

간행물등록번호

11-1613000-003470-01



도로터널 내화 지침 해설서

2024. 1.



국토교통부

Ministry of Land,
Infrastructure and Transport

목 차

제1장 총칙	1
제2장 터널의 한계온도	4
제3장 터널의 내화	10
제4장 터널의 내화공법	15
제5장 터널의 내화시험	25
[별표 1] 터널 내화시험곡선	34
[별표 2] 터널 내화시험 시 열전대 위치	37

도로터널 내화 지침 해설서

제1장 총칙

제1조(목적) 이 지침은 도로터널에서 발생할 수 있는 차량화재 등으로 인한 터널의 손상과 붕괴를 예방하기 위한 도로터널의 내화 기준을 규정함을 목적으로 한다.

【해설】 이 지침은 도로법 제10조에서 규정하고 있는 고속국도, 일반국도, 특별시도, 광역시도, 지방도, 시도, 군도, 구도의 터널에 적용함을 원칙으로 한다. 터널의 유형, 구조형식, 연장, 주변 환경을 함께 고려하여 화재로 인한 터널의 손상과 붕괴를 예방하는데 요구되는 내화 기준을 규정하는 것을 목적으로 한다.

터널은 폐쇄공간이기 때문에 내부에서 화재가 발생하게 되면 터널 사용자의 안전이 최우선적이며 사용자의 대피를 위한 시간과 경로를 확보해야 한다. 하지만 터널 구조물이 손상되어 구조적인 안전성에 문제가 발생하게 되면 대피에 지장이 생길 뿐만 아니라, 터널 기능의 상실로 인하여 막대한 사회적 비용이 발생하게 된다. 화재 후 보수 비용 발생, 교통 차단 등으로 인한 교통의 편의성 저하 및 주변 지역의 경제 활동 등이 사회적 비용에 포함된다.

국외에서는 Mont Blanc Tunnel 화재(1999)와 Tauern Tunnel 화재(1999), Gothard Tunnel 화재(2001) 등의 대형 터널화재가 발생하여 많은 인명피해와 터널의 구조적인 손상이 발생하였다. 국내에서도 사매2터널(2020), 상주터널(2015) 및 달성터널(2005) 등에서 발생한 대형차량 화재 사고로 터널 내 화재사고에 대한 사회적 불안감이 고조되고 있는 실정이다.

특히 최근 신설하는 도로는 도심지 통과 및 기존 도로 개량 등으로 지하도로 시공 및 설치사례가 증가하는 추세이며, 지하도로 구간의

연장도 증가하고 있다. 또한 침매터널, 도심지 터널, 복층 터널 등과 같이 화재로 인하여 구조적인 안전성이 위협을 받을 수 있는 유형이 많이 증가하고 있다. 특히 도심지 터널은 터널 구조물의 손상이 터널의 상부에 위치한 주변 구조물(overbuild)의 안전성에도 영향을 미칠 수 있어 터널 화재로 인한 피해가 광범위하게 확산될 가능성도 있다.

이처럼 화재에 대한 터널의 구조적인 안전성의 확보는 매우 중요함에도 불구하고, 사용자의 안전을 확보하고 터널 구조물의 손상 붕괴를 방지하기 위한 내화방안에 관한 통일된 개념이 확립되어 있지 않기 때문에 이 지침을 통하여 도로터널 내화기준을 규정하고자 한다.

제2조(용어의 정의) 이 지침에서 사용하는 용어의 뜻은 다음과 같다.

1. 내화도료공법 : 내화기능을 갖는 도료를 터널에 붓칠 또는 뿔칠로 일정 두께를 도장하여 화재 시 고열이 터널 부재에 전달되지 못하게 하는 공법을 말한다.
2. 내화보드(패널)공법 : 공장 생산된 내화보드(패널)를 터널 부재에 앵커 등으로 고정하여 화재 시 고열이 터널 부재에 전달되지 못하게 하는 공법을 말한다.
3. 내화뿔칠공법 : 내화재료를 현장에서 혼합한 후 뿔칠기계를 사용하여 터널 부재 등에 일정두께로 뿔칠하여 화재 시 고열이 터널 부재에 전달되지 못하게 하는 공법을 말한다.
4. 내화시험곡선 : 다양한 화재를 모사하는 시험곡선을 말하며 화재의 특성에 따라 온도변화, 최대온도 및 화재지속시간을 변수로 화재를 특정한다.
5. 내화재 : 터널화재 시 터널부재의 내화성능을 확보할 수 있도록 콘크리트 표면에 부착하는 자재나 콘크리트에 혼입하는 재료를 말하며, 일반적으로 내화 보드 및 뿔칠, 섬유혼입콘크리트 등이 있다.
6. 도심지터널 : 토지소유자가 토지를 이용함에 있어서 실질적으로 사용, 수익, 처분하지 아니하는 지하의 깊이 이하에 위치한 터널을 말한다.

7. 복층터널 : 하나의 터널 단면에 슬래브 등으로 터널 단면을 나누고 각 단면에 차량 또는 하중 등을 지지할 수 있는 구조로 여러 층으로 나누어 사용하는 터널을 말한다.
8. 부착강도 : 터널 부재와 내화재 간에 서로 분리되지 않으면서 일체화된 성능을 발휘할 수 있도록 하는 접착강도를 말한다.
9. 섬유혼입콘크리트 : 콘크리트의 내화성능을 보완하기 위해 단종 또는 이중 이상으로 섬유를 혼합하여 화재 시 섬유가 용융된 공극으로 압력을 방출시켜 폭렬이 감소하는 콘크리트를 말한다.
10. 내화 시험체 : 내화 성능을 측정할 목적으로 제공되는 내화재가 적용된 터널 부재 또는 그 일부를 말한다. 단, 섬유혼입콘크리트 등 자체내화공법은 내화 시험체와 내화 콘크리트 시험체를 동일한 것으로 본다.
11. 열전대(Thermocouple) : 두 종류의 금속을 조합하였을 때 접합 양단의 온도가 서로 다르면 이 두 금속 사이에 전류가 흐르게 되는 원리를 이용하는 온도 측정 센서(감지기)를 말한다.
12. 유해가스 : 화재 시 인체나 주위환경에 유해한 작용을 일으키는 일산화 탄소, 탄화수소, 질소산화물, 연기 등의 연소가스를 말한다.
13. 침매터널 : 하저(河底) 또는 해저(海底) 터널, 또는 지하수면 이하의 구조물로서 전체 또는 일부를 함체(函体)의 형태로 별도의 장소에서 제작한 후 물에 띄워 침설현장까지 예항(曳航)하고, 소정의 위치에 침하시켜 기설부분과 연결시킨 후 되메우기를 하여 완성시키는 터널을 말한다.
14. 내화 콘크리트 시험체 : 터널 부재 자체의 내화 성능이나 내화재 성능을 측정할 목적으로 제작하는 터널 부재 또는 그 일부를 말한다.
15. 폭렬 : 화재 시 급격한 고온에 의해 내부 수증기압이 발생하고, 이 수증기압이 콘크리트의 인장강도보다 크게 되면 콘크리트 부재 표면이 심한 박리 및 탈락하는 현상을 말한다.
16. 한계온도 : 화재발생 중 터널이 성능을 유지하고 안전성을 확보할 수 있는 최대 온도를 말한다.

제3조(적용범위) 이 지침은 「도로법」 제10조에 따른 도로에 건설되는 터널에 적용한다.

【해설】 도로법 제10조에 따르는 도로는 1. 고속국도(고속국도의 지선 포함), 2. 일반국도(일반국도의 지선 포함), 3. 특별시도(特別市道)·광역시도(廣域市道), 4. 지방도, 5. 시도, 6. 군도, 7. 구도이다. 이 지침의 적용대상인 ‘도로터널’은 자동차의 통행을 목적으로 지반을 굴착하여 지하에 건설한 구조물을 말한다.

제2장 터널의 한계온도

제4조(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.

【해설】 ① 도로터널의 한계온도는 터널을 구성하는 주요 부재인 콘크리트와 철근 등이 화재 발생 시 도로 이용자의 안전 확보와 터널 구조물의 손상을 최소화할 수 있는 온도로서 재료의 고온 노출 시 재료의 특성 등을 고려하여 구조적인 안전성을 확보할 수 있도록 설정하는 온도이다.

② 터널 주요 재료인 콘크리트와 철근은 일반적으로 약 500℃ 및 250℃ 이상의 온도에 노출될 경우, 역학적인 특성이 심각한 수준으로 변화한다. 따라서 화재 발생 시 터널의 구조적인 안전성을 확보할 수 있도록 각 재료별로 한계온도를 설정한다.

터널에 화재가 발생하면 터널 내부에는 화재발생 위치, 화재 차량

및 환기조건 등에 따라 발생하는 온도가 다르다. PIARC 보고서(Fire and Smoke Control in Road Tunnels, 1999)의 실제 화재 실험을 통한 연구 결과에 따르면 차량의 종류에 따라 발생하는 온도를 다음의 해설 표 2.1과 같이 분석한 바 있다.

해설 표 2.1 터널 화재로 인한 터널 내부 벽면의 온도

천정 내부	측벽 내부
승용차	400℃
버스, 소형화물차	700℃
대형화물차 (휘발유 등의 위험물 적재않은 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

터널의 주요 구조 부재는 콘크리트와 철근으로 일반적으로 철근 콘크리트는 약 400℃ 이상에서 구조물의 강도 감소가 발생하므로 화재 발생 시 터널의 구조적인 안전성을 확보하기 위하여는 콘크리트와 철근이 노출되는 온도의 한계를 설정하고 터널의 주요 구조 부재가 온도의 한계, 즉 한계온도 이상으로 노출되지 않도록 보호하여야 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.

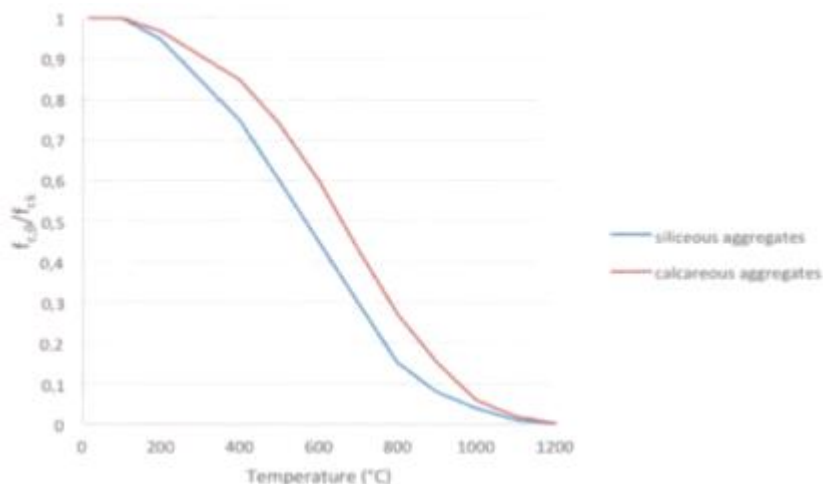
② 내화가 필요한 프리캐스트 세그먼트 콘크리트 부재는 표면을 기준으로 한계온도인 250℃ 이내로 보호해야 한다. 이 경우 내화처리된 세그먼트 부재는 온도기준면을 제1항과 동일하게 적용한다.

③ 철근은 한계온도인 250℃ 이내로 보호해야 한다.

④ 기타재료의 한계온도는 터널조건 및 사용재료 등을 종합적으로 고려하여 발주기관에서 정할 수 있다.

【해설】 ① 콘크리트는 노출되는 온도가 상승함에 따라 압축강도 및 탄성계수는 감소한다. 이는 온도에 의한 콘크리트의 열적분해(thermal decohesion) 또는 열적손상(thermal damage)으로 설명할 수 있다. 일반적으로 콘크리트의 압축강도는 약 600℃에 노출될 경우 상온 강도의 약 50% 수준인 것으로 알려져 있다. 이러한 온도에 따른 강도 및 탄성계수의 변화는 사용하는 골재의 종류에 많은 영향을 받는 것으로 알려져 있다.

