

거가대교 침매터널의 설계

Design of the Busan-Geoje Fixed Links Immersed tunnel



글 | 李定相
(Lee, Jung Sang)

(주)대우건설 과장
GK사업관리팀 설계담당

E-mail : summit@dwconst.co.kr

Immersed tunnel had been a rather new term in Korea before Busan-Geoje fixed link project was started and became known through the media. Although Korean is unfamiliar with the immersed tunnel, this construction method has a long history in the world. Busan-Geoje Fixed Link immersed tunnel consist of 18 elements and each element is approximately 180m long. These tunnel elements are prefabricated of reinforced concrete in a temporary dry dock and are towed to the site and lowered into final position in a dredged trench and are placed on a screeded gravel bed directly without temporary support.

1. 머리말

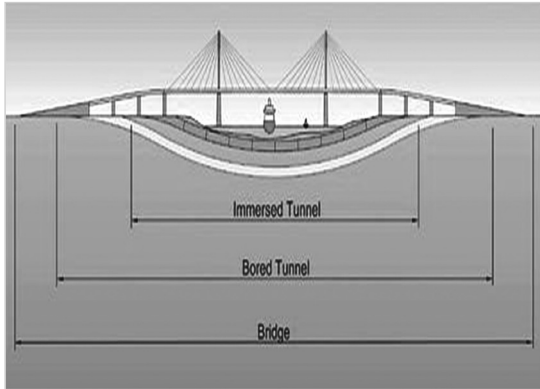
침매터널이라는 용어는 각종 언론매체를 통해서 거가대교 침매터널이 다큐멘타리 등으로 제작되어 공중파를 타면서부터 어느 정도 익숙해졌지만 얼마전까지 만해도 일반인은 물론이고 건설기술자들에게도 익숙하지 않은 것이었다. 비록 국내에는 다소 낯설지만 100년 이상의 짧은 역사를 가진 공법이다. 침매터널은 하나 이상의 단위함체를 육상에서 제작해서 자체의 부력으로 물에 띄워 현장 위치까지 운반하고 트랜치 저면에 가라 앉혀서 기설함체와 물밑에서 연결하는 작업을 연속적으로 수행하여 강이나 해협을 수저면 아래로 연결하는 공법이다. 침매터널의 특징은 경제성과 시공성 측면으로 크게 구분할 수 있다.

경제성 측면에서는 <그림 1>과 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 고려하

면 연장이 길어질 수밖에 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 어프로치(approach)부의 거리가 상대적으로 짧아서 육상점용면적이 줄어들게 된다. 따라서 관련 공사비, 보상비, 유지관리비 등이 교량 및 굴착터널에 비해서 상대적으로 저렴하게 된다. 물론 이러한 비교는 일반적인 경우에 대한 것이고 프로젝트의 특성에 따라서 다소 차이가 있을 수 있다.

시공성 측면에서는 침매터널은 원지반에 Trench를 굴착하여 매설하는 형식으로 설치하므로 큰 수준의 지반지지력이 필요없어 2차압밀 등의 장기적인 침하가 예상되는 초연약해성점토지반을 제외하고는 연약지반에 대한 적응도가 높다.

또한 침매터널은 각 개별 함체를 드라이독에서 프리캐스트공법으로 제작함으로써 다른 터널공법에 비해 높은 수밀성, 대단면제작, 고품질, 단기간제작 등의 장점을 가지고 있다.



〈그림 1〉 구조물 형식별 연장 비교

거가대교 침매터널은 국내최초라는 것 외에도 세계최대수심, 깊고 두꺼운 연약지반층, 외해조건 등 많은 특징을 가지고 있다. 많은 특징을 가지고 있는 만큼 설계단계에서 특별하게 고려해야 될 사항들로 많이 있다.

