

유한요소법에 의한 해저 파이프라인의
2차원 정적 해석에 관한 연구

김 국 태*, 박 한 일**

A Study on the Two Dimensional Static Analysis of
an Offshore Pipeline by the Finite Element Method

Goog-Tai Kim, Han-il Park

ABSTRACT

Offshore pipelines have an important role in the overall tasks of offshore oil and gas production. Offshore pipelines transport the crude oil or gas to an offshore terminal where it can be loaded into a storage and a transportation facility. During construction, the pipeline is exposed to various types of bending stress due to lateral currents and various dynamic conditions.

This study presents the finite element method for analyzing the stresses and displacements induced in offshore pipelines during installation under the combined action of bending moment, external water pressure, and axial tension.

In this study, the governing equilibrium equations are derived by the principle of minimum potential energy for the analysis of beam structures. This study is concerned only with the static analysis of the stresses of the pipeline. A computer program called S_PIPE is developed for the structural analysis of offshore pipeline under installation. The accuracy of the program is checked by comparing the results with those of OFFPIPE which is one of commercial programs for an offshore pipeline laying analysis.

* 한국해양대학교 해양공학과 대학원

** 한국해양대학교 해양공학과 교수

1. 서론

해저에서 생산된 원유와 천연가스를 수송하기 위해서는 해저 파이프라인이 주로 사용되고 있다. 이와 같은 해저 파이프라인을 설치하기 위한 공사는 1940년대말 멕시코만에서 최초로 행해진 이후로 북해, 지중해, 동남아시아를 비롯하여 세계 여러 해역에서 대규모의 해저 파이프라인 부설공사가 행해지고 있다. 최근에는 우리 나라 연안이나 주변 해역에서도 탐사 및 개발이 활발히 추진 중이어서 해저 파이프라인 공사도 예상되고 있다. 해저 파이프라인 설치 공사는 점차 해안에서 멀리 떨어지고 수심이 깊은 곳에서 이루어짐에 따라 해상상태가 거칠어서 작업이 어렵고 파이프라인이 손상할 가능성이 증대하고 부설에 따른 막대한 건설비가 소요되므로 부설 전에 충분한 사전연구와 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 파이프라인 설치시의 응력해석을 필요로 하게 되었다.[1] 파이프라인을 설치할 때의 응력해석은 해저 바닥과 부설선(lay barge) 또는 스팅어(stinger) 사이에 연결된 파이프라인의 응력을 구하는 것으로 응력해석은 크게 정적 해석과 동적 해석으로 구분할 수 있다.

본 논문에서는 파이프라인을 설치하는 동안 자중 및 인장력으로 인하여 파이프라인에 발생하는 응력을 구하기 위해 해저 파이프라인을 유한요소법으로 모델화하여 2차원의 정적 선형해석을 하였으며 이를 바탕으로 파이프라인 부설시 보다 정확한 분석을 위해 수치프로그램을 개발하였다. 모델구성에 있어서는 파이프라인을 임의의 구간에 걸쳐 일정한 길이를 가진 연속적인 보 요소(beam element)라고 가정하고 이와 같은 연속적인 보 요소들이 부설선과 스팅어(stinger)를 상의 롤러에 의한 지지점을 통과하여 해저면까지 이르는 것으로 모델하였다. 모델시에 부설선은 강체로 취급하였으며, 해저면은 롤리지점으로 모델하였다.(Figure 1.1 참조)

본 논문에서는 이러한 모델을 수립함에 있어서 파이프라인이 스팅어의 지지점 위로 균일한 휨반경(uniform bending radius)을 갖는다고 가정하였으며 이를 통하여 얻어진 결과는 파이프 특성, 부설선과 스팅어의 종류, 인장기에 의해 초기에 주어지는 인장값 그리고 경계조건에 따라 다를 수 있으므로 이러한 것들의 조합을 통하여 해저 파이프라인의 설치시 파이프의 응력과 처짐 형태를 분석하고자 하였다.

