

선박용 팬코일장치 냉각관 주위의 유동특성에 관한 연구

배봉갑* · 최금란** · 노병수†

*(주)코레코, **대림산업개발, † 에스티엑스포스

A Study on the Flow Characteristics around Cooling Tubes of Fan Coil Unit for Ship

Bong-Gap Bae* · Keom-Ran Choi** · Byeong-Su Ro†

* Koreco Co., Busan, 608-743, Korea

** DaelimJ.H., Busan, 608-743, Korea

† STX Pos Co., Busan, 600-721, Korea

요 약 : 이 연구에서는 선박용 팬코일유닛의 엇갈림 냉각관 주위 유동특성을 실험적으로 고찰하였다. 입자영상유속계를 이용하여 입구유속기준 레이놀즈수 $Re = 1.5 \times 10^3$ 에서 $Re = 2.5 \times 10^3$ 까지 계속결과를 얻었다. 그 결과 유동은 흐름방향으로 빠른 속도로 발달하여 비교적 짧은 거리 후방에 공간적인 주기성을 나타내었다. 유동이 발달하는 영역에서는 레이놀즈수에 의존하는 경향이 크게 나타났으나 공간적 주기성에 미치는 레이놀즈수의 영향은 크지 않았다.

핵심용어 : 냉각관, 유동특성, 엇갈림배열, 팬코일유닛, 입자영상유속계

Abstract : This experimental study investigated in to the flow characteristics around staggered cooling tube arrays of fan coil unit for ship. A particle image velocimetry technique was employed to obtain detailed measurements at inlet-velocity-based Reynolds numbers of $Re = 1.5 \times 10^3 \sim Re = 2.5 \times 10^3$. As for the results, the flow evolves rapidly and becomes spatially periodic in the streamwise direction after a relatively short distance. The flow exhibits strong Reynolds number dependence in developing region but no significant Reynolds number effects are observed in spatially periodic region.

Key Words : Cooling tube, Flow characteristics, Staggered arrays, Fan coil unit, Particle image velocimetry

1. 서 론

2000년 초까지 선박의 건조실적을 보면 특별한 일부 선박을 제외한 공조시스템은 중앙집중공조방식(central air handing unit)을 채택하여 왔다. 그러나 선박의 특성상 항해에 따른 지역별 기후의 변화에 민감하고, 선체가 강관으로 되어있어 주간과 야간의 온도가 크며 대기가 습한 환경으로 거주구의 각 데크(deck) 모두 쾌적한 환경을 만들기는 어려운 실정이다. 또한 승선인원이 감소하고 거주구의 구역별 사용빈도가 달라 최근에는 대형선박을 중심으로 개별 분산공조시스템(에 대한 관심이 커지고 일부 선박에서는 채택하고 있다. 팬코일유닛(fan coil unit)는 공냉식 열교환기(evaporator)와 송풍기를 케이싱 안에 조합시켜 공냉식 열교환기 내부에 냉수 또는 온수를 통과시키면서 송풍기로 열교환기를 향하여 바람을 불어냄으로서 그 통과되는 공기를 차갑게도 하고 따

뜻하게도 만들어 실제 환경을 쾌적하게 만드는 장치로서 분산공조시스템의 핵심장치이다. 이러한 팬코일 유닛은 각 실 또는 각 존별로 유닛을 설치하여, 용도별 사용 장소를 분리 가능하며 에너지 절감 효과가 있을 뿐만 아니라 기계실의 AHU(air handing unit)에서 각 실로 연결되는 덕트 공간이 필요 없는 장점이 있다. 선박에 사용되는 팬코일유닛의 경우 관리상의 문제 및 안전도, 그리고 협소한 공간에 설치되어야 하는 점과 감작성 등이 추가로 고려되어야 하며 선급의 승인을 얻어야한다. 팬코일 유닛에서 가장 중요한 구성품은 열교환기이며 일반적으로 엇갈림 관군의 구조로 되어있다. 그러나 엇갈림 관군 주위의 유동장은 기하학적형상에 따른 복잡한 유동의 특징, 즉, 높은 난류강도, 역압력구배, 박리와 재부착점, 유동형태의 주기성 또한 곡률 효과에 따른 추가적인 변형률 등으로 인하여 실험이나 수치해석을 수행하는데 많은 문제점을 가지고 있다.

