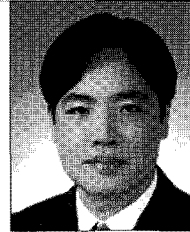


# 침매터널의 설계와 시공

## Design and Construction of the Busan-Geoje Fixed Links Immersed Tunnel



이 정 상\*



김 희 은\*\*

\* (주) 대우건설 GK사업관리팀 설계담당 과장  
\*\* (주)대우엔지니어링 토목사업그룹 차장

### 1. 머리말

2010년 12월이면 조사부터 시공까지 7년여의 대장정을 거쳐서 대한민국 최초의 침매터널이 개통하게 된다. 본 사업의 침매터널을 얘기할 때는 항상 국내 최초, 세계 최장도로 침매터널, 세계 최대수심 등의 화려한 수식어가 따라 붙는다. 수식어 자체는 화려하지만 이러한 수식어가 붙는 상황에서 설계와 시공을 진행하는 당사자의 입장에서는 무수한 난관에 직면해야 했고, 많은 기술자들의 땀과 열정이 필요했다. 본고의 본론에서는 한정된 지면으로 인해 많은 내용을 상세하게 전달할 수는 없지만 쉽지 않았던 설계와 시공에 대한 내용을 소개하고자 한다.

침매터널이라는 용어는 각종 언론매체를 통해서 거가대교 침매터널이 다큐멘터리 등으로 제작되어 공중파를 타면서부터는 어느 정도 익숙해졌지만 얼마전까지 만해도 일반인은 물론이고 건설 기술자들에게도 익숙하지 않은 것이었다. 비록 국내에는 다소 낯설지만 100년 이상의 짧은 역사를 가진 공법이다.

침매터널은 강이나 해협을 수저면 아래로 연결하는 터널의 하나로서 육상의 제작장에서 단위합체를 제작하여 이를 부력을 이용하여 물에 띄워서 시공현장까지 이동한 후에 합체내에 있는 물탱크에 물을 채워 서서히 가라 앉혀서 미

리 굴착된 트렌치 저면에 합체를 내려놓고 기 설치된 선형 합체와 연결하는 공법이다. 침매터널은 철도용의 경우 1910년에 미국과 캐나다 사이의 디트로이트강을 연결하는 사업에 최초로 적용된 이후로 근 30년 동안 미국에서만 건설되었고, 유럽과 일본에서는 1941년에 네덜란드의 Mass 터널과 1944년에 오사카 해저터널이 각각 최초의 침매터널이다. 이와같이 침매터널은 미국에서 최초로 적용된 이후로 지난 100여년의 기간 동안 전 세계 150여 곳에서 적용된 공법으로서 설치되는 지역의 자연환경적 특성에 따라 긴 역사 만큼이나 다양한 형태의 구조형식을 가지고 있다.

### 2. 본 론

#### 2.1 설계

침매터널은 전 세계적으로 많은 시공사례와 오랜 역사를 가지고 있지만 침매터널 설계와 시공을 위한 특별한 코드가 아직 만들어져 있지는 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. 하지

만 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 확보 방법, 제작장의 규모 등이 달라지므로 표준화된 단면이나 계획이 존재하는 것이 아니고 개별 사업의 특성에 따라서 다르게 진행된다. 침매터널의 설계 Flow는 명확히 정의되어 있지는 않지만 일반적으로 1. 지반조사 및 각종 조사수행 2. 설계기준 수립 3. 터널 선형계획 4. 함체단면계획 5. 기초형식결정 6. 터널방향 및 종방향해석 수행 7. M&E설계의 순서로 진행된다.

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 경우에는 깊은 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. 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.

