

# 유한요소법에 의한 해양 강성 라이저의 3차원 구조해석에 관한 연구

정 동 호\* · 박 한 일\*\*

## A Study on Three Dimensional Structural Analysis for Marine Rigid Riser by Finite Element Method

### ABSTRACT

A marine rigid riser is subjected to floating vessel motions as well as environmental forces arising from currents and waves. The static and the dynamic analyses are carried out for a marine rigid riser and a three dimensional computer program is developed by using finite element method. The dynamic analysis is performed in the time domain using the Newmark method for nonlinear drag problems. In the program, both time-varying axial forces and lateral forces giving rise to combined parametric and lateral excitations are taken into account. The vortex shedding which excites risers in a direction perpendicular to the flow and induces transverse response is also considered. It is demonstrated that transverse displacements due to vortex shedding is greatly increased in lock-in regions, and the effect of combined excitation of the response of a marine rigid riser becomes significant compared to separate lateral or parametric excitation. The results of this study are compared with those of references with good agreements.

### 1. 서 론

해양 유전에 대한 끝없는 개발로 인하여 수심이 얇은 지역에 위치한 유전은 거의

---

\* 한국해양대학교 대학원

\*\* 한국해양대학교

고갈 상태에 이르렀으며, 따라서 해저 유전 개발에 대한 관심은 북해의 북부, 북극해 등 환경 조건이 보다 열악한 해역이나 수심 900m 이상의 심해역으로 비중이 옮겨지고 있다.

해저 석유 개발 영역의 이전으로 인하여 석유 개발 도구인 해양구조물의 종류도 변하게 되었다. 기존의 적용 수심이 얕은 해역에서는 주로 고정식 구조물을 사용해 왔는데, 이러한 구조물은 수심이 깊어짐에 건조 비용이 상당히 증가하게 된다[12]. 따라서 건조비용을 줄이기 위하여 반 잠수식 구조물(semi-submersible vessel, SSV)이나 인장각식 플랫폼(tension leg platform, TLP)과 같은 부유식 또는 유연식 구조물을 사용하게 되었다. 특히 반 잠수식 구조물은 석유 시추 및 생산용 이외에 최근에 많은 관심이 집중되고 있는 망간 단괴 채취용 구조물로도 사용되어지고도 있다.

반 잠수식 구조물을 이용해서 해저 자원을 채취할 때는 라이저(riser)를 이용하게 되는데, 라이저란 해저면과 해수면의 구조물을 연결하는 긴 수직 파이프를 말한다. 심해역에서 라이저는 환경 하중에 의해서 정적 하중과 더불어 동적 하중을 받게 되는데, 이와 같은 하중에 의해서 작업 중에 라이저가 심하게 손상을 입게된다면 경제적, 환경적으로 치명적인 피해를 입게 된다. 따라서 이와 같은 반 잠수식 구조물에 연결된 라이저에 대한 해석을 수행할 시는 정적해석과 동시에 동적해석을 반드시 수행하여서 외력에 대한 응답을 보다 정확히 산출해야 한다. 특히 라이저의 설계자는 라이저에 발생할 수 있는 최고의 굽힘 응력(bending stress)과 BOP(blowout preventer)에서 발생하는 해저면과의 최고 각도(bottom angle) 또는 라이저 기울기(slope)를 고려해야 하며, 이에 더하여 평균 응력에 중첩되는 동적 진동에 의한 피로 파괴에 대해서도 고려해야 한다.

라이저에 작용하는 외력을 결정하고 나면 외력에 대한 응답을 산출하기 위해서 구조해석을 실시해야 하는데, 먼저 정적해석을 수행한 후 정적해석 결과값을 바탕으로 동적해석을 수행한다. 라이저의 동적해석 방법에는 비 결정론적인 랜덤진동 해석(non-deterministic random vibration analysis), 주파수영역 해석(frequency domain analysis) 그리고, 시간영역 해석(time domain analysis) 등이 있다. 이러한 방법 중 시간영역 해석은 비 선형 문제에 적용될 수 있으며, 라이저에 작용하는 축 방향 장력이 시간에 따라 변화할 경우에 사용될 수 있다.

본 논문에서는 반 잠수식 구조물에 설치되는 라이저 중 강성 라이저에 대한 정적, 동적해석을 실시하였는데, 구조물의 자유도가 많아지고 시간에 따라 변화하는 성분들 때문에 이론적인 해석이 불가능하여 수치적인 해석방법을 사용하고자 한다. 수치해석 방법은 유한 요소법에 기초하여 유체 비 선형과 시간에 따라서 변화하는 축 방향 장력 성분을 고려하기 위해서 시간영역 해석방법을 이용한다. 시간영역 해석방법은 여러 가

지가 있는데, 본 논문에서는 Newmark 방법을 사용하여 구조 해석을 하며, 이를 프로그램화하여 전산 프로그램을 개발하고자 한다.

일반적으로 강성 라이저에 대한 운동 해석은 2차원 평면에 기초해서 흐름(in-line) 방향의 응답을 해석한다[3][8]. 하지만 라이저가 실 해역에 설치되었을 때에는 파랑, 조류 그리고 바람과 같은 복잡한 외력에 의해서 상부 구조물과 라이저는 3차원 운동을 하게 된다.

또한 조류가 지배적인 해역에서는 와동방출의 발생으로 흐름의 직각(transverse) 방향으로 변위가 크게 발생하게 된다. 와동방출에 의한 흐름의 직각 방향 변위에 대해서는 많은 학자들이 연구와 실험을 계속해 오고 있다. 그런데 조류만 작용할 경우는 와류(vortex)에 의해 발생하는 양력(lift force)을 정확히 산정할 수 있지만, 파랑이 작용할 때는 시간에 따른 유속의 변화로 인하여 와동방출의 진동수가 변화하기 때문에 양력을 정확한 이론식으로 표현할 수 없다[9][10][13][14]. 따라서 실험에 의해서만 흐름의 직각 방향 변위를 구할 수 있다.

본 논문에서는 외력에 의한 상부 구조물의 3차원적인 임의 방향 가진을 표현하였으며, 라이저의 운동을 3차원으로 고려하여 구조해석을 실시한다. 흐름의 직각 방향 변위에 대한 계산은 조류만 작용할 경우와 조류와 파랑이 동시에 작용하는 경우로 나누어서 수행한다.

반 잠수식 구조물이 파랑에 의해서 가진 될 경우에 상부 구조물은 연직(heave) 운동을 하게된다. 이와 같이 상부 구조물의 연직운동은 라이저에 가진력으로 작용하여, 라이저에 작용하는 축 방향 장력 성분을 시간에 따라서 변화시키는 효과를 발생시킨다. 한편, 일반적으로 라이저의 운동해석을 할 경우에 시간에 따라서 변화하는 축 방향 장력 성분은 일정한 값으로 가정하고 해석을 하지만, 실제로 이 성분은 운동에 상당한 영향을 미치게 된다. 이와 같은 진동 현상은 파라메트릭 진동(parametric vibration) 문제로 접근해야 한다. Park[11]은 파라메트릭 진동에 대한 현상을 이론식에 의해 풀이하고, 유한 요소법에 의한 2차원 구조해석용 프로그램을 개발하였다. 그리고 두 가지 방법을 서로 비교하면서 파라메트릭 진동에 대한 제반 해석을 수행하였다. 반면에 류와 아이잭슨[1]은 세장형 해양 구조물의 운동해석을 2차원 프로그램을 이용하여 수행하였다. 시간에 따라서 변화하는 축 방향 장력 성분은 고려하여 해석을 수행하였지만, 파라메트릭 진동을 전반적으로 설명하는 Mathieu 불안정 차트(instability chart)에 대해서는 설명하지 않고, 단지 장력 진폭비에 따른 변위와 응력의 변화에 대해서만 설명하였다.

