

PIV기법에 의한 엇갈린 관군 배열 내부의 유동장 측정

김 경 천[†], 최 득 관^{*}, 박 재 동^{**}

부산대학교 기계공학부, ^{*}LG전자, ^{**}LG이노텍

Measurement of Flow Field through a Staggered Tube Bundle using Particle Image Velocimetry

Kyung-Chun Kim[†], Deug-Goan Choi^{*}, Jae-Dong Park^{**}

School of Mechanical Engineering, Pusan National University, Pusan 609-735, Korea

^{*}Digital Appliance Research Lab., LG Electronics Inc., Changwon 641-711, Korea

^{**}Yongin Engineering Lab., LG Innotek Co. Ltd., Yongin 449-910, Korea

(Received April 12, 2001; revision received May 4, 2001)

ABSTRACT: We applied PIV method to obtain instantaneous and ensemble averaged velocity fields from the first row to the fifth row of a staggered tube bundle. The Reynolds number based on the tube diameter and the maximum velocity was set to be 4,000. Remarkably different natures are observed in the developing bundle flow. Such differences are depicted in the mean recirculating bubble length and the vorticity distributions. The jet-like flow seems to be a dominant feature after the second row and usually skewed. However, the ensemble averaged fields show symmetric profiles and the flow characteristics between the third and fourth measuring planes are not so different. Comparison between the PIV data and the RANS simulation yields severe disagreement in spite of the same Reynolds number. It can be explained that the distinct jet-like unsteady motions are not to be accounted in the steady numerical analysis.

Key words: Tube bundle(관군), Particle image velocimetry(입자영상유속계), Recirculation region(재순환 영역), Shear layers(전단층), Instantaneous flow field(순간 유동장), Ensemble averaged flow field(평균 유동장)

기 호 설 명

D : 원주 지름
 W, H : 풍동 시험부의 너비, 높이
 U_{∞} : 자유유동속도
 U_{max} : 관군을 지날 때의 최대속도
 Re_D : 레이놀즈수(= $U_{max} D/\nu$)

u, v : x, y 방향의 속도성분
 U, V : u, v 의 전체 평균속도
 x, y : 유동방향 및 수직방향 좌표

1. 서 론

직교 유동장에 놓인 뭉툭한 물체 주위의 유동 현상에 관한 연구는 여러 가지 공학적인 측면에서 관심의 대상이 되어 왔다. 특히, 유체가 여러 개의 관으로 구성된 관군을 통과할 때, 유동에 대한 이해는 열교환기의 설계 및 응용에 매우 중

[†] Corresponding author

Tel.: +82-51-510-2324; fax: +82-51-512-9835

E-mail address: kckim@pusan.ac.kr

요하다. 열교환기의 전열성능은 관외열저항, 관내 열저항, 전도열저항 등에 의하여 복합적으로 영향을 받는데 전체 열저항의 70% 이상을 관외열저항이 차지하고 있기 때문에 관군 주위를 통과하는 유체의 유동특성에 대한 연구는 열전달 현상 연구에 중요한 정보를 제공할 수 있다.

