

大韓造船學會論文集
 第 37 卷 第 1 號 2000年 2月
 Journal of the Society of
 Naval Architects of Korea
 Vol. 37, No. 1, February 2000

평수중 자유 횡동요 시험에 의한 소형어선의 횡동요 감쇠모멘트에 관한 연구

전호환*, 천승현**, 김시영***

Roll Damping Moment of a Small Fishing Vessel by Free Rolling Test in Calm Water

by

H.H. Chun*, S.H. Chun** and S.Y. Kim***

요 약

3톤급 소형어선의 나선, 빌지킬 및 중앙날개(central wing)가 부착된 상태의 3가지 모델에 대해 평수중에서 속도 변화, 초기각의 변화 및 OG(무게중심과 횡동요 중심간의 거리)의 변화에 따른 횡동요 감쇠시험에 의해 감쇠특성을 비교하였다. 또한 에너지법에 의해 선형 및 비선형속도 항에 의존하는 횡동요 감쇠모멘트를 수식화하여 시험값과 비교하였으며 3가지 모델에 대한 에너지 발산 형태도 비교하였다.

Abstract

The roll damping characteristics of the three models of a 3 ton class fishing vessel such as the bare hull, hull with bilge keels, and hull with bilge keels and a central wing are investigated by the free roll tests in calm water in a towing tank with the variations of the forward speed, initial angle and OG. The experimental results are compared with the numerical results of mathematical modellings by the energy method for these three models and the energy dissipation patterns are also compared.

발 표 : 1998년도 대한조선학회 추계연구발표회('98. 11. 14.)

접수일자 : 1998년 12월 7일, 재접수일자 : 1999년 6월 26일

*정회원, 부산대학교 조선해양공학과 (기계기술연구소)

**학생회원, 부산대학교 조선해양공학과 대학원

*** 정회원 부경대학교 제어기계공학과

1. 서론

어선의 대부분을 차지하는 총톤수 20톤 미만의 소형어선은 전복에 의한 해난사고가 대부분이다. 선박의 전복은 과도한 횡동요(roll)에 의해 발생하며 횡운동을 억제하기 위해서 선형의 개량, 빌지킬(bilge keel) 및 stabilizing 핀 부착, stabilizing 탱크(tank)의 설치 등 여러 가지 방법이 강구되어져 왔다[1].

본 논문은 소형어선의 전복방지 메카니즘 개발 연구의 일환[2]으로 선저중앙부에 날개-플랩(wing-flap)시스템을 부착하여 횡운동을 제어하는 연구 중 중앙날개(central wing)가 부착되었을 때 미치는 횡운동 감쇠모멘트에 관한 시험적 및 수치적 연구결과이다.

소형어선의 횡동요특성에 관한 연구는 Tanaka et al.[3,4,5], Bass & Haddara[6], Haddara & Bass[7] 등이 있다. Tanaka et al.[3]은 수조에서 4가지 선형에 대한 강제 동요시험으로 OG(무계중심과 횡동요중심사이의 거리), 속도 및 선형이 횡동요감쇠력에 미치는 영향을 연구하였다. 또한 모형선과 실선의 데이터가 비교적 일치하여 축척비의 효과는 무시할 수 있다는 결론을 내리고 모형선 시험에 의한 실선의 횡동요 특성을 비교적 정확히 예측할 수 있다고 하였다.

Bass & Haddara[6]는 정수중에서 자유횡동요 감쇠시험에 의해 3가지 선형에 대한 횡동요 감쇠계수 및 좌우동요(sway)-횡운동 중첩 감쇠계수를 구하였다. 또한 Tanaka et al.[3]과 같이 횡운동 감쇠는 OG에 많은 영향을 받는다고 하였다.

Haddara & Bass[7]는 소형어선의 횡동요 감쇠모멘트를 횡동요각(angle) 및 속도에 의존하는 4가지형태의 모델로 수식화하고 시험결과와 비교하여 잘 일치함을 보였다.

국내에서 어선의 횡동요 감쇠에 대한 연구는 거의 없으나, 권[8,9]은 확률론적인 접근방법으로 1차 및 3차의 속도항의 결합식으로 일반선박의 횡동요에 관한 연구를 수행한 바 있다.

본 논문에서는 3등급 소형어선의 나선(bare hull), 빌지킬 및 중앙날개가 부착된 3가지모델에

대해 예인수조에서 정수중에서 자유 횡동요 감쇠 시험을 수행하여 속도의 변화, 초기각의 변화 및 OG의 변화 등이 3가지 모델의 횡동요 감쇠특성에 미치는 영향을 조사하였다. 또한 Haddara & Bass[7]가 제시한 이론적 추정 방법 중 1차 및 2차속도항의 결합, 1차 및 3차 속도항의 결합에 의한 횡동요 감쇠를 추정하고 시험결과와 비교하였고, 에너지법을 이용해서 3가지 모델에 대한 에너지 발산형태도 비교하였다.

