

PIV를 이용한 정렬 및 엇갈림 배열을 가진 관군을 지나는 유동장의 가시화

노기덕† · 박지태* · 변용수**

(원고접수일 : 2008년 8월 7일, 원고수정일 : 2008년 11월 13일, 심사완료일 : 2008년 11월 21일)

The Visualization of the Flowfield through Tube Banks with In-line and Staggered Arrangements Using the PIV

Ki-Deok Ro† · Ji-Tae Park** · Yong-Sue Byun**

Abstract : The Characteristics of the flowfield through tube banks with in-line and staggered arrangements were investigated by PIV. Strouhal numbers, velocity vectors and velocity profiles around the cylinders with in-line and staggered arrangements were observed at the pitch ratio $Pt/D=2.0$ and Reynolds number of $Re=4.0 \times 10^3$. As the results The flow patterns through tube banks were almost a straight line in case of the in-line arrangement while it was almost \wedge type in case of the staggered arrangement in the direction of the wake. The average velocity in the rear region of the tube banks with the staggered arrangement was far smaller than that with the in-line arrangement. The Strouhal number in the last rank was far smaller than that in the front ranks in both of the in-line and staggered arrangements. The wake of each cylinder changed with time and with the position of the cylinder.

Key words : Fluid mechanics(유체역학), Flow visualization(유동의 가시화), PIV(입자영상유속계), Unsteady flow(비정상 유동), Tube banks(관군), Separated shear layer(박리 전단층)

1. 서 론

열교환기에서 가장 널리 사용되고 있는 원통다관식(Shell and tube type)은 구조가 간단하고 설치비용이 적으며 고압에도 견딜 수 있는 장점이 있다. 그래서 이 형식의 열교환기는 핵반응로, 보일러

및 각종 산업용 열교환기에 가장 널리 사용되고 있다. 최근 과학기술의 발달과 함께 열교환기의 고성능화, 경량화, 콤팩트(Compact)화가 절실히 요구되고 있으며, 이를 위해서 열전달에 중요한 영향을 미치는 관군을 지나는 유동특성이 중요한 연구 과제가 되고 있다.

† 교신저자(경상대학교 기계항공공학부 · 해양산업연구소, E-mail : rokid@gachuk.gsnu.ac.kr, Tel : 055)640-3123

* 경상대학교 대학원 기계시스템공학과

** 범한산업(주) 연구개발부

직교 유동장에 놓인 관군에 관한 연구는 관군 전체의 압력손실 및 평균열전달율의 연구로부터 시작되었다. 1933년에 Colburn⁽¹⁾은 관군의 최소단면부를 통과하는 최대속도를 기준으로 한 레이놀즈 수 Re_{max} 의 개념을 처음으로 도입하고, 이전의 열전달 연구자료를 기초로 하여 엇갈림 관군배열에 대해 간격비의 효과를 포함한 상관방정식을 최초로 제시했다. Bergelin 등^{(2),(3)}이 비교적 낮은 레이놀즈 수에서 평균 열전달율과 압력손실에 관한 배열과 간격비의 영향을 상당히 체계적으로 연구한 결과를 발표 하였다. 이들은 Colburn에 의해 도입된 Re_{max} 의 개념이 매우 타당하다는 것을 확인했으나, 레이놀즈 수 1000 이상에서 열전달특성의 현저한 변화를 잘 설명하지 못했다. 근년에는 유동장을 보다 구조적으로 파악하기 위해 국소 유동특성 및 국소 열전달현상의 연구가 중요하게 되었다. 다수열로 이루어진 엇갈림 관군배열에 대한 연구로는 Zhukauskas 등^{(4),(5)}이 저항측정 실험을 행하였고, Poshkas 등⁽⁶⁾은 2×10^5 에서 2×10^6 의 레이놀즈 수 범위에서 관군이 받는 항력에 대하여 실험결과를 발표하였다. 이들은 주로 관표면의 압력분포 등에 의해 국소열전달 현상을 설명하고 있다. 그러나 압력분포는 주류속도의 가속과 감속만을 알려주기 때문에 국소 열전달현상을 완전히 설명하기에는 부족했다. Nishikawa 등⁽⁷⁾의 유동형태에 관한 연구와 Aiba 등^{(8),(9)}의 열전달에 관한 연구에서는 열선풍속계에 의한 난류강도의 측정실험을 수행하였다. 그러나 관군에서의 관 주위의 박리유동 영역은 고난류장을 형성하기 때문에 열선의 측정 한계에 의해 데이터의 정량적인 값은 신뢰도가 떨어진다. Umeda 등⁽¹⁰⁾은 LDV(Laser Doppler Velocimetry)계측 기법에 의해 다양한 관군 배열에서의 유동장 측정 실험을 하여 정렬배열과는 달리 엇갈림 배열에서는 von Karma vortices와 'X'자 형상의 주류가 상호작용을 하여 복잡한 유동장을 형성한다고 발표하였다. 최근에는 Suzuki 등⁽¹¹⁾이 PIV 계측방법을 통하여 관군내의 유동장 해석을 행하였다. 하지만 부분적인 관열 사이의 유동을 측정함으로써 유동이 시간과 관열을 따라서 변하는 현상을 설명하기에는 부족한 면이 있다.

