기술기사 3

가덕해저터널 내화시험 및 현장 시공 사례

김 민 철
(주)유신 감리본부 이사
y11108@yooshin.co.kr

1. 서 론

부산-거제간 연결도로는 부산 가덕도와 거제 장목면을 해상으로 연결하는 4차선 도로로서 2010년 12월 14일 성공적으로 개통하였으며, 주항로 구간의 침매터널(가덕해저터널) 3.7km와 예비항로 구간의 2주탑 사장교 및 3주탑 사장교, 접속교, 산악터널등 4.5km로 구성되어 총 연장은 8.2km이다. 이중 가덕해저터널은 가덕도와 중죽도로 연결되는 침매터널로서 대죽도와 중죽도 사이를 매립한 서측갱구부와 가덕도의 동측 갱구부를 포함하고 있다. 침매함체 제원은 26.5m×9.75m×180m(폭×높이×길이)로서 각 함체는 22.5m의 세그먼트 8개로 구성되며, 각 세그먼트는 지수판으로 연결하는 한편 침설조인트는 지나 가스켓(Gina Gasket)과 오메가 씰(Omega Seal)로 연결되어 있다. 침매함은 외부에 별도의 방수처리를 하지 않고 콘크리트 만으로 방수를 기대하는 규모가 큰 콘크리트 구조물이므로 충분한 수밀성을 위하여 특별 조건에 따른 배합설계를 시행하였다.

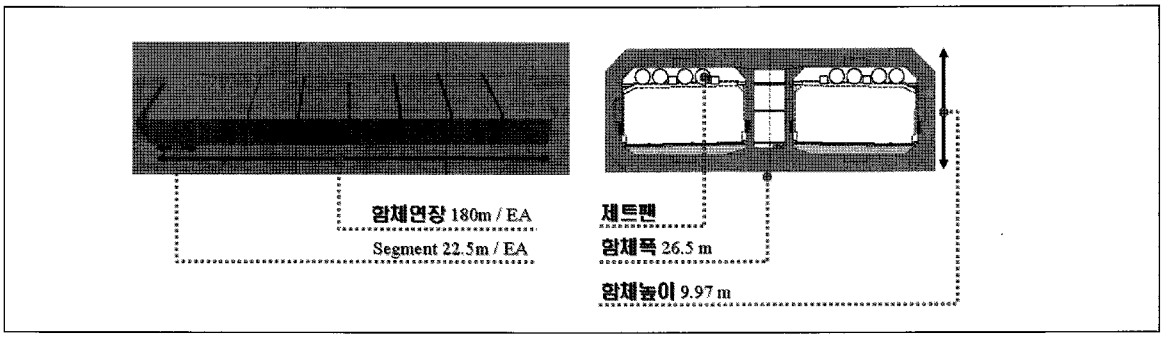


그림 1. 침매함체 제원

표 1. 해외의 대표적 터널 화재 발생 사례

터널명	화재발생년도	복구기간	피해금액(US$)	비 고
Channel tunnel(Euro tunnel)	1996	6달	350백만	구조물손상, 폭렬현상
Mont Blanc tunnel	1999	3년	273백만	천정부 900m 심각한 손상
Tauern tunnel	1999	3년	6백만	천정부 250m 폭렬현상
Cotthard tunnel	2001	2년	25백만	구조물손상, 폭렬현상

이와 같이, 가덕해저터널은 해저에 위치한 대형 콘크리트 구조물로서 외부와 노출된 교량, 댐등 토목구조물과는 상이하게 화재발생시 단 시간내 급격한 온도상승이 야기될 수 있어 피해가 크며, 보수보강이 곤란하여 향후 구조체의 강도저하에 의한 붕괴로 인해 교통망 단절등 큰 피해를 유발할 수 있다. 장대터널 및 해저터널에서의 화재사고는 실제로 표 1과 같이 유럽에서 발생된 사례가 있어 이로 인한 경제적 손실 및 막대한 보수 · 보강비용이 발생되었으며, 이로 인해 선진국에서는 오래전부터 터널 화재안정성에 대한 연구 개발이 진행되어 내화설계기준 및 방향을 제시하고 있다.

