

구 주위 유동의 선형비례제어

전승[†] · 최해천^{*}

Linear Proportional Control of Flow Over a Sphere

Seung Jeon and Haecheon Choi

Key Words : Drag(저항), Lift(양력), Sphere(구), Linear proportional control(선형비례제어), Fluctuation(섭동)

Abstract

In the present study, we reduce the drag and lift fluctuations of the sphere by providing a linear proportional control. For this purpose, we measure the radial velocity along the centerline in the wake and provide blowing and suction at a part of sphere surface based on the measured velocity. Zero-net mass flow rate is satisfied during the control. This control is applied to the flow over a sphere at $Re=300$ and 425 . We vary the sensing location at $0.8d \leq x_s \leq 1.3d$ and find that the most effective sensing region coincides with the location at which minimum correlation between the lift and sensing-velocity directions occurs. As a result, the lift and drag fluctuations are significantly reduced.

1. 서론

흐르는 유체 안에 잠겨있는 뚱뚱한 물체 주변에서는 보텍스 shedding이 발생한다. 이러한 보텍스 shedding은 항력과 양력의 섭동을 일으키며, 이러한 섭동으로 인해서 진동, 소음 등의 문제가 발생하게 된다. 따라서 유동을 제어하기 위해 준최적제어⁽¹⁾, 분할판⁽²⁾, 탭⁽³⁾ 등의 많은 연구가 2 차원 형상에서 개발되었으나 3 차원 형상에 적용하는 것은 한계가 있다. 구는 단순한 형상에도 불구하고 그 주위의 유동은 복잡한 3 차원의 거동을 보여, 3 차원의 유동제어방법을 개발하기 위해 주로 선택된다. 지금까지 구 주위의 유동은 통풍⁽⁴⁾, 가진⁽⁵⁾, 딥플⁽⁶⁾ 등을 이용하여 높은 레이놀즈 수에서 성공적으로 제어되었다. 그러나 이 방법들을 이용하여 낮은 레이놀즈 수에서의 구 주위의 유동을 제어하는 것은 한계가 있다. 따라서 본 연구의 목적은 낮은

레이놀즈 수에서의 구 주위의 양력과 항력의 섭동을 줄이는 것이며, 이를 위해서 선형비례제어를 구 주위의 유동에 적용하였다. 본 논문에서는 2 절에서 지배방정식과 수치해석방법, 3 절은 제어방법, 4 절은 결과, 5 절은 결론을 서술하였다.

2. 지배방정식과 수치해석방법

구 표면에서의 점착조건과 표면의 분사/흡입 속도를 만족시키기 위해서 본 연구에서는 원기둥 좌표계에서 가상경계방법⁽⁷⁾을 이용하였다. 지배방정식으로는 가상경계방법을 위한 가진 항과 source/sink 항이 추가된 다음과 같은 비압축성 Navier-Stokes 식과 연속방정식이 사용되었다.

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{Re} \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} + f_i \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} - q = 0 \quad (2)$$

[†] 서울대학교 대학원

E-mail : jeon_seung@euler.snu.ac.kr

TEL : (02) 880-1655

^{*} 서울대학교 기계항공공학부

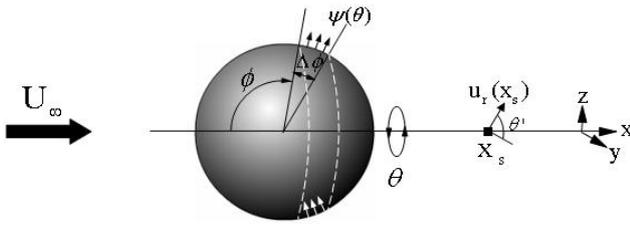


Fig. 1 Schematic diagram.