해설 그림 2.1에서와 같이 온도가 약 200℃까지는 강도의 감소가 거의 없지만 750℃ 이상에서는 설계에 반영할 수 있는 강도의 수준이 아니다. 일반적으로 설계 시 적절한 수준의 화재 규모에 대해 구조 부재의 허용강도는 콘크리트 압축강도의 30~50% 범위 내에 있는 것으로 가정한다. 안전성에 대한 사례로, 1992년 네덜란드에서는 안전 수준을 1.7로 가정하여, 즉 콘크리트의 압축강도가 59% (100%/1.7) 까지 줄어든 경우가 안전계수 1.0인 것으로 판단하였고, 이는 해설 그림 2.1을 참조할 경우 구조물이 파괴되기 직전의 온도가 약 450℃라는 것을 의미한다. 또한 이미 고온에 노출되어 초기강도가 낮아진 상태의 콘크리트 표면에는 미세균열(hair crack) 또는 박리(spalling)가 발생하였을 수 있다. 따라서 구조물의 하중지지능력을 유지하기 위해서는 콘크리트의 온도가 350~400℃ 수준 이내이어야 한다.



해설 그림 2.1 온도상승에 따른 골재종류별 콘크리트 압축강도 감소*

* 자료출처: Eurocode(2004)

만약 콘크리트가 RWS Standard와 같이 1,000~1,350℃까지의 고온에 노출될 경우에는 설계단계에서부터 구조물의 하중지지능력의 감소에 대한 고려를 해야 하고, 차폐재료의 사용 등을 고려해야 한다.

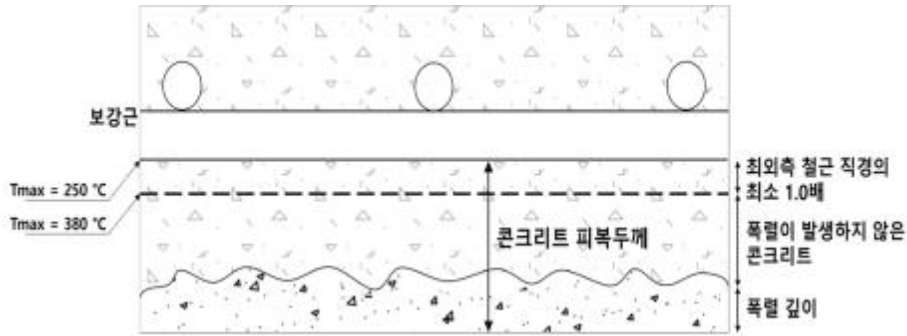
제9조에 언급한 바와 같이, 터널 내화 방법을 3가지로 분류할 수 있다.

- 1) 콘크리트 자체내화공법: 혼화재, 섬유 등 콘크리트 내부에 내화 재료가 혼입된 공법
- 2) 콘크리트 외부 내화공법 : 내화 보드, 뿔칠 등 콘크리트 외부에 내화재료가 부착되는 공법
- 3) 그 외의 기타 내화공법

공용 중 터널의 내화보강에는 2)만 적용가능한 반면에, 신규 터널의 내화 공법에는 1) 또는 2) 아니면 1)과 2)의 혼합이 가능하다.

콘크리트 부재의 표면을 온도기준면으로 간주하는 것은 내화 보드나 뿔칠을 적용한 2)와 같이 콘크리트 외부에 내화재를 보강한 공법에 적용된다. 반면, 섬유혼입 등 1)의 콘크리트 자체내화공법을 적용한 경우에는 네덜란드 정부기관인 Rijkswaterstaat (Ministry of Infrastructure and Water Management, 국내 국토교통부에 해당)와 네덜란드 연구기관인 Efectis Nederland의 공동 성과물인 Efectis-R0695:2020의 내화 실험 방법을 참고하여 온도기준면을 설정할 수 있다. 콘크리트 자체내화공법을 적용할 경우, 콘크리트 표면에 가까운 최외측 철근 직경의 최소 1.0배 떨어진 위치를 온도 기준면으로 권고하고 있다.

기타 내화공법의 경우, 온도기준면은 콘크리트 부재의 표면을 기준으로 하되 발주기관과 협의하여 결정한다.



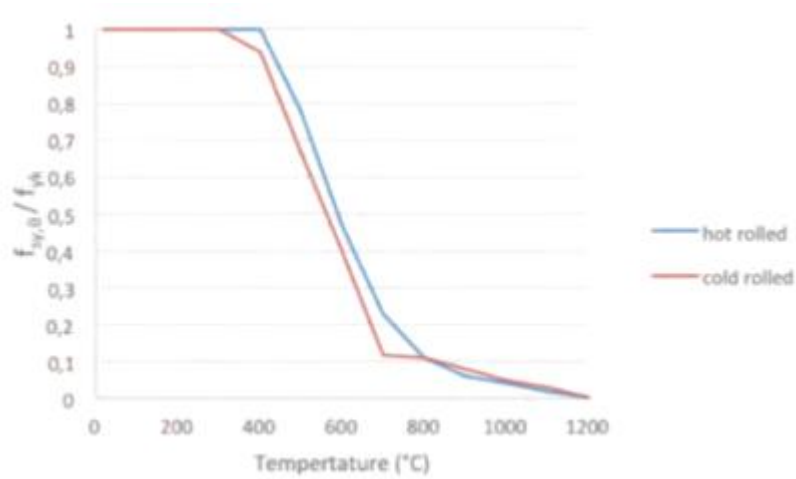
해설 그림 2.2 콘크리트 부재의 온도기준면*

* 자료출처: Efectis-R0695(2020)

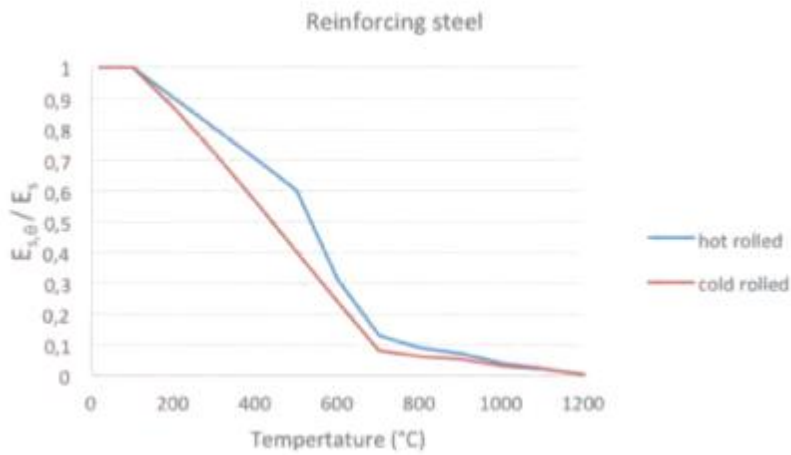
② 내화가 필요한 프리캐스트 세그먼트 콘크리트 부재라 함은 쉴드 TBM 공법을 적용하는 터널의 고강도 프리캐스트 세그먼트 콘크리트 라이닝 부재를 의미한다. 그 외의 터널 부재로 활용하는 풍도슬래브 등과 같은 프리캐스트 세그먼트 콘크리트 부재는 포함하지 않는다. 쉴드 TMB 공법은 조립된 세그먼트의 아칭효과에 의해 주응력인 축력이 터널을 지탱하는 구조이다. 따라서 고온 노출 시 폭렬로 단면이 손실될 경우 지지력이 소실될 수 있기 때문에 한계온도를 일반 콘크리트보다 낮은 온도인 250℃ 이내로 보호하여 보다 엄격히 관리해야 한다.

③ 철근의 강도 및 탄성계수는 콘크리트와 마찬가지로 온도상승에 따라 감소한다. 그 특성은 철근의 종류에 따라 달라지며, 고온에서는 냉간압연보강재(cold deformed reinforcement)가 열간압연보강재(hot rolled reinforcement)보다 강도저하가 더 심한 것으로 알려져 있다. 해설 그림 2.3과 해설 그림 2.4는 온도상승에 따른 철근의 항복강도와 탄성계수의 감소에 대한 사례를 나타내었다.

고온에 노출된 철근은 냉각 후에 어느 정도 강도를 회복하는 것으로 알려져 있다. 열간압연보강재의 경우 냉각 이후에 항복강도와 극한강도가 원래의 수준으로 회복된다. 냉간압연보강재는 약 300℃까지 노출된 경우 대부분의 강도를 회복하며, 600℃까지 노출된 경우, 항복강도와 극한강도가 약 60% 수준이 된다. 이를 초과하는 매우 높은 고온에 노출되면 강재는 녹거나 분해될 수 있고, 용접부의 강도도 저하되고 방청도료 같은 재료도 화재 시 구조물의 거동에 영향을 미칠 수 있다.



해설 그림 2.3 온도상승에 따른 class N 보강근의 강도 감소*



해설 그림 2.4 온도상승에 따른 철근의 탄성계수 감소*

* 자료출처: Eurocode(2004)

④ 방재시설, 대피소, 비상구 등의 부대시설 및 기타재료의 설치는 「도로터널 방재·환기시설 설치 및 관리지침(국토교통부)」의 기준을 준용한다.

제3장 터널의 내화

- 제6조(터널내화 일반사항)** ① 침매터널, 복층터널, 대심도 터널, 하저(河底) 또는 해저(海底) 터널 등 화재 사후 피해가 큰 도로터널은 이 지침에 따른 내화 적용 여부를 검토해야 한다.
- ② 이 외의 터널은 교통량, 터널유형 및 유지관리 조건 등을 종합적으로 검토하여 발주기관이 필요하다고 인정하는 경우에 적용해야 한다.
- ③ 제1항과 제2항에 따른 도로터널의 내화 적용 여부 및 공법은 터널의 설계단계에서 검토하여 필요 시 반영하고, 시공단계에서 내화시험 등을 통해 내화재를 선정해야 한다.

【해설】 ① 화재로 인하여 도로터널 구조물에 심각한 손상이나 붕괴와 같은 안전성의 위험을 예방하기 위하여 가능한 방법으로 내화를 적용한다. 특히 침매터널, 복층터널, 도심지 대심도 터널 및 하저(河底) 또는 해저(海底) 터널 등은 화재로 인한 손상이나 붕괴가 매우 심각한 사회적 재난을 초래할 수 있다. 하지만 대심도 터널의 경우, 그 유형이 NATM 터널이고 양질 암반구간(예 RMR 암반분류법에 의한 암반등급 I~Ⅲ)에 위치하는 조건이거나 철근을 보강재로 사용하지 않는 무근 콘크리트 터널은 화재로 인한 손상이나 붕괴 등의 위험이 상대적으로 적어 내화 적용을 생략할 수 있다. 해설 표 3.1은 터널의 형식에 따른 구조물의 특성과 화재로 인한 예상 피해를 정리하고 있다.

해설 표 3.1 화재 시 예상되는 피해

터널 유형	화재 시 예상 피해
침매/하저/해저 터널	<ul style="list-style-type: none"> • 하천이나 해저의 횡단 터널로, 흙덮개가 얇게 시공됨 • 고무재를 사용한 이음매에서 지하수가 침입하여 손상 복구에 막대한 비용이 예상됨
대심도/TBM 터널	<ul style="list-style-type: none"> • 대심도, 해수면 하, 취약 지반 등에 시공되고 근접 구조물이나 지표면 등에 영향이 적은 공법으로 시공 • 고무재 등을 사용한 이음매에서 지하수가 침입하여 손상 복구에 많은 비용이 예상됨 • 터널의 변형 또는 붕괴는 지표면 및 주변 구조물에 미치는 영향이 큼
복층/개착 터널	<ul style="list-style-type: none"> • 가설 토류 공법을 이용한 박스형식 RC구조가 많아 완성 후에 지하 수위가 복구됨 • 고무재를 사용한 이음매에서 지하수 침입이 예상됨 • 상부가 다층 구조이거나 터널 심도가 큰 경우에는 복구에 막대한 비용이 예상됨.
도심지 터널	<ul style="list-style-type: none"> • 지반 안정화를 위하여 보조 공법 시공 • 라이닝의 손상이 터널 붕괴로 이어지는 경우도 예상되므로, 터널의 변형이 지표부에 영향을 미칠 가능성도 높을 것으로 보임

② 터널 내화의 목적은 유관기관이 소화 및 구조 활동을 원활히 수행할 수 있도록 대응시간을 확보하고, 화재로 인한 손상을 최소화 하여 막대한 재산 손실을 예방하는 것이다. 터널 내화에 대한 사례가 많은 유럽에서는 교통량이 적어 사회적 비용이 현저히 낮아 내화공사 비용이 높은 경우는 내화수준을 낮추거나 내화 자체를 생략할 수 있도록 하고 있다. 반면, 사회적 비용이 커서 교통이 차단될 경우, 막대한 사회적 비용이 발생하는 경우는 복구보다는 내화공사에 치중하는 것이 합리적일 수 있다.

