

45° 원형충돌분류의 난류혼합유동장에 대한 수치해석 Numerical Analysis on the Turbulent Mixing Flow Field of 45° Impinging Round Jet

김 장 권 · 오 석 형
J. K. Kim and S. H. Oh

(접수일 : 2010년 12월 05일, 수정일 : 2011년 04월 13일, 채택일 : 2011년 05월 03일)

Key Words : Computational Flow Numerical Analysis(전산유동수치해석), Impinging Round Jet (원형충돌분류), Mean Velocity(평균속도), Mixing Flow Structure(평균유동구조), Turbulent Kinetic Energy (난류운동에너지)

Abstract : The computational flow numerical analysis was introduced to predict the turbulent characteristics in the mixing flow structure of 45° impinging round jet. This analysis has been carried out through the commercial fluent software. Realizable(RLZ) k-ε was used as a turbulent model. It can be known that mean velocities analysed through RLZ k-ε turbulent model comparatively predict well the experiments and show well the elliptic shape of mixing flow structure in the Y-Z plane, but analysed turbulent kinetic energies show somewhat differently from the experiments in certain regions.

1. 서 론

유체유동의 혼합과정 현상들을 파악하기 위해 지금까지 진행되어온 공기의 난류유동에 대한 연구는 단순하게는 원형분류(round jet), 평면분류(plane jet), 환상분류(annular jet), 평행분류(parallel jet), 동축분류(coaxial jet), 슬릿분류 slit jet) 등으로 부터 시작되어, 복잡하게는 이들 분류들을 응용한 다중분류(multiple jets)나, 일정한 회전운동을 동반한 스윙유동(swirling flow) 및 다양한 형태의 분류들을 벽에 충돌시키거나 또는 분류들을 서로 교차시켜 조합된 충돌분류(impinging jet)나 교차분류(cross jet) 등으로 연구되어 왔다.

여기서 교차분류의 연구는 수직분류에 횡류(cross flow or transverse flow)를 교차시킨 경우가 대부분을 차지하고 있다. 초창기에는 LDV¹⁻³⁾, 열선풍속계³⁻⁵⁾, PIV^{6,7)} 등을 이용한 실험적 연구¹⁻⁷⁾가 지배적이었으나, 최근에는 컴퓨터의 발달에 따라 표준 k-ε 난류모델^{8,9)}과 RSM(Reynolds stress model)^{10,11)}에서부터 LES(large-eddy simulation)¹²⁻¹⁵⁾ 모델에 이르기까

지 이론적 연구⁸⁻¹⁵⁾가 다양하게 진행되고 있다. 또 충돌분류는 두 원형분류를 일정 각도로 상호 충돌시켜 형성된 자유충돌분류(free impinging jet)로서 지금까지 Rho 등¹⁶⁾에 의해서 주로 실험적으로 연구되어왔다.

한편, 충돌분류나 교차분류는 대기 속으로 매연을 분출시키는 굴뚝의 대기오염문제, 전자 기관의 부품들에서 발생하는 열의 효율적인 냉각문제, 가스터빈 날개의 냉각문제, 연소실에 연료나 공기를 분사시키는 문제 및 연소실 내의 화염 속에 2차공기량을 투입하는 문제 등에 활용할 수가 있어 지금까지도 연구가 지속되고 있다.

본 연구에서는 두 원형분류를 45° 각도로 상호 충돌시켜 형성된 충돌분류에 대해 상용 CFD 해석 프로그램인 Fluent(ver. 6.3)¹⁷⁾를 사용하여 수치해석을 하였다. 본 연구에 사용한 난류해석모델로는 기 발표된 실험결과¹⁶⁾와 정확도를 비교한 결과¹⁸⁾를 통해 가장 잘 일치하는 Realizable(RLZ) k-ε을 적용하였다.

2. 수치 해석

2.1 해석모델

본 연구에 해석된 모델은 Fig. 1과 같이 외란이 없

김장권(교신저자) : 군산대학교 동력기계시스템공학과
E-mail : flowkim@kunsan.ac.kr, Tel : 063-469-1848
오석형 : 군산대학교 기계공학부

