간격을 갖는 원주열의 후류특성에 관한 연구

◦김 준 호*, 최 민 선**, 조 대 환**, 이 경 우**

A Study on Wake Flow behind a pair of Circular Cylinders with gap

Junho Kim*, Minsun Choi**, Daehwan Cho**, Keongwoo Lee***

* 목포해양대학교 대학원 기관공학과
** 목포해양대학교 기관공학부
*** 목포해양대학교 해양시스템공학부

Abstract : This experimental study investigates the wake flow behind a pair of cylinders displaced normal to a free stream. In this experiment, the principal aim is to investigate the transition mechanism of the large vortex generating process in the wake having unique vortex shedding pattern. associated with the gap difference between the cylinders. The detailed visualization is carried out using the PIV measurement. The transition mechanism of the large generating vortex is clarified by showing the streak lines. the vorticity and the statistical fluctuating velocity distributions.

Key words: Cylinder Arrays(원주배열), Free stream(자유유동), Flow Separation(유동박리), Flow Visualization(유동가시화), Particle Image Velocimetry(입자영상유속계)

1. 서론

다수원주 주위의 유동장 해석은 여러 공학적 관점에서 매우 중요하며 학문적으로는 유동의 정체, 경계층의 발달, 유동의 박리, 난류로의 천이 등 유체공학 분야에서 대두되는 기본적인 물리 현상들을 거의 모두 포함하고 있으므로 오래 전부터 연구의 대상이 되어왔다. 또한 열교환기, 건조기 연통의 배치 등 실용적으로 응용되고 있는 대상일 뿐만 아니라 비정상유동에 대한 수치해석의 모델로 사용되기 때문에 많은 연구자들에 의하여 최근까지 활발히 연구되고 있다.

Williamson[1]은 균일한 흐름 속의 놓여있는 원형실린더 후류에 대한 기존연구를 체계적으로 정리하여 천이구역을 후류천이 영역(Re=190~10^3 : Karman와류의 불안정성으로 2차 와류가 형성), 전단층 천이 영역(Re=10^3~2×10^5 : 박리점 근처에서 전단층의 불안정성이 형성) 그리고 2×10^5이상의 영역을 경계층천이구역으로 분류하였다.

Obara[2]는 인접한 두 개의 원주에서 피치비(H/d)에 따른 후류 유동특성을 계측하여 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 등[3]은 Reynolds수 10^4~10^5사이에서 차폐비와 형상이 실린더 주위 유동에 미치는 영향에 대해 연구하고 차폐비가 6% 미만일 때는 마찰계수, 압력분포, Strouhal수 등에 거의 영향이 없음을 밝혔다. Gerrard[4]는 원주 후방에 형성되는 와류의 entrainment 현상과 역류가 와류쉐딩 주파수에 미치는 영향에 대해 논의하였다. Kim 등[5]은 역류의 측정과 원주의 근접후류의 난류 구조에 미치는 자유흐름 난류의 영향을

정성적 및 정량적으로 조사하기 위하여 10mm 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.

Lee 등[6]은 레이놀즈수와 난류강도의 변화에 따라 원주실린더 주위의 흐름특성과 박리점이후의 유동구조에 대해 고찰하였다. 박리점은 보텍스쉐딩으로 인해 발생하는 경계층내 요동성분 위상차를 이용하는 방법을 택하였고 난류강도의 증가에 따라 박리점이후 재순환류들이 상류로 이동함을 보였다. Cho 등[7]은 일렬관군에 대해 유동가시화와 관의 표면압력측정시험 및 관 주위의 속도분포 등을 피치비에 따라 고찰하였다. 그리고 피치비가 감소함에 따라 평균속도분포비(U/U_∞)가 증가하는 결과를 얻었다.

원형실린더 주위의 유동이 기하학적으로 2차원이라는 점에도 불구하고 대단히 복잡하며 Reynolds수와 주유동의 난류강도, 차폐비, 형상비, 표면조도영향 등 고려해야할 변수들이 많다. 이 연구에서는 강제송풍식 건조기에 사용되는 연관군(煙管群) 주위의 유동특성을 해석하기 위한 기초자료로서 피치비에 따른 원주열의 후류특성 조사를 목적으로 하였다. 이를 위해 유동가시화와 PIV[5]계측을 하였으며 시계열의 비정상유동특성과 인접 원주사이에서 속도분포를 조사하였다. 간격을 갖는 원주열의 하류 유동특성은 피치비 2.2이하에서 인접원주의 영향이 나타나며 x/d=2.0의 위치에서 평균속도분포비가 크게 증가하였다.

