

장주기 표류운동의 감쇠력에 관한 연구

김현조*, 홍사영**, 김진하***

Experimental Study on Slow Drift Motion Damping

Hyun-Joe Kim*, Sa-Young Hong** and Jin-Ha Kim***

요 약

계류된 FPSO와 DP로 위치를 유지하는 셔틀탱커에 있어 장주기 표류운동의 특성은 매우 중요하다. 장주기 공진 운동 해석에 있어 표류감쇠력의 중요성은 아무리 강조해도 지나침이 없으나 감쇠력 발생의 원인이 너무도 다양하기 때문에 아직까지 이론에 의해 정확한 감쇠력을 추정하기가 어렵다. 따라서 모형시험을 통한 표류감쇠력을 이용하는 것이 시뮬레이션에서 장주기 운동예측치의 신뢰성을 높이는 방법이다.

본 논문에서는 FPSO, 셔틀탱커 등의 표류감쇠력의 실험 예측치를 구하기 위해 탱커 선형의 장주기 표류운동 감쇠력을 계측하였다. 파도, 바람, 조류 등에 의한 영향을 살펴보았으며 추진기 작동유무에 따른 장주기 운동감쇠력의 변화를 고찰하였다

※Keywords: 장주기 표류 운동(slow drift motion), 감쇠력(damping), 자동위치제어(dynamic positioning), 자유감쇠시험(free decay test), 모형시험(model test), 탱커(tanker), 파랑표류력(wave drift force), 파랑감쇠력(wave drift damping), 계류(mooring)

Abstract

In the present study, the amount of slow drift motion damping of shuttle tanker in still water and various environments is measured through free decay model test.

Although the estimation of slow drift damping is essential in analysing slow drift motion of moored FPSO or DP controlled shuttle tanker, it is difficult to predict damping accurately by theoretical analysis. The estimation of drift damping depends on model test mostly. Through the model test, the amount of slow drift damping is measured and the effects of environments and thruster action on drift damping are investigated. The measured damping characteristics are expected to be used in the analysis on slow drift motion of moored vessel.

접수일자: 2002년 5월 7일, 승인일자: 2002년 10월 21일

* 주저자, 정회원, 한국해양연구원 해양시스템안전연구소, 선임연구원(joe@kriso.re.kr)

** 정회원, 한국해양연구원 해양시스템안전연구소, 책임연구원(sayhong@kriso.re.kr)

*** 정회원, 한국해양연구원 해양시스템안전연구소, 선임연구원(jhakim@kriso.re.kr)

1. 서론

DP 혹은 계류삭에 의해서 계류된 부유체에서는 장주기 표류운동을 예측하는 것은 매우 중요하다. 특히, 감쇠력은 선박의 장주기 표류운동에 중요한 인자가 되므로 시뮬레이션을 통한 예측에 있어서 중요한 자료가 된다. 하지만, 이러한 감쇠력은 이론에 의해서 정확하게 추정하기 어렵기 때문에 감쇠력의 추정은 주로 모형시험에 의존하고 있다.

계류된 부유체에 있어서 감쇠력은 선체 표면에 의한 점성감쇠력, 조파 감쇠력, 계류삭에 의한 감쇠력, 바람에 의한 감쇠력 그리고, 파랑 표류 감쇠력으로 나눌 수 있다.

본 연구에서는 해양공학수조에서 파도,바람 그리고, 조류를 포함한 여러 환경조건하에서 자유감쇠시험을 수행하여 감쇠력을 구하고, 그 특성을 발표된 자료(Wichers,1988)와 비교하였다.

또한, 추진기가 작동하고 있는 경우에 대해서 추력 특성 및 감쇠력을 검토하여, DP 보조계류 시스템의 기본적인 특성을 파악하고자 하였다.

이러한 연구 결과는 본 연구소에 개발한 DP 시뮬레이션 프로그램인 'KDPSIM'(김현조 외,2000) 과 DP-계류 통합 시뮬레이션 프로그램인 'KDPMOOR'(홍사영 외,2001)의 저주파수운동 모델에 이용하여 시뮬레이션 결과의 신뢰성을 높일 수 있을 것으로 생각된다.