우리나라에서는 현재까지 침매터널에 대한 내화설계기준이 전무한 실정이므로 가덕해저터널의 경우, 유럽의 BS 476-4:1794와 ISO 2859-1:1999의 규정을 채택하였으며, 적용된 내화재료의 기준을 규정하여 이에 따르도록 하였다. 또한 침매터널의 화재안정성을 평가하고 최적의 내화 피복재 두께를 산정하기 위하여 한국건설기술연구원에서 내화 시험을 실시하였으며, 시험결과를 반영하여 적정 내화재료, 시공 두께 및 조인트 내화 시공 방법등을 가덕해저터널에 적용하였다. 이에 본 고에서는 내화재 선정 및 소요두께를 결정하기 위한 내화시험 과정 및 결과를 제시하고 아울러 내화재 현장시공 방법에 대해 소개하고자 한다.

2. 가덕해저터널 내화설계 및 시험 기준

2.1 가덕해저터널 내화설계 기준

터널구조물 내화성능의 목적은 터널 화재시 이용자의 안전한 피난과 구조, 화재 진압을 위한 소방대원과 화재 이후 보수작업에 투입되는 작업자의 안전을 동시에 확보하기 위함이다. 따라서 터널 화재시 안전은 인명과 구조물에 대한 안전을 동시에 보장해야 하므로 구조체의 성능을 보호하기 위한 내화설계를 하고 성능에 만족하는 내화대책을 수립하여 적용하도록 한다. 국내 침매터널에 대한 내화규정은 정립되어 있지 않으므로 유럽의 규정(BS 476-4:1794와 ISO 2859-1:1999)을 따르고 있으며, 시방서에서는 내화재료에 대한 요구조건을 제시하고 있다.

또한 내화재 설치시 소요의 내화성능을 확보하기 위하여 내화재료와 콘크리트 구조체와의 부착강도를 일정하게 유지하여야 하고 화재발생시 유출될 수 있는 유독성 가스의 방출량, 내화재의 시공성등을 정립하여야 하므로 시공시 아래와 같이 규정을 준수하여야 한다.

1) 보드 사용시 단부가 세그먼트 조인트 및 침설조인트와 일치하도록 시공해야 하며, 이러한 조인트에서는 겹침을 하거나 조인트 폭 변화를 수용할 수 있도록

표 2. 내화재료 요구 성능 기준

항 목	내화재료의 요구 조건
압축 강도	- 최소 7.5N/mm²
BS 476:4	- 기준에 부합되는 불연소 재료
기 타	- 습윤환경에 대한 내구성을 가질 것 - 내식성을 가질 것 - 표면이 구별가능하고 일정한 색상을 가질 것

기술기사 3

다른 설비를 하여야 한다.

2) 콘크리트 타설전 거푸집에 고정되는 볼트는 물과 양생전 콘크리트에 의한 영향에 대해 저항할 수 있도록 해야 한다.

3) 보드의 고정장치는 철근과 접촉하지 않아야 하며, 이 고정장치는 상시 조건하에서 3KN/m^2의 등분포 Suction하중에 대하여 설계되어야 한다.

4) 조명장치를 위한 브라켓등과 같은 비 부식 고정물등은 보드를 관통하여 콘크리트에 고정하여야 한다.

5) 스프레이 형식의 내화재 사용시, 시공두께가 30mm를 초과하는 경우에는 콘크리트 구조체에 스테인레스 메쉬로 보강하는데 이때 메쉬의 제원은 50×50×1.5mm로서 재질이 ANSI 316 그 이상이어야 한다.

6) 내화재의 최대 허용두께는 40mm를 초과하지 않아야 한다.

7) 보드형식의 내화재를 사용하는 경우, 설치 허용오차는 두께 ±1mm 내외, 길이와 폭 ±2mm 이내, 보드간의 최대 벌어짐은 2mm이다.

2.2 내화시험 적용 기준

현재 전세계적으로 널리 적용되고 있는 터널 및 지하공간 화재 시나리오는 그림 2에 제시한 바와 같이 다양한 기준이 있으며, 설계 또는 시공 단계에서 적절한 터널 및 지하공간 화재 시나리오를 결정한 후, 구조물의 화재 안정성을 평가하고 최적의 내화 피복재 두께를 산정하기 위하여 내화시험을 실시하고 있다. 본 시방서에서는 ISO834 및 HCinc 화재 시나리오를 따르도록 규정하고 있으므로 이 기준에 따라 침매터널 구조 부재의 화재저항성을 평가하고 그에 따른 소요 내화피복재 두께를 산정하였다.

일반적으로 ISO834 화재 시나리오로 알려진 Cellulosic 화재 시나리오는 많은 국가에서 화재 표준으로 채택하고 있으며(예: ISO 834, BS 476, DIN 4102, AS 1530 등), 이 화재 시나리오에서 온도와 시간의 관계는 식 (1) 및 그림 3과 같이 표현된다.

$$T = 20+345\log(8t+1) \quad (1)$$

여기서, T는 온도(℃), 그리고 t는 시간(분)이다.