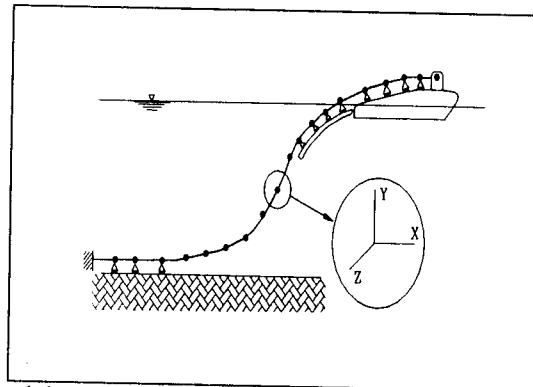


Figure 1.1 FEM Model of Submarine Pipeline Laying

2. 유한요소법의 전개

유한요소법은 유한요소(finite)라 불리는 물리적으로 혹은 편의상 나누어진 요소 위에 정의된 특정 성질의 형상함수(shape function)를 주어진 문제에 맞는 어떤 적분형의 원리에 사용하여, 연속체 문제를 유한차원 문제로 수식화하는 근사적 방법이다.[2] 이러한 요소들은 절점에서 서로 연결되어지고 절점에서의 절점변위를 구하여 요소내의 변위 및 내력 등을 계산할 수 있다. 이와 같이 파이프라인을 여러 개의 파이프라인 요소로 나누어 절점과 절점으로 요소들이 서로 연결되어 있는 것으로 가정하고 유한변위를 고려한 요소와 변형에너지법을 사용하여 평형방정식을 유도하였다.

전포텐셜에너지는 힘의 평형상태에 있는 한 물체에 대해 그 물체의 모양의 변화에 따른 변형 때문에 물체의 내부에 축적된 부재의 변형에너지와 부재에 작용하는 모든 외력에 의한 포텐셜에너지의 합으로써 정의된다.[3] 전포텐셜 에너지를 최소화되기 위해서는 1차 변분이 영(零) 값을 갖도록 한다. 변분은 절점의 변위를 미지의 변수로 선택하고 요소 내의 변위를 형상함수로 가정함으로써 임의의 요소로 영역을 분할하여 요소에 대해 적분을 하게 된다.

앞에서 설명된 것처럼 전포텐셜 에너지(total potential energy)는 부재내의 변형으로 인한 변형에너지 Π_u 와 외력에 의한 포텐셜에너지 Ω 의 합으로 정의되며 이를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\Pi_{TP} = \Pi_u + \Omega \quad (2.1)$$

여기서, 외력에 의한 포텐셜에너지 Ω 에는 부재표면력에 의한 일 Π_s 와 부재체적력에 의한 일 Π_M 이 포함된다. 전포텐셜에너지의 각 성분들을 식으로 나타내면 다음과 같다.[4] 부재내의 변형으로 인한 에너지 ;

$$\Pi_u = \frac{1}{2} \int_V \epsilon_{ij} D_{ijkl} \epsilon_{kl} dV \quad (2.2)$$

부재 표면력에 작용하는 일 ;

$$\Pi_s = - \int_{S_\sigma} \tilde{p}_i u_i dS \quad (2.3)$$

부재 체적력에 의한 일 ;

$$\Pi_M = - \int_V \tilde{f}_i u_i dV \quad (2.4)$$

으로 된다. 전포텐셜 에너지(total potential energy) 식은 다음과 같이 나타내어진다.

$$\begin{aligned} \Pi_{TP} &= \Pi_u + \Pi_M + \Pi_s \\ &= \frac{1}{2} \int_V \epsilon_{ij} D_{ijkl} \epsilon_{kl} dV - \int_V \tilde{f}_i u_i dV - \int_{S_\sigma} \tilde{p}_i u_i dS \end{aligned} \quad (2.5)$$

식(2.5)를 행렬(matrix)형태로 표시하면

$$\Pi_{TP} = \frac{1}{2} \int_V \{\epsilon\}^T [D] \{\epsilon\} dV - \int_V \{\delta\}^T \{\hat{f}\} dV - \int_{S_\sigma} \{\delta\}^T [\hat{p}] dS \quad (2.6)$$