제6조 ①항에 해당하지 않는 터널이지만, 교통량, 터널유형 및 유지관리 조건 등을 종합적으로 검토하고, 예상되는 터널 내화공사 비용과 사회적 비용 등을 고려하여 사회적 비용이 현저히 큰 경우는 발주기관에서 터널 내화를 검토할 수 있다. 사회적 비용은 복구를 위한 통행시간 손실비용, 차량운행 손실비용, 교통사고 및 대기오염손실을 포함하는 환경비용 등을 포함한다. 이를 기초로 터널 내화공사를 위한 비용편익분석을 수행하고 그 결과 사회적 비용보다 내화공사 비용이 높은 경우 내화 적용을 생략하거나 내화수준을 하향 조정할 수 있다.

터널유형이 쉘드 TBM 터널인 경우, 그 구조적 특성 때문에 내화 적용을 검토해야 한다. 또한 도심지를 관통하는 터널이나 터널 주변에

대형 건물 등과 같은 구조물들이 위치한 저심도 구간의 터널 등은 화재로부터 터널 구조물을 보호하기 위해 내화 적용여부를 반드시 검토해야 한다.

제7조(차량유형) 터널화재의 중요한 요인으로서의 차량유형은 다음과 같이 분류한다.

분류	차량유형
소형차	승용차, 승합차, 소형화물차
대형차	유조차 및 대형화물차

【해설】 국내의 도로 상의 화재사고는 점차 감소하는 추세지만, 연간 15억대 이상의 차량이 이용하는 고속도로에서는 여전히 수백 건의 차량화재 사고가 발생하고 있다. 사고원인은 해설 그림 3.1에 나타난 바와 같이 엔진과열, 노후타이어 등과 같은 차량요인이 가장 높게 나타났다. 전방주시 태만, 졸음운전 등 인적요인이 그 뒤를 잇고 있다. 차종별로는 교통량이 현저히 많은 소형차의 화재사고가 가장 많았으나, 차종별 교통량을 고려할 때, 화물 트럭이 주류인 중형차의 사고 빈도가 압도적으로 높게 나타나므로 중형 화물트럭의 화재안전에 대한 추가적인 장기대책 또한 필요할 것으로 판단된다. 이 지침에서 차량유형의 소형차는 「자동차관리법 시행규칙」 제2조<별표 1>의 규모별 세부기준에 따른 승용자동차 전 규모와 승합자동차, 화물자동차 및 특수자동차의 경형과 소형을 의미한다. 대형차는 승용자동차를 제외한 승합자동차, 화물자동차, 특수자동차의 중형과 대형을 의미한다. 차량유형을 소형차와 대형차로 구분하는데, 이는 실제 도로상에서 화재가 발생하여 터널 구조물에 구조적인 손상을 유발하는지에 대한 위험도를 고려하여 구분하였다.



해설 그림 3.1 고속도로 차량화재 사고원인* 해설 그림 3.2 고속도로 차종별 화재발생 통계*

* 자료출처: 고속도로 화재사례로 본 진단 및 대책, 한국도로공사 (2017)

제8조(내화설계) ① 터널의 내화설계는 제7조의 차량유형과 지반특성 및 터널유형을 고려한 다음의 내화시험(제12조부터 제19조) 화재 조건을 만족할 수 있는 성능을 확보해야 한다.

차량유형	침매터널, 복층터널, 대심도터널 하저 또는 해저 터널 등	기타 터널
소형차	KS 1시간 [별표 1]	주1)
대형차 (유조차 등)	RWS/HCinc 2시간 [별표 1]	주2)

주1) 화재피해가 지반 안전성에 영향을 주지 않는 안정구간 터널의 경우에는 별도의 내화처리는 필요하지 않다. 다만, 발주기관의 필요에 따라 KS 1시간 내화시험을 적용할 수 있다.

주2) 화재피해가 지반 안전성에 영향을 주지 않는 안정구간 터널의 경우에는 별도의 내화처리는 필요하지 않다. 다만, 발주기관의 필요에 따라 KS 2시간이나 RWS/HCinc 2시간 내화시험을 적용할 수 있다.

② 화재 발생 시 진압을 위한 접근성이 떨어지거나 유지보수에 따른 교통 차단이 곤란하여 발주기관이 터널 손상의 최소화 또는 차단 시간 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 방재시설, 대피소, 비상구 등 본선터널을 제외한 부대시설물의 경우 터널에 따라 다양한 형식으로 설치되므로 별도의 내화방안을 수립해야 한다.

【해설】 국제터널협회(ITA; International Tunnelling Association)에서는 해설 표 3.2와 같이 터널 구조물의 지반특성과 차량유형에 따라 적용하는 화재조건을 제시하고 있다.

해설 표 3.2 PIARC 화재조건

Category	Number vehicle involved	Immersed tunnel	Tunnel in unstable ground	Tunnel in stable ground	Cut & cover
1	1-2	ISO 60 min	ISO 60 min	(ii)	(ii)
1	≥3	ISO 60 min	ISO 60 min	(ii)	(ii)
2, 3	1-2	RWS/HC _{inc} 2 hrs. (i)	RWS/HC _{inc} 2 hrs. (i)	(iii)	(iii)
2, 3	≥3	RWS/HC _{inc} 3 hrs.	RWS/HC _{inc} 3 hrs.	(iii)	(iii)

(Note)

- (i) 터널 관리기관이 내부 시설자산을 보호하고 보수비용을 감소하고 차단기간을 축소하여 경제적 및 환경적인 영향을 감소하고자 할 경우, 설계 온도-시간곡선을 2시간에서 3시간으로 증가하는 것을 고려 가능
- (ii) 인명의 안전이 설계인자가 아닌 경우와 어떠한 내화시설이 필요하지 않은 경우(연속 붕괴를 고려하지 않는 경우). 기타 자산보호 또는 보수비용 최소화 등을 목표로 할 경우 다음의 기준을 선택 가능
 - 일반적인 경우, ISO 60분
 - 구조적인 안전성 확보가 화재 후 보수비용 및 절차보다 매우 심각하게 비싸고 어려운 경우, 내화 설계 제외 가능 (예, 소음 저감 장치 등)
- (iii) 인명의 안전이 설계인자가 아닌 경우와 어떠한 내화시설이 필요하지 않은 경우(연속 붕괴를 고려하지 않는 경우). 만약 다른 경우를 고려한다면 다음의 기준을 선택 가능
 - 도로망 또는 시설자산(예, 건물 지하 터널 등)에 심각한 영향을 미치게 되어 강력한 내화가 필요한 경우, RWS/HC_{inc} 120분
 - 상대적으로 저렴한 비용으로 자산 손상을 최소화할 수 있는 경우, ISO 60분
 - 구조적인 안전성 확보가 화재 후 보수비용 및 절차보다 매우 심각하게 비싸고 어려운 경우, 내화 설계 제외 가능 (예, 소음 저감 장치 등)

주1) 일반적으로 지반의 조건이 양호하지 않은 구간(예: RMR 암반 등급 IV 이상, 단층파쇄대 또는 지질이상대 등의 지반조건이 불량한 구간) 및 갱구부와 같이 콘크리트 라이닝에 철근보강을 적용한 구간에

대하여 KS 1시간 내화시험을 적용할 수 있다. 다만, 내화공사 비용과 사회적 비용에 대한 비용편익분석을 수행한 결과 내화공사 비용이 높은 경우 내화 적용을 생략할 수 있다.

주2) 일반적으로 지반의 조건이 양호하지 않은 구간(예: RMR 암반 등급 IV 이상, 단층파쇄대 또는 지질이상대 등의 지반조건이 불량한 구간) 및 갱구부와 같이 콘크리트 라이닝에 철근보강을 적용한 구간에 대하여 KS 2시간이나 RWS/HC_{inc} 2시간 내화시험을 적용할 수 있다 (RWS/HC_{inc} 내화시험 통과 시 KS 내화시험 통과로 간주). 다만, 내화공사 비용과 사회적 비용에 대한 비용편익분석을 수행한 결과 내화공사 비용이 높은 경우 내화 적용을 생략할 수 있다.

⑤ 방재시설, 대피소, 비상구 등의 부대시설 및 기타재료의 설치는 「도로터널 방재·환기시설 설치 및 관리지침(국토교통부)」의 기준을 준용한다.

제4장 터널의 내화공법

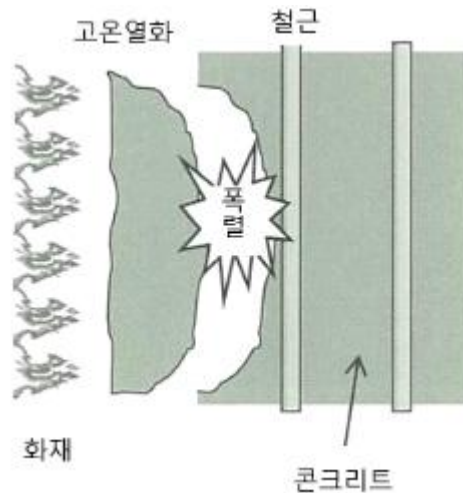
제9조(내화공법 유형) 터널 화재발생 시 터널의 손상방지를 위한 내화공법은 다음 각 호와 같이 분류한다.

1. 부재 자체내화(섬유혼입콘크리트 등)
2. 내화뿔칠(또는 도료)
3. 내화보드(또는 패널)
4. 그 밖에 화재로 인한 터널의 손상을 방지하기 위한 공법

【해설】 제5조 한계온도 규정에서 설명한 바와 같이 콘크리트 자체 내화공법, 외부 내화공법 및 기타 내화공법으로 구분하였다. 내화공법은 사용재료 및 시공방법에 따라 다양한 형식이 가능하고, 터널 유형 및 재료, 화재 발생 후 보수의 용이성, 경제성, 시공성, 건축한계의 여유, 점검 및 유지관리의 용이성 등을 감안해 선택할 수 있다.

터널의 내화 공법은 부재 자체의 내화성을 기대하는 부재 자체

내화공법과 터널 내부 표면에 내화 처리를 하여 온도전이 차단을 기대하는 외부 내화공법으로 크게 구분할 수 있다. 부재 자체의 내화성을 기대하는 것은 화재로 인한 콘크리트의 폭렬 현상을 억제하는 것을 기본으로 한다. 콘크리트의 폭렬 현상이란, 콘크리트가 고온에 노출되어 수증기압이나 열응력으로 인해 표면부터 손상이 진행, 단면이 파손되는 현상이다. 콘크리트가 폭렬로 인해 박락되면 내부 철근이 노출되고 고온 노출에 따른 파손이 발생하게 된다. 그 결과, 구조물의 내화 성능이 현저하게 저하되어 구조적 안전성이 매우 위험한 상태가 될 수 있다(해설 그림 4.1). 콘크리트의 폭렬은 6가지로 분류할 수 있다(해설 표 4.1, 해설 그림 4.2). 즉, a) 골재의 박리, b) 모서리부의 박리, c) 표층의 박리, d) 폭발적 박리, e) 취약적 박리, f) 냉각 후의 박리이다. 각각을 명확히 구분하기는 어려우나, a)~c)는 화재 초기에 발생하고 d)~f)는 화재 발생 후 일정 시간 경과 후에 발생한다고 알려져 있다. 또한 폭렬의 영향 인자는 다양하고 폭렬 발생의 메커니즘은 크게 열응력(해설 그림 4.3) 및 증기압응력(해설 그림 4.4)으로 설명할 수 있다.



