

◎ 論 文

석유 시추보호관의 운동특성에 관한 실험적 고찰+

김 용 철* · 이 관 목** · 홍 사 영**
(1988년 4월 6일 접수)

An Experimental Study on the Dynamic Behavior of a Marine Riser

Yong C. Kim, Pan M. Lee and Sa Y. Hong

Key Words: Marine Riser(석유 시추보호관), Geometric Nonlinearity(기하학적 비선형성), Vortex Shedding(보오텍스), Jump Phenomena(점프 현상)

Abstract

The experimental investigations on the motion characteristics of a marine riser both in air and water were performed. The static deflections and natural frequencies of the riser in air including the effect of static offset, were obtained from the experiment. These results were compared with those of theoretical prediction by using a simple asymptotic formula. In order to investigate the nonlinear motion characteristics of the riser subject to nonlinear viscous drag and large displacement, the forced oscillation tests both in air and water were performed. In the forced oscillation tests in air, it was found that the transverse motion due to geometrical nonlinearity grows when the amplitude of in-line oscillation exceeds a certain critical value, say, order of 1-2 diameters. The planar motions of the riser in water due to vortex shedding and the geometrical nonlinearity were described. Some of these results were also compared with those of theoretical analysis, which uses a numerical perturbation technique based on the derived linear asymptotic solutions, and found to be generally in good agreement.

1. 서 론

석유 시추보호관은 일반적으로 새장비가 대단히 큰 부재로서 시추 및 채굴을 하기 위하여 사용되고 있다. 해상작업시 시추보호관의 파괴는 부분 구조물의 안정성 뿐만 아니라 전체 구조물에 미치는 영향이 대단히 크므로 시간적으로나 경제적으로 막대한 손실을 초래하게 된다. 석유 시추보호관은 시간에

따라 변화하는 하중, 즉 풍력, 파랑하중, 조류등 동유체력 및 시추선운동에 의하여 움직이고 있다. 이와같은 기진력들은 그 양상이 매우 불규칙하기 때문에 시추보호관의 운동 또한 불규칙한 특성을 나타내게 된다. 초기 설계단계에서는 흔히 정역학적인 해석에 근거를 두고 있으나 시추보호관의 고유진동수가 기진력의 주파수 영역에 가까울 때에는 반드시 동역학적 해석이 수행되어야 한다.

+ 1986년도 한국해양공학회 추계학술대회 발표(1986년 12월)

* 정희원, 영남대학교 공과대학 정밀기계과

** 한국기계연구소, 내덕선박분소

본 논문은 시추보호관의 운동특성을 파악하기 위하여 시추선 운동을 시추보호관 상단의 규칙적인 운동으로 고려하여 수행한 실험결과를 기술하며, 특히 시추보호관의 실험방법 및 실험결과에 중점을 두고자 한다. 이론해석은 미소교란법을 이용하여 구한 asymptotic solution[1]을 사용하고, 비선형 문제에 대하여 spectral expansion technique을 사용하여 계산하였다. 3차원적 대변형에 대한 비선형 운동방정식의 유도는 문헌[2]에 자세히 기술되어있으며, 본 연구에서는 이론해석법을 다루지 않았다.

시추보호관은 상하양단이 단속지지되고 상하동요 보상시스템의 인장력이 상단에 작용하는 Euler Bernoulli type beam으로 가정하여 시추보호관의 변위 및 굽힘응력을 계산하였으며, 이 때 유체역학계수의 영향을 파악하기 위하여 sensitivity analysis도 수행하였다.

2. 모 형 시 험

2.1 시추보호관의 모형제작

본 실험에서 선택된 모형은 수심 148m에 설치된 길이가 148m, 직경이 0.4m 시추보호관으로서 재원이 Table 1에 나타나 있으며 API 시추보호관[3]과 유사하고, 축척비 λ 를 40으로 결정하였다. 시추보호관의 모형시험기법은 문헌[4]에 상세된 바와 같이 수행하였으며, 실험은 서울대학교 조선공학과 수조에서 수행되었다.

시추보호관의 재질로서 문헌[5]에 기술된 방법에 의해 Hoogslagvast PVC파이프가 선택되었으며, 물리적인 성질을 검토하기 위한 실험이 수행되었다. 선택된 파이프 시편에 스트레인 게이지를 부착하고 단순 굽힘모멘트를 시편에 가하여 스트레인 게이지

의 출력을 기록하였다. 파이프 시편의 내경은 7.61mm, 외경은 10.16mm이며, 계통된 탄성계수 E 값은 $32080kgf/cm^2$ 이다. 상온에서 실내온도 변화에 따른 E 값의 상태오차는 약 5%의 변화가 있었다. 실험 및 이론계산에 사용된 탄성계수 E 값은 $33100kgf/cm^2$ 을 일률적으로 사용하였다.

Table 1에 주어진 바와 같이 시추보호관 모델의 무게는 592g이다. 선택된 PVC 파이프는 단위길이당 무게가 48.65g/m이고 전체 무게가 180g이므로 부가적인 재료를 사용하여 전체 길이를 맞추어야 한다. 본 실험에서는 모델의 내경 7.61mm속에 들어가면서 PVC파이프의 탄성계수에 영향을 미치지 않는 재료를 사용하였다. 직경 1mm인 뱀납을 직경 6.5mm인 스프링 형태로 감아 코일형으로 만들어 PVC파이프 내에 삽입하였다. 삽입되는 코일형 뱀납의 무게는 시추보호관 모델에 포함되는 리이드선, 연결자, choke & kill line등의 무게를 고려하여 결정되어야 한다. 코일형 뱀납은 시추보호관 모델 전체 길이에 균일하게 분포되었고, 뱀납의 움직임을 방지하기 위해 PVC파이프 양단은 짐작재로 고정하였다. 게이저 리이드선이 게이저와 연결되는 부위는 Fig.1의 B단면과 같이 철판으로 고정하였다.

시추보호관 모델에 사용된 스트레인 게이지는 Kyowa KFP-2-C1-65 프라스타용 120 Ω 게이저로서 게이저 인자가 2.05이었다. 모든 PVC파이프에 대해 기준선을 표시하여 방향과 위치를 조정하여 PVC파이프에 열변형을 주지 않게 짧은 시간안에 뱀납작업을 수행하였다. 게이저의 회로 구성은 문헌[5]와 같이 하였다. 굽힘응력을 계측하기 위한 디이드선은 유체에 교란을 주지 않기 위하여 모델 내부로 관통하여 상단에서 밖으로 유도되게 제작하였다. 디이드선은 충분히 가는 제품으로 방수성이 좋은 것을 사용하였다.

Table 1 Specification of the riser

Designation	Symbol	Unit	Hard PVC	Full scale
Length	L	m	3.7	148.0
Outer diameter	D_o	m	0.01	0.40
Moment of inertia		m^4	0.37×10^{-9}	
Young's modules	E	N/m^2	3.15×10^9	
EA	EA	N	1.08×10^5	6.9×10^9
EI	EI	$N \cdot m^2$	1.17	1.2×10^8
kill and choke line	d_c	m	0.0025	0.10
Weight in air	W_a	N	5.9	375×10^3
Weight in water	W_w	N	3.9	250×10^3
Total mass	M	kg	0.602	38.2×10^3

