

원형실린더 점성 롤댐핑에 관한 이론적 접근 및 실험적 연구

양승호^{1*}, 백형민²

¹울산과학기술대학교 기계공학부, ²부산대학교 조선해양공학과 대학원

Theoretical Approach and Experimental Study on Viscous Roll Damping of Circular Cylinder

Seung-Ho Yang^{1*}, Hyung-Min Baek²

¹Department of Mechanical Engineering, Ulsan College

²Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University

요약 유체점성에 의한 강한 비선형 특성으로 인해 선박 및 부유식 해양구조물의 롤댐핑은 이론적으로, 수치해석적으로, 혹은 실험적으로도 정확한 값을 구해내기가 대단히 어렵다. 본 연구에서는 강제동요 시 원형실린더 점수표면에서의 점성 전단력에 관한 이론식을 통해 파라미터 변화 즉, 초기 회전각도와 반경 크기에 따른 점성 전단력을 회전주기별로 구한 후 새롭게 고안된 실험방법을 통한 점성 롤댐핑 계측결과와 비교검토하였다. 순수 점성 전단력 계측을 위해 수조 내 원형실린더를 수직으로 설치하여 강제동요 모형시험을 수행하였고 강제동요에 따른 토크값의 변화양상을 면밀히 관찰하였다. 원형실린더 점수표면에 작용하는 점성 전단력 자체가 아주 작은 값임에도 불구하고 이론식과 실험결과로부터 도출된 전단력 결과가 서로 아주 잘 일치함을 확인하였고 이를 통해 이론식 및 실험방법의 유효성과 정확도를 입증하였다. 본 연구결과를 통해 순수 점성 롤댐핑에 관해 새로운 시각에서 접근할 수 있는 이론적, 실험적 토대를 마련하였고 이의 검증과정을 통해 부유체 롤댐핑 현상에 대한 이해수준을 한단계 끌어올릴 수 있는 기반을 마련하였다.

Abstract Due to the strong nonlinear characteristics of fluid viscosity, it is very difficult to obtain accurate values for the roll damping of ships and floating offshore structures theoretically, numerically, or experimentally. This study calculated the viscous shear force acting on the surface of a circular cylinder according to the initial rotation angle and radius of the cylinder. In particular, the viscous shear force was calculated by rotation period through the theoretical formula for viscous shear force on the surface of the circular cylinder during the forced oscillation of the cylinder. Subsequently, the study compared the calculated viscous shear force with the viscous roll damping value for the cylinder measured using a newly designed experimental device. Additionally, the pure shear force on the surface of the circular cylinder was measured by installing the cylinder vertically in a water tank to perform a model test, and the change in the torque according to the forced oscillation of the cylinder was closely observed. Even though the viscous shear force acting on the surface of the circular cylinder was very small, the shear force derived from the theoretical formula and experiments, respectively, agreed very well. Thus, the effectiveness and accuracy of the theoretical formula and the experimental method were verified. Finally, through the results of the study, a theoretical and experimental foundation for pure viscous roll damping from a new perspective was laid, and through the verification, the understanding level of the floating body roll damping phenomenon was raised to the next level.

Keywords : Circular Cylinder, Fluid Viscosity, Roll Damping, Shear Stress, Torque

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. No.2019R1F1A105902313).

*Corresponding Author : Seung-Ho Yang(Ulsan College)

email: shyang@uc.ac.kr

Received May 23, 2022

Accepted July 7, 2022

Revised June 27, 2022

Published July 31, 2022

1. 서론

4차 산업혁명시대 현대과학기술의 엄청난 발전에도 불구하고 아직까지 선박 및 부유식 해양구조물의 롤댐핑(roll damping)에 관한 문제는 해결하기 어려운 과제로 남아있다. 유체점성으로 인한 강한 비선형 특성으로 인해 롤댐핑은 이론적으로, 수치해석적으로, 또한 실험적으로도 정확한 롤댐핑 값을 구해내기가 대단히 어렵다. 조선해양산업분야의 수많은 연구자들이 정도 높은 롤댐핑 값을 얻어내고자 하는 노력을 적극적으로 기울이고 있으나 아직까지 유체점성으로 인한 롤댐핑 고유의 비선형 특성과 관련한 어려움을 극복하고 정확한 값을 도출하였다고 볼 수 있을 만한 연구사례는 거의 없는 형편이다[1-5]. 상당수의 연구에서 이론식 혹은 수치해석에 의한 방법[6-8] 보다는 모델제작 기반의 모형시험을 통해 보다 직접적으로 대상 부유체에 대한 롤댐핑 값을 얻어내고 이를 운동해석 등의 입력자료로 활용하고 있다.

근래에 이르러 컴퓨터 성능의 급속한 향상에 따라 롤댐핑 값을 수치해석적으로 구해내려는 시도가 있어 왔으며 또한, 실험장비 및 계측기기의 발달에 따라 최신의 실험장비와 계측기기를 활용하여 정도 높은 롤댐핑 값을 얻으려는 시도들이 이루어지고 있다[9].

