

유한요소법에 의한 파이프라인 라이저의 3차원 구조해석에 관한 연구

A Study on the Three Dimensional Structural Analysis
for a Pipeline Riser by Finite Element Method

김 창현* 박 한 일**

* 한국해양대학교 해양공학과 대학원

** 한국해양대학교 해양공학과

Abstract

A pipeline riser plays an important role in the production and transportation of offshore oil and gas, and is one of main slender offshore structures. In this paper, three dimensional static analysis of a pipeline riser is carried out using the finite element method. A beam bending element of pipe cross-section is adopted for the riser model. Based on the method, a computer program is developed for the special purpose of structural analysis of pipeline risers. Fluid loading is directly calculated in the program, where Morison equation is used based on Stokes' fifth order wave theory. Displacements and the corresponding stresses in pipeline riser are calculated for the variation of several input parameters such as oil temperature and pressure, Poisson effect, bottom soil friction, current and wave etc. From the program, the exact position of the lowest clamp can be decided and the stability of pipeline risers can be estimated. In order to verify the developed program, the results are compared with those of ASASWAVE and ANSYS, which are general structural analysis softwares and the former is especially being used for offshore structural analysis. Results of the program agree well with those of ASASWAVE and ANSYS. The developed program can provide offshore engineers with a convenient tool for the design of pipeline riser.

1. 서론

해양자원의 개발을 위한 해양구조물 분야가 발전되어 감에 따라 해저원유 및 천연가스의 운송로 역할을 하는 해저파이프라인(pipeline)이나 파이프라인 라이저(riser)와 같은 세장형 해양구조물에 대한 관심도 날로 증가하고 있다.

해저파이프라인은 대표적인 세장형 해양구조물로서 주로 해저에 부설되어 생산된 원유 및 천연가스의 운송로 역할을 하고, 라이저는 이러한 해저파이프라인을 해양 석유생산설비의 상부구조물과 연결시켜 주는 구조물이다. 따라서 해저파이프라인과 라이저는 파랑 및 해류에 의한 유체력 뿐만 아니라 해저지반과 고온·고압의 내부유체로 인해서 매우 복잡한 역학적 거동을 하게 된다. 특히 라이저는 해저 바닥에 위치하는 해저파이프라인과 구조상 비슷한 특성을 지니면서도 수심 전반에 걸쳐 위치하기 때문에 해저파이프라인에 비해서 파랑 및 해류에 의한 영향을 많이 받게 되고, 해석시 고려해야 할 외부 하중도 여러 가지가 있다.

본 논문에서는 라이저 시스템의 운용환경과 라이저에 작용하는 여러 가지 하중의 산출 방법에 관하여 연구하였다. 라이저의 구조해석을 위해서 근사적 수치해석법인 유한요소법을 이용하였고, 이때 라이저의 모델링 요소로는 3차원 운동을 하는 파이프(pipe) 보요소를 사용하였다. 해석을 통해 얻어지는 라이저 부재의 길이방향응력(longitudinal stress)은 라이저 내부유체의 압력으로 인한 원환응력(hoop stress)과 함께 von-Mises의 동가응력(equivalent stress)으로 합성되고, 합성된 동가응력은 DnV[1] 등과 같은 각종 규정기관에서 제정한 허용응력과 비교하여 라이저의 안정성을 검토하게 된다.

본 논문에서는 라이저에 작용하는 모든 하중의 산출 과정과 구조해석 과정을 전산화해서 라이저의 구조해석을 간편히 다룰 수 있는 전산 프로그램을 개발하였다. 그리고 개발된 프로그램의 해석 결과를 범용 구조해석 프로그램인 ASASWAVE와 ANSYS의 해석 결과[2]와 비교하여 프로그램의 유용성을 검증하였다. 또한 개발된 프로그램을 이용해서 제반 설계인자들의 수치 변화에 따른 응력의 변화치를 비교하여 각각의 설계인자들이 라이저의 안정성에 미치는 정도를 파악해 보았다.

2. 라이저의 구조해석

2.1 라이저 시스템의 모델링

Fig. 1에 나타낸 것과 같이 라이저는 해저파이프라인과 해양 석유생산설비의 상부구조물을 연결하는 구조물로서 그 하부는 해저지반에 의해서 지지가 되고, 중간 및 상부는 각각 클램프(clamp)와 사하중 지지기(dead weight support)와 같은 라이저 지지기에 의해서 자켓(jacket)의 다리(legs)나 버팀대(braces)에 연결된다. 따라서 라이저 지지기와 해저지반은 라이저 구조물의 지지점으로서 라이저의 거동에 많은 영향을 끼치게 되고, 라이저에 대한 정확한 구조해석을 위해서는 이것들과 라이저와의 상호관계를 정확하게 모델링 하여야 한다.