유한요소법은 식(2.6)을 최소화원리에 의하여

$$\delta \Pi_{TP} = 0 \quad (2.7)$$

일 때, 안정을 이루며 유한요소법에서는 영역 V를 유한된 요소로 분할하여 적분을 수행한다. 이것을 이산화라고 한다. 식(2.6)을 이산화하면

$$\Pi_{TP} = \sum_{e=1}^n \Pi_e \quad (2.8)$$

여기서 요소에너지는 다음과 같다.

$$\Pi_e = \frac{1}{2} \int_{V_e} \{\epsilon\}_e^T [D] \{\epsilon\}_e dV - \int_{V_e} \{\delta\}_e^T \{\hat{f}\}_e dV - \int_{S_\sigma} \{\delta\}_e^T [\hat{p}]_e dS \quad (2.9)$$

여기서,

$$\{\epsilon\}_{2 \times 1} = [B]_{2 \times n} \{\tilde{q}\}_{n \times 1} \quad (2.10)$$

$$\{\delta\} = \begin{Bmatrix} u \\ w \end{Bmatrix} = [M] \{\tilde{q}\} \quad (2.11)$$

$$[B] = \text{변형률의 형상함수}$$

3. 수치해석 프로그램 S_PIPE의 분석 및 검증

이 장에서는 지금까지의 이론적인 유한요소법을 바탕으로 본 논문의 주된 목적인 해저 파이프라인의 2차원 정적 해석을 위해 개발된 수치해석 프로그램 S_PIPE를 분석하고 검증하였다. 프로그램 S_PIPE를 개발하기 위한 전산언어로는 Fortran을 사용하였다. S_PIPE에서는 가장 보편적인 해저 파이프라인 설치 공법인 Lay Barge 공법을 이용하고 고정구베스팅어(fixed curvature stinger)모델을 사용하였다.

S_PIPE는 현장에서 부설공사를 하기 전에 부설선에서 스타링어를 거쳐 해저 바닥에 놓인 해저 파이프라인의 응력을 해석함으로써 실제 해저 파이프라인의 설치시의 안정성을 확보하고 경비절감을 그 목적으로 한다. 이를 위해 기존에 현장에서 사용되고 있는 상용 프로그램인 OFFPIPE와 S_PIPE를 사용한 예제 해석 결과들을 비교·분석하였다. 이 때 예제 해석에서는 파도와 해류의 영향이 크지 않은 해양조건을 전제로 하였다.

수치해석 프로그램인 S_PIPE가 수치해석을 수행하는 과정인 흐름도는 Figure 3.1과 같다.

