

# 난류채널유동에서의 준최적제어 평가

최정일\* · 성형진†

(2001년 2월 27일 접수, 2001년 5월 9일 심사완료)

## Evaluation of Suboptimal Control in Turbulent Channel Flow

Jung-Il Choi and Hyung Jin Sung

**Key Words :** Suboptimal Control(준최적제어), Drag reduction(항력저감), Turbulent Channel Flow(난류채널유동)

### Abstract

A systematic analysis is made of suboptimal control for drag reduction. The influence of the amplitude of actuation ( $A$ ) and the time scale of actuation ( $\Delta t_a^+$ ) is evaluated. Two wall sensing variables are employed ( $\partial w / \partial y|_w$  and  $\partial p / \partial z|_w$ ) with two wall actuations ( $\phi_2$  and  $\phi_3$ ). To test the suboptimal control, direct numerical simulations of turbulent channel flow at  $Re_\tau = 100$  are performed in a spectral domain. It is found that the effect of  $A$  and  $\Delta t_a^+$  on the drag reduction rate is significant. An optimal time scale is obtained at  $\Delta t_a^+ \sim 1$ . The near-wall behaviors of flow structure are analyzed to characterize the drag reduction. The size effect of the sensor/actuator is examined.

### 1. 서론

난류경계층 유동에서의 벽면 부근 활발한 응집 구조(coherent structure)에 대한 다각적인 연구가 시도되었다.<sup>(1)</sup> 벽면 근처에서의 주유동방향 와도(streamwise vortex)에 의해 유도되어지는 스위프(sweep)이 벽면 마찰에 매우 밀접한 관련이 있음이 밝혀졌다.<sup>(2)</sup> 이에 대해 주유동방향 와도를 제어하여 항력을 줄이고자 하는 많은 연구가 진행되어지고 있다.

유동제어 기법에 대한 선행 연구를 살펴보면, 주로 난류채널 유동에서의 벽면 항력을 제어하기 위해 적용되었다. Choi 등<sup>(3)</sup>은 주유동방향 와도를 유동 내부의 감지층(detection layer)에서의 속도를 측정하여 벽면에서 반대되는 위상의 속도를 부가하는 방법을 통하여 항력제어의 가능성을 보여주

었다. 그러나 벽면 내부 유동 정보를 사용하고 있으므로 현실적인 적용이 용이하지 않다. Lee 등<sup>(4)</sup>은 신경망 이론을 이용하여 자기학습을 통한 배가 함수(weighting function)를 결정함으로써 감지자(sensor)와 가진자(actuator)의 상관성에 의거한 제어를 수행하였다. 최근들어, Lee 등<sup>(5)</sup>은 준최적 제어이론을 난류채널유동에 적용하여 항력 저감에 대한 연구를 수행하였다. 벽면에서 감지된 유동정보를 이용하여 흡입/분사(suction/blowing)에 의한 제어입력을 간단한 되먹임 관계를 제안하였으며,  $Re_\tau = 100$ 인 난류채널유동에 적용하여 16-22%의 항력저감을 얻었다.

Lee 등<sup>(5)</sup>에 의해 제안된 준최적 제어의 제어입력은 특정시간에 대한 ‘공간적으로 최적화’된 제어입력을 제시하고 있다. 따라서 시간에 대한 영향이 고려되지 않았으며, 또한 제어입력 크기( $A$ )를 능동상쇄(active cancellation)<sup>(3)</sup>에 의한 크기로 고정시켰다. 감지층 설정에 따라 항력이 오히려 증가하는 경향이 보고된 바 있으며, 이는 제어효율에 매우 민감한 것으로 밝혀져 있다.<sup>(6)</sup> 본 연구에서는 준최적제어 이론에 의거한 제어입력에 대해

\* 한국과학기술원 기계공학과

† 책임저자, 회원, 한국과학기술원 기계공학과

E-mail : hjsung@kaist.ac.kr

TEL : (042)869-3027

FAX : (042)869-5027

제어입력 크기 ( $A$ )와 시간척도 ( $\Delta t_a^*$ )에 대한 영향을 조사하고자 한다. 벽면에서의 감지함수로서 횡방향 속도구배 ( $\partial w / \partial y|_w$ )와 횡방향 벽압력구배 ( $\partial p / \partial z|_w$ )가 고려되었다. 가진자로서는 벽면 흡입/분사 ( $\phi_2$ )와 횡방향 미끄러짐 속도 ( $\phi_3$ )가 고려되었다. 감지부와 가진자 간의 상호 조합에 따른 제어효율을 평가하여 최적의 제어를 제시하고자 한다. 특히, 제어인자에 따른 벽면 부근에서의 유동 구조변화에 대한 조사를 통하여 항력저감에 대한 제어인자를 평가한다. 아울러 감지부와 가진자의 크기에 따른 제어효율을 고려하여 실제 응용에 있어서의 제어기의 크기를 제한하고자 한다.

## 2. 준최적 제어

### 2.1 지배방정식과 시간차분

비압축성 유동의 지배방정식과 경계조건은 아래와 같다.

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

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

$$u_i|_w = \phi_i(x, z, t) \quad (3)$$

여기서  $x_i$ 는 직교좌표를 나타내고,  $u_i$ 는 각각의 속도 성분들을 나타낸다.  $p$ 는 압력이고  $\text{Re}$ 는 레이놀즈 수이다. 모든 변수들은 벽면마찰속도 ( $u_\tau$ )와 채널 절반 높이 ( $\delta$ )로 무차원화되었다. 벽면에서의 가진자 ( $\phi_i$ )로서 유선방향 미끄러짐 속도 ( $\phi_1$ ), 흡입/분사 속도 ( $\phi_2$ )와 횡방향 미끄러짐 속도 ( $\phi_3$ )가 고려되었다.

준최적제어 입력을 구하기위해서 지배방정식을 Lee 등<sup>(6)</sup>이 사용한 방법으로 차분화하였다:

$$u_i^{n+1} - \frac{\Delta t}{2 \text{Re}} \frac{\partial^2 u_i^{n+1}}{\partial x_j^2} + \frac{\Delta t}{2} \frac{\partial p^{n+1}}{\partial x_i} = R^n \quad (4)$$

$$\frac{\partial u_j^{n+1}}{\partial x_j} = 0 \quad (5)$$

$$u_i^{n+1}|_w = \phi_i \quad (6)$$

여기서 위첨자  $n+1$ 은 시간단계를 의미하며,  $R^n$ 은 비선형 항과 압력구배 및 점성항의 외재부분들

을 나타낸다.

