

거가대교 침매터널의 설계 (Design of the Busan-Geoje Fixed Links Immersed tunnel)



이정상 (주)대우건설 GK사업관리팀 과장
김제춘 (주)대우건설 GK사업관리팀 차장



1. 머리말

2003년 상반기에 착수된 지반조사를 시작으로 오래전부터 타당성검토단계에 머물러 있던 거가대교사업이 본격적인 궤도에 오르게 된 이후로 7년여의 시간이 흘러 2010년 4월 현재 대망의 준공을 불과 8개월여 남겨두고 있다. 사업을 시작할 때만 해도 본사업과 관련된 많은 해외기술진은 물론이고 사업을 진행하는 주체인 대우건설을 비롯한 국내기술진조차도 침매터널공사를 성공리에 진행할 수 있으리라고 장담하지 못했던 것이 사실이다. 깊은 수심, 높은 파도와 강한 조류의 해상조건, 두꺼운 연약지반의 분포 등 세계적으로 유례가 없는 조건에서 침매터널을 계획하는 것은 설계와 시공 모든 면에서 도전적인 것이었다. 특히 설계의 경우엔 언급된 특수한 시공조건을 빠짐없이 터널분구조물, 기초지반, 시공 장비 등의 설계에 반영해야하므로 참여 기술진 모두에게 풀기 쉽지 않은 과제였다. 하지만 끊임없는 조사와 논의의 과정을 거쳐서 오늘에 이른 것이다. 국내 최초 침매터널의 설계과정의 모든 내용을 제한된 지면에 모두 언급하는 데는 한계가 있으므로 중요한 사항만 언급하고자 한다. 본 지면에 언급하지 못한 많은 사항들은 기술지라는 형식을 빌어서 본 사업을 완료되는 시기에 소개하고자 한다.

2. 본 론

침매터널은 전 세계적으로 많은 시공사례와 오랜 역사를 가지고 있지만 침매터널 설계와 시공을 위한 체계화된 코드가 아직 만들어져 있지 않아서 도로 구조물에 적용되는 국제적 코드를 기본으로 적용하고, 침매터널의 특성을 반영한

일부 코드를 추가하여 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, 수밀성 확보방법, 제작장의 규모 등이 달라지므로 표준화된 단면이나 계획이 존재하는 것이 아니고 개별 사업의 특성에 따라서 다르게 진행 된다. 침매터널의 설계 Flow는 명확히 정의되어 있지는 않지만 일반적으로 아래와 같은 흐름으로 설계가 이루어진다.

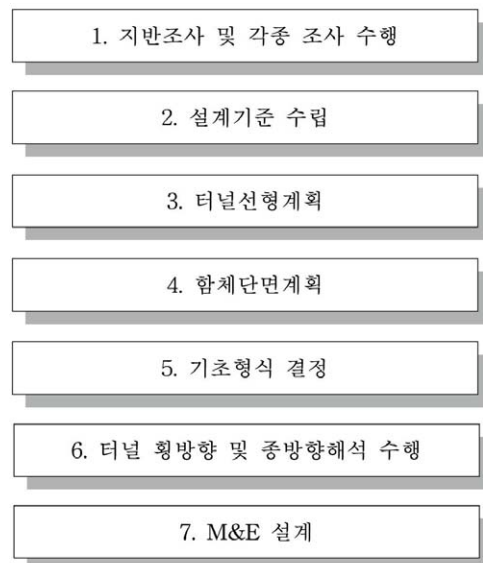


그림 1. 침매터널 설계 Flow

지반조사는 구조물 기초지반의 역학적 특성을 평가하기 위한 것으로 평가결과에 따라서 지반의 보강 필요여부 등이 결정되므로 매우 신중하고 정확하게 수행되어야 한다. 해상 조사의 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 각종 조사와 실험이 실시된다.

터널 단면 형상에 대한 계획은 철도 또는 도로 등 그 용도에 따라 국가별로 규정되어 있는 기준에 따라서 달리 적용하는 것이 일반적이다. 철도터널의 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 인경형태로 구성하는 경우도 있다. 반면 도로터널의 경우 이용하는 차량의 종류가 다양하고 왕복4차선 이상이 일반적이며 환기 등을 위한 공간이 추가적으로 필요하므로 원형보다는 장방형이 공간이용 측면에서는 유리하다고 할 수 있다. 그림 2는 거가대교 침매터널의 단면으로 폭 26.5m, 높이 10m의 장방형 단면을 적용하였으며 중앙에 갤러리를 두어 대피공간, 설비공간 및 제연공간으로 계획하였다.

침매터널은 재료적인 측면에서는 Steel tunnel과 본 사업에 적용된 Concrete tunnel로 크게 구분할 수 있다. 총 연장 3.7km인 거가대교 침매터널은 18개의 합체로 구성되며, 하나의 합체는 그림 3과 같이 길이 180m이며 8개의 콘크리트

트 세그먼트로 구성된다.

