



침매터널 세그먼트조인트의 내화 대책에 대한 실험적 평가

최순욱¹, 장수호^{2*}, 김홍열³, 조봉현⁴

Experimental evaluation of fire protection measures for the segment joint of an immersed tunnel

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

ABSTRACT In this study, a series of fire experiments under HC_{inc} and ISO834 (duration of 4 hour) fire scenarios were carried out for three different types of fire protection measures for the segment joint to evaluate their applicabilities to an immersed tunnel. The experimental results revealed that an expansion joint installed to allow relative movements between concrete element ends in a segment joint is the most vulnerable to a severe fire. For the fire protection measure where the originally designed steel plates at an expansion joint are replaced by fire-resistant boards, the experiments showed that they cannot achieve good fireproofing performance under both HC_{inc} fire scenario and ISO834 (4 hour) fire scenarios since the installation of fire-resistant boards results in the reduction of the sprayed fire insulation thickness. On the other hand, the application of modified bent steel plates replacing the original steel plates was proved to be very successful in fireproofing of the expansion joint due to more sprayed materials filled in bent steel plate than in the original design concept as well as higher adhesion between the steel plate and the sprayed fire insulation layer.

Keywords: Immersed tunnel, segment joint, sealing material, fireproofing

요약 본 연구에서는 화재 발생시 침매터널 세그먼트조인트의 지수재를 고온으로부터 보호하기 위한 내화대책의 효용성을 평가하기 위하여, 세 가지 방식으로 침매터널 세그먼트조인트를 모사한 콘크리트 블록실험체에 대해 HC_{inc} 화재 시나리오와 ISO834(4시간) 화재 시나리오 하에서 화재실험을 수행하였다. 실험결과로부터 힘체간의 변위를 허용하기 위한 시공조인트가 화재 시 취약부위임을 확인할 수 있었다. 열 손상에 취약한 시공조인트의 철판을 내화보드와 굴곡이 있는 철판으로 보강한 내화대책으로 변경하여 화재실험을 수행한 결과, 내화보드로 보강한 경우는 내화보드 설치에 따른 뿐어붙임 모르타르 내화재의 시공두께 감소로 인해 내화재의 흡이 발생하여 내화성능을 발휘하지 못하였고, 굴곡이 있는 철판으로 보강한 경우는 철판굴곡에 의해 철판과 뿐어붙임 모르타르 내화재와의 부착력이 증가됨과 더불어 철판 굴곡부에 채워지는 뿐어붙임 모르타르 내화재로 인하여 시공조인트에서의 열 손상이 발생하지 않아 내화성능을 충분히 발휘할 수 있음을 확인하였다.

주요어: 침매터널, 세그먼트조인트, 지수재, 내화대책

접수일(2011.4.1), 수정일(2011.4.28), 게재확정일(2011.5.15)

¹한국건설기술연구원 기반시설연구본부 지반연구실 전임연구원, 연세대학교 사회환경시스템공학부 박사과정

²한국건설기술연구원 기반시설연구본부 지반연구실 연구위원

³한국건설기술연구원 건설품질정책본부 화재안전연구실 연구위원

⁴대우건설 GK침매터널현장 현장소장

*교신저자: 장수호 (E-mail: sooho@kict.re.kr)

1. 서 론

침매터널은 해저준설 후 지반 보강된 수저(水底)에 육상에서 미리 제작된 함체를 침수시켜서 연결한 다음, 함체 상부에 쇄석 등으로 보호공을 시공한 구조물을 말한다. 침매터널의 외벽에는 보통 방수 피막이 시공되지만, 터널의 공용기간, 선박의 투·주묘(anchoring)에 의한 손상 가능성, 피막의 성능저하 등을 고려할 때 침매터널의 각 함체는 높은 수밀성이 요구된다. 특히, 세그먼트조인트에서는 연결부의 특성상 높은 수준의 수밀 대책이 필요하다.

본 연구대상인 부산-거제간 연결도로 침매터널에서는 지나 개스킷(GINA gasket)과 오메가 실(omega seal)을 사용하여 2중으로 세그먼트조인트에서의 수밀성을 확보하였다(지케이해상도로주식회사, 2008). 본 침매터널에 적용된 지나 개스킷은 침설 시의 작용 수압과 함체의 중량에 의해 압착되어 함체 간의 변위를 흡수하며 1차 지수재 역할을 수행한다. 그리고 수중에서 함체를 연결하고 배수를 완료시킨 후 설치되는 오메가 실은 지나 개스킷을 보완하기 위해 지나 개스킷 내측, 즉 함체 내부에 설치되어 변위와 수압이 작용하는 2차 지수재이다(그림 1 참조).

부산-거제간 연결도로는 화재강도가 큰 화물차가 통행하도록 설계되었기 때문에 침매터널 대형 화재에 대한 대책이 없을 경우 매우 심각한 인적·물적 피해가 발생할 수 있다. 특히, 해저라는 조건상 세그먼트조인트의 지수재가 손상될 경우, 육상 터널에 비해 더 큰 피해가 발생할 수 있으므로 이에 대한 대비가 필요하다.

ITA(2004)에서는 화물차가 통행하는 침매터널의 경우, HC_{inc}(modified hydrocarbon) 또는 RWS (RijksWaterStaat) 화재 시나리오 하에서 터널구조물의 화재 저항성을 실험을 통해 사전에 평가하도록 지침을 제시하고 있다. 따라서 본 연구에서는 ITA(2004)에서 제시하고 있는 HC_{inc} 화재 시나리오와 더불어, 장시간의 화재사고를 모사하기 위하여 ISO834(4시간) 화재 시나리오를 함께 적용하여 침매터널 세그먼트조인트의 내화대책에 대한 평가를 수행하였다. 이때 침매터널 세그먼트조인트와 그에 대한 내화대책을 모사한 철근보강 콘크리트 블록실험체들을 제작하여 화재 실험을 실시하였다. 또한 본 연구에서 수행된 화재실험으로부터 당초 설계된 세그먼트조인트의 지수재 보호 대책에 대한 문제점들이 확인되어, 뿜어붙임 방식의 모르타르 내화재 시공과 내화용 보드 설치를 혼용한 방법으로 지수재 보호 대책방법을 수정한 후 2차 화재실험을 수행하는 방식으로 연구를 수행하였다.

2. 침매터널 세그먼트조인트의 내화대책

2.1 당초 설계대책(안)에 대한 사전 검토

본 연구에서 대상으로 하는 침매터널 세그먼트조인트의 내화대책은 지나 개스킷의 안쪽(함체 내부)에 설치되는 2차 지수재인 오메가 실을 화재로 인한 고온으로부터 보호하는 것이다. 오메가 실과 지나 개스킷은 그림 1과 같이 붙어 있기 때문에 지수재에 대한 통합 보호대책이라 말할 수 있다. 그림 1은 부산-거제간 연결도로 침매터널의 설계사인 덴마크 COWI사에서 작성한 천정부의 세그먼트조인트 지수재 보호에 대한 상세도이다(지케이해상도로주식회사, 2008). 그림 1은 오메가실과 뿐 어붙임 방식의 모르타르 내화재 사이에 미네랄 울(mineral wool)과 같은 내화재를 철판으로 설치한 내화구조이다.

그러나 이 상세도와 같이 미네랄 울 하부에 메수(mesh)를 설치하고 뿐어붙임 모르타르 내화재를 시공할 경우 뿐어붙임 모르타르 내화재의 두께가 25~35 mm로 시공되기 때문에 미네랄 울 하부의 지지가 부족하여 뿐어붙임 모르타르 내화재의 쳐짐과 강도저하로 인해 시공불량이 발생할 수 있다. 또한 그림 1의 좌측하단과 같이 약 20 mm의 시공조인트를 고려하여 내화재를 시공하여야 한다. 이때 뿐어붙임 모르타르 내화재는 철판으로 마감하게 되는데, 화재 발생시 철판은 쉽게 가열되어 철판과 뿐어붙임 모르타르 내화재의 분리가 촉진됨으로 인해 내화재 탈락의 주요원인이 될 수 있다.

