인다.

5. 결론

터널 화재시 터널 구조물의 내화성능 평가는 터널 화재의 특성에 따라 섬유질계 가연물의 구획 내 화재에 기초한 화재온도 기준과는 상이한 화재온도 기준에 기초해야 할 필요성이 있다. 아직까지 국내에는 터널구조물의 내화성능에 대한 기준이 마련되어 있지 않지만, 외국의 기존 기준 또는 권고안을 기초로 하여 국내 터널 특성을 고려한 평가기준과 온도곡선이 마련되어야 할 것이다. 또한 터널 구조물에 대한 각 요소에 대한 내화규정의 마련이 향후 추가 연구를 통해 기준으로 정립될 필요성이 제기되고 있다. 특히 터널 화재의 대형화 경향을 고려하여 향후 제시될 국내 기준이나 권고안은 단일차량의 화

재모델뿐만 아니라 다중차량의 화재모델을 고려하여야 할 것으로 판단된다.

본 연구결과에 따라 제안된 터널별 특성에 따른 터널화재 온도곡선과 내화시간을 정리하면 다음과 같다.

1. 도로터널인 경우, (1) 대형 화물트럭과 위험물 수송 트레일러가 통과하지 않는 경우에는 ISO 834 표준 화재온도곡선, 1시간 이상의 내화시간, (2) 통과가 허용되는 경우에는 HC 곡선, 2시간 이상의 내화시간, (3) 수중터널인 경우 RWS 곡선에 기초한 2시간 이상의 내화시간을 제안한다.
2. 지하철터널인 경우 ZTV 곡선에 기초한 1시간 이상의 내화시간을 제안한다.
3. 철도터널인 경우 EBA 곡선에 기초한 2시간 이상의 내화시간을 제안한다.

터널 본체를 제외한 기타 요소들에 대한 세부규정은 국내 기술여건(시공성, 경제성) 등을 고려하여 향후 제시될 필요가 있으며, 이에 대한 국내연구가 계속 진행되어야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. Frank Peter, (unknown), "The Causes, Effect & Control of Real Tunnel Fires", http://www.pruefstelle.at/Vortrag_7.html
2. 신병철 (2003), "건축부재의 내화성능 평가방법에 관한 연구", 서울시립대학교 석사논문
3. E. Richer, (1994), "Propagation and Development of Temperature from Tests with Railway and Road Vehicle", Proceeding of the International Conference on Fire in Tunnels, pp. 51~63
4. SP, (2004), Proceedings of the International Symposium on Catastrophic Tunnel Fires, SP Fire Technology(Sweden), SP REPORT 2004-05
5. H. Ingason, A. Lonnermark, (2004), "Recent Achievements regarding Measuring of Time-heat and Time-Temperature Development Tunnels", Safe & Reliable Tunnels, pp. 87~96
6. PIARC, (1999), Fire and Smoke control in Road Tunnels, PIARC(C5), Ref. 05.05.B

7. A. Haack, S. Estefania, (1999), "Design Fires and Objectives for Tunnel Structures Resistance to Fire", PIARC CD-Reports

8. Y. Ota, et al, (2001), "A study on thermal analysis for tunnel structures in the incidence of fire", 4th Int. conf. on Safety in Road and Rail Tunnels, pp. 151~160

9. N.P. Hoj, (2004), "Guidelines for Fire Safe De-

sign Compared Fire Safety Features for Road Tunnels", Safe & Reliable Tunnels, pp. 127~138

10. H. Ingason, (2001), "An Overview of vehicle fires in tunnels", 4th Int. Conf. on Safety in Road and Rail Tunnels, pp. 425~434

11. ITA(Russell), (2004), "ITA Guidelines for Structural Fire Resistance for Road Tunnels", Fire Safety in Tunnels, pp. 72~81



김효규
 (주)삼보기술단 과장
 xram77@chol.com



윤명우
 서울시립대학교 도시과학대학원
 방재공학과 교수
 yoonmo@empal.com



박경환
 (주)영설계엔지니어링 이사
 kwfree21@hanmail.net



이창우
 동아대학교 지구환경공학부 교수
 cwlee@daunet.donga.ac.kr
