
 論 文

大韓造船學會誌
 第26卷 第2號 1989年 6月
 Journal of the Society of
 Naval Architects of Korea
 Vol. 26, No. 2, June 1989

반잠수식 시추선에 작용하는 장주기 표류력에 관한 연구

홍 사 영*, 이 판 목*, 홍 도 천*

A Study on the Slowly Varying Wave Drift Force Acting on a Semi-Submersible Platform in Waves

by

S.Y. Hong*, P.M. Lee* and D.C. Hong*

요 약

파랑표류력은 크기에 있어서는 2차항(2nd-order)의 힘으로, 파도의 주기로 나타나는 1차항(1st-order)의 파랑강제력에 비해 미미하나, 부유체 자체의 복원력이 없는 수평방향으로 작용하므로 부유체에 대변위 표류운동을 유발한다. 특히 장주기 표류력은 계류시스템에 장주기 대변위 공진응답을 야기시킬 수 있으므로 계류시스템의 설계 및 운용에 고려되어야 할 중요한 요소이다.

본 연구에서는 이론적 연구로서 개량된 Green 적분방정식을 이용하여 3차원 특이점을 분포하는 방법으로 near field법을 택하여 장주기 파랑표류력을 계산하였으며 계산결과는 Pinkster 및 Standing의 결과와 비교하였다. 비선형파의 산란효과 고려는 Pinkster의 근사방법을 따랐다.

실험적 연구로서 반잠수식 시추선의 1/60 모형에 대해 규칙파 및 불규칙파중 표류력계측시험을 수행하였으며 실험결과는 계산치와 비교되었다. 끝으로 계측시험에 있어 계류스프링의 영향 및 장주기 표류력 계측에 있어서 실험상 문제점을 논하였다.

Abstract

Wave drift forces which are small in magnitudes compared to the first order wave exciting forces can cause very large motion of a vessel in waves. In this paper a theoretical and experimental analysis is made of the mean and slowly varying wave drift forces on the semi-submersible platform. Theoretical calculations are performed by using near field method with three dimensional diffraction theory and model tests are carried out in regular and irregular waves with a 1/60 semi model. Test results are compared with theoretical calculations and the mooring spring effects in the test are discussed.

1. 서 언

반잠수식 시추선과 같은 부유식 해양구조물은 작업 목적상 해양환경하에서 일정한 위치를 고수하며 작업을

해야한다. 이러한 요구사항에 따라 계류계(mooring system)나 자동위치유지장치(DPS: Dynamic Positioning System)와 같은 위치확보장치를 채용하고 있다. 위치확보장치의 설계개념은 파진동수에 의한 운동은 허용하면서 조류, 바람, 파도 등에 기인한 표류를 방지

본 논문은 1988년도 대한조선학회 추계연구발표회에서 발표된 논문임
 접수일자: 1988년 10월 26일, 재접수일자: 1989년 1월 28일

* 정희원, 한국기계연구소 대덕선박분소

하는데 있으므로 이와 같은 시스템의 설계하중 추정은 시스템의 신뢰성 및 효율성을 위한 필수적 요소이다.

불규칙한 해상에서의 파랑표류력은 한방향으로 일정하게 작용하는 평균표류력과 입사파의 주기보다 매우 큰 주기를 가지고 시간에 따라 서서히 변화하는 장주기 표류력으로 구별할 수 있다. 표류력의 이론해석 방법은 물체의 존재로 인한 입사파의 효과를 운동량 보존법칙을 이용하여 Maruo [1], Newman [2] 등이 수행한 far-field법이 있으며 물체침수표면에 대해 유체 압력을 직접적분하는 방법으로 Faltinsen & Løken [3] Pinkster [4] 등이 수행한 near field법으로 대별할 수 있다. 전자의 방법은 간단한 형상의 물체에 대해서는 계산의 간편한 잇점이 있으나 물체의 형상이 복잡해지면 후자의 방법이 보다 효과적이며 장주기 표류력으로의 계산확장이 용이한 장점이 있다. 장주기 표류력의 발생원리는 불규칙 해상을 이루는 각 성분파의 상호간섭에 의한 것으로 알려져 있으며 이러한 상호작용은 평균 표류력을 구성하는 1차항성분의 곱으로 나타나는 기여분과 성분파의 상호작용에 의한 비선형파 (2nd ordre wave)의 성분으로 나타낼 수 있다. 이러한 비선형파의 영향은 Bowers [5]가 비선형입사파를 구한 바 있으며 Mei [6] 등이 multiple scale법을 이용하여 체계적인 해법을 보인 바 있다. 그러나 3차원 문제에 있어서 모든 비선형 경계조건을 만족하는 해석적인 해가 아직까지 구해지지 않았으며, Newman [7], Pinkster [8] 등이 근사적 해법을 제시하였다.

본 연구에서는 파랑에 의한 표류력 추정을 위해 이론 계산과 모형시험을 수행하였다. 이론적 방법으로 Hong [9,10]의 3차원 특이점 분포법을 이용하여 Pinkster [8]의 방법에 따라 마아지선 및 반잠수식 시추선에 대해 평균표류력 및 장주기표류력을 계산하였으며, 1/60 반잠수식 시추선 모형에 대해 규칙파 및 불규칙파중 표류력 계측시험을 수행하였다. 실험결과는 계산결과와 비교하였으며 아울러 표류력 계측실험에 있어서 제류스프링에 의한 영향을 고찰하였다.

2. 이론 해석

2.1. 문제의 수식화

물체의 침수표면에 작용하는 유체압력을 적분하고 이의 2차항을 취함으로써 파랑표류력을 유도할 수 있으며 이는 Pinkster [8], Standing [11] 등이 자세히 유도한 바 있다.

$$\begin{aligned} \vec{F}^{(2)} = & \underbrace{-\int_{WL} \frac{1}{2} \rho g \zeta_r^2 \vec{N}^{(0)} dl}_{I} + \underbrace{\iint_{S_0} \frac{1}{2} \rho |v \phi^{(1)}|^2 \vec{N}^{(0)} dS}_{II} \\ & + \underbrace{\iint_{S_0} \rho \vec{X}_1^{(1)} \cdot v \phi_1^{(1)} \vec{N}^{(0)} dS}_{III} + \underbrace{\vec{R}_1 \times M \ddot{\vec{X}}_g^{(1)}}_{IV} \\ & + \underbrace{\rho \iint_{S_0} \frac{\partial \phi^{(2)}}{\partial t} \vec{N}^{(0)} dS}_{V} \end{aligned} \quad (1)$$

ρ : 해수밀도

$\zeta_r^{(1)}$: 평균수선 WL에서의 선형상대파고

$\vec{N}^{(0)}$: 평균침수면 S_0 에서 유체를 향하는 단위법선 벡터

$\phi^{(1)}$: 입사파, 산란파 및 방사파를 포함하는 선형 속도 포텐셜

$\vec{X}_1^{(1)}$: 물체 표면에서의 선형 직선운동 벡터

$\vec{X}_g^{(1)}$: 물체 무게 중심에서의 선형 직선운동 벡터

\vec{R}_1 : 물체의 선형 회전운동 벡터

$\phi^{(2)}$: 입사파와 산란파를 포함하는 2차항 속도 포텐셜

2.2. Quadratic Transfer Function의 계산

2.2.1. 1차항의 곱에 의한 성분

불규칙파의 수면 상승을 다음과 같이 각 성분파의 선형함수로 표시하자.

$$\zeta(t) = \sum_{j=1}^N Re(\zeta_{oj} e^{-i\omega_j t}) \quad (2)$$

여기서 ζ_{oj} 는 j 번째 성분파의 복소진폭이다.

따라서 수면상승의 제곱을 성분파의 주파수 차이에 의한 기여분만 고려하면 식 (3)과 같이 표현가능하다.

$$\zeta^2(t) = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N Re\{\zeta_{oj} \bar{\zeta}_{ok} e^{-i(\omega_j - \omega_k)t}\} \quad (3)$$

여기서 위의 '-'는 공액복소수를 의미한다. 각 성분파에 의한 유체속도, 압력구배, 상대파고 및 물체운동과 같은 1차항 성분은 식 (2)로 부터 입사파에 대한 전달함수로 표시 가능하므로 다음의 식이 성립한다.

$$X = \sum_{j=1}^N \zeta_{oj} X_{oj} e^{-i\omega_j t} \quad (4)$$

$$Y = \sum_{k=1}^N \zeta_{ok} Y_{ok} e^{-i\omega_k t} \quad (5)$$

$$XY = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N X_{oj} \bar{Y}_{ok} \zeta_{oj} \bar{\zeta}_{ok} e^{-i(\omega_j - \omega_k)t} \quad (6)$$

$$= \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N \zeta_{oj} \bar{\zeta}_{ok} (P_{1jk} + iQ_{1jk}) e^{-i(\omega_j - \omega_k)t} \quad (7)$$

$$P_{1jk} + iQ_{1jk} = \frac{1}{4} (X_{oj} \bar{Y}_{ok} + \bar{X}_{ok} Y_{oj}) \quad (8)$$

식 (8)은 각 1차항의 전달함수의 곱으로 표시되는 quadratic transfer function으로 다음과 같은 특성을 갖는다.

