

감쇠계수 산출을 위한 자유 횡동요 감쇠실험 연구

김남우^{1,2} · 김용직^{3,†} · 하영록⁴

선박해양플랜트연구소¹

부경대학교 조선해양시스템공학과 대학원²

부경대학교 조선해양시스템공학과³

거제대학교 조선해양공학과⁴

Experimental Study of the Free Roll Decay Test for the Evaluation of Roll Damping Coefficients

Namwoo Kim^{1,2} · Yong Jig Kim^{3,†} · Youngrok Ha⁴

Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering¹

Dept. of Naval Architecture & Marine Systems Engineering, Graduate School, Pukyong National University²

Dept. of Naval Architecture & Marine Systems Engineering, Pukyong National University³

Dept. of Naval Architecture & Ocean Engineering, Koje College⁴

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

In general ships and FPSOs, roll damping is very small and consequently roll motion is very large at the roll resonance frequency. Proper evaluation of the roll damping coefficient at the resonance frequency is an important task in the study of roll motion and usually it is done by the analysis of free roll decay tests. The relative decrement method based on energy relation has been used mainly for the evaluation of roll damping coefficient from the roll decay test so far. As another method, the logarithmic decrement method based on equivalent linear decay assumption can be used for the same purpose and it is relatively simple. In this paper, both of the relative decrement method and the logarithmic decrement method are used for the evaluation of roll damping coefficient including quadratic damping from the free roll decay tests, and their results are cross-checked for verifying the obtained damping coefficients. Through applications to a box-type floating body equipped with bilge keels, it is shown that the two methods give almost the same damping coefficients in a practical view point and the cross-check of their results is to be a good tool to prevent a possible error. And also the quantitative effects of the bilge keels on the roll damping of box-type floating body are shown and discussed.

Keywords : Free roll decay test(자유 횡동요 감쇠실험), Relative decrement method(상대감쇠법), Logarithmic decrement method(대수감쇠법), Roll damping coefficient(횡동요 감쇠계수), Quadratic damping(2차 항 감쇠), Bilge keel(빌지킬)

1. 서론

선박 혹은 부유식 해양 구조물의 파랑 중 동요는 선상에 설치된 기기의 운용뿐만 아니라 선원의 임무수행과 승객의 승선감 등에 많은 악영향을 준다. 이런 이유로 선체의 동요를 억제하는 효율적 방안을 찾기 위한 관심과 노력이 기울여 지고 있다.

선박이나 FPSO 등의 횡동요(roll)는 다른 운동들에 비해 자체 감쇠력이 작아 심한 공진현상이 나타나며, 감쇠계수는 공진시 운동응답에 직접적인 영향(운동크기가 감쇠계수에 반비례 함)을 미

치므로 공진점에서의 횡동요 감쇠계수의 정확한 산출은 횡동요 연구에 있어 중요한 과제라고 할 수 있다. 횡동요 감쇠계수의 산출에는 주로 모형을 이용한 횡동요 감쇠실험(roll decay test)이 이용되는데, Choi, et al. (2005)과 Jung, et al. (2007), Jang, et al. (2010), Lee, et al. (2012) 등은 감쇠실험을 부유체의 횡동요 연구에 활용하였고, Chun, et al. (2000a; 2000b)과 Kim, et al. (2000) 등은 감쇠실험을 횡동요 저감장치의 성능파악에 활용하였다.

횡동요 감쇠실험으로부터 감쇠계수를 산출하는 데는 주로 상대감쇠(relative decrement)를 이용한 산출법(상대감쇠법)이 많이 사용되어 왔는데, 이 방법은 횡동요 진폭감소에 따른 동복원력

감소량과 감쇠모멘트가 소모하는 에너지와의 관계에 기초하고 있다. 다른 방법으로 대수감쇠(logarithmic decrement)를 이용한 산출법(대수감쇠법)을 사용할 수 있으며, 이 방법은 각 순간의 횡동요 비선형 감쇠 과정을 바로 등가의 선형 감쇠에 의한 과정으로 간주하는 물리적 근사에 기초한다. 대수감쇠법은 횡동요 연구에 사용된 예가 적지만 상대적으로 유도과정이 단순하고 계산도 간편한 장점이 있다.

본 논문에서는 자유 횡동요 감쇠실험을 통한 감쇠계수 산출시 신뢰성을 높이기 위해 상대감쇠법과 대수감쇠법을 병행하여 사용할 것을 제안하였으며, 빌지킬을 장착한 박스형 부유체를 대상으로 2차 항 감쇠까지를 고려하여 횡동요 감쇠계수를 산출하였고 그 특성을 고찰하였다.

2. 횡동요 감쇠실험을 통한 감쇠계수 산출법

2.1 상대감쇠를 이용한 감쇠계수 산출법(상대감쇠법)

선체의 횡동요 운동방정식은 다음 식으로 표현될 수 있다.

$$a\ddot{\phi} + f(\dot{\phi}) + c\phi = M_w(t) \quad (1)$$

여기에서 $\ddot{\phi}$ 와 $\dot{\phi}$, ϕ 는 각각 횡동요 가속도와 속도, 변위이다. a 는 선체질량 관성모멘트와 부가질량 관성모멘트의 합이고, $f(\dot{\phi})$ 는 감쇠모멘트이며, c 는 복원모멘트 계수이다. 우변의 $M_w(t)$ 는 파에 의한 횡동요 기진모멘트이다. 식 (1)에서 감쇠모멘트 $f(\dot{\phi})$ 를 선형 항과 2차 항의 합으로 표현하고, 정상상태에서의 자유 횡동요 방정식으로 나타내면 다음과 같다.

$$a\ddot{\phi} + b_1\dot{\phi} + b_2|\dot{\phi}|\dot{\phi} + c\phi = 0 \quad (2)$$

여기에서 b_1 과 b_2 는 각각 선형 감쇠계수와 비선형 2차 감쇠계수를 나타내고, 횡동요 모형실험으로부터 구할 수 있다.

정수 중에서 모형을 초기 횡경사각까지 기울이고 이후 정지상태로부터 자유롭게 놓아주는 방식으로 횡동요 감쇠실험(roll decay test)을 수행하면, Fig. 1과 Fig. 2의 자유 횡동요 시간이력(time history) 곡선을 얻을 수 있다. 감쇠계수를 산출하기 위해 Fig.1의 ϕ_i^+ , ϕ_{i+1}^+ 등 양의 극값들(positive peaks)을 사용할 수도 있고 ϕ_i^- , ϕ_{i+1}^- 등 음의 극값들(negative peaks)을 사용할 수도 있으며, Fig.2의 ϕ_i , ϕ_{i+1} 등 양쪽 극값들(double peaks)을 사용할 수도 있다. 본 연구에서는 이 3종류 극값들을 각각 사용하여 감쇠계수를 구하고 종합결과는 이들을 평균하여 구하기로 한다.

각 극값들의 경우 구간별 평균 진폭은 다음과 같다.