그림 1의 모사한 콘크리트 블록실험체에 대하여 두께 25 mm의 뿐어붙임 모르타르 내화재를 시

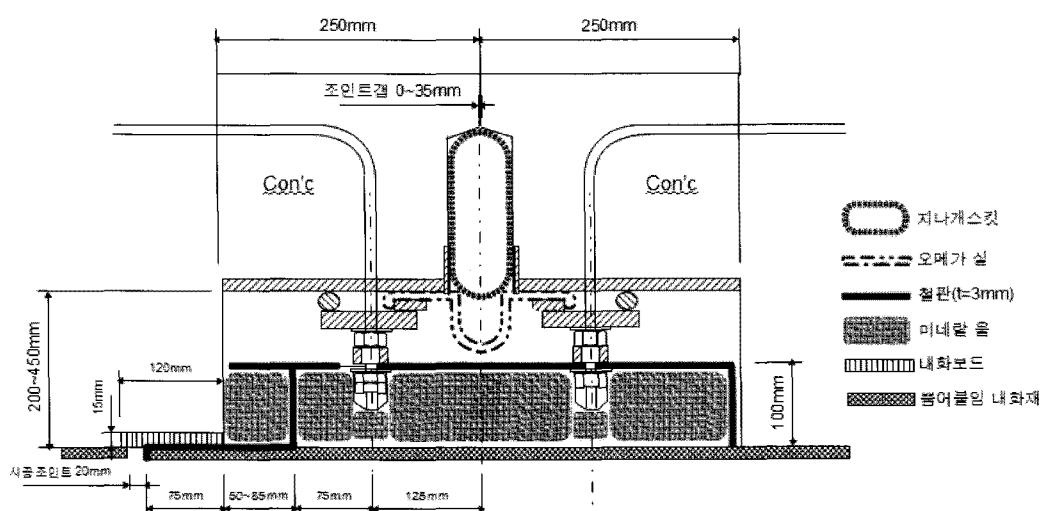


그림 1. 침매터널 침설 조인트의 당초 설계 상세도(지케이해상도로주식회사, 2008)

공하고 HC_{inc} 화재시나리오 하에서 화재실험을 실시하였다. 화재실험 개시 후 68분이 경과되었을 때 개스킷의 손상을 판단하는 위치인 $t=100$ mm에서의 온도가 ITA(2004)에서 제시하는 화재시 개스킷의 손상에 대한 가이드라인 기준온도인 150°C 를 초과하였다(그림 2). 경과시간 68분 이후에도 급격한 온도상승이 관찰되어 실험을 중단하였다.

실험체의 좌측부 열전대에서 관찰된 급격한 온도상승은 화재 개시 후 약 66분(42°C)에서 68분(150°C)사이에서 발생한 것으로서 단지 2분 만에 진행된 것이다. 그러나 본 연구에서 사용한 가열로의 관찰창을 통해 촬영한 그림 3을 보면 화재 개시 후 32분에 이미 철판과 뽑어붙임 모르타르 내화재의 분리가 발생하였고, 60분경에는 뽑어붙임 모르타르 내화재의 처짐이 발생하여 내부의 미네랄 울을 지지하지 못하는 것으로 관찰되었다. 미네랄 울은 뽑어붙임 모르타르 내화재에 의해 지지되어 2차 단열의 역할을 수행하지만 독자적으로는 고정될 수 없기 때문에 뽑어붙임 모르타르 내화재의 처짐이 발생하여 미네랄 울을 고정시켜주지 못하면 탈락하게 된다. 따라서 뽑어붙임 모르타르 내화재의 처짐에 따른 미네랄 울의 탈락으로 화재 개시 후 66분과 68분 사이에 급격한 온도상승이 발생하게 된 것으로 판단된다.

그림 4는 화재실험 종료 후 손상된 내화재와 콘크리트 블록실험체의 하부면이다. 내화재가 일부 탈락되었고, 내부의 철판이 열 손상을 받아 처짐이 발생하였다.

이상의 결과로부터 그림 1과 같은 세그먼트조인트 내화대책은 고온으로부터 철판의 가열을 방지하고 철판 표면에 뽑어붙임 모르타르 내화재를 설치하는데 있어 어려움이 있는 것으로 나타나 내화대책의 수정이 필요함을 실험적으로 사전 확인하였다.

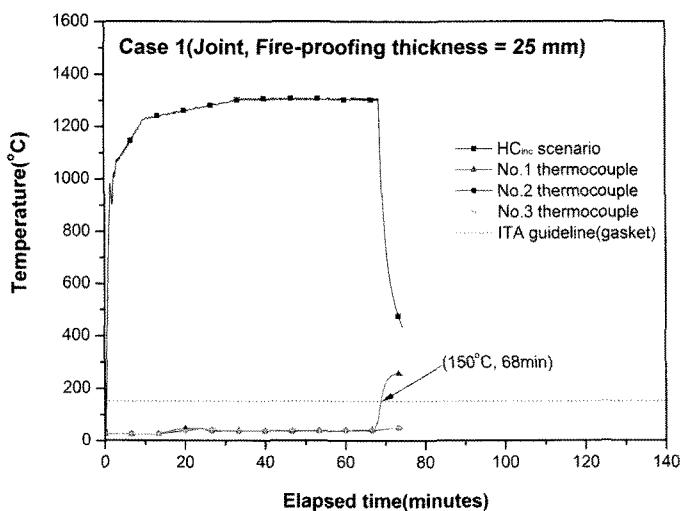


그림 2. 화재경과시간에 따른 1번 실험체(case 1, 당초설계) 내부온도 변화(HC_{inc} 화재시나리오)

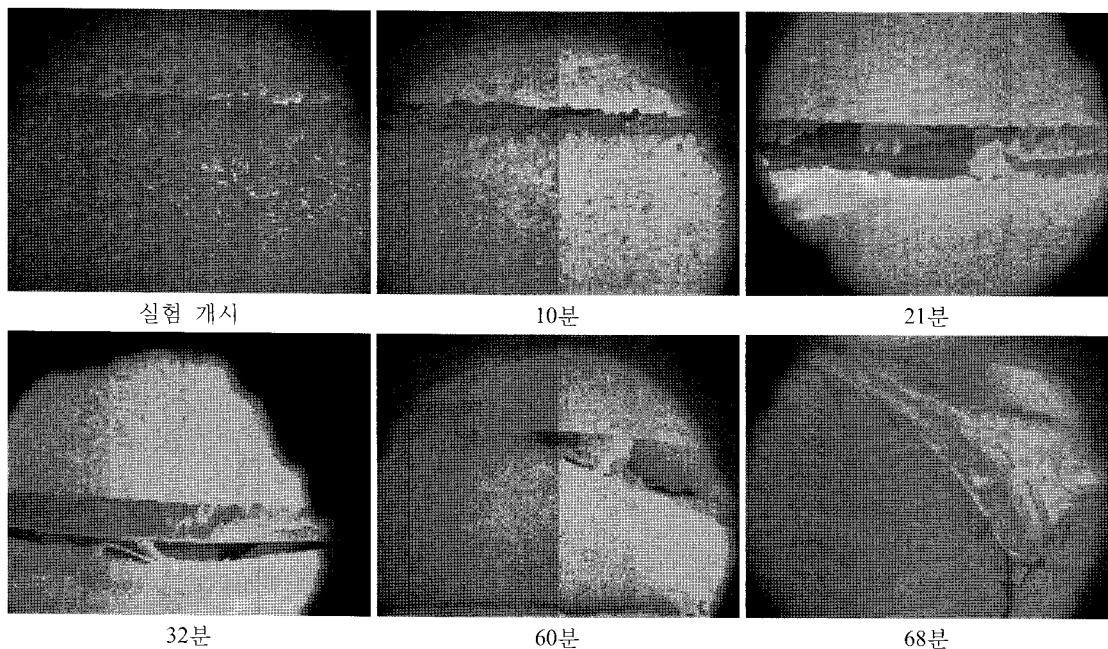


그림 3. 화재 경과시간에 따른 가열면의 변화(case 1)

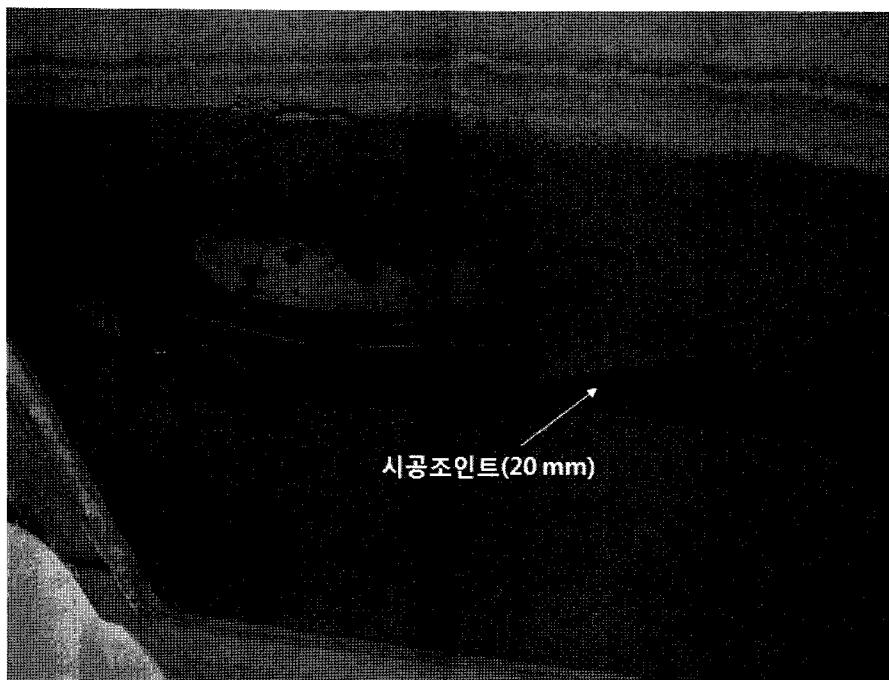


그림 4. 화재실험 후 1번 실험체(case 1) 하부면

2.2 침매터널 세그먼트조인트의 수정 내화대책

이상과 같이 당초 설계대책에서 나타난 문제를 해결하기 위하여 본 연구에서는 내화보드를 적용하는 방법과 굴곡이 있는 철판을 이용하는 두 가지 방법으로 내화재를 재시공한 다음에 화재실험을 수행하였다.