$$P_{1jk} = P_{1kj} \quad (9)$$

$$Q_{1jk} = -Q_{1kj} \quad (10)$$

2.2.2. 비선형파의 기여분

2차항까지의 비선형 문제는 다음의 비선형 경계조건을 만족하는 속도 포텐셜을 구함으로써 해결할 수 있다.

$$\nabla^2 \Phi^{(2)} = 0 \quad \text{유체영역에서} \quad (11)$$

$$\frac{\partial^2 \Phi^{(2)}}{\partial t^2} + g \frac{\partial \Phi^{(2)}}{\partial z} + 2\nabla \Phi^{(1)} \cdot \nabla \frac{\partial \Phi^{(1)}}{\partial t} - \frac{1}{g} \frac{\partial \Phi^{(1)}}{\partial t} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial^2 \Phi^{(1)}}{\partial t^2} + g \frac{\partial \Phi^{(1)}}{\partial z} \right) = 0$$

$$\frac{\partial \Phi^{(2)}}{\partial z} = 0 \quad \begin{matrix} \text{정지수면 } z=0\text{에서} \\ \text{해저면 } z=-h\text{에서} \end{matrix} \quad (12)$$

$$\nabla \Phi^{(2)} \vec{N}^{(0)} + \nabla \Phi^{(1)} \vec{N}^{(1)} = \vec{V}^{(1)} \vec{N}^{(1)} - (X_1^{(1)} \cdot \nabla) \nabla \Phi^{(1)} \vec{N}^{(0)} + \vec{V}^{(2)} \vec{N}^{(0)} \quad (14)$$

물체표면에서

그러나 식 (12)로 표시되는 비선형 자유표면을 만족하기 위해서는 물체표면뿐 아니라 자유표면에도 특이점을 분포시켜야 하고 방대한 계산량을 필요로 한다. 또한 3차원 비선형 문제에 있어 식 (12)를 만족하는 해석적인 해가 아직까지 구해진 바가 없다. Bowers는 식 (12)의 조건에서 선형포텐셜의 효과중 입사파의 영향만을 고려하여 2차항의 비선형 입사파를 구하였다[5].

$$\Phi_i^{(2)} = - \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \zeta_{oi}^{(1)} \bar{\zeta}_{oj}^{(1)} A_{ij} \frac{\cosh\{k'(z+h)\}}{\cosh(k'h)} e^{i(k'x - \omega't)}, \quad \omega_i > \omega_j \quad (15)$$

$$k' = k_i - k_j, \quad \omega' = \omega_i - \omega_j \quad (16)$$

$$A_{ij} = \frac{1}{2} g^2 \frac{B_{ij} + C_{ij}}{\omega'^2 - k' g \tanh(k'h)} \quad (17)$$

$$B_{ij} = \frac{k_i^2}{\omega_i \cosh^2(k_i h)} - \frac{k_j^2}{\omega_j \cosh^2(k_j h)} \quad (18)$$

$$C_{ij} = \frac{2k_i k_j (\omega_i - \omega_j) \{1 + \tanh(k_i h) \tanh(k_j h)\}}{\omega_i \omega_j} \quad (19)$$

Pinkster [8]는 식 (15)로 주어지는 비선형파에 의한 장주기 표류력을 구하는 문제를, k' 의 파수를 갖는 선형파에 의한 파랑강제력을 구하고 이에 중력장 g 를 변화시킴으로써 산란파의 dispersion relation을 만족시키는 방법으로 근사시켰다.

$$F_{2ij}^{(2)} = f_{ij} F^{(1)} \quad (20)$$

$F^{(1)}$: $k' = k_i - k_j$ 의 파수를 갖는 단위 선형파에 의한 파랑강제력

$$f_{ij} = \frac{A_{ij}}{g} \omega' \quad (21)$$

따라서 이와 같은 근사방법을 도입하면 비선형파에 의한 기여분을 quadratic function으로 표현가능하다.

$$P_{2ij} = \frac{1}{2} \text{Re}(F_{2ij}^{(2)}) \quad (22)$$

$$Q_{2ij} = \frac{1}{2} \text{Im}(F_{2ij}^{(2)}) \quad (23)$$

$$P_{ij} = P_{1ij} + P_{2ij} \quad (24)$$

$$Q_{ij} = Q_{1ij} + Q_{2ij} \quad (25)$$

$$T_{ij} = \sqrt{P_{ij}^2 + Q_{ij}^2} \quad (26)$$

2.2.3. 장주기 표류력 스펙트럼 계산

불규칙 해상상태를 파도 스펙트럼 $S_\zeta(\omega)$ 로 표시하면 불규칙파중 장주기 표류력의 스펙트럼 $S_F(\mu)$ 은 다음과 같이 표시 가능하다.

$$S_F(\mu) = 8 \int_0^\infty S_\zeta(\omega) S_\zeta(\omega + \mu) |T(\omega + \mu, \omega)|^2 d\omega \quad (27)$$

여기서, $T(\omega + \mu, \omega)$ 는 T_{ij} 를 의미한다. 불규칙 해상에서의 평균표류력은 다음과 같이 표현된다.

$$F_{mean}^{(2)} = 2 \int_0^\infty S_\zeta(\omega) P(\omega, \omega) d\omega \quad (28)$$

여기서 $P(\omega, \omega) = P_{ij}$ 이다.

2.3. 계산결과 및 고찰

전술한 방법에 따라 개발된 전산프로그램 SLDFN으로 바아지선과 GVA4500형의 반잠수식 시추선에 대한 표류력 계산을 수행하였다. 각 계산모델의 제원은 Table 1, 2와 Fig. 1, 2에 각각 나타내었다.

바아지선의 계산조건은 수심이 50m, 입사각은 선수파이며 계산을 위한 평면요소수는 172, 수선면의 선요소수는 52이다. 반잠수식 시추선은 수심이 400m이고,

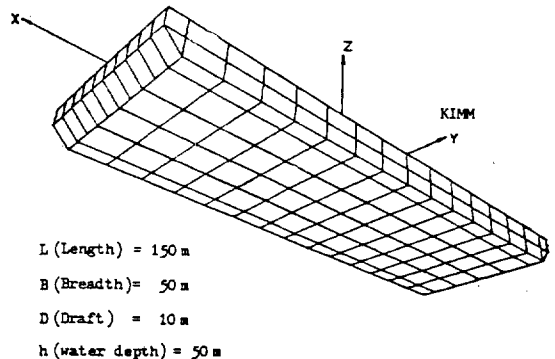


Fig. 1 Facet representation of the barge

Table 1 Main particulars of a barge

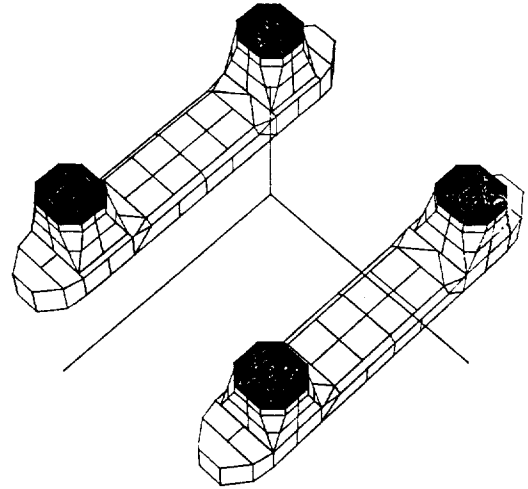
Designation	Symbol	Barge
Length (between perpendiculars)	L_{pp}	150.0m
Breadth	B	50.0m
Draft	D	10.0m
Volume	V	73,750m ³
Vertical center of gravity above base	KG	10.0m
Metacentric height	GM_T	16.23m
Gyradius of pitch	k_{yy}	39.0m
Gyradius of roll	k_{xx}	20.0m
Water depth	h	50.0m

Table 2 Main particulars of a semi-submersible

Designation	Symbol	Semi-submersible
Pontoon length	L_{pp}	89.0m
Pontoon breadth	B	16.0m
Pontoon height	H	9.10m
Beam outside pontoon	B_M	70.72m
Column $L \times B$ at pontoon deck	$L \times B$	13.68 × 14.5
Draft	D	24.9m
Volume	V	36,131m ³
Gyradius of pitch	k_{yy}	28.1m
Gyradius of roll	k_{xx}	30.3m
Vertical center of gravity above base	KG	21.1m
Metacentric height	GM_T	1.70m

선수각은 선수파와 횡파로 하였으며 평면요소수는 340이며 수선면의 선요소는 각 주기중에 대해 12로 나누었다.

바아지선에 대한 계산결과는 Pinkster와 Standing [11]의 계산결과와 비교하였다. Fig. 3은 평균표류력의 각 성분의 기여분을 나타낸 것이다. 세 계산결과가 대체로 일치하는 경향을 보이고 있으나 유체 속도의 제곱항에 의한 기여분이 $\omega \sqrt{L/g} > 3.5$ 부터 본 계산결과는 일정한 값으로 수렴하는 경향을 보이거나 나머지 두 계산결과는 단조 증가하는 경향을 보이고 있다. 이 성분의 차이로 인하여 Fig. 4의 결과에 있어 본 방법의 결과가 보다 크게 나타나고 있다. 이러한 차이는 계산시 평면요소 및 선요소에 의한 차이에도 원인이 있으나 본 방법은 소오스와 더블렛을 분포하는 반면 나머지 두 방법은 소오스만을 분포함으로써 속도계산에 있어 차이가 나타나는 것으로 생각된다[9].



