

곡관덕트의 입구영역에서 천이정상유동의 유동특성에 관한 연구

박길문* · 봉태근** · 손현철***

A Study on the Flow Characteristics of Developing transitional Steady Flows in the Entrance Region of a Curved Duct

G. M Park* · T. G. Bong** · H. C. Son***

Key words : Transitional Steady Flow(천이정상유동), Critical Dean Number(임계던수), Secondary Flow(2차유동), Entrance Length(입구길이)

Abstract

In this paper, an experimental investigation of characteristics of developing transitional steady flows in a square - sectional 180° curved duct is presented. The experimental study is carried out to measure axial velocity profiles, secondary flow velocity profiles and entrance length by using Laser Doppler Velocimeter (LDV) system. The flow development is found to depend upon Dean number and curvature ratio. Of special interest is the secondary flow generated by centrifugal effects in the plane of the cross - section of the duct. The secondary flows becomes strong from 120° of bended angle of the duct. The entrance length of transitional steady flow is obtained to 120° of bended angle of the duct in this experimental conditions.

기호설명

De : Dean number

$$\left(= Re\sqrt{a/R} = Re\sqrt{\frac{D_h}{2R}} = \sqrt{D_h/2R} \cdot (D_h \cdot \bar{u}_m/\nu) \right)$$

D_h : Hydraulic diameter(= $4ab/(a+b)$)

Le : Entrance length

R_c : Curvature ratio (= $\frac{a}{R} = \frac{D_h}{2R}$)

Re : Reynolds number

u, v, w : Velocity components in x, y and z -axis, respectively

\bar{u}_m : Cross - sectional mean velocity

x' : (= $\nu x/ab \bar{u}_m$)

* 조선대학교 공과대학 기계공학과(원고접수일 : 98년 8월)

** 목포해양대학교 기관공학부

*** 조선대학교 공과대학 대학원 기계공학과

- y' : ($=y/a$)
- z' : ($=z/b$)
- | | : Amplitude of oscillatory velocity
- : Time - averaged value

하 첨 자

- cl : Value of duct center - line
- cr : Critical value
- st : Steady flow
- ta : Time - averaged value

그리스 문자

- ϕ : Deflection angle of duct

1. 서 론

산업이 발달함에 따라서 기계장치에 관련된 각종 관로계도 점차 대형화되고 복잡한 양상을 갖게 되었다. 생산현장의 열기관이나 유체기계 등에는 필연적으로 관로망이 연결되어 있고, 이들 관로망의 설계는 플랜트 전체의 효율뿐만 아니라 안정성과도 밀접한 관계를 갖게 되었다. 유체수송기기, 각종 열교환기, 냉각장치, 화학반응장치, 각종 배관, 환기용 덕트, 유체기계장치 등에 많이 사용되는 곡관덕트의 유체유동은 직관덕트와는 달리 원심력이 작용하게 되어 덕트의 안쪽과 바깥쪽에 압력차가 존재하게 된다. 이 원인으로 인하여 축방향에 수직인 단면내에는 2차유동이 발생하므로 곡관덕트내의 유동은 새로운 유동현상으로 변화된다.

19세기 말 곡관로에서 유체유동이 공학적으로 연구되기 시작하여 1910년에 Eustice^{(1),(2)}, 1927년에 Dean^{(3),(4)}이 곡관덕트유동의 정상유동에 관한 연구를 발표하였고, Ito⁽⁵⁾는 직관과 곡관에 관한 이론 및 실험적연구를 수행하였고, 반경비와 방향변화의 각도가 다른 원형단면의 곡관 10개소의 수두손실을 측정하여 이론식과 비교하였다. 곡관의 입구유동을 다루고 있는 논문으로서, Austin⁽⁶⁾은 곡률반경비(Rc)가 1/6.9~1/24.1의 곡관유동에 대해서 관로 중심축을 포함 수평, 수직단면내의 관축방향 속도를 측정하였고 곡관내 층류유동에 대한 입

구길이로서 $\phi=49\left(\frac{De}{1/Rc}\right)^{1/3}$ 을 제안하였다. Hille⁽⁷⁾ 등은 레이저유속계를 이용하여 Dean수와 굽힘각을 변수로 하여 축방향속도와 2차유동속도를 측정하였다. 천이유동에 관해서는 Ito⁽⁸⁾는 White, Adler, Keulegan 등에 의한 관마찰계수의 측정 및 Taylor에 의한 색소주입 가시화 실험의 결과를 정리하였다.