이와 관련된 연구(Avisar et al. 2001; Kim and Bullard, 2002; Buyruk, 2002)에서 보면 팬코일 유닛의 열교환기의 경우 완전 발달된 이차원적 유동구조를 가진 종방향 및 축방향

* 대표저자 : 정희원, korecol@kornet.net, 051-628-7190

† 교신저자 : 정희원, ce_robbs@hanmail.net, 061-278-2624

유동에 국한된 결과와 AHU 및 온열환경의 분석에 관한 연구가 주류를 이루고 있다. 그러나 공조기 냉각관군의 경우 내부에서 형성되는 유동에 대한 올바른 고찰을 하기 위해서는 실제상황에 근접한 모델이 필요하다. Scholten and Murray(1998)는 3열의 잇갈린 관군에 대하여 두 종류의 레이놀즈수에 대해 속도의 변동성분을 측정하고 와류의 형성과 와류립 현상이 국부적으로 발생하는 결과를 제시하였다. 그리고 각 열의 후류의 속도 변동은 3열까지 점차적으로 증가하여 발생하고 이것은 전열의 영향으로 분석하였다. Tham et al.(2002)은 실내의 공간을 두 구역으로 나누고 이를 다시 각 실별로 실내공기질(indoor air quality, IAQ)을 조사하고 측정 영역에 대한 오염물질의 환기정도를 체계적으로 분석하였다. 그 결과 내부의 배치와 구획의 설정에 따른 IAQ의 저하가 나타남을 보고하였고, Niu et al.(2002)은 칠러시스템(chilled system)을 사용한 공조시스템이 에너지의 사용량을 연간 44% 감소시킬 수 있음을 보고하였다. Williamson and Vortex(1996)은 균일한 흐름 속의 놓여있는 원형실린더 후류에 대한 기존연구를 체계적으로 정리하여 전이구역을 후류전이 영역($Re=190\sim 10^3$: Karman)와류의 불안정성으로 2차 와류가 형성, 전단층 전이 영역($Re=10^3\sim 2\times 10^5$: 박리점 근처에서 전단층의 불안정성이 형성) 그리고 2×10^5 이상의 영역을 경계층전이구역으로 분류하였다. Obara and Matsudaira(1998)는 인접한 두 개의 원주에서 피치비(H/d)에 따른 후류 유동특성을 측정하여 와도분포 및 유맥선을 분석한 결과 피치비 2.0이상에서는 인접원주간의 상호 간섭이 없는 결과를 얻었다. 그러나 인접원주의 하류에 형성된 와류가 매우 근접하여 있어 레이놀즈수의 변화에 따라 상호간섭이 나타날 수 있는 점이 지적된다. West and Apelt(1982)는 Reynolds수 $10^4\sim 10^5$ 사이에서 차폐비와 형상이 실린더 주위 유동에 미치는 영향에 대해 연구하고 차폐비가 6% 미만일 때는 마찰계수, 압력분포, Strouhal수 등에 거의 영향이 없음을 밝혔다. 김과 정(1991)은 역류의 측정과 원주의 근접후류의 난류 구조에 미치는 자유흐름 난류의 영향을 정성적 및 정량적으로 조사하기 위하여 10 mm 원주 하류에 형성되는 속도변동 상관의 변화 등을 SFP(split film probe)센서를 이용하여 측정 분석하였다. 그리고 평균속도가 0인 지점이 후류 중심선에서 $x/d=1.65$ 근방임을 밝히고 있다. 임 등(1998)은 레이놀즈수와 난류강도의 변화에 따라 원주실린더 주위의 흐름특성과 박리점이후의 유동구조에 대해 고찰하였다. 박리점은 보텍스셰딩으로 인해 발생하는 경계층 내 요동성분 위상차를 이용하는 방법을 택하였고 난류강도의 증가에 따라 박리점 이후 재순환류들이 상류로 이동함을 보였다. 조와 부(1989)는 일렬관군에 대해 유동가시화와 관의 표면압력측정시험 및 관 주위의 속도분포 등을 피치비에 따라 고찰하였다. 그리고 피치비가 감소함에 따라 평균 속도분포비(U/U_{∞})가 증가하는 결과를 얻었다.