Facet 수 : 85(작업용수) × 4

Fig. 2 Facet representation of the semi-submersible

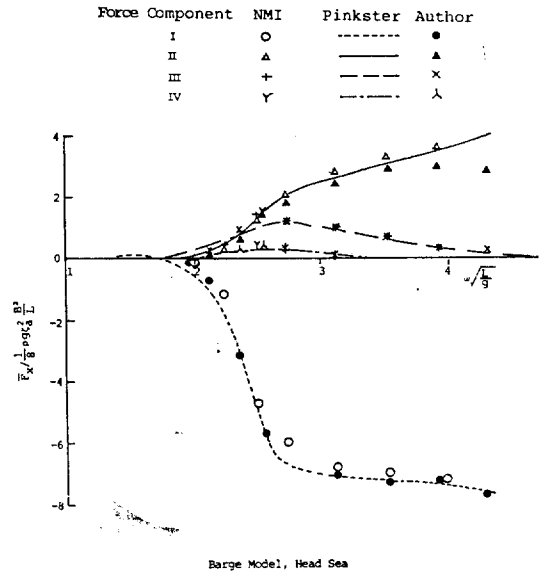


Fig. 3 Mean drift force components acting on the barge

Table 3에 quadratic transfer function의 계산 결과를 나타내었다. 세 방법의 결과가 대체로 비슷한 크기로 보이거나 주파수의 차이가 작은 곳에서는 일치도가 떨어지고 있다. Quadratic transfer function은 각 주파수 성분의 상호작용에 의한 것이므로 각 성분의 위상 차이등이 예민하게 결과에 반영된 것으로 생각되며 이러한 차이는 평균표류력의 각 성분의 차이에서 기인

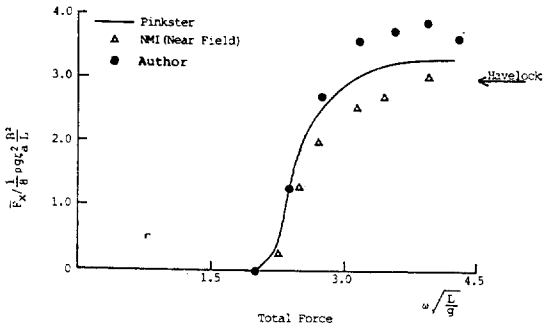


Fig. 4 Total mean drift force acting on the barge

하는 것으로 생각된다.

Table 4에는 비선형파의 기여분을 나타내었으며 본 계산과 Pinkster의 결과는 같은 방법이므로 일치도가 좋으며 Standing의 계산결과는 Bowers의 방법으로 비선형 입사파의 압력을 적분한 것이다.

Fig. 5에는 반잠수식 시추선에 대한 평균표류력을 나타내었다. 표류력 계수가 중간에 변곡점을 갖는 것은 시추선의 주기둥(column)과 주선체(pontoon)의 상호

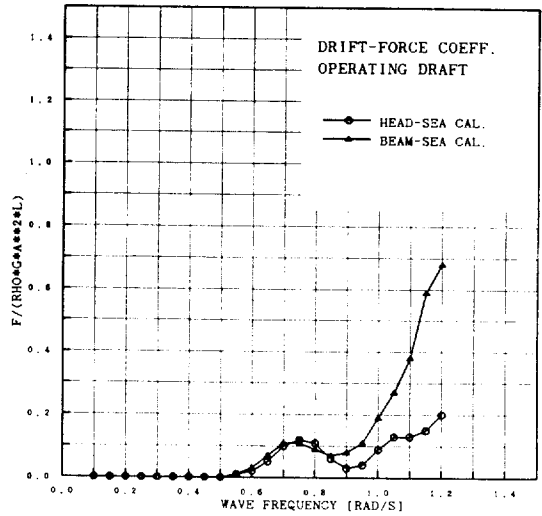


Fig. 5 Total mean drift force acting on the semi-submersible

간섭효과로서 나타나는 것이다. 시추선의 장주기표류력은 quadratic transfer function을 구하고 식 (27)을

Table 3 Quadratic transfer function of slow drift force (barge: head sea, total)

		$\omega_m(\text{rad/s})$							
		0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0		
ω_n	0.5	-0.4	14.0	18.5	13.7	11.2	9.4	(i)	
		0.0	3.0	4.0	9.0	11.0	7.0	(ii)	
		0.0	5.0	9.0	10.0	11.0	11.0	(iii)	
	0.6	-11.0	16.3	21.9	14.1	12.3		(i)	
		-5.0	8.0	6.0	14.0	4.0		(ii)	
		-9.0	13.0	11.0	16.0	13.0		(iii)	
	0.7			-23.6	24.9	25.8	19.6		(i)
				-18.0	15.0	15.0	20.0		(ii)
				-22.0	18.0	20.0	20.0		(iii)
	0.8				-31.2	27.9	29.7		(i)
					-22.0	16.0	21.0		(ii)
					-26.0	22.0	18.0		(iii)
0.9					-32.1	30.5		(i)	
					-24.0	18.0		(ii)	
					-27.0	21.0		(iii)	
	$T(\omega_m, \omega_n)^*$								
1.0						-33.8		(i)	
						-26.0		(ii)	
						-29.0		(iii)	

* : defined by $F_{mn}/\zeta_m\zeta_n$, [ton/m²]

(i) : Author's Calculation

(ii) : NMI's Calculation (Ref[11])

(iii) : Pinkster's Calculation (revised by Standing, Ref[11])

Table 4 Quadratic transfer function of slow drift force (barge: head sea, 2nd order potential)

		$\omega_m(\text{rad/s})$						
		0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	
ω_n	0.5		6.5	8.6	5.2	14.7	15.8	(i)
	0.0		7.0	2.0	2.0	13.0	16.0	(ii)
			6.0	6.0	5.0	15.0	17.0	(iii)
	0.6			6.0	6.3	7.6	13.7	(i)
				0.0	3.0	6.0	3.0	(ii)
					8.0	6.0	8.0	(iii)
	0.7				5.8	4.6	10.7	(i)
					0.0	4.0	6.0	(ii)
						6.0	5.0	(iii)
	0.8					5.8	3.8	(i)
					0.0	8.0	(ii)	
						6.0	(iii)	
0.9						5.8	(i)	
						0.0	(ii)	
						6.0	(iii)	
1.0							(i)	
						0.0	(ii)	
							(iii)	

$T(\omega_m, \omega_n)^*$

* : defined by $F_{mn}/\zeta_m\zeta_n$, [ton/m²]

- (i) : Author's Calculation
- (ii) : NMI's Calculation (Ref[11])
- (iii) : Pinkster's Calculation (revised by Standing, Ref[11])

이용하여 장주기 표류력 스펙트럼으로 나타내었다. Fig. 6과 Fig. 7은 각각 선수파와 횡파에 대한 스펙트럼 밀도를 무차원 값으로 나타낸 것이다. 계산결과에서 불규칙파중 장주기 표류력의 분포는 파도 스펙트럼의 평균주기가 짧아질수록 저주파수쪽으로 집중하는 경향을 보이고 있다.

이러한 계산결과에의 경향은 다음의 사실에 근거하고 있다.

첫째, 장주기 표류력 스펙트럼의 표현식(27)에서, 각 성분파도의 곱을 나타내는 $S_{\zeta\mu}(\omega) = S_{\zeta}(\omega)S_{\zeta}(\omega+\mu)$ 의 경향이 장주기파의 주파수 μ 가 커질수록 에너지의 최대치가 고주파수쪽으로 이동하고 그 면적이 감소하는 것을 보이고 있으며, 파도 스펙트럼의 평균주기가 증가할수록 면적이 감소하는 정도가 심화되고 있다(Fig. 10).

둘째, quadratic transfer function $T(\omega+\mu, \omega)$ 는 대체로 고주파수 영역에서 기여도가 높으나, μ 가 증가

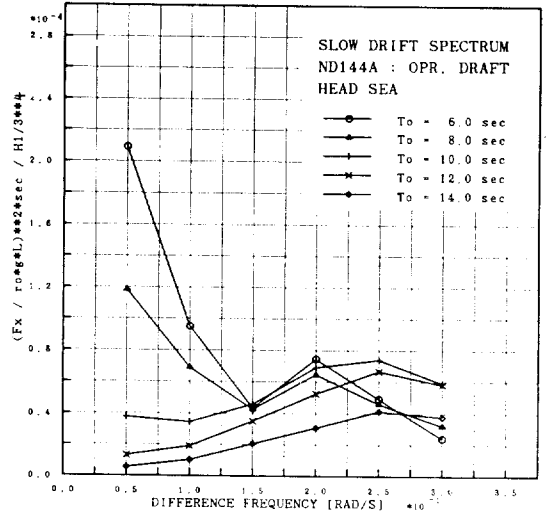


Fig. 6 Spectrum of slowly varying force in irregular waves (head sea, semi-submersible)

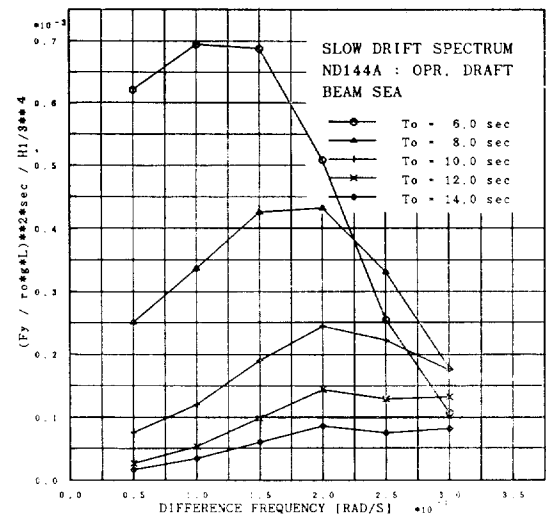


Fig. 7 Spectrum of slowly varying force in irregular waves (beam sea, semi-submersible)

할수록 고주파수 영역에서의 기여도가 상대적으로 낮아지고 있다(Fig. 11).

