

부산~거제간 연결도로 침매터널 설계

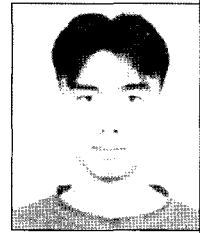
Design of the Busan-Geoje Fixed Link Project Immersed Tunnel



구 임 식*



김 창 환**



장 영***

*(주)대우건설 GK시공사업단장
 **(주)대우건설 GK설계팀 설계팀장
 ***(주)대우건설 GK설계팀 대리

1. 서 론

부산~거제간 연결도로 건설공사는 경상남도 거제시 장목면(거제도)에서 부산시 강서구 천성동(가덕도)를 연결하는 길이 8.2km의 사장교와 침매터널로 구성된 국가지원 지방도 58호선의 연장으로서, BTO(Build, Transfer & Operate)방식으로 추진하는 민간투자사업이다. 동쪽으로는 최근 개통된 대구~부산간 고속도로와 연결되고, 서쪽으로는 대전~통영간 고속도로와 연결되어 거제도를 기준으로 남해안을 U-Type으로 연결하는 교통로의 중앙에 위치하여 국내 제1의 항만도시 부산과 관광의 메카로 도약하는 거제를 연결하여 향후 교통 혈관으로서의 중추적 역할을 수행하게 될 전망이다. 부산광역시와 경상남도를 주무관청으로, 사업시행자는 GK해상도로(주)이며, 시공사는 (주)대우건설의 6개사이다. 특히 침매터널 방식에 의한 도로건설은 국내에서 최초로 적용되는 공법이며, 또한 전세계적으로도 깊은 수심과 외해 조건 등으로 인하여 높은 기술수준을 요하는 고난이도 공사로 세계적인 주목을 받고 있다.

2. 사업 개요

본 사업은 부산항 신항, 진해항과 마산항의 선박 진입

수로인 가덕수도를 횡단하게 된다. 따라서 많은 선박통행이 예상되는 주 항로구간(가덕도~중죽도)은 침매터널로 설계하여 예상되는 대규모 통항량에 대한 항로장애 요소를 제거하였으며, 기타 주 예비항로(중죽도~저도)는 2주탑 사장교로 부 예비항로(저도~거제도)는 3주탑 사장교로 구성된다.

위와 같이 본 사업은 지역적 특성, 환경적 요인, 경제성, 기술적인 문제 등을 종합적으로 검토/반영하여 계획 되었고, 구조적 안전성 측면으로 100년 빈도의 파랑조건 및 인접 양산 단층의 심도 15km지점에서 규모 6.0의 지진발생 조건이 반영되었으며, 시설물 사용년한을 100년으로 설계를 수행하

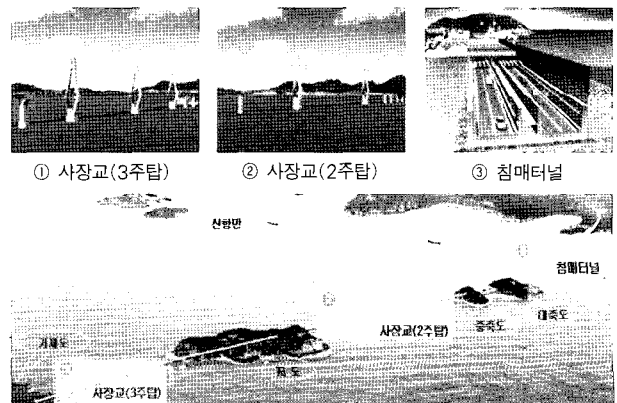


그림 1 사업개요도

였다. 특히 국내 최초로 LRFD(Load and Resistance Factor Design) 설계법을 적용하였으며, 설계와 시공을 병행하여 사업기간을 단축할 수 있는 Fast Track방법의 사업추진 방식을 적용하는 한편, 별도 제작현장(통영)에서 침매합체, 사장교 Caisson 및 교량상부구조물 등 주요구조물을 제작한 후 해상운반을 통해 현장에 이동/설치하는 공사 특성을 감안, 공사초기부터 PMIS(Project Management Information System) 기법을 적용하여 타 현장을 포함한 개별 구성원들이 전반적인 공정 및 공종별 특기사항을 공유함으로써 분리된 각 조직 및 구성원들 간의 원활한 정보교환과 의사소통을 통해 효율적인 공사운영을 도모하는 등 사업수행 전반에 걸쳐 진보된 방식을 도입하였다.

3. 침매터널 개요

침매터널은 180m의 18개 콘크리트 합체로 구성되어있으며, 각 합체는 약 22.5m의 세그먼트로 활절연결되어 있다. 평균해수면을 기준으로 최저 해저면의 깊이는 37m이며, 합체설치 후 합체 최저면의 깊이는 48m가 된다. 현장으로부터 북쪽으로 5km 정도 떨어진 곳에 부산항 신항이 위치하고 있으며 개항 후 많은 선박운항이 예상되며 이를 위해 주항로구간은 18m이상의 최소수심을 확보하고 있다.

침매터널구간의 최대 종단경사는 5%로 동측갱구부(가덕도구간)에 있으며, 서측갱구부(중죽도구간)의 종단경사는 4.75%이다. 또한 양측 갱구부들은 합체가 해지면 위로 돌출되는 부분으로 파랑의 영향을 직접 받는 구간이 되기 때문에 타 구간에 비해 설계에 세심한 고려가 필요하였다.

서측 중죽도 인공섬은 인공 호안으로 안전성을 확보하고 있으며, 남측호안에 적용되는 최대 TTP 중량은 72ton이며, 월파에 대한 호안 천단고는 EL(+15.5m)를 확보하여 내부 갱구부구조물을 보호하고 있다. 주요구조물로는 교량과 침매터널을 연결하기 위하여 400m의 Rock tunnel, 85m의 램프구조 및 170m의 개착식터널로 구성이 되어있다. 또한 마지막 합체인 18번 합체와 연결되는 개착식 터널 시작부의 45m에 서측환기탑구조물이 위치한다. 동측 가덕도구간의 인공섬은 최대 TTP 중량 50ton으로 호안의 안전성을 확보하고 있으며, 월파에 대한 호안 천단고는 EL(+14.5m)를 확보하고 있다. 갱구부 내부의 주요구조물로는 지상도로와 연결하기 위한 170m의 개착식터널이 있다.

침매터널은 Dry Dock에서 프리캐스트로 제작되며, 부력을 이용하여 운송, 침설 후 고무개스킷의 수압접합을 통해 연결, 시공되는 일련의 반복적인 시공과정을 통해 전구간의 침매 터널이 완성된다.