여기서 t 는 시간, x_i 는 원기둥 좌표계, u_i 는 속도성분, p 는 압력, $Re = U_\infty d / \nu$ 는 자유유동속도와 구의 지름으로 무차원화된 레이놀즈 수, f_i 는 운동량 가진, q 는 source/sink 항을 나타낸다. 두 식을 동시에 만족시키기 위해 분할단계방법을 사용하였다. 시간전진을 위해 $r \leq 0.1$ 인 지역에서는 Crank-Nicolson 방법을 이용하여 θ 방향을, 나머지 방향은 3 차 정확도의 Runge-Kutta 방법을 사용하였으며, $r > 0.1$ 인 지역에서는 r 방향을 Crank-Nicolson 방법을 이용하고 나머지 방향은 3 차 정확도의 Runge-Kutta 방법을 사용하였다⁽⁸⁾. 입구와 유동장의 바깥은 Dirichlet 경계조건, 출구는 대류경계조건을 사용하였다.

3. 제어방법

Park⁽⁹⁾ 등에 의해 개발된 선형비례제어방법은 2 차원 원기둥 주위의 유동장의 섭동을 성공적으로 줄였다. 이에 본 연구에서는 Park⁽⁹⁾ 등에 의해 개발된 선형비례제어방법을 3 차원 형상에 적용하였다. Fig. 1 은 선형비례제어방법의 개략도이다. U_∞ 는 자유유동속도, ϕ 는 방위각으로 $0 \leq \phi \leq \pi$, θ 는 원추각으로 $0 \leq \theta \leq 2\pi$, x_s 는 측정위치, ψ 는 분사/흡입, u_r 은 측정된 반지름 방향으로의 속도를 의미한다. 선형비례제어방법은 후류 지역의 구 중심선 중 한 점에서 측정된 속도를 바탕으로 구 표면에서의 분사/흡입 속도를 다음 식을 통해 결정한다.

$$\psi(\theta) = \alpha |u_{r,sensed}| \cos(\theta - \theta') \quad (3)$$

여기서 α 는 피드백 제어 계수, $|u_{r,sensed}|$ 는 측정된 속도의 크기, θ' 는 측정된 속도의 원추각을 의미한다. 이때 분사/흡입은 원추각 방향(θ)으로만

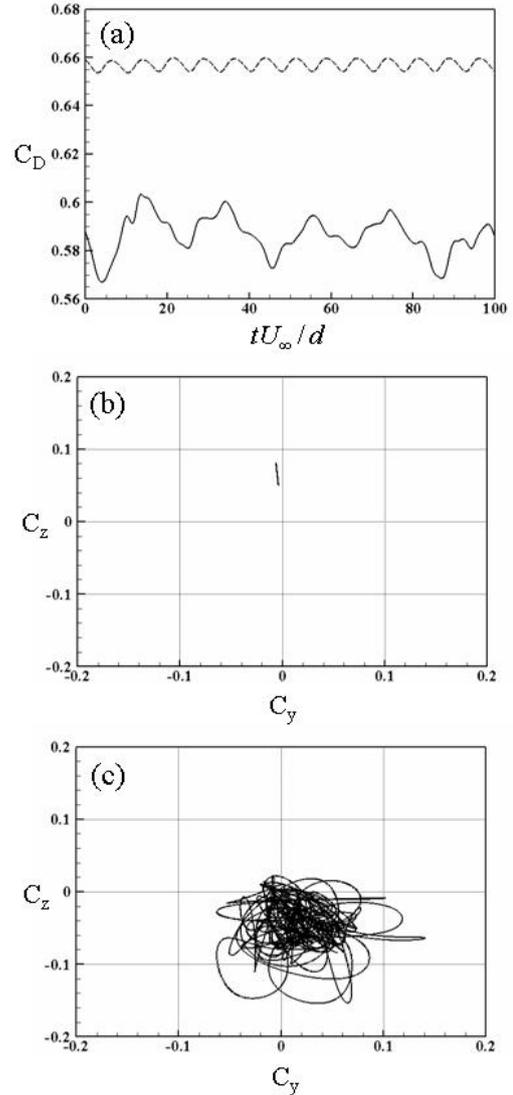


Fig. 2 Drag and lift coefficients of without control: (a) time histories of drag coefficients (---, $Re=300$; —, $Re=425$); (b) phase diagram of lift coefficient at $Re=300$; (c) phase diagram of lift coefficient at $Re=425$.