위의 사실에서 파도 스펙트럼의 평균주기가 짧은 경우(wide-band spectrum), $S_{\zeta\mu}(\omega)$ 의 면적과 고주파수 영역에서의 $T(\omega+\mu, \omega)$ 의 값이 장주기 표류력의 크기를 지배하며 따라서 μ 가 작은 쪽으로 장주기 표류력의 분포가 집중하게 된다. 반면에 파도 스펙트럼의 평균주기가 긴 경우(narrow-band spectrum), μ 가 작을 때 $S_{\zeta\mu}(\omega)$ 의 면적은 크나 $T(\omega+\mu, \omega)$ 의 분포와 떨어져 있

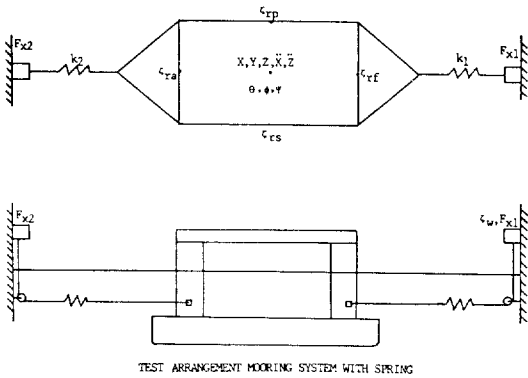
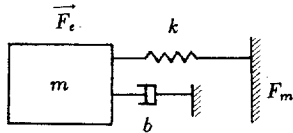


Fig. 8 Test arrangement



$$T_r(\omega) = \frac{1}{\sqrt{(1-\lambda^2)^2 + \nu^2\lambda^2}} \quad \lambda = \frac{\omega}{\omega_n}, \quad \nu = b\sqrt{km}$$

$$F_m = T_r^{-1} F_e$$

Fig. 9 One degree of freedom mass spring system

으며, μ 가 클 때 그 면적은 작으나 $T(\omega + \mu, \omega)$ 의 기억 범위의 근접하므로 표류력의 분포는 상대적으로 평탄

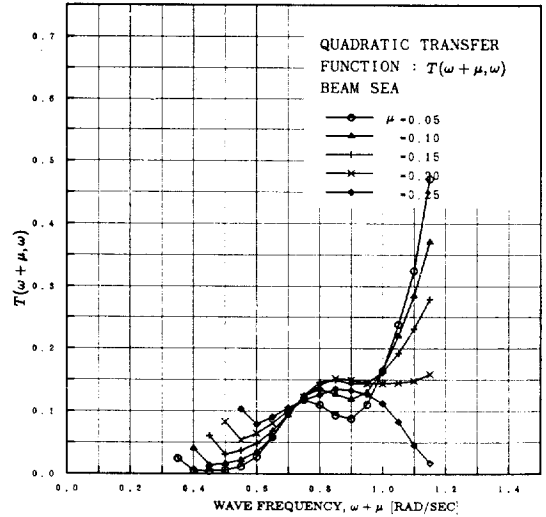
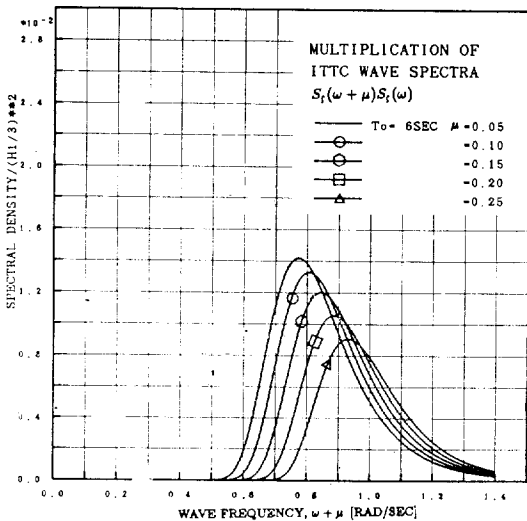


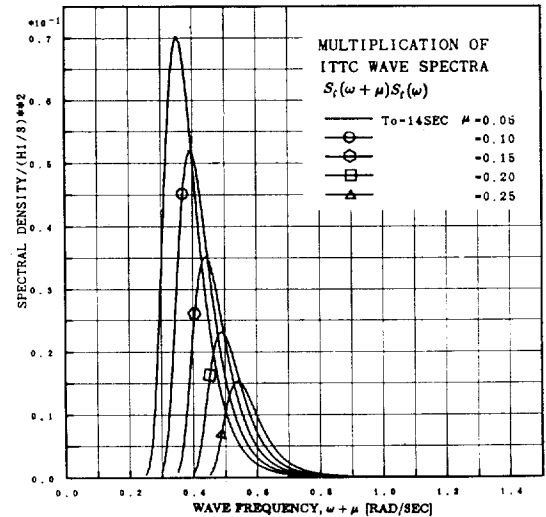
Fig. 11 The Quadratic Transfer function of the Semi-submersible for Beam Sea

하며 μ 가 큰쪽으로 집중하고 있다.

그러나 Fig. 6과 Fig. 7은 스펙트럼 값은 유의파고 ($H_{1/3}$)의 4제곱으로 무차원화시킨 값이므로 실제 표류력은 파도 스펙트럼의 평균주기가 긴 경우가 짧은 경우에 비해 대략 평균 주기의 8제곱에 비례하는 크기를 갖게 된다. 따라서 실제 해상에서의 장주기 표류력은 온 파도스펙트럼의 평균주기가 길어질수록 저주파수의



(a) $T_0=6\text{sec}$



(b) $T_0=14\text{sec}$

Fig. 10 Multiplication of wave spectra

전범위에 걸쳐 장주기 표류력이 존재하므로 계류시스템을 운용하는 데 있어 공진을 피하기가 어렵게 되며 이때의 안정성은 장주기 운동시 부유체의 감쇠력을 정확히 고려하여 검증되어야 할 것이다.

3. 모형 시험

3.1 모형시험

표류력 계측을 위한 모형시험은 GVA4500형 반잠수식 시추선의 1/60 모형에 대해 한국기체연구소 대덕선박분소의 심수대형 수조에서 수행되었으며 수조의 제원은 길이 200m, 폭 16m, 깊이 7m이다. 수행된 시험의 제 조건은 아래의 표와 같다.

Draft	Wave	Heading	Mooring System	Test Item
Operating (24.9m)	Regular	Head Sea	OP1, OP2	Mean Drift
	Regular SP1	Beam Sea	OP1, OP2	"
		Head Beam	OP2, OP3 OP2, OP3	Mean & Slow Drift
	SP2	Head Beam	OP2, OP3 OP2, OP3	" "

SP1 : $H_{1/3}=7.62m$ $T_0=10.0sec$

SP2 : $H_{1/3}=4.9m$ $T_0=8.3sec$

OP1 : $K = 10.57ton/m$

OP2 : $K = 5.37ton/m$

OP3 : $K = 87.80ton/m$

$H_{1/3}$: 유의파고

T_0 : 평균주기 $= 2\pi\sqrt{\frac{m_0}{m_2}}$

$m_n = \int_0^\infty \omega^n S_\zeta(\omega) d\omega$

K : 스프링 상수

제작된 모형선의 물리적 특성은 아래와 같으며 모형선의 재질은 FRP와 폴리우레탄의 복합재질이다.

불규칙파 생성시간은 2000초(실선단위 4.3시간)이며, 계측은 파생성후 5분 30초(실선단위 42.6분)후 부터 시작하여 계측 기록시간은 1536초(실선단위 3.3시간)이며 취득시간 간격은 0.05초(실선단위 0.387초)로 하였

(model scale)

Item	Desired	Measured	Error (%)
Transverse Metacenter (GM _T)	2.83cm	2.82cm	-0.4
Gyradius of Roll(K _{xx})	0.505m	0.493m	-2.4
Gyradius of Pitch(K _{yy})	0.468m	0.476m	+1.7

다. 실험배치도는 Fig. 8과 같다.

규칙파중 운동변위는 입사파에 대한 응답함수로 나타내었고 평균표류력은 계측신호의 시간영역에서의 평균값을 입사파의 계급의 함수로 표시하였다. 불규칙파중 운동응답은 스펙트럼 처리하여 입력 파도 스펙트럼의 유의파고에 대한 값으로 표시하였고 평균표류력은 시간영역신호에 대해 평균값을 취하고 유의파고의 계급의 함수로 나타내었다.

