

CFD와 역설계를 이용한 교반기 Impeller 형상 해석에 관한 연구

김동균*, 배석태**, 박재현***

Study on the Industrial Agitator's Impeller Shape Analysis Usng CFD and Reverse Engineering

Kim, D.K.*, Bac, S.T.** and Park, J.H.***

ABSTRACT

Industrial Agitators 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 agitator's tank. Impellers are Pitched blade turbine(PBT) types, Screw type and Rushton turbine type(RUT). In this study is numerical analysis of the Industrial agitator's Impeller types. The rotating speed of impellers fixed about 100RPM. Numerical analysis results show that differential flow characteristics of each type Impeller and Rushton turbine type(RUT) is suitable for mixing powder.

Key words : Impeller(임펠러), CFD(전산유체역학), Reverse Engineering(역설계)

1. 서 론

다양한 목적으로 산업현장에 사용되는 교반기는 원자력발전, 생화학공업, 생화학공업, 금속공업, 수(水)처리 및 환경 관련 공정 등 여러 산업분야에 사용되고 있으며, 혼합되는 물질의 특성과 종류에 따라 다양하고, 적절한 형태의 Impeller(임펠러)와 교반기가 설계되고 있다. 특히 Impeller는 기계동력을 교반 energy로 바꾸어 직접액체를 섞어주는 부분으로 Impeller 날개 형상에서부터 회전 밸런스까지 하나하나가 교반 효율에 큰 영향을 미치는 요소이다. 특히 중속회전인 경우에는 Impeller가 교반 성능에 미치는 영향이 매우 큰 것으로 알려져 있다.

교반기 내부 유동장은 Impeller로부터 발달되는 유체전단혼합(fluid shear mixing)과 유체 흐름(fluid flow)의 상호 작용에 의한 날개 끝부근에서 와류(vortex)의 주기적인 방출, 2차 와류의 순환 및 난류의 발생 등 상당히 복잡한 구조의 3차원 비정상 유동메커니즘을 가진다.

우수한 성능의 산업용 교반기 설계를 위해서는 반드시 교반성능에 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, Chapple과 Kresta^[1]는 가시화기법(tuft법)으로 3개의 블레이드를 가진 Impeller에 의한 교반기에서 유동패턴의 안정성과 Impeller의 위치, 직경과 같은 기하학적 변수의 영향에 대해 연구하였다. Winardi와 Nagase^[2]는 유동의 가시화 기법을 조합하여 선박용 프로펠러의 유동특성을 연구하였으며 다양한 와류의 회전, 순환과 같은 유동현상을 규명하고, 일정한 주기성을 관찰하였다. Bakker와 Akker^[3]는 LDV를 이용하여 피치 블레이드 터빈에 의한 유동장의 축방향 속도분포의 관찰을 통하여 유동패턴의 비정상성과 불안정성을 제시하였다.

LDV를 이용하여 피치 블레이드 터빈에 의한 유동장의 축방향 속도분포의 관찰을 통하여 유동패턴의 비정상성과 불안정성을 제시하였다.

*교신저자, 정회원, 동명대학교 기계공학과
**동명대학교 향안물류학부
***[재]한국조선기자재연구원
- 논문투고일: 2006. 03. 08
- 심사완료일: 2006. 08. 07

Haam 등¹⁵⁾은 일정한 주기를 갖는 교반탱크 내부의 상호 열전달 계수의 크기를 알아내고 이것은 교반탱크의 축방향 와류의 주기적인 유동에 따른 열전달 계수의 변동에 의한 것으로 보고하였다.

Bakker 등¹⁶⁾은 축방향 Impeller에 의해 교반되는 가스집진기 시스템의 유동현상의 주기성을 고찰하고 변동의 주기와 Impeller의 회전속도의 관계를 규명하였다. Tsurusaki와 Urata¹⁶⁾는 디지털 이미지 프로세싱 기법에 의해 교반수조 중앙의 두 단면에서 $r-z$ 와 $r-\theta$ 좌표계에 의한 속도를 측정하여, 이미지 프로세싱 기법의 유효성과 유동의 비정상성을 고찰하였지만, 교반 성능에 미치는 영향을 분석하기에는 미흡하다. 이상의 선행연구들은 교반기의 유동원리에 규명에 한정되어, 실제 교반기설계에 필요한 모델링 기술이나 현장에 곧바로 적용할 수 있는 해석기법에 대한 연구는 다소 부족한 실정이었다.

