

## PIV를 이용한 직렬배열에서 2원주 주위의 유동장 특성 연구

노기덕\* · 김광석\*\* · 박지태\*\* · 오세경†

(원고접수일 : 2006년 10월 23일, 심사완료일 : 2007년 3월 15일)

### The Characteristic Investigation of the Flowfield around Two Circular Cylinders in the Tandem Arrangement Using the PIV

Ki-Deok Ro\* · Kwang-Seok Kim\*\* · Ji-Tae Park\*\* · Se-Kyung Oh†

**Abstract** : The Characteristics of the flowfield around two circular cylinders in tandem arrangement was investigated by PIV. Strouhal numbers, velocity vectors and velocity profiles were observed at centre-to-centre space ratios of  $P/D=1.5, 2.0$  and  $2.5$ , and Reynolds number of  $Re=3.0 \times 10^3 \sim 5.0 \times 10^3$ . As the results the Strouhal numbers measured in the rear region of the cylinder of wake side were decreased with the space ratios. The flow between two cylinders was almost stagnated and the size of the stagnated region was larger in the close side than in the far side of the front cylinder. The direction of vortex between two cylinders was opposed each other with the small difference ( $\alpha = \pm 1.0^\circ$ ) of the attack angle  $\alpha$ .

**Key words** : Fluid mechanics(유체역학), Flow visualization(유동 가시화), PIV(입자영상유속계), Unsteady flow(비정상 유동), Two circular cylinder(2원주), Flow interference(유동 간섭)

#### 1. 서 론

2원주로 대표되는 유동장은 원자로 등 열교환기 내의 관다발, 잠수함의 흡·배기관, 공장지대의 굴뚝, 강물 속에 설치된 다리교각 등 수없이 많다. 2원주가 서로 충분히 멀리 떨어져 있을 때는 그 주위의 흐름이 단독 원주와 유사하나, 근접해 있을 때는 전혀 다른 형태의 흐름을 보인다.

2원주의 간섭에 관한 연구는 그 배치형태에 따라

3가지로 대별<sup>(1)</sup>되며 흐름에 나란한 형태의 직렬배열(tandem arrangement), 흐름에 수직인 병렬배열(side by side arrangement), 그 외 임의의 받음각을 갖는 엇갈림배열(staggered arrangement)이 그것이다. 2원주에 관한 종래 연구를 연구기법으로 대별해 보면, 양·항력측정, 압력분포측정, 와 방출 주파수 측정 및 유동장의 가시화 등으로 나눌 수 있다. 여기서 흐름에 나란한 직렬배열이 2원주의 가장 대표적인 배치형태이

† 교신저자(경상대학교 기계항공공학부·농생명과학연구원), E-mail : ohsek@gaechuk.gsnu.ac.kr, Tel : (055)640-3127

\* 경상대학교 기계항공공학부·해양산업연구소

\*\* 경상대학교 대학원 기계시스템공학과

며, 이에 관한 주요 연구결과를 살펴보면 다음과 같다. 먼저 양·항력에 관한 연구를 보면 Pannell 등<sup>(2)</sup>은 2원주 중심간의 수평 간격비  $P/D=1.0\sim 6.0$ 의 범위에서 직렬배열인 2원주의 조합항력을 측정했는데, 어느 간격비에 있어서도 조합항력은 단독원주 항력의 2배보다 작게 나타났고, 2원주가 접촉해 있는 상태에서 최소항력은 단독 원주의 40%정도 지나지 않았다. 또한 간격비  $P/D=1\sim 2, 2\sim 3, 3\sim 4$ 로 증가함에 따라 조합항력은 급속히 증가한 반면 4~6에서의 증가는 매우 작았음을 나타냈다.

Biermann 등<sup>(3)</sup>은 직렬배열 2원주의 간격비의 범위를  $P/D=1.0\sim 9.0$ 으로 넓힘과 동시에 각각의 원주에 대해 항력을 측정했다. 여기서 그들은 원주간의 간섭의 효과를 명확하게 나타내기 위해 소위 간섭항력계수를 도입하였는데 이는 2원주의 각 원주에 작용하는 항력계수와 같은 레이놀즈 수에서 단독 원주의 항력계수의 차로서 정의된다. 상, 하류측 각 원주에 작용하는 간섭항력계수는 -이고, 간격비에 따라 감소했다가 증가하는 변곡점(kink)을 가지며,  $P/D=4.0$  이상에서는 거의 일정함을 보였다.