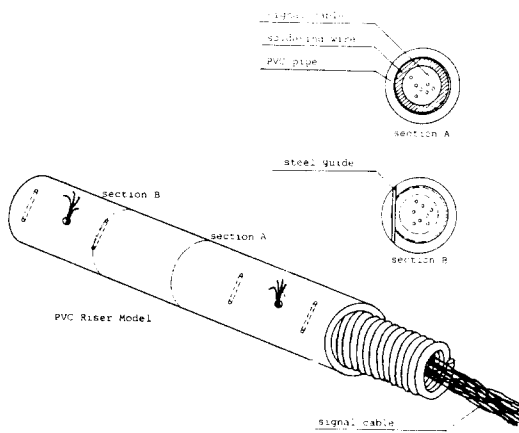


Fig. 1 Cross section of PVC riser model

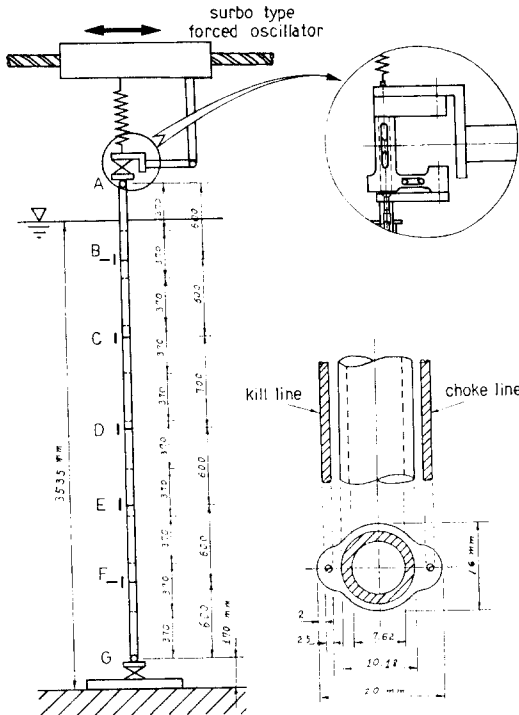


Fig. 2 Test set-up

모델의 연결은 평평한 장소에서 수행하였다. 각 PVC파이프 토막과 리이드선은 순서에 맞게 정리하고 Fig.2의 위치 G, F, D, C, B, A 순서로 PVC파이프와 리이드선을 정렬하였다. 이때 게이지의 방향을 정확히 맞추는 것이 중요하며, 각 PVC파이프의 연결이 지그재그가 되지 않도록 조심하고 최종적으로 연결부를 방수 처리한다. choke & kill line

은 시추보호관의 탄성계수에 영향을 미치지 않는 얇은 고무튜브부품로 제작하였으며 직경은 2.5mm이었다. 이 choke & kill line을 시추보호관에 연결한다. 모델 상하단의 연결 부위는 유니버설조인트로 연결하여 힘은 전달되고 모멘트는 전달되지 않는 구조로 제작하였다. 완성된 시추보호관 모델은 flexible한 부재이므로 다루는 데 특별한 주의할 필요로 한다. 작업시 시추보호관 모델의 보호및 운반의 편리성을 위해 목재 보호대 및 철재파이프를 별도로 제작하였다.

2.2 실험장치

(1) 3방향 힘 변환기

시추보호관 양단에 작용하는 인장력 또는 압축력은 임의의 방향을 가지므로 이힘을 측정하기 위해서는 3방향의 힘을 한 지점에서 동시에 얻을 수 있는 방법이 필요하다. Fig.3과 같은 형태의 탄성체 힘변환기 모형을 가정하여, I부분, II부분 및 III부분에서 P의 x, y, z성분 P_x, P_y, P_z 를 독립적으로 선별하여 얻을 수 있는 방법을 고려하였고, 게이지가 접촉되는 부위를 박막으로 만들고 힘 변환기에 가해지는 응력을 평면응력으로 해석하였다. Fig.4는 3방향 힘 변환기의 결과로서 각 축의 이득이 선형적인 것을 보인다. 힘이 x방향으로 가해졌을 때 y방향, z방향의 출력에 거의 영향을 미치지 않는 좋은 독립성을 보였다.

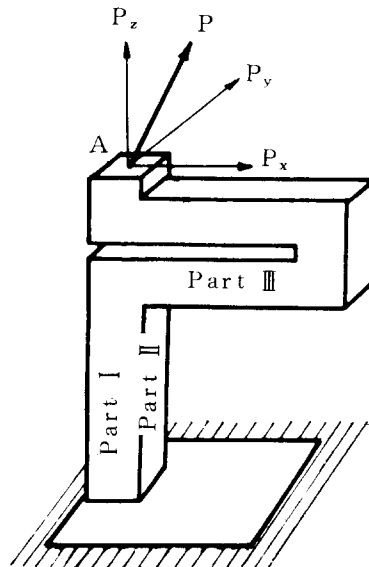


Fig. 3 3-component force transducer

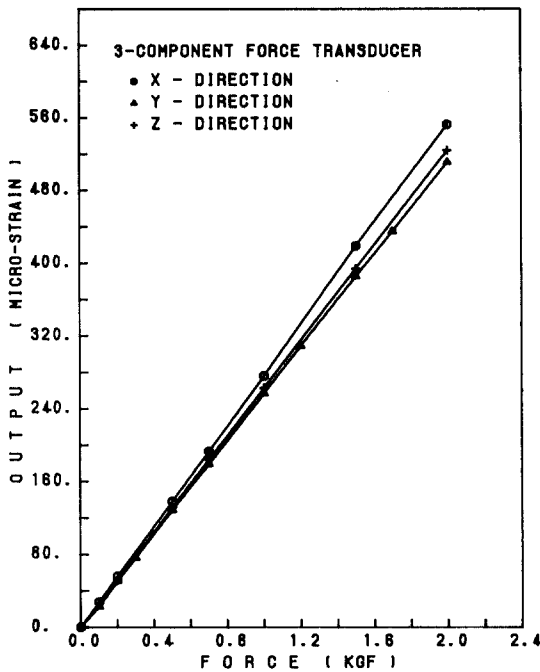


Fig. 4 Results of 3-component force transducer

(2) 강제진동기

본 실험에 사용된 강제 조화 진동기는 시추보호관 상단의 운동을 시뮬레이션하는 장치로서 불규칙 해상상태에서의 불규칙한 운동도 시뮬레이션할 수 있

게 제작되었다. 이것은 직류 서어보 모터의 회전운동을 ball screw와 ball jack을 통하여 소형전차의 왕복운동으로 바꾸는 장치이다. ball screw의 한쪽 끝단은 서어보 모터가 연결되어 있으며 다른 끝단에는 전위차계 장치 연결되어 소형전차의 왕복변위를 기록한다.

강제진동기의 제어기는 function generator의 신호를 받아 PWM(pulse width modulation) 방식을 이용하며, 출력 전류량과 방향을 조정하여 서어보 모터를 구동한다. 서어보 모터의 회전수를 폐회로 개환(closed loop) 하여 전류량을 제어하며, 전위차계 장치에서 변위를 기록하여 주어진 신호를 제어한다.

시추보호관 상단의 운동으로 인한 시추보호관의 인장력의 변화를 최소화하기 위하여 소형전차와 시추보호관 연결자 사이에 약한 스프링을 연결하였다. 또한 가이드 장치를 설치하여, 소형전차와 시추보호관 상단이 수평방향으로는 구속되고 수직방향으로는 운동이 허용되도록 하였다.