2. 에너지법에 의한 횡동요 감쇠계수결정법

Haddara & Bass[7]가 제시한 에너지 접근법을 사용해서 횡동요감쇠곡선을 해석하였다. 횡동요중심 0점에 대한 자유횡동요에 대한 운동방정식은 다음과 같이 둘 수 있다.

$$\ddot{\phi} + B(\phi, \dot{\phi}) + D(\phi) = 0 \quad (1)$$

여기에서 ϕ 는 횡동요각이고, $B(\phi, \dot{\phi})$ 는 단위 관성모멘트당 감쇠모멘트이며, $D(\phi)$ 는 단위 관성모멘트당 복원모멘트이다. 상위첨자는 시간에 대한 미분이다.

감쇠에서 횡동요와 좌우동요에 의한 효과를 분리하기 위해 $B(\phi, \dot{\phi})$ 는 아래와 같이 표시될 수 있다.

$$B(\phi, \dot{\phi}) = B_{44}^G + OG(B_{42}^G + B_{24}^G)$$

B_{44}^G 는 순수한 횡동요 감쇠모멘트이고, B_{24}^G 는 횡동요로 인한 좌우동요감쇠계수인데 횡동요속도로 인해서 G에 작용하는 힘을 증가시킨다. 그리고, B_{42}^G 는 O에 대해 구속된 횡동요에 의해 유기되는 좌우동요속도로 인해서 O에 대한 모멘트와 연관되는 좌우동요로 인한 횡동요 감쇠계수이다.

식(1)에 $\dot{\phi}$ 를 곱하고 재배열시키면 아래식을 얻을 수 있다.

$$\frac{d}{dt}[0.5\dot{\phi}^2 + G(\phi)] = -B(\dot{\phi}, \phi)\dot{\phi} \quad (2)$$

$$\text{여기서} \quad G(\phi) = \int_0^{\phi} D(x) dx$$

그리고, 에너지 $V(t)$ 와 에너지변화 $h(t)$ 를

다음으로 두면 $V(t) = 0.5\dot{\phi}^2 + G(\phi)$
 $h(t) = V(t+dt) - V(t)$

식(2)는 다음과 같이 된다.

$$h(t) = - \int_t^{t+dt} B(\phi, \dot{\phi}) \dot{\phi} dt \quad (3)$$

Haddara & Bass[7]는 다음의 속력에 의존하는 비선형 감쇠모멘트 식을 사용하였다.

i) 1차 및 2차속도항의 결합 :

$$B_1(\phi, \dot{\phi}) = 2\xi_1 w_\phi (1 + \varepsilon_1 |\dot{\phi}|) \dot{\phi} \quad (4a)$$

ii) 1차 및 3차속도항의 결합 :

$$B_2(\phi, \dot{\phi}) = 2\xi_2 w_\phi (1 + \varepsilon_2 \dot{\phi}^2) \dot{\phi} \quad (4b)$$

w_ϕ 는 고유주파수이고, ξ_1, ξ_2 는 무차원화된 선형감쇠계수이고 $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ 는 비선형값이다. 이 형태중 어느 하나를 사용해서 식(3)은 다음과 같이 될 수 있다.

$$h(t) = \zeta_k u_1(t) + \varepsilon_k u_{k+1}(t), k=1,2 \quad (5)$$

여기서

$$u_1(t) = -2w_\phi \int_t^{t+dt} \dot{\phi}^2 dt$$

$$u_2(t) = -2w_\phi \int_t^{t+dt} |\dot{\phi}| \dot{\phi}^2 dt$$

$$u_3(t) = -2w_\phi \int_t^{t+dt} \dot{\phi}^4 dt$$

매순간 t 마다 $h(t), u_k(t)$ 를 계산하고 ζ_k, ε_k 는 최소자승법을 사용해서 구할 수 있다.

식(5)는 시간 dt 동안 감쇠모멘트에 의한 에너지 분산량과 선박의 에너지 손실 사이의 등식을 나타내고 있다. 일반적인 averaging technique에서 식(5)는 보통 반주기에 걸쳐 평균화된다. 따라서 식(5)를 사용해서 얻어진 감쇠계수의 값은 실제 에너지 발산 메카니즘을 보여주고 있다.

3. 실험 및 고찰

시험에 사용된 선박은 국내에서 많이 사용되는 총톤수 3톤급 소형어선으로서 큰 스케그(skag)가

있으며 hard chine을 가지고 있는 전형적인 어선이다. Table 1에 주요제원을 보였고 Fig.1에 빌지킬 및 중앙날개가 부착된 정면도를 보였다.

