한국마린엔지니어링학회지 제31권, 제6호, pp. 797~803, 2007. 9 (ISSN 1226-9549)
Journal of the Korean Society of Marine Engineering

PIV와 CFD에 의한 산업용 교반기 Impeller 형상 선정에 관한 연구

김동균* · 김정환†

(원고접수일 : 2007년 7월 3일, 심사완료일 : 2007년 9월 13일)

A Study about Choice of Industrial Mixer's Impeller Type for PIV and CFD

Dong-Kyun Kim* · Jeong-Hwan Kim†

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 using PIV and CFD method. The rotating speed of impellers are fixed by 100RPM.

Key words : PIV(입자영상유속계), CFD(전산유체역학), Mixer(교반기), Impeller(날개)

1. 서 론

일반적으로 교반이란 두 가지 이상의 물질을 혼합하는 것이지만 공업분야에서의 전문적인 분류에 따르면, 점성이 높지 않고 비교적 유동성이 좋은 유체원료를 혼합하는 것을 교반이라 한다. 교반장치의 일반적인 구성은 모터에 의해 회전되는 교반축에 Impeller를 부착한 것으로 석유화학공업, 발효공업, 도료공업, 합성수지공업, 식품공업, 제지공업, 정밀화학 및 다양한 종류의 수처리공정 등 전반적인 산업분야에서 널리 사용되고 있으며, 그 응용분야가 매우 높다. 특히 임펠러는 기계동력을 교반에너지로 전환하여 직접액체를 섞어주는 부분으로 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 Impeller로부터 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 비정상 유동메커니즘을 가진다. 우수한 성능의 산업용 교반기를 설계하기 위해서는 반드시 교반성능에

† 교신저자 (한국조선기자재연구원), E-mail:jhkim@komeri.re.kr, Tel: 051)405-6880
* 동명대학교 기계공학과

영향을 미치는 다양한 내부 유동특성의 정량적 실험데이터의 확보가 필요하나, 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, Winardi 와 Nagase[1]은 유동의 가시화 기법을 이용하여 임펠러의 유동특성을 연구하였다. 이들은 다양한 와류 현상에 대한 유동현상을 규명하고 주기성에 대해서 고찰 하였다. Bakker 와 Akker[2]는 LDV를 이용하여 피치패들형상의 Impeller에 대한 유동장의 축방향 속도분포고찰을 통하여 유동패턴의 비정상성과 불안정성을 제시하였다. 송길섭 과 오석영[3]은 혼합탱크내의 임펠러 형태에 따른 각각의 유동 특성을 정상/비정상 수치해석을 통해 살펴보았다. 최두성 등[4]은 두 가지 형태의 임펠러형태에 대해서 고분자 반응기의 내부 유동 특성에 대한 MRF 수치해석을 수행하여 임펠러와 배플의 형상, 운전조건에 따른 각 반응기들의 독특한 유동 패턴을 연구하였다. 장재원 등[5]은 45° Pitched Paddle 형 교반기 내부 유동 해석을 통해 이에 대한 유동 특성을 확인하였다. 이상의 선행연구는 특정형상의 Impeller에 대한 유동특성에 대해서 연구하였다. 이러한 수치해석 및 가시화 실험을 수행하기 위한 전문적인 지식과 모델의 제작 및 가시화를 위한 계측장비 등에 소요되는 비용과 시간이 큰 문제점으로 남아 있다. 또한 교반기의 유동해석을 위해서는 교반기가 사용목적에 따라 종류 및 크기, 형태가 모두 달라 그 때마다 격자생성과 해석 변수설정을 해야 하고 또, 설계자가 바뀔 때마다 유동해석 방법을 습득해야하는 번거로움이 있을 것이라고 예상된다. 특히 산업현장 등에서는 여러 가지 Impeller형상에 대해서 특정조건에 적합한 Impeller를 선정하는 경우가 발생할 수도 있다. 아울러 수치해석의 과정을 보다 단순화하여 해석에 소요되는 시간을 단축할 수 있는 방법을 모색하고자 한다. 이에 본 연구에서는 유체에 분말가루를 교반하는 경우의 Impeller형상의 선정을 목적으로 연구를 수행하였다. 이를 위해 현재 교반기 관련 산업현장에서 실제로 산업현장에 사용 중인 교반기용 Impeller 모델을 참고하여, 3차원 CAD를 이용한 Impeller형상의 모델링작업을 수행하였다. 이를 바탕으로 CFD(전산유체역학)해석을 수행하였다. 또한 해석의 타당성을 검증하기 위해서 PIV(입자영상유속계)를 이용하여 CFD의 결과와 비교할 것이다. 교반목적에 따라 적절한 산업용 교반기 Impeller형상의 선정뿐만 아니라, Impeller가 적용된 범용유체기계에도 활용할 수 있을 것이라고 판단된다.