### 2.2 Fréchet 미분방정식과 해

속도와 압력의 미분상태들 ( $\theta_i, \rho$ )은 Fréchet 미분을 사용하여 다음과 같이 정의하였다.

$$\theta_i = \frac{Du_i(\phi_i)}{D\phi_i} \tilde{\phi}_i, \quad \rho = \frac{Dp(\phi_i)}{D\phi_i} \tilde{\phi}_i \quad (7)$$

$$\frac{Df(\phi_i)}{D\phi_i} \tilde{\phi}_i = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{f(\phi_i + \epsilon \tilde{\phi}_i) - f(\phi_i)}{\epsilon} \quad (8)$$

미분상태 변수의 정의에 의거하여 지배방정식에 대한 Fréchet 미분방정식은 아래와 같이 유도된다.

$$\theta_i^{n+1} - \frac{\Delta t}{2 \text{Re}} \frac{\partial^2 \theta_i^{n+1}}{\partial x_j^2} + \frac{\Delta t}{2} \frac{\partial \rho^{n+1}}{\partial x_i} = 0 \quad (9)$$

$$\frac{\partial \theta_j^{n+1}}{\partial x_j} = 0 \quad (10)$$

$$\theta_i^{n+1}|_w = \tilde{\phi}_i \quad (11)$$

여기서  $(DR^n / D\phi) \tilde{\phi}_i = 0$ 이다.

Fréchet 미분방정식 (9)-(11)에 대해 반무한 영역에서의 주유동 및 횡방향 주기조건을 사용한 해석하는 다음과 같다.

$$\hat{\theta}_1(y) = \left( \phi_1 + \frac{ik_1 \Delta t}{2} \hat{\rho}_w \right) e^{-\lambda y} - \frac{ik_1 \Delta t}{2} \hat{\rho}_w e^{-ky} \quad (12)$$

$$\hat{\theta}_2(y) = \left( \phi_2 - \frac{k \Delta t}{2} \hat{\rho}_w \right) e^{-\lambda y} + \frac{k \Delta t}{2} \hat{\rho}_w e^{-ky} \quad (13)$$

$$\hat{\theta}_3(y) = \left( \phi_3 + \frac{ik_3 \Delta t}{2} \hat{\rho}_w \right) e^{-\lambda y} - \frac{ik_3 \Delta t}{2} \hat{\rho}_w e^{-ky} \quad (14)$$

$$\hat{\rho}(y) = \hat{\rho}_w e^{-ky}, \quad \hat{\rho}_w = \frac{2(\lambda \phi_2 - ik_1 \phi_1 - ik_3 \phi_3)}{(\lambda - k)k \Delta t} \quad (15)$$

여기서  $\hat{\theta}_i, \hat{\rho}, \phi_i$ 는 각각  $\theta_i, \rho, \tilde{\phi}_i$ 의 Fourier 계수이며, 변조된 파수  $\lambda$ 는  $\lambda^2 = k^2 + 2 \text{Re} / \Delta t$ 이다.

### 2.3 목적함수 (cost functional)와 제어기

감지함수가 벽면 전단 응력인 경우에 대해 목적함수는 다음과 같이 최소화 되어야 한다.<sup>(5)</sup>

$$J(\phi_i) = \frac{l}{2A \Delta t} \int_S \int_0^{t+\Delta t} \phi_i^2 dt dS - \frac{l}{2A \Delta t} \int_S \int_0^{t+\Delta t} \frac{\partial w}{\partial y} \Big|_w dt dS \quad (16)$$

여기서 목적함수는 제어입력함수와 감지함수의 짧

은 순간 ( $\Delta t$ )에 대해 제어표면 ( $S$ )에서의 적분 형태이다. 제어인자로서  $l$ 은 제어입력에 대한 감지 부분의 상대적가치를 나타내고 있다. 또한 감지부에서의 음의 부호는 전단응력을 최대화 시키기 위한 것이다. 식 (16)에서 정의한 목적함수에 대한 퓨리에 영역에서의 Fréchet 미분은 다음과 같다.

$$\frac{D\hat{J}}{D\phi} \phi^* = l \hat{\phi} \phi^* - \frac{\partial \hat{w}}{\partial y} \Big|_w \frac{\partial \hat{\theta}_3}{\partial y} \Big|_w^* \quad (17)$$

여기서  $\hat{\cdot}$ 는 Fourier 계수를 의미하며,  $*$ 는 켈레 복소수를 나타낸다. 식 (12)-(15)에서 제시된 해석해를 이용하여  $\partial \hat{\theta}_3 / \partial y|_w^*$ 를 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{\partial \hat{\theta}_3}{\partial y} \Big|_w^* = -\frac{k_1 k_3}{k} \phi_1^* + i \frac{\lambda k_3}{k} \phi_2^* - \left( \lambda + \frac{k_3^2}{k} \right) \phi_3^* \quad (18)$$

식 (18)을 이용하여 임의의  $\phi_i^*$ 에 대해 식 (17)을 최소화하면, 즉  $D\hat{J}/D\phi_i = 0$ , 최적가진은 식 (20)-(22)와 같다.

$$\hat{\phi}_1 - C_1 \frac{k_1 k_3}{k} \frac{\partial \hat{w}}{\partial y} \Big|_w \approx 0 \quad (20)$$

$$\hat{\phi}_2 = +C_2 i \frac{\lambda k_3}{k} \frac{\partial \hat{w}}{\partial y} \Big|_w \approx +C_2 i \frac{k_3}{k} \frac{\partial \hat{w}}{\partial y} \Big|_w \quad (21)$$

$$\hat{\phi}_3 = -C_3 \left( \lambda + \frac{k_3^2}{k} \right) \frac{\partial \hat{w}}{\partial y} \Big|_w \approx -C_3 \frac{\partial \hat{w}}{\partial y} \Big|_w \quad (22)$$

여기서  $C_i, C'_i$ 는 전체가진 크기를 의미하는 양의 상수이다. Kolomogorv 길이척도에 의거하여 최대 파수는  $k_{\max} \sim Re^{3/4}$ 이며,  $u\Delta t / \Delta x \sim O(1)$ 의 가정에 의해  $(2Re / \Delta t) / k^2 \gg 1$ 이 성립되므로, 최적 가진은 식 (20)-(22)의 우변과 같이 간단히 표현된다.

감지함수가 횡방향 벽면 압력 구배인 경우에 대한 아래의 목적함수에 대한 최적가진이 고려되었다.

$$J(\phi_i) = \frac{l}{2A\Delta t} \int_S \int_0^{t+\Delta t} \phi_i^2 dt dS - \frac{l}{2A\Delta t} \int_S \int_0^{t+\Delta t} \frac{\partial p}{\partial z} dt dS \quad (23)$$

앞서 언급된 최소화 가정에 따른 최적 가진은 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\hat{\phi}_1 = +C_1 i \frac{k_1 k_3^2}{k} \hat{p}_w \approx 0 \quad (24)$$

$$\hat{\phi}_2 = +C_2 \frac{\lambda k_3^2}{k} \hat{p}_w \approx C_2 \frac{k_3^2}{k} \hat{p}_w \quad (25)$$