Table 1 Particulars of the fishing vessel

Disp. vol(m^3)	7.56
LWL(m)	7.9
Beam(m)	2.35
Draft(m)	0.73
LCB(m)	-0.44624

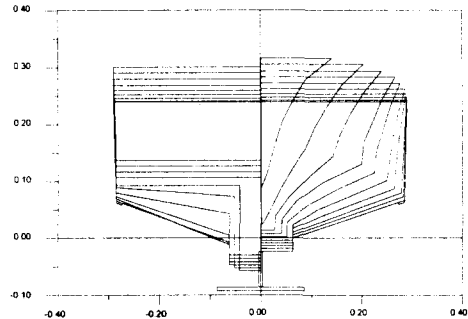
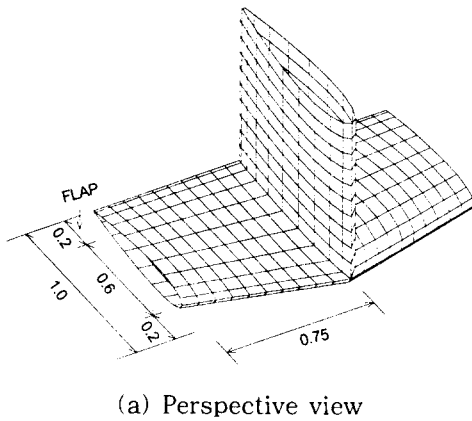


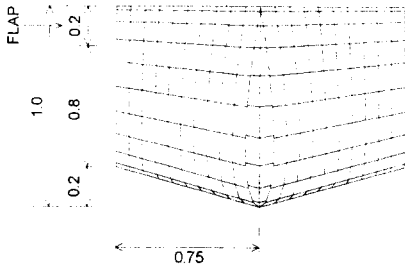
Fig.1 Body plan for fishing vessel with B.K. and central wing (model scale, unit in meter)

중앙날개의 코드(chord)는 중앙부가 1m, 끝(tip)에서는 0.8m이고 스패ן(span)은 0.75m이다(Fig.2 참조). 횡동요운동을 제어하기 위해서 0.2m의 코드를 가지는 플랩(Flap)을 부착하였으며 날개의 단면은 NACA0015로 하였다. 날개는 선박의 스케그와 평행하게 부착하였으며 이는 플랩각을 0° 로 하였을 때 날개에 의한 양력을 0으로 하기 위함이다. 길이방향으로는 LCG(길이방향으로 midship에서 -10cm)와 양력중심이 일치하도록 부착하였으며 높이는 조절할 수 있으나 본 시험에서는 0.38m로 고정하였다.

빌지킬은 선미에서 5 스테이션(station)까지 높이가 0.06m, 폭이 0.07m로 균일하게 hard chine에 일직선으로 부착되었고 그 이후로 점점 줄어들어 8 스테이션에서 선체와 일치되는 형상이다.



(a) Perspective view



(b) Top view

Fig. 2 Dimension of the wing flap design (unit in meters)

1/4축척의 나무로 모형선을 제작하여 정수중에서 정지중 및 5개의 속도에 대해 5개의 OG 및 6개의 경사각에 대해 횡동요 자유 감쇠시험을 수행하였다. 6분력 운동계측기를 사용하여 모형선의 부착점(O)을 이동시켰으며 OG는 계측기의 부착점과 중력중심간의 거리이다(G로부터 상방향을 +로 하였음). 연직운동(heave)과 횡동요만 자유로이 하고 그 외의 운동은 구속하였고 시험조건은 Table 2에 도시하였다.

3.1 전진속도가 없을 경우

나선, 빌지킬, 중앙날개가 부착된 3가지 모델에 대해 정지상태에서 Table 2에 보여주는 바와 같이 5개의 OG/d(여기서 d는 홀수임)변화에 대해 각각 5개의 초기경사각을 변화해가며 자유감쇠

Table 2 Test conditions for fishing vessel

	OG/d	Initial angle (deg.)	Fn	Test No.
Stationary in Clam Water	0.142	4, 8, 12, 16, 20	0	25
	0.510			
	0.674			
	0.811			
	1.058			
Speed in Calm Water	0.142	12	0, 0.1, 0.18, 0.2, 0.3, 0.4	12
	1.058			

시험을 수행하여 분석하였다.

