

화재시나리오별 침매터널 구조물의 화재저항성 평가

최순욱¹, 장수호^{2*}, 김흥열³, 조봉현⁴

Assessment of structural fire resistance of a fire-proofed immersed tunnel under tunnel fire scenarios

Soon-Wook Choi, Soo-Ho Chang, Heung-Youl Kim, Bong Hyun Jo

Abstract In this study, fire resistance of a fireproof material sprayed upon an immersed tunnel was experimentally evaluated under HC_{inc} and ISO834(duration of 4 hours) fire scenarios. Under HC_{inc} fire scenario, the maximum inner temperatures of a concrete specimen at the depth of 0, 25 and 50 mm from the interface between the structure and the fire-proofing layer were 311°C, 194°C and 142°C respectively. Similarly, the corresponding maximum temperatures under ISO834 fire scenario were 332°C, 222°C and 179°C respectively. From the results, it was revealed that the two different fire scenarios assumed in this study have almost the same fire capacity as each other in the maximum temperature concept. In addition, a structural analysis of the immersed tunnel under HC_{inc} fire scenario was carried out to verify the effects of the fireproof material on its structural stability. Material loss and deterioration of a concrete specimen without any fire-proofing measure was also experimentally evaluated to obtain input parameters for the structural analysis under such a severe fire scenario. From the results, it was confirmed that the application of fireproof measures to the immersed tunnel is essential for its structural stability even under a severe fire scenario.

Keywords: Immersed tunnel, fire scenario, fireproof material, fire resistance

요 지 본 연구에서는 뿔이붙임 방식의 모르타르 내화재가 시공된 침매터널 벽체구조물을 모사한 철근콘크리트 블록시험체에 대해 HC_{inc} 화재시나리오와 ISO834(4시간) 화재시나리오 하에서 침매터널 내화재의 화재저항성 평가결과를 비교하였다. HC_{inc} 화재시나리오 하에서는 내화재와 시험체 계면으로부터 0, 25, 50 mm 위치에서의 최대온도가 각각 311°C, 194°C, 142°C로 나타났으며, ISO834(4시간) 화재시나리오 조건에서는 0, 25, 50 mm 위치에서의 최대온도가 각각 332°C, 222°C, 179°C로 측정되었다. 이상의 결과로부터 본 연구에서 적용된 두 가지 화재시나리오들은 최대온도개념에서 유사한 화재강도임을 확인할 수 있었다. 이와 더불어 내화재 설치여부에 따른 침매터널 구조물의 안정성을 확인하기 위한 구조안정성 해석을 수행하였다. 이때 내화재가 설치되지 않은 시험체에 대한 화재시험을 수행하여 화재에 의한 콘크리트의 단면손실과 강도저하를 확인하고 그 결과를 이용하여 구조안정성 해석을 수행하였다. 이상의 해석 결과, 본 연구에서 적용된 강력한 화재시나리오 조건에서는 침매터널 구조물의 안정성 확보를 위하여 내화재가 필수적임을 확인할 수 있었다.

주요어: 침매터널, 화재시나리오, 내화재, 화재저항성

1. 서 론

침매터널 공법은 종래의 지중 굴착식 하·해저터널과 다른 개념의 하·해저터널 건설공법으로서, 국내에서는 최초로 “부산-거제간 연결도로 건설공사”에서 침매터널이 시공되고 있다. 부산-거제간 연결도로는 화재 시 고

온이 발생할 수 있는 화물차가 통행하도록 설계된 관계로 침매터널에서 화재가 발생하였을 경우 매우 심각한 피해가 발생할 수 있다.

화재 시 발생하는 고온에 의한 구조물의 손상은 국내의 대구지하철 화재사고(2004)와 더불어 유럽의 뭉블랑 터널 화재사고(1999), 일본의 니혼자카터널 화재사고(1979) 등으로 이미 널리 알려져 있다. 특히 스포링(spalling)에 의해 발생하는 단면손실은 내하력 저하와 응력 불균형을 발생시켜 터널의 안정성에 심각한 영향을 주는 원인이 된다. 또한 고온에서 콘크리트의 역학적 특성의 저하는 단면손실의 여부에 상관없이 발생하는 현상으로, ITA(2004)에서는 콘크리트의 강도가 손실되

¹한국건설기술연구원 기반시설연구본부 지반연구실 연구원,

연세대학교 사회환경시스템공학부 박사과정

²한국건설기술연구원 기반시설연구본부 지반연구실 연구위원

³한국건설기술연구원 건설품질정책본부 화재안전연구실 연구위원

⁴대우건설 GK침매터널현장 현장소장

*교신저자: 장수호 (E-mail: sooho@kict.re.kr)

는 임계온도를 380°C로 규정하고 있다. 콘크리트의 강도손실에 대한 임계온도는 연구자별로 의견이 다소 차이가 있으나, 일반적으로 화재손상 전 강도의 60~70%의 손실이 발생할 경우를 임계온도로 고려하고 있다 (Caner et al., 2005; ITA, 2004; Khoury, 2000; Marchet et al, 2002; Matsuo et al, 2005; Narendranathan and Chua, 1995). 화재 시 스펀링과 역학적 특성 저하로 나타나는 구조물의 손상을 방지하기 위하여 유럽과 일본 등에서는 중요 터널 구조물에 내화재를 시공하여 화재 저항성을 높인 구조물을 시공하고 있다.

콘크리트 구조물의 화재저항성을 높이기 위한 방법은 크게 4가지로 구분된다. 첫 번째는 콘크리트 제작 시 폴리프로필렌섬유(PP fibers) 등을 넣어 구조물에 내화성을 부여하는 방법이다. 이 방법은 화재발생시 구조물의 손상을 감소시키는 효과가 있으나, 화재 후 일반 콘크리트와 마찬가지로 손상된 콘크리트에 보수, 보강이 이루어져야 하는 문제가 있다. 두 번째는 공장 등에서 많이 사용하는 방법으로 구조물 표면에 코팅재를 시공하는 방법이다. 이 방법은 코팅재의 두께가 매우 얇기 때문에 높은 내화성을 기대하기 어렵다. 세 번째로는 뿔어붙임 방식으로 시공되는 모르타르 내화재를 시공하는 방법으로, 이 방법은 우수한 내화성능 확보와 시공 편리성으로 인하여 터널 등의 구조물에서 가장 널리 사용하는 방법이다. 네 번째는 내화용 보드 또는 패널을 설치하는 방법으로 세 번째 방법과 마찬가지로 내화성능이 우수하고 시공이 용이하다는 장점이 있으나, 터널의 내공단면적을 감소시키는 문제가 있다(ITA, 2004).

