

논문

PISO 알고리즘에서 난류예측의 후행성과 보완에 대한 연구

이 재 원^{*1}, 유 흥 선^{*2}, 강 관 구^{*3}

A Study on Delay and Modification in Predicting Turbulence Flow in PISO Algorithm

J.W. Lee, H.S. Ryou and K.G. Kang

In this paper, a modification of PISO algorithm based on standard $k-\epsilon$ turbulence model was proposed. The numerical technique used in this research is finite volume method, hybrid scheme for discretizing convection term, Euler implicit scheme for discretizing time term, and non-staggered grid. The basic idea of the modification of PISO algorithm is to perform an additional corrector stage for turbulence kinetic energy and dissipation rate to correct the inconsistency of flow and turbulence. In order to validate this algorithm, simulation of flow around a square cylinder ($Re=3000$) was performed in two-dimensional case. The results obtained from the proposed scheme show better agreement with those from the experiment than using original PISO algorithm in coherent velocity field.

Key Words : PISO 알고리즘, 사각실린더(Square Cylinder), 난류운동에너지(Turbulent Kinetic Energy)

1. 서 론

일반적으로 유체 유동의 해석에 있어서 압력장의 변화는 유체의 속도를 결정하기 위한 가장 중요한 해석의 조건이 된다. 비압축성유체의 경우 이러한 압력에 대한 방정식은 질량보존 방정식을 이용하여 해결하고 있으며 이러한 압력기반의 알고리즘 중 일반적으로 정상유동의 해석에 있어서 가장 정확하고 또 가장 널리 사용되는 알고리즘으로는 SIMPLE 알고리즘[1]을 들 수 있다.

그러나, SIMPLE 알고리즘은 정상유동의 해석에 있어서 하향이완 계수와 반복계산을 사용함으로써 비교적 정확한 해를 제시하였으나 비정상문제를 해결하는 데는 시간과 수렴성에 많은 문제를 나타내게 된다. 이러한 문제의 해결방법으로 여러 가지 방법들이 제안되었는데, 그 대표적인 예로 Fractional Step 기법, PISO 기법 등을 들 수 있다.

Kim과 Moin[2], Choi 와 Moin[3]에 의해서 사용된 fractional step method는 시간 정확도를 요구하는 계산에 매우 적합한 방법이다. Fractional step method에서는, 운동량 방정식의 해를 얻을 때, 보조속도장을 얻을 수 있다. 그리고, 운동량 방정식에 다이버전스를 취해서, 압력장을 위한 Poisson 방정식

* 2001년 8월 17일 접수

^{*1} 정회원, 한국화학

^{*2} 정회원, 중앙대학교 기계공학부

^{*3} 학생회원, 중앙대학교 대학원 기계공학과

이 얻어진다. Poisson 방정식의 해는 반복계산법으로 구해진다.

Issa[4]는 PISO(Pressure Implicit with splitting of Operators)라는 알고리즘을 제안하였다. PISO 알고리즘은 비정상 유동에 대한 해석에 time-marching 방법을 적용한 알고리즘으로 기존의 SIMPLE 알고리즘으로 비정상문제를 해결할 때 나타나는 시간과 수렴성의 문제를 해결하였다.

그러나 초기 Issa[4]에 의해 제시된 PISO 알고리즘은 속도 및 압력장의 해석에 있어서 사용된 2번의 correction과는 달리 표준 k-ε 모델의 적용에 있어서는 한번의 correction만을 수행하도록 하였다. 이는 필연적으로 속도 및 압력장의 시간에 따른 발달을 더디게 하고 이로 인해 난류에너지값을 하향 예측하는 결과를 낳게 된다.

따라서, 본 논문에서는 난류유동의 수치해석에 있어서 표준 k-ε 모델을 적용할 때 또 한번의 correction을 추가하는 수정된 PISO 알고리즘을 제안하였으며 이를 이용하여 사각 덕트주위의 유동에 대한 수치해석을 수행하고 이를 실험[5]과 비교하였다.

2. 지배방정식과 난류모델

2.1 지배방정식

뉴턴 유체의 비압축성 난류 유동에서 질량, 운동량, 에너지 및 스칼라량들에 대한 지배방정식을 일반 좌표계에서 나타내면 다음과 같다.