Fig.3, 4 및 5는 나선, 빌지킬, 빌지킬 및 중앙날개가 부착되었을 경우 대표적으로 2개의 OG의 변화에 대한 시험값과 앞절에서 언급한 방법에 의한 추정값을 비교하고 있다. 초기경사각은 모두 8°로 하였다. 감쇠가 큰 빌지킬 및 날개가 부착된 경우를 제외하고는 1차와 2차 혹은 1차와 3차 속도항의 결합으로 표시한 횡동요 감쇠모멘트에 의한 측정값이 시험값과 잘 일치하고 있다. 감쇠가 큰 경우에는 속도보다는 경사각의 함수로 감쇠모멘트를 추정하는 것이 시험값과 보다 더 잘 일치함을 보고한 바 있다[7].

Fig.6은 나선일 때 5개의 OG/d(여기서 d는 모형선의 홀수)값에 대해서 무차원 선형감쇠계수(ζ)를 초기경사각의 함수로 보여주고 있다. 여기서 $\zeta = B / (2 \times \omega_\phi)$ 이고 ω_ϕ 는 횡동요 고유진동수이다.

그림에서 보는 바와 같이 OG가 증가할수록 또한 초기각이 증가할수록 감쇠계수값도 증가함을 알 수 있다. OG의 증가로 감쇠계수값이 증가하는 이유는 Tanaka et al.[3]에 언급된 바와 같이 OG가 증가할수록 와(vortex)를 발생하는 빌지킬과 스케그 선단의 운동속도가 횡운동의 중심이 높은 만큼 크게 되는 것 및 선체표면에 작용하는 압력의 모멘트 길이(lever)가 크게 됨에 기인되는 조와성분의 증대가 주요인이라고 생각된다.

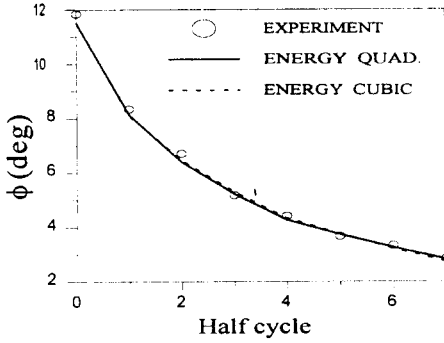


Fig. 3-a (OG/d = 0.142)

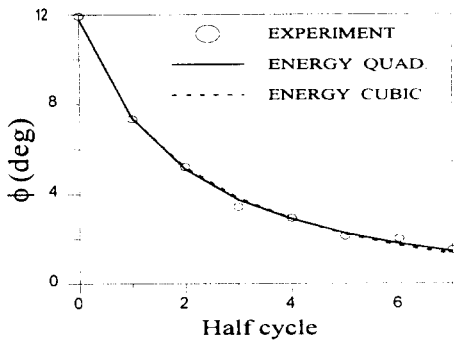


Fig. 3-b (OG/d = 1.058)

Fig. 3 Comparison between experiment and energy approach(bare hull)

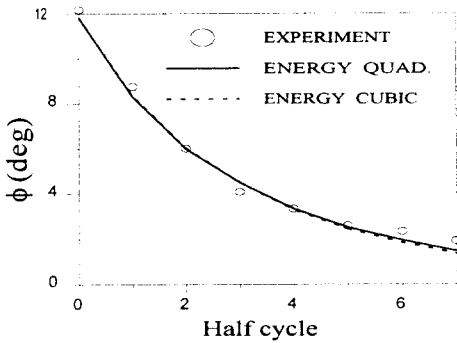


Fig. 4-a (OG/d = 0.142)

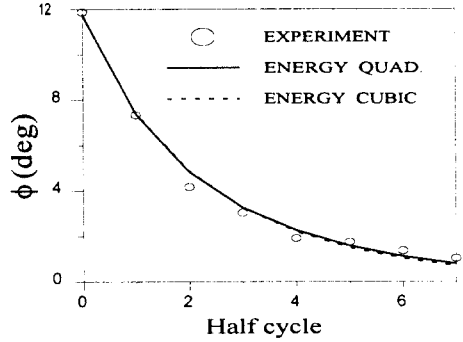


Fig. 4-b (OG/d = 1.058)

Fig. 4 Comparison between experiment and energy approach(hull with B.K.)

