

## 구(球) 주위 난류유동의 정량적 가시화

장영일\* · 이상준†

### Flow Visualization of Turbulent Flow around a Sphere

Young IL Jang and Sang Joon Lee

#### Abstract

The turbulent flow around a sphere was investigated in a streamwise meridian plane using two experimental techniques: smoke-wire flow visualization in wind tunnel at  $Re=5,300$  and PIV measurements in a circulating water channel at  $Re=7,400$ . The smoke-wire visualization shows flow separation points near an azimuthal angle of  $90^\circ$ , recirculating flow, transition from laminar to turbulent shear layer, evolving vortex roll-up and fully turbulent eddies in the sphere wake. In addition, the mean flow pattern extracted by particle tracing method in water tunnel at  $Re=14,500$  reveals two distinct comparable toroidal(not closed) vortices in the recirculation region. The mean velocity field measured using a PIV technique demonstrates the detailed wake configuration of close symmetric recirculation and near-wake configuration with two toroidal vortices, reversed velocity zone and vorticity contours.

Key Words : Sphere(구), Turbulent wake(난류 후류), PIV(입자영상유속계),  
Smoke-wire visualization(연선 가시화)

#### 1. 서론

구(sphere)는 3차원 뾰족한 물체(bluff body)의 전형적인 예로서 학문적 및 실용적으로 높은 관심 연구 대상이다. 구는 축대칭 물체이지만, 구 주위의 유동장은 레이놀즈수에 따라 축대칭 유동, 평면 대칭 유동, 비정규적 박리점의 회전, 비정상(unsteady) 와류 유출, 층류 후류, 전단층 불안정, 난류 후류, 난류 박리 등 다양한 유동형태를 보인다.

균일한 유동속에 놓인 구 주위 난류 후류( $Re>800$ )에 관한 실험연구는 열선을 이용하여 지배적인 와류출 주파수를 측정하여 와류출 특성을 분석하고, 염료와 버블, 연기 기법을 적용한

유동가시화 연구를 통해 구 주위 유동특성을 밝혀왔다. 그러나, 구의 주위 유동에 관한 실험적 연구는 구의 고정, 유동의 높은 시간 의존성, 넓은 박리영역, 복잡한 난류특성 등의 어려움 때문에 후류 유동구조에 대한 연구<sup>1)~3)</sup>는 많지 않다. 본 연구에서는 난류 레이놀즈수 범위에서 와이어를 사용하여 구를 고정시킨 후 연선기법, 입자추적가시화 및 PIV 측정을 통해 구 후방의 재순환(recirculation) 영역 및 후류 영역에서의 유동구조와 평균유동 정보를 해석하고자 한다.

#### 2. 실험 장치 및 방법

Fig. 1은 풍동에서 수행한 연선 가시화기법의 장치 구성이다. 측정부는  $6.75^L \times 0.72^W \times 0.6^H m^3$  크기이며, 측정유속 2m/s에서 난류강도는 0.08% 미만이다. 실험에 사용된 구는 셀룰로이드 재질의 속이 빈(hollow) 구이고, 직경(d)은 40mm(sphericity<

