

## 능동제어를 이용한 구의 저항 감소

전승\* · 최해천\*\*

### Active Controls of Flow Over a Sphere for Drag Reduction

Seung Jeon\* and Haecheon Choi\*\*

**Keywords :** Sphere(구), Suboptimal control(준최적제어), Surrogate Management Framework, Drag(저항)

#### Abstract

The objective of this study is to propose methods of controlling the wake behind a sphere for drag reduction using the suboptimal control theory and surrogate management framework, respectively. The Reynolds numbers considered is 300 at which the base flow is unsteady planar symmetric. Given the cost function defined as the square of the difference between the target pressure (potential-flow pressure) and real flow pressure on the sphere surface, the suboptimal control makes the flow steady axisymmetric and produces drag reduction. Based on the actuation profile from the suboptimal control, the optimal wavy actuation profile is obtained using the surrogate management framework and produces drag reduction.

#### 1. 서론

뭉툭한 물체 주변의 유동현상은 공학적으로 큰 연구가치를 지니고 있다. 뭉툭한 물체는 유동의 속도가 증가함에 따라 보텍스 쉼딩(vortex shedding)이 발생하게 되며 이러한 보텍스 쉼딩으로 인해서 뭉툭한 물체의 저항은 크게 증가하게 된다. 이에 많은 연구자들이 뭉툭한 물체의 저항을 줄이기 위해서 꾸준히 연구를 수행하였다.

구는 대표적인 3차원 형상이지만 그 단순한 형상과는 달리 복잡한 유동구조로 인하여 그 동안 구의 저항을 줄이기 위한 연구는 많이 진행되지 않았다. Kim & Durbin[1]은 저주파에서 고주파 가진을 적용한 결과 구의 저항이 증가하였다. Suryanarayana & Meier[2]는 구 형상의 변형을 통해서 저항 감소를 얻었다. 최근 Jeon *et al.*[3]은 고주파 가진을 통하여, Choi *et al.*[4]은 딴플(Dimple)을 통해 구의 저항을 크게 감소시켰다. 그러나, 이 연구들은 아임계영역에서 구 표면의 유동을 난류 경계층으로 만들어 유동박리현상을 통하여 항력감소를 얻었다. 따라서 이 제어방법들은 낮은 레이놀즈 수의 유동에 적용되었을 때 항력을 감소시킬 수 없다. 이에 본 연구에서는 넓은 레이놀즈 수 영역에서 효율적으로 저항을 감소시키기 위한 방법으로 준최적제어방법과 Surrogate Management Framework 방법을 사용하였다.

준최적제어방법은 Choi *et al.*[5]에 의해 개발된 방법으로 지금까지 난류채널[6], 2차원 원기둥[7], 후향계단[8] 등 다양한 유동장에서 성공적인 제어결과를 보여준 방법이며, 수학적으로 정의가 된 방법이기 때문에 물리적인 직관을 얻기가 힘든 경우에도 성공적인 제어결과를 얻을 수 있는 장점을 지니고 있다. Surrogate Management Framework은 최적 설계 방법 중 하나로써 다른 최적설계 방법에 비하여 여러 가지 장점을 지니

고 있다[9]. 본 연구에서는 이러한 방법들을 Re=300에서의 구 주위 유동에 적용하여 항력감소를 얻고자 한다.

#### 2. 지배방정식과 수치해석방법

본 연구에서는 Kim *et al.*[10]에 의해 제안된 가상경계방법을 이용하여 비압축성 Navier-Stokes 식과 연속방정식을 풀이하였다.

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

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

여기서  $u_i$ 는 속도성분을 나타내며,  $x_i$ 는 원통 좌표계  $(x, r, \theta)$ 의 위치성분이다.  $f_i$ 와  $q$ 는 각각 가상경계방법을 사용함에 따라 추가되는 운동량 부가와 질량부가를 나타낸다. 원통 좌표계에서 주어진 식을 풀이하기 위하여 본 연구에서는 Akselvoll & Moin[11]이 사용한 준내재적(Semi-implicit) 분할 단계 방법(fractional step method)을 사용하였다. 계산의 효율성을 증대시키기 위하여 계산영역을 내부와 외부로 나누어 내재적(implicit) 방법과 명시적(explicit) 방법을 서로 다른 항에 적용하였으며, 내재적 항은 2차 정확도의 Crank-Nicolson 방법을, 명시적 항은 3차 정확도의 Runge-Kutta 방법을 각각 적용하였다.

