해저파이프라인 설계와 시공 개요

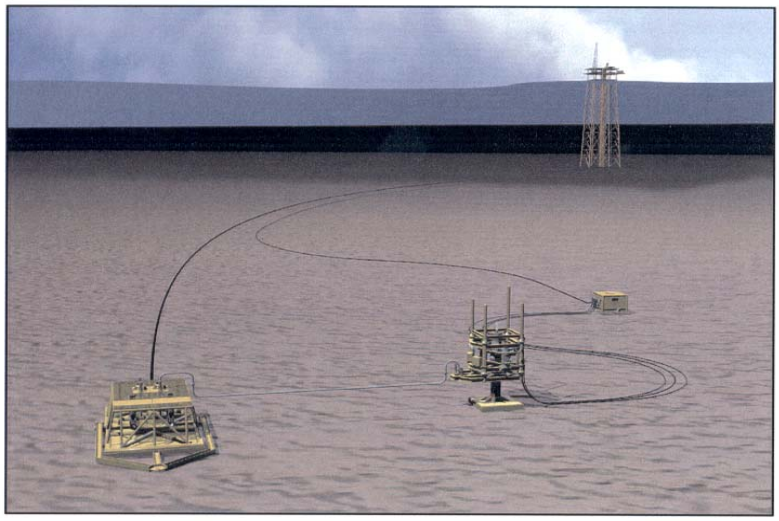
Brief Introduction to the Design and Construction of Submarine Pipeline

정 현 : 해양기술사

1. 서론

해저 석유 및 천연가스의 개발이 급격히 증가함에 따라 해저 파이프라인이 적용되는 사업도 상당히 늘어나고 있다. 해저 파이프라인을 부설하는 목적은 천해에서는 개발된 원유나 컨덴세이트, 가스 등을 주로 육상의 석유화학 플랜트로 연속적으로 직접 운송하기 위한 것이며, 심해에서는 경제적 이유로 해상 플랫폼의 숫자를 줄이는 대신 해저 생산 시스템과 해저 파이프라인 건설을 통해 여러 광구에서 동시에 생산을 가능하게 하기 위함이다.

<그림 1 : 해저 생산 시스템과 해저 파이프라인>



해저 파이프라인이 이러한 목적을 원활히 수행하기 위해서는 적절한 강성과 단면을 갖고 운영시의 압력을 견딜 수 있어야 하며, 해상에서 작업이 이루어지는 만큼 시공이 안전하고 신속하게 이루어져야 한다. 따라서 파이프라인 재료는 이러한 조건을 만족할 수 있는 철강재를 선별하여 사용하고 있다.
본 자료는 해저 파이프라인의 설계와 시공이 대략 어떻게 이루어지며 이를 위해서 검토해야 할 항목이 어떤 것이 있는가를 일별하여 살펴봄으로써 해저 파이프라인의 설계와

시공에 대한 이해를 돕고자 마련하였다.

2. 해저 파이프라인의 노선 선정

해저 파이프라인의 노선 선정을 위해선 우선 예상 노선상의 각종 기존 자료를 수집, 분석하고 필요시 예상 노선과 연육 지점에 대한 현지 조사를 추가로 실시하여 정확한 자료를 입수하여야 한다.

노선에 대한 현지 조사는 파이프라인의 안전하고 적절한 설치와 운영이 이루어질 수 있도록 충분한 폭과 정확도를 갖고 시행되어야 하며, 특히 해상 활동이 활발한 곳, 해저 장애물이 있는 곳, 해저 지형이나 해중 조건의 변화가 심한 곳 등에 대해선 보다 정확도가 높은 조사가 이루어져야 한다.

해저 지형 조사는 음향 탐사와 물리 탐사를 통해 실시하는데 이를 통해 파이프라인 설치 전에 제거 또는 평탄화가 필요한 노출암 또는 대형 자갈과 같은 장애물을 조사하고 잠재적인 불안정성이 있는 해저 경사, Sand Wave, 깊은 계곡, 세굴 형태의 침식, 퇴적물 등의 지형 특성을 파악하여야 한다.