2. 본론

침매터널은 전 세계적으로 많은 시공사례와 오랜 역사를 가지고 있지만 침매터널 설계와 시공을 위한 특별한 코드가 아직 만들어져 있지 않아서 고속도로에 적용되는 일반적인 코드를 적용하고 있다. 침매터널의 계획과 설계는 다른 어떤 구조물보다 수심, 파고 등의 현장조건에 따른 영향을 많이 받는다. 이러한 특성으로 인해서 일반적으로 적용할 수 있는 코드가 존재하지 않는 것으로 판단된다. 하지만 현장조건과는 상관없이 일반적으로 적용할 수 있는 부분에 대해서는 코드를 표준화하는 것이 필요할 것이다.

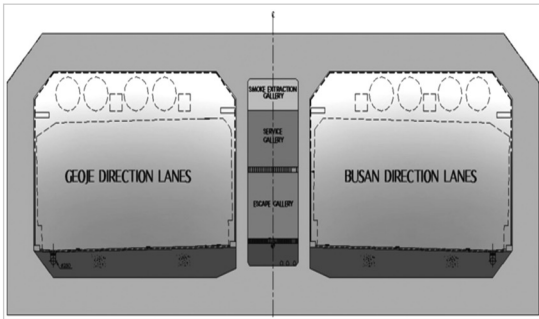
침매터널의 계획 및 설계는 현장조건(수심, 항로, 해상조건), 공기, 주변여건(제작장 부지확보의 수월성) 등에 따라서 단위함체의 치수, 수밀성확보방법, 제작장의 규모 등이 달라지므로 표준화된 단면이나 계획이 존재하는 것이 아니고 개별 사업의 특성에 따라서 다르게 진행 된다. 침매터널의 설계 Flow는 명확히 정의되어 있지

는 않지만 일반적으로 아래의 〈그림 2〉와 같은 흐름으로 설계가 이루어진다.

지반조사는 구조물 기초지반의 역학적 특성을 평가하기 위한 것으로 평가결과에 따라서 지반의 보강 필요여부 등이 결정되므로 매우 신중하고 정확하게 수행되어야 한다. 해상조사의 경우에는 깊은 수심, 강한 조류속 등 조사를 수행하는 조건이 열악하면 그 결과의 정확도가 떨어지고 이로 인해 신뢰성이 문제가 될 수 있으므로 지반조사를 수행하기 위한 사전조사와 준비가 특히 중요하다. 설계에 적용해야 할 하중과 하중조합을 결정할 때에는 현장여건 상 특별하게 고려해야 할 조건에 대한 깊은 고민과 조사가 필요하다. 거가대교 침매터널의 경우에도 현장의 특수한 조건이 하중에 반영되었다. 그 중 가장 특징적인 것이 선박충돌 및 침몰하중이다. 거가대교 침매터널이 건설되는 구간은 부산신항에 진출입하기 위한 컨테이너 선박의 주항로이자 해군의 주 작전항로이다. 그래서 선박이 침몰하거나 충돌할 수 있는 확률이 상대적으로 높으므로 이를 하중조합에 적용하였다. 이외에도 홍수 등으로 인한 침수, 선박의 앵커에 의한 충돌, 터널내 폭발로 인한 하중 등이 하중조합에 반영되었다. 설계에 적용할 각종 하중을 결정하고 침설에 대한 안정성 등을 평가하기 위해서 해상기상관측과 수리모형실험 등의 각



〈그림 2〉 일반적인 설계 Flow

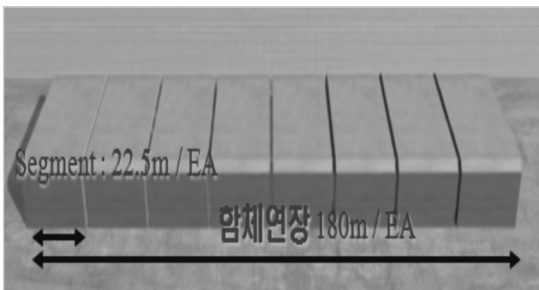


〈그림 3〉 침매터널 단면도

종 조사와 실험이 실시되었다.