자유 유동속도와 구의 지름으로 정의된 레이놀즈 수는 300이며, 그리드의 개수는 주 유동방향, 반지름방향, 원주방향으로 각각  $289 \times 161 \times 65$ 이다. 경계조건은 입구와 바깥쪽 경계에서는 Dirichlet 경계조건을 주었으며, 출구에서는 대류 경계조건을 사용하였다. 주어진 그리드와 출구의 경계조건을 사용

\* 서울대학교 대학원, jeon\_seung@euler.snu.ac.kr

\*\* 서울대학교 기계항공공학부, choi@snu.ac.kr

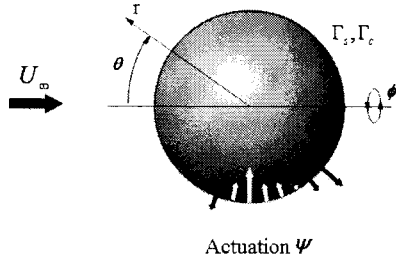


Fig. 1 Schematic diagram.

하여 구 주위의 유동장을 계산했을 때 Johnson & Patel[12]의 결과와 저항계수와 양력계수, Strouhal 수 등이 거의 일치하였다.

### 3. 제어방법

#### 3.1 준최적제어

준최적제어는 되먹임 (feedback) 제어방법이며, 되먹임을 위한 측정영역 ( $\Gamma_s$ ) 과 분사/흡입이 적용될 가진영역 ( $\Gamma_c$ )이 존재하여야 한다. 본 연구에서는 실용화를 염두에 두고 측정지역과 가진영역을 구의 표면으로 한정하였다. 또한 구 표면에서 가진되는 분사/흡입의 총 양은 0으로 제한하였다. Figure 1은 준최적제어의 개략도로서  $U_\infty$ 는 자유유동속도를 나타내며,  $r, \theta, \phi$ 는 구 좌표계의 각 방향을 나타낸다. 측정영역 ( $\Gamma_s$ ) 과 가진영역 ( $\Gamma_c$ )은 구의 표면 전체에 존재한다. 분사/흡입 ( $\Psi$ )은 구의 표면에 수직한 방향으로 이루어진다.

준최적제어를 위한 측정변수는 표면압력이며, 이때 목적함수는 다음과 같다.

$$J(\Psi) = \frac{1}{2} \int_{\Gamma_s} (p_i(\theta, \phi) - p(\theta, \phi))_{r=R} R^2 \sin \theta d\theta d\phi \quad (3)$$

$$p_i = \cos^2 \theta - \frac{5}{4} \sin^2 \theta \quad (4)$$

이때  $\Psi$ 는  $\theta$ 와  $\phi$ 의 함수이며,  $p_i$ 는 목적하는 압력으로서 구 주위 포텐셜 유동의 압력으로 정하였다.  $R$ 은 구의 반지름이다. 구 주위 포텐셜 유동에서는 구의 형상저항이 0이다. 그러므로 분사/흡입을 통하여 목적함수 값을 줄이는 것은 구 표면에서 측정된 압력과 포텐셜 유동의 압력차이를 줄이는 것을 의미하며, 그 결과 형상저항 값이 줄어들 수 있다. 이 목적함수를 이용하여 Min & Choi[7]는 이차원 원기둥 저항을 크게 줄였다.

매 순간 주어진 목적함수를 줄이는 분사/흡입은 준최적제어과정을 통하여 다음과 같이 결정된다[5-8].

$$\Psi(\theta, \phi, t) = \alpha \left[ (p_i(\theta, \phi) - p(\theta', \phi', t))_{r=R} \right. \\ \left. \Pi(\theta' - \theta, \phi' - \phi) \right]_{r=R} R^2 \sin \theta' d\theta' d\phi' \quad (5)$$

이때  $\alpha$ 는  $\psi_{\max} = 0.1U_\infty$ 가 되도록 결정하였으며,  $\Pi$ 는 압력의 선형화된 Fréchet differential state다.

### 3.2 Surrogate Management Framework

준최적제어는 되먹임 제어의 한 종류이기 때문에 제어를 하는 동안 특정변수를 측정해야 한다. 본 연구에서는 준최적제어를 통해 얻어진 분사/흡입형상을 바탕으로 Surrogate Management Framework(SMF)를 적용하여 최적 분사/흡입형상을 구하였다.

SMF는 몇 개의 변수를 가지고 있는 계산영역에서 최적 값을 구하기 위해서 사용하는 방법으로 기존의 최적설계 방법들에 비해서 수렴성이 보장되며, 대체함수를 이용하기 때문에 비용이 저렴하다는 장점을 지니고 있다. 이에 Marsden *et al.*[9]은 SMF를 이용하여 유동소음을 최소화 하는 2차원 airfoil의 형상을 설계하였다. SMF는 다음과 같은 단계로 구성된다.

