

# 전자석 액추에이터를 이용한 구 주위의 유동제어

박진일\*, 최해천\*\*, 전우평\*

## Active control of flow over a sphere using electro-magnetic actuators

Jinil Park, Haecheon Choi, Woo-Pyung Jeon

Key Words: Sphere(구), Flow Control(유동제어), Electro-magnetic Actuator(전자석 액추에이터)  
Drag Reduction(항력 감소)

### Abstract

Flow over a sphere is controlled experimentally at  $Re=10^5$  using electro-magnetic actuators. The electro-magnetic actuator developed in this study is composed of the permanent magnet, electro-magnet, membrane and slot. Eight actuators are placed inside the sphere at equally spaced intervals on a latitudinal plane and the position of the control slot is  $76^\circ$  from the stagnation point. Each actuator generates a periodic blowing and suction through the slot at variable frequencies of 10~140Hz and variable amplitudes by controlling electric signals applied to the electro-magnet. Drag on the sphere measured using a load cell is significantly reduced with control at the forcing frequencies larger than the natural shedding frequency ( $\approx 14\text{Hz}$  at  $Re=10^5$ ), whereas drag is slightly increased at the forcing frequency of 10Hz. It is shown from pressure measurement that the static pressure in the rear surface of the sphere is significantly increased with control, indicating that the separation is delayed due to control. Flow visualizations also show that the detaching shear layer is more attracted to the sphere center with control, the separation bubble size is significantly reduced, and motion inside the bubble is very weak, as compared to the case of uncontrolled flow.

### 1. 서 론

뿔뿔한 물체(bluff body) 위에서 발생하는 박리 유동을 제어하여 물체표면의 압력 및 벽 마찰 전단응력 분포를 변환시켜 물체가 받는 항력 및 양력을 제어하려는 많은 연구가 지속적으로 이루어지고 있다. 유동에 의해 뿔뿔한 물체가 받는 항력 중 대부분을 차지하는 형상 항력은 물체 표면에서의 점성 전단층 박리로 인한 후류 생성으로 물체 후면의 압력이 전면보다 작아지기 때문에 발생된다. 따라서 관련된 많은 연구들에서는 항력 감소를 위해 음향 가진, 표면에서의 분사·흡입, 표면 진동 등 여러 가지 형태의 교란을 주어 박리 전단층 유동 또는 vortex shedding으로 인한 비정상 후류를 제어하고자 하였다. 이와 같은 연구에서는 주로 2차원 실린더나 익형 주위의 유동

제어가 시도되었다. 그러나 보다 실제적인 3차원 특성을 갖는 축대칭 물체 후류에 관한 제어 연구는 매우 미미하며 본 실험 대상인 구 주위 유동 또한 특성 자체가 완전히 밝혀지지 않았다. 과거 구에 대한 연구는 주로 후류의 특성 및 레이놀즈수에 따른 항력의 변화 등 주로 기초적인 특성 파악에 집중되어 왔다<sup>(1)(4)</sup>. Kim & Durbin<sup>(3)</sup>은 32000 이하의 여러 레이놀즈수에서 음향 가진이 구 주변 3차원 후류에 미치는 영향을 보고한 바 있다. 그들의 실험에 의하면 음향 가진으로 후류의 혼합이 증가되어 박리 기포(separating bubble)의 크기가 작아지고 기포 내 유동속도가 빨라져 구 후면 압력이 감소되어 결국 구의 항력이 증가되었다. 한편 보다 효과적인 제어를 실험적으로 구현하기 위해 유동 특성에 맞는 교란을 발생시킬 수 있는 액추에이터의 개발이 요구된다. 일반적으로 물체 후류의 이탈 와류는 100Hz보다 낮은 주파수 특성을 가지므로 강도가 큰 저주파 교란을 발생시킬 수 있는 액추에이터의 개발이 중요하다. 본 풍동 실험에서는 구의 내부에 자체 개