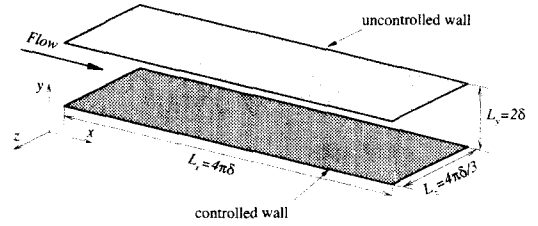


Fig. 1 Schematic diagram of computational domain

$$\hat{\phi}_3 = +C_3 \frac{k_3^3}{k} \hat{p}_w \approx 0 \quad (26)$$

Lee 등<sup>(6)</sup>의 준최적 제어 과정에서는 임의의 시간에 대한 공간적인 최적화에 따른 감지자와 가진자 사이의 위상정보만을 고려하고 있다. 본 연구에서는 가진자의 시간척도 ( $\Delta t_a^+$ )에 의한 영향을 고려하였다. 또한 가진크기 ( $A$ )를 정량화 하기위해  $\langle t_0 + n\Delta t_a^+, t_0 + (n+1)\Delta t_a^+ \rangle$  시간 간격에서의 가진 및 감지함수를 다음과 같이 정의하였다.

$$\phi_{a,i}(x, t) = A \phi_i(x, t_0 + n\Delta t_a^+) \quad (27)$$

$$\frac{\partial \hat{w}}{\partial y} \Big|_w(x, z, t) = \frac{\partial \hat{w}}{\partial y} \Big|_w(x, z, t_0 + n\Delta t_a^+) \quad (28)$$

$$\hat{p}_w(x, z, t) = \hat{p}_w(x, z, t_0 + n\Delta t_a^+) \quad (29)$$

여기서  $A$ 는 제어표면에서의 근평균 값이다. 가진 및 감지는  $\Delta t_a^+$ 마다 시행되었다. 제어는  $t_0$ 에서 시작되었으며,  $\langle \phi_i^2(x, z, t_0 + n\Delta t_a^+) \rangle_{x,z} = 1$ 이다.

### 3. 수치방법

준최적 제어를 평가하기위해 낮은 레이놀즈 수 ( $Re_\tau = 100$ )의 난류채널유동에 대한 직접수치모사가 수행되었다. Navier-Stokes 방정식의 해를 구하기 위해 시간차분에 대해 semi-implicit 방법이 사용되었다. 점성항에 대해서는 Crank-Nicolson 방법, 대류항에 대해서는 3 차 Runge-Kutta 방법이 사용되었다. 공간차분에 대해 벽면 수직방향으로는 Chebyshev-tau 방법, 주유동방향 및 횡방향으로는 dealiased Fourier 방법이 적용되었다. 본 연구에서 사용된 spectral 방법은 Kim 등<sup>(2)</sup>이 사용했것과 같다. 계산영역은 주유동방향, 벽면수직방향, 횡방향으로  $4\pi\delta \times 2\delta \times 4\pi/3$ 이며, 사용된 격자제는

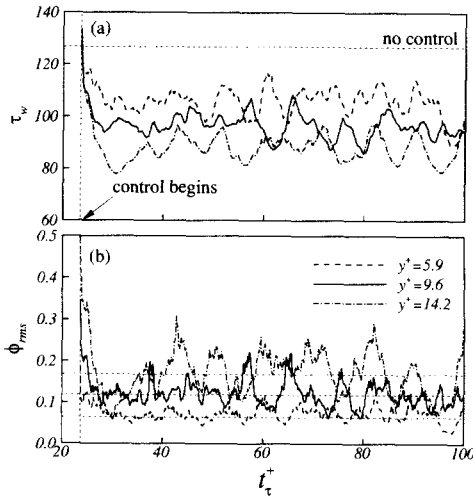


Fig. 2 Time history of (a) streamwise mean shear stress and (b) root-mean-squared values of actuation for  $\phi_2$

32×65×32이다. 경계조건으로서 Fig. 1에서 제시된 것 처럼 아래벽면에서는 가진조건 ( $\phi_i$ )이 부여되었으며, 위벽면에서는 점착조건이 사용되었다. 주유동방향 및 횡방향으로는 주기적인 경계조건이 적용되었다. 또한 모든 계산은 유량보존을 만족하도록 하였다.

4. 결과 및 토론

난류채널 유동에서의 준최적제어를 수행하기 전에, 가진크기에 대한 제어효율을 평가를 위해 Choi 등<sup>(3)</sup>이 제안한 능동감쇄를 이용한 제어가 수행되었다. 능동감쇄 제어는 Kim 등<sup>(2)</sup>이 제안한 주유동방향 와도 모델에 대해서 벽면 반대방향 속도를 이용하여 이를 약화시키는 방법이다. 능동감쇄에 의한 제어는 감지층의 설정이 항력감소율에 매우 민감한 요소이다.<sup>(3,6)</sup> 본 연구에서는 감지층을  $y_d^+ = 5.9, 9.6, 14.2$ 로 설정하였다. Figure 2는 제어된 유동에서의 평균전단응력 ( $\tau_w$ )의 시간이력을 나타낸다. 벽면 전단응력은 제어를 시작하자마자 갑작스럽게 줄어들어 점근적인 상태로 수렴된다 (Fig. 2(a)). 이에 상응하는 가진 크기의 근제곱 평균값 ( $\phi_{rms}$ )도 준정상 상태 (quasi-steady state)로 수렴된다. 최대 항력 감소는 감지층이  $y_d^+ = 14.2$ 인 경우에 얻어졌다. Fig. 2(b)에서 볼 수 있듯이,

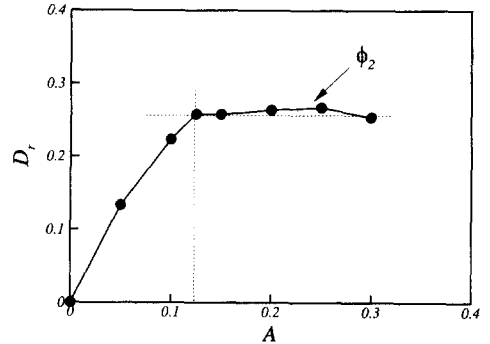


Fig. 3 Effect of  $A$  on  $D_r$  for  $\phi_2$  and  $\partial w / \partial y|_w$

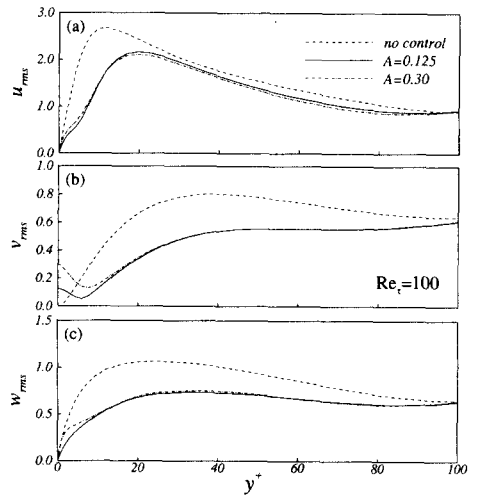


Fig. 4 Root-mean-squared velocity distributions for  $\phi_2$  and  $\partial w / \partial y|_w$ . (a)  $u_{rms}$  (b)  $v_{rms}$  (c)  $w_{rms}$

$\phi_{rms}$ 의 크기는 감지층의 설정에 많은 영향을 받고 있다. 예를 들어, 감지층이  $y_d^+ = 9.6$ 로 설정되는 경우에 대한 가진크기는  $\phi_{rms} \approx 0.121$  정도로 접근하고 있다.

