

# 부산-거제간 연결도로 침매터널 기초 Bed 시공 사례



김민철  
(주)유신  
부산-거제간 연결도로 감리단 이사  
(y11108@yooshin.co.kr)

## 1. 서론

부산-거제 간 연결도로 공사는 국가지원 지방도 58호선의 일부로서 경상남도 거제시 장목면 유희리와 부산광역시 강서구 천성동 가덕도를 총연장 8.2km의 왕복 4차 도로로 연결하는 노선이며, 주요시설로는 주 항로 구간의

침매터널 3.7km와 예비항로 구간의 2주탑 사장교 및 3주탑 사장교, 접속교, 산악터널 일부로 구성되어 있다. 이중 침매터널은 가덕도와 중죽도로 연결되는 해저터널로서 침매터널과 육상부의 도로를 연결하기 위하여 침매터널 서쪽 끝단 부에 대죽도와 중죽도 사이를 일부 매립하여 침매터널 갱구부를 조성하고 동쪽 끝단 부에는 가덕도



그림 1. 부산-거제간 연결도로 노선 현황

에 일부 매립을 하여 갱구부를 조성하는 것으로 계획하였다. 개착식 터널을 제외한 침매터널 연장은 3,240m로서 높이 9.75m, 폭 26.5m, 길이 180m의 합체 총 18개로 구성되어 있다.

침매터널은 제작된 합체가 부상되어야 하는 조건, 침설이 가능해야 하는 조건, 그리고 하상이나 해상에서 계속 안정된 상태로 유지되어야 하는 조건을 동시에 만족해야 하는데 이 3가지 조건은 서로 상반되기 때문에 합체 단면 크기, 재료의 단위 중량, 물의 밀도 등에 대해 상당한 정밀도가 요구된다. 또한, 공사중 침설이 가능하고 완공 후 부상에 대한 안정성을 확보하기 위하여 터널 내부에 발라스트(Ballast)가 필요할 정도로 상당한 부력이 작용하므로 침매터널 자중의 일부만이 지반에 하중으로 작용하게 되어 연약지반에서도 별도의 지반보강이 없이 Sand Flow, Sand Jet, Gravel Bed 등 준설면 기초만으로 시공이 가능하다. 그러나 당 현장의 경우 세계적으로 침매터널 시공사례가 없는 20~45m의 수심과 외해, 최대 33m인 연약지반 조건 등 열악한 현장여건과 합체 침설시 시공 오차, 온도변화, 콘크리트의 크리프 및 수축, Gina의 이완, 지진에 의한 거동, 침물선박, 침수에 의한 하중, 지반의 부

등침하 등으로 인해 야기 될 수 있는 조인트 오프닝을 최소화하고자 지반조건을 고려하여 지반보강이 시행되었으며, 합체를 해지면 하부에 거치하기 위한 준설과 침설 전 불균등한 준설면에 대한 평탄성 및 상재하중의 균등배분을 확보하기 위한 합체 기초 Bed공사가 병행되고 있다.

본고에서는 본 침매터널에 적용되어 공사 중인 기초 Bed공법에 대해 기본개념, 시공방법, 수치해석결과 및 시공 정밀도 측정기법 등을 소개하고자 한다.

## 2. 침매터널 지반보강 및 준설

### 2.1 침매터널 지반보강공법

침매터널은 겉보기 비중이 1.1 정도로서 기초지반에 작용하는 하중이 선행압밀하중보다 작아 이론적으로 침설후 침하가 발생하지는 않으나 부산-거제 간 연결도로 침매터널의 경우는 최대 50m에 가까운 깊은 수심, 외해로부터의 파랑, 조류 등 시공여건이 상당히 나빠 준설오차를 크게 할 수 있다. 이 경우 되메우기 사석하중의 증가

