

## 전자기력을 이용한 난류경계층 제어

이중호\*<sup>1</sup>, 성형진\*<sup>2</sup>

### Turbulent boundary layer control via electro-magnetic forces

J.-H. Lee and H. J. Sung

Direct numerical simulations are performed to investigate the physics of a spatially developing turbulent boundary layer flow suddenly subjected to spanwise oscillating electro-magnetic forces in the near-wall region. The Reynolds number based on the inlet momentum thickness and free-stream velocity is  $Re_\theta=300$ . A fully-implicit fractional step method is employed to simulate the flow. The mean flow properties and the Reynolds stresses are obtained to analyze the near-wall turbulent structure. It is found that skin-friction and turbulent kinetic energy can be reduced by the electro-magnetic forces. Instantaneous flow visualization techniques are used to observe the response of streamwise vortices to spanwise oscillating forces. The near-wall vortical structures are clearly affected by spanwise oscillating electro-magnetic forces.

**Key Words:** 난류경계층(Turbulent Boundary Layer), 전자기력(Electro-magnetic Force), 직접수치모사(DNS), 항력감소 (Drag Reduction)

### 1. 서 론

예부터 많은 사람들이 난류에 대해 연구하고 이를 이용하여 실생활에 적용시키려고 많이 노력해 왔다. 그 중 하나가 바로 난류 제어를 통한 항력감소이다. 배나 항공기 주위의 저항을 줄일 경우 파생되는 경제적 효과가 상당하기 때문에 최근 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 실험과 더불어 최근 컴퓨터의 발달로 직접 수치 모사(direct numerical simulation, DNS)가 가능해짐에 따라 난류 경계층 내부 응집구조(coherent structure)에 대해 조금씩 밝혀지면서 이를 제어해 표면 마찰력을 감소시키려는 연구가 활발히 진행되고 있다.

Robinson (1991)[1]에 따르면 유선방향 와류

(streamwise vortex)는 벽면 난류유동(wall-bounded turbulent flow)에 있어 중요한 역할을 하고 있다. 저속의 유체가 벽면으로부터 멀어지는 유동의 이벤트를 이젝션(ejection)이라 하고, 고속의 유체가 벽면으로 향하는 이벤트를 스위프(sweep)이라고 하는데, 이들은 난류의 생성과 소멸에 기여하는 유동의 이벤트로서 유선방향 와류와 연관되어 있다. 특히 스위프 이벤트는 난류 전단응력의 생성과 관련이 있어 항력 감소에 있어서 중요한 이벤트라고 할 수 있다(Orlandi와 Jimenez[2]). 이러한 스위프 이벤트들이 벽 근처에서 집중적으로 나타난다는 점에 착안하여, 벽 근처의 유선방향 와류를 효과적으로 제어하여 표면 마찰력을 감소시키는 방법들이 많이 제시되고 있다. 이들 중에서 벽면을 직접 횡방향으로 주기적으로 흔들어 주는 방법은 표면 마찰 저항을 최대 40%까지 줄일 수 있어 최근 여러 사람들에 의해 연구되고 있다. 이 방법은 수동적인 제어 방법이기 때문에 피드

\*1 한국과학기술원 기계공학과

\*2 정회원, 한국과학기술원 기계공학과

\*E-mail : hjsung@kaist.ac.kr

백 제어 알고리즘이 필요가 없는 장점이 있는 반면에, 벽을 직접 움직이게 해야 하므로 제어 시스템이 복잡해질 뿐만 아니라 공간상의 제약도 따르게 된다. Berger 등[3]은 직접수치모사 방법을 이용하여 전자기력을 통한 난류 유동 제어를 시도하였다. 바닷물같이 전류가 통하는 전해질 특성을 지닌 유체에 적용시킬 수 있는 방법으로, 벽 위의 자석과 전극의 배열 방식에 따라 흡입, 분사뿐만 아니라 횡방향 진동같이 다양한 형태의 힘을 벽의 움직임이나 변형 없이 유체에 전달시킬 수 있어 응용적인 측면에서 아주 우수한 방법이다.