2. 모형시험 Set-up

2.1 Model 및 설치

대상선은 100K 셔틀탱커로서 모형선은 1/60의 축소모델로 L_{pp} 가 약 3.7m 이며, 자세한 주요치수는 Table 1에 잘 나타나 있다. Fig.1에서 볼 수 있듯이 풍력을 모사하기 위해서 상부구조물을 실제 선박과 같이 제작하였다. 선수와 선미에 각 1개씩의 tunnel thrust용 구멍이 있으며, 추진기의 영향을 고찰하기 위하여, 주추진기 및 선수부에 1개의 azimuth 추진기를 설치하였다. 경사시험과 inertia 계측시험을 통해서 2.5% 의 오차로 무게 중심 및 pitch radius of gyration을 실선값에 상

사시켰다.

Fig.2에서는 규칙파중에서 파랑표류력을 계측하고 있는 모습을 볼 수 있다.

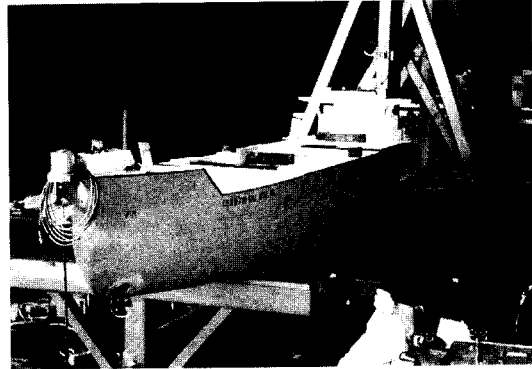


Fig. 1 Model shuttle tanker

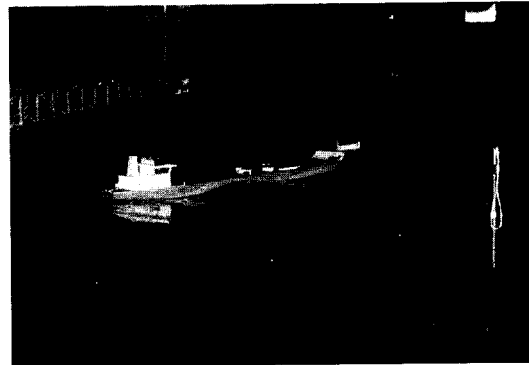


Fig. 2 Scene of model test in regular wave

Table 1 Principal dimensions of model tanker

Designation	Unit	Model
Loading Condition	-	Full Load
L_{pp}	m	3.72
B	m	0.7
T	m	0.252
Δ	kg	546.
K_{xx}	m	0.245
K_{yy}	m	0.9292

모형시험은 해양공학연구원 해양공학수조에서 수행되었다.

Fig.3 에서는 표류력 계측 및 자유감쇠 시험을 위한 모형선의 설치에 대한 개념도를 볼 수 있다.

파도의 입사방향에 평행하게 앞과 뒤에 pole을 세우고 그 사이에 선형스프링을 이용하여 모형선을 설치하였다. 선형스프링에 1축 로드셀을 설치하여 힘을 계측하였으며, 모형선에 7개의 가속도계를 설치하여 strap-down 방법을 이용하여 파도 중의 운동을 계측할 수 있게 하였다(홍사영외, 1992). 추진기에 의한 추력은 모형추진기의 크기에 대한 제약으로 직접 계측하지 않고 모형선에 작용하는 힘을 계측하여 추력과 동일하다고 가정하였다.

자유감쇠 운동시험시 신호선의 영향을 최소화하기 위해서 계측시스템을 모형선에 탑재하고 무선으로 신호를 계측하였다.

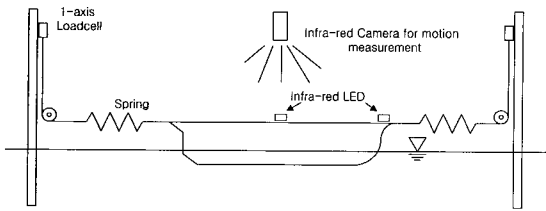


Fig.3 Schematic diagram of test set-up

2.2 환경조건

Table 2, 3, 4에 모형시험에서 사용한 규칙파, 조류 그리고 바람에 대한 시험 조건 및 계측 값이 나와있다.