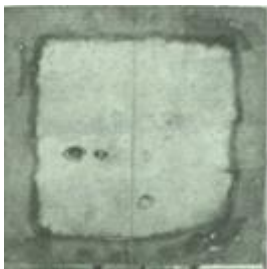
해설 그림 4.1 콘크리트의 폭렬 현상*

* 자료출처: 일본 토목학회 터널 구조물의 콘크리트 내화공 설계·시공 지침 (2014)

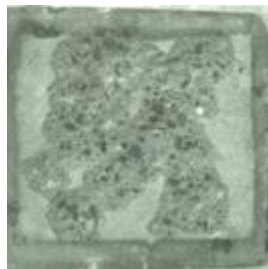
해설 표 4.1 폭렬의 분류

현상	가열 시간	폭렬의 상태	폭음	영향 정도	영향 인자
골재의 박리 (Aggregate spalling)	7-30분	골재의 균열	팝 아웃	표면 파괴	H, A, S, D, W
모서리부의 박리 (Comer spalling)	30-90분	심하지 않음	-	대규모 손상의 가능성 있음	T, A, ft, R
표층의 박리 (Surface spalling)	7-30분	심함	크래킹	대규모 손상의 가능성 있음	H, W, P, ft
폭발적 박리 (Explosive spalling)	7-30분	심함	거대 충격음	대규모 손상	H, A, S, fs, G, L, O, P, Q, R, S, W, Z
취약적 박리 (Sloughing-off spalling)	가열 후, 콘크리트 취약 후	심하지 않음	-	대규모 손상의 가능성 있음	T, fs, L, Q, R
냉각 후의 박리 (Post-cooling spalling)	가열 후, 수분 증발 후	심하지 않음	-	대규모 손상의 가능성 있음	T, fs, L, Q, R, W1, AT

영향 인자: A: 골재의 열팽창, AT: 골재의 종류, D: 골재의 열확산, fs: 콘크리트의 전단 강도, ft: 콘크리트의 인장강도, G: 콘크리트의 재령(材齡), H: 가열 속도, L: 하중, 구속, O: 가열 특성, P: 통기성, Q: 부재의 단면 형상, R: 철근, S: 골재의 치수, T: 피크 온도, W: 함수율, W1: 흡수 특성, Z: 부재의 단면 치수



(a) 골재 박리 (골재의 팝아웃과 표면균열)



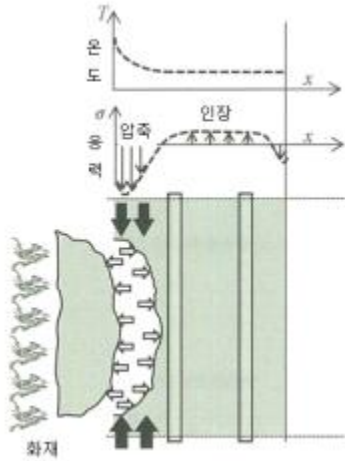
(b) 표층 박리



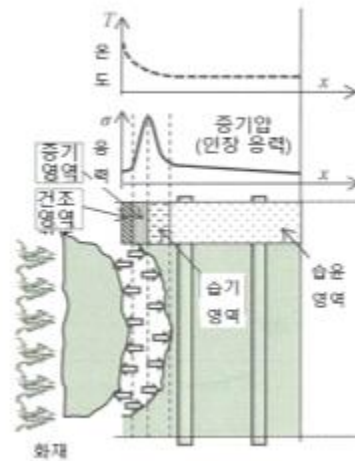
(c) 폭발적 박리

해설 그림 4.2 폭렬 현상 예시*

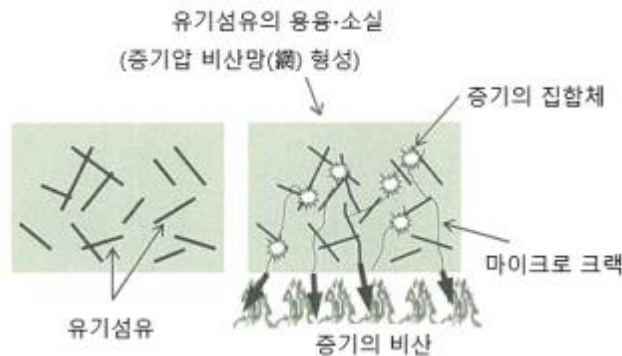
* 자료출처: 일본 토목학회 터널 구조물의 콘크리트 내화공 설계·시공 지침 (2014)



해설 그림 4.3 열응력설*



해설 그림 4.4 수증기압설*



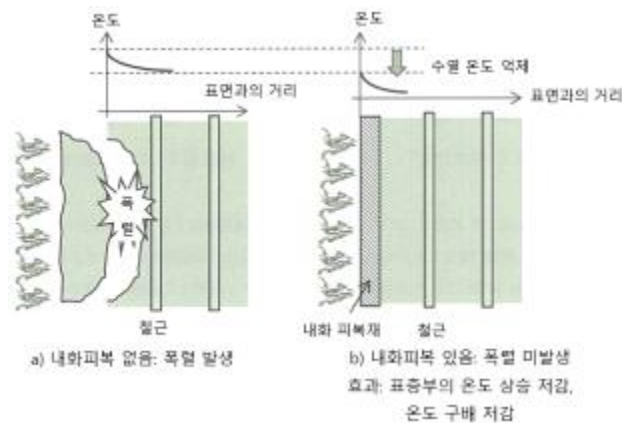
해설 그림 4.5 유기섬유의 폭렬 억제 메커니즘*

* 자료출처: 일본 토목학회 터널 구조물의 콘크리트 내화공 설계·시공 지침 (2014)

콘크리트 부재 자체의 폭렬 저항성을 높이는 방법으로는 폴리프로필렌 등 유기섬유를 혼합하는 방법이 일반적이다. 혼합량은 일반적으로 $1.0\sim 2.0\text{kg/m}^3$ 이지만 섬유와 콘크리트의 특성에 따라 최적의 배합을 확인하는 것이 바람직하다. 해설 그림 4.5에 유기섬유를 혼입했을 경우의 폭렬 억제 메커니즘을 나타냈다. 유기섬유를 콘크리트에 혼입할 경우, 유기섬유는 콘크리트에 분산된 상태로 존재해야 한다. 화재 시에 표층부가 가열되면 먼저 표층부에 균열이 발생하고, 그 후 화재가 지속되면 콘크리트의 내부 온도가 상승하고, 콘크리트 내에 존재하는 자유수(水)가 증기로 변해 증기 집합체를 형성한다. 유기섬유가 없는 경우에는 이 증기 집합체로 인해 인장 응력이 발생하고, 인장 응력이 콘크리트의 인장강도를 넘으면 폭렬이 일어날 것으로 예상된다.

반면, 유기섬유가 있는 경우에는 일반적인 유기섬유의 용점인 약 170℃에서 유기섬유가 용융되면 증기압 비산망이 형성되고, 이 망을 통해 증기가 외부로 비산함으로써 폭발을 억제할 수 있을 것으로 보인다.

이처럼 콘크리트 부재 자체에 내화성을 부여하는 경우, 예상 화재 곡선에서 콘크리트가 폭발을 일으키지 않는 것이 중요하다. 가령 폭발이 발생해도 그 정도가 경미해 내부 철근이 고온에 노출되지 않는 것이 필요조건이다. 또한 콘크리트가 화재손상을 입었을 경우, 폭발이나 강도 저하가 일어나지 않더라도 수분 및 기타 화학물질 침입 저항성이 저하될 가능성이 있으므로 유의해야 한다.



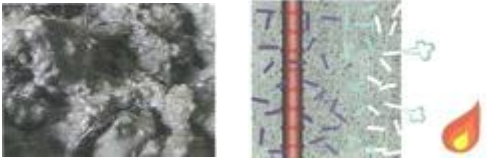
해설 그림 4.6 외부내화재(내화피복)의 단열 효과*

* 자료출처: 일본 토목학회 터널 구조물의 콘크리트 내화공 설계·시공 지침 (2014)

터널 구조물 표면에 외부 내화재를 적용하는 경우, 즉 뽀뽀칠 또는 보드 공법은 외부 내화재의 단열성을 통해 터널 구조물의 온도 상승을 억제한다. 외부 내화재가 없는 경우에는 콘크리트가 직접 고온에 노출되기 때문에 폭발이 생기기 쉽지만 외부 내화재를 적용하면 콘크리트 구조물의 온도 상승을 억제할 수 있고 폭발을 억제할 수 있을 뿐만 아니라, 콘크리트의 열 손상 자체를 어느 정도 막을 수 있다. 해설 그림 4.6에 외부 내화재의 온도 억제 효과를 나타냈다. 그림과 같이 a) 외부 내화재가 없는 경우에는 콘크리트가 직접 고온에 노출되기 때문에 폭발이 생기기 쉽다. 반면, b) 외부 내화재가 있는 경우처럼 표면에 적절한 내화 처리를 하면 콘크리트 구조물의 온도 상승을 억제할 수 있다.

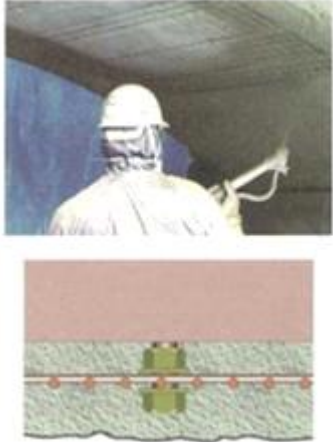
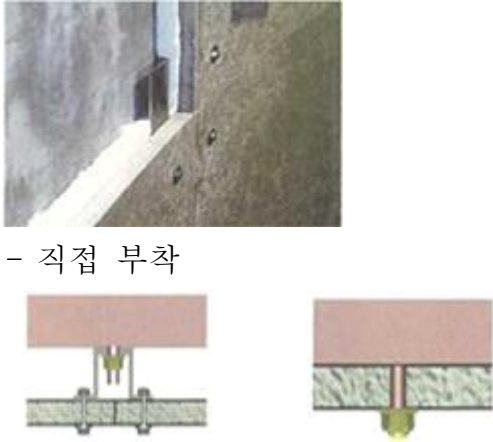
해설 표 4.2에서 해설 표 4.4는 이러한 내화공법의 장단점 등을 간략히 정리하였다.

