

수치해석에 의한 심해용 라이저의 와동방출 응답해석

박한일* · 조효제* · 정동호**

(99년 6월 10일 접수)

Response Analysis of Deep Ocean Risers to Vortex-Shedding by Numerical Analysis

Han-Il Park* · Hyo-Je Cho* · Dong-Ho Jung**

Key Words : Deep-Ocean Mining Riser Pipe(심해용 라이저), Vortex Shedding(와동방출),
Finite Element Method(유한요소법), Reduced Velocity(감소속도)

Abstract

A deep-ocean mining riser pipe is subjected to floating vessel motion as well as environmental forces arising from currents and waves. The dynamic analysis is carried out for a deep-ocean mining riser pipe by using a finite element method. The vortex shedding which excites risers in a direction perpendicular to the flow and induces transverse response is considered. It is demonstrated that transverse displacements due to vortex shedding is greatly increased in lock-in regions. The result of this study is compared with other results having good agreements.

1. 서 론

육상이나 천해역에 매장된 천연가스나 석유와 같은 자원의 고갈로 인하여 자원개발 대상지역이 보다 열악한 환경인 심해역으로 옮겨가고 있다. 탐사영역이 심해 영역으로 이동해 감에 따라 기존의 고정식 해양구조물은 설치비용이 상당히 증가하기 때문에 부유식이나 유연식 구조물들이 보다 선호되고 있다. 이러한 심해용 구조물에 있어서는 라이저(riser)나 인장각(tether) 등의 세장체 구조물들

이 중요한 부분을 차지한다(Fig. 1). 한편 석유개발과 더불어 심해저 망간단괴에 대한 관심이 증가하고 있다. 우리나라는 "2천년대 망간단괴 채광 기술의 확립"이라는 목표아래 국가적인 연구가 진행되고 있는데, 이러한 구조물에 있어서도 라이저의 기능이 핵심적인 역할을 하고 있다.

이러한 경향으로 석유 또는 망간단괴 생산용 라이저와 같은 세장형 구조물에 대한 연구가 더 요구되어지는데, 이 구조물들은 부재 직경에 비하여 길이가 상당히 길다. 라이저는 상부 구조물의 운동

* 종신회원, 한국해양대학교 해양과학기술대학

** 한국해양대학교 대학원

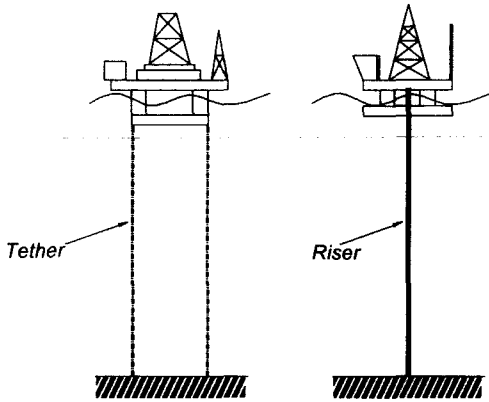


Fig. 1 Some examples of slender marine structures

에 의해 야기된 가진력과 조류와 파랑과 같은 직접적인 외력을 받게 된다. 또한 조류와 파랑과 같이 흐름 방향(in-line)으로 작용하는 힘 외에도 이에 부차적으로 와동방출(vortex shedding)이 발생하게 된다. 이것은 구조물 표면의 급격한 구배 변화로 인하여 흐름의 뒷면에서 발생하는데, 이로 인해 압력 변동이 발생하여 흐름 방향의 직각 방향 힘을 일으킨다. 라이저와 같은 세장형 구조물은 흐름방향에 대한 변위가 크게 발생하기 때문에 구조해석을 수행할 경우 일반적으로 와동방출의 영향을 고려하지 않고, 흐름 방향에 대한 응답만 고려하고 있다³⁾. 그러나, 피로해석을 수행할 경우에는 와동방출에 의한 응답이 영향을 미칠 수 있기 때문에 흐름 직각 방향 성분을 반드시 고려해서 설계해야 한다.