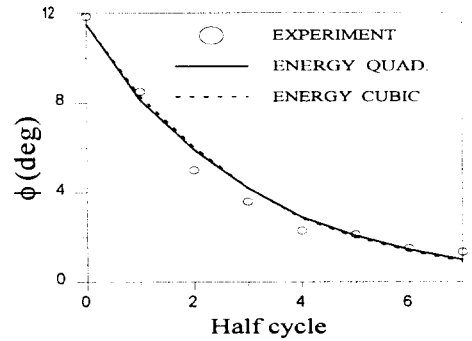


Fig. 5-a (OG/d = 0.142)

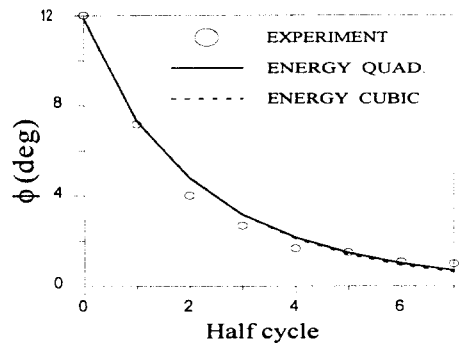


Fig. 5-b (OG/d = 1.058)

Fig. 5 Comparison between experiment and energy approach (hull with B.K. and wing)

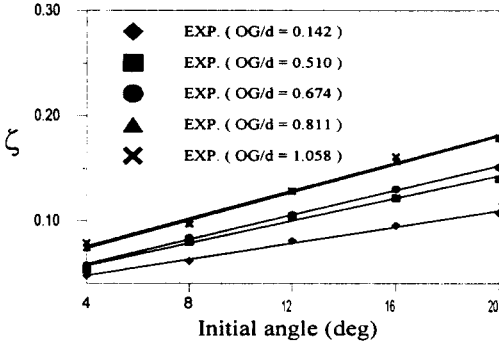


Fig. 6 ζ vs roll angle (bare hull)

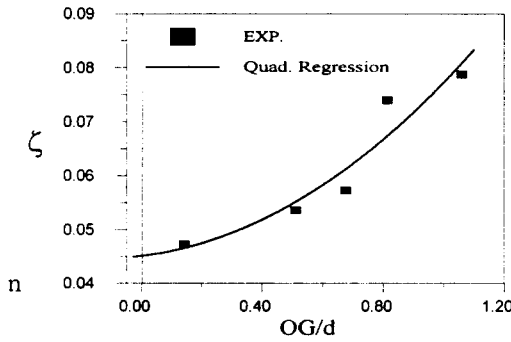


Fig. 7 ζ vs OG (bare hull, $\phi_0 = 8$ deg)

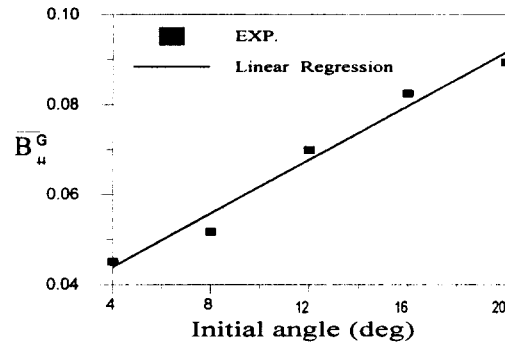


Fig. 8 \overline{B}_{44}^G vs roll angle (bare hull)

Fig.7은 나선에 대해 초기각 $\phi_0 = 8^\circ$ 인 경우 OG변화에 따른 ζ 의 변화를 보여주고 있으며 2차식으로 근사화한 곡선도 보여주고 있다. 이 그림으로부터 OG = 0인 경우에 \overline{B}_{44}^G (OG=0일 때의 ζ 값)를 구할 수 있음을 알 수 있고, 다른

초기각에 대해서도 같은 방법으로 구할 수 있으며 이를 Fig.8에 보였다. 횡동요 감쇠계수는 경사각에 선형적으로 비례함을 볼 수 있으며 이는 다른 연구 결과(3,6,7)에서도 밝혀진 사실과 같다.

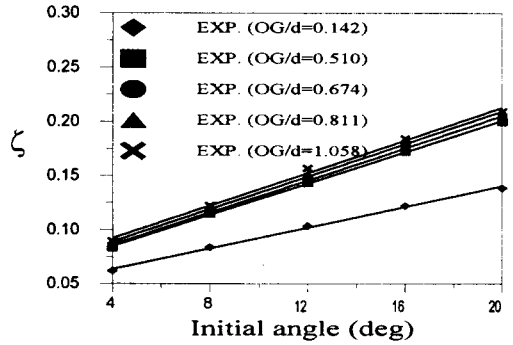


Fig. 9 ζ vs roll angle (hull with B.K.)