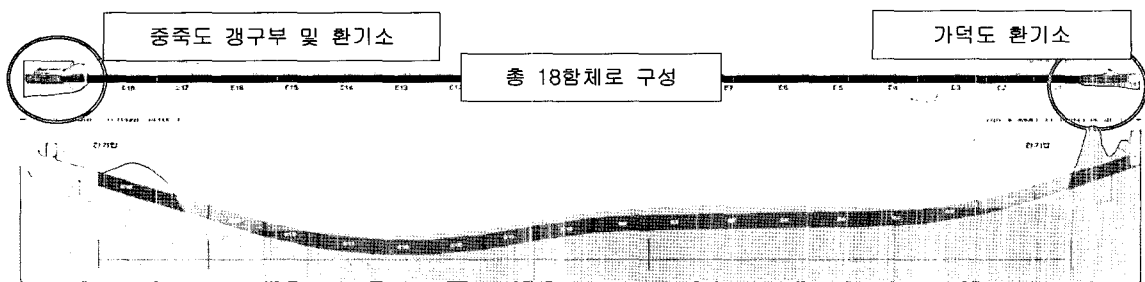


그림 2 침매터널 종단면도

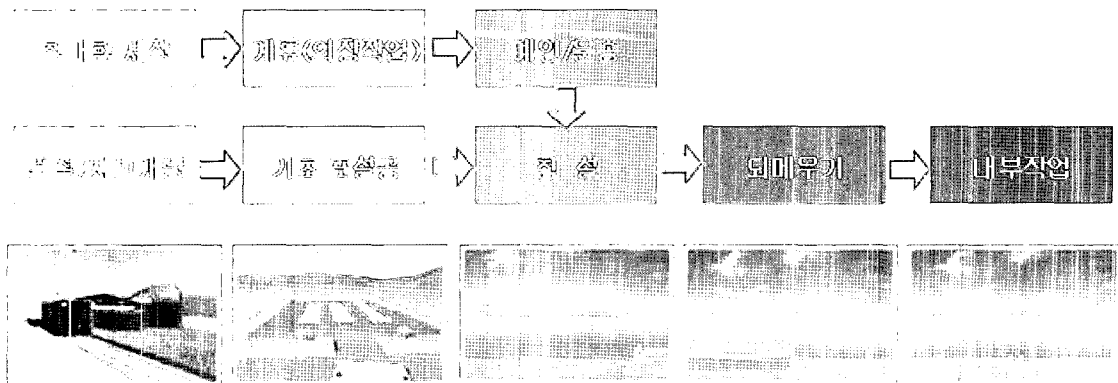


그림 3 침매터널 시공순서도

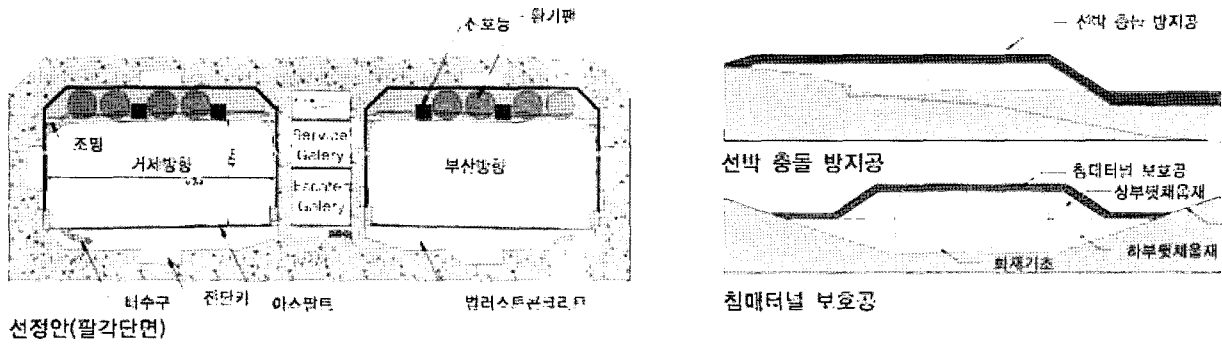


그림 4 침매터널 표준단면도

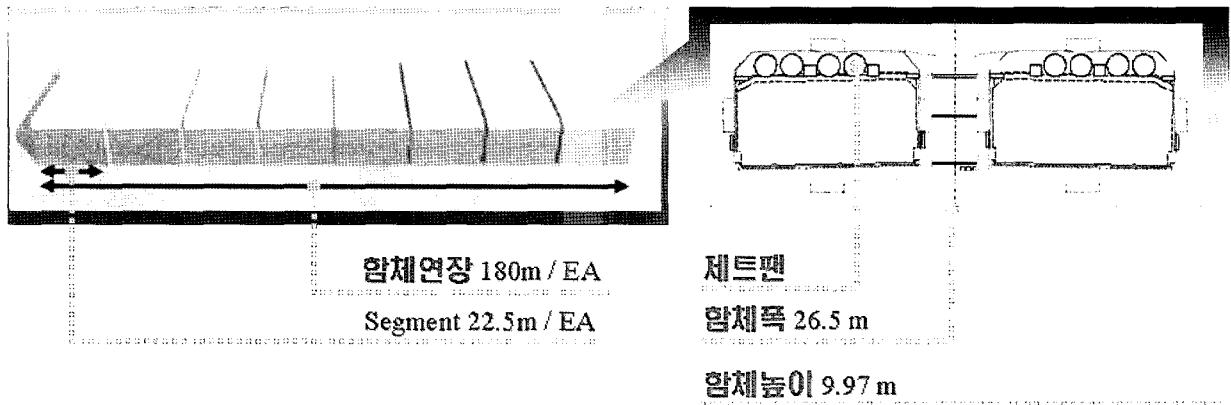


그림 5 침매터널 제원

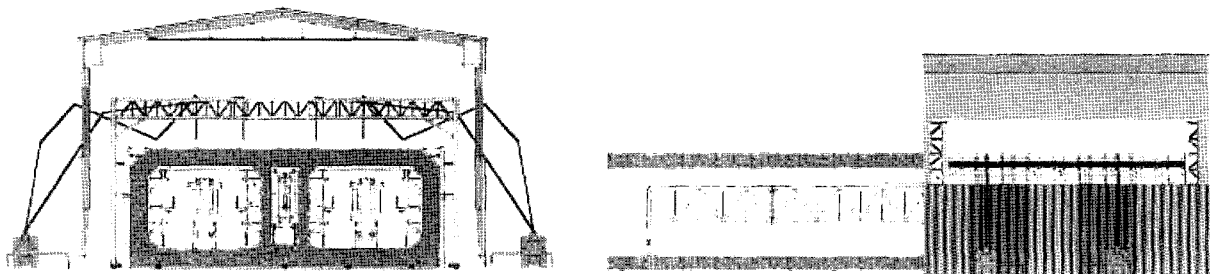


그림 6 침매터널 타설방법(일괄타설)

3.1 구조물 제원

터널은 폭 3.5m의 2개의 차선과 2.0m의 비상차도로 구성된 2개의 차량통행용 Tube로 구성이 되어있다. 확폭 구간인 오르막 차로구간에서는 노면측의 비상차도가 3.5m로 확폭된다. 중앙에 위치한 갤러리의 폭은 2.5m이며 제연통로, Service Gallery와 피난구로 구성된다. 합체단면은 폭 26.46m와 높이 9.97m로 되어 있으며, 내부벽체 및 상/하부슬래브의 두께는 1.33m와 내부벽체의 두께는 0.58m이다.

