

## KP505 프로펠러의 단독성능 시험을 위한 유동해석에 관한 연구

이한섭<sup>1</sup>, 김민태<sup>1</sup>, 김원섭<sup>1</sup>, 이종훈<sup>1</sup>, 박상흠<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>공주대학교 기계공학과

<sup>2</sup>공주대학교 기계자동차공학부

### A Study on the Flow Analysis for KP505 Propeller Open Water Test

Han-Seop Lee<sup>1</sup>, Min-Tae Kim<sup>1</sup>, Won-Seop Kim<sup>1</sup>, Jong-Hoon Lee<sup>1</sup>, Sang-Heup Park<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Division of Mechanical Engineering, Kongju University

<sup>2</sup>Division of Mechanical & Automotive Engineering, Kongju National University

**요 약** 공동현상은 유체의 속도 변화에 의한 압력변화로 인해 유체 내에 빈 곳이 생기는 현상을 말한다. 고속의 액체 유동에서 액체의 압력이 포화증기압 이하로 낮아져서 액체 내에 증기 기포가 발생하는 현상이다. 본 연구에서는 선박 및 해양플랜트 분야에서 사용되어지는 유체기기에 대해 CFD 유동해석을 이용하여 선박용 프로펠러의 단독성능 해석기법의 타당성 확보 및 공동에 따른 유동양상을 파악하기 위해 FLUENT를 이용하여 전진비를 증가시키며 3차원 해석을 수행하고 MOERI의 실험 데이터와 비교분석하였다. 대형 컨테이너선용 KP505프로펠러의 사양을 기준으로 전진비에 따른 해석의 결과 전진비 0.7~0.8 구간에서 효율은 60% 수준으로 가장 높게 확인되었다. 압력면과 흡입면의 차이로 추력이 발생하는 것을 확인하였고 프로펠러 표면보다는 이면부근에서 Bubble이 많이 생성될 것으로 추정되며 공동현상이 더 많이 발생할 것이라 추정되었다. 또한 전진비가 증가함에 따라 공동현상은 급격히 감소함을 알 수 있었다. 추력계수와 토크계수는 MOERI 실험값과 비교했을 때 비교적 유사한 결과를 나타내었으며 전진비 1을 제외하고 모두 5%이내의 차이를 나타내었다. 따라서, CFD로 프로펠러 단독 성능에 대한 평가가 가능함을 확인하였다.

**Abstract** Cavitation refers to a phenomenon in which empty spaces occur in a fluid due to changes in pressure and a velocity. When a liquid moves at a high speed, the pressure drops below the vapor pressure, and vapor bubbles are generated in the liquid. This study used CFD to analyze the flow of fluid machinery used in marine and offshore plants. The goals are to ensure the validity of the analysis method for marine propellers in an open water test, to increase the forward ratio, and to use FLUENT to understand the flow pattern due to cavitation. A three-dimensional analysis was performed and compared with experimental data from MOERI. The efficiency was highest at advance ratios of 0.7 - 0.8. Thrust was generated due to the difference between the pressure surface and the suction surface, and it was estimated that bubbles would be generated in the vicinity of the back side surface rather than the face side of the propeller, resulting in more cavitation. The cavitation decreased sharply as the advance ratio increased. The thrust and torque coefficients were comparable to those of the MOERI experimental data except at the advance ratio of 1, which showed a difference of less than 5%. Therefore, it was confirmed that CFD can evaluate an open water propeller test.

**Keywords** : Fluid Machinery, POW, CFD, Cavitation, Advance Ratio

\*Corresponding Author : Sang-Heup Park(Kongju National Univ.)

email: weldpark@kongju.ac.kr

Received June 13, 2019

Accepted September 6, 2019

Revised July 5, 2019

Published September 30, 2019

## 1. 서론

공동현상(Cavitation)은 유체의 속도 변화에 의한 압력변화로 인해 유체 내에 빈 곳(공동)이 생기는 현상을 말한다. 고속의 액체유동에서 액체의 압력이 포화증기압 이하로 낮아지면 유체는 비등하여 유체내부에 기포가 발생되는 현상이다. 물과 수증기에 대한 밀도의 비율이 약 1000:1인 것을 감안했을 때 공동의 내부는 역학적인 측면에서 상대적으로 빈 곳이라고 표현할 수 있기 때문이다. 이러한 공동현상으로 인해 소음과 진동, 침식 및 유체기기의 성능저하로 이어질 수 있다[1].