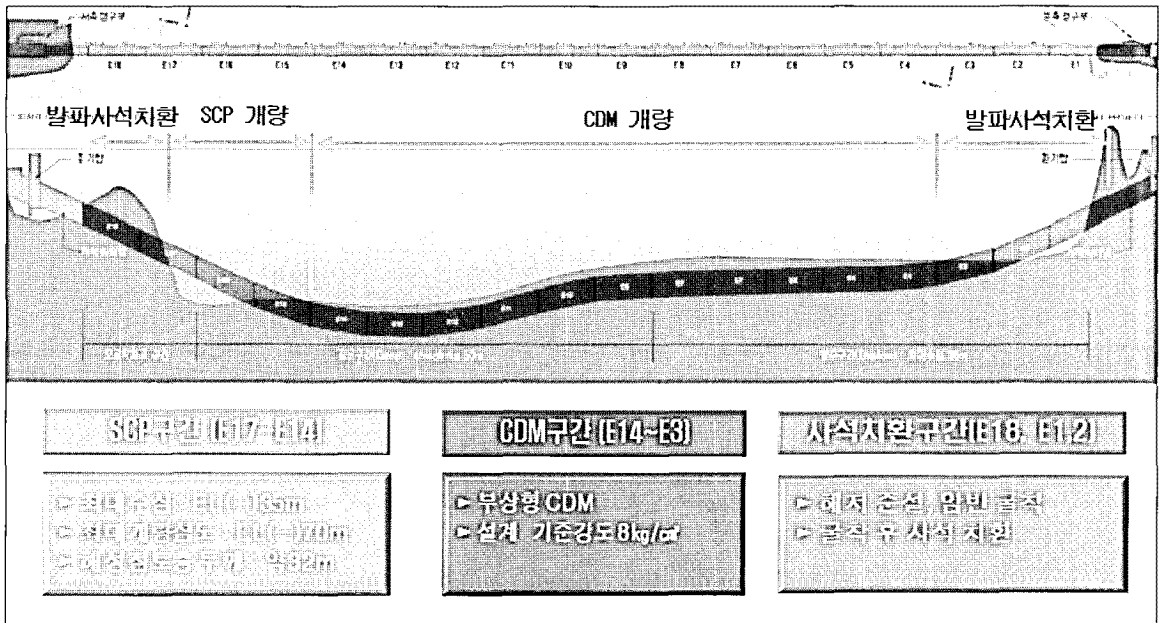


그림 2. 침매터널 지반개량공법 적용

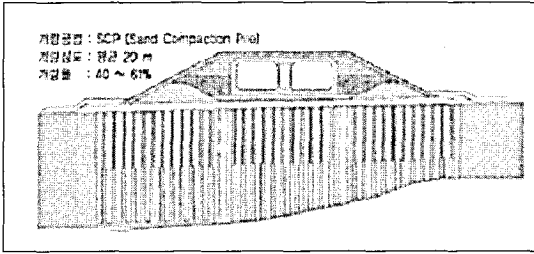


그림 3. SCP 지반개량 대표단면

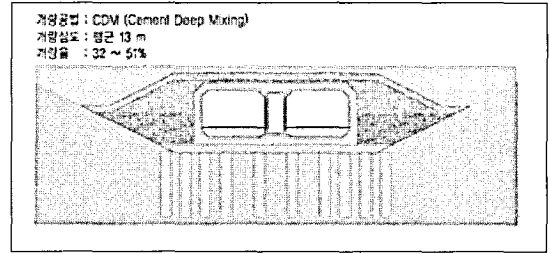


그림 4. CDM 지반개량 대표단면

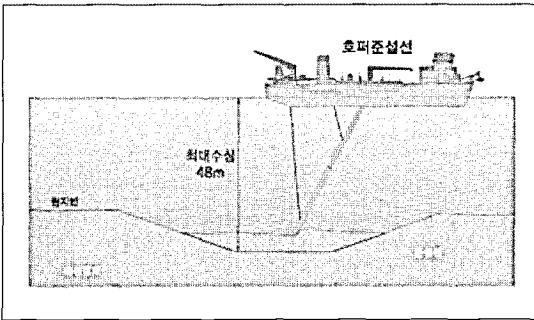


그림 5. 호퍼준설 개념도

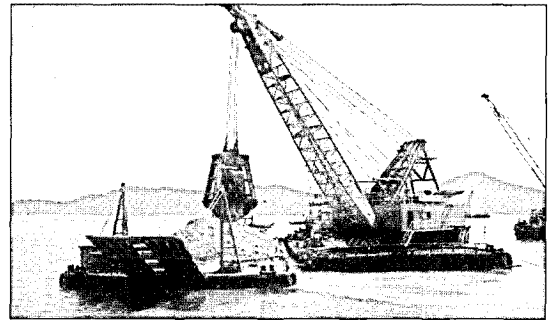


그림 6. 그라브준설 전경

에 의해 발생하는 장기침하량을 예상하기가 곤란하므로 함체 E3~E14 구간은 CDM공법, E14~E17 구간은 SCP와 Preloading 공법으로 지반 보강하였다.

## 2.2 침매터널 준설공법

침매터널에서 트랜치 준설은 굴착심도가 깊어서 굴착면의 높은 마무리 정도가 요구되므로 기초지반을 교란시키지 않는 굴착방법이 요구된다. 주로 펌프식 준설선 및 그라브(Grab) 준설선이 사용되며, 시공 능력을 고려하여 2단계로 준설하는데 우선 대규모로 거칠게 1차 준설시공 후 마무리 정도를 높이면서 교란을 방지할 목적으로 2차 준설을 시행하는 것이 일반적이다.