Table 2 Regular wave conditions

No	$w_s^{*1)}$ (rad/sec)	$w_M^{*2)}$ (rad/sec)	λ_M (m)	H/λ	Target H_s (m)	Measured H_s (m)
1	0.4	3.098	6.420	1/50	7.704	7.518
2	0.5	3.873	4.108	1/50	4.932	3.888
3	0.6	4.648	2.852	1/50	3.42	3.438
4	0.7	5.422	2.096	1/41.9	3.00	2.712
5	0.8	6.198	1.604	1/32.1	3.00	3.120

*1),*2) s 는 실선, M 은 model을 뜻한다.

Table 3 Measured current velocities

RPM of current generator	Measured current velocity	
	model(cm/s)	prototype (m/s)
177	5.709	0.442
295	9.085	0.704
530	18.859	1.461

Table 4 Measured wind velocities

RPM of wind generator	Measured current velocity	
	model(cm/s)	prototype (m/s)
27.4 %	1.715	13.28
34.3 %	2.143	16.60

3. 규칙파 중 파랑 표류력 계측

선수 규칙파중의 파랑 표류력을 계측하였다. 규칙파의 조건은 Table 2에 나타나 있다.

Fig.4 에서는 계측된 파랑 표류력과 9 node를 이용한 고차경계요소법(최윤락,1997)으로 계산한 결과와 비교하였으며, 실험결과와 계산결과가 일치함을 알 수 있다.

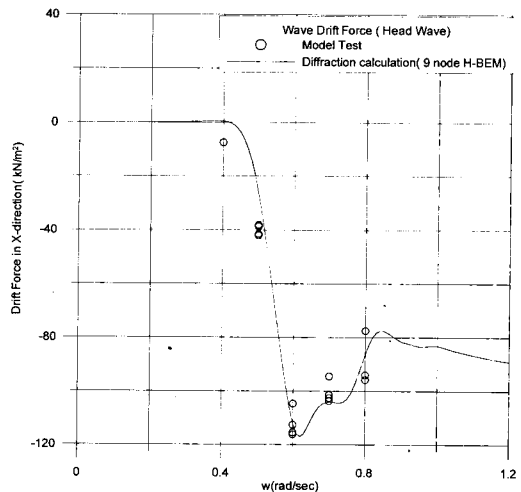


Fig. 4 Comparison of measured and calculated wave drift force

4. 자유감쇠 운동시험

4.1 정수중 자유감쇠 운동시험

정수중에서 자유감쇠하는 선박의 운동방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$(M + a_{11}(\mu_1))\ddot{x}_1 = -B_{11}(\mu_1)\dot{x}_1 - B_{112}(\mu_1)\dot{x}_1|\dot{x}_1| - c_{11}x_1 \quad (1)$$

여기서, M 은 질량, a_{11} 는 부가질량, μ_1 은 surge 운동의 고유진동수이다.

자유감쇠시험의 결과로서 하나의 시계열이 Fig.5 에 나타나 있다.

여기서, 대변위 surge 운동의 경우 점성감쇠력은 저주파수 속도에 비례한다고 할 수 있다. ($B_{112}(\mu_1) \sim 0$) 이런 경우 선형 점성 계수 (B_{11})는 시스템이 작은 감쇠력을 가진다는 가정 하에 다음과 같이 표현될 수 있다(Hooff,1982).

$$B_{11} = \frac{\delta \sqrt{c_{11}(M + a_{11})}}{\pi} \quad \text{또는} \quad B_{11} = \frac{\delta c_{11}}{\pi \mu_1} \quad (2)$$

여기서, δ 는 logarithmic decrement 로서, 일정한 값을 가지며, 다음과 같이 표현된다.

$$\delta = \frac{\ln x_1 - \ln x_{N+1}}{N} \quad (3)$$

N 은 number of oscillation 이다.

본 연구에서는 계측한 힘의 시계열을 이용하여 logarithmic decrement를 구하였으며, 이 때 스프링 상수는 실선에서 191.86 kN/m 이다.