(3) 장비구성

시추보호관 실험의 데이터 취득시스템은 Fig. 5와 같이 구성되었다. 시추보호관의 굽힘응력을 기록하는 7채널은 각각 Kyowa strain amplifier DPM-G로 연결되고, Kyowa low pass filter LF-C에서 10Hz이

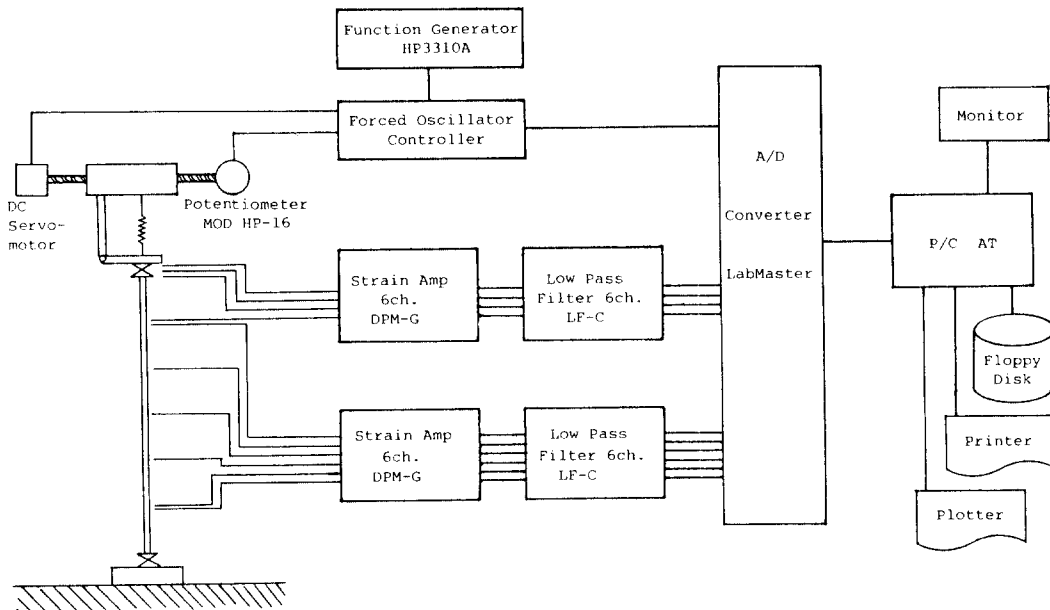


Fig. 5 Block diagram of data acquisition system

상을 cut-off시켰다. 시추보호관 상하단의 3방향 힘 변환기중 상단의 3방향 힘 성분은 계속하고, 하단의 힘은 계속하지 않았다. 강제 조화 진동기의 입력으로 HP3310A function generator를 이용하였으며, 진폭은 이의 이득을 조절함으로써 조정하였다. 상단 변위를 측정하는 전위차계 장치의 출력 전압은 강제 조화 진동기 조절기에 내장된 증폭기를 통하여 얻어진다.

이들 11채널의 출력은 LabMaster의 A/D 변환기를 통하여 P/C에 입력되었다. 데이터 취득 시간간격은 각 채널마다 0.05초로 정하였으며, 취득 데이터수는 FFT해석을 위하여 1024개 또는 512개로 하였다. 얻어진 데이터는 즉시 자료처리되어 결과를 검토할 수 있었으며 또한 플로피 디스크에 저장하였다.

2.3 모형설치

(1) 공기중 모형 설치

—모형 설치 장소선정

실험실의 공기의 유동, 즉, 바람이 부는 경우 모형이 흔들리므로 이로 인한 교란이 출력에 직접적인 영향을 미친다. 또한 시추보호관의 재질이 PVC이고 굽힘응력을 스트레인 게이지로 계속하였으므로 온도의 변화에 의한 실험오차가 존재한다. 실험실 전체의 온도가 변하는 경우에는 full bridge로 구성된 측정 회로에서 보상시킬 수 있으나 실험실의 국부적인 온도변화(모델에 햇빛이 닿는 경우 또는 전열기에 의한 온도)는 직접 출력에 영향을 미친다. 따라서 공기가 밀폐되고 햇빛등이 차단된 장소에 모형을 설치해야 한다.

—강제 조화진동기 설치

강제 조화진동기의 서어보 모터에 의한 진동 및 소형전차의 이동시 발생하는 진동이 모델에 전달되는 것을 방지하기 위해 방진고무를 진동기의 베이스에 설치하였으며, ball screw에 윤활유를 주유하여 상단의 운동을 원활하게 한다.

—힘 변환기 및 베이스 설치

강제조화진동기의 연결자에 3방향 힘변환기를 방향과 기울기를 고려하여 설치하였고, 시추보호관 모델이 수직으로 설치되게 하기 위하여 지정위치에 추를 매달아 하단의 중심을 잡았다. 베이스에 또 다른 힘변환기를 연결하고 연결부가 추에 일치하도록 위치를 잡아 베이스의 방향을 고정시켰으며, 베이스 높이는 연결부분의 길이등을 고려하여 결정하였다.

—시추보호관 모델 설치

상단의 힘 변환기에 유니버설 조인트로 모델을 고정시키던 자중에 의해 강제 조화진동기에 연결된 스프링이 늘어난다. 이때 상단의 영점을 조정한다. 시추보호관 하단의 유니버설 조인트와 3방향 힘변환기를 연결하고 상단의 스프링을 조정하여 상단 인장력을 구현하면 공기중 모델 설치가 완성된다.

(2) 수중 모형 설치

—모형 설치 장소 선정

서울대학교 수조의 수심은 위치에 따라 5~10cm 정도의 차이가 있었다. 시추보호관 모델이 설치될 위치가 결정되면 그곳 수심의 정밀한 높이를 측정하는 것이 중요하다. 시추보호관의 총 설치길이를 계산하고, 강제 조화진동기의 베이스를 예인전차의 어떤 높이에 설치해야 할 것인가를 계산하여 필요하면 보조 프레임 제작해야 한다. 본 실험에서는 보조 프레임을 제작하여 수중실험 조건을 구현하였다.

—강제 조화진동기 설치

제작된 보조 프레임을 전차의 레일에 설치하고 수평상태를 점검한 후 크랩프로 고정시킨다. 이 프레임에 강제 조화진동기의 설치는 공기중에서와 같이 한다.

—힘 변환기 및 베이스 설치

공기중과 같은 방법으로 상단 힘 변환기를 설치하고 추를 시추보호관 연결부에 연결하여 수중으로 내려 베이스를 설치한다. 잠수부가 베이스를 들고 물에 들어가 정해진 위치에 놓는다.

—시추보호관 모델 설치

시추보호관을 수중에 넣고 상단을 공기중 설치 방법과 같이 설치하며 하단의 고정은 잠수부가 한다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 공기중 실험결과 및 고찰

공기중 시추보호관 실험은 수중실험을 위한 전조 실험으로서 많은 유용한 결과를 얻을 수 있다. Fig. 2와 같이 설치된 상단인장력이 407kN인 시추보호관에 대하여 자유운동감시 시험을 수행한 결과 기본고유진동수가 0.63rad/s이었다. 같은 모델에 대해 상단 인장력이 775kN일 때 기본고유진동수는 0.99rad/s이었다. 이론계산에 의해 얻어진 기본 고유진동수는 407kN, 775kN 각각에 대하여 0.66rad/s, 1.05rad/s

이다. 이때 이론계산치와 실험치의 상대오차가 크다면 이론계산의 입력자료 또는 실험치의 전압환이득 등을 검토하고 최종적으로 모형제작 설치 조건을 다시 검토해야 한다. 참고로 MARIN & KIMM[6]의 시추보호관의 고유진동수는 407kN, 775kN에 대하여 각각 0.63rad/s, 1.01rad/s로 공기중 실험조건은 본 연구의 시추보호관 조건과 거의 일치한다고 볼 수 있다. 이론계산치와 실험치의 고유진동수가 Table 2에 정리되어 있으며, 3차 고유진동수까지 실험치와 이론치가 5%이내의 상대오차를 보인다.

시추보호관 상단의 정적 오프셋에 의한 고유진동수 변화를 관찰하기 위한 실험이 수행되었다. 정적 변형이 4.56m일 때는 변화가 없고 정적 변형이 8.0m일 때 2%이내의 고유진동수 변화가 있었다. 이때의 오프셋 비율(시추보호관 길이에 대한 정적 변형의 비)은 5.5%로서 정적 변형이 고유진동수에 미치는 영향은 거의 무시할 수 있다. 정적 변형에 의한 시추보호관의 변위 및 굽힘응력의 분포에 대하여 실험결과와 이론결과를 Fig. 6, Fig. 7에 비교하였다. 정적 변형에 의한 변위는 이론계산과 실험결과가 거의 일치하며, 실험결과에서 약간의 오차는 시추보호관의 직선성이 완전하지 못한 이유이다. 동적 변형에 의한

Table 2 The natural frequencies of the riser in air (Unit : rad/s)

T_{top}	Experiment		Asymptotic solution	
	407kN	775kN	407kN	775kN
w_1	0.63	0.99	0.66	1.05
w_2	1.62	2.44	1.69	2.34
w_3	3.15	3.86	3.22	4.02

굽힘응력은 이론계산 결과가 실험결과보다 큰 값을 보이지만, 굽힘응력의 분포경향은 거의 일치한다. 이론계산 결과는 실험결과보다 대략 30% 정도 크게 평가되고 있다.