- (i) 초기값을 이용하여 대체평면을 구성;
- (ii) 구성된 대체평면을 pattern search method를 이용하여 더 나은 점을 예상 (Search step);
- (iii) 더 나은 점이 예상되지 않을 경우 현재 최적점 주변의 값을 이용하여 새로운 평면을 구성 (Poll Step);
- (iv) 수렴할 때까지 (ii)와 (iii)단계의 반복.

### 4. 결과

#### 4.1 준최적제어

앞에서 언급하였듯이 본 연구에서는 구의 표면전체에서 압력을 측정하고 분사/흡입을 수행하였다. 수행된 연구의 시간간격인  $\Delta t = 0.01$ 이며 제어를 위한 시간간격인  $\Delta t_c = 0.25$ 를 사용하였다. 계산의 안정화를 위해서 제어 초기의 분사/흡입 값은 천천히 증가를 시켰다. 본 연구에 사용된  $Re=300$ 은 비정상 면대칭의 유동구조를 가지고 있는 영역이며, 제어에 사용된 분사/흡입의 양은 최대값이 자유유동속도의 10%가 되도록 하였다.

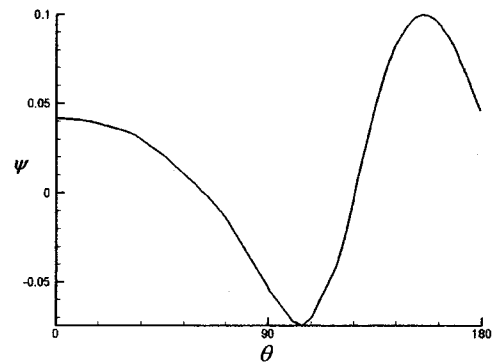


Fig. 2 Actuation profile.

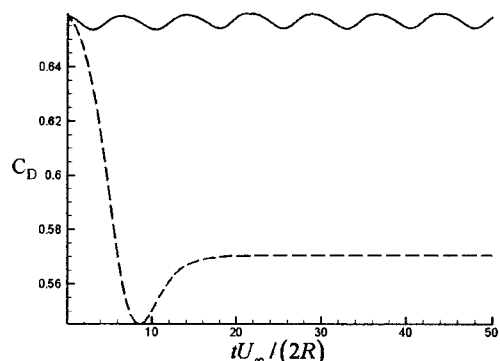


Fig. 3 Time history of drag coefficient: —, without control; ---, with suboptimal feedback control.

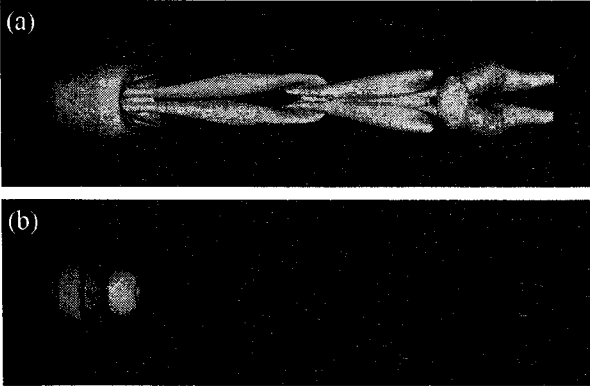


Fig. 4 Vortical structures: (a) without control; (b) with suboptimal feedback control.

식 (5)의 분사/흡입의 형태는 figure 2와 같다. 시간의 흐름에 따른 분사/흡입의 형태는 큰 변화가 없었다. Figure 2에서 볼 수 있듯이 정체점으로부터 약 110도 떨어진 곳에서 최대 흡입이 발생하게 되며, 정체점으로부터 약 160도 떨어진 곳에서 최대 분사가 일어나게 된다.

이러한 분사/흡입을 통해서 구에서는 박리가 지연되게 되며 박리의 지연을 통해서 구의 후면에서의 압력회복이 증가하게 되어 압력저항이 감소를 하게 된다. 그 결과 약 13%의 항력감소를 얻었다 (figure 3). 또한 시간 평균된 양력계수 또한 0.067에서 0으로 변화하였다. Figure 4는 이렇게 변화된 유동구조를 Jeong & Hussain[13]의  $\lambda_2$  방법을 이용하여 가시화한 것이다. Figure 4에서 볼 수 있듯이 준최적제어를 통하여 후류의 복잡한 유동구조가 사라졌으며, 비정상 면대칭의 유동구조 형상이 정상 축대칭의 유동구조 형상으로 변화하였다.

