한국박용기관학회지 제29권, 제1호, pp. 42~48, 2005. 1 (ISSN 1226-9549)
Journal of the Korean Society of Marine Engineers

충돌제트에 의한 덕트내 사각발열체의 냉각특성에 관한 수치해석적 연구

김지훈† · 윤정호** · 김시범*** · 김동균**** · 이치우*****

(원고접수일 : 2004년 9월 13일, 심사완료일 : 2004년 12월 2일)

A Numerical Study on Cooling Characteristics by Impinging Jet at a Square Heating Element with Duct

Ji-Hoon Kim† · Jeong-Ho Yoon** · Si-Boem Kim*** · Dong-Kyun Kim**** · Chi-Woo Lee*****

Abstract : Because Impinging jet has excellent heat & mass transfer characteristics, it has many advantages of cooling, drying, etc and widely applied at industrial fields. Therefore, there have been many experimental investigations and theoretical studies about Impinging jet. The present study is about a cooling characteristic by Impinging jet for a Square Plate on Duct and investigated this characteristic through three-dimensions numerical analysis, using FLUENT. As the result of this study, heat transfer effect is the most appropriate condition when the ratio of distance is 6 between nozzle exit diameter and heat source, diameter of duct is 90mm and height of duct is 60mm. In addition, under the influence of injected jet, stagnant fluid flow into free jet field and this affected the whole flow field. So the shape of duct is a important factor and the researcher confirmed the need of investigation about duct.

Key words : Impinging jet(충돌제트), Turbulent kinetic energy(난류 유동에너지), Duct(덕트)

1. 서 론

산업의 첨단화로 인해 기계요소의 고성능화와 전자 부품의 고집적화가 이루어지며 고온 및 과도한 열유속을 받는 상황이 급격히 증가되고 있다. 그러므로 열적인 과부하로 인한 기계부품의 손상을 방지하고 전반적인 생산시스템의 원활한 작동을 위해 적절한 냉각 시스템이 필수적이다. 여러 냉각방식 중 충돌유동장치는 충돌면에서 상대적으로 높은 열전달효과를 가지고 고온면을 효과적으로 냉각시키기 때문에 전자부품 내부의 반도체 냉각에 많이 적용되고 있다. 충돌제트는 전자기기냉각뿐만 아니라 고온가스터빈이나 강화유리, 금속의 어닐링, 섬유나 종이 또는 필름의 건조 등 산업의 여러 분야에서 광범위하게 응용되어 질 수 있기 때문에 여러 연구자들에 의해 연구가 선행되어

† 책임저자(동아대학교 기계공학과), E-mail : calgarian@hanmail.net, Tel : 017-543-1087
** 동아대학교 기계공학과
*** 동아대학교 기계공학과
**** 동명대학 컴퓨터응용기계과
***** 진주산업대학교 기계공학과

왔다. Florschuetz[1]등은 배열제트의 초기 직교류율의 영향에 의한 열전달특성을 보였고, Down[2]등은 충돌제트에서의 열전달과 물질전달에 관련된 온도, 기하학적 모양, 직교류, 난류 등에 의한 매개변수와의 관계를 요약하였다. Gardon[3]등은 자유제트가 표면에 충돌할 때 제트 출구와 충돌면 사이의 간격에 따라 난류가 열전달에 미치는 영향을 보였다. Gau[4]는 제트의 난류특성을 증대시키기 위한 연구를 하였다. 이상과 같은 기존의 연구들은 주로 제트의 형상에 대하여 연구하여 이를 열전달과 유동특성으로 연관하여 고찰하였다.

이렇듯 충돌제트가 가지는 뛰어난 냉각효과로 계속적인 연구가 이루어지고 있으나, 수치해석적 연구는 그 어려움 때문에 2차원 해석에서 머무르고 있는 실정이다.

본 연구에서는 상용코드인 Fluent를 이용하여 덕트내 충돌제트의 3차원 유동형태와 덕트가 충돌제트에 미치는 영향들을 살펴보았다.

2. 수치해석

2.1 해석모델

Fig.1은 본 연구에서 채택한 전체 형상이다. 덕트의 높이 H는 60mm부터 10mm씩 증감 시키면서 선정하였고, 덕트의 직경 D는 직경 80mm부터 10mm씩 증가시켜서 선정하였다.