본 연구에서는 정4각단면을 갖는 180° 곡관덕트의 입구영역에서 LDV시스템을 이용하여 실험을 하였다. 유동영역을 분류하여 임계단수를 결정하였고, 천이정상유동의 축방향 속도분포와 2차유동을 LDV로 측정하였고, 그 실험결과를 비교검토하여 입구길이를 결정하였다.

2. 실 험

2. 1 실험장치

실험장치의 주요부는 180° 곡관덕트, 변속모터에 연결된 스코치-요크형 가진기, 송풍기 등으로 구성되어 있다. 180° 곡관덕트는 아크릴로 제작하였고, 입구측에는 단면의 크기가 40mm×40mm이고 길이가 4000mm인 직관덕트에 곡률반경이 400mm이고 직관덕트와 단면크기가 같은 180° 곡관덕트를 연결한 다음, 출구측에는 입구측과 같은 직관덕트를 연결하였다. 곡관덕트내의 축방향유동과 2차유동을 측정은 LDV를 이용하였는데, 이 LDV 시스템은 최대출력 2W인 Ar-Ion 레이저이고, 광학계의 배치는 2중빔 형식이며 2색 3빔 방식의 후방산란형이다. LDV 시스템을 적재하여 이동할 수 있는 3차원 이송장치가 설치되어 있다.

실험장치의 개략도는 Fig. 1에, 곡관덕트의 좌표

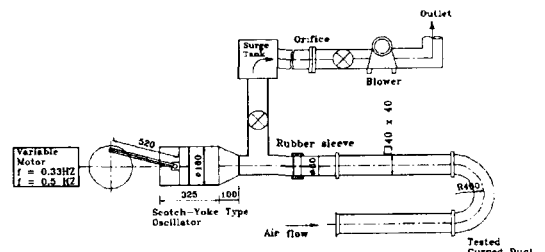


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

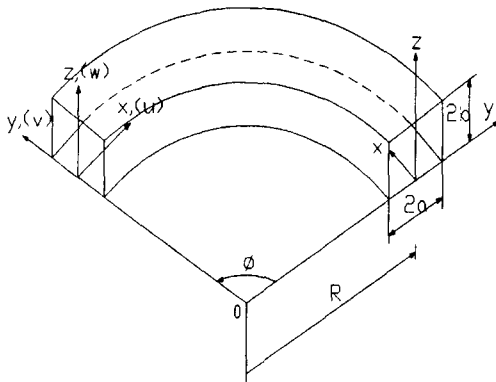


Fig. 2 Coordinate system of the curved duct

계는 Fig. 2에 각각 나타내었다.

2. 2 실험방법

천이정상유동은 송풍기에 의하여 공기를 흡입하여 시험덕트내로 유입하도록 하였고 시험관의 유속조절은 유량제어밸브 또는 송풍기를 구동하는 변속모터의 회전수를 조절함으로써 유속을 변화시켰다. 산란입자로는 입자 크기가 0.1~0.3 μm 인 모기향 연기를 사용하였다.

천이정상유동의 실험범위는 덕트 중심에서 열선으로 나오는 신호가 열선유속계를 지나 광기록계에 기록된 속도파형을 고찰하여 최초의 난류버스트가 발생하는 곳에서 부터 완전한 난류가 형성되는 부근 까지를 천이유동영역으로 규정하고 그 영역에서 실험을 하였다. 본 실험에서는 단수를 460과 530으로 하여 측정하였고, 유량은 오리피스로 측정하여 이로부터 단면평균속도를 구하여 단수를 계산하였다.

측정위치는 180도 곡관을 0°, 30°, 60°, 90°, 120°, 150°, 180° 까지 30° 등간격으로 7 지점을 측정하였다.

곡관덕트내에서 천이정상유동의 유동특성에 대한 유동형태를 정확히 고찰하기 위하여 z' 방향보다는 y' 방향의 속도분포가 곡관의 굽힘 때문에 심한 변화를 보일 것으로 예상되어 z' 방향은 7 지점, y' 방향은 15 지점을 측정하였으며 특히 관벽쪽은 1mm 간격으로 조밀하게 측정하였다.

