

## 부산-거제간 연결도로 침매터널



**이정상**  
(주) 대우건설 과장  
GK사업관리팀  
설계담당



**김제춘**  
(주)대우건설 부장  
공학박사  
GK사업관리팀  
설계팀장



**조봉현**  
(주) 대우건설 부장  
GK침매터널현장 소장

### 1. 개요

부산-거제간 연결도로 건설공사 프로젝트는 1994년 12월 부산-경남권 광역개발계획을 고시하면서 처음 그 계획이 세상에 알려진 이래로 16년만인 2010년 12월에 드디어 마침표를 찍게 되었다. 1998년 우선협상대상자로 지정된 이후에도 투자유치 등의 문제로 5년여의 시간이 지난 2003년이 되어서야 비로소 기공식을 가지고 지반조사를 시작했다.

지반조사에서부터 설계 및 시공에 이르기까지의 과정은 자연조건과의 끊임없는 투쟁의 연속이었다. 거가대교가 놓이는 위치는 남해동부 먼바다로부터 밀려오는 거친 파도와 거센조류의 영향을 아무런 여과 없이 그대로 받는 외해에 위치해 있다. 또한 수심도 깊고 연약지반의 두께 또한 유례없이 두꺼운 조건이다. 이러한 가혹한 조건들은 침매터널의 설계와 시공에 직접적으로 영향을 미친다. 침매터널은 육상제작장에서 제작하고 부력을 이용해서 물

에 띄워서 현장까지 이동하여 해저면에 가라 앉혀서 현장에서 접합하여 터널을 완성하는 공법이다. 그래서 해상조건은 침매터널시공의 성공여부에 지대한 영향을 미친다. 만약 이러한 악조건에서 침매터널을 성공적으로 시공한 사례라도 있었다면 거가대로 침매터널 시공에 상당한 도움이 되었겠지만 현실은 그렇지 않았다. 철저한 계산과 실험만이 시공상황을 예측해 볼 수 있는 유일한 수단이었다. 계산과 실험을 통한 검증과정은 설계 뿐만 아니라 시공과정에서도 이루어졌다. 수심 또한 도로전용터널로서는 세계에서 가장 깊은 48m이다. 깊은 수심으로 인한 높은 압력은 콘크리트 구조물 자체뿐 만 아니라 구조물과 구조물 사이에 있는 조인트에도 영향을 미친다. 철근콘크리트 형식의 침매터널의 조인트 부분에는 일반적으로 고무재질의 지수재가 적용되는데, 고무재질이므로 수압에 대해서 어느 정도의 저항력을 가지는 지 엄격한 실험과 예측이 필요했다. 조인트에 대한 유지보수의 어려움을 감안하여 세계최초로 모든 조인트에 이중지수시스템을 적

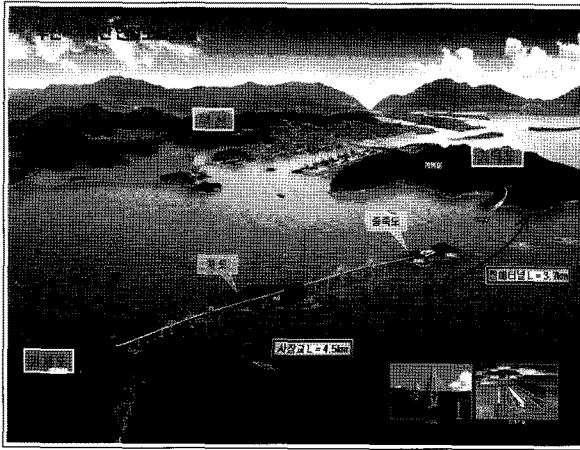


그림 1. 부산-거제간 연결도로 조감도

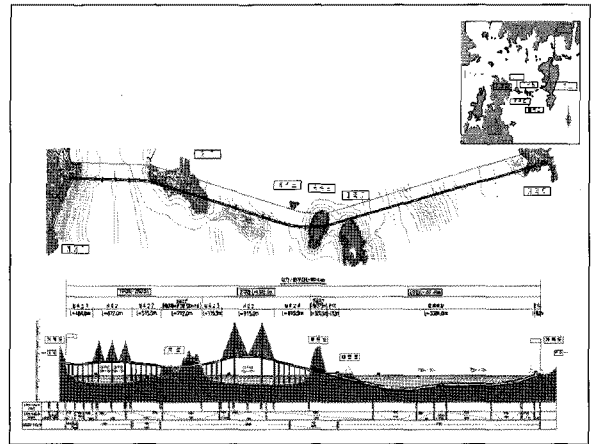


그림 2. 부산-거제간 연결도로 종평면도

용하였다. 침매터널 전구간은 최대 35m 두께를 가진 해성점으로 구성되어 있어서 장기적으로 발생할 수 있는 2차압밀침하 등의 불확실성에 대비하고자 DCM(Deep Cement Mixing)공법을 적용해서 지반개량을 실시하였다.

이처럼 많은 어려움을 극복하고 완공된 국내최초의 침매터널과 관련된 구체적인 사항들은 다음 장부터 소개하고자 한다.

## 2. 사업현황

부산-거제간 연결도로 건설공사는 경상남도 거제시 장목면에서 부산시 강서구 천성동 가덕도를 해상으로 연결하는 총연장 8.2km의 사장교와 침매터널로 구성된 국가 지원 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 혈관으로써의 중추

적 역할을 수행하게 될 전망이다. 부산광역시와 경상남도를 주무관청으로, 사업시행은 GK해상도로(주)가 맡았고 시공은 대우건설 외 6개사로 구성된 GK시공사업단에서 수행했다. 설계는 짧은 사업기간을 고려하여 시공과 동시에 진행되는 Fast-Track 방식으로 진행되었다. 설계기준은 국내 각종 기준과 함께 하중-저항계수설계법(LRFD)을 적용하였다.

특히 침매터널은 국내에서 최초로 적용되는 공법이며 또한 전세계적으로 유례없는 깊은 수심과 외해 조건 등으로 인하여 높은 기술수준을 요하는 고난이도 공사로 세계적인 주목을 받았다.

## 3. 침매터널

침매터널은 강이나 해협을 수저면 아래로 연결하는 터널의 하나로서 그 역사는 오래되었다. 최초의 침매터널은 철도용의 경우 1910년에 미국의 미시간과 온테리오를 연결하는 노선에 적용되었고 도로용은 1924년 미국의 포시에 건설되었다. 유럽과 일본은 1942년에 건설된 네덜란드의 Mass 터널과 1944년에 건설된 오사카 해저터널이 각

각 최초의 침매터널이다. 한국의 경우는 현재 건설되고 있는 부산-거제간 연결도로 침매터널이 최초의 침매터널이다. 20세기 초에 최초의 침매터널이 건설된 이후에 교량이나 굴착터널에 비해서 경제적이고 시공성 측면에서도 장점이 있다는 침매터널의 특징으로 인해서 전세계의 여러 국가에서 지속적으로 침매터널이 건설되고 있다. 국내에서도 침매터널에 대한 수요가 본 사업을 시작으로 지속적으로 증가할 것으로 예상하고 있다.

