

강제동요를 이용한 원형실린더 점성 롤댐핑 연구

양승호
울산과학기술대학교 기계공학부

Study on the Viscous Roll Damping around Circular Cylinder Using Forced Oscillations

Seung-Ho Yang

Department of Mechanical Engineering, Ulsan College

요약 선박 및 해양구조물 설계에 있어 롤댐핑에 관한 문제는 유체점성과 현상자체의 비선형성으로 인해 공학자들에게 있어 난제로 남아있다. 본 연구에서는 강제동요방법을 이용하여 원형실린더의 점성 롤감쇠에 관한 연구를 수행하였다. 토크 센서를 이용하여 강제동요 시 발생하는 롤모멘트(roll moment)를 강제동요 주기별로 측정하였고 이를 실험식(empirical formula)과 비교·검토 하였다. 점성에 의한 전단력으로부터 측정된 토크의 크기가 상대적으로 작은 값임에도 불구하고 실험식으로부터 얻어진 계산값들과 정성적으로 유사한 결과를 보였고, 일부 주기에서는 정량적으로도 잘 일치하는 결과를 보였다. 또한, PIV 측정기법을 통해 원형실린더 벽면주위의 유동을 면밀히 관찰하였으며, 유체점성으로 인해 원형실린더 벽면근처에서 경계층이 형성되고 자유수면에서 원형실린더의 주기적인 강제회전동요로 인해 미소한 크기의 파가 생성(wave making)됨을 PIV 측정결과와 분석을 통해 확인하였다. 본 연구에서는 점성 롤감쇠로 인한 실험식의 적합성을 모형시험을 통해 확인하였고, PIV 측정기법을 통해 벽면주위의 유체점성으로 인한 조파현상을 입증하였다.

Abstract The roll damping problem in the design of ships and offshore structures remains a challenge to many researchers due to the fluid viscosity and nonlinearity of the phenomenon itself. In this paper, the study on viscous roll damping of a circular cylinder was carried out using forced oscillations. The roll moment generated by forced oscillation using a torque sensor was measured for each forced oscillation period and compared with the empirical formula. Although the magnitude of the measured torque from the shear force was relatively small, the results were qualitatively similar to those obtained from the empirical formula, and showed good agreement with the quantitative results in some oscillation periods. In addition, the flow around the circular cylinder wall was observed closely through the PIV measurements. Owing to the fluid viscosity, a boundary layer was formed near the wall of the circular cylinder, and a minute wave was generated by periodical forced oscillations at the free surface through the PIV measurement. In this study, the suitability of the empirical formula for the roll moment caused by viscous roll damping was verified by model tests. The wave making phenomenon due to the fluid viscosity around the wall of a circular cylinder was testified by PIV measurements.

Keywords : Circular cylinder, Forced oscillation, PIV measurement, Torque, Viscous roll damping, Wave making phenomenon

1. 서론

선박 및 해양구조물 설계에 있어 지난 수십 년 동안의

눈부신 기술발전에도 불구하고 롤댐핑은 여전히 난제로 남아 있다. 롤댐핑에 관한 문제는 선형가정으로부터 시작되는 포텐셜 이론과는 달리 유체의 점성에 기인한 비

본 논문은 2016년 울산과학기술대학교 교내학술연구비 지원에 의해 수행됨.

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

Tel: +82-52-279-3138 email: shyang@uc.ac.kr

Received January 9, 2017

Revised January 31, 2017

Accepted February 3, 2017

Published February 28, 2017

선형성이 지배적인 영역에서의 문제이기 때문에 롤댐핑 값을 추정하는 것은 더욱 어렵다[1].

그럼에도 불구하고 많은 선구적인 연구자들이 롤댐핑에 관한 연구에 매진하였고, 롤댐핑에 관한 다양한 추정 방법들을 제시하였다. 그 대표적인 예가 Himeno의 “롤댐핑의 추정에 관한 연구”이며, 지금까지도 대부분의 롤댐핑 추정법에 있어 토대가 되고 있다[2].

