

# 비정상 RANS 계산을 위한 내재적 분리 방법

리광훈\*, 성형진\*\*

## An implicit decoupling method for unsteady RANS computation

Gwang Hoon RHEE, Hyung Jin SUNG

**Key Words** : fractional step method(분리단계법), RANS(레이놀즈 평균 유동 해석), DRANS method (분리된 레이놀즈 평균 유동 해석법)

### ABSTRACT

A new efficient numerical method for computing unsteady, incompressible flows, DRANS (Decoupled Reynolds-Averaged Navier-Stokes), is presented. To eliminate the restriction of CFL condition, a fully-implicit time advancement in which the Crank-Nicolson method is used for both the diffusion and convection terms, is adopted. Based on decomposition method, the velocity-turbulent quantity decoupling is achieved. The additional decoupling of the intermediate velocity components in the convection term is made for the fully-implicit time advancement scheme. Since the iterative procedures for the momentum,  $k$  and  $\epsilon$  equations are not required, the components decouplings bring forth the reduction of computational cost. The second-order accuracy in time of the present numerical algorithm is ascertained by computing decaying vortices. The present decoupling method is applied to turbulent boundary layer with local forcing.

### 1. 서론

난류 모델을 이용한 난류 유동의 해석에 가장 많이 사용되는 방법은 운동량 방정식과 연속 방정식이 결합되어 있는 SIMPLE계열의 방법들이다.<sup>(1,2)</sup> 정상 유동에 대한 해석에서는 완화법등을 이용하여 효율적인 해석이 가능하다. 이러한 방법은 비정상 유동의 해석에 있어서도 사용되어지고 있다.<sup>(3,4)</sup> 그러나, 비정상 유동에서는 정상유동에서와는 달리 매 시간 단계마다 반복계산을 하여야 하기 때문에 소요되는 CPU 시간이 과다하게 사용되어야 한다. 그 대안으로 생각할 수 있는 방법은 직접수치해석(DNS)나 대형와해석(LES)에서 널리 사용되는 부분단계법(Fractional Step Method)이다. 부분단계법은 속도와 압력을 분리하여 운동량 방정식과 압력을 각각 단 한번에 구하는 효율적인 방법이다.

최근 Kim 등<sup>(5)</sup>에 의하여 개발된 새로운 속도 압력 부분 단계법은, 3차원 비정상 비압축성 유동

을 해석하기 위해 Navier-Stokes 방정식의 모든 항들을 Crank-Nicolson 방법을 사용하여 완전 내재적인 (fully-implicit) 방법으로 시간과 공간에 대하여 동시에 차분하여 행렬식을 구성하였다. 이렇게 구성된 행렬식에서 계수 행렬을 근사적인 block LU decomposition 을 이용하여 시간에 대하여 2차의 정확도를 유지하도록 속도와 압력을 분리하였다. 그리고, 모델링 방정식에 해당하는 행렬식의 계수행렬 또한 근사적인 block LU decomposition 을 이용하여 대류항의 내재적인 처리로 인해 결합된 속도 성분들을 시간에 대한 2차의 정확도를 유지하면서 각각 분리하는 방법을 제시하였다. 즉, 속도 성분 상호간이 분리됨으로서 반복 계산이 필요없게 된 것이다.

난류 모델을 사용한 비정상 유동해석에서는 운동량 방정식과 연속 방정식과 함께  $k-\epsilon$  방정식 등이 추가로 연관되어 있기 때문에 기존의 부분 단계법을 사용하더라도 많은 반복계산이 필요하게 된다. 속도와 압력은 부분 단계법을 사용하여 분리시킬 수 있지만 속도와 난류량등은 서로 연관되어 있기 때문에 기존의 방법으로는 필수적으로 반복적 계산이 필요하게 된다.