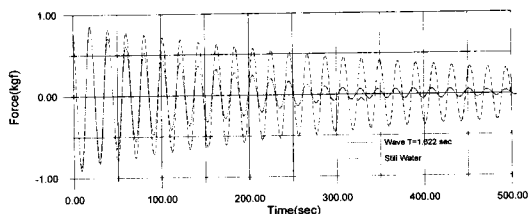


Fig. 5 An example of result of free decay test

모형 스케일에서 구한 점성감쇠계수는 Froude's scale에 따라서 실선 스케일로 바꾸었다. 점성 감쇠력의 경우 실선과 모형선 사이의 상관관계는 아직 뚜렷하게 밝혀지지 않았으며, 추후 연구가 필요할 것으로 생각된다(Wichers,1994).

Fig.6 에서는 정수중에서의 surge 방향의 자유감쇠 시험에 대한 결과를 나타내었다. 4번의 시험 결과가 잘 일치하고 있으며, 평균값이 7.226 tf s/m 로 나왔다. 이 값을 Wichers(1988)에서 나온 감쇠계수와 비교하였다(Fig.7).

Laminar flow에서 surge 방향으로 oscillating하는 탱커에 작용하는 저항은 다음과 같이 표현된다(Wichers,1988).

$$X_1 = \rho \sqrt{\mu \nu} S v_{1a} \cos\left(\frac{\pi}{4} - \omega t\right) \quad (4)$$

여기서, $\rho = 0.1045 \text{ tf s}^2 / \text{m}^4$

$\nu = 1.18831 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

S = wetted surface \approx

$$(3.4 \cdot \nabla^{1/3} + 0.515 \cdot L) \nabla^{1/3}$$

∇ = displacement in m^3

L = length between perpendiculars

따라서, 감쇠계수는 $\rho \sqrt{\mu \nu} S$ 가 된다.

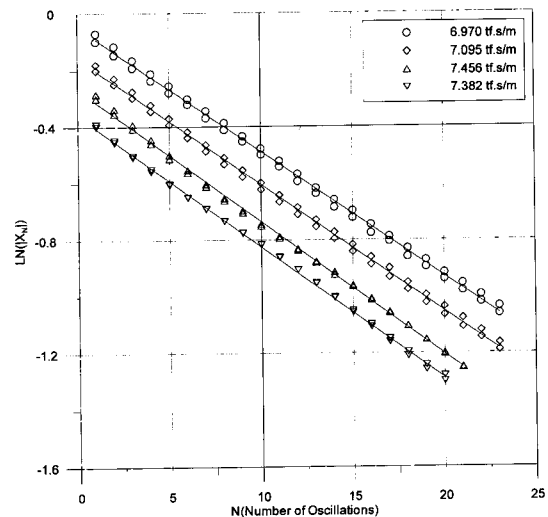


Fig. 6 Results of decaying surge motion in still water

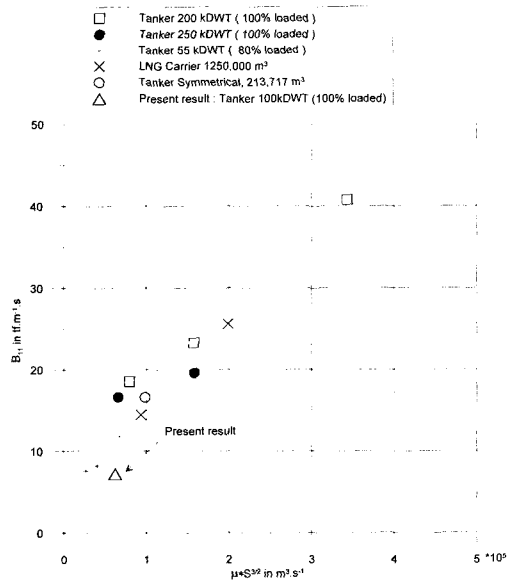


Fig. 7 Measured viscous damping coefficients for surge mode of motion(Wichers(1988))

이 식을 모형선에 적용하면 $S=3.7898 \text{ m}^2$, $\mu = 0.3040$ 이고, Froude's scale로 실선으로 확장하면 6.639 tf s/m 가 나온다. 예측한 감쇠력과 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

4.2 규칙파중 자유감쇠 운동시험

Fig.8에서는 규칙파중에서의 surge 방향의 자유 감쇠 시험에 대한 결과가 나와 있다.

