

## 해양구조물 설치 해석 소개



임 환 택\*



김 종 배\*\*

### 1. 서 론

최근 유가의 상승으로 해양사업이 활황을 이루고 있어 국내 대부분의 조선소에서도 해양사업에 대한 비중을 확대하는 있는 추세이다. 그 주된 이유는 하향 추세에 있는 조선분야에 반하여 계속되는 고유가로 석유개발업자들의 투자가 증가됨과 동시에 심해유전 개발 역시 경제성이 확보되어 세계유수의 석유회사들이 경쟁적으로 개발에 나서고 있기 때문이다. 특히, 심해유전의 경우 기존 고정식 구조물이 아닌 부유식 구조물로 설계되고 있으며 그 대부분이 원유의 일차정제를 위한 Process를 갖춘 선박형태의 FPSO이다. 국내 조선업체들이 이미 해양 플랜트에 대한 풍부한 경험을 보유하고 있는 상태이므로 Hull과 해양플랜트의 집합체인 FPSO의 경우 구조물일체를 Yard에서 수행할 수 있는 기술적 강점이 있어 수천만불에 불과한 선박에 비하여 수억불을 능가하는 FPSO에 관심을 가지는 것은 극히 자연스럽다고 할 수 있다.

본사는 지속적인 해양사업을 수행하고 있으며 기존 고정식 구조물 및 부유식 구조물에 대한 설

계, 구매, 설치, 인도를 일괄 수행하는 EPIC 도급자이며 세계 유수업체와 끊임없이 경쟁하고 있다. 최근 수주되는 FPSO의 경우 설계비만 1억불을 호가하는 등 엄청난 설계인원이 투입되고 기본/상세 설계 기간 또한 1년 이상이 소요되고 있으므로 최신 상용 해석 Program 외 자체 개발한 In-house Program등 전산해석의 의존도는 점점 증가하고 있다.

본 기고에서는 해양사업 전체에 대한 소개는 피하고 해양개발의 중요한 부분에 해당하는 해양 구조물 설치에 대해 논하고자 한다. 해양사업은 크게 자원탐사에 따른 경제성 검토 및 유전개발로 나눌 수 있으며 전자는 주로 Oil Major들이 수행하며 당사의 경우 실제 유전의 개발에 참여하고 있으며 이는 다시 설계, 구매, 제작 및 현장 설치 4개의 Activity로 나누어지며 입찰 시 각각 나누어 받을 수도 있다. 선행 Activity 3개는 육상에서 이루어지는 반면 마지막 설치의 현장에서 이루어지며 이를 위한 특수 장비 및 인원이 필요하므로 대부분 해양사업 참여 업체들은 제작업체 또는 설치업체로 Consortium 형태로 참여하거나 일괄 수주하여 어느 한쪽을 하청 수행하게 된다.

\* 현대중공업 해양사업부 설치부문 상무  
\*\* 현대중공업 설치기술부 차장 공학박사

해양구조물설치는 고정식 구조물, 부유식 구조물 및 해저 송유관 설치로 크게 나눌 수 있으며 이에 대한 간단한 소개 및 사용 Program에 대하여 수행 공사와 함께 소개하고자 한다.

2. 해양 설치

해양 설치는 건설업의 일종으로 말할 수 있으나, 대부분의 건설업이 콘크리트를 주재료로 하는 반면 해양설치의 경우 주재료는 Steel이다. 일반 건설업의 경우 일부 항만 및 댐공사등에서는 물을 다루지만 대부분이 토질역학을 근간으로 하는 반면, 해양공사는 반드시 물속에 설치되므로 토질역학 외에 유체역학적인 부분이 많이 포함된다고 할 수 있다.

