

회전 운동이 이젝터 성능에 미치는 영향에 관한 연구

강상훈^{1*}, 박영철²

¹(주)엔케이, ²동아대학교 기계공학과

Study on the Swirling Motion Effect of Ejector Performance

Sang-Hoon Kang^{1*}, Young-Chul Park²

¹NK. CO., LTD.,

²Division of Mechanical Engineering, Dong-A University

요약 본 논문은 오존 방식 선박평형수 처리의 핵심 장치인 이젝터에 대하여 회전 운동하는 구동 유체가 기체-액체 이젝터의 효율에 미치는 영향에 관한 연구이다. 이젝터는 오존을 구동 노즐을 통해 분사되는 고압 액체(선박평형수)와 주변부의 저압 기체 간의 운동량 교환으로 발생하는 부압에 의해 기체(오존)를 흡입시키는 장치이다. 기존의 이젝터는 단순한 형태로 구동 유체가 분사되지만, 본 논문에서는 구동 노즐부에 회전 유도장치를 적용하여 구동 유체가 회전 운동하며 분사될 수 있도록 한다. 구동 유체의 회전 운동 유무에 따른 유동 특성을 파악하기 위하여 전산유체해석을 이용하였으며, 구동 유체의 압력과 유량, 흡입부에 발생하는 흡입 유체의 부압과 흡입 유량, 그리고 토출 압력이 예측되었다. 그 결과를 바탕으로 회전 유도 장치가 적용된 이젝터의 효율은 22.25%로 산출되었으며, 구동 유체의 회전 운동이 없는 이젝터에 비해 약 1.7%의 효율이 향상되었다. 마지막으로 전산유체해석의 타당성을 검증하고자 실험 장치를 구축하여 회전 유도 장치가 적용된 이젝터에 대한 실험을 수행하였으며, 전산유체해석 결과와 비슷한 결과를 얻을 수 있었다.

Abstract This paper aims to examine the effect of rotational fluid motion about the efficiency of the gas - liquid ejector, which is a core unit in a ship equilibrium water treatment system. The ejector is a device for injecting ozone into ship equilibrium by the negative pressure generated by exchange of momentum between water and ozone. The existing ejector ejects the driving fluid with a simple form. In this paper, however, a rotation induction device is applied to the driving nozzle so that the driving fluid can be rotated and injected. To investigate the flow characteristics by the rotational movement of the driving fluid, CFD was used. The pressure and flow rate of the driving fluid, the negative pressure and suction flow rate of the suction fluid in the suction part, and the discharge pressure were predicted. On the basis of the results, the efficiency of the ejector using the rotation induction system was 22.25%, which was about 1.7% better than that of the existing ejector. Finally, to verify the feasibility of the CFD, an experiment was conducted on the ejector using the rotation induction device and the results were similar to those of the CFD.

Keywords : CFD, Driving Fluid, Ejector, Multi-phase, Swirl

1. 서론

선박평형수란 선박을 안전하게 운항하기 위해 선박에 유입되는 바닷물로 선박의 밑바닥이나 좌우에 설치된 탱크에 채워 선박의 무게 중심을 항상 일정하게 유지시킨

다. 만약 탱크에 적절한 양의 바닷물이 채워져 있지 않게 되면 선체의 무게 중심 상승으로 운항 중 선체의 좌우 흔들림이 증가하며, 심할 경우 전복 사고가 발생할 수도 있다.

선박평형수는 선박의 안전한 운항을 위해 필수적인

*Corresponding Author : Sang-Hoon Kang(NK. CO., LTD.)

Tel: +82-10-9195-2920 email: shinji2778@hotmail.com

Received January 2, 2017

Revised February 1, 2017

Accepted April 7, 2017

Published April 30, 2017

요소지만, 화물의 선적 또는 하역 시 배출되는 선박평형수 속에는 플랑크톤 및 박테리아 등의 외래 해양생물들이 포함되어 있어 토착 해양의 생태계 교란을 일으킨다. 이에 국제해사기구(IMO, International Maritime Organization)는 2004년 ‘국제 선박평형수 관리협약’을 채택하여, 선박평형수 처리설비를 의무적으로 설치하도록 했다. 협약이 의무화될 경우 최소 40조원에 이르는 선박평형수 처리 설비 시장은 국내외 업체들에 의해 초기 여과와 같은 물리적 처리기술이 적용된 선박평형수 처리기술이 개발되었다. 하지만 크기가 작은 생물이나 침전물을 걸러내는데 적합하지 못하여 최근에는 화학 반응을 통해 선박평형수 내 유해한 물질들을 제거하는 화학적 처리기술이 주로 사용되고 있다. 특히, 화학적 처리 기술 중 하나인 오존 방식은 오존과 선박평형수의 혼합을 통해 강력한 살균 반응을 일으켜 선박평형수를 효과적으로 처리하는 방식이다.