규칙파중에서 자유감쇠하는 선박에서는 총 감쇠 계수에서 점성에 의한 감쇠계수를 제외하고 남은 것을 파도에 기인한 것이라고 가정할 수 있다. 파도에 기인하는 감쇠계수는 파도의 진폭의 제곱에 비례한다고 알려져 있으며, 파랑 표류 감쇠력 (wave drift damping) 이라고 한다 (Wichers, 1988).

파랑 표류 감쇠력의 전달함수는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{B_1(\omega)}{\zeta_a^2} = -\frac{1}{\zeta_a^2} \frac{\partial X}{\partial \dot{x}_1} \Big|_{x=0} \quad (5)$$

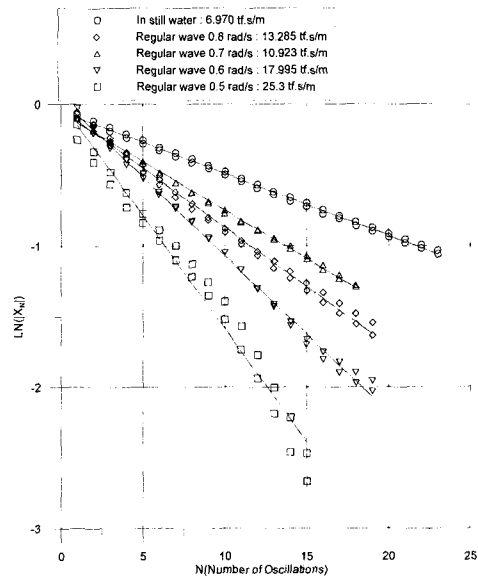


Fig. 8 Results of decaying surge motion in regular waves

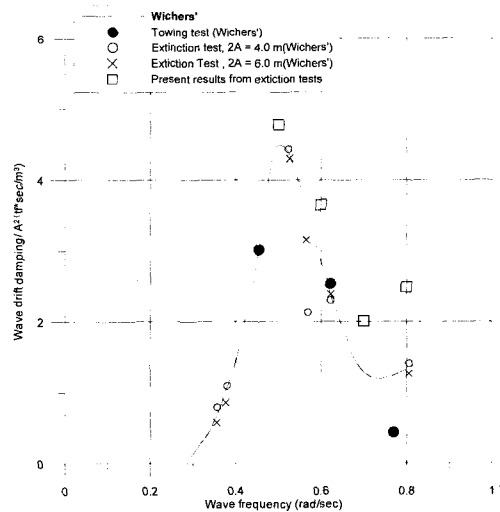


Fig. 9 Wave drift damping transfer function

Fig. 9에서는 자유감쇠시험을 통하여 구한 wave drift damping과 Wichers(1988)의 결과를 비교하였다. 주파수에 따른 경향이 일치하고 있음을 알 수 있다.