2.1 고정식 구조물 설치

고정식 구조물은 해상에 인공적인 지지기반을 만들고 그 위에 원유집하 및 1차 정제를 위한 시설을 올려놓는 것이며 가장 일반적인 구조물이 그림 1과 같은 Steel Template Jacket(보통 Jacket) 이다. 주 지지 구조는 강관 말뚝(Pile)이며 해상에서 정해진 위치 및 간격으로 강관 말뚝을 향타하는 것이 쉽지 않으며 구조물의 전도 모멘트에 대한 저항력을 증가시키기 위해 경사 말뚝을 채택하는 것이 보통인 해양구조물의 경우 항상 외력에 노출된 작업선을 이용하여 향타하는 것은 거의 불가능하다. 따라서, 향타시 말뚝을 지지할 수 있도록 약간 큰 내경을 가진 강관(Leg)을 주어진 위치에 필요한 개수만큼 배열하고 서로 지지할 수 있도록 수평 및 보강 부재를 용접하여 구조물을 만들고 대부분이 해수면 하에서 설계년한을 견딜 수 있도록 설계된다. 일단 설치되면 대부분의 하부구조물은 말뚝에 의해 지지되지만 수평력에 대한 말뚝간의 일체화를 위하여 말뚝과 Leg 사이의 공간은 팽창 Grout로 채워진다.

상부 구조물과 직접 용접되어 지지하는 말뚝(Main Pile)외 추가로 Jacket의 외부에 말뚝(Skirt Pile)을 설치하는 경우도 있으며 이를 위하여 Jacket에 돌출시켜 강관(Skirt Leg)을 구조에 추가하며 보통 해저면으로부터 10~20m 정도의 길이이다.

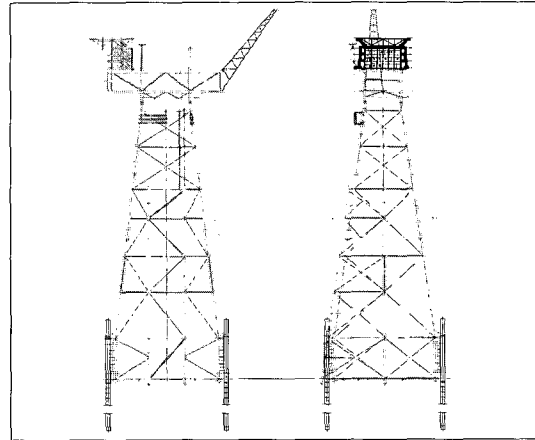


그림 1 Steel Template Jacket

최근 비교적 깊은 수심의 경우 Main Pile을 없애고 Skirt Pile만으로 하부구조물을 고정하고 상부구조물을 지지하는 방식으로 설계되고 있다.

고정식 구조물의 설치 순서도와 같으며 주된 설치 해석과 사용 Program은 다음과 같다.

- 구조물 운송해석(SACS 및 MOSES)
- Launching 및 Lifting 해석(SACS),
- Upending 해석(SACS)
- Pile Drivability 해석(GRL WEAP)
- Barge Stability 및 Mooring 해석(MOSES)

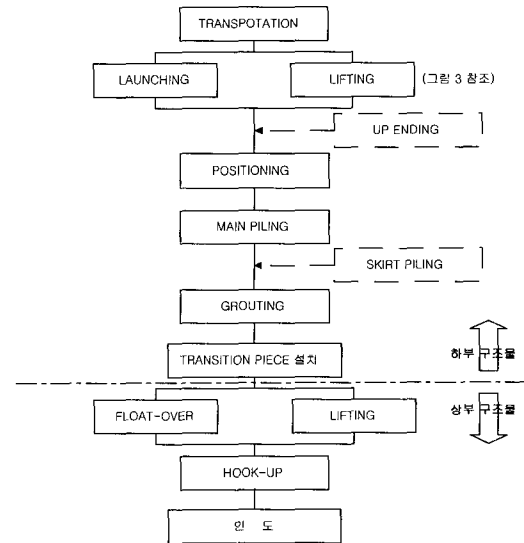


그림 2 고정식 구조물 설치 순서

국내 기업은 1985년 사우디 아라비아의 Zuluf/Marjan 공사를 시작으로 페르샤만, 인도, 동남아, 중국 등 여러 나라의 고정식 구조물 제작 및 설치공사에 참여하고 있으며, 이어도 종합해양과학기지 및 내년에 설치 예정인 동해-1 플랫폼 역시 고정식 구조물이다.