Fig. 2는 본 연구에서 선정한 노즐을 나타낸 것이다. 노즐은 대표적으로 circular sharp edge type 과 circular square edge type으로 나뉘어지는데, 일반적으로 circular square edge type노즐이 circular sharp edge type노즐보다 우수한 냉각성능을 발휘하므로, 본 연구에서도 circular square edge type노즐을 채택하였다. 노즐출구에서의 균일한 유동을 얻기 위해서는 노즐 길이가 노즐출구 직경의 8배이상이 되어야한다고[5] 알려져 있기 때문에, 본 연구에서도 노즐출구 직경의 13배인 130mm로 구성하였다.

본 수치해석에서는 CPU를 발열체로 선정하였는데, 일반적인 desktop내에 장착되는 CPU를 모델화하여 가로(mm)×세로(mm)×높이(mm)를 50×50×2로 정하였다. 본 연구에서 선정한 발열체를 Fig. 3에 나타내었다.

Fig. 4는 충돌제트의 유동영역을 도식화한 것이다. 충돌제트의 유동장은 크게 자유제트영역(free jet region), 충돌제트영역(impinging jet region), 벽제트영역(wall jet region)으로 나뉜다. 분사제트 외각에서 주위 정체유체와의 전단류가 형성됨으로써 와류가 형성되고, 하류로 진행하면서 발전되어 그 크기가 커진다. 각 영역에서의 유동은 레이놀즈수와 노즐과 충돌판사이의 거리 및 제트를 형성하기 위한 노즐의 기하학적인 요인들에 의하여 차이를 보이며, 이와 관련하여 전열특성과 유동특성도 달라지게 된다. 선행된 연구에 따르면, 노즐과 충돌판사이의 거리는 노즐의 출구 직경의 6배가될 때, 가장 효율적인 냉각성능의 발휘하였고, 유속은 레이놀즈수가 6000~7000일 때가 가장 적합한 조건이라고 알려져 있다.

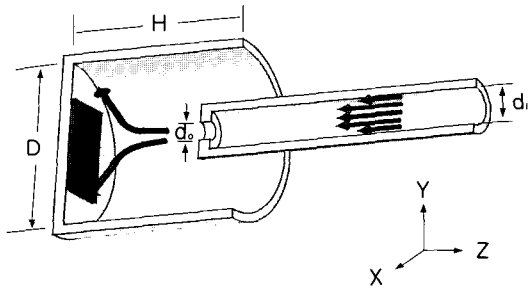


Fig. 1 Schematic diagram of 3-D

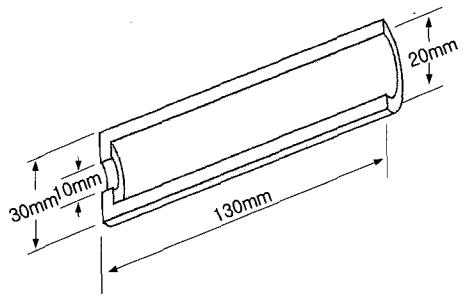


Fig. 2 Cross section of configuration numerical method

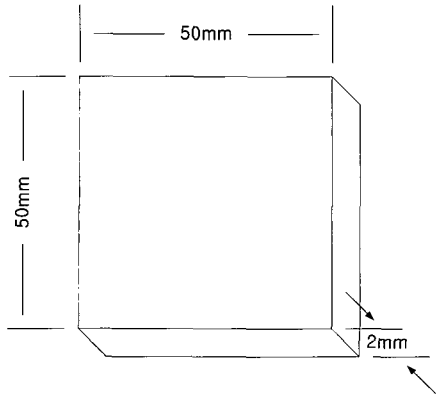


Fig. 3 Scale of impingement plate

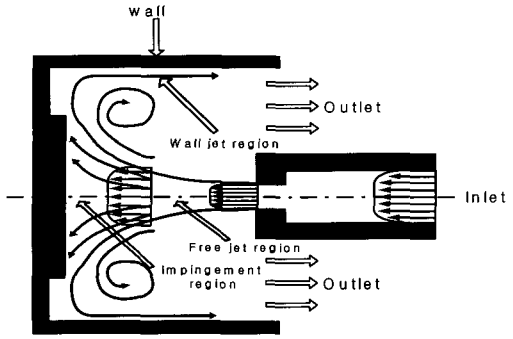


Fig. 4 Flow field of impinging jet (Copied CPU)