첫 번째로 내화보드를 적용하는 방법에서는 미네랄 울 하부에 내화보드를 설치한 다음, 내화보드 하부 좌측에는 합체의 변위를 허용할 수 있도록 다른 내화보드를 맞댄 후 그 하부에 뽑어붙임 모르타르로 내화재를 시공하였고, 우측에는 뽑어붙임 모르타르로 내화재만을 시공하였다(그림 5).

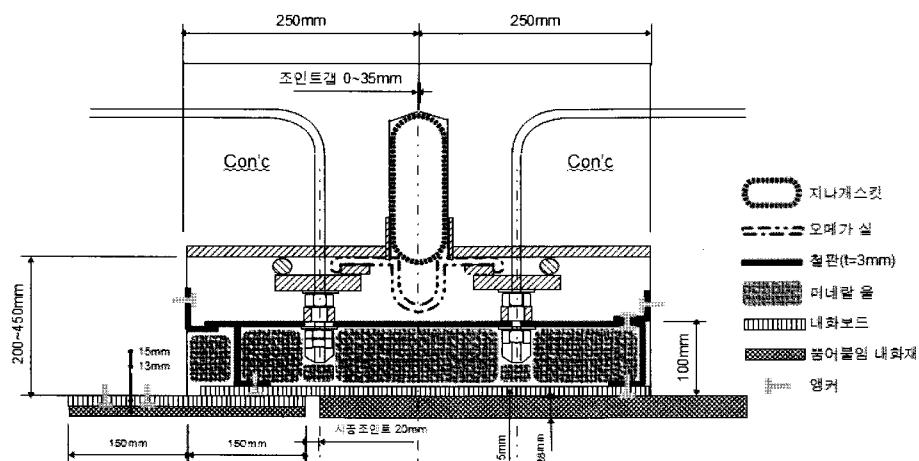


그림 5. 내화보드를 이용한 침매터널 세그먼트조인트 내화대책

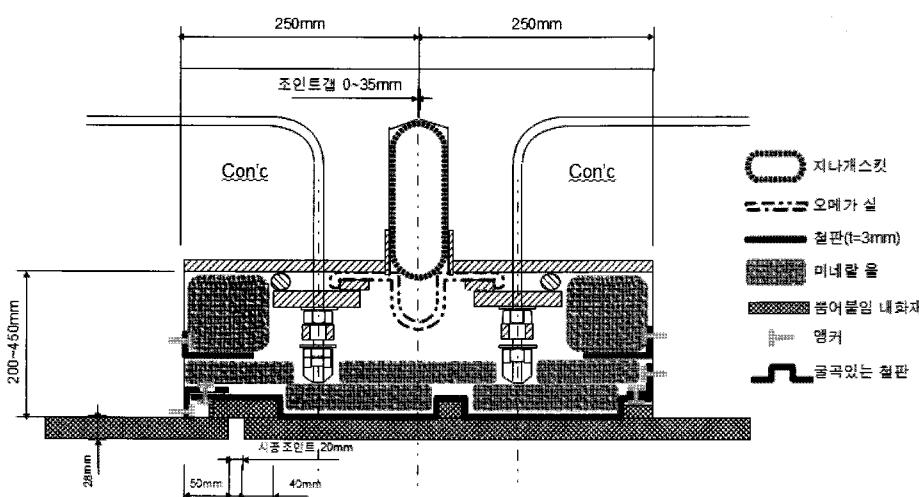


그림 6. 굴곡철판을 이용한 침매터널 세그먼트조인트 내화대책

표 1. 세그먼트조인트 내화대책의 장·단점

세그먼트조인트 내화대책	장점	단점
당초 설계 대책 (그림 1)	<ul style="list-style-type: none"> 시공이 간편함. 철판을 사용하여 미네랄 울을 고정시키고 하부에 뽑어붙임 내화재를 시공 	<ul style="list-style-type: none"> 화재시 시공이음부의 철판이 가열되어 뽑어붙임 내화재 탈락이 발생 미네랄 울 하부의 뽑어붙임 내화재를 지지할 수 있는 방법이 필요
내화보드 이용 (그림 5)	<ul style="list-style-type: none"> 화재시 가열되어 뽑어붙임 내화재 탈락의 주요 원인이 되는 철판을 내화보드를 사용하여 화재면으로부터 분리함에 따라 철판가열에 의한 영향을 제외 다른 방법에 비해 시공이 단순 	<ul style="list-style-type: none"> 내화보드와 뽑어붙임 내화재 사이의 부착력이 철판에 비해 부족 함께변위 허용을 위한 내화보드 추가로 뽑어붙임 내화재의 두께가 얇아짐 내화보드의 단가가 높음
굴곡철판 이용 (그림 6)	<ul style="list-style-type: none"> 화재시 가열되어 뽑어붙임 내화재 탈락의 주요 원인이 되는 철판을 뽑어붙임 내화재를 사용하여 화재면으로부터 분리함에 따라 철판가열에 의한 영향을 제외 굴곡철판에 의해 뽑어붙임 내화재의 부착력 증대 	<ul style="list-style-type: none"> 뽑어붙임 내화재의 시공시 굴곡철판의 음각부를 선 시공한 후 뽑어붙임 내화재 시공을 수행 굴곡철판의 가공작업이 추가

두 번째로 굴곡이 있는 철판을 이용한 방법에서는 미네랄 울 하부에 굴곡이 있는 철판을 설치하여 뽑어붙임 모르타르 내화재의 부착력을 높였으며, 굴곡의 음각부가 채워진 위에 뽑어붙임 모르타르 내화재를 시공함에 따라 시공조인트부에서 철판이 가열되지 않도록 하였다(그림 6).

본 연구에서 사용한 침매터널 세그먼트조인트 내화대책의 장·단점을 정리하면 표 1과 같다.

3. 실험체 제작 및 실험방법

3.1 실험체 제작

침매터널 세그먼트조인트의 내화대책들을 실험적으로 평가하고자 그림 7과 같이 실험체 내부에 열전대를 포함한 콘크리트 블록실험체를 4개 제작하였다. 이와 같이 제작된 콘크리트 블록실험체들은 세그먼트조인트의 내화대책별로 HC_{inc} 및 ISO834(4시간) 화재 시나리오 조건의 화재실험에 활용되었다(표 2).

콘크리트 블록실험체에는 부산-거제간 침매터널에 적용된 염해방지 콘크리트인 DURACRETE 을 동일하게 적용하였고, 블록실험체의 크기는 화재실험에 활용된 고온 가열로의 크기에 부합되도록 1,400×1,000×400 mm로 제작하였다. 이때 실제 시공조건과 동일하게 오메가 실을 시공한 다음, 오메가 실 하부에는 미네랄 울을 설치하였고 미네랄 울 하부는 각각의 내화대책 조건별로 그림

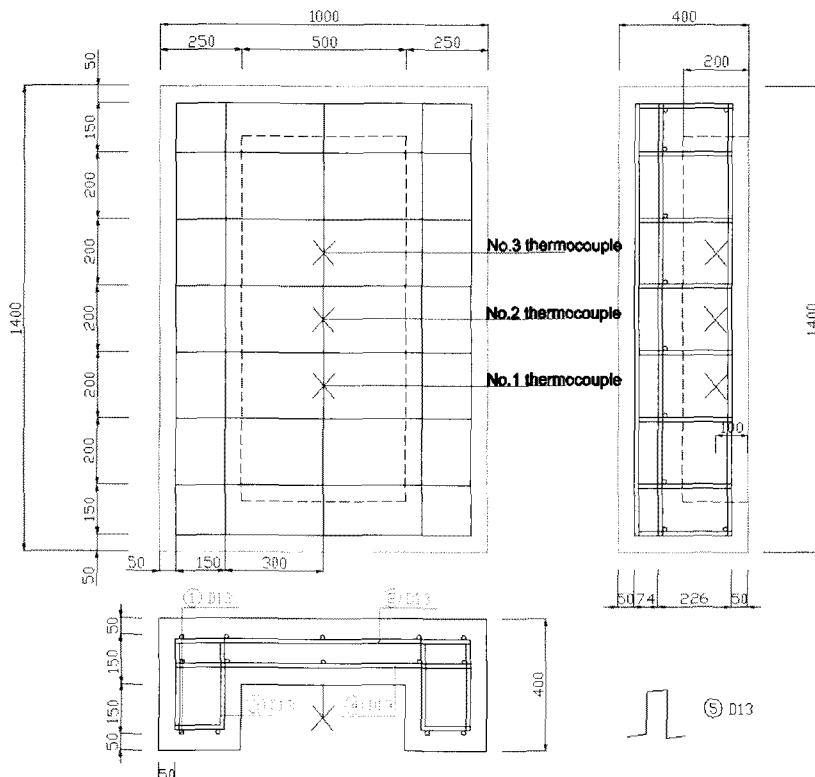


그림 7. 블록실험체내의 열전대 설치 위치

표 2. 실험체 구분

실험체 번호	세그먼트조인트 내화대책	내화재 두께	화재시나리오
Case 1	당초 설계대책(그림 1)	25 mm	HC _{inc}
Case 2	내화보드 이용(그림 5)	28 mm	HC _{inc}
Case 3	내화보드 이용(그림 5)	28 mm	ISO834(4시간)
Case 4	굴곡철판 이용(그림 6)	28 mm	HC _{inc}
Case 5	굴곡철판 이용(그림 6)	28 mm	ISO834(4시간)