† 포항공과대학교 기계공학과 교수  
E-mail : sjlee@postech.ac.kr

\* 포항공과대학교 기계공학과 대학원

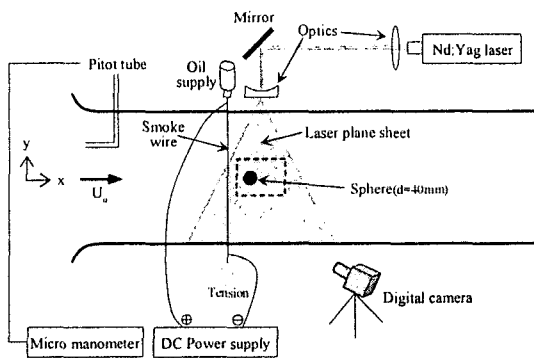


Fig. 1 Smoke-wire visualization setup in wind tunnel

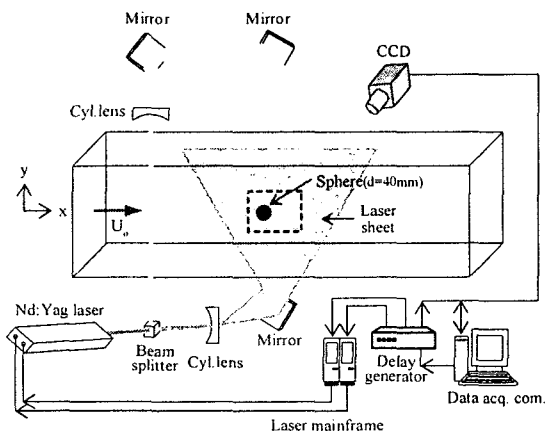


Fig. 2 PIV measurements setup in a circulating water channel

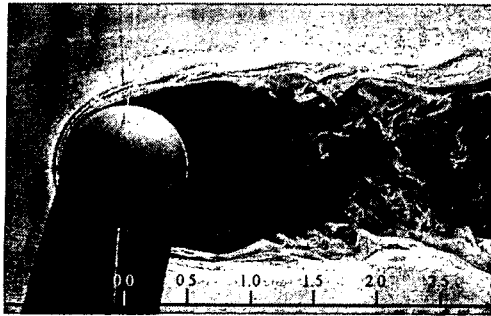
0.6% / 표면 균일도  $\leq 0.1\%$ )이며, 자유흐름에 대해 직각인 구의 중앙 단면에 직경 0.27mm 기타 (guitar) 와이어 2개를 구 내부를 통해 'X'로 교차해 연결하고 턴버클을 이용해 프레임에 단단히 고정해서 측정부에 설치하였다. 구와 프레임을 합친 차폐율(blockage ratio)은 6.1%이고, 측정부 중앙에 위치한 구는 측정유속에서 주유동 단면과 횡 단면에서 진동이 거의 관찰되지 않았다. 와이어에 의한 유동교란은 와이어 직경과 측정단면을 고려할 때 무시할 만한 크기이다.

연선은 직경 0.1mm 니크롬 와이어이며, Safex oil(Dantec)이 와이어를 따라 흘러 내리게 한 후 직류 전원 24volt(2.3A)를 가해 백색의 진한 연기를 발생시켰으며 연선의 위치를 구의 전·후방으로 옮겨가며 측정하였다. 조명으로 사용된 Nd:YAG(Beamtech, 50mJ) 펄스 레이저는 10hz로 작동시켜, 두께 3mm의 평면광을 생성시키도록 렌즈들을 배열했다. 평면광은 7ns의 짧은 시

간동안 측정구간을 비추어 카메라로 촬영하면 순간 유선이 가시화된다. 디지털 카메라(Nikon D100)에 60mm 마이크로 렌즈를 장착하여 노출 F3.5, 셔터속도 13으로 맞추어 연속적으로 촬영하였으며, 반복실험을 통해 각 실험조건에서 거의 동일한 유동형태를 갖는 깨끗한 사진들을 획득하였다. 연선 가시화실험에서 구의 직경과 자유흐름 속도에 기초한 레이놀즈수는  $Re=5,300$ 이다.

Fig. 2는 회류수조에서 수행한 PIV 속도장 측정실험 장치의 구성과 방법을 보여주고 있다. 측정부의 크기는  $1.0^L \times 0.3^W \times 0.2^H \text{ m}^3$  이고, 자유흐름 속도인  $U_0=17\text{cm/s}$ 에서 난류강도는 2.8% 미만이며, 양질의 균일도를 확인하였다. 회류수조 윗면에는 수심 높이에 아크릴로 제작한 덮개를 설치하여 유동 윗면의 자유면(free surface)을 제거함으로써 유동이 4개의 접촉면에서 동일한 정착조건을 갖도록 하였다. 구의 고정은 연선 실험시와 동일한 방법으로 2개의 기타 와이어와 프레임 이용해 측정부 중앙에 구가 놓이도록 설치하였으며, 구와 프레임을 포함한 차폐율은 6.3%이다. 이 정도의 차폐율은 뭉뚱한 물체 주위의 유체실험에서 막힘비에 대한 보정없이 측정결과 의 타당성이 확보되는 수준이다.