ITA(2004)에서는 화물차가 통행하는 침매터널의 경우, RWS(RijksWaterStaat) 화재시나리오와 HC_{inc}(modified hydrocarbon) 화재시나리오 하에서 구조물의 화재저항성을 시험하도록 지침을 제시하고 있다. 본 연구대상인 부산-거제간 침매터널에서는 ITA(2004)에서 제시하는 HC_{inc} 화재시나리오에 더불어, ISO834(4시간) 화재시나리오를 적용하여 침매터널에 시공될 내화재의 성능평가를 수행하였다. 적용된 HC_{inc} 화재시나리오는 RWS 화재시나리오와 더불어 가장 강력한 화재시나리오로 알려져 있다. HC_{inc} 화재시나리오는 초기 5분에서의 온도상승기울기가 224°C/min으로 급격한 온도상승을 특징으로 하며, 최대온도 역시 1,300°C로 매우 높다. 이에 비해 ISO834(4시간) 화재시나리오는 초기 5분에서의

온도상승기울기가 115°C/min이고 최대온도가 1,153°C로써 HC_{inc} 화재시나리오에 비해 완만한 온도증가 특성을 가진다.

본 연구에서는 뿔어붙임 방식의 모르타르 내화재가 시공된 침매터널 벽체구조물을 모사한 철근콘크리트 블록시험체에 대해 HC_{inc} 화재시나리오와 ISO834(4시간) 화재시나리오 하에서의 침매터널 내화재의 화재저항성을 비교하였다. 또한 HC_{inc} 화재시나리오 하에서 내화재 적용 여부에 따른 구조물의 안정성 평가를 실시하였다.

2. 시험체 제작 및 시험방법

2.1 시험체 제작

내화재가 시공될 침매터널 구조물의 벽체를 모사하고자 그림 1과 같이 콘크리트 블록시험체를 제작하였다. 콘크리트 블록시험체에는 부산-거제간 침매터널에 적용된 염해방지 콘크리트인 DURACRETE을 동일하게 적용하였고, 블록시험체의 크기는 화재시험을 위한 가열로 크기에 맞도록 1,400 × 1,000 × 300 mm로 제작하였다. 이때 시험하고자 하는 수평가열로의 가열면(1,100 × 700 mm)보다 가로·세로방향으로 각각 50 mm가 더 넓은 면적(1,200 × 800 mm)에 내화재를 시공하였다.

TNO(1998)에서는 내화재의 성능평가 시험 시 온도

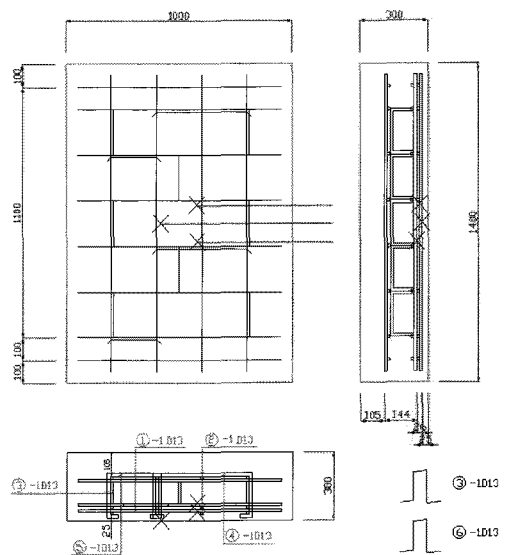


그림 1. 콘크리트 블록시험체내의 열전대 설치 위치

측정용 열전대를 내화재와 콘크리트가 닿는 면 ($t = 0$ mm) 을 기준으로 0, 25, 50 mm 위치에 설치하도록 규정하고 있다. 따라서 본 연구에서도 그림 1과 같이 가열면의 중앙부에 내화재와 콘크리트가 닿는 면을 기준으로 0, 25, 50 mm 위치에 내구성이 우수한 지름 6.4 mm의 시즈 열전대(sheathed thermocouple)를 설치하였다. 여기서 $t = 0$ mm는 화재에 의한 콘크리트의 손상기준온도(380°C)와 비교하기 위한 온도비교점이고, $t = 25$ mm는 화재에 의한 철근의 손상기준온도(250°C)와 비교하기 위한 온도비교점이다(ITA, 2004).

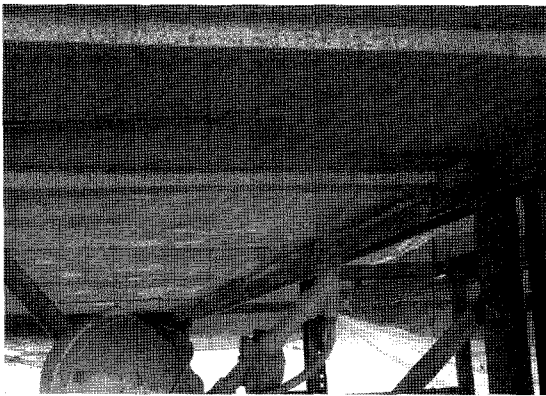


그림 2. 내화재 시공장면

사용된 내화재는 질석과 시멘트 혼합물로 구성된 국내 A사의 재료로서 25 mm 두께로 블록 콘크리트 표면에 뿔어붙임 시공을 하였다(그림 2). 또한 표 1은 염해방지 콘크리트인 DURACRETE의 배합설계표이며, 표 2는 적용된 내화재의 일반적인 물리·역학적 특성이다. 화재에서 염해에 의한 손상을 방지하고자 적용한 DURACRETE은 단위중량이 2.37 ton/m³이고 압축강도가 평균 45 MPa로 측정되었다.

2.2 시험방법

콘크리트 블록시험체에 시공된 내화재는 28일간 양생하였다. 양생 이후 화재시험을 위하여 내화재가 시공된 콘크리트 블록시험체를 그림 3과 같이 수평가열로에 설치하였다. 화재시나리오는 그림 4와 같이 HC_{inc} 화재시나리오와 ISO834(4시간) 화재시나리오를 적용하였으며, 이때 콘크리트 블록시험체 내부 온도를 그림 1의 열전대 위치에서 매 1초 간격으로 측정하였다.

TNO(1998)에서는 내화재에 대한 화재시험 시 내화재의 함수비가 5%이하일 경우에만 시험을 수행할 것을 권장하고 있다. 따라서 본 연구에서도 화재시험에 앞서, 그림 5와 같은 고주파 용량식(20 MHz) 콘크리트 및 모르타르 수분측정기(Kett사 HI-520)를 사용하여 내화재의 함수비를 측정하였다. 사용된 장비는 설정된 일정값

표 1. 염해방지 콘크리트(DURACRETE)의 배합설계

구분	설계 기준 강도 (MPa)	최대 골재 치수 (mm)	슬럼프 (cm)	공기량 (%)	S/a (%)	W/B (%)	단위재료량(kg/m ³)					
							굵은 골재	모래	시멘트	플라이 애쉬	물	혼화제 (유동 화제)
시방 배합	35	25	55	4.5	43	35	1048	761	325	81	142	4.06
현장 배합	35	25	55	4.5	43	35	1058	787	325	81	142	4.06

* 잔골재: No.4체 잔류율 2.17%, 잔골재 표면수율 4.10%
 * 굵은골재: No.4체 잔류율 2.03%, 굵은골재 표면수율 0.50%

표 2. 내화재의 물리·역학적 특성

구분	시험방법	측정결과
밀도	ASTM E605	732 kg/m ³
부착강도	ASTM E736	0.568 MPa
압축강도	ASTM E761	3.778 MPa
열전도율(24°C기준)	ASTM C177	0.19 W/mK