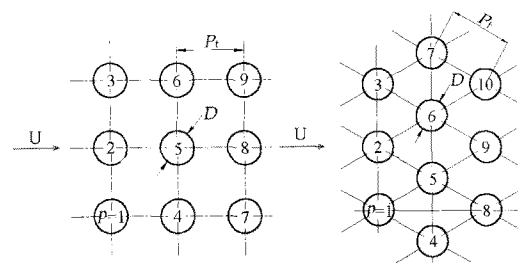
상술한 바와 같이 관군에 있어 평균 및 국소유동 연구결과에서는 유로 내의 높은 난류강도로 인해 측정상의 어려움 있고, 실험 데이터 역시 신뢰도가 떨어지며, 점측정 기법으로는 공간적인 해상도가 미흡하다. 한편 원통다관식 열교환기의 성능향상을 위하여 열교환기의 단위체적당 전열량을 크게 해야 하며, 이를 위해서는 관군의 배열양식에 따른 유동 특성 파악이 무엇보다 중요하다.

따라서 본 연구에서는 관군 주위의 유동장에 대한 신뢰도와 공간 해상도를 높일 수 있는 PIV기법을 이용하여 가장 기본적인 관군배열인 정렬배열과 엇갈림배열에 대해 속도벡터, 속도분포 및 스트로할 수(Strouhal number)를 명확히 파악하여 고성능 열교환기 설계에 기초자료를 제공하고자 한다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 관군의 모델 및 구조

먼저 정렬배열 및 엇갈림배열 상태에 놓인 관군의 실험모델을 Fig. 1에 나타낸다.



(a) In-line arrangement (b) Staggered arrangement

Fig. 1 Experimental model

먼저 Fig. 1(a)는 정렬배열로 일정류 U 중에 직경 D인 원주가 원주 중심간 간격 P_t 를 유지하면서 서로 이웃하며 놓여 있는 원주 중심간을 이은 선이 직각을 이루는 배열형태를 말하며 사각배열(Square arrangement)이라고도 한다. Fig. 1(b)는 엇갈림배열로 서로 이웃하며 놓여 있는 원주 중심간을 이은 선이 정삼각형을 이루는 배열형태를

말하며 삼각배열(Triangular arrangement)이라고도 한다. 실험 시 이웃하는 원주 중심간의 간격(Pt)을 원주 직경(D)으로 나눈 피치비는 두 배열 모두 2.0으로 고정하였다. 또한 편의상 각 원주의 순번은 그림에서와 같이 제1열 아래에서부터 일정류와 수직방향으로 P=1~10으로 정하였다.

다음으로 본 실험에 사용한 관군의 구조를 Fig. 2에 나타낸다. 관군의 각 원주는 직경 20mm의 투명한 아크릴관을 길이 180mm로 잘라 만들었다. 관을 고정시키기 위한 밀판은 가로 250mm, 세로 250mm로 두께 2mm의 투명아크릴판으로 만들었으며 흐름에 영향을 주지 않도록 그 가장자리는 그라인더로 갈아 경사를 주었다. 또한 밀판은 2매를 제작하였고, 밀판위에 각각 Fig. 1의 (a)와 (b)의 배열형태로 원주를 아크릴 본드로 부착하여 실험모형을 완성하였다. 그리고 실험 시 각 원주가 잘 보이도록 원주 가장자리는 흰색 도료를 칠하였고, 또한 추적입자가 잘 보이도록 밀판은 검정색 도료로 칠했다.