\* 서울대학교 정밀기계설계공동연구소 난류제어연구단

\*\* 서울대학교 기계항공공학부

발한 전자석 액추에이터를 설치하여 여러 가지 주파수의 교란을 발생시켜 구 주위 유동의 제어를 시도하였다. 액추에이터 작동 전후 및 주파수 변화에 따른 구 표면 압력 분포와 구가 받는 항력을 직접 측정하고 이를 유동가시화 실험으로 고찰하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1 풍동

실험에 사용된 저속 풍동은 송출 개방형으로 독특한 물체(Bluff body) 주위 유동 실험용으로 특별히 설계 제작되었다. 40마력의 원심송풍기로 발생하는 유동은  $5^\circ$ 와  $10^\circ$ 의 각도를 갖는 길이 2.3m의 사각 디퓨저를 지나 7.5mm 격자의 허니콤과 단위 인치 당 16, 24, 28개의 격자를 갖는 총 5장의 격자철망이 설치된 길이 1.1m의 안정실에서 정류된다. 이후 유동은 면적비 7:1, 길이 1.7m의 3차원 수축부를 지나  $0.6\text{m} \times 0.6\text{m}$  단면의 수축부 출구에서 대기로 방출된다. 수축부 출구에서 평균속도의 균일도와 주유동 방향 난류 강도는 실험 속도인 10m/s에서 각각 0.5%, 0.3% 이하이다.

### 2.2 구

실험에 사용된 구는 직경 0.15m이며 두랄루민으로 제작되었다. Figure 1과 같이 구의 표면에는 유동제어를 위한 8개의 슬롯들이 등위도상에 위치하며 ( $\theta = 76^\circ$ ) 각 슬롯의 크기는  $20\text{mm} \times 1.5\text{mm}$  이다. 구의 내부에 설치된 8개의 액추에이터의 작동에 의해 주기적인 분사·흡입이 이 슬롯에서 발생된다. 구의 표면 정압을 측정하기 위해 동일 경도상에 직경 1.5mm의 압력구멍을  $10^\circ$  간격으로 총 33개를 만들었다. 한편 구는 Figure 2와 같이 풍동의 수축부 출구 중앙에 위치시킴으로써 시험부 설치로 발생할 수 있는 벽과 벽 경계층에 의한 차폐효과를 최대한 줄였다. 또한 풍동 수축부 출구에서 0.12m의 가까운 하류에 구의 중심을 위치시킴으로써 구 전체가 충분히 균일한 자유 유동장에 놓이도록 하였다.

### 2.3 전자석 액추에이터

본 연구에서 개발한 액추에이터는 Figure 3과 같이 영구자석과 전자석, 진동판과 제어슬롯으로 이루어져 있다. 전자석에 전류가 흐르면 영구자석에 인력 또는 척력이 발생되며 이로 인해 영구자석이 부착된 진동판이 상하로 움직인다. 이 진