본 침매터널 CDM 개량구간은 해상점토가 두껍게 분포하고 있어 CDM 개량 전 심해작업에 적합한 자항식 호퍼준설선(Trailing Suction Hopper Dredger)을 사용하여 1차 준설한 후 그라브 준설선을 통해 2차 정밀준설을 시행하였다. 또한, 동쪽 및 서쪽갯구부 암반구간에서는 수중압 발파 후 그라브 준설선을 활용하였다.

준설경사는 CDM 개량구간은 허용 가능 오차, 준설 가능 경사, 시공성 등을 고려하고 최종적으로 사면안정해석을 통해 해저면으로부터 3m 깊이까지는 1:4로 하고 하부층은 1:2로 준설경사를 다르게 적용하였다. 암반사석치 환구간은 층적층과 기반암으로 구성되어 있고 대부분 층적층을 준설하게 되므로 일부 연약대가 포함된 층적층은 1:2, 기반암은 1:0.5로 경사를 고려하였다.

## 3. 침매터널 기초공법

### 3.1 침매터널 기초공법 개요

침매터널은 완성된 상태에서 걸보기 중량은 부력보다 약간 무거울 정도로 되며 흙 하중을 포함하면 부상에 대한 안전율이 1.25이고 지반반력이 30kN/m<sup>2</sup> 로서 특별히 기초가 필요치 않은 것이 특징이다. 그러나 기초 하부지반이 불균등하고 지반침하가 발생하는 경우 이에 대한 대책으로 여러 가지 기초형식과 공법이 적용되고 있다. 기초

형식으로는 크게 독립지방식과 연속지방식이 있으며, 여기서 독립지방식은 수중 교각, 교대 및 독립말뚝으로 합체를 지지하는 일종의 수중교량 형식으로 지반침하 대책으로 주로 활용되고 연속지방식은 지반침하가 적은 안정된 지반에 기초지반과 합체를 밀착시킨 직접기초형식으로 조성방법에 따라 Screed방식, 모래뽑어넣기 방식, 모르터 주입공법 및 수중콘크리트 공법 등이 있다.

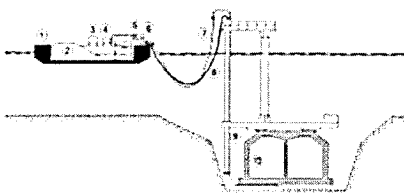
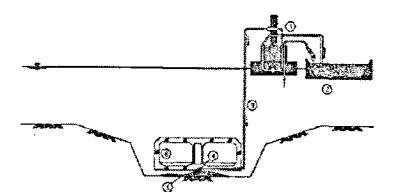
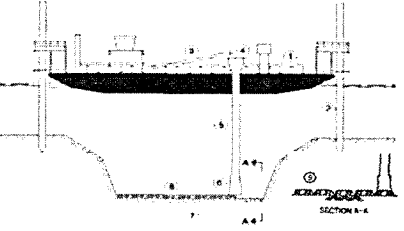
부산-거제 간 침매터널은 침하저감을 위하여 지반보강이 선행되어 연속지방식 중 공법 비교를 통해 직접 Screed 방식인 Gravel Bed 공법을 채택하였으며, 암발파 사석치환 구간에서는 Gravel Bed와 시멘트 Grout 주입 공법을 병행하였다.

### 3.2 침매터널 기초공법 계획

부산-거제 간 침매터널 기초공법은 기본 및 실시설계 단계에서 Grouted Gravel Bed와 Gravel Bed 공법이 동시에 검토되었으나 포설면에서 ±20mm 수준까지 정밀 포설이 가능한 장비가 개발됨에 따라 최종적으로 Leveled Gravel Bed 공법이 현장 적용되었다.

합체 기초공법중 Grouted Gravel Bed는 자갈 포설후 침설 합체를 가거치대를 이용하여 지지가 된 상태에서 합체내부에 설치된 Pipe를 통해 Grout를 주입하는 방법으로 균등한 포설면이 확보되나 Grout 주입과정 및 경화까지의 5일 이상이 소요되어 이 기간에 변화되는 해상환경