5와 그림 6의 상세도와 같이 시공하였다. 그림 8에서 뽑어붙임 내화재사이의 흄은 시공조인트 20 mm를 모사한 것이다.

본 연구에서는 그림 7과 같이 뽑어붙임 방식의 모르타르 내화재와 콘크리트가 닿는 면을 기준으로 100 mm 높이($t=100$ mm)에 지름 6.4 mm의 시즈 열전대(sheathed thermocouple)를 3개 설치하였다. 여기서 $t=100$ mm는 ITA(2004)에서 제시하는 화재시 개스킷의 손상에 대한 가이드라인 기준 온도(150°C)와 비교하기 위한 온도 측정점이다.

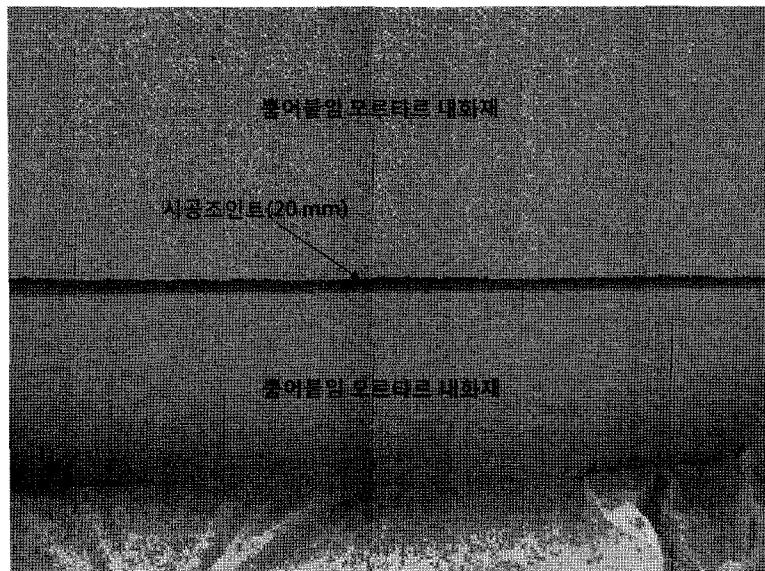


그림 8. 뿜어붙임 모르타르 내화재의 시공면과 시공조인트

표 3. 염해방지 콘크리트(DURACRETE)의 배합설계

구분	설계 기준 강도 (MPa)	최대 골재 치수 (mm)	슬립프 (cm)	공기량 (%)	S/a (%)	W/B (%)	단위재료량(kg/m ³)					
							굵은 골재	모래	시멘트	플라이 애쉬	물	혼화제 (유동화제)
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 4. 본 연구에서 적용된 뿐어붙임 모르타르 내화재의 물리·역학적 특성

구분	실험방법	크기
밀도(density)	ASTM E605	732 kg/m ³
부착강도(cohesion)	ASTM E736	0.568 MPa
압축강도(compressive strength)	ASTM E761	3.778 MPa
열전도율(thermal conductivity)	ASTM C177	0.19 W/mK@24°C

표 3은 염해방지 콘크리트인 DURACRETE의 배합설계 조건이며, 표 4는 본 연구에서 적용된 뿐어붙임 모르타르 내화재의 일반적인 물리·역학적 특성이다. 또한 침매터널 세그먼트조인트의 내화대책에 대한 당초 설계조건(case 1) 및 내화보드 또는 굴곡철판을 이용한 조건(case 2~case 5)에서 적용된 뿐어붙임 모르타르 내화재의 적용 두께는 각각 25 mm 및 28 mm 이었다.

3.2 실험방법

화재 실험을 위하여 내화재가 시공된 콘크리트 블록실험체를 그림 9와 같이 수평가열로에 설치하였다. 이때 그림 10과 같은 시간에 따른 온도이력 특성을 가지는 HC_{inc} 화재 시나리오와 ISO834(4시간) 화재 시나리오를 적용하였으며, 화재 실험시 콘크리트 블록실험체 내부 온도를 그림 7과 같이 설치된 열전대 위치에서 1초 간격으로 측정하였다.

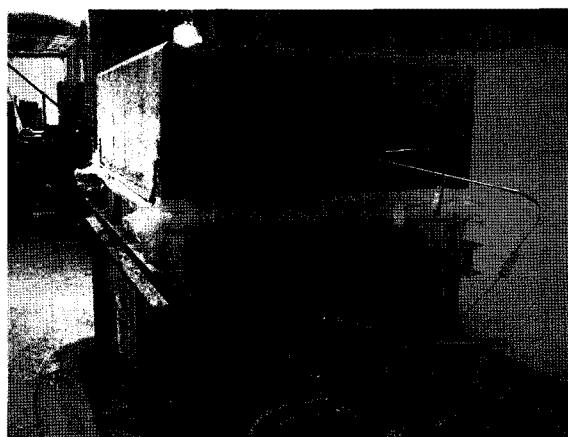


그림 9. 본 연구에서 활용된 수평가열로와 블록실험체의 설치 후 장면

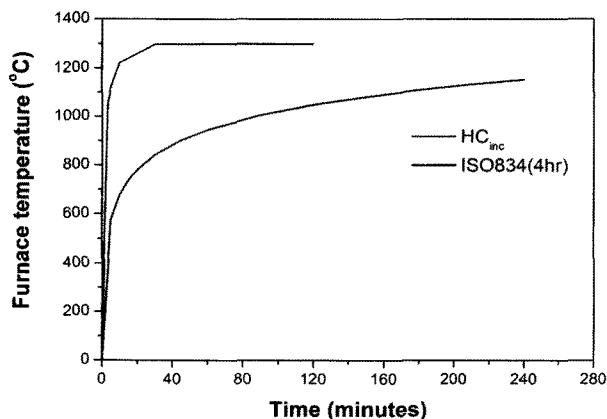


그림 10. 본 연구에서 적용된 터널 화재 시나리오

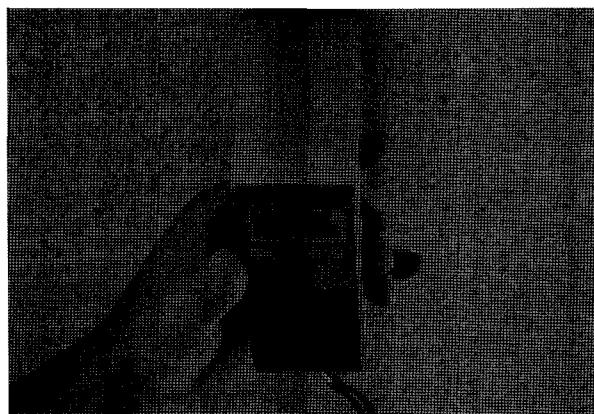


그림 11. 내화재의 표면 함수비 측정 장면

표 5. 화재실험전 실험체 조건별로 측정된 함수비

실험체 번호	시공재료	함수비(%)				
		1	2	3	4	평균
Case 1	콘크리트	4.7	4.6	4.6	4.7	4.7
	내화재	4.1	4.1	3.5	3.8	3.9
Case 2	콘크리트	4.3	4.5	4.8	4.5	4.5
	내화재	2.6	2.8	2.5	2.9	2.7
Case 3	콘크리트	4.5	4.7	4.3	4.6	4.5
	내화재	2.4	2.7	2.5	2.6	2.4
Case 4	콘크리트	4.6	4.5	4.5	4.5	4.5
	내화재	3.5	3.4	3.0	2.8	3.2
Case 5	콘크리트	4.4	4.5	4.7	4.5	4.5
	내화재	3.2	3.1	3.0	2.8	3.0

TNO(1998)에서는 내화재에 대한 화재실험시 내화재의 함수비가 5%이하일 경우에만 실험을 수행할 것을 권장하고 있다. 따라서 본 연구에서도 그림 11과 같은 고주파 용량식(20 MHz) 콘크리트·모르타르 수분측정기(Kett사 HI-520)를 사용하여 내화재의 함수비가 5% 이하인지를 확인한 후에 화재실험을 실시하였다. 이상과 같이 매 화재실험 이전에 측정된 각 실험체의 함수비는 표 5와 같다.