또한 HC_{inc} 화재 시나리오(수정 Hydrocarbon 화재 시나리오)는 HCM(HydroCarbon Modified curve)라고도 불리며, 기존의 HC 화재 시나리오보다 강력한 화재 시나리오를 프랑스 규정에서 요구함에 따라 개발되었다. HCM과 HC 화재 시나리오의 차이점은 각각의 최대온도가 1,300℃와 1,100℃이며, HCM 화재 시나리오는 RABT와 RWS(Rijkswaterstaat)처럼 초기 가열구배가 커서 콘크리트 구조물에 폭렬과 심각한 손상을 야기할 수 있다는

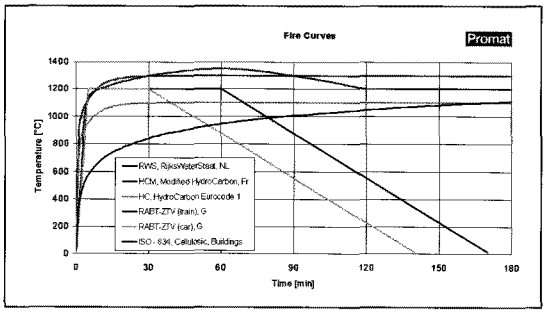


그림 2. 대표적인 터널 및 지하공간 화재 시나리오

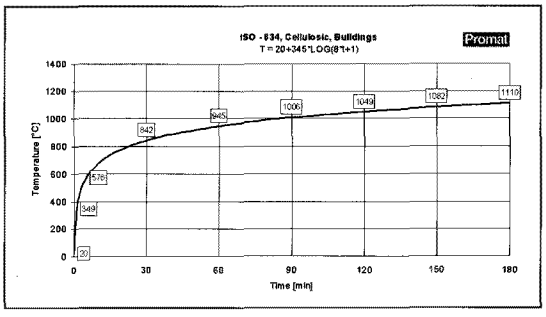


그림 3. ISO 834 화재 시나리오

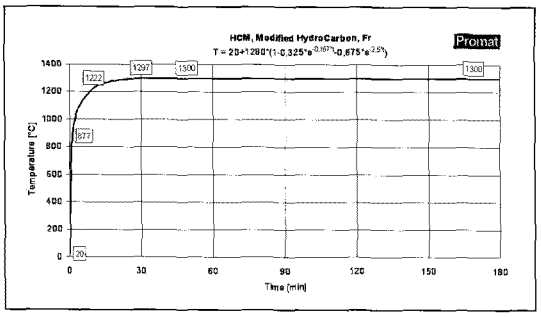


그림 4. 수정 Hydrocarbon(HCM) 화재 시나리오

점이다. HCM 화재 시나리오에서 온도와 시간의 관계는 식 (2) 및 그림 4와 같이 표현된다.

$$T = 20+1280\times(1-0.325e^{-0.167t}-0.675e^{-2.5t}) \qquad (2)$$

여기서, T는 온도(℃), 그리고 t는 시간(분)이다.

3. 가덕해저터널 내화시험 내용 및 결과

3.1 내화시험 내용

침매터널 내부에는 화재시 고온이 발생할 수 있는 화물차가 통행하도록 설계되었기 때문에 화재에 의한 폭렬 및 구조재료의 역학적 특성저하와 같은 손상 위협에 대하여 침매터널의 안정성 확보를 위해 내화재 시공이 필요하다. 내화시험은 내화재료의 선정, 내화재 적정두께의 결정 및 조인트에서의 내화재 설치방법등을 결정하기 위하여 2009.7.20~7.29(1차), 2009.9.8~9.18(2차)에 걸쳐 한국건설기술연구원에서 실시하였으며, 이때 적용된 재료의 내화온도 기준 및 본 시험 참여제품은 표 3,4와 같다.

내화시험은 ①시험시편 제작, ②내화재 시공, ③함수비 측정, ④수평가열로에 설치, ⑤내화시험 실시, ⑥결과분석 순으로 수행되었다. 여기서 내화시험용 수평가열로는 내부 크기 1,100mm(가로)× 700mm(세로)×600mm(높이)로서, ISO834, HCinc뿐만 아니라 다양한 화재 시나리오를 사용자 정의에 따라 구현할 수 있는 모형 또는 실물 화재시험용 장비이며, 특히 네덜란드 TNO(TNO-report, 1998- CVB-R1161)에서 제시하고 있는 터널 화재시험방법에 부합되도록 내화시험을 실시할 수 있는 국내 유일의 시험장비 이다.

