

## 침매터널의 소개



박래영  
대우엔지니어링 부장

### 1. 침매 터널이란 무엇인가?

하상이나 해상에 준설을 한 후 튜브를 연속적으로 연결하여 설치하는 기술은 19세기 후반에 정립되었다. 이 튜브는 주로 용수나 배수용으로 설치되기 시작하였으나, 이후 내부 물을 배수하여 전력용 케이블 설치용으로도 사용되었고, 이후 도로나 철도용으로 사용하고자 하는 아이디어가 정립되기 시작하였다.

튜브의 양단은 가격벽(Temporary Bulkhead)으로 임시 막힌 상태이며 수중에서는 방수가 가능한 조인트로 연결된다. 튜브를 준설면 바닥에 설치하고 육상 인근까지 연결한 후 가격벽을 제거하면 해저면에 도로나 철도용 구조물이 완성된다.(가물막이를 하고 수중 굴착한 후 매립하는 공법은 침매 터널 공법과 달리 개착식 터널-Cut & Cover- 공법이라 칭하며 이 공법은 부력을 이용하지 않기 때문에 침매 터널과는 구분된다.)

침매터널 공법은 제작된 함체가 부상하여야 하는 조건, 침설이 가능해야 하는 조건, 그리고 하상이나 해상에서 계속 안정한 상태로 설치되어야 하는 조건을 만족해야만

한다. 이 3가지 조건은 서로 상반되기 때문에 설계 및 제작 시 단면 크기, 재료의 단위 중량, 침매 터널 설치 위치에서의 물의 밀도에 대하여 상당한 정확성을 요구한다.

침매 터널은 공사 중 침설이 가능하고 완공 후 부상에 대하여 안정성을 확보하기 위하여 터널에 발라스트(Ballast)가 필요할 정도로 부력이 상당히 크게 발생하기 때문에 침매 터널 자중의 일부만이 기초에 하중으로 작용하게 되어 연약한 지반에서도 별도의 지반 보강 없이 Sand Flow, Sand Jet, Gravel Bed와 같은 준설면 기초 처리만으로 시공이 가능한 것이 일반적이다.

### 2. 침매 터널의 변천사

가격벽을 이용하고 수중에서 방수가 가능한 조인트로 연결하는 방식으로 건설된 최초의 터널은 미국과 캐나다 사이의 Detroit 강에 설치된 양방향 궤도의 철도 터널로 1910년에 완공되었다. 이 터널은 내부에 콘크리트 라이닝이 있는 강각(Steel) 방식의 터널로 이후 미국에서 침매터

널 공법의 한 형식으로 적용 발전되었다. 미국 방식의 침매 터널은 원형 강각 방식으로 내외부에 콘크리트로 발라스팅을 한다. 원형 강각 방식은 다차로를 구성하기 위해서는 단면의 폭 및 높이가 동시에 커지기 때문에 준설, 보호공 및 발라스팅 콘크리트의 양이 상당히 증가하게 된다.

콘크리트를 이용할 경우 사각형 단면을 구성할 수 있기 때문에 수평 수직 방향의 건축한계만을 확보하여 콘크리트 단면을 최적화함으로써 재료 및 가격 경쟁력을 확보할 수 있다. 덴마크의 Christiani & Nielsen사에서 콘크리트 터널을 드라이 도크에서 미리 제작하는 방법을 제안하였는데 이로써 직선 및 곡선 형태의 터널 제작이 가능하게 되었다.

함체 단부는 가격벽으로 막고 해상에서 함체 내부의 물탱크에 물을 채워 이미 준설된 위치에 한 개씩 침설시킨다. 침설 후 두 함체의 단부에 있는 가격벽 사이의 물을 배제하면 가격벽 사이의 대기압과 신설 함체 단부에서 작용하는

수압차를 이용하여 함체를 연결시킨다. 함체를 연결하고 가격벽을 제거한 후 함체 내부의 물탱크 물은 함체 바닥 슬래브 위에 타설 되는 발라스팅 콘크리트로 대체되고 물탱크는 해체된다. 발라스팅 콘크리트의 양은 부력을 상쇄시킬 수 있을 정도로 충분히 타설되어야 한다. 이 방법은 1936년 Rotterdam의 Mass 강을 가로지르는 두개의 원형 단면으로 구성된 침매터널 공사 입찰에서 덴마크의 Christiani & Nielsen사가 4개의 튜브로 구성된 1개의 사각형 단면의 침매터널을 대안으로 제시한 것으로 이 터널이 유럽에서 최초로 시행된 사각형 콘크리트 단면의 침매터널로 이 개념이 현재의 침매 터널의 기본 개념이 되었다.