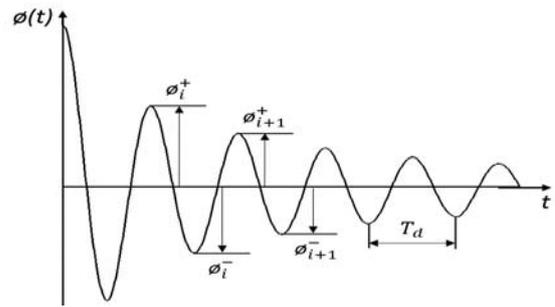


Fig. 1 Positive and negative peaks in the time history of the free roll decay test

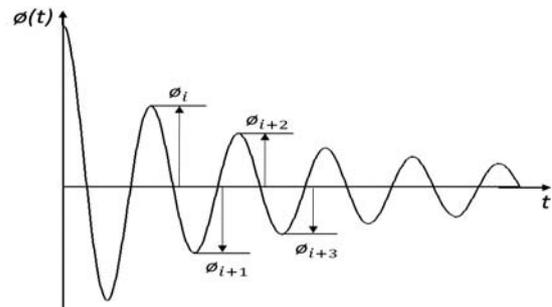


Fig. 2 Double peaks in the time history of the free roll decay test

$$A_i^+ = 0.5(\phi_i^+ + \phi_{i+1}^+) \quad ,\text{for positive peaks} \quad (3a)$$

$$A_i^- = -0.5(\phi_i^- + \phi_{i+1}^-) \quad ,\text{for negative peaks} \quad (3b)$$

$$A_i = 0.5(|\phi_i| + |\phi_{i+1}|) \quad ,\text{for double peaks} \quad (3c)$$

상대감쇠(relative decrement)는 순차적으로 감소하는 횡동요 진폭의 한 주기 당 감소량을 구간별 평균 진폭으로 나누어 다음과 같이 정의한다.

$$D_i^+ = \frac{\phi_i^+ - \phi_{i+1}^+}{0.5(\phi_i^+ + \phi_{i+1}^+)} \quad ,\text{for positive peaks} \quad (4a)$$

$$D_i^- = \frac{\phi_i^- - \phi_{i+1}^-}{-0.5(\phi_i^- + \phi_{i+1}^-)} \quad ,\text{for negative peaks} \quad (4b)$$

$$D_i = \frac{|\phi_i| - |\phi_{i+1}|}{0.25(|\phi_i| + |\phi_{i+1}|)} \quad ,\text{for double peaks} \quad (4c)$$

Fig. 3에는 상대감쇠를 도표로 나타내고, 최소 자승법(least-squares method)을 이용하여 데이터 값들로부터 구한 추세선의 예를 보인다. 여기서 D_i^* 는 D_i^+ 또는 D_i^- , D_i 이고, A_i^* 는 A_i^+ 또는 A_i^- , A_i 이다.

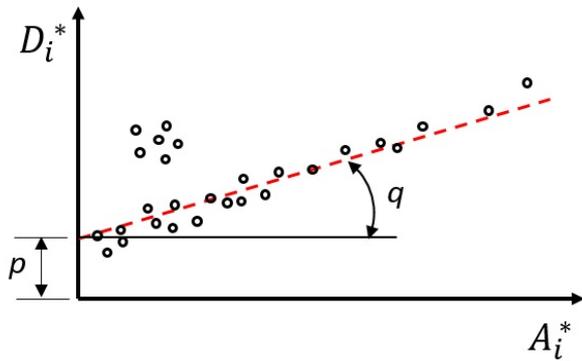


Fig. 3 Relative decrement vs. roll amplitude

Fig. 3에서 구한 추세선은 식 (5)와 같이 횡동요 진폭에 대한 1차식으로 나타낼 수 있다.

$$D_i^* = p + q A_i^* \quad (5)$$

이렇게 구해진 추세선의 절편 p 및 기울기 q 는 각각 식 (2)의 선형 감쇠계수 b_1 및 2차 항 감쇠계수 b_2 와 함수 관계에 있다. 이 관계식은 횡동요 진폭감소에 따른 동복원력 감소량과 감쇠모멘트가 소모하는 에너지가 같음을 이용하여 다음과 같이 유도된다 (Kim, 2010).

$$b_1 = 2p \frac{a}{T_d} \quad (6a)$$

$$b_2 = \frac{3}{8} qa \quad (6b)$$

여기서 T_d 는 감쇠 자유 횡동요의 주기(damped free roll period)이다. 식 (6)은 엄밀한 관계식은 아니며, 유도과정에서 사용된 주요 근사(approximation)는 다음과 같다.

$$T_d \approx T_n = 2\pi \sqrt{a/c} \quad (7a)$$

$$\phi_i^{*2} + \phi_{i+1}^{*2} \approx 2 A_i^{*2} \quad (7b)$$

$$\phi_i^{*3} + \phi_{i+1}^{*3} \approx 2 A_i^{*3} \quad (7c)$$

여기서 T_n 은 비감쇠 횡동요 고유주기(undamped roll natural period)이며, ϕ_i^* 는 ϕ_i^+ 또는 ϕ_i^- , ϕ_i 이고 ϕ_{i+1}^* 는 ϕ_{i+1}^+ 또는 ϕ_{i+1}^- , ϕ_{i+1} 이며, A_i^* 는 A_i^+ 또는 A_i^- , A_i 이다.

2차 항을 포함하는 감쇠모멘트를 그대로 운동방정식에 사용할 경우 해를 구하기 어려워 식 (6)의 감쇠계수들을 같은 에너지를 소모하는 등가 선형감쇠계수(equivalent linear damping coefficient) b_e 로 변환할 필요가 있다. 이 등가 선형감쇠계수 b_e 는 각속도의 자속에 비례하는 비선형 감쇠를 포함하여 선형계수로 대체한 것

이므로 횡동요 진폭 ϕ_a 의 1차 함수가 되며 다음 식으로 유도된다 (Kim, 2010).

$$b_e = b_1 + b_2 \frac{16}{3} \frac{\phi_a}{T_d} = 2(p + q\phi_a) \frac{a}{T_d} \quad (8)$$

이 등가 선형감쇠계수 b_e 는 차원을 갖는 계수라서 사용하기 불편할 수 있으므로 이 계수를 임계감쇠계수(critical damping coefficient) $b_c (=2\sqrt{ac})$ 로 나누어 무차원화하면 사용하기 편리하다. 결국 상대감쇠법에 의한 무차원 감쇠계수 ζ_R 은 ϕ_a 의 1차 함수로 다음과 같이 구해진다.

$$\zeta_R = \frac{b_e}{b_c} = \frac{1}{2\pi} (p + q\phi_a) \quad (9)$$

식 (8)을 식 (9)로 변환하는 과정에도 식 (7a)의 근사가 사용되었는데, 이 근사는 횡동요 관련 실용계산에서 흔히 사용된다. 이론상 $T_d = T_n / \sqrt{1 - \zeta_R^2}$ 이므로 $T_d \approx T_n$ 의 근사는, 예를 들면, ζ_R 이 0.1 정도일 때 약 0.5% 정도의 오차만을 주어 실용관점에서 충분히 사용이 가능하다고 할 수 있다. 무차원 계수 ζ_R 을 차원을 갖는 계수 b_e 로 역변환 할 경우 $b_c (=2\sqrt{ac})$ 를 곱하면 되는데, 이 때 a 와 c 의 계산에는 다음의 관계를 이용할 수 있다.

$$a = T_n^2 c / 4\pi^2 \approx T_d^2 c / 4\pi^2 \quad (10a)$$

$$c = \Delta \overline{GM} \quad (10b)$$

여기서, Δ 은 배수량이고 \overline{GM} 은 횡메타센터 높이이다.

이상으로 횡동요 감쇠실험에서 얻어지는 상대감쇠(relative decrement)를 이용하여 무차원 감쇠계수 ζ_R 을 횡동요 진폭 ϕ_a 의 1차 함수로 산출하는 상대감쇠법에 대해 설명하였다. 관련 실무에서는 신뢰성을 높이기 위해 하나의 대상 모형에 대한 최종 감쇠계수는 몇 가지 초기 횡경사각들에 대해 실험을 반복하여 수행하고, 그 결과들을 평균하여 계산한다. 또한, 매 실험에서도 3가지 피크들(positive peaks, negative peaks, double peaks)에 의한 결과들을 평균하는 방법이 사용된다.

2.2 대수감쇠를 이용한 감쇠계수 산출법(대수감쇠법)

앞에서 설명한 상대감쇠법은 최종식이 얻어지기까지 몇 단계의 상대적으로 복잡한 유도과정을 거치며, 그 과정에는 식 (7a) ~ (7c)와 같은 근사들이 사용된다. 이외는 다른 접근 방법으로, 대수감쇠(logarithmic decrement)를 이용하여 비교적 간단하게 무차원 감쇠계수를 횡동요 진폭의 1차 함수로 산출할 수 있다. 이 방법은 일종의 물리적 근사로 각 순간의 횡동요 비선형 감쇠

과정을 바로 등가의 선형 감쇠에 의한 과정으로 간주하여 동요 구간별 무차원 감쇠계수를 구하며, 이 구간별 무차원 감쇠계수를 회귀분석을 통해 횡동요 진폭의 1차 함수로 표현한다. 이 방법에서는 유도과정에 식 (7a) ~ (7c)와 같은 근사를 사용하지 않는다.