표 3. 침매터널에 사용되는 재료의 내화온도 기준

구분	콘크리트	철근	Gina Gasket	비 고
한계온도	380℃	250℃	150℃	

표 4. 내화시험 참여 제품

참가업체	제조사	제품명	국가	비 고
S.F.C	카푸코	Fendolite M2	영국	
노벨콘	그레이스	모노코트 Z-156T	미국	

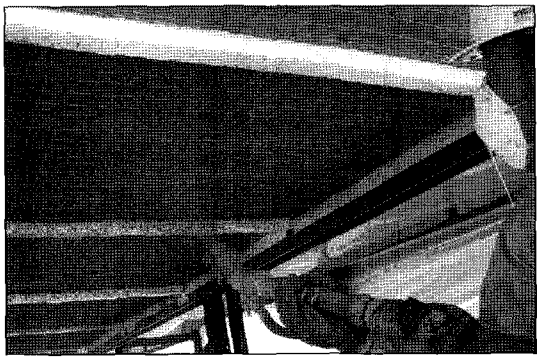


사진 1. 내화재 도포전경(벽체 구조물 시험체)

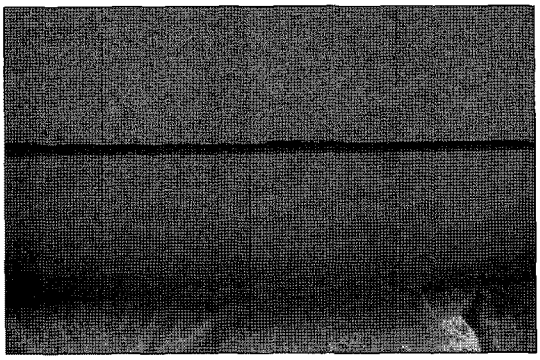


사진 2. 내화재 시공완료 전경(Segment Joint)

기술기사 3

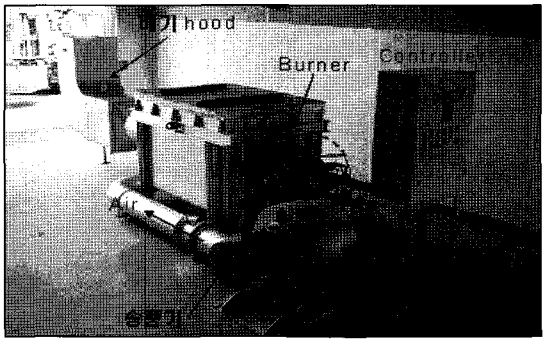


사진 3. 수평가열로 전경

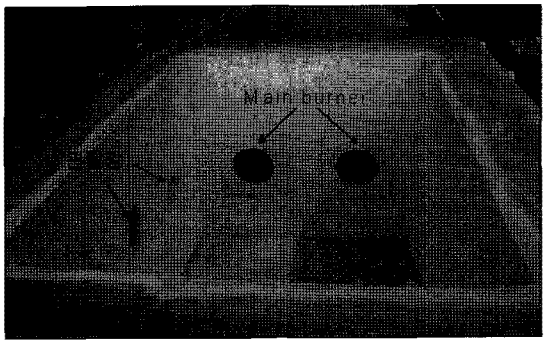


사진 4. 수평가열로 내부 구성 전경

3.2 내화시험 결과

네덜란드 TNO(1998년) 기준에 따르면 화재시험시 내화재의 함수비를 측정하여 5% 미만인 경우에 대해서만 시험을 수행할 것으로 제시하고 있으며, 가덕해저터널 내화시험에 사용된 내화재의 경우 40mm 두께의 깊이보정을 실시하여 시험체 표면의 함수비 변화가 5% 이내인 것으로 확인하였다. 내화시험은 ISO834, HCinc 화재 시나리오에 따라 일정시간 경과후 시험체에 설치된 열전대(thermocouple)에 전달되는 온도를 측정하여 허용기준을 만족하는지 여부를 판단하였다. 내화시험 결과에서 노벨콘사 제품인 모노코트 Z-156T는 기준시간 이내에 콘크리트 벽체의 허용기준온도 380℃를 초과하여 부적합 한 것