Table 1. Basis specification of KP505 propeller

Parameter	Principal
Scale ratio	31.6
Diameter(m)	0.25
Pitch/Diameter mean	0.95
Ae/A0	0.8
Hub ratio	0.18
No. of Blades	5
Section	NACA66
Atmospheric pressure[Pa]	101,325
Operating pressure[Pa]	32242.81
Vapor pressure[Pa]	3540
Speed[rpm]	720
Angular velocity $\omega$ [rad/s]	75.40
Density[kg/m <sup>3</sup> ]	998.2
Kinematic viscosity[ $\nu$ ]	1.004e-06

정상상태에서 받음각(Angle of attack)  $\alpha$ 로 전진하는 수중익 주위의 유선에 대하여 베르누이 방정식을 쓰면, Eq. (1)이 된다. 따라서 수중익의 표면에서는 속도  $v$ 가 증가하면 압력  $P$ 가 감소하게 되며, 속도  $v$ 가 계속 증가하면 압력  $P$ 가 포화증기압  $\rho$ 이하로 내려가게 되고 공동현상이 발생하게 되는 것이다. 포화증기압  $\rho$ 의 값은 온도에 따라 약간씩 변하나 15 °C에서 1.7 kPa 정도이다. 한편 대기압은 표준상태에서 101.3 kPa이 된다[2].

$$\frac{v^2}{2} + gh + \frac{P}{\rho} = Constant \quad (1)$$

Bernoulli's equation

공동현상은 프로펠러 및 임펠러 등 유체기기에서 유체 흡입 시 압력손실 등의 원인에 의해 액체의 압력이 낮아

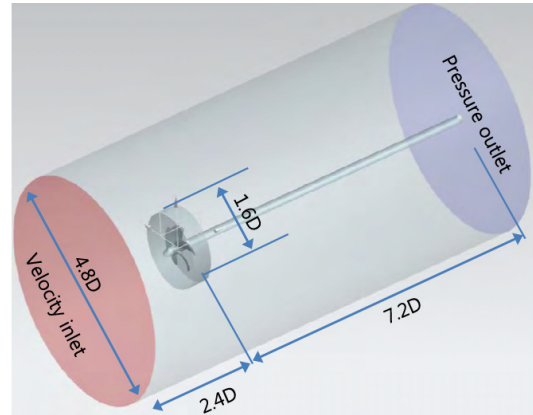


Fig. 1. Flow domains and boundary conditions

져 액체의 온도에 해당하는 증기압력보다 액체의 압력이 낮아지면서 액체에 증발현상이 발생되어 액중에 작은 기포가 다수 발생되는 현상을 칭한다[3]. 발생된 기포는 압력이 높은 유체기기로 이동하게 되어 기포가 깨지며, 소재에 침식을 일으키고 소음, 진동 등을 야기 시켜 토출량, 양정, 효율 등의 시스템 효율을 감소시키는 단점을 가지고 있다.

최근 상선의 추진효율향상을 위한 연구가 활발히 진행되고 있으나, CFD해석에 의한 프로펠러 단독시험에 대한 결과는 상당히 제한적이다[4].

본 연구에서는 선박 및 해양플랜트 분야에서 사용되는 유체기기(프로펠러 및 임펠러)의 CFD 유동해석을 이용하여 선박용 프로펠러의 단독성능시험(POW: Propeller Open Water Test, 이하 POW)에 대한 해석 기법의 타당성 확보 및 공동에 따른 유동양상을 파악하기 위해