항만 및 교량 역시 강관 말뚝으로 기초를 하는 경우 고정식 구조물의 범주에 속하며 이 경우에는 Jacket 없이 Free Standing Pile로 설치될 수 있다. 이스라엘의 Rutenburg 부두, 방글라데시 Jamuna 교량 및 서해대교의 교각 등의 공사에 국내기업이 참여하였다.

고정식 구조물의 특수형태로 중력식 구조물이 있으며 보통 콘크리트로 된 하부 구조물이지만 Steel Base에 고중량의 철광석을 채운 Veba 플랫폼이 북해에 설치되었으며 해저 지질의 특성을 고려 Suction Base 공법을 적용한 MOgPU 플랫폼을 인도네시아 Natuna 유전에 설치된 바 있다.

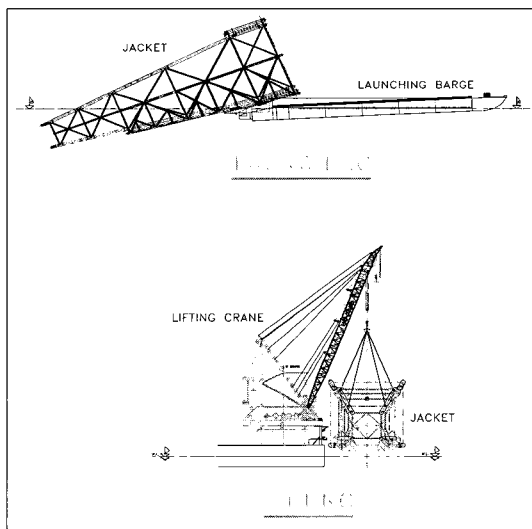


그림 3 Launching & Lifting 개략도

## 2.2 부유식 구조물

부유식 구조물의 경우 어느 정도의 위치 이동을 허용하여 계류하게 되며 주로 Chain, Wire 또는 이 둘의 조합으로 외력으로부터 구조물의 위치를 유지하게 된다. 상기 계류색을 해저에 고정하는 방

법은 크게 말뚝 또는 Anchor를 이용하며 상부 구조물에 작용하는 외력 및 지질의 특성을 고려하여 적절한 공법이 결정된다. 말뚝의 경우 상기 고정 구조물 설치와 마찬가지로 항타를 하거나 최근 적용되고 있는 Suction Pile 공법으로 설치된다. 부유식 구조물 계류는 FPSO와 같이 선박에 장치된 계류 시스템(Turret)에 바로 고정하는 방법과 운반선에 원유를 공급하기 위한 원유선적/하역 부표(Single Point Mooring) 시스템으로 나눌 수 있으나 이에 대한 설치는 동일하다. 지정된 위치에 말뚝이나 닻을 설치하고 이에 연결된 계류색을 설계장력에 견디는지 시험한 후 Buoy나 FPSO의 계류시스템에 연결하는 것이다. 보통 계류시스템 외 원유 이송을 위한 송유관 및 배분시스템(Pipeline End Manifold, 일명 PLEM)이 계류시스템 아래 해저에 위치하여 PLEM과 수면상 계류시스템 사이는 유연관(Flexible Pipe)이 연결되어 원유를 최종 이송하게 된다.

말뚝의 항타가 보통 해수면 위에서 이루어지는 고정식 구조물에 비하여 부유식 구조물의 기초는 말뚝의 끝단이 해저면 또는 그 이하로까지 항타되어야 하므로 수중 유압 햄머를 사용한다. 최근 부유식 구조물의 설치 수심이 점점 깊어져 1,000m 이상의 해상에 설치되는 추세로 이를 위해서는 자동위치 유지 시스템을 장착한 작업선 및 심해용 윈치 등을 이용하고 잠수부 대신 고성능 ROV에 의하여 모든 작업을 수행하고 있다.

대부분의 해석은 계류시스템 공급업자가 수행하여 제공하는 것이 보통이며, 당사의 해석은 현장 설치에 관련된 부유구조물의 해상 민감도 및 이에 따른 제반 예인색의 결정에 한정된다.