실제로 해상에 설치된 강성 라이저가 실제 설계 수명보다 빨리 파단된 사고사례가 있다. 그 원인은 와동방출에 의한 진동으로 응력이 증가되어서 발생한 것으로 보고되었다⁵⁾.

와동방출에 대한 중요성이 증가함에 따라서 많은 연구가 수행되고 있다. Sarpkaya는 와동방출에 의한 진동에 대하여 전반적인 사항을 기술하고 있다¹¹⁾. Foulhoux and Saubestre는 조류가 작용하는 환경에서 lock-in 현상에 대한 공학적 접근을 시도했는데, 여기서는 lock-in에 관련된 제반 사항을 설명하고 수치해석을 통하여 이를 해석하였다⁷⁾. 반면에 Angrilli and Cossalter은 파랑이 작용하는 환경

에서 연직 파일이 와동방출에 의해서 어떻게 응답하는가를 가상모드법을 사용하여 수치적 해석을 수행하였으며, 실험을 통하여 제반 사항을 검증하였다²⁾. 조류 환경과는 달리 파랑이 작용하는 환경에서는 시간에 따라서 변화하는 유속으로 인하여 와동방출의 진동수가 변화하기 때문에, 와동방출에 의한 양력을 산정하기가 상당히 어렵다. 이 외에도 많은 학자들이 해양 라이저와 인장각에 대한 와동방출의 영향을 모델실험을 통하여 연구하였다^{8,10)}.

본 연구에서는 유한요소법(Finite Element Method)을 이용하여, 와동방출에 의한 심해용 라이저의 운동 해석을 수행한다. 조류가 작용하는 환경에서 와동방출에 대한 구조해석을 하는데, 와동방출에 의해 작용하는 힘은 참고문헌⁷⁾에서 제시하는 식을 사용한다. 다양한 조류속도에 따라서 구조물의 전체적 변위형상을 조사하였으며, 와동방출의 정도를 나타내는 감소속도(V_r)에 따라서 흐름의 직각방향으로 응답이 어떻게 나타나는가를 관찰하였다. 본 연구는 결과는 참고문헌⁸⁾의 해석결과와 비교한다.

2. 와동방출(vortex shedding)에 의한 구조물의 영향

와동방출이란 표면의 구배 변화에 의해서 구조물 뒷면에서 와류가 발생하고, 이 와류가 구조물에서 떨어져 나가는 현상을 말한다. 레이놀드수가 증가하면 와류는 분리점(separation point) 뒤에서 실린더의 양 측면으로부터 비대칭적으로 떨어져 나가게 된다. 이것은 흐름 방향에 대하여 실린더 주변에 비대칭적인 압력 분포를 발생시키게 되며, 이로 인하여 흐름 방향에 대해서 직각방향으로 힘이 발생하게 되는데 이것을 양력(lift force)이라 한다. 양력의 방향은 각각의 새로운 와류가 실린더로부터 떨어져 나감에 따라 바뀌게 된다. 따라서 이와 같은 양력에 의해서 실린더는 흐름의 직각 방향으로 변동하게 된다.

연직한 실린더의 단위 길이 당 작용하는 양력은 다음과 같다.

$$f_L = \frac{1}{2} \rho C_L \cdot D_0 \cdot U^2 \quad (1)$$

여기서, C_L : 양력계수(lift coefficient)

U : 유체속도

D_0 : 구조물의 외경

그러나 와동방출은 직교축에 대하여 불규칙적으로 진동하기 때문에 양력도 불규칙적이다. 더구나 진동하는(oscillating) 흐름에서 와동방출은 약 반 주기마다 실린더의 앞과 뒤로 방향이 바뀌게 된다. 그러므로 양력에 대한 (1)식의 형태는 충분하지 않고, 양력 계수는 파의 주기마다 변해야하므로 양력의 적당한 표현은 Fourier 급수성분으로 나타내어질 수 있다. 또한 불규칙성 때문에 C_L 값도 파의 주기마다 변화하게 된다. 따라서, 진동하는 흐름에서 양력에 대한 완벽한 이론 해를 얻을 수는 없다. 그래서 와동방출의 진동수를 결정하는 Strouhal 수(S)는 일반적으로 0.2로 하고, C_L 은 흐름의 반 행정에 대해서 일정하다고 가정한다. S를 결정하고 나면 아래와 같은 관계식에 의해서 와동방출의 진동수를 구할 수 있다.

$$S = \frac{f_s \cdot D_0}{U} \quad (2)$$

여기서, S : Strouhal number

f_s : 와동방출 진동수(cycle/sec)

그러나 실험 자료에 의해서 C_L 와 S를 결정하는 방법도 있다¹²⁾.