선형연구에 따르면 Himeno[10] 등이 과거 수많은 실험에 기초한 실험식을 제안하고 이를 활용하여 롤댐핑 값을 추정하고 선박설계에 적용하고 있는 실정이다. 그러나, 대상구조물의 형상이 복잡해지고 다양한 종류의 선박 및 부유식 해양구조물을 다루게 될 때에는 제한적으로만 기존 실험식을 활용하고 있으며 모형제작과 실험에 따른 비용상승에도 불구하고 반드시 대상 부유체에 대한 롤댐핑 계측 모형시험을 통해 롤댐핑 값의 검증과정을 거치도록 하고 있다. Tanaka와 Hishida[11], Tanaka와 Kitamura[12], Tanaka[13,14]의 빌지길에 관한 연구를 필두로 하여, Kato[15], Ikeda[16] 등이 롤댐핑 예측방법에 관한 연구를 수행하였다. Kato는 입수상태의 원형실린더 동요운동 실험결과를 분석하여 마찰댐핑에 관한 실험식을 제안하였고, Himeno는 1970년대까지 이루어진 관련 연구들을 집대성하여 롤댐핑을 평가하기 위한 프로그램을 개발하였으며, 이를 이용하여 선박 초기설계에 활용할 수 있게 하였다. Ikeda는 날카로운 모서리가 있는 경우의 롤댐핑과 전진속도가 있는 경우의 롤댐핑에 관해 심도 깊은 연구를 수행하였다. 한편, Vugts는 다양한 단면형상에 대한 롤댐핑 계측 실험 연구를 수행하여 단면 형상별 유체역학적 계수들

(hydrodynamic coefficients)의 변화를 면밀히 조사하였고, Myrhaug와 Sand[17]는 표면마찰(skin friction)로 인한 댐핑을 다루는 데 있어 실선스케일(full scale) 보다는 모형스케일(model scale)에서 더욱 중요함을 강조하였다. 이들 롤댐핑에 관한 선구적인 연구들은 현재에 이르기까지 많은 시사점을 주고 있다. 특히, 롤댐핑을 구성하고 있는 개별 댐핑요소들에 관한 연구는 이론과 실험에 기반하여 수행되었기 때문에 마찰댐핑(friction damping), 에디댐핑(eddy damping), 리프트댐핑(lift damping), 조파댐핑(wave making damping)의 각 댐핑요소들에 대해 비교적 단순한 형상에 대해서는 상당히 정도 높은 예측결과를 주고 있다. 그러나, 현대의 컴퓨터 성능 향상을 포함한 조선해양공학의 눈부신 기술적 진보에 힘입어 과거 수행되어 적용되어 온 연구결과들이 더욱 정확하고 쉽게 활용될 수 있도록 개선되거나 새로운 기술에 의한 진일보한 결과로 제시될 필요가 있다. 최근에 파라메트릭 롤(parametric roll) 현상으로 추정되는 선박사고로 인해 Moideen et al.[18], Moideen et al.[19,20], Somayajula와 Falzarano[21,22]는 관련 연구를 수행하면서 선박 롤댐핑에 관한 문제가 재이슈화되었고, 선주, 선급, 조선소들이 각 기관 고유의 선박운동해석 프로그램을 개발하면서 롤댐핑 문제에 관해 상당한 관심을 기울인 상태였으나, 결과적으로 기존의 결과들을 재인용하는 수준에서 현재까지 롤댐핑 문제를 다루는 것으로 귀결되었다.

이상의 내용과 같이 지금까지의 롤댐핑 평가는 좀 더 근본적인 문제에 관해 도전적으로 다가갈 필요가 있음에도 불구하고 문제의 복잡성과 난해성으로 인해 과거 선진연구들을 이해하고 활용하는 수준에 머물러 있다. 따라서, 본 연구에서는 롤댐핑 문제를 현대적 관점에서 새로운 방법과 새로운 계측기술들을 활용하여 재해석하고 재평가하고자 하였다. 유체점성으로 인한 원형실린더 점성 롤댐핑 값을 예측하고자 이론적 접근을 통해 주요 파라미터 변화에 따른 점성 롤댐핑 값을 얻어내었고 새롭게 고안된 실험방법 및 실험장치를 활용하여 점성 롤댐핑 값의 정성적·정량적 값을 검증하고자 하였다.

2. 이론적 접근

2.1 점성 전단응력에 관한 이론식

근래 Jensen et al.[23], Lu and Chen[24] 등이 자유표면 효과를 무시할 경우, 원형실린더 표면에 작용하

는 전단응력(shear stress)을 다음의 실험식 Eq. (1)로 평가될 수 있다고 제시하였고 Yang[25]이 이를 원형실린더 주기회전운동에 관한 수식들을 활용하여 제시된 전단응력에 관한 실험식 Eq. (1)을 원형실린더 강제동요 시 모멘트, 즉 토크값(T)에 관한 최종식 Eq. (2)로 유도하였다.

$$\tau = -\frac{1}{2}\rho C_f |V_\tau| V_\tau \quad (1)$$

where, τ denotes shear stress, ρ denotes fluid density, C_f denotes friction coefficient, V_τ denotes shear rate.

$$T = -\pi\rho\sqrt{\nu}R^3L\theta_0\omega^2 \quad (2)$$

where, ρ denotes fluid density, ν denotes dynamic viscosity, R denotes radius of circular cylinder, L denotes length of circular cylinder, θ_0 denotes initial rotation angle, ω denotes angular frequency.