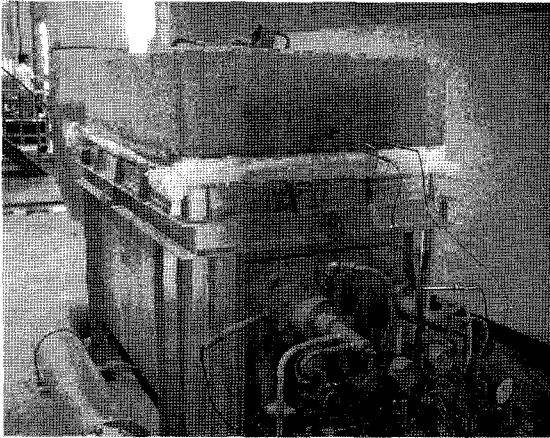


그림 3. 수평가열로에 의한 화재시험

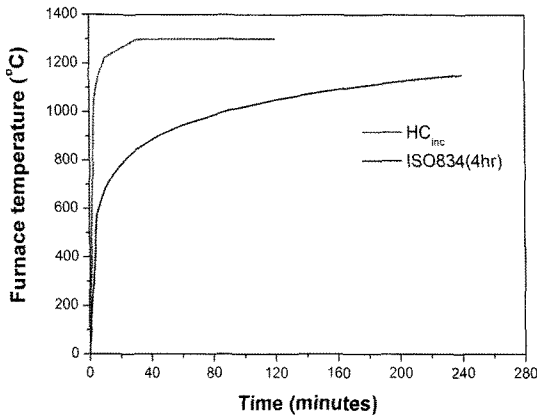


그림 4. 적용된 화재시나리오

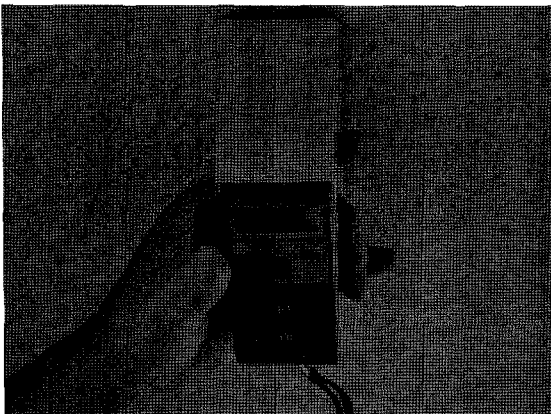


그림 5. 내화재의 표면함수비 측정

이에서의 함수비의 평균값을 보여준다. 본 연구에 사용된 HC_{inc} 화재시나리오용 블록시험체의 함수비는 평균 4.6%, 그리고 ISO834(4시간) 화재시나리오용 블록시험체의 함수비는 평균 2.9%로 측정되었다.

3. 화재시험결과

3.1 HC_{inc} 화재시나리오

내화재 두께가 25 mm인 벽체구조물을 모사한 콘크리트 시험체에 대하여 HC_{inc} 화재시나리오 하에서 화재시험을 수행하였다. 화재시험이 완료된 시점(120분)에서 콘크리트 시험체의 바닥면(내화재와의 계면)을 기준으로 $t = 0, 25, 50$ mm 위치에서의 온도는 각각 311°C, 194°C, 142°C로 측정되었다(그림 6).

그림 7은 화재시험 완료 후 내화재와 콘크리트 시험체의 모습이다. 내화재 표면에 망상균열과 직경 약 2 mm 가량의 균열이 시험체의 중앙부 세로방향으로 발생하였고, 최초의 밝은 갈색(베이지색)에서 짙은 갈색으로 변색이 되었다.

콘크리트의 손상을 판단하는 위치인 $t = 0$ mm의 온도는 311°C로서 손상 한계온도인 380°C 이하였으며, 철근의 손상을 판단하는 위치인 $t = 25$ mm의 온도도 194°C로서 손상 한계온도인 250°C 이하로 나타났다. 따라서 내화재 두께가 25 mm인 콘크리트 시험체는 HC_{inc} 화재시나리오 하에서 적절한 화재저항성을 가지는 것으로 판별되었다.

HC_{inc} 화재시나리오 하에서 $t = 0$ mm에서의 시험체 내부 온도는 시험시작 후 약 42분까지는 1.77°C/min의 온도상승기울기를 보였고, 42분 이후에서는 온도상승기울기가 2.64°C/min로 증가하였다.

그림 8은 가열로 옆면에 설치된 관찰창을 통하여 시간에 따른 가열면의 변화를 실시간으로 촬영한 것이다. 화재개시 후 30분경의 가열면 사진에서 균열이 발생하였으나, 60분과 시험종료시의 가열면 사진에서는 시간경과에 따라 균열이 연장 또는 확대되지 않고 축소되는 경향을 보였다. 초기 10분 이후에서의 표면상태는 최초의 단단한 모르타르보다는 좀 더 연질화된 상태를 보이는데, 급격한 균열의 확대가 발생하지 않는 경우 이 연질화된 상태가 균열축소에 영향을 끼치는 것으로 판단된다.

3.2 ISO834(4시간) 화재시나리오

내화재 두께가 25 mm인 콘크리트 시험체에 대하여 ISO834(4시간) 화재시나리오 하에서 화재시험을 수행하였다. 화재시험이 완료된 시간(240분)에서 콘크리트

시험체의 바닥면(내화재와의 계면)을 기준으로 t=0, 25, 50 mm 위치에서의 온도는 각각 332°C, 222°C, 179°C로 측정되었다(그림 9).

그림 10은 화재시험 완료 후 내화재와 콘크리트 시험

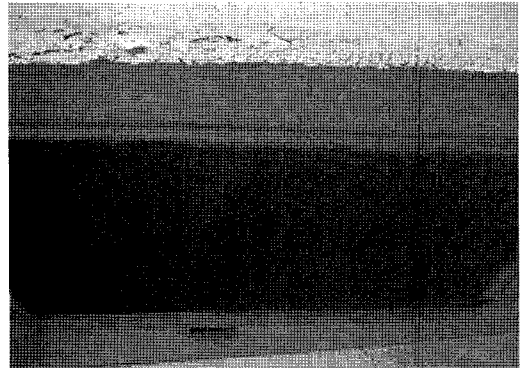
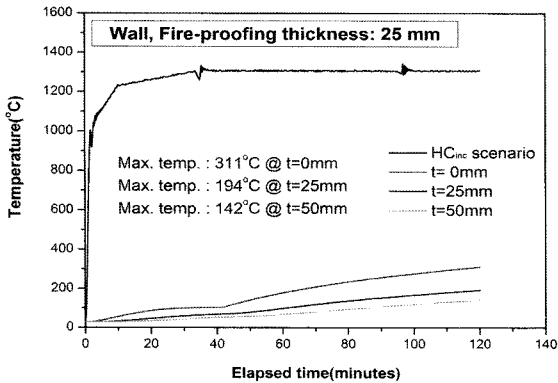
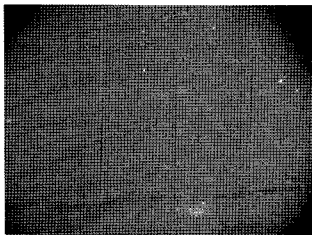
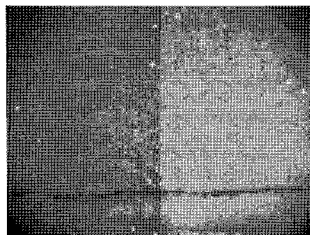