파랑은 작용하는 시간에 따라서 속도가 계속 변화하기 때문에 와동방출의 진동수도 시간에 따라서 변화하게 된다. 따라서 파랑상태에서는 와류에 의한 힘을 산정하기가 상당히 복잡하다.

와동방출의 진동수가 구조물의 고유 진동수와 거의 일치하는 경우에는($f_s \approx f_n$) 흐름 방향성분 변위보다 흐름의 직각 방향 성분 변위가 더 크게 나타나는 lock-in (locking-on 또는 synchronization)이 발생하게 된다¹¹⁾. 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.

일반적으로 공학적인 설계에서 lock-in상태가 되었을 때 발생하는 힘은 다음과 같이 표현된다⁷⁾.

$$F_L = \frac{1}{2} \rho D_0 C_L |U - \dot{D}|^2 \sin(2\pi f_s t + \theta) \quad (3)$$

여기서, \dot{D} : 구조물의 속도

위 식에서 와동방출 진동수(f_s)는 S를 결정하고 나서 (2)식에 의해서 결정한다.

와동방출에 의해 발생하는 진동의 정도를 결정하는 중요 매개 변수로는 감소감쇠(reduced damping)와 감소속도(reduced velocity)가 있고, 이들은 다음과 같이 표현된다⁹⁾.

$$\cdot \text{감소감쇠, } k_s = 2m\delta / \rho D_0^2 \quad (4)$$

$$\cdot \text{감소속도, } V_r = V / (f_n \cdot D_0) \quad (5)$$

여기서,

k_s : 감소감쇠

m : 부가질량을 포함하는 구조물의 단위 길이 당 질량

δ : 구조감쇠의 지수감소(logarithmic decrement)

V_r : 감소속도

V : 유체와 구조물의 상대속도

이 중 감소속도는 와동방출에 의한 진동의 정도를 결정하는데 중요한 변수로 사용되어 진다. 많은 연구자들은 실험을 통하여 감소속도와 응답의 관계를 조사하였는데, 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 된다는 것을 보여주고 있다⁸⁾.

본 연구에서는 다음 장과 같은 해석 방법을 통하여 감소속도 값에 따른 응답의 형태를 살펴볼 것이다.

3. 수치해석결과 및 고찰

본 장에서는 유한요소해석을 이용하여 해양라이저의 구조해석을 수행하는데, 와동방출에 의해 발

생하는 양력을 적용시켜서 흐름의 직각방향으로 응답이 어떤 형태로 나타나는가를 살펴보았다.

심해용 라이저는 보(beam)와 유사한 기하학적 성질을 가지고 있기 때문에, 절점 당 6자유도의 1차원 선형요소를 사용하였다. 축 방향과 비틀림 변위에 대해서는 선형 함수를 사용하였고, 굽힘 변위에 대해서는 cubic 함수를 사용하였다¹⁾.

다 자유도 시스템의 운동 방정식은 Lagrange 방정식을 적용하면 다음과 같이 유도된다⁶⁾.

$$M\ddot{D} + C\dot{D} + KD = F \quad (7)$$

여기서, M : 질량행렬식

C : 구조감쇠행렬식

K : 강성행렬식

D : 절점변위행렬식

F : 외력벡터

유한요소해석에서 M 은 집중 질량법을 사용하였으며, C 는 Rayleigh 감쇠행렬을 이용하였다.