표 1. 침매터널 기초공법 비교

기초공법	개념도	구성 요소	특징
Sand Jet		① 공급 Barge ② 모래 적재 ③ 콤프레서 ④ Water Supply Sand ⑤ Water Nozzle ⑥ 슬러리 펌프 ⑦ 슬러리 배출호스 ⑧ 공기배출호스 ⑨ 배출파이프 ⑩ 가거치대위 합체	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 합체가 지지 필요</li> <li>• 지진시 액상화</li> <li>• 지진시 안정화 대책으로 시멘트 혼합</li> <li>• 입자간 분리</li> <li>• 최대수심 시공사례 : 30m</li> </ul>
Sand Flow		① Sand Pumping 장치 ② 모래 공급 Barge ③ Pipe 라인 ④ 기 설치된 모래공급 Pipe ⑤ 배출 모래 ⑥ 가거치대위 합체	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 합체가 지지 필요</li> <li>• 지진시 액상화</li> <li>• 입자간 분리</li> <li>• 최대수심 시공사례 : 30m</li> </ul>
Gravel Bed (채택)		① 폰툰 ② Squd Lag ③ 컨베이어 벨트 ④ 호퍼 ⑤ 트레이미 파이프 ⑥ Scraeder Unit ⑦ 1차 포설 ⑧ 포설면 ⑨ 포설단면	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 합체가 지지 불필요</li> <li>• 지진시 액상화에 대해 안정</li> <li>• 입자간 분리 적음</li> <li>• 최대수심 시공사례 : 40m</li> </ul>