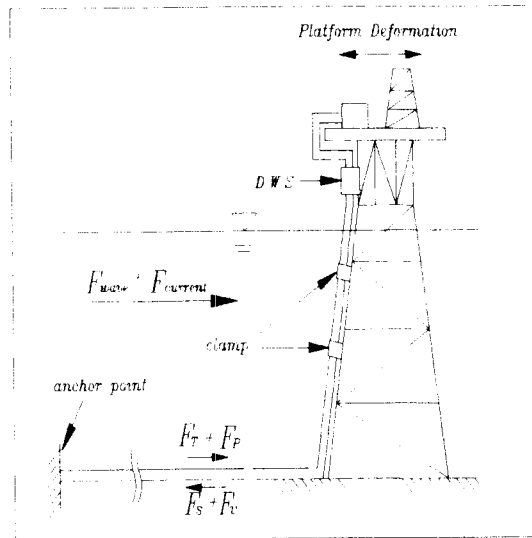


Fig. 1 Riser system

2.1.1 라이저 지지기의 경계조건

Fig. 1에서 알 수 있듯이 라이저는 자켓에 의해서 지지되는데, 이때 라이저를 자켓에 연결해 주는 것으로는 제일 상단에 위치한 사하중 지지기와 중간에 위치한 클램프가 있다. 전체 라이저 구조물의 자중을 지지하는 사하중 지지기는 하향의 축방향 운동과 구조물의 횡방향 운동에 대해서는 구속작용을 하지만 라이저의 회전운동에 대해서는 전혀 구속작용을 하지 않는다. 그러나 라이저 수직구간의 팽창은 갑판 파이프의 강성에 의해서 수직구간의 상단에서 억제되기 때문에 라이저 수직구간에 발생하는 팽창은 일반적으로 최소 저항경로를 따라 지반선을 향하여 아래로 움직이게 된다. 따라서 사하중 지지기는 축방향의 운동에 대해서 항상 구속작용을 한다고 간주할 수 있다. 이와 같이 상부지지기가 축방향 및 횡방향 변위에 대해서는 구속작용을 하는 반면에 회전변위에 대해서는 구속작용을 하지 않기 때문에, 이것의 지지조건을 고정힌지(hinge)에 의한 단순지지조건으로 모델링한다.

클램프는 라이저 수직 구간의 중간에 위치하여 라이저의 가이드 역할과 라이저의 횡방향 운동을 구속한다. 그러나 라이저의 축방향 운동과 회전 운동에 대해서는 전혀 구속을 하지 않는다. 따라서 클램프는 이동힌지에 의한 단순지지조건으로 모델링한다.

라이저 지지기는 라이저의 운동을 구속하는 역할도 하지만 파랑 및 해류에 의한 자켓 구조물의 변위를 라이저에 전달하는 역할도 하게 되는데, 이때 라이저에 전달되는 자켓 구조물의 변위는 라이저의 지지점점에 대한 강재변위로 고려한다.

2.1.2 해저 토질의 지지조건

본 논문에서는 라이저와 접촉하고 있는 토질의 영향을 수직 및 횡방향의 스프링으로 치환하여 해저 부분의 라이저에 대한 지지조건으로 사용하였고, 이때의 토질은 탄성체로 가정하였다. 토질의 스프링 계수를 계산하기 위해서 해저면에서 토질과 접촉하고 있는 라이저의 단면을 Fig. 2에 나타내었다.

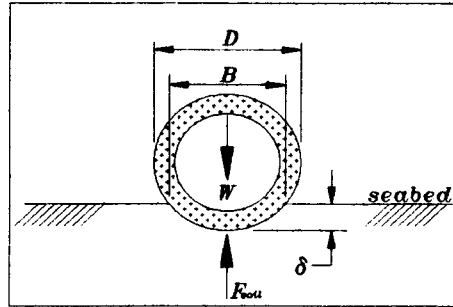


Fig. 2 Geometry model of riser/soil interaction

Fig. 2는 초기침하 후에 평형상태를 이룬 라이저를 나타내는데, 여기서 W 는 라이저의 단위길이당 수중중량이고, F 는 라이저에 작용하는 단위길이당 토질반력이다. 알은 기초의 극한지지력[3]과 초기침하 형상의 기하학적 조건으로부터 라이저의 초기침하 깊이 δ 를 구하고 나면, 다음과 같이 토질의 단위길이당 수직방향 스프링계수를 구할 수 있다.

$$k_v = \frac{W}{\delta} \quad (1)$$

k_v 는 요소의 전 길이 L 에 걸쳐 분포하므로, 이를 다시 등가의 절점 스프링계수로 치환하면 다음과 같다.

$$K_v = \frac{k_v L}{2} \quad (2)$$

토질의 횡방향 스프링계수는 수직방향 스프링계수와 같다고 가정하였고, 부재의 축방향 운동에 대한 토질의 영향은 마찰력으로서 고려한다.

2.2 라이저의 주요 하중

라이저는 파랑 및 해류에 의한 유체력, 부재 내부에 들어 있는 고온·고압의 유체로 인한 자체 팽창력, 그리고 해저단에 연결된 파이프라인의 팽창변위에 의한 하중 등을 받는다.

