

고정된 분포 분사/흡입을 통한 채널 유동의 저항 감소

김주현* · 최해천**

Drag reduction in channel flow using stationary distributed blowing and suction

Joohyun Kim* and Haecheon Choi**

Keywords : Skin friction(마찰 저항), Distributed forcing(분포 가진), Blowing(분사), Suction(흡입)

Abstract

The possibility of skin friction reduction in laminar channel flow is investigated when the flow is subjected to stationary distributed surface blowing and suction. Blowing and suction provided at the channel walls is steady in time but varies as a sine function along the streamwise direction. The skin friction changes depending on the wavelength and amplitude of the actuation. Especially, the skin friction is reduced below that of fully developed laminar flow as the wavelength decreases and amplitude increases. The optimal wavelength of producing minimum skin friction is $\pi/2\delta$, where δ is the channel half-height. It is observed that the distributed blowing and suction induces strong negative Reynolds shear stress in the near-wall region at the end of the suction part.

1. 서론

채널 유동에서 제어를 통해 얻을 수 있는 최소 저항을 아는 것은 제어 시스템을 설계할 때 중요한 기준이 된다. 따라서 이를 밝히기 위한 연구가 여러 연구자들에 의해 그간 진행되어 왔다[1~3].

Bewley는 2001년에 유량 합이 0인 분포 분사/흡입을 채널 벽에 주었을 때 유동이 얻을 수 있는 최소 저항은 간섭이 없는 층류 유동에서의 저항과 동일하다는 추측을 하였고[1], 2004년에 압력을 기반으로 한 분사/흡입 되먹임 제어 방법을 통해 이 추측이 현상학적으로 정당하다는 결론을 내렸다[2].

이에 대해 최근 Min *et al.*[3]은 채널 벽에서 주 유동 반대 방향으로 이동하는 분사/흡입(upstream traveling wave) 제어를 통해 간섭이 없는 층류 유동보다 낮은 저항을 얻을 수 있음을 밝혔다. Min *et al.* 은 Fukagata *et al.*[4], Bewley *et al.*[2]의 공식을 이용해 upstream traveling wave가 이차원 층류 유동과 삼차원 난류 유동에서 전체 저항을 감소시키는 방향의 y-weighted Reynolds shear stress를 유도하고 이로 인해 간섭이 없는 층류 유동보다 저항이 작아질 수 있음을 보였다.

본 연구는 유량 합이 0인 분포 분사/흡입을 벽면에 적용하여 층류 채널 유동의 저항 감소 가능성을 조사하였다. Min *et al.*[3]이 시간에 따라 주 유동 반대 방향으로 이동하는 upstream traveling wave를 이용하였던 것과 달리, 본 연구에서는 시간에 대해 고정된 분포 분사/흡입을 통해 층류 유동의 저항 감소 가능성을 연구하였다. 분사/흡입은 정현파 형태로 주었으며, 크기 ϕ_0 와 파장 λ_x 을 파라미터로 설정하여 저항 변화를 관찰하였다. 저항 변화는 채널 전체 유량을 고정한 상태에서

주 유동 방향의 평균 압력 구배 변화를 통해 조사하였다.

2. 수치 해석 기법

지배 방정식은 비정상, 비압축성 이차원 Navier-Stokes 방정식과 연속 방정식으로 다음과 같다.

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

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

여기서 t 는 시간, x_i 는 직각 좌표계에서 각 방향 좌표 성분이며, u_i 는 각 방향 속도 성분을, p 는 압력을 나타낸다. 모든 변수는 채널 반폭 δ 와 간섭이 없는 층류 유동의 중심 속도 U_c 로 무차원화 되었다. Reynolds 수는 $\text{Re} = U_c \delta / \nu$ 로 정의하였으며, ν 는 동점성 계수이다. 본 연구에서 사용된 Reynolds 수는 500이다.