이에 본 연구에서는 유체에 분말가루를 교반하는 경우의 Impeller 형상의 선정을 목적으로 연구를 수행하였다. 이를 위해 현재 교반기 관련 산업현장에서 실제로 산업현장에 사용 중인 교반기용 Impeller 모델을 참고하여, Reverse Engineering(역설계)와 3차원 CAD를 이용한 Impeller 형상의 모델링작업을 수행하였다. 이를 바탕으로 CFD(전산유체역학) 기법에 적용할 것이다. 교반목적에 따라 적절한 산업용 교반기 Impeller 형상의 선정뿐만 아니라, Impeller가 적용된 범용유체기계에도 활용할 수 있을 것이라고 판단된다.

2. 모델링

2.1 수치해석모델

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 1/2로 기준을 정하였다. Fig. 2는 교반기 내부의 유동영역을 도시화한 것이다. 교반기 내부유동영역은 크게 회전영역(Rotational Zone)과 비회전영역(Cylindrical Zone)으로 나눌 수 있다. 이를 3차원 CAD 모델링시에도 이를 반영하여 회전영역과 비회전영역으로 나누어 모델링을 수행하였으며, 3차원 CAD를 이용해서 두 영역으로 분리하여, 모델링한 결과는 Fig. 6에 나타내었다.

Fig. 2는 본 연구에서 고려한 교반기내의 Impeller, 자유표면의 위치 및 geometry의 형상을 나타낸 것이

다. Impeller의 직경은 각각의 Impeller 모두 340 mm이다. 사용된 교반기는 직경 180 mm, 높이 250 mm의 크기이며, Impeller의 중심은 교반기 바닥으로부터 100 mm 간격을 두고 설치되었으며, 교반조 외벽에 방사형으로 설치된 배플(baffle)의 폭은 각각 80 mm이다.

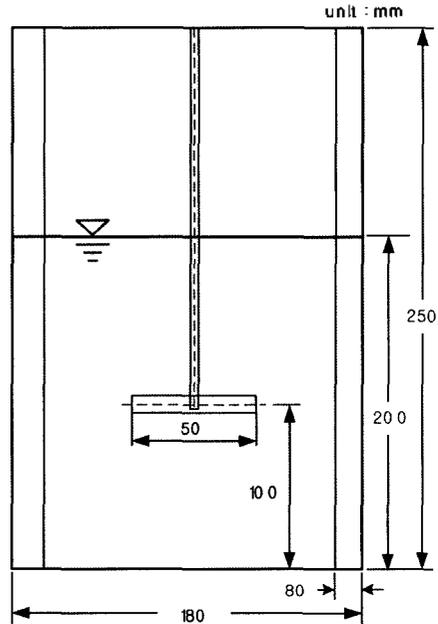


Fig. 1. Definition about Mixers flow area.

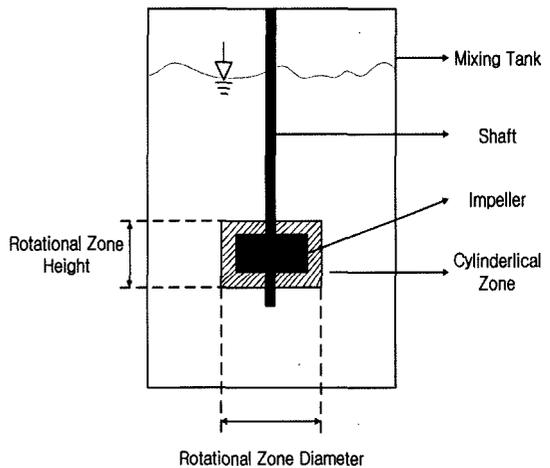
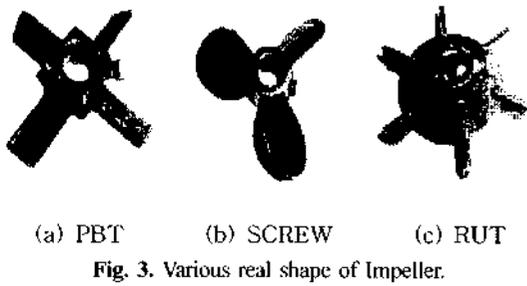