2.2.1 파랑 및 해류에 의한 유체력

본 논문에서는 Stokes의 5차 파이론[4]을 이용하여 파랑의 운동을 해석하였고, 파랑의 운동성분들로 인하여 라이저에 작용하는 유체력은 Morison 방정식을 사용하여 계산하였다. 아래의 식들은 라이저 부재의 각 축방향으로 작용하는 분포 파하중이다[5].

$$\begin{aligned} f_x &= \frac{1}{2} \rho C_D D_o \mu u_n + \rho C_I \frac{\pi D_o^2}{4} a_{nx} \\ f_y &= \frac{1}{2} \rho C_D D_o \mu v_n + \rho C_I \frac{\pi D_o^2}{4} a_{ny} \\ f_z &= \frac{1}{2} \rho C_D D_o \mu w_n + \rho C_I \frac{\pi D_o^2}{4} a_{nz} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 ρ 는 해수의 밀도, C_D 는 부재의 항력계수, C_L 는 부재의 부가 관성질량계수, D_o 는 부재의 외부 직경이고, μ , u_n , v_n , w_n , a_{nx} , a_{ny} , a_{nz} 는 Stokes의 5차 파이프론으로부터 구한 유체입자의 속도와 가속도를 부재의 x , y , z 축방향 성분으로 변화시킨 값이다.

2.2.2 내부유체에 의한 팽창력

라이저는 부재 내·외부유체의 온도 및 압력차이로 인해서 축방향의 변형이 발생하는데, 이로 인한 축방향 변형도와 팽창력은 각각 식 (4)와 식 (5)와 같이 구한다.

$$\epsilon_x = \alpha_x \Delta T + \frac{1}{E} \left\{ \frac{P_i D_i^2 - P_o D_o^2}{D_o^2 - D_i^2} - \frac{\nu(P_i D_i - P_o D_o)}{2t} \right\} \quad (4)$$

$$f_x = EA\epsilon_x \quad (5)$$

여기서 α_x 는 축방향의 열팽창계수, ΔT 는 내·외부유체의 온도차이, E 는 Young's modulus, P_i 는 내부유체의 압력, P_o 는 외부유체의 압력, D_i 는 라이저의 내부 직경, ν 는 Poisson's 비, 그리고 t 는 라이저의 벽두께이다.

2.2.3 파이프라인의 팽창

라이저의 해지단에 연결되어 해지 기반에 부설된 파이프라인은 고온·고압의 내부유체로 인한 팽창력과 프와송 효과 및 토질의 마찰력에 의한 저항력이 함께 작용해서 축방향의 팽창변위가 발생하게 된다. 파이프라인의 팽창변위는 라이저의 해지단을 통해서 라이저에 전달되고, 이로 인하여 라이저에 큰 매우 큰 응력이 발생하게 된다. 따라서 파이프라인의 팽창변위는 정확하게 산출하여야 한다. 본 논문에서는 파이프라인의 팽창해석으로부터 얻어지는 팽창변위를 라이저의 끝단에 강제변위 하중으로 고려하였고, 라이저 끝단의 구속조건은 고정힌지에 의한 단순지지조건으로 간주하였다.

2.3 라이저의 유한요소해석

본 논문에서는 라이저의 해석을 위해서 군사적 수치해석법인 유한요소법을 사용하였다[6]. 라이저의 모델링 요소로는 3차원 운동을 하는 파이프 보요소를 사용하였고, 요소에 대한 유한요소방정식은 전 포텐셜에너지 이론을 이용하여 유도하였다.

2.3.1 라이저 요소의 유한요소방정식

본 연구에서 사용한 라이저 요소는 Fig. 3과 같이 절점당 6자유도 운동을 하는 선형요소이다.

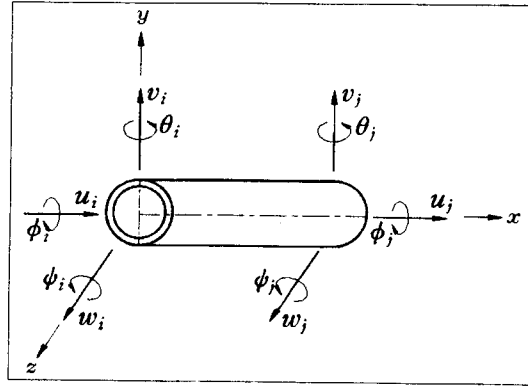


Fig. 3 One dimensional linear element

라이저가 작용하중에 의해서 변형을 할 때 전 포텐셜에너지 원리에 의한 라이저 구조물의 유한요소 방정식은 식 (6)과 같다.

$$\begin{aligned} \delta II = & \sum_{e=1}^{ne} [(\int_v [B]^T [D] [B] dv - T \int_0^l [N]^T [N] dx) \{d^{(e)}\} \\ & - \int_v [B]^T \{\sigma_0\} dv - \int_v [M]^T \{Q\} dv - \int_s [M]^T \{q\} ds - \{P\}] \\ = & 0 \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 $\{d^{(e)}\}$ 는 요소의 절점변위벡터, $[B]$ 는 요소의 절점변위와 변형도와의 관계행렬, $[D]$ 는 요소의 변형도와 응력과의 관계행렬, $\{\sigma_0\}$ 는 요소의 초기 응력, $[M]$ 은 형상함수 행렬, $\{Q\}$ 는 요소의 체적력, $\{q\}$ 는 요소의 분포하중, T 는 요소의 축방향력(-:인장력, +:압축력), $[N]$ 는 x 에 대한 형상함수의 미분행렬, $\{P\}$ 는 요소의 절점에 작용하는 집중하중이다.