위 식에서 외력 F 는 파랑과 조류에 의한 힘으로 나타내어진다. 흐름 방향으로는 관성력과 항력이 작용하고 흐름의 직각 방향으로는 양력이 작용하게 된다. 본 연구에서는 조류가 작용하는 환경에 대해서만 해석하며, 흐름방향과 흐름의 직각방향의 상호작용(coupling)에 대해서는 고려하지 않았다. 해석 방법은 유한요소법에 기초하고 시간 적분법은 Newmark법을 사용하였다⁴⁾.

Table 1 Basic data of riser model

Pipe outside diameter, m	0.4064
Pipe inside diameter, m	0.3746
Thickness of buoyancy	0.1016
Young's modulus, N/m ²	2.1×10 ¹¹
Sea water density, kg/m ³	1025
Mud density, kg/m ³	1432.0
Total weight of 15.24m, N	39099.5
Depth, m	914.4
Top tension, N	13×10 ⁶

본 논문에서는 심해용 라이저를 대상으로 하여 수치해석을 수행하였는데, Table 1은 라이저 모델의 특성치를 나타내고 있다. 상부 끝단에서의 장력은 13×10⁶N으로 두었으며, Table 2는 사용된 모델의 고유주기와 고유 진동수, 그리고 각 모드에 대해서 lock-in이 발생하는 조류의 속도를 나타낸다. Table 3은 다양한 조류 속도에 따른 와동방출의 진동수(f_s)와 감소속도(V_r)를 나타내고 있다.

Table 2 Natural frequency and period of model and current velocity at Lock-in region(top tension= 13×10⁶N)

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

양력계수(C_L)와 Strouhal 수(S)는 참고문헌¹²⁾의 실험값을 이용하여 각각 0.18로 두었다. (2)식을 이용하여 lock-in이 발생하는 와동방출의 진동수를 계산하였으며, 감소속도는 (5)식을 사용하여 계산하였다. 와동방출에 의해 발생하는 힘은 (3)식을 적용하였다.

Table 3 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	
0.225	0.0664	5.4	Near 1st lock-in region.
0.23	0.0679	5.56	Lock-in for 1st mode.
0.235	0.06939	5.65	Near 1st lock-in region.
0.25	0.07382	6.0	
0.3	0.0886	7.2	
0.45	0.1329	10.8	Near 2nd lock-in region.
0.463	0.13671	11.1	Lock-in for 2nd mode.
0.5	0.1476	12	
0.723	0.21348	17.3	Lock-in for 3rd mode.

Fig. 2는 다양한 조류속도에 따른 전체 구조물의 변위 형상을 나타내고 있다. 조류속도가 0.23m/s일 경우는 와동방출의 진동수가 구조물의 1차 고유주기와 같아지므로, 구조물의 전체 변위 형상을 보면 구조물의 1차 고유모드형상과 유사하게 나타남을 알 수 있다. 하지만 이 형상은 구조물의 자중과 축방향으로 작용하는 장력의 영향, 그리고 수심에 따라서 선형분포하는 조류의 영향으로 구조물의 중앙점에 대하여 완전 대칭되지는 않는다. 또한 조류속도가 0.463m/s, 0.723m/s일 경우는 와동방출의 진동수가 각각 구조물의 2차와 3차 고유주기와 일치하므로 응답도 2차와 3차 고유주기 모드형상을 나타내고 있음을 알 수 있다.

다음은 다양한 조류속도를 적용시켜서 라이저의 응답특성을 감소속도에 따라서 어떻게 변화하는지를 조사하였다.

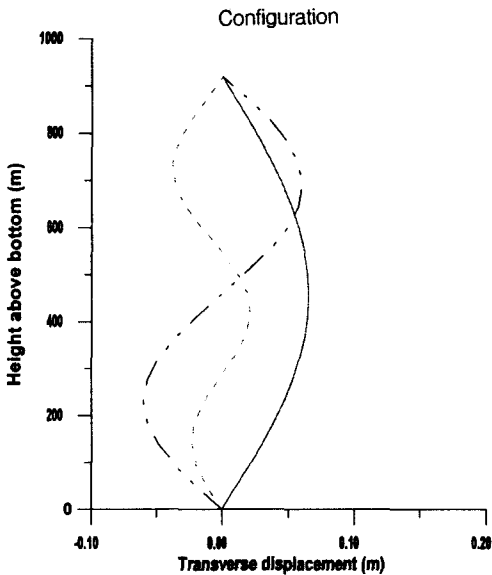


Fig. 2 The displacement configuration of riser according to current velocity

Fig. 3은 와동방출에 의해 발생하는 라이저 중간지점의 흐름 직각 방향 변위값에 대한 시간 이력 (time history)을 보여주고 있다.