Fig. 2. Dimension of numerical apparatus.

2.2 Impeller 형상 모델링

Fig. 3은 본 연구에 적용된 3가지 형태의 산업용 교



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

Fig. 3. Various real shape of Impeller.

반기에 사용되는 Impeller의 실제 모델을 나타내었다. (a)는 Pitched blade turbine type의 Impeller로써 radial flow보다는 효율적인 흐름을 가진다고 알려져 있다. (b)는 Screw type의 Impeller로써 유체진단율이 높다. 일정한 수준의 유체흐름속도와 유체전단이 동시에 요구될 때, 사용되며 Screw type의 Impeller는 Impeller 직경에 따라 교반효율이 좌우되는 특성을 가진다고 알려져 있다. (c)는 Rushton turbine type Impeller로써 교반영역 내에서 상대적으로 크고, 극부적으로 발생하는 전단율을 최소화시켜 교반조 전체에 토출되는 유체전단율을 일정하게 만드는 흐름을 발생시키며, 소요동력이 낮으며 펌핑(pumping)압이 높아 교반기내부의 전체 영역에 교반흐름이 비치며 교반강도가 작아서 저속교반용에 적합한 형태라고 알려져 있다.

본 연구에서는 Impeller형상 데이터를 확보하기 위해 Reverse Engineering(역설계) 기법을 적용하였다. 적용된 역설계 시스템은 exyma-E300(CimCore corporation)이다. exyma-E300 시스템은 측정영역에 비하여 높은 측정 분해능을 가지는 모아레 방식과 간결한 시스템 구성에 용이한 위상천이 방식의 장점을 결합시킨 비접촉식 3D Scanner이다. 획득된 데이터를 역설계 프로그램을 사용하여 필터링(filtering)하고 3차원 서피스(surface) 형상을 구하였다. 그리고 특징점을 이용하여 각 부분을 병합(merging)하여 완성된 하나의 형상을 만들었다. 이 과정을 통해서 Impeller형상의 CAD 모델링에 활용하여 적용하였다⁷⁾.

완성된 3차원 형상데이터를 CAD 데이터와의 검사를 통해 일치도를 구하였다. Fig. 4는 3차원 데이터 획득결과를 나타낸 그림이다. 획득한 Impeller 형상데이터를 이용하여, 3차원 CAD 이용하여 Impeller 형상을 모델링하였으며, 이를 Fig. 5에 나타내었다. 향후 Impeller 형상과 범용유체기기에 대한 정밀한 CAD 데이터확보를 위해서는 3차원 형상데이터의 추출과 관련된 연구가 더욱 필요하다고 판단된다.

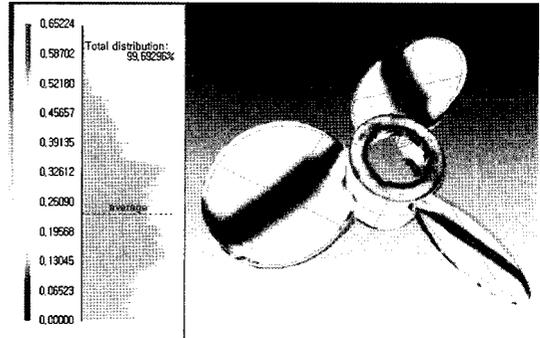
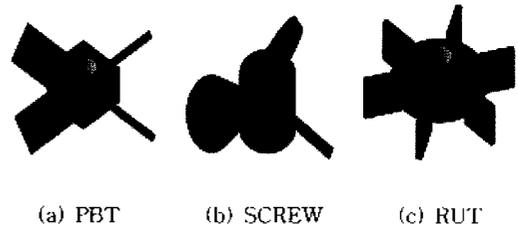


Fig. 4. Result about measurement Impeller shape.