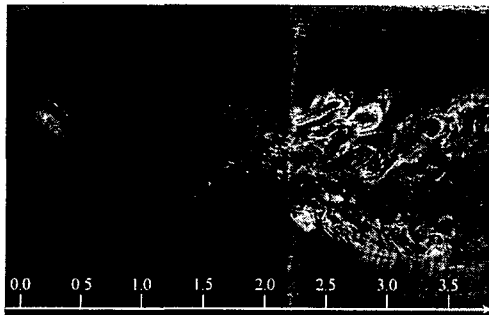
구 주위의 음영을 제거하기 위해 레이저(New Wave, 25mJ, 파장:532nm) 평면광이 구의 측정 단면 위와 아래에서 조사되도록 빔 분리기(50:50), 거울, 원통형 렌즈 등을 사용하여 조명 장치를 구성하였으며, 평면광의 두께는 3mm이다. 사용된 CCD(Kodak)의 해상도는  $1\text{K} \times 1\text{K}$  (8bit) pixels이며, 60mm 마이크로 렌즈를 장착하였다. Fig. 2에서 볼 수 있듯이 CCD와 레이저가 측정부를 중앙에 두고 서로 반대편에 위치하도록 배치하였다. 유동의 흐름 방향은 좌측에서 우측이다. 측정영상의 크기(FOV)는  $14 \times 14 \text{ cm}^2$  으로서 주유동 방향으로 구의 중심점을 기준으로  $x=-0.7d$ 에서  $x=+2.8d$ 까지의 영역이다. 추적입자(Potters, silvered sphere)는 평균  $10\mu\text{m}$  크기이며, delay generator를 이용해 레이저와 CCD를 동기시키고, 두 레이저 펄스 사이의 시간간격은 3ms로 하였다. 유동영상은 초당 8장씩 전체 700쌍을 획득하여, 미세조사구간은  $32 \times 32$  pixels로 하고 50% overlapping하여, 각 영상쌍에 대해  $64 \times 64$  격자수 만큼의 순간속도 벡터를 추출하였다. 전체 벡타수에서 5% 미만을 구성하는 에러 벡터



(a)



(b)



(c)

Fig. 3 Sphere wake visualization at  $Re=5,300$  (smoke-wire technique in wind tunnel)

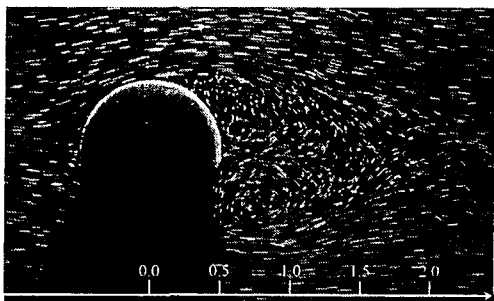


Fig. 4 Sphere wake visualization at  $Re=14,500$  (particle tracing method in a circulating water channel)

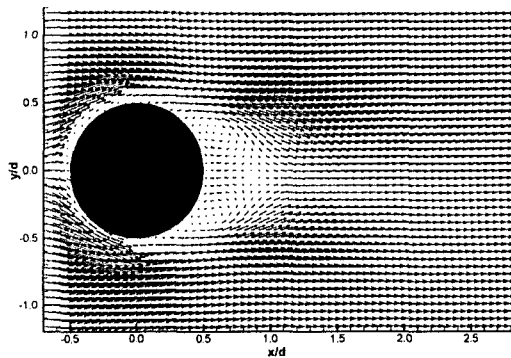
들은 Gaussian 보간법으로 재계산되어 교체되었다. 자유흐름 속도의 입자들은 두 영상 사이에서 3.7 pixel을 이동하였다. PIV 측정에서 실험유속과 구 직경에 기초한 레이놀즈수는  $Re=7,400$ 이다.