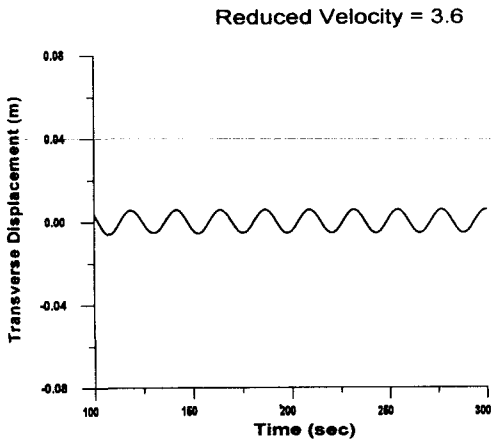
먼저 (a)에서는 조류속도인 $U_{current}=0.15$ 가 되면

서부터 약간씩 변위가 발생하고 있음을 알 수 있다. (b), (c)에서의 같이 조류속도가 증가하면서 와동방출에 의한 변위도 조금씩 증가하는데, 와동방출의 진동수가 구조물의 1차 모드 고유 진동수와 같아지는 (d)에서 흐름의 직각 방향 변위는 최대를 나타내고 있음을 볼 수 있다. 이 때는 $U_{current}=0.23$ 이고, $V_r=5.56$ 으로서 lock-in이 발생하는 영역이 된다. 그리고, (c)와 (e)와 같은 lock-in 부근에서도 변위는 크게 나타나고 있다.

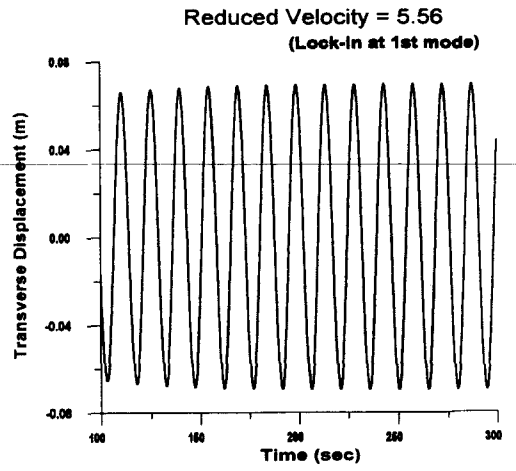
이후의 조류속도 증가에 대해 흐름의 직각 방향 변위는 감소하고 있음을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 1차 모드에 대해 감소속도가 약 6 근방에서 구조물의 응답이 최대가 된다는 것을 보여주고 있다. 조류속도가 증가하면서 흐름의 직각 변위는 감소하다가, 와동방출 진동수가 구조물의 2차 모드 고유진동수와 가까워지면서 다시 변위가 증가하고 있음을 볼 수 있다.

조류속도 $U_{current}=0.5$ 가 되면 변위는 작게 발생하지만, $U_{current}=0.723$ 이 될 때는 와동방출의 진동수가 3차 모드 고유진동수와 같아지면서 변위가 커지고 있다. 2차 모드에 비해서 3차 모드에 대한 lock-in 영역에서 변위가 더 크게 발생하고 있음을 알 수 있다. 여기서의 변위는 구조물의 중앙점에 대한 응답결과인데, Fig. 3의 (i)는 와동방출의 진동수가 구조물의 2차 고유주기와 일치하는 부분이다. Fig. 2에서 볼 수 있듯이 구조물의 중앙지점에서는 2차 고유주기로 가진 될 경우에 응답이 상당히 작게 나타난다. 따라서, 이 지점에서는 2차 가진주기보다 3차 가진주기에서 응답이 더 크다. 하지만, 구조물의 1/3지점과 2/3지점에 대한 시간 이력을 본다면, 2차 가진주기에 대한 응답이 3차 가진주기에 대한 응답보다 크게 나올 것으로 예상되어진다.