해설 표 4.2 콘크리트 자체내화공법 개요*

종류별	유기섬유를 혼입한 콘크리트	내화 방안으로서 2차 라이닝
개요	 <ul style="list-style-type: none"> - 분리된 섬유 - 저(低)용점 유기섬유를 콘크리트에 혼입 - 화재열에 섬유가 녹아 콘크리트 안에 있는 수증기를 비산시켜 폭발을 방지 	<ul style="list-style-type: none"> - 콘크리트가 본래 지닌 내화성을 기대
장점	<ul style="list-style-type: none"> - 현장 시공이 불필요하여 타 내화 방안에 비해 매우 저렴한 비용 - 설비 기기와의 접합에 문제없음 - 복공 표면을 상시 육안으로 점검 가능 	<ul style="list-style-type: none"> - 2차 라이닝에 의한 지수성 확보가 용이 - 자중(自重)이 늘어 지진시의 들뜸을 억제할 수 있음 - 2차 라이닝 표면을 상시 육안으로 점검 가능
제약 / 단점	<ul style="list-style-type: none"> - 철근이 노출되지 않도록 주의 필요 - 열변형이 내화 피복보다 커짐 - 내화 성능을 충족하기 위해 두께가 두꺼워짐 - 화재 후 복구를 위해 장기 통행 규제가 필요 	<ul style="list-style-type: none"> - 2차 라이닝 두께 확보를 위해 굴착 단면이 커짐 - 2차 라이닝 타설로 공사기간이 늘어남 - 2차 라이닝을 별도 시공하기 위해 비용이 비싸짐 - 화재 후 복구를 위해 장기 통행 규제가 필요
적용 사례	<ul style="list-style-type: none"> - RC 세그먼트 - 합성 세그먼트의 콘크리트 부분 - 수직갱도 등 RC 구조물 	-
내구성	<ul style="list-style-type: none"> - 화해를 입지 않을 경우에는 콘크리트의 내구성과 동등함. 단, 화재 시 수열 온도에 따라서는 물질 침입의 저항성이 저하되므로 주의가 필요 	<ul style="list-style-type: none"> - 콘크리트 내구성과 동일
유지 관리	<ul style="list-style-type: none"> - 평상시와 동일한 육안 및 타음 점검 가능 - 화재 후에는 중성화 부분을 제거한 뒤 유기섬유 분사 모르타르 등으로 보수 	<ul style="list-style-type: none"> - 평상시와 동일한 육안 및 타음 점검 가능 - 화재 후에는 중성화 부분을 제거한 뒤 유기섬유 분사 모르타르 등으로 보수


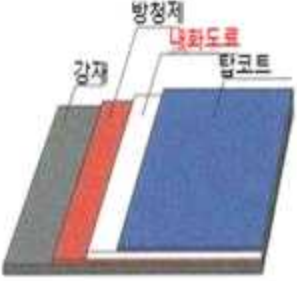
* 자료출처: 일본 토목학회 터널 구조물의 콘크리트 내화공 설계·시공 지침 (2014)

해설 표 4.3 내화뿔칠 및 내화보드 (또는 내화패널) 공법 개요*

종류별	내화뿔칠 공법	내화보드 (또는 내화보드) 공법
개요	 <ul style="list-style-type: none"> - 펄라이트, 버미쿨라이트, 시멘트를 주성분으로 한 재료를 분사 - 일반적으로는 박락방지 스테인리스 메쉬를 설치한 뒤 습식 분사재를 시공 	 <ul style="list-style-type: none"> - 직접 부착 - 플로팅 부착 - 직접 부착 - 규산칼슘계 또는 알루미늄 시멘트계를 주성분으로 한 판상형 내화피복을 직접 부착 또는 띄워 부착하여 시공
장점	<ul style="list-style-type: none"> - 시공 속도가 빠름. - 설비 기기와의 접합이 용이함 - 비정형 구조물에 적합 	<ul style="list-style-type: none"> - 띄워서 부착할 수 있음 - 표면의 평활성과 경도가 뛰어남 - 내장 기능 부여 가능
제약 / 단점	<ul style="list-style-type: none"> - 표면의 평활성과 경도가 떨어짐 - 리브 구조의 강철제(鋼鐵) 세그먼트에 부적합 	<ul style="list-style-type: none"> - 설비 기기에 대한 거푸집 처리가 번잡
적용 사례	<ul style="list-style-type: none"> - RC 세그먼트 - 합성 세그먼트 - 수직갱도 등 RC 구조물 	<ul style="list-style-type: none"> - 거의 모든 부위
내구성	<ul style="list-style-type: none"> - 해외에서 30년 정도의 실적 - 일본에서는 10년 정도의 실적 	<ul style="list-style-type: none"> - 해외에서 30년 정도의 실적 - 일본에서는 10년 정도의 실적
유지 관리	<ul style="list-style-type: none"> - 콘크리트 표면을 육안으로 확인할 수 없고, 콘크리트 타음 점검에 제약이 있음 - 화재 후에는 손상 범위를 교환 	<ul style="list-style-type: none"> - 콘크리트 표면을 육안으로 확인할 수 없고, 콘크리트 타음 점검에 제약이 있음 - 화재 후에는 손상 범위를 교환

* 자료출처: 일본 토목학회 터널 구조물의 콘크리트 내화공 설계·시공 지침 (2014)

해설 표 4.4 내화담요 및 내화도료 공법의 개요*

종류별	내화담요 공법	내화도료 공법
개요	  <ul style="list-style-type: none"> - 실리카를 주성분으로 한 담요 형태의 소재로 가볍고 부드러움 - 대상물에 스테드나 나사로 고정 - 표면은 SUS 판 등으로 덮어 보호 	  <ul style="list-style-type: none"> - 폴리인산암모늄, 다가 알코올류, 수지 바인더 등으로 구성된 도료형 재료를 여러 층으로 나누어 시공 - 표면은 탑코트로 보호하며, 화재 시 열로 발포(發泡)하여 단열층을 형성
장점	<ul style="list-style-type: none"> - 신축성·가요(可撓)성을 지님 - 매우 경량 	<ul style="list-style-type: none"> - 매우 얇음 - 페인트와 동등한 意匠性을 기대할 수 있음
제약 / 단점	<ul style="list-style-type: none"> - 표면 경도가 떨어지므로 보호 필요 - 내수성 취약 	<ul style="list-style-type: none"> - 다층 칠을 위한 공사 기간이 필요 - 건축계에서 주로 사용하며, 터널에 적용되는 경우는 적음
적용 사례	<ul style="list-style-type: none"> - 가요 세그먼트 - 신축 이음부 	<ul style="list-style-type: none"> - 콘크리트 충전 강관 기둥(CFT)
내구성	<ul style="list-style-type: none"> - 재료 자체의 내구성은 높으나, 표면 보호 재료에 따라 다름 	<ul style="list-style-type: none"> - 탑코트의 주기적 도장을 통해 우수한 내구성을 유지할 수 있음
유지 관리	<ul style="list-style-type: none"> - 표면 등을 육안으로 확인할 수 없음 - 콘크리트 타음 점검에 제약 있음 - 화재 후에는 손상 범위를 교환 	<ul style="list-style-type: none"> - 매우 얇아, 도장 상태에서 어느 정도의 육안 점검은 가능 - 본체의 타음 점검에 제약이 있음

* 자료출처: 일본 토목학회 터널 구조물의 콘크리트 내화공 설계·시공 지침 (2014)

제10조(내화재 성능) 내화재의 성능을 확보하기 위해 다음 각 호의 사항을 확인해야 한다.

1. 내화재는 내화시험시간 동안 제5조에 따라 각 부재를 한계온도 이내로 보호해야 하며, 이는 제12조부터 제19조까지의 터널 내화시험을 통해 확인한다.
2. 표면에 부착하는 내화재와 콘크리트 부재와의 부착강도는 KCS 41 48 01의 기준값 이상을 확보해야 하며, 부착강도는 KS F 2762의 시험을 통해 확인한다.
3. 내화재는 터널화재로 인한 유해가스, 타일 비산 등 부차적 피해를 최소화해야 하며, 가스유해성은 KS F 2271의 시험으로 확인한다.
4. 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.
5. 그 밖에 성능은 내화공법의 유형 및 내화재의 특성을 고려하여 발주 기관이 정한 방법에 따라 확인한다.

【해설】 2. 표면에 부착하는 내화재의 경우, KCS 41 48 01의 타일 인장 부착강도 기준인 0.39MPa 이상을 확보해야 한다. 부착강도는 KS L 15931)의 시험을 통해 확인한다.

4. 내화도료, 내화보드(또는 패널) 등과 같이 시멘트계 내화재가 아닌 경우, KS F 2456 급속 동결융해에 대한 콘크리트의 저항 시험방법 또는 스웨덴 규격인 SS 13 72 44 A법에 따라 표면의 박리저항 수준을 검토하여 기후저항성능을 확인할 수 있다.

1) 지침 본문의 KS F 2762는 오기로 추후 지침 개정 시 반영할 예정

제11조(내화재 시공) 내화재는 다음 각 호를 고려하여 시공한다.

1. 부재 자체내화(섬유혼입콘크리트 등)의 경우, 폭렬방지 및 내화성능 확보를 위해 결정된 적정 혼입량을 사용해야 하며, 섬유 사용에 따른 물성변화가 없어야 한다.
2. 내화뿔칠(또는 도료) 방식의 경우, 뿔칠의 반발량을 적게 하고, 호스의 막힘이 없도록 해야 하며, 두께불량 및 결손 등이 발생하지 않아야 한다. 특히, 섬유를 혼입하는 경우에는 제1호를 고려해야 한다.
3. 내화보드(또는 패널) 방식의 경우, 보드 간 이음새와 앵커 등 고정 장치는 화재 발생 시 열침투가 최소화되어야 한다.
4. 표면에 부착하는 내화재는 부착 전 부재의 면처리 및 세척 등을 실시하여 공용 중에 낙하하지 않도록 부착되어야 한다.
5. 터널의 누수, 수분비산 및 물청소 등의 영향으로 내화재의 성능 저하가 우려될 경우에는 별도의 발수(發水) 또는 차수(遮水) 성능을 확보해야 한다.
6. 그 밖에 내화방식의 경우에는 내화성능을 확보할 수 있도록 시공성을 확인한 후에 시공해야 한다.

【해설】 1. 콘크리트 자체내화공법을 적용한 경우 섬유혼입, 추가적인 혼화재 투입 등에 따라서 설계에 규정된 콘크리트의 규격(슬럼프, 공기량, 단위수량 등)을 만족해야 하며, 시공시 압송 및 다짐 불량 등으로 인한 재료 분리, 소성침하균열 등이 발생하지 않도록 관리해야 한다. 또한 요구되는 내화수준에 따라 섬유혼입콘크리트의 두께는 충분한 내화 성능을 발휘할 수 있도록 한다. 국외에서는 일반적으로 내화피복을 포함한 두께가 70~100mm 수준으로 적용하고 있다.

2. 뿔칠 방식의 경우, KCS 14 20 51 기준에 따라 도포된 뿔칠의 두께 및 품질을 만족하여야 한다. 국외에서는 일반적으로 뿔칠 두께는 약 30~50mm 수준을 적용하고 있다.

3. 구조체와 보드와의 고정장치(종류, 수량 및 간격)와 보드간 연결부

종류에 대한 내화성능을 반드시 평가받아야 한다. 국외에서는 일반적으로 내화재의 두께는 약 30~50mm 수준을 적용하고 있다.

4. 콘크리트의 면상태는 부착성능에 매우 중대한 영향을 주는 요소로서 내화재 부착 전 콘크리트 표면 상태 조사를 수행하여야 하고, 시공 전 콘크리트 표면에 대한 면처리 및 고압 물세척은 반드시 실시해야 한다. 고압 물세척을 한 경우 표면이 건조된 상태에서 내화재를 부착해야 한다.

5. 특히 물청소는 고압살수로 이루어지기 때문에 내화뿔칠(또는 도료)을 사용할 경우, 이에 대한 검증을 실시해야 한다.

제5장 터널의 내화시험

제12조(내화시험 기본조건) 내화시험을 수행하기 위해 적용되는 기본 조건은 다음 각 호와 같다.

1. 내화시험에 사용되는 내화시험곡선은 제8조에 따라 선정한다.
2. 내화성능은 콘크리트 시험체의 내화시험을 통해 평가하며, 비재하 조건으로 실시한다.
3. 콘크리트 시험체는 표면에 내화재를 부착하거나 자체내화(섬유 혼입콘크리트 등)를 적용한 상태로 시험한다.
4. 습도조건은 제16조에 따라 시험 전 미리 조절한다.
5. 내화시험에서 콘크리트 시험체의 열적·물리적 성능은 제19조에 따라 시험한다.

- 제13조(시험체 크기 및 철근배근 등)** ① 콘크리트 시험체 표면에 내화재를 부착하는 경우는 두께를 200 ± 5 mm 이내로 하고, 자체내화 시험체의 경우엔 두께를 250 ± 5 mm 이내로 제작한다.
- ② 콘크리트 시험체의 화염노출면적은 최소 $1,500\times 1,500$ mm로 하며, 시험체와 가열로 접촉면의 폭은 각각 150 mm 이상을 확보해야 한다.
- ③ 콘크리트 시험체의 철근은 공칭지름 D13 mm으로 별표2를 참조하여 배근하고, 철근배근이 별표2와 상이한 경우 해당 시험체의 특성에 적합하게 조정할 수 있다.
- ④ 무근콘크리트 시험체의 경우 사전에 내화시험의 안정성에 대해 검토해야 한다.
- ⑤ 시험체는 표면에서부터 25 ± 2 mm의 간격으로 내부 온도를 측정할 수 있도록 제작한다.

