터키 유라시아 터널 프로젝트에 대한 사례연구 A Case Study on Turkey Eurasia Tunnel Project

김도형¹⁾, Dohyung KIM, 방규민²⁾, Gyumin BANG, 전기찬³⁾, Gychan JUN, 김동현⁴⁾, Donghyun KIM, 김택곤⁵⁾, Taekkon KIM

- 1) 삼보기술단 지반사업부 과장, Manager, Dept. of Geotech Engineering, Sambo Engineering
- 2) 삼보기술단 지반사업부 대리, Assistant Manager, Dept. of Geotech Engineering, Sambo Engineering
- 3) 삼보기술단 지반사업부 이사, Director, Dept. of Geotech Engineering, Sambo Engineering
- 4) 삼보기술단 기획실 상무, Managing Director, Dept. of Planning, Sambo Engineering
- ⁵⁾ SK E&C Geotask팀 부장, Department Manager, Geotask team, SK E&C.

SYNOPSIS: Turkey Eurasia Tunnel Project is large scale road construction project of which the total length is 14.6km. The subsea shield TBM tunnel will be constructed under Bosphorus strait and the project site is in poor condition as composite ground, high water pressure and earthquake. The design procedure of subsea tunnel was introduced with tender design materials. That procedure contains tunnel type, TBM type and the principal design items considering geological condition such as high water pressure, composite ground and seismic area. This paper states the progress for geotechnical investigation, seismic analysis and TBM tunnel design. Analysis for geotechnical investigation is in progress, aseismatic design is going on stability study for liquefaction and structure. In addition, the performance of shield TBM to be considered such as advance rate and improvement of TBM was reviewed. The plan of fire safety was also reviewed with respect to fire protection.

Keywords: Eurasia Tunnel, subsea shield TBM, high water pressure, geological complexity, aseismatic design

1. 서 론

유라시아 터널 프로젝트는 보스포러스 해협의 해저구간을 쉴드 TBM공법을 적용하여 통과하는 것으로 계획되어 있다. 쉴드 TBM 공법은 도심지의 저토피 구간, 하저 및 해저의 연약지반 등의 불리한 조건에서 터널안정성 확보를 위해 보편적으로 적용되어 지는 기계화 시공법이다. 하지만 국내의 경우 쉴드 TBM 터널에 대한 설계 및 시공경험이 부족하여 상당부분을 외국자문에 의존하고 있는 실정이다. 그러나 최근 들어 국내에서도 쉴드 TBM공법의 폭넓은 적용이 검토되고 있으며, 기술적인 부분에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 정경환 등(2002)은 쉴드 TBM 장비에 대한 연구를 지속적으로 진행하고 있으며, 전기찬 등(2003)은 한강 하저 통과구간에서의 대구경 쉴드 TBM 장비 선정시 고려사항에 대해제안하였다. 김동현 등(2007)은 하·해저터널에 대한 국내외 사례분석 결과와 터널공법 선정시 고려사항에 대해제안하고 한강하저 쉴드 TBM사례를 바탕으로 고수압 대응을 위한 설계개선사항을 소개하였으며, 신희순(2006)은 해외의 해저터널 현황과 관련기술에 대해소개하였다.

현재 유라시아 터널 프로젝트는 전체 프로젝트 단계 중 preliminary design 단계가 진행 중이며, 고수압 및 복합지반조건에서의 해저터널 안정성 확보방안과 비상시 방재대책에 대해 검토 중이다. 본고에서는 이스탄불 보스포러스해협에 건설계획중인 유라시아 터널 사례를 중심으로 입찰설계에서의 주요사항인고수압 및 복합지반 조건, 내진설계에 대해 간략히 소개하고자 한다. 또한 현재까지의 진행현황을 지반

조사, 내진설계, 쉴드 TBM 장비개선 및 내화설계 내용을 중심으로 설명하고자 한다.

2. 유라시아 터널 프로젝트

최근 터키의 이스탄불은 경제와 인구의 폭발적인 성장으로 교통량이 큰 폭으로 증가하였으며, 이로 인한 교통혼잡비용의 증가로 큰 사회적 손실이 발생하고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 이스탄불 당국은 교통망의 확충이 절실히 필요하게 되었고 그 결과로 수립된 건설계획이 "Istanbul Strait Road Tunnel Crossing Project"이며 현재는 "Eurasia Tunnel Project"로 진행되고 있다.

유라시아터널 프로젝트는 총 사업연장이 14.6km인 대규모 토목사업 프로젝트로서 사업구간은 Part 1, 2, 3로 나누어 도로의 신설 및 확장을 수행하게 된다(그림 1 참조). 사업구간 중 보스포러스 해협을 통과하는 Part 2구간은 주요구조물로 쉴드 TBM터널, NATM터널, 개착터널과 환기구가 계획되어 있으며 Part 1, 3구간은 기존 도로의 확장이 주요 사업내용이다.