2. 실험장치 및 PIV계측

2.1 실험장치

실험에 사용한 소형회류수조의 전체길이는 3,000 *mm*이고 시험부의 유입단면은 가로(W), 세로(h) 300 *mm*이다. 0.3~0.5m/sec의 자유류 속도를 가지며 난류강도는 1.5% 이내로 유지되었다. 원형실린더는 표면이 매끄러운 아크릴재질이며 직경(D) 10.5mm, 축 방향의 길이(ℓ) 300mm이다. 벽면의 영향을 고려하여 실린더의 형상비(aspect ratio, ℓ/d)는 28.6, 차폐비(blockage ratio, D/W)는 3.5%로 하였다.

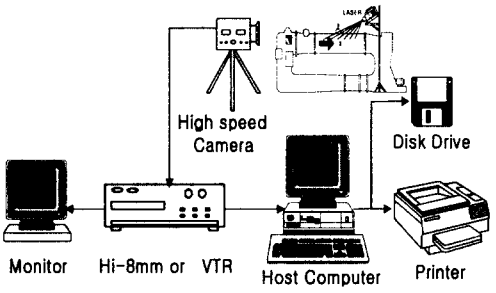


Fig. 1 Schematic arrangement of PIV system

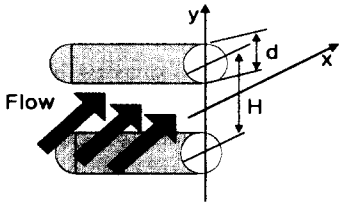


Fig.2 Coordinate system

그림 1에서 실험장치의 전체 구성을 개략적으로 보이고 있다. 가시화를 위한 유동장 조명은 5W 출력의 Argon-Ion 레이저와 실린드리컬렌즈가 연결된 광파이버를 이용하고 고속카메라로 촬영하였으며 PIV 시스템은 CACTUS'2000이다.

2.2 PIV 계측

유동장의 가시화는 비중 1.02 전후의 PVC 입자(직경90~150㎛)를 유동장 내에 주입하고 2차원 단면 광을 수조의 상부에 조사하여 산란된 입자영상을 고속카메라로 획득하는 방법을 사용하였다. 고속카메라는 640×480 픽셀 해상도에 픽셀당 8비트의 그레이 레벨을 가지며 부분해상도에서는 초당 600장의 속도로 연속촬영이 가능하다.

그림2는 실험에 적용된 원주열의 설치 및 좌표축을 나타내고 있다. 평행하게 설치되어있는 실린더에서 y축 방향의 중앙부를 원점으로 하여 주유동의 방향을 x, 실린더 길이방향을 z, 주유동의 수직 방향이 y축 이다. 계측 영역은 원점을 기준 하여 y축 방향 ±2D, x축 방향으로 8D이다. 표1에 가시화와 PIV계측 그리고 계측에 관련된 실험조건을 정리하였다. 피치비는 건조기의 구조와 관련문헌[4][7]을 참고하여 2.0, 2.2 및 2.4로 하였으며 원주직경을 기준으로 한

Table 1 Experimental Condition

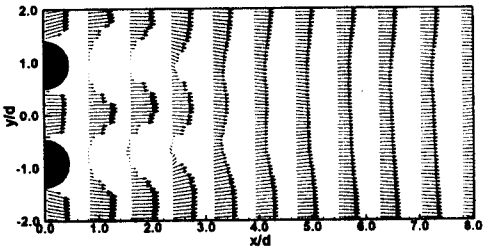
	Item	Specification
Visualization Equipment	Image board	DT3155 (640 x 480 Pixel, B/W)
	Light source	5W Argon-Ion Laser, λ=514μm
	Sheet light	Cylindrical Lens & Fiber Line, about 1.5mm
Measuring condition	Gap ratio(H/d)	H/d=2.0, H/d=2.2, H/d=2.4
	Reynolds Number	3.0×10^3, 5.0×10^3
	Particle	PVC(Specific Gravity:1.02, 90~150μm)
	Resolution	1/400 sec.(High Speed Camera, Photron, B&W)
Image processing	Calculation Time	20 second/Frame(200MHz, Pentium II)
	Image Record	Hi-8mm, Sony, Model:Pro5000
	Data for Time-mean	100~300 Frame(Random Acquire)
	Identification	CACTUS'2000(grey-level cross correlation algorithm)
	Error Vector(%)	Under 0.5 %/Frame, Average : about 0.15%