유한요소방정식으로부터 요소의 강성방정식을 구하면 식 (8)과 같다.

$$[k^{(e)}] \{d^{(e)}\} = \{f^{(e)}\} \quad (8)$$

$$\text{여기서 } [k^{(e)}] = \int_v [B]^T [D] [B] dv - T \int_0^l [N]^T [N] dx \quad (9)$$

$$\{f^{(e)}\} = \int_v [B]^T \{\sigma_0\} dv + \int_v [M]^T \{Q\} dv + \int_s [M]^T \{q\} ds + \{P\} \quad (10)$$

식 (8)에서 좌변의 두 번째 항은 요소의 축방향력이 요소의 굽힘에 미치는 영향을 반영하는 값으로서 라이저와 같이 축방향력이 크게 작용하는 구조물에 대해서는 반드시 이러한 효과를 고려해야만 한다. 이후의 해석과정은 유한요소법에 의한 일반적인 해석 절차와 동일하게 이루어 진다.

2.4 응력해석

라이저의 응력해석은 구조해석의 결과로 얻어지는 여러 가지의 응력 성분을 하나의 von-Mises 등가응력으로 합성해서 이 값을 DnV 등과 같은 각종 해양구조물 관련 기관에서 규정한 허용응력치와 비교하는 것이다. 여기서 von-Mises의 등가응력 σ_{eq} 는 다음과 같이 구한다[1].

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_L^2 + \sigma_H^2 - \sigma_L\sigma_H + 3\tau^2} \quad (11)$$

여기서 σ_L 은 길이방향응력, σ_H 는 원환응력, 그리고 τ 는 범선 전단응력이다.

2.5 구조해석 프로그램

2.5.1 프로그램의 개요

본 논문에서는 라이저에 작용하는 여러 가지 하중의 산출 이론과 유한요소해석 이론을 바탕으로 해서 라이저의 구조해석을 간편히 다룰 수 있는 라이저의 3차원 구조해석전용 전산프로그램을 개발하였다. 개발된 프로그램의 명칭은 RISER이고, 프로그램의 활용 언어로는 Microsoft Fortran을 사용하였다.

프로그램 RISER는 3차원 구조해석이 가능하기 때문에 라이저의 복잡한 기하학적 형상은 물론 라이저에 작용하는 여러 방향의 파랑 및 해류의 영향을 충분히 고려할 수 있다. 또한 보다 정확한 구조해석을 위해서 라이저에 가해지는 여러 가지 코팅재 및 절연체에 대한 특성치를 입력할 수 있도록 하였다.

2.5.2 해석 결과의 검증

가. 파하중의 검증

프로그램 RISER는 Stokes의 5차 파이론과 Morison 방정식을 이용해서 구조물에 작용하는 분포 파하중을 계산하였고, 여기서 얻어진 결과는 해양구조물전용 구조해석 프로그램인 ASASWAVE의 해석결과와 비교하였다.

계산에 사용된 구조물은 높이 80m, 직경 1m인 원통형 구조물이고, 각 지점의 분포 파하중은 해저면으로부터 0.5m씩 증가시키면서 구하였다. Table 1과 Table 2는 해석에 사용된 해류 속도와 여러 가지 입력자료들을 나타낸다.

Table 1 Current velocity

높이(m)	해류 속도(m/sec)
0.0	0.56
15.0	1.05
30.0	1.26
45.0	1.48
60.0	1.73

Table 2 Wave parameters

자료명	입력값
수심(m)	61.2
파고(m)	18.0
파주기(sec)	14.4
해수밀도(kg/m ³)	1025.0
항력계수	0.6
부가관성질량계수	2.0

위 자료들을 이용해서 두 프로그램으로부터 얻어진 분포 파하중을 Fig. 4에 나타내었다. 두 프로그램 모두 파하중의 최대 작용높이는 71.5m로서 일치하였으나, 파하중의 크기는 수치상으로 약 10%의 오차가 발생하였고, 프로그램 RISER의 값이 더 크게 나타났다.