벽면 흡입/분사( $\phi_2$ )를 이용한 준최적 제어의 항력저감을 살펴보았다. 감지함수로서 벽면 횡방향 속도구배 ( $\partial w / \partial y|_w$ )가 선택되었다. 벽면에서의 횡방향 전단응력을 최대화시키는 것은 벽근처 유동을 약화시키며, 이는 주유동방향 와도를 제어하는 것과 유사하다.<sup>(6)</sup> 항력감소율 ( $D_r$ )은  $D_r = (\tau_{no} - \tau_c) / \tau_{no}$ 로 정의하였다. 여기서  $\tau_{no}$ 과  $\tau_c$ 는 제어이전과 이후의 평균전단응력을 나타낸다. 가진 크기 ( $A$ )의  $D_r$ 에 대한 영향을 Fig. 3에 나타내었다. 이 때,

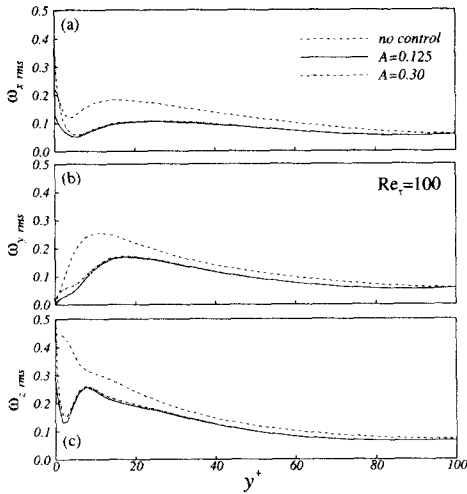


Fig. 5 Root-mean-squared vorticity distributions for  $\phi_2$  and  $\partial w / \partial y|_w$ . (a)  $\omega_{x,rms}$  (b)  $\omega_{y,rms}$  (c)  $\omega_{z,rms}$

가진 시간척도는  $\Delta t_a^+ = 1.0$ 로 고정시켰다. Fig. 3에서 보듯이,  $A < 0.125$ 인 경우,  $D_r$ 은  $A$ 가 증가함에 따라 선형적으로 증가한다. 그러나  $A > 0.125$ 보다 큰  $A$ 에 대해서는  $D_r$ 은  $D_r \approx 0.26$  정도로 수렴된다. 이는  $A > 0.125$ 보다 큰 가진크기는 초과가진을 의미하며, 최적 가진크기는  $A \approx 0.125$ 이다. 앞서 수행된 능동감쇄에 의한 제어의 경우,  $y_a^+ = 9.6$ 에서의 유동정보를 감지할때의 가진크기와 유사하다 ( $\phi_{rms} \approx 0.121$ ).

준최적제어를 난류채널에 적용을 하였을 때, 앞서 언급한 초과 가진과 최적 가진에서 비슷한 항력감소율을 나타내고 있는 경향을 보여주고 있다. 초과가진의 영향을 살펴보기 위해, 가진크기에 따른 벽면 거동을 살펴보았다(Fig. 4). 이에 대해, 제어이전 ( $A=0$ ), 최적조건 ( $A=0.125$ )와 초과가진 ( $A=0.30$ )의 경우에 대해 난류강도의 변화를 살펴보았다. 전체적으로 난류강도는 제어에 의해 약화되었다. Fig. 4(b)에서 볼 수 있듯이, 초과가진에 대한 벽면 수직방향 난류강도 ( $v_{rms}$ )는 벽면 부근 ( $y^+ < 20$ )에서 최적조건인 경우에 비해 높다. 이는 벽면에서 부가된 초과 가진에 의한 크기가 직접 반영된 것이다. 횡방향 난류강도 ( $w_{rms}$ )도 벽면 부근에서 유량보존을 유지하기 위해 약간 증가된다(Fig. 4(c)). 초과가진에 의한 효과는 벽면 근처를 제외하고는 최적조건인 경우에서 나타나는 현상과 유사하다.  $y^+ > 20$ 인 영역에서는 초과가

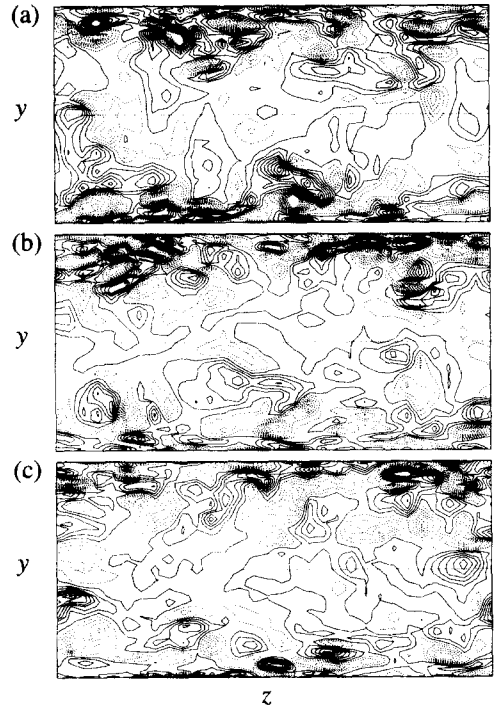


Fig. 6 Contours of  $\omega_x$  in a cross-flow plane for  $\phi_2$  and  $\partial w / \partial y|_w$ . (a)  $A=0$  (b)  $A=0.125$  (c)  $A=0.30$

진에 의한 효과는 거의 존재하지 않는다.

초과가진 ( $A=0.30$ )에 의한 효과를 살펴보기 위해, 와도성분의 변화를 Fig. 5에 나타내었다. 전체적으로 와도성분은 제어에 의해 약화되었다. 초과가진에 의한 경우, 유선방향과 횡방향 와도성분 ( $\omega_{x,rms}$ ,  $\omega_{z,rms}$ )들은 벽면 근처에서 매우 강화되어지며, 이 값들은 제어이전의 경우보다도 오히려 크다. 이는 가진에 의해 벽면에서 발생하는 주유동 방향과 횡방향 구배 ( $\partial \phi_2 / \partial x$ ,  $\partial \phi_2 / \partial z$ )에 의해 벽면 와도성분이 증가되기 때문이다. 또한 초과가진의 경우, 벽면 수직방향 와도성분 ( $\omega_{y,rms}$ )도 벽면 근처에서 약간 증가된다. 이는 초과가진에 의해 벽면 부근에서  $\partial w / \partial x$ 이 증가하기 때문에  $\omega_y$ 가 증가된다. 그러나 벽면 부근을 제외한 영역 ( $y^+ > 20$ )에서는 최적가진과 초과가진의 경우의 모든 물리량들은 거의 같다. 항력감소는  $y^+ > 20$ 에서 존재하는 유선방향 와도 성분과 밀접한 관련이 있기 때문에, 초과가진에 의해 비록 시스템에 많은 가진 에너지가 부과되었음에도 불구하고 거의 비슷한 항력감소량을 나타내고 있다(Fig. 3).