Part 2구간의 해저 쉴드 TBM 터널은 그 연장이 3.34km이며, 터널형식은 지질 및 수리조건, 시공성과 경제성을 고려하여 병렬터널이 아닌 대단면 복충터널로 계획되었다. NATM터널과 개착터널은 쉴드 TBM터널과 수직구에서 접속되며 복충터널구간에서 병렬터널구간으로 분기되는 것으로 계획되었다. 터키는 지진이 많이 발생되는 강진다발 국가로서 특히 이스탄불은 유명한 단층대인 North Anatolian Fault와 인접하고 있으며 쉴드 TBM 터널이 통과하는 해저구간에는 연약한 사질토층이 상당부분 존재하는 것으로 파악되어 액상화 발생에 대한 위험성이 존재한다. 이러한 조건은 해저구간 쉴드 TBM설계에 주요한 사항이므로 입찰설계단계에서 이와 관련된 검토사항에 대해 설명할 것이다.



그림 1. 터키 이스탄불해협 유라시아 터널 프로젝트 개요도

2.1 해저구간 터널형식 선정

유라시아터널 프로젝트의 해저구간 쉴드 TBM 터널형식을 선정하기 위해 대단면 복흥터널(Double Deck Tunnel) 형식과 병렬터널(Twin tunnel) 형식이 비교 검토되었다. 해저구간은 연약한 지흥에 최대수압이 8bar이상 작용되는 구간을 통과하며 이스탄불 지역은 규모 7.5이상의 강진이 자주 발생하는 지역이다. 따라서 병렬터널의 경우 피난연락갱 설치등과 같은 접속부가 존재하게 되므로 시공중 및 운영중에 고수압에 의한 해수침투 가능성이 높으며 지진발생시 피해발생이 우려된다. 반면에 대단면 복흥터널은 접속부가 필요치 않으므로 누수 및 지진피해 가능성이 상대적으로 낮다. 물론 복흥터널 형식의 경우 고수압하의 연약지층에서 직경 12m이상의 대단면 굴착을 수행하여야 하는 위험성이 있으나 현재의 쉴드 TBM장비 기술수준에서는 충분히 가능한 것으로 판단되었다.

입찰안내서에 제공된 시설한계(폭 8.25m× 높이 3.0m) 및 비상대피통로(폭 0.75m×높이 2.1m)를 만족하는 쉴드 TBM터널의 단면크기는 복층터널의 경우 세그먼트 외경을 기준으로 12.5m의 원형단면으로 계획되었다(그림 2 참조). 병렬터널과의 굴착단면적 비교결과 두 가지 형식의 단면직경의 큰 차이는 없으나 병렬터널의 양방향 굴착을 고려할 때 굴착단면적은 복흥터널에 비해 병렬터널이 약 31%정도 증가하는 것으로 분석되었다. 터널직경이 작은 병렬터널 형식이 고수압조건의 연약지층에서 시공성이 우수하나전체 프로젝트 일정을 만족시키기 위해서는 쉴드 TBM장비 2대를 투입하여야 하는 것으로 분석되었다. 이에 따른 장비구입비용 및 세그먼트 비용이 크게 증가하는 것으로 분석되었다. 또한 지상작업장 부지 및 수직구 규모 증가 등으로 인해 여러 요소가 불리한 것으로 판단되었으며 대단면 복흥터널 형식이 병렬터널 형식보다 터널공사비 분석에서 약 16%정도 낮은 검토되었다. 물론 이러한 공사비 비교 수치는 각 현장의 특성에 따라 변할 수 있는 사항이며 암질이 양호한 국내 현장의 비교분석 사례를 보면 복흥터널 형식의 공사비가 병렬터널 형식보다 오히려 증가하게 되는 경우도 발생하게 된다. 다만, 본 과업구간과 같이 고수압 조건의 연약지층을 통과하는 경우 병렬터널 형식은 피난연락갱 및 피난대피통로 시공을 위해 세그먼트 해체작업이 요구되어 지며 이러한 해체작업을 위해서는 동결공법 또는 제트그라우팅등과 같은 고비용의 지반개량공법의 적용이 요구되므로 복흥터널 형식이 터널 안정성이나 경제적 측면에서 유리할 것으로 판단된다.

결론적으로 유라시아 터널 프로젝트에서는 고수압 해저구간에서의 터널안정성, 시공성 및 경제성 등을 고려하여 대단면 복층터널형식으로 계획되었다.