본 논문에서는 시간에 따라 변화하는 축 방향 장력 성분을 고려하여 3차원 해석을 수행하여 장력이 일정한 경우와 서로 비교를 함으로서, 시간에 따라서 변화하는 축 방

향 장력 성분의 중요성을 확인하고자 한다.

또한, 흐름방향과 흐름의 직각방향 성분을 동시에 고려하며, 구조물의 운동과 해류의 임의 방향 가진을 표현하는 3차원 구조해석을 수행하고자 한다. 그리고, 유한요소법을 근거로 하여 개발된 프로그램을 이용하여 특정 라이저 모델에 대한 예제 해석을 하고자 한다.

## 2. 라이저의 유한요소 해석

### 2.1 지배 방정식

라이저를 해석하기 위해서는 먼저 이에 대한 지배방정식을 세워야 한다. 라이저에 대한 수평 운동방정식(horizontal equation of motion)을 유도하기 위해서는 3개의 평형 방정식(equilibrium equation)을 하나의 방정식에 대입해서 결합해야 한다[5].

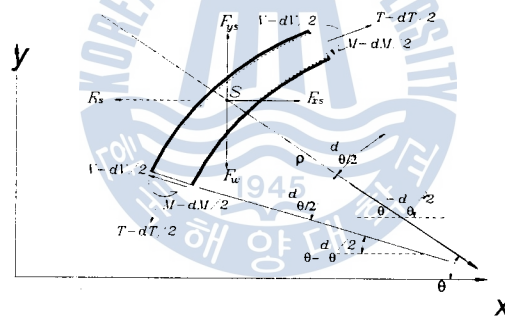


Fig. 1 Equilibrium equation for a bent tubular segment.

Fig. 1은 굽어진 상태의 세장형 미소요소(curved tubular segment)에 대한 자유 물체도를 나타내고 있는데, 수평, 수직, 모멘트 평형 방정식을 세운 후에 수평 방정식에 대하여 전개하면 해양강성 라이저의 지배 방정식이 유도된다. 대부분의 해양구조물에 대하여, 외력은 파랑과 조류에 의해서 라이저의 표면에 작용하는 힘  $f_{xs}$ 와  $f_{ys}$ 인데 이것들은 시간의 함수이고 위치의 함수이다. 또한 장력  $T$ 는 라이저의 자중 때문에 길이에 따라 변하거나 부력재에 의해서 갑작스럽게 변화할 수도 있다. 그리고, 내·외부 압력  $P_o$ ,  $P_i$ 는 중앙점  $s$ 로부터 해수면까지 거리의 선형함수이며, 라이저 파이프가 길이에 대해서 변화할 경우에  $EI$ ,  $A_o$ ,  $A_i$ 값들도 길이의 함수가 된다. 따라서 강성 라이저에 대한 일반적인 지배 방정식의 형태는 다음과 같이 표현된다.

$$\left[ \frac{\partial^2}{\partial s^2} (EI \frac{\partial \theta}{\partial s}) - \{ T(y) + A_o(y) \bar{P}_o(y) - A_i(y) \bar{P}_i(y) \} \frac{\partial \theta}{\partial s} \right] \sec \theta -$$

$$[\gamma_s \{ A_o(y) - A_i(y) \} - f_{ys}(x, y, t)' - A_o(y) \gamma_o(y) + A_i(y) \gamma_i(y)] \times$$

$$\tan \theta + m_x(y) \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} = f_{xs}(x, y, t)'$$
(1)

여기서,

$$T(y) = T_c + \int \gamma_s \{ A_o(y) - A_i(y) \} dy - \int f_{ys}(x, y, t) dy$$
(2)

$m_x$  : 부가질량을 포함하는 미소요소(segment)의 단위 길이 당 질량

$f_{xs}(x, y, t)'$ ,  $f_{ys}(x, y, t)'$  : x, y방향에 작용하는 압력을 제외한 표면력 성분

$A_o$ ,  $A_i$  : 외부, 내부 직경에 의한 단면적( $\pi D_o^2/4$ ,  $\pi D_i^2/4$ )

$P_o$ ,  $P_i$  : 라이저에 작용하는 외부, 내부 압력

## 2.2 동적 운동해석

다 자유도의 기본 운동방정식은 Hamilton 원리로부터 전개된 Lagrange 방정식으로 부터 유도될 수 있다[6]. Lagrange 방정식에 assumed-modes method를 사용하면 다음과 같은 기본적인 운동방정식이 유도된다.

$$M \ddot{D} + C \dot{D} + KD = F$$
(3)

위 식에 해양파에 의한 성분을 고려하고, 이에 의한 하중항을 적용시키면 아래와 같은 방정식으로 유도된다.

$$M_T \ddot{D} + C \dot{D} + KD = M_H \dot{U} + B(U - \dot{D}) (U - \dot{D})$$
(4)

여기서,  $M_T$  : 부가질량을 포함하는 전체질량행렬식

$M_H$  : 유체질량행렬식

$C$  : 구조감쇄행렬

$K$  : 전체강성행렬

$B$  : 유체감쇄행렬

### 2.2.1 와동방출(vortex shedding)에 의한 영향

와동방출이란 실린더형 구조물에서 구조물 표면의 구배 변화에 의해서 구조물 뒷면에서 와류가 발생하고, 이 와류가 불규칙적으로 구조물에서 떨어져 나가는 현상을 말한다. 이것은 흐름의 연직 방향으로 실린더 주변에 비대칭적인 압력 분포를 발생시키게 되며, 이로 인하여 흐름 방향에 대해서 직각방향으로 힘이 발생하게 되는데 이것을 항력(lift force)라 한다. 항력의 방향은 각 새로운 와류가 실린더로부터 떨어져 나감에

따라 바뀌게 된다. 따라서 이와 같은 항력에 의해서 실린더는 흐름의 직각(transverse) 방향으로 변위를 발생시키게 된다.

와동방출의 진동수는 Strouhal 수( $S = f_s \cdot D_o / U$ )에 의해서 결정되는데, 와동방출의 진동수가 구조물의 고유 진동수와 거의 같아지는 경우에는( $f_s \approx f_n$ ) 흐름(in-line) 방향 성분 변위보다 흐름의 직각 방향 성분 변위가 더 크게 나타나는 lock-in(locking-on 또는 synchronization)이 발생하게 된다[14]. 또한 와동방출의 진동수가 구조물의 고유 진동수를 벗어나서 lock-in현상을 피할 수 있다하더라도 와동방출에 의한 변위의 발생은 피로 수명을 단축시킬 수 있는 요인이 될 수 있다. 따라서 실린더형 해양 구조물 설계 시에는 반드시 이에 대한 고려를 해야한다. 와동방출에 의해 발생하는 진동의 정도를 결정하는 중요 매개 변수에는 감소감쇄(reduced damping)과 감소속도(reduced velocity)가 있다. 이러한 변수들은 다음과 같이 표현된다[10].

$$\cdot \text{감소감쇄, } k_s = 2m\delta / \rho D_o^2 \quad (5)$$

$$\cdot \text{감소속도, } V_r = V / (f_n \cdot D_o) \quad (6)$$

여기서,  $k_s$  : 감소감쇄

$m$  : 부가질량을 포함하는 구조물의 단위 길이 당 질량

$\delta$  : 구조감쇄의 지수감소(logarithmic decrement)

$V_r$  : 감소속도

$V$  : 유체와 구조물의 상대속도

감소감쇄는 구조 감쇄의 지수감소와 유체밀도에 상대적인 구조물의 질량의 곱이다. 감소속도도 역시 와동방출에 의한 진동의 정도를 결정하는데 사용되어 진다. 많은 연구자들에 의한 실험은 이를 보여주는데 실린더형 구조물의 횡 진동에 대하여, 감소속도가 3.5~5.0에 도달할 때 가진이 시작되고 6주변에서 가진력은 최대가 되며 8.0~12.0에서 진동은 점차 줄어들게 된다.