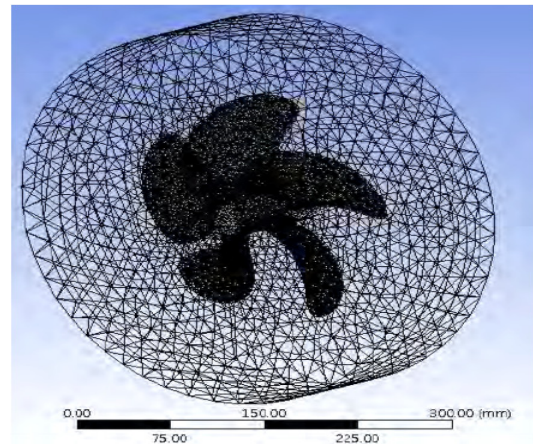


Fig. 2. Generated grid of propeller around

Table 2. Result of analysis according to advance ratio

Advance ratio ( $J$ )	N (rev/s)	N (rad/s)	Inlet Va	VR	Re	Force _x	Moments _x	CFD Result		
								Thrust coefficient ( $K_T$ )	Torque coefficient ( $10K_Q$ )	Single efficiency ( $\eta_0$ )
0.1	12	75.40	0.30	6.60	$5.66 \times 10^5$	243.08	9.41	0.433	0.671	10%
0.2	12	75.40	0.60	6.62	$5.67 \times 10^5$	230.12	8.90	0.410	0.634	21%
0.3	12	75.40	0.90	6.66	$5.70 \times 10^5$	210.18	8.16	0.374	0.581	31%
0.4	12	75.40	1.20	6.71	$5.74 \times 10^5$	184.39	7.26	0.328	0.517	40%
0.5	12	75.40	1.50	6.77	$5.80 \times 10^5$	156.42	6.38	0.279	0.454	49%
0.6	12	75.40	1.80	6.84	$5.86 \times 10^5$	127.54	5.51	0.227	0.393	55%
0.7	12	75.40	2.10	6.92	$5.93 \times 10^5$	97.80	4.59	0.174	0.327	60%
0.8	12	75.40	2.40	7.02	$6.01 \times 10^5$	66.91	3.59	0.119	0.255	60%
0.9	12	75.40	2.70	7.13	$6.11 \times 10^5$	34.05	2.46	0.061	0.176	50%
1	12	75.40	3.00	7.25	$6.21 \times 10^5$	6.30	1.18	0.011	0.084	21%

ANSYS FLUENT 14.0을 사용하여 전진비(Advance ratio,  $J$ )를 증가시키며 3차원 해석을 수행하고 MOERI의 실험 데이터와 비교분석하였다.

## 2. 해석 조건 및 방법

프로펠러의 전진비  $J$  및 추력계수  $K_T$  및 토크계수  $K_Q$ 와 효율  $\eta_0$ 은 일반적으로 사용되는 Eq. (2)를 이용하였다.

$$J = \frac{V_a}{nD}$$

$$K_T = \frac{Thrust}{\rho n^2 D^4}, \quad K_Q = \frac{Torque}{\rho n^2 D^5}$$

$$\eta_0 = \frac{J}{2\pi} \frac{K_T}{K_Q} \quad (2)$$

여기서  $V_a$ 는 프로펠러로 유입되는 유동의 속도이며  $\rho$ 는 물의 밀도,  $T$ 는 추력,  $Q$ 는 토크를 나타낸다[5].

해석에 사용된 대상 프로펠러는 MOERI에서 설계한 3,600 TEU급 컨테이너선용 프로펠러 KP505 이며 기본 제원은 Table 1. 과 같다[6]. 유속방향은 X축, 반경 방향은 Y축과 Z축으로 선정하였다. Fig. 1은 상류계면에서의 유속유입(Velocity inlet)조건, 하류계면은 압력유출(Pressure outlet)조건, 측면 및 상하면은 Slip-wall조건인 대칭면(Symmetry plane) 조건을 적용하고, 프로펠러와 허브는 고체 경계면(Solid wall)으로 처리하였다.

Fig. 2와 같이 수치해석을 실시하기 위해 적용한 격자 수는 152만개 이상을 사용하였다. 벽면의 최소 격자 간격은 0.4mm 수준으로 경계층 영향을 고려하여  $y^+ = 30$ 에 해당하였다. 프로펠러 벽면에는 Boundary Layer 효과를 위해 Prism 격자로 Inflation을 생성하였다. 날개 표면에서 층류를 피할 수 있도록 레이놀즈 수를  $10^5$  이상으로 설정하였다. 전반적으로 비 정렬 격자와 정렬 격자를 동시에 적용한 Hybrid 격자법을 적용하였다.