표 5. 노벨콘사 벽체 내화시험 결과

구 분	내화 시험 결과	판 정	비 고
t26 벽체 HC_{inc}	t=0 mm에서 50분이후 380℃ 초과	불가	
t32 벽체 HC_{inc}	t=0 mm에서 70분이후 380℃ 초과	불가	
t25 벽체 HC_{inc}	t=0 mm에서 51분이후 380℃ 초과	불가	

표 6. S.F.C사 내화시험 결과

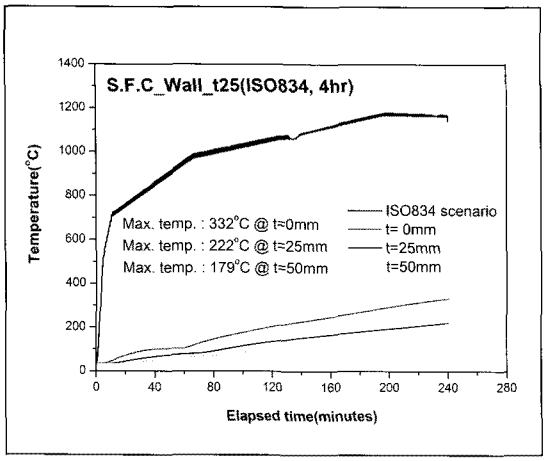
구 분		내화 시험 결과			판 정	비 고
		t=0 mm	t=25 mm	t=50 mm		
벽체	t25 HCinc	311℃	194℃	142℃	적정	
	t35 HCinc	t=0mm에서 70분이후 380℃ 초과			불가	
	t25 ISO834	332℃	222℃	179℃	적정	
	t35 ISO834	237℃	171℃	143℃	적정	
구 분		내화 시험 결과			판 정	비 고
		Left	Center	Right		
조인트	t25 HCinc	Left에서 68분이후 150℃ 초과			불가	세그먼트 조인트 오메가실대상
	t28 board HCinc	Left에서 89분이후 150℃ 초과			불가	
	t28 board ISO834	Left에서 219분이후 150℃ 초과			불가	
	t28 steel HCinc	62℃	58℃	62℃	적정	
	t28 steel ISO834	67℃	70℃	71℃	적정	

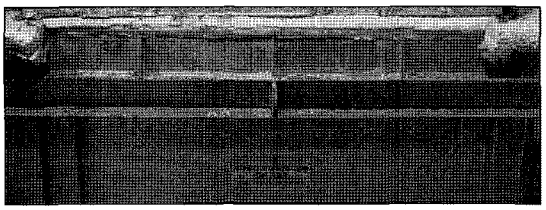
으로 나타났으나 S.F.C사의 Fendolite M2는 벽체를 대상으로 25mm 두께에서 표면온도 332℃로 콘크리트 기준온도 380℃ 이내이고 조인트에서는 스테인레스 메쉬를 사용할 때 최대 71℃로서 기준온도 150℃이내를 만족하는 것으로 확인되었다.

4. 침매터널 내부 내화재 시공

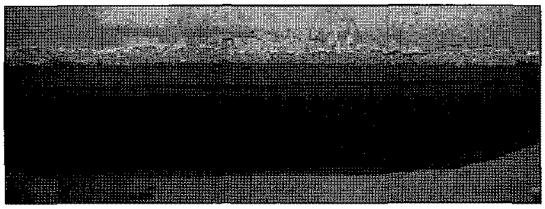
4.1 내화재 시공 개요

부산-거제간 연결도로 침매터널(가덕해저터널)에는 화재 발생시 높은 열로부터 터널내 중요 구조물의 붕괴 및 폭렬(Spalling)로 인한 파손에 대비하고 인명과 막대한 재산 피해를 최소화하기 위하여 내부 벽체 및 조인트부에 내화시험 결과로부터 채택된 S.F.C사의 Fendolite M2를