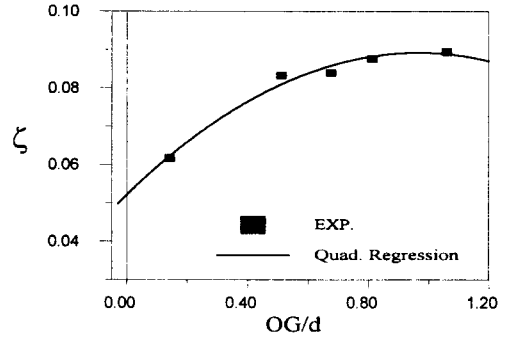


Fig. 10 ζ vs OG(hull with B.K., $\phi_0 = 8$ deg)

Fig.9 및 10은 빌지킬이 부착되었을 경우 초기경사각에 대한 ζ 의 값과 OG변화에 대한 ζ 값의 변화를 보여주며, Fig.11과 12는 빌지킬과 중앙날개가 부착된 경우의 값들을 보여주고 있다. Fig.13은 3모델에 대한 \overline{B}_{44}^G 를 비교하고 있으며 예상한대로 빌지킬, 빌지킬 및 중앙날개가 부착된 순서대로 \overline{B}_{44}^G 가 급격히 증가하고 있으며, 또한 그 순서대로 경사각에 대한 기울기가 증가함을 보여주고 있다. 3모델에 대한 에너지 변화량을 보면 (Fig.14) 빌지킬의 부착이 많은 에너지를 방출하고 있음을 알 수 있다. 빌지킬과 중앙날개를 동시에 부착한 경우는 빌지킬만 부착된 경우에 비해

큰 차이는 없으나 뒤에서 언급하는 전진속도가 있을 경우에는 큰 차이가 있음을 알 수 있다.

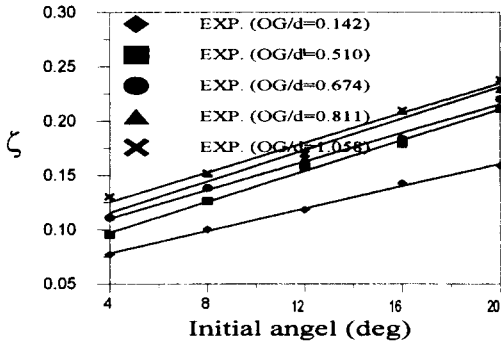


Fig. 11 ζ vs roll angle (hull with B.K. and wing)

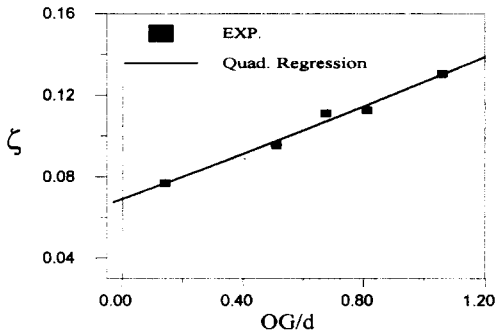


Fig. 12 ζ vs OG (hull with B.K. and wing, $\phi_o = 8$ deg)

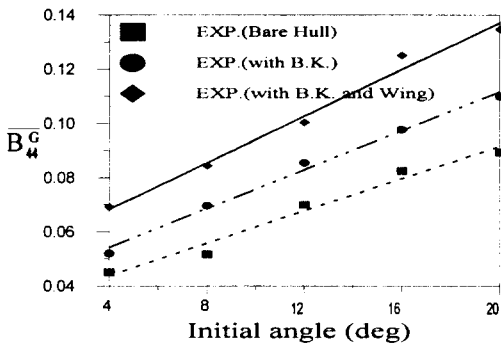


Fig. 13 Comparison of $\overline{B_{44}^G}$ for 3 models

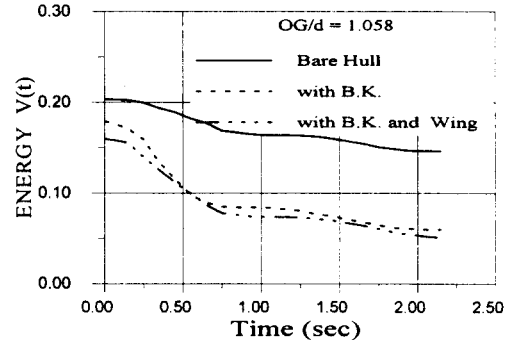


Fig. 14 Energy variation vs time for 3 models ($\phi_o = 8$ deg)

3.2 전진속도가 있을 경우

나선, 발지킬, 중앙날개가 부착된 3가지 모델에 대해 5개의 전진속도($F_n = 0.1, 0.18, 0.2, 0.3, 0.4$)에 대한 자유감쇠시험을 수행하였다.