2.2 수치해석 방법

본 연구에서 수치해석은 상용코드인 FLUENT를 사용하였다. FLUENT는 오랜기간 동안 널리 사용되어 그 정확성이 충분히 검증되어 있으며 해석대상모델링의 편리함과 수치해석시 가장 중요한 격자생성의 용이성 때문에 선택하였다. 각 벽면에서의 경계조건은 단열경계조건이고, 발열체는 온도를 일정하게 유지시키는것보다 입열열량을 일정하게 공급하는 것이 실제현상에 적합하므로 100W로 정상상태해석을 수행하였다. 계산 수행시 각각의 지배방정식에 관련된 항의 수렴조건은 다음과 같다. 반복계산에서의 수렴조건은 다음과 같다.

$$MAX[Q^m - Q^{m-1}] < 10^{-7}$$

여기서 Q는 지배방정식에서 x, y, z방향의 속도성분, 에너지성분, 운동방정식에서 k와 ε항을 나타내며, m은 반복횟수를 나타낸다. 해의 발산을 막기 위해 지배방정식의 각 항에 적용한 스킴은 압력항에서는 Second order, 운동량방정식에서는 Second order upwind, 압력과 속도항은 SIMPLEC, 에너지방정식은 Second order upwind를 적용하였다. 각 항에 적용한 스킴은 해의 정확도를 높이기 위해 FLUENT에서 제공하는 스킴중 가장 고차스킴을 선택하였다.

3. 결과 및 고찰

노즐의 형상은 앞 절에서 정의한 Circular square edge type nozzle을 선정하였다. 식 (3.1)은 본 논문에서 정의한 레이놀즈 수이다.

$$Re = \frac{u \cdot d}{\nu} \tag{3.1}$$

여기서 u : 노즐의 출구속도

d : 노즐의 출구직경

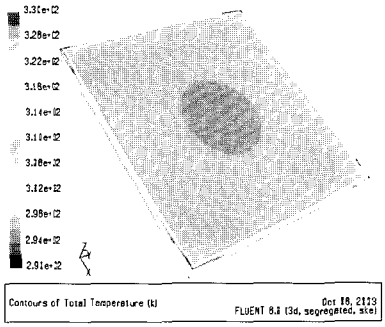
ν : 공기의 동점성계수

수치해석에서 구한 결과에서 전열특성에 관한 고찰은 발열체의 중심점을 원점으로 두고, 제트유동방향을 z축, 횡방향을 x축, 수직방향을 y축으로 두었을 때, x=0인 단면의 온도분포와 CPU를 모사한 충돌판의 온도분포에 대해서 이루어졌다.

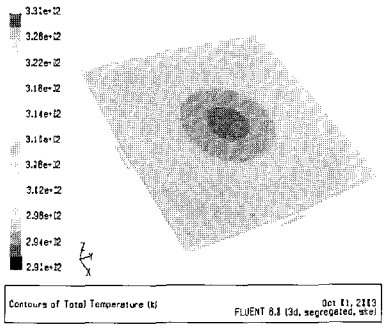
3.1 덕트의 유 · 무에 따른 온도분포 비교

Fig. 5는 사각평판의 충돌제트로 인한 온도분포를 이미지화시킨 것이다. 이미지에서 적색부는 고온을 청색부는 저온을 나타낸다. 덕트가 없는 경우의 CPU를 모사한 칩의 모서리부분의 흰색의 공백 부분은 후처리과정에서 설정한 온도 320(K) 이상의 영역이다.

이미지에서 살펴보면 덕트가 설치된 경우가 덕트가 없는 경우보다 낮은 온도분포를 보이고 있다. 충돌제트의 직접적인 영향을 받는 수직충돌면의 온도경향은 유사한 경향을 보이지만, 덕트가 없는 경우의 칩의 모서리 부분의 온도가 고온이라는 것은 충돌제트가 칩의 모서리부분까지 직접적인 충돌을 일으키지 못함을 의미한다.