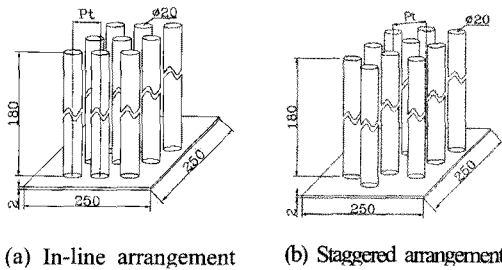


Fig. 2 Schematic diagram of experimental model

2.2 PIV 계측

Fig. 3에 PIV 계측을 위한 실험장치의 개략도를 나타낸다.

실험은 정렬배열 및 엇갈림배열 형태의 관군 모델을 Fig. 2에서와 같이 제작하여 일정류가 흐르는 회류수조⁽⁷⁾의 수로 내에 Fig. 3에서와 같이 장착하여, PIV를 이용하여 유동장을 가시화 하였다. 구체적으로 각 실험모형을 수로 내에 설치한 후 회류수조 밖에서 일정류와 수직, 수평방향으로 연속 광 레이저에 의한 시트(Sheet)상의 조명광을 비추

고, 관군의 상부에서 수직하방으로 고속도 카메라로 유동장을 연속 촬영하였다. 이때 추적입자로는 평균직경이 100 μ m이고, 비중이 1.02인 구형의 PVC(Poly Vinyl Chloride)를 사용했다. 고속카메라는 PHOTRON사의 FASTCAM 1280 PCI 모델을, 레이저는 JENOPTIK사의 Jenlas D2.8 모델을 사용했으며 본 실험에 사용한 PIV시스템의 주요규격은 Table 1과 같다.

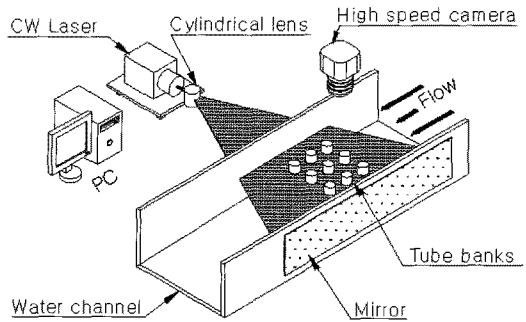


Fig. 3 Schematic structure of experimental device

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 1024pixel
Software	CACTUS 3.2
Error vector(%)	Average: about 0.1%

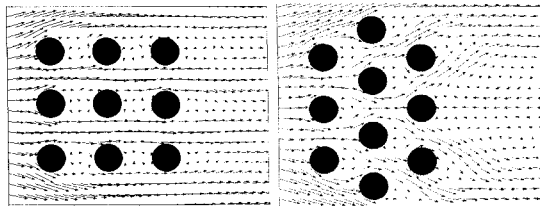
3. 실험결과 및 고찰

먼저 Fig. 4에 정렬배열 및 엇갈림배열 상태에서 관군 주위의 시간 평균 속도벡터를 나타낸다.

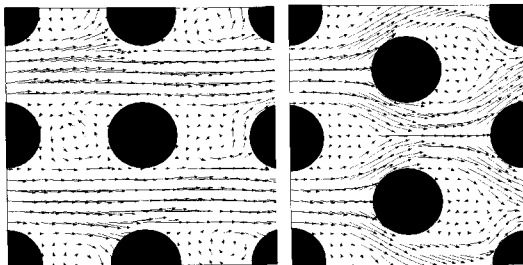
이때 피치비는 2.0이며, 원주 직경을 대표길이로 하여 계산한 레이놀즈 수는 $Re=4,000$ 이다. Fig. 4(a) 정렬배열에서 각 원주의 후류측을 보면 원주와 원주사이 흐름은 거의 정체되어 있고, 반면에 관열과 열 사이의 흐름은 일정류와 같은 속도로 흐르고 있다. 한편 Fig. 4(b) 엇갈림배열을 보면 제

1열의 원주와 원주 사이의 흐름은 중2열의 5번, 6번 원주의 방해로 받아 이들 원주의 양쪽으로 갈라져 흐르며, 이 흐름 역시 중3열의 원주의 방해를 받아 제8, 9, 10번 원주의 양쪽으로 갈라져 흐른다. 이러한 현상은 Fig. 4의 중앙 부근을 확대한 Fig. 5에서 구체적으로 알 수 있다. Fig. 5(a)와 (b)에서 각 원주 후류측 정체역역에서도 미세하나마 와류가 존재함을 볼 수 있다.