2. PIV

2.1 교반기 실험장치

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

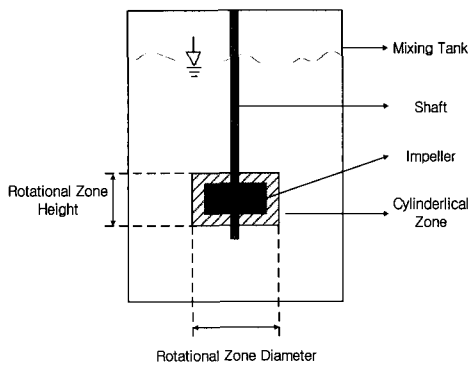


Fig. 1 Definition about mixers flow area

Fig. 2는 본 연구에서 고려한 교반기 내에서의 Impeller와 자유표면의 위치 및 geometry의 형상을 나타낸 것이다. Impeller의 직경은 각각의 Impeller 모두 340mm이다. 교반기는 직경

180mm, 높이 250mm의 크기이며, Impeller의 중심은 교반기 바닥으로부터 100mm 간격을 두고 설치되었으며, 교반조 외벽에 방사형으로 설치된 배플(baffle)의 폭은 각각 80mm이다.

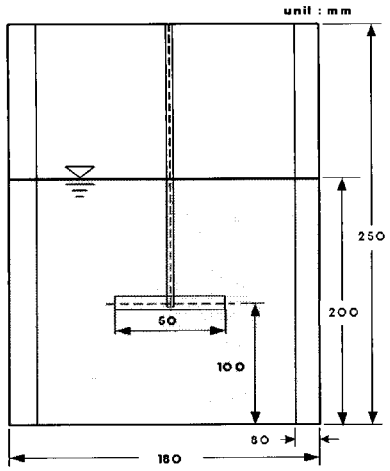
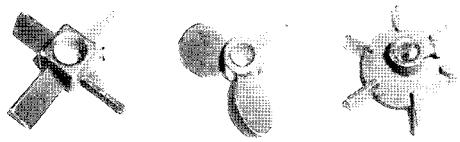


Fig. 2 Dimension of Experimental apparatus

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



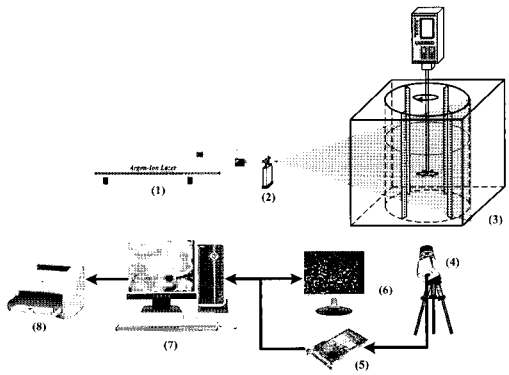
(a) PBT (b) SCREW (c) RUT

Fig. 3 Various shape of impeller

(a)는 Pitched blade turbine type의 Impeller이다. (b)는 Screw type의 Impeller로써 유체전단율이 높다. 일정한 수준의 유체흐름속도와 유체전단이 동시에 요구될 때, 사용되며 Screw type의 Impeller를 사용시에 Impeller 직경에 따라 교반효율이 좌우되는 특성을 가진다. (c)는 Rushton turbine type impeller로써 교반영역 내에서 상대적으로 다른 종류의 Impeller에 비해서 크고, 국부적인 전단율을 최소화시켜 교반조 전체에 토출되는 유체전단율을 일정하게 만드는 흐름을 발생시키며, 소요동력이 낮으며 펌핑(pumping)압이 높아 교반기 내의 고른 부분에 교반흐름이 미치며 교반강도가 작아서 저속교반용에 적합한 형태라고 알려져 있다[6].

2.2 PIV 실험장치

Fig. 4은 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. Impeller가 교반기 내부 유동장을 완전 발달시킨 후부터, 설치된 Impeller의 형태와 회전속도 변화에 따라 125~500frame/sec의 영상을 연속적으로 획득하였다. 작동유체로써 상온의 수도수를 이용하였으며, 교반조 내부의 실제 교반현상을 살펴보기 위해서 실험시작전에 본 연구의 교반대상 분말인 붕소를 실제로 투입한 후, 교반을 진행하면서 계측을 하였다.