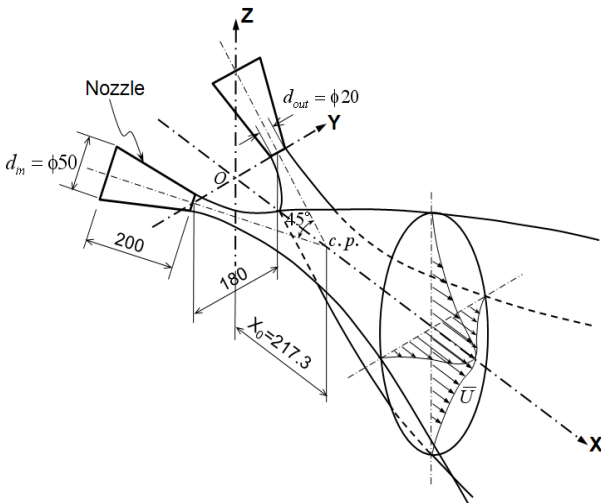


Fig. 1 Geometry and flow structure of 45° impinging round jet

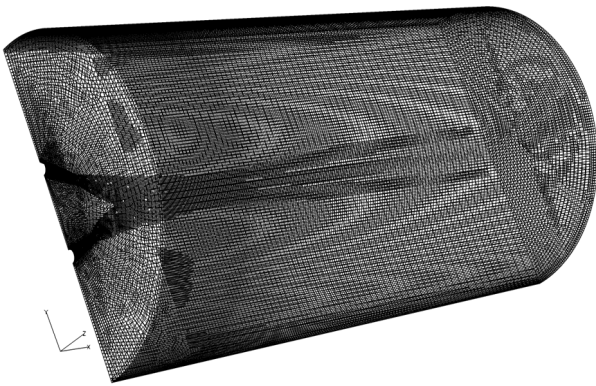


Fig. 2 Computational mesh of analysis model

는 정지 상태인 공간에 두 원형분류를 45°로 상호 충돌시켜 형성된 자유충돌분류¹⁶⁾를 기준으로 하고 있다. Fig. 1의 충돌분류를 모델링하기 위해서는 45°로 교차된 노즐들을 반경이 500 mm이고, 길이가 2000 mm인 원통덕트로 둘러쌓아, 노즐 출구면을 기준으로 상류측 유동영역으로 100 mm, 하류측 유동영역으로 1900 mm가 나누어지도록 해석영역을 설정하였다. Fig. 2는 본 연구에서 해석한 모델의 메쉬(mesh) 형상을 보여주고 있다. 여기서 해석모델은 X-Y평면에 대하여 대칭구조를 가지므로 원형덕트의 절반만 해석 영역으로 잡고, X-Y평면을 대칭면으로 정하였다. 해석모델의 형상과 격자생성은 Gambit (ver. 2.3.16)¹⁷⁾을 이용하였으며, 기본 격자는 육면체와 4면체를 조합한 Unstructured hybrid mesh scheme으로 460,483개를 생성하였으며, 이후 해석의 정확성을 위해 Fluent에서 Grid adaptation기법을 이용하여 총 격자수를 1,065,422로 늘려 잡았다. 이때 늘어난 격자는 두 원

형분류가 충돌하는 기하학적 충돌점(c.p.)인 $X_0=217.3$ mm를 전후로, 또 $Y=0$ 인 중심선 상으로 밀집되도록 배치하였다.

2.2 지배방정식 및 난류모델링

본 연구에서는 충돌분류를 해석하기 위해 작동유체(공기)를 정상상태의 3차원 비압축성유체로 가정하여 등온조건으로 적용하였다. 따라서 지배방정식은 텐서(tensor)로 나타내면, 다음과 같다.

$$\text{연속방정식} : \frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

운동량방정식(RANS 방정식) :

$$\rho U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_j \partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u_i u_j}) \quad (2)$$

여기서 U_i 는 평균속도이며, P 는 평균압력, ρ 는 밀도, μ 는 점성계수이며, $-\rho \overline{u_i u_j}$ 는 레이놀즈 전단응력이다.

난류모델링에 대한 레이놀즈 평균 개념의 접근은 레이놀즈 전단응력항을 적절히 모델 해야 함을 의미하는데, 일반적인 방법으로는 레이놀즈응력항을 평균 속도기울기와 연결시키기 위해 다음의 Boussinesq 가정을 도입해야한다. 즉,

$$-\rho \overline{u_i u_j} = \mu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (3)$$

이와 같은 Boussinesq 가정은 $k-\epsilon$ 모델과 $k-\omega$ 모델에서 사용된다. 또 난류점성계수(eddy viscosity) μ_t 는 난류운동에너지 k 와 소산율(dissipation rate) ϵ 에 의해서 다음과 같이 정의된다.

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

따라서 RLZ $k-\epsilon$ 모델에 대한 난류운동에너지와 소산율에 대한 수송방정식을 나타내면, 다음과 같다.

$$\rho U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \epsilon \quad (5)$$

$$\rho U_j \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S \epsilon - \rho C_2 \frac{\epsilon^2}{k + \sqrt{\nu \epsilon}} \quad (6)$$

$$G_k = -\overline{\rho u_i u_j} \frac{\partial U_j}{\partial x_i}, \quad C_1 = \max\left[0.43, \frac{\eta}{\eta + 5}\right],$$

$$\eta = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \frac{k}{\epsilon}, \quad S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_j}{\partial x_i} + \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right)$$

여기서 난류모델상수들은 모두 기본값¹⁷⁾을 사용하였다.