▶ 질량 보존 방정식

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial x^j} [J \alpha_m^j (\rho u_m)] = 0 \quad (1)$$

▶ 운동량 보존 방정식

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial x^j} [J \alpha_m^j (\rho u_m u_i - \tau_{mi} + P \delta_{mi})] = 0 \quad (2)$$

여기서 U_m 은 Cartesian 속도 성분이고 J 는 비직교 좌표계로의 변환에 따른 Jacobian을 나타내며 다음과 같다.

$$J = \det \left| \frac{\partial (y_1, y_2)}{\partial (x^1, x^2)} \right| \quad (3)$$

또한 α_m^j 는 일반 좌표계의 contravariant 기본 벡터 \vec{e}^j 와 직교 좌표계의 단위 벡터 \vec{i}_m 의 내적을 의미하고, δ_{mi} 는 Kronecker's delta를 나타낸다. 위의 식 (2)에서 응력 텐서는 다음과 같이 나타낸다.

$$\tau_{mi} = \mu_{eff} \left[\frac{\partial u_i}{\partial x^n} \alpha_m^n + \frac{\partial u_m}{\partial x^j} \alpha_i^j \right] - \frac{2}{3} \delta_{mik} \quad (4)$$

여기서 μ_{eff} 는 난류 점성 계수 μ_t 와 분자 점성 계수 μ 의 합으로 정의된 등방성의 유효 점성 계수를 나타낸다.

2.2 난류 모델

시간평균된 보존방정식에서 나타나는 레이놀즈 응력을 모델화하기 위하여 일반적으로 널리 사용되는 표준 k-ε 모델을 사용하였다.

▶ 난류 에너지 수송 방정식

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial x^j} [J \alpha_m^j (\rho u_m k - \frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x^n} \alpha_m^n)] = G - \rho \epsilon \quad (5)$$

▶ 난류 에너지 소멸을 방정식

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \epsilon) + \frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial x^j} [J \alpha_m^j (\rho u_m \epsilon - \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x^n} \alpha_m^n)] = C_1 \frac{\epsilon}{k} G - C_2 \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (6)$$

여기서 G 는 난류에너지 생성항이며 다음과 같이 나타낸다.

$$G = \mu_t \left[\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x^n} \alpha_j^n + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x^m} \alpha_i^m \right] \left[\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_n} \alpha_j^n \right] \quad (7)$$

또한 C_μ , C_1 , C_2 , σ_k , σ_ϵ 는 k-ε 난류

모델에서 사용되는 경험상수로 Table 1에 주어진다.

C_μ	C_1	C_2	σ_k	σ_ϵ
0.09	1.44	1.92	1.0	1.3

Table 1. Empirical constants of Standard k-ε model

2.3 벽함수

벽면 부근의 점성 저층의 효과를 벽면으로부터 첫 번째 계산점에 적용시켜 얻어진 이산화된 운동량 방정식은 다음과 같다.

$$(a_p + \lambda_w \delta A) = \sum a_m u_m + S_u \quad (8)$$

위의 식에서 m은 경계면을 제외한 나머지 계산점을 나타내며 전단 응력은 2층 모델을 사용하는 경우 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\lambda_w = \frac{\mu}{\delta n} \quad y_p^+ \leq 11.63 \quad (9)$$

$$\lambda_w = \frac{\rho_p C_\mu^{1/4} k_p^{1/2} x}{\ln(E y_p^+)} \quad y_p^+ \geq 11.63 \quad (10)$$

여기서

$$y_p^+ = \frac{\rho_p C_\mu^{1/4} k_p^{1/2} \delta n}{\mu} \quad (11)$$

난류에너지에 대한 경계조건으로 벽면에서 k=0이며, 난류에너지 소멸율에 대한 경계조건은 벽면으로부터 첫 번째 계산점에 적용하면 다음과 같다.

$$\epsilon_p = \frac{C_\mu^{3/4} k_p^{3/2}}{x \delta n} \quad (12)$$

3. 수치해석

3.1 지배방정식의 이산화

계산을 수행하기 위하여 비엇갈림(non-staggered) 격자계를 사용하여 모든 변수들을 단위체적의 중앙에 위치하도록 하였으며, 2장에 나타난 지배방정식들을 단위 체적에 대하여

적분하는 유한 체적법(finite volume method)을 이용하여 이산화하였다. 이 과정에서 확산항에 대하여는 중앙차분 도식(central differencing scheme)을, 대류항에 대하여는 중앙차분 도식과 상류 도식(upwind scheme)을 속도에 따라 적용시키는 혼합 도식(hybrid scheme)을 사용하였으며, 비정상항의 처리에서는 인접한 주변항에 대하여는 암시적 방법(implicit method)으로 처리하고 그 이외의 항에 대하여는 현시적 방법(explicit method)으로 처리함으로써 계산량 및 계산시간을 줄이도록 하였다.