대수감쇠(logarithmic decrement)는 다음과 같이 횡동요 감쇠 실험에서 i 번째와 $i+1$ 번째 횡동요 피크값 ϕ_i^* 와 ϕ_{i+1}^* 의 비에 자연대수를 취한 값으로 정의한다. 이 경우에도 3가지 피크값들 (positive peaks, negative peaks, double peaks)이 계산에 사용될 수 있다.

$$\delta_i^* = \ln \frac{\phi_i^*}{\phi_{i+1}^*}, \text{ for positive \& negative peaks} \quad (11a)$$

$$\delta_i^* = \ln \frac{|\phi_i^*|}{|\phi_{i+1}^*|}, \text{ for double peaks} \quad (11b)$$

실제의 횡동요 감쇠과정은 비선형 감쇠에 의해 일어나지만 이를 각 순간에서의 등가 선형감쇠에 의해 일어난다고 가정하면, 무차원 등가 선형 감쇠계수 ζ_i^* 와 대수감쇠 δ_i^* 는 잘 알려져 있듯이 다음의 관계를 갖는다 (Kim, 2010).

$$\zeta_i^* = \frac{\delta_i^{*2}}{\sqrt{(2\pi)^2 + \delta_i^{*2}}}, \text{ for positive \& negative peaks} \quad (12a)$$

$$\zeta_i^* = \frac{\delta_i^{*2}}{\sqrt{\pi^2 + \delta_i^{*2}}}, \text{ for double peaks} \quad (12b)$$

Fig. 4는 횡동요 감쇠실험에서 식 (12)로 계산된 무차원 감쇠계수 값의 도표를 나타내며, 분포된 데이터 값들을 바탕으로 최소자승법을 이용하여 구한 추세선의 예를 보이고 있다.

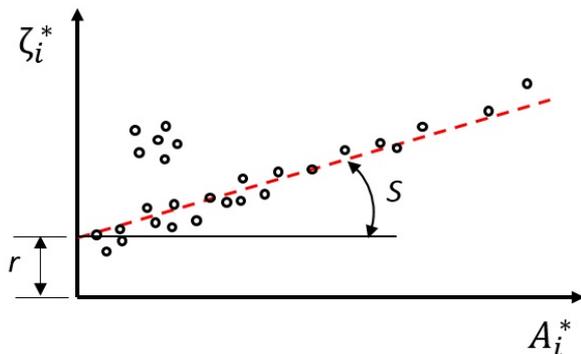


Fig. 4 Nondimensional damping coefficient obtained from logarithmic decrement vs. roll amplitude

식 (13)은 Fig. 4에서 구한 추세선의 식을 나타내며, 대수감쇠에 의한 무차원 등가 선형 감쇠계수를 횡동요 진폭의 1차식으로 표현하였다. 추세선의 절편이 r 이고, 기울기가 s 이다.

$$\zeta_i^* = r + s A_i^* \quad (13)$$

여기에서 감쇠계수 ζ_i^* 는 3가지 피크들에 의한 ζ_i^+ 또는 ζ_i^- , ζ_i 이며, A_i^* 는 A_i^+ 또는 A_i^- , A_i 이다.

식 (13)의 ζ_i^* 가 바로 구하려는 무차원 등가 선형 감쇠계수이고 A_i^* 는 횡동요 진폭 ϕ_a 로 대체 될 수 있으므로, 대수감쇠법에 의한 무차원 감쇠계수 ζ_L 은 별다른 변환 없이 ϕ_a 의 1차 함수인 다음 식으로 구해진다.

$$\zeta_L = r + s \phi_a \quad (14)$$

이상으로 대수감쇠법에서 대수감쇠를 이용하여 무차원 감쇠계수 ζ_L 을 횡동요 진폭 ϕ_a 의 1차 함수로 산출하는 방법을 설명하였다. 이 방법에서도 하나의 대상 모형에 대한 최종 감쇠계수는 신뢰성을 높이기 위해 여러 초기 횡경사각들에 대한 실험 결과들을 평균하여 계산하며, 매 실험에서도 3가지 피크값들에 의한 평균이 사용된다.

지금까지 설명한 2가지 감쇠계수 산출법 즉 상대감쇠법과 대수감쇠법은 서로 다른 접근법으로 유도된 다른 방법이라고 할 수 있고, 그 결과 값들도 (실용적 관점에서 무시할 수 있는 차이)는 있지만 약간의 차이가 있으며 엄밀하게 동일하지는 않다. 현재 횡동요 관련 실무에서는 일반적으로 상대감쇠법이 쓰이고 있으나 앞에서 보았듯이 대수감쇠법이 개념상 더 간단하고 오류의 가능성도 적어 향후 사용이 추천된다. 본 논문에서는 실험 결과의 교차확인을 위해 2가지 감쇠계수 산출법을 병행하여 사용할 것을 제안하며, 빌지킬을 장착한 박스형 부유체에 대해 적용 예를 보인다.

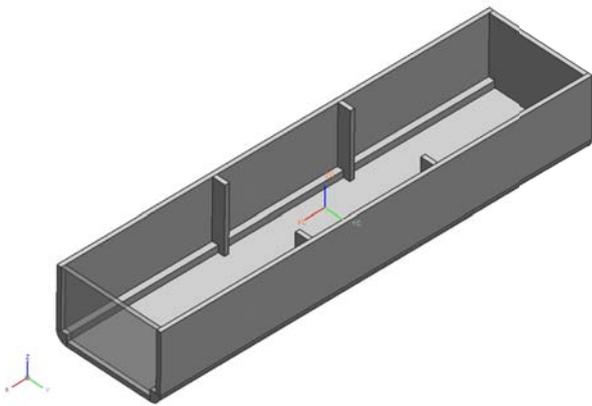
3. 실험모형 및 실험방법

3.1 실험모형

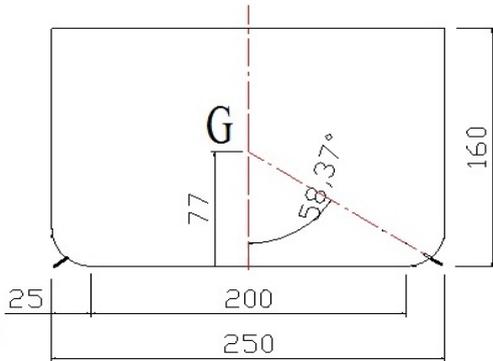
Fig. 5에 보인 실험모형의 본체는 최근 건조된 FPSO의 형태를 참조하여 길이 100 cm, 폭 25 cm, 높이 16 cm의 단순한 박스 형태로 제작하였으며, 등근 빌지부를 제외한 나머지 외곽부분들은 두께가 1 cm인 아크릴 평판으로 제작하였다. 모형 하부 좌우에 길이방향으로 부착된 빌지부는 빌지킬을 꽂아 장착할 수 있도록 반경이 2.5 cm인 1/4 원형 기동체로 제작하여 부착하였다. 실험모형의 주요제원은 Table 1과 같으며, 흘수 d 는 8 cm이고 무게중심의 높이 \overline{KG} 는 7.7 cm, 횡메타센터 높이 \overline{GM} 은 2.96 cm이다. Fig. 6에 실험 준비가 끝난 모형선의 사진을 보인다.