천이정상유동에 대한 측정값은 LDV를 통하여 얻은 실험값을 시그널 프로세서를 거쳐 PC에서

Table 1. Experimental conditions of transitional steady flow

Angle	De _{st}	Radius of curvature (mm)	Angle	De _{st}	Radius of curvature (mm)
0°	460	400	120°	460	400
	530			530	
30°	460	400	150°	460	400
	530			530	
60°	460	400	180°	460	400
	530			530	
90°	460	400			
	530				

FIND 소프트웨어에 의하여 속도값으로 처리되어 데이터 파일로 정리하여 ORIGIN 프로팅 소프트웨어에 의하여 그렸다.

Table 1은 천이정상유동의 실험조건을 나타낸 것이다.

3. 결과 및 고찰

3. 1 유동영역 분류

천이정상유동의 임계레이놀즈수는 열선유속계의 열선에서 얻어진 순간속도파형에 난류성분이 간헐적으로 나타나기 시작한 순간의 유동속도로부터 계산하였다.

그때의 정상유동의 유량을 오리피스로 측정하여 단면평균속도 ($u_{m, st}$)를 계산하여 다음과 같은 식으로 임계 레이놀즈수와 임계단수를 결정하였다.

$$Re_{st, cr} = \frac{u_{m, st} \cdot D_h}{\nu} \quad (1)$$

$$De_{st, cr} = \sqrt{D_h/2R} \cdot (D_h/2R \cdot u_{m, st})/\nu \quad (2)$$

본 실험에서는 실험범위를 결정하기 위해 곡관덕트의 완전히 발달된 부분이라고 생각되는 지점인 굽힘각(ϕ) 150°의 덕트중심에서 열선유속계로 속도를 측정하여 층류정상유동, 천이정상유동 및 난류정상유동으로 변해가는 속도파형을 광기록계에 기록하여 Fig. 3에 나타내었다.

Dest가 증가할수록 그리고 축방향으로 진행할수록 난류성분이 많이 나타나며 Fig. 3에서 난류성분이 나타나기 시작한 유동의 단면평균속도를 제

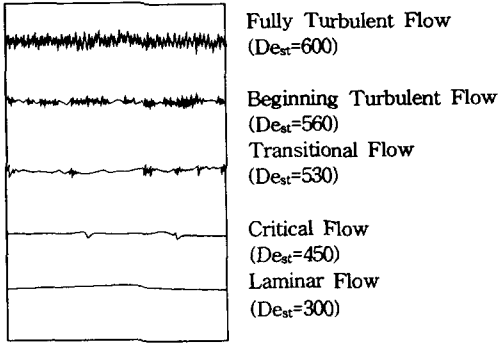


Fig. 3 Waveforms of steady flow in curved duct from hot-wire anemometer

산하여 식 (1)로부터 계산한 덕트내의 층류정상유동에서 천이정상유동으로 변화되는 임계단수는 450 정도였고, 난류정상유동으로 변화되는 임계단수는 560 정도였다. 곡관에서 임계레이놀즈수는 곡관입구에서 어느 정도의 난류성분이 존재하느냐에 따라 크게 영향을 받게된다.

3.2 축방향 속도분포

곡관덕트의 입구영역에서 유체유동이 하류방향으로 진행함에 따라 점성의 영향을 받는 영역과 받지 않는 영역이 존재한다. 입구영역에서 유체가 하류방향으로 진행하면 입구에서부터 경계층이 발달하지만 질량유량은 항상 같아야 하므로 중앙에서의 속도는 증가되는 반면에 벽면근방의 속도는 감소된다. 곡관덕트의 입구 유동영역은 경계층영역과 경계층밖의 영역으로 분류되며 단수가 증가하면서 압력구배와 점성력으로 인하여 유동이 층류유동, 천이유동, 난류유동의 상태로 변한다. 덕트의 모서리효과(corner effect)는 긴 타원형 형식이기 때문에 극소효과만이 존재한다.