이젝터의 유동 특성 및 성능 향상에 대한 최근의 연구 결과로는 Sun[1]는 이젝터의 구동유체와 흡입유체의 혼합에 관한 이론적 연구를 중점적으로 연구하였으며, Kim[2]은 기체-액체 이젝터에 대하여 구동유체(액체)의 유속과 흡입유체(기체)의 압력을 조절하면서 수치해석 및 실험을 수행하였으며, 그 결과가 비슷함을 확인하였다. Balamurugan[3]은 기체-액체 이젝터에 대한 실험적 연구를 통해 경험식을 제안하였으며, 그 결과가 잘 일치하는 것을 보여주었다.

본 논문은 전연연결부 없이 구동 유체(선박평형수)가 가지고 있는 속도 및 압력 에너지를 이용하여 흡입 유체(오존)를 흡입 및 혼합하는 오존 방식 선박평형수 처리설비용 기체-액체 이젝터에 대하여 회전 운동하는 구동 유체가 이젝터의 성능에 미치는 영향에 관한 연구이다.

2. 본론

2.1 이젝터 원리

이젝터의 원리는 벤츨리 효과를 통해 다음과 같이 설명이 가능하다.

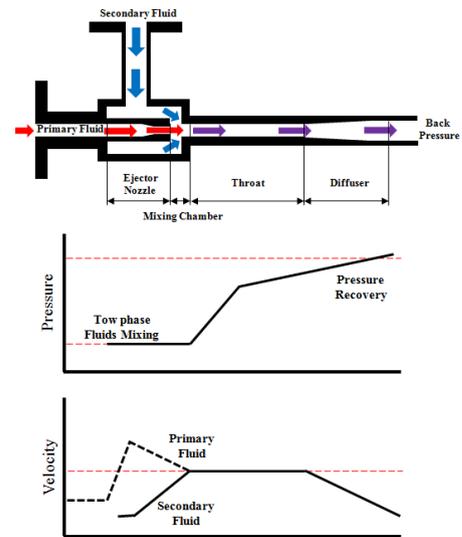


Fig. 1. Operating Principle of a Gas-Liquid Ejector

먼저 고압의 구동 유체가 구동 노즐을 통해 압력에너지가 속도에너지로 변환되어 고속 제트를 형성하며 분출된다. 구동 노즐의 상류 측은 높은 압력과 낮은 속도 영역이 되고, 하류 측은 낮은 압력과 높은 속도 영역이 존재하게 된다. 분출되는 고속 제트는 혼합실 내 압력까지 팽창하며 구동 노즐 출구 주변 기체의 운동량 교환을 통해 부압을 발생시킨다. 부압은 흡입 유체의 압력 이하로 발생되어 흡입부를 통해 흡입 유체가 주입되고 구동 유체와 혼합 후, 구동 유체의 분사 방향으로 압축, 가속화 및 혼합 과정을 거치며 이차목을 통과한다. 이후 고속으로 흐르는 혼합 유체는 디퓨저를 통과하면서 속도를 감소되고 압력 에너지를 회복하며 배출하게 된다[4].

2.2 전산유체역학 개념 및 원리

유체역학에 응용하는 전산유체역학(CFD, Computational Fluid Dynamics) 기법은 기계, 항공, 조선 등에 널리 이용되고 있다. 대부분의 실제 공학문제는 매우 복잡한 형상과 경계조건으로 이루어져있어 Navier-Stokes 방정식을 직접 해석적으로 풀어 유동현상을 이해한다는 것은 거의 불가능하다. 따라서 본 논문에서 다루고자하는 기체-액체 이젝터의 내부 유동 현상은 유체의 거동을 컴퓨터로 해석하고 그 결과를 실험으로 검증한다. 전산유체역학 기법은 범용 소프트웨어인 ANSYS CFX v16.2를 사용한다.