(a) Without Duct



(b) With Duct

Fig. 5 Contours of square plate temperature

3.2 유동장 온도해석

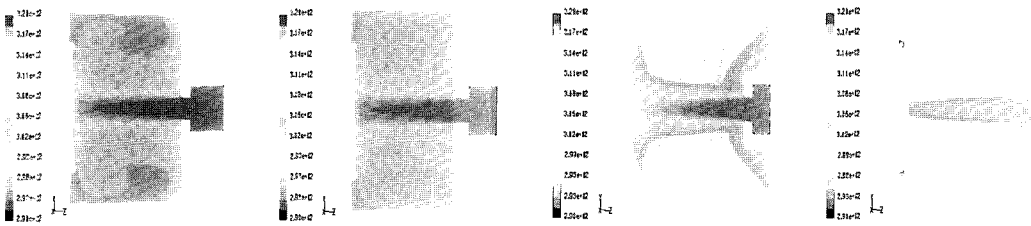
Fig. 6은 덕트직경 80mm일 때, 발열체의 중심점을 0으로 두고, 제트유동방향을 z축, 횡방향을 x축, 수직방향을 y축으로 두었을 때, x=0mm인 단면의 온도분포를 이미지화 시킨 그림이다. 그림에서 고온부는 적색으로 저온부는 청색부로 나타내었다. 덕트 높이가 50mm, 60mm, 80mm 인 경우를 보면, 노즐부근의 온도가 낮게 나타나는데, 이로써 앞 절에서 설명한 바와 같이 분사제트의 영향으로 정체유체가 자유제트영역에 유입되어 전체 유동장에 영향을 미침을 알 수 있다.

3.3 사각평판의 냉각 특성 해석

Fig. 7은 사각평판 전체의 온도분포를 이미지화 하여 나타낸 결과이다. 적색부는 고온을 청색부는 저온을 나타내는데, 분포는 1℃간격의 등온선으로 나타내었다. 덕트높이 50mm인 경우와 60mm인 경우가 덕트높이 80mm인 경우와 100mm인 경우보다 사각평판 중심부에서도 낮은 온도분포를 보이는데, 이는 속도분포에서 살펴보았듯이, 1차적으로 충돌한 제트가 덕트의 외부로 빠져나가다가 자유제트영역에 다시 유입되면서 제트속도에 영향을 미치기 때문으로 판단되어진다. 그리고, 모든 경우에서 사각평판 모서리 부분의 온도가 높게 나타나는데, 이는 충돌제트가 사각평판과 덕트의 거리가 가까운 부분에서 사각평판과 덕트의 거리가 먼 부분으로 유동하기 때문에 1차적으로 충돌한 제트가 사각평판 아래 부분에서 한번 더 충돌하여 2회의 냉각효과를 가져옴을 알 수 있다. 그러나, 덕트의 높이(H)=100인 경우에는 사각평판의 측면에서 모서리부분뿐만 아니라 중앙부분에서도 다소 높은 온도분포를 보이고 있는데, 덕트의 직경(D)이 80mm이고, 덕트의 높이(H)가 100mm인 경우는 원활한 유동이 이루어지지 못하는 조건으로 판단된다.

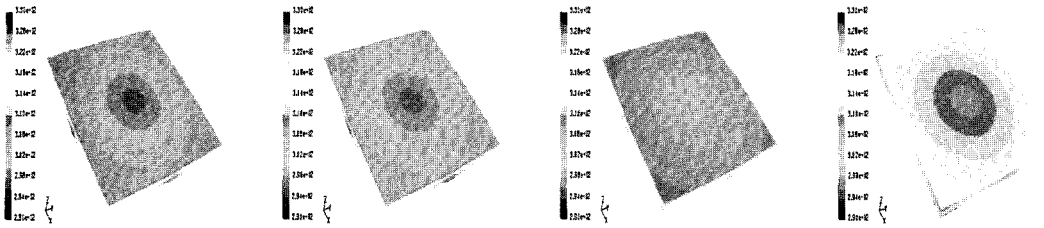
3.4 충돌판표면의 온도경향 그래프

Fig. 8~Fig. 10은 덕트 높이가 50mm, 80mm,



(a)H=50mm (b)H=60mm (c)H=80mm (d)H=100mm

Fig. 6 Contours of temperature various H's and D=80mm at X=0mm



(a)H=50mm (b)H=60mm (c)H=80mm (d)H=100mm

Fig. 7 Contours of square plate temperature for various H's and D=80mm

100mm 일 때, 발열체에서의 가상의 중심선을 따른 표면의 온도 T(℃)를 제트노즐내부의 온도Ti(℃)로 무차원화시킨 온도분포를 나타낸 것이다. Fig. 8에서 살펴보면, 중심부근에서는 덕트직경 80mm일때가 가장 낮으나, 발열체의 끝단으로 갈수록, 온도상승율이 높아져 덕트직경 90mm인 경우의 온도가 더 낮게 나타났다. 이는 덕트직경이 80mm인 경우는, 덕트 직경이 너무 좁아 1차로 충돌했던 제트가 원활히 유동하지 못하여 나타난 결과라 판단되어진다.