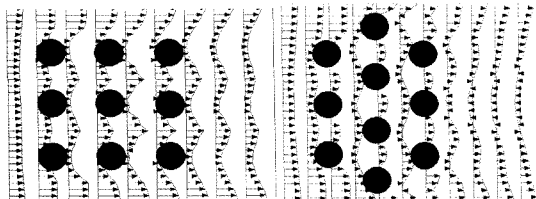
Fig. 6에 Fig. 4과 같은 조건에서 관군 주위의 속도분포를 나타낸다.



(a) In-line arrangement (b) Staggered arrangement
Fig. 4 Velocity vector around cylinders in in-line and staggered arrangements ($Re=4.0 \times 10^3$)



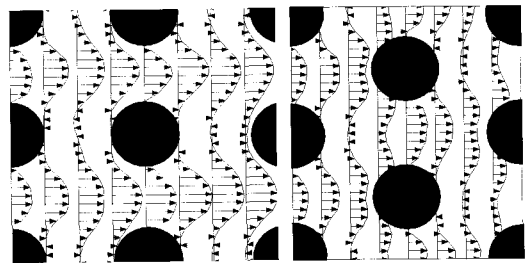
(a) In-line arrangement (b) Staggered arrangement
Fig. 5 The enlargement diagram of the central parts of Fig. 4(a) and (b)



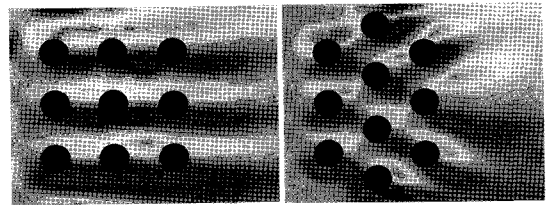
(a) In-line arrangement (b) Staggered arrangement
Fig. 6 Velocity profile through tube banks with in-line and staggered arrangements ($Re=4.0 \times 10^3$)

Fig. 6(a)와 (b) 모두에서 각 원주 표면에 가까울수록 속도분포가 좁으며, 유체점성에 의한 속도 경계층을 잘 나타내고 있다. 또한 Fig. 4에서 언급했듯이 정렬배열인 경우 관열과 열 사이의 중심에서 흐름은 거의 일정류와 같은 속도인데 반해, 엇갈림배열인 경우 원주 사이의 흐름은 그 바로 뒷줄 원주의 방해로 받아 후방으로 갈수록 속도가 감소하고 있다. 이러한 현상은 Fig. 6의 중앙 부근을 확대한 Fig. 7에서 더 명확히 알 수 있다. 또한 Fig. 6(a)와 (b)의 원주군 후방의 속도분포를 비교해보면 정렬배열에 비해 엇갈림배열의 속도분포가 평균적으로 훨씬 작게 나타나 있는데 이것으로 피치비가 같은 경우 정렬배열로 하면 엇갈림배열보다 유체저항을 더 작게 받는 것을 추측할 수 있다.

Fig. 8에 Fig. 6과 같은 조건에서 관군 주위의 등 와도선을 나타낸다. Fig. 8(a) 정렬배열인 경우 원주 주위의 등 와도선은 일정류의 영향을 받아 횡 방향으로 일직선상으로 놓여있고, 각 횡열의 위쪽은 시계방향, 아래쪽은 반시계 방향의 와도가



(a) In-line arrangement (b) Staggered arrangement
Fig. 7 The enlargement diagram of the central parts of Fig. 9(a) and (b)



(a) In-line arrangement (b) Staggered arrangement
Fig. 8 Contour of vorticity through tube banks with in-line and staggered arrangements ($Re=4.0 \times 10^3$)

