

배열회수 안내덕트 내부의 난류유동 수치시뮬레이션 곽승현†

(원고접수일 : 2011년 6월 13일, 원고수정일 : 2011년 7월 6일, 심사완료일 : 2011년 9월 5일)

Numerical Simulation of Turbulent Flows in Inlet Duct of Heat Recovery Steam Generator

Seung-Hyun Kwag†

요약 : 배열회수시스템 입구덕트의 3차원 난류유동을 수치시뮬레이션 하였다. 본 연구는 덕트의 루프 각을 부분적으로 수정하여 유동의 형상효과를 해석하는 것이 목표이다. 비구조 격자를 가지고 나비에 스톡스 방정식을 유한체적법으로 풀어 유체동력학적인 현상을 규명하였다. 유적선, 속도벡터, 동압, 잔차 등으로 수렴 등을 조사하였다. 난류모형은 k-epsilon, k-omega, reynolds stress 및 RNG k-epsilon 이다. 선회 및 비선회 조건을 2개의 덕트에 적용하였고 계산결과를 활용하여 최적형상설계를 검토하였다.

주제어 : 난류유동, 입구덕트, 유한체적법, 나비에스톡스, 배열회수시스템

Abstract: Turbulent flows are numerically simulated in the three dimensional inlet duct for heat recovery steam generator. The present study is aimed to analyze the effect of a variation in turbulent flow pattern by the change of roof angle in the transition duct. The finite volume based Navier-Stokes equations with unstructured grids are solved to make clear the flow dynamic phenomena. Reviews are made on with the data of path lines, velocity vectors, dynamic pressure, residuals for numerical convergence and so on. The k-epsilon, k-omega, Reynolds stress and RNG k-epsilon are used for generation of turbulence. Two types of roof angle are applied with and without the swirl in the duct. Turbulent flow patterns could be investigated for the optimum duct design based on the computational results.

Key words: Turbulent flows, Transition duct, Finite volume method, Navier-Stokes, Heat recovery system

1. 서 론

복합화력 발전설비 보일러의 배열회수 입구덕트 형상설계는 배기가스 조건이 고온이고 가스량이 대용량화됨에 따라 최적의 경제적 형상이 요구되어지고 있다. 운전방식에 있어서도 심야운전을 채택함에 따라 급격한 부하변동이 피로수명에 영향을 미치므로 응력집중을 최소화 할 수 있는 구조와 피로하중에 견딜 수 있는 재료의 선택 등 형상설계가 매우 중요한 시점이다. 열팽창에 의한 피로 및 응력발생을 최소화하기 위하여 보일러에 유입되는 고온의 배기가스가 튜브면적에 전체적으로

균등하게 응력을 미쳐야 하는데 이런 관점을 고려하여 본 연구에서는 2종류 덕트에 대한 난류유동 특성을 고찰하고자 한다. 배열회수 보일러 입구 덕트 내부 유동의 경우 선회가 심하며 유속의 편차가 크므로 유동에 난류모형을 삽입하였다. 수치실험을 위하여 k-epsilon, k-omega, Reynolds stress, RNG k-epsilon 모형을 적용하였다. 난류모형의 특성변화를 연구한 전례는 [1-3] 등으로 이들은 CFD를 이용하여 수치실험을 수행하여 실험값과 비교하였고, [4-5] 등은 선회를 동반한 수치연구를 수행하였다. [6]은 조연장치를 부착하여 입구덕트의 특

† 교신저자(한라대학교 공과대학 컴퓨터응용설계학과, E-mail: shkwag@halla.ac.kr, Tel: 033-760-1233)

성연구를 수행하여 유동해석 및 선회 효과를 연구하였다. 종전 연구 사례에 의하면 유속의 편차가 크며 선회가 심한 유동을 k-epsilon, k-omega, RNG k-epsilon 및 Reynolds stress 모형을 가지고 수치 실험을 하였으며 그 중에서 RNG k-epsilon이 모형 실험과 가장 유사한 결과를 보여준 것으로 알려져 있다. 가스터빈 출구의 온도가 상승함에 따라 보일러 배열회수 증기 발생조건이 복잡해지고 증기압력 및 덕트 내의 온도도 높아지고 있다. 이러한 고온의 가스터빈과 배열회수 보일러를 연결하는 입구덕트의 설계조건도 점차 복잡해지고 있다. 입구덕트 내부의 유동장 특성인 선회현상은 유체동력학적인 현상으로 가스터빈의 부하에 따라 강도 및 선회각도가 변화하는 등 설계조건이 매우 복잡하여 현장에서의 어려움이 가중되고 있는 실정이다.