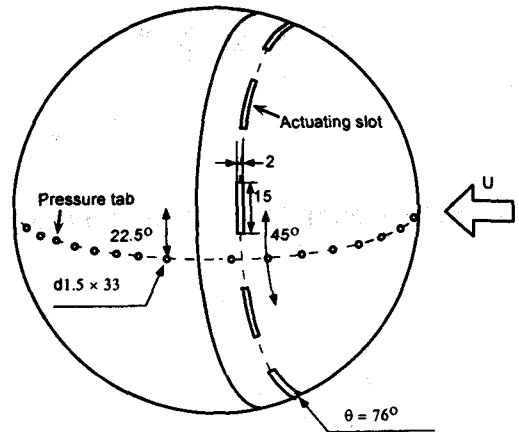


Fig. 1 Schematic diagram of the sphere

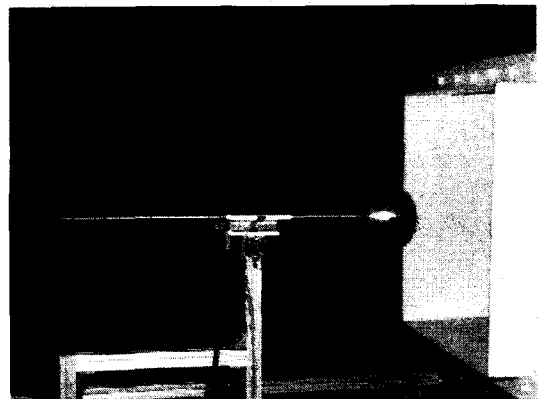


Fig. 2 Experimental setup

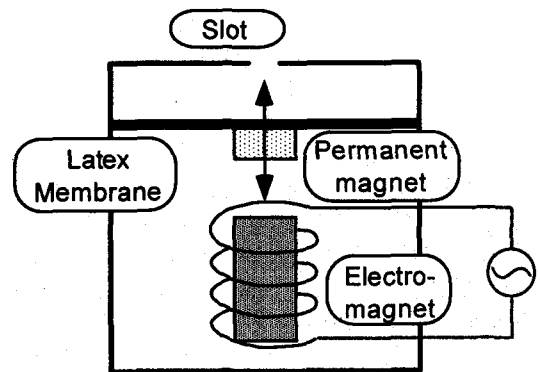


Fig. 3 Electro-magnetic actuator

동으로 인해 진동판 위의 제어슬롯으로부터 유체가 분사·흡입된다. 이 때 전자석에 가하는 전압의 주파수에 따라 구동 주파수가 결정되며 전압의 크기를 변화시켜 구동 진폭도 바꿀 수 있다. 전자석을 구동하기 위해 DA 컨버터로  $\pm 2V$ 의 정현파를 생성하고 이를 파워 앰프를 이용하여  $\pm 30V$ 로 증폭하였다. 다수의 액추에이터에 각각 DA 컨버터로 발생시킨 전압을 증폭하여 가하게 되면 액추에이터간의 위상 차이를 원하는 대로 조절할 수 있다. 제어슬롯으로부터 분사·흡입되는 유체의 속도는 진동판과 제어슬롯의 면적비, 액추에이터 작동 주파수, 그리고 진동판의 최대 변위에 의해 결정된다. 동일한 크기의 전압을 가할 경우, 영구자석의 최대 변위는 액추에이터의 작동 주파수가 60Hz 일 때 최대가 되고 그 이후 급격히 줄어든다. 본 연구에서는 각각의 제어 주파수마다 구동 전압을 달리하여 주파수에 상관없이 같은 분사·흡입 속도를 가지도록 하였다. 한편 본 액추에이터는 제어구멍으로부터 분출되는 유체의 양과 흡입되는 유체의 양이 같은 특성을 가져, 유동장으로 가해지는 유량의 합은 0이다. 액추에이터를 90Hz와 130Hz로 동작시키면서 구 표면의 제어슬롯에서 열선유속계로 측정된 분사·흡입 형태를 Figure 4에 나타내었다. Figure 4(a)와 Figure 4(b)는 각각 90Hz와 130Hz로 동작시킨 경우인데 두 경우 모두 최대 분사·흡입 속도는 1m/s로 유지되고 있음을 볼 수 있다. 열선유속계는 음의 속도를 측정할 수 없으므로 흡입시의 속도도 양의 값으로 표시되었다.

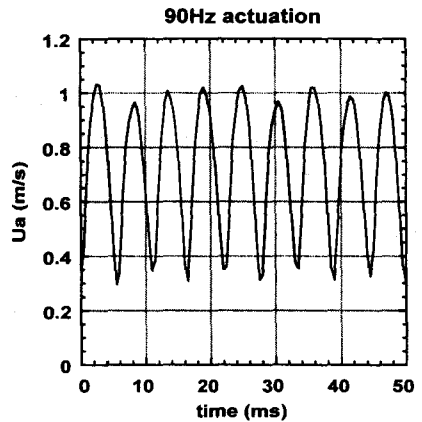
## 2.4 압력 및 항력 측정

구 표면의 압력은 비닐튜브를 통해 마노미터(MKS-220)에서 계측되며 구가 받는 항력은 로드셀(CAS, BCL)과 스트레인 앰프(Measurement group, 2310)로 측정하였다. 계측된 아날로그 신호는 컴퓨터에 내장된 12비트 A/D 변환기에서 디지털화 되며 이 값은 다시 컴퓨터 하드디스크에 저장된다. 모든 아날로그 신호는 1kHz의 주파수로 20초 동안 취득하였다.