빌지킬은 거의 모든 선박이 장착하고 있는 가장 일반적인 횡동요저감장치이다. 본 연구에서는 빌지킬의 감쇠효과에 대한 기초자료를 확보하기 위해 빌지부에 전형적인 형태로 빌지킬을 설치하되 빌지킬 길이(L_{BK})를 달리한 47가지 모델을 준비하여 자유 횡동요 감쇠실험으로부터 감쇠계수를 구하는 실험을 수행하였다. 빌지킬이 없는 본체만의 모델을 K0이라 하고, 모형선 좌우 양쪽 빌지부에

전체길이 중에서 중앙 25% 부분에 발지킬을 설치한 모델을 K1, 중앙 50% 부분에 발지킬을 설치한 모델을 K2, 그리고 전체길이에 걸쳐 발지킬을 설치한 모델을 K3으로 지칭하기로 한다. 각 발지킬은 두께 1.5 mm의 아크릴판으로 제작되었고 발지부에 파 놓은 홈에 꽂아서 설치하였다. 발지킬의 감쇠효과를 크게 하기 위해 Fig. 5의 (b)에서 보듯이 무게중심 G 에서 바닥 연장선과 현측 연장선의 교점을 향하는 직선을 따라 발지킬을 설치하였으며, 수직선에 대한 발지킬의 경사각은 58.37° 이다. 선체 표면 밖으로 돌출된 발지킬의 폭은 9.5 mm이며, 바닥 연장면과 현측 연장면 안에 발지킬이 들어 가도록 설치되었다.



(a) schematic view of main hull



(b) dimensions of cross section(unit: mm)

Fig. 5 Schematic view and cross section of the model ship

Table 1 Principal particulars of model ship

length $L(cm)$	100
breadth $B(cm)$	25
depth $D(cm)$	16
draft $d(cm)$	8
bilge radius $r(cm)$	2.5
displacement $\Delta(kgf)$	19.73
$\overline{KB}(cm)$	4.15
$\overline{BM}(cm)$	6.51
$\overline{KG}(cm)$	7.7
$\overline{GM}(cm)$	2.96

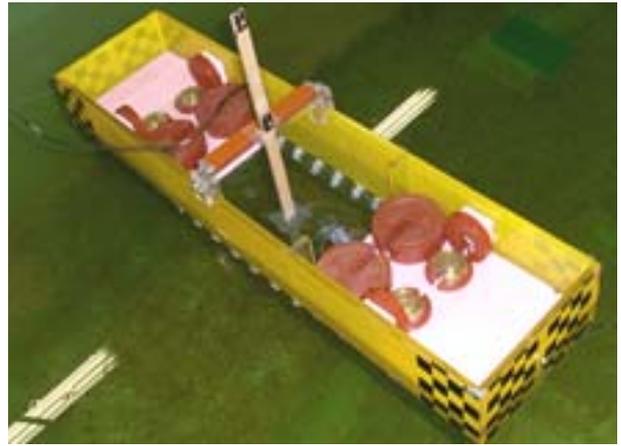


Fig. 6 Photo of the finished model ship

3.2 실험방법

실험은 부경대학교 조파수조(길이 40 m, 폭 2.5 m, 수심 1.3 m)에서 수행되었다. 모형선은 수조 중앙에 전진속도 없이 선수미가 수조 폭 방향을 향하도록 위치시켰고, 계류하지 않고 자유로운 상태에서 실험하였다. 모형선 중앙에 상하방향으로 설치된 2개의 LED 타겟을 이용하여 비접촉식 광학방식으로 횡동요를 측정하였다.

자유 횡동요 감쇠실험을 정확하게 수행하기 위해서는 모형선을 원하는 초기 횡경사각으로 기울이고, 불필요한 외부교란 없이 정수중의 정지상태로부터 극히 짧은 순간에 자유동요가 시작되도록 하는 실험기법을 고안하는 것이 필요하다. 이를 위해 여러 방법이 시도되었는데, 모형선 한쪽을 눌렀다가 놓아주는 방법은 실제 실행해 보면 정확한 초기 경사각을 주기도 어렵고 의도하지 않은 교란에 의해 불필요한 운동들이 수반될 수도 있으며, 특히 구속을 순식간에 제거할 수가 없어 실험결과에서 운동의 시작점도 명확히 구분되지 않는 난점들이 있었다. 본 연구에서는 여러 시행착오를 거쳐 선체중앙 현측상단을 절단기 용이한 가는 줄을 사용하여 위쪽으로 매달고 이 줄을 절단하여 자유 횡동요를 시작시키는 방법을 고안하였다. 초기 횡경사각을 미세하게 조절할 수 있도록 줄에 나사식 길이조정 장치도 설치하여 사용하였다. 정확한 실험을 위해서는 초기의 횡경사각 설정이 완료된 후 충분한 시간을 기다려 수면과 모델이 완전히 정지한 상태에서부터 실험을 시작하는 것도 중요하다.

본 논문에서의 자유 횡동요 감쇠실험은 Table 2에서 보듯이 4가지 모델 각각에 대해 목표 초기 경사각을 5° , 10° , 15° 로 정하고 2회씩 반복 수행하였으며, 필요한 경우 추가적인 실험을 수행하였다. 다수의 실험을 수행함에 따른 혼란을 피하기 위해 각각의 실험에는 다음의 예와 같이 고유 일련번호를 부여하였다.

예) K00501: model(K0) + target start angle(05) + test serial number(01)

Table 2 Cases of the free roll decay tests

bilge keel model name	target start angle	repeat
K0 ($L_{BK} = 0$)	5°	2
	10°	2
	15°	2
K1 ($L_{BK} = 0.25L$)	5°	2
	10°	2
	15°	2
K2 ($L_{BK} = 0.5L$)	5°	2
	10°	2
	15°	2
K3 ($L_{BK} = 1.0L$)	5°	2
	10°	2
	15°	2
total		24

4. 실험결과 및 고찰

4.1 자유 감쇠 횡동요의 시간이력

정수상태에서의 자유 횡동요 감쇠실험으로부터 계속된 횡동요의 시간이력 중 각 모델별 한 예를 Fig. 7에 보인다. 상하동요(heave)와 좌우동요(sway) 모두 자유로운 상태이므로 상방향 초기 변위에 기인하는 상하동요가 발생하고 횡동요와 연성된 좌우동요도 발생하지만, 이 운동들은 크지 않아 주 관심대상인 횡동요만 보인다. 목표 초기 횡경사각이 10°일 때의 예들이며, 빌지킬 모델 K0 ~ K3의 계속결과를 (a) ~ (d)에 각각 수록하였다. 빌지킬이 없는 모델 K0에서 감쇠가 가장 작아 운동이 가장 서서히 줄어드는 것을 볼 수 있고, 모델 K1, K2, K3로 갈수록 빌지킬의 설치길이가 길어지고 감쇠가 커져서 운동이 더 빨리 줄어드는 것을 볼 수 있다.

실험들의 수행에 있어 부정확성을 유발할 수 있는 요인들을 최대한 배제하였으므로, 본 논문에서 얻어진 실험결과들은 재현성이 매우 우수하다고 할 수 있다. 향후 관련 CFD 수치해석 결과를 검증하기 위한 벤치마크 데이터로도 활용이 가능할 것으로 기대된다. 참고로 Fig. 7의 예들에서 초기 횡경사각은 모델 K0의 경우 10.67°이고, 모델 K1의 경우 10.19°이며, 모델 K2의 경우 10.24°, 모델 K3의 경우 10.89°이었음을 밝힌다.

4.2 횡동요 감쇠의 선형 회귀분석

자유 횡동요 감쇠실험에서 얻어진 횡동요 시간이력으로부터 상대감쇠법과 대수감쇠법 각각을 이용하여 감쇠계수들을 산출할 수 있다. 상대감쇠법에서는 선형회귀분석을 통해 식 (5)의 절편 p와 기울기 q를 구해야 하고, 대수감쇠법에서는 선형회귀분석을 통해 식 (13)의 절편 r과 기울기 s를 구해야 한다. 선형회귀분석에는 최소자승법 (Press, et al., 1996)을 사용하였다.