2.3 지배 방정식

기체-액체 이젝터의 유동 특성은 정상 상태, 압축성 난류 유동으로 수치해석을 하기 위한 지배 방정식으로는 수송 방정식과 상태 방정식으로 다음 식과 같이 이루어진다.

2.3.1 수송 방정식

유동에서 다루는 수송 방정식에는 연속 방정식, 운동량 방정식, 에너지 방정식이 있다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0 \quad (1-1)$$

$$\frac{\partial (\rho U)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \otimes U) = -\nabla \rho + \nabla \cdot \tau + S_M \quad (1-2)$$

$$\frac{\partial (\rho h_{tot})}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U h_{tot}) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \nabla \cdot (U \cdot \tau) + U \cdot S_M + S_E \quad (1-3)$$

여기서, ρ 는 유체의 밀도, t 는 시간, U 는 유체의 속도, P 는 압력, S_M 은 외력, h_{tot} 전 엔탈피, T 는 온도이며, $U \cdot S_M$ 은 외부 운동량에 의한 일로서 무시할 수 있다[5].

2.3.2 상태 방정식

열평형을 이루고 있는 물질의 상태량 사이의 관계를 나타내는 상태 방정식은 이상기체의 압력과 체적 및 온도 사이의 관계를 나타낸다.

$$\rho = \rho(p, T) = \frac{w P_{abs}}{R_0 T} \quad (1-4)$$

$$dh = c_p dT \quad (1-5)$$

$$c_p = c_p(T) \quad (1-6)$$

여기서, w 는 분자의 중량, P_{abs} 는 절대압력, R_0 은 범용 기체상수이며, 이상 기체의 경우, 밀도가 이상기체 함수에 의해 계산되므로 c_p 는 온도의 함수이다.

2.4 회전 운동 유도 장치

본 연구는 구동 유체의 회전 운동이 기체-액체 이젝

터의 성능에 미치는 영향을 파악하기 위하여, Fig. 3와 같이 구동 노즐의 유입부에 회전 운동 유도 장치를 구성한다.

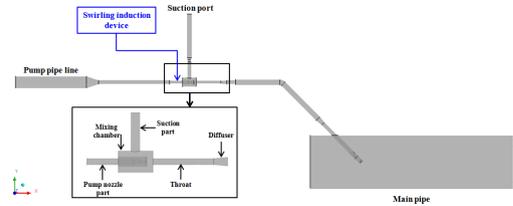


Fig. 2. Schematic of the ejector

회전 운동 유도 장치의 총 4개의 Blade로 이루어지며, 유입되는 구동 유체가 회전 운동을 하도록 유도시킨 후 구동 노즐을 통해 분출시킨다.



Fig. 3. Swirling induction device (a) General view (b) Section view

2.5 유동 해석 경계 조건

이젝터에 대한 3차원 형상은 구동 노즐, 흡입부, 혼합실, 이차목, 디퓨저, 그리고 메인 배관으로 구성된다. 메인 배관 입구(Inlet_01)와 메인 배관 출구(Outlet)은 배압 상태를 유지하기 위해 일정 압력 조건으로 구동 유체와 동일한 유체가 흐르도록 설정, 구동 노즐 유입구(Inlet_02)는 일정 유량 조건으로 구동 유체가 유입되도록 설정, 흡입부(Inlet_03)는 일정 압력 조건으로 흡입 유체가 주입되도록 설정한다. 전산유체해석에 사용된 각 유체들은 추후 검증 실험과 동일한 조건으로 설정하기 위하여 선박평형수 대신에 Water, 흡입 유체로 Air를 사용한다.

본 연구에서 다루고자하는 기체-액체 이젝터의 경우 내부 유동 영역에서 유속의 급변 또는 와류의 발생이 상당히 크고 구동 노즐 끝단부터는 고속 제트의 형성이 예상된다. 따라서 벽 근처 영역에서는 기존 Wilcox model을 사용하고, 벽에서 멀어질수록 Standard $k-\epsilon$ model을 사용하도록 개량된 SST(Shear Stress Transport)

model을 난류 모델로 선정한다. 이젝터 유동 모델에 대한 격자는 Table 1과 같이 최소 격자 크기 0.5mm, 최대 격자 크기 40.0mm로 구성한다.