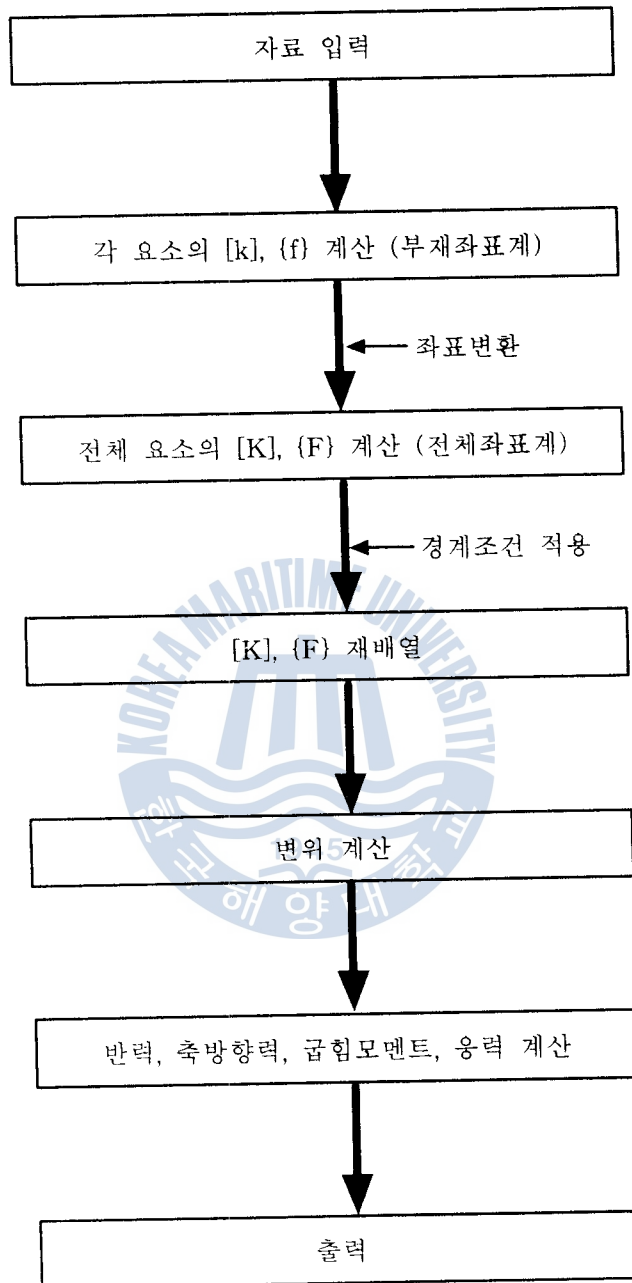


Figure 3.1 Flow Chart of Numerical Analysis Program, S_PIPE

3.1 수치해석 프로그램 S_PIPE의 검증

수치해석 프로그램 S_PIPE의 정확성과 신뢰도를 확보하기 위해 동일한 입력치를 가지

고 상용프로그램인 OFFPIPE를 사용하여 얻어지는 결과와 본 연구의 개발 프로그램 S_PIPE를 사용하여 얻어진 결과를 비교·분석하였다. 특히 수치해석 프로그램 S_PIPE으로는 스팅어 끝단(stinger tip)에서의 경계조건을 달리 하여 이로 인한 스팅어 끝단(stinger tip)에서의 응력변화를 살펴보았다. 이 때 사용된 입력값은 다음과 같다.

Table 3.1 Input Data

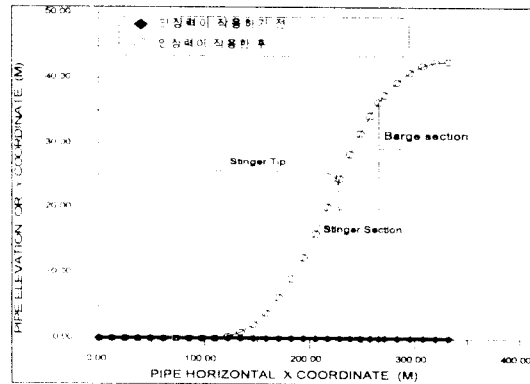
Pipe Properties	Outside Diameter	0.32390	m
	Wall Thickness	0.01270	m
	Weight/Length in Air	2171.880	N/m
	Submerged Weight/Length	896.934	N/m
	Wrap Coat Thickness	0.00500	m
	Concrete Thickness	0.03400	m
	Elastic Modulus	196500.0	MPa
	Cross Sectional Area	0.012416	m ²
	Moment of Inertia	0.0001505584	m ⁴
	Yield Stress	358.50	MPa
	Steel Density	7850.152905	Kg/m ³
	Wrap Coat Density	1299.69419	Kg/m ³
	Concrete Density	3043.832824	Kg/m ³
Barge Data	Total Pipe Tension	250000	N
	No. of Tensioners	1	
	No. of Pipe Supports	8	
	Radius of Curvature	311.00	m
	Pipe Angle at Stern	10.67	deg.
Stinger Data	No. of Pipe Supports	4	
	Radius of Curvature	182.87	m
	Stinger Stern Depth	-11.85	m
	Pipe Angle at Stern	22.837	deg.
	Stinger Length	39.34	m
Seabed Data	Water Depth	36.00	m
	Horizontal Pipe Tension	203300	N

3.2 결과 분석

3.2.1 해저 파이프라인의 형상변화

해저에 자연스럽게 놓여 있는 해저 파이프라인을 스팅어를 거쳐 부설선까지 인장력을 주어 들어올리는 것으로 하였다. S_PIPE를 실행한 결과 해저 파이프라인의 형상은 완전한 'S'자 모양을 나타내었다. Figure 3.2는 S_PIPE를 수행하기 전과 후의 해저 파이프라인의 형상을 나타낸다. 유한요소법의 구조해석을 위해 해저 파이프라인은 29개의 요소로 나누었다.

