

고속 PIV계측에 의한 실린더 근접후류 공진 유동 가시화

송 치 성

Visualization of Vortex Lock-on to Oscillatory Incident Flow in the Cylinder Wake Using Time-Resolved PIV

C-S, Song

Key words : Streamwise vortex(주유동 방향 와류), Lock-on(공진), Oscillatory Flow (진동 유동), Wake-Transition(후류 천이), Time-Resolved PIV(고속 PIV)

Abstract

Vortex lock-on or resonance behind a circular cylinder is visualized using a time-resolved PIV when a single frequency oscillation is superimposed on the mean incident velocity. For vector processing, a cross-correlation algorithm in conjunction with a recursive correlation and interrogation window shifting techniques is used. Measurements are made of the Karman and streamwise vortices in the wake-transition regime at Reynolds number 360. When lock-on occurs, the vortex shedding frequency is found to be half the oscillation frequency as expected from previous experiments. At the lock-on state, the Karman vortices are observed to be more disordered by the increased strength and spanwise wavelength of the streamwise vortices, which leads to a strong three-dimensional motion.

기 호 설 명

D : 실린더 직경
 f_n : 자연 방출 주파수
 f_o : 가진 주파수
 f_s : 와류 방출 주파수
U : 자유류 속도
 x, y, z : 주유동, 수직, 길이 방향 좌표
 Γ_x : 주유동 방향 순환
 ω_x : 주유동 방향 와도 성분

1. 서 론

원형실린더 후류의 보텍스 형성 및 발달과정은 주기적이면서도 매우 복잡한 구조를 가지고 있어 방대한 연구들이 수행되었다.^{1,2)} 이러한 연구결과들을 종합하여 Williamson³⁾은 그의 review 논문에서 넓은 범위의 레이놀즈수에서의 유동 특성에 대하여 논하였는데, 특히 레이놀즈수 190에서 1000까지를 후류 천이(wake transition) 영역으로

* 회원, 한국기계연구원 환경설비연구부

분류하면서 레이놀즈(Reynolds)수와 스트로할(Strouhal)수의 관계에서 2개의 불연속적인 점이 존재하고 불안정성이 증가하여 와류가 3차원 구조를 가지고 있음을 보였다. 이 두 개의 불연속점은 레이놀즈수 190 근처에서 A 모드, 260 근처에서 B 모드로의 전환하는 점으로, 두 모드는 2차 와류(secondary vortex)의 공간적 구조 및 불안정성 발생 원리에 있어 차이를 보인다. 이러한 와 구조의 발달과정에 대한 정량적 예측은 실린더 후류 유동이 비정상적이며 강제 유동이 아닌 자연 발생적이라는 점에서 매우 어려운 일이다. 또한 와류 형태의 임의적인 변화 가능성이 있어 기존의 열선유속계와 LDV 같은 점 측정방법으로는 전체적인 유동 구조를 파악하기에 한계를 지니고 있다.

한편, 실린더가 진동하는 주유동 속에 놓여 있을 경우 진동유동의 주파수와 와 방출 주파수 사이에서 공진이 일어날 가능성이 있으며(4), 이 때 항력 및 양력의 진폭이 증가하여 구조물의 파괴를 초래할 수 있다. 공진이 발생하면 실린더 후류의 와가 강제 진동의 주파수에 동기화되어 형성되는데, 이러한 공진 현상을 흔히 lock-on이라고도 표현하며 이에 따른 많은 연구들이 이루어져 왔다. Barbi 등(5)이 진동하는 입구 유동에서의 lock-on 발생에 대하여 최초로 언급하였으며, 입구 진동 유동의 주파수가 자연 발생적 와 방출 주파수(Natural shedding frequency)의 두 배 근처에서 공진이 일어난다고 하였다. 비슷한 시기에 Armstrong 등(6-7)은 원형, 평판, D 형상의 구조물에서 진동하는 입구 유동의 영향에 대하여 고찰하였으며, 진동 유동의 진폭이 증가할수록 공진이 나타나는 주파수 영역이 증가함을 보였다. 또한 그들은 난류 유동에 대한 실험을 통하여 공진이 발생하면 Karman 와류의 강도 및 수직방향 거리가 증가한다고 밝혔다. 최근 PIV 계속 기법의 발달과 함께 와 구조의 공간적 분포형태에 대한 연구가 이루어지고 있다. Chyu와 Rockwell(8)은 난류 유동에서의 주유동 방향 와의 형태를 제시하였고, Wu 등(9)은 종방향 와 구조를 계속하였다. 하지만 이들의 연구는 정상 입구 유동에 대하여 고찰되었으며, 진동하는 입구 유동에서의 후류 유동장에 대한 PIV 계속은 아직 보고되지 않았다.