직교 유동장에 놓인 관군에 관한 연구는 관군 전체의 압력손실 및 평균열전달률의 연구로부터 시작되었다. 1933년에 Colburn⁽¹⁾은 관군의 최소단면부를 통과하는 최대속도를 기준으로 한 레이놀즈수, Re_{max} 의 개념을 처음으로 도입하고, 이전의 열전달 연구자료를 기초로 하여 엇갈림 관군 배열에 대해 간격비의 효과를 포함한 상관방정식을 최초로 제시했다. Grimison⁽²⁾도 유사한 방법으로 여러 가지 배열과 간격비에 대해 유체저항과 열전달의 상관방정식을 제안했다. 그러나, 이들이 제안한 방정식들은 자료의 부족 때문에 그다지 정확하지 못했다. 관군에 관한 초기의 연구 결과는 관군 전체의 압력손실 및 평균열전달률에 관련된 것이 대부분을 차지하고 있다. 따라서, 최근에는 유동장을 보다 구조적으로 파악하기 위해 국소 유동특성 및 국소 열전달현상의 연구가 중요하게 되었다. 다수열로 이루어진 엇갈림 관군 배열에 대한 연구로는 Zhukauskas et al.^(3,4)이 저항측정 실험을 행하였고, Poshkas et al.⁽⁵⁾은 2×10^5 에서 2×10^6 의 레이놀즈수 범위에서 관군이 받는 항력에 대하여 실험결과를 발표하였다. 이들은 주로 관 표면의 압력분포 등에 의해 국소열전달 현상을 설명하고 있다. 그러나, 압력분포는 주류속도의 가속과 감속만을 알려 주기 때문에 국소 열전달현상을 완전히 설명하기에는 부족했다.

Umeda and Yang⁽⁶⁾은 LDV(Laser Doppler Velocimetry) 측정기법에 의해 다양한 관군 배열에서의 유동장 측정실험을 하여 정렬배열과는 달리 엇갈림 배열에서는 von Kármán 와류와 'X'자 형상의 주류가 상호작용을 하여 복잡한 유동장을 형성한다고 발표하였다.

Balabani et al.⁽⁷⁾은 레이놀즈수가 12,858인 영역에서 그리고 Mayer and Larsen⁽⁸⁾은 레이놀즈수가 32,000인 영역에서 관군에서의 열수별 재순환 영역을 확인하였으며, 이들은 모두 관외측 유체가 물인 경우이며 LDA(Laser-Doppler Anemometry)를 이용하여 측정하였다.

이상에서 알아 본 바와 같이, 관군에 있어서

평균 및 국소 유동특성 등을 연구한 결과는 유로 내의 높은 난류강도로 인한 측정상의 어려움 때문에 많은 데이터의 확보가 어렵고, 신뢰도 또한 떨어진 것이 사실이며, 접촉정 기법에 의해 공간적인 해상도가 떨어지고 있다. 이에 본 실험에서는 역류 및 비정상성이 동시에 존재하는 관군 주위 유동장에서 신뢰도가 높은 데이터를 얻고 공간적인 해상도를 높일 수 있는 방법으로 최근에 많이 사용되고 있는 PIV기법을 사용하여 1열에서 5열까지의 관군 주위를 통과하는 유체의 유동특성에 대한 구조적이고 신뢰성 있는 정보를 획득하여 열전달 현상 매카니즘 규명에 도움이 되고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치 및 조건

Fig. 1은 본 연구에 사용된 실험장치의 개략도를 나타낸 것이다. 본 실험에 사용된 풍동은 blower 방식의 소형 개회로 저속 풍동이며, 풍동의 시험구간은 폭이 800 mm, 높이가 300 mm, 유동방향 길이가 2,000 mm이다. 시험구간의 상·하면은 레이저의 산란을 막기 위해 유리로 제작을 하였으며 측면은 아크릴로 제작되어 있다.

3 Hp의 속도가변형 원심팬에서 공급되는 공기는 정류실과 단면비 2.67 : 1의 2차원 수축노즐을 통과한 뒤 여러 개의 스크린을 통해 정류된 후 시험구간으로 유입된다. 본 실험은 실제 열교환기에서 많이 사용되는 레이놀즈수가 4,000인 영

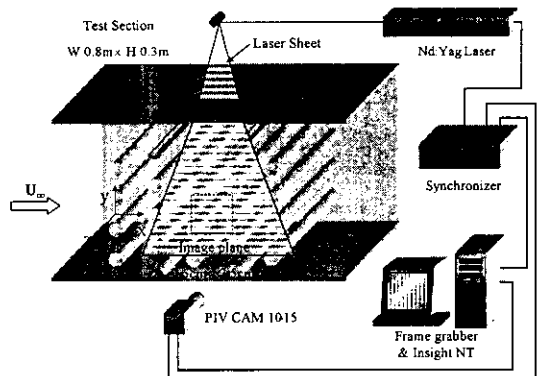


Fig. 1 A schematic diagram of experimental setup.