Table 3에는 모델 K0에 대해 목표 초기 횡경사각 5°, 10°, 15°의 3종류별로 2번씩 반복된 6회의 실험결과가 요약되어 있는데,

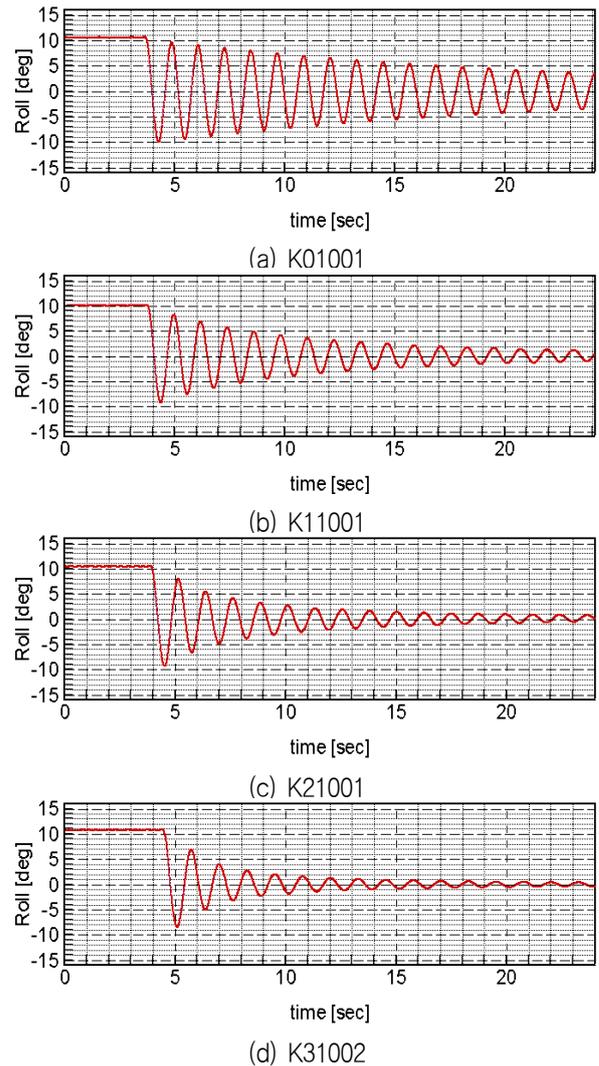


Fig. 7 Time histories of the free roll decay tests

각 실험번호별로 초기 횡경사각과 동요주기 T_d , 회귀분석에서 얻어진 계수들인 p와 q, 그리고 r과 s 값들이 수록되어 있다. Fig. 8에는 Table 3에 수록된 6회의 실험들 중 하나인 실험번호 k01001에 대해 데이터의 분포와 회귀분석 추세선들을 보이고 있다. (a)가 상대감쇠법의 경우이고, (b)가 대수감쇠법의 경우이다. 각각의 경우 3종류의 피크값들(positive, negative & double peaks)과 이들을 이용한 3종류 추세선들이 일점쇄선으로 표시되어 있는데, 각 추세선마다 절편과 기울기가 다소 다르므로 하나의 실험 k01001의 종합결과는 이 3종류의 추세선 값들을 평균하여 산출한다. Table 3의 p와 q, r, s가 이 평균된 값들이고, Fig. 8의 (a)와 (b)에 표시된 점선들이 k01001 실험의 평균 추세선이다. 모델 K0에 대한 최종 결과는 Table 3의 6회 실험을 전체 평균하여 구하며, Table 3의 맨 아랫줄에 최종 p와 q, r, s 값들이 구해져 있다. 이 모델 K0의 최종 평균에 해당하는 추세선도 비교 목적으로 Fig. 8의 (a)와 (b)에 실선으로 표시하였다.

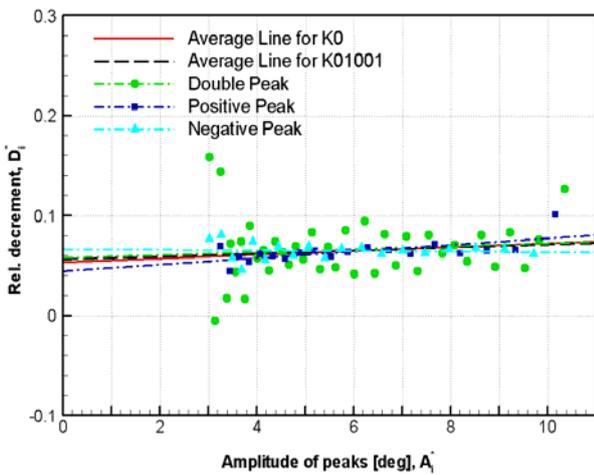
Table 4 ~ Table 6에는 각각 모델 K1 ~ K3에 대한 각 6회씩의 감쇠실험 결과가 요약되어 있고, Fig. 9 ~ Fig. 11에는 각각 모델 K1 ~ K3에 대한 6회 실험 중 하나의 실험을 택하여 회귀분석 결

Table 3 Summary of the free roll decay tests for model K0

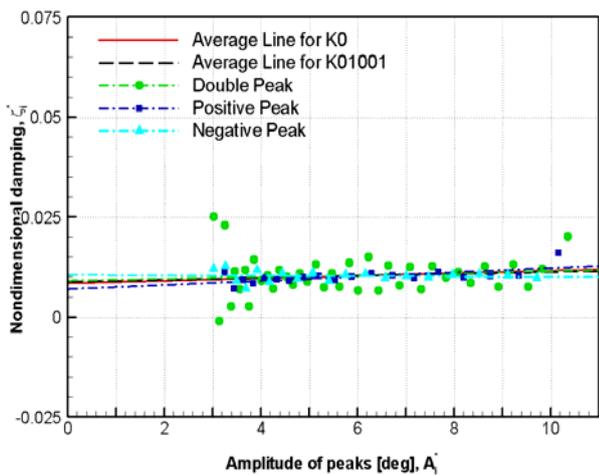
test #	start angle [deg]	T_d [sec]	Relative decrement method		Logarithmic decrement method	
			p	q [1/deg]	r	s [1/deg]
K00501	5.60	1.20	0.0628	0.0008	0.00999	0.00013
K00502	5.81	1.20	0.0523	0.0026	0.00832	0.00041
K01001	10.67	1.21	0.0567	0.0015	0.00903	0.00024
K01002	10.67	1.21	0.0479	0.0024	0.00762	0.00038
K01501	15.43	1.20	0.0502	0.0022	0.00799	0.00034
K01502	15.51	1.20	0.0490	0.0021	0.00781	0.00034
average		1.20	0.0531	0.0019	0.00846	0.00031

Table 4 Summary of the free roll decay tests for model K1

test #	start angle [deg]	T_d [sec]	Relative decrement method		Logarithmic decrement method	
			p	q [1/deg]	r	s [1/deg]
K10501	5.43	1.21	0.0782	0.0181	0.01245	0.00289
K10502	5.83	1.21	0.0808	0.0171	0.01286	0.00273
K11001	10.19	1.21	0.0902	0.0131	0.01435	0.00210
K11002	10.43	1.21	0.0863	0.0144	0.01372	0.00231
K11501	16.09	1.21	0.0911	0.0138	0.01446	0.00220
K11502	15.40	1.21	0.0874	0.0142	0.01388	0.00228
average		1.21	0.0857	0.0151	0.01362	0.00242