Himeno, Ikeda, Tanaka 등의 연구에 따르면 롤댐핑은 마찰 댐핑(friction damping), 에디 댐핑(eddy damping), 리프트 댐핑(lift damping), 조파 댐핑(wave making damping) 등으로 구분할 수 있으며, 빌지킬이 부착된 선박의 경우 빌지킬로 인한 부가적인 댐핑항들이 발생하게 된다. 각각의 항들은 간략화된 공식이나 수치해석을 통해서 구할 수 있으며 전체 롤댐핑의 각 부분으로서 선박의 롤댐핑에 기여하게 된다[3-6].

과거부터 현재에 이르기까지 롤댐핑에 관한 근본적인 평가법은 모형시험을 통한 감쇠시험을 통해 직접 롤댐핑 값을 얻어내는 방법이다. 대상 선박 혹은 대상 해양구조물에 대한 모형을 제작하여 롤감쇠 시험(roll decay test)을 통해 롤댐핑 값을 산정하고 있으며, 근래에 이르러서는 컴퓨터의 급속한 발전과 더불어 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics, 이하 CFD)을 이용한 수치해석적 방법을 통해 롤댐핑 값을 추정하기 위한 시도들이 이어지고 있다[7,8].

본 연구에서는 롤댐핑에 기여하는 여러 댐핑들 중, 마찰 댐핑에 대해 최신의 모형시험 장비와 계측기법들을 통해 그 값을 추출해 보고 기준에 알려진 전단응력에 관한 실험식으로부터 유도된 롤모멘트식의 적합성 및 정확도를 확인해 보고자 하였다. 또한, 롤댐핑 성분들 중 상대적으로 작은 값으로 인해 무시해 왔던 유체점성으로 인한 조파 댐핑 기여분을 확인해 보고자 하였다. 이를 통해, 현대적 관점에서 롤댐핑에 관한 제안된 롤모멘트식의 정확도와 선박 및 해양구조물 초기설계 적용 타당성을 살펴보고자 하였다. 뿐만 아니라, 강제동요를 이용한 롤댐핑 값의 추정에 있어 PIV(Particle Image Velocity, 이하 PIV)계측기법을 통해 대상물체 주변 유동장을 면밀히 살펴보고 유체점성으로 인한 조파현상을 규명하고자 하였다.

2. 실험적 연구

본 연구에서는 부산대학교(Pusan National University, 이하 PNU)에 있는 모형시험용 수조시설을 활용하여 원형실린더 강제동요방법을 이용한 롤댐핑 모형시험을 수행하고자 한다. 현재까지 원형실린더 형태의 물체에 대해 순수전단력(pure shear)에 의한 토크(torque)를 직접적으로 계측한 사례는 거의 없는 것으로 알려져 있다. 따라서, 모형시험 중 수조 내에 대상모델 주변의 마찰 댐핑으로 인한 토크를 계측하고 이와함께 모델 주변의 조파 현상이 함께 관찰되도록 PIV 계측기법을 이용한 원형실린더 주변 유동계측을 동시에 수행하였다. 계측된 토크 값은 기존의 실험식과 비교·검토하여 추정법의 타당성 및 정확도를 확인하고자 하였다.

2.1 롤모멘트 추정식

Jensen et al[9], Lu와 Chen[10]은 자유표면 효과를 무시할 때, 원형실린더 표면에 작용하는 전단응력은 다음의 실험식으로 평가될 수 있다고 하였다.

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

여기서, τ 는 전단응력, ρ 는 밀도, C_f 는 마찰계수, V_τ 는 전단속도이다.

본 연구는 원형실린더의 강제동요 주기 회전 운동 및 그 접수면에 관한 문제이기 때문에 $V_\tau = R\dot{\theta}$, $\theta = \theta_0 \cos(\omega t)$,

$C_f = \frac{2}{\sqrt{Re}}$, $Re = a \frac{V_\tau}{\nu}$, $a = R\theta_0$ 를 각각 적용하면 다음의 모멘트에 관한 실험식을 구할 수 있다. 여기서, R 은 원형실린더 반경, θ 는 회전각도, θ_0 는 초기회전각도, $\dot{\theta}$ 는 회전각속도, ω 는 각주파수, a 는 회전의 크기, V_τ 는 접선속도, ν 는 동점성계수이다. 따라서, 주기적으로 회전동요를 하는 원형실린더의 전단응력과 모멘트는 아래의 수식으로 표현될 수 있다[11].

$$\tau = -\rho \sqrt{\nu} R \theta_0 \omega^{\frac{2}{3}} |\sin(\omega t)| \sin(\omega t) \quad (2)$$

$$M = \int_0^\tau \tau(Rd\theta)LR = -\pi \rho \sqrt{\nu} R^3 L \theta_0 \omega^{\frac{3}{2}} |\sin(\omega t)| \sin(\omega t) \quad (3)$$

여기서, L 은 원형실린더의 길이이다.