장주기표류력의 계측신호 해석은 Fig. 9와 같은 1자유도의 질량과 스프링을 갖는 선형계에 대해 계측된 신호에 스프링으로 인한 힘의 전달함수를 곱함으로써 계류스프링의 영향을 보상하였다. 위와 같은 실험장치의 개념은 참고문헌 [8]에 상세히 설명되어 있다.

$$\vec{F}_m = \vec{F}_e \cdot T, \quad T_r = \frac{1}{\sqrt{(1-\lambda^2)^2 + \mu^2 \lambda^2}}$$

$$S_{F_m}(\omega) = S_{F_e}(\omega) \cdot T_r^2$$

\vec{F}_m : 계측력

\vec{F}_e : 작용력

$S_{F_m}(\omega)$: 계측력 스펙트럼

$S_{F_e}(\omega)$: 작용력 스펙트럼

장주기 표류력의 해석은 Dalzell [12]의 cross-bispectral 해석법으로 각 성분파의 영향을 직접 나타낼 수 있으나 매우 많은 계산시간을 요하며, 대용량의 전산기를 필요로한다. 본 연구에서는 실선단위로 취득시간 간격 $\Delta t=1.162 sec$, 샘플수 $N=2048$, 앙상블수 $N_s=13$ 에 대해 F.F.T 해석을 통하여 스펙트럼을 구하고 계산치와 비교하는 간접적인 방법을 취하였다. 위의 경우 주파수의 해상도 $d\omega=0.002 rad/s$ 이며, cut off frequency $\omega_c=2.704 rad/s$ 이다.

Table 5 Free oscillation results (ship scale)

[sec.]

Mooring System	Surge	Sway	Heave	Pitch	Roll
w/o Spring			20.9	48.6	58.0
OP1	96.9	108.6	21.0	42.0	49.2
OP2	137.3	151.8	21.3	44.5	54.0
OP3	35.6	40.3	21.0	38.7	45.3