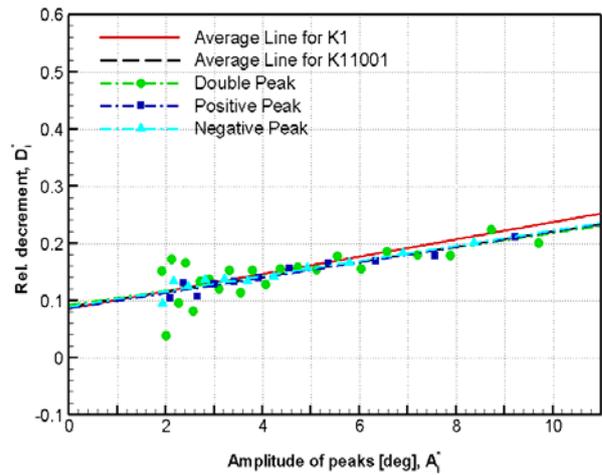


(a) Relative decrement method

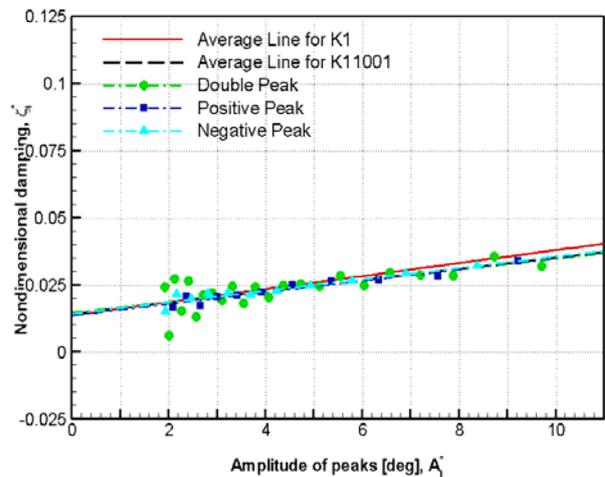


(b) Logarithmic decrement method

Fig. 8 Linear regression of data points for the test number K01001



(a) Relative decrement method



(b) Logarithmic decrement method

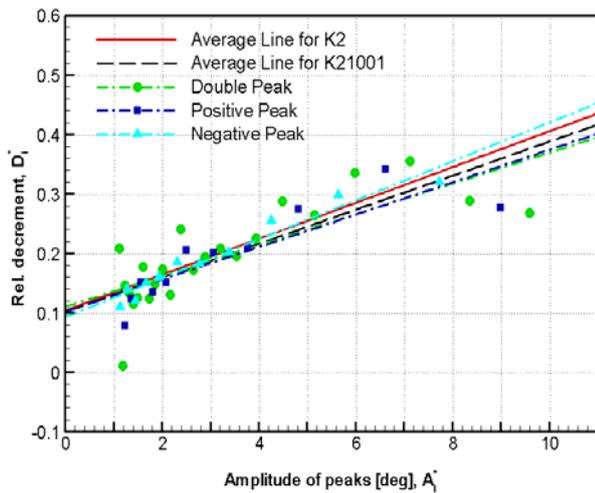
Fig. 9 Linear regression of data points for the test number K11001

Table 5 Summary of the free roll decay tests for model K2

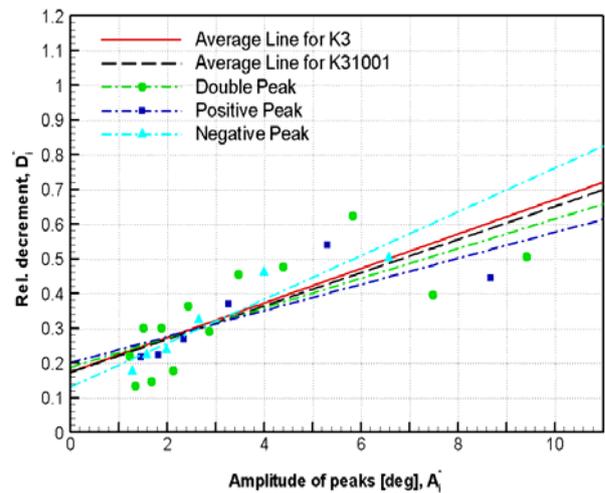
test #	start angle [deg]	T_d [sec]	Relative decrement method		Logarithmic decrement method	
			p	q [1/deg]	r	s [1/deg]
K20501	5.18	1.24	0.0915	0.0334	0.01455	0.00534
K20502	5.39	1.24	0.0854	0.0352	0.01357	0.00564
K21001	10.24	1.24	0.1033	0.0286	0.01641	0.00459
K21002	10.60	1.24	0.1089	0.0281	0.01730	0.00452
K21501	15.50	1.24	0.1190	0.0282	0.01773	0.00455
K21502	15.58	1.24	0.1163	0.0273	0.01844	0.00441
average		1.24	0.1041	0.0301	0.01634	0.00484

Table 6 Summary of the free roll decay tests for model K3

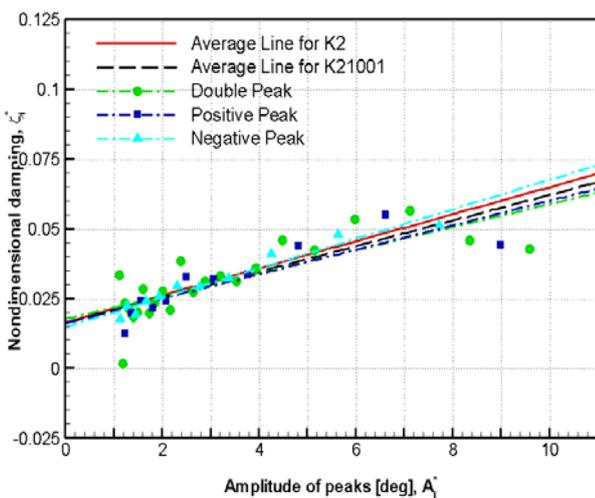
test #	start angle [deg]	T_d [sec]	Relative decrement method		Logarithmic decrement method	
			p	q [1/deg]	r	s [1/deg]
K30501	5.76	1.26	0.1406	0.0565	0.02231	0.00912
K30502	5.99	1.27	0.1405	0.0548	0.02231	0.00885
K31001	10.61	1.27	0.1744	0.0478	0.02763	0.00779
K31002	10.89	1.27	0.1822	0.0454	0.02886	0.00740
K31501	15.30	1.27	0.2000	0.0465	0.03160	0.00766
K31502	15.58	1.27	0.1994	0.0470	0.03149	0.00774
average		1.27	0.1729	0.0497	0.02737	0.00809



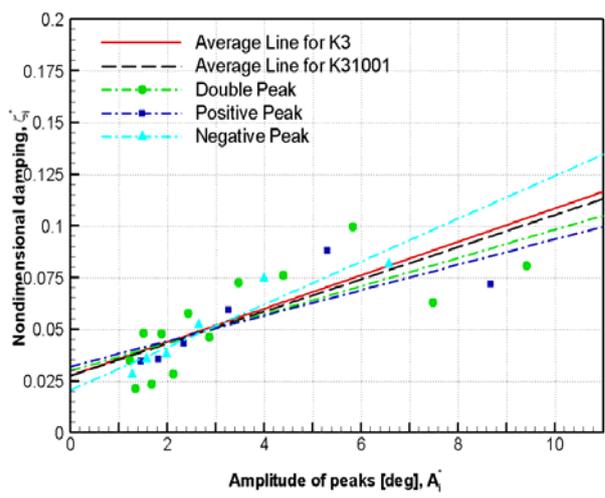
(a) Relative decrement method



(a) Relative decrement method



(b) Logarithmic decrement method



(b) Logarithmic decrement method

Fig. 10 Linear regression of data points for the test number K21001

Fig. 11 Linear regression of data points for the test number K31001

과를 그림으로 보이고 있다. Table 4~ Table 6의 항목 구성은 Table 3과 같고, Fig. 9~ Fig.11의 그림 구성은 Fig. 8과 같다.

본 논문의 제안처럼 감쇠계수 산출에 상대감쇠법과 대수감쇠법을 병행하여 사용하면 교차확인을 통해 오류 발생을 방지할 수 있다. 두 산출법은 유도과정은 다르지만 최종적으로 무차원 감쇠계수를 동일한 형태인 식 (9)와 식 (14)로 나타내므로 같은 실험에 적용할 경우 두 산출법의 절편과 기울기는 근사적으로 다음의 관계를 만족해야 한다.

$$r \simeq p/2\pi \tag{15a}$$

$$s \simeq q/2\pi \tag{15b}$$

두 산출법이 서로 다른 접근방법과 근사방법에 의해 유도되므로 식 (15a)와 식 (15b)는 엄밀하게 같아야 하는 관계는 아니고 근사적으로 같아지는 관계를 의미한다. Table 3~ Table 6의 p와 q, r, s 값들에서 이러한 관계가 잘 만족되고 있음을 확인할 수 있다. 만약 식 (15a)와 식 (15b)의 관계가 지켜지지 않는 경우가 발생하면 오류가 있다고 할 수 있으므로 분석과정을 다시 검토해 봐야 할 것이다.