본 연구에서는 전자기력을 통하여 횡방향으로 주기적인 힘을 난류경계층에 국소적으로 적용시켜 유동구조의 변화를 살펴봄으로써 국소적인 전자기력을 통한 난류 경계층 제어의 가능성을 알아보하고자 한다.

## 2. 수치 방법

### 2.1 유동장

본 연구에서는 Kim 등[4]에 의해 제시된 수치방법을 사용하였다. Fig. 1은 계산 영역의 개략도이다. Lund 등[5]이 제안한 방법을 이용하여 운동량 두께 (momentum thickness,  $\theta$ )와 자유 흐름 속도 (free-stream velocity,  $U_\infty$ )로 무차원한  $Re_\theta=300$ 인 시간에 따라 변화하는 난류 유동장을 입구에 넣어준다. 출구에서의 경계 조건은 대류 경계 조건 (convective boundary condition),  $(\partial u/\partial t) + c(\partial u/\partial x) = 0$ 을 사용하였다. 여기서  $c$ 는 부피 평균속도(local bulk velocity)이다. 벽면에서의

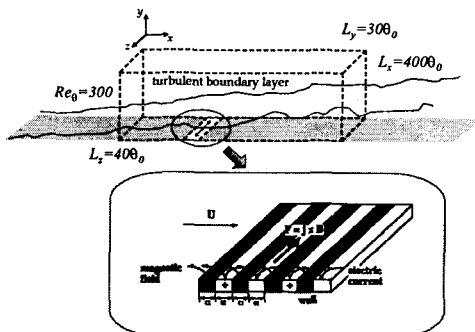


Fig. 1 Schematic diagram

속도 성분에 대해서는 점착 조건(no-slip condition)을 적용하였다. 윗면에서는  $u = U_\infty$ ,  $\partial v/\partial y = \partial w/\partial y = 0$  조건이 사용되었고, 횡방향으로 는 주기적인 경계조건이 사용되었다. 계산 영역은 주유동 방향, 벽의 수직인 방향과 횡방향으로 각각  $400\theta_m$ ,  $30\theta_m$ ,  $40\theta_m$ 이다. 여기서  $\theta_m$ 은 입구 유동의 운동량 두께이다. 격자수는 주유동 방향으로 513개, 수직 방향으로 65개 그리고 횡방향으로 129개이다. 주유동 방향과 횡방향으로는 균일 격자계(uniform grid)를 사용하였고 벽의 수직 방향으로는 쌍곡탄젠트함수(hyperbolic tangent function)를 이용한 비균일 격자계(non-uniform grid)를 사용하였다. 각각의 격자의 크기는 입구에서의 벽단위로 무차원했을 때  $\Delta x^+ \approx 12.40$ ,  $\Delta y_{min}^+ \approx 0.17$ ,  $\Delta y_{max}^+ \approx 23.86$ ,  $\Delta z^+ \approx 4.96$ 이다.

그리고 계산 시간 간격  $\Delta t^+ \approx 0.25$ 이다.