따라서, 모멘트의 크기에 관한 최종식은 아래와 같이 된다.

$$M^a = -\pi \rho \sqrt{\nu} R^3 L \theta_0 \omega^{\frac{3}{2}} \quad (4)$$

2.2 모형시험

2.2.1 강제동요를 이용한 물모멘트 계측 모형시험

원형실린더 모델에 대한 강제동요 모형시험을 실시하여 물운동에 의한 토크값을 얻고자 하였다.

Fig.1(a)는 모형시험이 수행된 2차원 수조와 계측시스템 전체구성을 나타낸다. Fig.1(b)는 모델을 강제동요시키기 위한 구동시스템을 나타낸다. 계측항목으로는 토크센서를 이용한 토크값과 PIV 계측시스템을 이용한 유동장(flow field)이 있다. PIV 계측방법에 관해서는 2.2.2 절에 간략히 요약하였다.

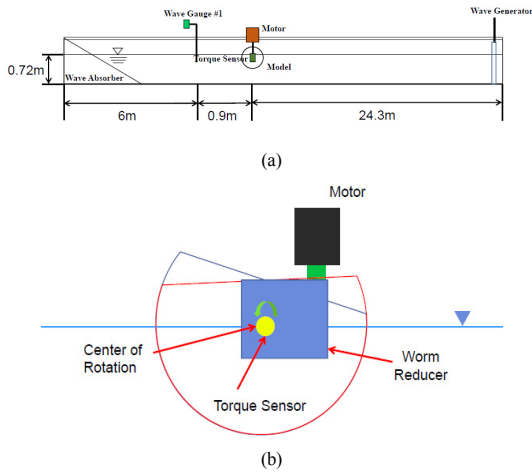


Fig. 1. Schematic diagram for model test
(a) Measurement in 2D wave flume
(b) Driving mechanism for forced oscillation

Fig.2는 수조내에 설치된 원형실린더 모델을 보여준다. 지그(jig)를 이용하여 모델을 수조 내에 고정하였고 원형실린더 내부공간을 활용하여 모델의 구동에 필요한 장치들을 구성하였다.

모델의 주요치수는 Table.1.에 나타난 바와 같다.

모형시험이 수행된 흘수는 0.5m이고, 따라서 이에 따른 원형실린더의 점수면적은 0.96m^2 가 된다.

Fig.3은 강제동요를 위한 구동장치들로 구동모터, 구동축, 모델과의 연결부위로 구성되어 있다.

사용된 토크센서는 스트레인 게이지 타입(strain gauge type)으로 계측범위가 최대 $\pm 50\text{Nm}$ 이고, 외형은 Fig.4(a)에 보이는 바와 같다. 모델 주기회전운동 구동용 모터는 서보모터(servo motor)로 최대 0.85kW의 파워(power)를 가지고 있고, 외형은 Fig.4(b)에 보이는 바와 같다.