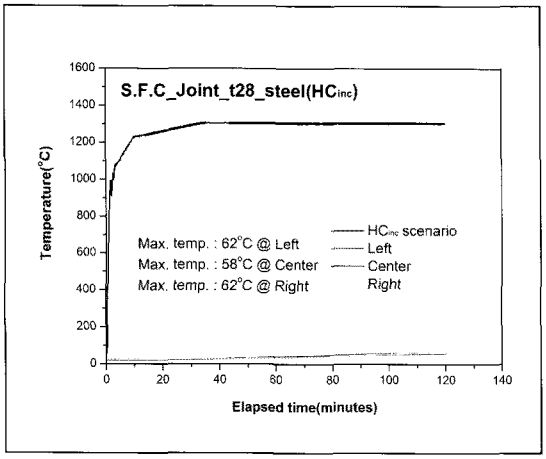


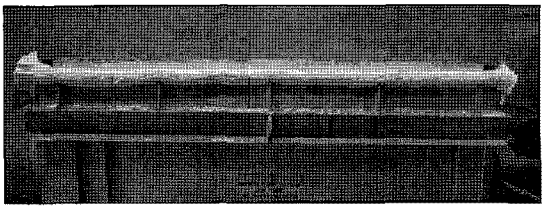
a) 시험전 시험체



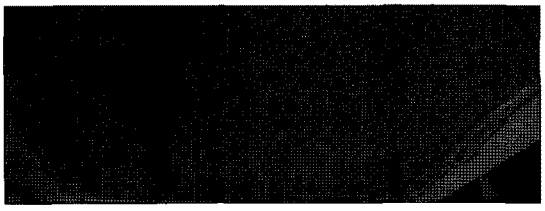
b) 시험후 시험체

그림 5. 시간에 따른 시험체 온도변화(SFC 벽체 t25, ISO834)





a) 시험전 시험체



b) 시험후 시험체

그림 6. 시간에 따른 시험체 온도변화(SFC 조인트 t28, Steel HCinc)

기술기사 3

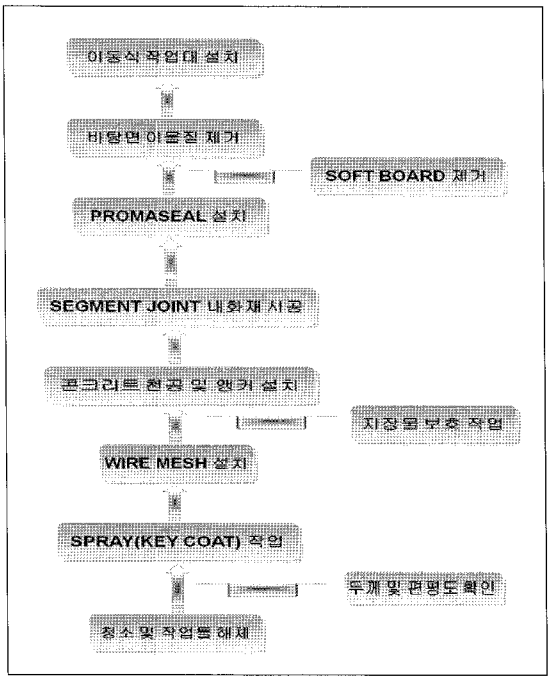


그림 7. 내화재 시공 순서도

28mm두께로 스테인레스 메쉬와 병행하여 시공하였다. 내화재 설치면에는 고압수(350kg/cm²)로 이물질을 세척한 후 침설조인트에는 Promaseal, 세그먼트 조인트에는 미네랄울을 삽입하고 메쉬 시공를 위한 앵커를 미리 설치한다. 그리고 스테인레스 메쉬를 설치하고 Key Coat 도포와 함께 Fendolite M2 Spray작업을 실시한 후 내화재 두께와 편평도가 적정한지 확인하고 작업을 종료하였다.

4.2 내화재 시공 항목별 세부내용

가덕해저터널 내부에 화재 발생시 콘크리트 및 고무 지수재는 내화재에 의해 보호되어야 하므로 벽체, 조인트 및 지붕에 내화재가 고르게 도포되어야 하며, 연석 상단면으로부터 포장면 높이 3.2m까지 시공되는 타일도 내화재의 일부로 고려될 수 있다. 본 현장에서는 스프레이 형식의 내화재를 사용하였으므로 도포 허용오차는 ① 전체의 90%에 해당되는 면적의 두께가 정상적인 요구치의 +10/-0mm이내이고, ② 모든 위치에서의 두께가 정상적인 요구치의 +15/-5mm이내를 만족하여야 한다. 표 7에서는 가덕해저터널 내부 내화재 시공을 항목별로 상세하게 제시하였다.