### 2.2 전자기장

횡방향으로 전자기력을 작용시키기 위해서는 Fig. 1에서처럼 전극과 영구자석을 나란히 배치시켜야 한다. 이렇게 전극과 자석을 배치한 경우 발생하는 전자기장을 수치적으로 모사하기 위해서는 아래와 같은 적절한 경계조건을 사용해야 한다. 기본적으로 다음과 같은 두 가지 가정을 세운다. 전기장의 경우, 전극 위에서만 전류가 흐르고 전극과 전극 사이, 즉, 비전도체 위에서는 전류의 크기가 0이어야 한다. 자기장의 경우에도 마찬가지이다. 이를 잘 모사하기 위해 Berger 등[3]은 포텐셜 함수의 경계 조건으로 계단 함수(step function)와 탄젠트 함수( $\tan(x)$ )를 혼합하여 사용하였다. 전극 위에서는 계단 함수를 사용하여 전극 위에서 전류가 흐르는 것을 모사하였고, 전극과 전극 사이에서는 탄젠트 함수를 사용하여 벽의 수직인 방향의 포텐셜 함수의 기울기 값이 거의 0에 가까워지도록 하여 전류의 크기가 0이 되도록 하였다. 자기장을 수치 모사할 때도 비슷한 경계조건을 사용하였다. 본 계산에서도 Berger 등[3]이 제시한 경계조건을 사용하였으며, 이때 전극과 자석이 존재하는 영역은 비압축성 유동장 계산 영역에서 보면 유동방향으로  $x/\theta_m = 50.3 \sim 112.8$ 에 해당된다. 전극과 자석이 존재하지 않는 영역에서는 전류와 자속이 존재하지 않도록 Neumann 조건을 사용하였다. 횡방향으로는 동일한 크기의 전자기력을 작

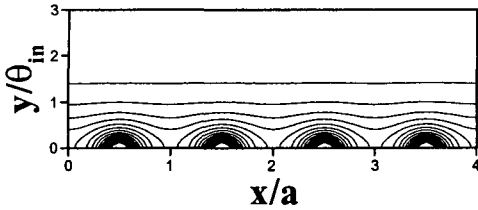


Fig. 2 Electro-magnetic force distribution. a is the electrode and magnet width.

용시켰다. 따라서 이차원으로 Maxwell 방정식을 계산하였다. 계산영역은 전극과 자극이 배열되어 있는 부근에서 수행하였으며, 그 크기는 주유동 방향과 벽의 수직인 방향으로 각각  $93.75\theta_m$ ,  $30\theta_m$ 이다. 격자수는 주유동 방향으로 961개, 수직 방향으로 65개이다. 주유동 방향으로는 균일 격자계를 사용하였고 벽의 수직 방향으로는 쌍곡탄젠트함수를 이용한 비균일 격자계를 사용하였다.

Fig. 2는 계산된 자기장과 전기장으로 발생하는 전자기력의 분포를 등고선으로 그린 그림이다.

### 3. 수치 결과

#### 3.1 평균 속도 분포

Fig. 3은 주흐름 방향으로 벽마찰 계수의 공간상의 변화를 나타낸 그림이다. 난류 경계층의 국소적인 영역에서 전자기력으로 횡방향 주기적 진동을 주었을 때와 진동을 주지 않았을 때를 서로 비교하였다. 진동 주기를 달리 하여 두 가지 경우를 계산하였는데 벽단위로 무차원한 진동 주기  $T^+$ 는 각각 100과 500이다. 그리고 전자기력의 최댓값이  $(StT^+)/ (Re,\pi) = 30$ 이 되도록 sin함수 형태로 진동을 해 주었다. 횡방향 진동을 해준 두 가지 경우가진 직후에 거의 같은 움직임을 보이면서 가진 하지 않았을 때보다 벽마찰 계수가 급격히 감소하기 시작한다. 진동 주기를 100으로 계산한 경우는 벽마찰 계수가 진동을 해주는 영역 내에서 계속 감소하여 최대 20%까지 감소하였다. 하지만 진동 주기를 500으로 하여 계산한 경우는  $x/\theta_m = 70$ 부근 이후부

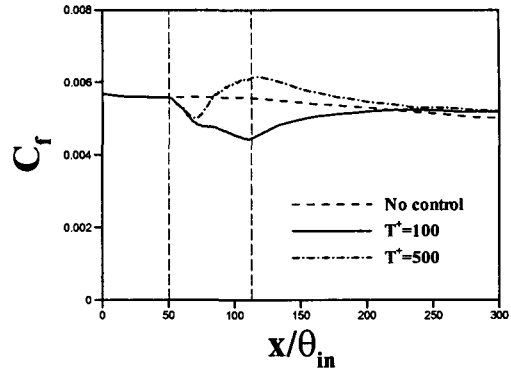


Fig. 3 Streamwise variation of the skin friction coefficient. -- : location of the electro-magnetic plate.

