부산-거제간 연결도로 민자사업 침매터널 설계 및 시공

김용일, 윤영훈, 정두석, 장현갑, 황낙연 ((주)대우건설)

1. 서 론

최근 세계 각 국에서는 고속화 철도 및 도로 등의 고속운송 체계의 개발수요가 증대됨에 따라, 하천이나 해협을 횡단하는 교통용 수저터널의 건설공법이 빠르게 발전하고 있다. 역사적으로 보면 19C말~20C에는 쉴드공법이 수저하의 연약지반에 교통터널을 건설하는 유력한 방법으로 개발·발전되어 왔으나, 원형단면을 기본으로 하는 것과 교통용 터널에 적합한 대단면의 굴착 곤란 등의 이유로 문제점이 대두되어 19C중반이후로 침매터널공법이 하(해)저터널 건설의 새로운 방법으로 발전되어 왔다.

본 고에서는 대우건설이 추진중인 부산-거제간 연결도로 민자사업을 통해서 하(해)저터널의 시공법과 특히 본 사업에 적용되는 침매터널공법의 설계 및 시공계획을 소개하고자 한다.

2. 하(해)저터널 공법

2.1 주요시공법

하(해)저의 지질 및 토질은 주로 투수성 토사지반으로 이루어져 있으며 암석이라도 균열이 많은게 특징이다. 따라서 이러한 지반에서의 터널공법은 기초지반이 불투수성 지반일 경우에 일반적으로 사용되는 일반 산악 터널 공법과는 달리 특수한 시공방법이 요구된다. 하(해)저 터널의 시공방법으로는 침매공법(Immersed Method)과 쉴드공법(Shield Method)이 주종을 이루고 있으며 이 밖에 잠함공법(Pneumatic Caisson Method), 물막이 개착공법(Coffer Dam Method), 시멘트 주입법, 측벽갱도 선진공법 등도 현장조건에 따라 사용되고 있다. 표 1.은 하(해)저터널의 주요공법을 비교한 것이다.

표 1. 하(해)저터널의 주요공법비교

구 분	쉴드공법	침매공법	잠함공법	물막이개착공법
단 면	· 원형이 기본 · 대단면굴착 곤란	· 형상크기 제한없음 · 대단면굴착 가능	· 일반적으로 구형	· 형상, 크기 제한없음
수로수심과 터널깊이	· 터널작업은 압기작업의 제한상 30m 한도이며 상당한 피 복두께 필요	· 터널깊이는 선박의 항행에 지장을 주지 않을 정도로 얕게하여 터널 총 연장 단축가능 · 압기작업이 필요없으므로 깊은 수심에 시공 가능	· 얕은수심에 적합 · 터널깊이를 얕게 할 수 있음	· 얕은수심에 사용 가능
유속등 수리적조건	· 관계없음	· 일반적으로 2노트이하의 유속이 적당 · 유속이 큰 하천일수록 강력한 작업발판이 필요 · 기상, 해상조건이 현저히 변하는 곳에서는 예항 및 침설작업이 곤란	· 축도식 공법의 경우 유속이 크면 물막이 설치시 유의 · 부양 예항식 공법이 경우 유속이 크면 케이슨의 계류 곤란	· 물막이 설치시 유의
지질조건	· 압축공기가 새는 것을 막기 위해 충분한 피복두께가 필요하므로 지질과 관계있음 · 지반안정처리공법과의 병용이나 특수쉴드공법의 사용에 의해 적용가능한 지반의 범위가 넓음 · 연약지반 및 토사지반에 매우적합	· 침설된 터널본체의 겉보기 단위중량은 부력으로 인해 1.1정도로, 주위 흙의 단위중량보다 작다. 따라서 지반 지지력에 대한 문제는 거의 없음 · 단, 암반과 같은 단단한 지반의 경우, 준설작업 곤란	· 굴착이 쉬운 토사지반에 적합	· 사질토 지반에 적합

2.2. 침매공법

2.2.1 개 요

침매공법은 지상 또는 수면상에서 제작한 함체를 물에 띄운채 원하는 위치까지 이동하여 준설기에 의해 미리 수중굴착된 하상의 제 위치에 침설 시킨 후 수중에서 함체들을 연결하고 그 위에 토사 등으로 되메우기를 하여 터널을 완성하는 공법으로 보통 Trench Method, Tube Sinking Method라고도 불리우며, 이 공법으로 건설된 터널은 보통 침매터널, Immersed Tunnel 및 Prefabricated Subaqueous Tunnel 등으로 불리운다.

1950년대 이래 하(해)저터널을 주도해 오고 있는 침매터널은 1910년 미국의 디트로이트 강 횡단 철도터널을 시작으로 적용되어 현재까지 약 60여개의 하저 및 해저터널이 교통용으로 시공되었다.

2.2.2 종류

원형강관방식과 구형콘크리트 방식의 개요 및 장단점은 표2, 표3과 같다.

표 2. 원형강관방식 (미국식)

개 요	· 수압, 토압등의 외력에 가장 유리한 원형 단면으로 된 함체의 형틀 즉 강각을 조선대에서 제작 · 강각을 소정의 위치에 진수시킨 상태에서 내부에 철근콘크리트를 타설하여 침설시킴
장 점	· 원형단면으로 역학적으로 유리, 대수심에 경제적 · 저면폭이 작아 기초조성에 유리 · 기존 조선소의 조선대를 이용하여 시공이 확실 · 강각이 방수층 역할을하여 특수 방수 불필요
단 점	· 원형 단면으로 상하부에 무용공간 발생하며, 준설 및 복토깊이가 증가 · 부상상태에서 콘크리트 타설시 응력에 대한 보강필요

표 3. 구형콘크리트 방식 (유럽식)

개 요	· 터널함체의 단면이 구형임 · Dry Dock등에서 함체의 형틀을 짜서 그 속에 콘크리트를 타설하여 콘크리트 함체를 제작 · 함체를 물에 띄워서 예항, 침설하는 방식
장 점	· 단면상 불필요한 공간이 저어 기면을 최소깊이로 가능하여 터널 총연장이 줄고, 준설깊이도 얕게 된다. · 단면크기에 제한을 받지 않아 대단면 터널에 적당 · Dry Dock에서 제작되어 강각이 불필요
단 점	· 함체의 저면이 넓어서 균일한 저면 지지를 위하여 기초처리에 특수공법 필요 · 콘크리트에 별도의 방수층 필요 · 함체에 큰 휨 모멘트 발생