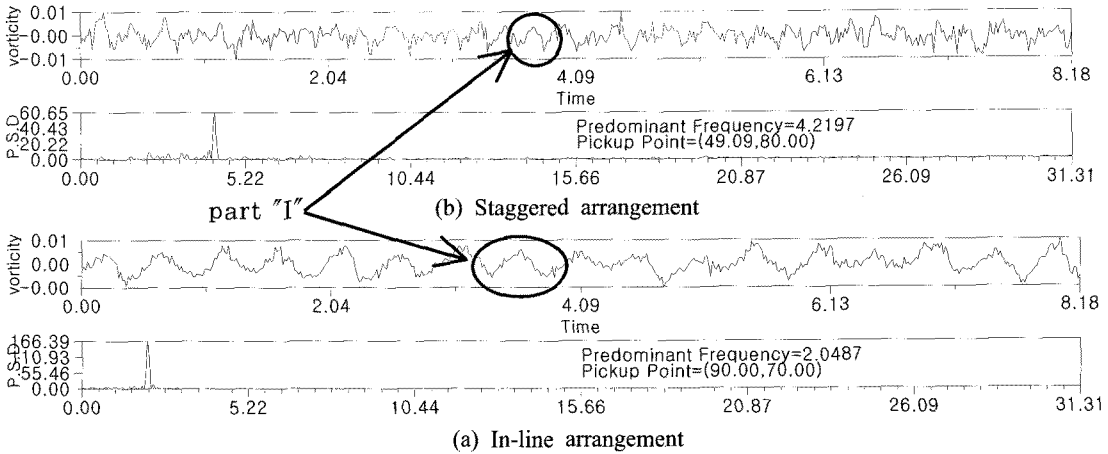


Fig. 9 Vorticity spectrum at the cylinder's wake with in-line and staggered arrangements ($Re=4.0 \times 10^3$)

밀집되어 있다. 한편 Fig. 8(b) 엇갈림배열인 경우 종1열 원주 주위의 등 와도선은 거의 일직선이거나, 종2열, 종3열 원주 주위의 등 와도선은 후류방향으로 거의 V자형을 나타내고 있다. 이것은 Fig. 4(b)에서 언급했듯이 원주 앞 열 사이의 흐름이 그 원주의 방해로 받아 원주 양쪽으로 V자형으로 갈라져 흐르기 때문으로 판단된다. 한편 Fig. 8(a), (b) 모두 일정류에 대하여 최상단 횡열, 최하단 횡열 바깥쪽 등 와도선이 안쪽의 다른 와도선들보다 더 진하고 넓은 범위에 분포되어 있어 관열 바깥쪽이 안쪽보다 와도가 더 큰 것을 알 수 있다. 이것은 Fig. 5(a), (b)에서 알 수 있듯이 상류측의 일정류가 관공의 방해로 받아 저항이 적은 바깥쪽 바깥측으로 흘러 가속되기 때문으로 판단된다.

Fig. 9에 관공 후류측에서의 와도 스펙트럼을 나타낸다. 이때 각각의 연속촬영시간은 8.18초이며, 고속도 카메라의 시간 간격을 1/125초로 설정하여 1024프레임의 화상을 얻었다. 와도측정 장소는 Fig. 6(a) 정렬배열인 경우는 5번 실린더(Fig. 1(a) 참조) 중심에서 일정류 방향으로 원주직경 D 만큼 떨어진 후류측이며, Fig. 6(b) 엇갈림배열인 경우는 2번 실린더(Fig. 1(b) 참조) 중심에서 역시 후류측 방향으로 원주직경 D 만큼 떨어진 곳이다. 그림에 나타난 바와 같이 Fig. 9(a)의 정렬배열인 경우 와도변화를 미루어 보아 칼만와는 주기적으로 발생하고 있음을 명확히 알 수 있고, 그 대

표주파수는 2.0 정도였다. 한편 Fig. 6(b)의 엇갈림배열인 경우 와도변화의 주기성이 정렬배열에 비해 다소 부족하지만 대표주파수는 4.2 정도로 정렬배열에 비해 2배 이상 높았다. 이들 원주의 직경* 대표주파수/일정류로 환산한 스트로할 수(Strouhal number)는 정렬배열의 경우 0.226, 엇갈림배열의 경우 0.47이었다.

Table 2에 엇갈림 및 정렬배열에 있어 각 원주 중심에서 후류방향으로 원주직경 D 만큼 떨어진 곳에서 대표주파수로 계산한 스트로할 수(Strouhal number)를 나타낸다.

