거가대교 침매터널의 설계와 시공

Design and Construction of Busan-Geoje Fixed Link Immersed Tunnel

이정상 차장
㈜대우건설 토목기술팀

LEE, Jung Sang Deputy General Manager, MSc
Daewoo Construction

The Busan–Geoje fixed-link bridge is an 8.2-km-long motorway connecting Busan, Korea's southernmost and second largest city, to the island of Geoje, where the two biggest Korean shipbuilding yards are located, with two normal traffic lanes in each direction. This motorway includes a 3,300-m immersed tunnel, which is one of the longest immersed tunnels in the world, and two cable-stayed bridges, each 2km in length. The immersed tunnel consists of 18 elements, each approximately 180m long. The standard tunnel elements, E1 to E16, have exterior dimensions of 26.46 m width and 9.97m height. The width of elements 17 and 18 was increased to 28.46m because of climbing lanes. These tunnel elements were prefabricated reinforced concrete in a temporary dry dock and towed to the site and lowered into final position in a dredged trench, placed directly, without temporary support, on a screeded gravel bed.

The site was located in an exposed offshore, subjected to strong winds, large swell waves, and strong tidal currents. These conditions, together with the tunnel being the deepest immersed tunnel ever built and the foundation consisting of a very soft, normally to slightly over-consolidated marine clay, makes the project unique and one of the most challenging immersed tunnels ever built. Due to these conditions, there was no choice but to have very strict accuracy for operations such as trench dredging, gravel bedding, and backfilling works that could induce differential settlement.

Several special methods were developed and applied to overcome the difficult conditions mentioned above. New, accurate gravel bedding equipment developed for this project and a deep mixing method applied to improve the soft marine clay are presented in the following paper as part of the foundation of the immersed tunnel.

침매터널의 역사

침매터널은 강이나 해협을 수저면 아래로 연결하는 터널의 하나로서 그 역사는 오래되었다. 최초의 침매터널은 철도용의 경우 1910년에 미국의 미시간과 온테리오를 연결하는 노선에 적용되었고 도로용은 1928년 미국의 Oakland와 Alameda를 연결하기 위해서 건설된 Posey tunnel이다. 또한 최초의 국가간을 연결하는 침매터널은 1930년에 미국의 Michigan과 캐나다의 Ontario를 연결하기 위해서 건설된 Detroit-Windsor tunnel 이다. 유럽과 일본은 1942년에 건설된 네덜란드의 Mass 터널과 1944년에 건설된 오사카 해저터널이 각각 최초의 침매터널이다. 한국의 경우는 2010년에 준공된 부산-거제간 연결도로 침매터널이 최초의 침매터널이다.

침매터널이란?

침매터널공법은 〈그림 1〉과 같은 주요공정으로 이루어지고 각각의 공정이 개별적으로 평행선상에서 동시에 진행된다. 바로 이러한 점이 침매터널공법의 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 일괄타설 방식으로 진행되며, 품질관리를 위해서 증기양생 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 배수하므로서 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.

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



〈그림 1〉 침매터널 주요 공정

침매터널의 접합 및 조인트부에 대한 공정은 〈그림 2〉와 같이 유압잭의 견인에 의한 1차 접합, 함체 사이의 공간에 있는 물의 배수에 의한 2차 접합, 2차 지수재의 설치, 가격벽 제거 및 전단키 설치의 순으로 이루어진다.

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

왜 침매터널을 적용하는가?

침매터널의 특징은 경제성과 시공성 측면으로 크게 구분할 수 있다. 경제성 측면에서는 그림.3과 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 고려하면 연장이 길어질 수 밖에 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 어프로치부의 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 유불리에는 다소 차이가 있을 수 있다〈그림 3〉.

시공성 측면에서는 침매터널은 원지반에 Trench를 굴착하여 매설하는 형식으로 설치하므로 큰 수준의 지반지지력이 필요없으므로 2차 압밀 등의 장기적인 침하가 예상되는 초연약해성점토지반을 제외하고는 연약지반에 대한 적응도가 높다. 또한 침매터널은 각 개별 함체를 드라이독에서 프리캐스트공법으로 제작함으로서 다른 터널공법에 비해 높은 수밀성, 대단면제작, 고품질, 단기간제작 등의 장점을 가지고 있다.