3. 부산-거제간 연결도로 민자사업

3.1 사업개요

· 공 사 명 : 부산-거제간 연결도로 민자사업공사
· 위　　치 : 부산광역시 가덕도 ~ 경상남도 거제시 장목면
· 공사기간 : 2004 ~ 2008 (72개월)
· 공 사 비 : 13,197억원
· 사업규모 : 8.2km / 왕복 4차선
· 주요시설 : 침매터널, 사장교 2개, 강합성교, 육상터널

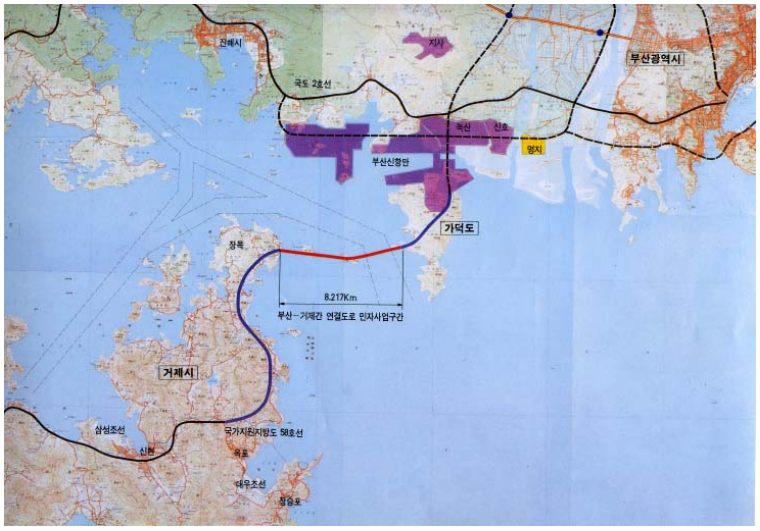

그림 1. 사업위치도

그림 2. 사업 조감도

3.2 사업성 검토

본 과업구간은 사회간접자본 시설공사로서 국토의 효율적 이용과 지역사회 기반시설의 원활한 이용 및 발전을 도모하고자 하였으며 이에 따른 타당성 조사를 실시하였다.

이 조사는 인근지역(부산,거제도 등)의 인구증가율과 노상조사, 차량보유율 등의 교통량 조사를 비롯한 조사를 수행 하였으며, 경제적인 효과는 표4와 같다.

표 4. 경제성검토 결과

단위 : 원

구 분	거리(km)	요금(원)	유류비용	시간비용	총 비용
국도14호선 남해고속도로	140	2,000	16,800	17,500	36,300
본도로	60	8,000	7,200	7,500	22,700
절감효과	80	-6,000	9,600	10,000	13,600

※연비 : 10㎞/ℓ, 유류비 : 1,200원/ℓ

3.3 노선계획 및 연결구조

3.3.1 노선계획

본 프로젝트는 총연장 8,214.7m(침매터널 : L=3,696.6m, 교 량 부 : L=3,507.5m)이며 노선개요 및 선형은 표5와 같다.

표 5. 노선개요 및 선형

구 분	설계 노선
개 요	· 총 연 장 : L=8,214.7m · 침매터널 : L=3,696.6m · 교 량 부 : L=3,507.5m (사장교: 672m + 915m, 접속교: 1,920.5m) · 토 공 부 : L=1,016.6m
선 형	· 최소 종단 반경 : R=1,500m · 최대 종단 구배 : S=5.00%

3.3.2 연결구조

· 제1항로는 거제도와 저도사이를 제1공구로, 제2항로는 저도와 중죽도 사이로 제2공구로, 제3항로는 중죽도와 가덕도 사이로 제3공구로 각각 부른다

· 관계기관의 확정된 요구사항

- 제1공구 : 항로고 36m, 항로폭 202m의 항로 2개유지
- 제2공구 : 항로고 52m, 항로폭 435m 항로 1개 유지(최소수심 16m)
- 제3공구 : 해군의 요구로 수상장애물을 불허한다.

· 공구별 배치 제안사항

- 제1공구 : 4경간(주탑3개) 사장교와 양단에 접속교
- 제2공구 : 3경간(주탑2개) 사장교와 양단에 접속교
- 제3공구 : 침매터널

3.4 교 량

교량은 2가지 형태로 구분되며 첫 번째 형태는 제1항로(부예비항로)와 제 2공구(주예비항로)의 접속교이다.

두 번째 형태는 제 1공구의 4경간(106+ 230+ 230+ 160m), 3 주탑의 사장교와 제 2공구의 3경간(220+ 475+ 220m), 2주탑의 사장교이다.

표 6. 교량개요

구 분	접 속 교	사 장 교
연 장	· 접속1교 : 464m · 접속2교 : 515.5m · 접속3교 : 335.5m · 접속4교 : 605.5m	· 부예비교 : 672m · 주예비교 : 915m
노 폭	18.5m	19.6m
기 초	직접기초 및 콘크리트케이슨기초	콘크리트케이슨기초
시공방법	· 상판 및 기초 : PC 콘크리트 제작, 현장에 해상크레인으로 가설.	· 주탑 : 현장타설. · 상판 및 기초 : PC 콘크리트 가설.

그림 3. 사장교 조감도

3.5 침매터널

· 연　장 : Tunnel: 3,384M(18EA×188M)+West Portal: 214.4M+East Portal: 98.2M

· 횡　단 : 27.3M×8.1M

· 환기방식 : 종류식(JET FAN)