Table 1 Characteristics of the tube bank

Rows of tubes	Tubes per row	Diameter of tube	Longitudinal pitch	Transverse pitch	Free stream velocity	Re_D
5	4	30 mm	65 mm	75 mm	1.24 m/s	4,000

역에서 수행되었고 이때 자유유동 속도는 $U_\infty = 1.24 \text{ m/s}$ 이다.

본 실험에서는 관군의 배열을 정삼각형 배열이 되도록 배치를 하였다. 그리고, 유동방향의 튜브 열수는 5열이 되도록 하였으며, 각 열에는 4개의 실린더가 놓이도록 하여 벽면의 영향을 받지 않는 중앙 부근에서 측정을 하였다. 그리고 제2열과 4열에는 유동의 조건을 이상적으로 만들기 위해 dummy tube를 설치하였다. Table 1에서는 실험에 사용되는 실린더의 사양과 관군 배열에 관한 정보 및 실험조건을 정리하여 나타내었다.

측정하고자 하는 유동영역은 높이 방향으로 중앙 부근에서 자유유동이 첫번째 관군으로 유입되어 마지막 관군을 빠져 나가기 직전까지의 영역을 선택하였다. 각 관열 사이의 유동영역을 각각 Position 1~4로 정하였다. 그리고, Fig. 2와 같이 유동 방향으로 x 좌표축을 설정하였고 유동 방향에 수직으로 y 좌표축을 설정하였다.

2.2 PIV 측정시스템 및 계측방법

본 연구에서의 PIV 시스템은 250 mJ/pulse의 이중 펄스 방식의 Nd:Yag 레이저 시스템과 1K × 1K의 고해상도 CCD 카메라(TSI, PIVCAM 10-15), 동기화장치(Synchronizer, TSI 610032), 화상처리 보드(TSI, Frame grabber 610066) 및 구

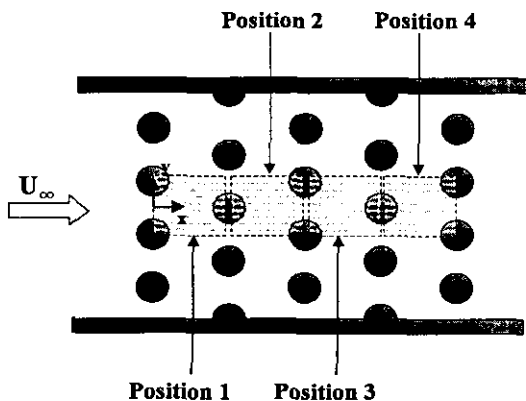


Fig. 2 Position of image view.

동용 펜티엄 컴퓨터로 구성되어 있다. 사용된 입자는 올리브 오일 에어로졸이며, 입자의 평균 직경은 $2 \mu\text{m}$ 이다.

본 실험에서의 PIV 측정영역(field of view)의 면적은 $75 \text{ mm} \times 75 \text{ mm}$ 이다. 속도벡터의 추출 알고리즘은 2화상 상호상관기법을 이용하였다. 탐색영역(interrogation window)의 크기는 24×24 픽셀이다. 6724개의 속도벡터들을 얻어내었고, 벡터간의 공간해상도는 0.9 mm이다. 구해진 속도 벡터는 본 실험실에서 개발한 PIV ACE V1.0 후처리 프로그램을 사용하여 불량 벡터의 제거, 속도 계산, 보간, 앙상블 평균 등의 통계적 처리를 수행하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 순간 유동장

Fig. 3은 각 위치에 따른 관군 내의 순간속도장을 나타낸 것이다. 유동방향으로 관열을 지나면서 유동의 교란이 심해져 구조가 복잡해짐을 알 수 있다.