본 연구에서는 2장에서 설명한 고속 PIV 계속 기법을 이용하여 x-y 평면에서 나타나는 1차 Karman 와류뿐만 아니라 y-z 평면에서 나타나는 2차 와류를 계속하여, 진동하는 입구 유동에서 공진이 발생하였을 때 근접후류의 3차원 유동을 두 가지 단면에서 각각 가시화하고 그 특성을 파악하고자 한다. 모든 결과는 z방향 특성 길이가 1D 정도로 작은 스케일의 2차 유동이 존재하는 레이놀즈수 360(B 모드)에 대하여 제시되며, 공진 발생으로 인한 Karman 와류와 2차 와류의 거동을 정상 입구 유동에 대한 결과와 비교 분석하고자 한다.

2. 실험 장치

실린더 후류 유동장 계속은 수통에서 이루어졌으며, 물에 의한 부식을 방지하기 위하여 모든 재료는 아크릴과 스테레스 스티로로 제작되었다. 실험부의 크기는 가로 15 cm, 세로 10 cm, 깊이가 100 cm이다. 펌프에서 발생하는 압력 요동을 줄이기 위하여 서지 탱크를 설치하였으며, 유동 안정화를 위한 챔버와 6:1 contraction을 두었다. 30 - 100 mm/s의 자유류 속도를 가지며 난류강도는 1.5% 이내로 유지되었다. 원형 실린더는 5 mm 직경의 유리봉으로 제작되었으며 형상비(L/D)는 30이다. 좌표계는 Fig. 1에서 나타낸 바와 같이 실린더 중심을 원점으로 하여 주유동 방향을 x, 실린더 길이 방향을 z, 이에 수직인 방향을 y로 두었다.

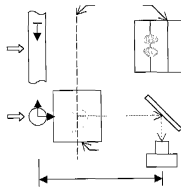


Fig. 1 Schematic of a three-dimensional field of view for PIV measurements on the cylinder wake in the oscillatory flow.

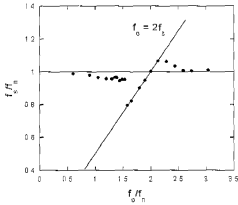
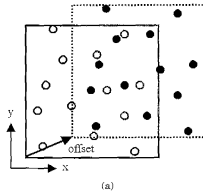


Fig. 2 Frequency response of vortex shedding according to the oscillation frequency.

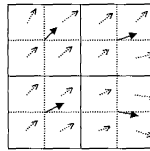
진동 유동은 수동의 시뮬부 하류에서 3개의 서티를 회전시킴으로써 구현하였다. 각각의 서티는 두 개의 판으로 이루어져 있으며, 등간격으로 놓여있는 수직봉에 부착되어 있다. 서티의 회전은 타임벨트를 통하여 AC 서보모터에 의하여 구동된다. 따라서 서티의 회전에 의한 유로의 개폐는 시뮬부 상류 방향으로 진동하는 압력파를 형성하여 진동 유동을 발생시키게 된다. 이때 진동 유동의 주파수는 서티 회전 주파수의 2배로 나타난다. 이상의 진동 유동 발생 장치는 Armstrong 등(6)이 사용한 기법과 유사하다. 진동 유동의 진폭은 주파수에 따라 조금씩 다르게 나타나나 평균 유속에 대하여 4% 이상으로 기존 연구(5)에 의하면 공진이 일어나기에 충분한 크기를 가지고 있다. 진폭은 속도 신호의 푸리에 시리즈 계수로부터 결정하였고, 유동의 비선형 특성에 의해 가진 주파수의 배수에 해당하는 성분들을 포함하고 있으나 그 영향은 미약하다.