Fig. 4는 곡관덕트에서 De_{st} 가 460과 530인 경우에 덕트의 무차원 횡단면 위치인 y' 방향에 따른 축방향 속도분포를 덕트 중심에서의 속도로 나누어 무차원화하여 곡관덕트의 굽힘각(ϕ)을 30° 간격으로 나타낸 것이다. 입구영역을 지나서 최대유속의 위치가 외벽쪽으로 기울기 시작하여 30° 되는 지점에서는 곡관덕트의 외벽쪽으로 갈수록 속도가 점점 증가하고 있고, 내벽쪽의 분포는 덕트 중심의 속도보다 더 작은 값을 나타내고 있음을 알

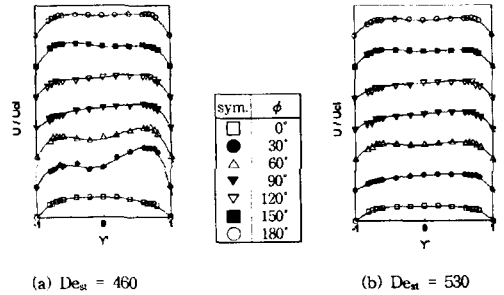


Fig. 4 Axial velocity distributions along axial direction in curved duct for transitional steady flow($z'=0$)

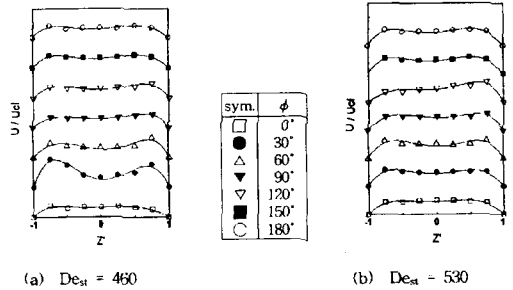


Fig. 5 Axial velocity distributions along axial direction in curved duct for transitional steady flow($y'=0$)

수 있는데 이것은 굽힘의 영향으로 인한 원심력 때문인 것으로 생각된다. Fig. 4(a)는 De_{st} 가 460인 경우인데 입구영역에서 내외벽사이의 속도분포는 변화가 심하다가 입구영역을 지나면서 점차적으로 안정되어 가고 있었고, De_{st} 가 증가한 530인 경우에는 Fig. 4(b)에서와 같이 속도분포의 변화도 점차적으로 작아지는 것을 관찰할 수 있었다.

Fig. 4, Fig. 5의 그림에서, 축방향 속도분포는 상하 양단면에서 극대치를 갖고, 중심부에서 극소로 된다. 유체가 포물선의 속도분포로 곡관에 유입하면 단면의 중심부에서 원심력이 최대가 되고 이것이 유체의 점성마찰이나 압력과 균형을 유지한 축방향 속도분포를 형성한다. 즉 관내 주위 가까이 유체를 내버려두므로 주류 중심부의 유체는 원심력으로 바깥 주위부로 밀리게 되는 결과로 관중앙부에는 주류 자신이 극소치를 갖는 애뉴러형의 속도분포를 갖고 지나쳐가는 현상을 하고 있다. y' 방향의 속도분포는 $\phi \approx 90^\circ$ 에도 지나쳐 가는 현상이 남아 있음을 알 수 있다. z 방향의 속도분

또는 $\phi=90^\circ$ 에서 관중양에서 평탄한 부분이 아주 넓게되어 있다. $\phi=180^\circ$ 가 되면서 유동은 발달을 완료한다.

3.3 2차유동

Fig. 6은 De_{st} 가 460, 530인 경우에 곡관덕트의 굽힘각(ϕ) 30° 간격으로 z 방향에 있어서 천이정상유동의 2차유동의 속도분포를 나타낸 것이다. 굽힘각이 0° 인 경우의 축방향속도의 속도분포가 곡관덕트의 굽힘각이 증가함에 따라서, 최대속도부가 유체의 관성력에 의해서 외벽측으로 이동시켜지기 때문에 2차유동이 발생하게 된다.

또한, 실제 유체의 유동에서는 점성의 작용에 의해 덕트 벽면부근의 유체의 속도는 늦어지게 되고 곡관덕트에서는 각 유체입자에 작용하는 원심력에 대응되는 압력장과 평행상태를 이루지 못하여 덕트 벽면의 유체가 압력이 낮은 방향으로 유동하게 되어 역시 2차유동이 발생하게 된다.

Sugiyama⁹⁾ 등은 2차유동은 굽힘 개시점의 상류에서 생기기 시작하고 $De < 300$ 의 경우에는 굽힘각(ϕ)이 8.2° 부근에서, $De > 300$ 의 경우에는 $\phi = 10^\circ$ 의 단면에서도 이미 확실한 2차유동이 나타나고 있다고 하였다.