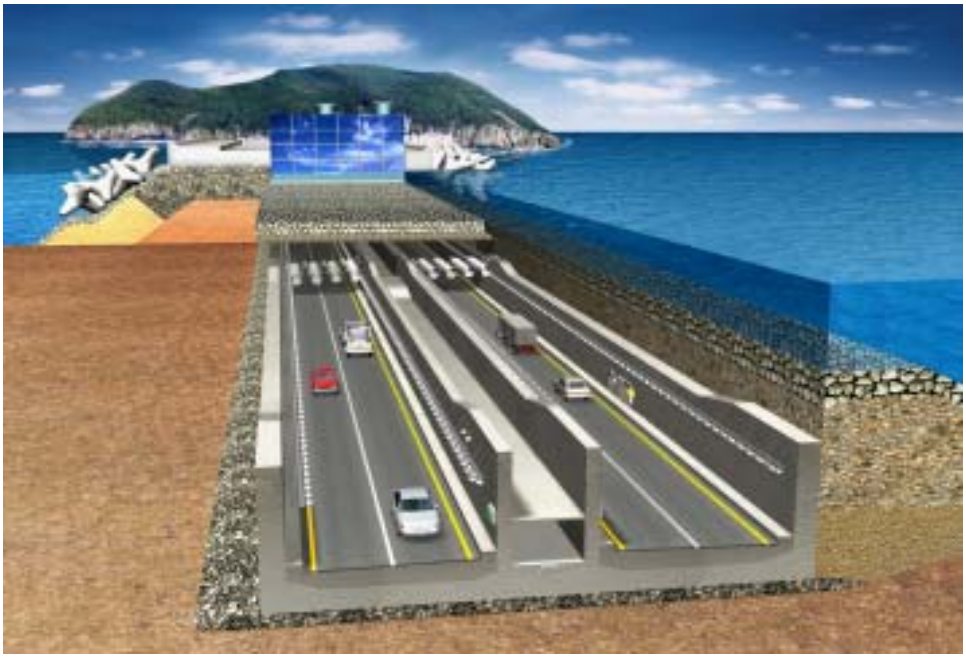

그림 4. 침매터널 조감도

3.6 기타구간

· 인 공 섬 : 가덕도 및 대죽도 양단

· 육상터널 : 저도(280M), 중죽도(210M)

· 가덕 및 거제휴게소, 영업소

4. 침매터널 시공방법

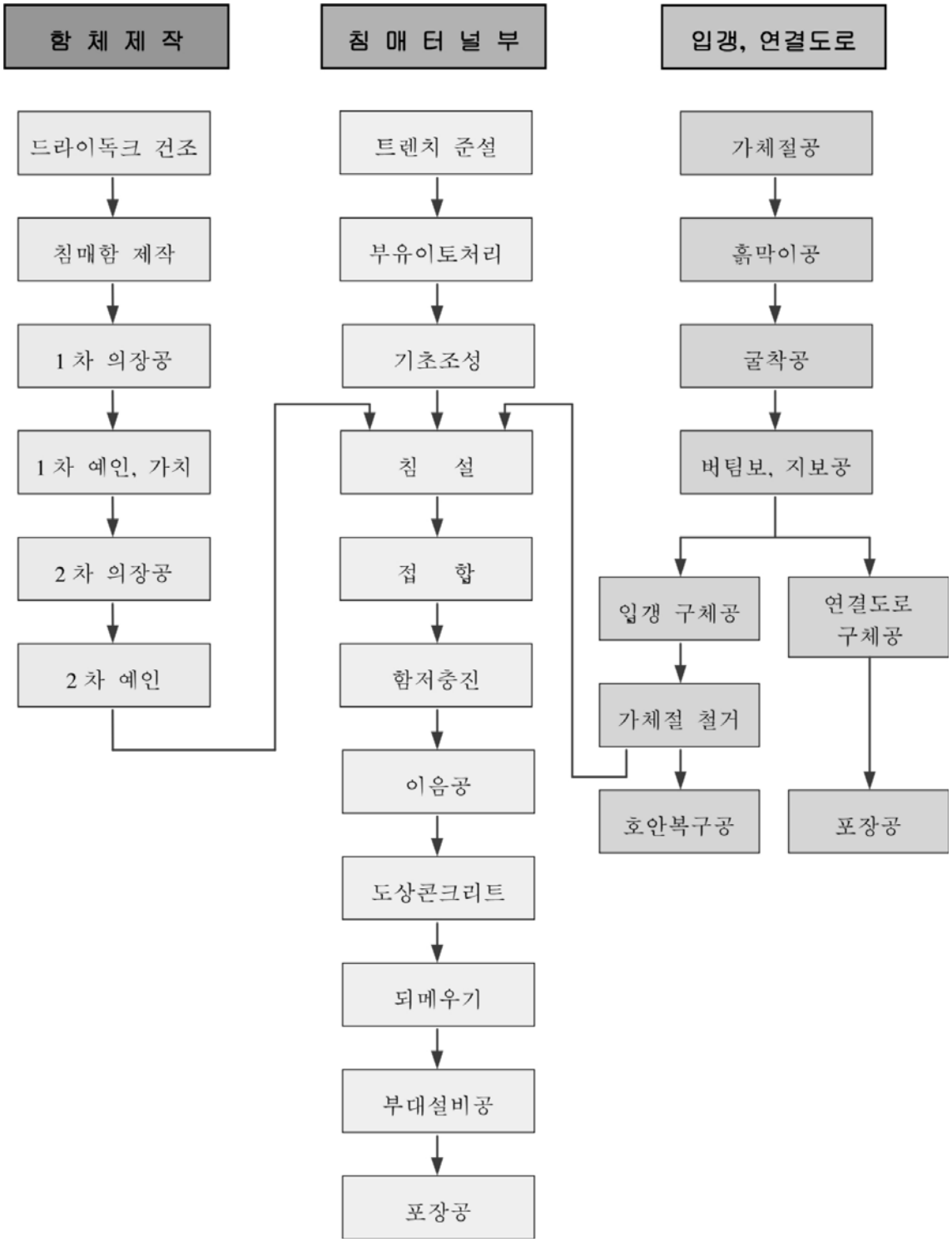

그림 5. 침매터널 시공 순서도

4.1 침매함 제작

침매공법은 지상 또는 수면상에서 제작한 함체를 물에 띄운채 원하는 위치까지 이동하여 준설기에 의해 미리 수중굴착된 하상의 제 위치에 침설 시킨 후 수중에서 함체들을 연결하고 그 위에 토사 등으로 되메우기를 하여 터널을 완성하는 공법으로 보통 Trench Method, Tube Sinking Method라고도 불리우며, 이 공법으로 건설된 터널은 보통 침매터널, Immersed Tunnel 및 Prefabricated Subaqueous Tunnel 등으로 불리운다.

침매터널의 시공방식에는 시공장소의 조건, 용도, 단면의 크기 등에 의해 여러 가지의 연구가 되었으며, 이것을 크게 나누면 특별한 독(dock) 등을 만들지 않고 강각함체를 수상에 띄어 강각을 외형 거푸집으로서 콘크리트를 타설하면서 함체를 완성시키는 “강각방식”과 드라이독을 함체제작야드로 하여 전함을 한 번에 또는 몇회로 나누어 드라이독으로 함체제작을 완료시키는 “드라이독방식”이 있다. 이들 공법의 주요특징은 표 7과 같다.