본 연구에서 계속된 유동 영역은 Fig. 1과 같이 Karman 와류가 나타나는 x - y 평면과 주유동 방향 2차 와류가 나타나는 y - z 평면으로 주어지며, y - z 평면의 계측에서는 먼 하류($x/D > 40$)에 거울을 설치하여 90도로 반사된 영상을 이용하였다. 정상 및 진동 유동에서 측정된 와류 방출은 레이놀즈수 360의 후류원이 영역이며, 각 측정 단면의 크기는 x - y 평면에 대하여 $0 < x < 4.6D$, $-2D < y < 2D$ 이고 y - z 평면에 대하여는 $-1.5D < y < 1.5D$, $0 < z < 3.4D$ 이다. 진동하는 입구 유동에 대한 와류 방출의 공진을 검증하기 위하여 Fig. 2에 나타낸 바와

같이 가진 주파수 (oscillation frequency)를 변화시키면서 방출 주파수의 변화를 관찰하였다. 여기서 f_n 는 자연 방출 주파수(natural shedding frequency)로서 가진이 없는 정상 입구 유동에 대하여 발생하는 방출 주파수이고, f_s 는 진동 입구 유동에 대하여 나타나는 와류 방출 주파수(vortex shedding frequency)이다. 그리고 f_0 는 가진 주파수를 의미한다. 이 그림에서 와류 방출은 가진 주파수가 $1.5 < f_s/f_n < 2.2$ 범위에 있을 때 $f_s/f_0 = 0.5$ 를 유지하면서 공진(lock-on)이 발생함을 볼 수 있다. 그러나 공진 영역 밖에서는 가진 주파수와 관계없이 방출 주파수는 자연 방출 주파수의 값으로 일정하게 유지된다. 이상의 주파수 특성이 기존 연구(5)에서 밝혀진 바와 잘 일치하며, 본 연구에서는 정상 상태(비공진 상태)와 공진 상태의 3차원 후류 특성을 고찰하였다.



(a)



(b)

Fig. 3 Principle of the recursive correlation: (a) window shifting, (b) one-quarter rule from large interrogation window (solid line) to small interrogation window (dotted line).

3. 고속 PIV 계측 기법

고속 PIV (Time-Resolved PIV) 계측은 대상유동의 시간스케일 보다 훨씬 빠른 속도로 연속된 속도장을 계측하는 PIV 기법을 의미하며, 본 연구에서는 $10 \mu\text{m}$ 의 hollow glass 입자를 유동장 내에 주입하고 5W 아르곤 이온 레이저로 조사하여 산란된 입자영상을 고속 디지털 CCD로 획득하는 방법을 사용하였다. 이 고속 카메라는 480×420 픽셀 해상도에 픽셀당 8 비트의 그레이 레벨을 가지며, 부분 해상도에서는 최대 2000 frame/s, 전체 해상도에서는 최대 250 frame/s의 속도로 촬영이 가능하다. 또한 카메라 자체에 512 MB의 대용량 메모리를 가지고 있어 2048 frame을 연속적으로 저장할 수 있다. 연속광의 레이저는 전기적인 편광 원리를 이용한 electro-optic 서러에 의해 최대 50 kHz의 펄스광을 만들 수 있다. 이 서러는 TTL 신호에 의해 제어 가능하며, 자체 제작한 PLD (Programmable Logic Device)에 의해 고속카메라와 동기화 된다. PIV 계측에서는 고속카메라를 사용하더라도 정지된 입자영상을 얻기 위해서는 1 ms이내의 짧은 노출을 요구할 뿐만 아니라 두 영상의 시간 간격에 대한 정밀한 제어가 필요하므로 동기화된 펄스광을 사용하였다. 본 연구에서는 250 frame/s의 속도로 입자영상을 획득하였으며, 총 2048 장의 연속된 입자영상으로부터 1024 장의 속도장이 얻어진다. 4회에 걸친 반복실험으로 각 평면에 대하여 총 4096장의 속도장을 얻었다.