침매터널의 특징은 경제성과 시공성 측면으로 크게 구분할 수 있다. 경제성 측면에서는 그림 3과 같이 교량 및 굴착터널과 각각 비교해 볼 수 있을 것이다. 대형선박의 진출입이 잦은 주항로를 가로지르는 위치에 설치되는 교량의 경우 통항하는 선박의 규모에 맞춰서 일정한 형하고를 확보해야 하므로 교량의 높이가 높아지고 노면구배를 고려하면 연장이 길어질 수 밖에 없다. 굴착터널은 굴착된 지반의 자체 지보능력이 확보될 수 있는 양호한 수준의 지반조건에 시공이 가능하므로 굴착심도가 깊어지고 그에 따라서 교량의 경우와 마찬가지로 연장이 길어진다. 반면 침매터널은 수저면하에 토피 두께 1~2m로 건설되므로 육상으로 접근하기 위해 필요한 어프로치부의 거리가 상대적으로 짧아서 육상점용면적이 줄어들게 된다. 이에 따라서 관련 공사비, 보상비, 유지관리비 등이 교량 및 굴착터널에 비해서 상대적으로 저렴하게 된다. 물론 이러한 비교는 일반적인 경우에 대한 것이고 프로젝트의 특성에 따라서 유불리에는 다소 차이가 있을 수 있다.

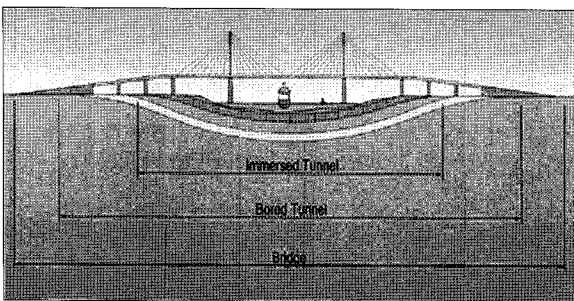


그림 3. 구조물 형식별 연장 비교

침매터널 공법은 그림 4와 같은 주요공정으로 이루어지고 각각의 공정이 개별적으로 평행선상에서 동시에 진행된다. 바로 이러한 점이 침매터널공법의 시공상의 특징이자 장점이다. 즉 공기를 단축시킬 수 있고 품질관리가 용이하다. 콘크리트 자체의 수밀성으로 방수기능을 수행하는 침매터널의 경우 콘크리트 품질관리가 어느 구조물보다도 중요하다. 그런 측면에서 공장에서 제품을 생산하듯이 제작장에서 단위합체를 제작하는 침매터널은 품질관리가 매우 용이하고 공기단축 또한 가능하다.

침매터널 공정을 좀 더 상세하게 살펴보면 합체제작을 위한 콘크리트 타설작업은 특수 제작된 거푸집을 이용하여 콘크리트 양생초기에 발생할 수 있는 관통균열을 방지하기 위해서 일반적인 방식이 아닌 대단면을 한번에 타설하는 일괄타설방식으로 진행되며, 품질관리를 위해서 증기양생 등의 과정을 거쳐 침매합체가 완성된다. 이렇게

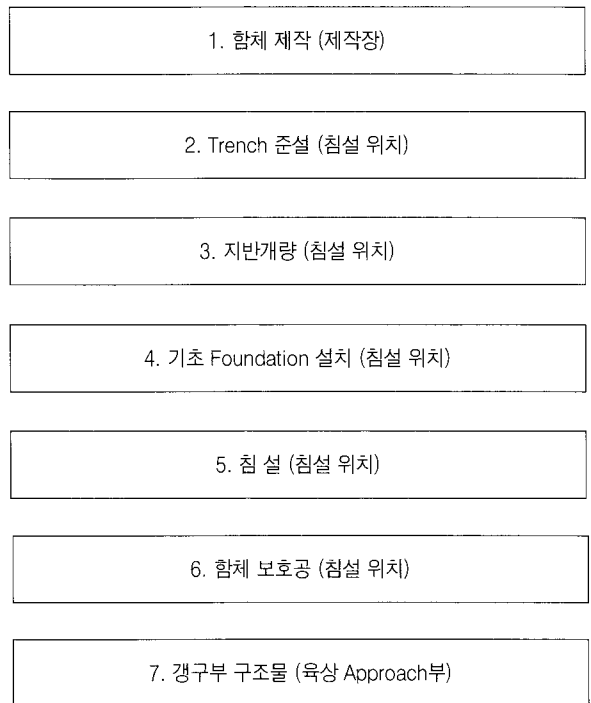


그림 4. 침매터널 주요공정

제작이 완료된 함체를 임시계류장으로 이동시키기 위해 수면 위로 띄우기 위한 준비작업을 하게 된다. 준비작업은 함체 양단에 Bulk head라고 하는 격벽을 설치하는 작업과 드라이독 내부에 물을 채우는 주수작업으로 이루어진다. 주수로 인해서 함체가 급격히 거동하는 것을 방지하기 위해서 주수작업 실시 전에 함체 내부에 설치되어 있는 Ballast tank에 함체 내부배관을 통해 물을 채워 넣는 선행작업을 수행한다. 드라이독에 대한 주수가 완료되면 Ballast tank에 채워져 있는 물을 점진적으로 함체 밖으로 배수함으로써 함체를 띄우는 작업을 실시한다. 띄워진 함체는 드라이독에 설치되어 있는 윈치(Winch)와 예

인선에 의해서 제작장 밖으로 반출된 후에 계류장으로 즉시 예인되어 침설전까지 계류장에 미리 설치되어 있는 앵커 와이어에 고정되게 된다. 계류장에서는 침설을 위한 각종 장비와 가시시설을 설치하는 작업이 이루어진다.

Trench 준설, 지반개량, 기초 Foundation 조성 등 함체 침설 전에 침설위치에서 이루어져야 할 선행공정이 완료되어 함체 침설이 가능해지면 국내최초로 적용되는 기상예보시스템을 통해서 해상기상조건을 최종 확인한 후에 계류장에서 침설현장까지 함체를 예인하여 운반 한다. 침설위치에 함체가 도착하면 사전에 미리 설치해 둔 앵커 와이어를 함체에 연결하는 작업을 수행하여 파도와 조류

