

농도계측기법과 PIV에 의한 산업용 교반기 Impeller 형상 선정에 관한 연구

김동균† · 배석태* · 김정환** · 김오근*** · 이영호****

(원고접수일 : 2006년 3월 13일, 심사완료일 : 2006년 5월 3일)

A Study about Choice of Industrial Mixer's Impeller Type for Concentration Measurement Method and PIV

Dong-Kyun Kim† · Suk-Tae Bae* · Jeong-Hwan Kim** · Oh-Keun Kim*** · Young-Ho Lee****

Abstract : The Industrial Mixers are used in various industrial fields where they are necessary to intimately mix two reactants in a short period of time. However, despite their widespread use, complex unsteady flow characteristics of industrial mixers are not systematically investigated. The present study aims for clarify unsteady flow characteristics induced by various impellers in a tank. Impellers are pitched blade turbine(PBT) types, Screw type and Rushton turbine type. In this study choice of the Industrial Mixer's Impeller type for distribution of concentration and PIV measurement method. The rotating speed of impellers are fixed by 100RPM.

Key words : Concentration(농도), PIV(입자영상유속계), Mixer(교반기), Impeller(날개)

1. 서 론

최근 산업현장에 사용되는 교반장치는 식품공업, 생화학공업, 금속공업, 수(水)처리 및 환경 관련 공정 그리고 원자력발전소 등 다양한 산업분야에 사용되고 있으며, 혼합되는 물질의 특성에 따라 다양한 종류의 임펠러(impeller)와 교반조(Mixer)가 설계되고 있다. 특히 임펠러는 기계동력을 교반에너지로 전환하여 직접액체를 섞어주는 부분으

로 임펠러 날개 형상에서부터 회전 밸런스까지 하나하나가 교반 효율에 큰 영향을 미치는 요소이다. 특히 중속회전인 경우에는 임펠러가 교반 성능에 미치는 영향이 매우 크다고 알려져 있다.

교반기 내부 유동장은 임펠러로부터 발달되는 유체전단혼합(fluid shear mixing)과 유체 흐름(fluid flow)의 상호 작용에 의한 날개 끝 와류(tip vortex)의 주기적인 방출, 2차 와류의 순환 및 난류의 발생 등 상당히 복잡한 구조의 3차원 비

† 책임저자 (동명대학교 기계공학과), E-mail:kimdk@tu.ac.kr, Tel : 051)620-3339

* 동명대학교 항만물류학부

** 한국조선기자재연구원 연구개발팀

*** (주)한국수력원자력

**** 한국해양대학교 기계·정보공학부

정상 유동메커니즘을 가진다. 우수한 성능의 산업용 교반기를 설계하기 위해서는 반드시 교반성능에 영향을 미치는 다양한 내부 유동특성의 정량적 실험데이터의 확보가 필요하다. 3차원적 비정상 특성을 나타내는 복잡한 구조의 내부유동특성에 관한 정량적 해석은 현재까지도 상당히 어려운 문제로 남아있다. 이러한 이유로 인해 산업용 교반기와 관련된 연구는 현재도 활발히 진행 중에 있다. 관련 연구를 살펴보면, Chapple과 Kresta⁽¹⁾는 가시화 기법(tuft법)으로 3개의 블레이드를 가진 임펠러에 의한 교반장치에서 유동패턴의 안정성과 임펠러의 위치, 직경과 같은 기하학적 변수의 영향에 대해 연구하였다. Winardi와 Nagase⁽²⁾는 유동가시화 기법을 조합하여 선박용 프로펠러의 유동특성을 연구하였으며 다양한 와류의 회전, 순환과 같은 유동현상을 규명하고, 일정한 주기성을 고찰하였다.

Bakker와 Akker⁽³⁾는 LDV를 이용하여 피치 블레이드 터빈에 의한 유동장의 축방향 속도분포의 고찰을 통하여 유동패턴의 비정상성과 불안정성을 제시하였다.

Haam 등⁽⁴⁾은 일정한 주기를 갖는 교반탱크 내부의 상호 열전달 계수의 크기를 알아내고 이것은 교반탱크의 축방향 와류의 주기적인 유동에 따른 열전달 계수의 변동일 것이라고 보고하고 있다.