수치해석을 수행하기 위해 유한 체적법에 근거한 범용 프로그램인 Fluent를 사용하였다. 비압축성 난류 유동해석을 위하여 3차원 평균 Navier-Stokes 방정식을 사용하였다. 난류 모델로 벽면과 Far field를 고려하여 SST k- $\omega$  turbulent model을 적용하였다. 속도/압력 연성은 수렴을 빠르게 하기 위해 scheme은 SIMPLEC(Semi-implicit method for pressure-linked equations-consistent)법을 적용하였다. 본 해석을 위한 Convergence criterion residual은  $10^{-5}$ 까지 만족으로 설정하였다. 해석 POW 시험 조건과 동일하게 회전수를 12rps로 고정하였다. Inlet 조건은 전진비 0.1~1.0까지 0.1 간격으로 계산하여 전진 속도를 변경 적용하였다. 전진비에 따른 X 방향 Force와 Moment를 계산하여 전진속도를 변경 적용하였다.

## 3. 유동해석 결과

Table 2는 KP505프로펠러에 대해 전진비를 변화시켜 추력과 토크를 측정하여 프로펠러의 단독효율을 계산한 결과이다.

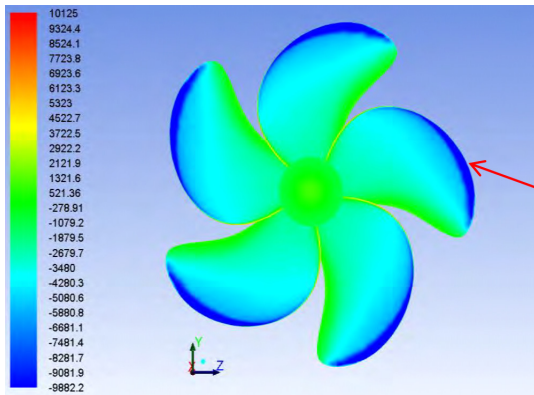


Fig. 3. Pressure distribution at J=0.5 Back side (Pa)

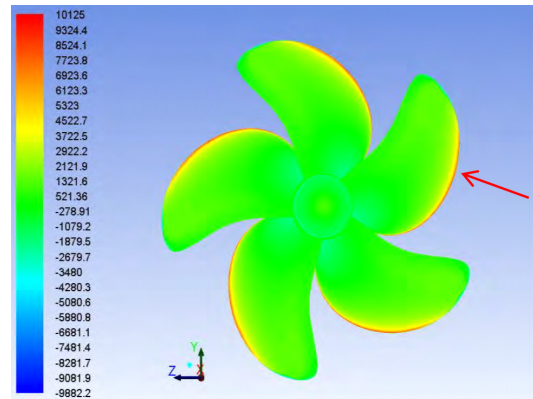


Fig. 4. Pressure distribution at J=0.5 Face side (Pa)

Fig.3과 4는 전진비 0.5 영역에서 압력면과 흡입면의 압력분포를 나타내고 있다. 압력면과 흡입면의 압력 분포 차이로 인해 추력이 발생하는 것을 확인할 수 있다. Back side에 증기압 이하로 떨어져 프로펠러 edge 부근에서 Bubble이 생성될 것으로 추정되며 Face side에도 edge 부근에 미세한 공동현상이 발생할 것으로 추정된다. Table 3는 전진비에 따른 Back side 부분의 압력분포를 나타내고 있다. 전진비 0.1~0.5 영역에서 전진비가 증가함에 따라 공동현상의 크기가 급격히 감소함을 알 수 있었고 추력과 토크 또한 급격히 감소하게 되었고 효율은 급격히 증가하였다. 최대 효율은 전진비 0.7~0.8 영역에서 60% 수준으로 확인되었고 0.9영역 이후에서부터는 단독효율이 급격히 감소하였다.

Fig. 5와 같이 CFD 유동해석결과를 평가하기 위해 MOERI의 실험데이터와 비교 평가하였다. 추력계수  $K_T$ 와 토크계수  $K_Q$ 는 전진비 0.1~0.3영역에서 약 0.01~0.03 가량 오차를 나타내고 있다. 이는 실제실험에서는 프로펠