또한 필요시 해저질 조사나 시추 조사, 현장 시험, 실내 시험을 통해 해저 지질 조건을 추가로 분석하여야 한다. 지질 조사는 설계시 해저 파이프라인 기초의 안전성 분석, 반복하중에 의한 해저 토류 현상이나 액상화 가능성 검토, 시공시 굴착 및 매설 작업의 용이성 검토 등을 위해 필요하다.

해저 파이프라인의 노선 선정이 완료되면 이 노선에 따른 여러 설계 조건에 따라 파이프라인의 설계가 이루어진다.

3. 해저 파이프라인 설계

3.1 주요 사전 검토 사항

자연환경 요소나 기타 인위적 요소들이 해저 파이프라인 설계시 주는 주요 영향을 살펴보면 아래와 같다.

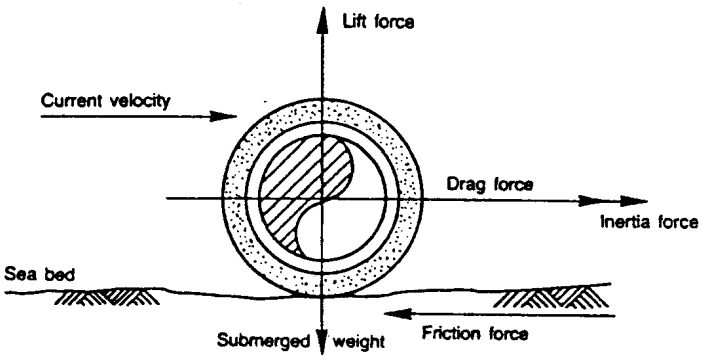
▶ 천해에 설치되는 파이프라인은 닻이나 어구에 의한 파손 위험이 크다. 닻이 끌릴 때와 어구가 수직 상향으로 올려질 때 해저 파이프라인에 걸릴 수 있으며 따라서 파이프라인의 매설 또는 뒤채움 보호 사석 시공 등으로 이를 예방하여야 한다.

▶ 태풍에 의한 대형 파랑의 내습, 주기적인 조류의 반복 흐름, 강한 해류의 지속적인 흐름으로 발생한 와류 등으로 인해 파이프라인 주위의 토사나 사석이 밀려나면서 생기는 세굴 현상으로 기초의 파괴가 일어날 수 있다. 이를 예방하기 위하여

파이프라인을 세굴 심도 이하로 매설하거나 세굴에 견딜 수 있는 피복석 또는 Blanket 등으로 주위를 감싸주기도 한다.

▶ 해수에 노출된 파이프라인에는 파랑 내습시 파입자의 속도 및 가속도에 의한 관성력(Inertia Force)과 항력(Drag Force), 양력(Lift Force)이 발생한다. 또한 해류에 노출된 파이프라인에는 해류 속도에 의한 항력과 양력이 발생한다. 이 때 관성력과 항력은 하중 작용과 같은 방향, 그리고 양력은 연직 방향으로 생기게 된다. 따라서 이러한 파력과 해류력이 매우 큰 지역에서는 파이프라인을 매설하거나 상부를 보호석으로 뒤채움하여 자연 현상에 의한 과다한 하중이 파이프라인에 걸리는 것을 방지하여야 한다.

<그림 2 : 파이프라인에 걸리는 자연 외력>



▶ 지진 또는 파랑 등에 의한 반복 충격파가 파이프라인 기초나 피복토를 액상화시켜 파이프라인에 침강이나 부양이 발생함으로써 파괴가 일어날 수 있다. 따라서 파이프라인 기초나 피복토의 액상화 가능성을 사전에 조사하여 이를 예방할 수 있는 토사로 대체 시공토록 하여야 한다.

3.2 해저 파이프라인의 설계

해저 파이프라인의 설계를 통해 최소 두께 결정, 파이프라인 재질 결정, 콘크리트 피복량과 해저면상의 안정성(On-Bottom Stability) 검토, 최대 허용 자유경간 길이 산정 등이 수행된다. 파이프라인의 파괴 가능한 양상과 설계 하중 등 여러 고려 요소를 토대로 설계시 주요하게 검토할 사항과 그 내용을 보면 다음과 같다.