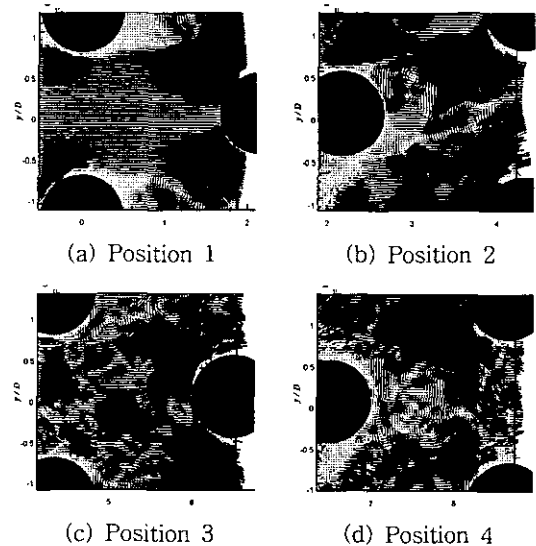


Fig. 3 The instantaneous velocity field.

Position 1과 Position 2에서는 대규모 와구조가 확연히 발달해 있는 것이 관찰되지만 Position 3과 Position 4에서는 관열의 영향에 의해 전단층이 매우 불안정해지면서 와구조가 상당히 많이 깨어져 작은 구조의 와가 나타나고 있음을 알 수 있다. 관군 전방에서 일정하게 들어오던 주류유동은 관군에 유입되면서 관의 존재에 의해 상·하 두 줄기의 큰 갈래로 나뉘어지고 있음을 확인할 수 있는데, 이렇게 나누어진 분류(jet)는 Position 1과 Position 2에서는 비교적 안정적으로 흘러가다가 관열을 여러 번 거친 Position 3과 Position 4에서는 확연하게 요동치고 있는 것을 발견할 수 있다. 이는 관군 내의 유동이 더욱 활발해져서 난류로의 전이를 촉진시키는 결과를 가져온다고 생각된다.

Position 1의 중심부에서는 균일한 포텐셜 유동 영역이 존재함을 알 수 있다. 그리고, 평균 유동장에서 관측이 될 수 있는 dead water zone이 관측되는데 상·하 영역의 크기가 다른 것은 독립적인 와유출이 발생하고 있다는 것을 보여주고 있다. Position 2에서는 전형적인 원주후류에서 상하 번갈아 발생하는 와류의 구조를 관찰할 수 있다.

2열 실린더 윗 부분에서 매우 빠른 전단유동이 관찰되며 dead water zone이 현저히 줄어들었음을 알 수 있는데, 이로 인해 1열에 비해 2열의 열전달 효과가 클 것으로 기대된다. Position 3의 3열 실린더 사이에서 분류의 편향성이 관찰되며, 중심부에 강한 난류장이 형성되고 있다.

상부측에는 연달아 두 개의 spanwise 구조의 와류가 관찰되는데, 이는 박리 전단층에 의한 와류구조와 분류에 의한 와류 때문이다. 4열 실린더의 정체점은 실린더 중심에서 약간 아래에 위치하고 있는데 이는 분류의 편향 때문이라고 생각된다. Position 4에서도 역시 분류의 편향은 관찰되고 있다. 그리고 실린더 후미에서 발견되는 주기적인 와유출 현상이 더 이상 나타나지 않고 있고, 와류의 크기도 줄어들었으며 매우 복잡해진 3차원적인 와류들이 관찰된다. 이는 3차원 박리, 3차원 분류에 의한 복잡한 구조로 판단된다.

Fig. 4는 순간 속도장으로부터 구한 와도장을 나타낸 그림이다. 역시 유동 방향으로 관열을 지나면서 유동의 교란이 심해져 구조가 복잡해짐을 알 수 있다.