그림 6. 화재경과시간에 따른 콘크리트 시험체의 내부온도 변화 (HC_{inc} 화재시나리오)

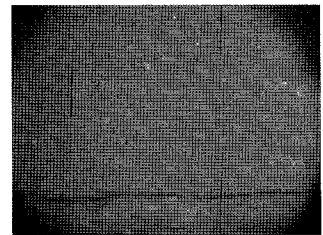
그림 7. 화재시험 후 시험체 하부면(HC_{inc} 화재시나리오)



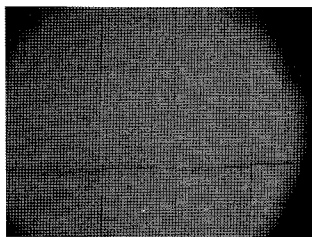
시험 개시



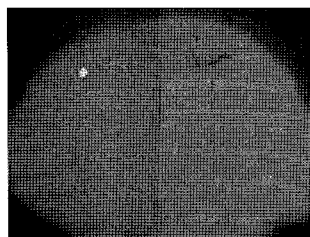
3분



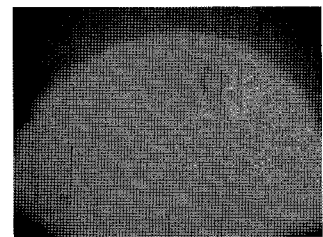
5분



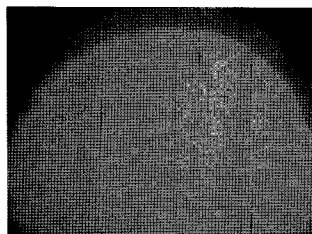
10분



30분



60분



시험 종료

그림 8. 화재 경과시간에 따른 가열면의 변화(HC_{inc} 화재시나리오)

체의 모습이다. 내화재 표면 전반에 걸쳐 망상균열이 발생하였고, 최초의 밝은 갈색(베이지색)에서 갈색으로 변색이 되었다.

콘크리트의 손상을 판단하는 위치인 $t = 0$ mm의 온도

는 332°C 로서 손상 한계온도인 380°C 이하였으며, 철근의 손상을 판단하는 위치인 $t = 25$ mm의 온도도 222°C 로서 손상 한계온도인 250°C 이하로 나타났다. 이는 HC_{inc} 화재시나리오의 결과와 비교할 때 다소 높은

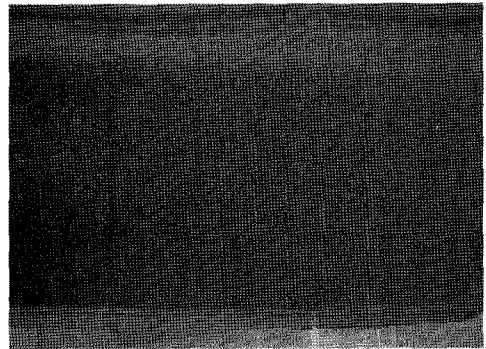
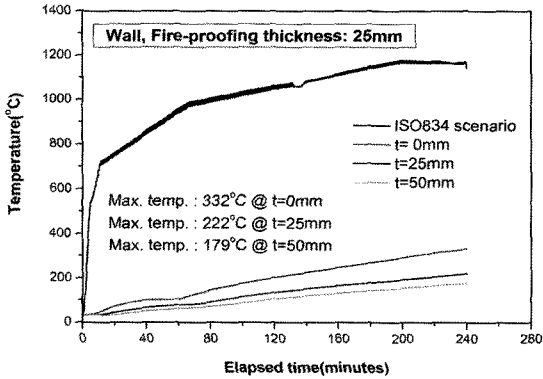
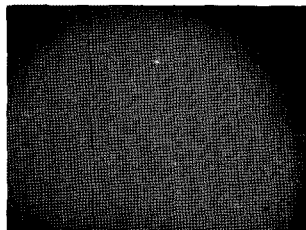
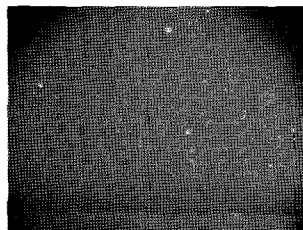


그림 9. 화재경과시간에 따른 콘크리트 시험체의 내부온도 변화(ISO834 화재시나리오)

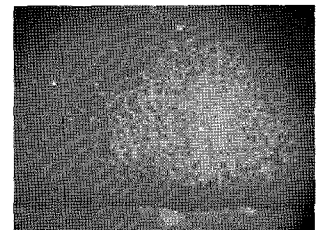
그림 10. 화재시험 후 시험체 하부 면(ISO834 화재시나리오)



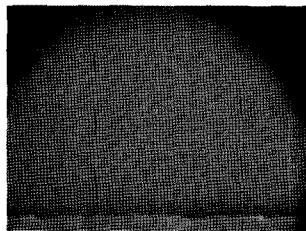
28분



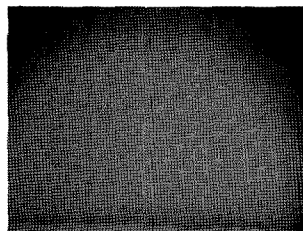
35분



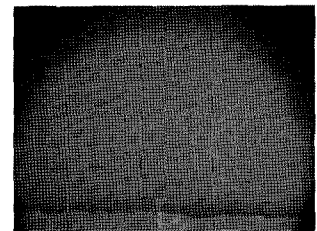
47분



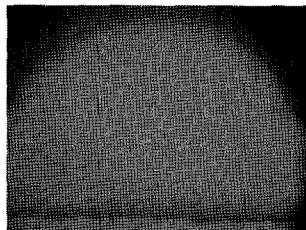
57분



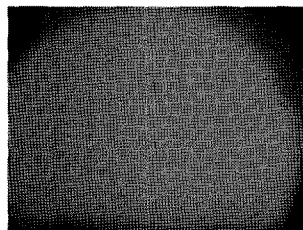
95분



124분



180분



시험 종료

그림 11. 화재 경과시간에 따른 가열면의 변화(ISO834 화재시나리오)

온도로써 ISO834(4시간) 화재시나리오가 HC_{inc} 화재시나리오에 비해 초기 온도상승기울기가 낮지만 상대적으로 장시간 동안 화재가 유지되기 때문인 것으로 판단된다. 하지만 HC_{inc} 화재시나리오의 경우와 마찬가지로 내화재 두께가 25 mm인 콘크리트 시험체는 ISO834(4시간) 화재시나리오 하에서 적절한 화재저항성을 가지는 것으로 판별되었다.

ISO834(4시간) 화재시나리오 하에서 t = 0 mm에서의 시험체 내부 온도는 시험시작 후 약 60분 까지는 1.13°C/min의 온도상승기울기를 보였고, 60분 이후에서는 온도상승기울기가 1.27°C/min로 증가하였다.