표 7. 가덕해저터널 내화재 시공 상세

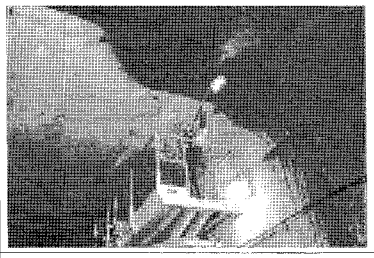
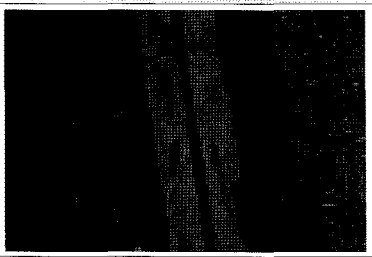
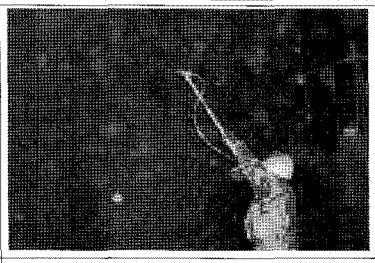
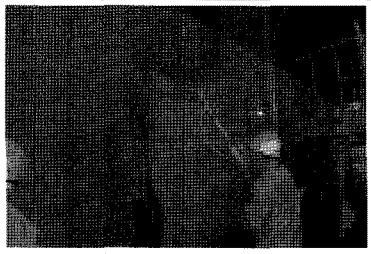
구 분	시공 전경	시공 내용(특기 사항)
함체 표면 세척		- 함체표면 고압세척(압력: 350Bar). - 먼지, CONC 레이턴스등 제거. - 함체표면의 이물질로 인해 내화재 부착력이 떨어지지 않게 골고루 세척.
침설조인트 Seal 삽입		- Joint 크기에 맞는 Seal 삽입. (Seal 삽입후 표면에 돌출 되지 않게 처리) - PROMASEAL은 4가지 종류로서 조인트 Opening 크기에 따라 삽입시공. (100mm×125mm, 75mm×84mm, 50mm×84mm, 50mm×56mm)

표 7. 가덕해저터널 내화재 시공 상세

구 분	시공 전경	시공 내용(특기 사항)
세그먼트 조인트 내화재 시공		① Segment 미네랄울 설치(벽측, 외측등 3면) ② Cover Plate 고정용 Angle설치. ③ Cover Plate 설치. ④ Sealing. (Cover Plate 설치시 Slot 되는 부분의 방향이 비뚫어 지지 않게 고정) ⑤ Cover Plate 홈에 내화재 시공시 Slot되게 내화재를 선 충진.
Stainless Mesh 및 Set Anchor 설치		① 벽체 헌치부를 시작으로 Mesh 부착. ② Mesh를 벽체에 붙인 상태에서 Anchor Hole 천공. (간격은 500mm×500mm) ③ Mesh를 Set Anchor로 고정.
Key Coat Spray		① Key Coat용 자재 혼합(내화재 1Bag당 SBRLatex 1:1 비율로 Mixing, 물 9L : latex 9L). ② Key Coat Spray(Mesh 설치된 벽체에 골고루 Spray).
내화재 Spray 및 미장		① 내화재 혼합(내화재 1Bag당 18~20L 물 배합, Mixing시간 3분 내외). ② Spray.(분사압력은 3.5kg/cm2이상, 도포 두께 28~30mm) ③ 표면 면정리. ④ 표면 미장된 면에 흩뿌림 Spray 시공. ⑤ Joint Cut(내화재 Slot부 절단).

함체 조인트에는 수밀성을 100년간 보장하도록 설계되어 있는 지수재(Gina Gasket과 Omega Seal)가 함체거동에 따른 변위 흡수와 외부 수압을 받을 목적으로 설치되어 있어 화재발생시 가장 우선적으로 보호해야 할 재료이다. 따라서 내화재 시공시 조인트 처리는 침설조인트, 동서갱구부, GALLERY부에 Opening 크기가 다르므로 Type별로 Promaseal을 조인트 공간에 삽입하고 세그먼트 조인트에서는 폭(500mm) 안쪽부터 미네랄울(T=75mm)을 폭에 맞게 잘라 삽입하고 Steel Plate 고정을 위한 스틸 앵글을 양쪽 콘크리트에 천공하여 설치한 후 설치된 앵글 Hole에 Cover Steel Plate Hole을 맞게 넣고 Bolt로 고정하여 설치한다.