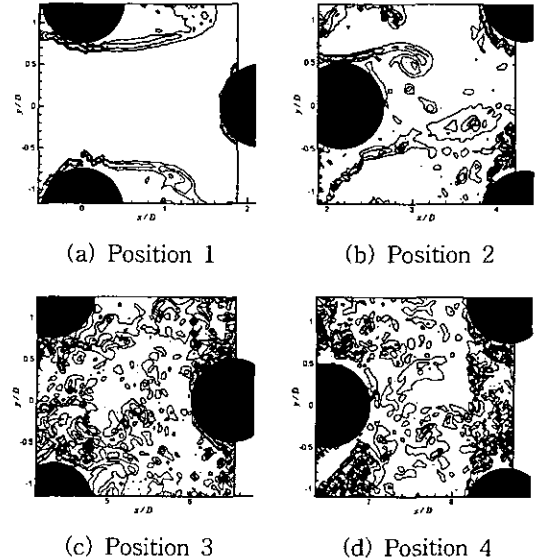


Fig. 4 The instantaneous vorticity field.

Position 1에서는 와가 주로 전단층에서 크게 발생하고 있음을 확인할 수 있고 아직은 작은 와의 구조는 현저하지 않음을 알 수 있다. 와의 구조도 대칭적 구조를 보이고 있다.

Position 2에서는 와 유출이 상·하 번갈아 발생하며 비대칭적인데 이로 인해 분류의 편향이 유발된다. 앞 열에서의 양의 와류의 영향으로 뒷 열에서 음의 와 확산이 촉진되고 있음을 확인할 수 있다.

Position 3에서는 전반적으로 강한 난류장이 형성되고 있음을 확인할 수 있다. 즉 전반적으로 뚜렷한 2차원 와류의 구조가 잘 보이지 않고 3차원적 turbulent vortex mixing이 일어나고 있다.

Position 4에서는 Position 3과 구별이 어려울 정도로 무질서한 와류의 구조가 관찰된다. 유동이 관열을 지나 하류로 옮겨 가면서는 유동의 교란이 커지면서 작은 와가 발달해 나가는 것을 알 수 있는데, 이러한 유동의 교란에 의해 주류공기와 원판과의 열전달도 더욱 촉진될 것으로 보인다.

3.2 평균 유동장

평균 유동장은 순간유동장을 앙상블 평균하여 얻었으며, 각 위치별로 400장의 유동장 전체를 평균하였다. 순간 유동장을 관찰한 결과 통계적

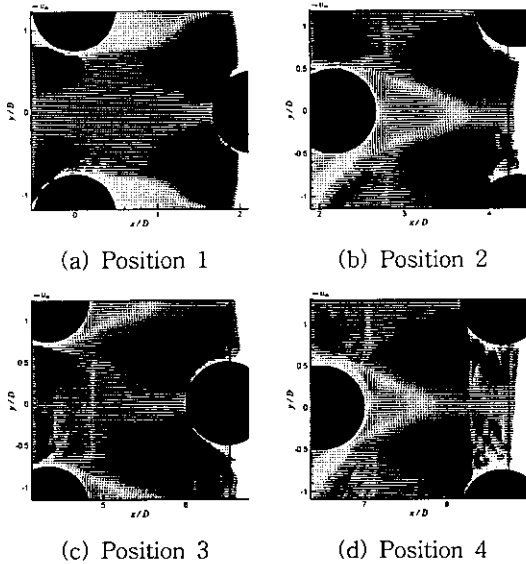


Fig. 5 The ensemble averaged velocity field.

으로 균등한 난류 유동장이므로 400번의 앙상블 유동장은 시간 평균된 유동장과 개념적으로 동일하다.

Fig. 5(a)에서 실린더 사이를 통과할 때 유로의 전반부에서 유로 단면적의 감소로 속도가 가속되고 후반부에서는 다시 유로 단면적의 증가에 의해 속도가 감속되고 있음을 알 수 있다.