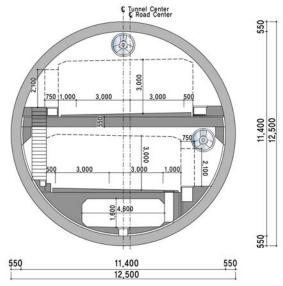


그림 2. 유라시아터널 쉴드 TBM 터널단면

2.2 쉴드 TBM 장비선정

설드 TBM 장비는 크게 이수식 설드 TBM과 토압식 쉴드 TBM으로 구분되며 최근에는 두 가지 방식의 혼용이 가능한 장비가 개발되었다. 장비형식은 지반조건 및 현장여건에 따라 굴진면 지지방식, 버력처리 용이성과 커터마모성을 고려하여 선정하게 된다. 이수식 쉴드 TBM 공법은 이수압을 조정하므로 고수압에 대한 대응이 확실하고 지지압 변화에 대한 신속한 대응이 가능하다는 장점이 있으며, 토압식 쉴드 TBM 공법은 스크류 컨베이어의 회전속도를 조정하여 지보압을 조정하므로 지지압 변화에 대한 대응속도가 상대적으로 떨어지는 단점이 있으나 최근 장비기술의 발달을 통해 많은 발전이 이루어지고 있다. 또한 스크류 컨베이어를 조정하여 수압에 대한 대응력을 향상시킬 수 있으나, 8bar이상의 고수압 조건에 대한 적용은 한계가 있는 것으로 판단된다.

이수식 쉴드 TBM은 버력을 이수와 함께 배니관으로 압송·배출하며 일정구간마다 배송펌프를 설치하므로 버력 압송력이 우수하고 배니관에 의한 유체수송이므로 보다 쾌적한 갱내 환경을 유지 할 수 있다. 그러나 토압식 쉴드 TBM의 경우 유라시아터널은 터널연장이 길고 종단경사가 급하기 때문에 대차 및 컨베이어 벨트에 의한 버력반출시 전력소모가 크고 버력반출시간이 다소 큰 단점이 있다.

또한, 이수식 쉴드 TBM의 경우 챔버내에 이수를 채워 굴진하기 때문에 토압식에 비해 디스크 커터의 내구성이 우수한 반면 토압식 쉴드 TBM은 챔버내에 굴착버력을 충만시켜 굴진하기 때문에 챔버내에서 디스크 커터의 마모가 더욱 심하게 발생하는 것으로 분석되었다. 이러한 디스크 커터의 마모현상은 종단경사가 크게 계획된 터널의 하방향 굴진에서 더욱 심하게 발생하게 된다.

따라서 고수압 대응성(최대수압 8bar이상), 대단면 굴진 및 버력처리 용이성, 시공중 지층변화에 대한 안정성을 고려하여 이수식 쉴드 TBM으로 선정하였다.

3. 입찰설계시 쉴드 TBM 터널설계 주요사항

3.1 복합지반 굴진

유라시아터널의 해저지반은 균열과 절리가 매우 발달되어 있는 트라키아층(Trakya formation)과 보스포러스 해협중앙에 깊게 분포하는 연약 퇴적층으로 구성되어 있다. 입찰설계시 가정된 지층분포 및 터널종단에서 보이듯이 쉴드 TBM 터널의 노선은 유럽사이드의 암반층을 통과하여 해저 연약지층을 지나 아시아사이드의 암반층을 통과하며 최소토피고는 약 20m로 계획되었다(그림 3 참조). 쉴드 TBM 장비의 커터헤드와 커터교체계획은 이러한 지반의 복합성을 고려하여 수행되었다. 암반구간에는 디스크커터를 적용하였으며 토사지반에는 비트 커터와 special knife edge 커터를 적용하였다. 또한 커터헤드전면의 개구율은 약 31%로 계획하였으며 선형 조정을 위한 카피 커터가 반영되었다. 커터 교체는 굴진효율의 저하를 방지하기 위해 마모정도를 체크하는 센서가 적용되었으며, 지반상태에 따라 암반구간은 200~500m굴진, 토사구간은 2,000m 굴진시 커터를 교환하는 것으로 가정하여 암반구간에서 약 10회의디스크 커터를 교체하는 것으로 계획하였다.

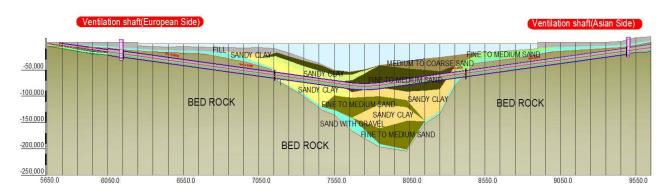


그림 3. 지층분포도 및 터널종단도(입찰설계)

3.2 고수압 대응

유라시아터널은 보스포러스 해협중앙부에서 8bar이상의 고수압 구간을 통과하는 것으로 계획되었으며 이러한 고수압구간에서의 대단면 터널계획은 세계적으로도 그 사례를 찾아볼 수 없는 어려운 공사로 평가되어 진다. 고수압 구간에서의 터널안정성 확보는 본 해저터널 프로젝트에서 가장 중요한 요소이며 이에 대한 대책으로 고수압 대응을 위한 쉴드 TBM 장비개선, 세그먼트의 두께 및 폭, 연결부 방수개선을 중점적으로 검토하였다. 앞 절에서 언급한 바와 같이 고수압 조건에서의 굴진면 압력변화에 대한 신속한 대처가 가능한 이수식 쉴드 TBM을 적용하였고, 쉴드 TBM 후방의 지수대책으로 3열 테일실 사이에 1열의 긴급지수장치를 적용하였다. 또한 고수압 조건에서 디스크 커터 교체시 작업자의 안전성 확보

를 위해 슬라이더 가이더를 이용한 교환방식이 적용되었다.