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 해석모형을 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 해수 온도변화에 따른 함체의 수축/팽창, 지진하중 등이고, 이를 종방향 해석모형에 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 보았을 때 액성한계와 자연함수비가 높아 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. 개량체의 선단은 점토에 비해서 좀 더 견고한 층으로 판단되는 모래자갈층에 근입되지 않고 점토층 내에서도 상대적으로 큰 강도를 가진 하부 점토층까지 근입하는 것으로 일명 부상형기초(partial depth foundation)로 하중분배의 개념으로 설계하였다. 이 개념은 주요하중이 CDM공법으로 조성된 침하저감요소(settlement reducing element)를 거쳐서 상대적으로 견고한 하부점토층으로 전달되므로서 하중분배(load-sharing concept)를 통해서



그림 1 침매터널 단면도

침하를 조절하기 위한 것으로 전반적인 침하에는 덜 민감하지만 부등침하에는 상대적으로 민감한 세그멘탈 형식의 침매터널 구조특성을 고려한 것이다.

종방향 해석을 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.

## 2.2 시공

침매터널 공법은 그림 1과 같은 주요공정으로 이루어지고 각각의 공정이 개별적으로 평행선상에서 동시에 진행된다. 바로 이러한 점이 침매터널 공법의 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 단위함체를 제작하는 침매터널은 품질관리가 매우 용이하고 공기단축 또한 가능하다.

침매터널 공정을 좀 더 상세하게 살펴보면 함체제작을 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

1. 함체 제작 (제작장)
2. Trench 준설 (침설 위치)
3. 지반개량 (침설 위치)
4. 기초 Foundation 설치 (침설 위치)
5. 침 설 (침설 위치)
6. 함체 보호공 (침설 위치)
7. 갱구부 구조물 (육상 Approach부)

그림 2 침매터널 주요공정

등의 과정을 거쳐 침매함체가 완성된다. 이렇게 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 배수하므로써 함체를 띄우는 작업을 실시한다. 띄워진 함체는 드라이독에 설치되어 있는 윈치(Winch)와 예인선에 의해서 제작장 밖으로 반출된 후에 계류장으로 즉시 예인되어 침설전까지 계류장에 미리 설치되어 있는 앵커 와이어에 고정되게 된다. 계류장에서는 침설을 위한 각종 장비와 가시설을 설치하는 작업이 이루어진다.

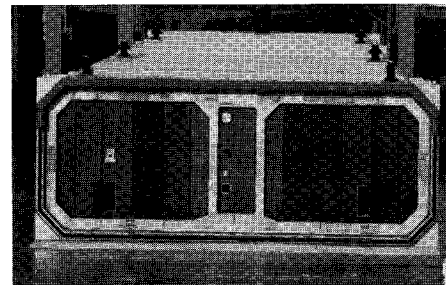


그림 3 격벽(Bulk head) 설치

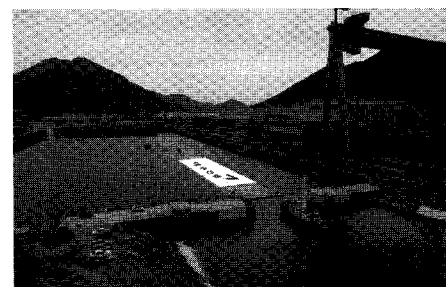


그림 4 드라이독 주수 및 함체 반출

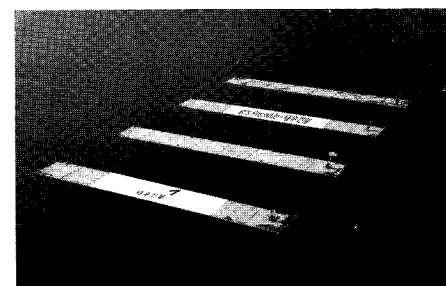


그림 5 임시계류장

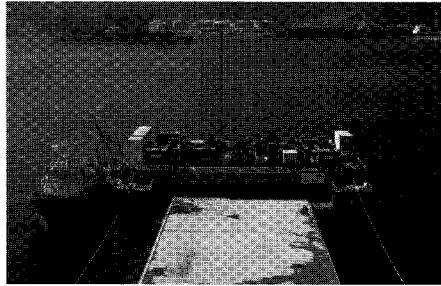


그림 6 침설을 위한 준비작업(계류장)