▶ 항복 강도 검토 : 항복 강도를 검토할 때는 우선 내부

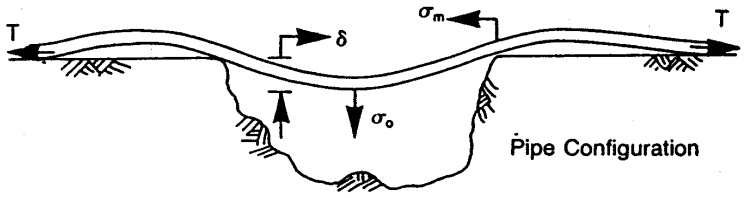
압력에 의한 응력을 산정한다. 이는 파이프라인 내를 흐르는 유체의 일정한 내압으로 인한 파이프라인의 Hoop 응력을 말한다.
다음은 외부 압력에 의한 응력을 검토한다. 이는 수압에 의한 외부응력으로 파이프라인에 좌굴이 일어나지 않도록 하기 위함이다. 외부 응력은 설치시와 수선을 위해 파이프라인의 가동을 중단했을 때 최대로 발생한다. 수압 산정시는 최대 파고와 최대 조위를 동시에 고려하여야 한다.
해저 장애물이나 열팽창 등을 고려하여 파이프라인에 곡률 반경을 줄 경우 이로 인한 추가 응력을 검토하여야 한다.
상기의 모든 응력을 Von Mises 기준에 의하여 합성하고 이 합성 응력이 항복 강도의 일정 비율에 해당하는 허용 응력 이내에 있는지를 검토하게 된다.
▶ 좌굴 검토 : 좌굴은 외부 압력, 축력, 휨 모멘트 등에 의한 파이프 벽체의 국부 좌굴(Local Buckling), 외부 압력으로 인한 좌굴 전파(Propagation Buckling), 압축력으로 인한 파이프 본체의 좌굴(Bar Buckling)로 크게 나눌 수 있다.
▶ 피로 파괴 검토 : 피로 파괴는 파이프라인의 주기적 응력 변화로 발생하며 이 원인에는 파랑의 직접적인 영향, 파랑 및 해류로 인한 와류 진동, 운영시 압력과 온도의 변화 등이 있다.
▶ 열응력 검토 : 파이프라인 내를 흐르는 석유나 가스는 고온인 경우가 많다. 이로 인한 열팽창으로 생긴 압축 응력은 내압에 의한 Hoop 응력과 결합하여 Von Mises 합성 응력을 증대시킨다. 파이프라인이 열팽창으로 인하여 길이 방향으로 늘어날 때 이는 다시 해저면 마찰에 의한 저감 효과와 맞물려 궁극적으로는 평형상태에 이르게 된다.
▶ 해저면상의 안정성(On-Bottom Stability) 해석 :
파이프라인이 해저면 상에 놓여 있을 때 파랑과 해류로 인한 횡력을 받을 수 있다. 이러한 횡방향 안정성을 확보하기 위해 콘크리트 피복으로 충분한 무게를 갖게 하여 해저면 마찰에 의한 저항력을 증대시킴으로써 균형을 잡게 하거나,
파이프라인을 따라 일정 간격의 앵커를 두어 고정시키거나,
아니면 환경 외력의 영향을 받지 않도록 파이프라인을 해저면 아래에 매설하기도 한다.
▶ 자유 경간 해석 : 해저면의 불규칙성이나 다른

파이프라인과의 교차로 인해 어쩔 수 없이 파이프라인이 해저면 상에 지지되지 않고 떠있는 구간이 발생한다. 이러한 자유 경간 해석을 위하여 와류 진동 검토와 항복 검토를 시행한다.