5. 결 론

1. 가덕해저터널은 가덕도와 중죽도로 연결되는 침매

기술기사 3

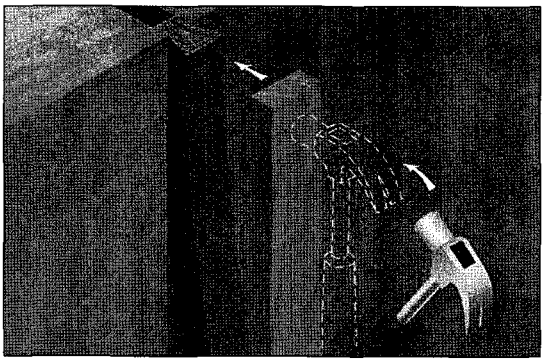


그림 8. Promaseal 시공 개념도

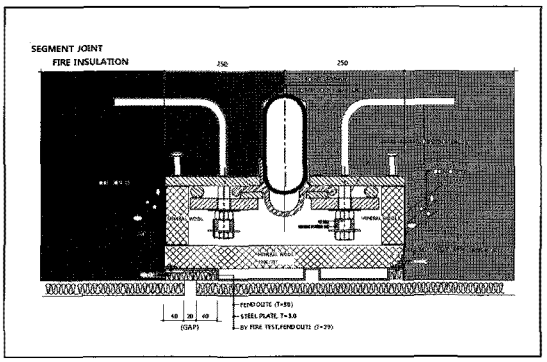


그림 9. 세그먼트 조인트 Cover 설치 개념도

터널로서 침매함 제원은 26.5m×9.75m×180m(폭×높이×길이)이고 각 함체는 22.5m의 세그먼트 8개로 구성되며, 각 세그먼트는 지수재으로 연결하는 한편, 함체간은 Gina Gasket과 Omega Seal로 연결하여 100년간의 수밀성을 보장하였다. 또한 침매함은 외부에 별도의 방수처리를 하지 않고 콘크리트만으로 방수를 기대하는 규모가 큰 콘크리트 구조물이므로 충분한 수밀성을 위하여 특별 조건에 따른 배합설계(Duracrete)를 시행하였다.

2. 가덕해저터널은 해저에 위치한 대형 콘크리트 구조물로서 화재발생시 단 시간내 급격한 온도상승이 야기될 수 있어 피해가 크며, 보수보강이 곤란하여 구조체의 강도저하에 의한 붕괴시 큰 피해를 유발할 수 있으므로 터널 화재시 구조체의 성능을 보호하기 위한 내화설계를 하고 성능에 만족하는 내화 피복재 두께를 산정하기 위하여 ISO834 및 HCinc 화재 시나리오에 따라 내화시험을 실시하였다.
3. 내화시험은 내화재료의 선정, 내화재 적정두께 및 조인트에서의 내화재 설치방법등을 결정하기 위하여 실시하였으며, S.F.C사의 Fendolite M2의 경우, 벽체를 대상으로 25mm 두께로 도포시, 표면온도 332℃로서 콘크리트 기준온도 380℃ 이내이고 조인트에서는 스테인레스 메쉬를 사용할 때 최대 71℃로서 기준온도 150℃이내를 만족하는 것으로 확인되었다.
4. 가덕해저터널 벽체, 지붕 및 조인트에는 화재시험 결과로부터 S.F.C사의 Fendolite M2를 내화재로 선정하였으며, 내화재 설치면을 확보하기 위하여 침설조인트에는 Promaseal, 세그먼트조인트에는 미네랄울을 삽입하고 Steel Plate를 고정한 후 스테인레스 메쉬를 설치하고 Key Coat 도포와 함께 Fendolite M2 Spray 작업을 실시하였다.
5. 가덕해저터널은 내부 화재 발생시 1300℃ 고온에서 2시간 이상을 구조물 손상없이 유지할 수 있는 안전한 터널로서 72개월간 수많은 기술인의 땀과 정성을 담아 2010년 12월 14일 성공적으로 개통하여 운영중으로 국제 특허 3개와 5대 세계신기록을 보유한 토목공학의 신기원으로 자리매김할 것이다.

[참고문헌]

1. 이영재, 김흥열, 신현준, 김형준(2008) "침매터널 내화설계에 관한 조사 분석적 연구", 한국소방학회, 추계학술 발표회 논문집
2. 최순욱, 장수호, 박태환, 조봉현(2009) "ISO834(4시간) 화재이력곡선에서의 침매터널 내화재 성능평가", 대한토목학회 논문집
3. GK Fixed Link Co. Ltd(2006) : Busan-Geoje Fixed Link 실시설계 공사시방서(11단계)
4. ITA WG-6(2004), Guidelines for Structural Fire Resistance for Road Tunnels
5. TNO(1998), Fire Protection for Tunnels(Part1:Fire Test Procedure). 1998-CVB-R1161(Rev.1)