【해설】 ① 콘크리트 시험체의 두께는 적용할 현장의 단면이 결정된 경우 최종 설계 단면의 두께를 적용할 수 있다.

③ 시험체에 철근 이외의 와이어 메쉬 등을 사용한 경우 반드시 내화 시험체에도 동일한 종류, 간격, 고정 방법으로 설치되어야 한다.

④ 무근콘크리트 시험체는 폭렬이 발생할 경우 취성과파괴 및 가열로의 손상을 유발할 우려가 있으므로 내화시험 전에 담당자와 사전 협의를 진행해야 한다.

⑤ 여기서 25 ± 2 mm 간격은 예시로서, 열전대의 측정간격은 피복 두께에 따라 달라질 수 있기 때문에 콘크리트 표면과 최외측 철근 사이에 최소 2개 이상의 열전대를 동일 깊이 다른 지점에 설치하도록 권장한다. 주철근을 지난 콘크리트 내부 단면에는 최대 50mm 간격으로 최대 2개 이하의 열전대를 동일 깊이 다른 지점에 설치하도록 권장하고 피복두께 등을 고려하여 발주처와 최종 협의하여 정한다.

제14조(콘크리트 시험체) ① 콘크리트 시험체는 현장타설라이닝 설계기준 (KDS 27 40 05)에 따라 제작하며, 공사 중 안정성 확보 등을 위해 발주 기관이 필요하다고 인정하는 경우에는 그 이상인 고강도 콘크리트를 사용 할 수 있다.
 ② 제1항에도 불구하고 적용대상 터널이 결정되어 있는 경우에는 해당 터널공사 시방서에 따라 제작한 콘크리트 시험체로 대체할 수 있다.

【해설】 해설 표 5.1은 설계 강도 27MPa인 콘크리트 배합표의 사례이며, 해설 그림 5.1은 내화 콘크리트 시험체의 제작 전경이다.

해설 표 5.1 사용 콘크리트 배합표 사례(압축강도 27MPa 기준)

구분	W/C (%)	S/a (%)	Unit Weight (kg/m ³)				Ad (kg)
			C	W	S	G	
내화시험체	45	47	362	163	854	962	3.26



해설 그림 5.1 내화 콘크리트 시험체의 철근 배근 및 시험체 제작 사례

제15조(열전대) ① 열전대는 KS C 1602에 따라 사용 및 보정해야 한다.

② 콘크리트 시험체의 내부온도 측정에 사용하는 열전대는 별표 2와 같이 시험체에 매입하는 것을 원칙으로 하며, 열전대의 측정부위는 철근과 닿지 않도록 정확히 배치하고, 열전대의 위치에 철근이 배치될 경우 열전대를 철근의 하단에 고정해야 한다.

③ 가열로의 온도 측정에 사용하는 열전대는 가열로 내부에 4개소 이상을 배치해야 하고 이 중 50퍼센트 이상은 가열로의 온도를 제어하기 위해 사용해야 한다.

【해설】 ② 콘크리트와 철근의 열전도율은 상이하므로, 콘크리트 부분의 열전대는 철근과 닿지 않도록 배치하여야 한다. 철근의 온도 측정을 위한 열전대는 철근에 단단히 부착되어야 한다.

제16조(시험체 준비) ① 콘크리트 시험체는 제13조, 제14조, 제15조에 따라 제작하며, 압축강도를 확인하기 위해 동일배합으로 3개 이상의 원주형 공시체를 KS F 2403에 따라 별도 제작해야 한다.

② 잔존강도 측정을 위해 콘크리트 시험체에서 KS F 2422에 따라 별표 2의 그림 3에 지정된 위치에서 시료를 채취해야 한다.

③ 이동용 고리를 시험체에 설치하는 경우 열전대를 200 mm 이상 이격해야 한다.

④ 시험체는 24시간이 경과한 이후에 탈형해야 하고 재령 90일 동안 온도 $20\pm 2^{\circ}\text{C}$, 상대습도 90% 이상의 조건에서 양생해야 한다.

⑤ 콘크리트 시험체 표면에 내화재를 부착하는 경우 다음의 각 호에 따른다.

1. 제4항의 90일 양생이 끝난 후 내화재를 부착한다. 다만, 시멘트계 내화재의 경우는 콘크리트 시험체 제작 또는 탈형 시점에 내화재를 부착한다.

2. 내화재 부착 시에는 실제 시공절차와 동일해야 하며 별표 2에 따라 이음부 위치에 열전대가 위치하도록 해야 한다.

- ⑥ 제4항에 따른 양생 및 제5항에 따른 내화재 부착 이후 시험체는 온도 23℃에서 상대습도 50%로 건조한 후 24시간 간격으로 연속하여 2번 질량을 측정하여 시험체의 질량차가 0.1% 이내인 상태에서 내화 시험을 해야 한다.
- ⑦ 제4항에도 불구하고, 제16조제1항의 공시체 압축강도가 제14조의 기준을 확보하고, 시험체가 폭렬에 대한 피해가 적을 것으로 예상될 경우, 해당 시험체는 내화시험을 실시할 수 있다.

【해설】 ① 콘크리트 압축강도는 재령 28일과 91일(또는 시험일)에 KS F 2405에 따라 측정하며, 설계기준강도 이상을 확보해야 한다.

② 내화시험 후의 잔존강도 측정을 위한 압축강도 시험은 시험체의 상태를 확인하고 담당자와 협의 후 생략할 수 있다. 기준이 되는 위치에서 측정된 콘크리트 온도가 한계온도 기준 380℃ 이하이고, 폭렬이 발생하지 않은 경우 잔존강도는 측정하지 않을 수 있다. ITA (Guidelines for Structural Fire Resistance for Road Tunnels, 2004)에서는 콘크리트 온도가 350℃ 이하로 유지된 경우 초기 강도가 유지된다고 언급하고 있다.

③ 이동용 고리에 의한 열전대의 손상을 예방하기 위함이다.

⑤ 1. 시멘트계 내화재의 경우 콜드 조인트로 인한 잠재적인 문제를 사전에 예방하기 위함이다.

⑥ 질량측정을 위해서는 별도의 시편을 제작해서 측정하며, 특히 뿔칠의 경우에는 완전히 양생이 끝난 이후에 질량을 측정한다. 뿔칠 시험체는 기건상태에서 양생할 경우 28일 양생이 원칙이지만, 증기양생 등의 촉진 경화를 실시하고 강도 등의 특성이 28일 재령 상태와 동일한 수준이라고 판단될 경우 또는 공기 및 설계변경 등의 합당한 사유가 있는 경우 양생기간을 축소할 수 있다. 단 이때 뿔칠 내화재의 강도는 기준강도 이상을 만족하여야 한다.

⑦ 시험체에 폭렬이 발생할 경우 취성과괴 및 가열로의 손상을 유발할 우려가 있으므로 내화시험 전에 담당자와 사전 협의를 진행해야

한다. 시험체는 기건상태에서 양생할 경우 90일 양생이 원칙이지만, 증기양생 등의 촉진 경화를 실시하고 강도 등의 특성이 90일 재령 상태와 동일한 수준이라고 판단될 경우 또는 공기 및 설계변경 등의 합당한 사유가 있는 경우 양생기간을 28일로 축소할 수 있다. 단 이때 콘크리트는 설계기준강도 이상을 만족하여야 한다.

- 제17조(가열로)** ① 시험체는 가열로 상단의 정확한 위치에 놓아야 하며 가열로 개방면은 1,500×1,500 mm 이상이어야 한다.
- ② 가열로는 양단부에서만 시험체를 지지해야 하며 내화시험 동안 시험체 주변으로 열이 빠져나가지 않아야 한다.
- ③ 내화시험곡선 구현의 확인을 위해, 가열로 온도는 시험체 하면 100±5 mm와 가열로 벽 100mm 이상 이격 위치인 4개소 이상에서 최대 1분 간격으로 측정해야 하며, 내화시험곡선에서 요구하는 시간에 1,400℃까지 온도를 올릴 수 있어야 한다.

【해설】 ② 불가피하게 발생하는 시험체와 가열로간의 틈새는 두께를 조절할 수 있는 내화단열재 등을 활용하여 단차를 최소화하여야 한다.

- 제18조(내화시험 주의사항)** 내화시험은 다음 각 호의 사항을 준수하여 시행해야 한다.
1. 시험체는 취급에 주의하여 가열표면에 손상이 없어야 한다.
 2. 시험체를 가열로에 놓을 때 내화재는 가열로에 닿지 않아야 한다.
 3. 시험체의 초기온도는 50℃ 미만이어야 한다.
 4. 시험체는 가열로의 정확한 위치에 놓고 접촉부가 밀봉되어야 한다.
 5. 시험 시작 직전에 열전대로부터 읽은 온도를 검사하여 온도가 일정한지 확인해야 한다.
 6. 가열은 내화시험곡선에 따르고, 안전문제가 발생하지 않도록 한다.

7. 온도는 시험체의 열접촉면으로부터 25, 50 및 75 mm 깊이 등에서 최대 1분 간격으로 가열에서 냉각 단계까지 측정해야 한다 [별표2 참조].
8. 시험체 온도는 가열종료 후 가열면 온도 200℃ 이하가 될 때 까지 측정해야 하며 최대 4시간까지 측정한다.
9. 시험체는 시험종료 후 최소 1시간이 경과한 후에 이동해야 한다.
10. 시험체 가열면 및 배면의 사진은 시험 전·후 촬영해야 한다.
11. 잔존 압축강도를 확인을 위해 시험 전·후의 압축강도를 KS F 2422에 따라 측정해야 한다.

【해설】 4. 불가피하게 발생하는 시험체와 가열로간의 틈새는 두께를 조절할 수 있는 내화단열재 등을 활용하여 단차를 최소화하여야 한다. 해설 그림 5.2는 가열로에 시험체를 거치하고 단차를 최소화하기 위하여 단열재를 시공한 사례이다.



해설 그림 5.2 시험체 거치 및 단차 최소화 사례

7. 제 13조 5항에 따른 측정 위치는 변경할 수 있다.
8. 가열면의 온도를 측정할 수 없을 경우, 콘크리트 표면온도를 기준으로 할 수 있으며, 내화로의 가열 종료 후 1시간까지 측정을 권장한다.
11. 내화시험 후의 잔존강도 측정을 위한 압축강도 시험은 시험체의 상태를 확인하고 담당자와 협의 후 생략할 수 있다. 제16조제2항에

따라서 기준이 되는 위치에서 측정된 콘크리트 온도가 한계온도 기준 380℃ 이하이고, 폭열이 발생하지 않은 경우 잔존강도 확인은 생략할 수 있다.

제19조(내화시험 측정항목) ① 내화성능의 평가를 위해 시험 중 다음 각 호의 사항을 측정해야 한다.

1. 가열로의 시간에 따른 온도변화
2. 시험체의 시간에 따른 온도변화
3. 시험 전·후 콘크리트의 압축강도

② 시험의뢰자가 요구할 경우 다음 각 호의 항목을 측정할 수 있다.

1. 소화수(消火水)를 적용할 경우 내화재의 거동특성
2. 콘크리트 시험체 표면에 내화재를 적용한 경우 잔류부착강도
3. 시험체 및 내화재의 변상(폭열, 균열, 표면변화특성 등을 포함한다.)

【해설】 ① 2. 동일 깊이에서 측정한 열전대 측정온도의 평균값으로 한계온도를 판정한다. 단, 각 열전대의 측정온도 결과 중 평균의 ±15% 이상을 초과하는 측정치는 제외한다.

① 3. 시험 후의 압축강도 확인은 생략할 수 있다.(제16조제2항 및 제18조제11호 참조) 해설 그림 5.3은 내화시험 전후의 시험체의 변상 사례이다.