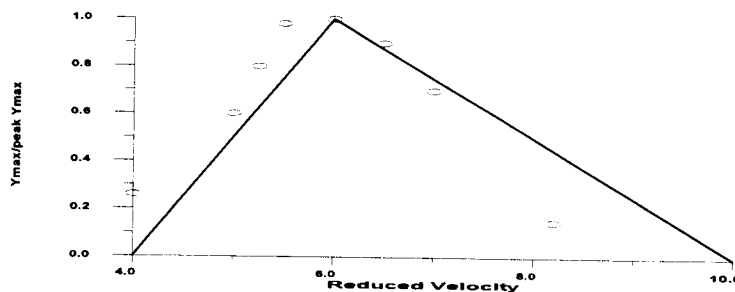


Fig. 2 Transverse oscillations of a circular cylinder.  
o, Experimental data; -, Triangular function used. ( $Re_{max} = 1 \times 10^4$ )

이 현상은 Fig. 2에서 잘 보여준다[13]. 본 논문에서는 감소속도 값에 대한 응답의 형태를 예제해석에서 보여줄 것이다.

### 2.2.2 파라메트릭 진동(parametric vibration) 문제의 접근

해양 강성 라이저의 상부 구조물은 외부 하중에 의해서 상하, 좌우(heave, surge)운동 등의 6자유도 운동을 하게되며, 이러한 상부 구조물의 운동은 라이저에 가진력으로 작용하게 된다. 가진력 중 특히 상하(heave) 운동에 의한 축 방향 가진력은 라이저 요소에 대하여 작용하는 장력을 시간에 따라 변화시키게 된다. Fig. 3은 횡 방향 가진과 축 방향 가진이 동시에 작용하는 구조물을 표현하고 있다.

이와 같이 횡 방향 운동 중인 구조물에 대하여 축 방향 가진력이 시간에 따라서 변화하면서 작용할 경우는 파라메트릭 진동 문제로 접근하여야 한다. 파라메트릭 진동이란 구조물의 강성이 시간에 따라 변화하는 것으로서, 축 방향 가진 진동수가 구조물 고유 진동수의 일정배수가 되는 점의 주변영역에 있을 때 구조물이 불안정 영역에 속하게 되는 현상이다[11].

파라메트릭 진동에 대한 기본적인 방정식은 다음과 같다.

$$\ddot{y} + (\alpha + \beta \cos \omega t)y = 0 \tag{7}$$

여기서, 
$$\alpha = \left(\frac{\omega_n}{\omega}\right)^2, \quad \beta = \frac{S}{EI(n\pi/L) + T_0} \left(\frac{\omega_n}{\omega}\right)^2 \tag{8}$$

$S$  : 시간에 따라 변화하는 장력의 진폭(=  $R \cdot T_0$ )

$\omega_n$  : 구조물의 고유진동수

$\omega$  : 축 방향 가진 진동수

$R$  : 장력 변화의 진폭비

파라메트릭 진동은 Mathieu 불안정 차트(instability chart)로서 잘 설명되어질 수 있는데, Fig. 4에서 보듯이 두 진동수의 비율인  $\alpha$ 와  $\beta$ 값에 따라서 구조물은 안정영역 또는, 불안정 영역에 들어가게 된다.

파라메트릭 진동 문제를 라이저에 적용시키기 위해서 지배방정식을 다시 살펴보겠다.

시간에 따라서 장력이 변화한다면 지배방정식 (1)식에서 사용되어진 장력  $T(y)$ 는 다음과 같이 다시 정의되어 진다.

$$T(y, t) = T(y) - S \cdot \cos \omega t \tag{9}$$

상부 구조물에 의해 가진되는 경우, 축 방향 가진 진동수  $\omega$ 는 횡 방향 가진 진동수와 같으며, 위상은  $90^\circ$  의 차이가 발생한다. 따라서 (9)식을 사용하여서 (1)식을 재 정의하면, 시간에 따라 변화하는 장력 성분은 라이저의 지배 방정식에서 시간에 따라 변

화하는 강성으로 되며, 재 정의된 지배방정식을 이용하여 라이저 문제를 해석해야 한다. 본 논문에서는 파라메트릭 진동에 대해서는 자세히 설명은 하지 않았다. 이에 대한 내용은 참고문헌 [18]을 참조하길 바란다.

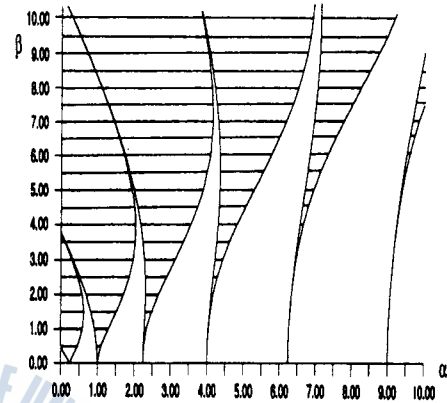
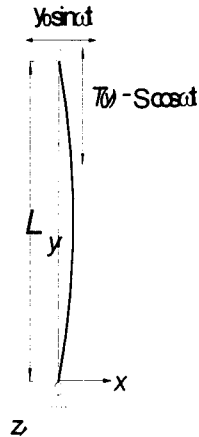


Fig. 3 Combined excitation of model. Fig. 4 Mathieu instability chart.

### 2.2.3 시간영역 해석

동적해석은 Newmark법에 근거하여 수행되어졌는데, (4)식을 기지와 미지의 자유도로 분리한 후 Newmark법을 사용해서 전개하면 아래와 같은 최종식으로 전개된다.

$$\begin{aligned}
 & \left[ \frac{4}{(\Delta t)^2} M_{TAA} + \frac{2}{\Delta t} C_{AA} + S_{AA} \right] D_{A \ t+\Delta t} = \\
 & M_{HAA} \dot{U}_{WA \ t+\Delta t} + B_{AA} (U_{WA} + U_{CA} - \dot{D}_A)_{t+\Delta t} \\
 & (U_{WA} + U_{CA} - \dot{D}_A)_{t+\Delta t} - C_{AB} \dot{D}_{B \ t+\Delta t} - S_{AB} D_{B \ t+\Delta t} + \\
 & \left[ \frac{4}{\Delta t} M_{TAA} + C_{AA} \right] \dot{D}_{AT} + \left[ \frac{4}{(\Delta t)^2} M_{TAA} + \frac{2}{\Delta t} C_{AA} \right] D_{AT} \\
 & M_{TAA} \dot{D}_{AT} = F_{t+\Delta t}
 \end{aligned} \tag{10}$$

(10)식에 근거해서 전산 프로그램을 개발하여 라이저의 3차원 구조해석을 수행하였다.