4. 화재실험 결과 및 분석

4.1 HC_{inc} 화재 시나리오 조건에서 내화보드를 적용한 실험체(case 2)

쁨어붙임 모르타르 내화재의 두께가 28 mm인 그림 5의 상세를 모사한 콘크리트 블록실험체에 대하여 HC_{inc} 화재시나리오 하에서 화재실험을 실시하였다. 화재실험 개시 후 약 89분이 경과되었

을 때 개스킷의 손상을 판단하는 위치인 $t=100$ mm에서의 온도가 ITA(2004)에서 제시하는 화재시 개스킷의 손상에 대한 가이드라인 기준온도인 150°C 를 초과하였다(그림 12). 경과시간 89분 이후에 온도상승이 지속되어 실험을 중단하였다.

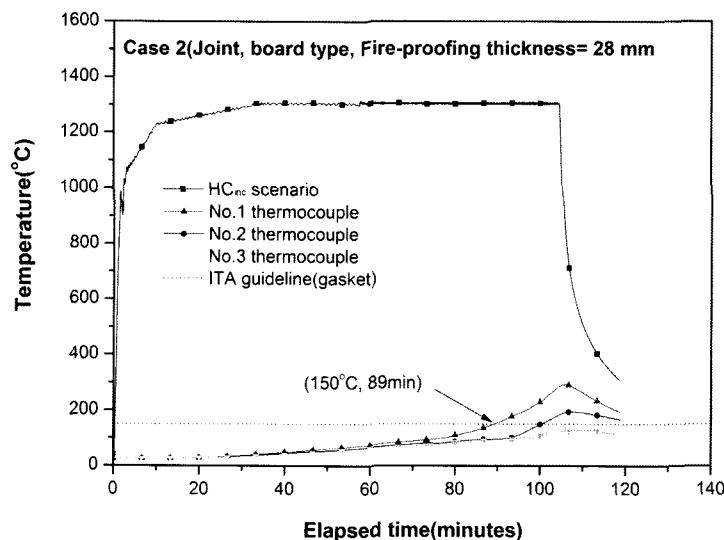


그림 12. 화재경과시간에 따른 2번 실험체(case 2) 내부온도 변화(HC_{inc} 화재시나리오)

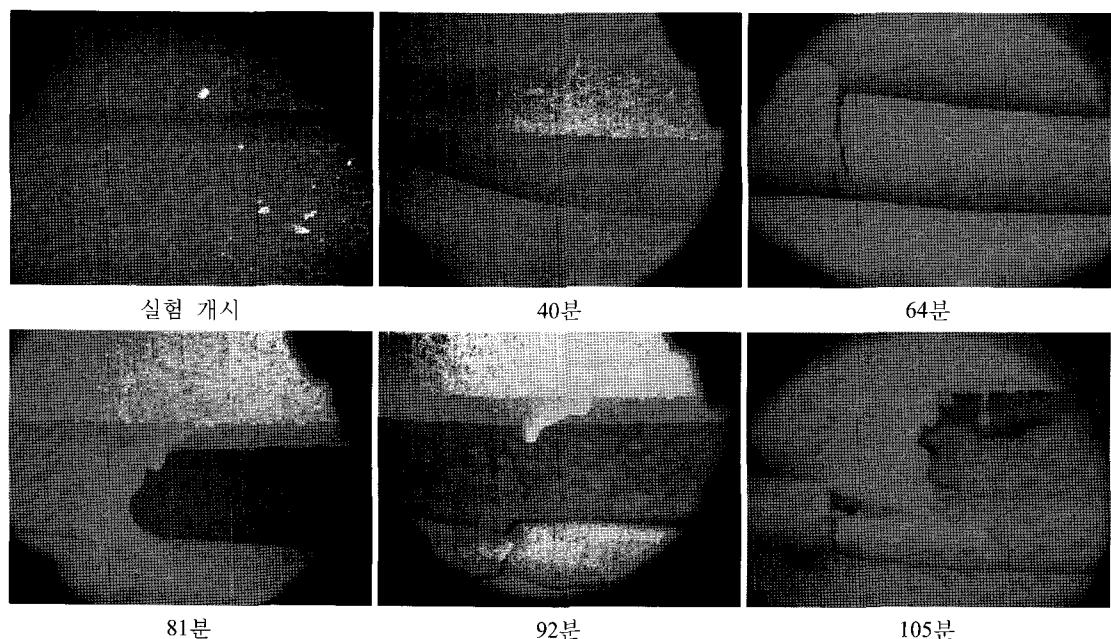


그림 13. 화재 경과시간에 따른 가열면의 변화(case 2)

온도가 가장 높은 실험체의 1번 열전대(No.1 thermocouple)를 기준으로 화재개시 후 75분까지는 약 $0.96^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 의 온도상승률을 보였으나, 이후로 89분까지는 $3.79^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 로서 급격히 증가하였다. 가열로의 관찰창을 통해 실시간 촬영한 그림 13에 따르면 화재개시 후 40분 이전에 내화보드와 뿐어붙임 모르타르 내화재의 분리가 발생하였고, 약 64분경에는 함체의 변위를 허용하기 위해 그림 5의 좌측 하단과 같이 미네랄 울 하부의 내화보드 아래에 맞닿아 시공된 내화보드의 처짐이 발생한 것으로 관찰되었다. 이후 81분 경과 시에는 내부의 미네랄 울을 지지하는 내화보드의 처짐이 발생하였고, 이로 인해 내부의 소프트타입의 내화재가 탈락되어 89분에 개스킷의 손상 한계온도를 초과하게 되었다. 화재 개시 후 92분과 105분에서 관찰된 용융현상은 미네랄 울이 녹은 것으로 사료된다.

그림 14는 화재실험 종료후 손상된 내화재와 콘크리트 블록실험체의 모습이다. 뿐어붙임 모르타르 내화재가 일부 탈락되었을 뿐만 아니라, 내부의 내화보드와 미네랄 울도 탈락되었고 미네랄 울을 감싸고 있던 철판이 노출되었다.

따라서 Case 2의 경우에는 내화보드와 뿐어붙임 모르타르 내화재를 시공한 시공조인트 좌측부가 우측부보다 상대적으로 화재에 취약한 것으로 나타났다. 이러한 문제는 함체간 변위를 일부 허용하기 위한 내화보드 설치로 인하여 우측부보다 좌측부에서 뿐어붙임 모르타르 내화재 두께보다 상대적으로 얇게 시공됨에 따라 고온의 화재 발생시 좌측부에서의 분리가 먼저 발생하기 때문인 것으로 판단된다.

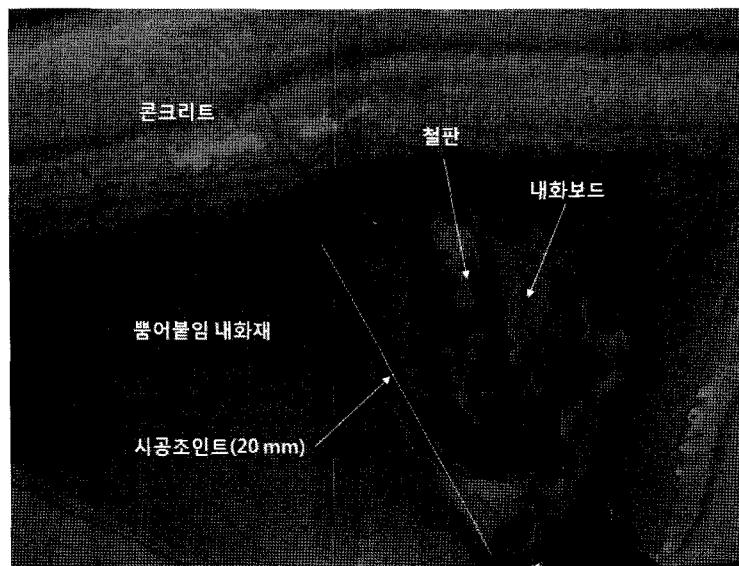


그림 14. 화재실험 후 2번 실험체(case 2) 하부면

4.2 ISO834(4시간) 화재 시나리오 조건에서 내화보드를 적용한 실험체(case 3)

쁨어붙임 모르타르 내화재의 두께가 28 mm인 그림 5의 상세를 모사한 콘크리트 블록실험체에 대하여 ISO834(4시간) 화재시나리오 하에서 화재실험을 실시하였다. 화재실험 개시 후 219분이 경과되었을 때 개스킷의 손상을 판단하는 위치인 $t=100$ mm에서의 온도가 ITA(2004)에서 제시하는 화재시 개스킷의 손상에 대한 가이드라인 기준온도인 150°C 를 초과하였다(그림 15). 이후에도 온도 상승이 지속되어 실험을 중단하였다.