Bakker 등⁽⁵⁾은 축방향 임펠러에 의해 교반되는 가스집진기 시스템의 유동현상의 주기성을 고찰하고 변동의 주기와 임펠러의 회전속도의 관계를 규명하였다. Tsurusaki 와 Urata⁽⁶⁾는 디지털 이미지 프로세싱 기법에 의해 교반수조 중앙의 두 단면에서 $r-z$ 와 $r-\theta$ 좌표계에 의한 속도를 계측하여, 이미지 프로세싱 기법의 유효성과 유동의 비정상성을 고찰하였지만, 교반 성능에 미치는 영향을 분석하기에는 미흡하였다.

본 연구에서는 산업용 교반기에서 최적의 교반효율을 가지는 임펠러의 형상설계를 위한 기초과정으로 범위를 제한하였다. 원자력 발전소는 산업용 교반기가 중요하게 사용되는 곳의 하나이다. 원자력 발전소에서 사용되는 교반기는 냉각수로 사용되는 해수의 염분으로 인한 배관부식을 방지하기 위해서 해수와 봉산을 교반하는 목적으로 사용한다. 이를

위해서는 교반기를 이용하여 해수와 봉산을 적절히 혼합해야 하는데 교반에 대한 뚜렷한 기준 데이터가 없기 때문에 단순한 시간경과에 따라 교반이 완료된 것으로 판단하는 실정이다. 이러한 문제점의 개선을 위해 본 연구에서는 교반기 내부유동패턴 뿐만 아니라, 자체 설계 및 제작한 농도센서를 이용하여 정확한 교반정도를 정량화 하여 출력된 데이터를 통해 교반의 정도를 파악하는 방법을 제안하고자 한다. 이를 위해 현재 산업현장에서 사용 중인 교반기용 임펠러 모델을 참고하여, 본 연구에서 개발한 농도계측기법과 내부유동패턴의 고찰을 위해 PIV계측을 활용하여 교반 목적에 따른 산업용교반기 임펠러형상 선정에 기초자료로 활용할 수 있을 것이라고 판단된다.

2. 실험장치

2.1 교반기 실험장치

Fig. 1은 본 연구에서 사용된 교반기의 구조에 대한 개략도이다. 그림을 살펴보면 교반기(Mixing Tank)는 크게 임펠러와 임펠러에 동력을 전달하기 위한 Shaft로 구성되어 있음을 알 수 있다. 임펠러의 위치는 교반기내부에 유체를 채웠을 경우 유체 수위의 절반으로 기준을 정하였다. Fig. 2는 교반기 내부의 유동영역을 도시화한 것이다. 교반기 내부유동영역은 크게 두 가지로 구분할 수 있는데, 회전영역(Rotational Zone)과 비회전영역(Cylindrical Zone)으로 나눌 수 있다.

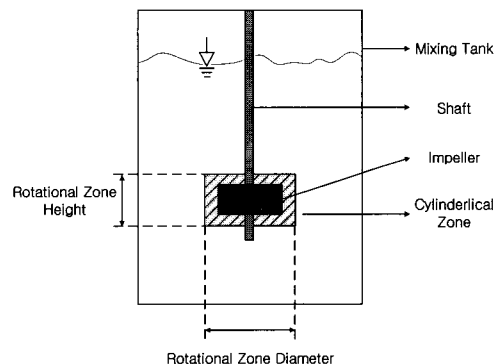


Fig. 1 Definition about mixers flow area

Fig. 2는 본 연구에서 고려한 교반기 내의 임펠러, 자유표면의 위치 및 geometry의 형상을 나타낸 것이다. 임펠러의 직경은 각각의 임펠러 모두 340mm이다. 교반기는 직경 180mm, 높이 250mm의 크기이며, Impeller의 중심은 교반기 바닥으로부터 100mm 간격을 두고 설치되었으며, 교반기 외벽에 방사형으로 설치된 배플(baffle)의 폭은 각각 80mm이다.

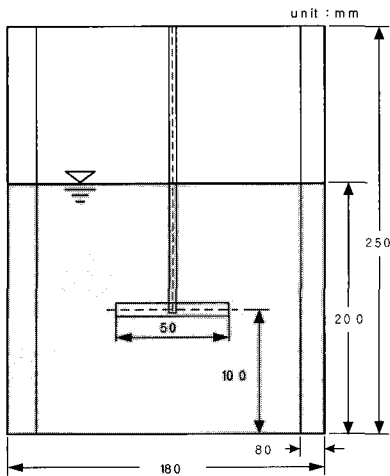
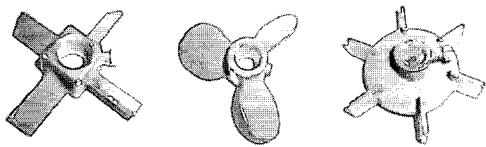


Fig. 2 Dimension of Experimental apparatus

Fig. 3은 본 연구에 적용된 세 가지 형태의 산업용 교반기에 사용되는 임펠러의 실제 모델을 나타내었다.