터 벽마찰 계수가 서서히 증가하기 시작하여 결국엔 진동을 가해주지 않았을 때보다 벽마찰 계수가 증가하게 된다. 그 크기는 아무런 교란을 주지 않았을 때보다 최대 10% 정도까지 증가하게 된다. 진동이 가해지는 영역을 벗어나게 되면 점차 벽마찰 계수는 가진 하지 않았을 때의 수치로 점차 회복해 간다. 회복해 가는 데 필요한 길이는 주기에 따라 큰 차이는 보이질 않고, 진동이 끝나고 진동 영역의 2배정도 지난 곳에서부터 가진 하지 않았을 때처럼 거의 회복해가는 모습을 볼 수 있다.

Fig. 4 a)는 주기가 100일 때, 가진 영역 내에서의 시간평균 속도분포를 나타낸 것으로 마찰 속도 (friction velocity)로 무차원화 하였다. 횡방향 주기적 진동을 주었을 때 점성아층(Viscous sublayer)의 두께는 진동을 주지 않았을 때보다 두꺼워진다. 그리고 대수 영역(Logarithmic region)에서는 속도 분포가 위로 올라가는 모습을 보인다. 이는 마찰 속도  $u_\tau$ 의 크기가 원래의 경우보다 감소하였기 때문이다. Fig. 4 b)는 진동을 가해주는 영역을 벗어나 진동 영역의 2배정도 되는 후류 지점에서의 시간평균 속도를 나타낸 그림이다. 주기적 진동의 효과가 거의 사라져 진동을 주지 않았을 때의 속도 분포로 거의 회복되었음을 확인할 수 있다.

#### 3.2 속도 섭동 분포

Fig. 5는 위상 평균한  $u''u''$ 의 주유동방향의 거리에 따른 변화를 그린 그림이다. Fig. 5 안의 등고선 그림은 주기적 진동을 가해주는 영역 주위를 확대하여  $u''u''$ 의 변화량이 최대가 되는 지점을 알 수 있도

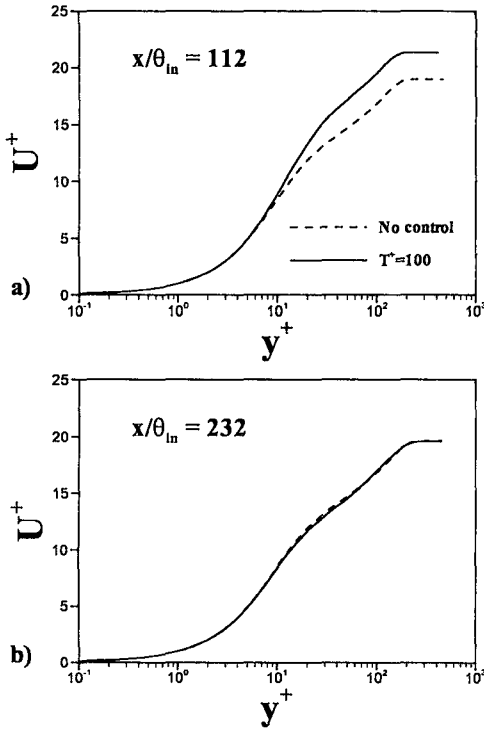


Fig. 4 Mean velocity profiles in wall coordinates : a) at  $x/\theta_m = 112$  and b) at  $x/\theta_m = 232$ .