시추보호관은 매우 긴 flexible한 부재이므로 기진주파수가 공진주파수 영역에 속할 때 비선형적인 거동을 예상할 수 있다. 공기중 시추보호관의 상단인 장력이 407kN인 조건에 대해 시추보호관의 F점에서 기진방향 F와 기진방향에 대한 횡방향 FT의 굽힘응력을 관찰하였다. 실험조건은 강제 조화진동 진폭을 0.3m, 0.6m, 1.0m, 1.5m로 선택하고, 각 경우에 대해 기진주파수 영역을 0.4rad/s~1.1rad/s범위로 정

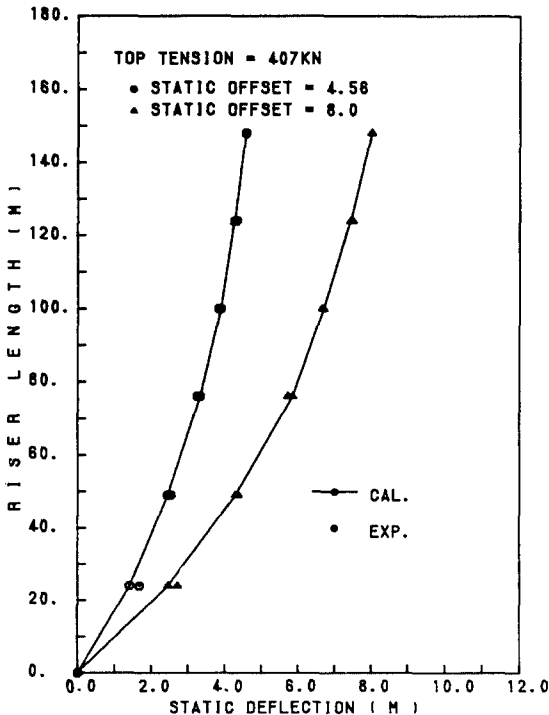


Fig. 6 Static deflection of the riser in air ($T_{top}=407kN$)

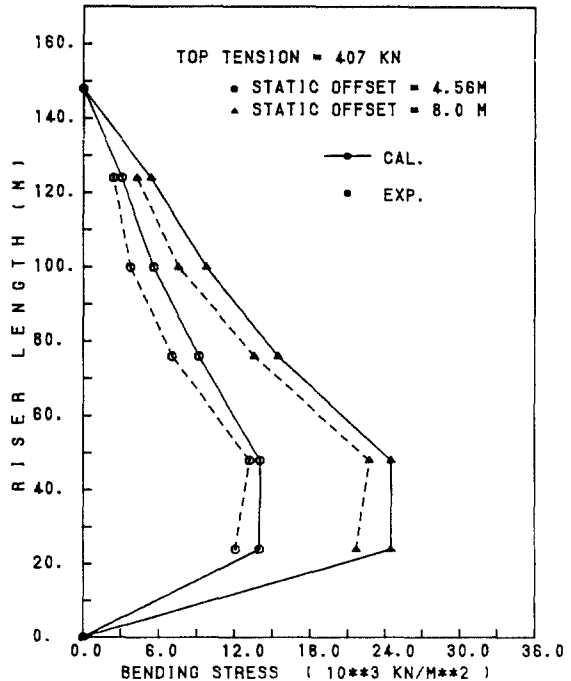


Fig. 7 Static bending stress of the riser in air ($T_{top}=407kN$)

하였다. Fig. 8F~ig. 11은 기진방향을 x축에, 횡방향을 y축에 대하여 굽힘응력의 변화를 평면적으로 기록한 것이다. Fig. 12~Fig. 13은 굽힘응력의 변화를 주파수영역에서 나타낸 것이다.

상단진폭이 0.3m(직경의 0.75배)인 경우, Fig. 8에서 보는 바와 같이 기진방향의 굽힘응력은 기진주파수가 증가하여 0.623rad/s (고유진동수)가 될 때까지는 서서히 증가한다. 기진주파수가 공진주파수보다 0.65rad/s일 때 최대값을 보이다가 0.65-0.7 rad/s일 때는 jump phenomena를 보이며 굽힘응력이 작게 나타나고 있다. 이때 횡방향의 굽힘응력은 기진주파수에 무관하게 거의 영을 지시하고 있다.

상단진폭이 0.6m(직경의 1.5배)인 경우, Fig. 9에서 보는 바와 같이 기진방향의 굽힘응력은 전술한 바와 같은 현상을 보이며, 점프현상이 일어나는 주파수가 0.7~0.75rad/s에서 일어나고 있다. 한편 횡방향의 굽힘응력은 진폭이 작은 경우와는 다른 현상을 보인다. 기진진폭이 작을 때는 횡방향 굽힘응력은 거의 영을 지시하나, 기진진폭이 어떤 임계치(약 직경의 1-2배)를 넘어서면서 급격히 증가하고 있다 [Fig. 13 참고]. 이러한 횡방향의 굽힘응력이 급격히 증가하는 현상은 기하학적 불안정성에 기인하는 것

으로 이 때의 굽힘응력의 평면모드는 Fig. 9와 같이 원형을 보인다. 여기서 기진주파수를 조금만 더 올리면 점프현상에 의해 기진방향 굽힘응력이 급격히 감소하면서 횡방향 굽힘응력은 거의 영으로 된다.

상단진폭이 1.0m (직경의 2.5배), 1.5m (직경의 3.75배)일 경우에도 0.6m일 경우와 같은 현상을 보이며, 이때 점프현상이 일어나는 주파수는 점점 증가한다[Fig. 12, 13 참고]. 기진방향 굽힘응력의 주파수 성분은 주로 기진주파수이며 3차 주파수 성분이 포함되어 있는 것을 FFT결과로 알 수 있다.

상기한 현상은 기하학적 비선형성에 의하여 일어나며 시추보호관의 경우 hardening type이고 기진진폭이 어떤 임계치(직경의 1-2배)를 넘어설 때 기하학적 불안정으로 인하여 횡방향 변위가 급격히 증가하는 것이다. 이에 대한 이론해석은 Kim[1,2]이 연구한 바 있으며 본 연구에서는 포함시키지 않았다.