표 7. 침매공법 방식의 비교

분 류	강각방식	드라이독 방식
주요 사용국	미 국	유럽, 캐나다 등
주요 용도	2차선통로, 단선철도, 하수관등에서 지름 10m정도 이내를 단위튜브로 한 것에 채용	다차선 광폭원의 통로터널에 채용(터널, 보도를 병치하는 예도 있다.)
기본단면형	원형 내지 소판형(외형은 변형팔각형, 정방형도 있다.)	장방형
주구조재	강각 및 철근콘크리트	철근콘크리트
침매함 제작장소	조선대 및 의장야드	가설드라이독
방수방법	강각	자체방수 또는 방수층(강판(6～8mm), 아스팔트, 부틸고무 등에 의한다.)
기초의 조성방법	스크리드에 의한 자갈의 정리가 일반적	가지승대를 설치, 모래 또는 모르타르의 충전
수중에서의 접합방법	수중콘크리트 또는 고무가스킷에 의한 수압접합	고무가스킷에 의한 수압접합
예항 및 침설방법	건현 30~50cm로 예항. 수상에서 자갈 내지 수중콘크리트를 침매함의 포킷부에 투입하여 침설	건현 10cm 정도로 예항. 침매함내의 물발라스트의 조작에 의한 침설

본 프로젝트에서 채택된 장방형 단면의 드라이독 방식은 넓은 폭원의 도로터널용으로서 주로 유럽에서 개발된 방식으로, 원형과 달리 불필요한 공간을 최소화 할 수 있으며 대단면

터널에 적합하고 이상적인 조건에서 시공하므로 고도의 품질관리가 가능한 장점을 가지고 있다. 반면에 기초 저면이 크기 때문에 지반면과 침매함 저면의 기초처리에 특수한 방법이 요구되며, 콘크리트의 품질관리를 철저히 하여 수밀성에 대해서도 충분한 주의가 요구된다. 또한 별도의 방수층 시공 및 방수층이 필요할 경우 이에 대한 보호도 충분한 주의를 기울여야 한다.

4.2 심해 준설

침매터널 공법에서 트렌치 준설은 굴착심도가 깊어서 굴착면의 높은 마무리 정도가 요구되므로 기초지반을 흐트러뜨리지 않는 굴착방법이 필요하다. 준설에 필요한 기술로는 법면 구배의 확보, 굴착면 관리 기술 등이며, 항로폭의 확보, 공사구역(작업선의 점유구역), 항로의 안전대책에 유의하여야 한다. 따라서 시공정도를 향상시키기 위해서는 자동준설시스템의 도입이 필요하다.

4.3 침매함 기초 조성

대규모 침매함의 기초는 일반적으로 연속지지방식이 사용되며, 연속지지방식에는 크게 트렌치 밑면 위에 자갈, 쇄석 등을 Screed로 정확히 부설하고 그 위에 침매함을 설치하는 방식과 침매함을 소정의 위치에 일시적으로 임시 지지하는 가지승대를 설치, 침매함을 침설시킨 후에 함과 기초의 공극을 모래, 몰탈 또는 콘크리트로 충전하는 방식으로 분류한다. 기초의 시공중에는 준설시 발생한 오탁물을 처리하는 펌프식 준설선 또는 샌드펌프 등의 장비가 필요하며, 침매함 침설후 함저콘크리트를 충전하고 콘크리트 강도가 도달될때까지 잭(Jack)으로 침설함의 중량을 지지하고 고정시켜 높이를 유지하는 가지승대를 두어야 한다.

4.4 침매함 침설 및 접합

일반적인 침설방식으로는 Tower pontoon방식, Placing barge방식, Placing pontoon방식, 자기승각식 작업대선(SEP)방식, Floating crane방식 등이 있다. 이중에서 Placing barge방식은 Placing barge라 부르는 쌍동선이 침매함을 껴안아 침설지점까지 예인한 다음 Ballast tank에 물을 넣어 침설하중을 작용시키고, 달아매는 거더에서 침설윈치로 침매함을 달아내리고, Barge에 있는 조선윈치를 이용, Barge를 이동시켜 침매함 위치를 정하여 침설한다. Placing barge방식은 다른 공법에 비해 침설직전까지 건현이 되기 때문에 의장작업이 용이하고 함체에 탑재된 의장품은 비교적 적으므로 공기를 단축시킬 수 있다.

수중에서 침매함을 접합하는 방법으로는 고무가스켓을 써서 수압으로 접합하는 방법과 이음주위에 수중콘크리트를 타설하여 지수하는 방법이 있다. 수압압접방식으 침매함끝단에

고무가스켓을 부착하여 수압으로 압착시키는 방법이다. 함내에 설치된 견인 잭으로 서서히 양침매함을 접근시키면, 고무가스켓 노즈부분이 압축되고 접합부분이 충분히 지수된 후 접합부분을 배수한다. 이공법은 수중콘크리트 방식과 비교하면 시공성이 양호하고 공사비, 공기에 대해서도 유리하지만 접합단면의 제작정밀도, 고무가스켓 재질, 형상, 치수, 침매함 연결 및 견인장치, 배수용 밸브 등을 충분히 검토하여야 한다.