개별분산공조에 관한 연구는 1990년대 이후 활발히 진행되고 있다.(태, 1994; 황과 김, 1995; 정과 조, 1999) 대형빌딩의

경우 여러 가지 방식의 시스템의 상용화되어 사용되고 있으나 신조선펀의 경우는 고가의 선박에서 선교 등에 복사열이 많은 특정구역이나 공공장소 등에서만 일부 적용되고 있는 실정이며 여객선이나 특수목적선의 경우는 현재 상용화 단계이다.

국내 대형 신조선의 경우 팬코일유니트의 소요량이 날로 증가하는 추세에 비추어 불 때 이에 대한 기술개발 및 다양한 규격의 국산화가 사실상 요구되는 실정이다. 이러한 필요성에 대해 이 연구에서는 개별분산 공조시스템 중에서 현재 박용으로 널리 탑재되고 있는 이등변관군 구조의 팬코일유니트 실물 장비를 연구모델로 선정하고 원주열의 후류특성을 PIV로 측정하여 속도분포와 내부유동특성을 고찰하였다.

2. 실험

실험에 사용한 소형회류수조의 전체길이는 3,000 mm이고 시험부의 유입단면은 가로(W), 세로(h) 300 mm이다. 0.1~1.0m/sec의 자유류 속도를 가지며 난류강도는 1.5% 이내로 유지되었다.

Fig. 1에서 실험장치의 전체 구성을 나타내고 있다. 가시화 장비는 크게 광원과 영상처리를 위한 이미지보오드 그리고 영상의 기록 장치로 구분할 수 있다. 실험에 사용된 광원은 수냉식 레이저(COHERANT사, MODEL : INNOVA 90-5, Argon-ion laser)의 빛을 크기 5 mm의 원통형렌즈를 통과시켜 피검각 약 60도로서 유동장의 상부에 두께 약 2 mm, 폭 180 mm의 시트라이트를 측정영역에 조사하였다. 영상은 고속 카메라(Photron사, 640x240픽셀, 흑백, 240 pps)로 유동장을 촬영한 연속 영상을 매초 30장의 비율로 재생하여 NTSC방식의 Hi-8 mm 카메라에 기록하고 이미지보오드를 이용하여 획득하였다. 실험에서 사용한 고체 추적입자는 지름 100 μm 정도의 PVC(poly vinyl chloride, CH₂CH(C1)) 백색 구형입자를 사용하였다. 실험에서는 입자의 선별을 위해서 용기 속에 입자를 분포시키고 수면에 있는 미소입자와 침강된 입자를 제외하고 공간에 일정시간 이상 부유하는 입자만을 선별하여 사용하였다. 원형실린더는 표면이 매끄러운 아크릴재질이며 직경(D) 10.5 mm, 축 방향의 길이(L) 300 mm이다.

벽면의 영향을 고려하여 영향을 받지 않도록 실린더의 형상비(aspect ratio, L/d)는 28.6, 차폐비(blockage ratio, D/W)는 3.5%로 제작하였다. 원주열의 좌표축은 평행하게 설치되어있는 실린더에서 y축 방향의 중앙부를 원점으로 하여 주유동의 방향을 x, 실린더 길이방향을 z, 주유동의 수직 방향이 y축으로 하였다. 측정 영역은 원점을 기준 하여 y축 방향 ±2D, x축 방향으로 8D이다. 피치비는 선박용 개별공조장치에 사용되는 팬코일 유니트의 관군 배치와 관련문헌(Kim et al., 2001)을 참고하여 2.2로 하였다. 시험에서 채택한 레이놀즈수는 유입속도와 원주 직경을 기준으로 $Re=1.5\times 10^3$ 에서 $Re=2.5\times 10^3$ 까지 $Re=10^2$ 의 간격으로 11가지이다. 상관영역은 41픽셀이며 탐색반경은 8픽셀이며 에러처리는 모든 격자에 대하여 발산 값을 계산하여 허용치를

초과했을 경우에 오류백터로 판별하였다.