Table 2 Strouhal number in the wake region of each cylinder

Tube banks arrangement	In-line arrangement			Staggered arrangement		
Strouhal No.	0.226	0.226	0.084		0.29	
					0.47	0.04
	0.226	0.226	0.084		0.26	
					0.47	0.04
	0.226	0.226	0.091		0.28	
					0.47	0.06
				0.26		

Table 2의 정렬 및 엇갈림배열에 있어 각 원주의 위치는 Fig. 1 실험모델에서의 위치와 같다. 먼저 정렬배열의 경우를 보면 종1열, 종2열의 경우 스트로할 수(Strouhal number)는 0.226으로 모

든 원주에 대해 같은 값을 가지나, 종3열 즉 마지막의 경우 0.084로 앞 열에 비해 크게 감소함을 알 수 있다. 다음 엇갈림배열의 경우를 보면 종1열의 스트로할 수(Strouhal number)는 0.47, 종2열은 대략 0.27로 앞 열에 비해 1/2정도이나, 종3열 즉 마지막 열은 0.04로 앞 열에 비해 대폭 감소함을 알 수 있다.

Fig. 10은 Fig. 9의 "I" 부분을 확대한 그림으로 그림에서 A ~ C점은 와도변화의 1주기를 2등분한 점을 나타낸다.

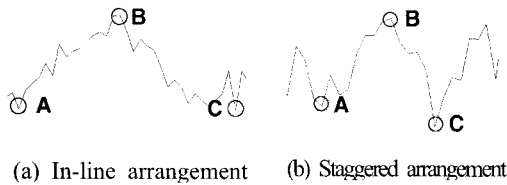


Fig. 10 The enlargement of part "I" in the Fig.9

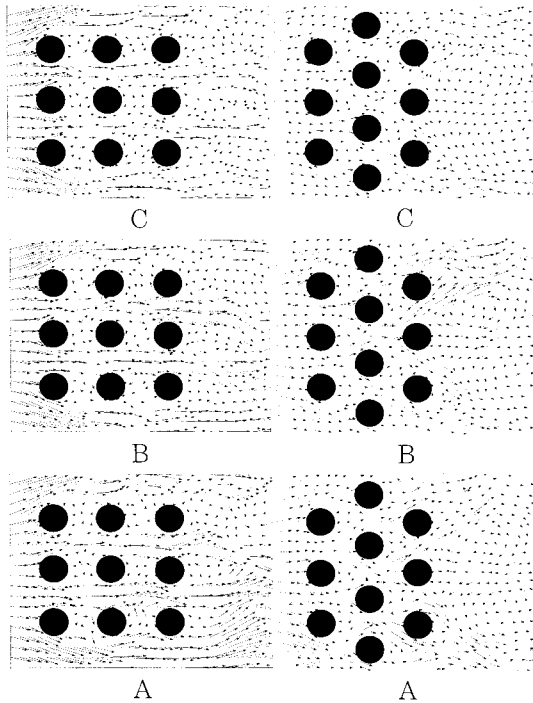


Fig. 11 Velocity vector through tube banks ($Re=4.0 \times 10^3$, A~C on the figure correspond to those point on Fig. 10)

Fig. 11(a)와 (b)는 각각 Fig. 10(a)와 (b)의 A ~ C 점에서의 순간 속도벡터를 나타낸다. 각 배열 A ~ C에서의 흐름패턴을 거시적으로 보면 Fig. 4에 나타낸 시간 평균 속도벡터와 거의 유사한 흐름패턴을 보인다. 즉 Fig. 4, 8에 설명한 바와 같이 정렬배열인 경우는 횡열 주위의 흐름은 일직선이나, 엇갈림 배열인 경우 후류방향으로 거의 V자형을 나타내고 있다. 그러나 각 배열 A ~ C에서 각 원주 후류의 흐름패턴을 미시적으로 살펴보면 그 형태 및 방향이 각 원주의 위치와 시간에 따라 변화하고 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