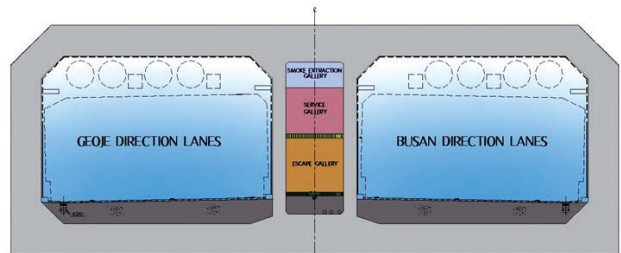


그림 2. 침매터널 단면도



그림 3. 단위 합체 개념도

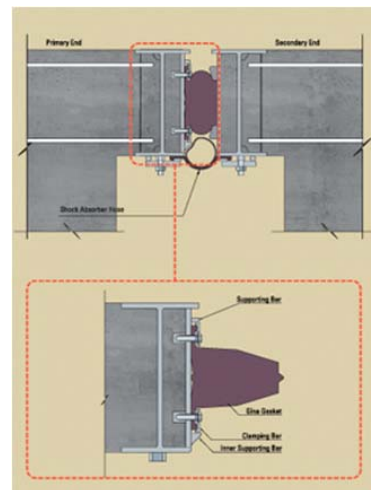


그림 4. 침설조인트

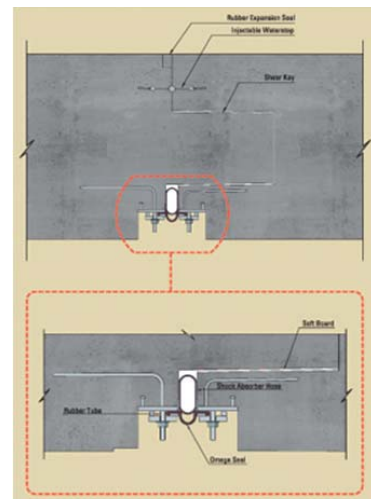


그림 5. 세그먼트 조인트

콘크리트 침매터널의 중요한 이슈는 수심 등의 건설조건에 따라 차이는 있을 수 있으나 대체적으로 조인트의 수밀성과 내구성이라 말할 수 있다. 거가대교 침매터널은 단위함체 사이의 침설조인트(그림 4 참조)와 단위함체 내의 8개 세그먼트 사이의 세그먼트조인트(그림 5 참조)가 있고 이들 조인트의 수밀성을 평가하려면 이의 거동을 알아야 되고 이를 위해서는 침매터널 종방향 거동에 대한 이해와 평가가 필요하다. 침매터널의 종방향 거동을 평가하기 위해서는 지반, 함체, 조인트 등으로 구성된 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 종방향해석결과에 따라서 적절한 종류와 크기의 조인트를 결정해야 한다. 조인트 거동에 가장 큰 영향을 미치는 변수는 지반조건, 계절별 해수온도변화에 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 결과도 출과 피드백 과정을 거쳐서 조인트 변경 또는 지반개량 등의 중요한 사항을 결정하게 된다. 거가대교 침매터널 구간의 해성점토 특성은 인근지역인 부산시항만 주변의 조사결과와 비교해 보았을 때 액성한계와 자연함수비가 높아서 상대적으로 고소성, 고압축성임을 알 수 있다.

또한 장기간 동안 발생할 것으로 예상되는 2차압밀침하와 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 일

명 부상형기초(partial depth foundation)로 하중분배의 개념으로 설계하였다. 이 개념은 구조물과 뒤채움으로 인한 주요하중이 CDM공법으로 조성된 침하저감요소(settlement reducing element)를 거쳐서 상대적으로 견고한 하부점토층으로 전달되므로서 하중분배(load-sharing concept)를 통해서 침하를 조절하기 위한 것으로 전반적인 침하에는 덜 민감하지만 부등침하에는 상대적으로 민감한 세그먼트 형식의 침매터널 구조특성을 고려한 것이다. 즉, 침하저감요소에 의해 전침하량을 최소화하므로서 전침하량에 비례해서 크질 수 있는 부등침하도 최소화하는 것이다.

종방향해석을 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 벨크헤드와 함체와 함체사이, 세그먼트와 세그먼트 사이에 설치되는 전단키, 침설작업에 필요한 와이어를 걸기 위한 각종 함체 매입물, M&A 등에 대한 설계도 더불어 진행된다.

3. 맺음말

침매터널은 통항하는 선박의 크기, 지반조건, 주변경관 등에 큰 영향을 미치지 않는 등 교량과 굴착터널에 비해 상대적으로 많은 장점을 가지고 있다. 본 사업을 계기로 이러한 장점을 가진 침매터널에 과거 보다는 좀 더 많은 관심과 기대가 모아지고 있다. 거가대교를 제외하고는 국내 적용 사례가 없는 침매터널을 향후 시행작업을 최소화하면서 적용하기 위해서는 본 사업을 통해 축적된 설계 및 시공 기술을 체계적으로 정리하는 작업이 이루어져야 하고 그러한 작업을 현재 진행중에 있다. 설계와 시공에 대한 체계적인 정리작업이 완료되면 학술적, 실용적 측면에서 매우 귀중한 자료가 될 수 있을 것이다. 이러한 작업을 통해 국내 토목기술이 한 단계 발전할 수 있는 기회가 될 수 있을 것으로 기대한다.

· 이정상 e-mail : summit@dwconst.co.kr

· 김제춘 e-mail : kjc66@dwconst.co.kr