\* 한국과학기술원 기계공학과 대학원

\*\* 한국과학기술원 기계공학과

본 연구에서는 Kim등<sup>(5)</sup>이 개발한 부분 단계법을 기초로 하여 속도 성분 상호간, 난류 운동량과 소산율을 모두 분리하는 부분 단계법(DRANS)을 제시하였다. 모든 운동량 방정식과 난류량 방정식들에 있어서 시간 차분은 Crank-Nicolson 방법을 사용하여 2차 정확도를 가지도록 하였고, 공간 차분은 중앙 차분을 이용하였다. 적절한 치환을 사용하여 2차 정확도를 유지하면서 속도 성분, 압력 그리고 난류량들을 분리하였다. 대류항들에 대한 내재적 처리를 이용하여 각 속도 성분과 난류량들이 모두 2차 정확도를 유지하면서 분리되는 방법을 제시하였다. 본 방법에 대한 검증으로는 주기적 국소 교란이 가해지는 난류 경계층에 대한 해석을 행하여 본 방법에 의한 결과와 기존 연구에서 행해지던 SIMPLEC 방법을 이용한 결과를 비교하였다. 난류 모델은 수치적 안정성과 해의 정확성에 있어서 우수한 성능을 지닌  $k-\epsilon-f_\mu$  모델을 사용하였다. 그 결과 많은 CPU 시간이 절약되면서 타당한 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

## 2. 수치 방법

### 2.1 $k-\epsilon-f_\mu$ 모델

비압축성 비정상 유동에 대한 레이놀즈 평균 지배방정식은

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + \frac{\partial U_i U_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \nu \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \overline{u_i u_j} \right] \quad (2)$$

이다.<sup>(6)</sup> 식(2)에서의 새로운 미지수인 레이놀즈 응력항은  $k-\epsilon-f_\mu$  모델에서는

$$-\overline{u_i u_j} = 2\nu S_{ij} - \frac{2}{3} k \delta_{ij}, \quad (3)$$

$$\nu_t = C_\mu f_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (4)$$

로 모형화한다. 여기에서  $S_{ij}$ 는 평균 속도 변화율이며 ( $S_{ij} = (U_{ij} + U_{ji})/2$ ),  $C_\mu$ 는 모델상수이다 ( $C_\mu = 0.09$ ). 벽면임계함수  $f_\mu$ 는  $f_\mu = f_{\mu_1} f_{\mu_2}$  로 나누

어지는데  $f_{\mu_1}$ 은 타원형 방정식으로부터 얻어지는  $f_w$ 의 벽면 근방에서의 효과를,  $f_{\mu_2}$ 은 비평형효과를 나타낸다.  $f_{\mu_2}$ 는 Lee등<sup>(7)</sup>의 직접수치모사의 결과를 이용하여 그 계수를 결정하였다;

$$f_{\mu_1} = (1 + 20 \exp[-(R_t/120)^2] R_t^{-3.4}) f_w^2, \quad (5)$$

$$f_{\mu_2} = 7 \frac{4.5 + 0.3 P_k/\epsilon}{(4.5 + 1.3 P_k/\epsilon)^2}. \quad (6)$$

$f_w$ 에 대한 타원형 방정식은 다음의 식(7)(8)과 같다;

$$L^2 \nabla^2 f_w = -\frac{R_t^{3.2}}{A^2} (f_w - 1), \quad (7)$$

$$L^2 = 0.2^2 \left[ \frac{k^3}{\epsilon^2} + 70^2 \left( \frac{\nu}{\epsilon} \right)^{1/2} \right]. \quad (8)$$

식(7)에서  $A=42$ 이며, 식(8)은 길이척도  $L$ 을 Durbin과 Laurence(14)가 제안한 형태로 난류적분 길이척도와 미소난류 (Kolmogorov) 길이척도의 합으로 모형화하였다.

$k$ 와  $\epsilon$ 는 다음과 같은 전달 방정식에 의하여 구하여 진다.

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \epsilon, \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \epsilon}{\partial t} + U_j \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} = & \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] \\ & + (C_{\epsilon_1}^* P_k - C_{\epsilon_2} f_2 \epsilon) / T \\ & + C_1 (1 - f_w) \nu \nu_t \left( \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_j \partial x_k} \right)^2 \end{aligned} \quad (10)$$

식(9)(10)에서의 모델상수 및 함수는

$\sigma_k$	$\sigma_\epsilon$	$C_{\epsilon_1}$	$C_{\epsilon_2}$	$C_1$
1.2	1.3	1.45	1.8	0.4

$$C_{\epsilon_1}^* = C_{\epsilon_1} - \frac{\eta(1 - \eta/4.44)}{1 + 0.25\eta^3}, \quad (11)$$

$$f_2 = 1 - \frac{2}{9} \exp(-0.33 R_t^{1.2}) \quad (12)$$

로 표시된다.  $\eta = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}k/\epsilon$ ,  $R_t = k^2/\nu\epsilon$ 이며, 미소난류 (Kolmogorov) 시간척도로 난류 시간척도를 교정한 형태를 사용하였다<sup>(8)</sup>;

$$T^2 = \left(\frac{k}{\varepsilon}\right)^2 + 6.0^2 \left(\frac{v}{\varepsilon}\right) \quad (13)$$

$k-\varepsilon-f_\mu$  모델에 대한 자세한 유도 과정과 그 응용은 Park과 Sung<sup>(6)</sup>에 잘 나타나 있다.