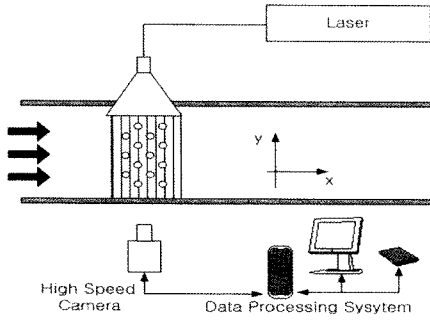


Fig. 1. Schematic arrangement of PIV system.

3. 결과 및 고찰

Fig. 2는 실험에 적용된 유동장에 대한 개략적인 유동형태를 보이고 있다. 내부열의 유동은 원주간의 간섭에 의해 복잡하며 주기적인 반복유동특성도 나타나므로 주로 실험적 연구에 의존하고 있다. 실제 가시화 실험에서도 이와 같은 주기성이 나타났으며 개별원주의 후류특성은 단일원주의 후류 유동과도 밀접한 유사함을 보였다. 상류로부터 유입된 흐름은 전방에 있는 원주 후미에 박리에 따른 와류영역이 형성되는 형태를 나타내었으며 공간적인 크기는 레이놀즈수에 따라 큰 변동은 나타나지 않았으나 주기성은 빨라지는 경향을 보였다. 이것은 후방에 있는 원주의 영향으로 판단되며 주기성은 원주 후류의 비정상 유동특성에 기인하는 것으로 추정된다. 유동가시화의 결과는 고속카메라를 이용하여 기록하였으며 CACTUS 2000으로 PIV 계측을 수행하였다. Fig. 3은 유동가시화의 결과를 1/120초 간격으로 나타낸 원시영상으로 설명의 편의를 위해 3열, 2열 및 1열의 후방에 수직선, 원형 그리고 사각으로 기준단면을 표시하였다. 가시화 영상을 관찰하여 보면 기하학적인 수직선상에서 원주사이의 흐름에 비정상특성을 나타내고 있음을 알 수 있다. 이러한 경향은 레이놀즈수가 증가할수록 크게 나타났으며 이것은 레이놀즈수가 증가할수록 이 영역에서 압력이 저하 및 유속상승이 커지고 후방의 원주의 영향을 받기 때문이다. 또한 전방의 원주로부터 박리된 작은 와류들이 이 영역에 합쳐져 매우 복잡한 비정상 흐름 특성을 보였다.

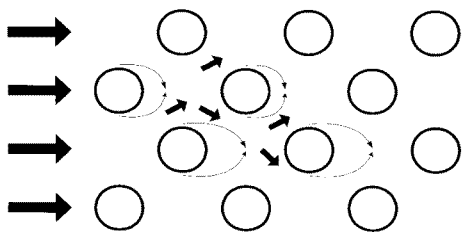


Fig. 2. Schematic diagram of the grooved channel.

Fig. 4는 레이놀즈수가 증가함에 따른 시간 평균의 속도분포이다. 가시화 실험 중 기록한 영상을 연속적으로 재생하여 샘플링 한 300회의 영상 중 3의 배수에 해당하는 영상을 선택하여 동일입자 추적을 행하여 얻은 순시 속도벡터를 산술 평균한 결과 원주 후류의 영역의 크기는 대체로 유사함을 보였다. 평균속도벡터분포를 보면 전체적으로 순간의 속도벡터 분포와 비교하여 정연한 모습을 보이고 있으며 와류의 형태 등이 확연하게 나타나 있다. Fig. 4(a)의 경우 $Re=1.5 \times 10^3$ 의 속도분포이다. 원주후류의 형태를 보면 칼만볼텍스의 시간평균 속도형태와 유사하며 $Re=2.1 \times 10^3$ 까지 유사한 경향을 보인다. $Re=2.1 \times 10^3$ 이상의 4열 이후 흐름형태는 대칭형 흐름패턴을 나타내었다.