고수압 조건하 터널 안정성에 직접적인 영향을 주는 세그먼트의 두께 및 폭의 결정은 해외 시공사례분석과 수치해석을 통해 수행되었다. 그림 4는 해외사례분석을 통한 세그먼트 외경(Do)과 폭(B), 두께(h) 와의 관계를 나타낸다.

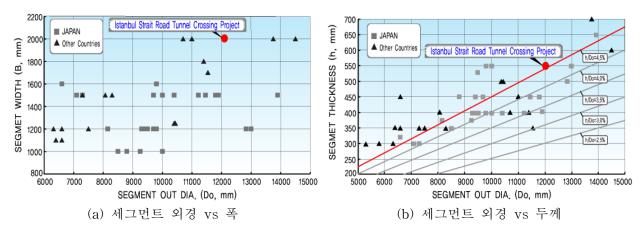


그림 4. 세그먼트 외경과 폭, 두께와의 관계

해외사례 분석결과를 바탕으로 유라시아터널 세그먼트 외경(Do=12,500mm)에 대응하는 세그먼트의 폭을 2.0m로 결정하고 세그먼트 두께는 550mm로 결정하였다. 세그먼트 폭 2.0m는 세그먼트 분할 수와 연결부 길이를 줄이고 방수성능 향상을 위해 유럽에서 일반적으로 적용되는 값이다(독일 no.4 Elbe 터널, 프랑스 Lyon 고속도로 터널). 또한 산정된 세그먼트 두께 550mm에 대한 구조검토를 수행하였다. 그러나 이는 입찰단계시 발주처에서 제공받은 인근지역의 지반물성을 바탕으로 수행된 검토이므로 향후 기본설계 단계에서는 수행된 지반조사결과를 바탕으로 정적안정성 및 동적안정성에 대한 세부적인 검토가 수행되어질 것이다. 그리고 세그먼트 누수량의 57%는 세그먼트의 연결부에서 발생하는 것으로 알려져 있으며 이에 대한 연결부 방수공법은 수팽창성 지수재와 가스켓의 두 가지 방식으로 구분되어 진다. 수팽창성 지수재는 재료의 팽창압과 탄성반력의 2가지 지수원리를 이용한 방수재이고, 고무 가스켓은 탄성반발력에 의한 접면압력으로 방수하는 방수재이다. 유라시아터널의 세그먼트 연결부 방수공법으로는 장기적인 방수성능 유지를 위해 수팽창성 지수재와 결합된 복합형 고무가스켓 방식을 적용하였다.

3.3 내진설계

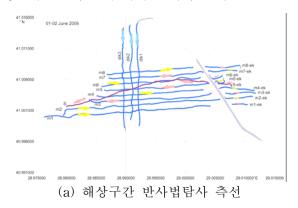
터키는 북 아나톨리아 단층대(North Anatolian Fault)의 활동으로 인해 지진이 빈번히 발생하는 나라로서 특히, 이 지진대를 따라 1939년과 1999년 사이에 모두 7회 이상의 강진이 발생하였다(정길호, 1999). 터키의 지진전문가들은 평균 지진발생주기가 대략 450 ± 220년으로 예측하고 있으며, 진도 7이상의 강진이 10년 안에 발생할 확률은 32 ± 12%, 30년 안에 발생할 확률은 62 ± 15%로 예측하고 있다.

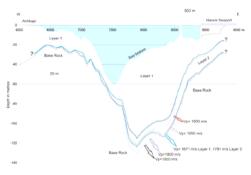
지진발생에 대한 주요사항은 상대강성 차이로 발생되는 상대변위로 인한 세그먼트의 손상이며 이에 대한 검토를 위해 상대강성이 암반-토사층 경계부와 수직구-터널 접속부 구간에 대한 중점적인 검토가수행되었다. 상대변위에 의해 세그먼트 손상이 예상되는 구간에는 동경만 아쿠아라인에 적용된 사례가 있는 가동 세그먼트(flexible segment)와 섬유보강 고무제(탄성와샤)를 적용하여 지진발생에 의한 변형을 흡수할 수 있도록 하였다.

4. 설계추진 현황

4.1 지반조사 수행현황

현재 지반조사는 쉴드 TBM 터널, 개착터널과 NATM터널이 있는 Part 2 구간에 대해 계획되어 해상구간에 대한 물리탐사 및 시추조사가 완료되었다. 또한 투수시험, 수압시험, PS 검층, CPT 등의 다양한 현장시험 결과가 분석중이며 내진설계가 중요한 과업구간의 특성을 반영하여 진동반복 삼축시험, 공진주시험 등의 동적물성치 산정을 위한 시험을 수행중이다. 해상물리탐사는 동서방향으로 9개의 측선과 남북방향으로 3개의 측선 등 총 11개의 측선을 따라 조사되었으며 물리탐사 결과분석을 통한 지층선추정결과는 그림 5에 나타난 바와 같다.