레이놀즈수는 3×10^3, 5×10^3이다. 상관영역은 35×35픽셀이며 탐색반경은 8픽셀이다. 에러처리는 모든 격자에 대하여 발산값을 계산하여 허용치를 초과했을 경우에 오류벡터로 판별하였다. 표1에서 오류벡터의 비율은 최종적으로 선별된 개수에 대한 백분율이다.

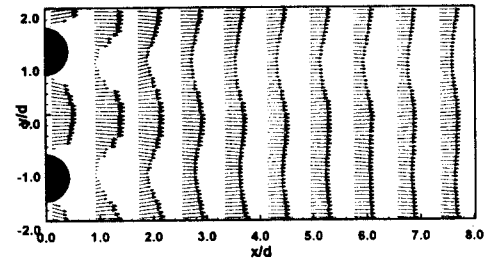
3. 결과 및 고찰

그림3은 $Re=5\times10^3$에서 피치비가 달라졌을 때의 속도분포를 보이고 있다. 그림3(b)는 H/d=2.4의 결과이다. 상부의 실린더 후류의 속도분포가 단일 실린더와 유사하게 나타내고 있으며 원주후류 중심선에서 속도가 영이 되는 지점이 x/d=1.6근방에서 형성되고 있다. 또한 x축 방향의 후류영역도 x/d=8.0 이상까지 평활 되지 않고 길게 진행되고 있으며 y 축을 중심으로 거의 대칭적인 구조를 나타내고 있음을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 Kim 등[5]이 실험한 결과와 일치한다. Obara[2]는 원주열 후류영역을 LDV로 계측하고 H/d=2.0이상에서 인접한 두 개의 원주의 하류에서 나타나는 와도의 분포가 대칭적으로 형성되고, H/d=1.3에서는 상호간의 간섭으로 하나의 장애물과 같은 유동특성이 나타남을 보고하고 있다.

그림3(a)는 H/d=2.0의 결과이다. 전체적인 분포는 그림3(b)와 유사하나 y/d=0 의 선상에 나타난 속도분포는 오히려 증가하고 있다.



(a) H/d=2.0, $Re=5\times10^3$

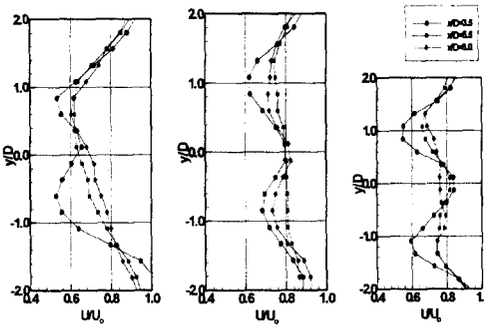


(b) H/d=2.4, $Re=5\times10^3$

Fig.3 Velocity profile distribution

이것은 동일한 레이놀즈수에서는 관군 최소단면 측의 평균속도는 같으므로 피치비가 작을수록 상류 측의 자유흐름 평균속도도 작아지기 때문이다.

그림 4는 시간평균속도분포이다. 실험에 채택한 각 피치비에서 y/d -2.0~2.0까지의 수평속도 속도성분을 x/d=3.5, 5.5 및 8.0에서 나타내었다.



