

구 주위 난류유동에 관한 가시화 연구

장영일* · 이상준**

Visualization of Turbulent Flow around a Sphere

Young IL Jang* and Sang Joon Lee**

Keywords : Sphere(구), PIV(입자영상유속계), Turbulent wake(난류 후류), Flow visualization(유동가시화)

Abstract

The turbulent flow around a sphere was investigated using two experimental techniques: smoke-wire flow visualization in wind tunnel at $Re=5300, 11000$ and PIV measurements in a circulating water channel. The smoke-wire visualization shows flow separation points near an azimuthal angle of 90° , recirculating flow, transition from laminar to turbulent shear layer, evolving vortex roll-up and fully turbulent eddies in the sphere wake. The mean velocity field measured using a PIV technique in x-y center plane demonstrates the detailed near-wake structure such as nearly symmetric recirculation region, two toroidal vortices, laminar separation, transition and turbulent eddies. The PIV measurements of turbulent wake in y-z planes show that a recirculating vortex pair dominates the near-wake region.

1. 서론

구(sphere)는 3차원 뾰족한 물체(bluff body)의 전형적인 예로서 그 동안 많은 연구가 수행되어왔다. 구는 축대칭 물체이지만, 구 주위 유동은 레이놀즈수에 따라 축대칭 유동, 평면 대칭 유동, 불규칙한 박리점의 회전, 비정상(unsteady) 와류 유출, 층류 후류, 전단층 불안정, 난류 후류, 난류 박리 등 매우 복잡한 유동형태를 보인다. 이와 같은 복잡한 유동특성에 기인하여 구 주위 유동은 아직까지 밝혀지지 못한 부분이 많이 남아있다. 균일한 유동속에 놓인 구 주위 난류 유동($Re > 800$)에 관한 실험적 연구는 주로 열선유속계(hot-wire)를 이용하여 와(vortex) 유출 특성을 분석하였으며, 염료와 연선(smoke-wire) 기법을 이용하여 구 주위 유동을 가시화 하였다. 그러나, 구의 고정, 유동의 높은 시간 의존성, 넓은 박리영역, 복잡한 3차원 난류특성 등 많은 이유들 때문에 구 후류에 대한 실험적 연구는 그리 많지 않다[1-4]. 본 연구에서는 구를 와이어를 사용하여 고정된 후 연선(smoke-wire) 가시화 기법을 적용하여 난류 유동구조를 가시화하고, PIV 측정기법을 이용하여 구 주위 유동의 속도장을 측정하여 이로부터 획득한 유동정보를 통해 구 후류의 난류특성을 해석하고자 한다.

2. 본론

2.1 실험장치 및 방법

Fig. 1은 회류수조에서 수행한 PIV 속도장 측정 실험장치의 구성과 측정방법을 보여주고 있다. 측정부의 크기는 $4.5^L \times 1.0^W \times$

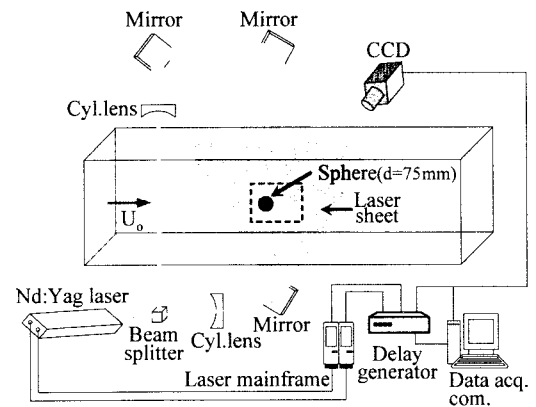


Fig. 1 Schematic of experimental set-up and PIV system

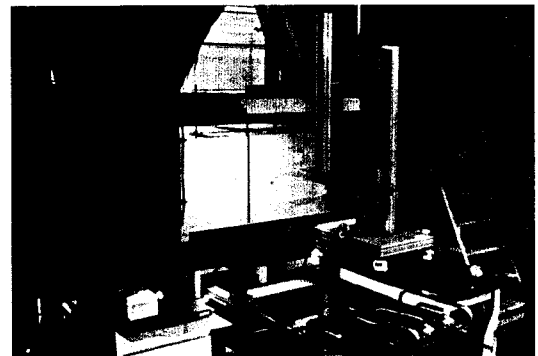


Fig. 2 Circulating water channel used in this study

* 포항공과대학교 기계공학과 대학원, yijang@postech.ac.kr

** 포항공과대학교 기계공학과 교수, sjlee@postech.ac.kr



Fig. 3 Smoke-wire flow visualization of sphere wake

$1.0^H m^3$ 이고, 난류강도는 0.28 % 미만이다. 실험에 사용된 구는 아크릴 재질로 만든 속이 빈(hollow) 구이고 직경(d)은 75mm이며, 직경이 0.27mm인 기타(guitar) 와이어 2개를 구 중앙단면을 통해 'X'자 형태로 교차시켜 연결하고 회류수조 프레임에 단단히 고정하여 측정부 중앙에 위치하도록 설치하였다. 측정부 중앙에 위치한 구는 본 연구에서 다른 유속범위 내에서 주유동 단면과 횡 단면에서 진동이 거의 관찰되지 않았다.

그리고, 실험시 한쪽 방향에서 조명할 경우 반대방향에 생기는 구의 그림자를 제거하기 위해 레이저(New Wave, 125mJ, 파장:532nm) 평면광이 구의 위와 아래 두 방향에서 조사되도록 빔분리기(bean splitter), 거울, 원통형 렌즈 등을 사용하여 조명장치를 구성하였으며, 평면광의 두께를 약 3mm로 조절하였다. 사용된 CCD 카메라의 해상도는 2K×2K (8bit) pixels 이며, 35mm 마이크로 렌즈를 장착하였다. 추적입자는 평균직경이 10 μm인 은으로 코팅된 구형 bead를 사용하였다. 순간속도장 결과들을 앙상블(ensemble) 평균하여 평균속도장과 난류통계치 정보를 획득하였으며, 에러 벡터들은 Gaussian 보간법으로 보정하였다.