1936년 유럽식 침매터널은 그 이후로 상당한 진전이 있었으며, 이 진전 중에 중요한 사항은 침매 터널 전체를 타설하여 연결하는 방식에서 GINA 조인트를 이용하는 방식으로의 전환으로 방수막과 시공 조인트가 필요 없는 콘크리트 기술의 발전이 그것이라 할 수 있다. 침매 터널의 기초 공법에 있어서도 다양한 공법이 모래 분사 기초 형식에서 최근 시공법으로 컴퓨터를 이용한 자갈기초 포

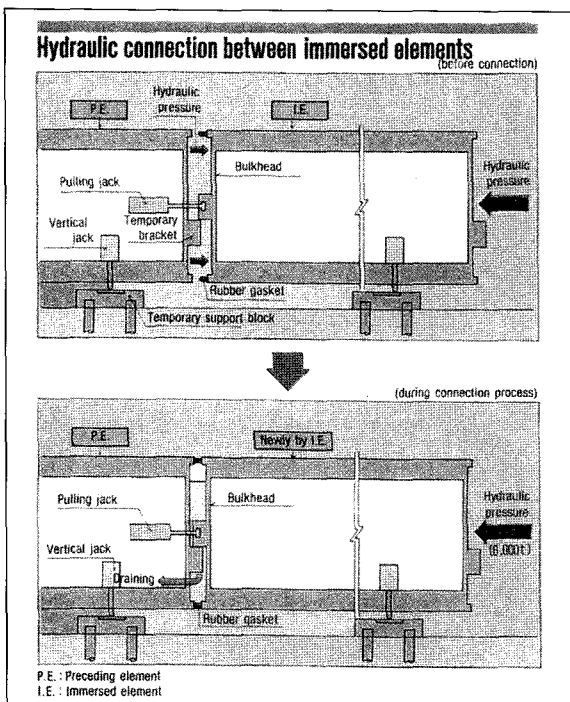


그림 1. 침매 터널 연결 개념도

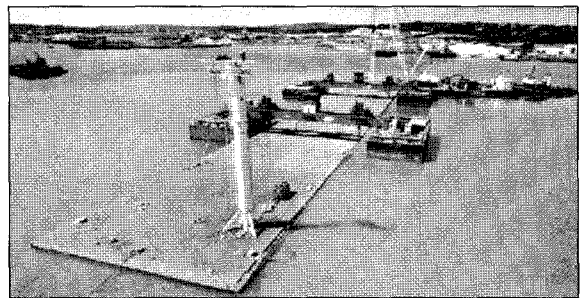


그림 2. 침매 터널 예인

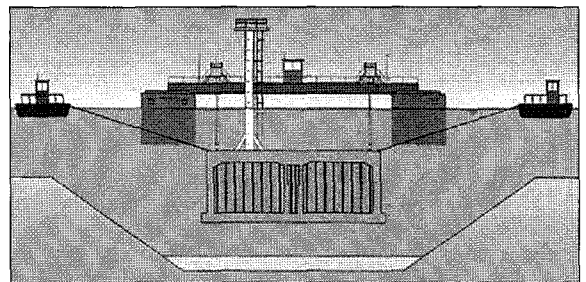


그림 3. 침매 터널 침설

설 방식 도입 등으로 발전되었다.

국내 토목기술자에게 생소한 침매 터널은 100년이 넘는 역사를 통해서 발전해 오면서 부산-거제간 연결도로인 침매터널의 모델이 되는 터널이기도 한 Drogden 터널과 같은 침단 터널을 건설하는 성과를 낳았으며, 현재 전 세계적으로 140여개 정도의 침매 터널이 건설된 것으로 알려져 있고 침매 터널이 가장 많은 국가는 네덜란드로 수로 이용 등 지형적인 영향이 크다.