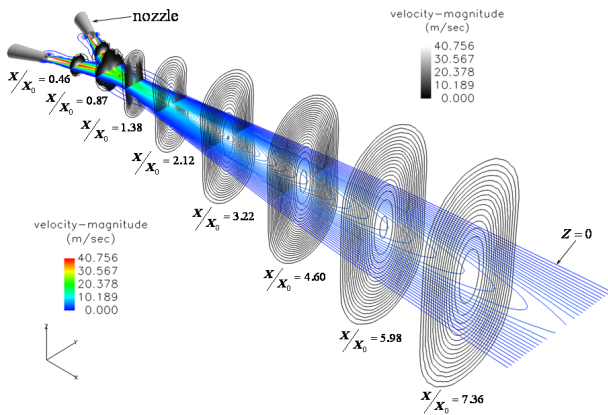


Fig. 3 Flow structure of 45° impinging round jet

2.3 수치기법

본 연구에서는 경계조건으로 두 노즐의 출구속도를 40 m/s로 정하였으며, 출구속도의 난류강도¹⁸⁾는 $I = 0.16(Re)^{-1/8}$ 에 의해 4.12%로 가정하였다. 이때 레이놀즈수는 $Re = 5.2 \times 10^4$ 이다. 또, 두 노즐을 제외한 입구벽면에 해당하는 경계조건은 대기압의 정지유체로 가정하였으나, 두 분류의 entrainment가 작용하므로 난류강도를 1%로 적용하였다. 또 원통형벽면의 경계조건은 가상의 벽면을 고려하여 마찰력이 존재하지 않는 점착(no-slip) 조건을 적용하였다. 또 출구면에서 경계조건은 완전히 발달된 난류유동영역으로 간주하여 대기압을 적용하였다. 한편, 해의 제어를 위해 압력항은 2차 upwind scheme으로 이산화하였고, 운동량과 난류운동에너지 및 난류소산율의 항들은 모두 QUICK scheme으로 이산화하였다. 이산화된 방정식들은 모두 SIMPLE 알고리즘을 사용하여 풀었으며, 모든 변수들의 완화계수는 초기상태의 값들을 이용하였다. 그리고 해의 수렴조건은 모든 변수들의 잔류값이 1×10^{-5} 일 때로 설정하였으며, 또 수렴조건에 미치지 못하더라도 가장 작은 일