러 성능 시험 초기에 프로펠러의 무게 및 마찰의 영향에 의하여 동력계에 부하가 크게 발생하여 CFD해석결과와 다소 차이가 발생한 것으로 판단된다. 하지만 0.4영역 이후부터는 비교적 실험값과 유사한 값을 계속 나타냈다. 단독효율의 경우 전진비 0.5 영역에서부터 MOERI 실험 데이터와 비교했을 때 점진적으로 높은 값이 나타났다. 또한 전진비 1 영역에서 CFD 해석결과는 21%로 타나났지만 MOERI 실험 데이터는 13%로 타나났다. 전진비 1 영역을 제외하고 0.9이하의 모든 영역에서 5% 이내의 차이를 나타냈다. 이는 실제 단독성능 실험에 있어 예인수조에 예인전차를 이용하여 프로펠러 성능시험을 진행함에 따라 발생하는 예인수조 내 시험조건 중 전진비가 증강함에 따라 파동에 의해 프로펠러에 작용하는 토크가 변화하는 것이 주된 원인으로 판단된다[7]. 따라서, CFD 유동해석을 통해 프로펠러 단독 성능에 평가가 가능함을 본 실험 결과로 확인하였다.

Table 3. Pressure distribution in back side according to the advance ratio (Pa)

	(a) J=0.1	(b) J=0.2	(c) J=0.3	(d) J=0.4

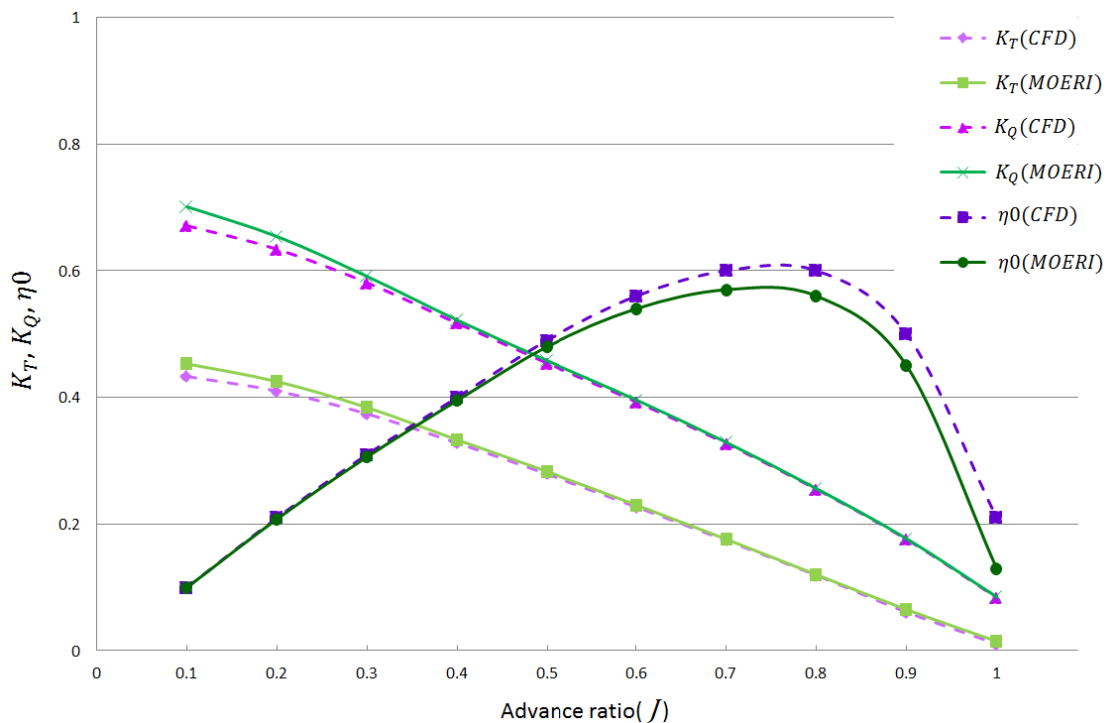


Fig. 5. Comparison CFD with MOERI on the thrust coefficient, torque coefficient and single performance efficiency

#### 4. 결론

본 연구는 KP505 프로펠러의 단독성능 시험에 대한 수치해석을 실시하고 분석하였다. 전진비에 따른 해석의 결과 전진비 0.7~0.8 구간에서 효율은 60% 수준으로 확인되었다. 압력면과 흡입면의 차이로 추력이 발생하는 것을 확인하였고 프로펠러 표면보다는 이면부근에서 Bubble이 많이 생성될 것으로 추정되며 공동현상이 더 많이 발생할 것이라 추정되었다. 또한 전진비가 증가함에 따라 공동현상은 급격히 감소함을 알 수 있었다. 추력계수와 토크계수는 MOERI 실험값과 비교했을 때 비교적 유사한 결과를 나타내었으며 전진비 1.0을 제외하고 모든 구간에서 5%이내의 차이를 나타내었다. 이와 같은 결과는 해당 영역에서 추력과 토크가 크게 감소하여 효율 계산에 있어 이점으로 작용한 결과로 판단된다. 따라서, CFD 유동해석으로 프로펠러 단독 성능에 대한 평가가 가능함을 확인하였다.