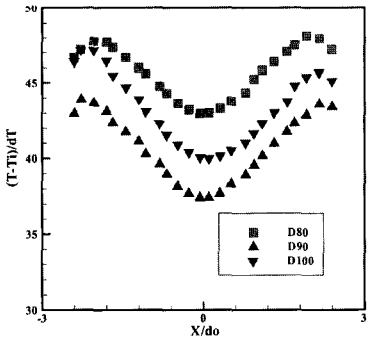


Fig. 8 H=50mm at Y=0mm

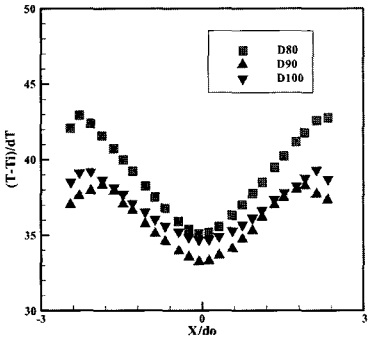


Fig. 9 H=80mm at Y=0mm

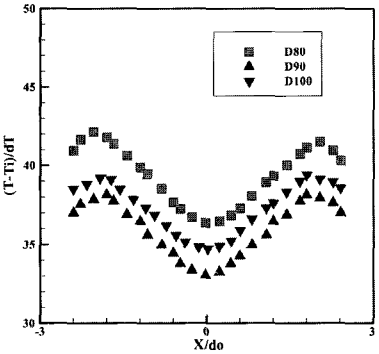


Fig. 10 H=100mm Y=0mm

Fig. 9와 Fig. 10에서도 Fig. 8에서와 같은 온도분포 경향을 보이고 있다. Fig. 8~Fig. 10에서의 결과로써 덕트 높이에 상관없이 가장 냉각 효과가 뛰어난 덕트의 직경은 90mm임을 알수 있다.

덕트의 직경별로 온도경향을 비교해보면, 각 경우에서 덕트의 높이가 60mm일때가 가장 낮은 온도분포를 나타내고 있다. 덕트직경(D)이 80mm, 덕트높이(H)가 100일 때, 월등히 높은 온도분포를 보이는데, 덕트직경이 좁고, 높은 관계로 유동장내에서 원활한 유동이 일어나지 못하기 때문으로 판단되어진다. 따라서 덕트가 설치된 충돌제트의 유동장에서는 덕트의 직경과 덕트의 높이중 어느 하나의 영향만을 받는다기 보다는 두 변수의 복합적인 영향을 받는다고 판단되어진다.

3.5 열전달 고찰

Fig. 11은 덕트의 직경과 덕트의 높이 변화에 따른 국소 Nusselt수의 평균값을 비교하여 나타낸 것이다. 그림을 살펴보면, 사각평판의 온도분

포그래프에서도 살펴보았듯이, 덕트의 직경(D)이 일정할 경우에는 덕트 높이(H)가 60mm일 때, 평균 Nusselt수가 가장 높게 나타났다.

덕트의 직경(D)이 80mm, 덕트의 높이(H)가 100일 경우의 평균 Nusselt수가 여타 경우와 비교했을 때 낮게 분포하는데, 이는 앞 절에서 설명한 유동장에서의 덕트의 영향에 관한 견해와도 일치하는 것이다. 또한, 덕트가 없는 경우의 평균 Nusselt수도 그림에 나타내었다.

덕트가 설치되지 않은 개방된 조건은 덕트의 높이가 높은 경우보다 낮은 경우가 개방면적이 더 넓으므로 덕트 높이가 가장 낮은 50mm인 조건에서 비교해 보는 것이 합당하다. 평균 Nusselt 수를 본 연구에서 제시한 조건 중 덕트의 높이가 가장 낮은 조건인 50mm일때와 비교해 본 결과 덕트가 설치되지 않은 경우보다 덕트가 설치된 경우에 냉각 효율이 뛰어났다.