침매터널은 해저면 또는 강하저면을 따라서 건설되는 공법이므로 교량과 같이 주변의 경관을 해치거나 철새의 이동을 방해하지 않는다. 한 예로 호주 시드니항에는 아름다운 오페라 하우스와 세계에서 4번째로 긴 아치교인 시드니 하버브릿지가 있다. 시드니는 늘어나는 교통량의 분산을 목적으로 추가 교량 건설을 검토하였으나 상기 두 구조물의 경관을 해치지 않기 위해 침매터널을 선택하였다.

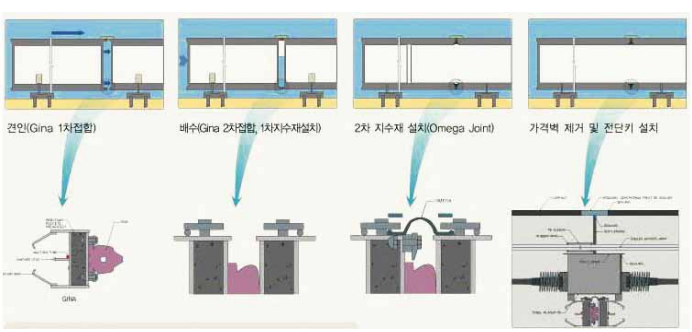
부산-거제간 연결도로 침매터널의 경우엔 군사적으로 이유로 침매터널을 적용하였다. 상기 연결도로가 계획된 수로는 해군의 주작전 항로로서 군함과 잠수함 등의 통항이 빈번히 이루어지는 지역이다. 사업의 초기계획단계에는 침매터널이 아닌 초장대교량을 검토하였는데, 해군과의 협의과정에서 해군측의 요구로 침매터널로 변경하게 되었다. 해군측의 요구는 전시에 교량이 폭파되어 주작전항로가 패쇄될 경우 작전수행에 지장이 있다는 것이었다. 이렇듯 다양한 이유로 침매터널을 적용하고 있다.

침매터널의 기본원리

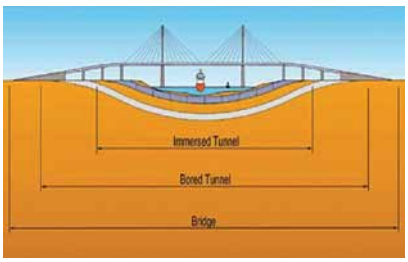
침매터널 시공에 있어서 가장 기본적인 사항은 육상에서 제작하고 물에 띄워서 운반하여 해저면에 가라앉힌 후에 이미 침설되어 있는 함체와 연결한다는 것이다. 여기서 운반하고 침설하는 작업은 부력이 있어야만 가능한 작업으로 함체 내부의 임시 물탱크의 수위를 조절함으로서 부력을 조절하는 침매터널의 부력조절작업은 잠수함과 같은 원리이다.

침매터널 단면 형태

침매터널은 그 기능과 용도에 따라서 다양한 단면 형태를 가진다. 철도전용터널의 경우엔 도로터널에 비해서 상대적으로 단면의 규모가 적고 환기를 위한 설비와 환기탑 등의 부대시설이 필요 없다. 도로터널은 자동차 전용터널로서 자동차에서 발생하는 유해한 배기가스를 처리하기 위한 환기설비와 환기탑 등의 시설이 필요하다. 도로철도혼용터널은 도로와 철도를 동시에 이용하는 터널로 폭이 보통 40m 정도로 규모가 크다.



〈그림 2〉 침매터널 접합 및 조인트 부 공정



〈그림 3〉 구조물 형식별 연장 비교

침매터널의 계획 및 설계

침매터널은 전세계적으로 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 구조물 보다도 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 진행된다.



LEE, Jung Sang

Daewoo Construction
Deputy General Manager, MSc

아주대학교 토목공학과에서 학사 및 석사 취득. 1999년 대우건설 입사. 거가대교 현장을 거쳐 현재 본사토목기술팀 근무

- 2011~Present : Civil Engineering Team in Head office. In charge of Management of Design for Oversea Tender
- 2004~2011 : Busan-Geoje Fixed Link Immersed Tunnel
- 2000~2004 : Deawoo Institute of Construction Technology
- 1998~2000 : Sewage Terminal Treatment Facility of Jinyoung, Korea