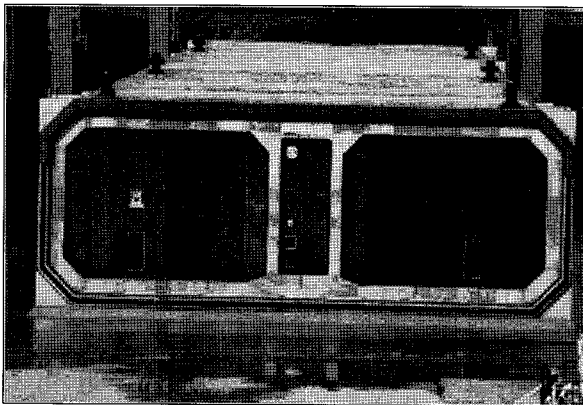


그림 5. 격벽(Bulk head) 설치

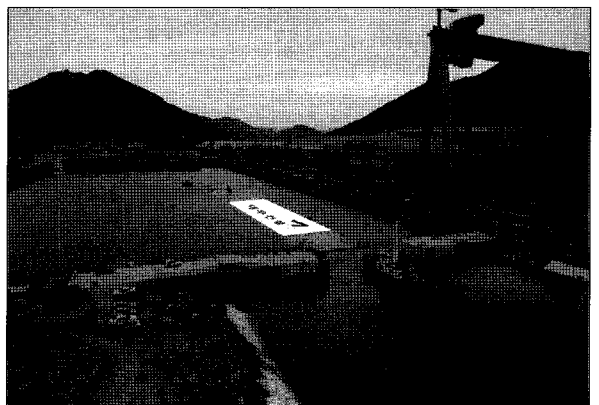


그림 6. 드라이독 주수 및 함체 반출

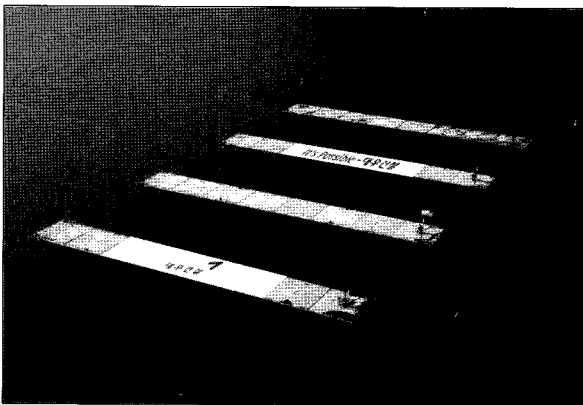


그림 7. 임시계류장

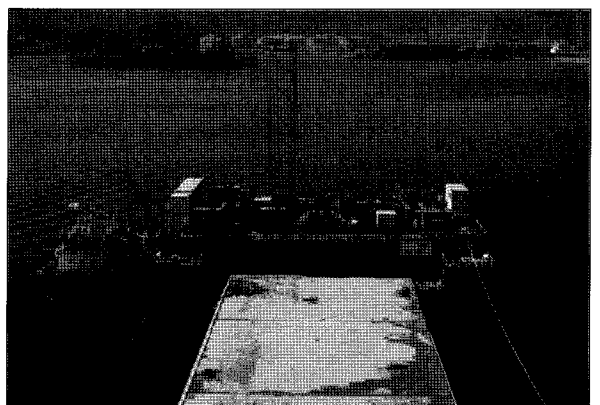


그림 8. 침설을 위한 준비작업(계류장)

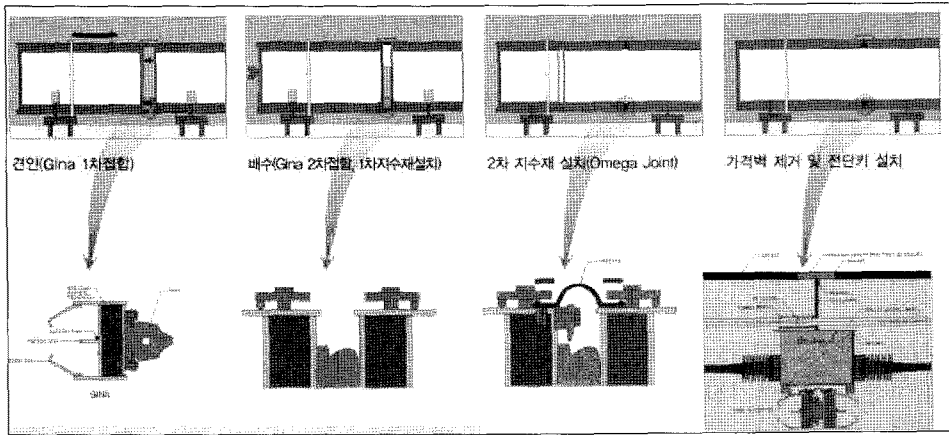


그림 9. 침매터널 접합 및 조인트 부 공정

에 대한 함체의 안정성을 확보한 후에 함체 내부에 설치된 Ballast tank에 물을 채워 넣어 함체를 서서히 가라앉혀서 기설함체와의 접합면에서 50cm가 이격된 위치에서 기초에 안착 시킨다. 함체가 안착된 후에는 함체의 정확한 위치를 측정하기 위한 장치와 1차 접합을 위한 유압잭을 설치하는 작업을 수행한다. 이러한 작업이 완료되면 침매함체의 접합공정과 함체 배면 뒤채움 및 보호공 작업을 순차적으로 진행하게 된다.

침매터널의 접합 및 조인트부에 대한 공정은 그림 9와 같이 유압잭의 견인에 의한 1차접합, 함체 사이의 공간에 있는 물의 배수에 의한 2차접합, 2차지수재의 설치, 가력벽 제거 및 전단키 설치의 순으로 이루어진다.

함체 운반 및 침설/접합 작업은 매 단위 함체 마다 실시되고 이러한 작업과 함체 내부에서 실시되는 작업들이 완료되면 비로소 침매터널이 완성되는 것이다.

#### 4. 침매터널 시공

침매터널은 제작장에서 단위 함체를 제작한 후에 제작된 함체를 부력을 이용하여 설치 위치까지 해상으로 운반

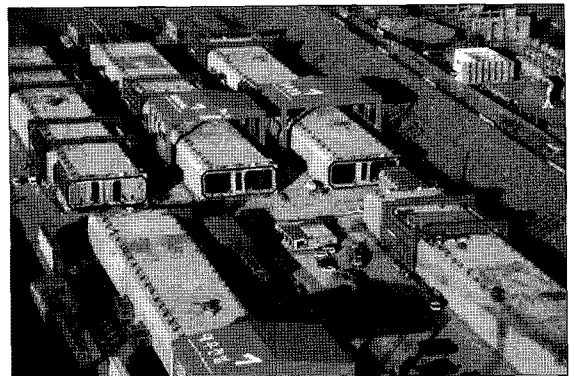


그림 10. 침매터널 제작장(경남 통영)

하여 설치하는 공법으로서 총 18함체를 한번에 네 개에서 다섯 개를 동시에 경남 통영의 안정에 위치한 제작장에서 제작하였다.

침매터널구간은 18개의 함체로 구성된 침매터널 본선과 육상으로 진입하는 부분인 가덕도와 중죽도에 각각 설치되는 갱구부의 개착식터널로 구분할 수 있다. 침매터널 본선의 경우 2008년 2월에 첫 번째 함체의 침설을 가덕도 측에서 시작하여 태풍 내습기를 제외하고 매일 한 함체 꼴로 침설을 실시하여 2010년 5월까지 총 18개 함체의 침설을 완료하였다. 한편 양측 갱구부에 각각 설치되는 개

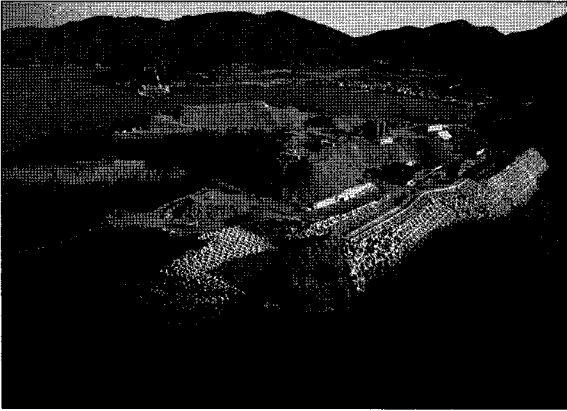


그림 11. 동측갱구부 전경(가덕도)

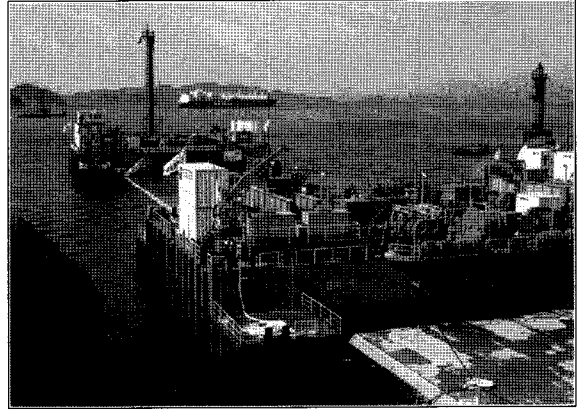


그림 12. 첫 번째 합체 침설

착식 터널은 가덕도측의 동측갱구부는 1번합체의 침설을 위해서 먼저 시공되었고, 마지막 합체인 18번 합체가 접합되는 서측갱구부는 18번 합체의 접합에 앞서서 시공이 완료되었다.