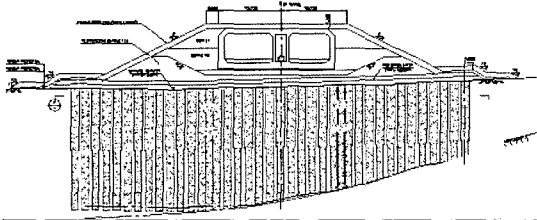
22.5m 한 개의 세그먼트는 수화열에 의한 초기발생 관통균열을 방지하기 위해 시공이음을 두지 않는 30시

간정도의 연속 타설로 제작이 되며, 내공단면적을 결정하는 중요한 요소인 소요환기단면적은 공기속도 10m/s를 고려하여 58m²이다.

3.2 기초처리

침매터널구간은 합체의 종단선형을 따라 다양한 기초처리 방법이 적용되었다. 서측인공섬 내부에 위치한 갱구부구조물(개착식터널)은 슬래브저면에 사석채움을 적용하였으며, 합체의 위치가 해저면상부에 위치한 서측지반처리구간은 평균개랑심도 20m, 개랑율 40~61%, 직경 2.0m의 SCP(Sand Compaction Pile)로 지반보강이 되며, 그 위에 해저사석제방

개량공법 SCP (Sand Compaction Pile)
 개량심도 평균 20 m
 개량율 40 ~ 61%



개량공법 CDM (Cement Deep Mixing)
 개량심도 평균 13 m
 개량율 32 ~ 51%

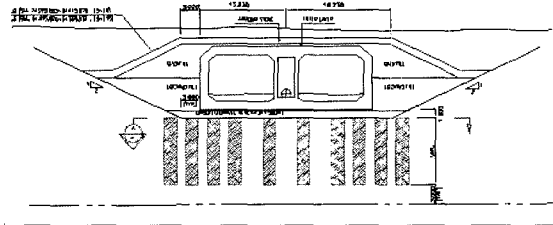


그림 7 침매터널 기초처리

을 쌓아 함체가 설치된다. 주 항로구간은 평균개량심도 13m, 개량율 32~51%, 제원 $\Phi 1.0 \times 4EA = 1.9m \times 1.9m$ 의 CDM (Cement Deep Mixing) 방법을 적용한 연약지반처리를 수행하며, 동측인공섬 부근의 암사면구간의 기초처리방법으로는 완전치환을 적용하였다.

4. 설계조건

다음 기술사항은 본 침매터널을 설계하기위한 주요설계조건을 서술한 것이다.

4.1 정수압

함체 바닥 최저점은 평균해수면을 기준으로 48m위치하기 때문에 수압은 침매터널설계, 특히 횡방향 구조물 설계의 중요한 하중조건이 된다. 수압은 앞으로 언급될 다른 주요하중과 함께 적절한 하중조합으로 고려되어 설계에 반영되며, 100년 빈도에서 최대압력은 수심 약 58m의 압력과 동등하다. 또한, 지구온난화의 영향을 고려하여 0.4m의 해수면 상승을 고려하였다. 해수의 밀도는 본 사업구간에 대한 통계적 자료를 근거하여 각 하중단계별로 아래 표 1과 같이 적용한다.

표 1 하중단계별 해수밀도

부양 및 운송시	최소값
부력에 대한 안정성 검토시	최대값
구조계산시	최대값

4.2 태풍 및 Swell

남해안 일대는 매년 다수의 태풍이 지나가고 있으며, 본 사업구간도 태풍의 영향을 직접적으로 받을 수 있다. 외해에 노출된 상황으로 함체구조 및 갯구부구조물은 태풍의 영향에 직접적으로 노출되어 있기 때문에 기존의 항만구

조물은 50년 빈도설계파랑을 조건으로 설계하는데 반해, 본 사업구간은 구조물의 중요도와 안정성 확보를 위하여 재현기간 100년 빈도 파랑을 대상으로 설계를 실시하였다. 재현 주기별 남쪽으로부터의 심해파랑은 표 2이다. 100년 설계빈도 설계파에 대하여 피복재 및 기타 구조물의 전체 피해율은 2%이내이며, 침매터널로의 월파 및 해수 유입은 허용하지 않았다. 또한 극한 상황을 대비하여 빈도해석을 통하여 산출된 10,000년 빈도 조위 및 파랑조건을 대상으로 안정성 및 호안 월파 특성 등도 검토하였다.

표 2 재현 주기별 심해파

파 향	심해파 유의파고(m)		
	10년	100년	10,000년
SSE	7.4	9.3	13.1
S	8.0	10.9	16.6
SSW	7.0	10.2	16.6