노 등<sup>(4)</sup>은 비교적 작은 수평 간격비  $P/D=1.25\sim 2.5$ 의 범위에서 간격비에 따른 간섭 양·항력계수의 시간변화를 측정하였는데 그 결과를 요약하면 다음과 같다. 2원주 양력계수의 진동은 수평 간격비 1.25의 경우 동시성, 동위상, 동진폭을 가지나, 2.5의 경우 서로 역위상이며, 상류측 원주의 진폭이 상대적으로 매우 작다. 또한 2원주 간섭항력계수는 간격비 1.25의 경우 양자 모두 진동하고 있으나, 2.5의 경우 하류측 원주만 진동한다.

유동장 가시화에 관한 연구를 보면 Zdravkovich<sup>(5)</sup>는 2원주의 후류를 연기로 가시화하여 하류측 원주의 뒤쪽에 항상 하나의 볼텍스 열이 존재하며, 수평간격비가 클 경우는 상류측 원주의 뒤쪽에도 볼텍스 열이 생성됨을 밝혔으며, Ishigai 등<sup>(6)</sup>은 간격비 변화에 따른 2원주 주위의 흐름패턴을 슈리렌법으로 가시화했고, 수평 간격비에 따라 흐름패턴이 변화함을 밝혔다.

최근 노 등<sup>(7)</sup>은 2원주 주위의 흐름패턴을 수소기

포법에 의한 가시화실험과 이산화법에 의한 수치계산을 병행하여 조사하였고, 수평 간격비가 1.5인 경우 하류측 원주에만, 2.5인 경우는 상, 하류측 원주 모두 후류측에 칼만와를 형성하며, 하류측 원주의 와발생 주파수는 간격비가 작은 쪽이 작으며, 2원주 사이의 흐름은 거의 정체되어 있음을 나타냈다.

유동장의 가시화는 유동장을 직접 눈으로 확인할 수 있어 가장 기초적인 연구라 할 수 있으나, 상술한 바와 같이 2원주 주위의 유동장 가시화에 관한 연구는 주로 실험에 의존하고 있고, 실험기법 역시 연기선법, 슈리렌법 또는 수소기포법에 의존하고 있어 정량적인 결과를 볼 수 없다. 따라서 본 연구에서는 최신의 가시화 기법인 PIV(Particle Image Velocimetry)를 이용하여, 비교적 수평간격비가 작은 직렬 배열상태에 있는 2원주 주위의 유동장 특성을 정량적으로 파악하고자 한다.

## 2. 실험 장치 및 방법

### 2.1 2원주의 모델 및 구조

먼저 직렬배열 상태에 놓은 2원주의 실험모델을 Fig. 1에 나타낸다.

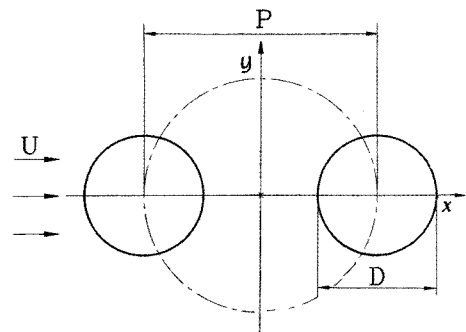


Fig. 1 Model of two cylinders in the tandem arrangement

Fig. 1에서 일정류  $U$  중에 직경  $D$ 인 한 쌍의 원주가 원주 중심간 간격  $P$ 를 유지하면서 일정류와 나란하게 놓여 있다. 실험은 실험모델에서와 같은 2원주를 제작하여 일정류가 흐르는 회류수조<sup>(4)</sup>의 수로 내에 장착하고, 간격비  $P/D$  및 레이놀즈

수를 변화시켜가며 행하였다. 레이놀즈 수 산정 시 대표길이는 원주의 직경 D로 했으며, 일정류 U를 조정하여 레이놀즈 수를 변화시켰다.

다음으로 본 실험에 사용한 2원주의 구조를 Fig. 2에 나타낸다.