### 3. 침매 터널의 적용성

#### 3.1 경제적 측면

대형 선박이 통과하는 하천이나 바다(일반적으로 항내가 많음)를 가로질러 도로나 철도의 건설이 필요한 경우 교량, 침매 터널 및 굴착 터널의 연장을 비교하면 일반적으로 교량, 굴착 터널, 침매 터널 순이다. 이와 같은 지형 조건의 경우 구조물 연장을 최소화시킨 침매 터널이 타 공법에 비하여 경제성 우위에 있다.

#### 3.2 환경적 측면

환경적 측면은 영구적인 측면과 공사 중 측면으로 구분할 수 있다. 영구적인 측면에서는 해류 변화, 조류 서식의 영향이나 조류 이동 경로의 장애, 수중 생물에 미치는 영향 등이 있으며 공사 중 측면에서는 공사 중 발생하는 부유물의 영향 등이 있다.

굴착 터널의 경우 공사 중 부유물의 발생이 전혀 없으며 영구적인 측면에서도 환경에 미치는 영향이 없어 환경 친화적이라고 할 수 있다.

교량의 교각이나 주탑이 해상이나 하상에 설치될 경우 해류 변화를 수반하며, 주탑 및 교량상의 차량으로 인한 조류의 이동 경로 장애나 서식에 영향을 미친다. 또한 공

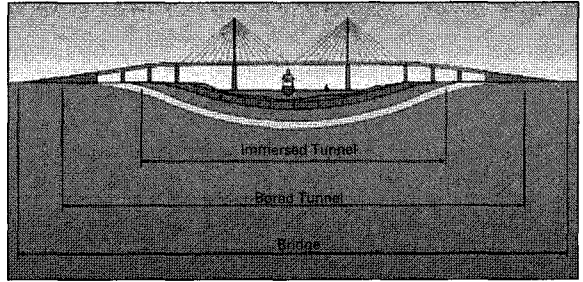


그림 4. 침매 터널, 굴착 터널, 교량의 구조물 연장 비교

사 중 발생하는 부유물 영향이 있다.

침매 터널의 경우 반드시 준설 공사를 동반하기 때문에 공사 중 부유물로 인한 환경 영향은 있으나 영구적 측면의 영향은 교량에 비하여 상대적으로 적다고 할 수 있다. 침매 터널의 준설 및 준설 면의 매립 공사는 일반 항만공사와 동일하게 수행된다.

교량과 침매 터널이 환경에 미치는 영향을 비교하면 규모 및 검토 대상의 가중치에 따라서 다르지만 일반적으로 침매 터널의 준설량이 교량 공사에 비하여 많기 때문에 공사 중 영향은 침매 터널이 크다고 할 수 있으나, 영구적인 측면에서는 침매 터널이 교량에 비하여 유리한 경우가 많다고 할 수 있다.

#### 3.3 미관

교량이 자연 경관을 훼손하거나 기존 구조물의 경관을 훼손하는 경우 대안으로 침매 터널을 적용하는 사례가 있다. 호주의 시드니 Harbor Bridge의 경우 교통량 분산을 위하여 교량을 추가로 설치할 경우 Harbor Bridge의 상징성을 훼손하기 때문에 대안으로 시드니 Harbor 침매 터널을 건설한 것이 대표적 예라 할 수 있다.

#### 3.4 항공 장애

덴마크와 스웨덴을 연결하는 Fixed Link의 침매터널이 대표적인 예이다. 스웨덴을 연결하는 부분은 사장교를

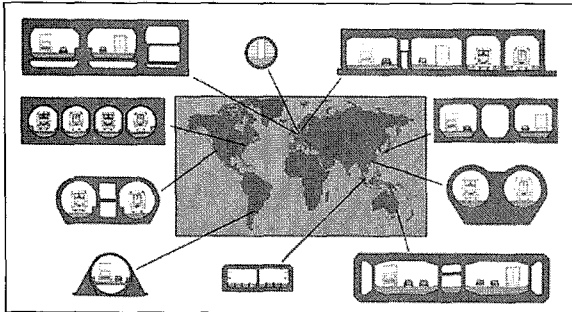


그림 5. 대표 침매 터널 단면 및 분포

적용하고 덴마크의 Kastrup 공항과 인접한 부분은 침매 터널로 건설하여 항로에 장애가 발생하지 않도록 하였다. 이 Drogden 침매 터널은 현재 세계 최대 규모로 연장이 약 4km에 이른다.