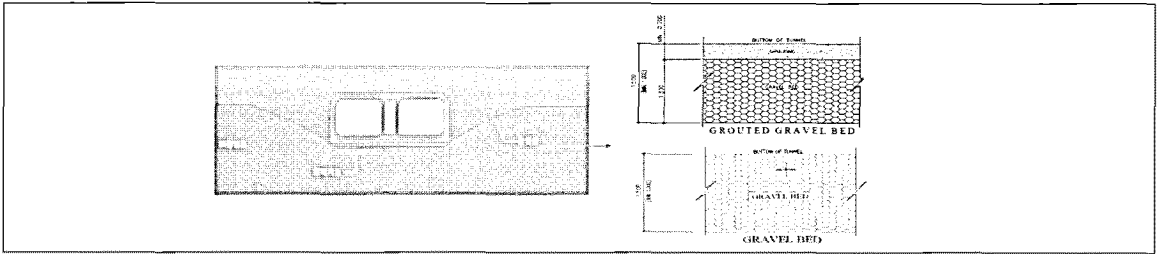


그림 7. 기본 및 실시설계단계 기초 Bed공법 적용

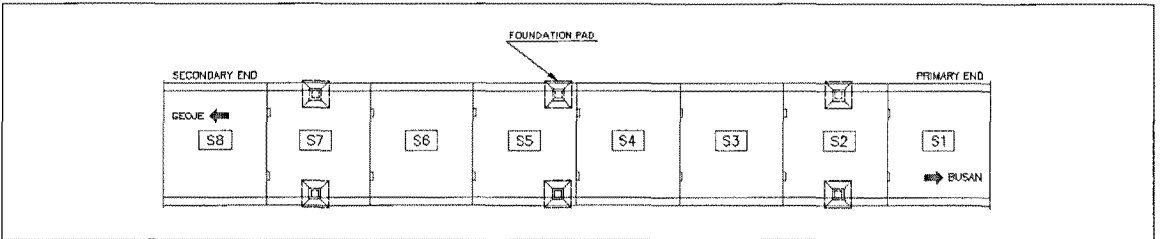


그림 8. 콘크리트 Pad 위치도

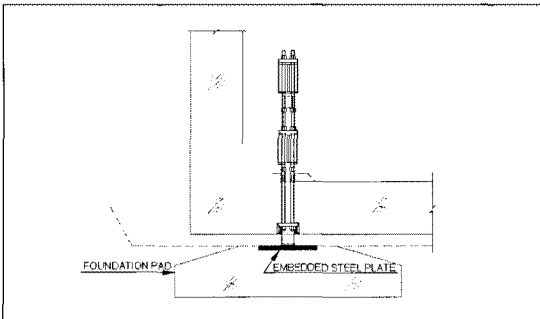


그림 9. 임시거치 개념도

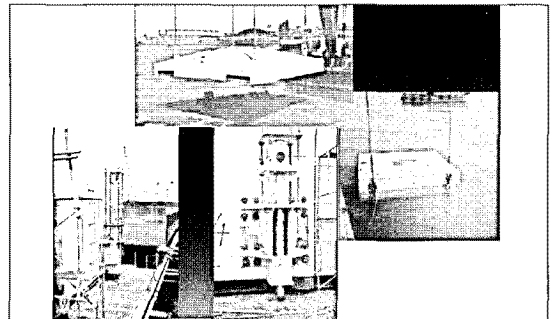


그림 10. Hydraulic Jack 및 콘크리트 Pad

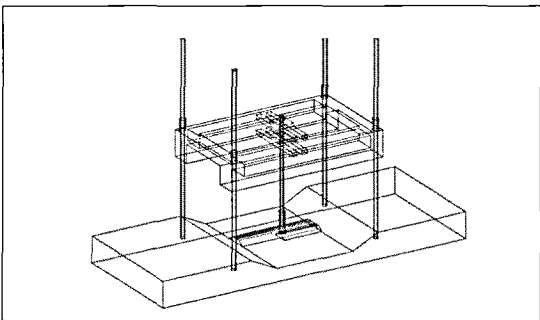


그림 11. Gravel Bed 포설 개념도

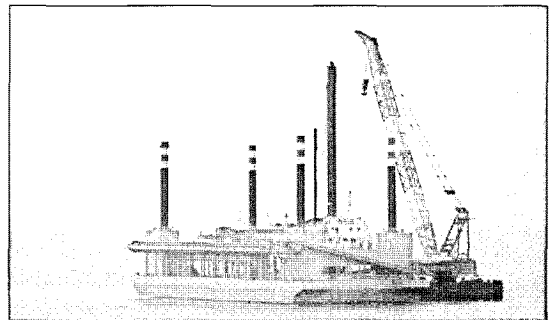


그림 12. 자갈정밀포설장비

에 노출되므로 합체 정위치 이탈에 따른 안정성이 저하되는 단점이 있다.

합체기초 설치의 목적인 포설정밀도 향상을 위해 사업

진행 중 자갈 정밀포설장비를 개발하였으며, Gravel Bed를 포설하고 합체를 자갈포설면에 직접 거치하여 Full Ballast가 확보됨에 따라 합체 안정성이 향상되었다.

### 3.3 정밀포설장비의 시공오차

기초자갈 정밀포설장비의 개발은 세계적으로 유일하게 자갈포설장비를 소유한 Boskalis사(네덜란드)의 모델을 바탕으로 제작되었으며, 포설형식 및 원리는 Boskalis의 모델이 투입된 바 있는 오레슨드 침매터널(덴마크-스웨덴, 도로/철도터널)과 유사하다. 정밀포설장비는 4개의 Leg로 지지가 되는 Jack Up Barge형식으로 대차가 레일 위로 이동하면서 트레미관을 통해 자갈이 포설되며, 해상운반된 자갈은 콘베이어 벨트를 통해 트레미관으로 공급된다. 시공위치와 Level은 포설장치 Deck 및 트레미관 상단에 부착된 RTK GPS와 육상에 설치된 Total

Station을 활용하였다. 그러나 포설장비가 육상에서 멀어질수록 정도가 저하되어 침매함 E5부터는 Trimble R7 GNSS GPS를 이용하여 측정 정밀도를 향상시켰다.

침매터널 기초포설 시험시공은 2008년 1월에 Gravel Bed 포설 시공속도, 정밀도 및 시공 시 문제점 등을 파악하고자 실제 시공환경을 반영하여 침매함 E2 위치에서 시행되었으며, 실제 노선 경사 및 형상에 따라 4개의 Line을 포설한 후 Gravel Bed Group 간의 평균포설오차 및 포설계획고와 실제 포설레벨과의 허용오차가 시방기준인  $\pm 20\text{mm}$  이내임을 확인하였다. 그림 16, 17은 Gravel Bed 포설허용오차 기준을 개념도로 나타낸 것이며, 그림 18, 19는 부산-거제간 연결도로 침매터널과 오

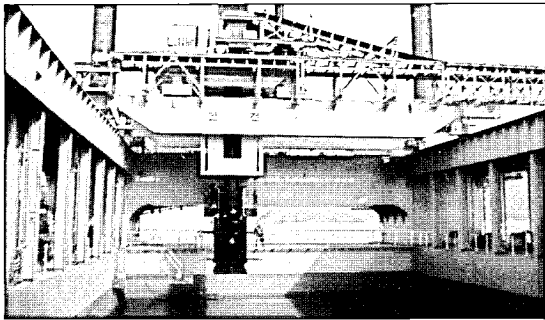


그림 13. 트레미관 및 대차

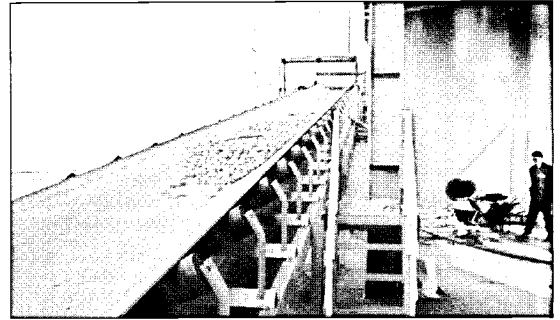


그림 14. 자갈공급을 위한 벨트콘베이어

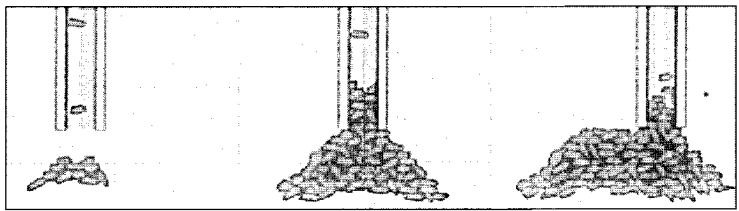
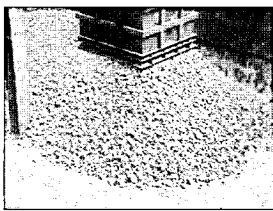