최종적으로 이산화된 지배방정식은 다음과 같다.

$$a_p \phi_p = \sum_m a_m \phi_m + C_p \quad (13)$$

여기서 $a_p = \sum_m a_m + S_\phi''$ 이다.

위 형태의 방정식을 SIP(Stone's implicit procedure)행렬해법을 이용하여 전체 영역에 대하여 계산을 수행함으로써 유동장을 해석하였다.

3.2 난류수정(Turbulence correction) 이 보완된 PISO 알고리즘

3.2.1 PISO 알고리즘 - Original

PISO알고리즘은 Issa[4]에 의하여 창안된 방법으로 한 time step에서의 속도장과 압력장의 계산을 Operator-Splitting 방법을 이용하여 계산하여 time marching에 의하여 유동장 계산의 error를 줄여가는 방법이다.

▶ 표준 k-ε 모델의 적용

초기 Issa[4]의 논문에서 제안된 PISO알고리즘은 난류유동을 해석하기 위하여 난류에너지 수송 방정식과 난류에너지 소멸율 방정식에 다음과 같은 방법을 제시하였다.

• 난류에너지 수송방정식

$$\begin{aligned} & \left(\frac{\rho}{\delta t} - C_0 + \frac{\rho^2 C_\mu}{\mu^{n+1}} k^{n+1} \right) k^{n+1} \\ & = K'(k^{n+1}) + \mu^{n+1} g + \frac{\rho^n k^n}{\delta t} \end{aligned} \quad (14)$$

• 난류에너지 소멸을 방정식

$$\begin{aligned} & \left(\frac{\rho}{\delta t} - D_0 - C_2 C_\mu \frac{k^{n+1}}{\mu^{n+1}} \right) \varepsilon^{n+1} \\ & = L'(\varepsilon^{n+1}) + C_1 g C_\mu \rho k^{n+1} + \frac{\rho^n \varepsilon^n}{\delta t} \end{aligned} \quad (15)$$

여기서 K' , L' 는 각각 공간유속 - 중앙요소에서의 $C_2 k$, $D_0 \varepsilon$ 를 나타내는 연산자이다.

① predictor step

위의 난류수송방정식과 난류에너지소멸을방정식에 Operator Splitting방법을 적용하여 다음과 같은 식을 얻게되고 이를 유동장에 대하여 계산하여 predictor step에서의 k^* , ε^* 값을 계산해낸다.

• 난류에너지 수송방정식

$$\begin{aligned} & \left(\frac{\rho}{\delta t} - C_0 + \frac{\rho^2 C_\mu}{\mu^n} k^n \right) k^* \\ & = K'(k^*) + \mu^n g + \frac{\rho^n k^n}{\delta t} \end{aligned} \quad (16)$$

• 난류에너지 소멸을 방정식

$$\begin{aligned} & \left(\frac{\rho}{\delta t} - D_0 - C_2 C_\mu \frac{k^*}{\mu^n} \right) \varepsilon^* \\ & = L'(\varepsilon^*) + C_1 g C_\mu \rho k^* + \frac{\rho^n \varepsilon^n}{\delta t} \end{aligned} \quad (17)$$

위의 결과 얻어진 k^* , ε^* 값은 다음의 식을 통하여 μ^* 를 계산하는데 사용된다.

$$\mu^* = C_\mu \rho \frac{k^{*2}}{\varepsilon^*} \quad (18)$$

② corrector step

• 난류에너지 수송방정식

$$\begin{aligned} & \left(\frac{\rho}{\delta t} - C_0 + \frac{\rho^2 C_\mu}{\mu^*} k^* \right) k^{**} \\ & = K'(k^*) + \mu^* g + \frac{\rho^n k^n}{\delta t} \end{aligned} \quad (19)$$

• 난류에너지 소멸을 방정식

$$\begin{aligned} & \left(\frac{\rho}{\delta t} - D_0 - C_2 C_\mu \frac{k^{**}}{\mu^*} \right) \varepsilon^{**} \\ & = L'(\varepsilon^*) + C_1 g C_\mu \rho k^{**} + \frac{\rho^n \varepsilon^n}{\delta t} \end{aligned} \quad (20)$$

위의 식(19)과 (20)에서 식(16)와 식(17)를 빼줌으로써 다음의 corrector step에서의 산술식을 얻게된다.