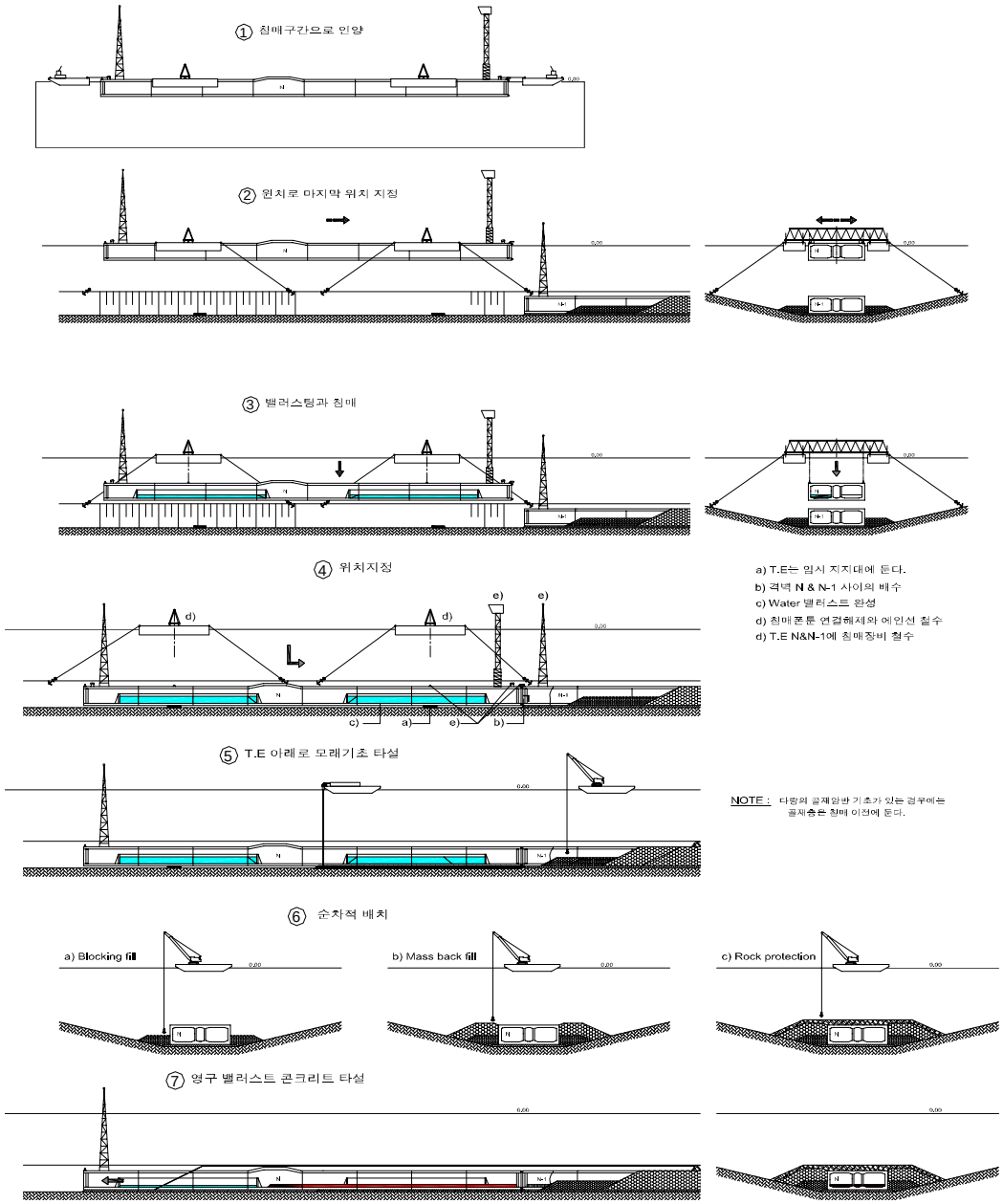

그림 6. 침매터널 기초조성, 침설 및 접합

5. 침매터널 설계

5.1 일반 기능상 필요조건

침매터널의 일반 기능상 필요조건을 만족하기 위해 설계에 반영되는 안전개념이나 운영계획 수립 시, 연결도로의 주요 조직, 공공시설 관련 업체와 주무기관과 같은 유관기관과의 사전협조가 이루어져야 한다.

5.1.1 내구 연한 조건

구조물 요소의 내구연한은 유지 관리를 전제로 하여 그 구조물의 기능이 주어진 내구연한 동안 지속되는 것을 의미한다. 따라서, 영구 구조물에 대한 내구연한은 100년으로 하되, 교체 가능한 항목에 대한 내구 연한은 100년 보다 작다.

5.1.2 내구성, 검사성, 유지 보수성

모든 재료는 정확한 내구성 입증이 필요하다. 구조 설계와 본 공사시 사용될 건설재료는 구조물의 구성요소 및 환경에 노출되는 영향을 고려한 내구성을 가져야 한다. 터널 콘크리트 내구성에 대하여 염화이온에 대한 콘크리트의 투수성과 콘크리트 피복은 염화물로 인한 철근의 부식속도를 결정하는 주요인자로써 부식발생의 시작은 내구연한의 종료로 정의하며, 이를 고려한 철근콘크리트의 피복은 표 8과 같다.

표 8. 철근콘크리트 피복

부 위	피복(mm)
방수벽, 내부	75
방수벽, 외부	75
내부벽	40

주요자재(특히 실제 초기 염화물 함량과 염화이온에 대한 콘크리트의 실제 투수성)는 환경적 변수와 관련하여, 최종 구조물의 실제 콘크리트 피복이 90%의 확률을 가지고 내구연한 100년 동안 염화물에 의한 초기부식이 발생하지 않도록 확률을 기초로 한 내구연한 평가를 수행한다.

연결부와 같이 중요한 부분이나 계측 장비와 구조물의 검사 등 유지보수 상 필요한 부분은 접근이 용이하도록 별도의 시설 설계가 필요하며, 보수작업이 필요한 곳은 교통간섭을 최소화 하면서 보수가 가능하도록 이를 설계시 반영하여야 한다.

야간보수작업은 1차로 교통을 차단한 채 최대 5시간 동안 수행할 수 있는 것으로 가정된

다. 한쪽 터널을 완전히 차단한 채 수행되는 주요 보수는 최대 48시간, 주2일을 기준으로 연 4회를 초과하지 않는 것으로 가정된다. 또한, 운전자, 운영 및 유지보수 직원의 안전을 고려하여 설계하여야 한다.

5.1.3 방수 및 균열

지하수위 아래의 터널 및 접근램프는 방수가 되어야 하고 사용재료 또한 콘크리트 또는 연결부를 통하여 물의 침투에 의한 흔적이 없어야 한다. 터널 및 램프구조물은 콘크리트 구조 자체가 방수 역할을 하도록 설계하며, 중요한 설계 원칙은 관통균열을 허용하지 않는 것으로 이는 콘크리트 타설 후 양생기간(온도균열)과 양생후(부등침하나 온도의 영향)발생하는 변형의 구속이나 직접적인 하중으로부터 야기되는 인장균열을 포함한다. 콘크리트는 부재의 최소 응력 압축깊이, 최대 축응력과 관통 균열의 제한조건을 적절히 조합한 기준을 통하여 방수에 대한 검토를 수행한다.

균열 계산은 공칭 피복을 기준으로 하며, 피복은 50mm보다 작은 값을 취하여 계산한다. 균열을 허용가능 한 수준으로 한정하기 위해서는 직접 작용하는 하중과의 조합으로 인한 구속 여부와 관계없이, 발생된 변형구속으로 인해 인장력이 크게 발생하는 모든 단면은 상기의 균열하중으로 인하여 철근이 항복하지 않도록 최소한의 철근을 배근하며, 철근의 간격과 지름은 균열폭을 제한하도록 배근해야한다. 최대 허용 가능한 균열폭은 표 9와 같으며, 사용한계 상태하중조합에 대하여 검증된다.

표 9. 최대 설계 균열 폭

위 치	설계 균열 폭(mm)
내부 콘크리트 면	0.2
외부 콘크리트 면	0.2

5.1.4 경관 조건 및 환경

부산-거제간 연결도로는 미관적 측면에서 각 구조물간의 일관성을 유지하여야 하므로 재료, 마감, 상세, 질감과 관련하여 구성기준을 반영해야 한다. 터널 내부, 환기소, 터널 입구 등은 전체적으로 육상 터널 및 교량과 함께 전체적인 미적 고려가 필요하다.