2.2 실험결과

선행 연구[4]에 따르면, 본 연구에서 실험한 레이놀즈수 영역에서 구를 지나는 비정상(unsteady) 와 유출 유동은 불규칙적으로 회전하는 박리선(separation line)과 주기적으로 굽이치며(wavy) 하류로 진행되는 와 유출 특성을 띠며 후류의 난류구조가 비대칭적인 것으로 알려져 있다.

Fig. 3은 $Re=11,000$ 에서 연선으로 가시화한 구 주위 유적선을 찍은 사진인데, 구 주위의 복잡하고 비정상(unsteady)인 난류 유동형태의 일면을 잘 보여주고 있다. 그림에 표시한 가로축은 구의 중심으로부터 주유동 방향의 거리를 구의 직경으로 무차원화한 값(x/d)이다. 이 가시화 결과는 방위각 90° 근처에서의 층류 박리, 실린더 형태의 층류전단층의 진행, 난류전단층으로의 천이, 와류 roll-up, 난류 에디 등을 보여주고 있다.

Fig. 4는 PIV 속도장 측정기법으로 구($d=40mm$) 주위 중앙 종단면($x-y$ 평면)에서 측정한 순간속도장 결과들을 앙상블 평균하여 구한 평균속도장 결과로서 구 표면에서 박리된 유선이 구 이면에서 안쪽으로 휘감아 회전하는 재순환 와류쌍을 관찰 할 수 있다. 이 재순환 와류쌍의 중심은 $x/d=0.55$, $y/d=\pm 0.33$ 지점에 위치하고 있으며, 와류쌍의 끝은 구 후방으로 $x/d=0.85$ 까지 이어진다. Fig. 5는 구 후류 중심단면에서 측정한 레이놀즈 전단응력 분포를 나타낸 것으로 방위각 90° 를 약간 지나서 아주 좁은 영역에서 레이놀즈 전단응력이 발생하기 시작하며, 근접 후류의 재순환 와류쌍 영역에서 대칭성을 띠며 큰 값을 가진다. 구 주위의 3차원 난류특성을 보다 자세히 분석하기 위해 구 주위 중앙

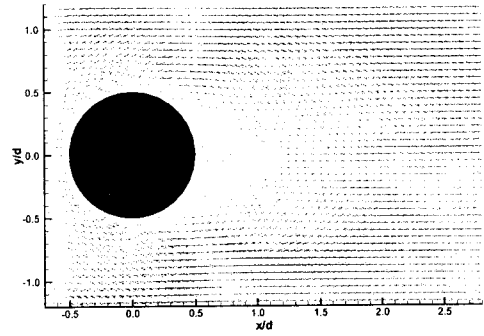


Fig. 4 Mean velocity field of flow around a sphere

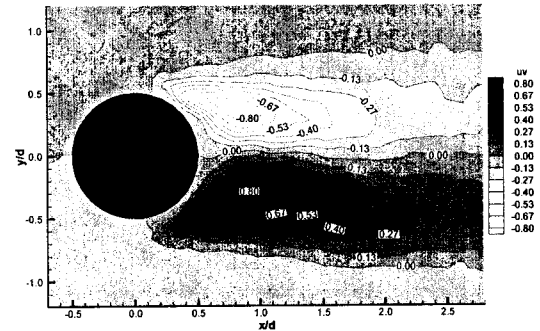


Fig. 5 Spatial distribution of Reynolds shear stress

종단면 뿐만아니라 횡단면인 $y-z$ 평면에서의 PIV 측정결과도 제시 될 것이다.

3. 결론

구 주위 유동에 대해 연선 가시화와 PIV 속도장 측정실험을 수행하여 구 주위 유동의 난류특성을 실험적으로 해석하였다. 구를 와이어를 이용하여 회류수조 시험부 중앙에 고정된 후 중앙단면에서 순간속도장을 획득하고 평균 속도장과 난류 통계치의 공간분포를 도출하였다. 속도장 측정결과, 평면대칭 형태의 재순환 와류쌍이 구 후방 근접 후류 영역의 지배적인 유동형태로 나타났다. 와류쌍의 중심은 구 후방 $x/d=0.55$, $y/d=\pm 0.33$ 에 위치하고 있으며, 주유동 방향 속도성분은 $x/d=0.8$ 위치까지 음의 값을 가지며 포물선 형태의 운동량 결손 분포를 나타내었다. 근접후류에서 주유동방향 평균속도, 레이놀즈 전단응력 및 난류 운동에너지는 재순환 와류쌍의 경계부근에서 최대값을 가졌다.

참고문헌

- [1] E. Achenbach, 1974, "Vortex shedding from spheres", J. Fluid Mech., Vol. 62, Part 2, pp. 209-221
- [2] H. Werlé, 1980, "ONERA photograph", An Album of Fluid Motion (assembled by M. V. Dyke), The Parabolic Press. pp. 32-35
- [3] H. J. Kim and P. A. Durbin, 1988, "Observations of the frequencies in a sphere wake and of drag increase by acoustic excitation", Phys. Fluids, Vol. 31, No. 11, pp. 3260-3265
- [4] H. Sakamoto and H. Haniu, 1990, "A study on vortex shedding from spheres in a uniform flow", J. Fluids Eng., Vol. 112, pp. 386-392