(a) PBT (b) SCREW (c) RUT

Fig. 3 Various shape of impeller

(a)는 Pitched blade turbine type의 임펠러이다. (b)는 Screw type의 임펠러로써 유체전단율이 높다. 일정한 수준의 유체흐름속도와 유체전단이 동시에 요구될 때, 사용되며 Screw type의 임펠러를 사용시에 임펠러 직경에 따라 교반효율이 좌우되

는 특성을 가진다. (c)는 Rushton turbine type impeller로써 교반영역 내에서 상대적으로 다른 종류의 임펠러에 비해서 크고, 국부적인 전단율을 최소화시켜 교반기 전체에 토출되는 유체전단율을 일정하게 만드는 흐름을 발생시키며, 소요동력이 낮으며 펌핑(pumping)압이 높아 교반기 내의 고른 부분에 교반흐름이 미치며 교반강도가 작아서 저속 교반용에 적합한 형태라고 알려져 있다.

2.2 농도계측 실험장치

불순물이 없는 순수한 유체인 경우 절연상태이기 때문에 전기저항은 무한대이다. 이 상태에서 불순물이 첨가되면 전기저항이 낮아지게 된다. 이렇게 하여 혼합유체 내의 전기저항률은 혼합유체각지점에서 농도에 따라 달라진다.

본 연구에서는 이러한 원리를 이용하여 교반기 내부의 농도에 따라 교반의 효율을 판단할 수 있는 농도감지장치를 개발하였다.

Fig. 4는 본 연구에서 개발한 농도감지장치의 회로도도를 나타낸 것이다. 즉 혼합유체내의 전기저항률은 혼합유체 각 지점에서 농도에 따라 달라지는 원리를 이용하여, 교반기 벽면 4지점에 농도감지센서를 부착하여 4개 지점의 농도의 변화를 관찰하였다. 농도에 따라 전기저항값이 다르므로, 이때 발생하는 전기저항값을 펄스로 변환하여 주파수가 빨라지도록 장치를 구성하였다. 즉 통전률이 높아지면 주파수도 같이 높아지게 되어있다. 또한 각각의 지점에서 계측되는 주파수를 다시 수치화하기위해서 ATMEGA128chip을 사용하여 수치로 변환하여 RS-232C를 통하여 최종적으로 사용자의 컴퓨터에 전달한다. 여기에 본 연구에서 개발한 신호처리 소프트웨어를 통하여 이러한 주파수의 변화를 그래프로 확인이 가능하며 수치는 시간대별로 저장이 가능하다. 이러한 과정을 통해서 순수한 물이 담긴 교반기내부에 봉산이 초기에 주입되는 시점에는 농도감지센서가 부착된 각 지점에서부터 일정시간(60초)까지 측정하였다. 이 때 농도분포선에 나타난 농도분포가 안정화되는 시간을 교반 완료시간으로 설정하였다.

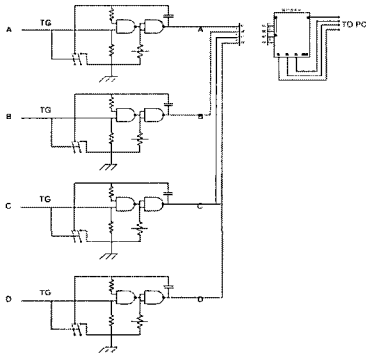


Fig. 4 Circuit Diagram about Concentration measurement sensor

Fig. 5는 본 연구에서 농도계측시스템을 교반기 실험장치에 설치한 것의 개략도를 나타낸 것이다. 농도계측부위로 선정된 교반기의 한 쪽 벽면을 4개의 영역으로 분할하여 상부를 Point 1에서 하부를 Point 4순서로 하였다. Fig. 6은 농도계측 실험장치를 나타낸 것이다.