사용된 언어로서는 Microsoft Power Station Fortran 4.0이며, 개발된 프로그램의 이름을 DHRISER로 하였다. 프로그램 DHRISER는 3차원 구조해석용 프로그램이므로 임의의 방향에서 가해지는 파랑과 조류에 대해서 고려할 수 있으며, 파랑에 의해 상부 구조물에 가해지는 가진력도 임의의 방향으로 표현 될 수 있다.



### 3. 예제해석과 구조해석 및 검증

본 장에서는 유한요소를 기초로 해서 개발된 DHRISER를 이용하여 여러 가지 예제 해석을 실시하였고, 또 이것을 검증하기 위해서 참고문헌 [8], [9] 그리고 [11]을 이용하여 DHRISER의 타당성을 확인하였다.

#### 3.1 예제해석 모델의 설명

본 논문에서 모델해석으로 사용된 라이저는 Fig. 5과 같다. 구조물은 전체를 20개의 요소로 나누었으며 따라서 절점은 21개가 생기게 된다. 요소 번호는 Fig. 5과 같이 해저면에서 1번이 되며, 상부 끝단의 끝점을 21번으로 정했다. 해저면에 해당되는 절점번호 1은 횡 방향과 축 방향 운동에 대해서는 고정시키고 회전 운동에 대해서는 자유롭게 표현되어졌다. 상부 끝점에 해당되는 절점번호 21은 회전과 축 방향으로서는 자유로이 운동하고, 축 방향으로서는 고정 절점으로 지정한 후 이 절점은 강제 변위 절점으로 사용되어졌다. 예제해석에서는 파랑과 조류가 Fig. 5과 같이 같은 방향으로 작용한다고 가정했으며, 파랑과 조류의 상호작용에 대해서는 고려하지 않았다. 조류는 해수면에서 0.256m/sec이고 수심에 따라서 선형적으로 변한다고 가정하였다. 횡 방향 가진의 진동수는 파랑의 진동수와 같다고 보았으며, 재료 특성치는 길이에 따라 일정하다고 보았다. 그리고, 파라메트릭 진동에 대한 검증 부분에서만 장력이 시간에 따라 변화하고, 나머지는 일정한 장력으로 가정하였다. 모델해석에서 사용된 라이저의 제반 특성치는 Table 1, Table 2와 같다.

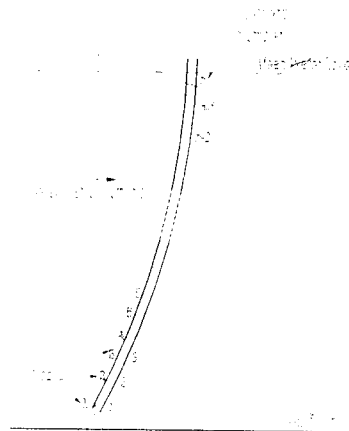


Fig. 5 The geometric configuration of riser model.

Table 1 Basic data of riser model(depth independent parameters)

변 수		수치	
해저면과 볼 조인트사이의 거리, m		9.144	
해수면과 맨 위 절점과의 거리, m		15.24	
부력재의 외경, m		0.6096	
파랑과 조류에 대한 유효직경, m		0.6604	
탄성계수(Young's modulus), N/m <sup>2</sup>		2.1×10 <sup>11</sup>	
내부 진흙의 밀도, kg/m <sup>3</sup>		1432.0	
부력재와 초크/킬 라인 을 포함 하는 길이 15.24m에 대한 N	공기 중 무게 (초크/킬 라인속에 있는 진흙포함)	39099.5 (부력재×)	42664.7 (부력재○)
	물속 무게	33053.1 (부력재×)	13816.4 (부력재○)
항력계수		0.7	
부가 질량계수		1.5	
설계 파고, m		6.096	
설계파 주기, sec		9	
조류(선형분포), m/sec		해수면 : 0.256	
		해저면 : 0	
상부 구조물에 의한 측 방향 가진 진폭, m		0.6096	
상부 구조물에 의한 측 방향 가진 주기, sec		9	
상부 구조물과 파랑과의 위상차, degree		15	

Table 2 Basic data of riser model(depth dependent parameters)

No. 변수	C a s e			
	Case. 1	Case. 2	Case. 3	Case. 4
수심, m	152.40		457.20	
라이저의 길이, m	158.50		463.30	
상부 끝단에서의 초기변위, m	4.57		13.72	
상부 끝단에서의 초기장력, N	544,000	907,180	1,315,410	2,267,950

### 3.2 예제해석의 결과 및 검증

본 논문은 크게 정적해석, 모드해석, 동적해석으로 나누어서 해석을 하게된다. 하지만 본 논문에서는 동적해석의 결과값을 중심으로 검증을 실시하였다. 따라서 정적해석 결과와 동적해석 결과의 합인 최대 변위와 최소 변위값을 비교함으로써 본 논문에서

개발된 프로그램의 타당성을 확인하였다. 최대, 최소 변위값에 대한 검증은 한 후, 본 프로그램이 3차원에 적용 가능한가를 확인하기 위해서 2차원 평면변위와 동시에 와동 방출에 의한 흐름의 직각(transverse) 방향의 변위에 대하여 검토하였다. 그리고 마지막으로 파라메트릭 진동에 대한 검증은 수행하였다.

### 3.2.1 흐름(in-line) 방향 변위의 검증

흐름 방향에 대한 해석결과는 앞에서 설명했듯이, Table 2에 제시한 4가지의 경우에 대한 최대변위와 최소변위의 값을 참고문헌 [8]과 비교함으로써 검증을 했다. Fig. 6은 4개의 경우에 대한 해석결과를 보여주는데 해석결과가 참고문헌 [8]와 잘 일치함을 알 수 있다.