## 2.2 Decoupling Method

식(3)을 식(2)에 대입하고 무차원화된 형태로 표현하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + \frac{\partial U_i U_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \frac{1}{Re} + v_t \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right] \quad (14)$$

식(14)를 시간에 대해 Crank-Nicolson 방법을 사용하여 차분화하면

$$\begin{aligned} & \frac{U_i^{n+1} - U_i^n}{\Delta t} + \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial x_j} \{ U_i^n (U_j^{n+1} - U_j^n) \} \\ & + \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial x_j} \{ U_j^n (U_i^{n+1} - U_i^n) \} \\ & + \frac{\partial p^{n+1/2}}{\partial x_i} - \frac{\partial p^{n-1/2}}{\partial x_i} \\ & - \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (v_t^{n+1} - v_t^n) \frac{\partial U_i^n}{\partial x_j} \right] \\ & - \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \frac{1}{Re} + v_t \right) \left( \frac{\partial U_i^{n+1}}{\partial x_j} - \frac{\partial U_i^n}{\partial x_j} \right) \right] \\ & = -\frac{\partial p^{n-1/2}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \frac{1}{Re} + v_t \right) \frac{\partial U_i^n}{\partial x_j} \right] \\ & + \frac{\partial}{\partial x_j} \{ U_i^n U_j^n \} \end{aligned} \quad (15)$$

중간 단계 속도  $U_i^*$ 를 다음과 같이 정의하여 사용한다.

$$\begin{aligned} U_i^* &= U_i^{n+1} + \Delta t \left[ \frac{\partial p^{n+1/2}}{\partial x_i} - \frac{\partial p^{n-1/2}}{\partial x_i} \right. \\ & \left. - \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ (v_t^{n+1} - v_t^n) \frac{\partial U_i^n}{\partial x_j} \right\} \right] \end{aligned} \quad (16)$$

식(15)에 (16)을 대입하여 정리하면

$$\begin{aligned} & \frac{U_i^* - U_i^n}{\Delta t} + \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial x_j} \{ U_i^n (U_j^* - U_j^n) \} \\ & + \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial x_j} \{ U_j^n (U_i^* - U_i^n) \} \\ & - \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \frac{1}{Re} + v_t \right) \left( \frac{\partial U_i^{n+1}}{\partial x_j} - \frac{\partial U_i^n}{\partial x_j} \right) \right] \\ & = RHS_i \end{aligned} \quad (17)$$

식(17)에서의 우변은 식(15)에서의 우변과 동일한 값을 지닌다.

각 속도 성분간의 연관을 없애기 위하여 다시

중간 단계 속도  $\widehat{U}_i$ 를 도입한다.

$$\begin{aligned} \widehat{U}_1 &= U_1^* + \frac{\Delta t}{2} \frac{\partial}{\partial x_2} \{ U_1^n (U_2^* - U_2^n) \} \\ & + \frac{\Delta t}{2} \frac{\partial}{\partial x_3} \{ U_1^n (U_3^* - U_3^n) \} \end{aligned}$$

$$\widehat{U}_2 = U_2^* + \frac{\Delta t}{2} \frac{\partial}{\partial x_3} \{ U_2^n (U_3^* - U_3^n) \} \quad (18)$$