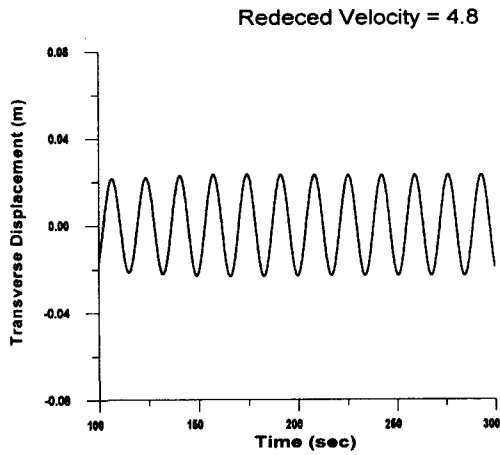
Fig. 3의 (g)와 (i)를 비교해 볼 때 변위는 (g)에서 변위가 약간 더 크게 나타나고 있지만, (i)에서 와동방출의 진동수가 (g)의 진동수에 비해서 약 2배가 되고 따라서 응답도 2배의 진동수로 발생한다. 따라서 피로(fatigue) 해석을 할 경우에는 변위와 진동수에 대해 재해석할 필요가 있다.



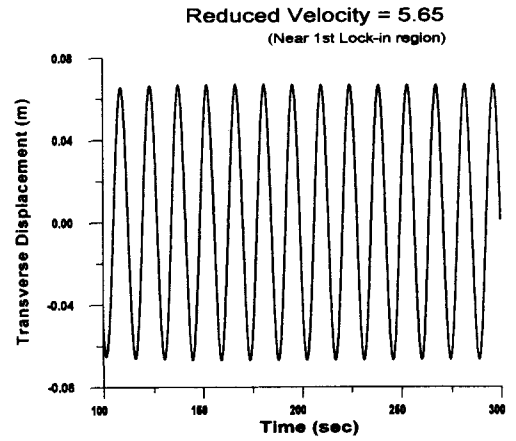
(a) $U_{current} = 0.15$ (m/sec)



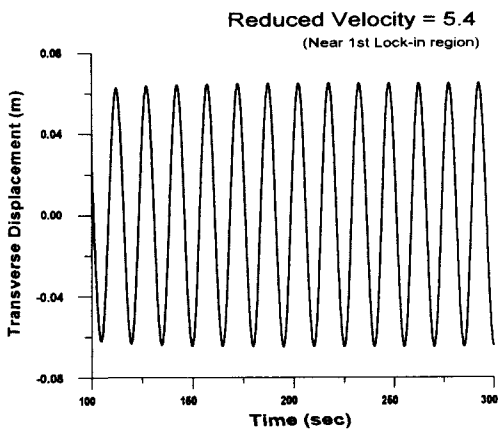
(d) $U_{current} = 0.23$ (m/sec)



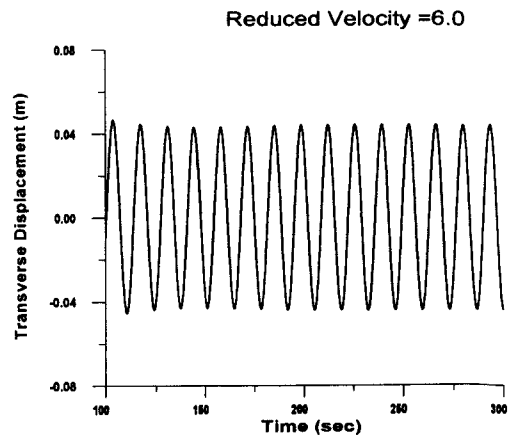
(b) $U_{current} = 0.2$ (m/sec)