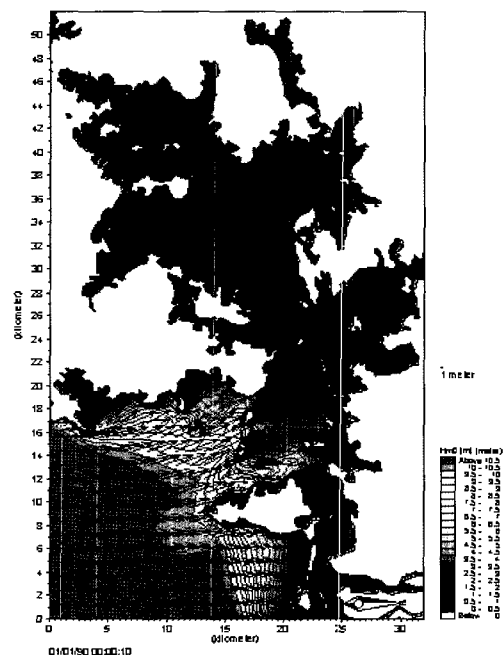


그림 8 100년 빈도 설계파랑조건

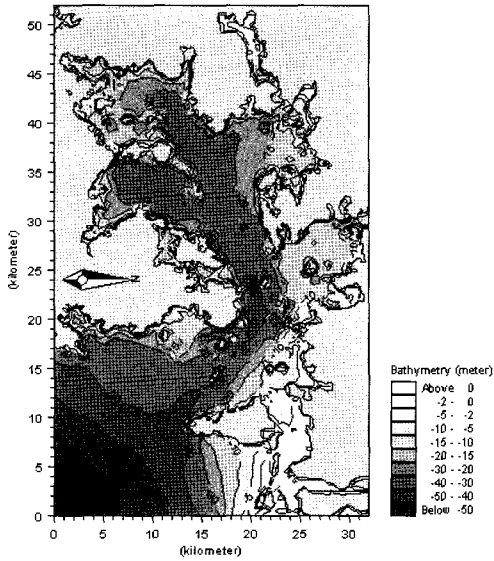


그림 9 수심자료

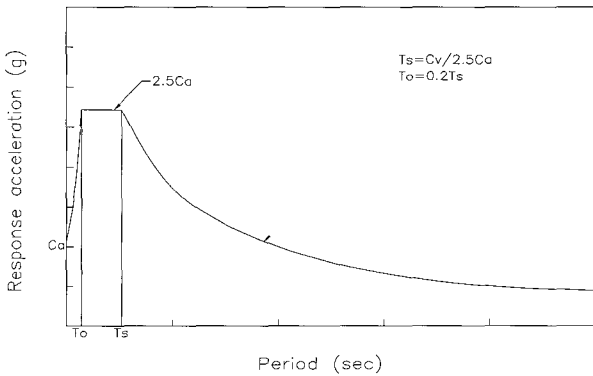


그림 10 표준 설계응답 스펙트럼

4.3 지진

본 프로젝트의 설계기준에 명시된 설계최대지반가속도 수준은 다른 지진활성단층(일본, 캘리포니아)과 비교할 때 상대적으로 작은 지진하중을 나타낸다. 본 프로젝트에서는 두 가지의 지진 위험수준을 고려한다. 이 두 가지 지진 위험 수준은 Operating Design Earthquake(ODE)와 Maximum Design Earthquake(MDE)이며 각각에 해당되는 설계 최대지반 가속은 각각 0.062g와 0.154g이다. 상대적으로 작은 지진하중임에도 불구하고 구조물의 길이, 터널 종방향 특히 터널의 끝단부에서의 지반조건의 현격한 변화 때문에 지반운동의 변화량을 무시할 수 없다. 이는 본 프로젝트에 적용된 세그멘탈 분절 침매터널설계개념에서 특히 중요하며, 지진하중, 온도변화, 부등 침하 등의 결과로써 나타나는 침설조인트, 세그먼트 조인트에서 발생하는 가능한 변위에

대해 검토하는 것이 본 침매터널설계의 핵심이라 할 수 있다. ODE조건에서 구조물은 탄성거동을 하도록 설계되며, MDE조건에 대해서는 지진이 발생한 후에 구조물에 대한 보수공사 없이 비상차량에 대한 제한된 통행이 허용되어야 한다. 본 침매터널 구조물은 국내기준에 따라 구조물의 중요도에 대하여 내진 1등급으로 분류된다. 이런 기준에 의해 MDE 조건에서의 추정 재현기간은 1000년이며, ODE조건에서 추정 재현기간은 100년이다.

이런 위험수준을 기본으로 다음과 같은 조건들을 만족시켜야 한다.

- 모든 조인트들에서 차수가 확보되어야 한다.
- 철근의 응력이 항복응력을 초과하지 않아야 한다.

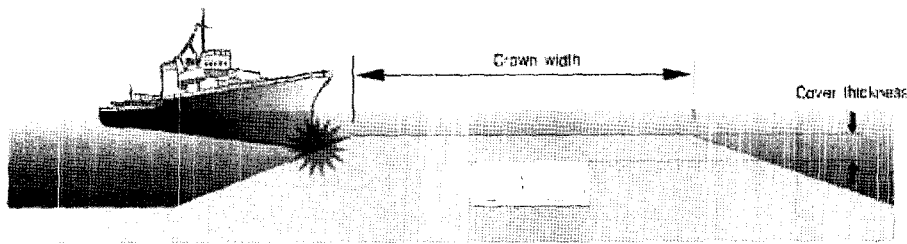
이를 기본으로 본 사업구간의 설계기준에서는 MDE조건에 대하여 암반상의 수평 설계최대지반가속도(PGA)로 0.154g를 적용한 설계지진하중을 고려하였으며, 연직지반가속도를 수평설계지반가속도의 2/3를 고려하여 설계하였다. 또한 종방향으로 합체위치별 기초처리방법이 다르기 때문에 이에 따른 지반의 특성이 상이하여 터널을 따르는 지반조건의 변화뿐만 아니라 지진파의 전달속도 및 크기를 고려한 서로 다른 18개의 합체별 지진하중 변위시간이력을 고려하여 내진설계를 수행하였다.

4.4 선박충돌하중

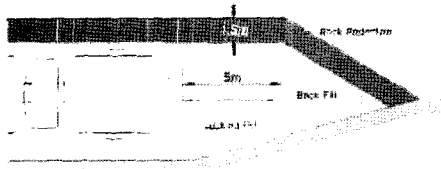
터널구조에 영향을 미치는 선박의 충돌 및 좌초빈도를 결정하기 위해 위험도 분석이 수행되었으며, 충돌하중을 고려하기 위한 선박의 크기는 충돌하중이 1년에 10^{-4} 회 미만으로 발생할 확률을 갖는 것으로 하였다. 이 위험분석은 2020년에 터널을 가로질러 항해하는 해상교통량을 기준으로 결정된 것이다.

선박의 좌초에 대해서는 해저 원지반 상부에 위치한 터널부, 환기소, 접근램프가 주요 검토부가 되며, 선박의 좌초로 인한 구조적 손상을 방지하기 위하여 보호/보강되어야 한다. 충돌에 대한 하중영향은 좌초나 충돌의 역학적 모델링을 통해 수치해석적으로 검토되었다.

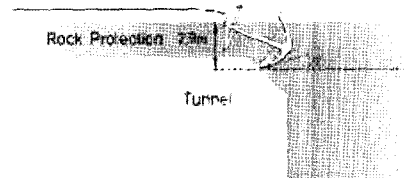
- 선박의 좌초 또는 침몰에 대한 보호
 - 선박좌초하중 : 31.6MN=3160ton(합체 종방향 : 22.7m, 수심 9m이상의 합체에 대해)
 - 선박침몰하중 : 수평하중=36MN=3600ton, 연직하중=30MN=3000ton, 5m×5m
- 앵커의 낙하나 끌림에 대한 보호
 - 앵커 끌림하중 : 4.5MN = 450ton, 작용면적 : 0.1m×0.1m
 - 앵커 낙하하중 : 앵커하중 11.1ton, 낙하속도 : 9m/s, 수심 10m이상의 합체에 대해