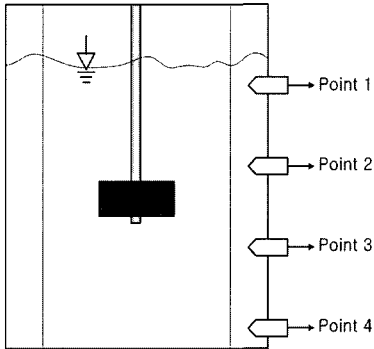


Fig. 5 Location about concentration measurement sensor

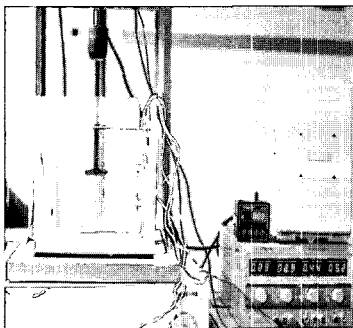
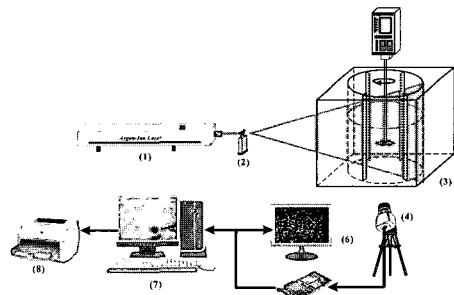


Fig. 6 Experiment apparatus about concentration measurement system

2.2 PIV 실험장치

Fig. 7은 PIV 실험장치 개략도를 나타내었다. 본 연구에 사용된 PIV 시스템은 조명으로 연속광 레이저(6W, Ar-Ion)를 이용하였으며, 2mm 미만의 얇은 두께의 레이저 평면광을 계측단면에 적절히 조사하기 위하여 원통형 비구면 렌즈(Aspheric lens)를 사용하였다. 영상입력장치로써, 시공간 분해능이 우수한 고속도카메라(1280(H)×1024(V), Photron.,CO.LTD)를 이용하였다. 임펄스가 교반기 내부 유동장을 완전 발달시킨 후부터, 설치된 임펄러의 형태와 회전속도 변화에 따라 125~500frame/sec의 영상을 연속적으로 획득하였다. 작동유체로써 상온의 수도수를 이용하였으며, 교반조 내부의 실제 교반현상을 살펴보기 위해서 실험 시작전에 본 연구의 교반대상 분말인 붕소를 실제로 투입한 후, 교반을 진행하면서 계측을 하였다. Fig. 8는 PIV를 이용하여 실험을 수행한 것을 나타낸 것이며, 농도계측과 동시에 PIV 계측을 수행하였다.



- (1) Argon Ion Laser(6W)
- (2) Aspheric Lens
- (3) Mixer Model
- (4) Hi Speed Camera(1280X1024)
- (5) Image Grabber
- (6) Monitor
- (7) Main Computer
- (8) Laser Printer

Fig. 7 Schematic arrangement of PIV system

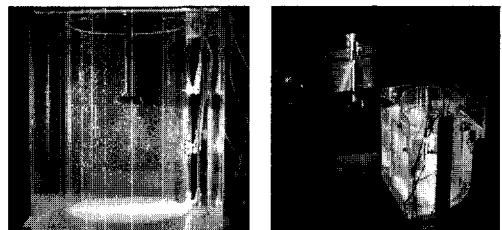
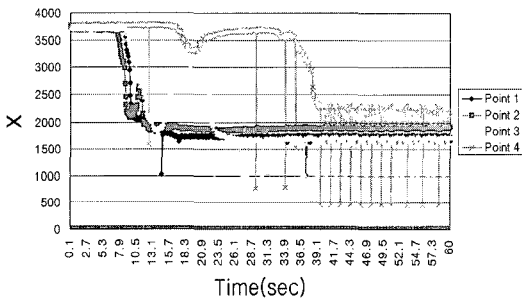