3.2 수중 실험결과 및 고찰

공기중 시추보호관 실험과 마찬가지로 가장 먼저 고유진동수를 검토해야 한다. 본 연구에서는 고유진동수를 찾는 방법으로 충격시험법과 frequency sweep법을 사용하였다. 유체속의 시추보호관은 매

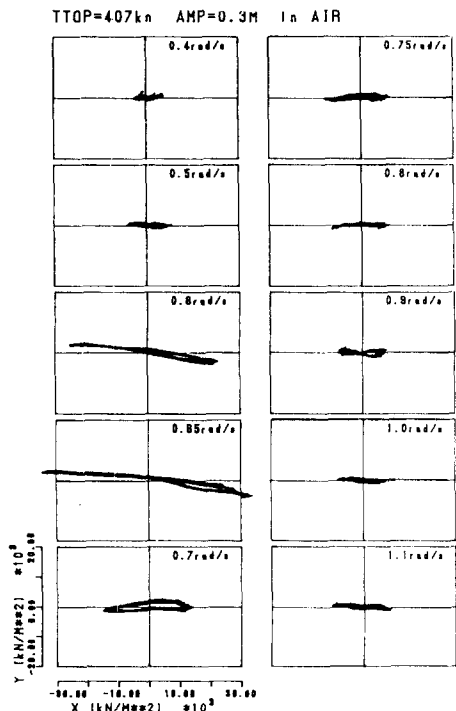


Fig. 8 Time histories of bending stress in air (Amp=0.3m)

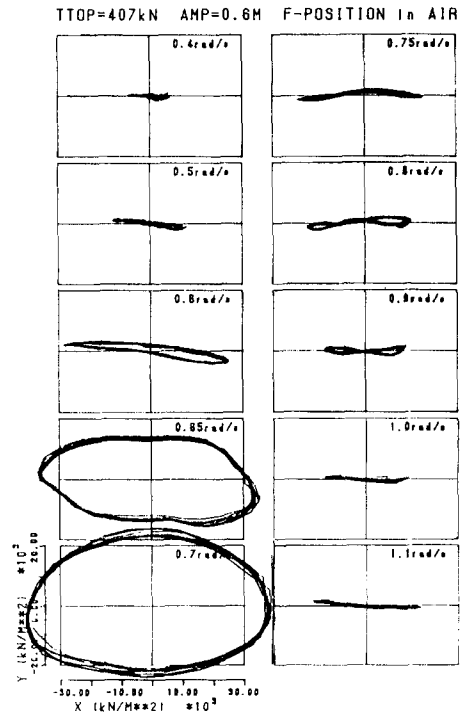


Fig. 9 Time histories of bending stress in air (Amp=0.6m)

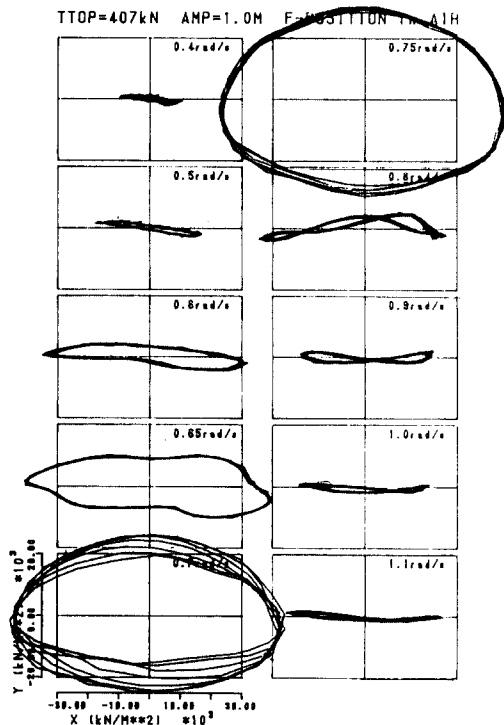


Fig. 10 Time histories of bending stress in air (Amp = 1.0m)

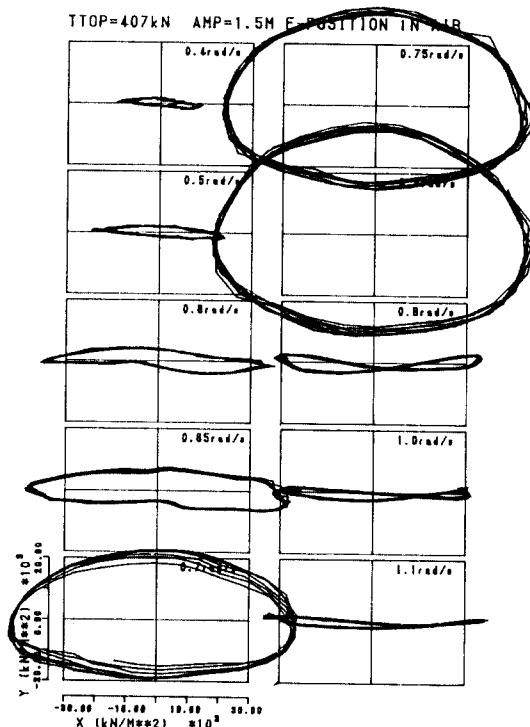


Fig. 11 Time histories of bending stress in air (Amp = 1.5m)

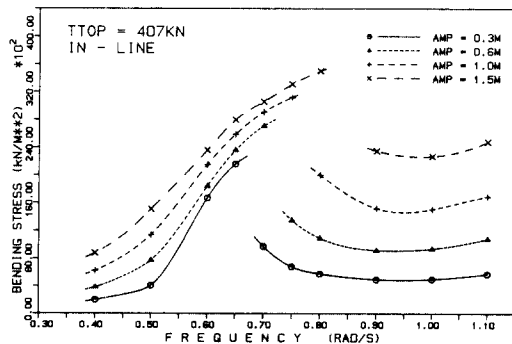


Fig. 12 In-line bending stresses of the riser in air ($T_{top} = 407kN$)

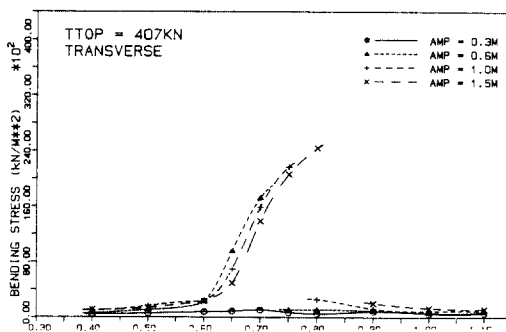


Fig. 13 Transverse bending stresses of the riser in air ($T_{top} = 407kN$)

우 큰 점성저항을 받으므로, 충격시험을 수행하였을 때 짧은 시간내에 충격이 흡수되어 정확한 결과를 얻기가 어려웠다. 또한 frequency sweep법도 정확한 공진주파수를 지정하기 보다는 대략적인 공진주파수 영역을 보여주었다. 두가지 방법을 통하여 결정된 공진주파수 영역은 Table 3에 주어져 있다. 수중 실험조건에서 수심이 MARIN & KIMM과 다르므로 결과를 문헌⁶⁾과 비교하지 않았다.

Table 3 The fundamental natural frequency of the riser in water(Unit : rad/s)

Top tension	Experiment	Asymptotic solution
370kN	0.45 ~ 0.6	0.482
630kN	0.7 ~ 0.8	0.689
890kN	0.8 ~ 0.95	0.845

수중 시추보호관의 이론해석을 수행하기 위하여 유체역학계수, 즉, 관성계수 C_m , 항력계수 C_d 값을 추정해야 한다. 타당성 있는 유체역학 계수를 얻기 위하여 많은 연구가 수행되어 왔으며 Sarpkaya⁷⁾가 이를 정리하여 기술을 바가 있다. 이러한 자료들은 대부분 균일한 유속이 있거나 진동하는 유체가 있을 때의 정지된 강제 실린더, 또는 유속이 있는 상태에서 진동하는 강제 실린더에 대한 결과이다. 본 실험과 같이 길이가 매우 길고 flexible한 구조물에 대한 연구결과는 매우 적은 상황이다. Vandiver⁸⁾는 균일 정상 유속상태의 긴 flexible실린더에 대한 실험을 수행하여 항력계수를 계산하는 경험식을 제시한 바 있다. Moe와 Overvik⁹⁾는 시추보호관군(multiple riser)에 대하여 실험을 수행하여 유속에 의한 시추보호관군의 운동에 대하여 연구하였지만, 이 시추보호관군은 강체이었고 길이가 짧았다.