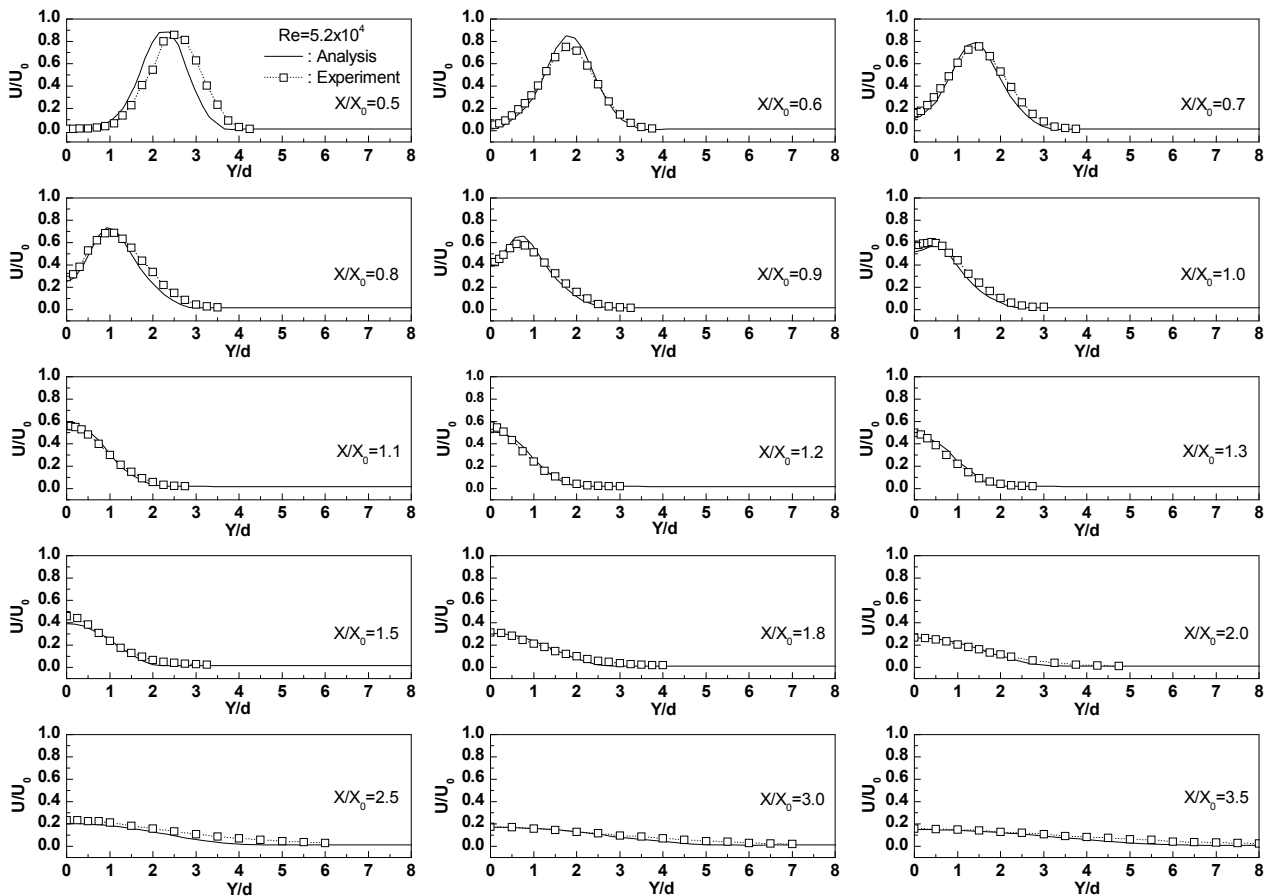


Fig. 4 Mean velocity U profiles in the X-Y plane

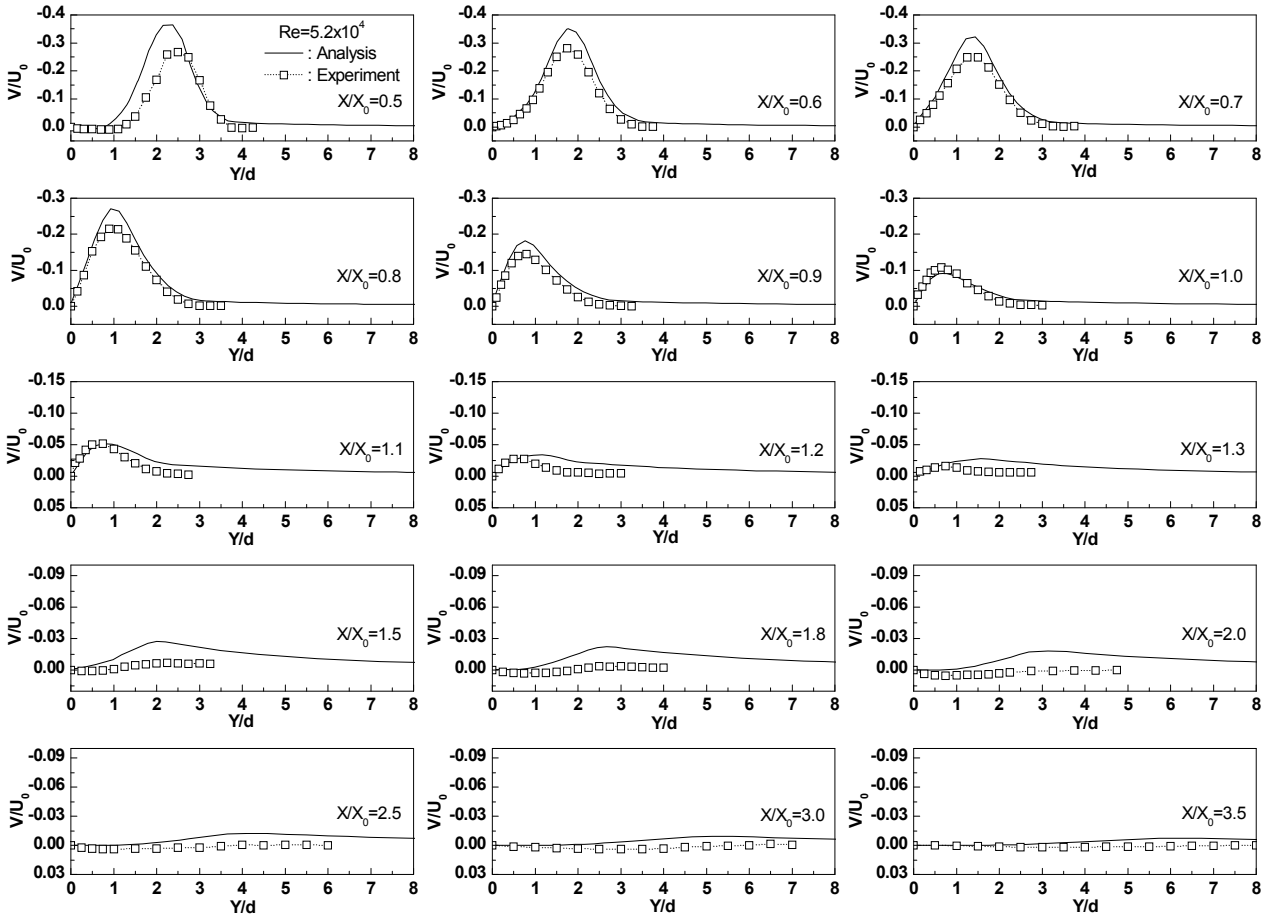


Fig. 5 Mean velocity V profiles in the X-Y plane

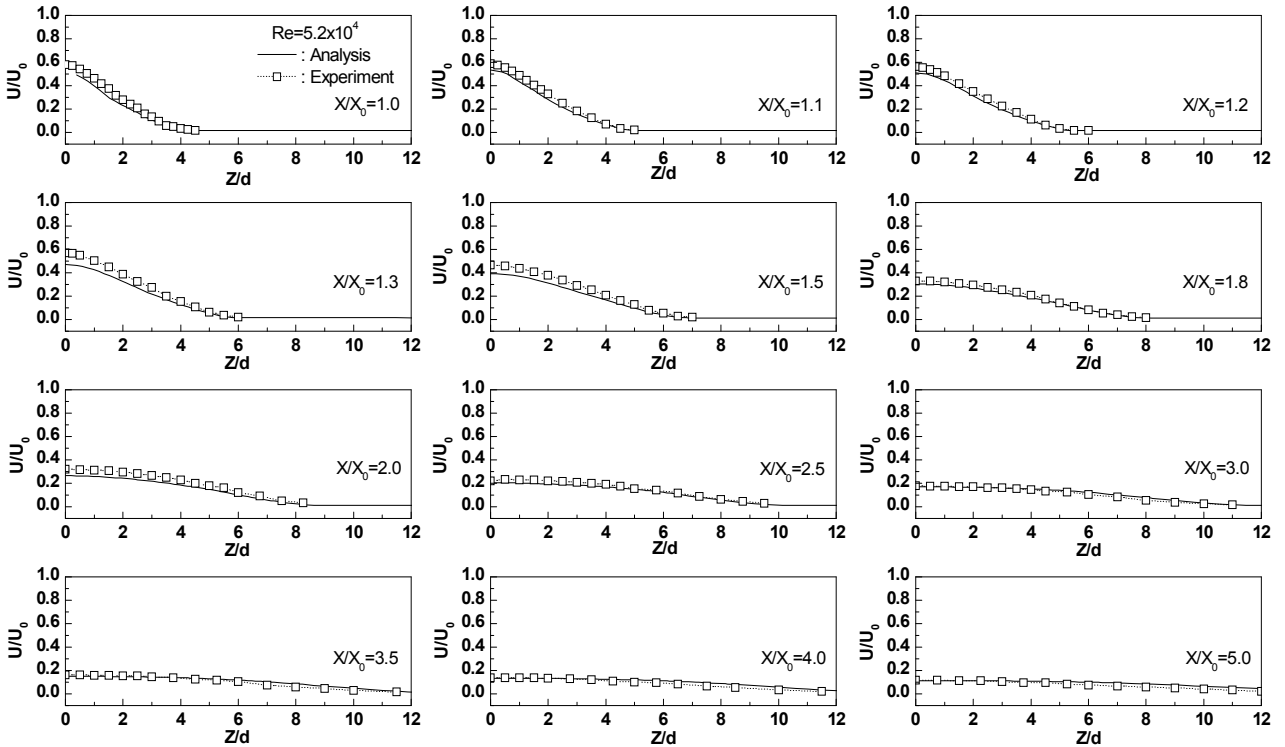


Fig. 6 Mean velocity U profiles in the X-Z plane

정한 값으로 계속 나타날 경우에는 수렴한 것으로 간주하였다.

3. 계산결과 및 고찰

3.1 유동발달과정

Fig. 3은 45° 원형충돌분류의 유동발달과정을 나타낸 해석결과이다. 실험으로 밝혀진 기 선행연구에 의하면,¹⁶⁾ Fig. 1에서와 같이 두 원형분류의 45° 충돌력에 의해 형성된 유동단면 구조는 $X/X_0=1.2$ 에서 Y방향으로 가장 수축된 단면이 형성되다가, $X/X_0=1.2$ 이후부터는 다시 확산되는 유동구조를 보이지만, Z방향으로는 상대적으로 Y방향보다 훨씬 크게 확산되는 유동구조를 보여, 결과적으로는 충돌력이 크게 영향을 미치는 X축방향 위치에서는 타원단면형상을 보이다가 충돌력의 영향이 없어지는 X축방향 위치부터는 점차 원형단면형상으로 변해가는 유동단면 구조를 보여준다고 하였다. 이 같은 사실들은 Fig. 3의 해석결과에서도 잘 확인할 수가 있었다.

3.2 평균속도 분포

Fig. 4는 X-Y평면에서 얻어진 X축방향의 평균속도분포를 Y축방향의 거리에 따라 나타낸 그림이다. 여기서 평균속도는 노즐 출구속도(U_0)로 무차원화했으며, 거리는 노즐직경(d)으로 무차원화 하였다.