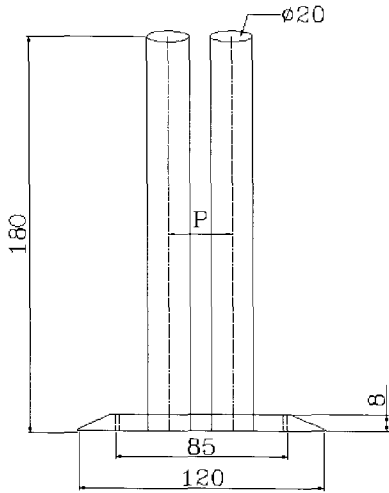


Fig. 2 Structure of two cylinders (unit : mm)

각 원주는 직경 20mm의 투명한 아크릴관을 길이 185mm로 잘라 만들었다. 원주를 고정시키기 위한 고정판은 직경 120mm, 두께 8mm의 목판으로 만들었으며 흐름에 영향을 주지 않도록 그림에서와 같이 가장자리를 그라인더로 갈아 경사를 주었다. 또한 고정판은 두께 2mm의 아크릴 밑판에 나사못으로 고정 시켰으며, 실험 시 추적입자가 잘 보이도록 2원주 모델의 고정판 및 밑판을 검정색 도료로 칠했다. 이때 2원주의 모델은 각 원주의 중심에서 중심까지의 간격비 P/D가 1.5, 2.0, 2.5인 3종류를 만들었다.

2.2 PIV 계측

Fig. 3에 PIV 계측을 위한 실험장치의 개략도를 나타낸다.

그림에서와 같이 2원주의 모델을 회류수조의 수로 내에 설치하고 회류수조 밖에서 일정류와 수직, 수평방향으로 연속광 레이저에 의한 시트(sheet) 상의 조명광을 비추고 2원주의 상부에서 수직하방으로 고속도 카메라로 유동장을 촬영했다. 이때 추적입자로는 평균직경이 100 $\mu$ m이고, 비중이 1.02인 구형의 PVC(Poly Vinyl Chloride)를 사용했다.

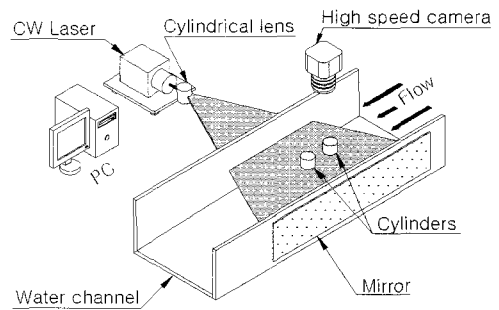


Fig. 3 Schematic structure of experimental device

Table 1 Main specification of PIV system

Item	Specification
Image board	Fast Cam-X panel link board drive
Light source	8W continuous wave laser
Sheet light	Cylindrical lens: $\varnothing 3.8 \times 11.4$ mm
Resolution	1280 $\times$ 512pixel
Software	CACTUS 3.2
Error vector(%)	Average: about 0.1%

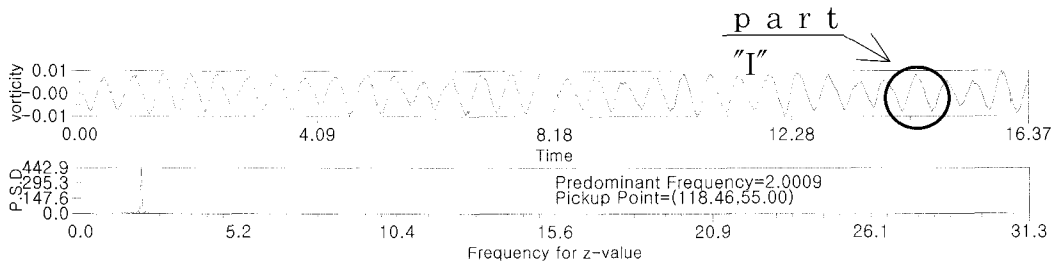


Fig. 4 Spectral analysis of vorticity

고속카메라는 PHOTRON사의 FASTCAM 1280 PCI 모델을, 레이저는 JENOPTIK사의 JenlasD 2.8 모델을 사용했으며 본 실험에 사용한 PIV시스템의 주요규격은 Table 1과 같다.