상기 식 Eq. (1)과 Eq. (2)는 기본적으로 마찰계수 C_f 와 전단속도 V_τ 에 기반한 수식으로 강제동요 초기각도 변화, 반경 변화, 동요주기 변화 등의 다양한 파라미터 변화에 따른 원형실린더 점성 토크값을 구하는 경우에 대해 효과적으로 이용될 수 있다.

2.2 강제동요 초기각도 변화에 따른 점성 전단력 변화

토크값에 있어 유체점성에 의한 점성 전단력은 강제동요 초기각도에 대해 영향을 받게 되며 이러한 강제동요 초기각도 변화에 따른 점성 전단력의 변화양상을 알아보기 위해 상기 2.1절에 제시된 원형실린더 강제동요 시의 모멘트에 관한 이론식 Eq. (2)를 활용하여 강제동요 주기별 토크값(T)을 구하였다. Fig. 1의 그래프는 $\nu = 0.01 \text{ cm}^2/\text{s}$, $a = 30 \text{ cm}$, $L = 70 \text{ cm}$ 의 조건에서의 회전동요 주기에 따른 토크값 T 의 변화를 나타낸다. 여기서, 점성계수 $\nu = 0.01 \text{ cm}^2/\text{s}$ 는 1기압, 20 °C 물의 동점성계수를 나타내고, $a = 30 \text{ cm}$,와 $L = 70 \text{ cm}$ 는 대상 실험모델의 반경과 길이를 각각 나타낸다. 토크값 T 는 Fig. 1에 보이는 바와 같이 원형실린더 회전주기가 증가함에 따라 2차 곡선 형태의 비선형적으로 감소하는 경향을 나

타냄을 살펴볼 수 있다.

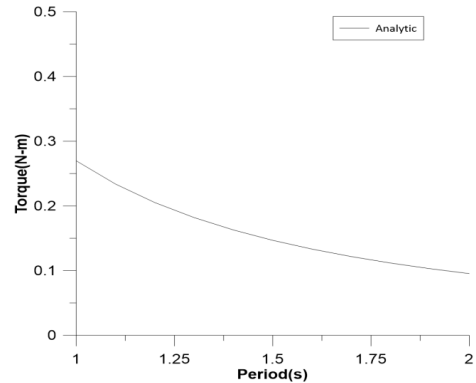


Fig. 1. Change of torque value by period of forced oscillation based on the theoretical formula ($\nu = 0.01 \text{ cm}^2/\text{s}$, $a = 30 \text{ cm}$, $L = 70 \text{ cm}$)

아래 Fig. 2는 초기각도($\theta = 2.5^\circ$, $\theta = 5.0^\circ$, $\theta = 7.5^\circ$)에 따른 회전주기별 원형실린더 점성 전단력의 변화를 나타낸다. 초기 회전각도가 크면 클수록 동일한 주기에서 토크값이 커지는 결과가 나타났으며 이를 통해 원형실린더에 작용하는 점성 전단력이 강제동요 초기각도에 대해 크게 영향을 받는다는 것을 확인할 수 있다.

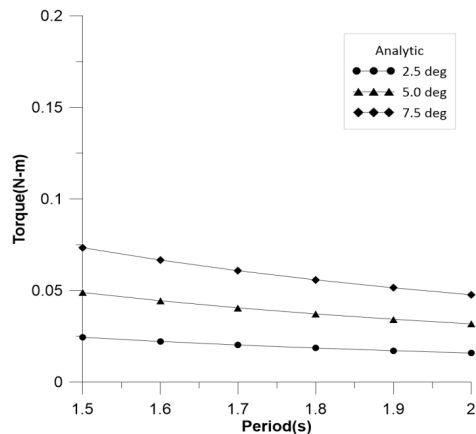


Fig. 2. Torque value for each rotation period according to the initial rotation angle

Fig. 3의 그래프 (a), (b)는 동일한 회전주기 ($Period = 1.6 \text{ s}$, $Period = 1.8 \text{ s}$)에서 초기각도($\theta = 2.5^\circ$, $\theta = 5.0^\circ$, $\theta = 7.5^\circ$) 변화에 따른 원형실린더 점성 전단력의 변화를 나타낸다. 초기각도가 증가함에 따라 토크값이 선형적으로 증가하는 것을 살펴볼 수 있다.