그림 15. 트레미관을 이용한 골재의 포설

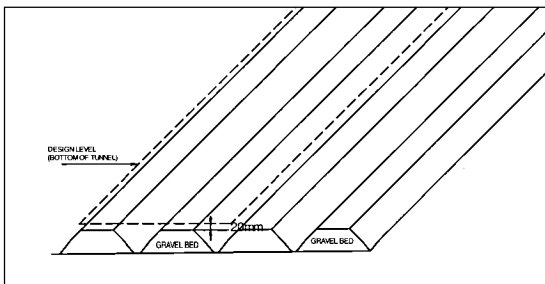


그림 16. 계획고와 실패설레벨간 오차

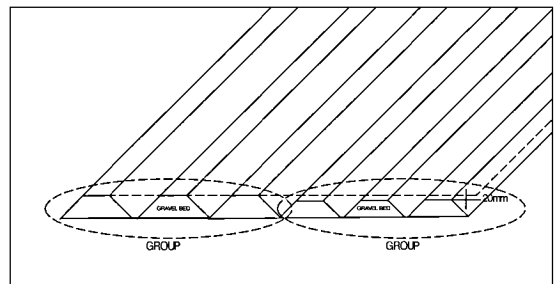


그림 17. GROUP간의 평균포설오차

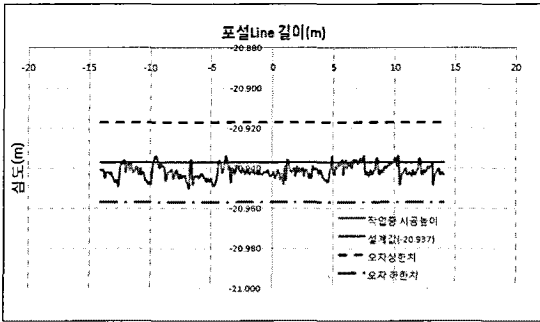


그림 18. 부산-거제 침매터널 포설오차 측정

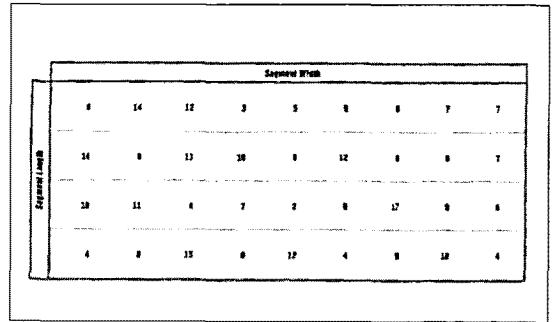


그림 19. 오레슨드 침매터널 포설오차 측정

레슨드 침매터널 과의 포설 Layer의 표면 오차 확인방법을 비교한 것이다.

### 3.4 자갈기초(Gravel Bed)의 해석 개념

부산-거제 간 침매터널 기초공법으로 Gravel Bed는 정밀포설장비의 개발에 따라 포설오차의 최소화가 가능함에 따라 적용되었으며, 포설오차의 허용범위를 결정하고자 구조해석을 실시하였다. 기초 포설과정에서 일정한 규모로 돌출된 포설오차(High Point)가 발생한 것으로 가정된 후 구조해석을 통해 합체의 단면력(휨모멘트, 전단력)과 전단키에 미치는 영향을 고려하였다.

특히 암발파사석치환 구간에서는 ROBOT 3D와 2차원 SAP 구조해석프로그램을 이용하여 가정된 돌출 포설오차를 제거하기 위해 필요한 하중을 산정한 후 전단키의 작용하중에 추가하여 전단키 용량에 적합한지 확인하였으며, 연성 구간(CDM, SCP 개량구역)에서는 지반범용 프로그램인 PLAXIS 3D를 이용하여 포설 오차가 합체의 단면력에 미치는 영향을 파악하였다.