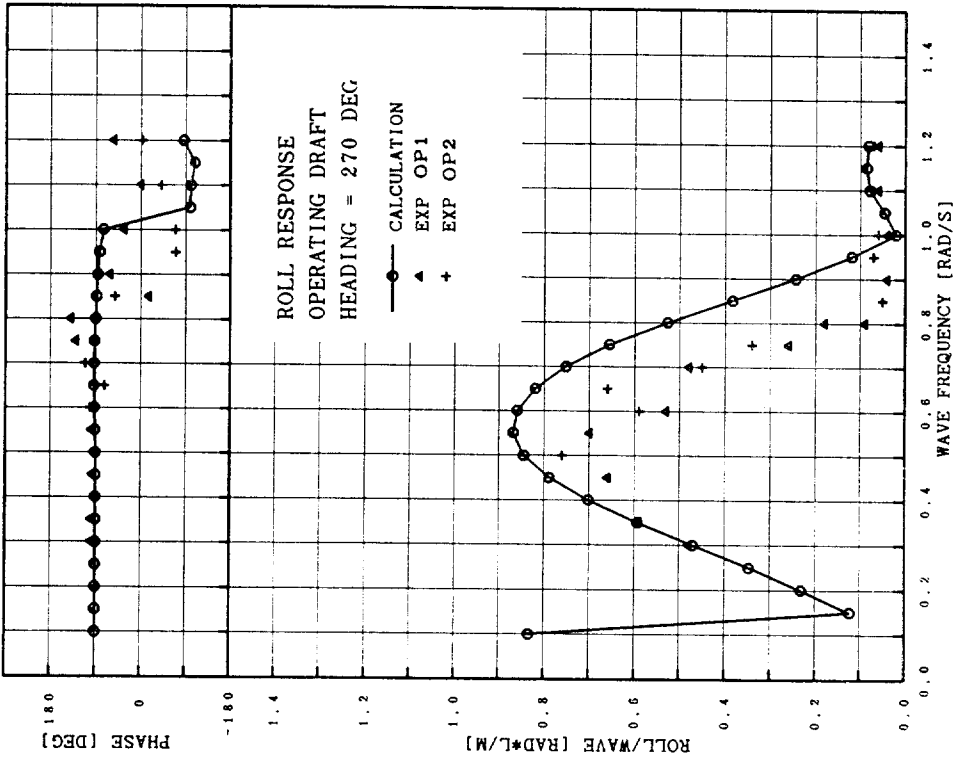


Fig. 13 Roll response in regular beam waves

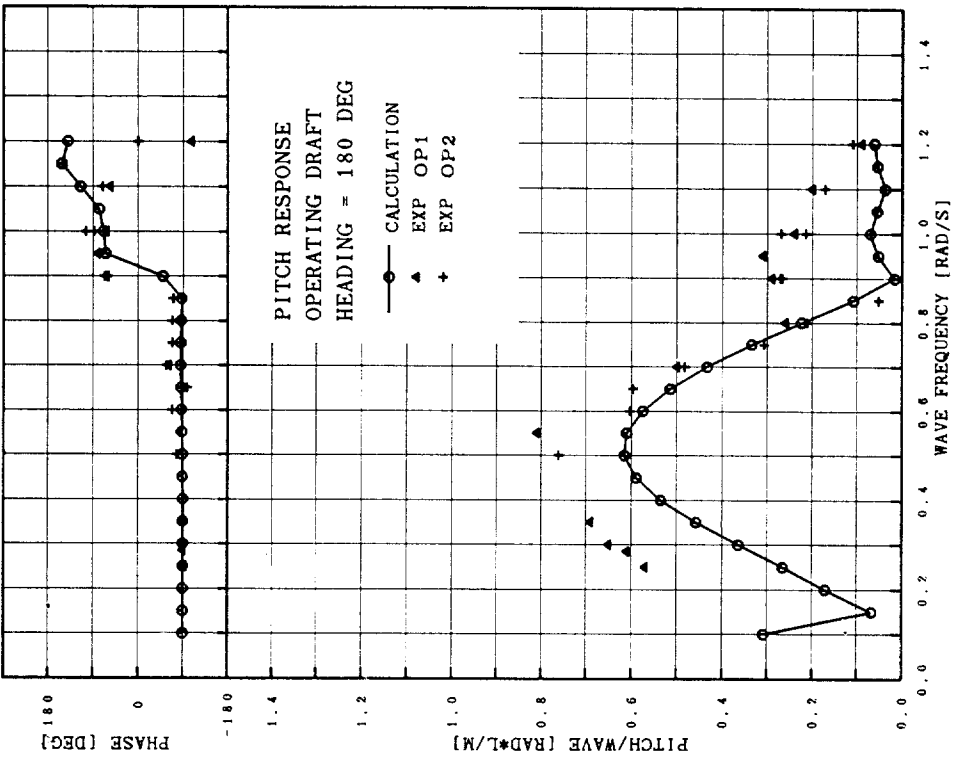


Fig. 12 Pitch response in regular head waves

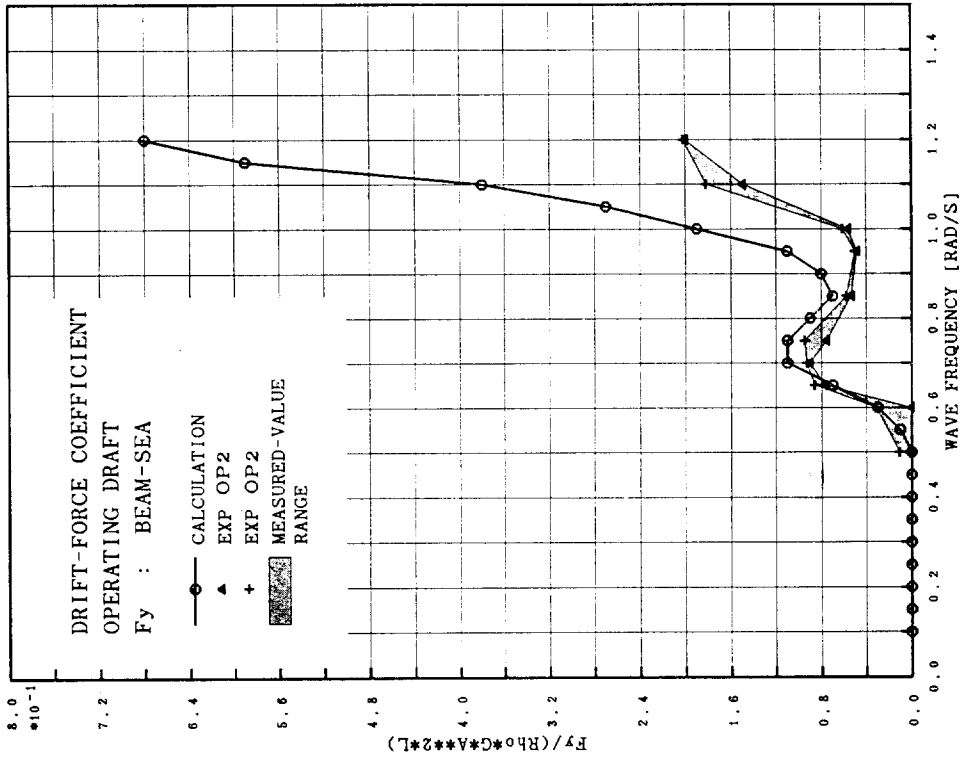


Fig. 14 Drift force in regular head waves

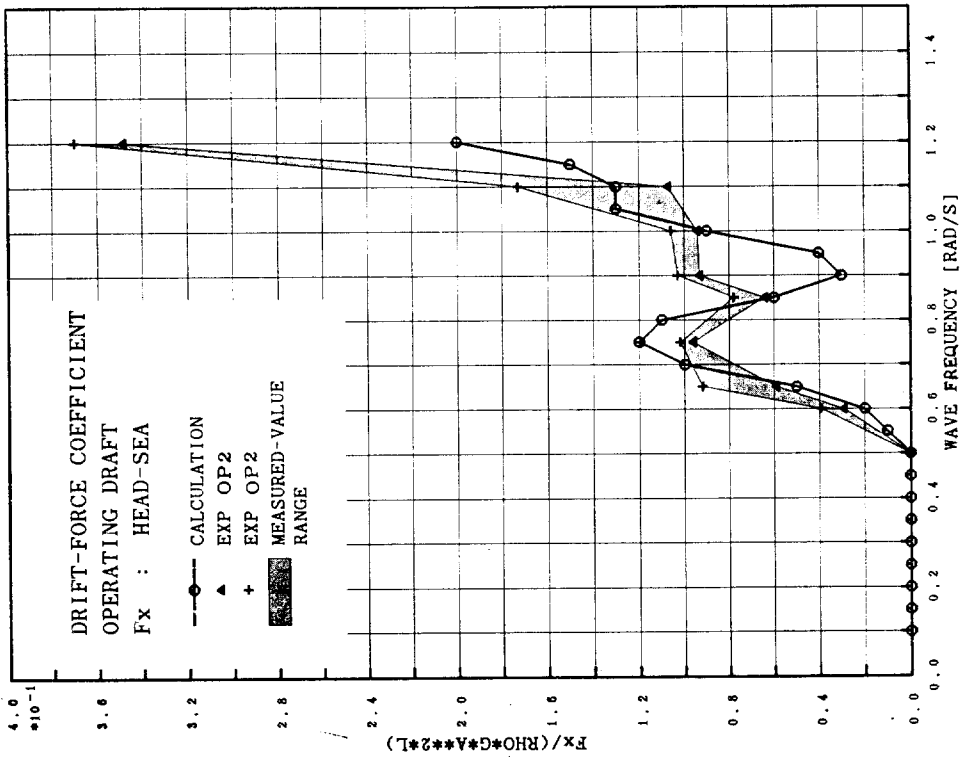


Fig. 15 Drift force in regular beam waves (semi-submersible)

3.2 모형시험 결과 고찰

계류스프링의 변화에 따른 고유주기의 계측치를 Table 5에 나타내었다. 선수 규칙파중 중동요응답을 Fig. 12에 나타내었으며, 횡파중 횡동요응답을 Fig. 13에 나타내었다.

중동요 및 횡동요의 실험결과가 계산치와 차이를 보이고 있으며 이는, 설계선형의 중동요 및 횡동요의 고유주기가 매우 길고(복원력이 작음) 계류스프링의 부착 위치가 회전중심과 떨어져 있어, 전후동요 및 좌우동요와의 연성효과 등으로 인한 결과로 생각된다.

Fig. 14와 Fig. 15에는 각각 선수파와 횡파에 대한

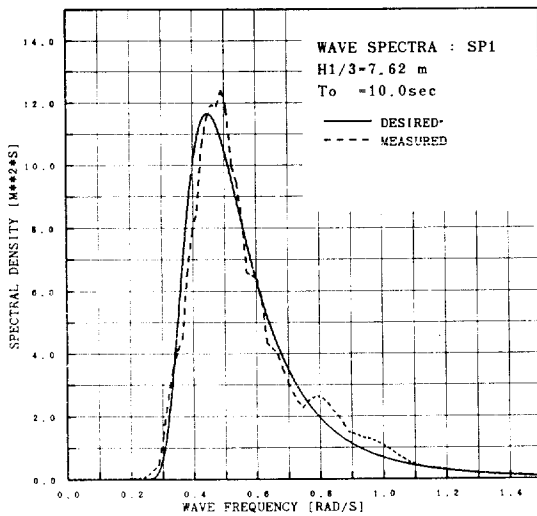


Fig. 16 Wave spectrum SP1

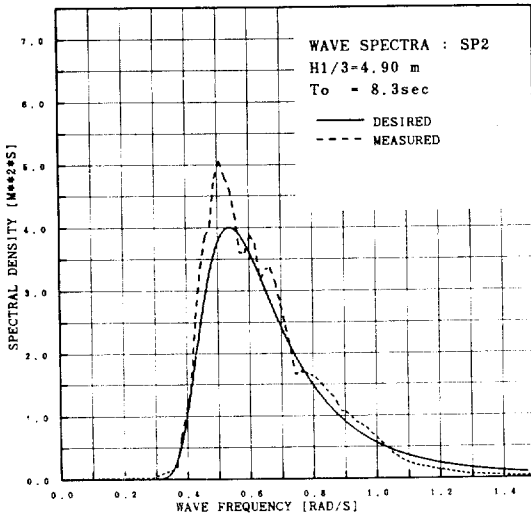


Fig. 17 Wave spectrum SP2

평균표류력의 계측치를 계산치와 함께 도시하였다. 두 결과 모두 대체로 유사한 경향을 보이나 선수파의 경우 1.0 rad/s 이후에서 계측치가 큰 값을 나타내며 횡파의 경우 반대현상을 보이고 있다. 이는 Fig. 12에서 같은 구간에서 중동요의 계측치가 큰 값을 나타내고 있는 것과 상관관계가 있는 것으로 생각된다. 즉, 표류력의 계측에 중동요의 거동이 영향을 미치고 있으며 이 영향이 계측치의 표류력을 크게 나타낸 것으로 생각된다. 횡파의 경우는 계류스프링의 간섭효과가 반대로 일어난 것으로 생각된다.

Fig. 16과 Fig. 17에는 파도 스펙트럼 SP1과 SP2의 계측치를 도시하였다. Fig. 18~Fig. 20에는 불규칙파중 운동응답을 유의파고에 대한 응답함수로 표시하여 나타내었다. Fig. 18의 상하동요는 실험치와 계산치가 좋은 상관관계를 보이고 있다. Fig. 19와 Fig. 20의 중동요 및 횡동요의 계측치도 유사한 경향을 보이나 규칙파중 결과와 같이 계류스프링의 영향이 나타난 것으로 보인다. 계류스프링이 강한 경우 표류력의 계측치가 크게 나타나고 있으며, 이는 중동요의 영향이 계측치에 직접 영향을 준 것으로 보이며 비선형적인 간섭효과가 일어났을 것으로 생각된다.

Fig. 21과 Fig. 22는 각각 선수파와 횡파중의 평균표류력을 나타낸 것이다. 두 결과 모두 계산치와 좋은 상관관계를 보이며, 규칙파중의 결과와 상응하는 경향을 보이고 있다. Fig. 23은 선수파 상태에서 파도스펙트럼 SP2인 경우의 장주기 표류력 스펙트럼을 나타내었다. 그림에서 * 표시는 계산치를 나타낸다. 전반적으로 계측치가 계산치보다 크게 나타나고 있으며 파도와 표류력의 스펙트럼이 $\omega=0.085$ rad/s와 $\omega=0.18$ rad/s에서 극대값을 보이고 있다. 그리고 그 부분에서 coherence도 높은 값을 보이고 있다. 후자의 극대값은 스프링의 공진효과가 완전히 보상되지 않은 것으로 생각되며 파도스펙트럼은 공진사 대변위로 인한 방사파가 계측된 것으로 보인다. 이와 같은 신호의 해석에는 몇가지 불분명한 사실이 내재하고 있는데, 첫째 계측 신호의 레벨이 매우 작으므로 이 신호의 물리적 정당성—가령 계측기의 교란 및 영점의 표류—을 부여하는 것이며, 둘째 수조에서 만든 파는 수조크기에 따라 정상파(standing wave)가 존재할 수 있으며 또한 천수파(shallow water wave)의 영향도 고려되어야 할 것이다. 또 조파시스템의 물리적 특성상 연속적인 성분파를 생성하지 못하므로 우리가 기대한 비선형파(2nd order wave)가 만들어지는가에 대한 의문도 있다.