1년 중 태풍내습기인 6월에서 9월까지의 3개월을 제외하고는 매월 침설작업을 진행해야만 준공시기인 2010년 말까지 공사를 완료할 수 있을 정도로 매우 빠듯한 일정 하에서 공정이 진행되어서 숨 돌릴 틈조차 없는 것이 현실이었다. 일정상으로 한 치의 실수도 용납할 수 없는 상황이었으므로 돌발적인 상황이나 공정에 지장을 줄 수 있는 변수가 발생했을 때는 시공사업단에 소속된 구조, 해양, 지반 등 각 분야 기술진의 역량을 집중해서 이를 해결해 가면서 공정을 진행하였다.

세계 최초의 침매터널이 미국 미시간에 시공된 이래로 100여개 이상의 침매터널이 시공되었음에도 불구하고 그 사례를 찾아 볼 수 없을 정도의 열악한 환경조건에 더해 국내 최초라는 현실로 인해서 국내는 물론이고 외국의 전문가들조차 명확한 답을 주지 못하는 수많은 결정의 순간들을 오로지 열정 하나로 극복하고 그림 12와 같이 국내 최초 첫 번째 합체를 2008년 2월에 침설하는데 성공하였다. 물론 첫 번째 이후로 침설과정에서 난관이 없지는 않았으나 첫 단추가 어렵게 꿰어진 이후로 나머지 단추들

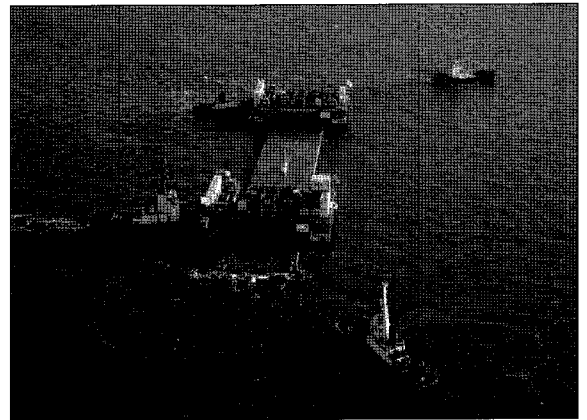


그림 13. 합체 침설을 위한 Positioning

은 순서에 맞춰서 차례차례 꿰어졌다. 그림 12의 첫 번째 합체 침설사진은 침매터널이 설치되는 해역에 대한 여러 가지 정보를 담고 있다. 합체 뒤쪽으로 대형컨테이너선이 지나고 있는 것을 보면 이곳이 대형 선박의 진출입이 잦은 주항로임을 알 수 있고 인근에 부두가 없음은 외해임을 시사하는 것이다.

앞서 언급한 것 처럼 침매터널은 그 세부 공정 전반에 대해서 상당히 높은 수준의 정밀도를 요하고 있는 반면에 주변 환경은 정밀시공에 매우 불리하다. 그래서 이러한 불리한 조건을 극복하고 정밀한 시공을 담보해 내기 위해

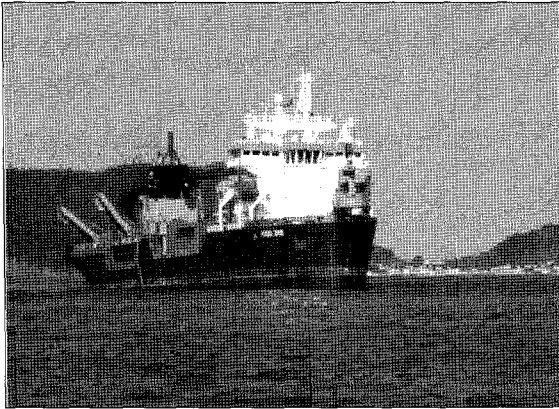


그림 14. 침매터널 트렌치 준설에 적용된 준설선

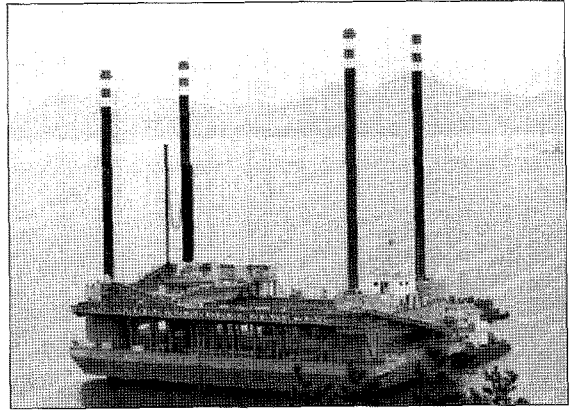


그림 15. 침매터널 기초자갈 포설장비

서 준설, 기초자갈포설, 침설 등의 공정에 개선 또는 개발된 장비를 적용하였다. 침매터널을 해저면 아래에 설치하기 위해 필요한 트렌치를 만드는 준설공정에 요구되는 수직 방향 허용시공오차 수준은  $\pm 0.5\text{m}$ 이고 이를 달성하기 위해서 네덜란드 국적의 Trailing Suction Hopper Dredger를 적용하였다. 본 사업구간의 대수심에 맞게 장비의 규모를 조정하였다.

함체의 하중을 트렌치 저면에 균등하게 전달하기 위해서 트렌치 준설이후에 약 1m 두께의 기초자갈을 포설하게 된다. 만약 트렌치 저면을 매우 균등하게 준설할 수 있다면 별도의 기초가 필요하지 않을 수도 있을 것이다. 하지만 현실은 그렇지 못하므로 함체의 하중을 전달하는 역할을 하는 소위 침매터널 기초가 필요하고 이는 그 시공 방법에 따라서 크게 두가지로 구분되어 진다. 함체를 패드 형식의 가 기초 위에 유압잭 등을 이용하여 임시로 거치한 후에 트렌치 저면과 함체저면 사이에 존재하는 공간을 모래, 시멘트 몰탈, 콘크리트 등으로 채워 넣는 방식이 그 한가지이고 높은 정밀도 수준으로 자갈을 포설하여 기초를 조성하고 그 위에 함체를 즉시 올려 놓는 방식이 또 다른 한가지이다. 폭 26.5m, 높이 9.97m, 길이 180m의 함체를 높은 파도와 빠른 조류의 외해조건에서 수직 및 수평 방향으로  $\pm 50\text{mm}$  내의 허용위치오차 내에서 정밀