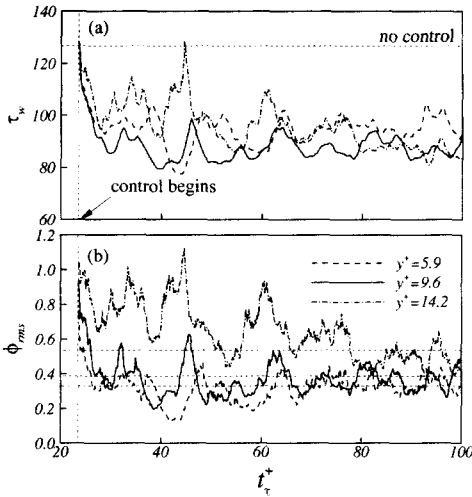


Fig. 7 Time history of (a) streamwise mean shear stress and (b) root-mean-squared values of actuation for  $\phi_3$

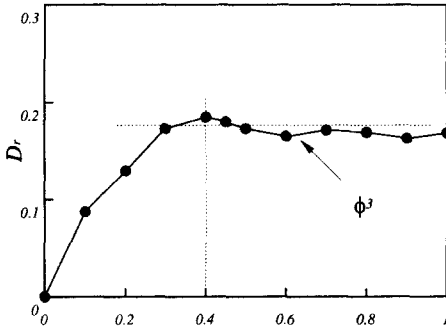


Fig. 8 Effect of  $A$  on  $D_r$  for  $\phi_3$  and  $\partial w / \partial y|_w$

초과가진에 의한 영향을 자세히 관찰하기 위해, 주유동 방향 와도 ( $\omega_x$ )의  $y-z$  평면상에 대한 순간등고선을 Fig. 6에 제시하였다. 제어이전의 등고선의 형태를 보면, 많은 주유동방향 와들이 벽면 근처에 밀집되고 있다. 최적조건 ( $A=0.125$ )에서의 준최적 제어가 바닥면에 적용되었을 경우에는 주유동방향 와도가 현저히 약화되어 있다. 초과가진의 경우 ( $A=0.30$ )에도 벽면에 아주 근접한 영역을 제외하고는 최적조건과의 경우와 매우 유사한 경향을 보여주고 있다. 초과가진에 의한 영향에 의해 바닥면에 매우 근접하게 주유동 방향 와도가 매우 밀집된 것을 확인할 수 있다.

벽면 가진 형태에 대한 영향을 살펴보기 위해,

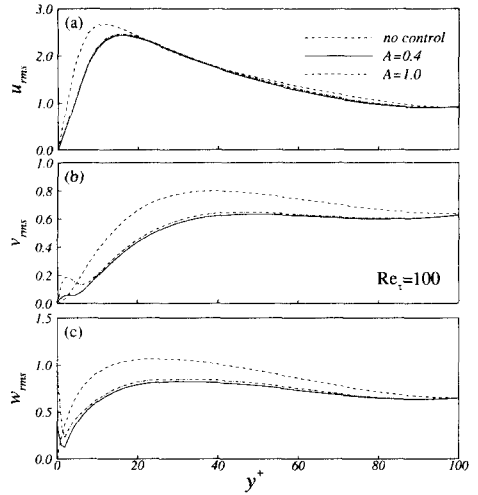


Fig. 9 Root-mean-squared velocity distributions for  $\phi_3$  and  $\partial w / \partial y|_w$ . (a)  $u_{rms}$  (b)  $v_{rms}$  (c)  $w_{rms}$

가진자로서 횡방향 미끄럼 속도 ( $\phi_3$ )가 고려되었다. 이에 대해, 흡입/분사에 대한 능동감쇄에 대한 영향을 살펴본 경우와 마찬가지로 먼저 세 가지 감지층 ( $y_d^+ = 5.9, 9.6, 14.2$ )에 대한 횡방향 미끄럼 속도를 이용한 능동감쇄 제어가 수행되었다. Figure 7에서 볼수 있듯이, 감지층이  $y_d^+ = 9.6$ 으로 설정되었을 때, 최대 항력감소를 얻을 수 있다. 이 경우에서의 수렴된 가진 크기의 근평균자승 값은  $\phi_{rms} \approx 0.41$ 이다. Choi 등<sup>(3)</sup>이 지적한 바와 같이, 다른 형태의 가진자에 대한 항력최대감소를 얻을 수 있는 최적 감지층은 다르게 나타났다.

Figure 8은 횡방향 미끄럼 속도를 이용한 준최적 제어기의 가진 크기에 대한 항력감소율의 변화를 나타낸다. 가진 시간척도는  $\Delta t_d^+ = 1.0$ 로 고정시켰다. 가진자의 크기가  $A < 0.4$ 인 영역에서는 항력감소율 ( $D_r$ )은 선형적으로 증가한다. 그러나 가진크기가  $A > 0.4$ 인 영역에서는 항력감소율은 일정하게 유지된다. 이는 앞서 흡입/분사에 의한 준최적 제어 경우에서 나타난 초과가진에 대한 항력감소율이 정체된 것과 비슷한 양상이다. 그러므로 최적조건은  $A = 0.4$ 이며, 이는 앞서 언급된  $y_d^+ = 9.6$ 의 감지층을 이용한 능동감쇄에 의해 나타난 가진자의 크기 ( $\phi_{rms}$ )와 유사하다.

횡방향 미끄럼 속도에 의해 변화된 난류강도 ( $u_{i,rms}$ )와 와도 ( $\omega_{i,rms}$ )를 Figs. 9와 10에 나타내었다. 초과가진에 대해 가진크기가  $A = 1.0$  경우,

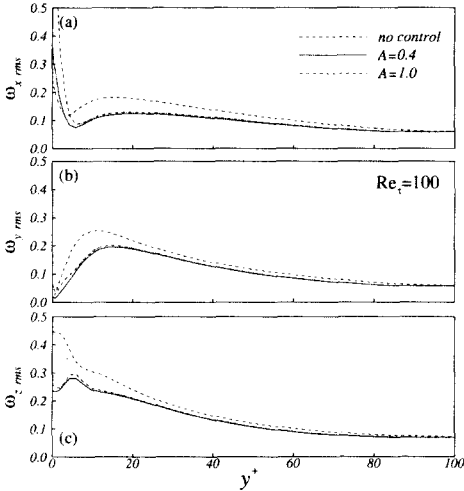


Fig. 10 Root-mean-squared vorticity distributions for  $\phi_3$  and  $\partial w/\partial y|_w$ . (a)  $\omega_{x,rms}$  (b)  $\omega_{y,rms}$  (c)  $\omega_{z,rms}$