(a) 내화 시험 전 시험체 표면 (b) 내화 시험 후 시험체 표면
해설 그림 5.3 내화시험 전·후 시험체 표면 사례

제20조(시험성적서) 시험성적서에는 다음 각 호를 포함한다.

1. 시험기관 상세정보
2. 시험의뢰자 상세정보
3. 시험조건 상세정보
4. 콘크리트 시험체 상세정보
5. 내화재 상세정보
6. 열전대 정보
7. 가열로 정보
8. 시험 결과
9. 시험의뢰자 요구 정보

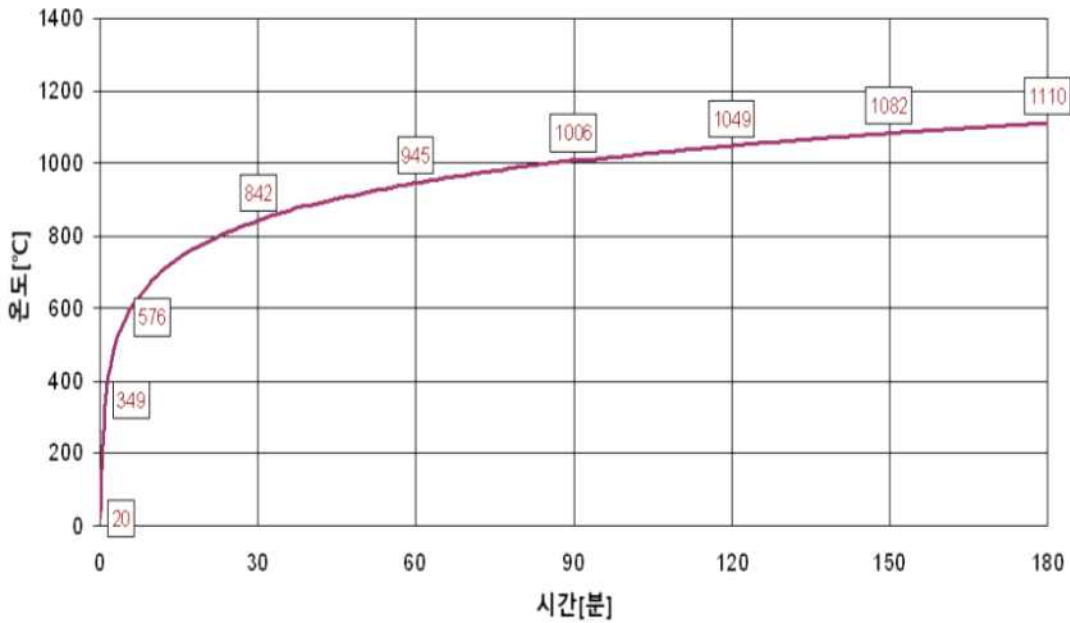
【해설】 시험성적서에는 각 호의 상세정보의 기준을 명확히 기입하고, 콘크리트 자체내화공법을 제외한 뿔칠 및 보드 공법은, 동일한 공법을 동일한 현장에 적용할 경우 유효기간을 3년으로 한다. 다만, 발주기관에서의 요청이 있을 경우 신규 시험성적서를 제출하여야 한다.

4. 콘크리트 시험체의 상세정보는 제16조 시험체 준비에 관련한 사항을 포함하며 이는 시험의뢰자가 공문으로 제출한다.

[별표 1] 터널 내화시험곡선(제8조제1항 및 제12조제1항 관련)

1. KS F 2257 내화시험곡선

KS F 2257에서 제시하는 가열 곡선이며, 여러 국가(ISO 834, BS 476: PART 20, DIN 4102, AS 1530)에서 채택하여 내화시험 곡선으로 활용된다. KS F 2257 내화시험곡선은 다음 <그림1> 및 (식1)에 따르며, 허용오차는 다음 <표1>과 같다.



<그림1 KS F 2257 내화시험곡선>

$$T = 20 + 345 \times \text{LOG}(8t + 1) \quad (\text{식1})$$

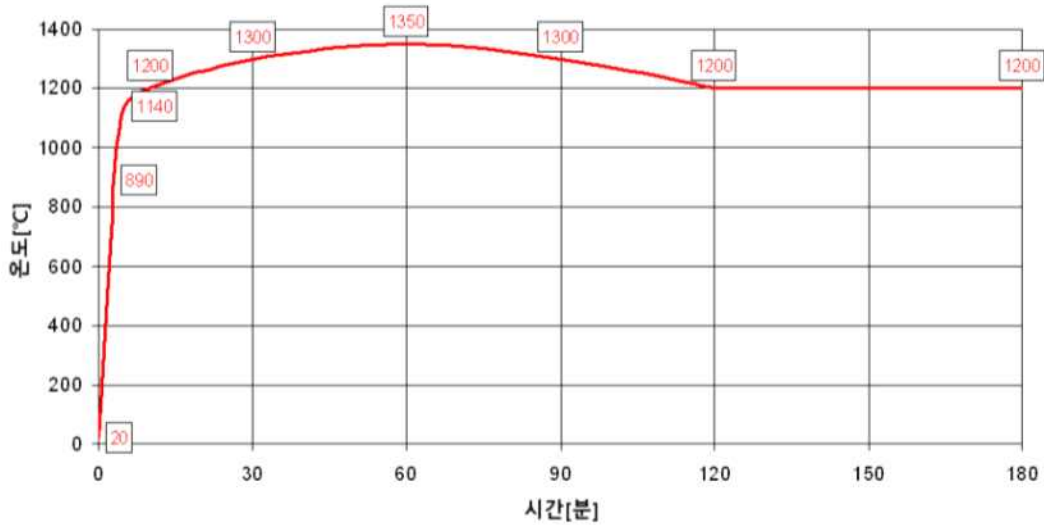
여기에서, T:가열로 내 평균 온도(°C), t:시간(분).

<표1 KS F 2257 내화시험곡선의 허용오차>

구분	허용오차	비고
5<t≤10	15% 이하	오차 = $\frac{A - A_s}{A_s} \times 100(\%)$
10<t≤30	15-0.5×(t-10)% 이하	
30<t≤60	5-0.083×(t-30)% 이하	
60<t	2.5% 이하	

2. RWS 내화시험곡선

국제터널협회(ITA)에서 유조차 화재를 모사하기 위해 채택하고 있는 내화시험곡선으로 지속시간 2시간 및 최고온도 1,350℃인 가열곡선이다. RWS 내화 시험곡선은 다음 <그림2> 및 <표2>에 따르며, 허용오차는 다음 <표3>과 같다.



<그림2 RWS 내화시험곡선>

<표2 RWS 내화시험곡선의 시간-온도 가열기준>

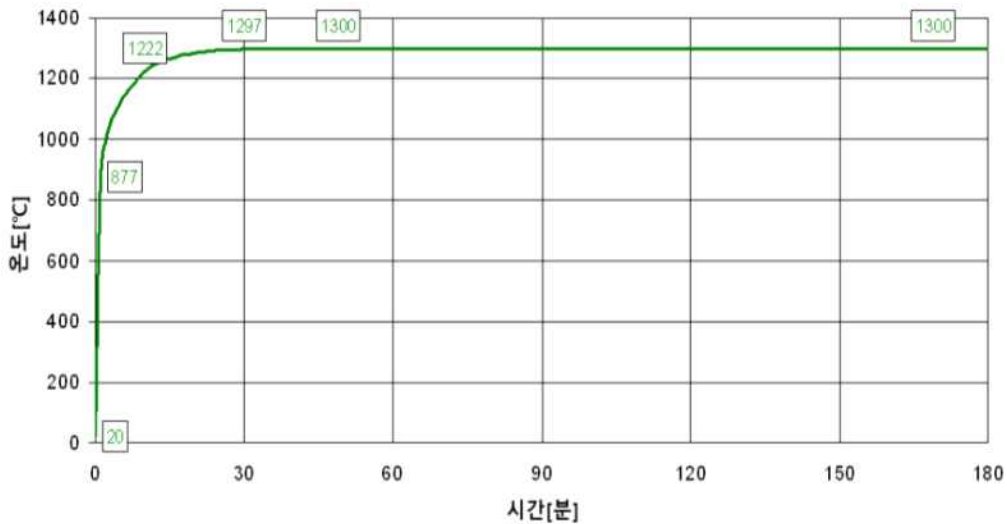
시간(분)	온도(℃)	시간(분)	온도(℃)	시간(분)	온도(℃)
0	20	10	1,200	90	1,300
3	890	30	1,300	120	1,200
5	1,140	60	1,350	180	1,200

<표3 RWS 내화시험곡선의 허용오차>

구분	허용오차	비고
5<t≤10	15% 이하	$\text{오차} = \frac{A - A_s}{A_s} \times 100(\%)$
10<t≤30	10% 이하	
30<t	5% 이하	

3. HCinc 내화시험곡선

국제터널협회(ITA)에서 RWS와 함께 유조차 화재를 모사하기 위해 채택하고 있는 가열 곡선으로 HC(Hydrocarbon) 내화시험곡선의 최고온도인 1,100℃를 1,300℃로 조정하였으며, RWS와 HCinc를 동일한 수준으로 인정한다. HCinc 내화시험곡선은 다음 <그림3> 및 (식2)에 따르며, 허용 오차는 다음 <표4>와 같다.



<그림3 HC_{inc} 내화시험곡선>

$$T = 20 + 1280 \times (1 - 0.325e^{-0.167t} - 0.675e^{-2.5t}) \quad (\text{식2})$$

여기에서, T:가열로 내 평균 온도(°C), t:시간(분).

<표4 HCinc 내화시험곡선의 허용오차>

구분	허용오차	비고
5<t≤10	20% 이하	$\text{오차} = \frac{A - A_s}{A_s} \times 100(\%)$
10<t≤20	15% 이하	
20<t≤30	10% 이하	
30<t≤60	5% 이하	
60<t	2.5% 이하	

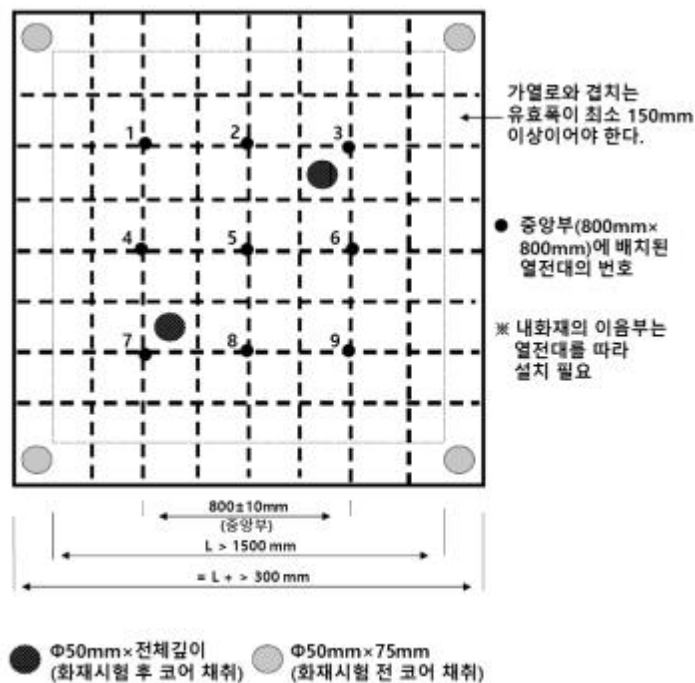
[별표 2] 터널 내화시험 시 열전대 위치(제13조 및 제15조제2항 관련)

1. 표면에 내화재를 부착한 시험체의 온도측점

표면에 내화재를 부착하는 경우 열전대의 위치는 <그림4> 및 <그림5>와 같이, 내화재를 부착한 경계면에 4개의 열전대(2, 4, 6, 8)를 배치하고, 가열표면으로부터 $25\pm 2\text{mm}$ 위치(1, 3, 5, 7, 9)에 5개의 열전대, 철근 밀면 $50\pm 2\text{mm}$ 위치(2, 3, 5, 7, 8)에 5개의 열전대를 고정하며, $75\pm 2\text{mm}$ 위치(1, 4, 6, 9)에는 4개의 열전대를 배치한다(필요한 경우, 배면에 3개의 열전대(1, 5, 9)를 배치할 수 있다).