5.1.5 도로 교통 추정

교량 및 터널 개통시의 추정 교통량과 교통 구성은 “수정사업계획서, GK주식회사, 2000”을 참고하였으며, 표 10과 같다.

표 10. 2010년, 2030년 추정교통량과 평균 교통구성

차 종		2010년		2030년	
연평균 각 방향 교통량		17,400 대수/일		30,700 대수/일	
승용차		58%		62.5%	
디젤차량	소형버스(2t)	8.7%	14%	7.8%	12.5%
	대형버스(10t)	5.3%		4.7%	
	소형트럭(2t)	7.7%	28%	6.9%	25%
	보통트럭(10t)	6.4%		5.7%	
	대형트럭(20t)	7.2%		6.4%	
	트레일러(40t)	6.7%		6.0%	

위험물은 “Transport of Dangerous Goods through Road Tunnels, OECD, 2001"에서 정의하고 있는 5가지 화물 범주 A, B, C, D, E를 참고 한다. 여기서 범주E는 일반 화물이고 범주 A는 최고 위험물을 포함한 모든 종류의 화물을 의미한다. 설계는 범주 E의 화물적재 차량만 통과하는 것으로 간주한다. 기타범주의 화물차량은 위험 분석결과에 따라 허용된다. 위험분석은 위험확률과 발생 가능한 위험 결과를 제시하는 것으로, 야간 통행만 허용하는 것과 위험감소 조치를 고려한다.

5.1.6 선형 및 시설한계

본 구간은 주간선 도로로 분류되어 설계 속도를 80km/h로 하며, 국내기준에 따라 도로폭과 시설한계를 고려한다. 도로의 기하구조는 최대 종단경사를 4%에서 6%사이의 값으로 결정할 때는 실시설계 전 부득이한 경우에 대한 타당한 근거를 검토한다. 최소 종단 경사는 배수를 감안하여 0.2%로 하고, 장래의 선박통항 조건을 고려하여 결정한다.

5.1.7 긴급 구조 시설

긴급 구조시설의 범위는 소방서나 관계기관의 동의를 득한 연결도로 전구간의 안전개념을 기본으로 결정한다. 기본원리는 본 구간과 유사한 덴마크와 스웨덴을 연결하는 Oresund Link와 같이 장대 터널 및 교량으로 연결된 프로젝트와 동등한 정도의 안전수준을 갖도록 한다. 안전수준은 1km당 연 발생 가능한 사고로써 정의할 수 있다.

5.1.8 이동식 방호울타리(Movable Barriers)

유지 및 긴급 상황으로 인해 양방향 터널 중 한 개의 터널이 일시적으로 차단되는 경우를 대비하여 이동식 방호울타리 시설이 필요하며, 이동식 방호울타리의 위치는 침매터널 구간 밖으로 결정될 것으로 예상된다. 설치는 터널의 교통 통제 제어 시스템에 대한 계획과 안전개념에서 함께 고려되여야 한다.

5.2 하중과 하중조합

하중, 하중조합, 하중계수 및 각각의 하중에 관한 사항으로 침매터널, 환기소, 개착식 터널 및 접근 램프 설계시 적용한다.

5.2.1 일반사항

AASHTO LRFD의 규정에 따라 각 한계상태에서 구조물의 부재 및 그 연결부는 다음의 식을 만족한다.

$$Q = \sum \eta_i \cdot \gamma_i \cdot Q_i \leqq \phi \cdot R_n = R_r$$

여기서

Q : 계수하중
η_i : 하중조합 보정계수, 연성, 여용성 및 구조물의 중요도에 관련된 계수
γ_i : 하중계수, 하중영향에 대한 통계적인 계수
Q_i : 공칭하중 또는 공칭 하중 효과
ϕ : 저항계수
R_n : 공칭저항력
R_r : 계수저항력

하중조합 보정 계수는 1.0을 취한다.

상향력에 대한 안정은 구조물의 각 부분이 아래의 식을 만족해야 한다.

$$\gamma_w \cdot V_w \cdot \rho_w \leqq FS \cdot \sum \gamma_i \cdot V_i \cdot \rho_i$$

여기서

V_w : 물의 부피
ρ_w : 물의 밀도
γ_w : 부력에 적용된 하중계수
V_i : 안정성을 증가시키는 부피

ρ_i : 안정성을 증가시키는 밀도
γ_i : 하중계수
FS : 상향력에 대한 안전율

터널 함체가 제작장이나 트렌치 바닥에 놓여있을 때의 임시 상황시 부력에 대한 최소 안전율은 1.025를 적용시킨다. 그리고 영구상황 시에는 두 신축이음 장치 사이의 각 터널 함체에 대해서 부력에 대한 최소 안전율은 1.06을 적용하며, 집수조가 있고 최대수심에 설치되는 함체의 안전율은 1.04를 적용한다.

5.2.2 하 중

침매 구간에서 고려되는 하중은 표 11과 같다.

표 11. 하중에 대한 정의

영구하중		일시하중		돌발하중 및 지진하중	
DC	구조부재와 발라스트콘크리트	LS	상재 활하중	FR	화재
DW	포장과 도로시설	LL	차량 활하중	EX	폭발
WA-1	평균해수면에서의 정수압	BR	차량 제동하중	CT	차량 충돌
			기타 차량하중		
EH	수평토압	WS	바람	CV	선박 충돌
EV	수직토압	WA-2	수위변화	AN	앵커의 충돌(투묘) 및 끌림(주묘)
EL	시공중 또는 프리스트레싱에의한 2차 하중으로부터 발생하는 부가하중	WA-3	파랑과 조류	FD	터널 침수
		CR	크리이프	EQ	지진
		SH	건조수축	WA-4	극치 고조위와 극치파랑
		TU	온도하중		
		TG	온도경사		
		SE	침하		
		IC	설하중		
		BD	건물에 작용하는 부가하중		
		TC	일시적 작업하중		

5.2.3 하중 조합

1) 한계상태

수심이 깊은 곳에 설치하는 침매터널에 대하여 한계상태의 계산에 적용되는 특수한 하중조합은 AASHTO LRFD를 적용할 수 없다. 따라서 현재 유럽의 침매터널 프로젝트에서 적용되는 일반적인 사항을 참조하여 한계상태를 규정하며, 표 12과 같이 정의된다.