와류 진동(Vortex Shedding)에 의한 진동 주기가 우연히 자유 경간의 고유 주기에 근접하게 되면 큰 증폭 현상이 일어나 파이프라인을 손쉽게 파괴할 수 있다. 따라서 이를 방지하기 위해 유속과 파이프 단면 성질, 자유 경간 길이의 함수인 와류 발생 주기와 고유 주기를 현격히 차이나게 설계함으로써 와류 진동에 의한 파괴를 미리 예방하도록 하여야 한다.

파이프라인이 해저면 상에 떠있을 경우 자중에 의한 휨응력 뿐만 아니라 파랑과 유속에 의한 휨응력을 동시에 받게 된다. 여기에 열응력과 곡률반경에 의한 응력, Hoop 응력을 조합하여 발생 가능한 최대 응력을 검토함으로써 자유 경간의 항복에 대한 안전성을 확보하도록 한다.

<그림 3 : 파이프라인의 자유 경간 발생>



파이프라인은 외부 구조물이나 파이프라인, 난파선, 암초 등을 되도록 피해야 하며 피할 수 없을 때는 클램프나 지지대로 고정시키고 최소 0.3m 이상의 이격 거리를 두어야 한다.

3.3 파이프라인 방호 설계

해저 파이프라인은 닻이나 어망 등에 의한 기계적 손상을 방지하고 화학적 부식 작용을 막기 위해 방호를 실시한다.

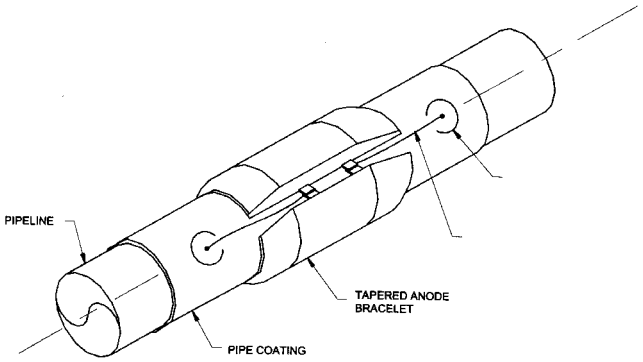
기계적 손상 방지를 위한 방호에는 사석 피복, 방호 매트리스, 매설, 콘크리트 중량 피복, 여유 두께 등이 있다.

이 중 가장 많이 쓰이는 것은 콘크리트 중량 피복으로 파이프라인 둘레를 고강도 콘크리트나 특수 콘크리트로 피복하여 파이프라인과 부식 방지용 외부 코팅을 보호하고 파이프라인의 부력 방지도 겸하도록 하고 있다.

부식 방지를 위한 코팅에는 외부 코팅과 내부 코팅이 있는데,

외부 코팅에는 코울타르, 아스팔트 에나멜, 아스팔트 마스틱, 에폭시 등과 희생 양극(Sacrificial Anode)에 의한 음극 방호 시스템을 사용한다. 희생 양극에는 알루미늄 또는 아연 합금을 보통 쓰고 있다.

<그림 4 : 파이프라인 외부 코팅과 Anode>



해저 파이프라인은 부식성 탄화수소를 운송하기 때문에 적절한 내부 부식 방지 대책을 수립하여야 하며, 여기에는 부식 방지제의 첨가, 부식 허용 두께, 내부 코팅, 부식 저항 합금이나 라이닝의 적용, 건조 등의 방법이 있다.