록 등고선 간격을 조정한 그림이다. 등고선에서 실선으로 표시한 첫 번째 위치는 가진의 효과가 미치지 않는 지점으로  $x/\theta_m = 40$ 에 해당되는 위치이다. 점선으로 표시한 두 번째 위치는 맨 처음으로 가진 직후 변화량이 최대가 되는 위치로  $x/\theta_m = 69$ 에 해당된다. 일점쇄선으로 표시한 세 번째 위치는 두 번째로 변화량이 최대가 되는 위치로  $x/\theta_m = 109$ 이다. 마지막 이점쇄선으로 표시한 위치는 가진이 끝나고 가진 영역만큼의 후류에 해당되는 위치로  $x/\theta_m = 175$ 이다.  $u''u''$ 는 가진 직후부터 가진하지 않았을 때보다 그 크기가 가파르게 감소하는 모습을 보인다. 점차 감소되는 속도가 줄어들지만 가진 영역 내에서 지속적으로 그 크기가 감소하여 가진하지 않았을 때보다 두 번째로 변화량이 최대가 되는 지점에서 최

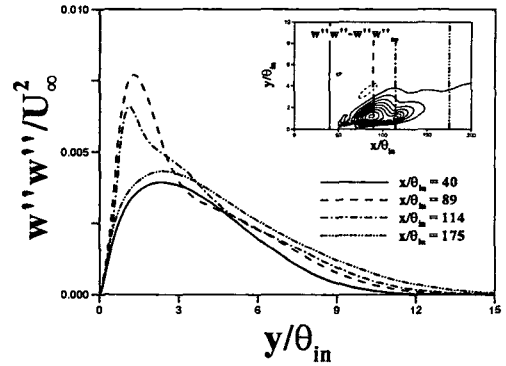


Fig. 5 Profiles of Reynolds stress,  $w''w''$ . The contour levels range from  $-0.005 U_\infty^2$  to  $0.005 U_\infty^2$  by  $0.0005 U_\infty^2$

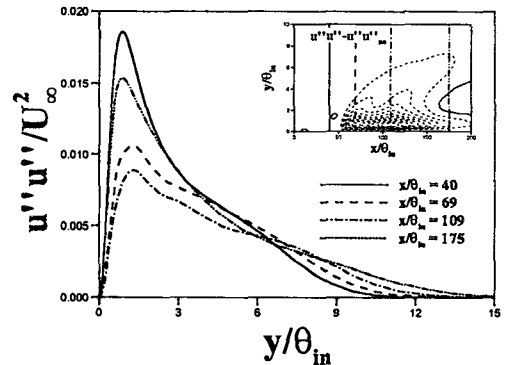


Fig. 6 Profiles of Reynolds stress,  $u''u''$ . The contour levels range from  $-0.01 U_\infty^2$  to  $0.01 U_\infty^2$  by  $0.001 U_\infty^2$ .

대 50%까지 감소하는 결과를 보인다. 그리고 후류로 감에 따라 가진하지 않았을 때처럼 회복되어간다.

Fig. 7은 가진 했을 때와 하지 않았을 때의 난류 운동 에너지 (Turbulent kinetic energy,  $k = 1/2 (u'^2 + v'^2 + w'^2)$ ) 차이를 등고선으로 나타낸 그림이다. 그리고 Fig. 8은 가진 영역 위의 한 점에서 난류 운동 에너지 분포를 그린 그림인데 횡방향 주기적 진동을 주었을 때와 주지 않았을 때를 비교하였다.

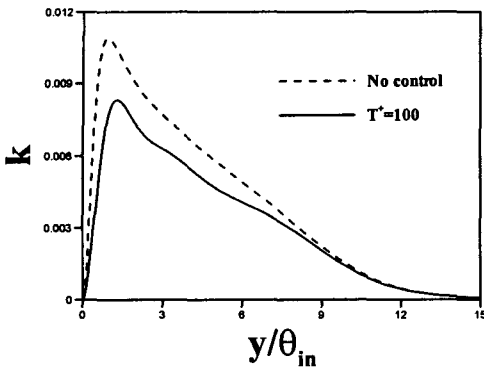


Fig. 7 Turbulent kinetic distributions at  $x/\theta_{in} = 116$ .

