

회리통기체흐름의 수치모의에서 란류모형리용에 대한 연구

김철선, 장학철

본문에서는 인민경제 여러 분야에서 널리 리용되고있는 회리통흐름의 수치모의에서 란류모형설정에 관한 문제를 해결하였다.

회리통은 기체속에서 고체알갱이 혹은 액체립자를 분리하기 위하여 원심력을 리용하는 장치로서 효율적이고 력사가 비교적 오랜 제진기들중의 하나이다.[1] 회리통은 실천에서 광범히 리용되고있으나 그 성능을 평가하는 리론적인 방법은 아직 완성되지 못하고 연구가 심화되고있으며 특히 강한 란류회전흐름특성으로 하여 회리통에서는 란류모의를 다른 대상에서보다 심중하게 할것이 권고되고있다.[1, 2]

선행연구[1, 2]에서는 회리통에서의 란류계산에서 RSM모형이 많이 리용되었으며 $k-\varepsilon$ 모형보다 실험값에 더 잘 근사한다는것을 밝혔다.

여기서는 회리통의 수치모의에서 대표적인 란류모형들인 RNG $k-\varepsilon$ 모형, RSM모형과 LES모형들을 리용한 계산결과들과 선행실험결과[3]와의 비교분석을 진행하였다.

1. 수학적모형화

회리통에서 기체흐름이 란류인 경우에 그것을 수학적으로 표현하는 레널즈평균화된 방정식은 다음과 같다.[1]

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (2)$$

여기서 $p(x, t)$ 는 압력, $\tau_{ij}(x, t)$ 는 점성응력, $\rho(x, t)$ 는 류체밀도이다.

란류모형들에는 여러가지가 있는데 대표적인 모형들은 다음과 같다.[1]

RNG $k-\varepsilon$ 모형의 수송방정식은

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S_\varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b + S_\varepsilon \quad (4)$$

이다. 여기서

$$C_1 = \max \left[0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right], \quad \eta = S \frac{k}{\varepsilon}, \quad S = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}} \quad (5)$$

G_k 는 평균속도그라디언트로 인한 란류운동에너르기생성항이며 G_b 는 부력에 의한 란류운동에너르기생성항이다.

RSM모형의 정확한 수송방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
\frac{\partial}{\partial t}(\rho \overline{u'_i u'_j}) + \frac{\partial}{\partial x_k}(\rho u'_k \overline{u'_i u'_j}) = & -\frac{\partial}{\partial x_k}[\rho \overline{u'_i u'_j u'_k} + p(\delta_{kj} \overline{u'_i} + \delta_{ik} \overline{u'_j})] + \\
& + \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\mu \frac{\partial}{\partial x_k}(\overline{u'_i u'_j}) \right] - \rho \left(\overline{u'_i u'_k} \frac{\partial u_j}{\partial x_k} + \overline{u'_j u'_k} \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \right) - \rho \beta (g_i \overline{u'_j \theta} + g_j \overline{u'_i \theta}) + \\
& + p \left(\frac{\partial u'_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u'_j}{\partial x_i} \right) - 2\mu \frac{\partial u'_i}{\partial x_k} \frac{\partial u'_j}{\partial x_k} - 2\rho \Omega_k (\overline{u'_j u'_m} e_{ikm} + \overline{u'_i u'_m} e_{jkm}) + S_{user}
\end{aligned} \quad (6)$$

LES모형을 리용한 나비에-스톡스방정식은

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \bar{u}_i) = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \bar{u}_i \bar{u}_j) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\mu \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (8)$$

이다. 여기서 σ_{ij} 는 아래와 같이 정의된 분자점성에 의한 응력텐소르이다.

$$\sigma_{ij} \equiv \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} \delta_{ij} \quad (9)$$

또한 τ_{ij} 는 다음과 같이 정의된 SGS응력이다.

$$\tau_{ij} \equiv \overline{\rho u_i u_j} - \rho \bar{u}_i \bar{u}_j \quad (10)$$