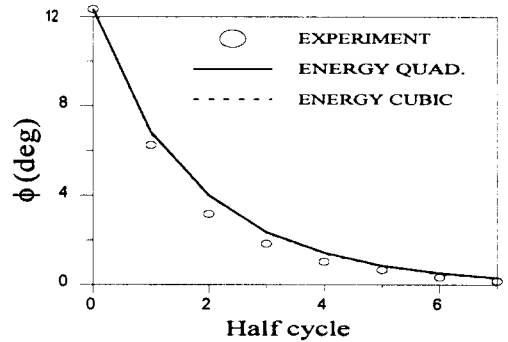


Fig. 15 Comparison between experiment and energy approach at $F_n = 0.2$ (bare hull)

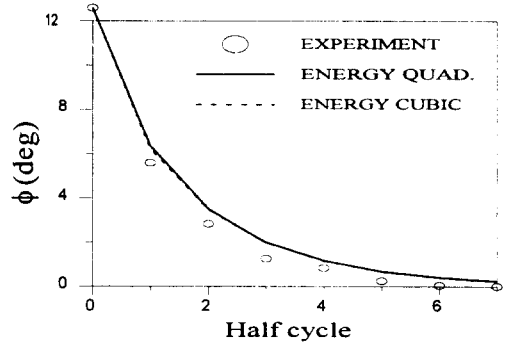


Fig. 16 Comparison between experiment and energy approach at $F_n = 0.2$ (hull with B.K.)

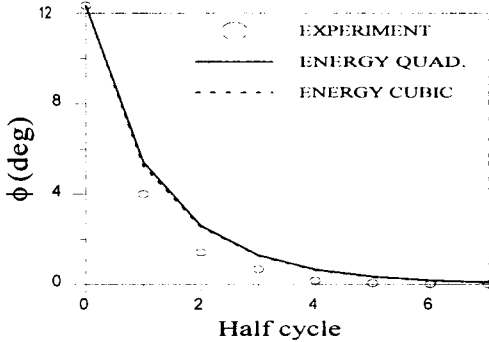


Fig. 17 Comparison between experiment and energy approach at $Fn = 0.2$ (hull with B.K. and wing)

Fig.15, 16 및 17은 나선, 발지킬, 발지킬 및 중앙날개가 부착되었을 경우 $OG/d = 1.058$ 에 대한 시험값과 3절에서 언급한 2개의 감쇠모멘트 모델을 이용한 추정값의 비교를 보이고 있다. 전진속도의 영향으로 앞에서보다 감쇠가 더 크므로 시험값과 추정값이 다소 차이가 있음을 알 수 있다.

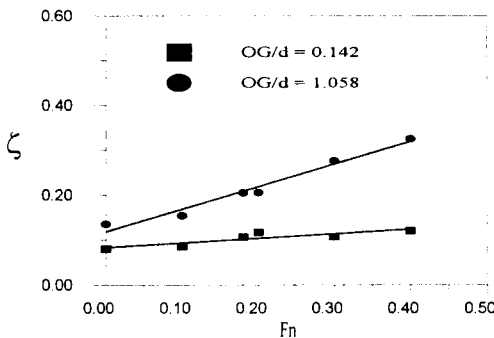


Fig. 18 ζ vs speed with forward speed (bare hull, $\phi_o = 8$ deg)

Fig.18에 나선의 경우 $OG/d = 0.142$, $OG/d = 1.058$ 에 대한 감쇠계수 ζ 의 변화를 속도의 함수로 보여주고 있다. $OG/d = 0.142$ 인 경우는 속도가 증가하여도 감쇠계수값의 증가는 미소하나 $OG/d=1.058$ 인 경우는 속도가 증가함에 따라 감쇠계수가 크게 증가함을 보인다. 일반적으로 속도가 증가함에 따라 양력의 발생으로 감쇠력이 급격히 증가하나 선형에 따라 혹은 횡동요

중심위치에 따라 그렇지 않은 경우가 Tanaka et al.(3)의 시험에서도 나타나고 있다.

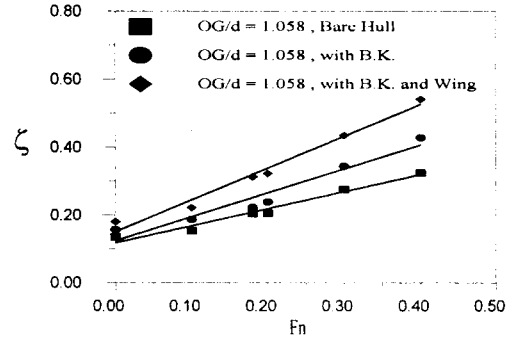


Fig. 19 Comparison of ζ for 3 models with forward speed ($\phi_o = 8$ deg)

Fig.19는 3가지모델에 대해 하나의 중심높이 $OG/d=1.058$ 에서 ζ 값의 속도의 함수로 보여주고 있다. 발지킬과 중앙날개의 부착순으로 속도가 증가함에 따라 감쇠는 더 크게 증가함을 보이고 이는 속도에 의한 양력성분이 커졌기 때문으로 분석된다.