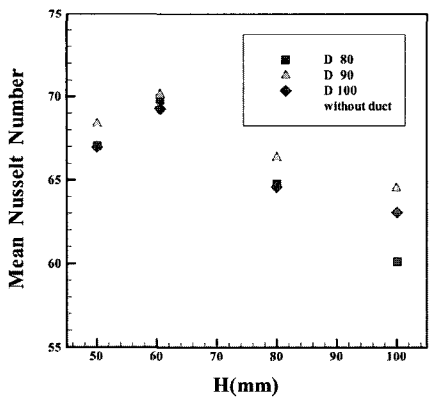


Fig. 11 Mean Nusselt Number Distribution for various D, H

4. 결 론

본 연구에서 원형노즐을 통과하는 완전 발달된 원형 충돌제트(impinging jet)의 덕트의 직경(D=80mm, 90mm, 100mm)과 덕트의 높이(H=50mm, 60mm, 80mm, 100mm)에 따른 영향을 3차원 수치해석으로써 연구하였다. 덕트를 설치함으로써 충돌판 하부에서 2차 와류를 생성시킴으로써 충돌판 하부에서의 2차 냉각효과를 얻어냈다. 상용코드인 Fluent를 사용하여 수치해석결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 덕트는 사각충돌판 모서리 부근에서 충돌제트의 2차와류를 형성시킴으로써 2차냉각 효과를 가지게 해준다.
2. 덕트의 직경이 일정한 경우, 덕트의 높이가 50mm에서 100mm인 조건에서는 덕트의 높이(H)가 60mm 인 경우에 냉각효과가 가장 우수했다.
3. 덕트의 높이가 일정한 경우, 덕트의 직경이 80mm에서 100mm인 조건에서는 덕트의 직경(D)이 90인 경우가 가장 냉각효과가 뛰어났다.
4. 충돌판 표면의 냉각특성을 비교해본 결과, 덕트의 직경(D)이 90mm이고, 덕트의 높이(H)가 60mm인 경우에 가장 높은 냉각효과가 나타났다.

후 기

본 연구는 2004학년도 동아대학교 공모과제지원에 의해서 수행되었음

참고문헌

[1] Florschuetz, et al., "Evaluation of Internal Heat Transfer Coefficients for Impingement Cooled Turbine Airfoils", AIAA Paper No.68-564,AIAA 4th Propulsion Joint Specialist Conference, Cleveland, Ohio, June 10-14, 1984.

[2] Downs, S. J. and James, E.H., "Jet Impingement Heat Transfer-A literature Survey," ASME Paper No.87-H-35, ASME, New York, 1987.

[3] Gardon, R. and Akfirat, J, C., "The Role of Turbulence in determining the heat-transfer charactristics of impingging jet", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 8, pp. 1261-1272, 1963.

[4] C. Gau. W. Y. Sheu and C. H. Shem "Impingement Cooling Flow and Heat Transfer Under Acoustic Excitation." ASME J. Heat Transfer, Vol. 119, pp.810-817, 1997.

[5] 김동균,"전열제어를 위한 충돌제트의 거리비에 따른 열전달 특성에 관한 연구" 한국박용기관학회지, 25(6) 1237-1243, 2000.

저 자 소 개

김지훈 (金志勳)

동아대학원 기계공학과 공학석사
동대학원 기계공학과 공학박사 졸업예정, 동아대학교 생산기술 연구소 선임연구원, 현 동명대학 메카트로닉스과 겸임교수.

윤정호 (尹晶好)

동아대학교 기계공학과 공학사, 동대학원 기계공학과 공학석사과정, 동대학원 기계공학과 공학박사과정, 동아대학교 기계공학과 교육조교, 동아대학교 생산기술연구소 특별연구원

김시범 (金施帆)

서울대학교 공과대학 기계공학과 공학사, 서울대학교 대학원 기계공학과 공학석사, 서울대학교 대학원 기계공학과 공학박사, 일본 東北大學 방문연구원, 공기조화 냉동공학회 부산울산경남지부 부지부장, 공기조화 냉동공학회 부산울산경남지부 감사, 동아대학교 비서실장, 일본 구주국제대학 파견교수, 현 동아대학교 공과대학 기계공학과 교수

김동균 (金東均)

동아대학교 자원공학과 졸업,공학사, 동대학원 기계공학과 공학석사, 동대학원 기계공학과 공학박사, 동아대학교 생산기술연구소 특별연구원, (주)세진 CAD/CAM연구개발실 선임연구원, 한국해양대학교 조선해양기자재 Center 박사후 연구원, 현재 동명대학 컴퓨터응용기계과 전임강사

이치우 (李致雨)

동아대학교 기계공학과 공학사, 동아대학교 기계공학과 공학석사, 동대학원 기계공학과 공학박사, 대우자동차(주) 기술연구소 차량시험실 주임연구원, 마산대학 자동차공학과 부교수, 진주산업대학교 자동차공학과.