2. 수치모의대상과 방법

여기서는 선행연구[3]에서 보여준 회리통에 대하여 수치모의를 진행하였다. 수치모의에서 리용한 회리통의 기하학적치수는 다음과 같다.(그림 1)

입구에서 체적흐름속도는 $0.08\text{m}^3/\text{s}$ 이며 계산모형에서 점선방향으로 들어오는 입구속도는 20m/s 이다. 밀도는 $1.225\text{kg}/\text{m}^3$, 점성은 $1.789 \times 10^{-5}\text{kgm}^{-1}$, 입구레널즈수는 $10^4 \sim 10^5$ 이다. 또한 입구란류도는 5%이며 란류특성길이는 입구너비의 0.07배이다.[4] 그리고 회리통에서 평균머무름시간은 0.25s이다.

근사풀이에서는 SIMPLEC도식, PRESTO압력보간방법을 선택하였다. RSM모형에서는 운동량모멘트와 란류운동에너지, 란류분산비, 레널즈응력의 리산화에서 QUICK리산화도식을 선택하였다. LES모의에서는 중심계차도식을 리용하였다.

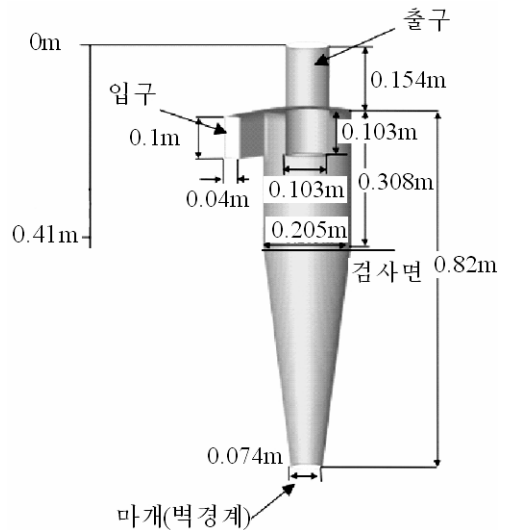


그림 1. 수치모의에서 리용된 회리통의 기하학적치수

3. 계산결과 및 분석

RSM과 RNG $k-\varepsilon$, LES모형을 리용하여 모의를 진행하고 필요한 위치에서 계산된

접선속도와 축방향속도값들과 실험값[3]과의 비교를 진행하였다.

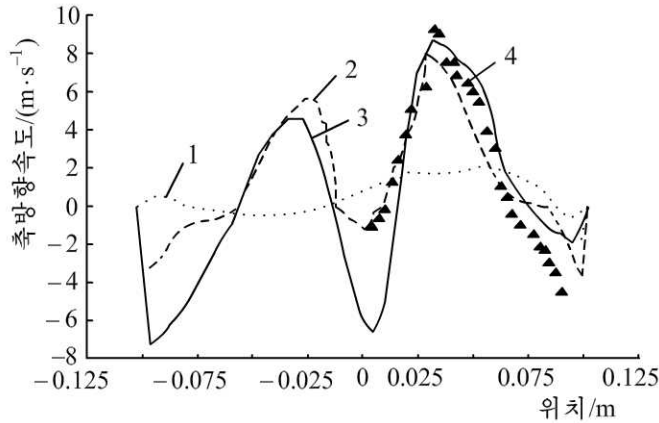


그림 2. 축방향속도곡선

1-RNG $k-\varepsilon$ 모형, 2-RSM모형, 3-LES모형, 4-실험값[3]