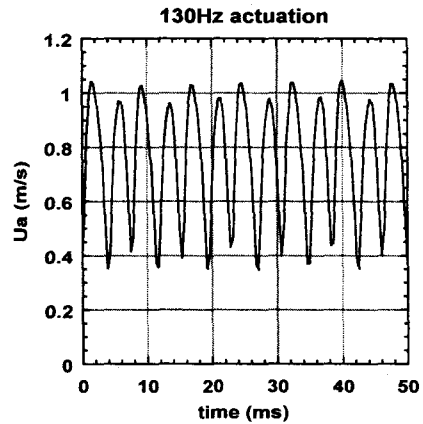
## 3. 실험결과

### 3.1 압력 및 항력측정

실험장치 및 측정장치의 신뢰성을 검증하기 위하여 압력을 측정하고 이전 연구와 비교하여 Figure 5에 나타내었다. 측정된 압력은  $Re=1.62 \times 10^5$  인 Achenbach<sup>(1)</sup>의 실험결과와 유사한 분포를



(a)



(b)

Fig. 4 Actuation velocity at the slot exit: (a) 90Hz; (b) 130Hz

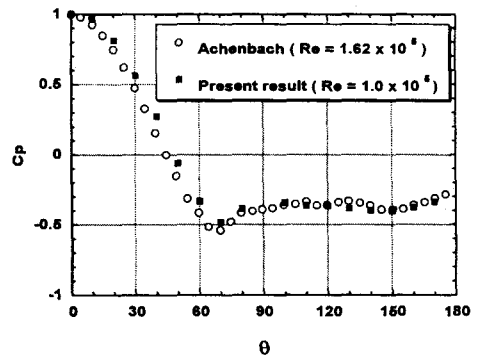


Fig. 5 Static pressure distribution on the sphere surface

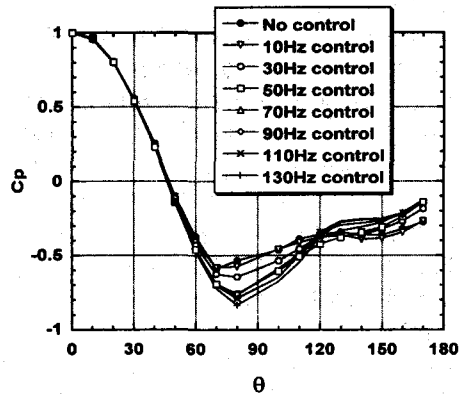
보이고 있다. Figure 6은 액추에이터를 동작시키면서 압력 분포를 측정한 것이다. 그림으로부터 유동제어에 의해 유동박리 지점이 뒤로 밀린 것과 구 뒷부분의 압력이 증가한 것을 볼 수 있다. 이러한 형태의 압력 분포는 Re 값이 대략 300000 이상일 때 나타나는데 이 영역은 난류 유동 박리가 발생하는 영역이므로 유동제어에 의해 난류로의 전이가 촉진되었음을 알 수 있다. 제어 주파수가 증가함에 따라 구의 후면 압력이 계속적으로 증가하다가 110Hz에서 최대값을 보인다(Figure 6(b)). 구의 후면 압력 증가는 항력 감소를 의미하며 항력측정을 통해 이를 확인할 수 있다. 로드셀을 이용하여 유동제어에 따른 항력변화를 측정하여 Figure 7에 나타내었다. 항력은 액추에이터의 작동 주파수가 10Hz일 때 약간 증가했다가 주파수가 커짐에 따라 감소하여 110Hz에서 최대 25% 감소를 보인 후 다시 증가하였다. 최대 항력 감소가 발생하는 110Hz는 natural shedding frequency ( $Re=10^5$ 에서 약 14Hz)의 약 8배에 해당한다. 이러한 현상은 제어 주파수가 자연 이탈 주파수보다 큰 경우 최대의 항력 감소가 발생한다고 보고한 Tokumaru & Dimodakis<sup>(5)</sup>의 결과와 일치한다.