속도 벡터는 FFT 방식의 상호상관법에 의해 계산되었으며, 상관 영역은 8×8 로 하였으며 50%의 overlap을 사용하였다. 공간 분해능을 향상시키기 위하여 Fig. 3에서 나타난 바와 같이 64×64 에서 8×8 까지 상관영역을 점점 줄이면서 계산하는 점진적 상관기법(recursive correlation)(10)을 채택하였다. 이 과정에서 큰 상관영역에서 계산된 속도 벡터를 이용하여 두 번째 영상의 상관영역을 오프셋(offset)시키는 방식(10-11)을 사용하였고, 픽셀 단위 이하의 정밀도를 얻을 수 있도록 상호상관 계수의 피(peak)를 Gaussian 보간법으로 보간하였다. 실린더 후류 유동은 3차원성이 강하므로 2차원 단면에서의 유동장 측정시 레이저 펄스의 간격

을 줄이더라도 많은 에러 벡터를 수반한다. 이를 해소하기 위하여 상호상관계수를 구하는 과정에서 영상데이터에 90%의 Top-Hat 원도우를 취하고 얻어진 상관계수를 Low-pass 필터링하여 입자 변위를 나타내는 상관계수의 피 위치를 구하였다. 에러 벡터의 판단은 세가지 기준을 사용하였으며, 상관계수의 첫 번째 피와 두 번째 피의 비, 최대 픽셀 범위, 그리고 국소 divergence가 허용값 이상이면 에러 벡터로 판단하였다.

이상의 PIV 알고리즘을 검증하기 위하여 일본 가시화 학회(Visual Society of Japan)에서 제공하는 표준 이미지(standard image)에 대한 계산 결과를 Fig. 4에서 엄밀해와 비교하였다. 이 표준 이미지는 CFD 계산 결과를 이용하여 합성된 영상으로 256×256 픽셀 해상도를 가지며 약 5 픽셀 크기의 입자를 4000개 정도 포함하고 있다. 또한 적용된 유동이 3차원이므로 0.12 픽셀 정도의 평면에 수직 방향 속도 성분을 가지고 있다. Fig. 4에 비교한 속도 분포는 상관영역의 크기에 관계없이 엄밀해와 잘 일치함을 볼 수 있다. 실제 유동의 경우 상관영역이 작으면 입자에 대한 정보가 충분하지 못하여 에러 벡터가 많이 발생한다. 따라서 Fig. 5에서는 본 연구에서 계측한 실린더 후류 유동에 대하여 상관영역의 크기에 따른 영향을 살펴보았다. 그 결과, 주유동 속도 분포에 있어 크게 차이가 없음을 볼 수 있고, 상관영역을 크기를 줄임으로써 공간 해상도를 증가시킴으로써 효과를 얻었다.

4. 결과 및 고찰

레이놀즈수 360 (B mode)에서 x-y 평면과 y-z 평면에서의 속도장을 계측하였다. 와류 방출 주기는 3.282 Hz이며, 스트로할수는 0.204로 나타났다. 이는 Roshko(12)와 Fey 등(13)이 제시한 스트로할수-레이놀즈수 관계식으로부터 각각 얻은 0.2045 및 0.2025와 비교할 때 잘 일치함을 볼 수 있다. 방출 주기 측정시에는 정밀도를 높이기 위하여 특별히 62.5 Hz로 샘플링한 4096개의 PIV 데이터를 스펙트럼 분석하여 얻었으며 주파수의 해상도는 방출 주파수의 0.5% 이내이다.