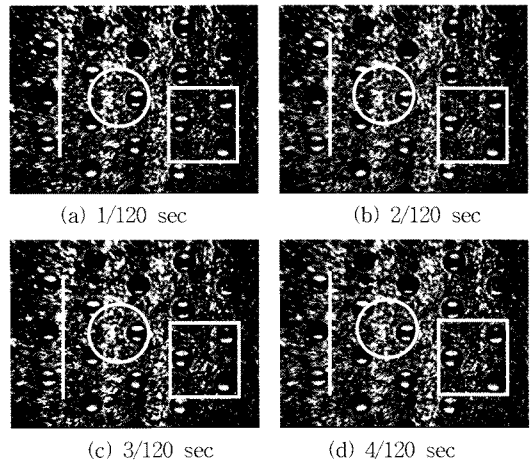
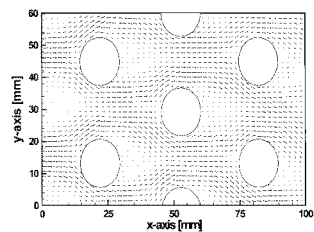
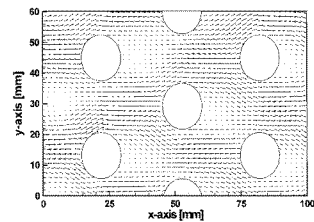


Fig. 3. Flow visualization by high speed camera.



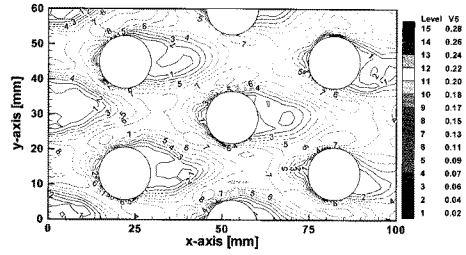
(a) $Re=1.5 \times 10^3$



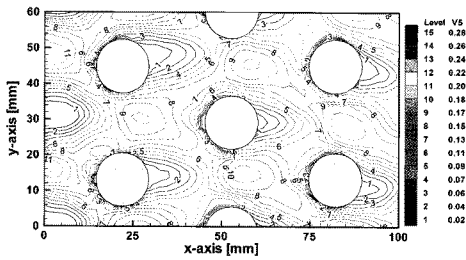
(b) $Re=2.1 \times 10^3$

Fig. 4. Distribution of velocity vector.

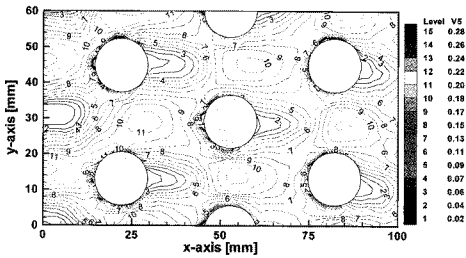
Fig. 5는 등속도선을 15단계로 구분해 등고선으로 표시하였다. $Re=2.1 \times 10^3$ 이상의 경우 원주열의 상하영역의 등속도분포가 유사하게 나타나고 있으며 흐름의 세기만 증가하고 있다.



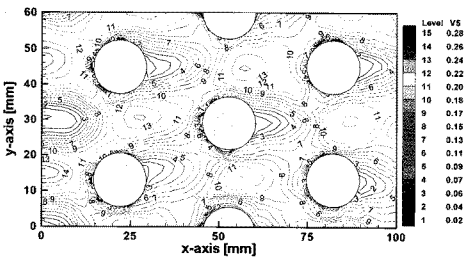
(a) $Re= 1.5 \times 10^3$



(b) $Re= 2.0 \times 10^3$

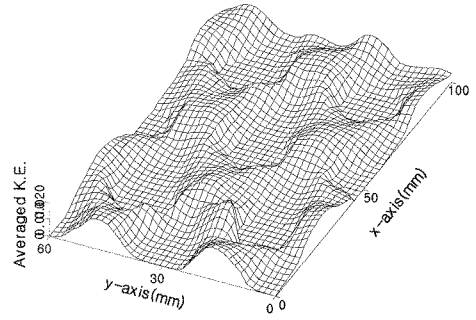


(c) $Re= 2.1 \times 10^3$

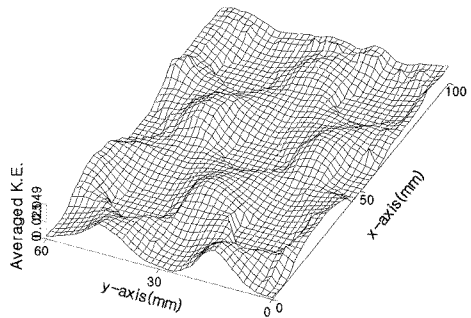


(d) $Re= 2.5 \times 10^3$

Fig. 5. Distribution of equi-velocity.