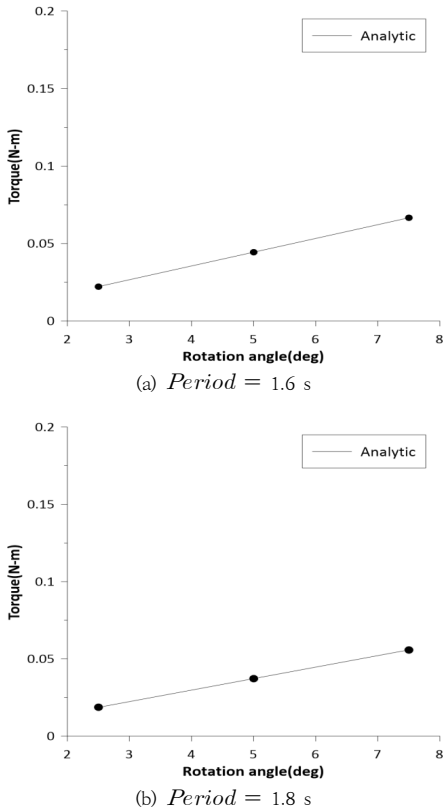


Fig. 3. Change of torque value according to the initial rotation angle based on rotation period

2.3 원형실린더 반경 크기 변화에 따른 점성 전단력 변화

원형실린더 반경크기가 증가하게 되면 접수면적이 증가하게 되며 이에 따라 롤댐핑 값 또한 증가하게 된다. 강제동요 시 원형실린더 반경 크기 변화에 따른 점성 전단력의 변화양상을 알아보기 위해 Eq. (2)에 제시된 이론식을 활용하여 반경 크기에 따른 강제동요 주기별 토크 값을 그래프로 나타내었다. Fig. 4에 보이는 바와 같이 반경 R 이 증가함에 따라 강제동요에 의한 원형실린더 토크값이 급격히 증가함을 알 수 있으며 원형실린더 점성 롤댐핑 값이 반경 R 이 커짐에 따라 비선형적으로 증가함을 살펴볼 수 있다. 이것은 원형실린더의 점성 전단력이 초기 회전각도에 비례할 뿐만 아니라 원형실린더 반경 (R)의 세제곱에 비례하기 때문에 급격하게 증가한 것으로 추정할 수 있다.

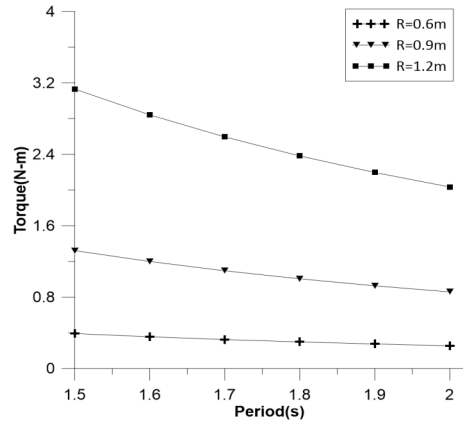


Fig. 4. Torque value for each rotation period according to the radius of circular cylinder

Fig. 5의 그래프 (a), (b)는 동일한 회전주기 ($Period = 1.6\text{ s}$, $Period = 1.8\text{ s}$)에서 반경 크기 변화 ($R = 0.6\text{ m}$, $R = 0.9\text{ m}$, $R = 1.2\text{ m}$) 변화에 따른 원형실린더 점성 전단력의 변화를 나타낸다.

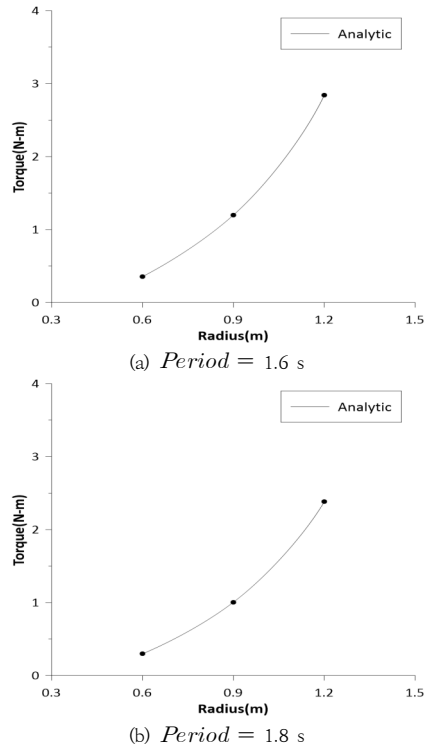


Fig. 5. Change of torque value according to the radius of circular cylinder based on rotation period

3. 실험적 접근

3.1 모형시험

이론적 접근점에 의한 원형실린더 점성 전단력 예측결과와 유효성과 정확도 검증을 위해 모형시험이 수행되었다. 원형실린더 점수표면에서의 순수 점성 전단력(pure shear force) 계측을 위해 특별히 고안된 실험장치를 제작하여 모형시험에 활용하였다. Fig. 6은 점성 전단력 실험을 위한 롤댐핑 모형시험 장치와 주요 구성요소 및 개별치수를 보여준다. 자유표면에서의 조파로 인한 댐핑 발생을 방지하기 위해 사각형 형태의 소형 수조 내에 원형실린더를 수직으로 설치한 후 구동시스템 및 계측시스템과 직접 연결하는 방식으로 점성 롤댐핑 실험장치를 구성하였다. Fig. 6은 주요 구성요소가 포함된 점성 롤댐핑 모형시험 장치 개념도와 제작된 실물 모형시험 장치를 보여준다.

순수 점성 전단력 계측을 위해 수조 내 모델을 수직으로 설치할 경우, 모델의 회전중심부와 지지 바닥면의 마찰로 인한 기계적인 댐핑이 발생하게 된다. 즉, 유체점성으로 인한 순수한 토크발생 외에 추가적인 토크가 발생하게 되므로 이를 방지하기 위해 실린더 회전중심 하부에 스러스트 베어링을 설치하여 기계적인 마찰 발생을 최소화 하였다. 또한, 원형실린더 모델은 순수 점성 전단력으로 인한 마찰댐핑만이 계측되도록 원형실린더의 도심에 회전중심을 두어 모형시험을 수행하였다.