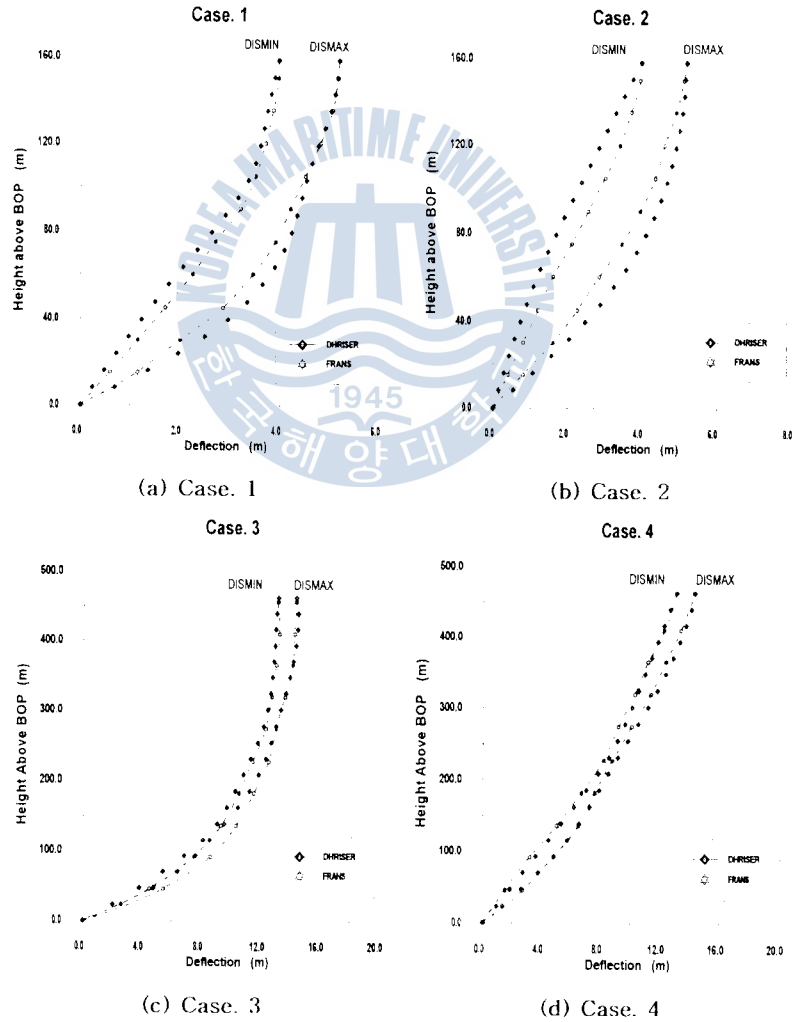


Fig. 6 Comparison of max., min. displacements between DHRISER and FRANS (in-line, x-direction).

### 3.2.2 와동방출에 의한 흐름의 직각(transverse) 방향 변위의 검증

본 절에는 동적 응답 중 와동방출에 의한 흐름의 직각 방향의 변위값을 검증한다.

검증 방법은 흐름의 직각 방향 변위를 결정하는 중요변수인 감소속도( $V_r$ )값에 따라서 변위값이 어떻게 변화하는가를 해석하여, 그 변화하는 경향이 이론해석 결과와 일치하는가를 평가하는 것이다.

상부 끝단에서의 장력은  $13 \times 10^6 \text{N}$ 으로 증가시켜서 해석을 실시하였으며, 10번 절점에 대한 응답을 관측하였다. 실제 라이저에는 이와 같은 큰 장력이 작용하지 않지만, 와동방출의 효과를 이론해석과 비교하기 위해서 임의의 값을 사용하였다. 해석에서 사용된 각종 특성치는 Table 1에서 사용된 값을 사용했으며,  $C_L=0.18$ 로 가정하였다. 파랑이 외력으로 작용할 시는 상당히 복잡해지므로, 조류만 작용한다고 가정하였다.

Table 3은 사용된 모델의 고유주기와 고유 진동수, 그리고 각 모드에 대해서 lock-in이 발생하는 조류의 속도를 나타낸다. Table 4는 다양한 조류 속도에 따른 와동방출의 진동수( $f_s$ )와 감소속도( $V_r$ )를 나타내고 있다.

Strouhal No(S)는 0.18을 사용했으며, (4.98)식을 이용하여 lock-in이 발생하는 와동방출의 진동수를 계산하였다. 감소속도는 (4.102)식을 사용하여 계산하였고, 와동방출에 의해 작용하는 힘의 표현은 (4.99)식을 사용하여, 이 힘을 흐름의 직각 방향으로 적용시켜서 해석을 실시하였다.

Fig. 7은 와동방출에 의해 발생하는 10번 절점 흐름의 직각 방향의 변위값에 대한 시간 이력(time history)를 보여주고 있다.

먼저 (a)에서는  $U_{current}=0.15$ 로서  $V_r=3.6$ 을 나타낸다. 이 영역에서는 와동방출이 구조물의 운동에 약하게 영향을 미치지 않고 있음을 나타낸다. 그 후  $U_{current}=0.2$ 이 되면서부터 조금씩 변위가 발생하고 있음을 알 수 있다. 조류속도가 증가하면서 와동방출에 의한 변위도 조금씩 증가하다가, 와동방출의 진동수가 구조물의 1차 모드 고유 진동수와 같아지는 (c)에서 흐름의 직각 방향 변위는 최대를 나타내고 있음을 볼 수 있다. 이때는  $U_{current}=0.23$ 이고,  $V_r=5.56$ 으로서 lock-in이 발생하는 구역이 된다. 이후에 조류속도는 증가하지만, 흐름의 직각 방향 변위는 감소하고 있음을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 앞장에서 설명했던 내용으로서, Fig. 2에서 보는 것과 거의 일치하고 있다. 조류속도가 증가하면서 감소속도( $V_r$ )는 감소하게 되고 따라서 흐름의 직각 변위가 감소하다가, 와동방출 진동수가 구조물의 2차 모드 고유진동수와 가까워지면서 다시 변위가 증가하고 있음을 볼 수 있다.

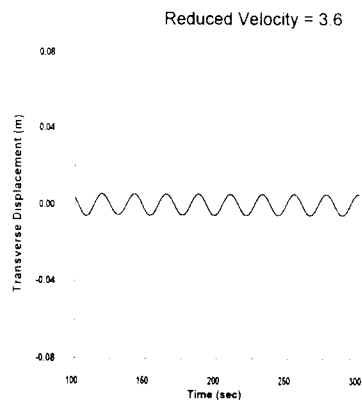
위와 같은 결과값으로 볼 때 와동방출에 의한 흐름의 직각 방향 변위에 대한 해석은 타당하다고 판단되어 진다.

Table 3 Natural frequency and period of model and current velocity at Lock-in region(top tension=  $13 \times 10^6$ N)

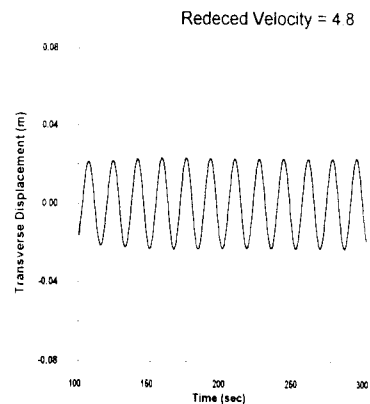
Natural period (T=sec)	Natural frequency ( $f_n$ =cycle/sec)	U at lock-in (m/sec)	$V_r$
14.649	0.068264	0.23	5.56
7.3145	0.13672	0.463	5.56
4.868	0.2054	0.723	5.56
3.6455	0.2743	0.929	5.56

Table 4 Vortex shedding comparison data

$U_{current}$ m/sec)	Vortex shedding frequency (cycle/sec)	$V_r$	
0.15	0.04429	3.6	
0.2	0.05906	4.8	
0.23	0.0679	5.56	Lock-in for 1st mode.
0.27	0.07972	6.5	
0.35	0.103346	8.4	
0.45	0.1329	10.8	Near 2nd lock-in region.