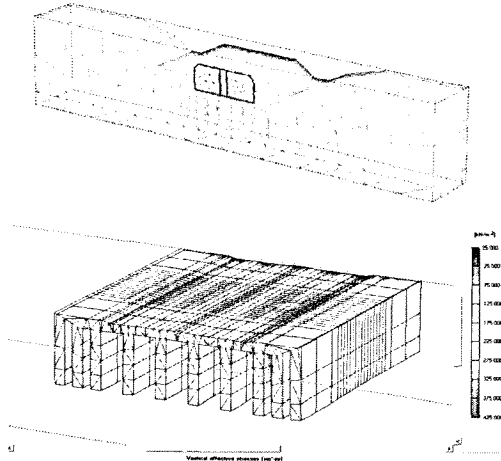
### 3.5 자갈기초(Gravel Bed) 해석 결과에 따른 현장 적용

침매터널 하부 지반 조건이 암반인 경우 견고한 지반

표 2. 기초 Gravel Bed 포설오차에 따른 해석 내용(계속)

지반조건	해석 모델	해석 내용
암반사석 치환구간		<ul style="list-style-type: none"> <li>• 작용하중 조건                     <ul style="list-style-type: none"> <li>- 상시 하중상태(SLS)</li> <li>- 극한 하중상태(ULS)</li> <li>- 돌발 하중상태(ALS)</li> </ul> </li> <li>• High Point 조건                     <ul style="list-style-type: none"> <li>- 균등한 표면</li> <li>- 10~50mm 돌출부</li> </ul> </li> <li>• 해석결과                     <ul style="list-style-type: none"> <li>- 합체 세그먼트 조인트 내 전단키에서 허용 가능한 추가하중을 고려</li> <li>- 포설오차 10mm를 초과하는 경우 추가하중이 전단키의 허용능력(Capacity)을 넘어 불안정한 것으로 나타남</li> </ul> </li> </ul>

표 2. 기초 Gravel Bed 포설오차에 따른 해석 내용

지반조건	해석 모델	해석 내용
연성구간 (CDM 및 SCP 개량)		<ul style="list-style-type: none"> <li>• 작용하중 조건                     <ul style="list-style-type: none"> <li>- 극한 하중상태(ULS)</li> </ul> </li> <li>• 재료조건                     <ul style="list-style-type: none"> <li>- 투수성 큰 재료 Drained Mohr-Coulomb</li> <li>- Marine Clay Hardening Soil Model</li> </ul> </li> <li>• High Point 조건                     <ul style="list-style-type: none"> <li>- 높이 : 50mm</li> <li>- 크기 : 2×2.5m</li> </ul> </li> <li>• 해석결과                     <ul style="list-style-type: none"> <li>- 횡방향, 종방향 모멘트, 전단력이 균등한 경우보다 허용범위내에서 증가</li> </ul> </li> </ul>

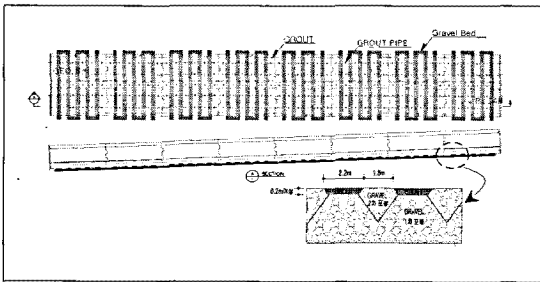


그림 20. 암반구역내 배열식 Gravel Bed + Grouting 시공도

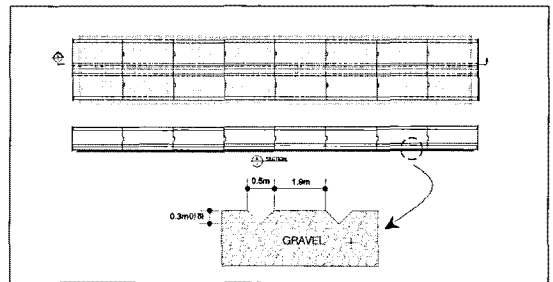


그림 21. 연성구역내 배열식 Gravel Bed 시공도

강성의 영향으로 가정된 돌출 포설 오차가 10mm를 초과하는 경우에 조인트 전단기의 작용력이 용량을 초과하는 것으로 나타났다. 이 경우 시험시공을 통해 확인된 정밀 포설장비의 시공 오차 ±20mm로서는 정밀도를 충족할 수 없으므로 Gravel Bed의 균등한 표면부를 조성하기 위하여 그림 20과 같이 Gravel Bed 배열면 사이에 Grouting을 실시하였다.

침매함 E3~E15 일부 구간에 적용된 CDM 공법 중 E4 일부구간까지는 착저형 CDM 개념으로 개량되어 암반구역과 동일하게 배열식 Gravel Bed와 Grouting으로 시공하였고 E4 일부부터 SCP 구간인 E16까지는 포설오차 ±20mm이내에서 구조적 안정성이 확보되므로 배열식 Gravel Bed를 적용되었다.