Fig. 6에서 레이저 반사광의 영향으로 박리점을 정확히 찾기는 어려우나 후열로 진행할수록 재순환 영역이 짧아지고 있으므로, 이를 통해 박리점이 지연되고 있음을 알 수 있다.

Fig. 6(a)에서 유선의 분포는 상하 대칭을 이루고 있음을 알 수 있다. 실린더 후면에는 유동이 거의 정지한 dead water zone이 관찰되고 이 부근에서는 열전달 효과가 적을 것으로 판단된다.

순간 유동장들을 평균하면 층류영역인 저 레이놀즈수에서 확인할 수 있는 재순환영역이 나타난다. 이때 원관 중심의 끝에서 재순환영역의 끝 지점까지를 재순환영역의 길이라고 하여 L_F (Formation Length)라고 표시하기도 한다. 유선의 분포와 v_{rms} 가 최대가 되는 지점을 보아 재순환영역의 끝 지점은 약 $x/D=1.55$ 인 지점이다. 그러므로 L_F 는 약 1.05 D이다.

Fig. 5(b)에서는 Position 1에서와 마찬가지로 원관의 전반부에서 유로 면적의 감소로 속도의

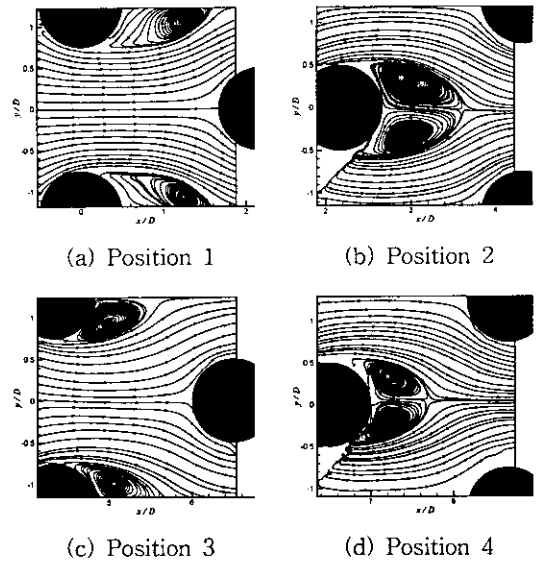


Fig. 6 The streamlines from ensemble averaged velocity field.

가속이 일어나고 있음을 알 수 있다. 하지만, 순간 유동장에서 관찰되던 분류의 편향현상이 평균 유동장에서는 보이지 않음을 알 수 있다. Fig. 6 (b)에서 첫번째 관열을 지날 때에 비해서 L_F 가 0.91 D로 짧아졌음을 확인할 수 있다. 이는 관열을 지나치면서 형성된 난류 성분의 발달과 아울러 전단층의 불안전성의 증대로 인해 와 유출이 상류 쪽으로 당겨졌다고 판단되며, 재순환유동과 외부유동의 활발한 운동량 교환으로 인해 열전달이 더욱 촉진될 것으로 생각된다.

Fig. 5(c)에서 앙상블 평균에 의해 유동의 편향성이 사라지고 대칭적인 구조를 나타내고 있음을 확인할 수 있다. 정체점도 순간 유동장과 달리 중앙 부근에 나타나고 있다. Fig. 6(c)에서 L_F 을 구해 보면 0.72 D로 앞에서보다 더욱 짧아졌음을 확인할 수 있다. 이 역시 관열을 지나치면서 형성된 난류박리로 인한 난류 성분의 증대와 아울러 전단층의 불안전성에 의해 와 유출이 상류 쪽으로 더욱 당겨졌다고 판단된다.