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

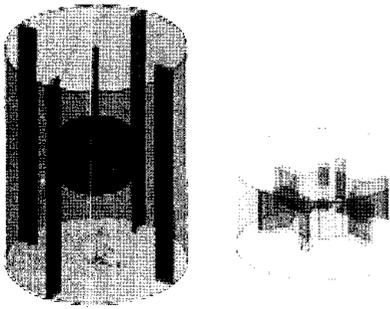
Fig. 5. CAD modeling result about Impeller.

2.3 교반기와 Impeller의 격자생성

CFD를 이용한 수치해석에서는 무엇보다도 격자(mesh) 생성이 대단히 중요하다. 본 연구에서는 격자의 생성을 위해서 격자생성 전용 프로그램인 ICEM CFD를 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 우수하다고 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 교반기영역은 HEXA mesh로 구성하였고, 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. 6은 앞에서 언급하였듯이, 해석영역별로 나누어 3차원 CAD로 모델링한 결과이다.

Fig. 7은 해석영역별로 나누어 격자형상의 결과를 나타 내었다. 그림에서 (a)는 교반기의 격자형상(Hexa)

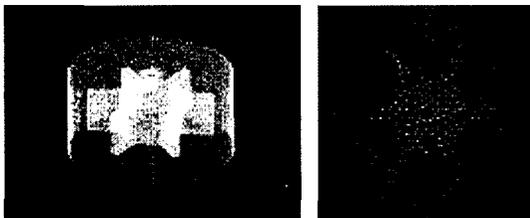


(a) Mixer Area (b) Impeller Area
 Fig. 6. CAD modeling result about each area.

이며 (b)는 Impeller의 격자형상(Tetra-Prism)이다. 이를 통해 복잡하고, 다양한 Impeller형상에 대해서도 mesh 생성에 별 다른 어려움 없이 적용할 수 있으며 이는 산업현장에서도 쉽게 적용할 수 있는 방법이며, 교반목적에 적합한 Impeller의 형상을 빠른 시간에 선정할 수 있는 방법이라고 생각된다. 또한 Impeller가 적용된 범용유체기계의 해석에도 충분히 활용할 수 있는 방법이라고 판단된다.



(a) Mixer Area mesh



(b) Impeller Area mesh

Fig. 7. Meshing result about each area.

2.4 Solver에서의 mesh 결합

Fig. 8은 본 연구에서 Solver로 사용한 열·유체 해석코드인 CFX 5에서 각 영역별로 나누어 생성한 mesh를 Import한 결과를 나타낸 것이다. 교반기 영역은 Hexa mesh, Impeller 영역은 Tetra-Prism mesh로 구성된 격자를 결합한 형태이다. CFX5는 유체기계와

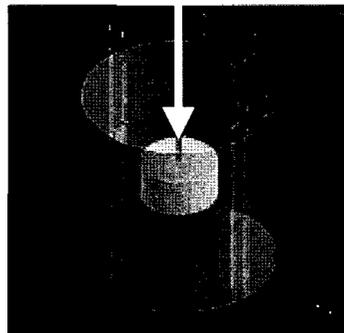
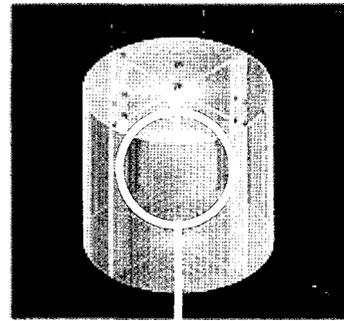


Fig. 8. Import each area mesh at solver.