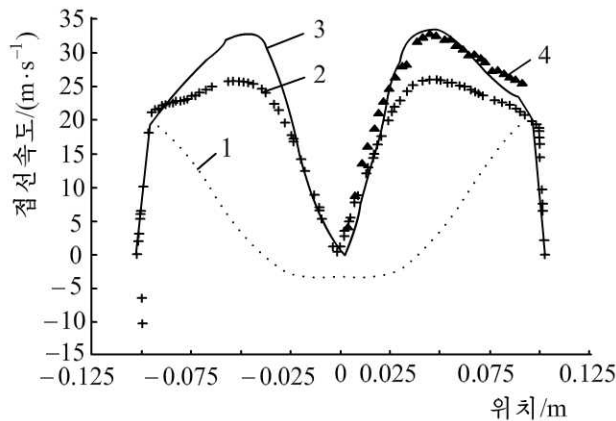


그림 3. 접선속도곡선

1-RNG $k-\varepsilon$ 모형, 2-RSM모형, 3-LES모형, 4-실험값[3]

실험값과 비교된 출구관윗부분으로부터 아래쪽으로 0.41m위치에서의 축방향속도와 접선속도곡선들을 그림 2, 3에서 보여주었다.

회리통은 한쪽에 접선속도입구를 가지고있는것으로 하여 그 내부에서 접선속도곡선은 비대칭특성을 가지고있으며 최대접선속도는 공기출구관직경이 감소할 때 점근적으로 입구속도의 1.589배로 수렴한다.[1]

속도곡선들을 통해 알수 있는것처럼 LES모형이 RSM모형과 함께 $k-\varepsilon$ 모형보다 훨씬 더 우월하게 회리통내부에서의 접선속도곡선에 대한 이론을 만족시키면서 실험값과 작은 오차를 가지고 일치한다는것을 알수 있다.(표 1, 2)

표 1. 실험값과 매 란류모형의 모의값사이 접선속도오차

오차 \ 란류모형	LES	RSM	RNG $k-\varepsilon$
평균오차/%	3.995	17.7	50%이상
최대접선속도오차	4.6	20.4	50%이상

표 2. 실험값과 매 난류모형의 모의값사이 축방향속도오차

오차 \ 난류모형	LES	RSM	RNG $k-\varepsilon$
평균오차/%	4.7	6.146	38.88
최대축방향속도오차	21.43	14.52	50%이상

맺 는 말

회리통에서 기체흐름을 모의하는데서 난류모형들이 속도분포계산결과에 어떤 영향을 주는가를 조사하였다. 연구결과에 따르면 지금까지 발표된 난류모형들중에서 회리통에서 강하게 회전하는 난류흐름을 객관적으로 모의하는데 적합한 난류모형은 LES모형이다.

RNG $k-\varepsilon$ 모형을 리용하는 경우에 계산된 속도분포값들은 오차가 매우 크며 RSM 모형인 경우에는 그에 비해볼 때 오차는 작지만 무시할수는 없다.

연구결과는 회리통에서와 같이 강한 난류회전흐름이 진행되는 경우에는 난류모형을 심중하게 선정하여야 하며 LES모형을 리용하면 회리통에서 속도값들을 구할 때 실험값과의 오차를 최소로 되게 할수 있다는것을 보여준다.

참 고 문 헌

- [1] Chris Lacor; Analysis and Optimization of Cyclone Separators Geometry Using RANS and LES Methodologies, Uitgeverij University Press, 31~55, 2011.
- [2] Mehdi Azadi et al.; Journal of Hazardous Materials, 182, 835, 2010.
- [3] Michael Slack; Cyclonic Separator, Sheffield Airport Business Park, 12~16, 2002.
- [4] A. J. Hoekstra; Gas Flow Field and Collection Efficiency of Cyclone Separators. PhD Thesis, Technical University Delft, 79~81, 2000.

주제108(2019)년 12월 15일 원고접수

Turbulence Models for the Numerical Simulation of Cyclone Gas Flow

Kim Chol Son, Jang Hak Chol

In the paper, we investigate the effect of turbulence model on the result of a velocity distribution via the numerical simulation of cyclone gas flow. The result show that LES model is the suitable turbulence model that can estimate the velocity distribution of cyclone

Keywords: cyclone, RSM, LES, turbulence model