Fig. 5(d)에서도 역시 순간 유동장에서 관찰되는 유동의 편향현상은 보이지 않고 대칭적인 유동장을 형성하고 있다. Fig. 6(d)에서 L_F 는 0.7 D로 3열과 거의 비슷하다. 그러므로 4열 이상을 지나면 유동의 형태가 비슷하리라고 예측된다.

이것은 4열 이상을 지나면 유동의 패턴이 거의 일정해진다는 기존의 논문들의 결과를 반영하고 있다고 생각된다.

3.3 실험결과와 수치해석 비교

유한체적법에 근거한 상용 코드인 Fluent/Unс를 사용하여 수치해석을 하여보았다. Fluent 해석에 사용된 조건을 간단히 살펴보면, 표준 $k-\epsilon$ 난류모델을 사용하였고, 유동에 수직인 방향으로 대칭(symmetry)조건, 공기의 온도는 상온상태를 유지하였으며, 격자로서는 2차원 삼각형 격자를 이용하여 모델링하였다.

Fig. 7(a)는 관열의 중심에서 다음 관열의 정체점에 이르기까지 수평 중심선에서의 U속도 성분을 각 Position별로 추출하여 비교한 그림이다. 실험결과는 Position 1에서 Position 4로 갈수록 처음 유입될 때의 U속도가 조금씩 감소하고 있는 것을 확인할 수 있다. 이는 관열을 지나면서 상·하 양쪽 실린더 부근의 유동이 더욱 가속이 되므로 질량보존법칙에 의해 중앙에서의 U속도가 줄어들었기 때문이다. 전산결과는 관열 전반부에서 가속되었다가 후반부에서는 속도가 감소되는 현상이 실험결과와 비슷한 분포를 보이거나 정량적인 값은 최대치에 있어서 실험결과가 전산결과보다 전반적으로 약 1.125배 크게 나타나고 있다.

Fig. 7(b)는 중앙관을 지나 후측 관열 사이를 통과할 때까지 중심에서의 U속도 성분을 각 Position별로 추출하여 비교한 그림이다. 실험결과

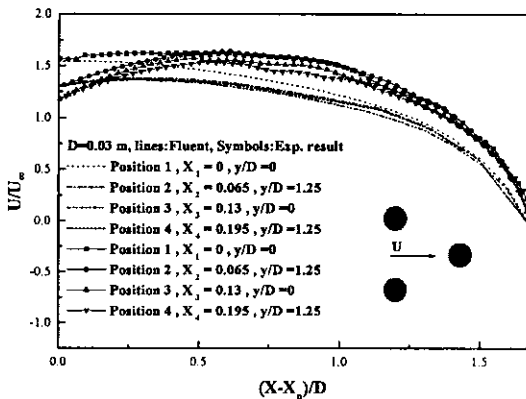
는 재순환 버블의 길이가 약 $x=1.55D$ 에서 1.20D까지 짧아졌음을 확인할 수 있다. 이는 관열을 지나면서 형성된 난류 성분의 증대와 아울러 전단층의 불안전성에 의해 와 유출이 상류 쪽으로 당겨졌음을 보여주고 있다. 그리고, 버블의 길이가 짧아지므로 U속도가 가속되는 구간이 줄어들어 역류되는 U값의 최대치도 작아지고 있다고 판단된다. 중심에서의 U속도 성분을 비교하여 본 결과 출구영향에 의해 완전히 일치하지는 않지만 3, 4열을 지나면서 유사한 분포와 성질을 보이는 것으로 보아 이상적으로 관열의 수가 무한할 때에는 4열을 지나면서는 거의 유동의 구조가 비슷하리라고 판단된다.

전산결과는 1열에서 4열에 이르기까지 거의 음의 U값이 나타나지 않고 있고 따라서 재순환 길이를 정의하기도 용이하지 않은 결과를 보이고 있어 실험결과와는 큰 차이를 나타내고 있다. 이러한 차이는 전산 해석시에 실제로 발생하고 있는 비정상 분류유동을 적절히 반영하지 못함과 난류모델의 부적절성에 기인하기 때문이라고 생각된다.