하게 접합하고 뒤채움까지 완료하기 위해서는 기상조건이 허락하는 시간 내에 침설작업을 완료해야만 한다. 이러한 작업에 허락되는 시간은 5일 정도이고 이 시간은 이 지역에 대한 국지적이고 광역적인 해상 및 기상정보를 분석하여 산출된 것으로 침설가능 기상조건을 모두 고려하여 산출된 것이다. 침설이 가능한 기상조건을 만족하는 시기가 연중 또는 월간 중 매우 제한적이기 때문에 주어진 시기에 침설을 실시하지 못할 경우 전체 공정에 상당한 지장을 줄 수 있다. 그래서 되도록이면 침설공정을 단순화하고 시간을 단축시키는 것이 침설성공 여부를 판가름하는 매우 중요한 요소가 된다. 이러한 이유로 본 침매터널에는 자갈을 포설하고 함체를 즉시 거치하는 방식을 적용하였다. 이 방식을 적용하기 위해서는 정밀한 포설을 담보할 수 있는 시공방법과 장비를 확보하는 것이 무엇보다 중요하다. 장비를 확보하는 것은 쉽지 않은 또 하나의 과제였다. 본 사업구간과 같은 깊은 수심과 외해조건에서  $\pm 40\text{mm}$ 의 허용포설오차 기준을 만족하면서 작업을 수행한 사례나 장비가 전 세계적으로 전무한 상태에서 2007년 6월에 장비개발에 착수해서 시험시공을 모두 마치고 2008년 2월에 실제 작업에 적용하는 쾌거를 이루었다. 현재 침매터널을 계획하고 있는 홍콩이나 미국에서도 이 장비에 대해서 관심을 가지고 문의해오고 자료를 요청



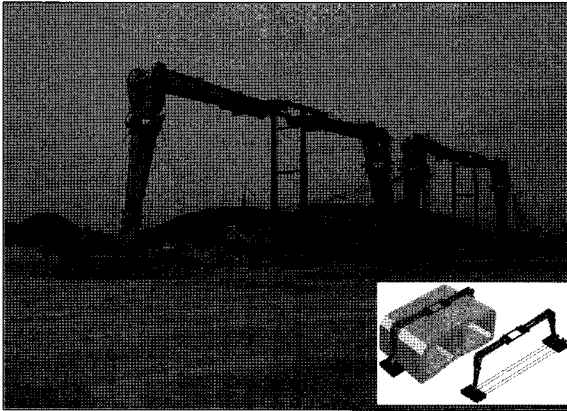


그림 16. EPS(External Positioning System)

할 정도로 그 우수성을 인정받고 있다.

최종 집합과정에서 전후좌우, 상하 전 방향으로 함체를 미세 조정할 수 있는 EPS(External Positioning System)라 명명한 특수 장비를 세계최초로 개발해서 본 사업에 적용하였다. 이 또한 열악한 환경조건을 극복하기 위한 것으로 조류 등으로 인해서 위치가 틀어진 함체를 조정하기 위한 목적으로 개발된 것이다.

## 5. 지반조건

광역적인 관점에서 침매터널구간은 낙동강 하구지역에 속하고 있어서 부산신항만 지역에서 분포하고 있는 지반과 유사한 면도 있지만, 근해라는 특수성도 있기 때문에 다른 면도 있다. 본 침매터널구간의 지반조건에 대한 이해를 위해서 인근지역의 지반조건과 비교하였다.

그림 17에서 A~D는 부산신항만지역이고 E는 침매터널구간이다.

액성한계와 압축지수와의 관계를 나타낸 그림 19에 나타나 있듯이 침매터널구간의 액성한계가 인접지역의 액성한계 보다 상당히 높으며 최대 WL = 110~120%의 범위에 있다. 액성한계가 크게 되면 침하량과 직접 관련이

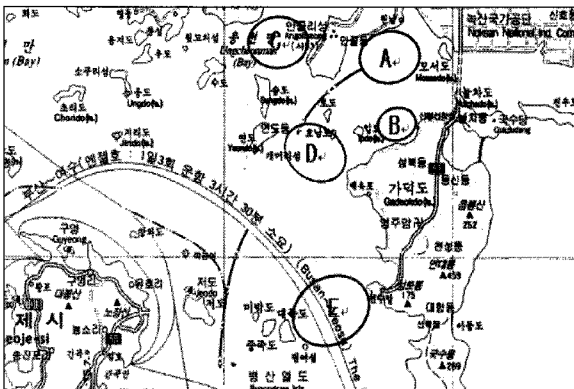


그림 17. 침매터널구간과 부산신항만 지역

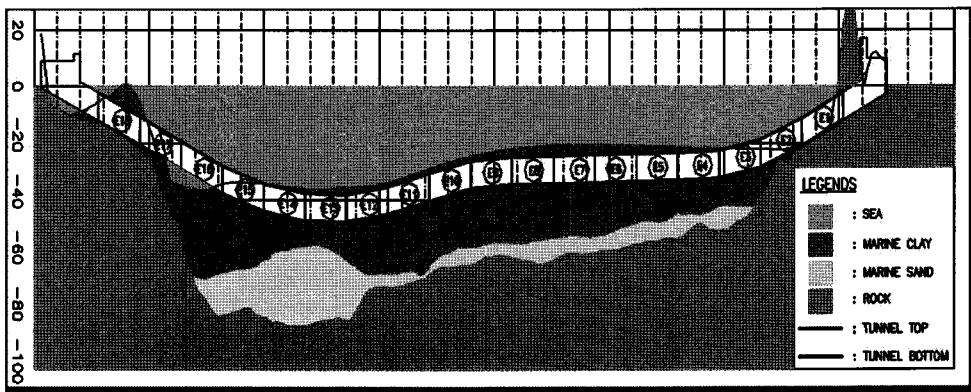


그림 18. 침매터널구간 지반 Profile



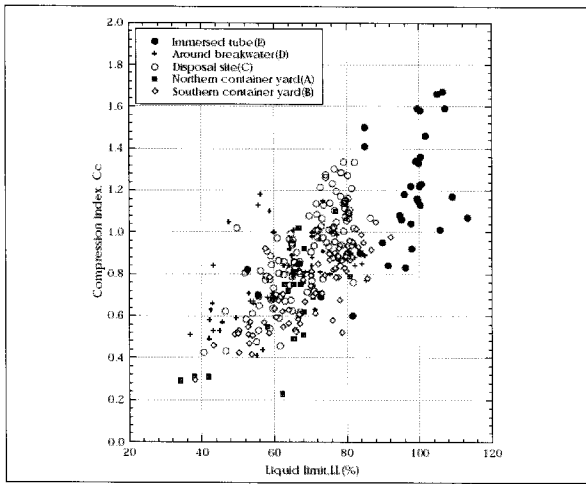


그림 19. 액성한계와 압축지수의 관계

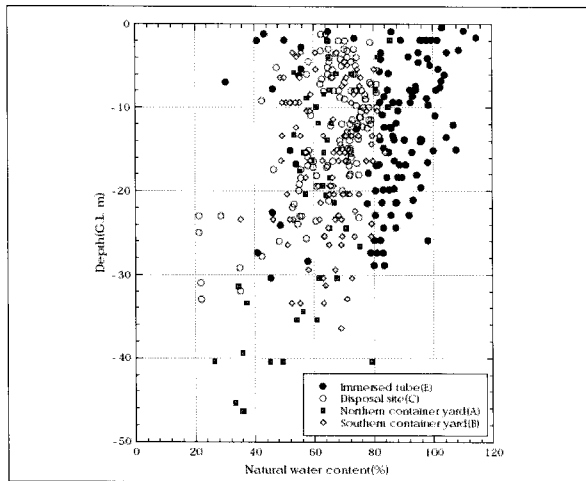


그림 20. 자연함수비

있는 압축지수도 증가하는 경향을 보인다. 이는 인접지역의 압축지수 보다 상당히 높은 수준으로 상대적으로 고압축성의 특성을 가지고 있음을 알 수 있다. 자연함수비는 그림 20과 같이 80~100% 범위에 분포하고 있어서 인접지역에 비해 높은 경향을 보이고 있다. 이 또한 주변지역에 비해 고소성이고 고압축성인 점토가 분포하고 있음을 보여주는 것이다. 고소성의 점토는 압밀도 저소성에 비해 매우 적으므로 압밀소요기간이 길어질 수 있다. 주변지역

과의 비교에서도 알 수 있듯이 침매터널구간의 점토는 고압축성이고 압밀에 소요되는 기간도 길 수 있다.