표 12. 한계상태에 대한 정의

극한 한계 상태		
①	강도 한계 상태 조합 Ⅰ	터널 건설중의 임시 조건
②	강도 한계 상태 조합 Ⅱ	터널 내구연한의 사용 시 설계 조건
③	강도 한계 상태 조합 Ⅲ	터널 내구연한중 활하중 효과에 비해 사하중 효과가 훨씬 큰 경우에 대한 사용시 설계하중
④	극한 한계 상태 조합 Ⅰ	지진 하중을 고려하는 설계조건
⑤	극한 한계 상태 조합 Ⅱ	구조물의 극한 조건과 같은 돌발 설계 조건
사용 한계 상태		
⑥	사용성 한계 상태 조합 Ⅰ	침매터널 시공과 관련한 임시 설계조건
⑦	사용성 한계 상태 조합 Ⅱ	내구연한과 관련한 사용 시 설계조건

피로 한계상태 조합은 터널프로젝트에 대해서는 적용하지 않는다.

2) 하중계수

한계상태에 적용되는 하중계수는 표 13과 같다.

정수압에 대한 하중계수는 AASHTO LRFD에서 1.0을 적용하였지만, 본 프로젝트에서는 하중계수를 증가시켰고, 이를 제외한 다른 하중계수들은 AASHTO LRFD의 규정을 따랐다. 하중계수는 터널에 대한 신뢰도가 AASHTO LRFD에서의 교량에 대한 신뢰도와 유사하도록 확률론적 모델링을 이용하여 계산하였으며, 수위와 밀도의 변화에 대한 사항을 반영하였다.

AASHTO LRFD에서 규정된 기타 하중에 대하여 AASHTO LRFD의 하중계수의 기초가 되는 통계적 변수 및 값은 미국과 유사한 것으로 가정한다. 모든 하중조합에서, 포스트 텐션으로 인한 2차하중을 포함하는 시공과정에서 발생하는 잔류 하중효과에 대해서는 하중계수 1.0이 적용된다. 강도한계 상태에서, 영구하중에 대한 하중계수는 부재에 유리하게 작용하는 경우에는 작은 하중계수값을 적용하고, 부재에 불리하게 작용하는 경우는 큰 값의 하중계수를 적용한다. 일시하중은 부재에 불리하게 작용할 경우에만 고려한다.

5.3 해성토와 보호공

흙의 강도와 변형특성은 상세한 지반조사를 통하여 얻어질 수 있으며, 이를 기초로 하여 침매터널의 토공과 보호공의 설계가 이루어져야 한다.

트렌치 준설의 준설경사는 전체적인 안정성를 확보하도록 결정하며, 바닥폭원은 터널 함체 설치의 여유공간 뿐만 아니라 기초 설치용 장비를 고려해야한다. 터널 설치 후 수중제체는 설계 허용치를 초과하여 콘크리트에 응력이 유발되거나 연결부의 벌어짐을 야기하는 부

등침하가 발생하지 않도록 해야 한다.

터널 주변의 일부 특정지역의 지반개량 및 치환은 연약한 해성점토의 특성에 의해 좌우되며, 개량 또는 치환된 흙의 강도와 변형계수는 실험실과 현장시험에 의해 확인되어져야 하다. 함체는 평평하게 한 쇄석 바닥층, 펌프 또는 분사하여 채우는 모래바닥층 또는 파일기초 위에 놓인다. 기초층의 최소 두께는 준설여유를 고려해야 하며, 최대 두께는 설계시 침하 해석으로부터 결정해야 한다. 침설 연결부(Immersion Joint)의 고정은 침하가 상당히 진행된 것이 확인된 이후 시행해야 한다.

파와 조류에 노출되어 있는 터널에 근접한 되메우기층과 침식에 대한 함체 보호층은 재현기간 100년의 조류에 대한 침식에 저항할 수 있어야 한다. 함체 보호층은 통과선박에 대한 분석을 기본으로 설계대상 선박의 프로펠라 회전에 의해 발생하는 유입수로 인한 침식에 저항할 수 있어야 한다.

표 13. 하중의 조합과 하중계수

Limit State	영구하중					일시하중										돌발하중 및 지진하중							
	DC	DW	WA-1	EH	EV	LS	LLBR	WS	WA-2	WA-3	CRTU	TG	SE	IC	BD	TC	EQ	FR	EX	CT	CV	AN	FD	WA-4
①	1.25	-	1.15	1.0	1.0	1.0	-	1.25	1.3	γ_{WA3}	0.5/1.2	-	γ_{SE}	1.75	-	1.75	-	-						
②	0.9/0.25	0.65/1.5	1.0/1.1	1.5/0.9 1.35/0.9	1.35/1.0 1.30/0.9	1.75	1.75	1.4	1.35	γ_{WA3}	0.5/1.2	-	γ_{SE}	1.75	1.75	-	-	-						
③	1.5	1.5	0.9/1.25	1.5/0.9 1.35/0.9	1.35/1.0 1.30/0.9	-	-	-	-		0.5/1.2	-	-	-	-	-	-	-						
④	0.9/1.25	0.65/1.5	1.0	1.5/0.9 1.35/0.9	1.35/1.0 1.30/0.9	0.5	0.5	-	1.0	1.0	-	-	-	0.5	0.5	-	1.0	-						
⑤	0.9/1.25	0.65/1.5	1.0	1.5/0.9 1.35/0.9	1.35/1.0 1.30/0.9	0.5	0.5	-	1.0	1.0	-	-	-	0.5	0.5	-	-	-						
⑥	1.0	-	1.0	1.0	1.0	1.0	-	0.3	1.0	0.3	1.0/1.2	0.5	γ_{SE}	1.0	1.0	1.0	-	-						
⑦	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.3	1.0	0.3	1.0/1.2	0.5	γ_{SE}	1.0	1.0	-	-	-						

(1) 하중계수 값은 해수위의 상세 조사 자료를 바탕으로 검증되어야함.
(2) 토압에 관한 하중계수의 첫 번째 묶음은 주동토압, 두 번째 묶음은 정지토압에 관한 사항.
(3) 토압에 관한 하중계수의 첫 번째 묶음은 옹벽, 두 번째 묶음은 지중구조물에 관한 사항.
(4) 두값중 큰값은 변형을 고려하기위해 사용되며, 작은값은 기타효과를 고려하기위해 사용.

터널 구조는 좌초 선박, 앵커의 끌림과 낙하, 선박의 침몰에 의한 영향으로부터 보호가

필요하다. 터널 보호공에 사용되는 재료 종류 및 보호층의 두께는 함체 상부에 낙하하는 앵커의 영향에 의해 결정되며, 침매터널 주위의 추가 보호공은 선박의 좌초, 앵커의 끌림과 낙하에 의한 충돌하중을 고려한 해석을 통해 결정된다.