변화하며, 방위각 방향(ϕ)으로는 변화하지 않는다. 분사/흡입지역은 박리점 근처인 $100^\circ \leq \phi \leq 120^\circ$, $0^\circ \leq \theta \leq 360^\circ$ 에 위치한다. 제어를 하는 동안 제어 유량의 총합은 0 이다.

4. 결과

낮은 레이놀즈 수에서 구 주위의 유동장은 레이놀즈 수가 바뀔에 따라서 다양한 종류의 유동구조를 가지게 된다. 레이놀즈 수가 증가함에 따라서 정상 축대칭, 정상 면대칭, 비정상 면대칭, 비정상

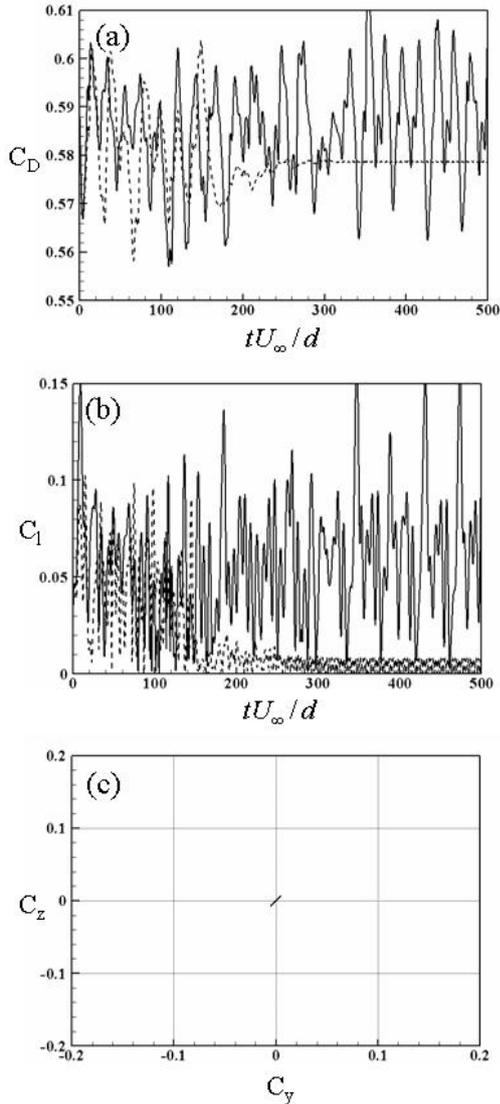


Fig. 3 Drag and lift coefficients at $Re=425$: —, without control; ---, with control. (a) Time histories of drag coefficients; (b) time histories of lift coefficients; (c) phase diagram of final state.

비대칭의 유동구조로 순서대로 바뀌게 되며, 본 연구에서는 항력과 양력의 섭동이 존재하는 비정상 면대칭, 비정상 비대칭의 유동구조를 가지는 $Re=300$ 과 $Re=425$ 를 선택하여 제어를 수행하였다. Fig. 2 는 제어를 하지 않았을 때의 항력계수와 양력계수를 보여준다. C_y 와 C_z 는 y 방향과 z 방향에 대응하는 계수이며, 양력계수는 $C_l = \sqrt{C_y^2 + C_z^2}$ 로 구해진다. 이때 시간 평균된 항력계수 값은 기존의 연구와 잘 일치한다⁽¹⁰⁾. Fig. 2 에서 확인할 수 있듯이, 항력계수와 양력계수의 섭동 모두 레이놀즈 수가 425 일 경우 훨씬 크다. 그러므로 본 연구에서는 $Re=425$ 의 경우를 중점