### 5.1 지반개량

침매터널은 해저면에 미리 트렌치를 굴착해 놓고, 육상 Dry Dock에서 적당한 길이로 분할하여 제작한 침매함을 설치 지점까지 예인 운반하여, 트렌치에 차례로 침설시켜 침매함끼리 수압차를 이용하여 접합한 후에 되매우기 및 보호공으로 매설하여 터널을 완성하는 공법이다. 침매함 설치 후에 원지반에 작용하는 하중이 설치 전에 원지반에 작용했던 하중보다 적으므로 침매터널 공법을 적용하는 지반에 요구되는 조건은 크게 까다롭지 않은 것이 일반적이다. 하지만 부등침하에 매우 민감한 침매터널의 구조적 특징으로 인해 지반의 특성을 심도있게 검토하고 그 결과에 따라서 적절한 대책을 수립해야 하는 경우도 있다. 본 사업 침매터널의 경우 세계적으로 사례가 없는 최대 50m의 깊은 수심과 외해조건 그리고 최대 35m 두께의 연약지반에 적용된다. 이러한 깊은 수심과 외해조건으로 인해 부등침하에 영향을 미치는 트렌치 준설, 기초자갈 포설, 매설 등의 작업에 기대할 수 있는 정밀도가 매우 제한적일 수 밖에 없다. 또한 침매터널 전구간에 걸쳐 두껍게 분포하고 있는 매우 연약한 정규압밀 점토로 인해 부등침하가 지속적으로 발생할 가능성이 있다.

기본설계단계에서는 지반개량을 하지 않는 것으로 계획하였으나 깊은 수심과 외해조건으로 인해 발생할 수 있는 각종 시공상의 불확실성을 고려하여 민감도 분석을 실시한 결과 지반개량 또는 깊은 기초 등의 형식을 적용할 필요가 있다고 판단하여 실시설계단계에서는 각종 적용 가능한 공법을 비교 검토하였다. 침매터널은 Element라 불리우는 다수의 단위 합체로 구성되어 있고 이들 합체는 Gina gasket이라는 가요성 조인트로 연결되어있다. 또한 단위합체는 8개의 세그먼트로 구성되어 있고 제작장에서 제작시에 세그먼트 사이에는 시공조인트가 있게 되고 이

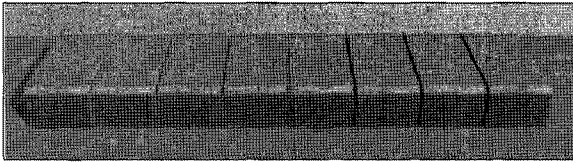


그림 21. 침매합체 개념도

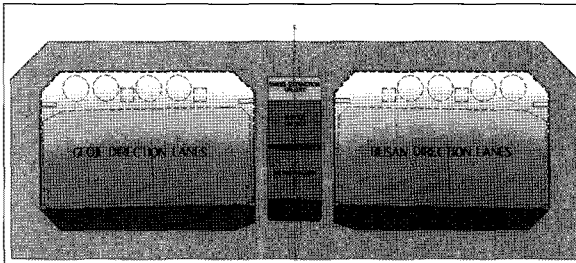


그림 22. 침매터널 단면도

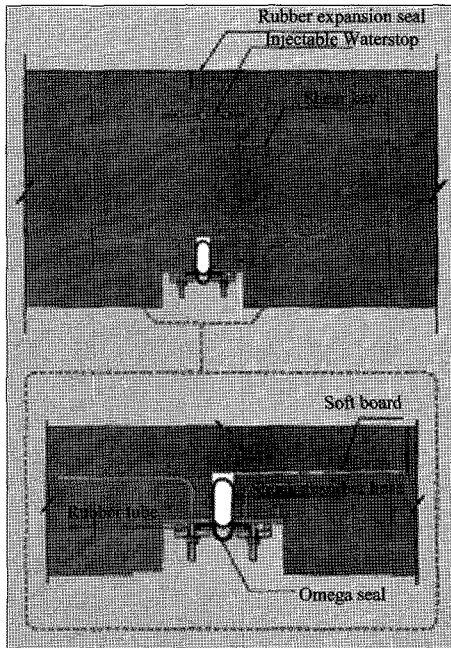


그림 23. 세그먼트 조인트

시공조인트에는 Waterstop 이라는 가요성 재료의 지수재가 설치된다. 이러한 구조적인 특징으로 인해서 단위합체 사이와 세그먼트 사이에 벌어짐을 유발할 수 있는 지반의

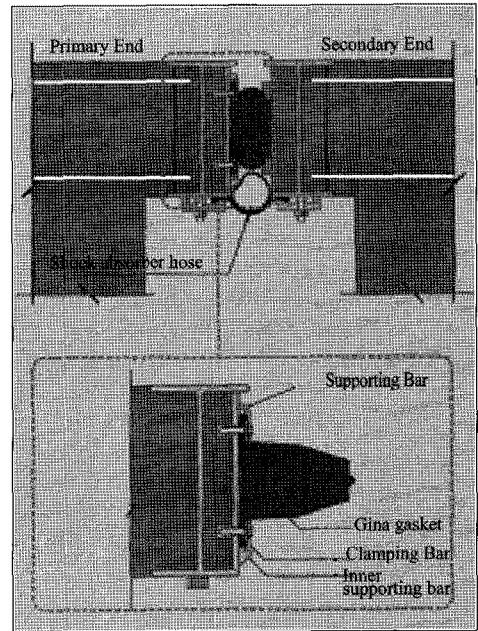


그림 24. 침설조인트

부등침하는 전침하에 비해서 엄격하게 제한된다.

## 5.2 CDM (Cement Deep Mixing) 공법의 적용

앞서 언급한 본 사업구간의 자연환경적 특성과 구조물의 특성을 고려하여 일부구간에 대해서 하부기초 지반개량공으로 심층혼합처리(CDM; Cement Deep Mixing)공법이 적용되었다. CDM 공법은 국내에서 일반적으로 적용되고 있는 DCM 공법과 동일한 공법으로 국제적으로 통용되고 있는 용어를 적용하기 위해서 CDM으로 명하였다. DCM(심층혼합처리)공법은 연약지반을 고화재와 교반 혼합하고, 고화재와 연약지반의 간극수에 의한 수화작용, 수화생성물과 점토광물의 이온교환작용, 포졸란 반응을 주체로 하는 화학반응 및 흙과 시멘트의 치환작용 등으로 단시간에 말뚝형태로 개량체를 형성하여 연약지반의 강도를 증대시키는 개량공법으로, 연약지반에 시공되는 구조물의 기초지반을 개량하거나 흙막이 벽체로 사용하기