온도가 가장 높게 발생한 실험체의 1번 열전대(No.1 thermocouple)를 기준으로 실험시작 후 165분까지의 온도는 약 71°C 로 나타났고 이후 219분까지 $1.48^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 의 온도상승률을 나타내었다. 가열로의 관찰창을 통해 촬영한 그림 16에 따르면 화재 개시 후 180분경에 내화보드와 뜯어붙임 모르타르 내화재의 분리가 발생하였고, 240분에는 뜯어붙임 모르타르 내화재의 처짐이 크게 발생하였다. 하지만 ISO834(4시간) 화재시나리오 하에서는 HC_{inc} 화재시나리오에 비해 상대적으로 내화보드의 손상이 크게 발생하지 않는 것으로 관찰되었다.

그림 16의 촬영 화면으로부터 자세한 확인이 어려웠던 관계로 화재실험 후에 내화면을 육안으로 조사한 결과, 미네랄 울 하부의 내화보드와 그 아래 좌측의 내화보드사이의 공간이 벌어짐에 따라 온도상승이 발생한 것으로 판단되었다. 또한 Case 2에서는 앞선 그림 12와 같이 내화보드의 탈락으로 인해 온도상승률이 급격히 증가하는 시점인 75분과 150°C 를 초과하는 시점인 89분사이의 시간

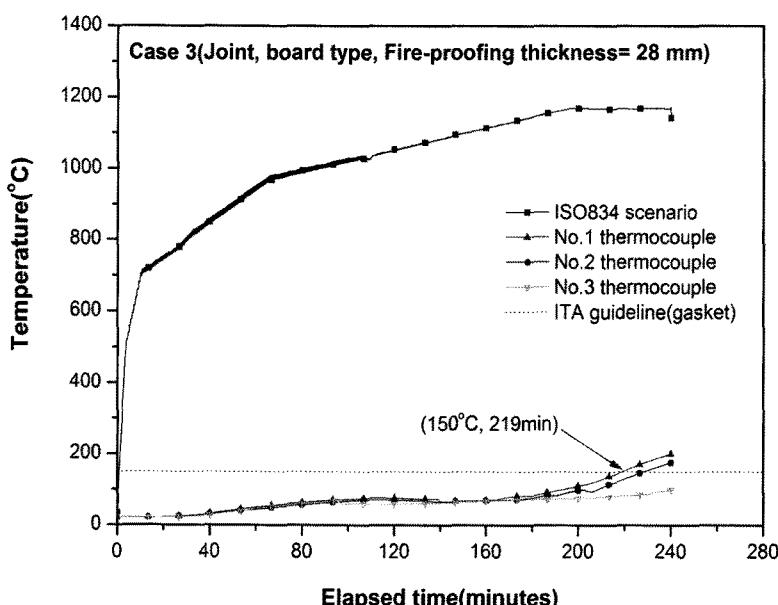


그림 15. 화재경과시간에 따른 3번 실험체(case 3) 내부온도 변화(ISO834 4시간 화재시나리오)

차이가 14분에 불과했던 반면, 내화보드가 탈락하지 않은 Case 3 실험에서는 온도상승률이 급증하는 시점인 165분과 기준온도 150°C 초과시점인 219분사이의 시간이 54분으로서 온도상승이 상대적으로 느리게 발생하였다. 이상의 결과로부터, Case 3에서는 미네랄 울 하부의 내화보드와 그 하

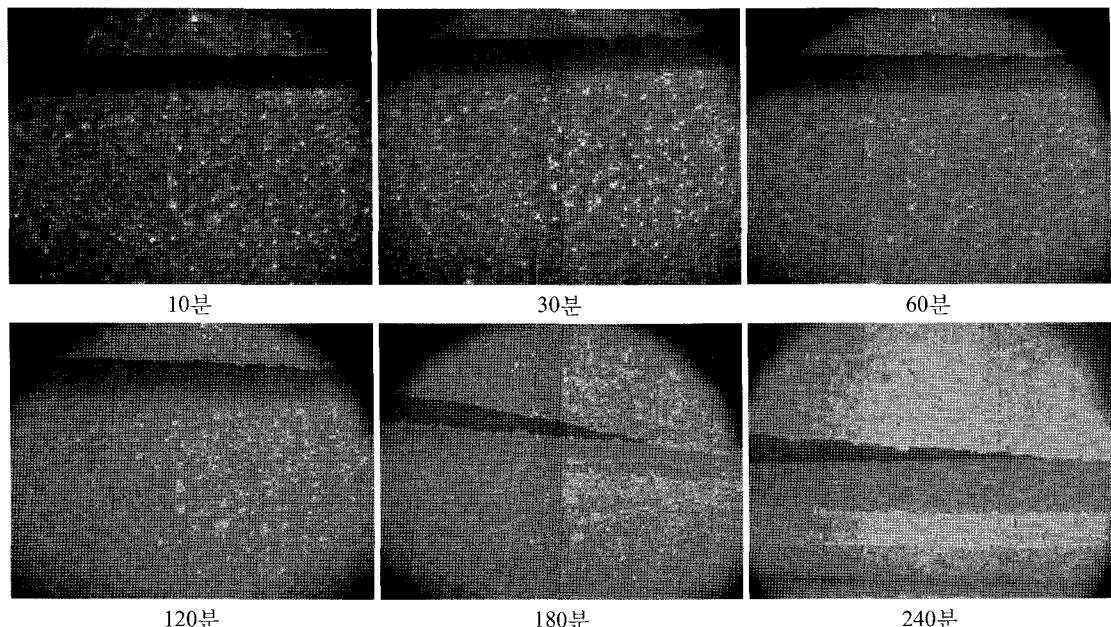


그림 16. 화재 경과시간에 따른 가열면의 변화(case 3)

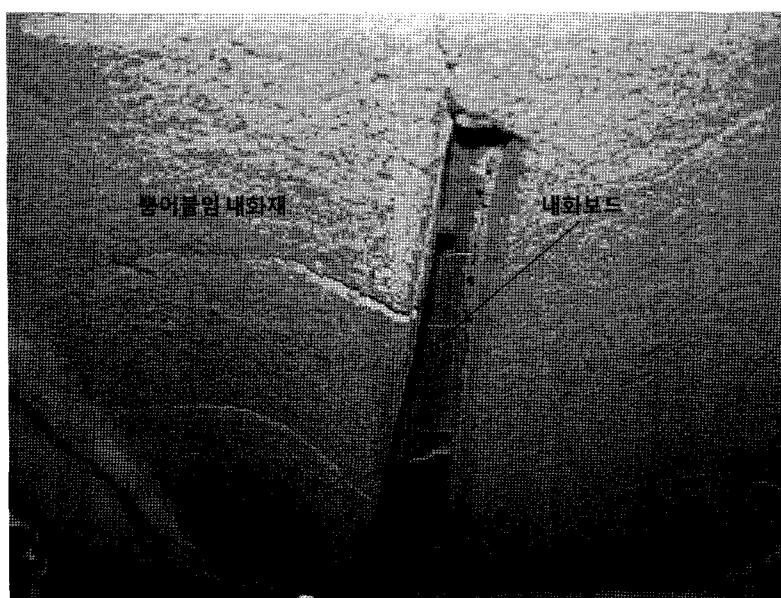


그림 17. 화재실험 후 3번 실험체(case 3) 하부면

부 죠측의 내화보드에서 온도증가가 지속적으로 발생할 정도의 처짐이 발생되었지만 내부의 미네랄 울은 유지되는 수준으로서 Case 2와 비교할 때 상대적으로 화재손상이 작았다는 것을 확인할 수 있었다.

그림 17은 실험 종료후 관찰된 손상된 내화재와 콘크리트 블록실험체의 모습이다. 여기서 뿐어붙임 모르타르 내화재에 처짐이 발생하였고 내부의 내화보드 역시 처짐이 발생하였으나, 미네랄 울을 지지하는 내화보드는 탈락되지 않았음을 확인할 수 있다.

4.3 HC_{inc} 화재 시나리오 조건에서 굴곡철판을 적용한 실험체(case 4)

뿜어붙임 모르타르 내화재의 두께가 28 mm인 그림 6의 상세를 모사한 콘크리트 블록실험체에 대하여 HC_{inc} 화재시나리오 하에서 화재실험을 수행하였다. 화재실험이 완료된 시간(120분)에서 개스킷의 손상을 판단하는 위치인 $t=100$ mm에서의 온도는 1번~3번 열전대 위치에서 각각 62°C, 58°C 및 62°C로 측정되어 ITA(2004)에서 제시하는 화재 시 개스킷의 손상에 대한 가이드라인 기준 온도인 150°C 이하로 모두 나타나 요구되는 내화성능을 확보할 수 있는 것으로 나타났다(그림 18). 가열로의 관찰창을 통해 실시간 촬영한 그림 19에서도 표면 손상 등과 같은 특별한 현상이 발생하지 않았음을 확인할 수 있었다.