• 난류에너지 수송방정식

$$\begin{aligned} k^{**} & = \left(\frac{\rho}{\delta t} - C_0 + \frac{\rho^2 C_\mu}{\mu^*} k^* \right)^{-1} \\ & \times \left[\left(\frac{\rho}{\delta t} - C_0 + \frac{\rho^2 C_\mu}{\mu^n} k^n \right) k^* + (\mu^* - \mu^n) g \right] \end{aligned} \quad (21)$$

• 난류에너지 소멸을 방정식

$$\begin{aligned} \varepsilon^{**} & = \left(\frac{\rho}{\delta t} - D_0 - C_2 C_\mu \frac{k^{**}}{\mu^*} \right)^{-1} \\ & \times \left[\left(\frac{\rho}{\delta t} - D_0 - C_2 C_\mu \frac{k^*}{\mu^*} \right) \varepsilon^* \right. \\ & \left. + C_1 g C_\mu \rho (k^{**} - k^*) \right] \end{aligned} \quad (22)$$

위의 결과 얻어진 k^{**} , ε^{**} 값은 다음의 식을 통하여 μ^{**} 를 계산하는데 사용된다.

$$\mu^{**} = C_\mu \rho \frac{k^{**2}}{\varepsilon^{**}} \quad (24)$$

이와 같은 과정을 거쳐서 얻어진 점성계수는 다음 시간단계의 속도장을 계산하는데 사용된다.

3.2.2 난류수정이 보완된 PISO 알고리즘

위의 Original PISO알고리즘에서 표준 $k-\varepsilon$ 모델의 적용과정을 보면 운동량방정식의 해석에 있

어서 2번의 correction을 거친 것과는 달리 1번의 correction만으로 난류에너지를 계산함을 알 수 있다. 이는 하나의 시간단계에서 수렴된 해를 얻고 다음 시간 단계로 이동하는 SIMPLE 알고리즘과 같은 반복계산을 사용할 때 문제가 없다. 그러나 시간에 따라 유동장의 오차를 줄여가는 time marching에 의한 PISO알고리즘에서는 $k-\epsilon$ 난류 모델에서 예측된 난류와점성계수 (turbulent eddy viscosity)가 다음 time step에 적용되어서, 속도벡터와 난류가 시간상 불일치 되어 유동장의 해석에 있어서 난류에너지의 값을 작게 예측하는 결과를 낳게 된다. 따라서 본 논문에서는 압력 1차 수정과 2차 수정 사이에 또 한번의 난류수정을 거침으로 전체적인 유동장의 발달에 보다 정확한 해석을 가능하도록 하였다.

• 난류에너지 수송방정식

$$\left(\frac{\rho}{\delta t} - C_0 + \frac{\rho^2 C_\mu}{\mu^{n+1}} k^{n+1}\right) k^{n+1} = K'(k^{n+1}) + \mu^{n+1} g + \frac{\rho^n k^n}{\delta t} \quad (24)$$

• 난류에너지 소멸율방정식

$$\left(\frac{\rho}{\delta t} - D_0 - C_2 C_\mu \frac{k^{n+1}}{\mu^{n+1}}\right) \epsilon^{n+1} = L'(\epsilon^{n+1}) + C_1 g C_{\mu\rho} k^{n+1} + \frac{\rho^n \epsilon^n}{\delta t} \quad (25)$$

① predictor step

앞서의 original PISO와 같은 방법으로 predictor step에서의 k^* , ϵ^* 값을 계산해준다.