Trench 준설, 지반개량, 기초 Foundation 조성 등 합체 침설 전에 침설위치에서 이루어져야 할 선행공정이 완료되어 합체 침설이 가능해지면 국내최초로 적용되는 기상예보시스템을 통해서 해상기상조건을 최종 확인한 후에 계류장에서 침설현장까지 합체를 예인하여 운반한다. 침설위치에 합체가 도착하면 사전에 미리 설치해 둔 앵커 와이어를 합체에 연결하는 작업을 수행하여 파도와 조류에 대한 합체의 안정성을 확보한 후에 합체 내부에 설치된 Ballast tank 에 물을 채워 넣어 합체를 서서히 가라 앉혀서 기설합체와의 접합면에서 50cm가 이격된 위치에서 기초에 안착시킨다. 합체가 안착된 후에는 합체의 정확한 위치를 측정하기 위한 장치와 1차 접합을 위한 유압잭을 설치하는 작업을 수행한다. 이러한 작업이 완료되면 침매합체의 접합공정과 합체 배면 뒤채움 및 보호공 작업을 순차적으로 진행하게 된다.

침매터널의 접합 및 조인트부에 대한 공정은 그림 6과 같이 유압잭의 견인에 의한 1차접합, 합체 사이의 공간에 있는 물의 배수에 의한 2차접합, 2차지수재의 설치, 가격벽

제거 및 전단키 설치의 순으로 이루어진다.

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

### 3. 맺음말

침매터널 각 단위합체의 제작은 매우 안정된 환경의 육상 제작장에서 진행된다. 하지만 제작외의 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 사용가능 여부 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. [N]

[담당 : 김명한, 편집위원]

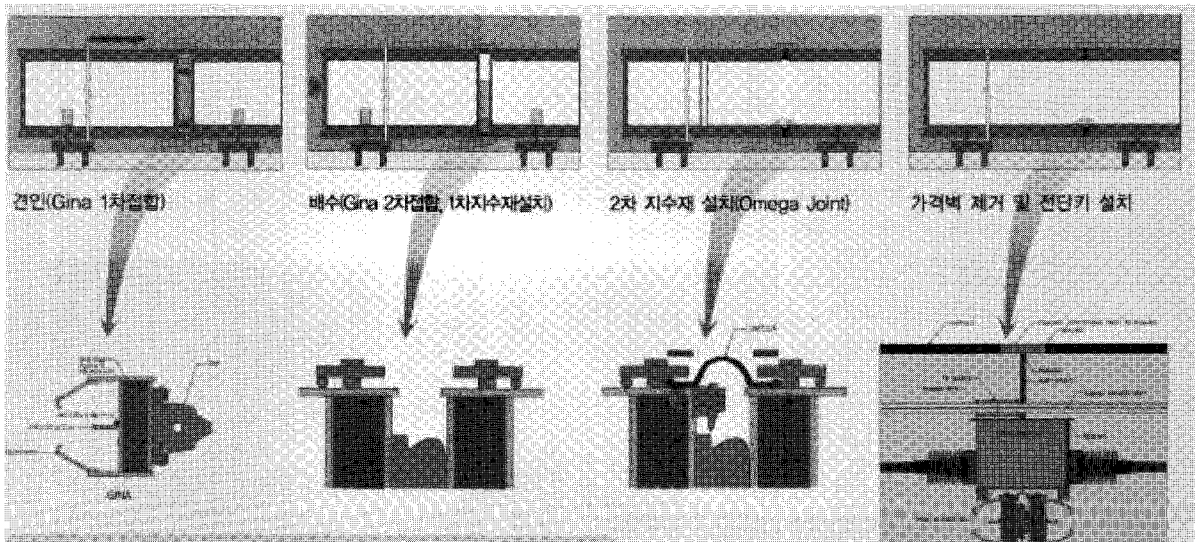


그림 7 침매터널 접합 및 조인트 부 공정