그림 20은 화재실험 후에 촬영된 내화재와 콘크리트 블록실험체의 표면이다. 내화재 표면 전반에

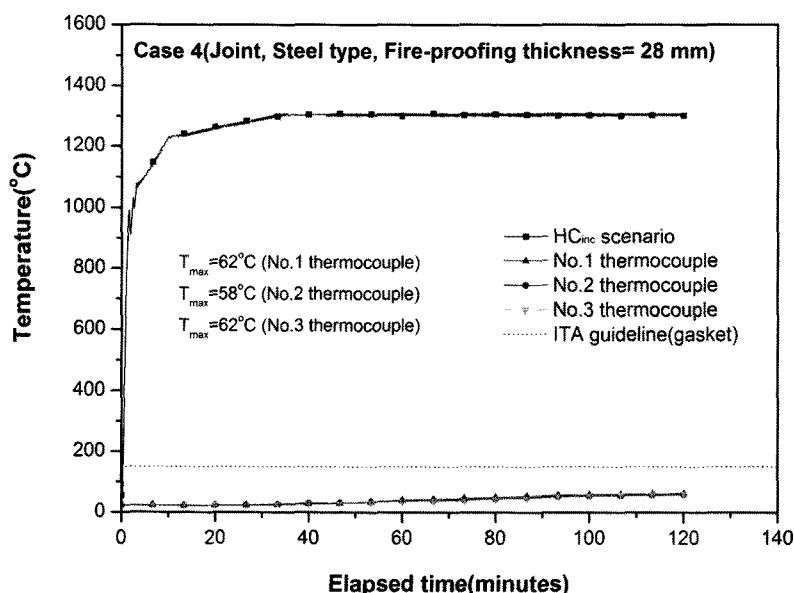


그림 18. 화재경과시간에 따른 4번 실험체(case 4) 내부온도 변화(HC_{inc} 화재시나리오)

걸쳐 망상균열이 발생하였고 최초의 밝은 갈색(베이지색)에서 갈색으로 변색이 되었으나, 전반적으로 내화재 탈락과 같은 실험체의 큰 손상은 관찰되지 않았다.

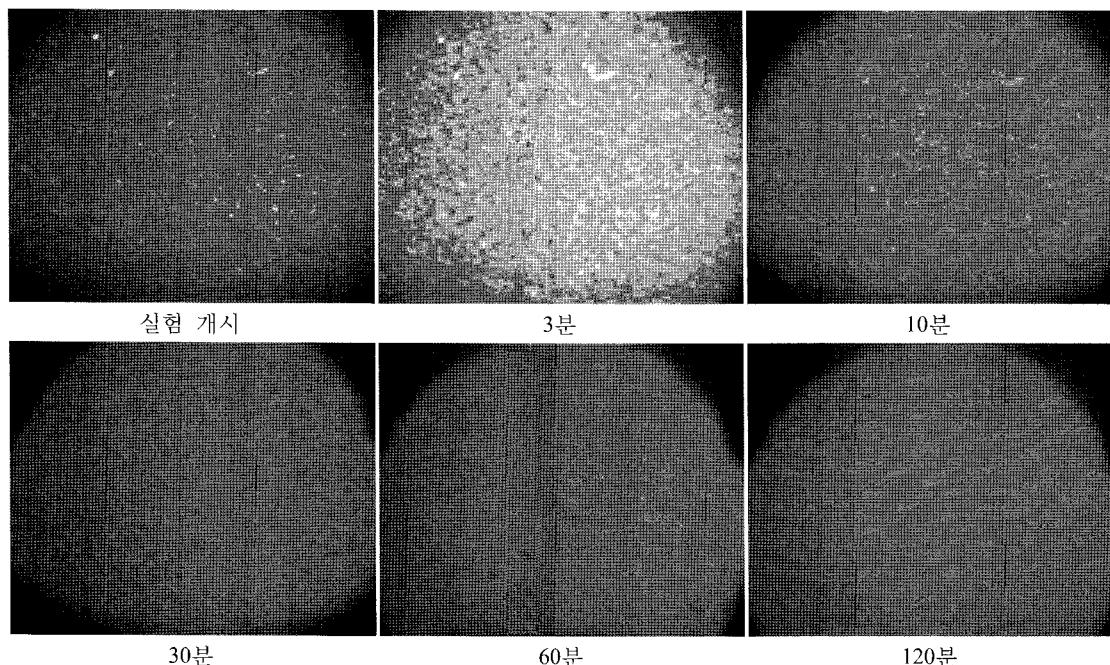


그림 19. 화재 경과시간에 따른 가열면의 변화(case 4)

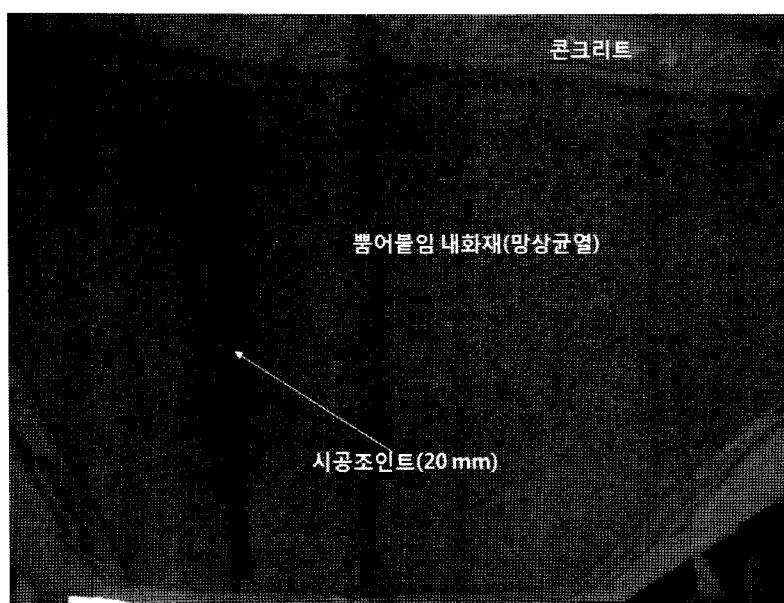


그림 20. 화재실험 후 4번 실험체(case 4) 하부면

4.4 ISO834(4시간) 화재 시나리오 조건에서 굴곡철판을 적용한 실험체(case 5)

喟어붙임 모르타르 내화재의 두께가 28 mm인 그림 6의 상세를 모사한 콘크리트 블록실험체에 대하여 ISO834(4시간) 화재시나리오 하에서 화재실험을 수행하였다. 화재실험이 완료된 시간(240 분)에서 개스킷의 손상을 판단하는 위치인 $t=100$ mm에서의 온도는 1번~3번 열전대 위치에서 각각 67°C, 70°C 및 71°C로 측정되어, ITA(2004)에서 제시하는 화재시 개스킷의 손상에 대한 가이드라인 기준온도인 150°C 이하로 모두 나타나 요구되는 내화성능을 확보할 수 있는 것으로 나타났다 (그림 21). 가열로의 관찰창을 통해 실시간 촬영한 그림 22에서도 표면 손상 등과 같은 특별한 현상이 전혀 발생하지 않았음을 확인할 수 있었다.

그림 23은 실험 후 관찰된 내화재와 콘크리트 블록실험체의 표면으로서, 앞선 Case 4의 경우와 마찬가지로 내화재 표면 전반에 걸쳐 망상균열이 발생하였으나 내화재 탈락과 같은 실험체의 큰 손상은 관찰되지 않았다. 다만 화재 지속시간이 HC_{inc} 화재시나리오에 비해 상대적으로 길었던 관계로 직경 약 2 mm가량의 균열이 실험체의 중앙부 세로방향으로 발생하였음을 관찰하였다. 내화재 표면의 색깔도 Case 4의 경우와 마찬가지로 최초의 밝은 갈색(베이지색)에서 갈색으로 변색됨을 확인하였다.