4. 해저 파이프라인의 시공

4.1 개요

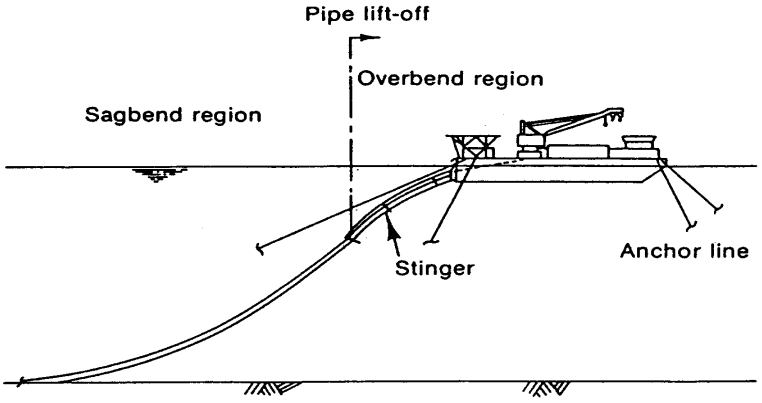
해저 파이프라인의 시공은 설치 장소에 따라 해양 파이프라인의 설치와 연육 지점의 설치로 나눌 수 있으며, 파이프의 연결 장소에 따라 부설선 위에서 용접을 통해 파이프를 연결하는 방법과 대부분의 용접을 육상에서 실시하고 파이프를 긴 길이로 현장까지 운송하는 방법으로 나눌 수 있다. 또 부설 공법에 따라 스팅거 방식(S-Lay 공법)과 경사램프 방식(J-Lay 공법), 릴 방식(Reel-Lay 공법)의 3가지로 나눌 수 있다. 여기서는 지면 관계상 가장 많이 쓰이는 스팅거 방식을 간단히 소개하고, 파이프라인 보호를 위한 Trenching 공법의 종류만을 살펴보는 것으로 하겠다.

4.2 스팅거 방식 부설선 공법

이 공법은 가장 대표적인 부설 공법으로 먼저 파이프를 6m 또는 12m 길이로 Cargo Barge에 의해 Lay Barge로

운반한다. 옮겨진 파이프는 Lay Barge상의 크레인으로 저장 장소에 일단 놓인 다음 부설 작업이 시작되면 Automated Rack을 통해 Line-up Table로 자동적으로 옮겨진다. 여기서 파이프들은 용접과 비파괴 검사를 통해 서로 연결되며 코팅과 부식 방지 양극 부착, 콘크리트 중량 피복을 실시한다. 이 과정이 끝나면 완성된 파이프라인을 Barge Roller와 스팅거로 지지하면서 S자 형으로 해저에 내려 부설하게 된다.
스팅거는 부설시 파이프라인의 안전한 곡률 반경이 유지될 수 있도록 볼록 굽힘(Overbend)을 유지하는 작용을 한다. Tensioner는 부설선에서 해저면 까지 파이프를 내릴 때 파이프의 무게를 지탱해 주며, 수평력을 작용하여 파이프라인의 오목 굽힘(Sag Bend) 현상과 파이프와 스팅거 사이의 각도가 허용치 이상으로 커지지 않도록 하는 작용을 한다.

<그림 5 : 스팅거 방식 부설선 공법>



4.3 Trenching 공법

해저파이프라인은 조류, 파랑 등 환경 외력과 어구, 닻 등의 기계적 외력에 쉽게 노출되는 경우가 많으며, 따라서 필요시 이의 보호를 위하여 매설을 실시한다. 매설을 위한 굴착방법에는 Jetting, Mechanical Ditching, Fluidization, Ploughing 공법 등이 있다. 이 중 가장 많이 쓰이는 Ploughing 공법에는 Trench를 먼저 파고 파이프라인을 나중에 설치하는 Preploughing 공법, Trench와 파이프라인을 동시에 설치하는 Simultaneous Ploughing 공법, 해저면에 먼저 파이프라인을 설치하고 난 후 Trench를 파는 Postploughing

공법이 있다. 각 공법이 유리하게 적용될 수 있는 공사는 다음과 같다.

공법	적용 공사
Preploughing 공법	해저 견인 공법에 의한 파이프라인 설치
Simultaneous Ploughing 공법	비교적 얕은 수심에서의 파이프라인 설치
Postploughing 공법	심해에서의 파이프라인 설치

5. 참고서적

1) Det norske Veritas, Rules for Submarine Pipeline Systems, 1981

2) 한국과학기술원 해양연구소, 해저파이프라인 최적설계에 관한 연구, 과학기술처, 1986

3) 대한조선학회, 해양공학 개론, 동명사, 1996