(a) $Re= 1.7 \times 10^3$



(b) $Re= 2.4 \times 10^3$

Fig. 6. Distribution of time-mean kinetic energy.

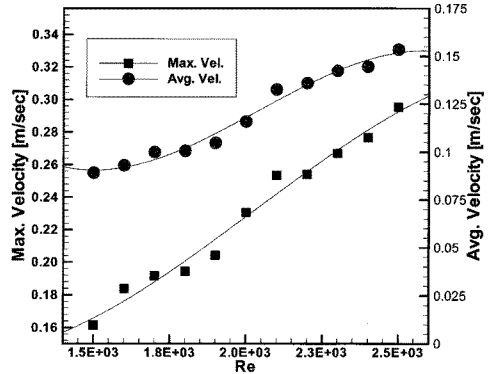


Fig. 7. Comparison of velocity profile on flow field.

등속도선의 숫자는 실제 속도를 나타낸다. 레이놀즈수가 증가할수록 동일 위치의 속도가 증가함을 알 수 있다. Fig. 5(d)에서 보면 원주사이의 중앙에서 하류 측으로 약 0.2D전후에 가장 높은 등속도선이 있는 것으로 확인된다. 이위치는 전 레이놀즈수의 범위에서 공통적으로 일치하며 가장 높은 유속을 보이는 곳이다. 유동장내에 가장 낮은 유속을 보이는 영역은 원주의

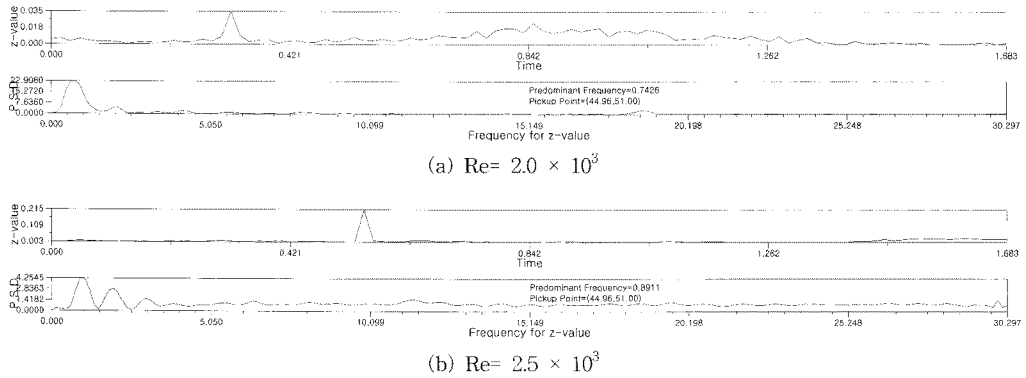


Fig. 8. Kinetic energy spectrum at the tube array's wake(pick up point $x=33.1\text{mm}$, $y=24.0\text{mm}$).

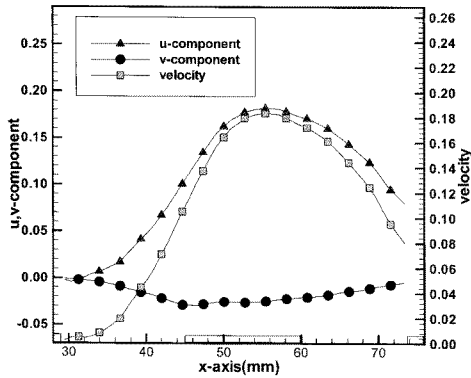


Fig. 9. Comparison of velocity component profile at $y=13.7\text{mm}$ ($Re = 2.0 \times 10^3$).

하류측 중앙부근이다.