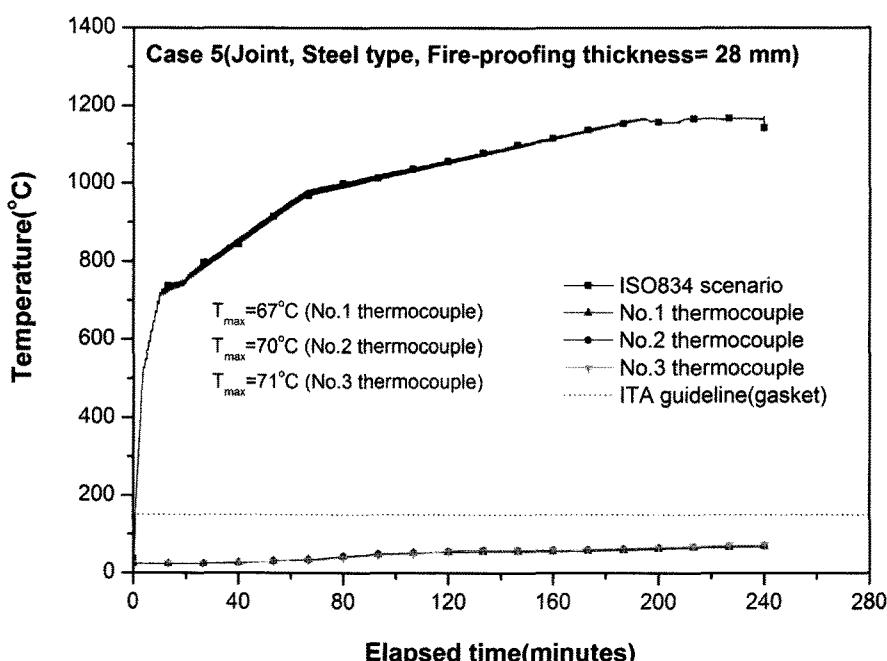


그림 21. 화재경과시간에 따른 5번 실험체(case 5) 내부온도 변화(ISO834 4시간 화재시나리오)

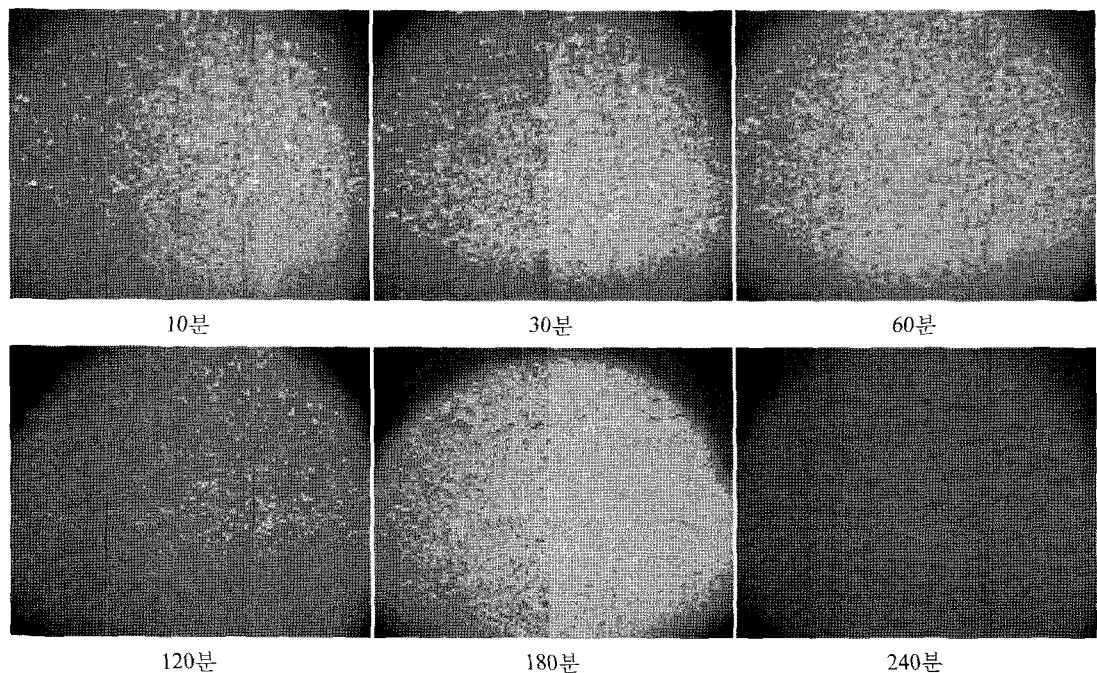


그림 22. 화재 경과시간에 따른 가열면의 변화(case 5)

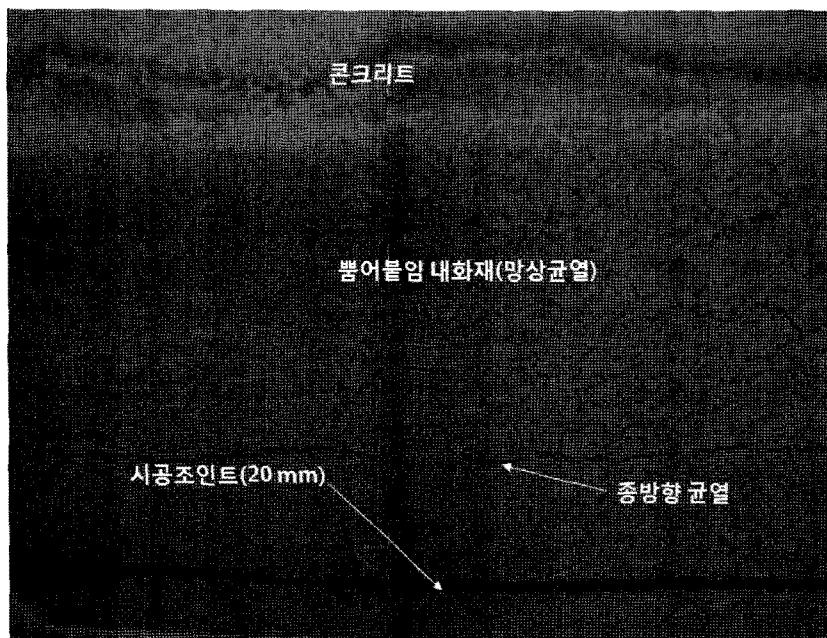


그림 23. 화재실험 후 5번 실험체(case 5) 하부면

5. 결론

본 연구에서는 침매터널의 세그먼트조인트를 대형 화재로부터 보호하기 위한 내화대책들을 검토하고 각각의 적용성을 HC_{inc} 화재시나리오와 ISO834(4시간) 화재시나리오 하에서 실험적으로 파악하였다. 이상의 연구로부터 얻어진 주요 결과들을 요약하면 다음과 같다.

1. 세그먼트조인트의 오메가 실이 설치되는 위치에서는 함체간의 상대 변위를 일부 허용해야 하기 때문에 시공조인트를 설치하여야 하나, 화재실험 결과로부터 시공조인트는 화재발생 시 열 손상에 매우 취약한 지점임을 확인하였으며 시공조인트로부터 내화재의 손상이 진전됨을 피악할 수 있었다.
2. 시공조인트에서 뿐어붙임 방식의 모르타르 내화재를 설치하기 위해서 사용되는 철판은 화재발생시 고온에 의해 쉽게 가열 및 손상됨으로 인해 모르타르 내화재를 틸락시키는 주요 요인임을 화재실험으로부터 확인하였다. 내화재 틸락 이후에도 내부에 설치된 미네랄 울 역시 고온으로 인한 손상이 발생하여 요구되는 내화성능을 확보하지 못하는 것으로 나타났다.
3. 시공조인트에서의 철판 시공을 대체하여 내화보드를 적용한 결과, 함체간의 상대 변위를 허용하기 위한 내화보드의 설치로 인하여 당초 설계조건보다 모르타르 내화재의 두께가 얇아졌고, 이로 인하여 모르타르 내화재와 내화보드의 분리가 발생함에 따라 적용된 화재 시나리오 조건에서 내화성능을 발현하지 못하였다.
4. 최종적으로 굴곡이 있는 철판을 이용하여 모르타르 내화재와의 부착력을 향상시킴과 동시에 철판 굴곡부의 음각부에 모르타르 내화재를 시공하는 대책을 적용한 결과, HC_{inc} 및 ISO834(4시간) 화재 시나리오 조건 모두에서 개스킷의 손상 한계온도인 150°C 이하로 최대 온도가 유지되는 것으로 나타나 본 연구대상인 침매터널에서 요구되는 내화성능을 확보할 수 있는 것으로 나타났다.
5. 이상의 결과로부터, 침매터널에서 사용되는 오메가 실과 같은 지수재를 보호하기 위한 내화대책의 선정 시에 가장 중요한 사항은 화재 발생 시 고온에 의한 시공조인트의 손상을 방지하기 위한 내화설계와 시공조인트에서 발생하기 쉬운 내화재 시공불량의 최소화라는 점을 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 “부산- 거제간 연결도로공사 해저터널현장 침매터널 구조물의 구조안정성 평가 연구”의 일환으로 수행된 것으로서 본 연구를 지원해준 (주)대우건설에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 지케이해사도로주식회사(2008), 침매터널 마무리공 상세도(Heat Insulation Panel, Fire Protection).
2. ITA WG-6 (2004), Guidelines for Structural Fire Resistance for Road Tunnels.
3. TNO (1998), Fire Protection for Tunnels (Part 1: Fire Test Procedure), 1998-CVB-R1161 (rev. 1).