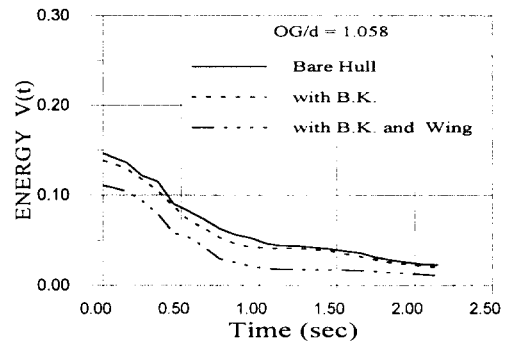


Fig. 20 Energy variation vs time for 3 models with forward speed ($\phi_o = 8$ deg, $Fn = 0.2$)

Fig.20은 3모델에 대한 에너지변동량을 보여주고 있다. 발지킬을 부착한 모델은 나선의 경우에 비해 큰 차이는 없으나, 발지킬과 중앙날개를 동시에 부착한 모델은 발지킬만을 부착한 모델에 비해 많은 에너지를 방출함을 볼 수 있다. 발지킬

은 조와성분을 증가시키는 효과를 가져오는데 전진속도가 있을 때에는 이 영향이 그다지 크지 않기 때문이고, 날개를 동시에 부착했을 때에는 날개에 의해 발생하는 양력의 영향으로 감쇠가 많이 발생하기 때문이라 생각된다.

4. 결 론

1. 1차 및 2차 속도항의 결합 혹은 1차 및 3차 속도항의 결합으로 모델링한 감쇠계수로 추정된 횡동요운동은 시험결과와 잘 일치하였다.

2. OG가 증가할수록 횡동요 감쇠력은 커짐을 알 수 있다. 이것은 와(vortex)를 발생하는 빌지킬과 스케그선단의 운동속도가 횡운동의 중심이 높은 만큼 크게 되는 것 및 선체표면에 작용하는 힘의 모멘트길이(moment lever)가 크게 됨에 기인하는 조와성분의 증대가 그 주요인이라 생각할 수 있다.

3. 소형어선의 횡동요감쇠력은 전진속도와 함께 증가하고 그 증분의 주요성분은 양력에 의한 것이다. 따라서 빌지킬이 부착되었을 경우보다 중앙날개가 부착되었을 경우가 감쇠 증가량이 크다.

4. 나선, 빌지킬이 부착된 모델, 빌지킬과 중앙날개가 부착된 모델의 순으로 감쇠계수가 증가함을 알 수 있었으며, 에너지발산 형태에서도 이러한 경향은 뚜렷이 나타났다.

참 고 문 헌

[1] Lloyd, J. M., "Seakeeping : Ship Behaviour in Rough Weather" , Ellis Horwood Limited, 1978, pp.343-397

[2] Chun, S. H, Chun, H. H, Kim, C. H & Kim, S. Y. " Development of a Stability System to Prevent the Capsize of a Small Fishing Vessel ", J. of Ocean Engineering and Technology, Vol. 13, No. 1, 1999 (in Korean)

[3] Tanaka, N., Ikeda, Y. and Okada, H., " Study on Roll Characteristics of Small Fishing Vessel, Part I Measurement of Roll Damping" , J. Kansai Soc. N.A., No 187, 1983, pp.15-23

[4] Tanaka, N., Ikeda, Y. and Okada, H., " Study on Roll Characteristics of Small Fishing Vessel, Part II An Approximate Method of Solution for Nonlinear Lateral Equations" , J. Kansai Soc. N.A., No 189, 1984, pp.43-51

[5] Tanaka, N., Ikeda, Y. and Okada, H., " Study on Roll Characteristics of Small Fishing Vessel, Part III Effects of Over-Hung Deck" , J. Kansai Soc. N.A., No 194, 1985, pp.43-52

[6] Bass, D. W. and Haddara, M. R., "Roll Damping for Small Fishing Vessel" , Proc.of 22nd American Towing Tank Conference, St John's, Canada, 1989, pp.443-449

[7] Haddara, M. R. and Bass, D. W., " On the Form of Roll Damping Moment for Small Fishing Vessels " , Ocean Engng, Vol. 17 , No 6, 1990, pp. 525-539

[8] Kwon, S. H, Chung, J. H. and Lee, T. I., " Application of FPK Equation for Nonlinear Ship Rolling in Irregular Seas", Trans. SNAK, vol. 29, No 1 , 1992, pp. 62-70 (in korean)

[9] Kwon, S. H, Chung, J. H. and Kim, D. W., " A Stochastic Prediction of Rolling of Ships Using Equivalent Non-linear Method", Trans. SNAK, vol. 29, No 2 , 1992, pp. 60-65 (in korean)