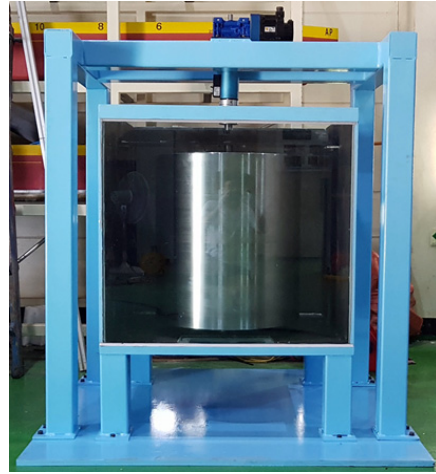
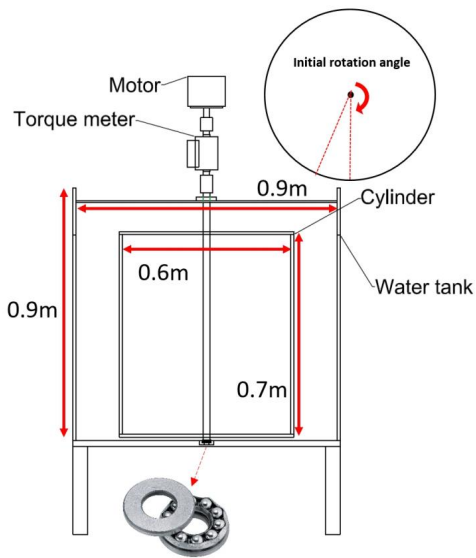


Fig. 6. Schematic diagram of viscous roll damping experimental device(upper) and real model test device(lower)



본 연구에 사용된 모형시험 장치와 원형실린더 모델의 주요재원을 아래 Table 1에 요약하였다.

Table 1. Main particulars of square tank and circular cylinder

| Item | Square tank | Circular cylinder |
|--------------|-------------|-------------------|
| Length (m) | 0.9 | - |
| Width (m) | 0.9 | - |
| Height (m) | 0.9 | 0.7 |
| Diameter (m) | - | 0.6 |

실험장치 내에 설치된 원형실린더 모델의 강제동요 회전주기운동 구동용 서보모터의 제원과 외형을 아래 Table 2에 나타내었다. 토크센서는 서보모터와 실린더 모델 사이에 커플링(coupling)을 이용하여 연결구성하였고 신호계측은 NI(National Instrument)사의 DAQ 시스템(Data Acquisition System)을 이용하였다.

Table 2. Specifications of torque sensor and servo motor

| Item | Torque sensor | Servo motor |
|-------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Type | Strain gauge type | - |
| Power | - | Max. 0.85 kW |
| Measurement range | Max. ± 50 N·m | - |
| Shape |  |  |
| Manufacturer | Kistler | Yaskawa |

수조 내 강제동요 모형시험에 있어 초기회전각도와 회전주기는 점성 전단력 계측을 위한 주요 입력 파라미터들이다. 본 연구에서는 회전각도 $\theta = 5.0^\circ$ 와 $\theta = 7.5^\circ$ 에서 강제동요 모형시험을 수행하였고 회전주기 T 는 1.5 s ~ 2.0 s의 범위에서 회전주기별 토크값을 계측하였다.

4. 모형시험 결과와 이론식 기반 토크값 예측결과 비교

모형시험 결과의 유효성 확인을 위해 접수 표면적의 크기 변화에 따른 토크값의 변화를 확인하였다. 원형실린더 모델의 잠긴 부분의 차이, 즉 접수 표면적의 변화를 주기 위해 수심 0.5 m와 0.7 m에서 동일한 구동조건 하에 모형시험을 수행하였다. 아래 Fig. 7의 (a), (b) 그래프들은 강제동요 시 접수면적에 따른 토크값의 크기변화를 나타낸다. 동일한 모형시험 조건에서 실험모델의 수심에 비례하여 접수표면적이 커질수록 토크값이 미소하게 커지는 것을 확인할 수 있으며 이를 오른쪽 토크값 피크(peak)부분 확대그래프(Fig. 7 (b))에서 명확히 살펴볼 수 있다.