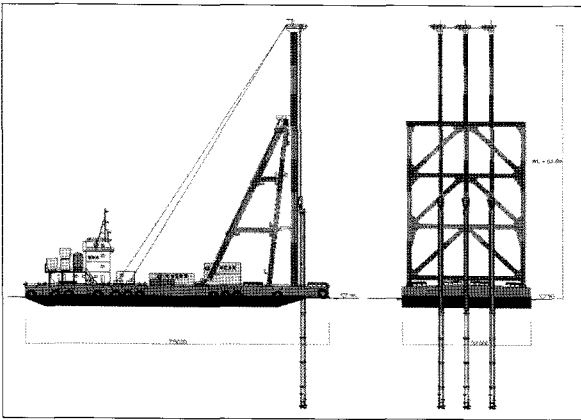


그림 25. CDM 해상전용선(동아지질)

위해 개발되었다. 이 공법은 저소음·저진동 시스템으로서 단기간에 지반을 개량할 수 있으며, 토질특성에 따른 고화재의 종류와 양을 선택하여, 목표로 하는 강도를 확보할 수 있다. 원지반 상태에서 고화·개량하는 공법이므로 발생잔토(부상토)가 적으며, 시공 및 품질관리가 용이한 특징이 있다. 빠른 조류와 높은 파도 등 열악한 외해조건에서 안정된 개량작업을 수행하기 위해서 동아지질에서 개발한 그림 25와 같은 해상전용선을 적용하였다.

### 5.2.1 CDM Design concept

그림 28과 같이 동시에 조성되는 직경 1.0m의 말뚝 4개가 개량체의 최소단위가 되고 이러한 단위개량체를 종방향으로는 주열로 배열하고 횡방향으로는 터널의 하중분포에 따라서 그 간격을 조정하였다. 개량체의 선단은 점토에 비해서 좀 더 견고한 층으로 판단되는 모래사갈층에 근입되지 않고 점토층 내에서도 상대적으로 큰 강도를 가진 하부 점토층까지 근입하는 것으로 일명 부상형기초(partial depth foundation)로 하중분배의 개념으로 설계하였다. 이 개념은 구조물과 뒤펀으로 인한 주요하중이 CDM공법으로 조성된 침하저감요소(settlement reducing element)를 거쳐서 상대적으로 견고한 하부점토층으로 전달되므로서 하중분배(load-sharing concept)를 통해서

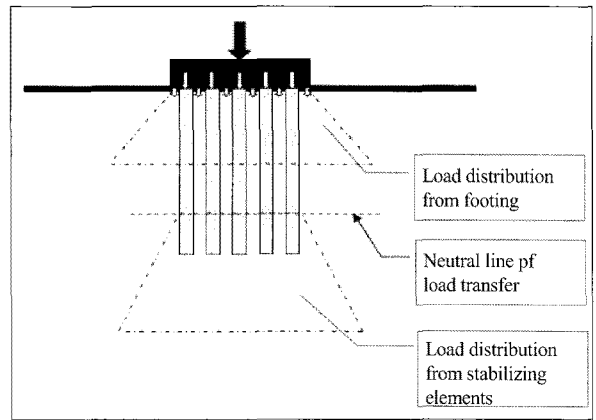


그림 26. Load sharing concept

침하를 조절하기 위한 것으로 전반적인 침하에는 덜 민감하지만 부등침하에는 상대적으로 민감한 세그멘탈 형식의 침매터널 구조특성을 고려한 것이다. 즉, 침하저감요소에 의해 전침하량을 최소화하므로서 전침하량에 비해 크질 수 있는 부등침하도 최소화하는 것이다. 하중분배개념이 가진 또 하나의 중요한 이점은 기초와 침하저감요소 사이에 점진적인 하중전달을 통해서 균형에 도달하는 ‘Self-adjusting’이다.

### 5.2.2 CDM Design approach

앞서 언급한 설계개념을 구체화하는 과정에서 아래와 같은 다양한 조건들이 개량체의 배열을 결정하는 주요 변수로 고려되었고 하중과 지반조건변화 등의 형태로 해석에 반영되었다.

- 터널단면상에서 최대하중이 작용하는 뒤펀부에 대한 고려
- 준설과 뒤펀의 시공오차로 인해 발생하는 작용하중의 종방향 변화
- 선박침몰하중, 침수 등 사고로 인한 하중 고려
- 종방향 및 깊이에 따른 지반물성의 변화
- 대형파도, 지진, 선박 Anchor에 의해 야기되는 수평하중

개량 범위, 개량체의 배열, 개량심도 등의 주요설계는 그림 27과 같은 순서로 진행되었다.

우선 지반개량의 필요성과 침하양상을 파악하기 위한 사전검토단계로 개량되지 않은 원지반상태에서의 전침하

량과 부등침하량을 계산하였다. SLS(Service Limit State), ULS(Ultimate Limit State), ALS(Accidental Limit State) 등 각 하중상태에서의 침하량을 산출한 결과 허용치를 상회하는 하중상태가 있는 것으로 확인되어 하중분배개념의 최적화된 침하저감요소를 적용하여 침하량을 조절하는 것으로 결정하였다. 다음 단계로 차후 수행될 단면2차원 해석과의 비교, 검증의 목적으로 1차원의 전통적인 침하해석을 실시하였다. 최종 단계로 PLAXIS FEM Program을 사용하여 2차원 해석을 수행하여 지반과 구조물의 상호관계를 파악하고 개량체의 배열, 심도, 범위 등을 결정하였다. 이 과정에서 지반변수의 변동성과 시공오차등을 고려하여 민감도분석(Sensitivity analysis)을 또한 실시하였고 그 결과를 반영하여 최적화된 배열을 결정하였다. FEM에 의한 해석에 있어서 어떤 모델을 적용하느냐 하는 것도 매우 중요하다. 그래서 Mohr-Coulomb model을 적용해서 예비검토(Preliminary study)를 수행하여 그 결과를 사전에 실시했던 1차원 침하해석결과와 비교하였고, 최종 상세검토과정에서는 가장 신뢰성있는 결과를 보여줄 것으로 판단되는 Hardening Soil(HS) model