• 난류에너지 수송방정식

$$\left(\frac{\rho}{\delta t} - C_0 + \frac{\rho^2 C_\mu}{\mu^n} k^n\right) k^* = K'(k^*) + \mu^n g + \frac{\rho^n k^n}{\delta t} \quad (26)$$

• 난류에너지 소멸율방정식

$$\left(\frac{\rho}{\delta t} - D_0 - C_2 C_\mu \frac{k^*}{\mu^n}\right) \epsilon^* = L'(\epsilon^*) + C_1 g C_{\mu\rho} k^* + \frac{\rho^n \epsilon^n}{\delta t} \quad (27)$$

위의 결과 얻어진 값은 다음의 식을 통하여 μ^* 를 계산하는데 사용하는 k^* , ϵ^* 된다.

$$\mu^* = C_{\mu\rho} \frac{k^{*2}}{\epsilon^*} \quad (28)$$

② corrector step

앞서의 original PISO와 같은 방법으로 predictor step에서의 k^{**} , ϵ^{**} 값을 계산해준다.

• 난류에너지 수송방정식

$$k^{**} = \left(\frac{\rho}{\delta t} - C_0 + \frac{\rho^2 C_\mu}{\mu^{*2}} k^*\right)^{-1} \times \left[\left(\frac{\rho}{\delta t} - C_0 + \frac{\rho^2 C_\mu}{\mu^n} k^n\right) k^* + (\mu^* - \mu^n) g\right] \quad (29)$$

• 난류에너지 소멸율방정식

$$\epsilon^{**} = \left(\frac{\rho}{\delta t} - D_0 - C_2 C_\mu \frac{k^{**}}{\mu^*}\right)^{-1} \times \left[\left(\frac{\rho}{\delta t} - D_0 - C_2 C_\mu \frac{k^*}{\mu^*}\right) \epsilon^* + C_1 g C_{\mu\rho} (k^{**} - k^*)\right] \quad (30)$$

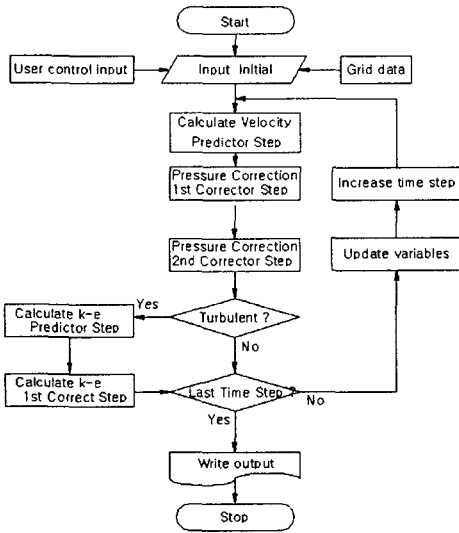
위의 결과 얻어진 k^{**} , ϵ^{**} 값은 다음의 식을 통하여 μ^{**} 를 계산하는데 사용된다.

$$\mu^{**} = C_{\mu\rho} \frac{k^{**2}}{\epsilon^{**}} \quad (31)$$

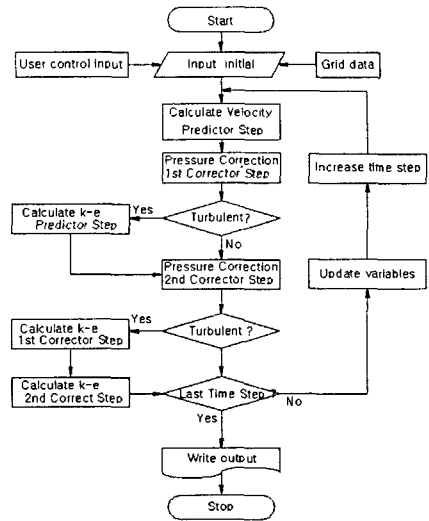
③ second corrector step

다음 단계로 또 한번의 향상된 난류에너지와 소멸율을 k^{***} , ϵ^{***} 으로 가정한다.