(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. 4 Schematic arrangement of PIV system

Fig. 5는 본 연구에 사용된 PIV 실험장치 구성도를 나타낸 것이다.

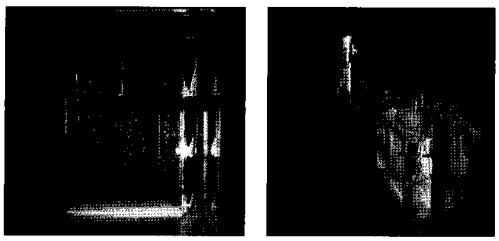


Fig. 5 PIV experiment system

3. 수치해석

3.1 3D CAD Modeling

본 연구에서는 Impeller형상의 모델링을 위해 3차원 CAD 프로그램을 사용하였다. 하지만 단순하게 각각의 Impeller를 각 형상별로 모델링하는 방법을 사용할 경우, 각각의 Impeller 형상에 모델링 작업을 수행해야 하기 때문에, 작업량이 많아지는 단점이 있다. 이를 보완하기 위하여 Impeller 모델의 DB 구축을 위한 기술을 개발하여 Impeller의 형상 모델링에 활용 하였다. Impeller 모델링의 DB화는 모든 과정이 3차원 CAD를 통해 이루진다. 따라서 Impeller의 형상변경은 Parametric 모델링 방식의 적용이 가능하다. 따라서 3차원 CAD의 변수변형조건을 통해 다양한 형상의 Impeller를 손쉽게 모델링 가능하며, 이러한 과정을 통해서 Impeller형상을 변경해야할 경우, 손쉽게 CFD해석에 적용할 수 있는 장점이 있다. Fig.6은 3차원 CAD를 이용한 Impeller형상을 나타낸 것이다.

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

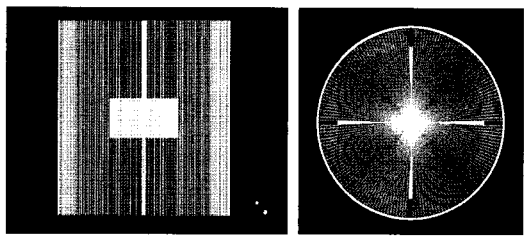
Fig. 6 CAD modelling about impeller

3.2 교반기와 Impeller의 격자생성

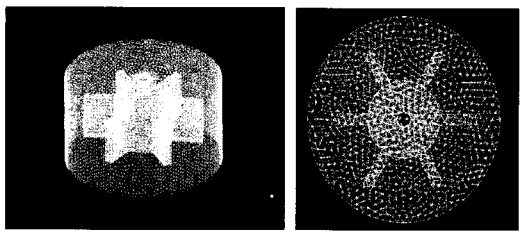
CFD를 이용한 수치해석에서는 무엇보다도 격자(mesh)생성이 대단히 중요하다. 본 연구에서는 격자의 생성을 위해서 격자생성 전용 프로그램인 ICEMCFD를 사용하였다. 기존의 CFD의 연구추세가 간단한 형상은 단일 HEXA mesh(사각격자)를, 보다 복잡한 형상에 대해선 단일 TETRA mesh(삼각격자)로 구성하였다. 하지만 계산정도와 시간, 후처리결과처리의 용이성 등 여러 가지 이유로 HEXA mesh가 상대적으로 우수다고 알려졌으나, 복잡한 형상에서 HEXA mesh를 구성하는 것이 시간이 많이 소요되는 단점이 있다. 이를 보완하기 위해서 최근의 CFD 연구추세는 HEXA mesh와 TETRA mesh의 장·단점을 보완하는 HYBRID mesh(혼합격자)를 구성하여 연구를 수행하고 있다.

본 연구에서는 Impeller를 제외한 교반기영역에 대해서는 HEXA mesh로 구성하였으며, Impeller 영역은 TETRA mesh로 각각 구성하였다. 따라서 Impeller의 형상이 변하더라도, 쉽게 격자를 생성할 수 있도록 하여 해석에 소요되는 시간을 단축할 수 있는 장점이 있다.

Fig.7은 각 해석영역에서의 격자를 나타낸 것이며, Fig.8은 Solver에서 영역별로 작성된 격자를 결합한 것을 나타낸 것이다. 계산에 사용된 격자수는 평균적으로 300만개이다.