(a)H/d=2.0 (b)H/d=2.2 (c)H/d=2.4

Fig.4 Compare of velocity distribution along the x-direction($Re=3\times10^3$)

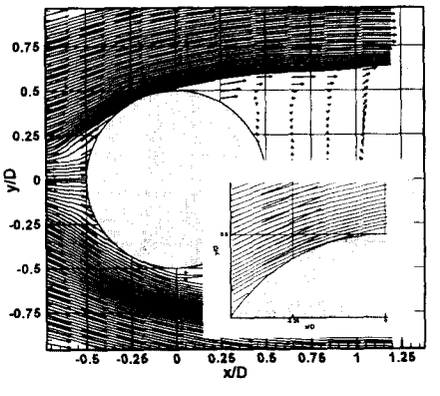
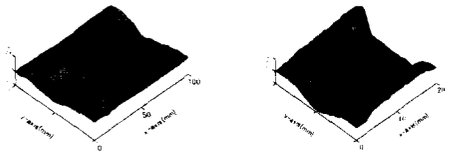


Fig.5 Streamlines around upper cylinder

피치비가 큰 H/d=2.4인 경우에는 평균속도의 분포가 y축을 중심으로 유사하게 나타나고 있으며 쌍봉형태를 보이고 있다. 따라서 원주열을 이루는 2개의실린더 모두 단일실린더와 같이 칼만볼텍스에 의한 와류유출이 존재하고 있다. 그러나 그림 4(a)의 경우 x/d=3.5에서만 쌍봉형태의 속도분포를 보이고 있다. 이것은 이피치비에서도 불안정하지만 칼만볼텍스에 의한 와류유출이 있을 것으로 판단된다.

그림5는 H/d=2.0, $Re=3.0\times10^3$에서 상부 실린더 주위의 유선을 나타낸 것이다. 압력 구배가 순 압력 구배인 경우에는 유동방향으로 작용하는 압력이 입자의 앞에서 막는 압력보다 크므로 유체입자는 압력이 낮은 쪽으로 미끄러져 내려가게 된다.



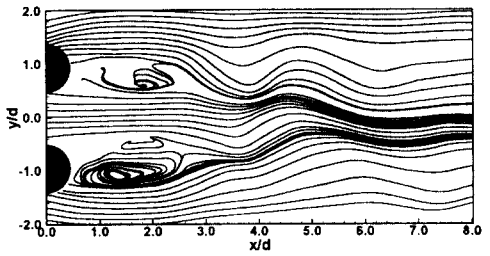
(a) H/d=2.0 (b) H/d=2.4

Fig.6 Average kinetic energy distribution

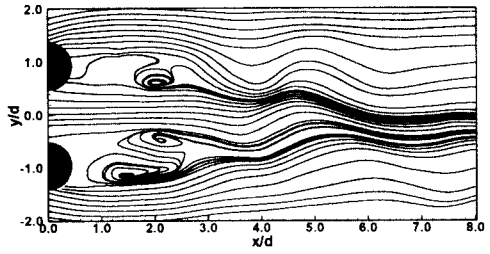
역압력구배인 경우에는 경계면에서 입자는 정지하게 되고 뒤에서 유입되는 유체에 밀려 결국은 경계면에서 이탈되는 현상이 나타나게 된다. 이러한 현상을 박리라고 하며 이러한 박리점은 여러 가지 방법으로 구할 수 있다. 열선을 이용하여 실린더 경계층 내에서 속도를 측정하여 구할 수도 있고 벽면 전단 응력의 최소 값으로 판정할 수도 있으며 오일 , 연기, 수소거품을 이용한 가시화의 방법으로도 계측이 가능하다. 또한 압력계수의 변곡점에서도 박리점을 정하는 기법도 있다. 이 연구에서는 유선을 이용하여 박리점을 구하는 방법을 검토하였다. 이것은 PIV 계측이 전유동자의 속도를 임의의 한 시점에서 구할 수 있는 장점을 갖기 때문이다. 그림4에서 박리점은 83° 전후의 값으로 추정된다. 그러나 카메라 각도의 편향 및 여러 가지 불규칙성으로 추후에 추가적인 검토가 필요하다.

그림6은 시간평균의 운동에너지 분포이다. 피치비에 따른 시간평균 운동에너지의 분포에서 피치비 H/d=2.0의 경우는 인접한 실린더의 영향이 남아 있음을 알 수 있다.