2. 수치시물레이션

2.1 기본방정식과 수치조건

기본방정식은 Navier-Stokes 방정식이며 유한체적의 수치기법으로 이산화하여 계산을 수행하였다[7].

k-epsilon 방정식은 아래와 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (2)$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (3)$$

k-omega 방정식은 아래와 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - Y_k + S_k \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + S_\omega \quad (5)$$

$$\Gamma_k = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}, \quad \Gamma_\omega = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega}, \quad \mu_t = \alpha^* \frac{\rho k}{\omega} \quad (6)$$

$$\alpha^* = \alpha_\infty \cdot \left(\frac{\alpha_0^* + Re_t / R_k}{1 + Re_t / R_k} \right) \quad (7)$$

Reynolds stress 방정식은 아래와 같다.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho \overline{u'_i u'_j}) + \frac{\partial}{\partial x_k}(\rho u_k \overline{u'_i u'_j}) = \\ & -\rho \left(\overline{u'_i u'_k} \frac{\partial u_j}{\partial x_k} + \overline{u'_j u'_k} \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \right) - \rho \beta (g_i \overline{u'_j \theta} + g_j \overline{u'_i \theta}) \\ & + \rho \left(\frac{\partial u'_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u'_j}{\partial x_i} \right) - 2\mu \frac{\partial u'_i}{\partial x_k} \frac{\partial u'_j}{\partial x_k} \\ & - 2\rho \Omega_k (\overline{u'_j u'_m \epsilon_{ikm}} + \overline{u'_i u'_m \epsilon_{jkm}}) \end{aligned} \quad (8)$$

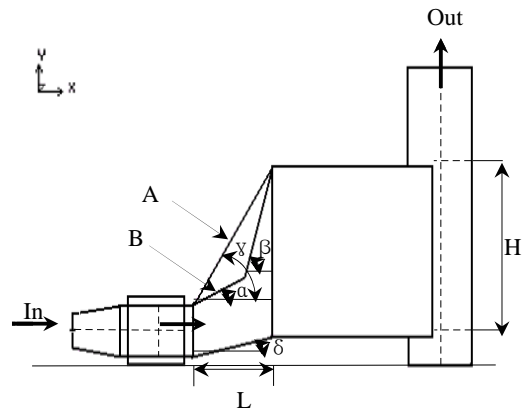


Figure 1: General view of A & B-type

2.2 덕트형상, 격자생성, 경계조건

덕트형상은 단일루프각을 가진 형상과 2중루프각을 가진 형상으로 나누어 설계하였다. 덕트바닥은 12°, 윗부분의 단일형상은 55.6°, 2중루프는 30°, 70°로 설계하였다. 모형에서의 유동흐름은 12,233 Kg/hr, 레이놀드수는 5.83x10⁵이다. 덕트길이는 L=10,906mm, 입구면은 6,096x6,096mm, 출구면은 20,068x9,052 mm 이다. 격자는 비구조 사면체 형상으로 격자수는 225,364, 노드수는 42,682 이다. 경계조건은 입구면, 출구면, 벽에 각각 속도, 압력 조건을 부여하였고 공간내부에는 연속체 조건을 주었다. 입구면에는 단위속도인 1m/sec, 출구면에는 제로구배 압력조건을 적용하였다. Figure 1은 측면도로서 덕트의 루프형상을 보여준다. 밑면과의 경사각, A 및 B 루프 형상에 대한 각인 각도 및 형상을 보여주고 있다. Figure 2는 물체내부의 격자 및 경계면을 보여준다.

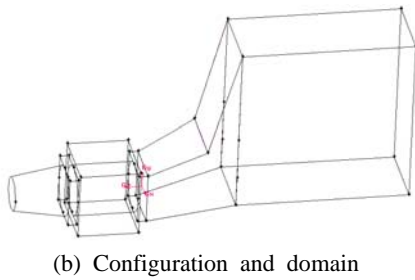
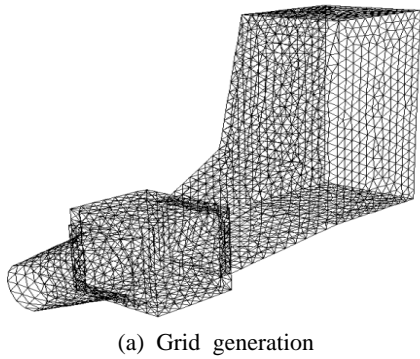