Fig. 8 PIV experiment system

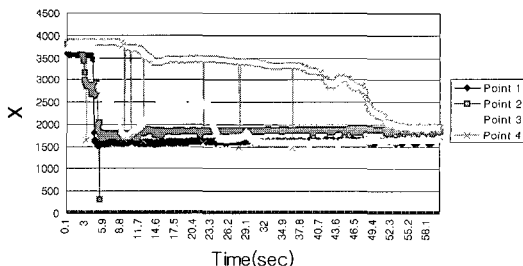
3. 결과 및 고찰

3.1 농도계측 결과

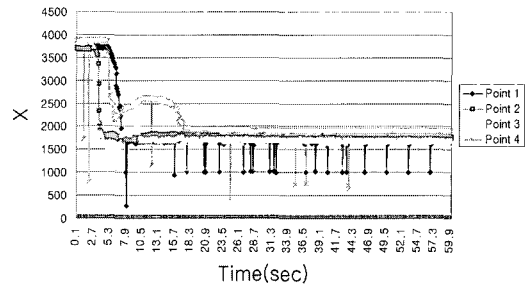
Fig. 9는 시간변화에 따른 농도분포의 변화를 도식화한 것이다. 그림에서 가로축은 시간(Time (sec))을 나타내며, 세로축은 농도의 정도(X)를 나타내었다. (a)는 Pitched blade turbine type impeller, (b)는 Screw Type impeller 그리고 (c)는 Rushton turbine type impeller에 대한 결과이다. 결과에서 알 수 있듯이 본 연구에서 고려한 3가지 종류의 Impeller에서 Point 1과 Point 2의 농도분포가 다른 계측 Point에 비해서 빠른 시간에 안정되는 경향을 보이고 있다. Point 3과 Point 4의 계측지점은 교반대상물질의 혼입에 따른 영향으로 불안정한 농도변화를 보이기 때문이라고 생각한다. 그리고 그림에서 알 수 있듯이, Rushton turbine Type의 impeller가 다른 impeller에 비해서 상대적으로 교반에 소요되는 시간이 적음을 알 수 있다. 이는 Rushton turbine Type impeller의 유동특성이 impeller를 중심으로 교반기의 상부 및 하부 방향으로 전체적으로 고른 유동장을 생성하기 때문이라고 판단된다.



(a) Pitched blade type impeller



(b) Screw type impeller



(c) Rushton turbine type impeller

Fig. 9 Concentration measurement distribution at 100 rpm

3.2 PIV계측 결과

Fig. 10~11은 PIV계측결과를 시간평균유동장에 대해서 속도벡터와 유선으로 나타낸 것이다. 각각의 그림에서 (a)은 Pitched blade turbine type impeller, (b)는 Screw type impeller 그리고 (c)는 Rushton turbine type impeller에 대한 결과이다. Fig. 10~11의 결과에서 알 수 있듯이, (a)Pitched blade turbine type impeller와 (b) Screw type impeller의 유동은 45°각도를 가진 Pitch 형태의 임펠러로써 회전방향이 시계방향이므로 주 흐름이 교반기의 바다 부를 향해 형성되고 있다. 이로 인해 교반기 전체 유동장에서는 상·하 비대칭적인 유동형태가 나타나고, 임펠러를 기준으로 상부영역에 비해서 하부영역에서 활발한 교반효과를 기대할 수 있다. 이는 결과적으로 교반기 전체 유동영역에서는 고른 교반효과를 가지기 힘들다고 생각된다. 따라서 본 연구의 교반목적인 해수와 봉산의 교반에서, 봉산과 유사한 분말가루의 교반에는 적절하지 못한 형태의 임펠러라고 판단된다.

이와는 달리 (c)Rushton turbine type impeller는 임펠러의 위치를 기준으로 상·하 대칭적인 유동패턴이 나타나며, 이는 반경방향으로 향하는 주유동의 영향 때문이다. 이로 인하여 교반기 전체 유동장은 임펠러를 중심으로 두 영역으로 분리되어 물질 전달에 의한 대류현상이 발생하며, 이로 인해 교반기 유동영역에 걸쳐 고른 교반효과를 기대할 수 있는 형태의 임펠러라고 예상된다. 따라서 PIV계측결과와 앞서 살펴본 농도계측결과를 비교해보면 교반기의 임펠러형상에 따라 유동패턴이 상이하며, 교

반기내부의 유동패턴에 따라 교반기의 내부의 농도 분포가 다르게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 따라서 본 연구에서 개발된 농도계측기법이 산업용교반기의 교반성능평가에도 사용할 수 있을 것이라고 본다.