$\phi = 0^\circ$ 에서 발생하는 내벽방향으로의 2차유동은 굽힘각이 증가하면서 단면중앙부는 외벽방향으로, 양측 벽근방은 내벽방향으로 향하는 유동이 존재한다. 곡률반경비(Rc) 및 종횡비가 본 실험과는 같지 않지만 본 실험에서도 곡관 덕트의 굽힘각이 0° 인 지점에서 미약하나마 2차유동이 계측되고 있으며 굽힘각이 120° 가 되면 직관덕트로 유입된 유체는 외벽측으로 밀리면서 2차유동이 강하게 된다. 그렇기 때문에 외벽측의 속도구배는 크게 됨을 볼 수 있다. 2차유동은 ϕ 가 0으로부터 증가함에 따라 상하벽면에서 중앙부쪽으로 이동하고 $\phi = 120^\circ$ 부터는 강한 2차유동이 발생하고 점차적으로 ϕ 가 증가함에 와의 중심은 상하벽쪽으로 이동한다.

De_{st} 가 낮은 유동에는 관로의 굽힘의 영향은 약하고 관중심부의 유체를 대칭면에 인접해 내측벽으로부터 외측벽으로 향해 평행으로 유동하고 2차유동의 중심은 점점 반단면중앙부에 위치한다. De_{st} 의 증가에 의한 강한 2차유동은 그 영역을 통

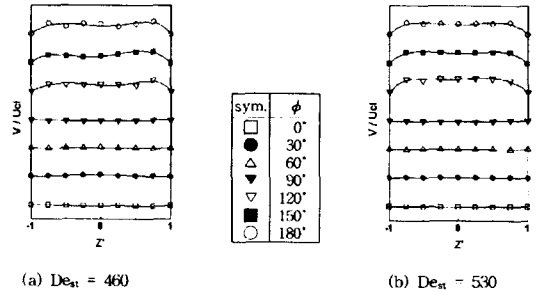


Fig. 6 Secondary flow distributions along axial direction in curved duct for transitional steady flow ($y' = 0$)

해 운동량이 큰 외벽부근의 유체를 내벽측으로 이동하고 z 축상의 2차유동의 속도분포형은 점성작용이 큰 벽부근의 층과 점성작용이 작은 단면중앙부의 영역이 만나는 곳에서 돌출하였다.

3.4 입구길이

곡관덕트의 입구영역에서 천이정상유동은 경계층의 영향을 받는 포텐셜부분과 퍼프(puff)와 슬러그(slug)가 공존하는 부분으로 나뉘어져 있다. 속도파형을 관찰하여 덕트의 중심인 곳에서 최초로 난류가 발생하여 유체가 하류방향으로 진행하면서 속도분포의 변화가 거의 없는 지점까지를 입구길이(Entrance length)로 정의한다.

곡관부가 있는 천이정상유동의 입구길이는 곡관 입구에서 충분히 발달된 유동이 유입되는 경우

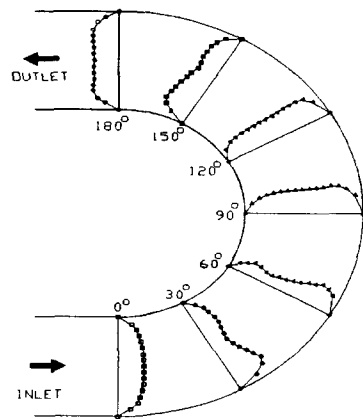


Fig. 7 Variation of axial velocity distributions in a curved duct for transitional steady flow at $De_{st} = 460$

에 있어서 직관에서부터 곡관까지의 마찰계수를 구하고 그 마찰계수의 값이 진동을 반복하면서 발달하여 일정한 값에 가깝게 안정된 정상상태가 된다. 이 안정 정상상태까지의 거리를 입구길이라고 한 경우와 속도분포가 축방향으로 변화하지 않게 되는 위치까지의 곡관개시점에서부터의 거리를 취급하는 경우등이 있는데, 후자의 경우에 비추어 Fig. 7에서 알 수 있듯이 실험범위에서 곡관의 굽힘각이 약 120° 부근에서 더 이상의 속도분포의 변화가 없었다. 이러한 실험결과를 Austin(6)이 제시한 입구길이의 실험식 $\phi = 49 \left(\frac{De}{1/Rc} \right)^{1/3}$ 와 비교한 결과 비교적 잘 일치하고 있었다.