Figure 2: Grid and configuration

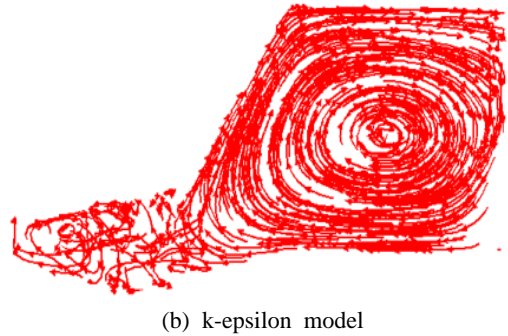
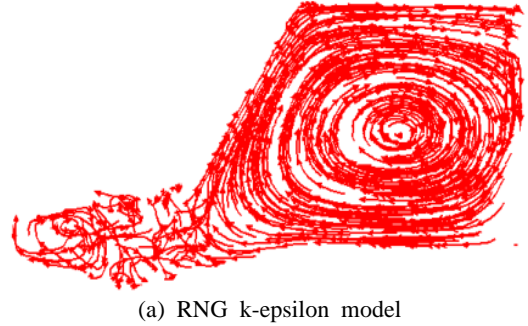


Figure 3: Pathlines, A-type

3. 수치해석 및 토의

3.1 수치해석

유동장 수치해석은 상용코드인 FLUENT 6.3버전을 사용하였으며 방정식 계산에는 속도와 압력을 커플링하여 수렴이 될 때까지 반복하였다. 속도와 압력의 coupling은 SIMPLE해법을, 이산화는 1차 upwind scheme을 기본으로 하였다. 수치실험은 연속방정식 및 각 방향 속도의 값을 계산하고 초기 값과 오차의 범위를 제한함으로써 수렴과정을 확인하였다.

3.2 수치해석결과

Figure 3은 선회강도 0.18을 준 상태에서 단일루프각을 갖는 A형상의 유선(pathline)을 보여주고 있는데 RNG k-epsilon, k-epsilon, 두 경우를 볼 수 있다. RNG k-epsilon의 경우가 선회 유동에 대하여 효과가 있는 것으로 나타나고 있다.

경계조건은 덕트 입구에서 일정한 속도를 부여하고 동시에 선회(swirl) 조건을 적용하여 얻은 값이다. RNG k-epsilon의 경우 수치 결과를 보면 전체적인 유동형태에서 가장 유사하게 예측하고 있다.

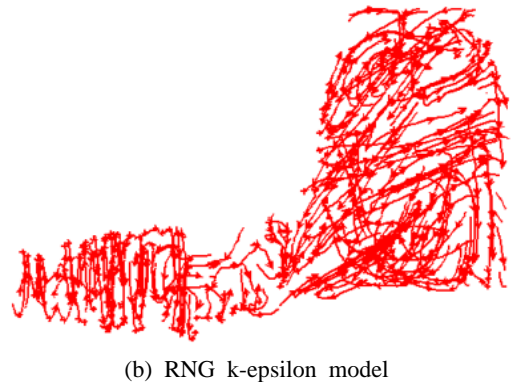
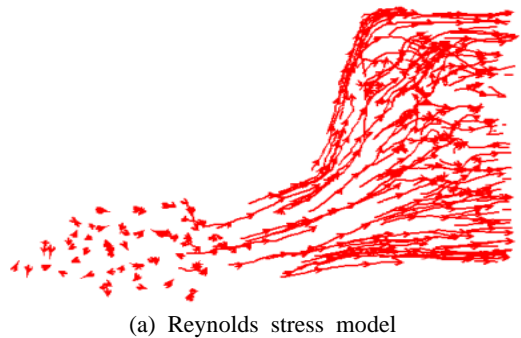