최적가진에 대해서  $A=0.4$ 가 고려되었다. 흡입/분사를 이용하는 경우에 나타나는 유동변화와 유사한 경향이 관찰되었다. 초과가진에 의해 벽면에서의 주유동방향 와도 ( $\omega_{x,rms}$ )는 매우 증가한다. 이는 제어기가 목적함수인  $\partial w/\partial y|_w$ 를 증가하기 위해 구성되었기 때문이다. 그러나, 벽면 부근 ( $y^+ < 20$ )을 제외한 영역에서는 초과가진에 의한 효과는 무시할만 하다. 증가된 주유동방향 와도 성분은  $y^+ < 10$ 에서의 벽면 수직방향 와도 ( $\omega_{y,rms}$ )를 증가시키고 있다. 벽면에서 초과가진이 주어졌지만, 경계층은 직접적으로 반응하지 않으며, 가진자에 의해 교란된 에너지들은 벽면 근처에서 재분배된다. 그러므로 최적가진 크기 이상의 가진에 의해서도 항력감소율은 일정하게 유지된다.

Lee 등<sup>(5)</sup>이 제안한 준최적 제어방법에서 가진자와 감지자 사이의 배가함수를 결정함에 있어서 특정 시간에서의 공간상의 위상정보를 제공하고 있다. 본 연구에서는 가진시간 ( $\Delta t_a^+$ )에 대한 항력감소의 영향을 살펴보기 위해, 앞서 제시한 식 (27)에서 제시한 바와 같이 일정시간간격에 따라 가진조건을 변화시켜주는 방법을 채택하였다. 두 가지 가진형태 ( $\phi_2, \phi_3$ )를 고려하였으며, 가진크기는 앞서 얻어진 각각의 최적조건을 사용하였다. 즉,  $\phi_2$ 에 대해서는  $A=0.125$ ,  $\phi_3$ 에 대해서는  $A=0.4$ 이다. 항력감소율 ( $D_r$ )은 Fig. 11에서와 같이  $\Delta t_a^+$ 에 의해 상당한 차이를 보여주고 있다.

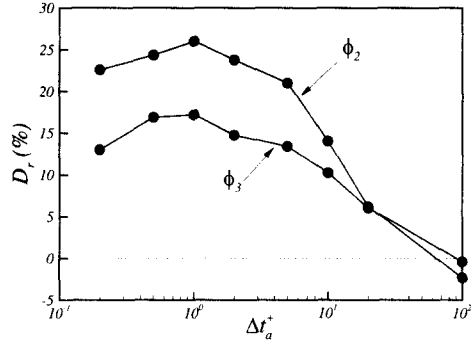


Fig. 11 Effect of  $\Delta t_a^+$  on  $D_r$  for  $\partial w/\partial y|_w$

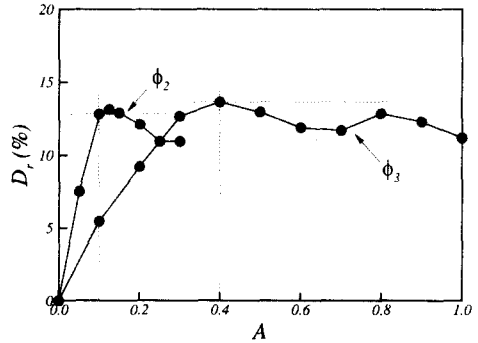


Fig. 12 Effect of  $A$  on  $D_r$  for  $\partial p/\partial z|_w$

두가지 가진 형태에 대해 최적 시간적도는  $\Delta t_a^+ \approx 1.0$ 이며, 이는 준최적 제어를 적용함에 있어서 중요한 현상이다. 그러나  $\Delta t_a^+$ 를 더욱 증가 시킴에 따라, 특히  $\Delta t_a^+ \geq 100$ 인 경우에는 항력은 증가한다. 그러므로 가진시간 척도는 성공적인 제어를 위해서  $\Delta t_a^+ \sim 100$  이내로 제한되어야 한다. 이러한 시간척도는 Kim 과 Sparlart<sup>(7)</sup>가 제시한 돌출 시간 (bursting period)와 밀접한 관련이 있다.

주유동방향 와도에 대해 밀접한 관련이 있는 벽면 정보로서 횡방향 압력구배 ( $\partial p/\partial z|_w$ )가 잘 알려져 있다.<sup>(8)</sup> 이에 Lee 등<sup>(5)</sup>은 흡입/분사를 이용한 준최적제어를 수행함에 있어서 주유동방향 와도의 억제에 따라 횡방향 벽면 압력구배는 증가됨을 관찰하였다. 또한 벽면 감지 물리량으로서 횡방향 압력구배는 압력 감지열을 이용하여 쉽게 측정할 수 있다는 장점이 있다.<sup>(9)</sup> 본 연구에서는 감지함수로서  $\partial p/\partial z|_w$ 인 경우에 대해,  $\partial w/\partial y|_w$ 인 경우와 마찬가지로  $A$ 와  $\Delta t_a^+$ 가 항력에 미치는 영향을

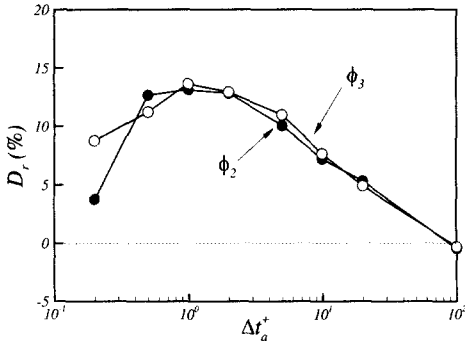


Fig. 13 Effect of  $\Delta t_a^+$  on  $D_r$  for  $\partial p / \partial z|_w$

조사하였다. 식 (26)에서 제시된  $\phi_3$ 는 항력에 어떠한 영향을 미치지 못한다. 그러나 벽면에서  $\partial p / \partial z|_w$ 과  $\omega_x|_w$ 과의 관련성<sup>(9)</sup>을 근거로 하여 다음과 같이 수정하였다.

$$\hat{\phi}_3 = -C'_3 \partial \hat{w} / \partial y|_w = C'_3 \partial \hat{p} / \partial z|_w = C'_3 ik_z \hat{p}_w \quad (30)$$

두 가지 가진 형태에서 가진크기에 대한 항력감소율을 Fig. 12에 나타내었다. 가진 시간척도는  $\Delta t_a^+ = 1.0$ 로 고정시켰다. 감지함수가  $\partial w / \partial y|_w$ 인 경우와 유사한 거동을 보이고 있으며, 최적조건은  $\phi_2$ 에 대해서는  $A = 0.125$ ,  $\phi_3$ 에 대해서는  $A = 0.4$ 이다.