선박충돌 터널보호공 형상



침매터널 입반 보호공 형상



터널 무각부의 및 충격하중

그림 11 선박충돌 및 앵커하중에 대한 보호

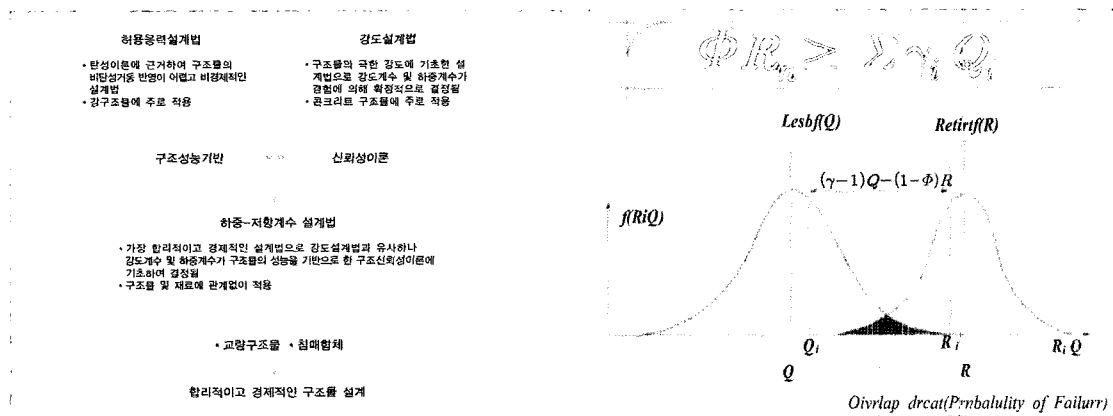


그림 12 LRFD 개요

선박침몰에 대해서는 아래 2가지 형태의 설계시나리오를 가정하여 결정되었다.

- 선박이 터널 축에 직각방향으로 해저면이나 되메우기 상단에 침몰한 경우로 터널 전폭에 걸쳐 정적하중을 균등하게 작용시킨다.
- 침몰선의 선수나 선미와 같이 선박의 끝단이 충돌하는 경우로 터널 상부슬래브에 집중하중을 작용시킨다.

5. 설계기준

5.1 설계기준과 규정

침매터널 설계기준은 AASHTO LRFD에 근간을 두고 있다. 하지만 AASHTO LRFD는 영구적으로 수압이 크게 작용하는 침매터널구조설계에 필요한 조건을 모두 규정하지 않고 있으며, 특히 방수와 터널의 내구성은 침매터널에 있어 중요한 사항이기 때문에 AASHTO LRFD의 콘크리

트 설계기준을 적절히 변경하였다. 주요변경 사항은 방수와 내구성 설계, 균열 폭 계산 및 허용치, 온도 영향과 같은 부가변형, 하중 분배 시 단면균열의 영향 부분으로 이에 대한 보안을 위해 EC2의 관련규정으로 수정되었다.

기본적으로 터널은 임시구조물에 대해 10년 빈도 발생 하중에 대해 설계 하였으며, Service와 Strength조건에 대해서는 100년 빈도 발생하중을 고려하였고, 극한 조건에 대해서는 10,000년 빈도를 적용하였다.

5.2 콘크리트 설계

침매함의 콘크리트 외부벽체와 슬래브는 해수에 대한 유일한 방호책이며 이에 대한 안전성을 확보하기 위해 엄격한 설계기준이 적용되었다. 기본적으로 콘크리트 배합설계 및 현장의 콘크리트 및 골재에 대한 품질관리에 중점을 두고 있으며, 콘크리트는 DuraCrete라는 내구성설계기준에 따라 제시된 배합의 필요조건에 만족하도록 대우기술연구

소에서 배합설계 되었다. 설계기준측면에서는 사용성 한계 상태의 하중조합에 대해 최대 허용 가능한 균열폭을 0.2mm로 규정하고 있으며 방수벽역할을 하는 외부벽체 및 상하부슬래브의 경우 관통균열에 대한 가능성을 배제하도록 콘크리트의 압축응력깊이를 최소 200mm이상 또는 부재두께의 25%이상이 확보되도록 설계를 수행하였다.

5.3 내구성설계

부산~거제간 연결도로의 콘크리트 구조물의 내구성 설계는 국내에서는 최초로 유럽을 중심으로 여러 분야의 전문가가 참여, 구조물의 성능을 기반으로 실제 구조물의 거동 및 실험데이터를 사용하여 개발된 최신 설계법인 DuraCrete에 의하여 수행되었다. DuraCrete에서는 염화물 침투와 콘크리트의 탄산화 등 각종 열화인자 등을 고려하여, 100년의 설계수명동안 90%의 확률로 초기부식발생을 방지할 수 있는 콘크리트의 최소피복두께(공칭 피복두께)와 내구성에 대한 가

표 3 침매터널 내구성 조건

노출등급 분 류	침매터널	
	최대염화물확산계수 ($10^{-12} \text{m}^2/\text{sec}$)	최소피복두께 (mm)
대기구간	6.0	75
수중구간	6.0	75

Submerged zone

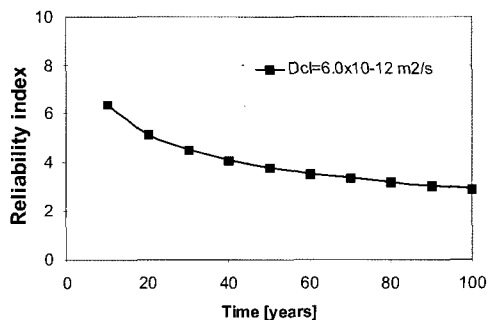


그림 13 신뢰성 지수 평가(수중구간)

장 중요한 변수 중 하나인 최대 염화물확산계수를 제시한다.

DuraCrete의 설계개념은 다음과 같다. 내구성 설계의 기본적인 목표는 염화물 침투 및 탄산화 등의 열화메카니즘에 대하여 목표내구수명동안 구조물이 특별한 유지관리 없이 일상적인 유지관리 하에서 충분한 안전도를 확보하는데 있으며, 기본적인 설계개념은 콘크리트 구조설계기준인 하중저항계수설계법(LRFD)과 일관성을 같이하고 있다. 이러한 개념하에 특정사용기간 즉, 목표내구수명 동안에 구조물의 각종 열화인자에 저항하도록 재료배합 및 구조상세를 결정하고 이를 적용하는 절차로 수행된다. 최근에 개발된 DuraCrete를 비롯한 최신의 내구성 설계법은 지금까지 대부분의 국가에서 사용하고 있는 규정과 다른 구조신뢰성이론에 기초한 확률적 사용연한설계 접근방법을 사용하고 있다.

또한 DuraCrete 설계로부터 산정된 내구연한의 실제적 평가를 위해 함체내부에 72개의 부식감지시스템을 설치하여 모니터링을 수행하도록 계획하였다.

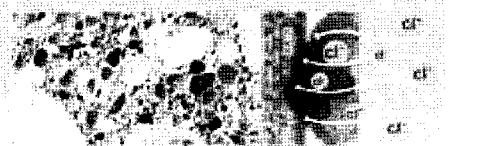
운송, 침설 및 접합공정을 위해 해수에 노출되어 있는 철재 매입물들에 대해서는 사용기간을 고려한 적절한 2중 방식시스템을 도입하였다. 그 예로 GINA 조인트가 설치되는 철재 End Frame의 경우 공사 중에는 희생양극방식을 도입하였으며, 향후 영구방식을 위해 외부 전원법을 도입하였다.