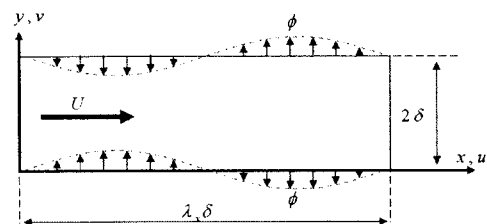


Figure 1. Schematic diagram of the computational domain.

* 서울대학교 대학원, contral@snu.ac.kr

** 서울대학교 기계항공공학부, choi@snu.ac.kr

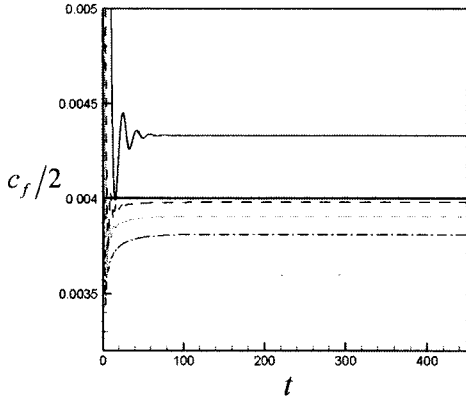


Figure 2. Time histories of the skin-friction coefficient for various wavelengths ($\phi_0 = 0.1$): thick solid, no actuation; solid, $\lambda_x = 4\pi$; dashed, $\lambda_x = 4\pi/3$; dotted, $\lambda_x = \pi$; dashdot, $\lambda_x = \pi/2$.

지배 방정식의 시간에 따른 수치 적분을 위해서 fractional step method을 사용하였고, 대류항은 3차의 정확도를 가지는 Runge-Kutta 방법을, 점성항은 Crank-Nicolson 방법을 사용하였다. 공간적으로는 2차의 정확도를 가지는 중심 차분법을 사용하였다.

Figure 1 은 계산 영역의 개략도이다. 채널은 이차원이며 채널 위/아래 벽에서 (3)과 같은 정현파 형태의 고정된 분포 분사/흡입을 주었다. 분사/흡입의 유량 합은 각 벽에서 0이 되도록 하였다.

$$\phi = \phi_0 \sin\left(2\pi \frac{x}{\lambda_x}\right) \quad (3)$$

채널은 주 유동 방향으로 주기 조건을 주었다. 주 유동 방향의 계산 영역은 정현파의 파장과 동일한 $\lambda_x \delta$ 로 설정하여 계산 영역에 하나의 주기만이 들어가게 하였다. 본 연구에서 고려된 유동은 낮은 Reynolds 수의 층류 유동이므로 주 유동 방향의 계산 영역을 파장의 배수로 설정하여도 결과에는 아무런 변화를 주지 않았다.

격자 배열은 주 유동 방향으로는 등간격으로 주었으며, 벽 수직 방향으로는 hyperbolic tangent 함수를 이용하여 비 등간격으로 배열하였다. 격자의 개수는 주 유동 방향과 벽 수직 방향으로 128×129 개 이다.

3. 결 과

Figure 2는 $\phi_0 = 0.1$ 인 분포 분사/흡입을 주었을 때 마찰 계수의 시간에 따른 변화를 나타낸 것이다. 모든 수치 실험은 간섭이 없는 층류 유동에서 시작하였으며 유동이 완전 발달 상태에 도달할 때까지 계산을 수행하였다. 파장이 $4\pi/3$ 보다 작은 경우 제어된 유동의 저항이 간섭이 없는 층류 유동보다 작아지며, 파장이 짧을수록 저항이 많이 감소하였다.