• second corrector step에서의 난류에너지 수송방정식



(a) Original PISO Algorithm



(b) Modified PISO Algorithm

Fig. 1 Flow Chart

$$\left(\frac{\rho}{\delta t} - C_0 + \frac{\rho^2 C_\mu}{\mu^{**}} k^{**}\right) k^{***} = K'(k^{**}) + \mu^{**} g + \frac{\rho^n k^n}{\delta t} \quad (32)$$

· second corrector step에서의 난류에너지 소멸을 방정식

$$\left(\frac{\rho}{\delta t} - D_0 - C_2 C_\mu \frac{k^{***}}{\mu^{**}}\right) \epsilon^{***} = L'(\epsilon^{***}) + C_1 g C_\mu \rho k^{***} + \frac{\rho^n \epsilon^n}{\delta t} \quad (33)$$

위의 결과 얻어진 k^{***} , ϵ^{***} 값은 다음 시간단계의 계산을 위하여 다음과 같이 μ^{***} 의 계산에 이용된다.

$$\mu^{***} = C_\mu \rho \frac{k^{***2}}{\epsilon^{***}} \quad (34)$$

계속적인 수정은 위의 second corrector step의 과정을 반복함으로써 가능하다. 이상의 알고리즘에 대한 흐름도를 Fig. 1에 나타내었다.

4. 계산영역 및 경계조건

정사각형의 실린더가 장입된 덕트의 형태를 Fig. 2에 나타내었다. 덕트의 높이(H)는 0.05 m이고 사각실린더 한 변의 길이는 0.01 m이며, 작동 유체는 물($\mu = 1.12 \times 10^{-3} \text{ N s/m}^2$, $\rho = 999 \text{ kg/m}^3$)을 사용하였다. 사각실린더의 표면과 덕트 상, 하 면은 점착 조건을 적용하여 벽 조건을 사용하였고, 입구에서의 속도는 균일한 속도를 가정하였다. 사각 실린더의 경우 진동이 발생하는 레이놀즈 수(Re_c)는 1000에서 3000사이로서 입구에서의 레이놀즈수가 사각 실린더 한 변의 길이 기준으로 3000이 되도록 입구 속도를 주었다. 입구에서의 난류강도는 입구속도를 기준으로 6%를 사용하였다.

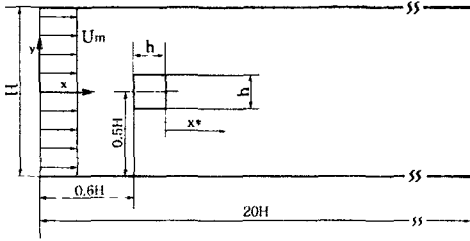


Fig. 2 Schematic diagram of square cylinder in the channel.

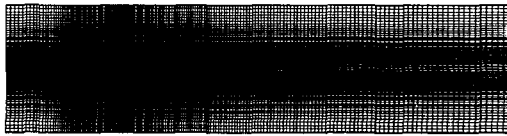


Fig. 3 Part of 250×80 grid

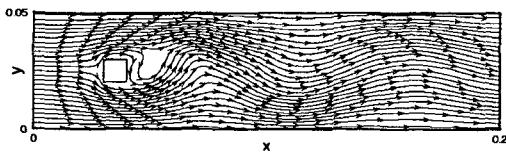


Fig. 4 Streamline

5. 결과 및 고찰

5.1 계산격자 및 격자독립성 시험

사각 실린더 주위의 유동의 수치해석에 사용된 격자의 일부를 Fig. 3에 나타내었다. 덕트내를 흐르는 사각 실린더 주위의 유동은 실린더의 상, 하 면에서 형성되는 경계층이 유동장의 형성에 큰 영향을 미치므로 사각 실린더의 벽주위를 조밀하게 격자를 구성하였다. 격자의 독립성을 시험하기 위하여 150×40, 250×80, 400×100의 격자를 구성하여 수치해석을 수행하였다. 각각 격자에 대하여 시간평균된 항력계수 ($\overline{C_D}$) 값은 2.008, 2.472, 2.502로 250×80, 400×100에서의 항력계수의 변화가 미미하므로 계산에 250×80의 격자를 사용하였다.

사각 실린더 주위의 유동은 규칙적인 oscillation

을 보이는 유동으로 시간간격 또한 계산에 중요한 변수가 된다. 따라서 시간간격을 0.1초, 0.05초, 0.02초, 0.01초로 계산을 수행하고 유동의 형태를 관찰한 결과 시간간격을 0.01초로 할 경우 규칙적인 oscillation이 발생하여 이를 시간 간격으로 사용하였다. 총 계산 시간은 유동장이 안정되었다고 가정된 35초까지 계산하였으며 수정된 PISO 알고리즘을 이용할 경우 수치해석에 사용된 계산시간은 Pentium-III 667 MHz, 256 Mbyte인 시스템으로 약 8시간의 CPU시간이 소요되었으며 Original PISO의 경우 약 6시간 30분의 CPU시간이 소요되었다.