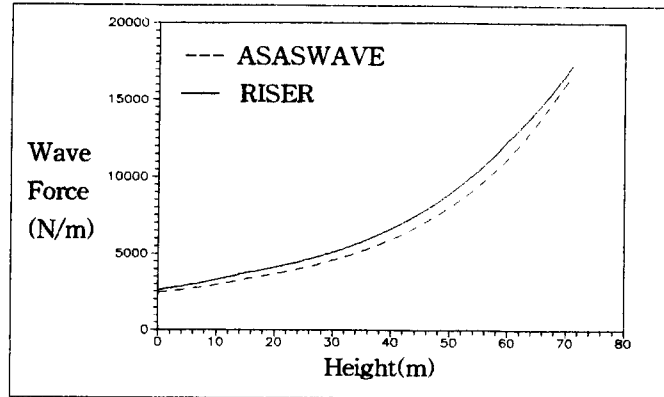


Fig. 4 Comparison between ASASWAVE and RISER for wave force

나. 구조해석 결과의 검증

프로그램 RISER의 구조해석 결과는 유한요소법의 범용 프로그램인 ANSYS의 해석 결과와 비교 검토 하였다. 해석에 사용된 라이저 구조물은 Fig. 5에 나타낸 것과 같이 해저구간 45.2m와 해저면으로부터 70m 지점에 위치한 사하중 지지기까지이다. 해석에 사용된 라이저 모델에 관한 재반 자료는 Table 3에 나타내었다. 해석시 자켓의 변위로 인한 지지절점의 강제변위는 고려하지 않았으나, 파이프라인과 연결되는 시작절점에서는 파이프라인의 팽창을 고려하기 위해서 X 축방향으로 1m의 강제변위를 가하였다. 또한 해류 및 파랑에 관한 자료는 Table 1과 2의 값들을 동일하게 사용하였고, 수심만 60m로 바뀐다.

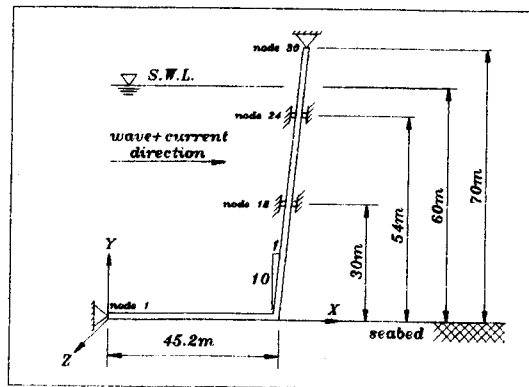


Fig. 5 Riser geometry model and coordinates

Table 3 Basic data for riser analysis

항 목	수 치	항 목	수 치
파이프의 직경, m	0.5	내부유체의 압력, N/m ²	1.726 × 10 ⁷
파이프의 두께, m	0.02	외부유체의 압력, N/m ²	0.0
요속 개수	29	내부유체의 온도, °C	93.0
중력 가속도, m/sec ²	9.81	외부유체의 온도, °C	23.0
Young's modulus, N/m ²	2.034 × 10 ¹¹	수심, m	60.0
Poisson 비	0.292	해수의 밀도, kg/m ³	1030.0
열 팽창계수, /°C	1.17 × 10 ⁻⁵	파이프 鋼의 밀도, kg/m ³	7850.0
설계 허용응력, N/m ²	4.48 × 10 ⁸	내부유체의 밀도, kg/m ³	200.8

Fig. 6은 프로그램 RISER와 ANSYS의 응력해석 결과인 von-Mises 등가응력 σ_{eq} 와 설계 허용응력 σ_v 의 비를 나타낸다. Fig. 6에서 응력의 최대치는 라이저의 제일 하부 클램프에서 발생하는 것을 알 수 있다. Fig. 6에서 두 해석 결과는 거의 일치하고, 실제 수치상으로도 두 해석 결과의 차이는 1% 미만이다. 따라서 본 연구에서 개발된 프로그램 RISER는 라이저의 구조해석용 프로그램으로서 유용 가치가 충분하다고 할 수 있겠다.

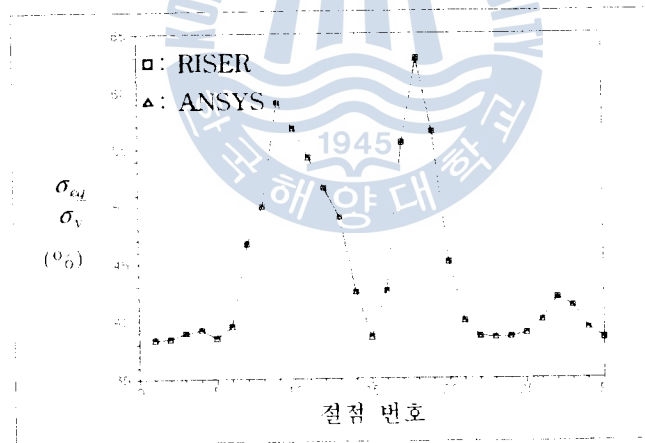


Fig. 6 Comparison between ANSYS and RISER for stress

3. 예제 해석

본 장에서는 라이저 구조물의 제반 설계인자들이 라이저의 안정성에 미치는 정도를 파악하기 위해서 설계인자들의 수치 변화에 따른 응력의 변화치를 비교해 보았다.