Figure 3은 분포 분사/흡입의 파장과 크기에 따른 채널 유동의 저항 변화를 나타낸 것이다. 파장이 짧아 질수록 저항이 작아지는 경향을 보이며 $\lambda_x \approx \pi/2$ 에서 최소 저항을 얻을 수

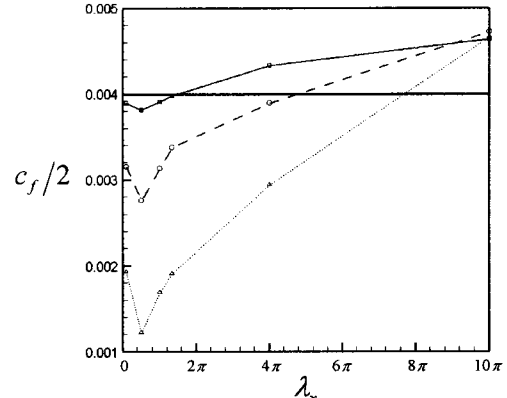


Figure 3. Variations of the skin-friction coefficient as a function of λ_x : solid, $\phi_0 = 0.1$; dashed, $\phi_0 = 0.3$; dotted, $\phi_0 = 0.5$.

있다. 고정된 파장에서 ϕ_0 가 클수록 저항 감소가 크게 나타났다. 특히 분사/흡입의 크기를 교란이 없는 층류 유동 중심속도에 50%로 주고 파장을 $\pi/2$ 로 하여 유동을 제어 하였을 경우, 최대 70%의 저항 감소를 얻을 수 있었다.

제어된 채널의 유동장을 관찰해 보면, 분사/흡입에 의해 채널의 속도 분포가 변화된 것을 알 수 있다(Figure 4(a),(b)). u 는 분사 영역을 지나면서 유입되는 유량에 의해 가속되고 흡입 영역을 지나면서 배출되는 유량에 의해 감속된다. 분사/흡입에 의해 출입하는 유량은 파장과 크기 모두에 비례하므로 파장이 길고 크기가 클수록 속도의 변화량은 커진다. Figure 4(c)는 압력 등고선으로 분사/흡입에 의해 유동의 압력 분포가 복잡하게 변화된 것을 볼 수 있다. 간섭이 없는 층류 유동의 경우 벽 수직 방향 속도 성분이 없으므로 주 유동 방향의 압력 구배만 나타나는데 반해, 분사/흡입이 있는 경우 벽에서 출입하는 유량에 의해 벽 수직 방향으로도 압력 구배가 형성된다.

층류 채널 유동에 정현파 형태의 고정된 분포 분사/흡입을 주었을 때 저항이 변화하는 원인은 다음과 같다. 채널 유동은 분사 영역을 지나면서 가속되고 이어지는 흡입 영역에서 바닥으로 당겨지므로, 흡입 영역 앞부분에서 저항이 크게 증가한다. 한편 유동이 흡입 영역에서 분사 영역으로 넘어갈 때 분사 영역에서 유입되는 유동은 강한 역구배 압력장을 형성한다. 흡입 영역 뒷부분에서 형성되는 역 압력 구배는 주 유동을 반대 방향으로 밀어주어 저항을 감소시키는 결과를 낳는다.

흡입 영역 앞 부분의 저항 증가는 분사에 의해 유입된 유량과 밀접한 관계를 갖으므로 파장이 길수록 저항 증가가 커지는 반면, 흡입 영역 뒷 부분의 저항 감소는 분사 영역과 흡입 영역의 압력차에 의존하므로 분사/흡입의 크기에 더욱 영향을 받는다.

Figure 5는 $\phi_0 = 0.3$, $\lambda_x = 10\pi$ 과 $\lambda_x = \pi$ 의 경우에 대한 채널의 마찰 저항 계수 분포를 나타낸 것이다. $\lambda_x = 10\pi$ 경우 흡입 영역 앞 부분에서의 저항 증가가 $\lambda_x = \pi$ 보다 월등히 크게 나타나는 반면 흡입 영역 뒷 부분에서 나타나는 저항 감소는 두 경우가 크게 다르지 않음을 알 수 있다. 특히 $\lambda_x = \pi$ 와 같이 파장이 짧을 경우 흡입 영역 앞 부분의 저항 증가가 흡입 영역 뒷 부분의 저항 감소 보다 작게 되어 전체 적으로 채널 유동의 마찰 저항이 감소하는 결과를 낳는다.