상대감쇠법의 경우 p와 q로부터 식 (6a)와 식 (6b)에 의해 감쇠모멘트의 선형 항 계수 b₁과 2차 항 계수 b₂를 구할 수 있고, 대수감쇠법의 경우 r과 s로부터 다음 식에 의해 두 계수들을 구할 수 있다.

$$b_1 \simeq 4\pi r \frac{a}{T_d} \tag{16a}$$

$$b_2 \simeq \frac{3\pi}{4} s a \tag{16b}$$

Table 3~ Table 6에서 절편 r의 평균값을 보면 모델 K0에서 0.00846이고, K1에서 0.01362, K2에서 0.01634, K3에서 0.02737로 증가함을 알 수 있고(p의 변화도 유사함), 기울기 s의 평균값도 모델 K0에서 0.00031이고, K1에서 0.00242, K2에서 0.00484, K3에서 0.00809로 증가함을 알 수 있다(q의 변화도 유사함). 이는 감쇠모멘트의 선형 항 계수 b₁과 비선형 2차 항 계수 b₂ 모두 빌지킬의 부착길이가 증가함에 따라 증가하고 있음을 의미한다. 또한 Table 3~ Table 6에서 각 모델의 감쇠동요 주기 T_d가 K0에서 1.20 sec이고, K1에서 1.21sec, K2에서 1.24 sec, K3에서 1.27 sec로 빌지킬 길이의 증가에 따라 점차 증가해 감도 볼 수 있다.

Fig. 8~ Fig.11의 그림들에서 4가지 모델 K0~ K3에 대한 회귀분석에서의 경향을 볼 수 있다. 각 그림의 (a)에 보인 상대감쇠법과 (b)에 보인 대수감쇠법을 비교하면 종축 값이 서로 다르면서도 물리적으로 밀접한 상관관계가 있으므로 두 그림의 경향은 매우 유사하다. 모델 K0에서 K3으로 갈수록 추세선의 절편

(감쇠의 선형 항)과 기울기(감쇠의 2차 항)가 함께 증가함을 시각적으로 확인할 수 있다. 본 연구의 실험에서는 Table 2에 보인 것처럼 각 조건별로 2회의 실험을 수행하여 재현성을 확인하였는데, 지면관계로 1회의 회귀분석 그림만 수록했지만 동일 조건의 2회 실험에 대한 회귀분석 그림들은 눈으로 차이를 발견하기 어려운 정도로 재현성이 매우 우수했음을 밝혀둔다. 부적절한 실험기법을 사용하거나 선행실험의 잔존파 등에 의한 교란을 방지하지 못할 경우, 데이터의 분산이 심하고 재현성도 약한 실험이 되며 회귀분석 시 절편 값이 음이 되는 등 불합리한 결과를 얻을 수 있으므로 주의할 필요가 있다.

4.3 무차원 감쇠계수

감쇠실험의 회귀분석으로 절편과 기울기를 구한 후 식 (9) 또는 식 (14)로 무차원 감쇠계수 값을 원하는 횡동요 진폭에 대해 계산할 수 있다. 횡동요 진폭 φ_a가 5°, 10°, 15°일 때의 무차원 감쇠계수 값들을 모델 K0~ K3에 대해 Table 7~ Table 10에 각각 보인다. 각 실험번호별 값들은 3가지 피크들(positive peaks, negative peaks, double peaks)에 의한 결과를 평균한 것이며, 각 표들의 맨 아래 줄은 각 모델별 6가지 실험의 평균값이다. Fig. 12에는 각 모델별 평균 감쇠계수 값들의 변화를 횡동요 진폭 φ_a= 0°~ 21° 범위에서 그림으로 비교하여 보인다.

이들 표와 그림에서 상대감쇠법에 의한 무차원 감쇠계수 ζ_R과 대수감쇠법에 의한 무차원 감쇠계수 ζ_L을 비교하여 보면, 감쇠계수가 작은 경우 거의 차이가 없고 감쇠계수가 큰 경우 대체로 ζ_L이 ζ_R보다 약간 크게 산출됨을 볼 수 있다. 예를 들면, 무차원 감쇠계수(임계감쇠에 대한 비율)가 1.5% 미만인 모델 K0에서는 두 계수가 거의 같고, 감쇠가 커질수록 약간의 차이가 생겨 무차원 감쇠계수가 대략 15% 정도인 모델 K3의 φ_a=15°인 경우 평균값 기준으로 ζ_L이 ζ_R보다 0.27%p (상대오차 약 1.8%) 크게 산출됨을 알 수 있다. 하지만 이 정도 값의 차이는 실용적 관점에서는 무시할 수 있는 크기이므로 두 산출법은 거의 같은 감쇠계수 값을 준한다고 할 수 있으며, 본 논문에서처럼 두 산출법을 병행하여 사용하고 그 값들을 서로 비교하면 감쇠계수 산출과정의 오류를 효과적으로 방지할 수 있다.

Table 7 Comparison of the nondimensional damping coefficients for model K0

test#	Relative decrement method, ζ _R [%]			Logarithmic decrement method, ζ _L [%]		
	φ _a =5°	φ _a =10°	φ _a =15°	φ _a =5°	φ _a =10°	φ _a =15°
K00501	1.063	1.128	1.192	1.064	1.128	1.192
K00502	1.036	1.241	1.446	1.037	1.241	1.445
K01001	1.020	1.138	1.256	1.020	1.138	1.256
K01002	0.954	1.145	1.337	0.954	1.146	1.337
K01501	0.971	1.143	1.315	0.971	1.143	1.316
K01502	0.950	1.119	1.288	0.950	1.119	1.289

Table 8 Comparison of the nondimensional damping coefficients for model K1

test#	Relative decrement method, ζ_R [%]			Logarithmic decrement method, ζ_L [%]		
	$\phi_a=5^\circ$	$\phi_a=10^\circ$	$\phi_a=15^\circ$	$\phi_a=5^\circ$	$\phi_a=10^\circ$	$\phi_a=15^\circ$
K10501	2.686	4.127	5.569	2.690	4.135	5.580
K10502	2.645	4.004	5.363	2.649	4.011	5.373
K11001	2.479	3.523	4.566	2.483	3.530	4.578
K11002	2.522	3.671	4.820	2.526	3.680	4.834
K11501	2.544	3.639	4.733	2.548	3.649	4.751
K11502	2.523	3.656	4.789	2.527	3.667	4.807
average	2.567	3.770	4.973	2.570	3.779	4.987

Table 9 Comparison of the nondimensional damping coefficients for model K2

test#	Relative decrement method, ζ_R [%]			Logarithmic decrement method, ζ_L [%]		
	$\phi_a=5^\circ$	$\phi_a=10^\circ$	$\phi_a=15^\circ$	$\phi_a=5^\circ$	$\phi_a=10^\circ$	$\phi_a=15^\circ$
K20501	4.111	6.765	9.419	4.124	6.792	9.460
K20502	4.164	6.969	9.774	4.177	6.997	9.817
K21001	3.921	6.197	8.473	3.937	6.233	8.528
K21002	3.974	6.214	8.453	3.991	6.252	8.512
K21501	4.026	6.270	8.515	4.047	6.321	8.594
K21502	4.028	6.204	8.380	4.049	6.253	8.457
average	4.037	6.436	8.836	4.054	6.474	8.895

