

# 두 원형분류에 의한 45° 충돌분류의 혼합유동구조에 대한 난류모델 평가 Evaluation of Turbulent Models on the Mixing Flow Structure of 45° Impinging Jet by Two Round Jets

김 장 권 · 오 석 형  
J. K. Kim and S. H. Oh

(접수일 : 2009년 6월 23일, 수정일 : 2009년 9월 4일, 채택확정 : 2009년 10월 6일)

**Key Words** : Computational Fluid Dynamics(CFD) Analysis(전산유체역학해석), Flow Half Width(유동반폭), Impinging Round Jet(원형충돌분류), Mixing Flow Structure(혼합유동구조)

**Abstract** : In this paper, the CFD analysis using various turbulent models has been performed to evaluate which type of turbulent models can predict well the mixing flow structure of 45° impinging round jet. This CFD analysis has been carried out through the commercial Fluent software. As a result, any of turbulent models cannot predict the experimental results definitely all over the flow range. However, as compared with the experimental results, the turbulent model of realizable(RLZ) k-ε only predicts well in the limited range between X/X<sub>0</sub>=1.1 and X/X<sub>0</sub>=2.0.

## 1. 서 론

현재 유체유동에서 난류유동의 중요성은 계속적으로 커지고 있으며, 특히 비행기나 선박 및 자동차 등에서 난류유동을 고려한 설계의 적용으로 연비의 개선 등 그 성능이 크게 향상되고 있다. 또한 난류유동은 유체의 혼합능력을 매우 촉진시키므로, 각종 내연기관이나 연소장치 등에서 그 응용성을 쉽게 찾아볼 수 있다.

이와 같이 유체의 혼합과정의 현상들을 파악하기 위해서 지금까지 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 회전을 가한 스월유동(swirling flow) 및 다양한 형태의 분류들을 벽에 충돌 내지는 서로 충돌시키거나 교차시켜 조합된 충돌분류(impinging jet)와 교차분류(cross jet) 등으로 연구되어 왔다.

여기서 교차분류는 수직분류에 횡류(cross flow

or transverse flow)를 교차시킨 경우가 대부분을 차지하고 있으며, 초기에는 LDV<sup>1-3)</sup>, 열선풍속계<sup>3-5)</sup>, PIV<sup>6,7)</sup> 등을 이용한 실험적 연구<sup>1-7)</sup>가 지배적이었으나, 최근에는 전산기의 발달에 따라 표준 k-ε 난류모델<sup>8,9)</sup>과 RSM(Reynolds stress model)<sup>10,11)</sup>에서부터 LES(large-eddy simulation)<sup>12-15)</sup> 모델에 이르기까지 이론적 연구<sup>8-15)</sup>가 다양하게 진행되고 있다. 이 같은 유동은 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.

한편, 두 원형분류를 일정 각도로 상호 충돌시켜 형성된 자유충돌분류(free impinging jet)는 지금까지 Rho 등<sup>16-20)</sup>에 의해서 주로 실험적으로 연구되어 왔다. Rho 등은 두 원형분류들을 다양한 각도로 상호 충돌시켜 형성된 충돌분류의 타원형 유동구조에서 X형 열선프로브로 속도분포, 난류강도 및 난류전단응력 등을 규명하였다. 그러나 본 연구와 같은 충돌분류에 대한 이론적인 접근은 아직까지 한 번도 연구되지 않아, 이에 대한 응용 연구를 확장하기 위해서도 CFD해석이 절실히 필요한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 충돌분류에 대한 CFD해석

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

을 위해 상용 수치해석 프로그램인 Fluent(ver. 6.3)<sup>21)</sup>를 이용하여 RANS(Reynolds-averaged Navier-Stokes) 방정식에 사용될 난류모델로 standard (STN) k-ε, realizable(RLZ) k-ε, SST(shear stress transport) k-ω들을 적용하였으며, 기 발표된 실험 결과들<sup>16-20)</sup>과도 중심선상의 X축 방향 평균속도분포와 Y축 및 Z축 방향으로 확산되는 유동반쪽들을 이용하여 비교하였다. 여기서 그 밖의 다른 난류모델들(RNG k-ε, RSM)<sup>21)</sup>은 수렴에 어려움을 보이거나 실험값들과 현저한 차이를 보여, 본 연구에서는 생략하였다.

한편 본 연구에서는 충돌분류의 실험치와 가장 잘 일치하는 난류모델을 규명하고자 한다.

## 2. 수치 해석

### 2.1 해석모델

본 연구에서 해석된 모델은 Fig. 1과 같이 외란이 없는 정지 상태인 공간에 두 원형분류를 45°로 상호 충돌시켜 형성된 자유충돌분류<sup>16, 20)</sup>를 기준으로 하고 있다. Fig. 1의 충돌분류를 모델링하기 위해서는 45°로 교차된 노즐들을 반경이 500 mm이고, 길이가 2000 mm인 원통형 덕트로 둘러싸아, 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 원통형 덕트의 절반만 해석영역으로 잡고, X-Y평면을 대칭면으로 삼았다. 해석모델의 형상과 격자는 Fluent의 전처리 소프트웨어인 Gambit(ver. 2.3.16)<sup>21)</sup>을 이용하여 기본 격자를 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 격자는 두 원형분류가 충돌하는 기하학적 충돌점인  $X_0=217.3$  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.