(b) 물리탐사 결과에 의한 지층선 추정

그림 5. 물리탐사 측선 및 분석결과

그림 6에서 보듯이 시추조사는 총 22공이 계획되었으며 쉴드 TBM 터널이 통과하는 해상구간은 10공, 육상구간은 3공, 개착터널과 NATM 터널이 통과하는 육상구간은 각각 4공과 5공이 수행되었다. 시추조사 결과 기반암은 그림 7과 같이 사암과 이암이 교호하여 파쇄대구간이 매우 발달됨을 알 수 있으며 다이크가 간헐적으로 관입되어있다.

해저구간 시추조사결과를 보면 반사법 탄성파 탐사결과로 예상한 기반암선과 다소 차이를 나타내는데 이는 심한 조류 및 잦은 선박운항에 따른 노이즈에 의한 징후로 판단되며 물리탐사결과를 통한 해저구간 지층분포 파악의 한계점을 보여준다. 하지만 물리탐사결과는 전체적인 기반암 분포현황 파악이 가능하기 때문에 해상구간 실제 시추조사위치 선정에 중요한 근거를 제공한다. 보스포러스 해협의 경우 빠른 조류흐름으로 인해 해상시추시 상당한 어려움을 겪었으나 현지조사업체와의 조율을 통해 큰 무리 없이 시추조사가 마무리 되었다. 실내시험은 터키 현지 Istanbul Technical University(ITU)와 Istanbul Kutur University(IKU), FUGRO(네덜란드 社)에서 수행중이며 분석된 결과를 바탕으로 지반조사 성과 분석이 수행될 예정이다.

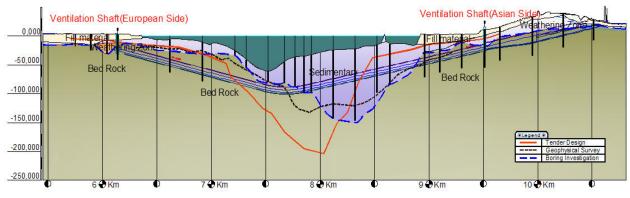


그림 6. 물리탐사 결과와 해상시추조사 결과를 반영한 지층종단



(a) 해상구간 시추코어



(b) 육상구간 시추코어

그림 7. 회수된 시추코어

해저 쉴드구간의 지층구조는 크게 해성퇴적층 및 기반암의 분포를 보이고 있으며, 해성퇴적층은 층후는 그림 8과 같으며 대부분 점성토 및 사질토가 교호하여 3.0~25.0m, 0.8~30.0m의 층후로 주를 이루고 있다. 자갈층~호박돌은 해저 중앙바닥부 및 STA. 8+500~8+900 구간에 광범위하게 분포되어 있으며 호 박돌층은 단층에 의한 Trakya formation의 fragment의 형태로 출현한다.

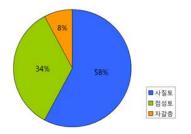


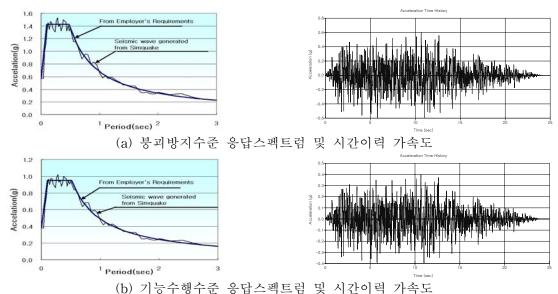
그림 8. 해저구간 지층분포 현황

4.2 내진설계

유라시아 터널의 사업구간은 강진 발생 위험이 높은 구간으로 발주처에서는 기능수행수준과 붕괴방지수준의 두 가지 내진성능수준별로 구조물의 안정성을 확보하도록 요구하였으며, 각 수준의 설계지진가속도로 각각 0.4g와 0.6g를 제안하였다. 현재까지의 지반조사 결과를 바탕으로 진행되고 있는 내진설계진행현황은 다음과 같다.

4.2.1 설계지진파의 결정

입찰안내서에는 기능수행수준과 붕괴방지수준의 두 가지 성능수준별 설계응답스펙트럼이 제공되었다 (그림 9 참조).



b) 기능수행수준 응답스펙트럼 및 시간이력 가속도 그림 9. 내진설계에 적용된 입력지진파

본 프로젝트에서는 설계응답스펙트럼에 부합하는 인공지진파를 생성하여 검토를 수행중이며, 향후 인접 보스포러스 철도터널 프로젝트에 적용되었던 지진파 및 터키 현지의 계측파를 비교 검토하여 인공 지진파에 대한 검증이 수행될 것이다.