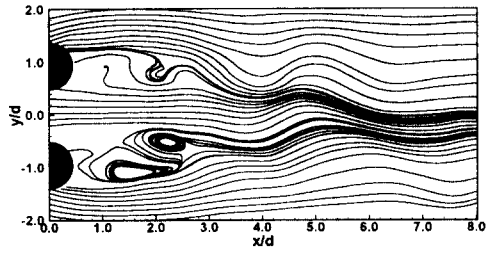
그림7은 $Re=3.0\times10^3$, H/d=2.0, 일 때 원주열의 후류에 박리가 일어나기 시작하여 와류가 형성되고 발달하는 과정을 보여주고 있다. PIV계측에서 얻은 속도벡터에 유선을 도시하여 1/200초 간격으로 나타내었다. 그림7(a)에서 하부실린더의 하류에 박리현상이 나타나서 유선이 폐곡선으로 되며 이 영역에서 와류가 형성되고 있다(7b, 7c 참조). 그림7(d)에는 형성된 와류가 시간진행에 따라 점차 소멸 되어 가는 것을 알 수 있다. 이러한 과정은 상부실린더의 하류에도 발생하고 있다(7a, 7b, 7c 참조). 이러한 현상은 인접관의 최소단면을 통과하는 분류의 편향흐름의 영향으로 판단된다. 이 논문에 나타내지는 않았지만 가시화의 결과를 관찰하면 이러한 편향흐름의 방향도 주기적으로 반복되었다.



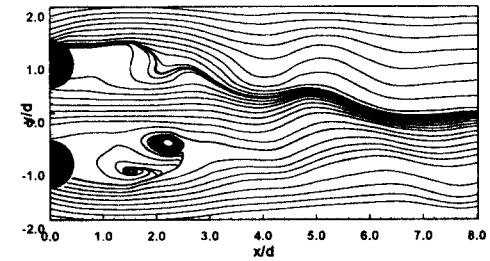
(a) T = 1/200



(c) T = 2/200



(c) T = 3/200



(d) T = 4/200

Fig. 7 Instantaneous Streamlines

4. 결론

이 연구에서는 강제송풍식 건조기에 사용되는 연관군(煙管群) 주위의 유동특성을 해석하기 위한 기초자료로서 피치비에 따른 원주열의 후류특성 조사를 목적으로 하였다. 이를 위해 유동가시화와 PIV계측을 하였으며 시계열의 비정상유동특성과 인접 원주사이에서 속도분포를 조사하였다. 간격을 갖는 원주열의 하류 유동특성은 피치비 2.2이하에서 인접원주의 영향이 나타나며 x/d=2.0의 위치에서 평균속도분포비가 크게 증가하였다. 피치비가 큰 H/d=2.4에서는 평균속도의 분포가 y축을 중심으로 유사하게 나타났으며, 2개의실린더 모두 단일실린더와 같이 칼만볼텍스와 유사한 와류유출 현상이 존재하였다.

참고문헌

[1] C.H.K.Williamson, "Vortex Dynamics in the Cylinder Wake," Annu. Rev. Fluid Mech., Vol. 28, pp.477-539, 1996

[2] H.Obara and Y.Matsudaira, "Vortex Gerating Process behind a Pair of Circular Cylinder'" Proc. of 4th KSME-JSME Fluids Eng. Conf., pp.141-144, Tokyo, 1998

[3] G. S. West and C. J. Apelt, "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, 1982

[4] J.H.Gerrard, "The Mechanics of the Formation region of vortices behind Bluff bodies," J. Fluid Mech. Vol.25, part2, pp.401-403, 1966

[5] 김경천, 정양범, "원주의 근접후류에 대한 자유흐름 난류강도의 영향," 대한기계학회 논문집, Vol. 15, No. 6, pp. 2062- 2072. 1991

[6] 임용섭, 손동기, 이준식, 양경수, "Reynolds수와 난류강도의 변화에 따른 실린더주위 유동박리점의 거동에 관한 실험적 연구," 대한기계학회 논문집, Vol. 22, No. 7, pp. 889-898. 1998

[7] 조석호, 부정숙, " 일렬관군에서 난류 후류특성에 관한 연구", 대한기계학회 논문집, Vol. 13, No.5, pp. 1023-1031. 1989

[8] 이영호, 최장운, "해설-PIV의 분류 및 원리," 대한기계학회지, Vol. 36, No. 12, pp. 1146-1162. 1996