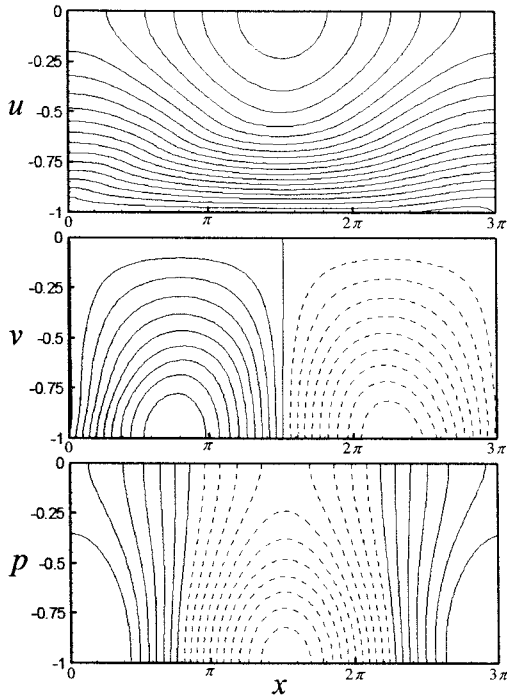


Figure 4. Contours of u (top), v (middle) and p (bottom) at the lower part of the channel in the case of $\phi_0 = 0.3$ and $\lambda_x = \pi$. Contour levels for u, v and p are $0 \sim 1.2$, $-0.3 \sim 0.3$ and $-0.4 \sim 0.2$, respectively.

곧, 흡입/분사의 파장을 짧게 하고 크기를 증가시킬수록 흡입 영역 앞부분의 저항 증가는 작아지고 흡입 영역 뒷부분의 저항 감소는 커지므로, 전체 채널의 저항은 크게 감소하게 된다. Figure 3을 보면 이와 같은 경향이 일치하여 나타나는 것을 알 수 있다.

채널의 저항 감소를 확인하기 위해 Reynolds shear stress 등고선을 보았다. Figure 6은 $\phi_0 = 0.3, \lambda_x = \pi$ 로 분사/흡입을 한 채널의 $-u'v'$ 등고선 분포이다. 분사/흡입에 의해 Reynolds shear stress가 복잡하게 형성된 것을 볼 수 있다. 흡입 영역 뒷부분 ($x = 7\pi/3 \sim 3\pi$)은 분사 영역 앞부분 ($x = 0 \sim 2\pi/3$)에 비해 높은 음수의 Reynolds shear stress가 벽 근처에 집중해 있는 것을 알 수 있다. 흡입 영역 뒷부분에서 벽 근처에 집중된 음의 Reynolds shear stress는 y-weighted Reynolds shear stress를 채널

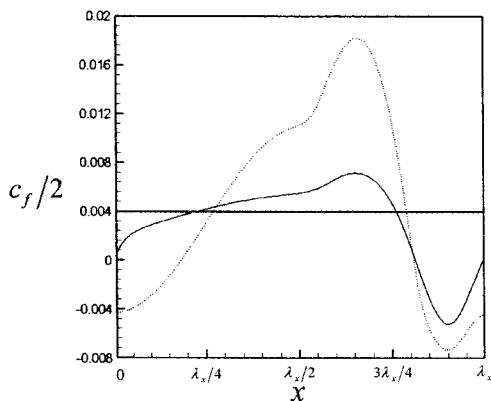


Figure 5. Distributions of the skin-friction coefficient with $\phi_0 = 0.3$: Solid, $\lambda_x = \pi$; dotted, $\lambda_x = 10\pi$.