같은 회전유동에 적용되어 그 결과가 충분히 검증되어 있는 Solver로 알려져 있다. 또한 본 연구에서 해석을 위해 적용한 난류모델은 $k-\omega$ 모델을 사용하였다. 그리고 회전유동부와 비회전유동부의 접하는 부분에는 Interface 조건을 부가하여 회전유동부와 비회전유동부의 접합부에서 발생할 수 있는 오차를 최소화 하였다.

3. 결과 및 고찰

Figs. 9~11은 본 연구에서 선정대상으로 고려한 Impeller의 수치해석에 대한 결과를 나타낸 것이다. Impeller 형상에 따른 유동특성을 살펴보기 위해서 Impeller의 위치와 회전속도(100RPM)은 고정하였다.

Fig. 9는 Pitched blade turbine type Impeller, Fig. 10은 Screw type Impeller 그리고 Fig. 11은 Rushton turbine type Impeller에 대한 결과이다. 각각의 그림에서 (i)는 속도벡터, (ii)는 유선, (iii)은 운동에너지를 나타낸 것이다. 각각의 결과에서 알 수 있듯이, Fig. 9 Pitched blade turbine type Impeller와 Fig. 10 Screw type Impeller의 Impeller 형태는 45° 각도를 가진 Pitch 형태의 Impeller로써 회전방향이 시계방향이므로 주 흐름이 교반기의 축방향으로 형성되고 있다. 이로 인해 교반기 전체 유동장에서는 상·

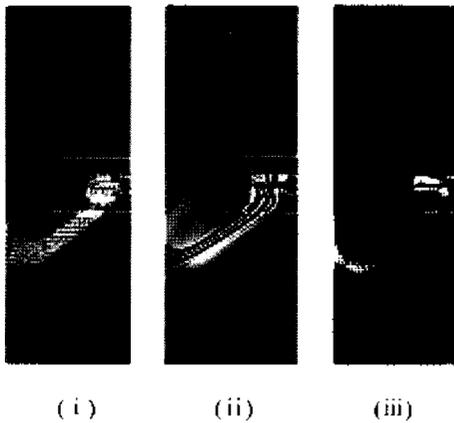


Fig. 9. Pitch blade turbine type.

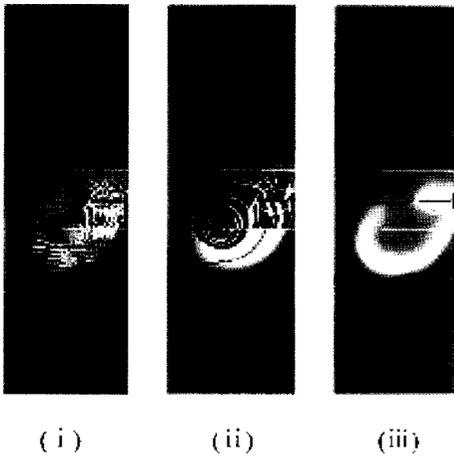


Fig. 10. Screw type.

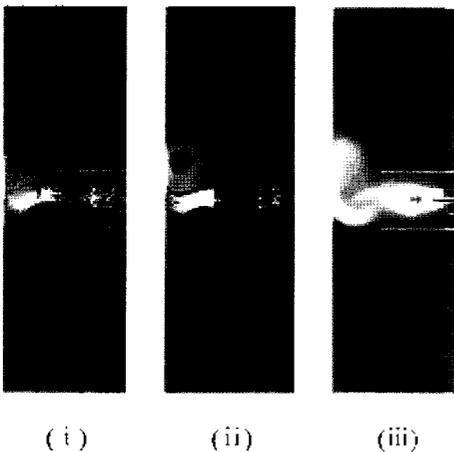


Fig. 11. Rushton turbine blade type.

하 비대칭적인 유동형태가 나타나고, Impeller를 기준으로 상부영역에 비해서 하부영역에서 활발한 교반효

과를 기대할 수 있다. 이에 따라 교반기 전체의 유동 영역에서는 고른 교반효과를 가지기 어려울 것이라고 생각된다. 따라서 본 연구의 교반복적인 해수와 봉산의 교반에서, 봉산과 유사한 분말가루의 교반에는 적절하지 못한 형태의 Impeller라고 판단된다.