4. 결 론

정4각단면 180° 곡관덕트에서 천이정상유동의 유동특성을 규명하기 위해 실험적연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 정4각단면 곡관덕트의 층류정상유동에서 천이정상유동으로 변화되는 임계단수는 $De_{st,cr} \approx 450$ 정도였고, 천이정상유동에서 난류정상유동으로 변화되는 임계단수는 $De_{st,cr} \approx 560$ 정도였다.
2. 천이정상유동의 축방향 속도분포는 입구로부터 굽힘각(ϕ)이 30° 되는 지점에서부터 최대 유속의 위치가 외벽측으로 이동하기 시작하였고, 중심부의 유체는 원심력으로 바깥 주위부로 밀리게 되어, 관중상부에는 주류 자신이 극소치를 갖는 애뉴러 형의 속도분포를 갖고 지나쳐가는 현상을 고찰 할 수 있었다.
3. 천이정상유동의 2차유동은 ϕ 가 0으로부터 증가함에 따라 상하벽에서 중앙부쪽으로 이동하고, $\phi = 120^\circ$ 부터는 강한 2차유동이 발생하여 점차적으로 ϕ 가 증가함에 와의 중심은 양벽측으로 이동하였다. 2차유동의 속도분포형은 점성작용이 큰 벽 주위의 층과 점성작용이 작은 단면중앙부의 영역이 만나는 곳에서 돌출하여 최대속도가 상하벽의 2개소에 생겼다.
4. 입구길이의 경우, 천이정상유동의 곡관덕트에서는 실험범위에서 120° 부근이었고 Austin

등(6)이 제시한 $\phi = 49 \cdot \left(\frac{De}{1/Rc} \right)^{1/3}$ 에 비교적 잘 일치하였다.

후 기

이 논문은 1997년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었으며, 이에 대하여 감사의 뜻을 표합니다.

참고문헌

- (1) Eustice, J., 1910, "Flow of Water in Curved Pipes", Proc. R. Soc, Ser. A. 84 - 568, pp. 107 - 118.
- (2) Eustice, J., 1911, "Experiments on Stream-line Motion in Curved Pipes", Proc. R. Soc, Ser. A. 84 - 576, pp 119 - 131.
- (3) Dean, W. R., 1927, "Note on the Motion of Fluid in a Curved Pipe", Phil. Mag.S. 7, Vol. 4, No. 20, pp. 208 - 223.
- (4) Dean, W. R., 1928, "The Stream - line Motion of Fluid in a Curved Pipe", Phil Mag. S. 7, Vol. 5, No. 30, pp. 673 - 695.
- (5) Ito, H., 1951, "直管 曲管의 層流理論", 東北大學高速力學 研究報告, 第4卷 第35號, pp. 96 - 102.
- (6) Austin, L. R., and Seader, J. D., 1973, "Fully Developed Viscous Flow in Coiled Circular Pipes", AIChE. J., Vol. 19, No. 1, pp. 85 - 93.
- (7) Hille, P., Vehrenkamp, R., and Schulz-Dubois, E. O., 1985, "The Development and Structure of Primary and Secondary Flow in a Curved Square Duct" J.Fluid Mech, Vol. 151, pp. 219 - 241.
- (8) Ito, H., 1955, "曲リ管の流れに關する理論的ならびに實驗的研究 V", 東北大學高速力學 研究報告, 第12卷 第113號, pp. 27 - 37.
- (9) Sugiyama, S., Yamamoto, M., and Hayashi, T., 1987, "Flows in a Curved Rectangular Channel(2nd Report)", 日本機械學會論文集 (B編), 53卷 487號, pp. 751 - 755.

저 자 소 개



박길문(朴吉文)

1946년 3월생, 1974년 조선대학교 공과대 기계공학과 졸업. 1977년 고려대학교 대학원 기계공학과 졸업(석사), 1987년 동 대학원 기계공학과 졸업(박사), 1977년~현재 조선대학교 기계공학과 교수



봉태근(奉泰根)

1956년 3월생, 1978년 목포해양고등전문학교 기관과 졸업, 1989년 조선대학교 대학원 기계공학과 졸업(석사), 1997년 동 대학원 기계공학과 졸업(박사), 1982년~현재 목포해양대학교 기관공학부 조교수.



손현철(孫炫澈)

1965년 9월생, 1990년 금오공과대학교 기계공학과 졸업. 94년 동 대학원 졸업(석사), 현재 조선대학교 대학원 기계공학과 박사과정 재학중.