본 연구에서는 교란성분과 계기의 영향이 서로 독립

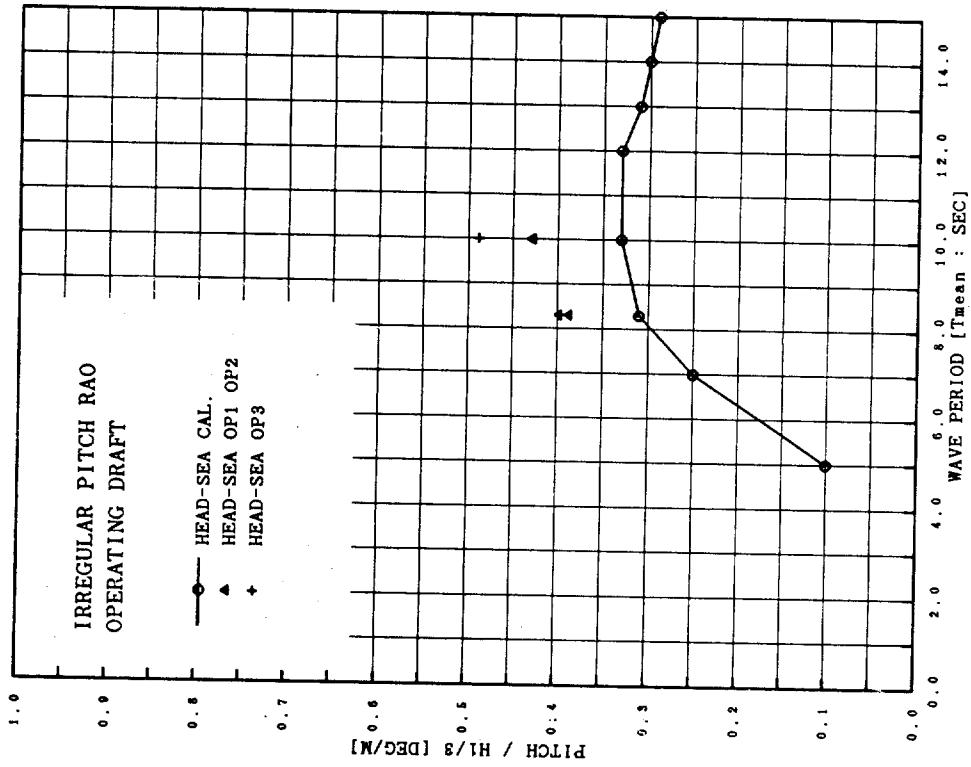


Fig. 19 Pitch response in irregular head waves

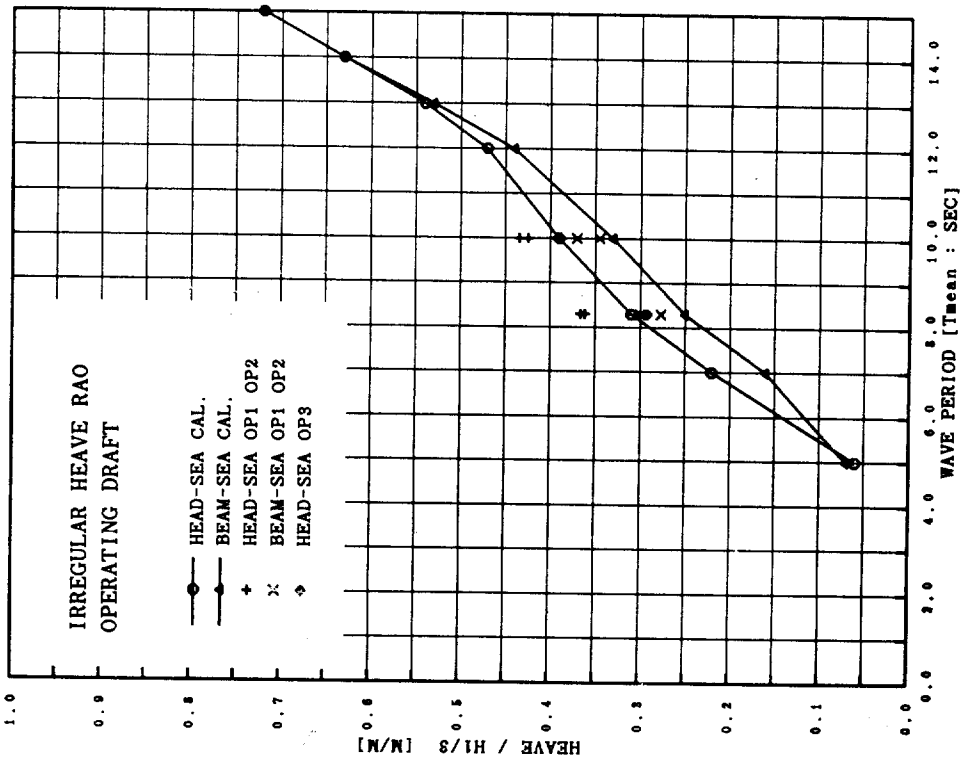


Fig. 18 Heave response in irregular waves

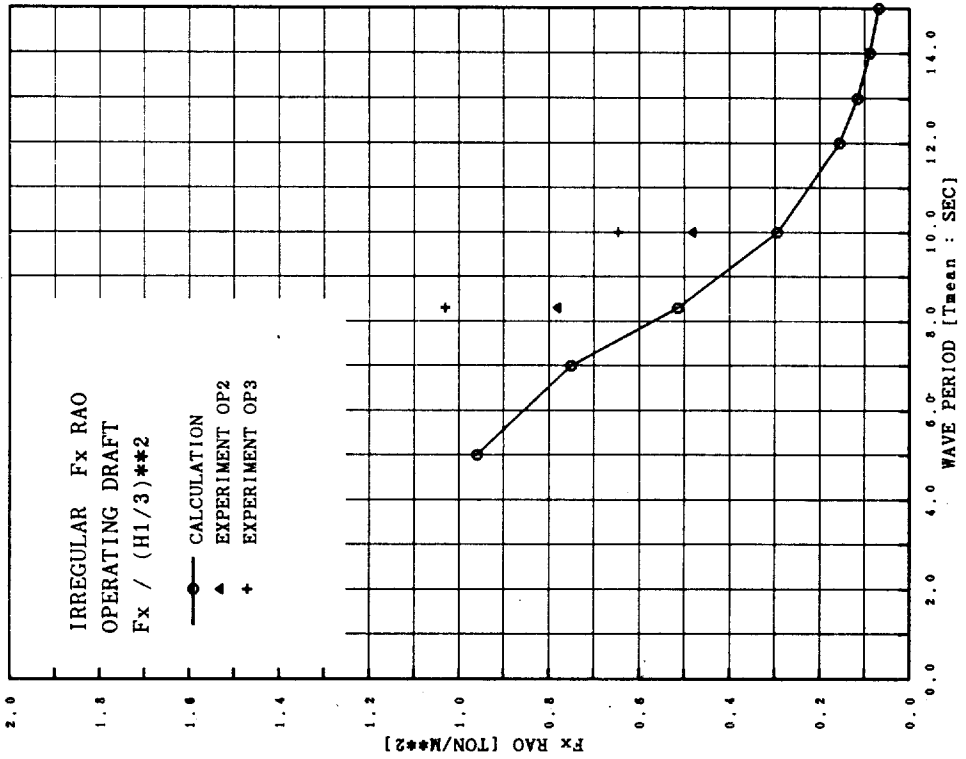


Fig. 21 Drift force in irregular head waves

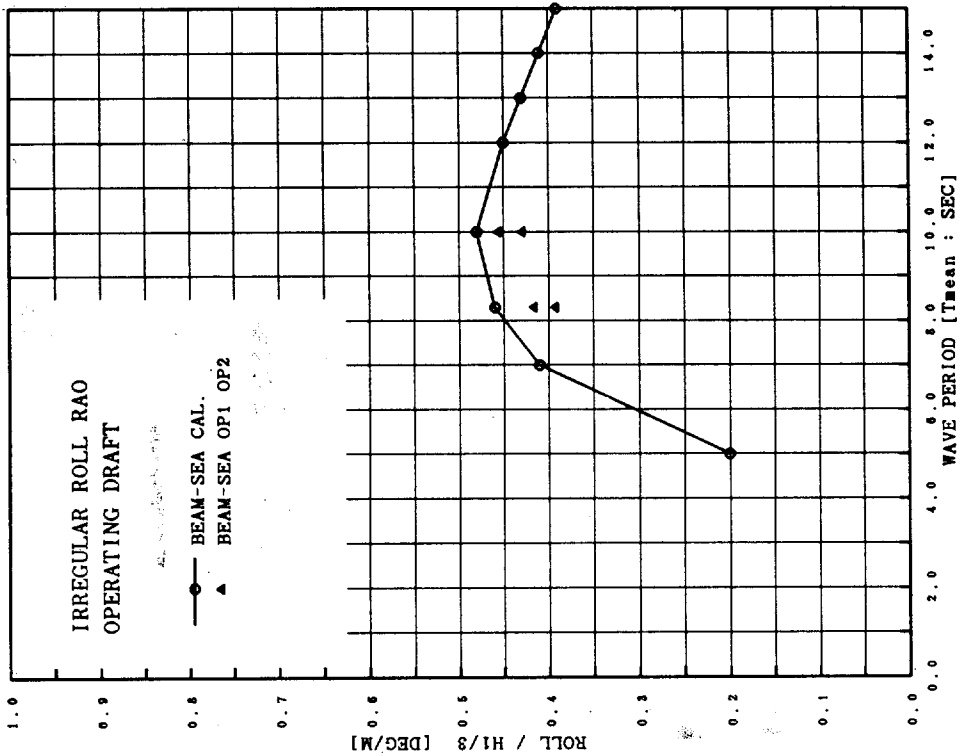
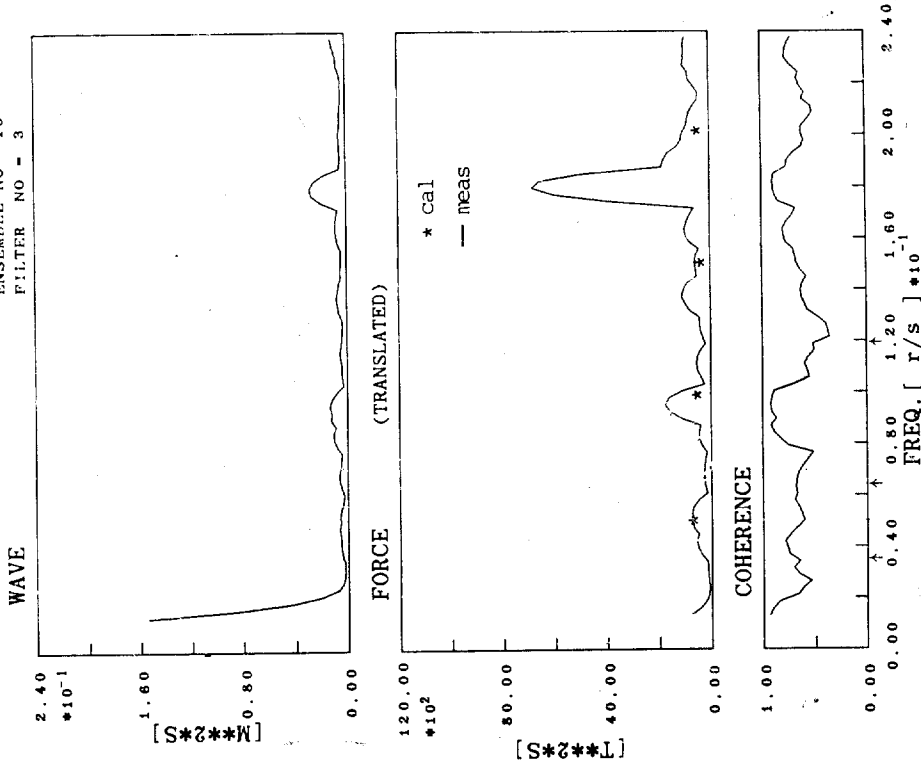