그림 11은 가열로 옆면에 설치된 관찰창을 통하여 시간에 따른 가열면의 변화를 촬영한 것이다.

3.3 화재시나리오에 따른 시험결과와의 비교

화재시나리오에 따른 침매터널의 화재저항성을 평가하기 위하여 내화재 두께가 25 mm인 콘크리트 시험체에 대하여 HC_{inc} 화재시나리오와 ISO834(4시간) 화재시나리오 하에서 화재시험을 수행하였다.

시험결과로부터 HC_{inc} 화재시나리오와 ISO834(4시간) 화재시나리오의 화재강도(fire severity)가 다름에도 불구하고, 시험체 내부의 최대온도와 온도기울기 변화양상이 약간의 차이가 있지만 유사한 결과를 보이고 있는 것을 알 수 있었다.

실제 화재는 실험과 달리 화재시간 동안 온도를 측정할 수 없기 때문에, 실제 화재의 강도를 추정하기 위해

서 화재시나리오와 실제 화재의 강도를 비교하는 유사화재강도(equivalent fire severity)라는 개념이 있다. 유사화재강도는 구조물 설계 시 예상되는 화재의 발생정도를 널리 알려져 있는 표준 화재시나리오와 비교하여 나타내는 데 목적이 있다. 유사화재강도를 추정하는 방법은 다음과 같은 3가지가 있다(Buchanan, 2002).

첫 번째는 동일면적개념(equal area concept)이다. 동일면적개념은 비교하고자 하는 두가지 화재시나리오의 면적, 즉 온도 × 시간의 값을 비교하는 것이다(그림 12). 이 개념은 그림 12의 A1과 A2 같이 온도-시간관계 곡선의 면적이 같으나 형상이 다를 경우, 그림 12의 실제 화재(real fire)가 화재시나리오(standard fire)에 비해 더 큰 열전달을 발생시킴에도 불구하고 같은 화재강도로 판단할 수 있는 문제가 있다. 따라서 이 개념은 같은 형상을 가진 화재시나리오에 한하여 적용하는 것이 좋다. 두 번째는 최대온도개념(maximum temperature concept)이다. 최대온도개념은 표준 화재시나리오와 실제 화재 하에서 각 화재에 의해 야기된 구조물 내부의 최고온도가 유사할 경우 이를 유사화재강도로 보는 개념이다. 이 개념은 본 연구에서와 같이 내화재에 의해 보호되는 콘크리트 내부의 온도로부터 유사화재강도를 추정하기에 적합한 방법으로 널리 적용되고 있다(그림 13). 세 번째는 최소지지력개념(minimal load capacity concept)이다. 최소지지력개념은 비교하고자 하는 두 가지 화재시나리오 하에서의 지지력을 비교하여 유사화재강도를 추정하는 방법이다. 이 개념은 최소지지력을 분명하게 정

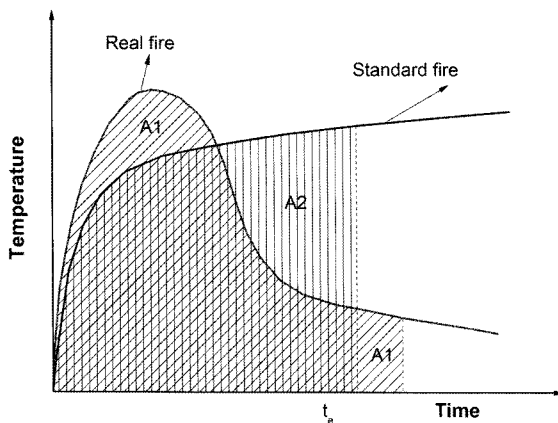


그림 12. 동일면적개념에 의한 유사화재강도 추정

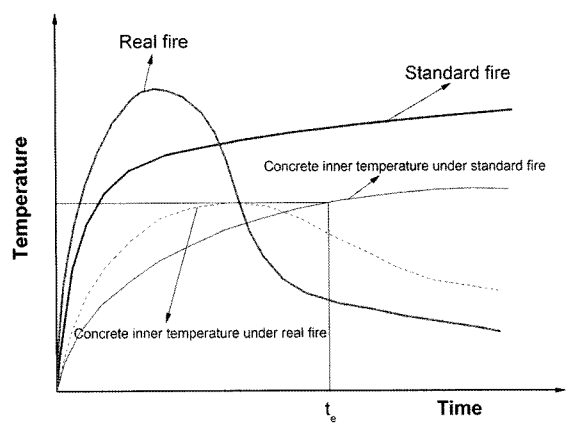


그림 13. 최대온도개념에 의한 유사화재강도 추정

의할 수 있을 때, 지보부재의 설계를 위해 위 두 가지 방법보다 현실적인 방법이다.

본 연구에서는 최대온도개념과 동일면적개념을 적용하여 그 결과를 비교하여 보았다. 먼저 최대온도개념에서 HC_{inc} 화재시나리오와 ISO834 화재시나리오의 결과를 비교해 보면, HC_{inc} 화재시나리오 하에서는 t = 0, 25, 50 mm 위치에서의 온도가 각각 311°C, 194°C, 142°C로 나타났고, ISO834(4시간) 화재시나리오 하에서는 t = 0, 25, 50 mm 위치에서의 온도가 각각 332°C, 222°C, 179°C로 측정되었다. t = 0, 25, 50 mm 위치에서 두 화재시나리오 하에서의 결과 차이는 각각 21°C, 28°C, 37°C로 나타났다. 두 화재시나리오 하에서 콘크리트 시험체 내부온도 비교를 정량화하기 위하여 두 화재시나리오 결과 중 낮은 온도를 나타내는 HC_{inc} 화재시나리오의 결과(311°C, 194°C)를 기준으로 콘크리트의 손상을 판별하는 기준위치인 t = 0 mm와 철근의 손상을 판별하는 기준위치인 t = 25 mm에서의 온도차이를 백분율로 나타내었다. 그 결과, t = 0 mm에서는 6.7%, t = 25 mm에서는 14.4%로 나타나, 화재면으로부터 멀어질수록 온도차이가 큰 것을 알 수 있었다. 위 결과로부터 ISO834(4시간) 화재시나리오는 HC_{inc} 화재시나리오에 비해 초기 온도상승기율과 최대온도가 낮지만 지속시간이 긴 이유로 HC_{inc} 화재시나리오와 화재강도가 유사함을 추정할 수 있었다.