#### References

- [1] John Carlton, "Marine propellers and propulsion", Elsevier, pp. 12-23, 2010
- [2] John Carlton, "Marine propellers and propulsion", Elsevier, pp. 25-32, 2010
- [3] Y. J. Kim, I. J. Son and S. H. Yi, "Electroless Ni-P Plating and Heat Treatments of the Coating Layer for Enhancement of the Cavitation Erosion Resistance of Vessel Propellers", Korean J. Mater. Res., Vol. 27, No. 8, pp. 409-415, 2017  
DOI: <https://doi.org/10.3740/MRSK.2017.27.8.409>
- [4] J. W. Ahn, G. D. Kim, K. S. Kim, Y. H. Park, H. S. Ahn, Y. J. Jung and J. H. Yoon, "Performance Improvement Study of Propeller Propulsion Efficiency and Cavitation for the 8800TEU Class Container", Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 54, No. 6, pp. 453-460, 2017  
DOI: <https://doi.org/10.3744/SNAK.2017.54.6.453>
- [5] J. I. Kim, I. R. Park, K. S. Kim and J. W. Ahn, "Numerical Analysis of Non-Cavitating and Cavitating Performance of a SVA Potsdam Propeller", Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 54, No. 3, pp. 215-226, 2017  
DOI: <https://doi.org/10.3744/SNAK.2017.54.3.215>

- [6] I. R. Park, "RANS ANALYSES OF THE TIP VORTEX FLOW OF A MARINE PROPELLER", *J. Comput. Fluids Eng.*, Vol. 21, No. 2, pp. 62-69, 2016  
DOI: <https://doi.org/10.6112/ksce.2016.21.2.062>
- [7] D. S. Kim and H. T. Kim, "Analysis of Open-Water Characteristics of Marine Propeller by Computational Method for Viscous Flow", *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, Vol. 39, No. 3, pp. 8-17, 2002  
DOI: <https://doi.org/10.3744/SSNAK.2002.39.3.008>

이 한 섭(Han-Seop Lee)

[준(학생)회원]



- 2009년 2월 : 공주대학교 기계설계공학전공 (공학사)
- 2011년 3월 ~ 현재 : 공주대학교 기계공학과 (석사과정)

〈관심분야〉

육성용접, 공정 최적화, 용접품질검사

김 민 태(Min-Tae Kim)

[준(학생)회원]



- 2010년 2월 : 공주대학교 기계시스템공학과 (공학사)
- 2015년 2월 ~ 현재 : 공주대학교 일반대학원 기계공학과 (석사과정)

〈관심분야〉

육성용접, 용사코팅, 표면처리

김 원 섭(Won-Seop Kim)

[준(학생)회원]



- 2018년 2월 : 공주대학교 기계시스템공학 (공학사)
- 2018년 3월 ~ 현재 : 공주대학교 기계공학과 (석사과정)

〈관심분야〉

육성용접, 플랜트용접

이 종 훈(Jong-Hun Lee)

[준(학생)회원]



- 2018년 2월 : 공주대학교 기계시스템공학 (공학사)
- 2018년 3월 ~ 현재 : 공주대학교 기계공학과 (석사과정)

〈관심분야〉

육성용접, 용접자동화

박 상 흡(Sang-Heup Park)

[정회원]



- 1984년 2월 : 단국대학교 기계공학과 (공학사)
- 1986년 2월 : 단국대학교 일반 대학원 기계공학과 (공학석사)
- 2000년 2월 : 홍익대학교 일반 대학원 기계공학과 (공학박사)
- 2005년 3월 ~ 현재 : 공주대학교 기계자동차공학부 교수

〈관심분야〉

용접시공 및 용접 자동화, 비파괴 검사