### 3. 실험결과 및 고찰

Fig. 4에 직렬배열에서 수평간격비  $P/D=2.0$ , 레이놀즈 수  $Re=4.0 \times 10^3$ 에서의 와도 스펙트럼을 나타낸다. 이때 연속촬영시간은 16.37초이며, 고속도 카메라의 시간 간격을 1/62.5초로 설정하여 1024프레임의 화상을 얻었다. 와도변화의 측정 위치는 후류측 원주의 중심에서 후류방향으로 3.0D 떨어진 곳이며, 그 이유는 이곳에서 칼만와의 주기성이 가장 명확하게 측정되었기 때문이다. 그림에 나타난 바와 같이 와도변화를 미루어 보아 칼만와는 주기적으로 발생하고 있음을 알 수 있고, 이때 그 대표주파수(predominant frequency)는 Fig. 4의 하단 그림에 나타난 바와 같이 2.0이었다.

Fig. 5는 Fig. 4의 "I" 부분을 확대한 그림으로 그림에서 A~E 점은 와도변화의 1주기를 4등분한 점을 나타낸다.

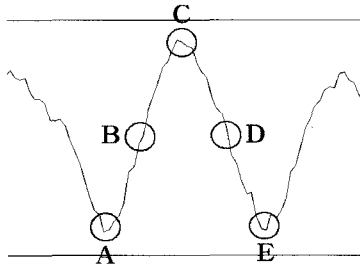
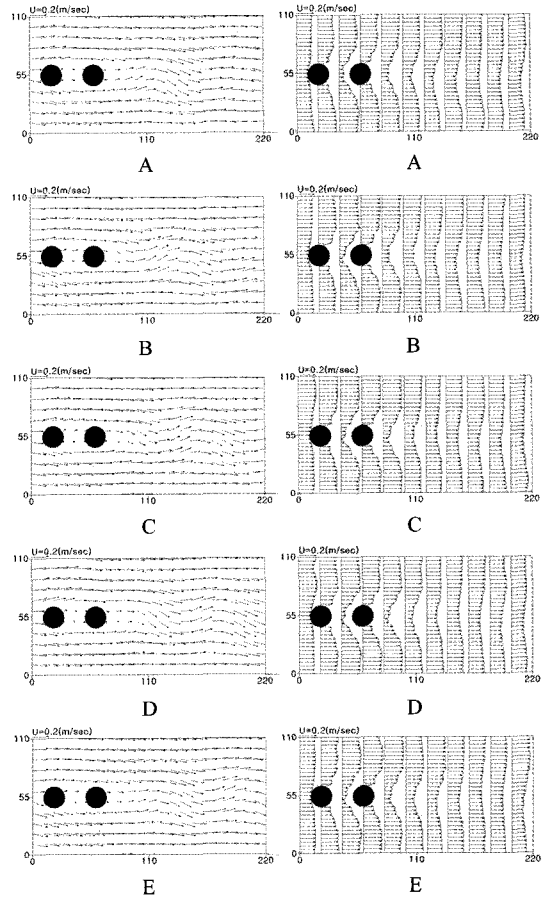


Fig. 5 The enlargement of part "I" in the Fig. 4

Fig. 6은 Fig. 5의 A ~ E 점에서의 순간 속도벡터 및 속도분포를 나타낸다. Fig. 6에서 가로, 세로축의 좌표 단위는 mm이며, 이때 각 원주의 직경은 20mm이다.

Fig. 6(a)에서 와도변화의 측정점(118, 55)을 기준으로 해서 속도벡터를 관찰해보면 A와 E는 같은 방향, B와 D는 서로 반대방향의 속도벡터가 존

재하여 후류패턴의 주기성을 잘 보여주고 있다. 또한 Fig. 6(b)의 속도분포를 살펴보면 그 패턴의 주기성은 명확하지 않으나 2원주 근방에서의 속도 경계층은 명확하게 구분되며, 후류측 원주의 후방으로 멀리 떨어질수록 속도분포는 일정하여 상류측에서와 같은 균일유동을 회복하고 있음을 보여주고 있다.



(a) velocity vectors (b) velocity profiles

Fig. 6 Flow pattern around two cylinders for one cycle ( $P/D=2.0$ ,  $Re=4.0 \times 10^3$ , unit : mm, A~E on the figure correspond to those points on Fig. 5)

Fig. 7에 수평 간격비  $P/D=1.5, 2.0, 2.5$ 에 있어 레이놀즈 수 변화에 따른 Strouhal 수( $f \times D/U$ ) 변화를 나타낸다.