6. 설계를 위한 해석

6.1 구조해석

본 과업구간의 지반의 불확실성을 해결하기위해 무수히 많은 구조해석이 수행되었다. 먼저 지반구조물 상호작용(Soil Structure Interaction)을 수행하기위한 지반평가를 위해 2D Plaxis해석이 수행되었으며, 이 지반해석결과를 기초로 확보된 지반정수를 고려하여 조인트의 벌어짐, 구조부재에 작용하는 단면력 및 침하의 분배 등을 확인하기 위해 횡방향 및 종방향에 대한 상세 구조해석이 수행되었다. 이를 위해 범용 구조해석 프로그램인 SAP2000이 사용되었다.

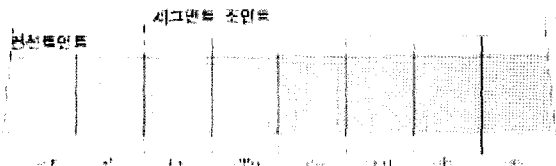
일반 콘크리트
콘크리트 내의 공극을 통해 염화물의 침투가 빠르게 진행



DuraCrete 콘크리트
분투수성, 고밀도콘크리트로 제작되므로 염화물의 침투가 매우 느리게 진행



그림 14 일반콘크리트와 내구성 콘크리트의 차별성



침매터널 합체 종단면도



SAP2000 FEM 모델--Typical Element, 8 세그먼트

그림 15 합체 종단면도 및 FEM 모델링

6.2 수화열 해석

침매 터널 세그먼트 1개에 대한 수화열 해석을 실시하였으며, 이 때 횡방향으로는 전체 단면을 포함시키되 종방향으로는 대칭성을 활용하여 1/2만을 모델링하였다. 사전 연구를 통하여 소요 내구성을 확보하고 수화열을 저감할 수 있도록 슬래브와 플라이애쉬를 적정량 혼합한 최적의 배합이 도출되었으며, 따라서 본 해석에서 배합은 변수로 두지 않았다. 수화열 해석시 요구되는 단열온도 상승곡선은 단열온도시험에서 얻은 값을 사용하였으며 타설온도로부터 최대 40℃까지 상승하였다. 양생 조건으로서 거푸집이 설치되는 벽체 측면과 상부 슬래브 하면은 거푸집이 일정기간 존치되는 것으로 보았으며, 하부 슬래브 및 상부 슬래브의 상면은 타설 초기부터 적절한 보온 양생이 실시되는 것으로 가정하였다. 대류계수, 외기온도 및 타설온도에 대한 것은 뒤에서 따로 언급하며, 밀도는 실측값인 2,420 kg/m³을 사용하되 그 외의 해석 조건들은 콘크리트표준시방서에 제시된 값들을 참조하여 열전도도 2.32 kcal/(m·h·℃), 비열 0.276 kcal/(kg·℃), 열팽창계수 1.0×10⁻⁵/℃를 사용하였다. 크리프의 영향은 콘크리트표준시방서의 유효탄성계수 개념으로 고려하였다. 콘크리트의 설계기준강도는 35MPa으로 압축강도 및 인장강도의 발현곡선은 역시 시방서를 참조하였다. 강도 발현곡선에서 고려되는 시간은 단순한 물리적인 개념이 아닌 성숙도에 근거한 등가재령의 개념으로 즉, 온도의 영향이 함께 고려되었다. 해석에는 범용구조해석 프로그램 MIDAS를 사용하였으며, 그림 2는 솔리드 요소를 사용한 유한요소 모델을 나타낸다.

본 침매터널은 엄밀한 타설 계획에 따라 상부 슬래브와 하부 슬래브를 각각 4개 층으로, 벽체는 19개 층으로 나누어 각 층을 280~430mm 높이로 연속적으로 타설하게 된다. 각 층의 타설 시간 간격은 상부 슬래브를 제외하고는 21분~91분을 유지하여 콜드 조인트 발생 가능성을 최소화하고자 하였다. 총 타설 시간은 약 32시간으로 층에 따라 상당한 타설 시간 차이가 발생함에 따라 엄밀한 단계별 해석을 수행하였으며, 이를 일체 타설한 것으로 가정한 경우와 비교하였다.

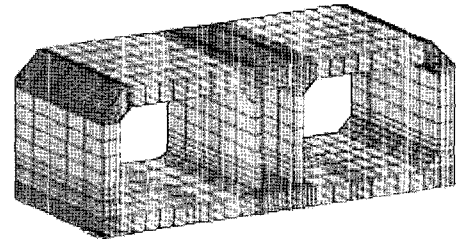
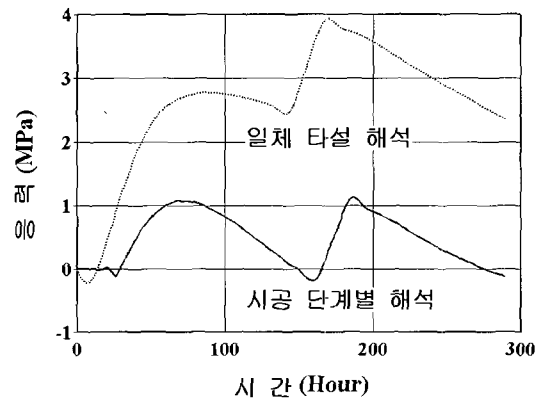
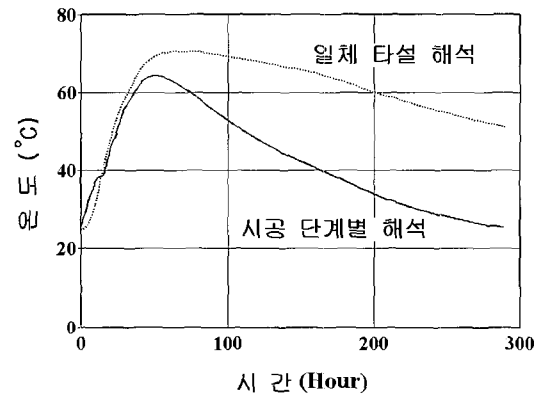


그림 16 유한요소모델



(a) 응력



(b) 온도

그림 17 해석조건에 따른 비교(하부슬래브)

6.3 내진해석

침매터널에 대한 지진의 영향은 다음과 같이 두개의 그룹으로 나눌 수 있다.