4.2.2 액상화 안정성 검토

현재단계에서는 상세 지층분포 파악 및 동적물성치에 대한 실내실험이 완료되지 않은 관계로 인접 Marmaray 철도터널 프로젝트에 적용되었던 동적물성치를 이용하여 액상화 가능 심도별 간편법, 상세법, 유효응력해석을 통해 액상화 발생 여부에 대한 Case study를 수행하였다(그림 10 참조). 검토결과 해저 구간 쉴드 TBM의 토피고를 25m이상 확보할 경우, 액상화 발생 확률이 적다는 것을 확인하였으며, 향 후 지반조사 결과를 반영하여 상세한 검토를 추가적으로 진행할 예정이다.

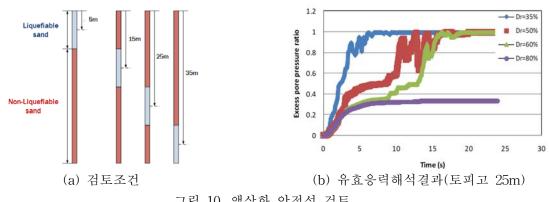


그림 10. 액상화 안정성 검토

4.2.3 구조물 안정성 검토

쉴드 TBM 터널 통과구간 중 상대강성의 차이가 큰 암/토사 경계부 및 수직구-터널 접속부 등은 지진 위험이 큰 구간으로 내진대책의 적정성을 검토하기 위하여 횡방향 및 종방향 구조물 안정성 검토를 수행 하였다. 1차원 지반응답해석 및 횡방향 구조해석을 통해 세그먼트 두께 및 이음부 지수성에 대하여 검토 하였으며, 2차원 지반응답해석 및 종방향 구조해석을 통해 이음부 지수성 및 가동세그먼트, 탄성와셔 등의 내진대책의 적정성을 검토하였다. 향후 상세 지반조사 결과를 반영하여 재검토할 계획이다. 그림 11은 2차 원 지반응답해석 결과를 보여준다.

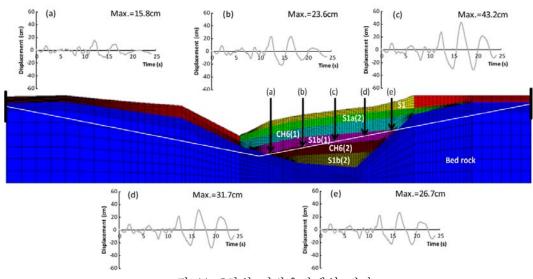


그림 11. 2차원 지반응답해석 결과

4.3 쉴드 TBM 설계시 고려사항

4.3.1 쉴드 굴진율 추정

트라키아층은 고생대 퇴적암층으로 사암 및 이암으로 구성되어 있으며, 절리와 균열이 발달되어 있다. 기반암인 트라키아층은 약 70m 간격으로 관입에 의해 다이크가 발달하며 그 다이크는 압축강도가 200MPa 이상의 휘록암, 안산암, 섬록암으로 구성되어 있다. 강도가 큰 관입암의 출현은 굴진속도를 감소시키며, 실제 인근의 트라키아층에서 시공중인 현장에서 시공된 쉴드 TBM의 굴진속도 자료를 보면 평균 굴진속도가 3.5~4.6 m/day로 상당히 낮은 굴진속도를 나타낸다(그림 12 및 그림 13 참조).

Istanbul Technical University의 linear rock cutting rig(그림 14 참조)을 이용하여 쉴드 TBM의 굴진율을 산정하였고 굴진속도 산정시 쉴드 TBM 가동률을 30%로 가정하였다. 굴진속도를 산정한 결과 트라키아층의 무결암 굴진속도는 8.6 m/day이고, 파쇄암은 10.8 m/day이며, 관입암은 4.3 m/day로 추정되었다. 다이크의 분포현황을 고려할 때 암반구간의 굴진속도는 8.0 m/day로 추정되었으며, 연약지반구간의굴진속도는 11.0 m/day가 가능한 것으로 추정되었다.



그림 12. 커더헤드의 트라키아층



그림 13. 커터헤드 손상사진



그림 14. 굴진율 시험장비(ITU)

4.3.2 쉴드 TBM 장비개선

설드 TBM 장비에 대한 세부설계는 커터헤드, 추력, 최대 및 평균토크, 송/배니관의 크기 등의 제원을 결정하는 것이다. 일반적으로 디스크 커터 사이즈와 배치 등을 포함하는 커터헤드 설계는 장비 제작사별 노하우이며 설계회사에서 쉽게 접근할 수 있도록 공개되어 있지는 않다. 일반적으로 굴착을 위한 디스크 커터의 크기는 클수록 유리한 것으로 알려져 있으나, 커터교체시의 어려움과 장비제원 증가를 함께 고려해야 한다. 쉴드 TBM이 널리 적용되어온 일본의 경우 대단면(10m이상) 터널에는 19인치가 일반적으로 적용되어 지고 있다. 그러나 유럽에서는 아직까지 17인치가 주로 사용되어 지며 최근 들어 19인치가 적용된 현장도 소개되고 있다. 디스크 커터의 지름은 암의 강도, 장비크기, 추력, 커터형식과 커터간격에 관련되어 있으며 전체 쉴드 TBM공정에서 주요한 사항으로 세부적인 검토가 진행 중이다.