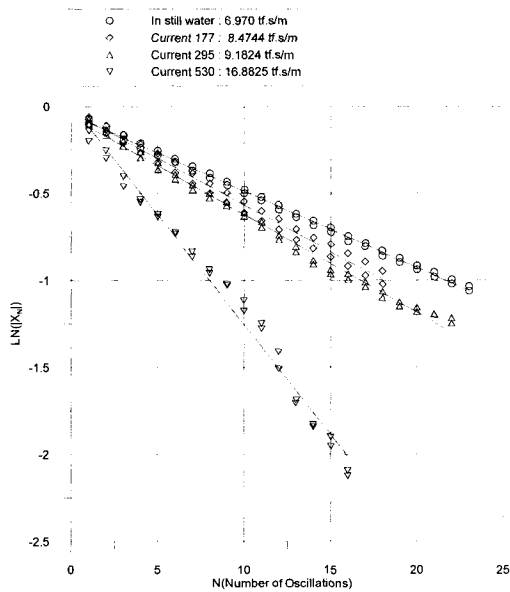


Fig. 10 Results of decaying surge motion in current

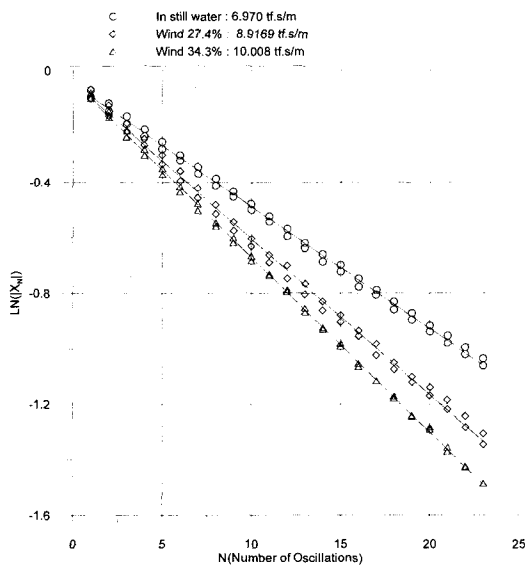


Fig. 11 Results of decaying surge motion in wind

4.3 조류와 바람중에서의 자유감쇠 운동시험

Fig.10, 11에는 선수 조류와 바람이 있는 경우에 대하여 surge 방향의 자유감쇠 시험에 대한 결과를 나타내었다. 시험에 사용한 조류 및 바람의 조건은 Table 3,4에 나타나 있다.

4.4 추진기 작동시 자유감쇠 운동시험

자유감쇠 운동시험에 앞서 규칙파 및 조류중에서의 추력계측 시험을 수행하였다.

규칙파중에서는 주추진기 및 azimuth 추진기 모두 정수중에서의 추력과 큰 차이점을 보이지 않았다. 모형선의 loading 상태가 full load 이기 때문에 자유수면에 의한 효과가 없으며, 파도에 대한 영향도 크지 않았던 것으로 생각된다.

조류중에서의 추력은 회전수 및 조류속도에 따라 10~20%의 감소가 있음을 알 수 있었다.

자세한 결과는 홍사영 외(2000)에 나와 있다.

Fig.12과 Fig.13에서는 주추진기와 선수부 azimuth 추진기가 일정한 회전수로 움직이고 있을 경우에 대해서 surge 방향의 자유감쇠 운동시험에 대한 결과를 나타내었다. 결과를 보면 주추진기와 azimuth 추진기의 회전수가 증가하면서 감쇠력이 증가함을 알 수 있다.

일반적으로 시뮬레이션에서는 이러한 추진기의 작용에 의한 추가적인 감쇠력이 고려되지 않고 있다. 이러한 추진기의 작용에 의한 감쇠력은 저주파수 표류운동을 감소시키는데 불규칙파중의 시험에서 더욱 명확하게 나타났다(홍사영외,2000).

DP와 계류삭을 같이 사용하는 DP 보조 계류시에 추진기는 full DP 모드로 위치를 유지하거나 속도 게인만 사용하여 감쇠력으로 작동하게 된다. 이때 추진기의 운전에 의해서 추가적인 감쇠력이 발생한다고 예상할 수 있다. 또한, 단지 일정한 회전수로 추진기를 움직임으로써 평균 offset과 저주파수 표류운동을 감소시킬 수 있다고 생각된다.

이를 위해서는 추진기와 감쇠력에 대한 상관관계를 찾아내기 위한 추가적인 연구가 필요할 것으로 생각된다.