### 3.5 군사적 이유

군사적 이유로 교량 건설이 불가하여 굴착 터널이나 침매 터널을 적용해야만 하는 경우가 있으며 부산-거제간 연결 도로의 침매 터널의 경우가 그 예이다.

### 3.6 복합 구조

형태 및 연장의 제약이 없어 광폭의 도로 및 철도의 복합 구조에 적용성이 뛰어나므로 도로와 철도가 병행하는 구간에 적용 시 유리하다.

## 4. 침매 터널의 기초 공법

침매 터널은 함체가 부력을 받는 구조이기 때문에 기초 바닥에 작용하는 응력이 당초 원지반 상태에서 작용하는 유효응력과 유사하여 일반적으로 육상 구조물에 적용하는 방식의 기초 공법이 불필요하다. 따라서 침매 터널의 일반적인 기초 공법은 하중 지지를 목적으로 하기 보다는

함체의 하중을 기초 바다에 고르게 전달할 수 있도록 기초면을 정리하는 개념으로 크게 3가지 공법이 적용되고 있다. 이 중에서 모래 분사 공법 및 모래 낙하 공법은 준설면에 설치된 가 기초에 함체를 침설 시킨 후 함체 바닥과 준설면 사이를 채우는 방식이고, 자갈층 포설 공법은 함체를 설치하기 전 준설면에 자갈층을 고르게 포설한 후 함체를 안치하는 공법이며, 특별한 경우 별도의 기초 공법으로 말뚝 공법 등이 적용된 사례도 있다.

### 4.1 모래분사(Sand Jetting) 공법

터널 하부와 준설면 사이를 모래로 채우는 공법으로, 채움 작업을 위하여 함체를 임시 지지할 수 있는 가 기초가 필요하며 가 기초 규격은 일반적으로 높이 0.6m, 1.2m, 폭 10m, 40m 정도 이다. 이 공법은 덴마크의 Christiani & Nielsen A/S사에서 개발하였다.

바지선에 설치된 펌핑 기지와 함체 상단에 설치한 이동식 갠트리로부터 함체와 준설면 사이로 3개의 파이프를 설치한다. 모래-물 혼합물은 중앙 파이프를 통하여 배출되고, 동시에 다른 파이프에서는 물을 흡입한다.

적정 속도로 분사 시 모래층은 팬 케이크 모양의 형태로 준설면과 터널 바닥 사이의 틈을 완전히 채운다. 파이프 시스템을 이동시켜 기존 모래 채움 층을 일부 잠식해 들어가면서 전체 틈을 채우게 되며, 흡입수에 포함된 모래가 중앙 파이프를 통하여 배출되는 모래와 유사할 때

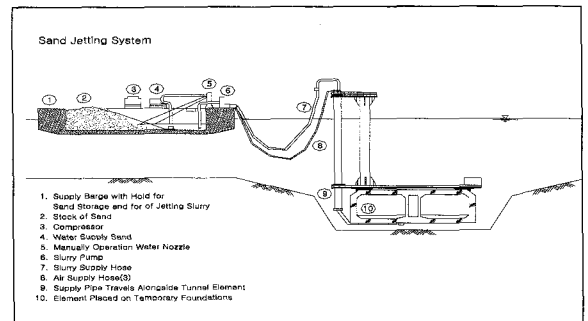


그림 6. 모래 분사 공법

작업을 종료한다.

모래-물 혼합물의 모래 부피 비율은 5%에서 20% 정도가 전형적이며, 일반적으로 굵은 모래를 사용한다. Sand jetting 공법은 모래 기초를 시공하기 전 터널 하부에 침전된 실트를 제거하기 위하여 초기 청수를 이용한 실트 제거 작업이 필요하다.

### 4.2 모래 낙하(Sand Flow) 공법

함체 제작 시 함체 하부 슬래브에 분사 노즐(jetting nozzle)을 설치하여 모래-물 혼합물을 주입할 수 있도록 한다. 모래는 수직 파이프를 통해 배출되어 원형 형태가 되며 점차 배출 높이가 증가하여 터널 하부 슬래브 하단까지 포설된다. 이 공법은 네덜란드의 Ballast Nedam Group에서 개발하였다.