Figure 4: Path line for Type B

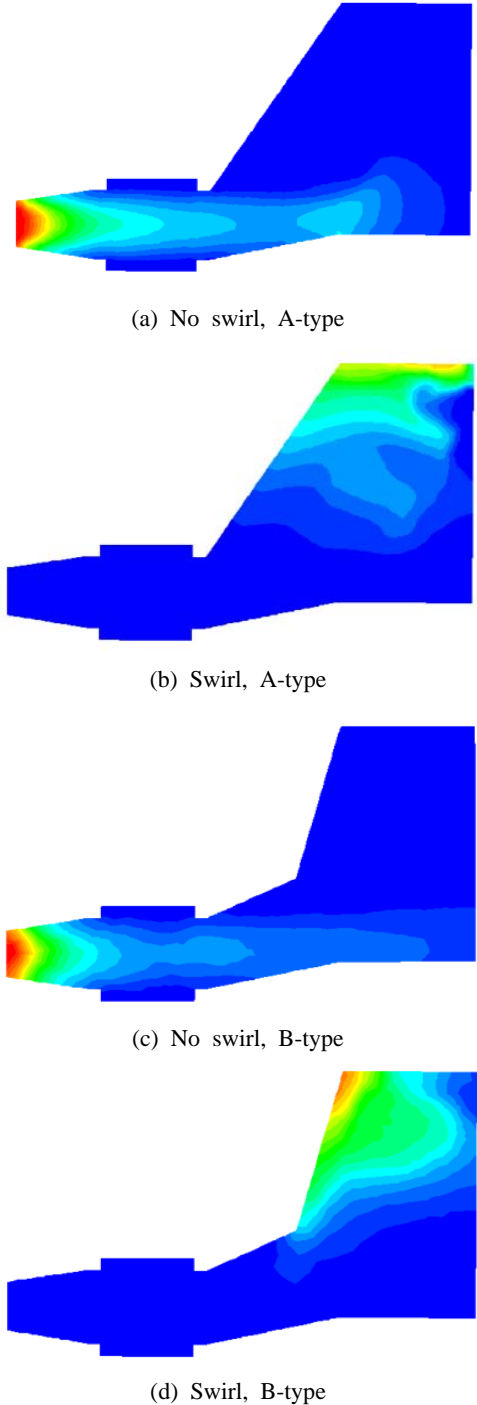


Figure 5: Dynamic pressure, RNG k-e.

Figure 4는 2중 루프각을 갖는 B형상의 유선을 보여준다. Reynolds stress 모형과 RNG k-epsilon

모형을 비교한 것이다. A형상과 비교했을 때 B형상의 경우는 덕트 내부의 선회 반경이 작음을 알 수 있다. 고온 고속의 유동 선회가 일어나기 때문에 속도 및 속도변화폭이 적게 나타나며 내부의 압력 강하도 적음을 알 수 있다.

Figure 5는 RNG k-epsilon 모형의 동압(dynamic pressure)을 보여주고 있다. 선회(swirl)가 없는 경우와 있는 경우를 모두 수치 재연하였다. 선회가 있는 경우는 출구면 근처에서 압력이 강하게 나타나고 있으며, 선회가 없는 경우는 입구면 근처에서 압력상승을 보여준다. 단일루프의 경우는 상부면의 압력구배가 높게 나타나고 2중루프인 경우는 출구 전면부의 구배가 높은 것을 알 수 있다.

Figure 6은 k-omega 모형을 사용하여 선회가 있는 유동의 유선을 계산하였다. A 및 B의 경우를 비교하였는데 B의 경우가 선회효과가 큰 것으로 보여주고 있다.

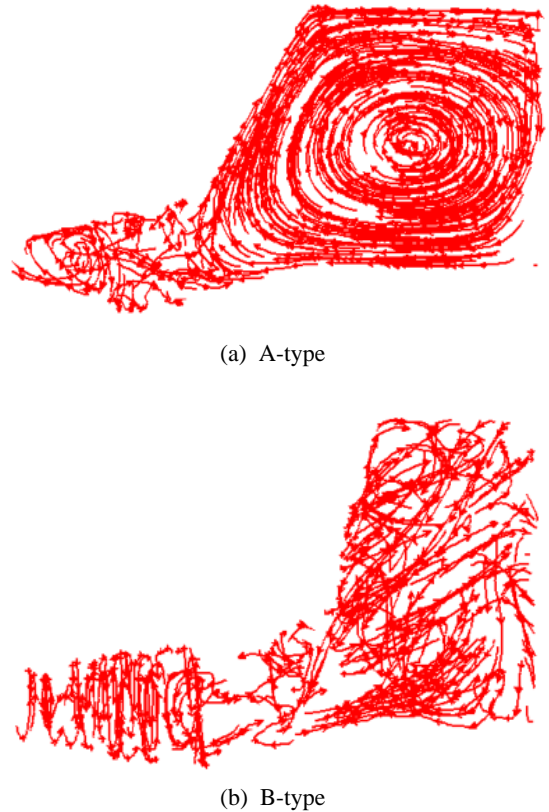


Figure 6: Pathline, k-omega model, swirl

Figure 7은 해석 결과와 실험값을 정량적으로 비교한 것이다. RNG k-epsilon의 수치결과가 실험값에 가장 근접함을 알 수 있다. 이는 선회가 강한 유동의 경우, 표준 k-epsilon, k-omega 및 Reynolds stress보다 RNG k-epsilon이 유효함을 확인하여 준다.