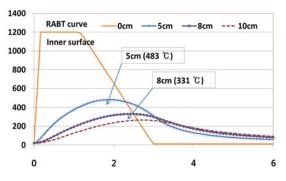
이수식 쉴드 TBM의 송/배니관의 크기는 쉴드 TBM의 크기에 의해 결정되어지며 일반적으로 쉴드 TBM의 지름(Do)이 12~14m인 경우에는 송/배니관의 크기는 350~400/300~350mm로 적용되어진다. 하지만 과업구간의 트라키아층에 포함된 200MPa이상의 강도를 가지는 다이크의 영향으로 인한 송/배니관의 막힘 현상을 방지하기 위해 송/배니관의 크기를 각각 450/500mm로 확대하고 챔버하단부에 stone crusher장치의 적용을 검토 중이다.

4.4 내화설계

내화에 대한 설계기준은 여러 나라에서 제시되고 있으며, 유라시아터널 프로젝트에서도 내화설계에 관해 여러 기준들을 제시하고 있다. 본 프로젝트의 내화설계 요구사항을 정리하면 다음과 같다.

- (1) 필요 구간에는 내화재가 설치되어야 하며, 특히 천장부에는 내화보강이 반드시 이루어 져야 한다.
- (2) 내화설계시 적용되는 화재의 특성은 최대 1200℃의 온도로 60분간 연소되며, 110분간 냉각과정을 거치는 화재 곡선을 적용한다.
- (3) 콘크리트의 폭렬현상은 방지되어야 한다.
- (4) 구조물의 철근 온도는 350℃ 이하여야 한다.
- (5) 화재시 구조물의 안전계수는 1.1 이상이어야 한다.

먼저 위에서 언급되어진 화재시 최대온도 1200℃를 터널구조물에 직접 적용하여 열전도 해석 등의 내화해석을 수행하였다. 일반 현장타설 콘크리트의 강도보다 큰 40MPa이상의 강도를 가지는 세그먼트 라이닝의 경우에는 열전도율이 상대적으로 크기 때문에 최대온도 1200℃를 60분간 지속시킬 경우에는 내화기준을 만족시키지 못하는 경우가 발생하게 된다. 입찰안내서의 내화설계시 적용되는 화재특성은 독일 RABT (Richtlinien fuer die Ausstattung und den Betrieb von Strassentunne)규정의 EBA 화재시간 관계곡선과동일하다. EBA곡선을 구조물에 적용하여 해석을 수행하였으며 화재 발생 전과 화재 발생 후의 구조물 강도는 화재시에도 1.12의 안전계수를 확보하여 안전한 것으로 판단되었다. 그러나 시간에 따른 깊이별 온도변화 결과에서, 철근이 위치하고 있는 5cm 깊이에서의 온도는 최고 483℃까지 상승하여 설계기준에서 허용한 최대 온도 350℃를 초과하므로 내화보강이 필요한 것으로 분석되었다. 따라서, 터널 내부에서 화재가발생할 경우 세그먼트 구조물의 안정성 확보를 위해 터널천단부에는 내화보드를 적용하였다. 또한, 데크플레이트의 하부에는 내화 모르터 적용을 검토 중이며, 상대적으로 온도상승이 작은 측벽부에는 시멘트 모르터 적용으로 피복두께를 증가시켜 철근부의 온도가 350℃를 초과하지 않도록 계획 중에 있다(그림 15 참조).



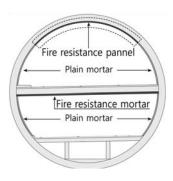
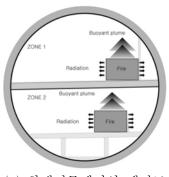
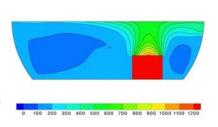


그림 15. 시간에 따른 세그먼트 깊이별 온도변화와 내화재 설치계획



0 100 200 300 400 500 600 700 800 900 1000 100 1200



(a) 화재시뮬레이션 개념도

(b) 상부데크 온도분포

(b) 하부데크 온도분포

그림 16. 화재시뮬레이션 개념도 및 온도분포 결과

또한 화재 특성곡선에 해당하는 화재강도를 가정하여 CFD(Computational Fluid Dynamics)해석을 통해 터널구조물의 온도분표 변화를 분석하였다(그림 16 참조). 고강도 세그먼트 라이닝으로 이루어진 쉴드 TBM터널 전체에 최대 화재온도를 직접 적용하는 것은 다소 과도한 화재강도의 적용이라 판단된다. 실제터널내 화재발생을 모사한 CFD해석결과를 살펴보면 측벽부 및 데크플레이트 하부에서 철근이 위치하는 지점에서 내화기준 350℃를 초과하지 않는 것을 확인할 수 있다(그림 17 참조). 이는 실제 터널내 화재발생시 터널 천단부에 비해 측벽부에는 온도변화가 크지 않다는 기존의 문헌 및 시험결과와 유사한 경향을 나타낸다. 향후 세부적인 설계단계에서는 보다 심도 깊은 검토가 수행될 예정이다.