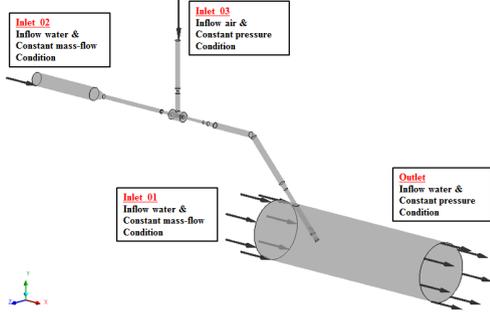


Fig. 4. Boundary conditions of the ejector

Table 1. Size of grids for ejector

Model	Min. size of grid (mm)	Max. size of grid (mm)	Nodes (ea)	Elements (ea)
Non Swirl	0.5	40.0	248,994	855,988
Swirl	0.5	40.0	311,244	1,043,014

2.6 유동 해석 결과

전산유체해석 결과 구동 유체는 구동 노즐을 통과하면서 약 40m/s 가량의 제트를 형성하며 분사되는 것으로 확인된다. 구동 유체에 회전 운동을 적용한 경우 구동 노즐을 통해 분사되는 제트가 이차목으로 더 많이 침투되었으며, 회전 운동이 없는 구동 유체에 비해 높은 속도 분포가 형성되었다.

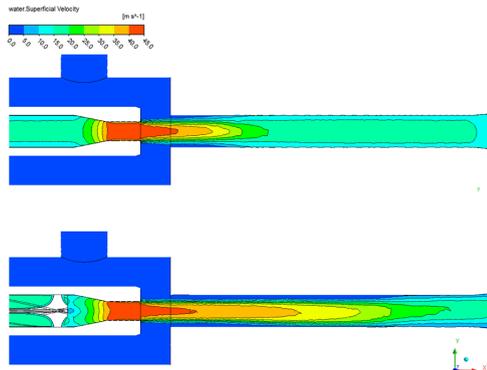


Fig. 5. Contours of Water Superficial Velocity for CFD result

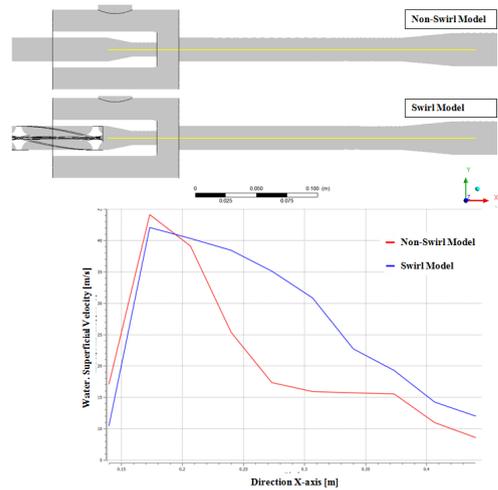


Fig. 6. Comparison of Water Superficial Velocity by center-line (Swirling vs Non-Swirling Ejector)

Fig. 6은 이젝터의 내부 유동 중심선에 따라 구동 유체의 회전 운동 유무에 따른 Water Superficial Velocity의 유동 해석 결과를 비교한 것이다. 구동 유체가 회전 운동하는 이젝터의 경우 구동 노즐을 통과하기 전에는 상대적으로 유속이 낮게 나타났다. 이는 회전 유도 장치에 의해 분사 속도가 일시적으로 낮아졌지만 구동 유체의 회전 운동이 없는 이젝터와 달리 혼합실 이후 이차목까지 상대적으로 높은 구동 유체의 유속을 유지하였다. 그 결과 흡입 유량이 약 5.7% 증가하였으며, 이는 상대적으로 길게 발생된 구동 유체의 제트에 의한 효과로 사료된다.