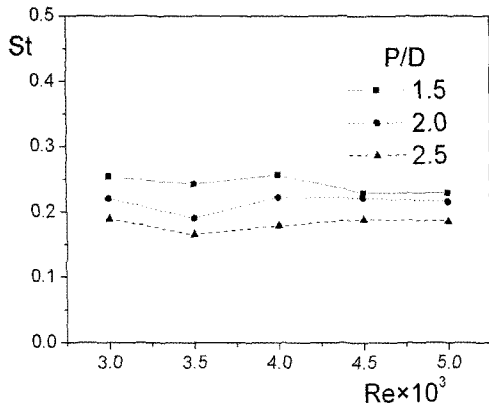


Fig. 7 Strouhal number with Reynolds number

이때 주파수 측정점은 Fig. 4에서와 마찬가지로 후류측 원주 중심에서 후류방향으로 3D 떨어진 곳이다. 각 간격비에 있어 레이놀즈 수 변화에 따른 Strouhal 수 변화는 거의 나타나지 않고 있다. 하지만 간격비에 따라서는 그 변화가 명확하며, 간격비가 클수록 모든 레이놀즈 수에서 Strouhal 수가 작다.

Fig. 8에 수평 간격비  $P/D=2.0$ 에서 2원주 사이의 시간평균 속도벡터 및 속도분포를 나타낸다. Fig. 8(a)의 속도벡터를 살펴보면 2원주 사이의 유속은 일정류와 비교하여 거의 정체상태에 있음을

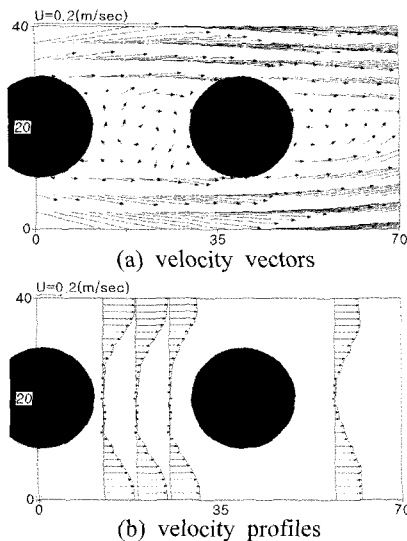


Fig. 8 Average flow patterns between two cylinders( $P/D=2.0$ ,  $Re=4.0 \times 10^3$ , unit : mm)

알 수 있다. 그 곳의 일정류와 수직인 속도분포 Fig. 8(b)를 보면 그 정체역역의 크기가 상류측 원주에 가까울수록 크게 나타나고 있다. 후류측 원주의 후방에서도 정체영역 즉 사수영역이 존재하나 2원주 사이에서보다 그 영역의 작다.

Fig. 9에 Fig. 8과 같은 조건에서 영각( $\alpha$ )을 미세하게 변화( $\alpha = \pm 1.0^\circ$ )시킨 경우 시간평균 속도벡터를 나타낸다.

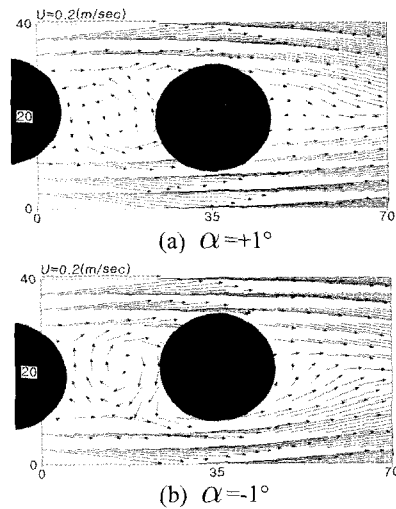


Fig. 9 Average velocity vectors between two cylinders with small attack angle  $\alpha$  ( $P/D=2.0$ ,  $Re=4.0 \times 10^3$ , unit : mm)

여기서 영각 $\alpha$ 란 2원주의 중심선이 일정류와 이루는 각도를 말한다. Fig. 9(a)  $\alpha = +1^\circ$ 인 경우 2원주 사이의 속도벡터를 살펴보면 그곳에는 반시계방향의 볼텍스가 존재함을 볼 수 있고, 반면에 Fig. 9(b)  $\alpha = -1^\circ$ 인 경우에는 시계방향의 볼텍스가 생성되어 있다. 그러나 속도벡터의 크기를 일정류와 비교해 보면 두 경우 모두 아주 약한 볼텍스임을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구는 직렬배열(tandem Arrangement) 상태에 놓인 2원주 주위의 유동장 특성을 PIV를