- (1)지반의 움직임, (2)액상화, 단층의 변위, 사면의 불안

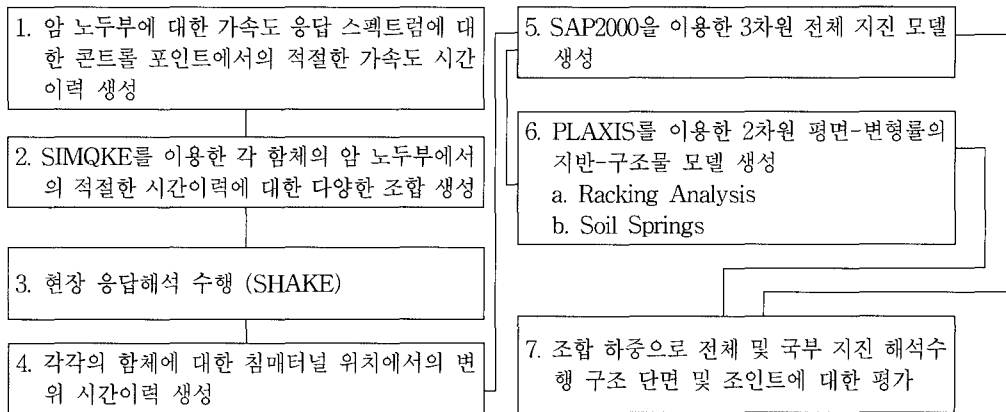


그림 18 지진해석 방법

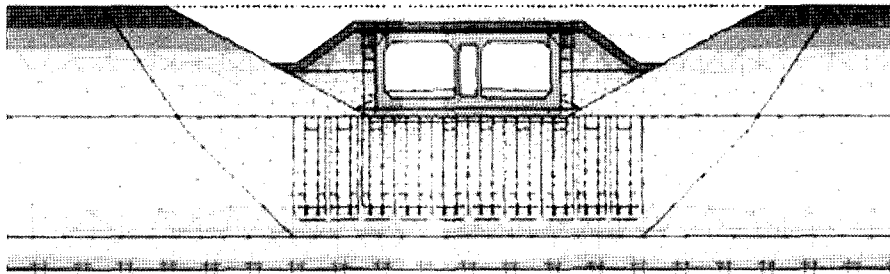


그림 19 Plaxis 8.0의 2D를 이용한 Racking Analysis

정 등과 같은 지반의 파괴. 침매터널은 지반에 묻혀있는 기다란 구조물이다. 그렇기 때문에 암반과 지반의 변형으로 정의되는 지반의 움직임에 대한 침매터널의 응답은 지표면 위에 있는 구조물에 대한 가속도로 인한 관성력발생의 기본원리와는 아주 다르다. 일본과 미국에서 몇 개의 지진이 발생하는 동안 침매터널의 지진반응에 대해 관측한 결과, 지진 반응은 터널구조물의 관성력보다는 주변 지반(자유장)의 변위에 더 많이 지배된다는 것을 알게 되었다. 따라서 지진해석과 침매터널 내진설계 시, 지반의 자유장 변위와 지반-터널의 상호작용관계가 가장 중요하게 된다.

침매터널에 대해서 하나의 전체 3D 모델과 여러 개의 2D 유한요소 모델을 이용하여 지진 지반 구조물 상호작용에 대한 해석이 수행되었다. SAP2000을 이용한 전체 3D 모델에서는 지진하중이 작용할 때의 전체 힘(축력, 휨모멘트), 터널의 굽힘, 조인트의 움직임 등을 포함하는 침매합의 전체적인 거동을 파악할 수 있었다. 터널합체의 세그먼트는 빔 요소를 사용하였으며, 지반반력을 모델링하는 Soil Spring요소를 사용하여 각 합체에 해당하는 변위시간이력을 Soil Spring의 끝단에 입력하였다. 국부적인 횡방향 지

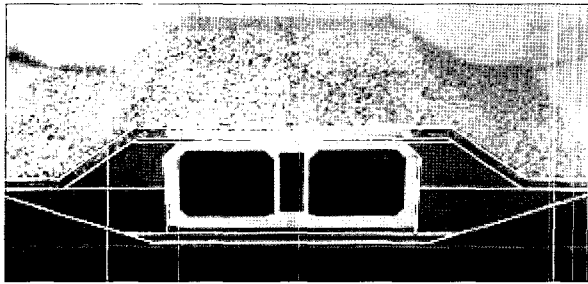
반 구조물상호작용에 대한 모델링은 유한요소 프로그램인 Plaxis 8.0의 2D를 이용하여 모델링되었다. 터널을 따르는 서로 다른 지반조건을 표현하기 위해서 여러 개의 모델링을 만들었으며, 전체 모델에 이용된 대표 Soil Spring을 얻기 위해서 이 모델들이 이용되었다. 대표적인 터널 단면의 Racking Distortion을 추측하고, 횡단면에 대한 지진력을 구하기 위해 유사정적해석 및 동적해석을 수행하였다.

6.4 파랑에 대한 안정해석

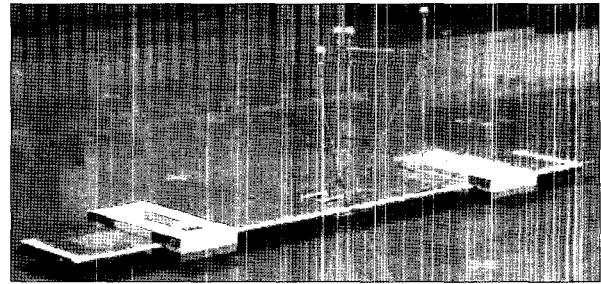
파랑조건에 대해서는 MIKE21을 이용한 수치파랑모델을 이용하여 결정되었다.

그림 8에서 보는 바와 같이 최대심해파는 남쪽방향에서 오고 있으며 본 사업구간에 거의 연직방향으로 지나고 있다. 이에 대한 침매터널의 안정성을 검토하기 위해 DHI(Danish Hydraulic Institute)에서 2차원 수리모형실험 및 2차원 유한요소해석이 수행되었다.