(a)  $U_{current} = 0.15$



(b)  $U_{current} = 0.2$

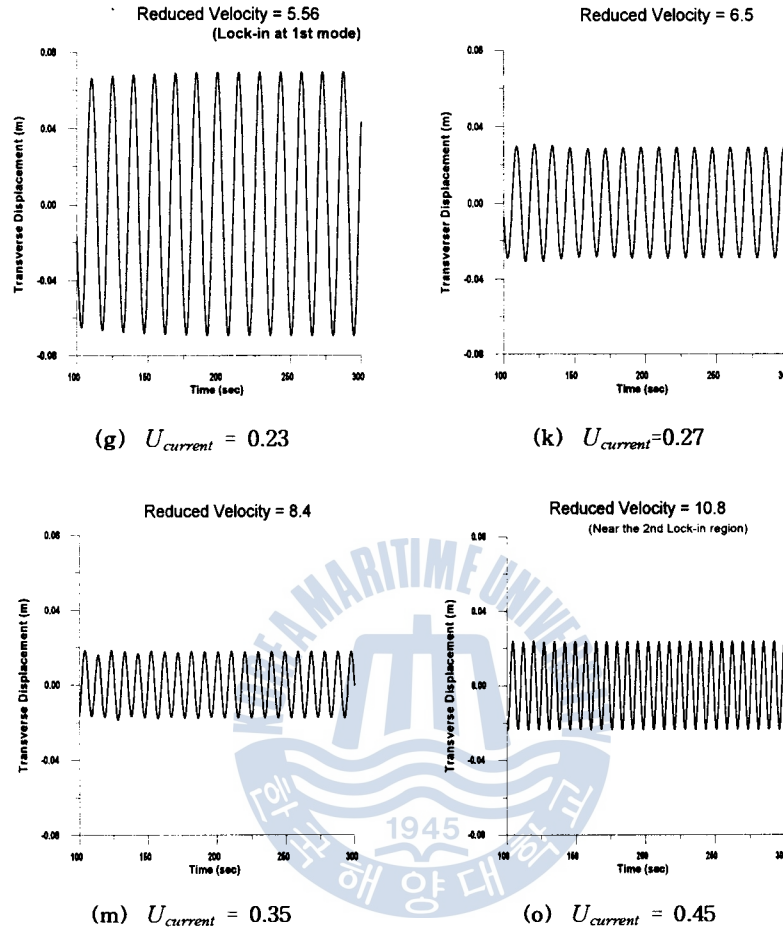


Fig. 7 Transverse displacements by vortex shedding (time history,  $S=0.18$ , Node. 10).

### 3.2.3 파라메트릭 진동(parametric vibration)의 검증

흐름(in-line) 방향과 흐름의 직각(transverse) 방향 변위값에 대한 검증을 마친 후, 마지막으로 파라메트릭 진동에 대한 검증을 하였다. 파라메트릭 진동에 대한 검증은 본 연구에서 개발된 프로그램에 의해 해석된 결과값이 Mathieu 불안정 영역(instability region)에 잘 부합되는가를 살펴보았다. 또, 참고문헌 [11]의 결과값과 본 연구의 결과값을 서로 비교하여, 그 유형을 관찰함으로써 본 연구의 타당성을 확인하였다. 여기서도 역시 10번 절점에 대한 응답을 살펴보았다. Fig. 8은 Park[11]에 의해 준 이론(semi-analytic)해석으로 구해진 값으로서, 각 가진방법에 대한 정상상태(steady state) 응답의 진폭을  $\alpha$ 값에 따라서 나타내었다. 이 값은 1차 모드만을 고려한

값이다. 여기서 parametric은 시간에 따라서 변화하는 축 방향 장력 성분만 작용하는 경우이고, lateral은 축 방향 가진이 작용하는 경우이며, combined는 두 가지의 가진이 동시에 작용하는 경우이다. Table 5는 예제 해석에서 사용되어지는 모델의 특성치와 환경적 요소의 특성치를 나타내고 있다. 세장형 해양구조물을 해석 모델로 사용하였으며, 파이프 관내의 내용물 효과는 무시했다. 상부 구조물에서 작용하는 초기 장력은  $13 \times 10^6(N)$ 을 사용했는데, 실제 라이저에는 장력기 시스템이 있기 때문에 이와 같은 큰 장력이 작용하지 않게 된다. 하지만 파라메트릭 진동 특성을 정확히 보기 위해서 이와 같은 임의의 장력값을 사용하였다. 예제 해석에서는  $\alpha$ 값에 따라서 결합진동의 효과가 다르게 나타나는지를 알아보기 위해서, 다양한 구조물의 길이에 대해서 해석을 수행하였다. 하지만 초기 장력과 구조물의 외경은 같다고 가정하였다. Table 6은 예제 해석에서 사용된 여러 경우의 구조물 길이와 이에 대한  $\alpha$ 값을 나타내고 있다. 시간에 따른 장력과 초기 장력의 비( $S/T_0 \approx \beta/a$ )는 1.0을 사용하였고, 상부 구조물의 축 방향 운동 진폭은 3.0m를 사용하였다. 예제 해석결과를 참고문헌 [11]의 해석결과와 비교하기 위해서 파랑에 의한 하중은 무시했다.

해양 강성 라이저는 축 방향과 축 방향 가진을 동시에 받고 있지만, 대부분의 논문에서는 이 두 가지 효과를 분리해서 해석한다. 그러므로, 본 논문에서는 결합 가진의 중요성을 알아보기 위해서 축 방향, 축 방향 그리고, 결합 가진의 효과에 대한 비교가 수행된다.

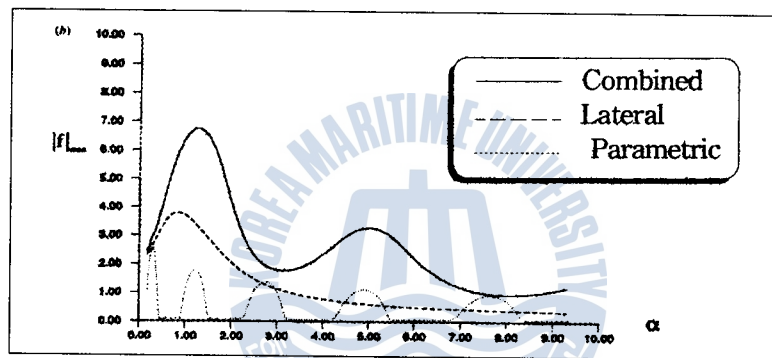
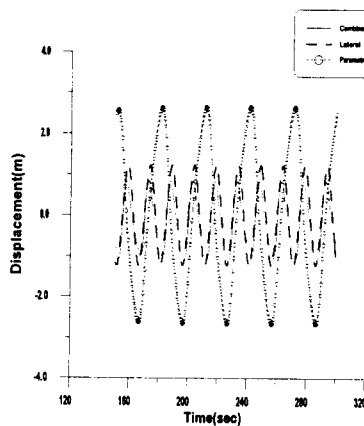
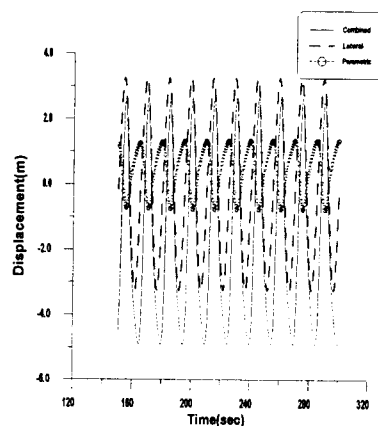
Fig. 9은 다양한 구조물 길이에 대한, 즉 다른  $\alpha$ 값에 따른 축 방향, 축 방향 그리고, 결합 가진에 대한 응답을 보여준다. 이 결과는 구조물의 중앙점에서 축 방향 변위를 나타내고 있다. Fig. 9의 (a)는 Mathieu 차트의 첫 번째 불안정 영역에 해당하는 것으로서 1365.5m 길이의 구조물에 대한 해석 결과이다. 결합 가진의 결과는 축 방향 가진의 결과와 거의 비슷한 값을 나타낸다. 이것은 첫 번째 불안정 영역에서 축 방향과 축 방향 사이의 상호간섭이 발생하지 않는다는 것을 나타낸다. 반면에 각 가진에 대한 응답 주기를 살펴보면 축 방향 가진에 대한 응답 주기는 가진 주기와 같지만, 축 방향 가진에 대한 응답 주기는 가진 주기의 2배가됨을 알 수 있다. 이것은 축 방향 가진과 축 방향 가진의 특징이 된다. Fig. 9의 (b)는 675m 길이 구조물에 대한 해석 결과로서 두 번째 불안정 영역의 중앙점(mid point)에 해당하는 경우이다. 이 경우에는 3가지 각 가진에 대한 응답이 첫 번째 불안정 영역에서의 응답 결과인 (a)와 비교해 볼 때 많이 변화했음을 알 수 있다. 결합 가진에 대한 응답은 축 방향 가진에 대한 응답보다 훨씬 커짐을 알 수 있는데, 이것으로서 두 번째 불안정 영역에서는 축 방향과 축 방향 가진 사이의 상호 작용이 중요함을 알 수 있다.