Fig. 6은 평균 속도벡터에서 각 위치의 운동에너지를 3차원적으로 도시한 운동에너지 분포이다. Fig. 6(a)과 Fig. 6(b)의 z 축 스케일은 각각 0.20과 0.49로 약 2.45배의 차이를 보인다. 원주와 후류영역은 가운데가 가라앉은 모습으로 운동에너지의 분포가 나타나 있다. 레이놀즈수가 증가할수록 운동에너지의 크기는 비례적으로 증가하고 있다. Fig. 6(a) $Re=1.7 \times 10^3$ 이상에서는 후류의 영역과 원주 사이에 흐름이 형성되는 영역 사이의 경계가 다소 완만하며 원주를 중심으로 대칭적인 형태를 보이고 있다. 이것은 원주열의 흐름에서 피치비가 2.0 이상일 경우 상호간의 간섭이 미약해지는 결과(Obara and Matsudaira, 1998)와 일치한다. 그러나 Fig. 6(b) $Re = 2.4 \times 10^3$ 전후의 레이놀즈수 이상에서는 다시 경계면의 변화가 급격하게 나타나고 있다. 이것은 피치비에 따른 원주후류간의 간섭이 레이놀즈수의 변화에 따라 영향을 받기 때문으로 추정되며 이에 관해서는 차후 면밀한 검토가 필요하다.

Fig. 7은 계측 유동장의 속도분포에서 최고속도와 산술평균한 속도를 비교하여 나타내고 있다. 레이놀즈수가 $Re = 1.0 \times 10^2$ 이 증가할 때 최고속도 및 평균속도의 증가율은 약 16% 전후이며 증가율도 거의 일정하다. 계측 범위 내 유동장의 평균속도와 최고속도의 비는 약 1.9 ± 0.1 이었다. 따라서 속도특성은 레이놀즈수에 크게 의존하는 것으로 판단된다.

Fig. 8은 계측영역의 $x=44.96\text{mm}$ 및 $y=51.0\text{mm}$ 위치에서 계측테이터를 이용해 대표주파수를 구한 결과이다. $Re = 2.0 \times 10^3$ 에서 0.74이며 $Re = 2.5 \times 10^3$ 의 경우 0.89 전후였다. 이것은 대표주파수가 일정유속의 범위 내에서 레이놀즈수에 비례하기 때문이며 주기는 레이놀즈수의 증가에 따라 주기는 약 4% 전후의 증가율로 빨라질 것으로 예측 할 수 있다. 따라서 공간적인 측면에서 후류의 크기는 레이놀즈수에 크게 영향 받지 않으나 속도 및 주기는 레이놀즈수에 큰 영향을 받고 있다.

Fig. 9는 $Re = 2.0 \times 10^3$ 의 평균속도유동장의 경우 $y=13.7\text{mm}$ 의 위치에서 하류방향으로 수평속도성분, 수직속도성분 및 속도성분의 차이를 나타낸 것이다. 하부의 직사각형의 표시는 상하 및 전후방의 원주의 위치이다. 수직속도성분의 최저점은 원주 전방이다. 수평속도성분 및 속도성분의 최고치는 원주의 중앙에서 약 0.2D 하류로 치우쳐 있으며, 최고속도를 정점으로 좌우 대칭의 분포를 보이고 있다.

4. 결론

엇갈림 관군배열 원주열은 공조기의 팬코일유닛의 열교환기의 내부 유동장으로서 개별분산공조기의 성능에 큰 영향을 미치는 장치이다. 이 연구에서는 실제 팬코일유닛의 열교환기 내부 형상을 모사한 유동장을 대상으로 고속카메라를 이용한 유동 가시화 및 PIV 상용소프트로 전 유동장의 속도를 계측하여 내부유동 특성을 고찰하였다. 그 결과, 팬코일유닛의 후류 유동은 공간적으로 원주 후류 영역과 원주 사이 영역으로 크게 구분되며 속도특성은 레이놀즈수에 따라 큰 변화를 보였다. 원주사이영역의 유속은 다른 영역보다 매우 빠르고 유속의

방향도 각 원주의 중심선을 잇는 선에 거의 수직인 방향이다. 연구범위 내에서는 레이놀즈수가 $Re=10^2$ 증가 할 경우 계측영역 전체의 속도의 증가율은 약 16%전후이며 증가율도 거의 일정하다. 또한 원주 후류의 비정상 유동특성에 기인하는 주기성은 레이놀즈수가 $Re=10^2$ 증가 할 경우 약 4% 전후로 빨라지는 경향을 보였다. 상류로부터 유입된 흐름은 전방에 있는 원주 후미에 박리에 따른 와류영역이 형성되는 형태를 나타내었으며 후방에 있는 원주의 영향으로 공간적인 후류의 크기에 미치는 레이놀즈수의 영향은 크지 않았다.