Figure 3.2 Pipeline Configuration



3.2.2 두 프로그램 OFFPIPE와 S_PIPE의 비교

3.2.2.1 스틱어 끝단에서 구속을 받는 경우

Figures 3.3, 3.4와 3.5는 두 프로그램으로부터 구한 굽힘모멘트와 Von Mises응가응력 그리고 항복응력에 대한 백분율을 서로 비교한 결과를 나타낸다. 해저바닥, Sagbend부분 그리고 부설선에서의 각각의 값들이 서로 비슷한 결과치를 보이며 스틱어 끝단에서의 Von Mises응가응력은 항복응력을 초과하지 않는다. 그러나 스틱어 끝단에서의 굽힘모멘트는 S_PIPE를 실행한 결과 나타난 값과 상용프로그램 OFFPIPE의 결과값이 약간의 차이를 보였다. 스틱어 위의 마지막 롤리지점에서의 차이는 OFFPIPE에서는 대변형을 고려한 비선형 해석을 수행하였으나 S_PIPE에서는 선형 해석을 수행한 결과로 인해 일어나게 되었다. 또한 두 프로그램의 경계조건들의 차이도 영향을 미친다. 이 때에는 부설선의 움직임과 해류나 파력과 같은 하중들이 작용하는 경우, 스틱어 끝단에서 콘크리트 코팅이나 해저 파이프라인 자체에 큰 손상을 입힐 수

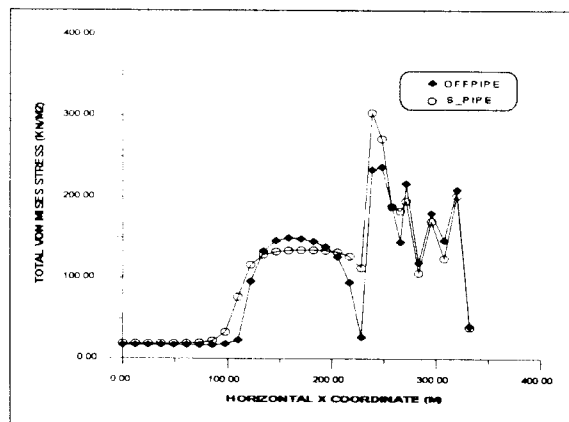


Figure 3.3 Comparison of Von Mises Stresses from OFFPIPE and S_PIPE for Fixed Condition

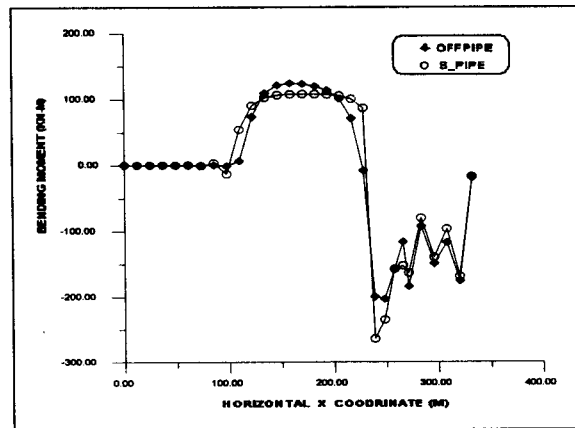


Figure 3.4 Comparison of Bending Moments from OFFPIPE and S_PIPE for Fixed Condition