Table 5-5 Basic data for model

Young's modulus, $N/m^2$	$2.1 \times 10^{11}$
Drag coefficient, $C_D$	0.5
Added mass coefficient, $C_m$	1.0
Outer diameter, m	0.812
Thickness, m	0.0276
Material density, $kg/m^3$	7850
Wave period, sec	15
Amplitude of top end lateral displacement, m	3

Table 5-6 Relations of  $\alpha$  value, instability region number and model length

$\alpha$	Instability region	Length, m
0.25	Mid first	1365.5
1.0	Near second	760.5
1.3	Mid second	675.0
2.25	Near third	525.0
2.8	Mid third	475.0
4.0	Near fourth	400.0
5.0	Mid fourth	360.0

Fig. 8 Comparison between frequency response curves of combined, lateral and parametric excitations for  $\beta/\alpha=1.0$  and  $y_0=3.0$ (By (18)).(a) 1st instability region  
( $\alpha = 0.25$ )(b) Mid 2nd instability region  
( $\alpha = 1.3$ )



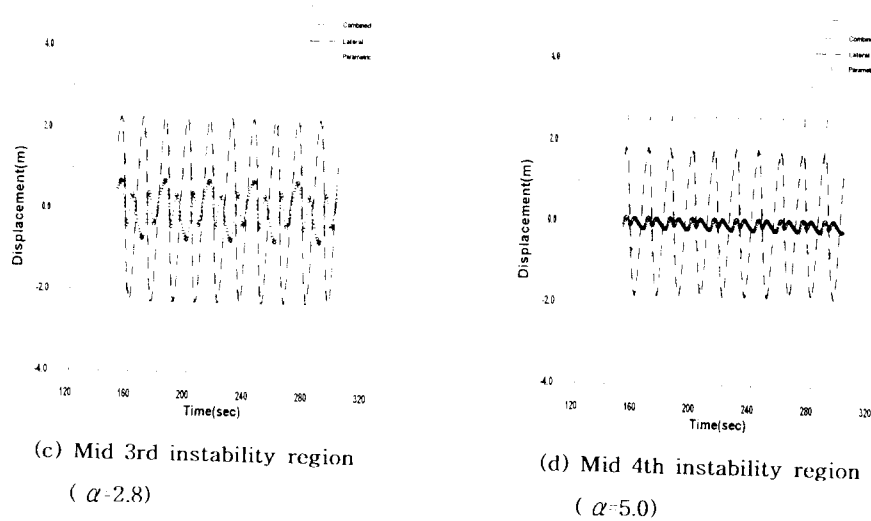


Fig. 9 Comparison of lateral displacements of example structures under combined, lateral and parametric excitations(instability region).

하지만 세 가지 모두 응답 주기는 가진 주기와 같게 나타남을 알 수 있다. Fig. 9의 (c)는 길이 475m 구조물로서 세 번째 불안정 영역에 대한 응답 결과이다. 결합 가진의 응답 진폭은 축 방향 가진 응답 진폭과 거의 비슷하고, 결합 가진과 축 방향 가진에 대한 응답 주기는 가진 주기와 같지만 축 방향 가진에 대한 응답 주기는 가진 주기에 비해 매우 작게 나타남을 알 수 있다. Fig. 9의 (d)는 길이 360m 구조물로서 네 번째 불안정 영역에 대한 해석 결과이다. 이것은 (b)의 응답 결과와 비슷한 것으로서, 결합 가진의 응답 진폭이 축 방향이나 축 방향 가진의 응답 진폭보다 훨씬 크게 나타남을 알 수 있다. 이상의 결과를 준 이론적 해석 결과인 Fig. 8와 비교해보면, 그 경향이 상당히 일치함을 알 수 있다. 또한 불안정 영역 중 짝수가 되는 영역(2nd, 4th)에서 결합 가진에 대한 응답이 더욱 크게 나타남을 알 수 있었다.

이상으로 각 예제 해석을 통해서 본 연구의 타당성을 충분히 인정할 수 있다고 판단되어진다.

### 3.2.4 DHRISER에 대한 예제 해석

모든 검증을 마친 후, 본 절에서는 실제 해역의 자료를 이용해서 해석을 실시하였다. 참고문헌 [2]에서는 반 잠수식 구조물의 설계조건에 관한 여러 가지 예를 제시하고 있는데, 이 중 수심 900m일 때 조업중인 상태에 대한 설계조건 자료를 사용해서 해석을 실시하였다. Table 7은 그 자료를 제시하고 있으며, 나머지 특성치는 라이저 모델의 특

성치인 Table 1의 값을 사용하였고, 상부 구조물의 초기 장력은  $13 \times 10^6$ 을 사용하였다.

Table 5-7 Design condition of semi-submersible

설 계 조 건				
상태	수심(m)	설계파 파고(m)	설계파 주기(sec)	조류(m/s)
조업중	900.0	19.8	10.0	1.0

Fig. 10은 Table 7을 이용한 해석 결과를 보여준다. 이 경우는 파랑의 파고가 상당히 커 질 경우에 어떤 응답이 나타나는가를 보여준다. (a)는 결합 가진과 측 방향 가진에 대한 최대, 최소 변위값을 나타내고, (b)는 두 경우에 대한 굽힘 응력(bending stress)값을 서로 비교하고 있다. 변위를 살펴보면 두 경우에 대해서 큰 차이 발생하지 않지만, 응력을 살펴보면 결합가진에 대한 응답이 상당히 커지고 있음을 알 수 있다. 따라서, 시간에 따라서 변화하는 측 방향 장력성분을 고려하지 않고 설계를 한다면, 해수면 부근에서 굽힘 응력을 정확히 파악하지 못하게 되므로 구조물을 실제 해역에 설치했을 시에 구조물에 큰 손상이 발생할 수도 있다. 따라서 측 방향 장력 성분을 반드시 고려하여서, 보다 더 정확한 해석을 해야 될 것으로 판단된다.