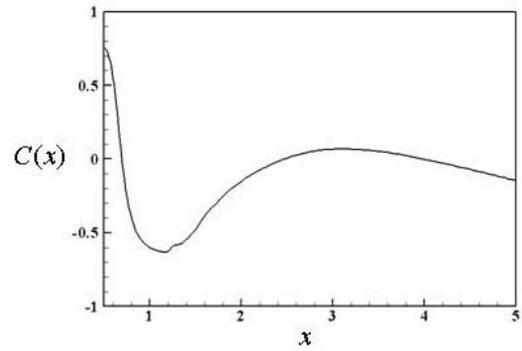


Fig. 4 Correlation of the directions between the lift and sensing velocity.

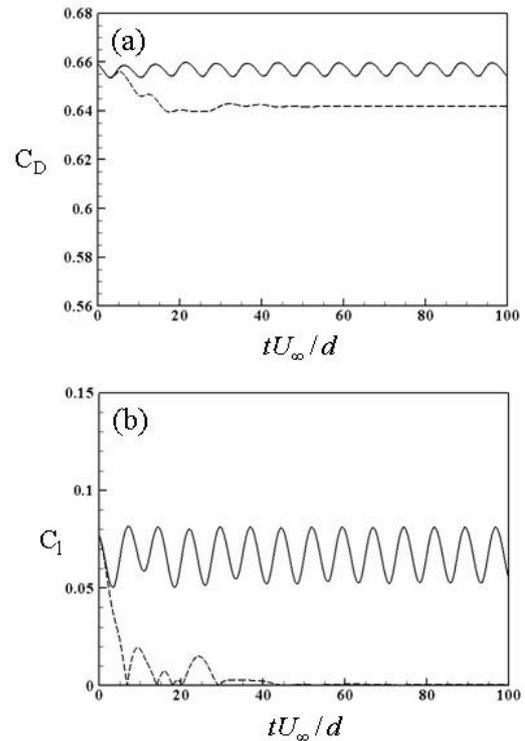


Fig. 5 Time histories of drag and lift coefficients at $Re=300$: —, without control; ---, with control. (a) C_D ; (b) C_l .

적으로 다루고자 한다. Fig. 3 은 선형비례제어방법을 $Re=425$ 에 적용한 결과이다. 측정위치는 $0.8d \leq x_s \leq 1.3d$ 로 변화시키며 제어하였고, 그 중 가장 성공적인 제어결과는 피드백 제어 계수 $\alpha = -0.5$, 측정위치 $x_s = 1.2d$ 일 때 얻어졌다. 이 결과 Fig. 3 에서 볼 수 있듯이 항력계수와 양력계수의 섭동 값은 제어를 통해서 크게 감소하였다. 또한 제어를 하기 전에는 Fig. 2 (c)와 같이 양력계수의 크기와 방향이 임의로 변화하며 그 변화량도 크지만 제어를 수행한 결과 양력계수의 변화는 크게 줄어들고 양력계수의 방향 또한 일정하게 유지된다(Fig. 3 (c)). 이러한 섭동의 감소는 보

텍스 웨딩이 약해짐에 따라 얻어진다. 그러므로 성공적인 제어를 위해서는 보텍스 웨딩과 밀접한 관계가 있는 측정지역을 찾는 것이 중요하다. 보텍스가 구 표면에서 국소적으로 떨어져 나가는 현상은 양력의 방향과 밀접한 관계를 가지고 있으므로, 양력의 방향과 큰 상관관계를 가지고 있는 측정위치를 찾음으로써 성공적인 제어결과를 얻을 수 있다. 이 위치를 찾기 위해 다음과 같은 상관함수를 정의하였다.