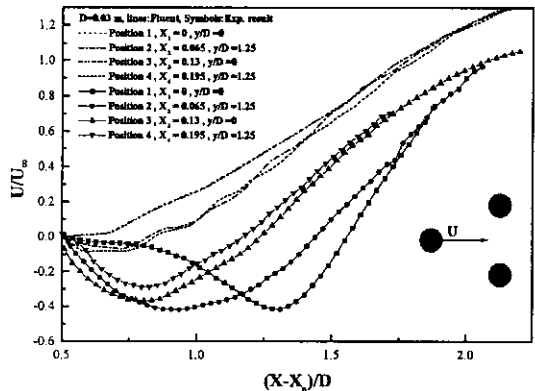
4. 결 론

관군에서의 열전달 현상 메카니즘 규명을 위하여 PIV를 이용하여 실험한 결과를 해석과의 비교를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) PIV 계측방법에 의해 공간 해상도를 높인 국소적인 유동장에 관한 상세한 데이터를 정량적으로 확보하였다.



(a) Streamwise velocity at the centerline (1)



(b) Streamwise velocity at the centerline (2)

Fig. 7 Comparison of experiment and computational results.

(2) 재순환영역의 길이가 1열 1.05 D, 2열 0.91 D, 3열 0.72 D, 4열 0.7 D로써 1열에서 3열까지는 재순환영역의 길이가 확연히 짧아지고 있으나, 4열부터는 거의 변화가 없음을 확인할 수 있다. 이를 통해 3열까지는 열수의 증가에 따른 열전달률 향상의 효과를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

(3) 순간 및 평균 유동장의 속도, 와도 및 유선들을 비교하여 볼 때 1열에서 4열까지의 유동의 특성은 관열을 지나면서 점점 복잡해져 가는 다른 특성을 나타내고 있음을 확인할 수 있었다.

(4) 관열을 지나면서 전단층의 불안정성이 커지고, 재순환영역은 줄어들며, 난류치가 점차 증가해 가고 넓게 퍼지는 것을 확인할 수 있었다.

(5) 관열 사이의 국소유동의 특성은 열마다 다르기 때문에 관열의 수가 적을 때는 평균 열전달이나 평균 압력강하식을 사용하는 것은 위험성이 따를 수가 있다. 그러므로, 평균 열전달 및 압력강하 실험을 할 때는 이상적인 조건으로 만들기 위해 적절한 수 이상의 관열이 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. Colburn, A. P., 1933, A method of correlating forced convection heat transfer data and a comparison with fluid friction, *Trans. AIChE*, Vol. 29, pp. 174-210.
2. Grimison, E. D., 1937, Correlation and utilization of new data on flow resistance and heat transfer for cross flow of gases over tube banks, *Trans. of the ASME*, PRO-59-8, pp. 583-594.
3. Zhukauskas, A. A. and Ulinskas, R. V., 1977, 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.
4. Zhukauskas, A. A., Ulinskas, R. V. and Martšinauskas, K. F., 1977, 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.
5. Poshkas, P. S., Survila, V. Yu. and Zhukauskas, A. A., 1978, 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.
6. Umeda, S. and Yang, Wen-Jei, 1996b, Flow visualization in intersecting ducts with different converging-diverging angles, *J. Visualization Soc Japan*, pp. 16 : 19-27.
7. Balabani, S., Bergeles, G., Burry, D. and Yianneskis, M., 1994, Velocity characteristics of the crossflow over tube bundles, 7th Int. Symposium, Application of Laser Tech. to Fluid Mech., July 13-16, pp. 3.1-3.8.
8. Mayer, K. E. and Larsen, P. S., 1994, LDA study of turbulent flow in a staggered tube bundle, 7th Int. Symposium, Application of Laser Tech. to Fluid Mech., July 11-14, pp. 4.1-4.8.