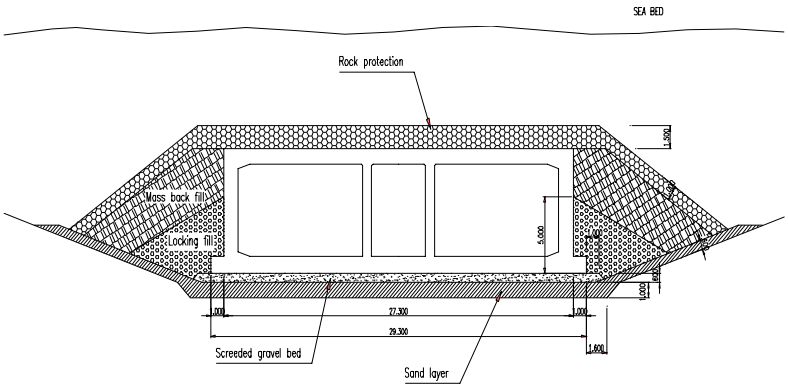

그림 7. 침매터널 보호공

5.4 터널 및 램프의 연결부

모든 연결부의 내구 연한은 100년 기준이며, 내구연한동안 방수가 확보되고, 온도, 크리프 및 지진활동등에 대해 견딜 수 있어야 한다. 또한 차량으로부터 유출될 수 있는 발화성 물질 및 터널내의 화재에 대한 대비가 필요하며, 모든 연결부는 수직, 수평 전단력을 전달하여야 한다.

5.4.1 침설 연결부

침설연결부의 방수장치는 임시 방수를 목적으로하는 Gina 가스켓과 영구방수를 목적으로하는 Omega 씰로 구성된다. 또한 Omega 씰과 Gina가스켓은 최대수심에서 연결부의 방수가 보장되도록 설계하며, 설계에서 예상되는 변형을 허용하여야 한다.

침설연결부는 수평과 수직 방향으로 전단력을 전달하여야 하지만, 내구 연한동안 발생 가능한 지진과 온도, 건조 수축, 회전, 침하, 크리프 등에 의한 변형을 허용할 수 있어야 한다.

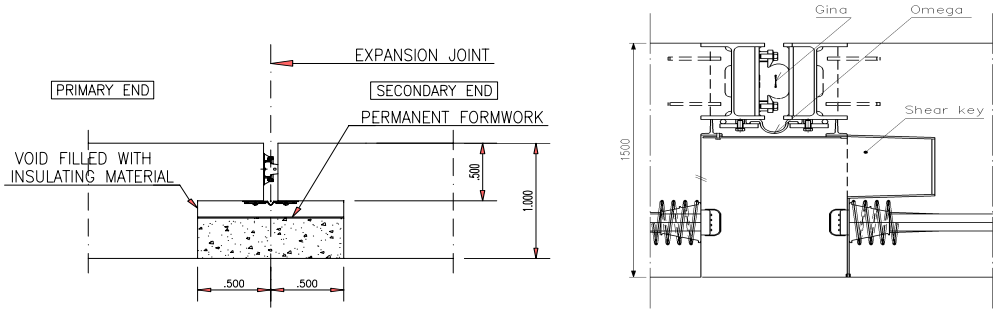

그림 8. 침매터널 침설연결부

5.4.2 최종 연결부

최종 연결부의 시공이음부와 신축이음부에는 주입이 가능한 지수판 설치를 고려해야 한다. 최종연결부는 수평과 수직 방향으로 전단력을 전달하여야 하지만, 내구연한 동안 발생 가능한 지진과 온도, 건조 수축, 회전, 침하, 크리프 등에 의한 변형을 허용할 수 있어야 한다.

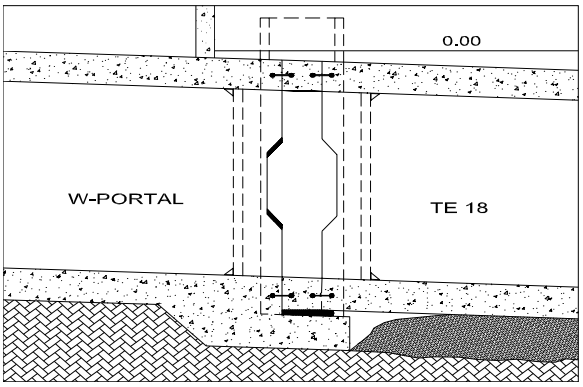

그림 9. 침매터널 최종연결부

5.4.3. 신축 이음

신축이음부는 주입 가능한 지수판과 수팽창 고무지수재 설치를 고려한다. 제안된 신축이음 체계는 방수, 허용변형에 대하여 기능상 조건을 만족하여야 한다.

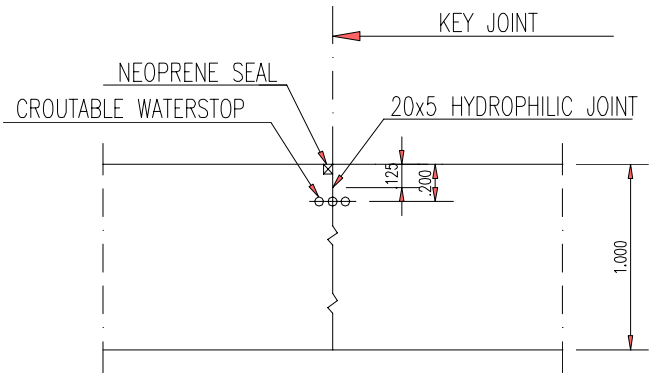

그림 10. 침매터널 신축이음

6. 결 언

부산-거제간 연결도로 사업에 국내 최초로 적용되는 침매터널공법은 하(해)저 터널에 있어서 가장 합리적인 공법이라 하겠다. 이에 따라서 설계 및 시공계획은 국가기반사업의 발

전에 대한 확신을 가지고, 현실적이면서 경제적으로 계획 되었다. 이 공법을 바탕으로 완벽하고 합리적인 시공을 이루어 국내는 물론, 21C 동북아시아 터널설계 및 시공 기술 발전에 기여하고자 한다.

■ 참고문헌 ■

1. (가칭) GK주식회사, “부산-거제간 연결도로 민간투자사업 사업계획서”
2. GK해상도로주식회사, “부산-거제간 연결도로 민간투자사업 설계기준”, 2003. 7.
3. (가칭)GK주식회사, “수정사업계획서”, 2000.