가진 시간척도 ( $\Delta t_a^+$ )에 대한 항력감소율의 영향을 Fig. 13에 나타내었다. 여기서 가진크기는 앞서 얻어진 최적조건인  $\phi_2$ 에 대해서는  $A = 0.125$ ,  $\phi_3$ 에 대해서는  $A = 0.4$ 로 고정시켰다. 최적가진 시간척도는 모든 경우에 대해  $\Delta t_a^+ \cong 1.0$ 로 얻어졌으며, 감지함수가  $\partial w / \partial y|_w$ 인 경우와 비교해볼 때, 흡입/분사에 의한 제어를 하는 경우 짧은 시간 척도 ( $\Delta t_a^+ < 1.0$ )에서 항력감소율은 매우 민감하게 변화한다. 실제 준최적 제어를 적용함에 있어서 아주 짧은 시간척도의 가진은 효과적인 항력감소를 주지 못하므로, 시간척도의 선택이 매우 중요함을 시사하고 있다. 시간척도를 증가시키에 따라 ( $\Delta t_a^+ \geq 100$ ), 항력은 오히려 증가하는 경향을 보이고 있다. 이는 감지함수가  $\partial w / \partial y|_w$ 인 경우에서 관찰된 것과 일치한다.

짧은 순간의 가진 ( $\Delta t_a^+ = 0.2$ )에 의해 야기되는 전단응력 ( $\tau_w$ )의 민감도를 살펴 보기 위해, 감지

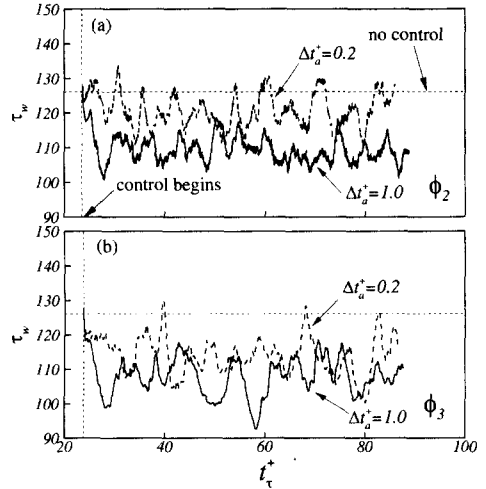


Fig. 14 Time history of  $\tau_w$  for  $\partial p / \partial z|_w$ . (a)  $\phi_2$  and (b)  $\phi_3$

함수가  $\partial p / \partial z|_w$ 인 경우에 대해 가진형태 및 시간척도에 따른 시간이력곡선을 Fig. 14에 제시하였다. 시간 간격에 따른 민감도의 비교를 위해  $\Delta t_a^+ = 0.2, 1.0$ 이 선택되었다.  $\phi_2$ 에 의한  $\tau_w$ 의 반응은 미소한 섭동이 관측되는 반면,  $\phi_3$ 에 의해서는 관찰되지 않는다. 이는  $\phi_2$ 에 의해 벽면에서 압력변동이  $\phi_3$ 보다 더욱 불안정한 거동이 발생하기 때문이라 기대된다. 이에 대해 식 (25)와 (30)에서 제시된 가진자와 감지자의 연관성을 살펴보면,  $\phi_2$ 의 경우는 벽면압력과 횡방향 파수의 제공에 관련되어 있지만,  $\phi_3$ 의 경우는 파수에 비례한다. 이러한 높은 차수의 파수 연관성에 의해 가진자와 감지자 사이의 위상정보의 변조 가능성이 높기 때문에 효과적인 항력감소를 기대하기 어려우며, 전단응력의 반응 또한 시간척도에 매우 민감하다고 추정된다.

실제 벽면에 가진자/감지자 (actuator / sensor)가 설치되었을 때, 제어표면에서의 제어소자들은 유한한 크기를 가지며, 공간적으로 이산화되어 분포된다. 본 연구에서는 동일한 준최적 제어이론이 적용되었을 때, 제어기의 크기에 따른 항력감소의 영향을 살펴보았다. 가진자 (A) 및 감지자 (S) 크기에 대한 효과를 구현하기 위해 다음의 수치적 처리가 사용되었다.

$$S \rightarrow \bar{S} \rightarrow \hat{\bar{S}} \rightarrow \hat{\bar{A}} \rightarrow \bar{A} \rightarrow A \quad (31)$$



여기서,  $\bar{\cdot}$  는 공간 평균을 나타내며,  $\wedge$  는 Fourier 변환을 의미한다. 먼저  $\mathbf{S}$  는 등성한 격자계에서의 감지자 ( $\hat{\mathbf{S}}$ ) 를 표현하기 위해 공간적으로 평균된 후, Fourier 변환을 되었다 ( $\hat{\hat{\mathbf{S}}}$ ). 이 감지 변수 ( $\hat{\hat{\mathbf{S}}}$ ) 는 준최적 제어를 적용하여 가진자 ( $\hat{\hat{\mathbf{A}}}$ ) 로 변화 되었다. Fourier 공간에서 정의된 가진자 ( $\hat{\hat{\mathbf{A}}}$ ) 는 실변수 공간으로 Fourier 역변환 되어졌으며 ( $\bar{\hat{\hat{\mathbf{A}}}}$ ), 선형삽입 (Linear interpolation)을 이용하여 조밀한 격자계에서의 가진자 ( $\bar{\mathbf{A}}$ ) 로 정의되었다.

Figure 15(a)는 가진자/감지자 열에 대한 계략적인 모형을 나타내고 있다. 세가지 형태의 제어 열들이 고려되었다 ;  $8 \times 8, 16 \times 16, 32 \times 32$ . 이에 대한 벽단위 길이 척도 ( $\Delta x^+, \Delta z^+$ ) 는 각각 (160,52),

(80,26), (40,13) 이다. Figure 15(b)는  $\partial w / \partial y|_w$  을 감지한 후, 흡입/분사에 의해 제어를 하는 경우에 대한 벽면에서 주어지는 특정 시점에서의 가진 형태를 제시하고 있다. 가진 인자로서  $A=0.125$ ,  $\Delta t_a^+ = 1.0$  이 사용되었다. 가진자/감지자의 크기가 커짐에 따라 순간 가진 형태의 위상정보가 공간상으로 평균화되어지며, 특히  $8 \times 8$  격자에서는  $32 \times 32$  격자에서의 가진 형태의 위상이 상당히 왜곡되어 진다. 가진자 및 감지자 크기에 대한 항력 감소율을 Table 1 에 요약하였다. 각각 가진 및 감지 형태에 따라 앞서 논의된 최적의 조건을 사용하였으며,  $32 \times 32$  격자에 비해  $16 \times 16$  격자에서는 다소 감소된 제어효율을 제시하고 있지만,  $8 \times 8$  격자에서 제어가 거의 되지 않았다. 그러므로 가진자/감지자의 크기가  $\Delta x^+ = 80$ ,  $\Delta z^+ = 26$  로 적어도 제한되어야 한다. 이는 벽면 띠무늬 구조 (streaky structure)와 밀접하게 관련되어 있다. 여기서 띠무늬구조의 길이척도는 주유동방향으로 약 300 벽단위이며, 횡방향으로는 약 100 정도 이다.<sup>(10)</sup> 띠무늬구조의 변화를 위상정보의 왜곡없이 표현하기 위해서는 길이척도의 1/4 정도로 제한되어야 한다.