이용하여 파악한 것이다. 실험은 레이놀즈수  $Re=3.0 \times 10^3 \sim 5.0 \times 10^3$  범위 내에서 수평간격비 (P/D)를 세가지(P/D=1.5, 2.0 및 2.5)로 변화 시켜가며 행하였다. 각각의 실험 파라미터에서 Strouhal 수, 속도벡터 및 속도분포를 측정하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 하류측 원주의 후방에서 측정된 Strouhal 수는 수평 간격비가 클수록 작게 나타났다.

(2) 2원주 사이의 흐름은 거의 정체되어 있으며, 상류측 원주에 가까울수록 정체 범위가 크게 나타났다.

(3) 직렬배열에서 일정류와 2원주의 중심선이 이루는 영각( $\alpha$ )의 미소 변화( $\alpha = \pm 1.0^\circ$ )에 따라 2원주 사이에는 서로 반대 방향의 볼텍스가 생성되었다.

## 후 기

이 논문은 2006년도 경남전력산업기획단에서 시행한 지역산업진흥사업 지역특화기술개발사업 및 지방대학혁신역량강화사업에 의하여 지원되었음.

## 참고문헌

- [1] Zdravkovich, M. M., "Review of Flow Interference Between Two Cylinders in Various Arrangements," Trans. of ASME, Journal of Fluid Engineering, Vol. 99, pp. 618-633, 1997.
- [2] Pannell, J. R., Griffiths, E. A., and Coales, J. D., "Experiments on the Interference between Pairs of Aeroplane Wires of Circular and Lenticular Cross Section," (British) Advisory Committee for Aeronautics, Reports and Memoranda No. 208, Annual Reports for 1915-1916, Vol. 7, pp. 219-221, 1915.
- [3] Biermann, D., and Herrnstein, W. H., Jr., "The Interference between Struts in Various Combinations," National

Advisory Committee for Aeronautics, Tech. Rep. 468, 1933.

- [4] G.R.S. Assi, J.R. Meneghini, J.A.P. Aranha, P.W. Bearman, and E. Casaprima, "Experimental investigation of flow-induced vibration interference between two circular cylinders", Journal of Fluids and Structures, Vol.22, pp. 819-827, 2006.
- [5] Zdravkovich, M. M., "Smoke Observations of Wakes of Tandem Cylinders at Low Reynolds Number," The Aeronautical journal, Vol. 76, pp.108-114, 1972.
- [6] Ishigai, S., Nishikawa, E., Nishimura, K., and Cho, K., "Experimental Study on Structure of Gas Flow in Tube Banks with Tube Axes Normal to Flow (Part 1. Karman Vortex Flow around two Tubes at Various Spacings)," Bulletin of the Japan Society Mechanical Engineers, Vol. 15, No. 86, pp. 949-956, 1972.
- [7] 노기덕, 박지태, 강호근, "이산와법에 의한 다양한 배열에서 2원주 주위의 유동장 계산", 한국박용기관학회지, Vol. 27, No. 3, pp. 365-372, 2003.

## 저 자 소 개



### 노기덕(盧基德)

1953년 6월생, 1977년 부산수산대학 기관공학과 졸업(학사), 1986년 Kobe Univ. 대학원 기계공학과 졸업(석사), 1989년 Kobe Univ. 대학원 기계공학과 졸업(박사), 현재 경상대학교 기계항공공학부 교수



### 김광석(金光石)

1980년 11월생, 2006년 경상대학교 기계항공공학부 졸업(학사), 현재 경상대학교 대학원 기계시스템공학과 석사과정 재학 중



**박지태(朴知泰)**

1970년 10월생, 1999년 경상대학교 기관공학과 졸업(학사), 2001년 경상대학교 대학원 기관공학과 졸업(석사), 현재 경상대학교 대학원 기계시스템공학과 박사과정 재학 중



**오세경(吳世鏡)**

1948년 3월생, 1973년 부산수산대학 기관공학과 졸업(학사), 1988년 부경대학교 대학원 기관공학과 졸업(석사), 2000년 부경대학교 대학원 기관공학과 졸업(박사), 현재 경상대학교 기계항공공학부 교수