5.2 사각실린더 주위의 유동해석

항력계수의 변화를 관찰한 후 완전히 안정되었다고 볼 수 있는 30초 이후의 사각 실린더 주위의 유동을 Fig. 4에 유선을 이용하여 시간에 따라 가시적으로 나타내었다. 유동 상류에서 흘러오는 유체는 사각실린더 전면을 만남에 따라 실린더의 전면 모서리부분에서 후류를 형성하고 이때 형성된 vortex가 실린더 후미에서 서로 교차하여 규칙적인 진동을 보이는 것을 알 수 있다.

사각 실린더 주위의 유동의 경우, 유동이 주기적으로 안정된 후 계산되는 시간평균된 물성치들은 수치해석기법이나 난류모델의 정확도를 결정하는 중요한 인자가 된다. 이러한 유동에 있어서 중요한 무차원수로는 레이놀즈수(Reynolds Number)와 스트로울수(Strouhal Number)를 들 수 있다. 유동의 평균속도에 대한 진동수의 비를 나타내는 스트로울 수는 다음의 식을 통하여 계산된다.

$$St = \frac{f h}{U_m} \quad (35)$$

이때 f는 진동수를 h는 사각 실린더의 높이를 나타내며 U_m 은 평균속도를 나타낸다. 유동이 안정된 30초 이후에 나타난 스트로울수를 비교해보면 Original-PISO의 경우 약 0.085의 값을 나타냈으며 난류 수정을 보완한 PISO의 경우 약 0.083의 값을 나타내었다. 두 가지 경우 서로 근소한 차이를 보이는 반면 실험과 비교하여 약 0.13의 차이를 나타내어 두 가지 경우에 모두 약 35%의 오

차를 보였다. 이는 유동의 주기를 정확히 예측하지 못한 결과로 생각된다.

Figure 5는 유동이 모두 안정되었다고 생각할 수 있는 30초 후에 나타난 덕트의 중앙선상에서 계산된 유동방향 속도의 시간평균된 값을 보여준다. 사각 실린더의 바로 후면에서부터 다시 유동방향 속도(U/U_m)가 0이 되는 지점을 관측해보면 난류 수정을 보완한 PISO 알고리즘을 사용하는 경우가 Original PISO 알고리즘을 사용하는 경우보다 더 잘 예측함을 알 수 있다. 이는 난류 수정을 보완한 PISO 알고리즘이 실제와 더 가까운 난류에너지값을 예측함으로써 유동의 주기적인 연동을 더 강하게 예측하였기 때문이라고 볼 수 있다. Saha 등[6]이 언급한 바와 같이 유동의 주기적인 연동은 순간적인 속도와 시간평균된 속도사이의 운동량의 전달을 더욱 용이하게 하며, 따라서 실제에 가까운(더 큰) 난류에너지는 시간평균된 속도의 회복에 더 많은 기여를 한다고 생각할 수 있다. 이와 같은 결과는 Fig. 6에서도 확인할 수 있다.

Figure 6는 x^*/h 가 2.0인 지점에서의 시간평균된 유동방향속도를 비교한 것이다. y/h 가 0에 가까운 중앙선 부근에서의 유동방향속도를 살펴보면 수정된 PISO의 경우 유동방향 속도의 회복이 더 크고 실험 결과와 더 가까움을 알 수 있다.

Figure 7에서는 난류 수정을 보완한 PISO 알고리즘의 난류에너지 계산에 또 한번의 corrector 과정을 적용하여 수치해석을 수행한 후 이를 난류 수정을 보완한 PISO 알고리즘 및 Original PISO알고리즘의 결과와 비교하였다. x 축은 유동방향의 거리를 나타내며 y 축은 덕트의 중심선상에서 발생하는 난류에너지의 시간평균값을 나타낸다. 이 결과에서 알 수 있듯이 한 번의 corrector 과정을 거치는 Original PISO 알고리즘과 두 번의 corrector 과정을 거치는 수정된 PISO 알고리즘사이에는 난류에너지의 예측에 있어 많은 차이를 보이지만 그 이상의 수정은 불필요함을 알 수 있다. 또한 앞서의 Fig. 6에서 예측한 대로 2번의 correction을 수행한 결과 난류에너지의 최고값이 1번의 correction을 수행했을 때보다 더 크게 나타남을 알 수 있다.