원칙적으로 모든 규격의 모래가 가능하나 배출 위치 당 채움 면적이 굵은 모래가 가는 모래보다 작기 때문에 가는 모래가 유리하다. 모래-물 혼합물의 모래 비율은 sand jetting 방법과 유사하다. 모래-물 혼합물 공급 체계의 성능에 영향을 받는 sand jetting 방법보다 sand flow 방법이 공기가 빠르는데 그 이유는 sand flow를 위한 배출 파이프를 사전에 많이 준비할 수 있기 때문이다.

이 방법은 함체 가설과 모래층 기초 작업 시작 사이의 시간을 축소하여 실트 침전을 간접적으로 줄이는 것을 제

외하고는 실트의 침전을 배제시킬 방법이 없다.

터널 하부 슬래브에 모래 배출을 위한 밸브가 있는 파이프 개구부를 많이 설치할 경우에는 시공 중 누수 혹은 침수 발생 가능성이 크며 완공 후에도 누수의 우려가 있다. 이와 같은 위험 요소를 배제하기 위하여 터널의 하부 슬래브를 관통하지 않고 하부 슬래브에서 벽체를 따라 매입한 파이프에 잠수부가 펌핑 기지에 있는 flexible line을 외부에서 연결하여 이를 통하여 모래-물 혼합물을 배출한다.

### 4.3 골재 포설(Screeded Gravel) 공법

모래를 이용한 공법의 대안으로 골재층 기초가 있다. 침매 터널 기초는 함체에 집중 지지점이 발생하지 않도록 하는 것이 중요하기 때문에 골재층의 포설 높이 허용 오차 수준이 작으므로 골재층 기초 공사를 위해서는 특수 장비가 필요하다. 골재포설 공법의 이점은 가지지가 필요 없고 함체를 안치시키는 작업만으로 공정이 종료되기 때문에 공기가 짧다는 것이다.

골재층 기초의 두께는 0.5~0.9m 정도가 필요하므로 이를 위한 충분한 깊이의 준설이 필요하다. 입도가 양호한 골재가 필요하며 허용 오차 이내로 평탄성을 확보하여야 하고 터널 함체보다 1m 정도 넓게 포설한다.

골재층 기초는 철도 터널이나 왕복 2차로 터널과 같이 폭이 좁은 터널에 적합하다. 이와 같은 경우는 터널 축을

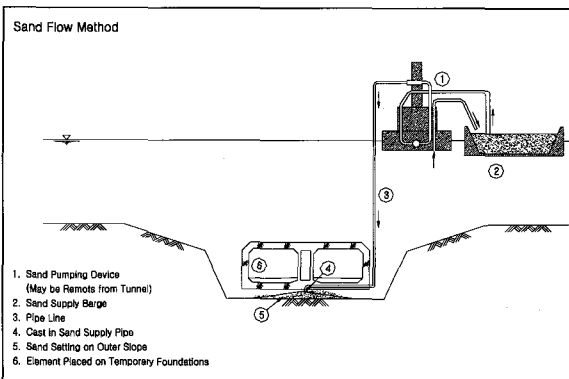


그림 7. 모래 낙하 공법

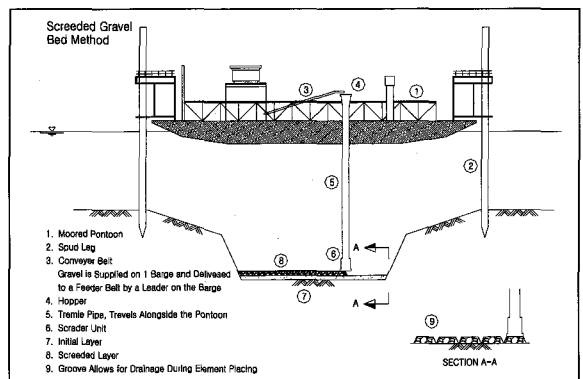


그림 8 골재 포설 공법

따라 한번의 연속 작업으로 포설이 가능하지만 터널 합체의 폭이 커지면 한번 이상의 연속 작업이 필요하다. 각 연속 작업 간에는 이전 포설 구간의 교란을 방지하기 위해 약간의 간격이 필요하다.