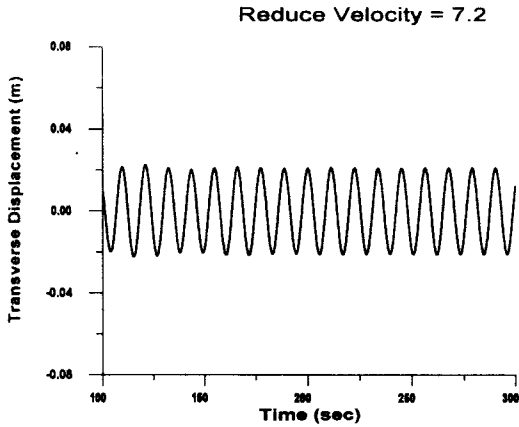
(e) $U_{current} = 0.235$ (m/sec)



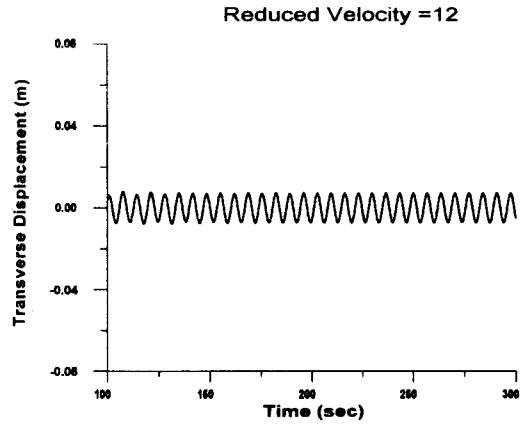
(c) $U_{current} = 0.225$ (m/sec)



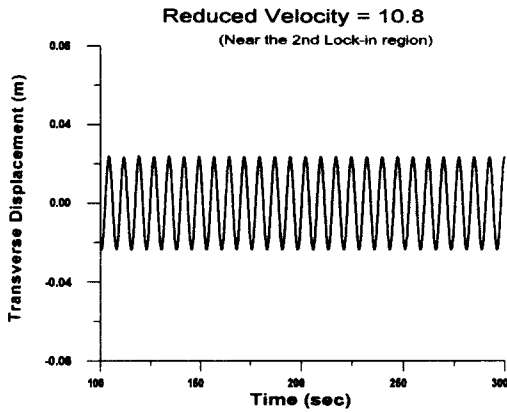
(f) $U_{current} = 0.25$ (m/sec)



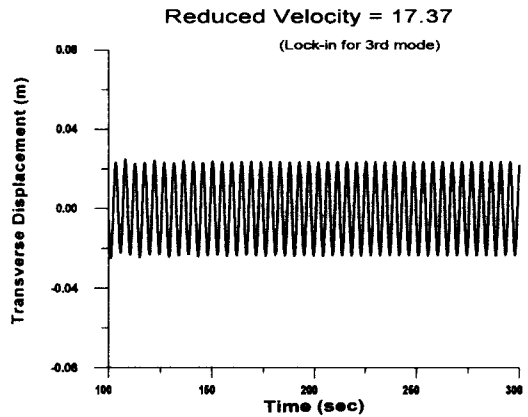
(g) $U_{current} = 0.3$ (m/sec)



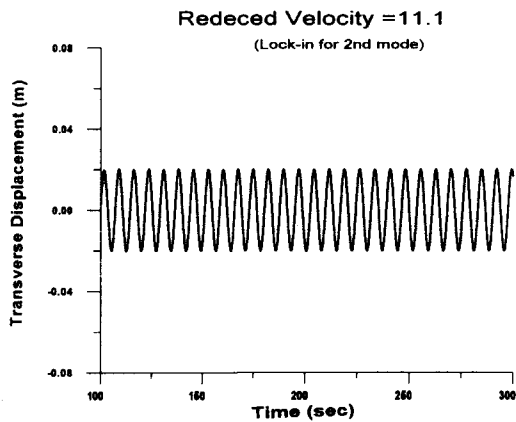
(j) $U_{current} = 0.5$ (m/sec)



(h) $U_{current} = 0.45$ (m/sec)



(k) $U_{current} = 0.723$ (m/sec)



(i) $U_{current} = 0.463$ (m/sec)