이와는 달리 Fig. 11에 나타낸 Rushton turbine type Impeller는 90° 각도를 가진 Pitch 형태의 Impeller이다. Impeller의 위치를 기준으로 상·하 대칭적인 유동패턴이 나타나며, 이는 반경방향으로 향하는 주 유동의 영향이라고 판단된다. 이로 인하여 교반기 전체 유동장은 Impeller를 중심으로 두 영역으로 분리되어 물질전달에 의한 대류현상이 발생하며, 이로 인해 교반기 유동영역에 걸쳐 고른 교반효과를 기대할 수 있는 형태의 Impeller라고 예상된다.

4. 결 론

산업용 교반기의 Impeller 형상 해석에 대해서 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 고찰하였으며, 이에 대한 결론은 다음과 같다.

1. 산업용 교반기의 Impeller 형상을 역설계기법을 적용하여 형상데이터를 획득한 후, CAD 모델링으로 전환하여 CFD 해석방법에 적용하였다.

2. 본 연구에서 제시한 해석방법을 통해서 다양한 Impeller 형상에 대해서도 별도의 부가적인 작업 없이 적용할 수 있으며, Impeller가 적용된 범용유체기계의 해석방법에도 활용할 수 있을 것이다.

3. 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 있다. 이에 따라 교반기 전체의 유동영역에서는 고른 교반효과를 가지기 어려울 것이라고 생각된다. 교반복작이 유체와 분말가루를 교반하는 경우에는 Rushton Turbine typed의 Impeller 형상이 적합한 해석결과를 보였다.

참고문헌

1. Chapple, D. and Kresta, S., "The Effect of Geometry on the Stability on the of Flow Patterns in Stirred

- "Tanks", Mixing XIV, Santa Barbara, CA, June 20-25, 1993.
2. Winardi, S. and Nagase, Y., "Unstable of Flow in a Mixing Vessel with a Marine Propeller", *of Chemical of Japan*, Vol. 24, No. 2, pp. 243-249, 1991.
 3. A. Bakker, V. D. Akker, H. E. A., "Single-Phase Flow in Stirred Reactors", *Trans. IChemE*, Vol. 72, Part A, pp. 583-593, 1994.
 4. Haam, S., Brodkey, R. S. and Fasano, J. B., "Local Heat Transfer in a Mixing Vessel Using Heat Flux", *Industrial and Engineering Chemistry Research*, Vol. 31, No. 5, pp. 1384-1391, 1993.
 5. A. Bakker, V. D. Akker, H. E. A., "Gas-Liquid Contacting with Axial Impeller", *Trans. IChemE*, Vol. 72, Part A, pp. 573-582, 1994.
 6. Tsurusaki, H. and Urata, T., "A Method for 3-D Study by Digital Image Processing of Pathline Pictures", *The Winter Annual Meeting of the ASME on Flow Visualization*, San Francisco, CA, Dec. 10-15, pp. 95-100, 1989.
 7. 김민주, 김수용, 이승수, 전연찬, "역설계 시스템 적용을 통한 프레스 성형불 검사", *대한기계학회논문집 A권*, 제28권, 제9호, pp. 1276-1283, 2004.



김 동 균

1995년 동아대학교 자원공학과 학사
 1997년 동아대학교 기계공학과 석사
 2001년 동아대학교 기계공학과 박사
 2006년~현재 동명대학교 기계공학과 전임강사
 관심분야: CFD, Data Exchange, CAD/CAM e-Training



배 석 태

1988년 동아대학교 기계공학과 학사
 1990년 동아대학교 기계공학과 석사
 1998년 동아대학교 기계공학과 박사
 2006년~현재 동명대학교 향만물류학부 조교수
 관심분야: CAD/CAM, User Interaction Technique



박 재 현

2000년 동아대학교 기계공학과 학사
 2002년 동아대학교 기계공학과 석사
 2004년 동아대학교 기계공학과 박사수료
 2006년~현재 (재)한국조선기계가연구원 선임연구원
 관심분야: CFD, Optical lens Modeling, API