$X/X_0=0.5$ 에서의 해석된 X축방향 평균속도성분은 실험값보다 Y축방향으로 더 수축된 유동의 영향으로 $1 < Y/d < 4$ 의 위치에서 크기차이가 달리 나타나나 $X/X_0=0.6$ 이후부터는 비교적 해석결과와 실험값이 비교적 잘 일치함을 볼 수 있다. 그 중에서도 $1.1 \leq X/X_0 \leq 2.0$ 에서 특히 잘 일치하고 있다.

Fig. 5에 나타난 Y방향 평균속도성분은 $X/X_0=1.2$ 를 전후로 해서 뚜렷이 다른 모습을 보여주며, 해석결과가 측정값보다 약간 더 크게 나타나 있다. 특히 $0.6 \leq X/X_0 \leq 1.1$ 에서는 같은 모습의 분포를 보이나 두 노즐의 원형분류가 합산되어 유동이 확산되는 $X/X_0 > 1.1$ 이후에는 그 크기 차이들은 작지만, 서로 다른 분포모습을 보여주며 소멸하고 있다.

Fig. 6은 X-Z평면에서 얻어진 X축방향의 평균속도분포를 Z축방향의 거리에 따라 나타낸 그림이다. X축방향의 평균속도분포는 전체적으로 해석결과와 실험값의 분포경향이 거의 같게 나타났으며, $X/X_0 \leq 2.5$ 에서는 실험값이 해석결과보다 약간 더 큰 크기 분포를 보이고 있으나, $X/X_0 > 2.5$ 이후부터는 거의 같은 크기를 보이고 있다. 또 Z방향성분의 평균속도분포인 Fig. 7의 경우에는 전 X축방향의 영역에서 해석결과와 실험값들이 모두 같은 경향으로 분포되며, 그 크기 값들은 약간의 차이들을 보이지만 대체적으로 잘 일치함을 알 수 있다. 따라서 각 방향 성분의 평균속도분포들을 통해서 볼 때, $RLZ k-\epsilon$ 의 난류모델의 해석능력은 비교적 우수하다고 판단된다.