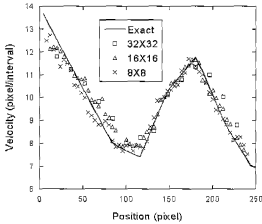


Fig. 4 Velocity profiles evaluated from the standard PIV images using three kinds of interrogation windows in the process of recursive correlation.

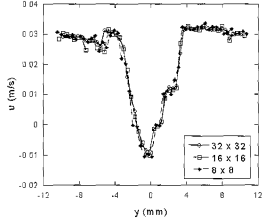


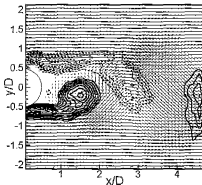
Fig. 5 Real measurement of the streamwise velocity profile in the cylinder wake to consider the effect of the interrogation window size.

4.1 위상 평균 유동장

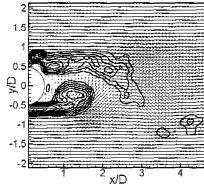
후류 현이 영역에서의 와류 shedding은 주기적이면 서도 3차원 유동에 의한 불규칙적인 성분을 포함하고 있다. 따라서, 3단계 분리(triple-decomposition) 기법(14)을 사용하면, 비정상 속도신호 u 는 시간 평균량 \bar{u} , 주기 평균량 \bar{u}' 그리고 불규칙적인 성분 u'' 로 다음과 같이 분해될 수 있다.

$$\begin{aligned}
 u(\vec{x}, t) &= \bar{u}(\vec{x}) + \bar{u}'(\vec{x}, t) + u''(\vec{x}, t) \\
 &= \langle u(\vec{x}, t) \rangle + \bar{u}'(\vec{x}, t) \\
 \bar{u}(\vec{x}) &= \lim_{T \rightarrow \infty} \int_0^T u(\vec{x}, t) dt \\
 \langle u(\vec{x}, t) \rangle &= \lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{n=0}^N u(\vec{x}, t + n\tau)
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

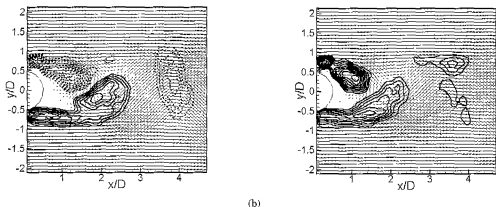
여기서 τ 는 shedding 주기이며, $\langle u \rangle$ 는 주어진 위상에서의 앙상블 평균값이다. 주기 유동에 대한 기준 위상 신호는 $(x/D, y/D) = (1.5, -0.5)$ 에서의 주류동 방향 속도 성분을 사용하였다. 이 주기신호의 실시간 데이터는 많은 고주파 성분을 포함하고 있어 기준 신호로 사용하기 힘들기 때문에 필터링된 신호를 이용하였다. 하지만 이 신호도 위상의 jitter 현상이 있어 연속된 신호의 모든 양의 정점을 기준점(phase = 0)으로 지정하고 그 기준점으로부터 일정한 위치에서 추출된 데이터를 이용하여 위상 평균을 수행하였다. 위상 평균에 사용된 데이터는 125 Hz로 샘플링하였기 때문에 위상 에러가 약



(a)



(1357)

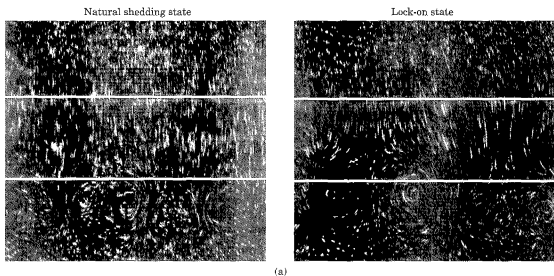


(b)
Fig. 6 Phase-averaged velocity and vorticity fields in the x-y plane. The left plots correspond to the natural shedding of $f_0/f_n = 0$ and the right plots, the lock-on state of $f_0/f_n = 1.92$. The phases are (a) 0 and (b) $\pi/2$.