본 연구의 실린더는 유속이 없는 정수중에서 하단을 고정하고 상단을 강제 진동시키는 조건이므로 앞서 기술한 여러 조건과는 다르다. 본 연구의 목적은 정확한 유체역학계수를 찾는 것이 아니고, 긴 flexible 시추보호관의 동적특성을 확인하며 이론계산과 비교하는 것이므로, 실험결과와 고유진동수를 이용

하여 C_m 값을 추정하고 C_d 값을 정하였다. 이론계산의 유효 직경을 0.412m로 정의⁸⁾하고 실험결과로부터 관성계수 C_m 을 2.2로, 항력계수 C_d 를 2.8로 결정하였다⁶⁾. flexible한 실린더의 항력계수는 강제파일인 경우보다 대략 2.5배 정도 크게 항력계수를 정하기도 한다⁹⁾. 결정된 계수를 사용한 이론계산 고유진동수가 Table 3에 나타나 있다. 상단인장력 370kN, 기진주파수 0.4rad/s, 행정 1.0m인 실험의 굽힘응력과 C_m 및 C_d 값 변화에 따른 이론계산의 굽힘응력 변화를 Fig. 14, Fig. 15에 나타내었다. 여기서 이론계산 결과는 2차원 모델에 대한 것으로서 횡방향 양력을 포함하지 않았으며, 시추보호관 길이 전체에 대해 같은 유체역학 계수를 갖는 것으로 계산한 것이다.

수중 시추보호관의 강제조화진동시험을 수행하였다. 실험결과중 상단인장력이 370kN, 기진주파수가 0.6rad/s이고, 행정이 1m일 때 각 제추부위에서의 굽힘응력 신호가 Fig. 16에 나타나 있다. 정수중에서 수행된 실험의 결과를 통계처리하여 얻은 굽힘응력과 이론계산의 굽힘응력을 rms 값으로 나타내었다. Fig. 17-Fig. 20은 각 기진주파수에서 상단인장력의 변화에 따른 결과로 이론결과와 비교되어 있고, Fig.

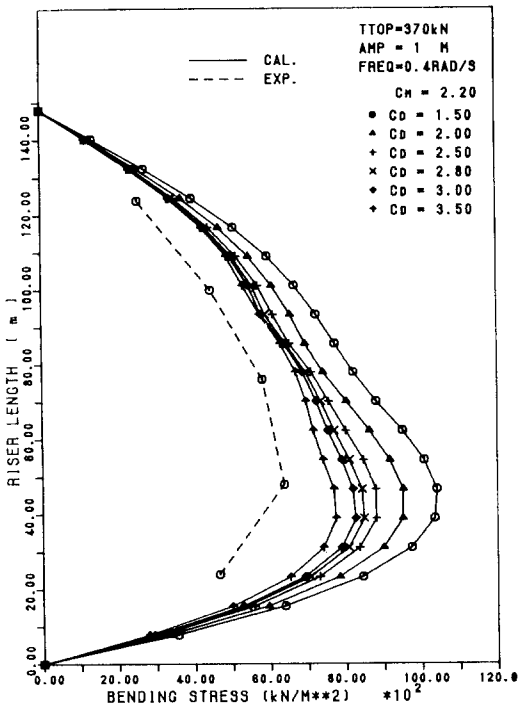


Fig. 14 Bending stress envelopes due to the variation of C_d in water (T_{top} = 370kN)

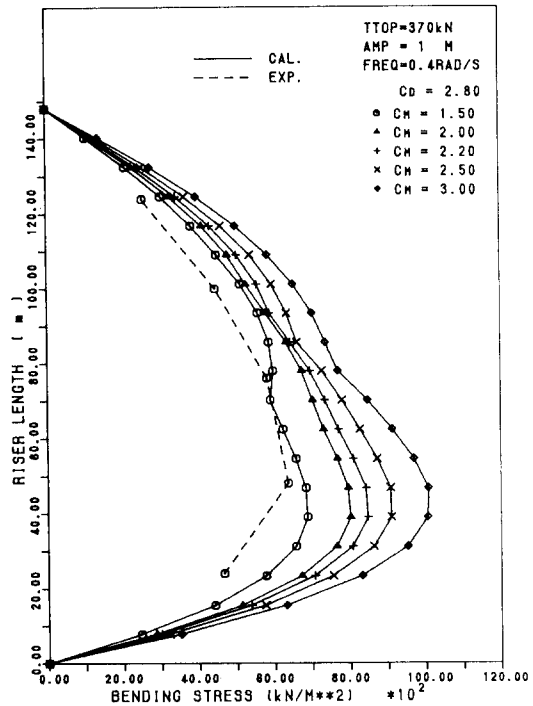


Fig. 15 Bending stress envelopes due to the variation of c_m in water (T_{top} = 370kN)

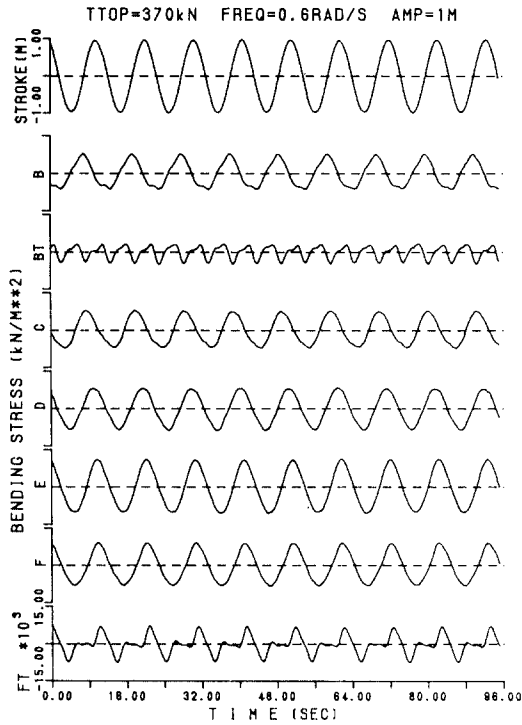


Fig. 16 Time histories of bending stresses in water ($T_{top}=370kN$, $\omega=0.6rad/s$, Amp=1.0m)

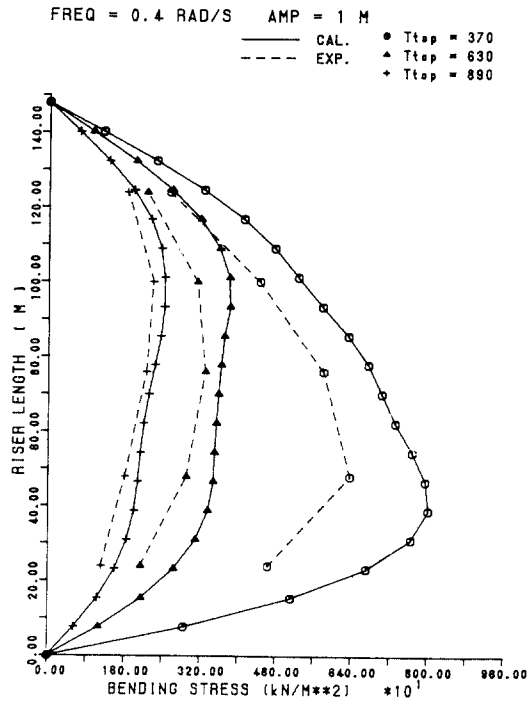


Fig. 17 Bending stress envelopes due to variation of T_{top} ($\omega=0.4rad/s$)

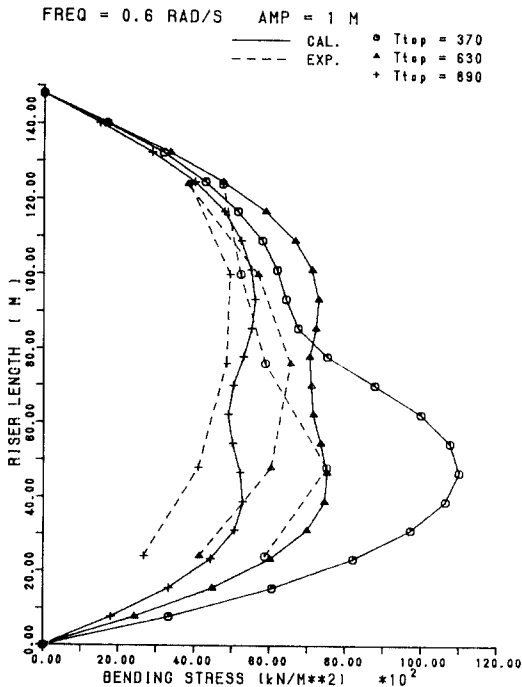


Fig. 18 Bending stress envelopes due to variation of T_{top} ($\omega=0.6rad/s$)