### 3. 결과 및 토의

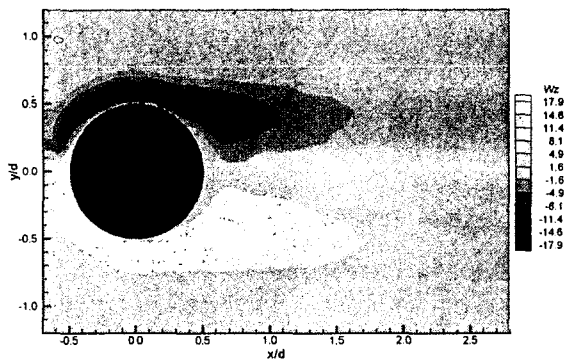
Fig. 3은 풍동에서 연선을 구의 전·후방에 위치시키고 구 주위 주유동 방향의 중앙단면에서 순간유선을 측정하는 것이다. 그림에 표시한 숫자는 주유동 방향의 거리를 구의 직경으로 무차원화한 값( $x/d$ )이다. Fig. 3(a)-(c)는 구 주위 후류의 유동형태로 방위각  $90^\circ$  근처에서의 층류 박리, 실린더 형태의 층류전단층의 진행, 난류전단층으로의 천이, 와류 roll-up, 난류 에디(eddies) 등을 보여주고 있다. Fig. 3(b)에서는 재순환 영역에서 역류 속도성분에 의해 연기들이 구 방향으로 전달된 현상을 볼 수 있으며, 이러한 유동특성은 Fig. 3(c)의  $x/d \approx 2.2$  영역까지 나타났다. Fig. 3(b)는 구의 표면에서 박리된 층류전단층이  $x/d \approx 1.8$  위치까지 유지되다가 이후 천이되어 난류전단층으로 바뀌는 것을 보여준다. 이 천이 위치는 Seidl<sup>4)</sup>의 연구를 이용한 실험결과( $Re=5,000$ ,  $x/d \approx 0.6$  까지) 보다는 크며, Sakamoto<sup>2)</sup>의 연기기법 실험결과( $Re=4,460$ )와는 비슷하지만, 본 연선 가시화 결과가 보다 선명한 유동형태를 보여주고 있다.

Fig. 4는 65mm 직경의 구를 회류수조에 설치하고  $Re=14,500$  조건에서 입자추적기법으로 가시화한 구 주위의 유동 가시화 사진이다. 조명은 할로겐 램프를 이용하여 구의 뒷 방향에서 아래 방향으로 빛을 비추 주었으며, 평균 직경  $40\mu m$ 의 입자를 tracer로 사용하였고, 디지털 카메라로 촬영하였다. 구의 재순환 영역에서  $x/d=1.3$ 까지 이어지는 소용돌이 형태의 와류쌍을 볼 수 있다. 이 재순환 와류쌍은 층류 레이놀즈수( $Re < 210$ )에서 보이는 달린 재순환 버블과는 다른 것이다. 또한, 이 와류쌍은 Dyke<sup>1)</sup>의 가시화 결과( $Re=15,000$ )보다 뭉뚱한 모양을 띠고 있다. 이것은 본 연구에서 사용한 와이어를 이용한 고정방법이 후류에서 유동이 구 고정용 막대에 재부착 되는 유동간섭을 배제하였기 때문인 것으로 판단되며, 본 가시화 결과가 보다 정확한 유동 특성을 보여주고 있다고 할 수 있다.