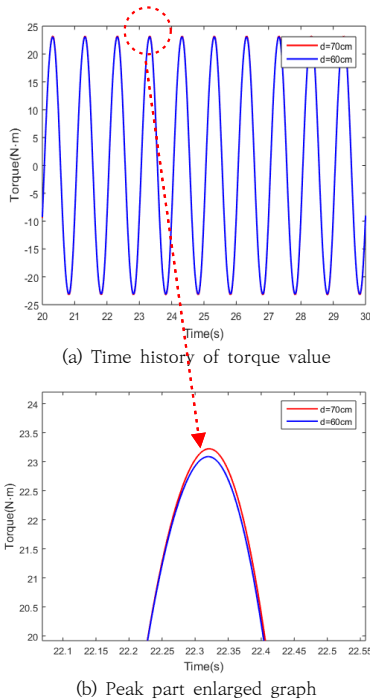
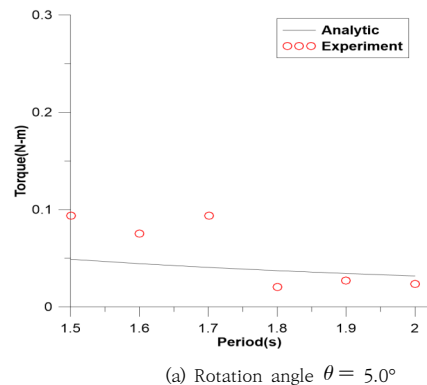


Fig. 7. Change of torque value according to water depth ($d = 50$ cm vs. $d = 70$ cm)

아래 Fig. 8의 (a), (b) 그래프들은 원형실린더 회전각도에 따른 강제동요 회전주기별 전단력 해석결과와 모형시험에서 계측된 토크값을 동일한 그래프 상에 상호비교한 결과를 나타낸다. Table 3에 수행된 수조 모형시험 케이스(case)별 이론식과 실험결과의 차이값을 요약하여 나타내었다. 초기 회전각도 5.0° 인 경우와 7.5° 인 경우 모두 이론식으로부터 얻은 토크값과 실험으로부터 얻은 토크값과 상당히 잘 일치하는 결과가 나타났다. 초기 회전각도 5.0° 인 경우 이론식으로부터 얻은 토크값과 실험으로부터 얻은 토크값이 1.5 s ~ 1.7 s의 구간에서는 이론식 결과에 대해 0.05 N·m ~ 0.03 N·m 범위의 근소하게 큰 값이 나타났으나 1.8 s ~ 2.0 s의 구간에서는 계측된 토크값과 실험결과가 0.01 N·m ~ 0.02 N·m 범위의 이론식 결과에 거의 근접하는 결과가 나타났다. 이론식과 실험결과가 일부 구간에서 다소 차이가 나는 이유로 모형시험 수행 중의 실험오차나 이론식 자체가 가질 수 있는 한계 등을 검토해 볼 수 있으며 향후, 이러한 일부 구간에서의 이론식과 실험결과가 차이가 나는 원인을 규명하기 위한 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다. 또한, 초기 회전각도 7.5° 인 경우에는 전 구간에 걸쳐 이론식으로부터 얻은 토크값과 실험으로부터 얻은 토크값이 아주 잘 일치하였다. 이상의 결과를 종합해 볼 때, 일부 구간에서 미소한 차이가 있음에도 불구하고 유체점성으로 인한 토크값 자체의 크기가 대단히 작고 원형실린더 모델을 이용한 수조 내 모형시험이 기본적으로 어느 정도의 실험오차를 포함하고 있음을 고려해 볼 때 이론식으로부터 얻은 전단력 결과가 모형시험결과와 상당히 잘 일치한다고 볼 수 있다.



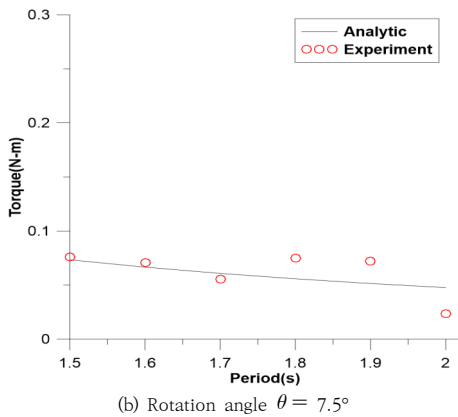


Fig. 8. Comparison of torque values by rotation period for $\theta = 5.0^\circ$, $\theta = 7.5^\circ$ rotation angle (Analytic Solution vs. Experiment)

Table 3. Difference between theoretical formula and experimental result regarding torque value

| $\theta(^\circ)$ \ T(s) | 1.5 | 1.6 | 1.7 | 1.8 | 1.9 | 2.0 |
|-------------------------|-------|------|-------|-------|-------|-------|
| 5.0 | 0.04* | 0.03 | 0.05 | -0.02 | -0.01 | -0.01 |
| 7.5 | 0.00 | 0.00 | -0.01 | 0.02 | 0.02 | -0.02 |

*unit: N-m

5. 결론

선박 및 부유식 해양구조물의 설계와 해석에 있어 난제로 남아있는 점성 롤댐핑에 관해 이론적, 실험적 접근을 통한 연구가 수행되었다. 본 연구에서는 이론적 접근 방법에 기반한 파라미터 변화에 따른 점성 롤댐핑 값의 변화양상을 면밀히 검토하였고 그 결과를 요약하여 나타내었다. 또한 강제동요 시 원형실린더 접수표면에 작용하는 점성 롤댐핑 값의 정성적 변화와 정량적 변화를 새로운 실험적 접근방식에 의한 결과값과 비교·검토하여 이론식의 유효성과 적합성을 실험적으로 검증하였다. 특히, 순수 점성 전단력 모형시험을 위해 특별히 고안된 소형 수조 모형시험 장치를 제작하여 실험을 수행하였고 원형실린더 강제동요에 따른 토크값의 변화를 면밀히 관찰하였다. 이론식으로부터 구한 점성 전단력값과 모형시험을 통해 얻은 점성 전단력값의 비교검증을 통해 다음의 결론을 얻을 수 있다.