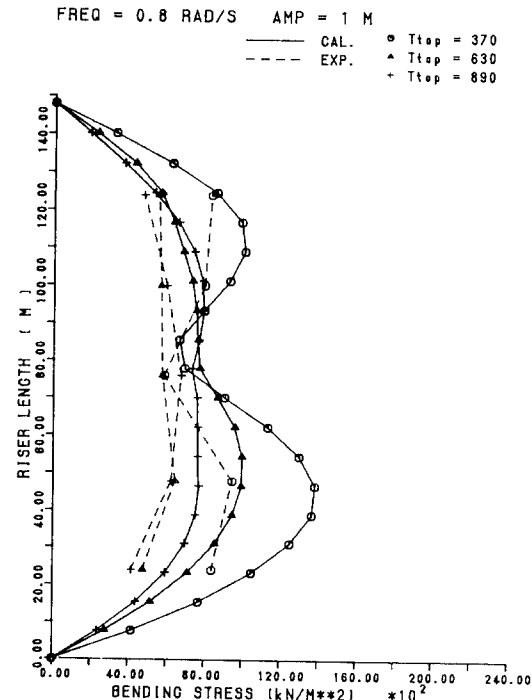


Fig. 19 Bending stress envelopes due to variation of T_{top} ($\omega=0.8rad/s$)

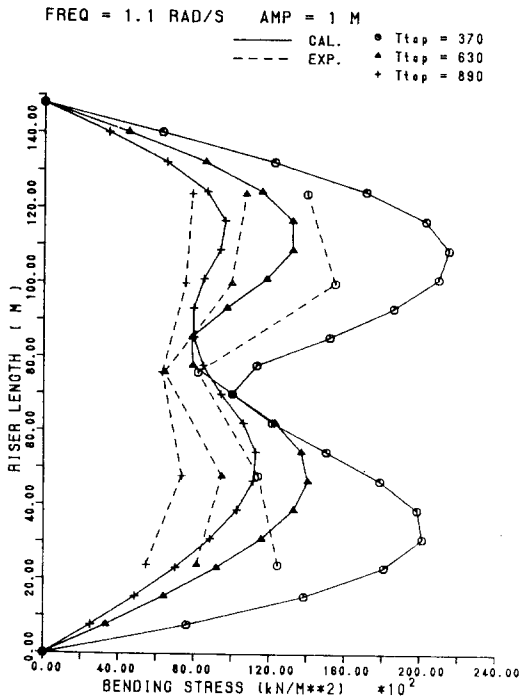


Fig. 20 Bending stress envelopes due to variation of T_{top} ($\omega = 1.1 rad/s$)

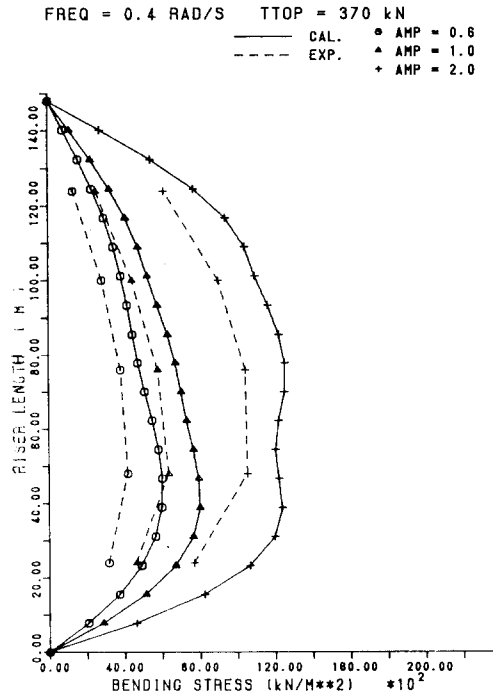


Fig. 21 Bending stress envelopes due to variation of amplitude ($\omega = 0.4 rad/s$)

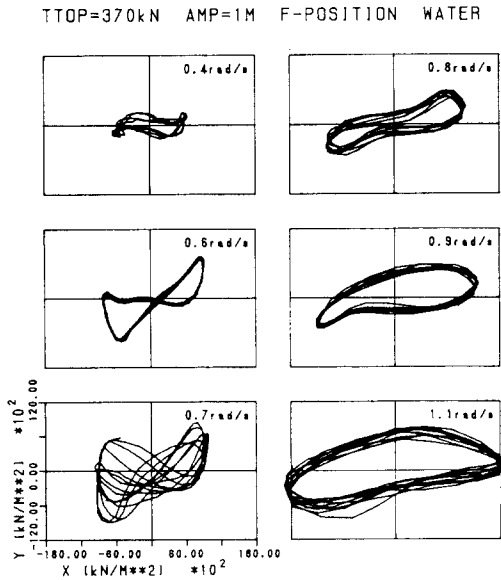


Fig. 22 Bending stress at position F ($T_{top} = 370kN$, Amp = 1.0m)

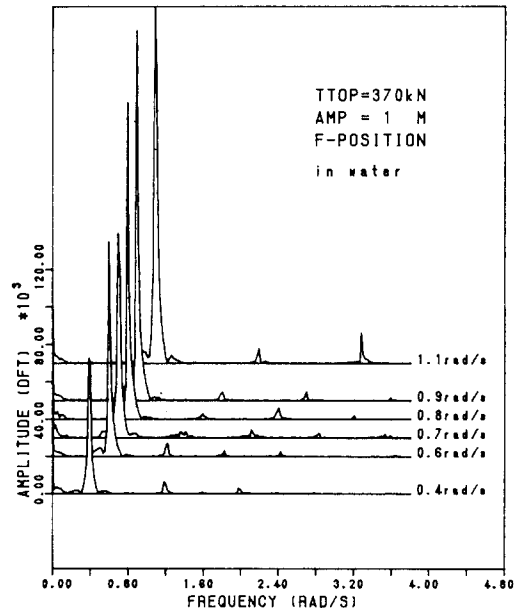


Fig. 23 Frequency response map at position F ($T_{top} = 1.0m$)

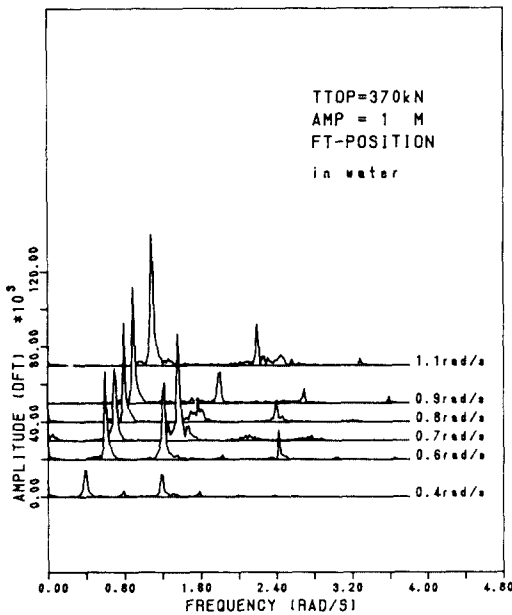


Fig. 24 Frequency response map at position FT ($T_{top}=370kN$, Amp=1.0m)

21은 상단인장력 370kN의 기진주파수에서 기진폭의 변화에 따른 결과이다. Fig. 22는 시추보호관의 F점에 대해 기진방향을 x축으로 횡방향을 y축으로 놓고 굽힘응력을 기록하여 각 실험조건에서의 운동형태를 예측할 수 있는 그림이다. 또한 Fig. 23-Fig. 24는 시추보호관의 F점에 대하여 기진방향 및 횡방향의 frequency response map을 도시한 결과이다.