#### 4.2 Surrogate Management Framework

Figure 2에서 볼 수 있듯이, 준최적제어 방법을 이용하여 성공적으로 저항을 줄인 분사/흡입은 정현파의 형태를 띠고 있다. 따라서 구의 저항을 가장 크게 줄이는 최적의 정현파 형태를 구하기 위하여 SMF를 사용하였다. 최적 정현파의 형태를 구하기 위한 함수의 형태와 자유변수는 다음과 같다.

$$\psi(\theta) = \alpha(\psi_m(\theta) - \bar{\psi}) \quad (6)$$

$$\psi_m(\theta) = \psi_{m1}(\theta) \text{ or } \psi_{m2}(\theta) \quad (7)$$

$$\psi_{m1}(\theta) = A \cos 2\theta - B \sin 2\theta \quad (8)$$

$$\psi_{m2}(\theta) = A \cos 2\theta - B \sin 2\theta - C \cos 3\theta + D \sin 3\theta \quad (9)$$

$$\bar{\psi} = \frac{\int \psi_m(\theta) R^2 \sin \theta d\theta d\phi}{\pi} \quad (10)$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{0.01}{\int (\psi_m(\theta) - \bar{\psi})^2 R^2 \sin \theta d\theta d\phi}} \quad (11)$$

이때  $\bar{\psi}$ 는 분사/흡입의 총 합을 0으로 만들기 위한 상수이며,  $\alpha$ 는 최적 정현파의 형태를 구하기 위해 동일한 에너지로 분사/흡입을 하기 위한 상수이다. SMF를 통한 최적 분사/흡입의

형태는 figure 5와 같으며  $\psi_{m1}$ 의 A, B값은 각각 0.5와 -0.3이고  $\psi_{m2}$ 의 A, B, C, D값은 각각 0.4, -0.4, 0.6, 0.8이다. Figure 5에서 볼 수 있듯이 최대 흡입이 일어나는 지역은 정체점으로부터  $\theta$ 방향으로 약 110도 떨어진 구간으로, 앞서 얻어진 준최적제어의 분사/흡입과 유사하다. 최적 분사/흡입을 이용하여 줄어든 구의 저항은 각각 17%와 18%이며 (figure 6), 비정상 면대칭 유동구조 또한 정상 축대칭 유동구조로 변화하였다. 제어 효율은  $\pi/4 \times (C_{D0} - C_D) / \int (|\psi|^3 + 2|p\psi|) R^2 \sin \theta d\theta d\phi$ 로 정의되며 두 경우 각각 1.30, 1.32이었다.

Figures 2와 5를 통해서 알 수 있듯이 특정지역에서의 분사/흡입은 구의 저항을 효율적으로 줄일 수 있을 것으로 생각된다. 이에 본 연구에서는 SMF를 이용하여 일부 지역에서의 분사/흡입을 통하여 구의 저항을 최소화 하는 분사/흡입위치를 찾았다. 이런 분사/흡입 최적 지역을 찾기 위해서 분사지역과 흡입지역의 크기는  $\theta$ 방향으로 각각 20°씩 정하였으며, 흡입 속도는 자유유동속도의 10%, 분사속도는 유량의 총합이 0이 되도록 맞춰주었다 (figure 7). SMF를 통한 최적의 분사위치는

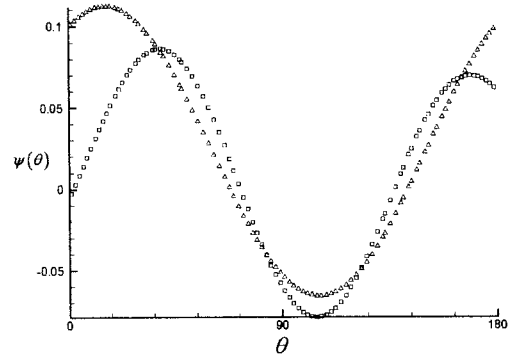


Fig. 5 Actuation profiles from SMF:  $\Delta$ ,  $\psi_{m1}$ ;  $\square$ ,  $\psi_{m2}$ .