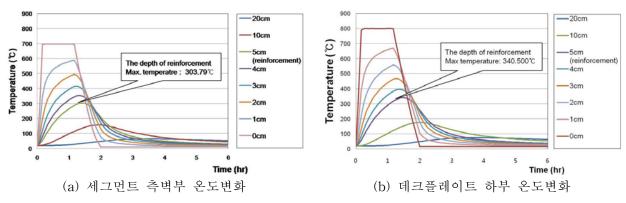


그림 17. CFD분석에 의한 구조물 깊이별 온도변화

5. 결 론

본 연구에서는 터키 이스탄불해협에 추진 중인 유라시아터널 프로젝트에 대한 사례를 바탕으로 해저 쉴드 TBM 터널 설계시 주요 고려사항과 현재단계의 설계추진현황에 대해 소개하였다. 본 고에서의 주요 사항을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 유라시아 터널 프로젝트에서는 고수압 해저구간에서의 터널안정성, 시공성 및 경제성 등을 고려하여 접속부가 발생되는 병렬터널 형식이 아닌 대단면 복층터널 형식으로 계획되었다.
- (2) 쉴드 TBM 장비의 선정은 고수압 대응성(최대수압 8bar이상), 대단면 굴진 및 버력처리 용이성, 시 공중 지층변화에 대한 안정성을 고려하여 이수식 쉴드 TBM으로 선정하였다.
- (3) 유라시아터널의 해저지반은 균열과 절리가 매우 발달되어 있는 트라키아층과 보스포러스 해협중앙에 깊게 분포하는 연약 퇴적층으로 구성되어 있다. 이러한 복합지반 통과를 위해 암반구간에는 디스크 커터를 적용하였으며 토사지반에는 비트 커터와 special knife edge 커터를 적용하였다.
- (4) 쉴드 TBM 후방의 지수대책으로 3열 테일실 사이에 1열의 긴급지수장치가 적용되었으며 고수압 조건에서 디스크 커터 교체시 작업자의 안전성 확보를 위해 슬라이더 가이더를 이용한 교환방식을 적용하였다. 또한 세그먼트 연결부 방수공법으로는 장기적인 방수성능 유지를 위해 수팽창성 지수재와 결합된 복합형 고무가스켓 방식을 적용하였다.
- (5) 내진설계에서는 상대강성 차이가 큰 암반-토사층 경계부와 수직구-터널 접속부 구간에 대한 중점적 인 검토가 수행되었으며 상대변위에 의해 세그먼트 손상이 예상되는 구간에는 가동 세그먼트와 섬유 보강 고무제(탄성와샤)를 적용하여 지진발생에 의한 변형을 흡수할 수 있도록 하였다.
- (6) 현재까지 물리탐사 및 시추조사가 완료되었으며 수행된 지반조사를 바탕으로 터널선형 결정을 위한 내진설계 및 액상화평가가 진행 중이며 굴진율 산정 및 쉴드 TBM 장비개선을 위한 다양한 검토가 수행중이다.
- (7) 내화설계는 입찰안내서의 화재규모를 적용하여 분석되었으며 검토결과 내화재 보강이 요구되어 터널 천정부에는 내화보드가 적용되었다. 또한, 측벽부에는 시멘트 모르터를, 내부구조물인 데크플레이트 하부에는 내화 모르터의 적용이 검토되고 있다.

참고문헌

- 1. 김동현, 김도형, 오세준(2007), "하·해저터널 설계방안 및 한강하저 쉴드TBM 사례", **제7회 터널 시 공기술 향상 대토론회 논문집**, pp.43~61.
- 2. 신희순(2006), "외국의 해저터널 현황 및 관련기술", 2**006년도 한국암반공학회 춘계학술발표회 논** 문집, pp. 1~10.
- 3. 전기찬, 추석연, 이두화, 김용일, 조상국(2003), "한강-하저 통과구간에서의 대구경 쉴드 TBM 장비선 정", 한국터널공학회 터널기술학회지, Vo.5, No.3, pp. 53~63.
- 4. 정경환, 정문식, 안국일, 김동해(2002), "Shield TBM", **한국터널공학회 터널기술학회지**, Vol.4, No. 4, pp.20~48.
- 5. 정길호(1999), "1999.8.17 터키의 이즈미트 지진", 행정자치부 국립방재연구소 현장조사보고서, pp. 5.
- 6. JSCE(2006), Standard Specifications for Tunneling 2006: Shield Tunnels, Japan Society of Civil Engineers, Tokyo.
- 7. NIKKEI Construction 편집부(1997), **동경만 횡단도로의 모든 것**, NIKKEI Construction Books, pp. 81
- 8. TKJV(Turkey Korea Joint Venture)(2008), Istanbul Strait Road Tunnel Crossing Project Technical Reports.
- 9. 한국터널공학회, **터널공학시리즈 3 터널 기계화시공 설계편**, 도서출판 CIR