시추보호관 길이방향에 따른 굽힘응력의 분포경향은 대부분의 계층위치에서 일치하고 있으며, B점의 분포경향 중 몇몇 조건에서 약간의 차이를 보이고 있다. 이것은 B점이 수면 근방의 계층지점으로서 유체의 자유표면 효과에 의한 영향이라고 사료된다, Fig. 21에서 실험결과와 이론결과의 굽힘응력은 상단 기진진폭의 변화에 대해 선형적인 변화를 보이고 있다. 비교결과로부터 이론계산치는 실험결과의 굽힘응력보다 크게 나타났다. 이들의 상대적인 차이는 최대 30% 정도의 오차를 보이고 있으며, 오차의 주된 원인은 다음과 같이 판단된다.

- 1) 실험에서 횡방향의 운동이 관찰되었으나 이론계산은 횡방향 운동을 고려하지 않고 기진방향의 운동을 2차원 해석한 것으로서, 횡방향 운동이 기진방향의 운동에너지를 분산시킨 효과
- 2) 유체의 점성 감쇠력에 비하여 구조물의 자체 감쇠력이 작다고 가정하여 고려하지 않은 영향

3) 유체 점성계수를 작게 추정

정도 높은 이론 계산을 위해서는 3차원 해석을 수행할 필요가 있으나 본 연구에서는 포함시키지 않았다. flexible 한 시추보호관의 유체력 계수에 관한 연구가 계속 진행되어 정확한 유체력 계수의 특성을 얻을 필요가 있다.

이러한 결과로부터 시추보호관의 2차원 해석은 실험결과보다 큰 값을 보이므로 설계의 관점에서 안전한 설계지침을 제시할 수 있고 유용하게 쓰일 것이라 기대된다.

Fig. 22는 시추보호관의 운동형태를 굽힘응력의 변화로 보여주며 Fig. 24는 굽힘응력의 주파수성분을 보여준다. 상단 인장력이 370kN이고 기진 진폭이 0.6m (직경의 1.5배) 일 때 시추보호관의 운동은 0.4rad/s에서 거의 직선운동을 하며, 0.6rad/s 기진 주파수에서 시추보호관은 8차운동을 한다. 이것은 vortex shedding이 일어나 문헌[10]에 설명된 바와 같이 횡방향에 기진주파수의 2배 주파수성분이 나타나고 있으며, 이때의 기진주파수는 고유진동수 부근의 값이다. 기진주파수가 높아짐에 따라 vortex strength는 약해지며 시추보호관의 운동이 타원형으로 진행되기 시작하였다. 기진주파수 1.1rad/s에서 2배 주파수성분이 다시 나타나나 기진주파수 성분이 지배적이므로 운동형태는 타원형을 유지한다.

상단 인장력이 370kN이고 기진진폭이 1m(직경의 2.5배)일 때 전술한 바와 유사한 현상을 보이며, 횡방향의 운동성분이 0.6m 일 때보다 커졌고, vortex strength는 0.6-0.7rad/s 및 1.1rad/s에서 크게 나타나고 있다. 상단 인장력이 370kN이고 기진진폭이 2m(직경의 5.0배) 일 때는 위의 현상과 함께 기진방향의 주파수성분은 주로 기진주파수와 3차 주파수성분이 상당히 포함되어 있는 것을 볼 수 있다. 기진진폭이 증가하면서 기하학적 비선형성이 크게 나타나기 시작하여 공기중 시추보호관 실험에서 고찰한 바와 같은 횡방향 운동을 유발하는 역할을 한다. 한편 굽힘응력이 x축에 대해 비대칭인 것은 시추보호관의 제작상 문제로 시추보호관의 연결상태와 choke & kill line의 비대칭에 의한 결과라 사료된다.

이상과 같은 실험결과로부터 기진진폭이 클 경우 vortex shedding에 의한 시추보호관 운동과 기하학적 비선형성에 의한 운동이 상호 연관된 운동형태를 갖는다. 이러한 결과는 흔히 유체계수 추정만을 위한 실험 또는 구조물 자체의 운동 실험과는 달리 유체와 구조물의 상호관계(fluid-structure interaction)

를 규명하는데 도움이 될 것이다.

4. 결 론

본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 시추보호관의 모형시험이 국내 최초로 수행되었으며, 이를 위한 모형의 재질선택, 실험장치 개발 및 결과 분석을 위한 제반 기술을 습득하였다.
- 2) 공기중 실험에서 시추보호관의 전체길이에 대하여 상단 정적 읍세트의 비율이 5% 이내에서 정적 읍세트가 고유진동수에 미치는 영향은 무시할 수 있다.
- 3) 석유시추보호관의 상단 변위가 임계치(시추보호관 직경의 1-2배)를 초과할 때 기하학적인 비선형성으로 인하여 공진주파수영역에서 횡방향의 변위가 생성되며, 상단변위가 증가할수록 공진주파수 영역이 넓어진다.
- 4) 시추보호관의 이론해석 결과는 C_d , C_m 값에 영향을 많이 받고 있으나, multiple riser와 같은 복잡한 형상의 시추보호관의 c_m 값의 추정을 위해서는 공기중 및 정수중에서 고유진동수를 측정하는 실험을 거쳐 결정하는 것이 바람직하다.
- 5) 모형시험 결과는 이론해석 결과와 비교하여 운동 모드 및 응력분포에서 좋은 일치율을 보이고 있으며, asymptotic solution을 이용한 비선형 해석은 실제 석유시추보호관 설계시 유용하게 사용될 수 있다.

5. 후 기

본 논문은 과학기술처의 지원을 받아서 한국기계연구소가 수행한 '86년 국가특정연구사업 중 "반잠수식 시추선의 설계기술 개발 [I]" 과제의 일부임을 밝혀둔다.

참 고 문 헌

- 1) Kim., Y.C., "Derivation of the Three Dimensional Equation of Motion of a Marine Riser for Large Deflections", Proceedings, Energy-Sources Technology Conference and Exhibition, ASME, New Orleans. LA, USA., Feb., 1986.
- 2) Kim., Y.C., "Nonlinear Vibration of Long Slender Beams", Ph. D. Thesis, Dept. of Ocean Engineering, M. I. T., Cambridge, MA, USA, May, 1983
- 3) American Petroleum Institute, "Comparison of Marine Drilling Riser Analyses", API bull., 2J, First Edition. Jan. 1983
- 4) 김용철, 이관복, "규칙파중 석유시추보호관의 운동특성에 관한 연구", 한국해양공학회지 제1권, 제1호, July, 1987
- 5) 김용철 외, "반잠수식 시추선의 운동특성에 관한 연구", 한국기계연구소 연구보고서, UCN 350-701.D, 1986
- 6) MARIN, KIMM, "Data Report on Model Experiments", Cooperative Research Program, Jan., 1986
- 7) Sarpkaya, T. and M. Isaacson, "Mechanics of Wave Forces on Offshore Structures", Van Nostrand Reinhold, 1981
- 8) Vandiver, J.K., "Drag Coefficients of Long Flexible Cylinders", Proceedings, OTC 4490, Houston, Texas, May., 1983
- 9) Moe, G. and T. Overvik, "Current-induced Motions of Multiple Risers", Proceedings, Behaviour of Offshore Structures Conference, Vol.2, pp.618-638, Cambridge, MA., 1982
- 10) Mercier, J. A., "Large Amplitude Oscillations of a Circular Cylinder in a Low-speed Stream", Ph. D. Dissertation, Stevens Institute of Technology. 1973