### 3.2 유동가시화

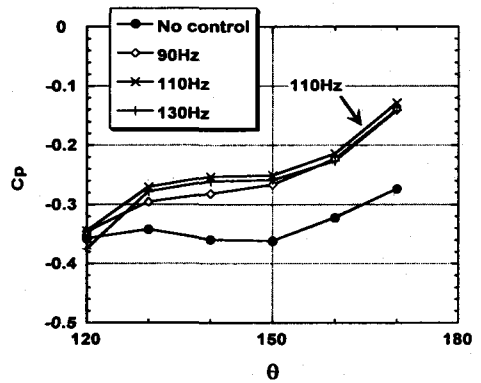
구 주위의 유동가시화를 위하여 smoke-wire와 레이저를 이용한 가시화 장치를 제작하였다. 사용된 smoke-wire의 재질은 100 $\mu$ m의 니크롬선이며 길이 당 저항은 155 $\Omega$ /m이다. 레이저는 500mW용량의 다이오드 레이저(Polaroid, 500-660-COL)로서 렌즈를 사용하여 평면광으로 처리하여 사용하였다. 니크롬선에 가한 전압은 직류 60V이며 이를 300ms동안 공급하여 스모크를 발생시켰다. Smoke-wire를 구의 상류와 하류에 위치시키고 액추에이터의 동작에 따른 유동 변화를 촬영하여 이를 Figure 8에 나타내었다. 이 때 액추에이터는 항력 감소가 가장 큰 110Hz로 동작시켰다. Smoke-wire를 구의 상류에 위치시켰을 경우, 이탈 전단층(detaching shear layer)이 구의 중심으로 유도됨을 볼 수 있다. 한편, smoke-wire를 구의 하류에 위치시킬 경우, 박리 기포의 크기가 감소하였으며 기포 내의 유체 움직임도 상당히 둔화됨을 볼 수 있다.

## 4. 결론

본 연구에서는 전자식 액추에이터를 개발하고



(a)



(b)

Fig. 6 Variation of the static pressure distribution with the forcing frequency: (a)  $0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$ ; (b)  $120^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$

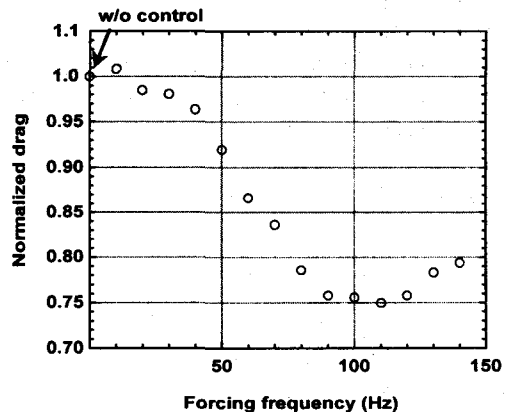


Fig. 7 Variation of drag with the forcing frequency

이를 구 주위의 유동제어에 적용하였다. 개발된 전자식 액추에이터는 넓은 작동주파수를 가지며 제어량 및 액추에이터간의 위상을 조절할 수 있는 장점이 있다. 유동제어를 통하여 유동박리가 지연되었고 박리 기포의 크기도 감소하였다. 이러한 결과는 구의 항력이 감소하였다는 것을 의미하며 직접 항력을 측정하여 이를 확인할 수 있었다. 구의 항력은 자연 보텍스 shedding 주파수 부근에서 약간 증가하였고 이 후 주파수가 증가함에 따라 계속 감소하다가 자연 보텍스 shedding 주파수의 약 8배인 110Hz에서 최소값을 보인 후 다시 증가하였다.