두 번째로 동일면적개념을 사용하여 HC_{inc} 화재시나리오와 ISO834 화재시나리오의 결과를 비교해 보면 ISO834 화재시나리오의 유지시간이 4시간에서 2.75시간으로 줄어들었을 경우에 동일면적개념이 성립하게 된다. 그래서 ISO834 화재시나리오의 시간을 2.75시간으로 가정하여 그 결과를 살펴보았다. ISO834 화재시나리오의 결과인 그림 9로부터 2.75시간에서의 t = 0 mm와 t = 25 mm의 온도를 찾아보면 253°C, 170°C이다. 이 결과와 HC_{inc} 화재시나리오 하에서 시험완료 후 t = 0 mm와 t = 25 mm의 온도(311°C, 194°C)를 비교하면 t = 0 mm와 t = 25 mm에서 각각 58°C, 24°C의 차이가 발생한다. 앞서 수행한 바와 같이 두 화재시나리오 결과 중 낮은 온도를 나타내는 ISO834(2.75시간) 화재시나리오의 결과(253°C, 170°C)를 기준으로 t = 0 mm와 t = 25 mm에서의 온도 차이를 백분율로 나타내었다. 그 결과, t = 0 mm에서는 22.9%, t = 25 mm에서는 14.1%

로 나타났다. ISO834 화재시나리오의 유지시간을 2.75시간으로 가정하여 결과를 비교하였음에도 불구하고, t = 0 mm에서의 온도차이가 22.9%로 나타나 동일면적개념에서는 ISO834(4시간) 화재시나리오와 HC_{inc} 화재시나리오의 화재강도가 유사하다고 보기 어려운 것으로 판단되었다. 특히 Buchanan(2002)이 언급한 바와 같이 HC_{inc} 화재시나리오는 초기에 온도상승기율가가 가파르고, 최대온도가 높기 때문에 내화재가 없을 경우는 콘크리트 내부에서 급격한 온도상승에 의한 단면손실과 내부온도 증가가 발생하므로 ISO834 화재시나리오와 다른 화재손상을 야기할 것이라는 점을 주지해야 한다. 위 두 가지 유사화재강도 비교개념을 적용해 본 결과, 최대온도개념에 의한 비교방법이 더 정확한 결과를 보였다. 그러나 최대온도개념은 앞서 말한 바와 같이, 내화재와 같이 피복이 있을 경우에 대해서 적용하도록 되어 있기 때문에 피복이 없는 경우나 피복의 열전도도 등이 다른 경우에는 다른 결과를 보일 수 있음에 주의하여야 한다.

4. 내화재 설치 여부에 따른 침매터널의 구조 안정성 평가

4.1 화재시험에 의한 염해방지콘크리트의 화재 저항성 평가

본 연구의 대상인 침매터널은 화물차의 통행을 허용하기 때문에 침매터널 구조물에 내화재를 적용한 상태에서 HC_{inc} 화재시나리오를 적용하여 화재시험을 수행하였다. 내화재를 설치한 경우와 별도로, HC_{inc} 화재시나리오 하에서 내화재를 적용하지 않고 침매터널 구조물의 시공재료인 DURACRETE에 대해서 화재시험을 수행하였다.

그림 14는 HC_{inc} 화재시나리오 하에서 DURACRETE로 제작된 시험체 내부의 온도분포이다. 시험 후반부에서 열전대의 손실로 인해 시험개시 후 95분 이후의 결과가 손실되었지만 전체적인 화재손상을 파악하는데 무리가 없는 것으로 판단되었다.

그림 14에 따르면 화재 가열면으로부터 10 cm 깊이의 최대온도는 시험개시 후 95분에서 560°C, 그리고 15 cm 깊이에서는 170°C로 나타났다. 이로부터 시험체의 단면손실은 5 ~ 10 cm인 것으로 추정되었으며, 이상의

실험결과와 시험종료 후의 육안관찰 결과를 종합하면, 약 8 cm의 단면손실이 발생한 것으로 나타났다.

4.2 화재발생시 침매터널 구조물의 구조안정성 평가

침매터널 구조물의 단면검토를 위하여 침매터널 구조 해석보고서의 “합체 E12 ~ E14 횡방향 해석”을 참조하였다(지케이해상도로주식회사, 2006). 그림 15는 구조 해석을 위한 절점도이고, 표 3은 대표적인 설계정수, 그리고 표 4는 해석에 적용된 설계하중 조합이다. 상세한

설계하중 수치는 “합체 E12 ~ E14 횡방향 해석” 보고서 를 참조하였다.

화재가 발생한 후 침매터널 구조물의 안정성 검토를 위해 4.1절에서 도출된 HC_{inc} 화재시나리오 하에서

표 3. 해석에 적용된 설계정수(지케이해상도로주식회사, 2006)

구분	설계정수
콘크리트 강도	35 MPa
콘크리트 탄성계수	27.2 GPa
철근강도	400 MPa
해수 단위중량	10.08 kN/m ³
철근보강콘크리트 단위중량	24.38 kN/m ³
Ballast 콘크리트 단위중량	22.90 kN/m ³

표 4. 해석에 적용된 설계하중 조합

구분	하중조합	비고
자중	1.25	
Ballast콘크리트	1.25	
수압	1.0	
수평토압	1.5	
수직토압	1.35	
EXPLOSION(left)	1.0	폭발물
SUNKEN SHIP	1.0	선박침몰 고려
FALLING ANCHOR(left)	1.0	

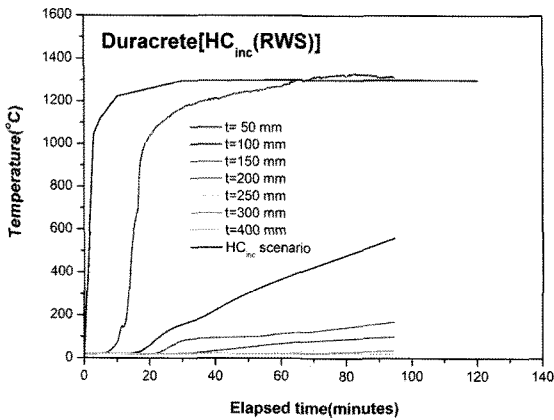


그림 14. 시간경과에 따른 DURACRETE 시험체 내부의 온도 변화(HC_{inc} 화재시나리오)

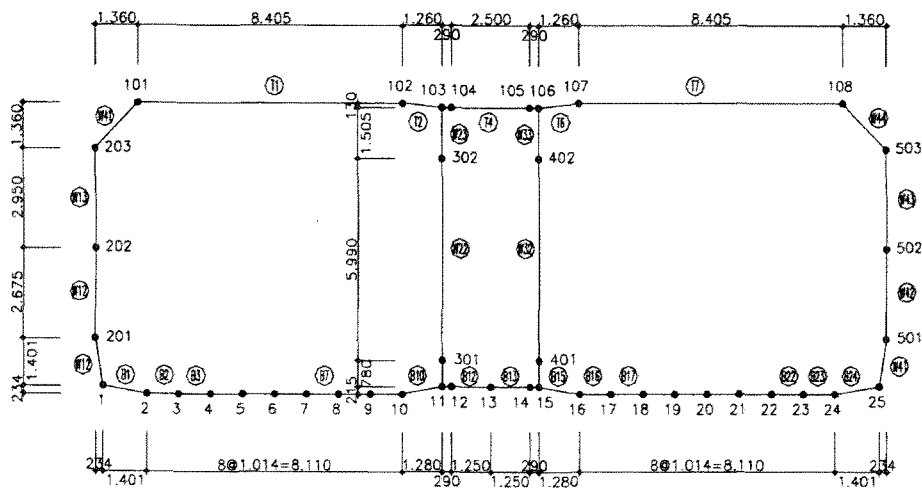


그림 15. 구조해석을 위한 절점도(지케이해상도로주식회사, 2006)

DURACRETE의 단면손실 깊이인 8 cm를 화재에 의해 발생된 단면손실로 적용하였다. 그리고 고온 하에서 온도에 따른 콘크리트 역학적 특성 저하는 한국시설안전공단에서 발간한 대구지하철 1호선 중앙로역 정밀안전진단보고서(한국시설안전공단, 2003)에 제시된 화재손상 부위의 압축강도 산정방법을 적용하여 고려하였다.