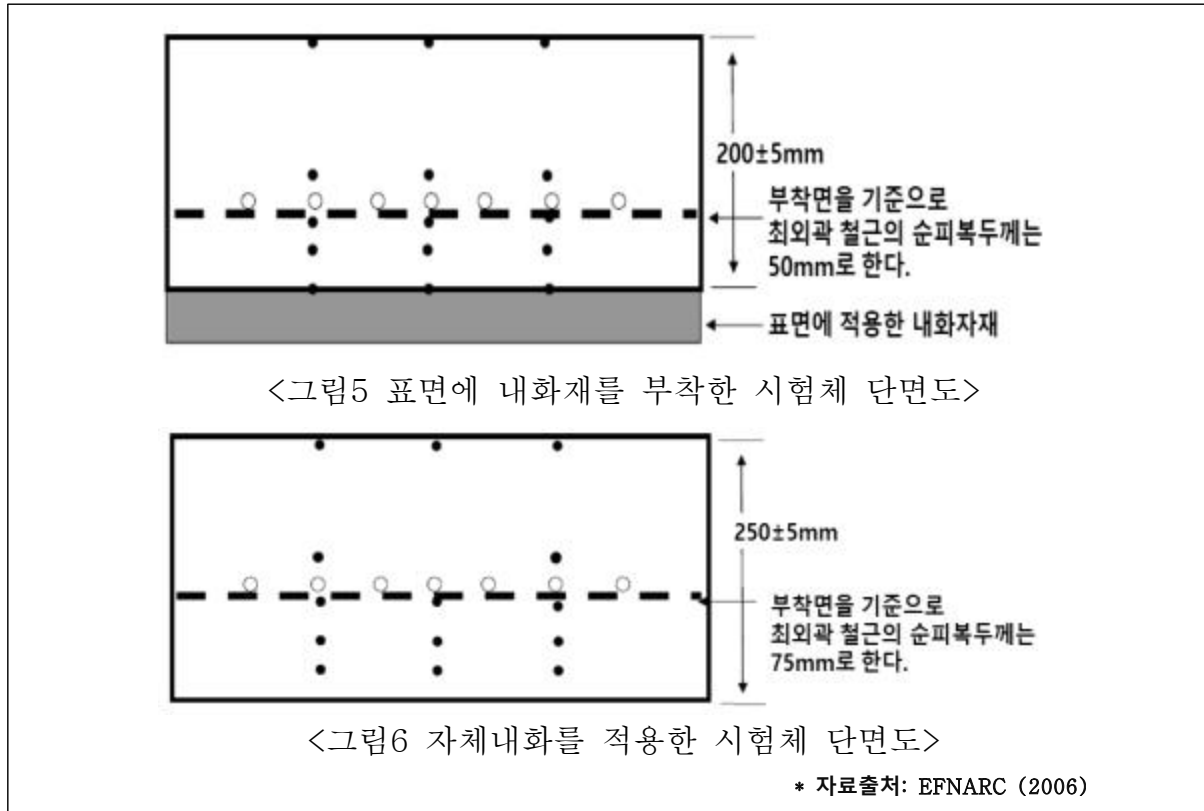
2. 부재 자체내화를 적용한 시험체의 온도측점

자체내화를 적용한 경우 <그림4> 및 <그림6>과 같이, 가열표면으로부터 $25\pm 2\text{mm}$ 위치(2, 4, 6, 8)에 4개의 열전대를 배치하고, $50\pm 2\text{mm}$ 의 위치(1, 3, 7, 9)에 4개의 열전대, 철근 밀면 $75\pm 2\text{mm}$ 위치(2, 4, 5, 6, 8)에 5개의 열전대가 고정되어야 하며, $100\pm 2\text{mm}$ 의 위치(3, 7)에 2개의 열전대를 배치한다(필요한 경우, 배면에 3개의 열전대(1, 5, 9)를 배치할 수 있다).



<그림4 시험체 평면도>

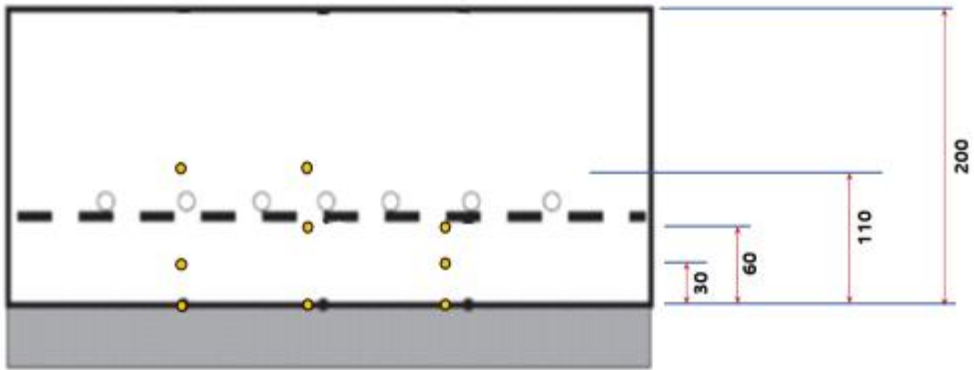
* 자료출처: EFNARC (2006)



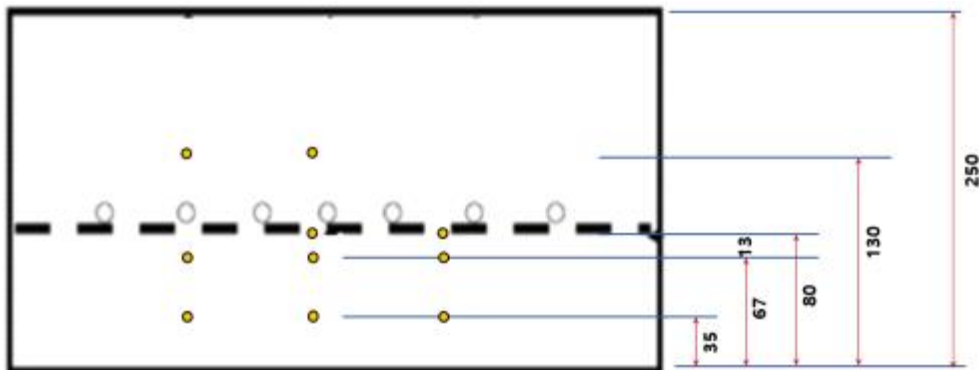
【해설】 1. 제13조 5항에 따라서, 콘크리트 표면(0mm)을 기준으로 최대 $35\text{mm}\pm 2\text{mm}$ 간격으로 콘크리트 표면과 최외측 철근 사이에 시험체의 동일 깊이 및 다른 지점에서 최소 2개 이상의 열전대를 배치한다. 주철근을 지난 콘크리트 내부 단면에는 최대 50mm 간격으로 최대 2개 이하의 열전대를 설치한다. 순피복두께는 설계에 따라 변경될 수 있으며, <그림 5-1>은 순피복두께 60mm인 경우 열전대 배치의 예이다. 최종 열전대의 위치는 피복두께 등을 고려하여 발주처와 최종 협의하여 정한다.

2. 1호와 동일하게 설치하며, 제5조제1항을 참고하여 최외측 철근 직경의 1.0배 떨어진 위치에서 측정한다. <그림 6-1>은 순피복두께가 80mm인 경우 열전대 배치의 예이다. 최종 열전대의 위치는 피복두께 등을 고려하여 발주처와 최종 협의하여 정한다.

※<그림 4>의 화재시험 전 코어 채취는 제16조제1항에 따라 공시체를 제작하여 압축강도를 측정하는 경우 생략가능하고 화재시험 후 코어 채취는 제18조제11호에 따른다.



< 해설 그림 5-1 순피복 두께가 60mm인 예 >



<해설 그림 6-1 순피복 두께가 80mm인 예>

참 고 문 헌

- (1) 도로법(법률 제16954호, 2020.2.4.).
- (2) 도로터널 방재시설 설치 및 관리지침(국토교통부예규 제308호, 2020.8.31.)
- (3) 자동차관리법 시행규칙(국토교통부령 제1269호, 2023.10.31.)
- (4) 한국건설기술연구원. (2020). 대심도 복층터널 설계 및 시공기술 개발. R&D/19SCIP-B089409-06.
- (5) 한국도로공사. (2018). 고속도로 위험물질 수송차량 관리방안 연구(II). 연구원-2018-47-534.9607호.
- (6) 한국도로공사. (2018). 차량화재에 대한 터널·교량의 내화방안 및 내폭특성 연구. 연구원-2018-53-534.9607호.
- (7) AS 1530.4 (1997). Methods for Fire Tests on Building Materials, Components and Structures. Australian Standard.
- (8) SS 13 72 44. (2005). Concrete testing - Hardened concrete - Scaling at freezing. Swedish Standards.
- (9) BS 476-20. (1987). Fire Tests on Building Materials and Structures. Method for Determination of the Fire Resistance of Elements of Construction (General Principles). British Standards.
- (10) DIN 4102.2. (1997). Fire Behaviour of Building Materials and Building Components; Building Components; Definitions, Requirements and Tests. Deutsches Institut für Normung E.V. (DIN).
- (11) European committee for Standardization. (2004). Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design. EN 1992-1-2. European Standards.

- (12) ISO 834. (1980). Fire Resistance Tests, Elements of Building Construction. International Standards Organization.
- (13) International Tunnelling Association (ITA). (2004). Guidelines for Structural Fire Resistance for Road Tunnels. International Tunnelling Association (ITA).
- (14) International Tunnelling Association (ITA). (2017). Structural Fire Protection For Road Tunnels. International Tunnelling Association (ITA).
- (15) Japan Society of Civil Engineers (JSCE). (2014). Guidelines for the fire protection of concrete in tunnel structures. Japan Society of Civil Engineers (JSCE).
- (16) KCS 14 20 22. (2016). 섬유보강 콘크리트. 구조재료공사 표준시방서.
- (17) KCS 14 20 51. (2021). 숏크리트. 콘크리트 표준시방서.
- (18) KCS 41 43 02. (2016). 내화피복공사. 건축공사 표준시방서.
- (19) KCS 41 48 01. (2018). 타일공사. 건축공사 표준시방서.
- (20) KDS 27 40 05. (2016). 현장타설 라이닝. 터널 설계기준.
- (21) KS C 1602. (2019). 열전대. 한국산업표준.
- (22) KS F 1593. (2020). 도자기질 타일용 접착제.
- (23) KS F 2257-1. (2019). 건축 부재의 내화 시험방법 - 일반 요구사항. 한국산업표준.
- (24) KS F 2271. (2019). 건축물 마감재료의 가스유해성 시험 방법. 한국산업표준.
- (25) KS F 2403. (2019). 콘크리트의 강도 시험용 공시체 제작 방법. 한국산업표준.
- (26) KS F 2422. (2017). 콘크리트에서 절취한 코어 및 보의 강도

시험방법. 한국산업표준.

- (27) KS F 2456. (2018). 급속 동결 융해에 대한 콘크리트의 저항 시험방법. 한국산업표준.
- (28) KS F 2762. (2016). 콘크리트 보수·보호재의 접착 강도 시험 방법. 한국산업표준.
- (29) Rijkswaterstaat (Ministry of Infrastructure and Water Management). (2020). Fire testing procedure for concrete tunnel linings and other tunnel components. Report No. Efectis-R0695:2020.
- (30) World Road Association (PIARC). (1999) & (2007). Fire and Smoke Control in Road Tunnels. World Road Association (PIARC).
- (31) World Road Association (PIARC). (2002). PIARC Proposal on the Design Criteria for Resistance to Fire for Road Tunnel Structures. World Road Association (PIARC).

도로터널 내화 지침 해설서

- 간행물 등록번호 : 11-1613000-003470-01
- 발행일 : 2024. 1.
- 발행처 : 국토교통부