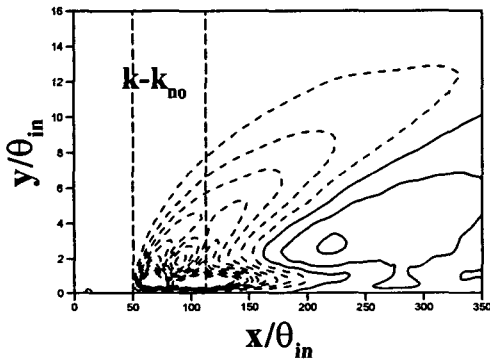


Fig. 8 Contours of the differences of the turbulent kinetic energy between the perturbed and unperturbed flows, where the subscript "no" stands for the case of no control. The contour levels range from  $-0.003 U_{\infty}^2$  to  $0.003 U_{\infty}^2$  by increments of  $0.0003 U_{\infty}^2$ . Negative contours are dashed.

Fig. 6에서 알 수 있듯이  $w''w''$ 가 가진 영역 내에서 상당한 크기로 증가했음에도 불구하고 벽 근처의 난류 에너지는 가진 영역 뿐 아니라 가진 영역의 후류 상당한 거리 동안에도 상당히 감소하였다. 전자기력의 진동이 시작된 직후부터 난류 에너지가 감소하기 시작하여 진동이 끝난 부근( $x/\theta_{in} = 116$ )에서는 진동을 주지 않았을 때보다 최대 20%까지 감소하였다.

### 3.3 유동 가시화

Fig. 9는 전자기력으로 주기적 가진을 했을 때의 벽면 근처의 유선방향 와류(streamwise vortex)들

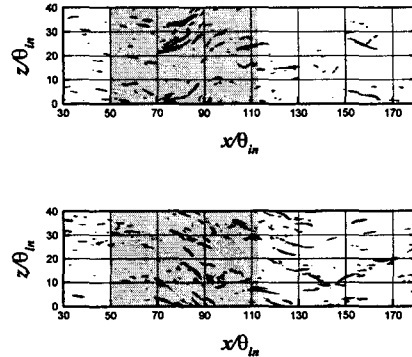


Fig. 9 Near-wall streamwise vortices.

을 가시화 한 그림이다. 본 연구에서는 Jeong과 Hussain[6]이 벽면 근처의 와류들을 검출하기 위해 제안한 방법을 사용하여 유동 가시화하였다.

Fig. 9는 동일한  $\lambda_2$ 값을 갖는 표면을 그려서 벽면 근처의 와류 구조들을 가시화한 것이다( $\lambda_2 = -0.03$ ). 회색으로 칠해진 영역은 가진 영역을 의미한다. Fig. 9를 보면 전자기력을 통한 횡방향 주기적 진동이 벽면 근처의 와류들에게 영향을 미치고 있다는 것을 알 수 있다. 가진 내에서 점차 후류로 갈수록 벽면 근처의 와류 구조들의 수가 많이 증가하고, 가진 영역에서 벗어나 게 되면 벽면 근처의 와류 구조들의 수는 다시 감소한다. 횡방향 주기적 진동의 영향으로 와류들이 유선 방향에서 약 30도 정도까지 기울어지기도 한다. 그리고 와류 구조들이 길게 늘어나기도 한다. 이러한 전자기력 횡방향 주기적 가진으로 생긴 와류 구조들의 변화로 인해 표면 마찰 계수가 감소 또는 증가하게 된다고 생각된다.

## 4. 결론

본 연구에서는 전자기력을 이용한 횡방향 주기적 진동이 난류경계층에 미치는 효과를 살펴보기 위해 직접수치모사를 수행하였다. 레이놀즈수  $Re_{\theta} = 300$  인 공간 발달하는 난류 경계층 유동장을 계산하였



다. 최대 전자기력의 크기는  $(StT^+)/ (Re,\pi) = 30$  을 만족시키게 하여  $\sin$ 함수형태로 두 가지 진동 주기에 대해서 횡방향 주기적 진동을 난류 경계층 벽면 부근에만 국소적으로 적용시켰다. 이때 진동 주기는 100과 500이고 진동을 주는 구간은  $x/\theta_w = 50.3 \sim 112.8$  이다. 벽단위로 무차원한 주기를 100으로 하여 가진해 주었을 때 표면 마찰 계수는 최대 20%까지 감소하게 된다. 마찰 속도로 무차원화된 평균 속도 분포를 보면 점성아 층의 두께가 진동을 주지 않았을 때보다 두꺼워 지고 대수영역에서의 속도 분포는 위로 이동하였다. 가진 영역에서 벗어나 2배정도 후류가 되는 지점부터는 평균 속도 분포도 진동하지 않았을 때처럼 거의 회복하게 된다.