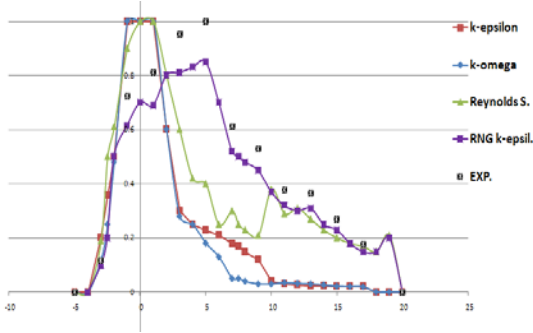


Figure 7: Comparison of velocities between experiment and calculations

4. 결 론

수치해석을 통하여 배열회수 입구덕트 형상에 대하여 유동을 예측하였다. 선회가 있는 경우와 없는 경우에 대하여 k-epsilon, k-omega, Reynolds stress 및 RNG k-epsilon 난류모형을 적용하여 수치 해석을 수행하였다. 2중 루프각을 갖는 형상의 유동을 분석한 결과 단일루프각을 갖는 경우와 비교할 때 덕트내부의 선회반경이 작음을 알 수 있었다. 유동선회는 속도 및 속도변화폭에 강하게 영향을 미치며, 유동선회가 심할수록 내부 압력 강하가 발생함을 알 수 있었다. 선회가 있는 경우는 출구면 근처에서 압력이 강하게 나타나고 있으며, 선회가 없는 경우는 입구면 근처에서 압력상승을 보여주었다. 단일루프의 경우는 상부면의 압력구배가 높게 나오고 2중루프인 경우는 출구전면부가 구배가 높은 것을 알 수 있었다. 정량적으로 비교한 결과 RNG k-epsilon 모형의 수치결과가 실험값에 가장 근접함을 알 수 있었다. 즉, 선회가 강한 유동의 경우 표준형 k-epsilon, k-omega, Reynolds stress보다 RNG k-epsilon이 적합함을 알 수 있었다. 잔차 결과에 의하면 모든 난류해석에서 수렴을 확인할 수 있었다.

참고문헌

- [1] B. Lindgren, O. Tornblom and A. V. Johansson, "Measurements in a plane asymmetric diffuser with 8.5 opening angle, Part II, comparison with model prediction for turbulence characteristics," Royal Inst. of Technology, Sweden
- [2] C. U. Buice and J. K. Eaton, "Experimental investigation of flow through an asymmetric plane diffuser", Journal of Fluids Engineering, vol. 122, pp. 433-435, 2000.
- [3] S. Obi and K. Masuda, "Experimental and computational study of turbulent separating flow in an asymmetric plane diffuser," The 9th Symp. on Turbulent Shear Flows, Kyoto, Japan, pp. 305.1-305.4, 1993.
- [4] C. Hah, "Particle Wake Effects on the Drag Force of an Interactive Particle," Int'l. Journal Multiphase Flow, vol. 20, pp. 117-129, 1994.
- [5] M. A. Habib and J. H. Whitelaw, "The Calculation of various diffuser flows with inlet swirl and inlet distortion effects," AIAA Journal vol. 21 no. 8, pp. 1127 -1133, 1983.
- [6] B. E. Lee, S. B. Kwon and C. S. Lee, "On the effect of swirl flow of gas turbine exhaust gas in an inlet duct of heat recovery steam generator", ASME vol. 124, no. 3, pp. 496-502, 2002.
- [7] J. H. Ferziger and M. Peric, "Computational Methods for Fluid Dynamics," Springer, 1997.

저 자 소 개



곽승현(郭承鉉)

1953년 7월 4일. 1979년 서울대학교 조선공학과 졸업(공학사). 1985 Univ. of Michigan 조선해양공학 (공학석사), 1991 Hiroshima Univ. 조선해양공학 (공학박사), 1980-1995 현대중공업 근무. 1995-현재 한라대학교 공과대학 컴퓨터응용설계학과 교수