오레슨드와 Second Benelux 터널의 기초는 터널 축 방향으로 포설하는 방식의 전형적인 방법으로 시공하지 않고 좁은 폭으로 터널 축을 직각으로 교차하는 방법으로 포설하였으며, 최근에 골재층 포설 공법의 개발이 많이 진전되어 상당히 높은 수준의 정밀도로 골재 포설이 가능하다. 특히 2000년 완공된 침매 터널인 Drogden 터널은 전례가 없는 침단 공법을 적용하여 건설하였다. 공장 내에서 합체를 일괄 타설하는 방법으로 제작하고 합체를 골재층 위에 바로 안치할 수 있을 정도의 정밀도를 갖는 골재 포설 방법을 개발하고 포설 높이를 컴퓨터로 관리하여 정밀도를 한층 증가시켰다.

## 5. 침매 터널의 방재

장대 침매 터널에는 도로용 튜브 외에 서비스용 튜브(중앙 갤러리)를 설치하는 경우가 많다. 일반적으로 이 튜브는 도로 튜브 사이에 있어 비상대피용 통로, 기계, 전기 설비 공간으로 이용되는데 부산-거제간 연결도로의 침매터널(이하 거가 침매 터널)의 경우에는 화재 시 배연 통로도 사용할 수 있도록 설계하고 있다. 중앙 갤러리에는 비상문을 일정 간격으로 설치(거가 침매 터널은 90m 간격으로 설치)하여 화재 시 대피가 가능하도록 하고 있으며, 상시 가압 상태로 유지하여 화재 시 연기의 유입을 방지하여 대피 시 안전을 도모하고 있다.

## 6. 침매 터널의 배수 계획

침매 터널의 종단 선형은 일반 지하차도와 같이 아래로

볼록한 형태가 된다. 따라서 터널 내로 유입되는 우수량이 상당히 많으며 이를 처리하기 위한 집수조가 반드시 필요하다. 침매 터널은 그 특성상 어느 특정 구간에 단면에 변화를 주어 많은 양의 물을 처리할 수 있는 대규모의 집수조를 설치하는 것이 어렵다. 따라서 침매 터널 진입부의 개착식 터널 구간에 집수조를 설치하여 침매 터널 내로 유입되는 우수를 입구에서 차단하는 방식으로 계획한다. 강우 강도에 대한 재현 주기는 위험도 분석을 통해 결정하는데 거가 침매 터널의 경우에는 250년 빈도 강우 강도를 기준으로 배수 계획을 수립하였다. 개착식 터널에 설치된 집수조에는 펌핑 설비를 갖추어 집수된 물을 배출한다. 집수조에는 동작 상태와 수위를 알려주는 경보장치를 설치하여 집수조의 넘침에 대한 경보가 운전자에게 전달될 수 있도록 한다.

터널 내 청소용수 처리나 화재 진압용수의 처리를 위해서 침매 터널 최저점에 집수조를 설치하는데 집수조의 위치는 밸러스트 콘크리트 내에 설치하여 침매 터널의 단면이 변하지 않도록 계획한다. 이와 같은 오염물이 터널내의 집수조에 집수될 시에는 배수펌프가 작동하지 않고 탱크 트럭에 의해 수거되며 많은 비가 내리거나 비슷한 상황이 발생했을 경우 오염되지 않은 물은 터널내 집수조의 펌프에 의해 배수된다. 유출된 가연성 유체도 터널 내 집수조로 유입되며, 집수조에 일산화탄소가 일정량 모이게 되면 폭발할 수 있는 환경이 되어 집수조에 감압장치가 설치되지 않으면 그 폭발압이 증가하기 때문에 집수조에 수면 위의 방폭 전기 설비, 일산화 탄소 감지기, 가스 경보기, 감압용 게이트, 자동 포말 소화 설비, 파이프내에서 역류를 방지하기 위한 체크밸브가 설치된다.

## 7. 부산-거제간 연결도로 침매 터널

부산 거제간 연결도로는 부산광역시 강서구 가덕도에 서 경상남도 거제시 장목면을 연결하는 국가지원지방도

58호선으로서, 공동 참여사가 초기 자본금을 투입하고 시설물을 완공하여 정부로 소유권을 넘긴 후 그 운영권은 사업 시행자가 가지며, 운영에 따른 통행료 수입으로 사업의 수익을 얻는 방식인 BTO(build, transfer & Operate) 방식으로 사업을 추진하는 방식이다. 조직 구성은 부산 광역시와 경상남도에서 공동으로 출자한 부산-거제간 연결도로 건설 조합이 주무관청으로 조직되어 있으며, 사업시행자는 GK 해상도로(주)이며 시공의 주간사는(주)대우건설로 사업규모는 총연장 8.2km의 왕복 4차로로 구성된다. 총 사업비는 1999년 12월 불변가 기준으로 할 때 1조 4,469억원으로 2004년에 착수하여 2010년에 완공예정이다.