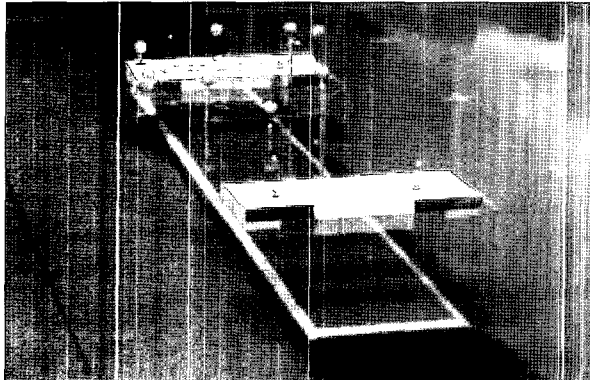
침매터널 본선부의 수리모형 실험은 가설 중의 안정성과 운영 중 태풍 내습시의 안정성에 대한 검토를 각각 나누



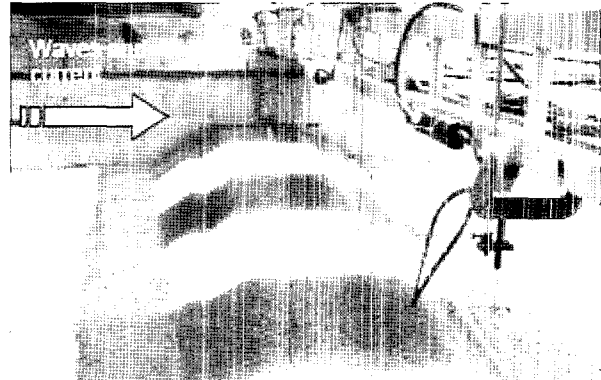
(a) 침매터널 단면 수리모형 실험



(b) 침매터널 평면 수리모형 실험 (운송시)



(c) 침매터널 평면 수리모형 실험 (침설시)



(d) 침매터널 평면 수리모형 실험

그림 20 침매터널 본선부 수리모형 실험

어 수행하였다. 가설중의 안정성 검토는 조류와 파랑의 동시 작용 조건 하에서 침매 합체의 계류시, 예인시, 침설 작업시의 안전성 여부를 3차원 수리모형 실험으로 수행하였다. 그리고 운영중 태풍 내습시의 안정성에 대한 검토는 단면과 평면 수리모형 실험을 통하여 100년, 10,000년 빈도의 파랑 조건과 10,000년 파고의 20%를 초과하는 극단적인 경우의 파랑 조건 하에서 침매 합체와 그 상부의 보호공의 안정성 여부를 검토하였다. 이를 바탕으로 설계상의 적절성을 평가하였으며, 각 수리모형 실험의 종류는 그림 20이다.

7. 조인트 설계

침매터널의 조인트 부는 잠재적인 Weak Point이기 때문에 세심한 주의가 필요하다. 특히 기존의 시공된 침매터널과 달리 큰 수압이 작용하기 때문에 충분한 수밀성이 확보되는 조인트시스템이 확보되어야 한다. 본 침매터널은 콘크리트 세그멘탈 침매터널로 각각방식 침매터널과 같이 연속되지 않고 각 세그먼트에서 구조적으로 현지와 같은 구조로 되어있기 때문에 지진에 대한 합체의 변위가 집중되지 않고 많은 세그먼트조인트에 분포되어 흡수된다.

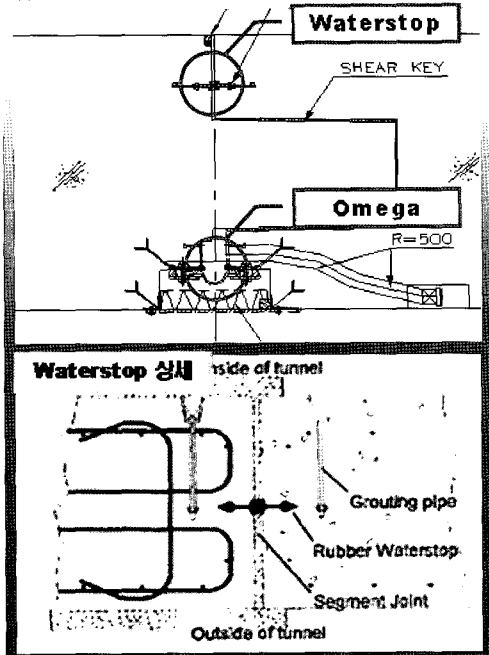
7.1 침설 조인트

침매터널의 각 합체는 침설 조인트로 연결되며, 연결부 상에는 기 시공된 일반 콘크리트 침매터널과 동일한 Layout을 가지고 있다. 연결부에 Gina Gasket과 Omega Seal을 설치하여 해수의 유입을 차단하고 합체사이의 신축량을 흡수하도록 하였다. Gina Gasket은 공사 중 합체의 초기 수밀성 확보를 위해 설치되어 있으며, 추후 영구 수밀성 확보를 위한 2차지수재의 역할을 수행한다. Omega Seal은 침설/접합 후 설치하여 영구 수밀성 확보를 위한 1차지수재의 역할을 수행한다. 침설이 완료된 이후에 Shear key가 설치된다.

7.2 세그먼트 조인트

침매터널의 각 합체는 22.5m인 8개의 세그먼트로 구성되며, 세그먼트 단부에는 Shear Key가 설치되어 각 세그먼트가 일체로 거동하도록 하였다. 세그먼트 조인트의 수밀성을 확보하기 위해 전통적인 주입식 지수판(Injectable Waterstop)이 설치되며, 설치위치는 인장부 균열발생에 의한 수밀성 확보를 위해 콘크리트의 압축부에 배치하고 있다. 또한 기 시공된 침매터널과 달리 큰 수압에 대한 수밀성에 대한 안전율을 확보를 위해 추가로 Omega Seal을

Segment Joint detail
INJECTIBLE WATER STOP &
OMEGA



Immersion Joint detail
GINA GASKET &
OMEGA

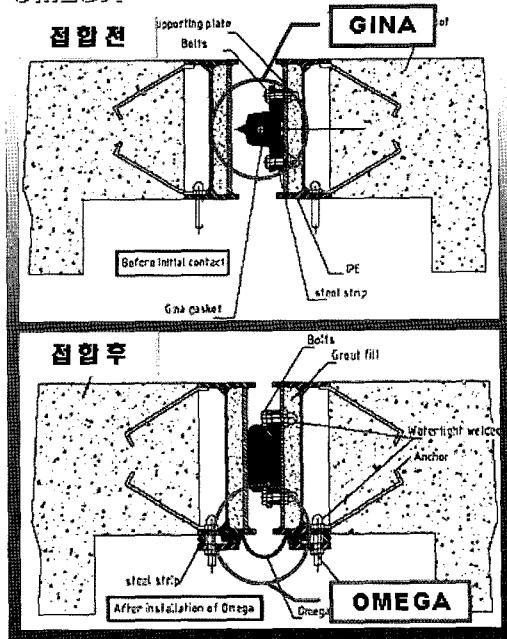


그림 21 세그먼트 조인트 및 침설조인트

배치하였다.

8. 결 론

“부산~거제간 연결도로 사업”의 중요구조물로 계획된 침매터널은 국내 최초의 침매공법에 의한 해저터널이며, 수심 40m 이상되는 해저에 설치되는 구조물로서 해외에서도 그 사례를 찾아보기 힘든 고난도의 사업으로 과업이 성

공적으로 수행될 경우 세계 최고수심 침매터널이 될 것이다. 본 사업의 성공적 완수는 국내 건설기술 발전의 질적 도약을 위한 매우 중요한 기회임과 동시에 국내 건설기술의 대외적 위상을 높이고 국가 경쟁력 확보에 큰 도움을 줄 것으로 확신한다. ㄹ