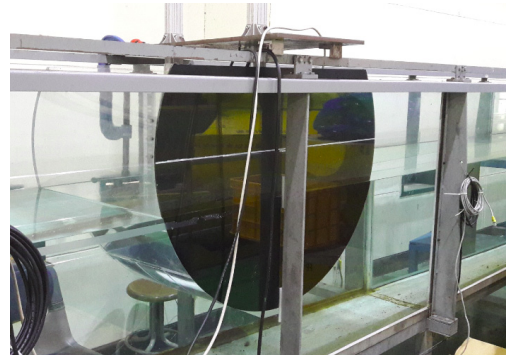


Fig. 2. Circular cylinder model in 2D wave flume

Table 1. Model main particulars

	Dimension	Remark
Length	0.59m	< 0.6 (2D wave flume breadth)
Diameter	1.0m	-

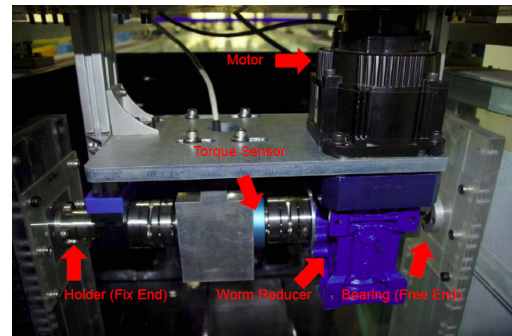


Fig. 3. Model test set-up for forced oscillation

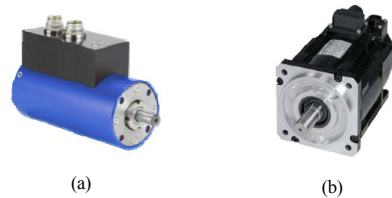


Fig. 4. Instruments for model test
(a) Torque sensor (b) Servo motor

2.2.2 PIV 계측기법을 이용한 원형실린더 주변 유동장 계측 모형시험

근래에 와서 PIV 계측기법을 이용하여 대상 유동장을 정밀하게 계측하는 연구방법이 일반화되고 있다. 본 연구에서도 원형실린더 주변 유동장의 변화를 가시화하

고 이를 분석하기 위하여 PNU에서 보유중인 PIV 계측 시스템을 모형시험 수행 시 이용하였다[12]. Fig. 5는 본 연구에서 사용한 PIV 계측시스템의 개념도를 보여준다.

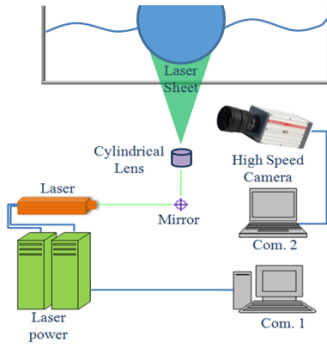


Fig. 5. Schematic diagram of PIV measurement system

3. 모형시험 결과 및 분석

강제동요를 이용한 롤모멘트 계측 모형시험 결과와 PIV기법을 이용한 원형실린더 주변 유동장 계측 모형시험 결과를 3.1과 3.2에 각각 요약하였다.

3.1 강제동요를 이용한 롤모멘트 계측 모형시험 결과

강제동요를 이용한 롤모멘트 계측 모형시험 결과를 시계열 그래프(Fig.6.)와 동요주기별 토크값(Fig.7.)으로 나타내었다.

Fig.6.은 흘수 0.5m, 회전동요주기 1.1초와 1.3초에서 각각 계측한 모멘트의 시계열 그래프로 강제동요에 의한 토크값의 주기적인 변동양상을 확인할 수 있다. Fig.7.은 회전동요주기에 따른 토크를 모형시험을 수행한 전주기에 대해 그래프에 나타난 것으로, 점수면 전단력의 주기별 토크값을 확인할 수 있다. 모형시험 결과를 이론식과 비교해 볼 때, 특정주기에서는 정량적으로 잘 일치하는 결과를 보였고 일부주기($T=1.1s$)에서는 다소 큰 값을, 일부주기($T=1.2 \sim 1.6s$)에서는 근소하게 크거나 작은 값을 보였다. 또한, 계측된 데이터들의 기울기가 이론식에 비해 약간 크게 나타났다. 그러나, 점성에 의한 롤모멘트 값 자체가 다른 감쇠값들에 비해 상대적으로 아주 작은 값이기 때문에 차이가 나는 주기에 대해 향후 CFD 등을 통한 추가적인 연구가 필요할 것을 사료된다.