Table 1 Size effect on  $D_r$

| size  | $\partial w / \partial y _w$ |          | $\partial p / \partial z _w$ |          |
|-------|------------------------------|----------|------------------------------|----------|
|       | $\phi_2$                     | $\phi_3$ | $\phi_2$                     | $\phi_3$ |
| 32x32 | 26%                          | 18%      | 14%                          | 14%      |
| 16x16 | 15%                          | 17%      | 14%                          | 10%      |
| 8x8   | -8%                          | 6%       | 3%                           | -1%      |

5. 결론

준최적제어를 이용한 항력저감에 대해 여러가지 제어인자들의 평가가 이루어졌다. 이를 위해  $Re_\tau = 100$  인 난류채널 유동장은 직접수치모사방

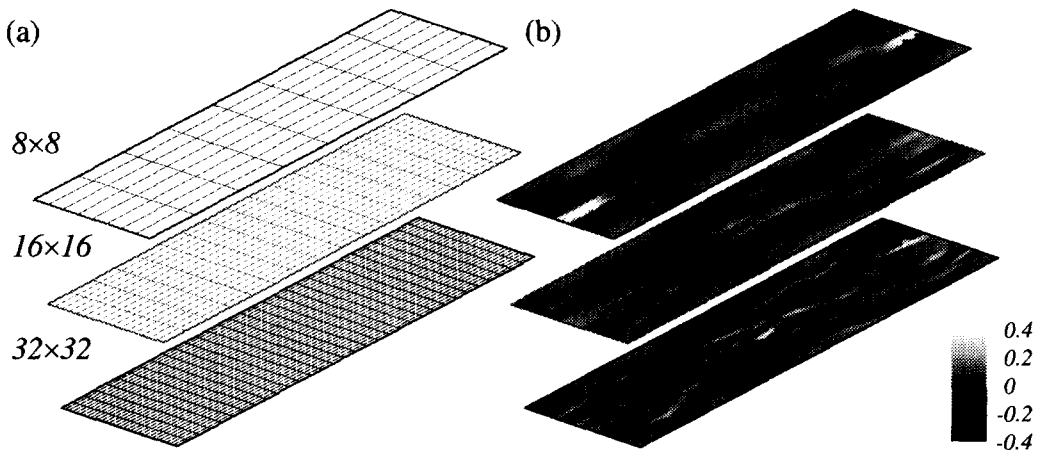


Fig. 15 (a) Schematic diagram of sensor/actuator arrays, (b) contour plots of instantaneous actuation field

법을 이용하여 spectral 영역에서 해석되었다. 두 가지 형태의 감지함수 ( $\partial w/\partial y|_w$ ,  $\partial p/\partial z|_w$ )에 대한 두 가지의 가진자 ( $\phi_2, \phi_3$ )를 이용한 준최적 제어 기법이 사용되었다. 이에 대해 가진크기 ( $A$ )와 가진 시간척도 ( $\Delta t_a^+$ )에 대한 항력감소율 ( $D_r$ )의 영향을 조사하였다. 또한 가진크기에 대한 해석을 뒷받침을 위해 능동감쇄를 이용한 제어도 수행되었다. 주어진 제어기에 따라 가진 크기는 최적조건이 존재함을 알 수 있었으며, 초과가진에 의해서도 항력감소는 유지되었다. 이에 대해 벽면 유동 거동을 살펴본 결과, 벽면 가진에 의해서 유동의 구조의 변화는 벽면에 아주 가까운 영역 ( $y^+ < 20$ )에서만 일어나며, 초과가진에 의해서도 일정 항력감소를 기대할 수 있다. 또한 가진 시간척도는  $\Delta t_a^+ = 1.0$ 에서 최적이며, 제어효율은 돌출시간간격 ( $\Delta t_a^+ \sim 100$ ) 이상에서는 항력이 오히려 증가하였다. 가장 효과적인 가진자와 감지자의 구성은  $\partial w/\partial y|_w$ 를 감지하여  $\phi_2$ 로 가진하는 형태이며, 이 경우 최대 항력감소율은 약 26%이다. 가진자와 감지자의 크기가 항력감소율에 미치는 영향을 조사하였다. 벽면에서 발생하는 항력과 밀접한 관계를 나타내고 있는 떠무늬 구조의 크기와 관련되어 있으며, 이에 상응하는 길이척도로서 가진자와 감지자의 크기 결정에 있어서 반드시 고려되어야 한다.

## 후 기

본 연구는 과학기술부 국가지정연구실 사업의 일환으로 수행되었으며, 아울러 많은 조언을 해주

신 연세대학교 이창훈 교수님께 감사드립니다.

## 참고문헌

- (1) Robinson, S.K., 1991, "Kinematics of Turbulent Boundary Layer Structure," Ph.D dissertation, Stanford University, Stanford, CA.
- (2) Kim, J., Moin, P. and Moser, R.K., 1987, "Turbulence Statistics in Fully Developed Channel Flow at Low Reynolds Number," *J. Fluid Mech.*, Vol. 177, pp.133~166.
- (3) Choi, H., Moin, P. and Kim, J., 1994, "Active Turbulence Control for Drag Reduction in Wall-Bounded Flow," *J. Fluid Mech.*, Vol. 262, pp.75~110.
- (4) Lee, C., Kim, J., Babcock, D. and Goodman, R., 1997, "Application of Neural Networks to Turbulence Control for Drag Reduction," *Phys. Fluids*, Vol. 9, pp.1740~1747.
- (5) Lee, C., Kim, J. and Choi, H., 1998, "Suboptimal Control of Turbulent Channel Flow for Drag Reduction," *J. Fluid Mech.*, Vol. 358, pp.245~258.
- (6) Hammond, E.P., Bewley, T.R. and Moin, P., 1998, "Observed Mechanism for Turbulence Attenuation and Enhancement in Opposition-Controlled Wall-Bounded Flows," *Phys. Fluids*, Vol. 10, pp.2421~2423.
- (7) Kim, J. and Spalart, 1987, "Scaling of the Bursting Frequency in Turbulent Boundary Layers at Low Reynolds Numbers," *Phys. Fluids*, Vol.30, pp.3326~3328.
- (8) Kim, J., 1989, "On the Structure of Pressure Fluctuations in Simulated Turbulent Channel Flow," *J. Fluid Mech.*, Vol. 205, pp.421~451.
- (9) Lee, I. and Sung, H.J., 1999, "Development of an Array of Pressure Sensors with PVDF Film," *Exp. Fluids*, Vol. 26, pp.27~35.
- (10) Jimnez, J. and Moin, P., 1991, "The Minimal Flow Unit in Near-Wall Turbulence," *J. Fluid Mech.*, Vol. 225, pp.213~240.