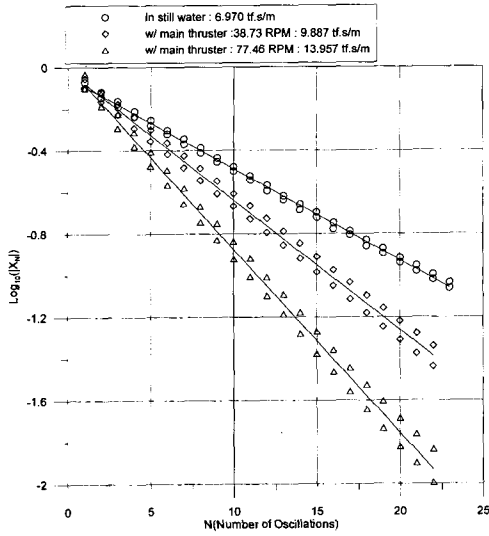


Fig. 12 Results of decaying surge motion in still water with main thruster

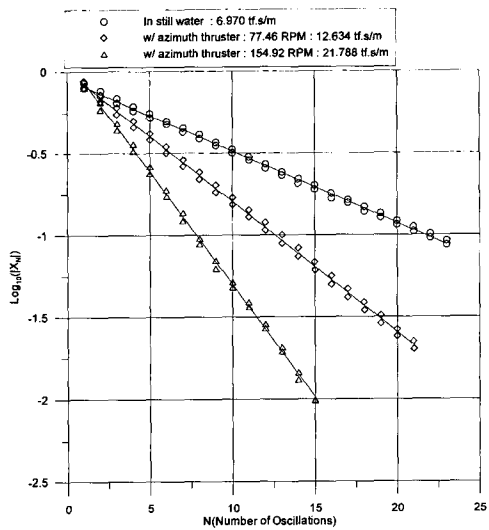


Fig. 13 Results of decaying surge motion in still water with azimuth thruster

5. 결론

본 연구에서는 여러 환경 조건 하에서 일련의 자유감쇠시험을 통해서 탱커에 작용하는 감쇠력을 계측하여 감쇠력의 특성을 파악하였다. 아울러, 규

칙파중에서 파랑 표류력을 계측하여 고차경계요소 법으로 계산한 결과와 비교하여 잘 일치함을 확인하였다. 또한, 정수중, 규칙파중, 조류중의 추진기력을 계측하여 추력의 변화를 검토하였다.

이와 같은 일련의 시험을 통하여 다음과 같은 사실을 확인하였다.

(1) 자유감쇠운동시험을 통해서 여러 환경외력이 선수방향으로 작용하고 있을 때의 감쇠력은 정수중과 각 환경조건에 대한 감쇠계수의 선형함수로 나타낼 수 있다.

(2) 본 시험에서 규칙파중의 추진기 감소는 거의 나타나지 않았다. 이것은 모형선의 loading condition이 full load 상태이기 때문에 자유수면이나 파도에 의한 간섭이 작았던 것으로 생각된다.

조류중에서는 선수 조류인 경우에도 조류의 속도와 추진기의 회전수에 따라서 10~20 %의 추력감소가 발생함을 알 수 있었다.

(3) 추진기가 일정한 회전수로 작동하고 있을 때 감쇠력이 발생하며, 시뮬레이션을 통해서 장주기 표류운동을 예측하는 경우에 이러한 부가적인 감쇠력을 추가해야 할 것으로 생각된다.

(4) 파도 표류 감쇠력을 자유감쇠 시험을 통하여 계측하였으며, Wichers(1988)의 결과와 비교하였다. 주파수에 따른 경향은 일치하고 있으나 추가적인 시험이 필요하다.

시뮬레이션 모델을 이용하여 좀 더 정확하게 장주기 표류운동을 예측하기 위해서는 많은 데이터의 축적이 필요하며, 따라서, 앞으로 여러 선박에 대한 추가적인 시험이 요구된다.

또한, 본 연구에서 수행한 surge 방향의 감쇠력 이외에도, sway, yaw 방향에 대한 감쇠력을 계측하는 시험이 필요할 것으로 사료된다. 그리고, 감쇠력에 대한 실선과 모형선의 상관관계에 대한 연구도 수행되어야 할 것이다.

후 기

본 연구는 과학기술부가 지원한 기본연구사업 “계류 부유구조물의 계류성능 평가기법 고도화(I)”의 결과 중 일부임을 밝힌다.

참 고 문 헌

- 김현조 외, 2000, KDPSIM 사용자 설명서, 한국해양연구원
- 최윤락, 1997, *고차경계 요소법을 이용한 2차항 파랑하중 해석*, 박사학위논문, 서울대학교
- 홍사영 외, 2000, 계류 부유구조물의 계류성능 평가기법 고도화(I), 한국해양연구원 보고서
- 홍사영 외, 2001, KDPMOOR 사용자 설명서, 한국해양연구원
- 홍사영 외, 1992, 실선 운동계측 시스템 개발, 대한조선학회논문집, 제29권, 제3호, pp. 125-130

- Hoof, J.P.,1982, *Advanced dynamics of marine structures*, Wiley-Interscience Inc., New York
- Wichers, J.E.W.,1988, *A simulation model for a single point moored tanker*, MARIN, Netherlands, Publication No. 797
- Wichers, J.E.W., Dercksen, Albert,1994, "Investigation into scale effects on motions and mooring forces of a turret-moored tanker", OTC 7444, Houston, USA



< 김 현 조 >



< 홍 사 영 >



< 김 진 하 >