2.7 이젝터 효율

이젝터의 성능을 유량비(M)와 압력비(N)를 이용하여 효율로 나타낼 수 있다[6].

$$M = \frac{Q_s}{Q_d} \quad (1-7)$$

$$N = \frac{P_{dis} - P_s}{P_d - P_{dis}} \quad (1-8)$$

$$\eta = M \cdot N \quad (1-9)$$

식 (1-7)은 이젝터의 유량비(M)를 나타내는 식으로 Q_s 는 흡입부를 통해 흡입되는 흡입 유체의 유량, Q_d 는 구동 노즐로 유입되는 구동 유체의 유량을 뜻한다. 식

(1-8)은 이젝터의 압력비(M)를 나타내는 식으로 P_d 는 구동 유체의 압력, P_s 는 흡입부 압력, P_{dis} 는 토출부 압력을 뜻한다. 이젝터의 효율은 유량비와 압력비의 곱으로 나타낼 수 있으며, 식 (1-9)를 이용하면 구동 유체가 회전 운동하는 이젝터의 효율은 22.25%로 산출된다. 이는 구동 유체가 회전 운동하지 않는 이젝터에 비해 약 1.70% 가량 높은 효율로서 흡입되는 흡입 유체의 유량의 차이에 의해 나타난 결과이다.

2.7 실험을 통한 성능 검증

전산유체해석을 통해 예측된 구동 유체와 흡입 유체의 유량, 압력 및 이젝터의 효율을 검증하기 위하여 Fig. 7과 같이 실험 장치를 구성한다.

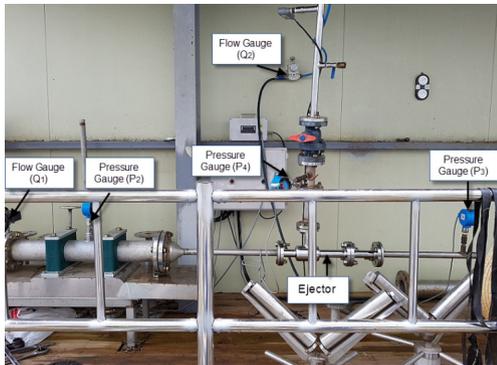


Fig. 7. Test bench of ejector

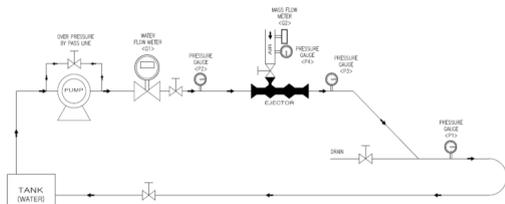


Fig. 8. Schematic diagram of test bench for ejector

실험 장치는 메인 배관, 각종 밸브, 유량계, 압력계, 저장 탱크, 펌프 및 이젝터로 구성된다. 작동 과정은 펌프에 의해 저장 탱크 내 구동 유체(물)를 이젝터로 유입하게 되며, 유량계 Q_1 , 압력계 P_2 를 통해 측정한다. 구동 유체의 분사력에 의해 흡입되는 흡입 유체(공기)의 유량은 Q_2 , 압력은 P_4 에 의해 측정되며, 혼합실에서 혼합된 유체의 압력은 디퓨저 후단의 압력계 P_3 에 의해 측정된다. 이후 배출되는 메인 배관의 배압은 압력계 P_1 을 통해 측정한다.



(a)



(b)

Fig. 9. Prototype ejector (a) Swirling induction device (b) Assembly ejector

이젝터의 구동 노즐부에 삽입되는 회전 유도 장치는 3D Print를 이용하여 Fig. 9와 같이 제작한다.

이젝터에 대한 시험은 메인 배관에서 유지되는 배압에 따라 0.5 barg부터 3.0 barg까지 총 6번 수행한다. 흡입 유체의 유량에 대하여 전산유체해석에서 예측된 값과 비교한 결과, 약 1.8%의 근소한 차이를 나타내어 전산유체해석이 타당하다는 것을 확인할 수 있다.

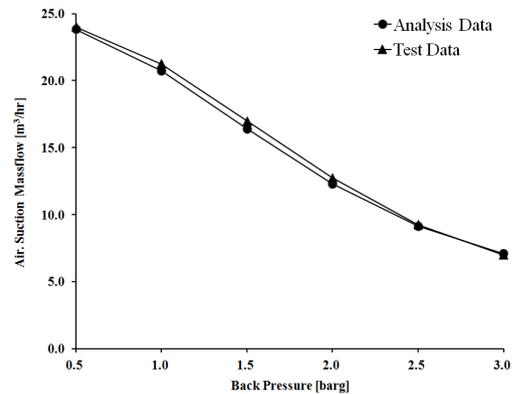


Fig. 10. Comparison of test & analysis data (Air. Suction Massflow)