$$\widehat{U}_3 = U_3^*$$

식(18)을 식(17)에 대입하면 각 속도 성분은 상호 연관이 없어지기 때문에 반복 계산 없이 얻을 수 있게 된다. 중간 단계 속도  $\widehat{U}_i$ 에 대한 전달 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \widehat{U} + \Delta t \frac{\partial}{\partial x} (U^n \widehat{U}) \\ & + \frac{\Delta t}{2} \frac{\partial}{\partial y} (V^n \widehat{U}) + \frac{\Delta t}{2} \frac{\partial}{\partial z} (W^n \widehat{U}) \\ & - \frac{\Delta t}{2} \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \frac{1}{Re} + v_t \right) \frac{\partial \widehat{U}}{\partial x_j} \right] \\ & = U^n - \Delta t \frac{\partial p^{n-1/2}}{\partial x} \\ & + \frac{\Delta t}{2} \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \frac{1}{Re} + v_t \right) \frac{\partial U}{\partial x_j} \right] \\ & - \frac{\Delta t}{2} \frac{\partial}{\partial y} (U^n V^n) - \frac{\Delta t}{2} \frac{\partial}{\partial z} (U^n W^n) \\ & \widehat{V} + \frac{\Delta t}{2} \frac{\partial}{\partial x} (U^n \widehat{V}) \\ & + \Delta t \frac{\partial}{\partial y} (V^n \widehat{V}) + \frac{\Delta t}{2} \frac{\partial}{\partial z} (W^n \widehat{V}) \\ & - \frac{\Delta t}{2} \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \frac{1}{Re} + v_t \right) \frac{\partial \widehat{V}}{\partial x_j} \right] \\ & = V^n - \Delta t \frac{\partial p^{n-1/2}}{\partial y} \\ & + \frac{\Delta t}{2} \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \frac{1}{Re} + v_t \right) \frac{\partial V}{\partial x_j} \right] \\ & - \frac{\Delta t}{2} \frac{\partial}{\partial x} (\widehat{U} V^n) - \frac{\Delta t}{2} \frac{\partial}{\partial z} (V^n W^n) \\ & \widehat{W} + \frac{\Delta t}{2} \frac{\partial}{\partial x} (U^n \widehat{W}) \\ & + \frac{\Delta t}{2} \frac{\partial}{\partial y} (V^n \widehat{W}) + \Delta t \frac{\partial}{\partial z} (W^n \widehat{W}) \\ & - \frac{\Delta t}{2} \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \frac{1}{Re} + v_t \right) \frac{\partial \widehat{W}}{\partial x_j} \right] \\ & = W^n - \Delta t \frac{\partial p^{n-1/2}}{\partial z} \\ & + \frac{\Delta t}{2} \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \frac{1}{Re} + v_t \right) \frac{\partial W}{\partial x_j} \right] \\ & - \frac{\Delta t}{2} \frac{\partial}{\partial x} (\widehat{U} W^n) - \frac{\Delta t}{2} \frac{\partial}{\partial y} (\widehat{V} W^n) \end{aligned} \quad (19)$$

식(19)은 상호 연관이 없기 때문에 한 번에 해석될 수 있다. 식(19)에서 구한 중간 단계 속도  $\widehat{U}_i$ 를 이용하여 중간 단계 속도  $U_i^*$ 를 구하는 식은 식(18)에서 구할 수 있는데 다음과 같다.

$$\begin{aligned} W^* &= \widehat{W} \\ V^* &= \widehat{V} - \frac{\Delta t}{2} \frac{\partial}{\partial z} \{V^n(W^* - W^n)\} \\ U^* &= \widehat{U} - \frac{\Delta t}{2} \frac{\partial}{\partial y} \{U^n(V^* - V^n)\} \\ &\quad - \frac{\Delta t}{2} \frac{\partial}{\partial z} \{U^n(W^* - W^n)\} \end{aligned} \quad (20)$$

식(16)에서 압력을 구하기 위해서는 우변의 마지막 항에 포함된  $v_i^{n+1}$ 을 구하여야 한다. 식(20)에서 구한 중간 단계 속도  $U_i^*$ 는  $U_i^{n+1}$ 과  $U_i^* = U_i^{n+1} + O(\Delta t^2)$ 의 관계를 가진다. 따라서  $v_i^{n+1}$ 을 구하기 위한  $k-\varepsilon$  방정식에서는 속도성분  $U_i^{n+1}$  대신  $U_i^*$ 를 사용하여도 전체 에러항은  $O(\Delta t^2)$ 을 유지하게 된다. 평균 속도장에서와 같이  $k-\varepsilon$ 에서도 다음과 같은 중간 단계 변수를 사용한다.