2.7%이다. 따라서 이를 선형 보간하여 위상 에러를 최소화하였다.

동특한 실린더가 진동하는 입구 유동에 의해 공진 상태에 들어서게 되면 근접유류의 특성도 많이 변화게 된다. 가장 대표적인 특징으로서 와류 방출에 의하여 주기적으로 실린더에 가해지는 힘이 증가하며, 재순환영역 또는 와생성영역의 크기가 줄어들게 된다. Fig. 6에서 정상 및 공진 모드에서의 위상평균된 속도장을 비교하였는데, 공진 유동에서 와류가 실린더 후면에 더욱 가까운 곳에서 형성됨을 확인할 수 있다. 여기서 특이한 점은 정상상태에 비하여 공진상태에서 Karman 와류가 생성

이후 급격히 소산되는 것처럼 보인다는 사실이다. 이는 공진상태에서 3차원 효과가 증가하면서 Karman 와류가 실하게 변형되어 동일한 위상에서 관찰하면 그 불규칙성이 증대되기 때문이다. 매 주기마다 일어나는 이러한 불규칙성은 위상평균 유동장의 관점에서 보면 상관도(coherence)가 줄어들어 소산되는 것으로 나타난다. 본 연구에서 제시하지는 않았지만 주유동 속도의 RMS(Root-Mean-Square)값이 공진상태에서 더욱 더 크게 나타난 것은 공진으로 인한 3차원성의 증가를 직접적으로 말해 준다.



(a)

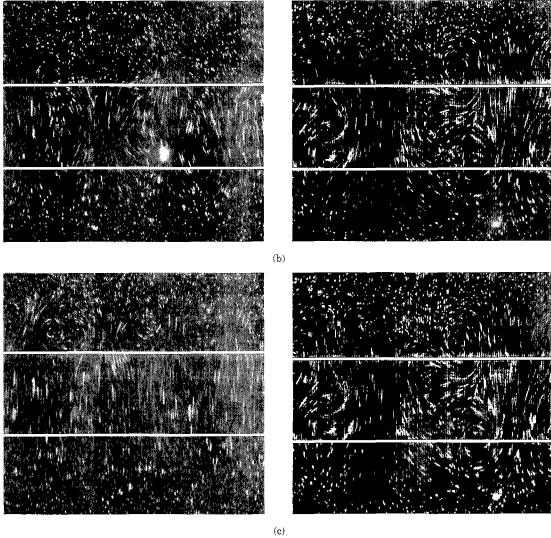


Fig. 7 Flow visualization of the streamwise vortices in the y - z plane at $x/D = 2.5$. The left plots correspond to the natural shedding of $f_0/f_n = 0$ and the right plots, the lock-on state of $f_0/f_n = 1.92$, when the streamwise vortices are located (a) below, (b) center of and (c) above the cylinder.

4.2 주유동 와류의 시간 및 공간적 거동

본 연구에서 계측한 실린더 후류의 3차원 유동은 실린더 직경 크기의 길이 스케일을 갖는 2차 와류의 존재로 특징지을 수 있다. 따라서 2차 와류의 시간 및 공간적 거동을 해석하는 것은 매우 중요하며, 가시화를 통하여 공진유동 하에서 2차 와류의 응답 특성을 살펴보고자 한다. Fig. 7은 정상 및 공진 상태에서 가시화한 2차 와류의 시간적 변화 과

정을 보여주고 있다. 여기서 측정된 단면은 $x/D = 2.5$ 위치에 있는 y - z 평면을 선택하였다. 이 위치는 재순환 영역보다 약간 하류에 해당되는 것으로 Fig. 6에서 나타난 바와 같이 3차원성이 강하게 형성되는 위치이다. 유동 가시화는 60Hz의 연속된 영상을 통하여 이루어졌으며, Fig. 7에서는 주유동 방향 와류(ω_z)가 실린더 아랫부분, 중심 그리고 위 부분에 존재하는 경우를 나타내었다. 대체적으로

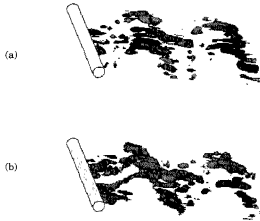


Fig. 8 Spatio-temporal representations of the streamwise vortices observed in the y - z plane at $x/D = 2.5$ for (a) the natural shedding of $f_0/f_n = 0$ and (b) the lock-on state of $f_0/f_n = 1.92$.