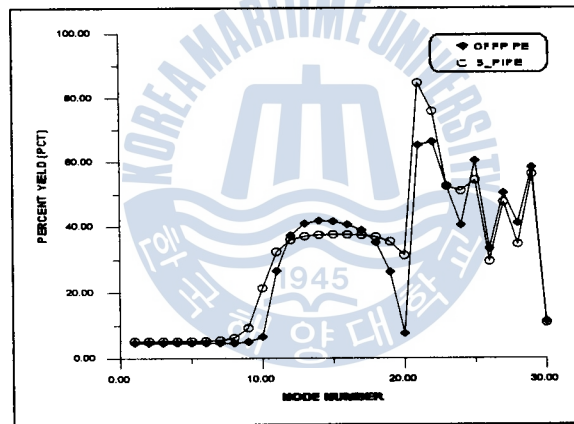


Figure 3.5 Comparison of Yield Stresses from OFFPIPE and S_PIPE for Fixed Condition

3.2.2.2 스틱어 끝단에서 구속을 받지 않는 경우

이 경우도 스틱어 끝단이 구속을 받는 경우와 같이 다음의 Figures 3.6, 3.7과 3.8을 통해 두 프로그램의 굽힘모멘트와 Von Mises응력 그리고 항복응력의 백분율을 서로 비교한 결과를 나타낸다. 이 경우에서도 해저바닥, Sagbend부분 그리고 부설선에서의 각각의 값들이 서로 비슷한 결과치를 나타낸다. 그리고 스틱어 끝단에서 두 프로그램의 굽힘모멘트의 값이 스틱어 끝단에서 구속을 받는 경우보다 두 프로그램의 결과값들이 보다 근사한 값을 나타낸다. 따라서 스틱어 끝단에서의 해저 파이프라인의 안정성도 그만큼 높다.

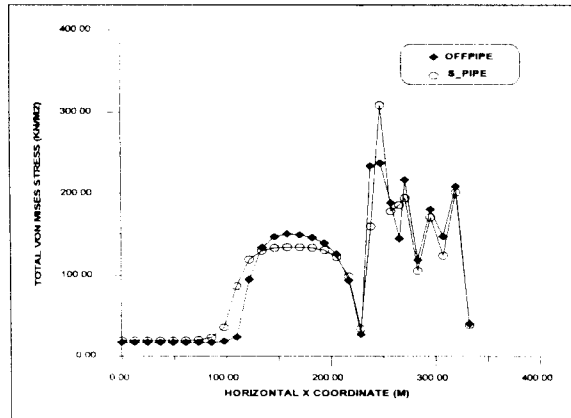


Figure 3.6 Comparison of Von Mises Stresses from OFFPIPE and S_PIPE for Free Condition

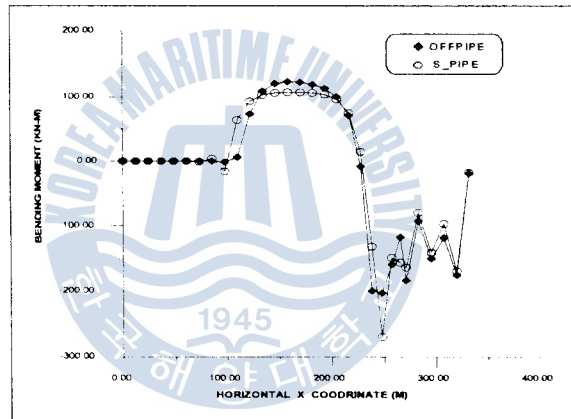


Figure 3.7 Comparison of Bending Moments from OFFPIPE and S_PIPE for Free Condition