본 논문은 원통 다관식 열교환기에서 자주 등장하는 정렬배열(In-line arrangement) 및 엇갈림 배열(Staggered arrangement) 상태에 놓인 관군 주위의 유동장 특성을 PIV를 이용하여 파악한 것이다. 실험은 레이놀즈 수 $Re=4.0 \times 10^3$, 피치비 $Pt/D=2.0$ 로 고정 시킨 상태에서 관군 주위의 속도벡터, 속도분포 등 와도선 및 각 원주 후류측의 스트로할 수(Strouhal number)를 측정하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 관군 주위의 주류흐름패턴은 정렬배열인 경우는 후류방향으로 거의 일직선이나, 엇갈림 배열인 경우 거의 V자형을 나타내었다.
- (2) 관군 후방의 평균속도분포를 비교해보면 정렬배열에 비해 엇갈림배열의 속도분포가 평균적으로 훨씬 작게 나타났다.
- (3) 각 원주 후류측 스트로할 수는 정렬배열의 경우 종1열, 종2열, 종3열은 각각 0.226, 0.226, 0.084이었고, 엇갈림배열의 경우는 각각 0.47, 0.28, 0.04로 종2열은 종1열에 비해 거의 반으로 감소했다.
- (4) 각 원주 후류측 흐름의 형태 및 방향은 원주의 배열형태에 따라, 또한 각 원주의 위치와 시간에 따라 변했다.

후 기

이 논문은 2007년도 경남전력산업기획단의 지역 산업진흥사업 지역특화기술개발사업 및 지방대학 혁신역량강화사업에 의하여 지원되었음.

참고문헌

- [1] Colburn, A.P., "A Method of Correlating Forced Convection Heat Transfer Data and a Comparison with Fluid Friction", *Trans. AIChE*, Vol. 29, pp. 174-210, 1993.
- [2] Bergelin, O.P., Brown, G.A. and Doberstein, S.C., "Heat Transfer and Fluid Friction During Flow Across Banks of Tubes-IV", *Trans. of the ASME*, Vol. 74, pp. 953-960, 1952.
- [3] Bergelin, O.P., Bell, K.J. and Leighton, M.D., "Heat Transfer and Fluid Friction During Flow Across Banks of Tubes-IV", *Trans. of the ASME*, Vol. 80, pp. 53-60, 1958.
- [4] Zukauskas, A.A. and Ulinskas, R.V., "Analysis of Lateral Streamline Flow of Water through Tube Bundles During the Process of Heat Transfer at Critical Reynolds Number", *International Chemical Engineering*, Vol. 17, No. 4, pp. 673-676, 1972.
- [5] Zukauskas, A. A. Ulinskas, R. V. and Martsinauskas, K. F., "Influence of the Geometry of the Tube Bundle on the Local Heat Transfer Rate in the Critical Region of Streamline Flow", *International Chemical Engineering*, Vol. 17, No. 4, pp. 744-751, 1977.
- [6] Poshkas, P. S., Survila, V. Yu. and Zhukauskas, A. A., "Local Heat Transfer Rate at a Tube in a Corridor Bundle Lateral to an Air Stream at Large Reynolds Number", *International Chemical Engineering*, Vol. 18, No. 2, pp. 337-343, 1978.
- [7] Nishikawa, E. and Ishgai, S., "Structure of Gas Flow and Its Pressure Loss in Tube Banks with Tubes Axes Normal to Flow", *Trans. of the JSME*, Vol. 43, No. 373, pp. 3310-3319, 1977.
- [8] Aiba, S., Tsuchida, H. and Ota, T., "Heat Transfer Around Tubes in In-line Tube Banks", *Bulletin of the JSME*, Vol. 25, No. 204, pp. 919-926, 1982.
- [9] Aiba, S., Tsuchida, H. and Ota, T., "Heat Transfer Around Tubes in Staggered Tube Banks", *Bulletin of the JSME*, Vol. 25, No. 204, pp. 927-933, 1982.
- [10] Umeda S, Yang Wen-Jei, "Flow visualization in intersecting ducts with different converging-diverging angles", *J. of Visualization Soc. Japan*, Vol. 16, pp. 19-27, 1996.
- [11] T. Suzaki, Y. Ochiai, T. Oda and K. Hosotani, "A challenge to Pattern Recognition in Complex Flows(An Application of Proper Orthogonal Decomposition method to Flows passing a Cross a Tube Bank)", *9th. International Symposium on Flow visualization*, pp. 1-10, 2000.

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



박지태 (朴知泰)

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



변용수 (卞容洙)

1970년 6월생, 1995년 한국해양대학교 기계공학과 졸업(학사), 1999년 한국해양대학교 대학원 기계공학과 졸업(석사), 현재 범한산업(주) 범한기술연구소 수석연구원