횡방향 주기적 가진으로 인해 레이놀즈 응력들도 공간상으로 변화하게 되는데 그 변화하는 패턴이 각각 다르다.  $u'u'$ 는 횡방향 주기적 가진으로 인해 그 크기가 감소하게 되는 데,  $w'w'$ 는 주기적 진동으로 인해 최대 90%까지 그 크기가 증가하였다가 다시 감소하게 된다. 하지만 가진 영역 내에서의  $w'w'$ 의 증가에도 불구하고 난류 운동 에너지는 상당한 구간에서 진동을 주지 않았을 때보다 크기가 감소한다.

전자기력이 벽면 근처에 존재하는 와류구조에까지 영향을 미치는지 알아보기 위해서 Jeong과 Hussain[6]이 제안한 방법을 사용하여 유동가시화를 해보았다. 가진의 영향으로 후류로 가면서 벽면 근처의 와류 구조들이 활성화 되고 가진 영역을 벗어나게 되면 후류로 갈수록 벽면 근처의 와류 구조들의 수가 다시 감소함을 알 수 있었다. 횡방향 진동으로 인하여 와류 구조들이 주유동방향에서 기울어지기도 하고 길게 늘어나기도 한다. 전극과 자석의 배열을 적절히 잘 해주면 이 때 전자기장에서 발생하는 전자기력을 이용한 횡방향 주기적 진동으로 벽면 근처에 위치하고 있는 와류 구조들을 변형시킬 수 있음을 확인할 수 있었다. 그리고 진동 주기와 전자기력의 세기를 적절하게 잘 선택하여 사용하면 벽면 근처의 와류 구조들을 변화시켜 그로 인해 표면 마찰 저항을 감소시킬 수 있게 된다. 전자기력을 통한 횡방향 주기적 진동을 주는 이러한 유동제어 기법은 앞으로 초전도체에 관한 기술이 지금보다 더욱 발전하게 된다면 적은 전기에너지로 상당량의 표면 마찰 저항을 줄일 수 있기 때문에 에너지 절약 측면에서 아주 효율적인 제어 기법이 될 것으로 생각된다.

## 후 기

이 연구는 과학기술부 국가지정연구실 사업의 일환으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

- [1] Robinson, S.K., "Coherent motions in the turbulent boundary layer," *Annu. Rev. Fluid Mech.*, Vol.23, (1991), p.601-639.
- [2] Orlandi, P. and Jimenez, J., "On the Generation of Turbulent Wall Friction," *Phys. Fluids A* Vol.6, (1994), p.634-641.
- [3] Berger, T.W., Kim, J., Lee C. and Lim, J., "Turbulent Boundary Layer Control Utilizing the Lorenz Force," *Phys. Fluids*, Vol.12, (2000), No.3, p.631-649.
- [4] Kim, K., Baek, S.-J. and Sung, H.J., "An Implicit Velocity Decoupling Procedure for the Incompressible Navier-Stokes Equations," *Int. J. Numer. Meth. Fluids*, Vol.38, (2002), p.125-138.
- [5] Lund, T.S., Wu, X. and Squires. K.D., "Generation of Turbulent Inflow Data for Spatially-developing Boundary Layer Simulations," *J. Comput. Phys.*, Vol.140, (1998), p.233-258.
- [6] Jeong, J. and Hussain, F., "On the Identification of a Vortex," *J. Fluid Mech.*, Vol.285, (1995), p.69-94.