터널 단면 형상에 대한 계획은 철도 또는 도로 등 그 용도에 따라 국가별로 규정되어 있는 기준에 따라서 달리 적용하는 것이 일반적이다. 철도 터널의 경우 이용하는 차량의 규모가 일정하고 환기 등을 위한 공간이 불필요하여 도로터널에 비해서 상대적으로 단면적이 적게 소요되므로 원형으로 적용하는 것이 경제적이고 구조적인 측면에서도 외부하중에 대해서 대부분의 구조영역이 압축력을 받으므로 유리하다. 원형터널은 하나의 대단면에 왕복차선을 구성하는 경우도 있고 두 개의 원형단면을 안경형태로 구성하는 경우도 있다. 반면 도로터널의 경우 이용하는 차량의 종류가 다양하고 왕복 4차선 이상이 일반적이며 환기 등을 위한 공간이 추가적으로 필요하므로 원형보다는 장방형이 공간이용 측면에서는 유리하다고 할 수 있다.

침매터널은 재료적인 측면에서는 Steel tunnel 과 본 사업에 적용된 Concrete tunnel로 크게 구분할 수 있다.

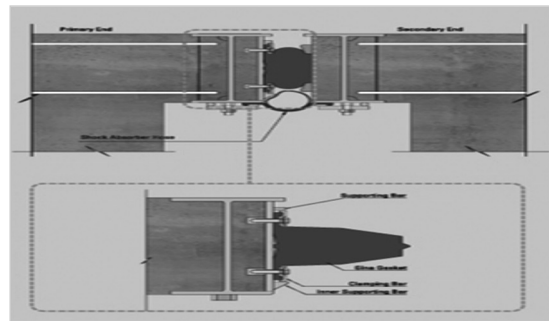


〈그림 4〉 단위 함체 개념도

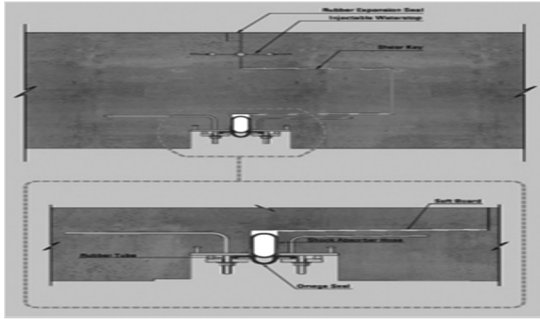
콘크리트 침매터널의 중요한 이슈는 수심 등의 건설조건에 따라 차이는 있을 수 있으나 대체적으로 조인트의 수밀성과 내구성이라 말할 수 있다. 조인트의 수밀성을 평가하려면 이의 거동을 알아야 되고 이를 위해서는 침매터널 종방향 거동에 대한 이해와 평가가 필요하다. 침매터널의 종방향 거동을 평가하기 위해서는 해석모델을 구축하고, 해석에 필요한 지반스프링계수와 요소의 물리적 성질 등 각종 입력변수들을 평가하고 결정해야 한다. 이러한 일련의 과정이 침매터널 설계에 있어서 가장 중요하고 필수적인 작업이다. 침매터널 종방향 해석의 결과물은 조인트의 오픈(Opening)과 크로징(Closing) 값이다.

조인트는 주로 고무재질로 되어 있어서 종류와 크기에 따라서 거동에 한계가 있으므로 종방향 해석결과에 따라서 적절한 종류와 크기의 조인트를 결정해야 한다. 조인트 거동에 가장 큰 영향을 미치는 변수는 지반조건, 계절별 해수온도 변화에 따른 함체의 수축/팽창, 지진하중 등이고 이를 종방향해석 모델에 적용하여 해석을 수행하게 된다. 해석결과에 따라서 때로는 조인트의 거동이 과도하여 그 자체가 가진 능력의 한계를 초과할 것으로 판단되는 경우에는 조인트 설계를 수정하거나 지반개량 등을 고려하게 된다. 이러한 일련의 결과도출과 피드백 과정을 거쳐서 조인트 변경 또는 지반개량 등의 중요한 사항을 결정하게 된다.