공진상태에서 주유동 방향 와류의 강도 및 스케일이 더 강하고 크게 나타남을 볼 수 있고, 실린더 길이 방향으로 불규칙성이 두드러짐을 확인할 수 있다.

Fig. 8에서는 위 단면에서 계속된 PIV 속도장을 이용하여 이를 시간-공간 표현법(spatio-temporal representation)(15)으로 재구성한 유동장을 정상 및 공진상태에 대하여 각각 보여주고 있다. 이 그림에 나타난 3차원 형상은 주유동 와도 성분(ω_x)의 분포를 그린 것으로 Taylor 가설을 근거로 x 좌표를 시간에 자유류 속도를 곱하여 표현하였다. 비록 이 그림이 근접후류의 3차원 구조를 정확히 표현한 것은 아니지만 전체적인 와류 행태를 파악하는 데 도움이 된다. 두 경우 모두에 있어 큰 스케일의 아래 위로 진동하는 주유동 와류의 구조를 확인할 수 있으며, 이는 Karman 와류가 주기적으로 형성되기 때문이다. 그러나 주유동 와도의 강도 및 길이 스케일에 있어서는 차이를 보이고 있다. 이 차이를 정량화하기 위하여 주어진 단면에서의 와도 분포로부터 주유동 방향 순환(streamwise circulation)의 크기를 계산하였다. 그 결과 시간 평균된 무차원 순환값 ($|\Gamma_x|/\pi UD$)이 정상상태인 경우에는 11.87인 반면 공진상태에서는 15.81로 약 33% 증가된 것으로 나타났다. 한편, 실린더 길

이 방향으로의 스케일은 순간 유동장의 와도 분포를 이 방향으로의 상관(correlation) 계수로부터 얻을 수 있으며, 정상 및 공진상태에 대하여 각각 0.93D 및 1.18D 로 나타났다. 이는 공진으로 인해서 약 27% 증가되었음을 의미한다. 그러므로 실린더에 의한 와류 방출과 진동하는 입구 유동 사이에서 공진이 발생하면 2차 와류가 크고 강하게 형성되면서 유동의 3차원성이 증가하는 것으로 해석된다.

5. 결 론

후류 천이 영역에서 정상 및 진동하는 입구 유동에 대한 실린더 근접후류의 3차원 유동 특성을 두 가지 단면에서 고속 PIV 계측에 의하여 관찰하였다. 고속 PIV는 고속카메라에 동기화된 레이저 펄스 장치를 구현함으로써 가능하였고, 점진적 상관 기법을 채택하여 공간분해능을 크게 향상시켰다. 개발된 PIV 알고리즘을 검증한 결과 성능이 매우 우수한 것으로 나타났다.

입구 유동의 진동 주파수가 정상 유동에서의 와류 방출 주파수의 2배 근처에서 공진 영역이 존재함을 보였고, 정상 및 공진상태에서의 유동장을 각각 비교 분석하였다. 위상 평균된 Karman 와류의 구조로부터 공진이 일어나면 유동의 3차원성이 증가하는 것을 알 수 있었으며, y - z 평면에서 관찰한 주유동 방향의 2차 와류의 가시화로부터 공진으로 인하여 2차 와류의 강도 및 길이 스케일이 증가함을 볼 수 있었다. 이는 연속적으로 얻어진 PIV 속도장을 이용하여 재구성한 3차원 와도 구조를 통하여 더욱 더 잘 파악할 수 있었으며, 주유동 와류의 강도 및 길이 스케일을 정량적으로 계산한 결과 공진상태에서 이들이 현저하게 증가함을 볼 수 있었다.