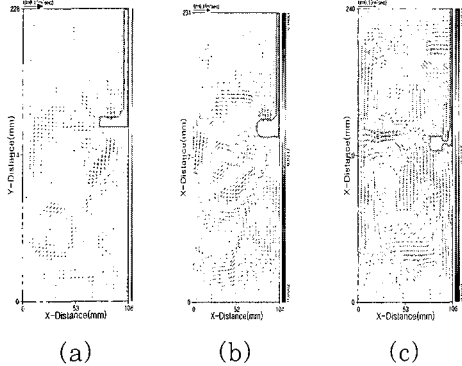


Fig. 10 Vector distribution for each impeller

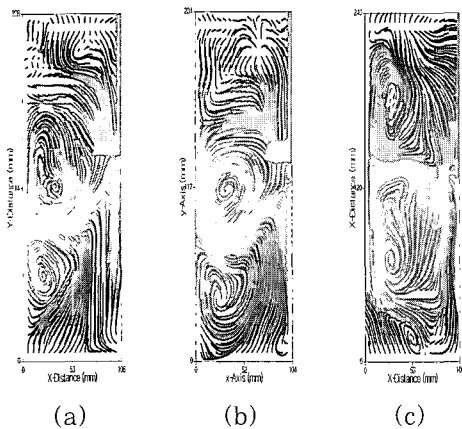


Fig. 11 Streamline distribution for each impeller

4. 결 론

본 연구에서는 산업용교반기에서 전체 교반기의 교반효율을 좌우하는 중요한 변수중의 하나인 임펠러의 형상선정에서 교반정도를 판단하는 새로운 계측방법을 제시하고자 하였다. 이에 본 연구에서 개발한 농도계측기법과 기존의 PIV계측기법을 활용하여, 산업용교반기에 적용하였다. 교반기의 외부 조건(교반기의 크기, 교반속도 등)은 고정하여 오직 교반기의 임펠러의 형상에 따른 교반성능에 대

해서 고찰해 보았다. 그 결과 개발된 농도계측기법을 통해 실시간으로 교반기의 농도를 관찰 할 수 있었으며, 농도계측결과와 PIV계측결과를 비교한 결과 동일한 결과를 확인하였다. 이 결과를 바탕으로 본 연구에서 제시한 농도계측기법이 타당함을 알 수 있었다. 농도계측기법의 장점은 교반기의 교반효율을 효과적으로 살펴 볼 수 있으며, 교반기가 교반하는 중에도 언제든지 원하는 계측지점에 대해서 계측할 수 있음을 확인하였다. 본 연구에서 개발된 농도계측기법이 산업용교반기의 성능지표로 이용할 수 있는 기초자료로 활용될 수 있을 것이라고 판단된다.

참고문헌

- [1] D. Chapple, S. Kresta, "The Effect of Geometry on the Stability on the Stability of Flow Patterns in Stirred Tanks", Mixing XIV, Santa Barbara, CA, June 20-25, 1993.
- [2] S. Winardi, Y. Nagase, "Unstable Phenomenon of Flow in a Mixing Vessel with a Marine Propeller", Journal of Chemical of Japan, Vol.24, No. 2, pp.243-249, 1991.
- [3] A. Bakker, V. D. Akker, "Single-Phase Flow in stirred reactors", Trans. IChemE, Vol. 72, Part A, pp.583-593,1994.
- [4] S. Haam, R. S. Brodkey, J. B. Fasano, "Local Heat Transfer in a Mixing Vessel Using Heat Flux Sensors", Industrial and Engineering Chemistry Research, Vol. 31, No.5, pp.1384-1391, 1993.
- [5] A. Bakker, V. D. Akker, "Gas-Liquid Contacting with Axial flow Impeller", Trans. IChemE, Vol. 72, Part A, pp. 573-582, 1994.
- [6] H. Tsurusaki, and T. Urata, "Measuring Method for 3-D Study Flow by

Digital Image Processing of Pathline Pictures", The Winter Annual Meeting of the ASME on Flow Visualization, pp.95-100, 1989.



김정환 (金貞煥)

1968년생. 2003년 8월 한국해양대학교 기계공학과 대학원 졸업(공학박사). 현재 (사)조선기자재연구원 연구개발팀 팀장.

저 자 소 개



김동균 (金東均)

1970년생. 2001년 동아대학교 기계공학과 대학원 졸업(공학박사). 현재 동명대학교 기계공학과 전임강사



김오근 (金五根)

1965년생. 2000년 동아대학교 기계공학과 대학원 졸업(공학박사) 현재 (주)한국수력원자력 근무.



배석태 (裴錫泰)

1965년생. 1998년 동아대학교 기계공학과 대학원 졸업(공학박사). 현재 동명대학교 향만물류학부 조교수.



이영호 (李英浩)

1958년생. 1986~1989년 일본 동경대학 기계공학과 졸업(공학박사) 현재 한국해양대학교 기계정보공학부 교수.