- (1) 원형실린더 접수표면에서의 점성 전단력은 강제동요 초기각도와 원형실린더 반경크기에 크게 영향

을 받는다. 초기각도가 커질수록 점성 전단력의 크기가 선형적으로 증가하고 반경이 커질수록 점성 전단력의 크기가 비선형적으로 급격히 증가한다.

- (2) 정도높은 점성 롤댐핑 실험을 위해 소형 수조 내 수직으로 설치된 원형실린더를 이용한 실험방법 및 계측방법을 제시하였다.
- (3) 새로운 실험적 접근법을 통해 얻은 계측결과와 이론식에 의한 결과를 상호 비교하여 두 결과가 서로 아주 잘 일치함을 확인하였고, 이를 통해 이론식 및 실험방법의 유효성과 정확도를 입증하였다.
- (4) 본 연구결과를 통해 순수 점성 롤댐핑에 관해 새로운 시각에서 접근할 수 있는 이론적, 실험적 토대를 마련하였고 이의 검증과정을 통해 부유체 롤댐핑 현상에 대한 이해수준을 한단계 끌어올릴 수 있는 기반을 마련하였다.

본 연구를 통해 얻은 유체점성에 의한 순수 점성 마찰 댐핑에 관한 이론적, 실험적 연구결과가 향후 에디댐핑, 리프트댐핑, 조파댐핑을 포함하는 전체 롤댐핑을 얻어내기 위한 부분으로 활용된다면 선박 및 부유식 해양구조물의 롤댐핑값을 얻어내기 위한 많은 노력과 비용이 줄어들 수 있을 것으로 기대한다.

References

- [1] J. H. Vugts, "The Hydrodynamic Coefficients for Swaying, Heaving and Rolling Cylinders in a Free Surface", *International Shipbuilding Progress*, vol.15, no.167, pp. 251-276, 1968.
DOI: <https://doi.org/10.3233/ISP-1968-1516702>
- [2] Y. Ikeda, Y. Himeno, N. Tanaka, "On Roll Damping Force of Ship - Effects of Friction of Hull and Normal Force of Bilge Keels", *Journal of the Kansai Society of Naval Architects*, Japan no. 161, pp. 41-49, 1976.
DOI: https://doi.org/10.14856/kansaiks.161.0_41
- [3] Y. R. Choi, J. H. Kim and Y. S. Kim, "An Analysis of Rolling Performance for a Barge Type FPSO", *Journal of Ocean Engineering and Technology*, vo.19, no.3, pp. 25-30, 2005.
- [4] N. W. Kim, Y. J. Kim and Y. R. Ha, "Experimental Study of the Free Roll Decay Test for the Evaluation of Roll Damping Coefficients", *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, vol.52, no.6, pp. 460-470, 2015.
DOI: <https://doi.org/10.3744/SNAK.2015.52.6.460>
- [5] B. W. Park, D. W. Jung, J. S. Jung, I. B. Park, S. K. Jo and H.G.Sung, "Experimental Study on Estimation