3.1 파랑 및 해류의 작용방향에 따른 응력의 변화

본 절에서는 파랑 및 해류의 작용방향에 따른 라이저의 응력변화를 살펴보기 위해서 +X 방향뿐만

아니라 +Z, -X 방향의 파랑과 해류에 대해서도 구조해석을 실시하였다. Fig. 7을 보면 파랑의 진행방향에 따라서 라이저의 응력 값이 변할 뿐만 아니라 최대응력 값의 발생위치도 바뀌는 것을 알 수 있다. 즉, 파랑과 해류가 +X 방향으로 작용할 때는 그 방향이 파이프라인의 열팽창변위 방향과 일치하여 라이저의 제일 하단 클램프에서 최대응력이 발생하고, 파랑과 해류가 -X 방향으로 작용할 때는 그 방향이 파이프라인의 열팽창변위 방향과 반대가 되어 라이저의 만곡부에서 최대응력이 발생하게 된다.

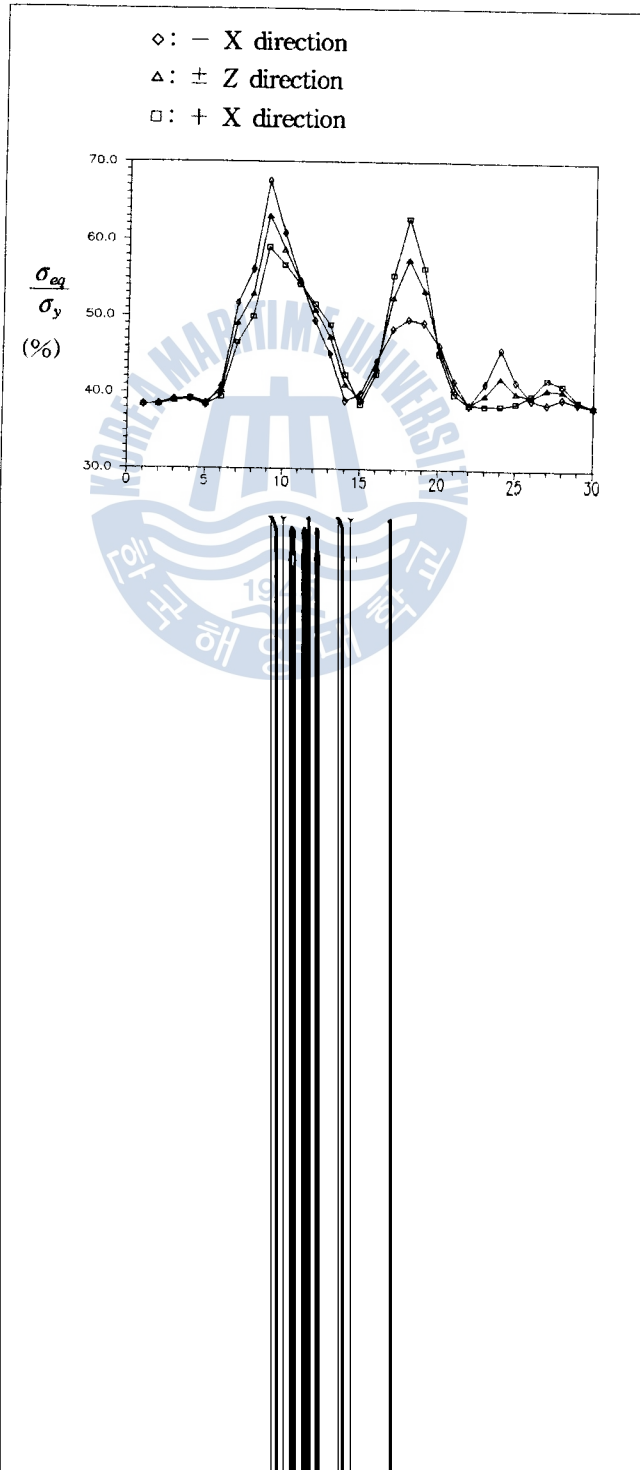


Table 3 Basic data for riser analysis

항목	수치	항목	수치
파이프의 직경, m	0.5	내부유체의 압력, N/m ²	1.726×10 ⁷
파이프의 두께, m	0.02	외부유체의 압력, N/m ²	0.0
요소 개수	29	내부유체의 온도, ℃	93.0
중력 가속도, m/sec ²	9.81	외부유체의 온도, ℃	23.0
Young's modulus, N/m ²	2.034×10 ¹¹	수심, m	60.0
Poisson 비	0.292	해수의 밀도, kg/m ³	1030.0
열 팽창계수, /℃	1.17×10 ⁻⁵	파이프 鋼의 밀도, kg/m ³	7850.0
설계 허용응력, N/m ²	4.48×10 ⁸	내부유체의 밀도, kg/m ³	200.8

Fig. 6은 프로그램 RISER와 ANSYS의 응력해석 결과인 von-Mises 등가응력 σ_{eq} 와 설계 허용응력 σ_v 의 비를 나타낸다. Fig. 6에서 응력의 최대치는 라이저의 제일 하부 클램프에서 발생하는 것을 알 수 있다. Fig. 6에서 두 해석 결과는 거의 일치하고, 실제 수치상으로도 두 해석 결과의 차이는 1% 미만이다. 따라서 본 연구에서 개발된 프로그램 RISER는 라이저의 구조해석용 프로그램으로서 유용 가치가 충분하다고 할 수 있겠다.