$$\begin{aligned} k^* &= k^{n+1} + \frac{\Delta t}{2} (\varepsilon^{n+1} - \varepsilon^n) \\ &\quad - \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \frac{v_i^{n+1} - v_i^n}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \\ &\quad - \frac{1}{2} (v_i^{n+1} - v_i^n) \left( \frac{\partial (U_i^n + U_i^{n+1})}{\partial x_j} \right)^2 \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon^* &= \varepsilon^{n+1} + \frac{\Delta t}{2} \left( -\frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \frac{v_i^{n+1} - v_i^n}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] \right. \\ &\quad - \left( \frac{C_{\varepsilon 1} P_k}{T} \right)^{n+1} + \left( \frac{C_{\varepsilon 1} P_k}{T} \right)^n \\ &\quad \left. + \left( \frac{C_{\varepsilon 2} f_2 \varepsilon}{T} \right)^{n+1} - \left( \frac{C_{\varepsilon 2} f_2 \varepsilon}{T} \right)^n - P_\varepsilon^{3n+1} + P_\varepsilon^{3n} \right) \end{aligned} \quad (22)$$

식(21)(22)에 의해 치환된 변수들은 상호 연관이 없기 때문에 반복계산을 필요로 하지 않는다. 시간에 대해 Crank-Nicolson 방법을 사용하여 차분화된  $k-\varepsilon$  방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} k^* &+ \frac{\Delta t}{2} \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \frac{1}{2} (U_i^n + U_i^*) k^* \right] \\ &- \frac{\Delta t}{2} \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \frac{1}{Re} + \frac{v_i}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k^*}{\partial x_j} \right] \\ &= k^n - \frac{\Delta t}{2} \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \frac{1}{2} (U_i^n + U_i^*) k^n \right] \\ &+ \frac{\Delta t}{2} \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \frac{1}{Re} + \frac{v_i}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k^n}{\partial x_j} \right] \\ &+ \Delta t \left[ \frac{v_i^n}{2} \left\{ \frac{\partial (U_i^n + U_i^*)}{\partial x_j} \right\}^2 - \varepsilon \right] \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon^* &+ \frac{\Delta t}{2} \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \frac{1}{2} (U_i^n + U_i^*) \varepsilon^* \right] \\ &- \frac{\Delta t}{2} \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \frac{1}{Re} + \frac{v_i}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \varepsilon^*}{\partial x_j} \right] \\ &= \varepsilon^n - \frac{\Delta t}{2} \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \frac{1}{2} (U_i^n + U_i^*) \varepsilon^n \right] \\ &+ \frac{\Delta t}{2} \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \frac{1}{Re} + \frac{v_i}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \varepsilon^n}{\partial x_j} \right] \\ &+ \Delta t \left[ \left\{ \frac{C_{\varepsilon 1} P_k}{T} \right\}^n - \left\{ \frac{C_{\varepsilon 2} f_2 \varepsilon}{T} \right\}^n + (P_\varepsilon^3)^n \right] \end{aligned} \quad (24)$$

$v_i^{n+1}$ 은 식(23)(24)에서 구하여진 난류량들을 이용하여 구할 수 있다.

식(16)의 양변에 Divergence를 취하면 식(25)와 같이 압력항을 구할 수 있고, 식(26)과 같이 평균 속도  $U_i^{n+1}$ 을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 p^{n+1/2}}{\partial x_i^2} &= \frac{\partial^2 p^{n-1/2}}{\partial x_i^2} \\ &+ \frac{1}{\Delta t} \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ U_i^* + \right] \end{aligned} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} \frac{\Delta t}{2} \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ (v_i^{n+1} - v_i^n) \frac{\partial U_i^n}{\partial x_j} \right\} \\ U_i^{n+1} &= U_i^* - \Delta t \left[ \frac{\partial p^{n+1/2}}{\partial x_i} - \frac{\partial p^{n-1/2}}{\partial x_i} \right] \\ &- \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ (v_i^{n+1} - v_i^n) \frac{\partial U_i^n}{\partial x_j} \right\} \end{aligned} \quad (26)$$

### 3. 국소 교란 난류 경계층 수치 해석

본 연구에서 개발된 분리 방법을 사용하여 그림1과 같은 Park등<sup>(9)</sup>의 난류 경계층 유동을 선택하였다. 비정상성을 가하기 위하여 그림과 같이 국소 교란을 가하였다. 입구 유동은 Rhee와 Sung<sup>(10)</sup>의 방법을 사용하였으며, 자유 속도( $U_\infty$ )와 가진폭(g)로 무차원화된 국소 교란의 가진 주파수( $fU_\infty/g$ )가 0.16이며 진폭은 자유 속도의 10%인 정현파로 국소교란이 가해진다.