참 고 문 헌

- (1) Mansy, H., Yang, P. M. and Williams, D. R., 1994, "Quantitative Measurements of Three-Dimensional Structures in the Wake of a Circular Cylinder," *J. Fluid Mech.*, Vol. 270, pp. 277 ~ 296.
- (2) Williamson, C. H. K., 1996, "Three-

Dimensional Wake Transition," J. Fluid Mech., Vol. 328, pp. 345 ~ 407.

(3) Williamson, C. H. K., 1996, "Vortex Dynamics in the Cylinder Wake," Annu. Rev. Fluid Mech., Vol. 28, pp. 477 ~ 539.

(4) Griffin, O. M. and Hall, M. S., 1991, "Review-Vortex Shedding Lock-on and Flow Control in Bluff Body Wakes," ASME J. Fluids Engrg., Vol. 113, pp. 526 ~ 537.

(5) Barbi, C., Favier, D. P., Maresca, C. A. and Telonis, D. P., 1986, "Vortex Shedding and Lock-on of a Circular Cylinder in Oscillatory Flow," J. Fluid Mech., Vol. 170, pp. 527 ~ 544.

(6) Armstrong, B. J., Barnes, F. H. and Grant, I., 1986, "The Effect of a Perturbation on the Flow over a Bluff Cylinder," Phys. Fluids, Vol. 29, pp. 2095 ~ 2102.

(7) Armstrong, B. J., Barnes, F. H. and Grant, I., 1987, "A Comparison of the Structure of the Wake behind a Circular Cylinder in a Steady Flow with That in a Perturbed Flow," Phys. Fluids, Vol. 30, pp. 19 ~ 26.

(8) Chyu, C. and Rockwell, D., 1996, "Evolution of Patterns of Streamwise Vorticity in the Turbulent Near Wake of a Circular Cylinder," J. Fluid Mech., Vol. 320, pp. 117 ~ 137.

(9) Wu, J., Sheridan, J., Welsh, M. C., Hourigan, K. and Thompson, M., 1994, "Longitudinal Vortex Structures in a Cylinder Wake," Phys. Fluids, Vol. 6, pp. 2883 ~ 2885.

(10) Hart, D. P., 1998, "Super-Resolution PIV by Recursive Local-Correlation," Proc. VSJ-SPIE98, Yokohama, AB149, pp. 1 ~ 10.

(11) Scarano, F. and Riethmuller, M. L., 1999, "Iterative Multigrid Approach in PIV Image Processing with Discrete Window Offset," Exp. in Fluids, Vol. 26, pp. 513 ~ 523.

(12) Roshko, A., 1954, "On the Development of Turbulent Wakes from Vortex Streets," NACA Report 1191.

(13) Fey, U., Konig, M. and Eckelmann, H.,

1998, "A new Strouhal-Reynolds-Number Relationship for the Circular Cylinder in the Range $47 < Re < 2 \times 10^5$," Phys. Fluids, Vol. 10, pp. 1547 ~ 1549.

(14) Hussain, A. K. M. F. and Reynolds, W. C., 1970, "The Mechanics of an Organized Wave in Turbulent Shear Flow," J. Fluid Mech., Vol. 41, pp. 241 ~ 258.

(15) Lin, J.-C., Vorobioff, P. and Rockwell, D., 1995, "Three-Dimensional Patterns of Streamwise Vorticity in the Turbulent Near-Wake of a Cylinder," J. Fluids Struct., Vol. 9, pp. 231 ~ 234.

저 자 소 개



송치성(宋致成)

1961년 4월 1일생 1983년 한국해양대학교 기관학과 졸업. 1989년 동대학 대학원 기계공학과 졸업. 1996년 선박기계 기술사. 1989~현재 2001년 서울대학교 대학원 기계공학과 졸업. 공학박사.