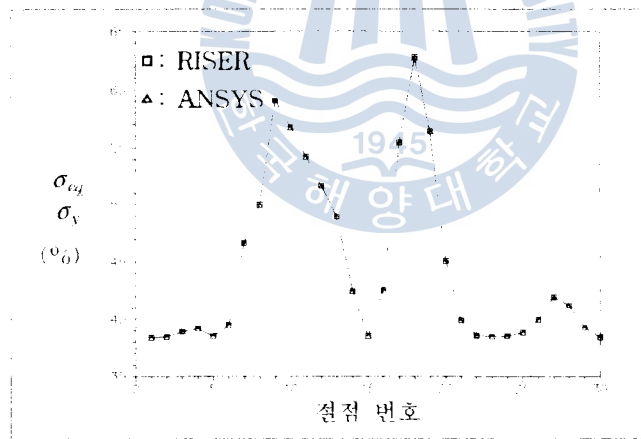


Fig. 6 Comparison between ANSYS and RISER for stress

3. 예제 해석

본 장에서는 라이저 구조물의 제반 설계인자들이 라이저의 안정성에 미치는 정도를 파악하기 위해서 설계인자들의 수치 변화에 따른 응력의 변화지를 비교해 보았다.

3.1 파랑 및 해류의 작용방향에 따른 응력의 변화

본 절에서는 파랑 및 해류의 작용방향에 따른 라이저의 응력변화를 살펴보기 위해서 +X 방향뿐만

아니라 +Z, -X 방향의 파랑과 해류에 대해서도 구조해석을 실시하였다. Fig. 7을 보면 파랑의 진행 방향에 따라서 라이저의 응력 값이 변할 뿐만 아니라 최대응력 값의 발생위치도 바뀌는 것을 알 수 있다. 즉, 파랑과 해류가 +X 방향으로 작용할 때는 그 방향이 파이프라인의 열팽창변위 방향과 일치하여 라이저의 제일 하단 클램프에서 최대응력이 발생하고, 파랑과 해류가 -X 방향으로 작용할 때는 그 방향이 파이프라인의 열팽창변위 방향과 반대가 되어 라이저의 만곡부에서 최대응력이 발생하게 된다.

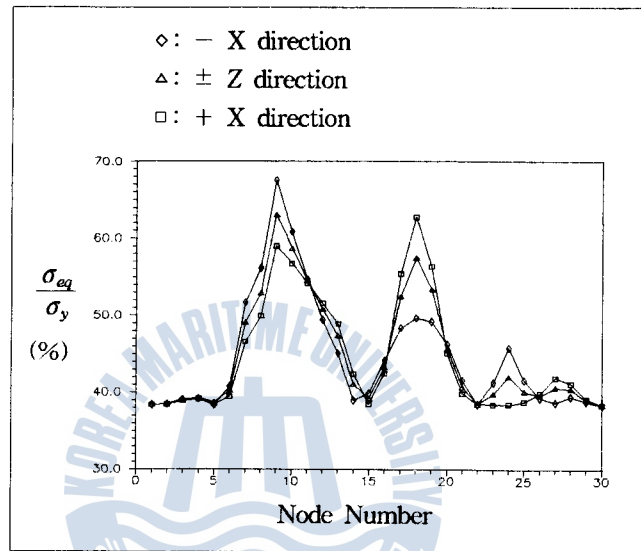


Fig. 7 Variation of equivalent stress for different wave directions

3.2 주요 설계인자의 응력에 대한 영향

본 절에서는 라이저의 관두께, 설계 온도, 그리고 설계 압력을 기준치의 10%씩 상하 20%까지 증감 하였을 때, 그에 따른 라이저 요소의 응력변화를 살펴보았다. 각 인자의 기준치로는 Table 3에 나타난 것과 같이 관두께 20mm, 내부유체의 설계 온도 93℃, 그리고 내부유체의 설계 압력 $1.726 \times 10^7 \text{N/m}^2$ 을 사용하였고, 그밖에 모든 설계요소들의 특성치는 Table 3의 값을 동일하게 적용하였다.