$$C(x) = \frac{\int_0^T \cos(\theta_{c_i} - \theta_{u_i}) dt}{T} \quad (4)$$

여기서 $C(x)$ 는 상관함수이며, θ_{c_i} 은 양력의 방향, θ_{u_i} 은 측정된 속도의 방향, T 는 총 평균 시간을 의미한다. 따라서 이 값이 1 또는 -1에 가까운 값을 가지게 될수록 양력의 방향과 측정된 속도의 방향은 큰 상관관계를 가지게 된다. Fig. 4는 구의 중심선을 따라서 얻어진 관계함수의 값을 나타낸 그래프다. 성공적인 제어결과를 얻은 측정위치인 1.2d에서 가장 작은 상관함수값을 가지는 것을 알 수가 있다. 또한 이 방법을 비정상 면대칭 유동구조를 갖는 $Re=300$ 의 경우에도 적용을 해 보았다. 그 결과 Fig. 5 (a)와 (b)에서 볼 수 있듯이 항력계수와 양력계수의 섭동 값은 0이 되어 정상유동의 형태로 변화하였다.

5. 결론

본 연구에서는 낮은 레이놀즈 수에서 구의 항력과 양력의 섭동을 줄이기 위해서 선형비례제어방법을 구에 적용하였다. 선형비례제어방법을 위해서 구의 중심선에 위치하는 후류의 한 지점에서 반지름방향 속도성분을 측정하였으며, 이를 통해 구 표면에서의 분사/흡입속도를 계산하였다. 이러한 선형비례제어방법을 이용하여 $Re=425$ 와 $Re=300$ 에서 구에 작용하는 항력과 양력의 섭동을 크게 줄일 수 있었다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 국가지정연구실사업과 교육인적자원부의 BK21 Program의 지원 하에 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Min, C. and Choi, H., 1999, "Suboptimal feedback control of vortex shedding at low Reynolds number," *J. Fluid Mech.*, Vol 401, pp. 123~156.
- (2) Bearman PW., 1965, "Investigation of the flow behind a two-dimensional model with a blunt trailing edge and fitted with splitter plates," *J. Fluid Mech.*, Vol. 21, pp. 241~255.
- (3) Park, H., Lee, D., Jeon, W.-P., Hahn, S., Kim, J., Kim, J., Choi, J. and Choi, H., 2006, "Drag reduction in flow over a two-dimensional bluff body with a blunt trailing edge using a new passive device," *J. Fluid Mech.*, Vol. 563, pp. 389~414.
- (4) Suryanarayana, G. K., Pauer, H. and Meier, G. E. A., 1993, "Bluff-body drag reduction by passive ventilation," *Exp. Fluids*, Vol. 16, pp. 73~81.
- (5) Jeon, S., Choi, J., Jeon, W.-P., Choi, H. and Park, J., 2004, "Active control of flow over a sphere at a subcritical Reynolds number," *J. Fluid Mech.*, Vol. 517, pp. 113~129.
- (6) Choi, J., Jeon, W.-P. and Choi, H., 2006, "Mechanism of drag reduction by dimples on a sphere," *Phys. Fluids*, Vol.18, pp. 014702.
- (7) Kim, J., Kim, D. and Choi, H., 2001, "An immersed-boundary finite volume method for simulations of flow in complex geometries," *J. Comput. Phys.*, Vol. 171(1), pp. 132~150.
- (8) Akselvoll, K. and Moin, P., 1995, "Large eddy simulation of turbulent confined coannular jets and turbulent flow over a backward facing step," *Report No. TF-63 (Thermoscience Division, Department of Mechanical Engineering, Stanford University)*.
- (9) Park, D. S., Ladd, D. M. and Hendricks E. W., 1994, "Feedback control of von Karman vortex shedding behind a circular cylinder at low Reynolds numbers," *Phys. Fluids*, Vol. 6, pp. 2390~2405.
- (10) Johnson, Y. A. and Patel, V. C., 1999, "Flow past a sphere up to a Reynolds number of 300," *J. Fluid Mech.*, Vol. 378, pp. 19~70.