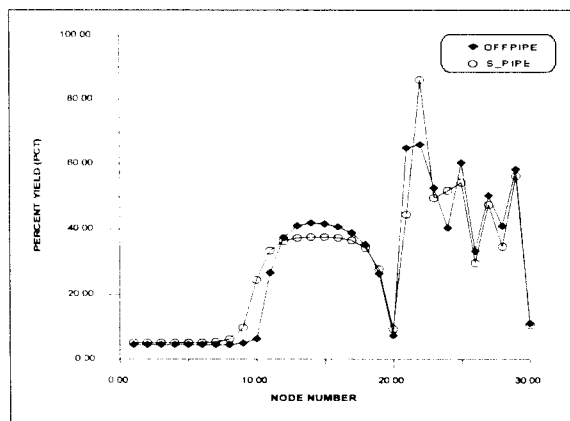


Figure 3.8 Comparison of Yield Stress from OFFPIPE and S_PIPE for Free Condition

3.2.2.3 인장력에 따른 형상 변화

해저 파이프라인의 형상은 인장력의 크기에 따라 크게 변화한다. 따라서 인장력을 달리 하여 작용시켰을 때의 해저 파이프라인의 형상을 살펴보는 것도 응력해석 못지 않게 중요하므로 여기서는 각기 다른 인장력에 따른 해저 파이프라인의 형상변화를 살펴보았다. Figure 3.9에서 보는 바와 같이 인장력이 작아질수록 해저 파이프라인의 형상은 보다 완만한 'S'자 형상을 나타낸다.

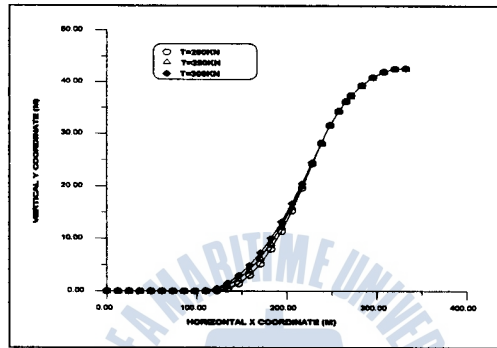


Figure 3.9 Comparison of Pipeline Configurations from Different Tensile Forces for Free Condition

4. 결론

본 논문에서는 Lay Barge 공법에 의해 해저 파이프라인의 설치시에 발생하는 응력 해석을 위해 2차원 보요소에 대한 유한요소방정식을 유도하고 수치해석 프로그램 S_PIPE를 개발하였다.

해저 파이프라인을 설치할 때 부설선과 스텐더 그리고 해저 바닥을 롤리지점으로 모델화하였으며 파이프라인은 보요소를 사용하여 모델화하였다. 그리고 해저바닥에서 멀리 떨어진 고정점과 인장기는 고정된 것으로 모델화하였다.

본 논문을 통해 개발된 수치해석 프로그램 S_PIPE의 검증을 위해서 현장에서 사용되고 있는 상용프로그램 OFFPIPE와 S_PIPE를 사용한 예제 해석 결과들을 비교·분석하였다. 이 때 예제 해석에서는 파도와 해류의 영향이 크지 않은 해양조건을 전제로 하였다. 그 결과 스텐더 위의 마지막 롤리지점(lift-off point)에서 약간 큰 값의 차이를 보였으나 그곳을 제외한 다른 부분에서는 대체로 만족할 수 있었다. 스텐더 위의 마지막 롤리지점에서의 차이는 OFFPIPE에서는 대변형을 고려한 비선형 해석을 수행하였으나 S_PIPE에서는 선형 해석을 수행한 결과로 인해 일어나게 되었다. 또한 두 프로그램의 경계조건의 차이도 영향을 미친다.

해저 파이프라인의 설치시 해저 파이프라인의 형상에 큰 영향을 미치는 인장력을 달리

하여 S_PIPE를 실행한 후 형상의 변화를 살펴보았다. 그 결과 인장력이 작은 값을 가질수록 보다 완만한 'S'자 형상을 보였다.

차후 과제로는 해류와 파랑의 영향을 고려한 3차원 해저 파이프라인의 정적 및 동적 비선형해석을 수행할 수 있는 새로운 수치해석 프로그램의 독자적인 개발이 필요하다.

참고 문헌

- [1] A. H. Mousselli, "Offshore Pipeline Design, Analysis, and Methods", PennWell Publishing Company, 1981
- [2] 임상전, 광병만, 이주성, "유한요소법 입문", 동명사, 1985.
- [3] D. L. Logan, "A First Course in the Finite Element Method", PWS Publishing Company, 1993
- [4] 김재윤, 김사수, 정기태, "기본수치계산연학", 문운당, 1995