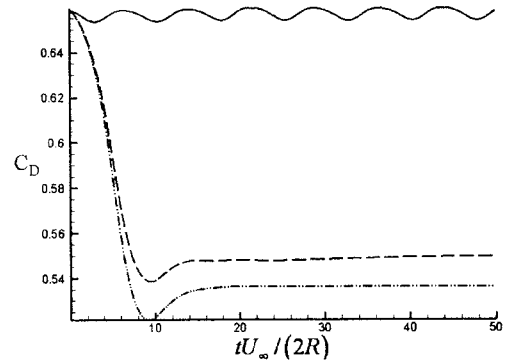


Fig. 6 Time histories of drag coefficient: —, without control; ---,  $\psi_{m1}$ ; - · -,  $\psi_{m2}$ .

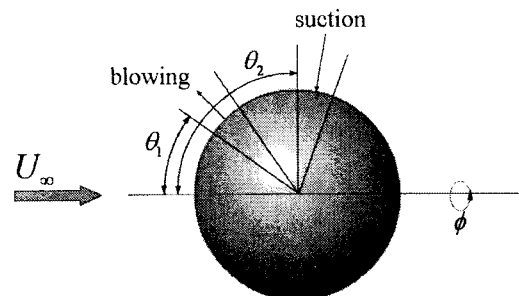


Fig. 7 Schematic diagram of optimal local blowing/suction.

정체점으로부터 35도이며 최적의 흡입위치는 정체점으로부터 90도에 위치하였다. 이 위치에서의 분사/흡입을 통하여 저항은 12.7% 감소하였으며, 효율은 2.71을 얻었다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 구에 작용하는 저항을 줄이기 위해 준최적 제어방법과 SMF방법을 각각 사용하였다. 준최적제어방법에서 사용된 목적함수는 실제 표면압력과 포텐셜 유동 압력과의 차이를 최소화하도록 정의하였으며, 이를 통해 얻어진 분사/흡입을 통해 저항을 줄일 수 있었다. 준최적제어방법을 통하여 구해진 분사/흡입 형태를 바탕으로 구의 저항을 최소로 하는 최적화된 정현파의 형상을 구하기 위해서 SMF를 이용하였다. 이렇게 구해진 정현파의 형상을 통해서 구의 저항을 감소시킬 수 있었다. 또한, 분사/흡입의 최적 위치도 SMF를 이용하여 구하였고, 이를 통하여 구의 저항을 감소시켰다.

#### 후기

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

#### 참고문헌

- [1] Kim, H. J. and Durbin, P. A., 1988, "Observations of the frequencies in a sphere wake and of drag increase by acoustic excitation." *Physics of Fluids*, Vol. 31, pp. 3260-3265.
- [2] Suryanarayana G. L., Meier, G. E. A., 1995, "Effect of ventilation on the flow field around a sphere." *Experiments in Fluids*, Vol. 19, pp. 78-88.
- [3] Jeon, S., Choi, J., Jeon, W.-P., Choi, H. and Park, J., 2004, "Active control of flow over a sphere at a sub-critical Reynolds number." *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 517, pp. 113-129.
- [4] Choi, J., Jeon, W.-P. and Choi, H., 2006, "Mechanism of drag reduction by dimples on a sphere." *Physics of Fluids*, Vol. 18, pp. 041702.
- [5] Choi, H., Temam, R., Moin, P. and Kim, J., 1993, "Feedback control for unsteady flow and its application to the stochastic Burgers equation." *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 253, pp. 509.
- [6] Lee, C., Kim, J. and Choi, H., 1998, "Suboptimal control of turbulent channel flow for drag reduction." *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 358, pp. 245-258
- [7] Min, C. and Choi, H., 1999, "Suboptimal feedback control of vortex shedding at low Reynolds numbers." *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 484, pp. 123-156.
- [8] Kang, S. and Choi, H., 2002, "Suboptimal feedback control of turbulent flow over a backward-facing step." *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 463, pp. 201-227.
- [9] Marsden, A. L., Wang M., Dennis Jr, J. E., Moin, P., 2004, "Suppression of vortex-shedding noise via derivative-free shape optimization." *Physics of Fluids*, Vol. 16(10), pp. L83-L86.
- [10] Kim, J., Kim, D. and Choi, H., 2001, "An Immersed-Boundary Finite Volume Method for Simulations of Flow in Complex Geometries." *Journal of Computational Physics*, Vol. 171 (1), pp. 132-150.
- [11] Akselvoll, K. and Moin, P., 1996, "An efficient method for temporal integration of the Navier-Stokes equations in confined axisymmetric geometries." *Journal of Computational Physics*, Vol. 125, pp. 454-463.
- [12] Johnson, T. A. and Patel, V. C., 1999, "Flow past a sphere up to a Reynolds number of 300." *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 378, pp. 19-70.
- [13] Jeong, J. and Hussain, F., 1995, "On the identification of a vortex." *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 285, pp. 69-94.