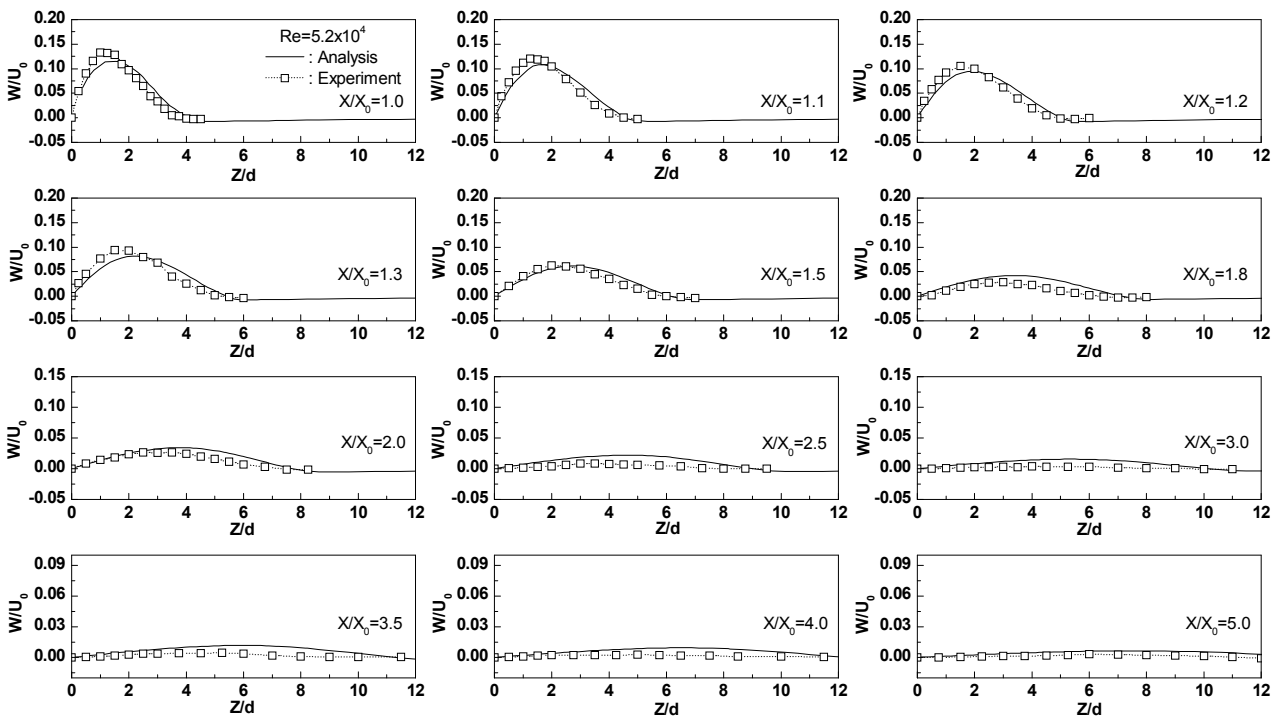


Fig. 7 Mean velocity W profiles in the X-Z plane

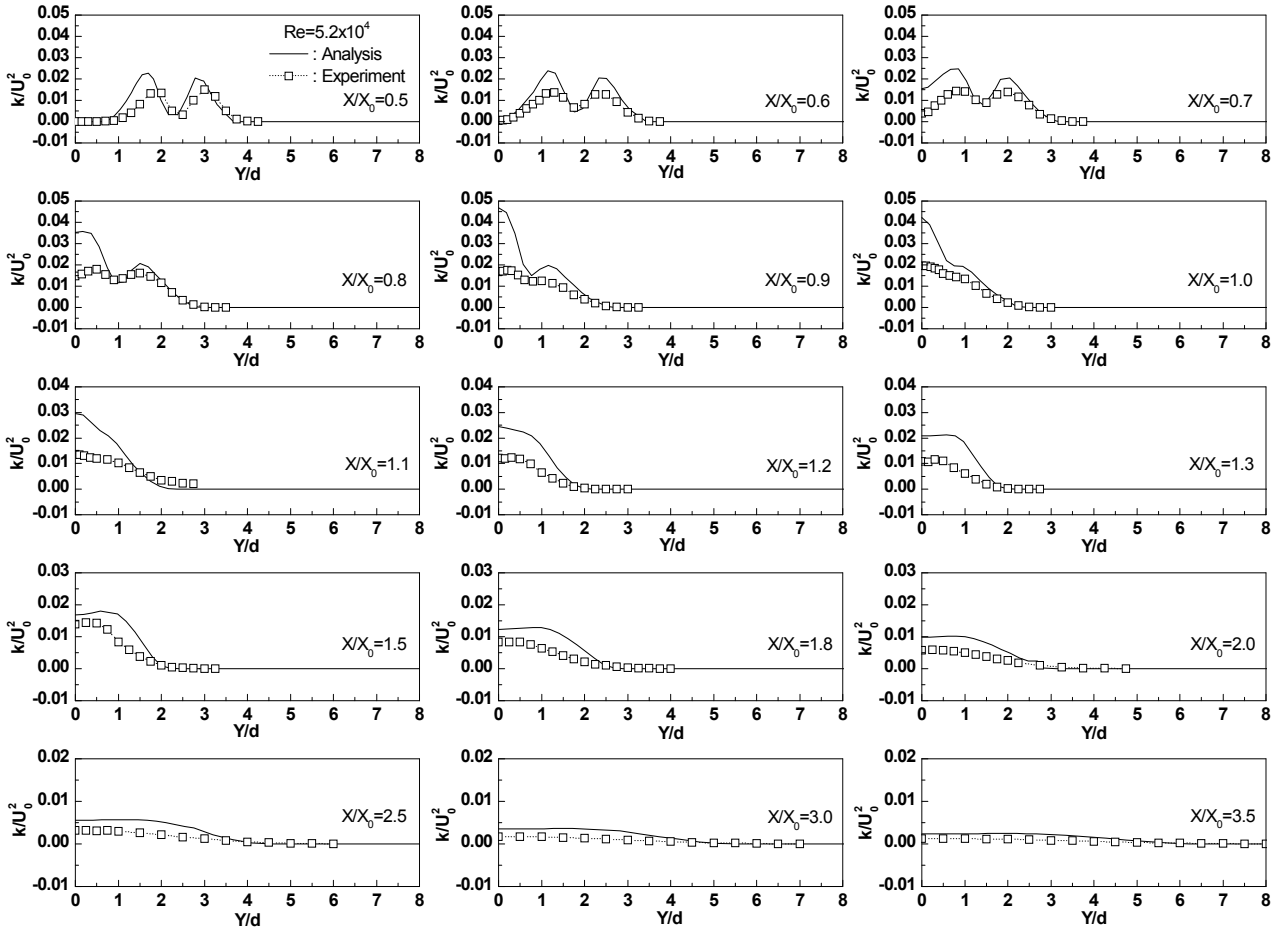


Fig. 8 Turbulent kinetic energy profiles in the X-Y plane

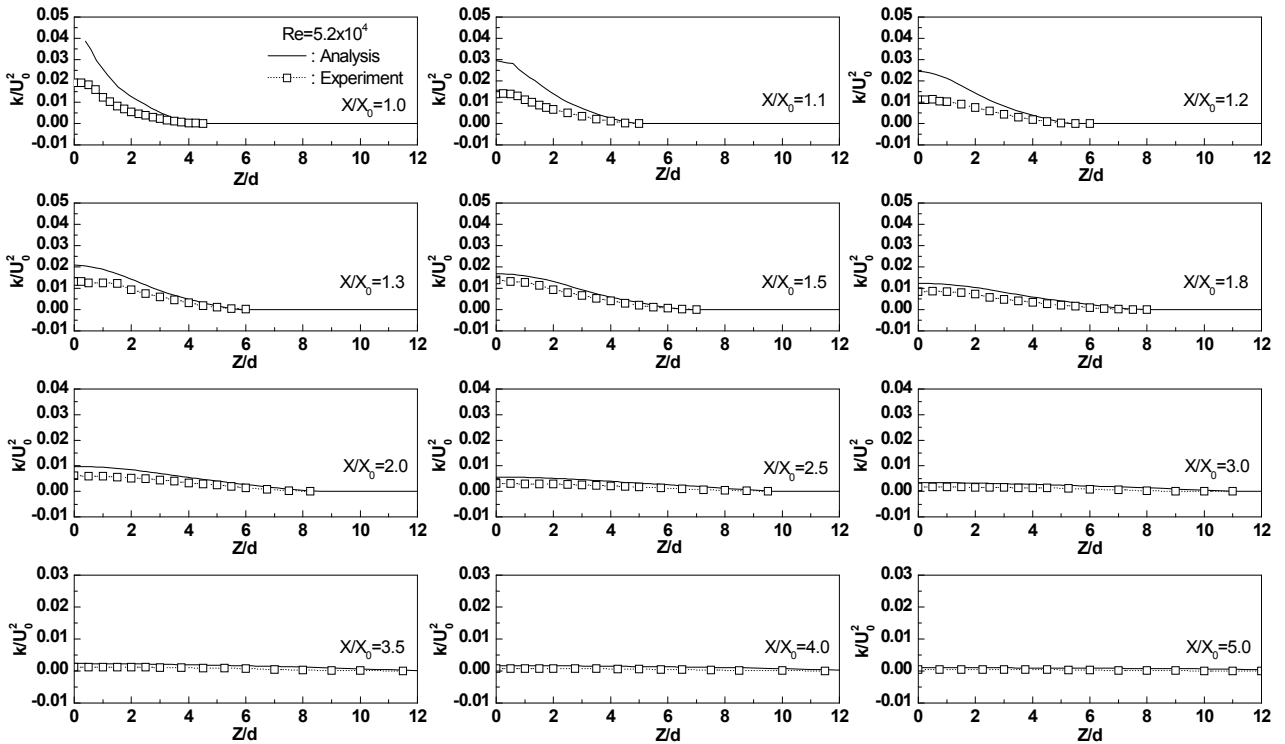


Fig. 9 Turbulent kinetic energy profiles in the X-Z plane

3.3 난류운동에너지 분포

Fig. 8은 X-Y평면에서 얻어진 난류운동에너지분포를 Y축방향의 거리에 따라 나타낸 그림이다. 전체적으로 해석한 결과와 실험값들의 분포 모습은 그 경향이 매우 유사하게 나타났으나, 크기는 특히 $X/X_0 \leq 2.0$ 의 분류 중심부에서 과대 예측하는 것을 보이고 있다. 또 X-Z평면에서 얻어진 난류운동에너지의 분포인 Fig. 9에서도 그 분포경향이 유사하며, 이 경우에도 $X/X_0 < 1.3$ 에서는 분류중심부에서 과대 예측하는 것을 볼 수 있다. 따라서 $RLZ k-\epsilon$ 의 난류모델은 두 원형분류의 충돌력이 지배하는 영역에서는 난류운동에너지를 다소 과대 예측하는 것으로 나타났다.