Table 10 Comparison of the nondimensional damping coefficients for model K3

test#	Relative decrement method, ζ_R [%]			Logarithmic decrement method, ζ_L [%]		
	$\phi_a=5^\circ$	$\phi_a=10^\circ$	$\phi_a=15^\circ$	$\phi_a=5^\circ$	$\phi_a=10^\circ$	$\phi_a=15^\circ$
K30501	6.734	11.230	15.725	6.792	11.352	15.912
K30502	6.601	10.965	15.330	6.655	11.079	15.504
K31001	6.581	10.386	14.191	6.657	10.551	14.445
K31002	6.512	10.124	13.736	6.586	10.285	13.984
K31501	6.883	10.582	14.280	6.991	10.822	14.652
K31502	6.910	10.646	14.382	7.019	10.888	14.758
average	6.703	10.655	14.607	6.783	10.830	14.876

Table 7 ~ Table 10에서 빌지킬 길이에 따른 감쇠계수의 변화를 살펴보면, 횡동요 진폭 $\phi_a = 5^\circ$ 일 때 모델 K0의 무차원 감쇠계수가 1.0%이고, 모델 K1이 2.6%, 모델 K2가 4.1%, 모델 K3이 6.8%이다(편의상 수치는 대수감쇠법의 ζ_L 과 각 모델별 평균값을 기준으로 함. 이하 동일). $\phi_a = 10^\circ$ 일 때는 K0이 1.2%, K1이 3.8%, K2가 6.5%, K3이 10.8%이며, $\phi_a = 15^\circ$ 일 때는 K0이 1.3%, K1이 5.0%, K2가 8.9%, K3이 15.0%이다. 이로부터 빌

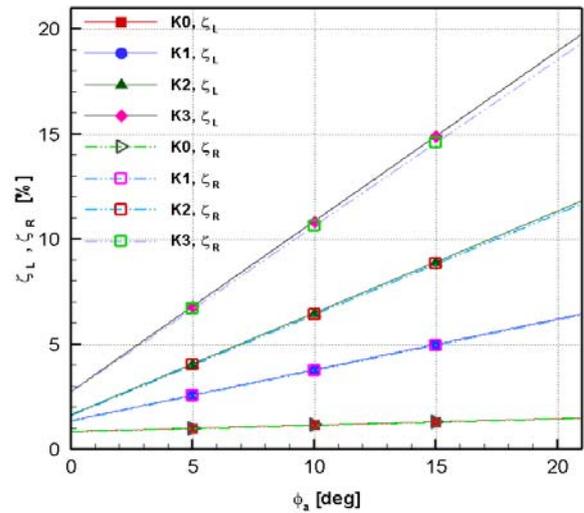


Fig. 12 Comparison of the nondimensional roll damping coefficients by the relative decrement method and the logarithmic decrement method for the 4 models

지킬이 설치되고 그 길이가 증가할수록 횡동요 감쇠계수가 급격히 증가함을 알 수 있는데, $\phi_a = 10^\circ$ 일 때를 예로 들면, 빌지킬을 설치하지 않은 경우에 비해 25% 길이에 빌지킬을 설치한 경우 횡동요 감쇠가 3.2배로 증가하며, 50% 길이에 설치한 경우 5.4배로 증가하고, 100% 길이에 설치한 경우 9.0배로 증가함을 알 수 있다. 횡동요는 공진이 심하고 공진점에서 감쇠증가에 반비례하여 횡동요가 감소하므로, 이러한 감쇠계수의 현저한 증가는 빌지킬에 의해 큰 횡동요 저감효과를 얻을 수 있음을 의미한다. 또한, Fig. 12에서 보면 이러한 빌지킬에 의한 감쇠계수의 증가는 $\phi_a = 0^\circ$ 에서의 절편 증가보다는 주로 각 직선의 기울기 증가에 의해 얻어지고 있는데, 이는 빌지킬의 감요효과가 선형 항 감쇠의 증가보다는 주로 비선형 2차 항 감쇠의 증가에 의해 얻어짐을 의미한다.

5. 결론

신뢰성 있고 효율적인 감쇠계수 산출법의 정립은 횡동요 관련 실무에서 중요한 의미를 갖는다. 본 논문에서는 횡동요 감쇠실험을 통한 감쇠계수 산출시 신뢰성을 높이기 위해 상대감쇠법과 대수감쇠법을 병행하여 사용할 것을 제안하였다. 빌지킬을 장착한 박스형 부유체를 대상으로 2차 항 감쇠까지를 고려하여 횡동요 감쇠계수를 산출하였고 그 특성을 고찰하였다. 이를 통해 얻어진 주요 결과는 다음과 같다.

- 횡동요 연구에서 일반적으로 사용되어 온 상대감쇠법에 비해 대수감쇠법은 상대적으로 유도과정이 단순하고 계산도 더 간편한 장점이 있다.
- 상대감쇠법과 대수감쇠법에 의한 감쇠계수들은 감쇠가 작은 경우 거의 차이가 없고 감쇠가 큰 경우 약간의 차이가 발생한다. 그 차이는 무차원 감쇠계수(임계감쇠에 대한비율)의 크기가 15% 정

도일 때 0.27%p (상대오차 약 1.8%) 정도로서 크지 않다.

- 상대감쇠법과 대수감쇠법은 서로 다른 접근법으로 유도된 다른 방법이지만, 실용적 관점에서는 거의 같은 횡동요 감쇠계수를 산출한다고 할 수 있다. 따라서 두 산출법을 병행하여 사용하고 그 값들을 교차 확인하면 횡동요 감쇠계수 산출과정의 오류를 방지하는 효과적인 수단이 될 수 있다.
- 수행된 실험에서 빌지킬은 그 크기가 커질수록 횡동요 감쇠계수를 현저히 증가시켜 횡동요 저감에 크게 기여함을 정량적으로 확인 할 수 있었고, 빌지킬에 의한 이러한 횡동요 감쇠의 증가는 주로 비선형 2차 항 감쇠의 증가에 기인함도 알 수 있었다.

또한, 본 논문의 실험 수행에 있어 부정확성을 유발할 수 있는 요인들은 최대한 억제하였으므로 얻어진 실험결과들은 재현성이 매우 우수하였다. 향후 관련 CFD 수치해석 결과를 검증하기 위한 벤치마크 데이터로 그 활용이 기대된다.

후 기

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2014년)에 의하여 연구되었습니다.

References

Choi, Y.R. Kim, J.H. & Kim, Y.S., 2005. An Analysis of Rolling Performance for a Barge-Type FPSO. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 19(3), pp.25-30.

Chun, H.H. Chun, S.H. & Kim, S.Y., 2000a. Roll Damping Moment of a Small Fishing Vessel by Free Rolling Test in Calm Water. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 37(1), pp.1-9.

Chun, H.H. Chun, S.H. & Kim, S.Y., 2000b. Roll Damping Moment of a Small Fishing Vessel by Free Rolling Test in Waves. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 37(2), pp.30-37.

Jang, T.S., Kwon, S.H. & Lee, J.H., 2010. Recovering the Functional Form of the Nonlinear Roll Damping of Ships from a Free-Roll Decay Experiment: An Inverse Formulism. *Ocean Engineering*, 37, pp.1337-1344

Jung, K.H. Suh, S.B. & Chun, H.H., 2007. Experimental Study on the Eddy Making Damping Effect at the Roll Motion of a Rectangular Barge. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 44(3), pp.267-278.

Kim, N.W., 2010. *An Experimental Study of the Roll Decay Test for Evaluation of Roll Damping Coefficients*. Master's Thesis. Pukyong National University.

Kim, Y.B. Byun, J.H. & Yang, J.H., 2000. An Experimental Study on the Development of the Anti-Rolling Control System for a Ship. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 14(4), pp.43-48.

Lee, S. You, J.M. Lee, H.H. Rhee, S.H. & Rhee, K.-P., 2012. Experimental Study on Free Roll Decay Motions of a Damaged Ship for CFD Validation Database. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 49(1), pp.52-59.

Press, W.H. Teukolsky, S.A. Vetterling, W.T. & Flannery, B.P., 1996. *Numerical recipes in Fortran 77: the art of scientific computing*. -2nd ed. Cambridge University Press: Cambridge.



김 남 우

김 용 직

하 영 록