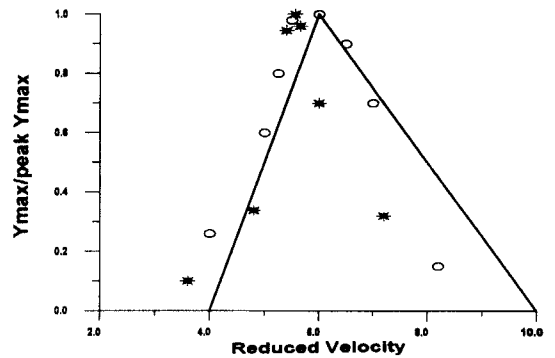


Fig. 4 Transverse oscillations of a circular cylinder. o, Experimental data; -, Triangular function used: *, this study

Fig. 4는 감소속도에 따른 응답결과를 참고문헌⁸⁾의 결과와 서로 비교하고 있다. 여기서, 실선은 참고문헌⁸⁾의 삼각함수를 이용한 이론해석 결과이고, ○는 실험결과이다. 그리고, *는 본 논문의 수치해석 결과를 나타내고 있다. Fig. 4에서 알 수 있듯이 본 연구의 해석결과가 이론적, 실험적 해석 결과와 유사하게 나타나고 있다. 고속부에서는 응답이 작게 나타나지만, 이는 본 연구의 해석결과가 2차 및 3차 모드응답까지 포함함에 기인하는 것으로 사료된다. 따라서, 와동방출에 의한 흐름 직각 방향 변위에 대한 해석은 타당하다고 판단되어진다.

4. 결 론

유한요소법을 이용하여 조류상태 심해용 라이저의 와동방출에 대한 응답해석으로부터 얻어지는 결론은 다음과 같다.

- 1) 와동방출의 진동수가 구조물의 모드별 고유진동수와 거의 일치하는 영역에서 구조물의 응답은 최고치를 나타내었다.
- 2) 와동방출에 의한 응답은 감소속도가 약 5.56에서 최대의 응답을 나타내었다.

본 연구를 통하여 조류중 와동방출에 의한 구조물의 응답을 추정할 수 있었으나, 향후 흐름방향과 연성되는 효과와 파랑에 의한 영향을 고려하는 종합적인 해석을 할 필요가 있다.

참고문헌

- 1) 임상진 외 2인, 1996, "유한 요소법 입문", 동명사
- 2) Angrilli, F. and V. Cossalter, "Transverse Oscillations of Vertical Pile in Waves", Transactions of the ASME, Vol. 104, March, 1982
- 3) API, "API Bulletin on Comparison of Marine Drilling Riser Analyses", Bul. 2J, First edition, 1977
- 4) Bathe, K. J., "Finite Element Procedures in Engineering Analysis", Prentice-Hall, Inc, New Jersey, 1982
- 5) Brooks, I. H., "A Pragmatic Approach to Vortex-induced Vibrations of a Drilling Riser", OTC 5522, 1987
- 6) Clough R. W. and J. Penzien, "Dynamics of Structures", McGraw-Hill, 1975
- 7) Foulhoux, L. and V., Saubestre, "An Engineering Approach to Characterize the Lock-in Phenomenon Generated by a Current on a Flexible Column", Proceedings of ISOPE Conference, Singapore, 1993
- 8) Griffin, O. M. and S. E., Ramberg, "Some Recent Studies of Vortex Shedding with Application to Marine Tubulars and Risers", American Society of Mechanical Engineers, 104, pp.2-13, 1982
- 9) Lyons, G. J. and M. H. Patel, "A Prediction Technique for Vortex Induced Transverse Response of Marine Risers and Tethers", Journal of Sound and Vibration, Vol. 111, Part 3, 1986
- 10) Patel, M. H. and A. S., Jesudasan, "Theory and Model Tests for the Dynamic Response of Free Hanging Risers", Journal of Sound and Vibration, Vol. 112, Part 1, 1987
- 11) Sarpkaya, T., "Vortex-Induced Oscillations", Journal of Applied Mechanics, Vol. 46, 1979
- 12) Sarpkaya, T. and M., Isaacson, "Mechanics of Wave Forces on Offshore Structures", Van Nostrand Reinhold Company, New York, 1981