### 3.6 침매터널 기초 Bed 공법 적용 요약

부산-거제 간 연결도로 침매터널 기초 Bed 공법은 정밀포설장비의 개발로 직접 Screed 방식인 Gravel Bed 공법의 적용이 가능하게 되었으나 일부 강성이 큰 지반에 위치한 합체 기초의 경우에는 구조해석 결과를 반영하여 포설면의 오차를 감소시키기 위해 배열면 사이 공간을 Grout 충전하였다. 합체가 위치하는 지반 조건별로 적용된 기초공법은 표 3에 제시하였다.

## 4. 결론

1. 부산-거제 간 연결도로의 침매터널은 총연장 8.2km



표 3. 합체별 기초 Bed 공법 적용 현황

구 분	E1~E3	E4	E5~E14	E15~E16	E17~E18
지반개량	암준설 +사석치환	CDM 개량	CDM 개량	SCP 개량	암준설+사석치환
기초공법	배열식 Gravel Bed + Grouting	배열식 Gravel Bed + Grouting	배열식 Gravel Bed	배열식 Gravel Bed	배열식 Gravel Bed + Grouting
사용 장비	Gravel Bed 정밀포설장비(일명 KUS ISLAND)				

의 왕복 4차선으로서 주 항로 구간의 침매터널 3.7km와 예비항로 구간의 2주탑 사장교 및 3주탑 사장교, 접속교 및 산악터널로 구성되어 있다.

2. 개착식 터널을 제외한 침매터널 연장은 3,240m로서 높이 9.75m, 폭 26.5m, 길이 180m의 합체 총 18개로 구성되어 있으며, 침설 시 시공 오차, 온도변화, 콘크리트의 크리프 및 수축, Gina의 이완, 지진에 의한 거동, 침몰선박, 침수에 의한 하중, 지반의 부등침하 등으로 인해 야기 될 수 있는 조인트 오프닝을 최소화하고자 합체 E3~E14구간은 CDM공법, E14~E17 구간은 SCP와 Preloading 공법으로 지반 보강하였다.
3. 침매터널 CDM 구간은 심해작업에 적합한 자항식 호퍼준설선(Trailing Suction Hopper Dredger)을 사용하여 1차로 준설한 후 그라브 준설선을 통해 2차 정밀준설을 시행하였으며 동쪽 및 서쪽갱구부 암반구간에서는 수중암발파 후 그라브 장비로 준설하였다.
4. 기본 및 실시설계 단계에서 Grouted Gravel Bed와 Gravel Bed 공법이 동시에 검토되었으나 포설면에서 ±20mm 수준까지 정밀포설이 가능한 장비가 개발됨에 따라 최종적으로 Leveled Gravel Bed 공법이 현장 적용되었으며, 자갈기초를 조성한 후 합체를 직접 거치하여 Full Ballast가 단기간에 확보됨에 따라 침설중 합체 안정성을 향상시켰다.
5. 신규 개발된 정밀포설장비를 이용하여 시험포설한 결과 Gravel Bed Group 간의 평균포설오차 및 포설 계획고와 실제 포설레벨과의 허용오차가 시방기준인 ±20mm 이내임을 확인하였다.
6. 침매터널 기초공법으로 Gravel Bed 적용시 포설오차의 허용범위를 결정하고자 일정한 규모로 돌출된

포설오차(High Point)를 가정한 후 구조해석을 통해 합체의 단면력(휨모멘트, 전단력)과 전단키에 미치는 영향을 고려하였다.

7. 침매합 하부지반 조건이 암반인 경우 견고한 지반강성의 영향으로 가정된 돌출 포설오차가 10mm를 초과하는 경우에 조인트 전단키의 작용력이 용량을 초과하는 것으로 나타나 포설면 오차를 제거하고자 Gravel Bed 배열면 사이에 Grouting을 실시하였으며, 연성구역인 CDM, SCP 개량구간은 배열식 Gravel Bed가 시공되었다.
8. 부산-거제 간 연결도로 침매터널 사업은 2010년 12월 성공적인 준공을 위해 막바지 공사에 박차를 가하고 있으며, 그동안 침매합 제작, 대심도 지반개량, 침설과정에서 축적해온 기술력은 대외적 위상을 높이는 계기가 될 것이다.

### 참고 문헌

1. 김민철, 윤상철, 최준수(2008. 4) "부산-거제 간 연결도로 침매터널 지반보강공법 적용 사례", 한국 지반공학회지 Vol.24, No.4
2. GK Fixed Link Co. Ltd(2004) : Busan-Geoje Fixed Link 기본설계보고서
3. GK Fixed Link Co. Ltd(2005) : Busan-Geoje Fixed Link 실시설계보고서(8단계)
4. GK Fixed Link Co. Ltd(2006) : Busan-Geoje Fixed Link 실시설계보고서(10단계)
5. Niels J Gimsing & Claus Iversen(2001. 3) : The Oresund Technical Publications The Tunnel