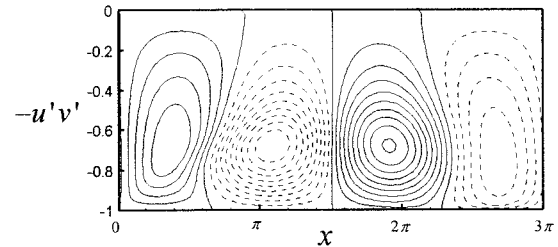


Figure 6. Contour of $-u'v'$ at the lower part of the channel in the case of $\phi_0 = 0.3$ and $\lambda_x = \pi$. Contour level is $-0.3 \sim 0.3$.

전체에 대해 적분했을 때 음의 값을 띄게 하고 그 결과 채널의 저항을 감소시킨다.

4. 결론

유량 함이 0인 정현파 형태의 고정된 분포 분사/흡입을 벽면에 적용하여 채널 유동의 저항 감소 가능성을 조사하였다. 분사/흡입의 파장과 크기에 따라 간섭이 없는 층류 유동보다 작은 저항을 얻을 수 있었다.

분사/흡입의 파장이 짧고 크기가 클수록 저항이 큰 폭으로 감소 하였으며 $\lambda_x = \pi/2$ 에서 최저값을 갖는 것을 알 수 있었다. 분사/흡입은 속도와 압력 분포에 큰 영향을 미쳤으며, 분사 영역 위에서 가속 구간이, 흡입 영역 위에서 감속 구간이 각각 형성되었다. 또한 벽 수직 방향 압력 구배도 관찰할 수 있었다.

제어된 채널의 경우, 흡입 영역 앞부분과 뒷부분에서 주요한 저항 증가/감소가 나타났다. 분사/흡입의 파장이 짧을수록 분사 영역 위에서의 가속이 크지 않기 때문에 흡입 영역 앞부분의 저항 증가는 작게 형성되었고 분사/흡입의 크기가 클수록 흡입 영역과 분사 영역의 압력차가 크게 형성되어 흡입 영역 뒷부분의 저항 감소는 큰 폭으로 나타났다. 그 결과 파장이 짧고 크기가 큰 분사/흡입을 주면 저항이 큰 폭으로 감소하는 것을 알 수 있었다.

Reynolds shear stress 분포를 관찰한 결과 흡입 영역 뒷부분에서 음의 Reynolds shear stress가 벽 근처에 집중되어 나타나고, 그 결과 채널 전체에 대해서 적분한 y-weighted Reynolds shear stress는 음의 값을 갖게 되어 전체 저항이 감소되는 것을 알 수 있었다.

본 연구에서는 간단한 형태의 정현파 분포 분사/흡입을 통하여 제어를 통해 얻을 수 있는 채널 유동의 저항은 간섭이 없는 완전 발달된 층류 유동의 저항 보다 작을 수 있음을 보였다.

후기

본 연구는 과학기술부의 국가지정연구실사업과 교육 인적 자원부의 BK21 Program의 지원 하에 이루어 졌으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] Bewley, T. R., 2001, "Flow control: new challenges for a new Renaissance", Progress in Aerospace Sciences, Vol. 37, pp. 21-58.
- [2] Bewley, T. R. and Aamo, O. M., 2004, "A 'win-win' mechanism for low-drag transients in controlled two-dimensional channel flow and its implications for sustained drag reduction", Journal of Fluid Mechanics, Vol. 499, pp. 183-196.

[3] Min, T., Kang, S.M., Speyer, J. L. and Kim, J., 2006, "Sustained sub-laminar drag in a fully developed channel flow", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 558, pp. 309-318.

[4] Fukagata, K., Iwamoto, K. and Kasagi, N., 2002, "Contribution of Reynolds stress distribution to the skin friction in wall-bounded flows", *Physics of Fluids*, Vol. 14, pp. L73-76.