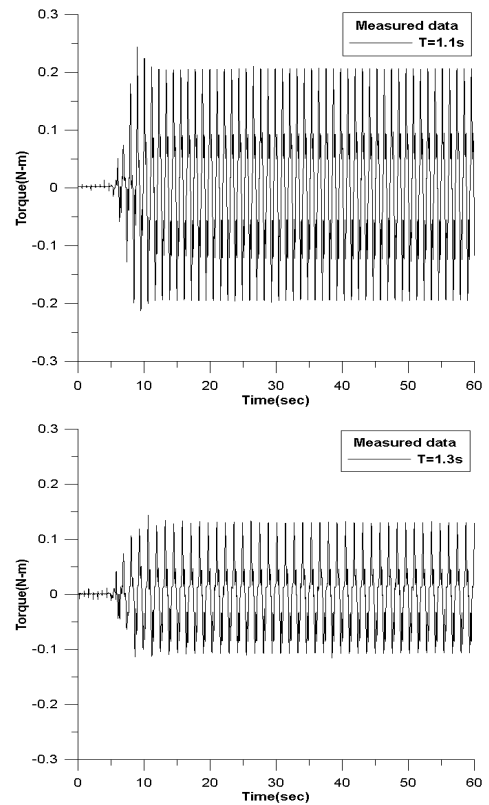


Fig. 6. Time history of torque by forced oscillation in water($T=1.1sec$ (upper), $T=1.3sec$ (lower))

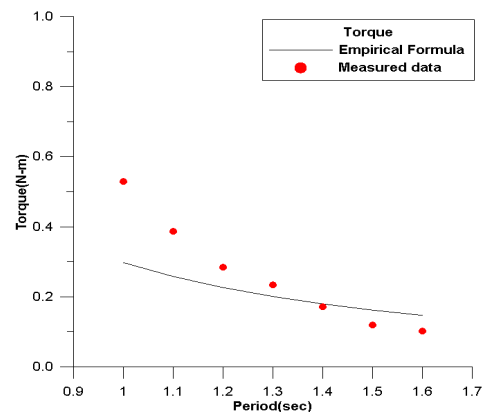


Fig. 7. Torque according to forced oscillation periods of circular cylinder model

3.2 PIV 계측결과

PIV 계측기법을 이용한 모형시험 결과를 원형실린더 주변 유체속도장(velocity vector field)과 와운곽선(vorticity contour)으로 Fig.8.에 나타내었다.

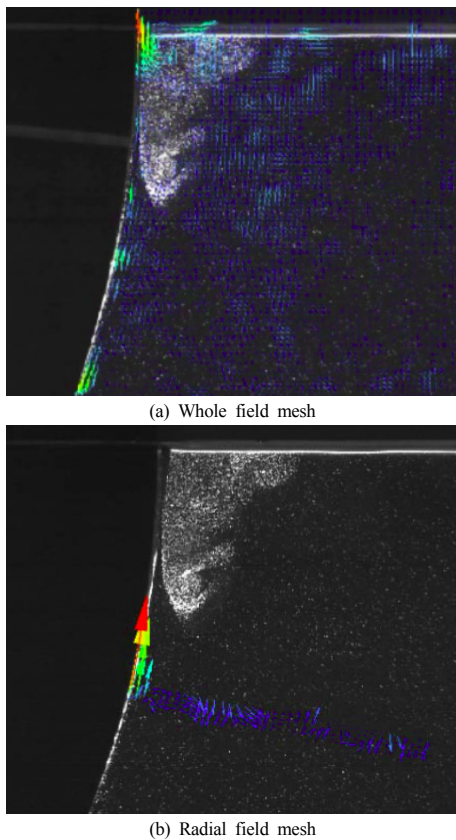


Fig. 8. Velocity vector field and vorticity contours

Fig.8은 동요주기 $T=1.0$ 초로 강제회전시켰을 때 반시계방향 회전 중 특정시점에 원형실린더 주변 유체속도와 와운곽선을 입자이미지 형태로 나타낸 것이다. 원형실린더 벽면근처와 자유수면 근처에서 유체속도의 크기가 상대적으로 크고 와가 자유수면 근처의 벽면에 집중되어 있는 것을 관찰할 수 있다. 또한, 생성된 와가 원형실린더 벽면근처에서 물체중심에서 멀어지는 방향으로 퍼져나가는 것으로 살펴볼 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 강제동요방법을 이용하여 원형실린더의 점성 롤댐핑에 대한 연구를 수행하였다.

강제회전동요 시의 원형실린더 롤모멘트를 직접 계측하고 실험식과 비교·검토하여 그 적합성을 검토하였다. 회전동요 주기별 롤모멘트 계측결과가 실험식과 정성적

경향과 정량적 크기면에서 비교적 잘 일치하였다.