Fig. 20 Roll response in irregular beam waves

MEASURED SLOWLY VARYING FORCE : HEAD-SEA

HI/3 = 4.90 M
 Delta TIME = 1.162
 NO OF DATA = 2048
 Tmean = 8.30 SEC
 ENSEMBLE NO = 13
 FILTER NO = 3



†: Standing wave frequency

Fig. 22 Drift force in irregular beam waves

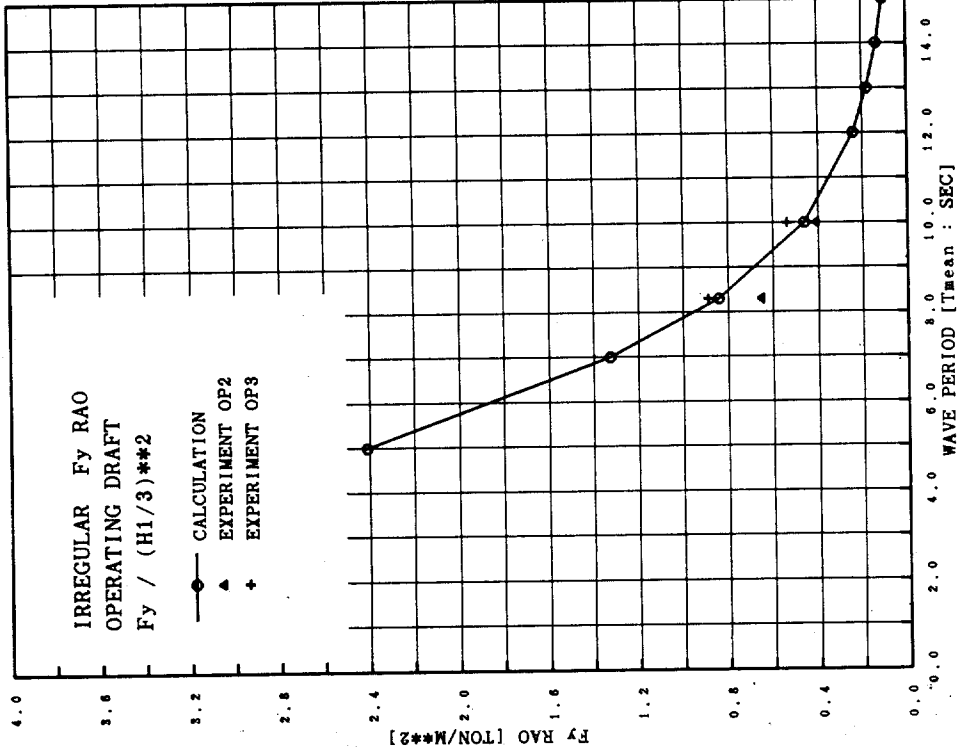


Fig. 23 Measured slowly varying force in irregular head waves

적일 것이라는 가정하에 파도와 표류력의 coherence를 구하여 예측치의 상관관계를 나타내었다. 파도스펙트럼이 $\omega=0.085$ rad/s에서 극값을 보이고 있으며 이는 조파기에 의해 생성된 비선형파 성분으로 추측된다. 그림에서 횡축의 \uparrow 는 정상파의 주파수를 나타낸 것으로 예측결과에서 정상파의 존재는 미미한 것으로 보인다. 천수파는 \sqrt{gh} 의 위상속도로 전진하며 이 조건에 대해 천수파의 주파수가 $\omega=0.067$ rad/s, 0.022 rad/s로 나타날 것이다. 예측결과 별 영향이 없는 것으로 보인다.

4. 결 론

1. 3차원 물체에 작용하는 장주기 표류력에 대한 수치계산용 전산프로그램이 소오스와 더블릿을 분포하고 near field 법에 의한 방법으로 개발되었으며, 마아지선에 대해서 소오스만을 분포하는 계산방법의 결과와 비교 계산결과 quadratic transfer function이 대체로 일치하는 것을 볼 수 있었으나 두 주파수의 차이가 작아지면서 일치도가 떨어지는 것으로 나타났다. 이는 두 계산법에 있어서 속도성분의 차이에 기인하는 것으로 생각된다.

2. 불규칙파중 반잠수식 시추선에 작용하는 장주기 표류력의 분포는 파도 스펙트럼의 평균주기에 따라 변하며 평균주기가 짧아질 수록 장주기 표류력의 분포가 저주파수로 집중하는 경향을 보인다.

3. 규칙파중 반잠수식 시추선에 대한 모형시험결과 평균표류력 예측치는 계산치와 좋은 상관관계를 보였으며 $\omega > 0.9$ rad/s의 고주파수 영역에서 정량적 차이는 계류스프링에 의한 영향으로 생각된다.

4. 장주기 표류력의 실험적 추정에 대해서는 보다 정밀한 시험장치가 요구되며 이에 대한 많은 연구가 기대된다.

후 기

본 논문은 과학기술처의 1987년 국가특정연구사업의 일환으로 한국기계연구소에서 수행된 "반잠수식 시추선의 설계기술개발 (II)" 과제 [13]의 결과중 일부를 밝히려 한다.

참 고 문 헌

[1] Maruo, H., "The Drift of a Body Floating on

- Waves," *J. Ship Res.*, Vol. 4, No. 3, 1960.
- [2] Newman, J.N., "The Drift Force and Moment on Ships in Waves," *J. Ship Res.*, Vol. 4, No. 3, 1960.
- [3] Faltinsen, O.M., A.E. Løken, "Drift Forces and Slowly-varying Forces on Ships and Offshore Structures in Waves", *Norw. Marit. Res.*, Vol. 6, No. 1, 1978.
- [4] Pinkster, J.A. and G. Van Oortmerssen, "Computation of the First and Second Order Wave Forces on Bodies Oscillating in Regular Waves", *Proc. 2nd Conf. Numer Ship Hydrodyn.*, Berkeley, 1976.
- [5] Bowers, E.C., "Long-period Oscillations of Moored Ships Subject to Short-waves Seas", *Trans. R. Inst. Nar. Archt.*, London, Vol. 118, 1976.
- [6] Mei, C.C., "The Applied Dynamics of Ocean Surface Waves", John Wiley & Sons, Inc., 1983.
- [7] Newman, J.N., "Second-order Slowly-varying Forces on Vessels in Irregular Waves", *Proc. Symp. Dyn. Mar. Vehicles Struct. in Waves*, Inst. Mar. Eng., London, 1974.
- [8] Pinkster, J.A., "Low Frequency Second Order Wave Exciting Forces on Floating Structures", NSMB, Wageningen, Rep. 650, 1980.
- [9] Hong, D.C., "On the Improved Green Integral Equation to the Water-wave Radiation-Diffraction Problem", *J. of Society of Naval Architects of Korea*, Vol. 24, No. 1, 1987.
- [10] 홍도천 외, "반잠수식 시추선의 설계기술 개발 (I)", 한국기계연구소 보고서 UCN076-929. D, 1987.
- [11] Standing, R.G. Dachuna, N.M.C. and Martten, R.B., "Slowly-varying Second-order Wave Forces: Theory and Experiment", NMI Rep. 138, Oct. 1981.
- [12] Dalzell, J.F., "Cross-bi-spectral Analysis: Application to Ship Resistance in Waves", *J. Ship Res.*, Vol. 18, No. 1, 1974.
- [13] 홍도천 외, "반잠수식 시추선의 설계기술 개발 (II)", 한국기계연구소보고서, 1988.