- of Roll Damping for Various Midship Section”, *Journal of Ocean Engineering and Technology*, vol.33, no.4, pp. 322–329, 2019.
DOI: <https://doi.org/10.26748/KSOE.2019.004>
- [6] Bonfiglio L. U. C. A, Brizzolara S. T. E. F. A. N. O, Chrysostomidis C. H. R. Y. S. S. O. S. T. O. M. O. S, “Added Mass and Damping of Oscillating Bodies: a fully viscous numerical approach”, *Recent Advances in Fluid Mechanics, Heat & Mass Transfer and Biology*, pp. 210-215, 2011.
- [7] Min Gu, Jiang Lu, Shuxia Bu, Chengsheng Wu, Gengyao Qiu, “Numerical Simulation of the Ship Roll Damping”, *Proc. of 12nd International Conference on the Stability of Ships and Ocean Vehicles*, Jun. 14–19. 2015.
- [8] M. K. Kim, K. H. Jung, S. B. Park, G. N. Lee, I. R. Park and S. B. Suh, “Study on Roll Motion Characteristics of a Rectangular Floating Structure in Regular Waves”, *Journal of Ocean Engineering and Technology*, vol. 33, no.2, pp. 131–138, 2019.
DOI: <https://doi.org/10.26748/KSOE.2019.009>
- [9] S. H. Kwon, B. J. Kim, S. Y. Han, Y. J. Kim, K. S. Ahn, D. Ren, L. Lu, S. C. Jiang and X. B. Chen, “Study on Roll Damping around Circular Cylinder”, *Proc. of 29th IWWWFB Conference*, Mar. 30–Apr. 2. 2014.
- [10] Y. Himeno, *Prediction of Ship Roll Damping - A State of the Art*, report no. 239, Department of Naval Architecture and Marine Engineering, University of Michigan, Sep. 1981.
- [11] N. Tanaka and T. Hishida, “A Study on the Eilge Keels : Part 1. Two Dimensional Model Experiments”, *Journal of Zosen Kiokai*, no.101, pp. 99–105, 1957.
DOI: <https://doi.org/10.2534/jiasnaoe1952.1957.99>
- [12] N. Tanaka and H. Kitamura, “A Study on the Bilge Keels : Part 2. Full Sized Model Experiment”, *Journal of Zosen Kiokai*, no.103, pp. 69–73, 1958.
DOI: <https://doi.org/10.2534/jiasnaoe1952.1958.69>
- [13] N. Tanaka, “A Study on the Bilge Keels: Part 3. the Effect of the Ship Form and the Bilge Keel Size on the Action of the Bilge Keel”, *Journal of Zosen Kiokai*, no.105, pp. 27–32, 1959.
DOI: <https://doi.org/10.2534/jiasnaoe1952.1959.27>
- [14] N. Tanaka, “A Study on the Bilge Keels : Part 4. on the Eddy-Making Resistance to the Rolling of a Ship Hull”, *Journal of Zosen Kiokai*, no.109, pp. 205–212, 1961.
DOI: <https://doi.org/10.2534/jiasnaoe1952.1961.205>
- [15] H. Kato, “On the Frictional Resistance to the Rolling of Ships”, *Journal of Zosen Kiokai*, no.102, pp. 115–122, 1957.
DOI: https://doi.org/10.2534/jiasnaoe1952.1957.102_115
- [16] Y. Ikeda, “Roll Damping of Ships”, *Proceedings of 1st Marine Dynamics Symposium*, Japan, pp. 241–250. 1984.
- [17] D. Myrhaug and I. Ø. Sand, “On the Frictional Damping of the Rolling of a Circular Cylinder”, *Journal of Ship Research*, vol.24, no.4, pp. 244–255, 1980.
DOI: <https://doi.org/10.5957/jsr.1980.24.4.244>
- [18] H. Moideen, J. M. Falzarano and S. A. Sharma, “Parametric Roll of Container Ships in Head Waves”, *Ocean Systems Engineering*, vol.2, no.4, pp. 239–255, 2012.
DOI: <https://doi.org/10.12989/ose.2012.2.4.239>
- [19] H. Moideen, A. Somayajula and J. M. Falzarano, “Parametric Roll of High Speed Ships in Regular Waves”, *Proceedings of the ASME 2013 32nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, Nantes, France, V005T06A095, 2013.
DOI: <https://doi.org/10.1115/OMAE2013-11602>
- [20] H. Moideen, A. Somayajula and J. M. Falzarano, “Application of Volterra Series Analysis for Parametric Rolling in Irregular Seas”, *Journal of Ship Research*, vol.58, no.2, pp. 97–105, 2014.
DOI: <https://doi.org/10.5957/jsr.2014.58.2.97>
- [21] A. S. Somayajula and J. M. Falzarano, “Non-linear Dynamics of Parametric Roll of Container Ship in Irregular Seas”, *Proceedings of the ASME 2014 33rd International Conferences on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, San Francisco, USA, V007T12A018, 2014.
DOI: <https://doi.org/10.1115/OMAE2014-24186>
- [22] A. S. Somayajula and J. M. Falzarano, “Validation of Volterra Series Approach for Modelling Parametric Rolling of Ships”, *Proceedings of the ASME 2015 34th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, St. John’s, Newfoundland, Canada, V011T12A043, 2015.
DOI: <https://doi.org/10.1115/OMAE2015-41467>
- [23] B. L. Jensen, B. M. Sumer, J. Fredsøe, “Turbulent Oscillatory Boundary Layers at High Reynolds Number”, *Journal of Fluid Mechanics*, no.206, pp. 265–297, 1989.
DOI: <https://doi.org/10.1017/S0022112089002302>
- [24] L. Lu and X. B. Chen, “Dissipation in the Gap Resonance between Tow Bodies”, *Proceedings of 27th IWWWFB Conference*, Copenhagen, Denmark, 2012.
- [25] S. H. Yang, “Study on the Viscous Roll Damping around Circular Cylinder Using Forced Oscillations”, *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, vol.18, no.2, pp. 71–76, 2017.
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2017.18.2.71>

양 승 호(Seung-Ho Yang)

[정회원]



- 2001년 2월 : 부산대학교 공과대학 기계공학부 (기계공학학사)
- 2003년 8월 : 부산대학교 공과대학원 기계공학과 (기계공학석사)
- 2013년 8월 : 부산대학교 공과대학원 조선해양공학과 (조선해양공학박사)
- 2013년 2월 ~ 2016년 2월 : 삼성중공업 중앙연구소 대덕연구센터 책임연구원
- 2016년 3월 ~ 현재 : 울산과학기술대학교 기계공학부 부교수

<관심분야>

해양유체, 해양구조물 설계 및 설치

백 형 민(Hyung-Min Baek)

[정회원]



- 2017년 2월 : 부산대학교 공과대학 조선해양공학과 (조선해양공학학사)
- 2019년 2월 : 부산대학교 공과대학원 조선해양공학과 (조선해양공학석사)
- 2020년 3월 ~ 현재 : 부산대학교 공과대학원 조선해양공학과 (조선해양공학박사과정)

<관심분야>

해양유체, 슬로싱