또한, PIV 계측기법을 이용하여 원형실린더 벽면근처의 유동장 형태를 관찰하였고, 점성으로 인한 원형실린더 주변 자유수면과의 생성현상을 파악하였다.

이상의 연구결과로부터 다음의 결론을 얻을 수 있다.

첫째, 실험식에 기초한 원형실린더 롤모멘트식을 이용하여 유체점성에 의한 롤모멘트를 계측값과 유사한 수준으로 추정할 수 있다.

둘째, PIV 계측결과를 토대로 볼 때, 원형실린더 벽면 자유수면 근처에서 국소적으로 와가 형성되고 미소자유수면과가 생성되어 주변으로 퍼져나가는 현상을 실험적으로 확인할 수 있다.

셋째, 강제동요로 인한 방사파(radiation wave)의 발생현상이 있음에도 불구하고 그 크기가 극히 작은 것으로 관찰되는 바, 점성으로 인한 순수전단력에 의한 방사파는 무시할 수 있다.

본 연구에서 수행된 원형실린더 주변 순수 점성 감쇠력 계측 및 실험식과의 비교·평가가 향후 실제 선박 및 해양구조물 롤감쇠력(roll damping force) 추정을 위한 기본토대가 될 것으로 사료된다.

References

- [1] J.M.J. Journée, W.W. Massie, *Offshore Hydrodynamics*, 1st edition, pp. 298-304, Delft University of Technology, Jan. 2001.
- [2] Himeno, Y., *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.
- [3] Ikeda, Y., Himeno, Y., Tanaka, N., "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.
- [4] Ikeda, Y., Komatsu, K., Himeno, Y., Tanaka, N., "On Roll Damping Force of Ship - Effects of Hull Surface Pressure Created by Bilge Keels", *Journal of the Kansai Society of Naval Architects*, Japan no. 165, pp. 31-40, 1977.
- [5] Ikeda, Y., Himeno, Y., Tanaka, N., "On Eddy Making Component of Roll Damping Force on Naked Hull", *Journal of the Society of Naval Architects*, Japan no. 142, pp. 59-69, 1977.
- [6] Ikeda, Y., Komatsu, K., Himeno, Y., Tanaka, N., "Components of Roll Damping of Ship at Forward Speed", *Journal of the Society of Naval Architects*, Japan no. 143, pp. 121-133, 1978.

- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] B.L. Jensen, B.M. Sumer, J. Fredsoe, "Turbulent Oscillatory Boundary Layers at High Reynolds Number", *Journal of Fluid Mechanics*, 206, pp. 265-297, 1989
DOI: <https://doi.org/10.1017/S0022112089002302>
- [10] L. Lu, X.B. Chen, "Dissipation in the Gap Resonance between Tow Bodies", *Proc. of 27nd IWWF Conference*, Apr. 22-25. 2012.
- [11] S.H. Kwon, B.J. Kim, S.Y. Han, Y.J. Kim, K.S. Ahn, D.Ren, L.Lu, S.C. Jiang, X.B. Chen, "Study on Roll Damping around Circular Cylinder", *Proc. of 29nd IWWF Conference*, Mar. 30-Apr. 2. 2014.
- [12] S.J. Park, *Hydrodynamic Characteristics of Moonpool Shapes*, Mater Thesis, Pusan National University, 2009.

양 승 호(Seungho-Ho Yang)

[정회원]



- 2003년 8월 : 부산대학교 공과대학 원 기계공학과 (기계공학석사)
- 2013년 8월 : 부산대학교 공과대학 원 조선해양공학과 (조선해양공학 박사)
- 2003년 7월 ~ 2011년 9월 : 현대중공업 선박해양연구소 선임연구원
- 2012년 1월 ~ 2012년 11월 : 로이드선급아시아 Hydrodynamicist
- 2013년 2월 ~ 2016년 2월 : 삼성중공업 중앙연구소 대덕연구센터 책임연구원
- 2016년 3월 ~ 현재 : 울산과학기술대학교 기계공학부 교수

<관심분야>

해양유체, 해양구조물 설계 및 설치