Table 2. Comparison of test and analysis results

Cases	Results	Back Pressure (barg)					
		0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
Test	Air Suction	25.50	21.75	17.75	13.50	9.75	7.00
Analysis	Massflow (m ³ /hr)	23.83	20.73	16.39	12.31	9.14	7.08

3. 결론

본 논문은 오존 방식 선박평형수 처리설비용 이젝터에 대하여 구동 유체의 회전 운동이 이젝터의 성능에 미치는 영향에 관한 연구이다. 본 논문에서 다루고자하는 기체-액체 이젝터는 다상의 내부 유동에 대한 특성을 파악하기 위하여 전산유체해석을 이용하였으며, 회전 유도 장치를 제작하여 적용된 이젝터에 대한 실험을 수행하였다. 측정된 실험 결과와 해석을 통해 예측 결과를 비교하여 유동 모델에 대한 타당성을 검증하였으며, 다음과 같은 결론을 얻어낼 수 있었다.

첫째, 회전 운동하는 구동 유체는 분사 속도의 손실이 적어 이차목까지 형성되는 제트로 인해 흡입량이 5.7% 향상되었다.

둘째, 구동 유체의 회전 운동이 적용된 이젝터는 22.25%의 효율을 가지는 것으로 예측되며, 구동 유체의 회전 운동이 없는 이젝터에 비해 효율이 1.7% 향상됨을 확인하였다.

셋째, 실험 장치를 구성하여 회전 유도 장치가 적용된 이젝터에 대한 실험 결과, 전산유체해석과 약 1.8%의 오차율을 나타내 기체-액체 이젝터에 대한 유동 해석에 적합한 유동 모델이라는 것이 검증되었다.

최종적으로 전산유체해석에 대한 검증을 위해 실험 장비를 구축하였다. 회전 유도 장치가 적용된 이젝터에 대한 실험 결과, 전산유체해석과 약 1.8%의 오차율로 나타나 유동 모델이 타당하다는 것을 확인하였다.

References

- [1] D. W. Sun, I. W. Eames, "Recent developments in the design theories and applications of ejectors: a review", *Journal of Institutional Energy*, vol. 68, no. 475, pp. 65-79, 1995.
- [2] M. I. Kim, O. S. Kim, D. H. Lee, S. D. Kim,

"Numerical and experimental investigations of gas - liquid dispersion in an ejector", *Chemical Engineering Science*, vol. 62, no. 24, pp. 7133-7139, 2007.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2007.08.020>

- [3] S. Balamurugan, M. D. Lad, V. G. Gaikar, A. W. Patwardhan, "Hydrodynamics and mass transfer characteristics of gas-liquid ejectors", *Chemical Engineering Journal (LAUSANNE)*, vol. 131, no. 1-3, pp. 83-103, 2007.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2006.12.026>
- [4] S. B. Mun, H. K. Choi, H. J. Kwon, K. K. Kim, S. H. Choi, "Experimental Study for the Development of New Type Water Ejector", *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, vol. 30, no. 6, pp. 677-684, 2006.
- [5] Z. H. Jin, T. Utomo, H. S. Chung, H. M. Jeong, Y. S. Shin, S. C. Lee, "A Study on the Gas-Liquid Mixing Characteristics in Reactor System Using Ejector", *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 2007, no. 5, pp. 1278-1283, 2007.
- [6] Y. H. Lee, M. O. Kim, C. G. Kim, Y. T. Kim, "The evaluation of performance and flow characteristics due to the length of throat and diffuser for ship's ejector", *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, vol. 38, no. 1, pp. 31-38, 2014.
DOI: <https://doi.org/10.5916/jkosme.2014.38.1.31>

강 상 훈(Sang-Hoon Kang)

[정회원]



<관심분야>
구조설계, 조선해양

- 2013년 2월 : 동아대학교 일반대학원 기계공학과 (석사)
- 2012년 10월 ~ 현재 : (주)엔케이 선임연구원

박 영 철(Young-Chul Park)

[정회원]



<관심분야>
금속재료, 구조설계

- 1982년 2월 : 부산대학교 금속공학과 대학원 (석사)
- 2002년 2월 : 일본 동북대학교 기계공학과 대학원 (박사)
- 2009년 3월 ~ 2013년 7월 : 동아대학교 산학협력단 단장
- 1998년 3월 ~ 현재 : 동아대학교 기계공학과 교수