그림 16은 화재 발생 시 가열면으로부터 내부 두께 방향으로의 단면손실에 대한 개념도이다. 본 연구에서는 한국시설안전공단(2003)에서 제시한 방법과 같이 화재로 인해 역학적 특성이 저하된 단면(H')과 화재로 인해 손상된 단면과 손상되지 않은 단면을 포함하는 두께(H'A)의 비율을 β 라 할 때, 다음의 식 (1)에 따라 화재손상 부위의 압축강도를 산정하였다.

$$f_{ckd} = f_{ck}(1 - \beta) + \alpha\beta f_{ck} \quad (1)$$

여기서, α 는 온도에 따른 압축강도의 저하비율이다.

먼저 내화재가 설치되지 않은 침매터널 구조물의 단면손실깊이(H'A-H')를 8 cm로 적용하고 화재에 의해 역학적 특성이 저하된 단면(H')의 강도를 추정하기 위하여 앞서 설명한 한국시설안전공단(2003)의 방법을 사용하였다. 한국시설안전공단(2003)에서는 500°C까지 온도가 상승된 콘크리트의 깊이를 산정한 후 식 (1)에 따라 강도저하를 고려하였다. 본 연구에서는 상부슬래브를 대상으로 500°C까지 온도가 상승된 콘크리트의 깊이를 그림 14로부터 12 cm(화재면을 기준)로 추정하였다. 추정된 강도저하 깊이를 식 (1)에 대입하여 화재손

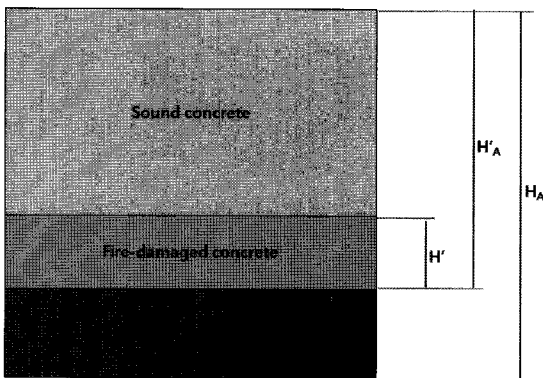
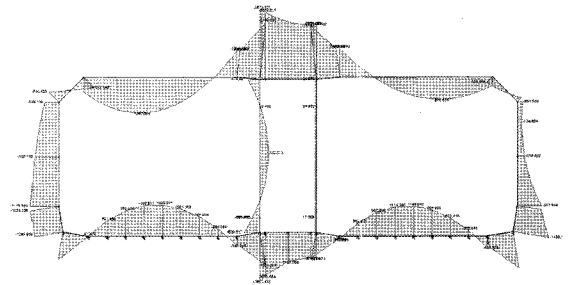


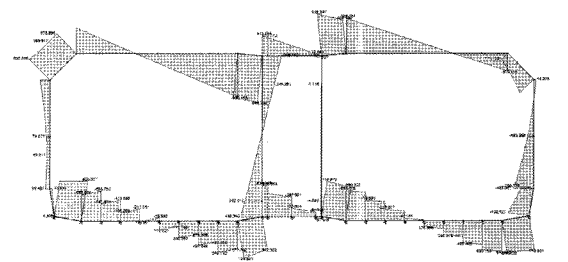
그림 16. 화재에 의한 단면손실 개념

상부위의 압축강도를 추정하였다. 이때 온도에 따른 압축강도의 저하비율은 장수호 등(2007)이 제시한 목표온도 500°C에서의 상온 대비 콘크리트 압축강도 비율인 56%를 사용하였다(콘크리트 설계강도 40 MPa). 그 결과, 화재손상부위의 압축강도는 34.51 MPa로 예상되었다.

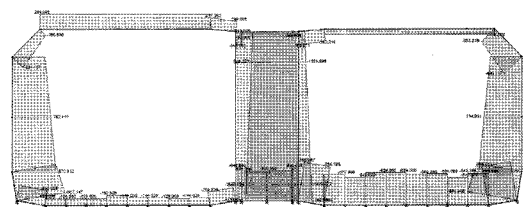
두 번째로 내화재가 설치된 침매터널 구조물의 화재손상부위의 압축강도를 추정하였다. 그러나 내화재가 설치된 경우는 화재시 ITA(2004)에서 규정한 바와 같이 콘크리트는 최대 380°C를 넘지 않아야 한다. 또한 본 연구에서 측정된 콘크리트의 온도 역시 최대 332°C(그림 9의 ISO834 화재시나리오 결과)이기 때문에 한국시설안전공단의 방법을 적용하기 어려웠다. 그래서 300°C까지 온도가 상승된 콘크리트의 깊이를 기준으로 화재



(a) 모멘트도



(b) 전단력도



(c) 축력도

그림 17. 부재력도

손상부위의 압축강도를 추정해 보았다. 위와 마찬가지로 상부슬래브를 대상으로 300°C까지 온도가 상승된 콘크리트의 깊이를 그림 9로부터 7 mm(내화재와 콘크리트가 맞닿는 면을 기준)로 추정한 후, 장수호 등(2007)이 제시한 목표온도 300°C에서의 상온 대비 콘크리트 압축강도 비율인 80%를 적용하여 내화재가 설치된 경우의 화재손상부위의 압축강도를 추정하였다. 그 결과, 화재손상부위의 압축강도는 34.99 MPa로 원 강도인 35 MPa과 차이가 없었다.

그림 17은 유한요소 상용 프로그램인 VISUALFEA를 사용하여 수행한 구조해석으로부터 얻어진 부재력도이다. 상부슬래브, 측벽부, 중앙측벽부 및 하부슬래브로 구분하여 부재력도로부터 각각의 부재력과 단면력을 검

토하였다(표 5). 특히 화재가 발생하기 전의 구조물 안정성 검토를 수행한 후에, 화재에 의해 단면손실과 역학적 특성저하가 발생하였을 경우의 단면력 저하를 부재력도와 비교하였다(표 6). 그리고 내화재가 설치된 구조물에 화재가 발생한 경우에 대해서도 단면검토를 실시하였다(표 7).