### 후 기

본 연구는 과학기술부 창의적 연구 진흥사업의 지원에 의해 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

### 참고문헌

- (1) Achenbach, E. 1972 Experiments on the flow past spheres at very high Reynolds numbers, *J. Fluid Mech.*, **54**, 565.
- (2) Taneda, S. 1978 Visual observations of the flow past a sphere at Reynolds numbers between 104 and 106, *J. Fluid Mech.*, **85**, 187.
- (3) Kim, H. J. and Durbin, P. A. 1988 Observations of the frequencies in a sphere wake and of drag increase by acoustic excitation, *Phys. Fluids*, **31**, 3260.
- (4) Sakamoto, H. and Haniu, H. 1990 A study of vortex shedding from spheres in a uniform flow, *J. Fluids Eng.*, **112**, 386.
- (5) Tokumaru, P. T. and Dimotakis, P. E. 1991 Rotary oscillation control of a cylinder wake. *J. Fluid Mech.*, **224**, 77.

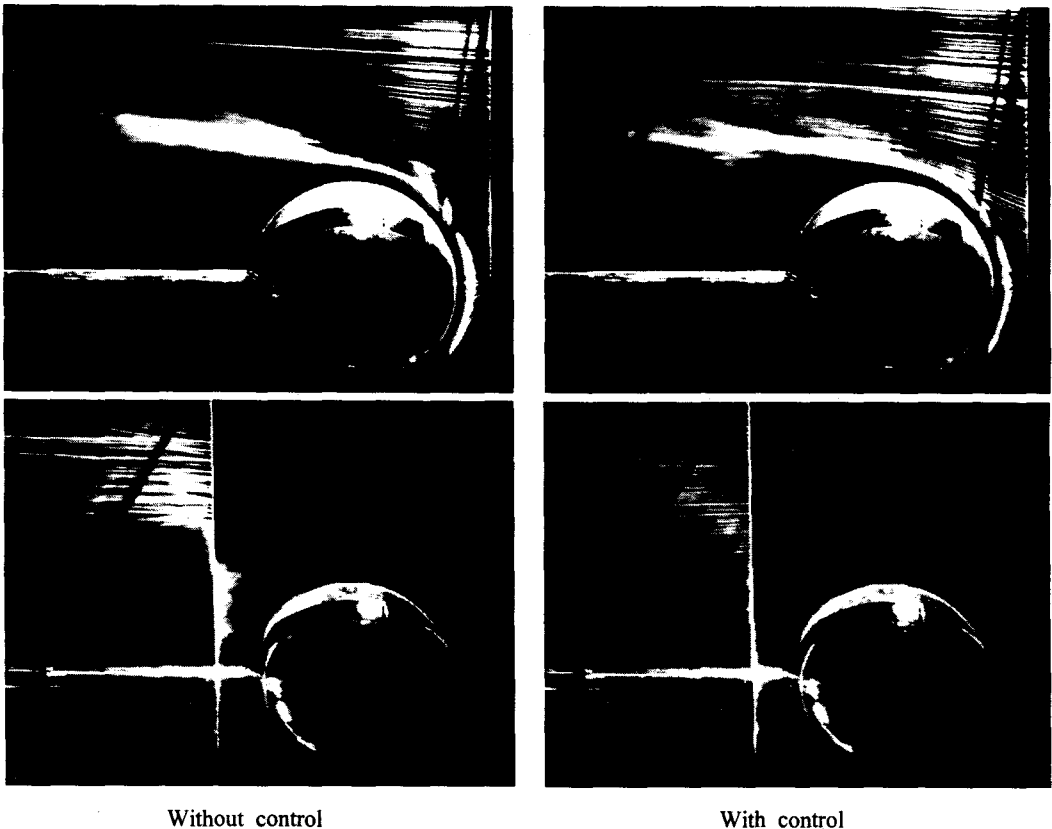


Fig. 8 Flow visualizations with and without control.  $f=110\text{Hz}$  in the case of control