거가대교 침매터널 구간의 해성점토 특성은 인근지역인 부산시항만 주변의 조사결과와 비교해



〈그림 5〉 침설조인트



〈그림 6〉 세그먼트 조인트

보았을 때 액성한계와 자연함수비가 높아서 상대적으로 고소성, 고압축성임을 알 수 있다.

또한 장기간 동안 발생할 것으로 예상되는 2차 압밀침하와 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 검토하였고 검토결과 CDM(Cement Deep Mixing)공법이라는 지반개량공법을 적용하였다. CDM 공법은 국내에서 일반적으로 적용되고 있는 DCM 공법과 동일한 공법으로 국제적으로 통용되고 있는 용어를 적용하기 위해서 CDM으로 명하였다.

개량체의 선단은 점토에 비해서 좀 더 견고한 층으로 판단되는 모래자갈층에 근입되지 않고 점토층 내에서도 상대적으로 큰 강도를 가진 하부 점토층까지 근입하는 것으로 일명 부상 형기초(partial depth foundation)로 하중분배의 개념으로 설계하였다. 이 개념은 구조물과 뒤채움으로 인한 주요하중이 CDM공법으로 조성된 침하저감요소(settlement reducing element)를 거쳐서 상대적으로 견고한 하부점토층으로 전달됨으로써 하중분배(load-sharing concept)를 통해서 침하를 조절하기 위한 것으로 전반적인 침하에는 덜 민감하지만 부등침하에는 상대적으로 민감한 세그멘탈 형식의 침매터널 구조특성을 고려한 것이다. 즉, 침하저감요

소에 의해 전침하량을 최소화하여 전침하량에 비례해 커질 수 있는 부등침하도 최소화하는 것이다.

중방향해석을 통해서 조인트의 거동에 대한 평가와 이를 통해서 지반개량 등의 사항을 최종결정하면 침매터널 주요 구조물에 대한 설계는 어느 정도 완료된 것으로 볼 수 있다.

주요 구조물 설계와 함께 함체의 앞뒤를 막는 구조물인 벌크헤드와 함체와 함체사이, 세그먼트와 세그먼트 사이에 설치되는 전단키, 침설작업에 필요한 와이어를 걸기 위한 각종 함체 매입물, M&A 등에 대한 설계도 더불어 진행된다.

3. 맺음말

침매터널 각 단위함체의 제작은 매우 안정된 환경의 육상 제작장에서 진행된다. 하지만 제작 외의 준설, 기초조성, 침설, 되메우기 등의 작업은 상대적으로 열악한 해상조건에서 실시된다. 따라서 제작 외의 대부분의 작업이 해상에서 실시되므로 파고, 조류, 수심, 해저지반에 대한 면밀한 사전조사와 더불어 주어진 해상조건을 극복하고 원활하게 작업을 진행할 수 있는 충분한 능력을 가진 장비의 존재와 사용가능여부 등에 대한 조사도 함께 실시되어야 한다.

이는 침매터널의 계획과 설계에 있어서 상당히 중요한 부분을 차지하는 것으로 사업의 성패여부가 여기에 달려 있다고 해도 과언이 아닐 것이다. 비록 국내의 침매터널 설계와 시공경험은 걸음마 단계에 불과하지만, 사업초기단계에서 면밀한 사전계획과 조사가 이루어진다면 큰 시행착오 없이 원활하게 사업을 진행할 수 있을 것이다. 또한 지금까지 건설된 침매터널 중에서도 가장 열악한 자연환경에서 건설되고 있는 거가대교 침매터널에 대한 경험은 앞으로 건설될 침매터널에서 발생할 수도 있을 시행착오를 줄여줄 중요한 자산이 될 것이다.

〈원고접수일 2010년 2월 17일(수)〉