(a) Mixer area mesh



(b) Impeller area mesh

Fig. 7 Meshing result about each Area

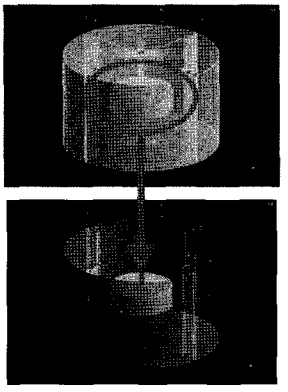
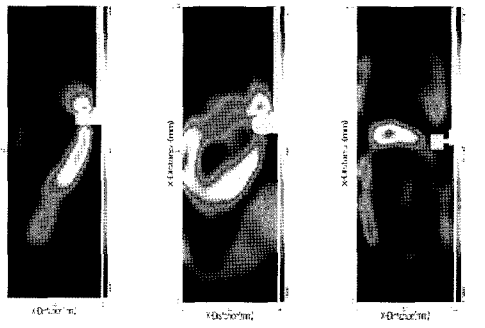


Fig. 8 Solver at each area mesh

CFX10는 그동안 교반기와 같은 회전유동에 적용되어 그 결과가 검증되어 있는 Solver로 알려져 있다. 또한 본 연구에서 난류 모델은 k-ω모델을 사용하였다. 그리고 회전유동부와 비회전유동부의 접하는 부분에는 Interface조건을 부가하여 접합부에서 발생할 수 있는 오차를 최소화 하였다.

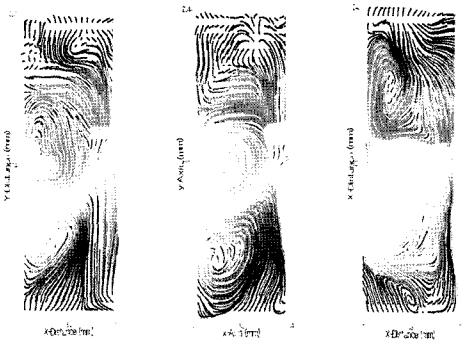
4. 결과 및 고찰

Fig. 9~10는 Impeller형상에 따라 PIV계측결과를 시간평균유동장에 대해서 운동에너지와 유선으로 나타낸 것이며, Fig.11~12는 CFD해석결과를 도식화한 것이다. 해석결과를 비교한 결과 PIV와 CFD해석결과는 유사한 경향을 보였다. 각각의 그림에서 (a)는 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 impeller 와 (b) Screw type impeller의 유동은 45°각도를 가진 Pitch 형태의 Impeller로써 회전방향이 시계방향이므로 유동형태가 교반기의 바닥방향으로 향하고 있다. 이로 인해 교반기 전체 유동장에서는 비대칭적인 유동형태가 나타나고, Impeller를 기준으로 상부영역에 비해서 하부영역에 대한 교반효과를 기대할 수 있다. 이는 결과적으로 교반기 전체 유동영역에서는 고른 교반효과를 가지기 힘들다고 생각된다. 따라서 본 연구의 교반목적인 해수와 붕산의 교반에서, 붕산과 유사한 분말가루의 교반에는 적절하지 못한 형태의 Impeller라고 판단된다.



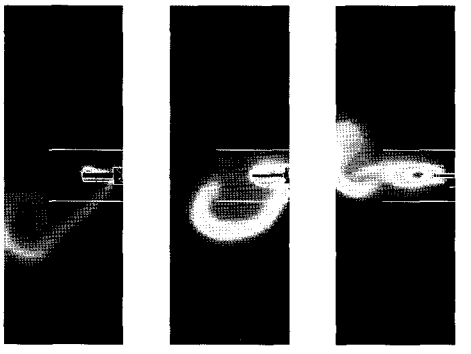
(a) (b) (c)

Fig. 9 Kinetic energy distribution for each impeller using PIV



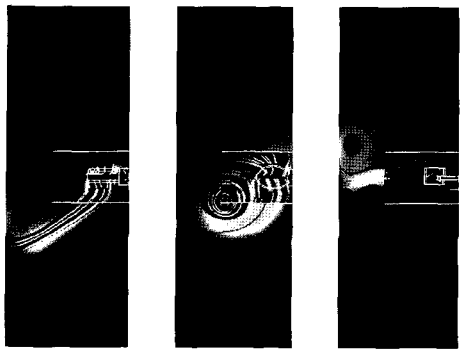
(a) (b) (c)

Fig. 10 Streamline distribution for each impeller using PIV



(a) (b) (c)