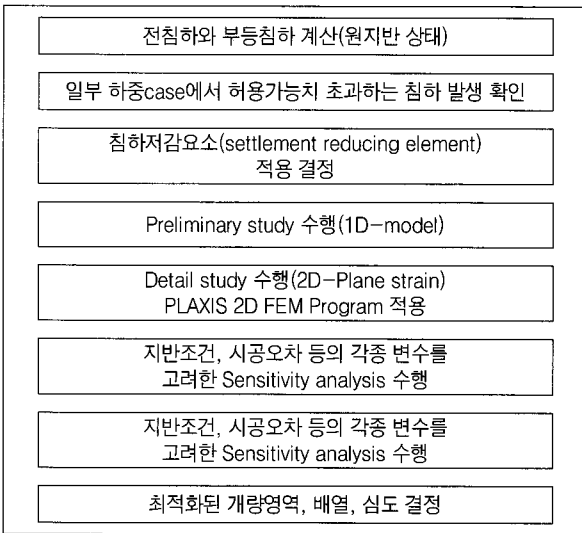


그림 27. Design approach

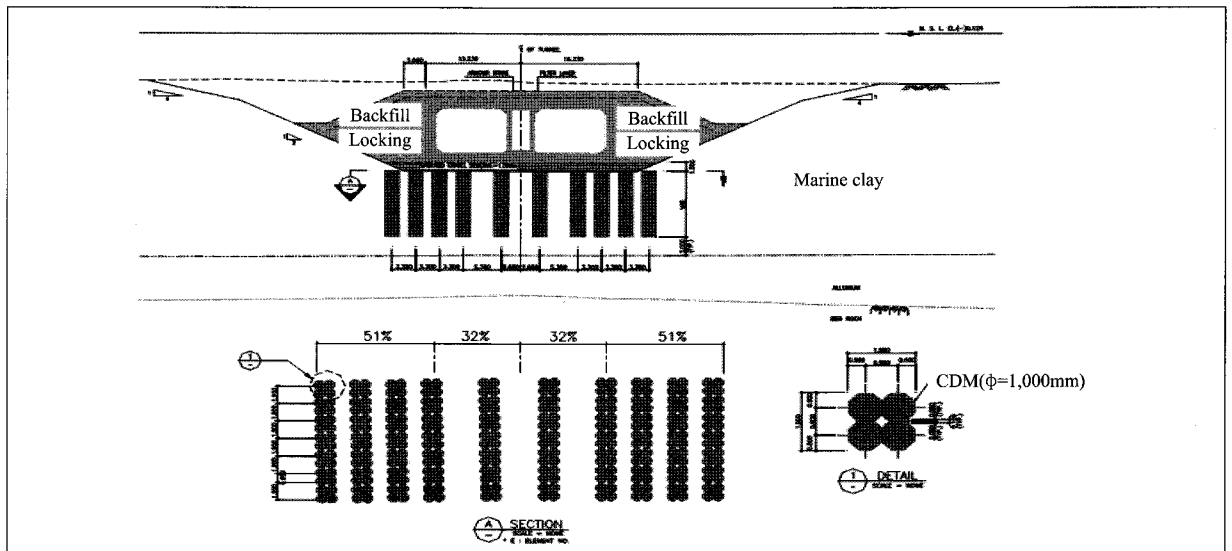


그림 28. CDM배열 표준단면도

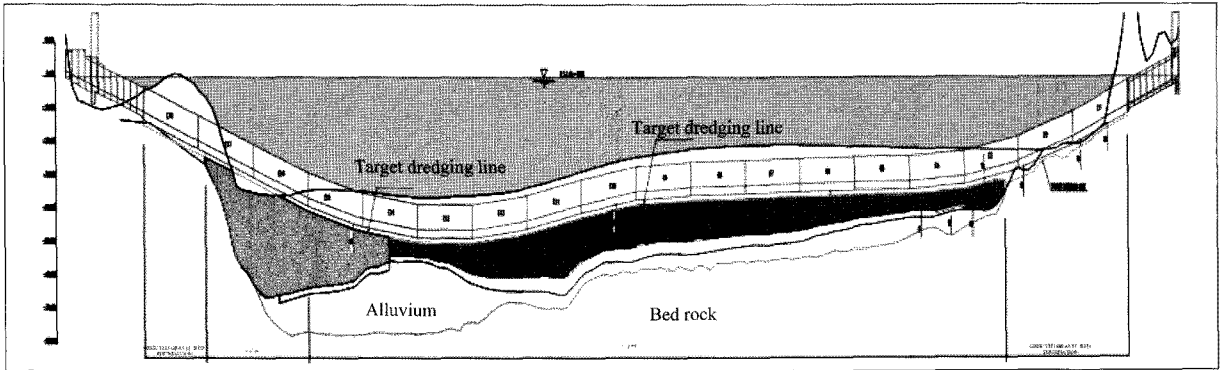


그림 29. 침매터널구간 CDM 개량영역 단면도

표 1. 실내시험 배합조건

구분	배합조건	비고
함수비 (%)	70~80, 80~90, 90~100	3 종류
시멘트량 (kg/m <sup>3</sup> )	125, 175, 200, 225, 250	5 종류
물-시멘트비 (%)	80, 90, 100	3 종류

표 2. 시험시공적용 배합조건

TYPE	시멘트량 (kg/m <sup>3</sup> )	물-시멘트비 (%)	물의양 (kg)	4축1m당 시멘트량 (kg)	4축1m당 슬러리량 (kg)	분당 페이스트 분사량 (L/min)	m당 시공속도 (min/m)
A	125	100	378	378	489	400	1.2
B	150	100	454	454	547	400	1.4
C	175	100	529	529	605	400	1.5

을 적용하였다.

이러한 설계과정을 거쳐서 그림 28과 같은 최종 단면이 결정되었다. 그림 28의 단면은 표준단면이고 연약지반의 두께와 종방향 위치에 따라서 개량심도에 차이가 있어서 표준단면과는 약간 상이한 단면이 몇 개의 section에 존재한다.

그림 29에서 파란색으로 표현된 부분이 CDM 공법이 적용된 영역이다.

### 5.2.3 CDM 배합결정 및 시공

CDM 개량체의 설계강도는 800 kPA로서 시공시에 이

값을 만족할 수 있도록 시공전 사전 배합설계를 수행하였다. 배합설계에 필요한 정보를 얻기 위해서 실내시험 및 현장시험시공을 계획하였고, 현장시험시공에 앞서서 시험시공에 적용할 배합조건을 최적화하기 위해서 표 1과 같이 함수비, 시멘트량, 물-시멘트비를 변수로 해서 실내시험을 수행하였다.

실내시험결과를 분석하여 표 2와 같이 설계기준강도를 만족하는 몇 가지 type을 결정하고 외해의 시공조건을 반영하기 위해서 침매터널 본선 옆의 위치에서 시험시공을 실시하였다. 시험시공결과에 대한 평가는 코어채취에 의한 일축압축강도시험, 탄성파탐사, 프레스미터 test로 구

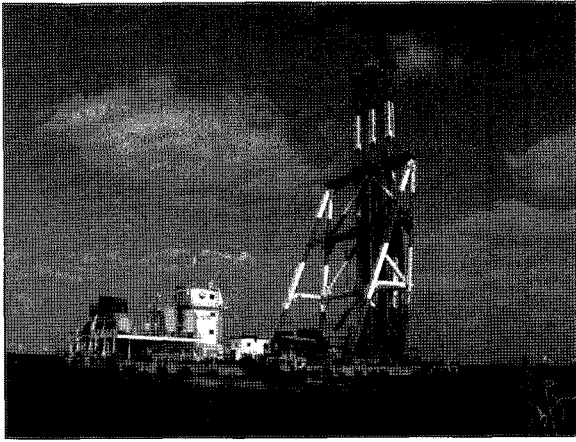


그림 30. 작업중인 CDM 해상전용선(동아지질)

성되었다. 시험시공결과를 분석하여 최종 C-type으로 결정하였다.

개량 영역의 전 구간에 걸친 품질확인 시추조사와는 별개로 실제 시공결과를 침하량으로 확인하고자 CDM에 의

한 지반개량을 모두 완료한 이후에 본선의 개량된 지반에 층별침하계를 설치하고 영구하중 수준의 하중을 사석성 토채로 재하하여 일정기간 침하량을 측정하였고, 측정된 침하량은 설계에서 예상했던 수준 보다는 다소 적은 수준임을 확인하였다.

## 6. 맺음말

2003년 지반조사를 시작한 이래로 수많은 역경과 난관을 극복하고 마지막 마침표를 성공적으로 찍기 위해서 쉼 없이 달려왔다. 후대에 부끄럽지 않을 토목구조물을 남기기 위해서 피와 땀으로 젊음과 열정을 바쳤다. 거가대로는 국내 토목기술을 한 단계 발전시킬 수 있는 밑거름이 되길 기원한다.