6. 결 론

비정상 난류유동의 수치해석에 있어서 수정된 PISO알고리즘을 이용하여 사각실린더 주위의 2차원 유동을 해석하고 이를 Nakagawa 등[5]의 실험결과와 비교하였다. 본 연구를 통하여 얻을 수 있는 결론은 다음과 같다.

- [1] 비정상 유동의 해석을 위하여 개발된 PISO 알고리즘을 이용하여 사각 실린더 주위의 난류유동을 해석할 경우 난류에너지의 계산

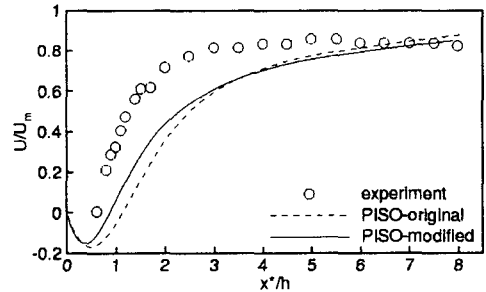


Fig. 5 Time averaged streamwise velocity at the center line (2-D case)

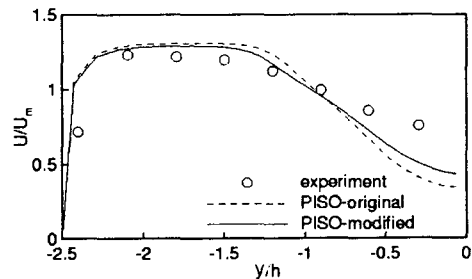


Fig. 6 Time averaged streamwise velocity at $x^*/h = 2.0$ (2-D case)

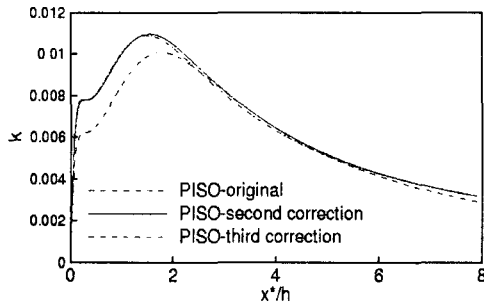


Fig. 7 Time averaged turbulent kinetic energy at the center line (2-D case)

에 있어서 1번의 수정단계를 거치는 것보다 2번의 수정단계를 거치는 것이 좀더 실험에 가까운 시간평균속도값을 예측함으로써 보다 정확한 유동장의 해석을 가능하게 한다.

- [2] 유동이 안정된 30초 이후에 나타난 스트롤수를 비교해보면 두가지 경우에 실험과 비교하여 약 35%의 오차를 보이고있다.

후 기

본 연구는 한국에너지관리공단 학술진흥사업의 지원으로 수행되었으며, 관계제위께 감사드립니다.

참고문헌

- [1] Patankar S.V., *Numerical heat transfer and fluid flow*, McGraw-Hill, Washington D.C., (1980)
- [2] Kim J. and Moin P. "Application of a fractional step method in incompressible Navier-Stokes equations", *J. Comp. Phys.*, Vol 59, pp. 308-323, 1985.
- [3] Choi H. and Moin P., "Effects of the computational time step on numerical solution of turbulent flow", *J. Comp. Phys*, vol 113, pp. 1-4, 1994.
- [4] Issa R.I., "Solution of the Implicitly Discretised fluid Flow Equations by Operator-Splitting", *J. Computational Physics*, Vol. 62, pp. 40-65, 1985.
- [5] Nakagawa S., Nitta K. and Senda M., "An experimental study on unsteady turbulent near wake of a rectangular cylinder in the channel flow", *Experiments in Fluids*, vol. 27, pp. 284-294, 1999.
- [6] Saha A.K., Biswas G. and Muralidhar K., "Numerical study of the turbulent unsteady wake behind partially Enclosed square cylinder using RANS" *Compt. Methods Appl. Mech. Engrg*, Vol. 178, pp. 323-341, 1999.