그 결과, 화재발생 전 내화재가 미설치된 구조물의 단면검토에서는 모멘트, 전단력, 축력 모두에서 설계강도가 소요강도보다 크게 나타났으나, 화재발생 후 내화재가 미설치된 구조물의 단면검토에서는 상부슬래브와 중앙측벽부의 모멘트와 축력에서 설계강도가 소요강도에 못 미치는 결과가 나타났다. 그리고 내화재를 설치시에는 화재발생 전 내화재가 미설치된 구조물의 결과와 같

표 5. 화재발생 전 구조물 단면검토(내화재 미설치시)

구분	모멘트(kN·m)		전단력(kN)		축력(kN)	
	M_u	ΦM_n	S_u	ΦS_n	P_u	ΦP_n
상부슬래브	2673	2801	966	1207	480	503
측벽	1430	1695	430	1256	985	1168
중앙측벽	600	655	438	600	1503	1642
하부슬래브	1861	3129	820	1304	762	1281
판정	O.K		O.K		O.K	

표 6. 화재발생 후 구조물 단면검토(내화재 미설치시)

구분	모멘트(kN·m)		전단력(kN)		축력(kN)	
	M_u	ΦM_n	S_u	ΦS_n	P_u	ΦP_n
상부슬래브	2673	2585	966	1121	480	464
측벽	1430	1519	430	1170	985	1046
중앙측벽	600	473	438	512	1503	1185
하부슬래브	1861	2848	820	1211	762	1166
판정	N.G		O.K		N.G	

표 7. 화재발생 후 구조물 단면검토(내화재 설치시)

구분	모멘트(kN·m)		전단력(kN)		축력(kN)	
	M_u	ΦM_n	S_u	ΦS_n	P_u	ΦP_n
상부슬래브	2673	2801	966	1205	480	503
측벽	1430	1694	430	1254	985	1167
중앙측벽	600	654	438	599	1503	1639
하부슬래브	1861	3128	820	1302	762	1281
판정	O.K		O.K		O.K	

이 설계강도가 소요강도보다 큰 결과를 보였다.

이상과 같이 HC_{inc} 화재시나리오 하에서 침매터널 구조물의 안정성을 평가한 결과, 내화재 미설치 시에는 구조물의 단면검토 시 단면내하력이 부족한 것으로 나타났다. 본 연구에서 실험한 내화재를 적용할 경우에는 HC_{inc} 화재시나리오와 같이 강력한 화재 발생 시에도 구조물의 안정성을 확보할 수 있는 것으로 나타났다.

5. 결 론

본 연구에서는 거가대교 침매터널 벽체구조물에 적용된 내화재의 화재저항성을 HC_{inc}(modified hydrocarbon) 화재시나리오와 ISO834(4시간) 화재시나리오 하에서 살펴보고, 내화재 설치에 따른 구조안정성을 평가하여 내화재의 필요성을 확인하였다. 이상의 연구로부터 얻어진 주요 결과들을 요약하면 다음과 같다.

1. HC_{inc} 화재시나리오와 ISO834(4시간) 화재시나리오 하에서의 화재시험을 수행한 결과, 콘크리트 시험체에 내화재를 시공할 경우 시험체의 내부온도가 ITA (2004)에서 제시하는 콘크리트와 철근의 손상임계온도 이하로 나타남을 확인하였다.
2. HC_{inc} 화재시나리오 하에서 t = 0 mm에서의 온도상승기울기는 42분 이후에 1.77°C/min에서 2.64°C/min로 증가하였고, ISO834(4시간) 화재시나리오 하에서 t = 0 mm에서의 온도상승기울기는 60분 이후에 1.13°C/min에서 1.27°C/min로 증가하였다. 이 결과로부터 초기 온도상승기울기와 최대온도가 낮은 화재시나리오에서 보다 초기 온도상승기울기와 최대온도가 높은 화재시나리오에서 시험체 내부의 온도상승기울기가 급해지고, 온도상승기울기가 변하는 시점도 빠르게 발생하며, 온도의 증가량도 높다는 것을 알 수 있었다.
3. HC_{inc} 화재시나리오와 ISO834(4시간) 화재시나리오는 최대온도 및 최대온도유지시간과 같은 화재특성의 차이를 나타내는 화재강도가 다름에도 불구하고 시험종료 시의 최대온도가 유사한 결과를 보이므로 최대온도개념에서 유사화재강도로 판단할 수 있다. 그러나 내화재료의 특성과 내화재 설치두께에 따라 상이한 결과를 보일 수 있으므로 유사한 조건일 경우

에 한해 결과를 이용할 수 있을 것이다. 따라서 구조물의 내화설계를 위해 표준 화재시나리오와 실제 화재 사이의 유사화재강도를 파악하고자 할 경우에는 실험 또는 해석을 수행하는 것이 바람직하다.

4. 침매터널 구조물의 재료인 DURACRETE은 염해방지 콘크리트로서 일반 콘크리트에 비해 치밀한 구조를 가져 스폴링에 취약한 특성을 가진다. HC_{inc} 화재시나리오 하에서 화재시험을 수행한 결과, 8 cm 가량의 단면손실이 발생함을 확인하였다. 또한 단면손실과 강도저하를 고려한 구조안정성 해석을 수행한 결과, 내화대책을 적용하지 않은 경우 구조물의 안정성 확보에 문제가 있음을 알 수 있었다. 따라서 화재강도가 큰 화재사고를 고려할 경우 단면손실과 역학적 특성 저하를 방지하기 위해서는 내화재의 설치가 필수적임을 확인 할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 (주)대우건설의 “부산-거제간 연결도로 건설공사”중 침매터널 구조물의 구조안정성 평가 연구 사업으로 이루어진 것으로 본 연구를 지원해준 (주)대우건설에 감사드립니다.

참고문헌

1. 지케이해상도로주식회사(2006), 구조해석보고서 일부(함체 E12 ~ E14 횡방향 해석 부분).
2. 장수호, 최순욱, 권종욱, 김상환, 배규진(2007), 화재 후 터널구조물 시공재료의 역학적 특성변화, 한국터널공학 회논문집, 제9권, 제2호, pp. 157-169.
3. 한국시설안전공단(2003), 대구지하철 1호선 중앙로역 정밀안전진단보고서.
4. Buchanan, A. H. (2002), Structural Design for Fire Safety, WILEY.
5. Caner, A., Zlatanic, S. and Munfah, N. (2005), “Quantitative assessment of structural fire endurance of concrete and shotcrete tunnel liners”, Underground Space Use: Analysis of the Past and Lessons for the Future-Erdem & Solak (eds), pp. 585-590.
6. ITA WG-6 (2004), Guidelines for structural fire resistance for road tunnels.
7. Houry, G.A. (2000), “Effect of fire on concrete and

- concrete structures”, Proc. Struct. Engng. Mater., pp. 429-447.
8. Marche, R., Lapierre, J. Y., Pozzi, V. and Mayu, P. (2002), “Mont Blanc Tunnel - a method to evaluate damage by fire to the concrete shell”, Proc. of ITA-AITES, TS12A.4.
9. Matsuo, Y., Mizobe, A, and Kiyomiya, O. (2005), “Study on anti-fire panel for vehicle fore in immersed tunnel”, Underground Space Use: Analysis of the Past and Lessons for the Future-Erdem & Solak (eds), pp. 1005-1011.
10. Narendranathan, N., Chua, T. J. (1995), “Assessment and repair of fire damaged concrete structures”, 20th Conference on Our World in Concrete & Structures, August, 23-25, Singapore.
11. TNO (1998), Fire Protection for Tunnels (Part 1: Fire Test Procedure), 1998-CVB-R1161 (rev.1).

접수일(2010.10.8), 수정일(2010.11.15), 게재확정일(2010.11.22)