Fig. 11 Kinetic energy distribution for each impeller using CFD



(a) (b) (c)

Fig. 12 Streamline distribution for each impeller using CFD

이와는 달리 (c) Rushton turbine type impeller는 유동패턴이 Impeller의 위치를 기준으로 상·하 대칭적인 유동패턴이 나타나는 결과를 보였다. 이는 반경방향으로 향하는 주유동의 영향 때문이다. 이로 인하여 교반기 전체 유동장은 Impeller를 중심으로 두 영역으로 분리되어 물질 전달에 의한 대류현상이 발생하며, 이로 인해 교반기 유동영역에 걸쳐 고른 교반효과를 기대할 수 있는 형태의 Impeller라고 판단된다.

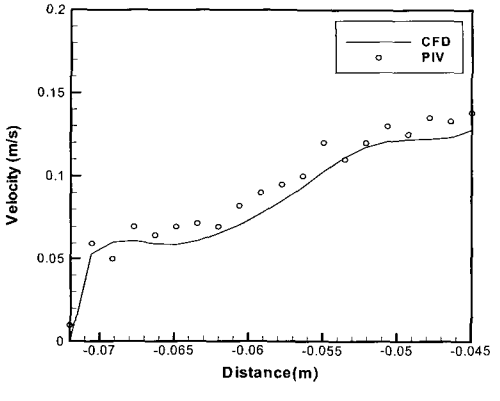


Fig. 13 Comparison of CFD result with PIV result velocity distribution for Rushton turbine type impeller

Fig.13은 Impeller반경방향으로의 속도분포에 대해서 CFD결과 와 PIV결과를 비교한 것이다. CFD결과와 PIV결과는 정량적으로 2% 일치하는 결과를 보였으며, CFD결과의 타당성을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

산업용 교반기의 Impeller 형상 선정에 대해서 PIV 와 CFD를 적용하여 연구하였다. Impeller 형상에 따른 교반기내부의 유동특성을 고찰하기 위해서 Impeller 형상 외에 다른 조건(Impeller의 위치, 속도)은 동일하게 설정하였다. Impeller는 3가지 형상에 대해서 고찰하였다. 본 연구에서 사용한 해석방법은 교반기에 적용하고자 하는 다양한 Impeller형상에 대해서도 적용하여 격자생성을 비롯한 해석의 과정을 대부분 생략하여 결과를 빠른 시간 내에 도출할 수 있으며, Impeller가 적용된 범용유체기계의 해석방법에도 활용할 수 있을 것이라고 판단된다. Impeller의 형상에 따라 교반기에서의 유동패턴이 다르게 나타났으며, Pitched blade turbine type Impeller과 Screw type Impeller는 교반기 전체 유동장에서 상·하 비대칭적인 유동형태가 나타나고, Impeller를 기준으로 상부영역에 비해서 하부영역에서 활발한 교반효과를 기대할 수 있는 Impeller 형태이다. 따라서 교반기 전체의 유동영역에서는 고른 교반효과를 가지기 어려울 것이라고 생각된다. 교반목적이 유체와 분말가루를 교반하는 경우에는 Rushton Turbine typed의 Impeller형상이 적합한 해석결과를 보였다. 본 연구결과와 선행연구결과를 바탕으로 향후 다양한 형상의 Impeller와 세분화된 변수(회전속도 및 위치 등)에 따른 연구를 수행하여 교반기의 Impeller형상선정에 대한 기초자료에 반영할 예정이다.

참고문헌

[1] 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.243~149, 1991

[2] A.Bakker, V.D.Akker, "Single-Phase Flow in Stirred Reactor", Trans KHEME, Vol.72 PART A ,pp.583~593, 1994
[3] 송길섭, 오석영, 오정진, "혼합탱크 내의 임펠라 형태에 따른 유동특성에 관한 수치해석", 유체기계저널 제5권 2호, pp.29~35, 2002
[4] 최두성, 임예훈, 한상필, "고분자 반응기의 내부 유동 특성에 관한 연구", 한국전산유체공학회 춘계학술대회 논문집 pp.134~139, 2002
[5] 장재원, 허남건, "45° Pitched Paddle 형 교반기 내부의 유동해석".한국전산유체공학회 추계학술대회 논문집 pp.109~114, 2000
[6] 박경일, "비정상 교반을 이용한 교반장치의 유동특성 및 교반 이론의 적합성에 관한 연구", 연세대학교 산업대학원, 2001

저 자 소 개

김동균(金東均)

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

김정환(金貞煥)

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