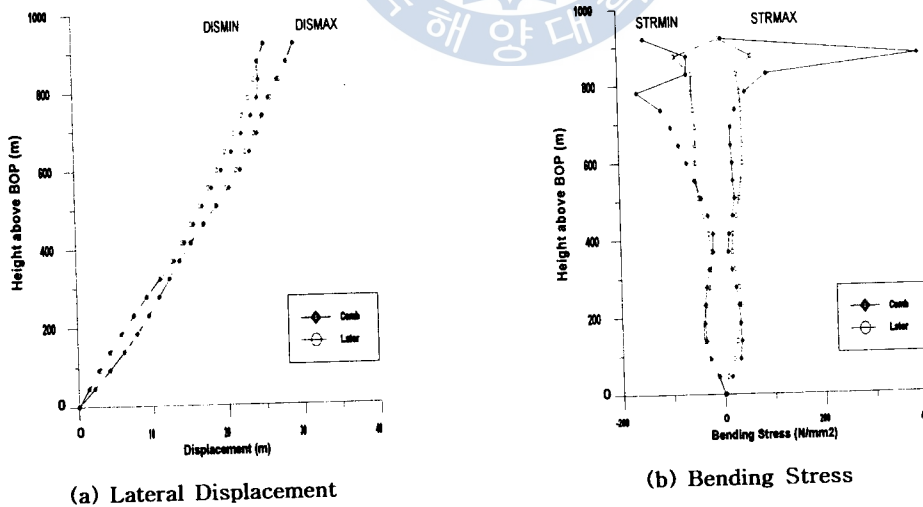


Fig. 5-8 Comparison of max., min. lateral displacements and bending stresses of example structures under combined and lateral excitations.

## 4. 결 론

본 논문은 라이저에 대한 3차원 동적해석이 가능한 구조해석용 프로그램을 개발하는 것을 그 목적으로 하였다. 프로그램은 유한요소법에 근거하여 Microsoft Power Station Fortran 4.0을 사용하여 개발하였다. 구조물에 작용하는 외력은 세장형 구조물에 적합한 Morison 방정식을 사용하였으며, 유체의 임의 방향에 대한 가진을 표현할 수 있도록 구성되어졌다. 기본적인 흐름 방향에 대한 해석을 3차원까지 고려하여 실시하였다. 이것은 참고문헌의 해석결과와 서로 비교를 하였는데, 대체적으로 잘 일치하였으며 한 가지 경우에 대해서 약간의 오차가 발생했다.

흐름 방향 변위와 동시에, 와동방출에 의해서 발생하는 흐름의 직각 방향에 대한 해석을 실시하였다. 하지만, 조류만 작용할 경우의 와동방출에 대한 해석은 이론과 상당히 일치하였지만, 파랑 작용시의 와동방출에 대한 정확한 적용은 불가능하였다. 그 이유는 파랑이 작용할 경우는 와동방출의 진동수가 시간에 따라서 변화하기 때문에 정확하게 프로그램에서 구현하기가 힘들었다. 이에 대해서 본 프로그램에서는 와동방출의 진동수를 시간의 함수인 유속의 변화에 따라서 계속 재정의 하면서 해석을 시도하였다. 하지만 만족할 만한 결과를 얻지 못했으며, 무엇보다도 정확한 이론해석이 불가능하기 때문에 검증하기 힘들었다.

일반적인 세장형 구조물에 대한 해석은 파랑에 의한 상부 구조물의 축 방향 가진에 대해서만 해석을 실시하는데 그이지만, 본 논문에서는 축 방향 가진과 더불어 시간에 따라서 변화하는 축 방향 가진도 동시에 고려해서 해석을 실시하였다. 이에 대한 문제는 파라메트릭 진동 문제를 다루어서 이론해석과 집복해서 해석을 실시하였는데, 해석 결과는 이론해석을 다룬 참고문헌과 잘 일치했다. 어떤 상태에서는 축 방향 가진과 동시에 작용하는 축 방향 가진이 라이저의 운동에 상당한 영향을 미치게 되므로 이를 반드시 고려해서 정확한 해석이 필요하다는 것을 알 수 있었다.

응력 해석을 통하여 해역의 특성치와 구조물의 특성치만 주어지면 최대 응력이 발생하는 지점과 최대 응력값을 산출할 수가 있었다. 이와 같은 해석을 통하여 설계시에 응력이 크게 걸리는 해수면과 해저면 부근에서는 응력에 따라서 구조물의 특성치를 달리 해서 설계하는 방법을 택해야 할 것이다. 하지만 해수면 부근에서 응력이 크게 걸리기 때문에 직경을 무리하게 크게 한다면, 조류가 크게 작용하는 해역에서는 항력이 크게 작용하게 되므로 해역의 특성치를 잘 고려해서 이에 적합한 설계를 해야 할 것이다.

마지막으로 앞으로의 연구 방향을 살펴보면,

첫째는, 본 논문은 대표적인 세장형 구조물인 라이저에 대해서 해석을 실시하였지만, 모든 세장형 구조물에까지 확대가 가능하므로 본 프로그램을 세장형, 계류 시스템까지

해석할 수 있는 상용 프로그램에 대한 연구가 요구된다.

둘째는 동적해석을 함과 동시에 피로해석을 실시하여서 구조물의 수명까지 예측할 수 있는 보다 정확한 해석이 필요하다.

## 참 고 문 헌

- [1] 류정선, 마이클 아이잭슨, 1998, "파랑 및 부유체 운동을 고려한 세장 해양 구조물의 동적 거동 해석.", Vol.10, No.2.
- [2] 유흥선 외 공역, 1997, "해양공학의 기초지식.", 동명사.
- [3] API, 1977, "API Bulletin on Comparison of Marine Drilling Riser Analyses.", Bul. 2J, First edition.
- [4] Chakrabarti S. K., 1987, "Hydrodynamics of Offshore Structures.", Computational Mechanics Publications, London.
- [5] Chakrabarti S. K. and Frampton R. E., 1982, "Review of Riser Analysis Techniques.", Applied Ocean Research, Vol.4, No.2.
- [6] Craig R. R. Jr., 1981, "Structural Dynamics.", John Wiley & Sons, New York.
- [7] Griffin O. M. and Ramberg S. E., 1982, "Some Recent Studies of Vortex Shedding with Application to Marine Tubulars and Risers.", ASME, 104, pp.2-13.
- [8] Hachemi S. V., 1983, "Nonlinear Dynamic Analysis of Deep Water Risers.", Applied Ocean Research, Vol.5, No.4.
- [9] Foulhoux L. and Saubestre V., 1993, "An Engineering Approach to Characterize the Lock-in Phenomenon Generated by a Current on a Flexible Column.", Proceedings of ISOPE Conference, Singapore.
- [10] Lyons G. J. and Patel M. H., 1986, "A Prediction Technique for Vortex Induced Transverse Response of Marine Risers and Tethers.", Journal of Sound and Vibration, Vol.111, part3, pp.457-487.
- [11] Park H. I., 1992, "Dynamic Stability and Vibration of Slender Marine Structures at Low Tension.", Ph. D Thesis, University of London.
- [12] Patel M. H., 1989, "Dynamic of Offshore Structure.", Butterworths, London.
- [13] Patel M. H. and Jesudasan A. S., 1987, "Theory and Model Tests for the Dynamic Response of Free Hanging Risers.", Journal of Sound and Vibration, Vol.112, part1, pp.149-166.

- [14] Sarpkaya T., 1979. "Vortex-Induced Oscillations.", Journal of Applied Mechanics, Vol.46, pp.241~257.
- [15] Young R. D., Fowler D. R., 1978, "Mathematics of the Marine Riser.", The Energy Technology Conference and Exhibition(ASME)