Fig. 8에서 알 수 있듯이 라이저에 대한 각 설계인자의 영향은 온도에 의한 영향이 가장 두드러지게 나타났으며, 관두께에 의한 영향도 중요하게 나타남을 알 수 있다. 관두께와 설계 내부압력의 변화에 따라 라이저 응력이 변화하는 주요 이유는 이들 인자가 원환응력에 직접적인 변화를 가져와 등가응력의 값을 변화시키기 때문이다. 또한 설계 온도의 변화에 의해서 라이저의 응력이 변화하는 주요 이유는 설계 온도의 변화에 따른 파이프라인의 팽창변위가 크게 변화하고 이로 인해서 라이저에 작용하는 굽힘응력이 크게 변화하기 때문이다. 따라서 라이저의 내부유체를 고온으로 설계할 때는 그에 따른 파이프라인의 팽창변위를 정확하게 산출하여야 하고, 파이프라인의 팽창길이가 너무 클 때는 라이저의 만곡부 근처에 파이프라인의 팽창흡수용 루프(expansion loops)를 설치하거나 라이저의 설치각도를 조정해서 초과응력의 발생을 방지해야 한다.

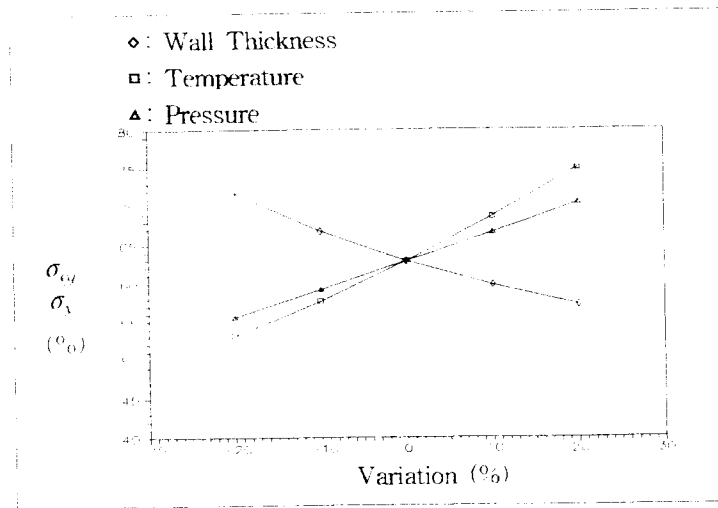


Fig. 8 Effect of design parameter on stress variation

4. 결 론

본 논문은 대표적인 세장형 해양구조물중의 하나인 라이저의 구조해석전용 전산프로그램을 개발하고자 하였다. 본 논문에서 개발한 프로그램은 기존의 라이저 구조해석전용 프로그램과는 달리 파랑 및 해류에 의한 유체력을 프로그램 내에서 직접 산출하여 구조해석에 사용함으로써 라이저의 구조해석을 간편하면서도 신속하게 수행할 수 있게 하였다. 라이저에 작용하는 유체력 계산에 있어서는 심해파 이론인 Stokes의 5차 파이프론과 세장형 해양구조물의 유체력 산정에 가장 적합한 Morison 방정식을 사용하였다. 라이저의 구조해석 기법으로는 유한요소법을 사용하였으며 라이저 요소의 구조적 거동은 원통형 단면의 굽힘모 요소로 모델링하였다.

본 연구의 예제해석에서는 유체 내·외부 온도차, 압력차, 포와송 (Poisson) 효과, 토질마찰, 유체력 등의 설계인자들을 고려하여 라이저의 변위 및 응력을 계산하였으며 라이저의 안정성에 미치는 각각의 영향을 검토하였다. 이로부터 파이프라인의 팽창변위와 라이저의 안정성에 가장 큰 영향을 미치는 것은 라이저 내부유체의 온도임을 알 수 있었다.

본 연구에서 개발한 프로그램을 검증하기 위해서 ASASWAVE 및 ANSYS의 해석 결과와 비교하였다. ASASWAVE 결과와의 비교에서는 오차가 약 10% 정도이고 ANSYS 결과와의 비교에서는 오차가 약 1% 미만으로서 개발된 프로그램의 정확성을 확보할 수 있었다. 본 프로그램은 궁극적으로 라이저의 안정성을 예측할 수 있으며 라이저의 설계에 있어서 아주 중요한 최하단 클램프의 정확한 위치를 결정할 수 있다. 본 프로그램은 해양엔지니어가 라이저를 설계하는 데 좋은 도구가 될 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- [1] DnV, 1981, Rules for Submarine Pipeline System.
- [2] Peter K. P., 1992, ANSYS User's Manual Vol. IV-Theory, Swanson Analysis Systems, Houston.
- [3] Bowels J. E., 1988, Foundation Analysis and Design, Mcgraw-Hill International, New York.
- [4] Sarpkaya T. and Isaacson M., 1981, Mechanics of Wave Forces on Offshore Structures, Van Nostrand Reinhold Company, New York.
- [5] Dawson T. H., 1983, Offshore Structural Engineering, Prentice Hall, New Jersey.
- [6] 임 상진, 광 병만, 이 주성, 1991, 유한요소법 입문, 동명사, 서울.
- [7] Bathe K., 1982, Finite Element Procedures in Engineering Analysis, Prentice Hall, New Jersey.