참 고 문 헌

- [1] 김경천, 정양범(1991), 원주의 근접후류에 대한 자유흐름 난류강도의 영향, 대한기계학회 논문집, Vol. 15, No. 6, pp. 2062-2072.
- [2] 임용섭, 손동기, 이준식, 양경수(1998), Reynolds수와 난류강도의 변화에 따른 실린더주위 유동 박리점의 거동에 관한 실험적 연구, 대한기계학회 논문집, Vol. 22, No. 7, pp. 889-898.
- [3] 정기범, 조동우(1999), 인텔리전트빌딩에서 개별공조시스템의 최근 동향, 냉동공학회지, Vol.28, No.3, pp.196-202
- [4] 조석호, 부정숙(1989), 일렬관군에서 난류 후류특성에 관한 연구, 대한기계학회 논문집, Vol. 13, No.5, pp. 1023-1031.
- [5] 태춘섭(1994), 개별 분산공조시스템의 고찰, 공기조화·냉동공학회지, Vol.23, No.1, pp. 37-52.
- [6] 황원택, 김세훈(1995), 공간절약을 위한 천장형 분산 공조기, 냉동공학회지, Vol.24, No.6, pp. 628-634.
- [7] Avisar Barak, Lev Shemer and Abraham Kribus(2001), Measurements of velocity fields in finite cylinder arrays with and without tip clearance, Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 24, pp. 157-167.
- [8] Buyruk(2002), E. Numerical study of heat transfer characteristics on tandem cylinders, inline and staggered tube banks in cross-flow of air, International Communications in Heat and Mass Transfer, Vol. 29, pp. 355-366.
- [9] Kim M. H. and Clark W. Bullard(2002), Air-side performance of brazed aluminum heat exchangers under dehumidifying conditions, J. Refrigeration, Vol. 25, pp. 924-934.
- [10] Kim M. H., B. Youn and Clark W. Bullard(2001), Effect of inclination on the air-side performance of a brazed aluminum heat exchanger under dry and wet conditions, J. Heat and Mass Transfer, Vol. 44, pp. 4613-4623.
- [11] Niu J. L., L. Z. Zhang and H. G. Zuo(2002), Energy savings potential of chilled-ceiling combined with desiccant cooling in hot and humid climates, Energy and Buildings, Vol. 34, pp. 487-495.
- [12] Obara H. and Y. Matsudaira(1998), Vortex Generating Process behind a Pair of Circular Cylinder, Proc. of 4th KSME-JSME Fluids Eng. Conf., pp. 141-144.
- [13] Scholten J. W. and D. B. Murray(1998), Heat transfer and velocity fluctuations in a staggered tube array, International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol. 19, pp. 233-244.
- [14] Tham K. W., S. C. Sekhar and David Cheong(2002), Indoor air quality comparison of two air-conditioned zones served by the same air-handling unit, Building and Environment, Vol. 37, pp. 947-960.
- [15] Williamson C. H. and K. Vortex(1996), Dynamics in the Cylinder Wake, Annu. Rev. Fluid Mech., Vol. 28, pp. 477-539.
- [16] West G. S. and C. J. Apelt(1982), The Effects of Tunnel Blockage and Aspect Ratio on the Mean Flow Past a Cylinder with Reynolds Numbers Between 10^4 and 10^5 , J. Fluid Mech., Vol. 114, pp. 361-377.

원고접수일 : 2009년 02월 17일

원고수정일 : 2009년 03월 02일 (1차)

: 2009년 06월 19일 (2차)

게재확정일 : 2009년 06월 25일