- 부유 구조물 Stability 및 Temporary Mooring 해석(MOSES)
- 작업선 Stability 및 Mooring 해석(MOSES)
- Pile Drivability 해석(GRL WEAP)

당사에서는 해저 송유관 공사의 일부로 인도의 RAVVA, IOCL 공사 등 주로 30만톤 급 SPM 설치를 수행하였으며 2001년 이란의 Soroosh Nowrooz 현장에 30만톤 급 FSU "Soorena"를 위한 계류 시스템을 설치하고 고난도의 Marine Operation이

필요한 대형선박을 직접 계류하여 새로운 설치영역을 개척한 바 있다. 아울러, 당사에서 현재 수행 중인 West Seno TLP/FPU 및 Kizomba FPSO 등 수심 1,000m 이상의 심해저 설치를 준비하고 있다.

### 2.3 해저 송유관

해저 송유관은 유전 내에서 원유를 집하하거나 정제된 원유를 육상 또는 해상 부유식 선적 설비 등으로 이송하는 통로이며 48" 대구경 배관이 수백 km의 길이를 연결하기도 한다. 해저에 부설되어 20년 이상 사용하므로 압력(내압+외부수압) 및 열팽창을 고려하여 충분한 두께로 설계될 뿐만 아니라 유체력에 대한 안정성 확보를 위한 무게를 증가시키기 위한 중량(3,040kg/m<sup>3</sup>) 콘크리트 피복을 입히고 충분하지 않을 경우, 해저에 매설하기도 한다. 해저면의 굴곡으로 일부구간에 자유 경간이 생길 수 있으며 이 경우에는 배관의 자중에 의한 파응력 뿐만 아니라 조류 및 파랑에 의한 와류진동 현상을 고려해야 하며 각 조건에 대한 허용 경간을 계산하여 자유 경간이 이를 넘지 않도록 조치하여야 한다. 방식 도막 및 콘크리트로 보호되어 있지만 해저배관의 부식을 방지하기 위하여 희생양극을 일정간격으로 부착한다.

해저 배관과 상부구조물(Deck)의 배관 연결을 위하여 Jacket을 타고 올라가는 배관을 Riser라 하며 이 역시 송유관의 일부이다. Riser의 설계는 해저 배관과 유사하게 설계되지만 수심 전체에 걸쳐 노출되어 조류 및 파랑 특히 와류진동에 대한 고려가

중요하며 비말대에 대한 특별한 보호 도막(Neoprene, Polymer 등)이 적용된다.

- 배관 내 유체 흐름에 따른 압력/온도 변화(PIPESIM)
- 배관 및 Concrete 두께 결정(PLUS ONE)

상기 해석 외 Hydrate 및 Slug 추정 등 Process 측면의 상세 해석이 포함되지만 이는 FEED 단계에서 수행되어 제공되는 것이 보통이며 배관의 구조적인 설계 해석은 비교적 간단하여 별도 Program 외에 Code에 따른 계산으로도 가능하여 자체적으로 개발한 Spread sheet를 많이 이용한다.

해저 송유관의 설치는 전용부설선(Laybarge)에서 용접한 배관을 해저에 내려주므로 상당길이가 지지되지 않은 상태로 유체력에 노출된다. 이 구간의 배관이 허용응력 내에 있기 위해서 배관에 장력을 주어 곡율을 허용범위 내로 조정하여야 하며 항상 이러한 상태를 유지하면서 부설선이 진행하고 그 거리만큼 배관은 해저에 부설되게 된다.(그림 4 참조) 따라서, 설치와 관련한 해석은 대변형 및 비선형 특성이 강하여 간단히 계산될 수 없으며 전문 Program을 이용하여 주어진 조건에 대해 Simulation 하여 적정 부설요소를 결정하게 된다. 상기 부설은 정상적인 부설의 경우이며 육상 및 해상 구조물 배관과의 연결은 특수한 방법이 필요하다. Riser의 설치하는 배관을 해수면 위로 들어올려 용접하고 내리는 Stalk-on 방법(그림 5 참조)과 기계적인 연결구(보통 Flange)를 이용하여 해저에서 잠수부가 연결하는 방법이 있으며, 육상 접속의 경우에는 배