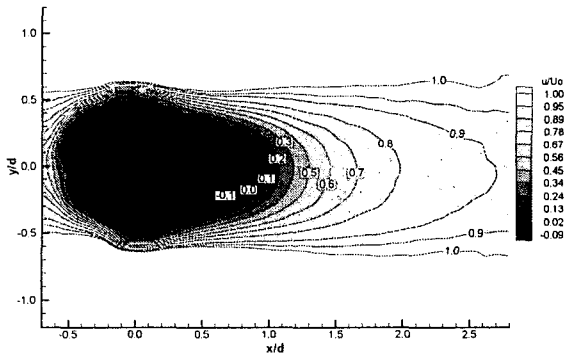
Fig. 5는 풍동실험( $Re=7,400$ )에서 PIV로 구 주위  $x-y$  중앙단면에 대해 측정된 평균속도장과 와도(vorticity) 및 주유동방향 속도분포를 보여주고 있다. Fig. 5(a)에서는 구 후면 재순환 영역의  $x_c/d=0.55$ ,  $y_c/d=\pm 0.33$  위치에서 반대방향으로 회전하는 와류쌍을 볼 수 있으며, 이 재순환 와류쌍은  $x/d=0.85$ 까지 이어진다. 순간속도를 평균



(a) mean velocity field



(b) out-of-plane vorticity contour



(c) mean streamwise velocity

Fig. 5 PIV measurements of turbulent flow around a sphere at  $Re=7,400$

한 속도벡터에 의해 재순환 영역에서 이와 같이 와류쌍이 명확히 드러나는 것은 이 영역에서 재순환 와류쌍의 유동형태가 지배적이라는 사실을 나타낸다. Fig. 5(b)는 out-of-plane 와도 분포로서 가속구간, 유동 박리점, 박리된 총류전단층의 초기영역을 따라 큰 값을 가지며, 평면대칭에 가까운 유동 형태를 보이고 있다. Fig. 5(c)는 주유동 방향 평균속도 분포로서  $x/d=0.8$  하류 위치 단면까지 관찰되는 역류속도 영역과 유동의 하류 방향으로 포물선 형태의 운동량 결손을 보여주고 있다. 참고적으로, Kim<sup>3)</sup>이  $Re=3,700$ ,  $x/d=1.6$ 에

서 열선 유속계로 측정된 주유동방향 평균속도 ( $u/U_0$ )는  $y/d=0.55\sim 0.66$  위치에서  $u/U_0=0.27\sim 1.0$  사이의 범위내에서 급격하게 변화한다. 한편, 본 실험( $Re=7,400$ )에서 구 후류의  $u/U_0$ 는 빠르게 회복하는 경향성을 보이며,  $x/d=1.6$ ,  $y/d=0.55$  위치에서 속도비는  $u/U_0=0.95$ 로 나타났다. 주유동방향  $x$ - $y$  중앙단면에서 측정된 평균속도장, 와도 및 주유동방향 속도분포는 전체적으로 구 주위의 재순환 영역과 근점 후류 영역이 평면대칭에 가까운 유동이라는 것을 보여주고 있다.

#### 4. 결론

구 주위의 난류 유동 특성에 대해  $Re=5,300$  (연선기법),  $Re=7,400$ (PIV) 및  $Re=14,500$ (입자 추적 방법)에서 정량적 가시화 실험을 수행하였다.  $Re=5,300$ 에서 가시화한 구 주위 유동의 순간유선들은 방위각  $90^\circ$  근처에서 총류 박리,  $x/d \approx 1.8$  영역까지 실린더 형태의 총류전단층의 진행, 이후 난류전단층으로의 천이, 난류 에디(eddies) 그리고 재순환 영역의 역류속도 성분 등을 상세히 보여주고 있다. 또한,  $Re=14,500$  조건에서 가시화한 유동형태는 구 후류의 재순환 와류쌍을 보다 정확하게 보여 주었다.

PIV 기법에 의해  $Re=7,400$ 에서 측정된  $x$ - $y$  중앙 단면에서의 평균 속도장 결과로부터 도출한 재순환 와류쌍과 역류속도 영역, 그리고 주유동 방향 속도 및 와도 분포 등은 평면대칭에 가까운 재순환 유동 및 근점후류 유동 형태를 보여주고 있다.

#### 참고 문헌

- 1) 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
- 2) V. Dyke, 1998, An Album of Fluid Motion(7th printing), 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) V. Seidl, S. Muzaferija and M. Peric, 1998, "Parallel DNS with Local Grid Refinement", Applied Scientific Research, vol. 59, pp. 379-394