4. 결 론

본 연구에서는 두 개의 원형분류를 45°로 충돌 혼합시켜 형성된 유동구조를 $RLZ k-\epsilon$ 난류모델을 이용하여 예측한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) X-Y 및 X-Z평면에서 예측한 평균속도 U 와 W 의 분포는 실험값과 비교적 잘 일치하지만, 평균속도 V 의 분포는 일부영역에서 그 크기차이는 작지만 실험값보다 과대 예측하는 경향이 있다.

(2) 난류운동에너지의 분포는 X-Y평면에서는 $X/X_0 \leq 2.0$ 에서 그리고 X-Z평면에서는 $X/X_0 \leq 1.3$ 에서 다소 과대 예측하고 있으나, 그 분포모습은 유사한 경향을 보이고 있다.

이상의 연구결과들을 볼 때, 본 45° 원형충돌분류의 유동구조를 $RLZ k-\epsilon$ 으로 예측하는 것은 어느 정도 가능하나, 난류운동에너지에서는 일부 영역에서 다소 과대 예측하여 그 한계를 알 수 있다.

참고 문헌

1. G. Rudinger and L. F. Moon, 1976, "Laser-Doppler Measurements in a Subsonic Jet Injected into a Subsonic Cross Flow", Trans. of the ASME, pp. 516-520.
2. A. S. Ahmed and R. M. C. So, 1987, "Characteristics of Air Jets Discharging Normally into a Swirling Crossflow", AIAA J., Vol. 25, No. 3, pp. 429-435.
3. J. H. Whitelaw, 1981, "Measurements in a Jet-Pipe Flow Issuing Perpendicularly into a Cross Stream", Trans. of the ASME, Vol. 103, No. 80, pp. 142-153.
4. J. Andreopoulos and W. Rodi, 1984, "Experimental Investigation of Jets in a Crossflow", J. Fluid Mech., Vol. 138, pp. 93-127.
5. S. A. Sherif and R. H. Pletcher, 1989, "Measurements of the Flow and Turbulence Characteristics of Round Jets in Crossflow", Trans. of the ASME, J. of Fluids Eng., Vol. 111, pp. 165-171.
6. S. Gogineni, L. Goss and M. Roquemore, 1998, "Manipulation of a Jet in a Cross Flow", Exp. Thermal and Fluid Sci., Vol. 16, pp. 209-219.
7. S. Gopalan, B. M. Abraham and J. Katz, 2004, "The Structure of a Jet in Cross Flow at Low Velocity Ratios", Physics of Fluids, Vol. 16, No. 6, pp. 2067-2087.
8. P. Nadeau, D. Berk and R. J. Munz, 2001, "Mixing in a Cross-Impinging Jet Reactor", AIChE J., Vol. 47, No. 3, pp. 536-544.
9. Y. T. Yang and Y. X. Wang, 2005, "Three-Dimensional Numerical simulation of an Inclined Jet with Cross-Flow", Int. J. Heat and Fluid Flow, Vol. 48, pp. 4019-4027.
10. N. A. Worth and Z. Yang, 2006, "Simulation of an Impinging Jet in a Crossflow Using a Reynolds Stress Transport Model", Int. J. for Numerical methods in Fluids, Vol. 52, pp. 199-211.
11. M. Pathak, A. Dewan and A. K. Dass, 2006, "Computational Prediction of a Slightly Heated Turbulent Rectangular Jet Discharged into a Narrow Channel Crossflow Using Two Different Turbulence Models", Int. J. Heat and Fluid Flow, Vol. 49, pp. 3914-3928.
12. W. P. Jones and M. Wille, 1996, "Large-Eddy Simulation of a Plane Jet in a Cross-Flow", Int. J. Heat and Fluid Flow, Vol. 17, No. 3, pp. 298-306.
13. B. Wegner, Y. Huai and A. Sadiki, 2004, "Comparative Study of Turbulent Mixing in Jet in Cross-Flow Configurations Using LES", Int. J. Heat and Fluid Flow, Vol. 25, pp. 767-775.
14. P. Majander and T. Siikonen, 2006, "Large-

- Eddy Simulation of a Round Jet in a Cross-Flow", *Int. J. Heat and Fluid Flow*, Vol. 27, pp. 402-415.
15. M. Popovac and K. Hanjalic, 2007, "Large-Eddy Simulations of Flow over a Jet-Impinged Wall-Mounted Cube in a Cross Stream", *Int. J. Heat and Fluid Flow*, Vol. 28, pp. 1360-1378.
 16. B. J. Rho, J. K. Kim and H. A. Dwyer, 1990, "Experimental Study of a Cross Jet", *AIAA J.*, Vol. 28, No. 5, pp. 784-789.
 17. Fluent Inc., 2006, *FLUENT User's Guide*
 18. J. K. Kim and S. H. Oh, 2009, "Evaluation of Turbulent Models on the Mixing Flow Structure of 45° Impinging Round Jet by Two Round Jets", *J. of KSPSE*, Vol. 13, No. 5, pp. 34-39.