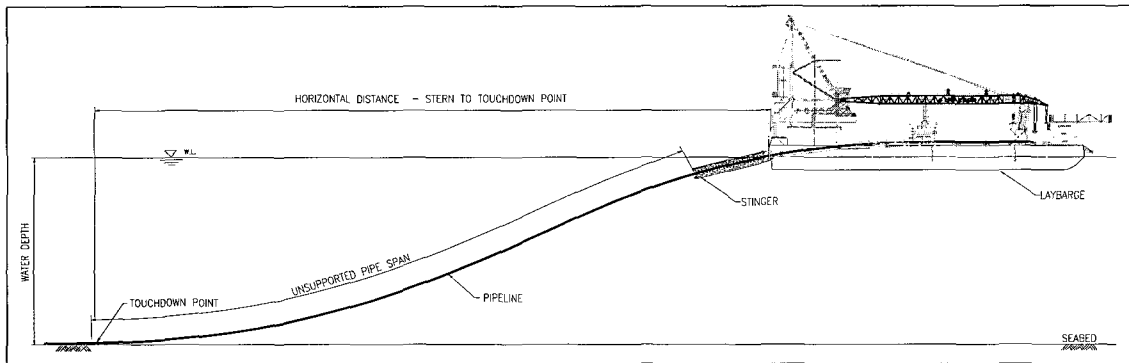


그림 4 해저 송유관 부설 개략도

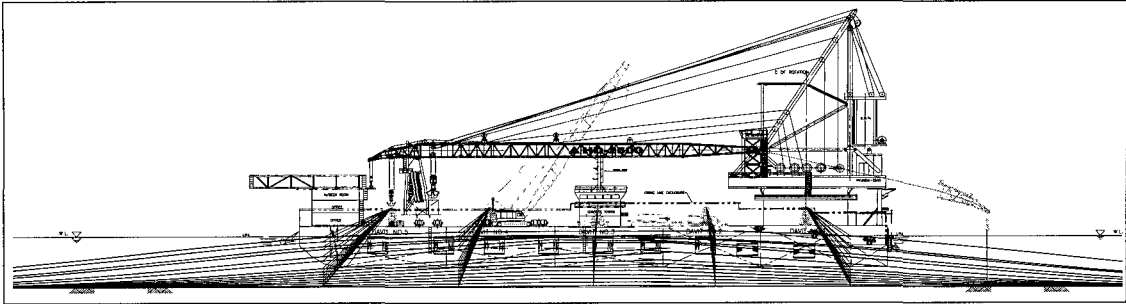


그림 5 Surface Tie-In 개략도

관을 육상 또는 해상으로 목표지점까지 끌어내며 보통 부설선이 접근 가능한 최소수심까지 접근한 상태로 배관을 용접하여 내어 주고 육상에 설치된 윈치를 이용하여 육상으로 끌어당겨 육상 배관을 용접한다.

- 부설 해석(OFFPIPE)
- Surface Tie-in(OFFPIPE)
- Barge Motion/Mooring 해석(MOSES)
- Shore Approach(자체 개발 Spread sheet)

### 3. 결 론

본 기고에서는 평소 접하기 힘든 분야인 해양사

업 및 특수 건설업에 해당하는 해양설치 분야를 소개하여 끊임없이 도전해야 할 해양에 대한 관심을 유도함과 동시에 내년에 설치될 동해 가스전 구조물을 통한 산유국 진입에 걸 맞는 해양에 대한 이해를 요청하고자 하였다.

제반 설계 및 해석 역시 국제적인 요건에 맞게 상용 Program을 이용하여 진행되고 있으며 해상 공사의 특성상 동적해석의 포함은 필수적이다. 또한, 해상 상태의 변화로 실작업에 해석 결과를 그대로 준용하지 못하는 경우가 많아 상대적으로 과도한 안전율을 고려함과 동시에 항상 비상 조건(Contingency case)을 대비한 해석 및 결과를 추가하는 것이 해상 설치 설계의 특성이라 할 수 있다. [2]