그림 2에서는 국소교란을 가하는 중심점에서

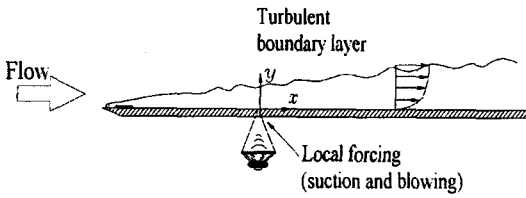


그림 1. Schematic diagram

국소교란을 가하는 너비만큼 벽면에서 떨어진 곳에서 벽면 수직 방향의 Ensemble 평균 속도의 시간에 따른 변화가 도시되어 있다. 그림에서와 같이 SIMPLEC 방법으로 해석하였을 경우와 좋은 일치를 보여주고 있다. 이는 DRANS 방법이 작은 CPU 시간을 사용하면서도 타당한 결과를 주고 있음을 보여준다.

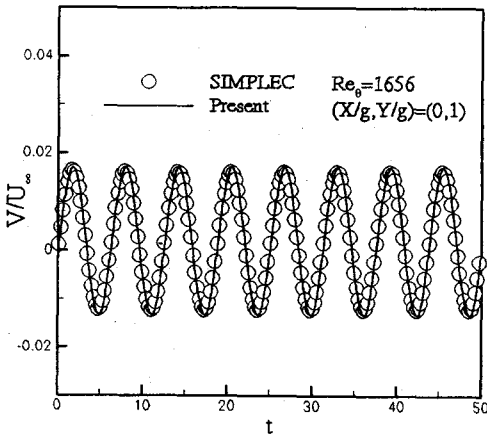


그림 2 Time history of vertical velocity component

표 1에서는 그림 2에서의 한 주기동안의 소요되는 CPU 시간을 제시하였다. SIMPLEC 방법에 비하여 불과 7%정도의 계산 시간만으로도 그림 2에서와 같이 SIMPLEC와 같은 결과를 보여준다. 이는 SIMPLEC에서의 반복 계산 과정을 생략함

Method	CPU time	Ratio	Percentage
SIMPLEC	1860 sec	14.6	100 %
Present	130 sec	1	6.99 %

표 1 Comparison of CPU time during one period

으로서 많은 계산 시간을 감소시켜줄 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 난류 모델을 이용한 비정상 유동 해석에 있어서 효율적으로 사용될 수 있는 DRNAS 방법을 제시하였다. 운동량 방정식과 난류 방정식들의 각 변수를 모두 분리시켜 반복적 계산없이 한 번의 계산으로 각 시간 단계에서의 유동장을 계산하는 방법을 개발 적용하였다. 난류 모델 중 정확한 수치 해를 제시하고 있는  $k-\epsilon-f_w$  모델을 사용하였다. 기존의 SIMPLEC 방법과 본 연구에서 제시한 방법을 비교하기 위하여 국소교란이 가해지는 난류 경계층을 해석하였다. 정확도에 있어서는 기존 방법과 같은 정도의 해를 주면서 CPU 시간은 93%가 감소하는 등, 좋은 결과를 보여주고 있다.

#### 참고문헌

- (1) Rhee, G. H. and Sung, H. J., 1997, Int. J. Heat and Fluid Flow, Vol. 18, No. 11, pp.38-44.
- (2) Rhee, G. H. and Sung, H. J., 2000, Int. J. of Heat & Mass Transfer, Vol. 43, No. 8, pp. 1439-1448.
- (3) Rhee, G. H. and Sung, H. J., 2000, Fluid Dynamic Research, in press.
- (4) Rhee, G. H. and Sung, H. J., 2000, Numerical Heat Transfer, in press.
- (5) Kim, K. Y., S-J. Baek and Sung, H. J., 2000, Journal of Computational Physics, submitted.
- (6) Park, T. S. and Sung, H. J., 1997, Fluid Dynamics Research, Vol. 20, pp. 97~113.
- (7) Lee, M. J., Kim, J. and Moin, P., 1990, J. Fluid Mech., Vol. 216, pp. 561~583.
- (8) Durbin, P. A. and Laurence, D., 1996, 3rd Advances in Turbulence Research Conference, Korea Univ., Korea, pp. 109-120.
- (9) Park, S. H., I. Lee and Sung, H. J., 2000, Experiments in Fluids, submitted.
- (10) Rhee, G. H. and Sung, H. J., 2000, AIAA J., Vol.38, No.4.