주요시설로는 주항로 구간의 침매터널 3.7km와 예비항로 구간의 2주탑 사장교 및 3주탑 사장교가 있으며, 접속교 및 산악터널 일부로 구성된다.

이중 침매 터널은 가덕도와 중죽도를 연결하는 해저터널 구간으로서 침매터널과 육상부의 도로(본 구간은 서측의 경우 중죽도 육상 터널에 연결되며 동측의 경우 가덕도 도로구간에 연결)를 연결하기 위하여 침매 터널 서측 끝단부의 경우 대죽도와 중죽도 사이를 일부 매립하여 침매터널 갱구부를 조성하는 것으로 계획하였으며, 동측 끝단부에도 가덕도에 일부 매립을 하여 갱구부를 조성한다.

갱구부에는 침매터널을 육상부 도로와 연결하기 위한 개착식 터널(Cut and Cover Tunnel)이 있으며, 터널 내 환기와 제연 설비 및 전기 설비를 설치하기 위한 환기소는 개착식 터널 구간의 끝부분에 설치된다. 개착식 터널을 일반 도로와 연결하기 위한 구조물로 램프(U형 옹벽)가 있어 서측은 중죽도 터널과 연결되고 동측은 일반 도로 구간과 연결될 예정이다.

침매함은 외부에 별도의 방수 처리를 하지 않고 콘크리트만으로 방수를 기대하는 규모가 큰 Massive 콘크리트 구조이므로, 충분한 수밀성을 기대하기 위하여 콘크리트 수밀성에 대하여 특별 조건에 따른 배합 설계가 준비된다. 제작장에서 제작되는 함체의 제원은 26.5m x 9.75m

x 180m(폭 x 높이 x 길이)이며 각 함체는 22.5m 의 세그먼트 8개로 구성된다. 각 세그먼트는 지수판으로 연결하는 반면 함체간 연결은 GINA 조인트와 Omega 조인트로 연결 한다. 해저 지반 조건은 해상 점성토 지반이 대부분을 차지하고 최대 수심은 전례가 없는 수심으로 침매터널 저면 기준으로 약 50m에 이른다.

## 8. 결론

침매 터널은 대부분 도로 및 철도에 적용하고 있으나 이외에 고압 전선 케이블 설치용, 발전소의 냉각수 공급용으로 적용한 경우도 있다. 주로 도로 및 터널에 적용하는 침매 터널은 경제성 뿐 만 아니라 지형적, 환경적, 사회적 여건 등에 따라서 장대 교량의 대안으로 적용될 수 있는 공법이다. 그럼에도 불구하고 지금까지 국내 장대교량 설계 시 비교 안 중 하나로 드물게 검토된 적은 있으나, 국내에서 적용 사례가 없고 침매 터널 기술이 생소하기 때문에 적극적으로 검토하거나 채택된 사례는 없었다. 이제 부산-거제간 연결도로 구간의 침매 터널을 시작으로 보다 적극적, 긍정적으로 장대 교량의 대안으로 검토될 필요성이 있다고 판단된다. 그리고 필자는 향후 국내에서 건설 된 많은 장대 교량 노선 확장이 필요한 경우 기존 교량의 미관을 침해하지 않도록 인근에 침매 터널 건설이 필요할 것이라고 조심스럽게 전망한다. 최근 철거 논란이 되었던 부산 영도다리의 경우도 인접하여 침매 터널을 건설하고 영도다리를 보도교로 이용한다면 영도다리의 상징성을 보존할 수 있는 대안이 아니었는가 하는 개인적 아쉬움이 남는다. 또한 최근 철도에 대한 사회적 관심이 증대되고 있는 점을 고려해 볼 때, 하천이나 해안을 가로지르는 노선의 개발 시 장대 교량에 비하여 철도 적용성이 뛰어난 침매 터널 검토 욕구는 한층 더 증대될 수 있을 것으로 생각된다.