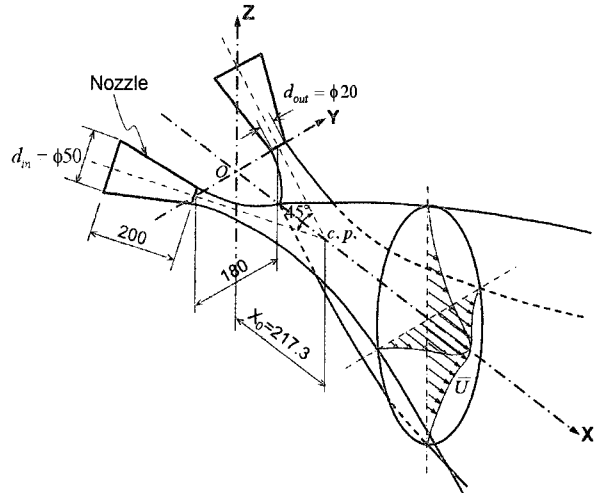


Fig. 1 Geometry and flow structure of 45° impinging round jet

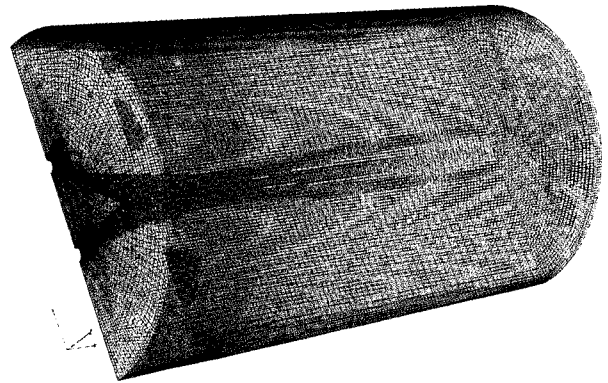


Fig. 2 Computational mesh of analysis model

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

운동량방정식(RANS 방정식) :

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

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

난류모델링에 대한 레이놀즈 평균 개념의 접근은 레이놀즈 전단응력항이 적절히 모델 되어져야함을 의미하는데, 일반적인 방법으로는 레이놀즈 응력항을 평균속도기울기와 연결시키기 위해 다음과 같은 Boussinesq 가정을 도입해야한다. 즉,

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

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

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

본 연구에서는 비교난류모델 중에서도 실험치와 가장 잘 일치하는 *RLZ*  $k-\epsilon$  모델에 대한 난류운동에너지와 소산율에 대한 수송방정식을 나타내면, 다음과 같다.

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

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

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

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

여기서 사용된 난류모델별 난류상수들은 Table 1에 나타낸 해석조건 D를 제외한 모든 해석모델에 대하여 기본값<sup>21)</sup>을 사용하였으며, 해석조건 D에 한해서만  $C_2 = 1.87$ 을 적용하였다.

Table 1 Classification of the analysis conditions

Analysis condition	Model	Near-wall treatment	Discretization
			Pressure
A	<i>RLZ</i> $k-\epsilon$	Enhanced	2nd-order
B	<i>RLZ</i> $k-\epsilon$	Standard	2nd-order
C	<i>STN</i> $k-\epsilon$	Enhanced	Standard
D	<i>RLZ</i> $k-\epsilon$	Enhanced	2nd-order
E	<i>SST</i> $k-\omega$	-	2nd-order

### 2.3 수치기법

본 연구에서는 두 노즐의 출구속도를 기 발표된 실험결과들<sup>16-20)</sup>에서 사용하였던 40 m/s로 정하였으며, 출구속도의 난류강도<sup>21)</sup>는  $I = 0.16(Re)^{-1/8}$ 에 의해 4.12%로 가정하였다. 이때 노즐의 출구속도와 직경으로 산출된 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. 원통형 벽면의 경계조건은 가상의 벽면을 고려하여 마찰력이 존재하지 않는 free-slip 조건을 적용하였다. 또 출구면에서 경계조건은 완전히 발달된 난류유동영역으로 간주하여 대기압을 적용하였다. 한편, 해의 제어를 위해 압력항은 표준 또는 2차 upwind scheme으로 이산화 하였고, 운동량과 난류운동에너지 및 난류소산율의 항들은 모두 QUICK scheme으로 이산화 하였다. 이산화된 방정식들은 모두 SIMPLE 알고리즘을 사용하여 풀었으며, 모든 변수들의 완화계수는 초기상태의 값들을 이용하였다. 그리고 해의 수렴조건은 모든 변수들의 잔류치가  $1 \times 10^{-5}$ 일 때로 설정하였으며, 또 수렴조건에 미치지 못하더라도 가장 작은 일정한 값으로 계속 나타날 경우에는 수렴한 것으로 간주하였다.

### 3. 계산결과 및 고찰

#### 3.1 중심선상의 평균속도분포에 의한 난류모델 비교

45° 원형충돌분류의 선행연구에 의하면,<sup>16-20)</sup> 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 Y방향에 비해 상대적으로 크게 확산되는 유동구조를 보이게 된다. 결과적으로 충돌력이 지배하는 위치에서는 타원단면형상을 보이지만, 충돌력의 영향이 약해지는 위치부터는 점차 원형단면의 형상으로 변해가는 유동단면 구조를 보여준다.

Fig. 3은  $Y=Z=0$ 인 충돌분류 중심선 상에서 X축 방향의 위치 변화에 따라 얻어진 X축 방향 평균속도  $U$ 를 노즐 출구의 분출속도  $U_0$ 로 무차원화한 그

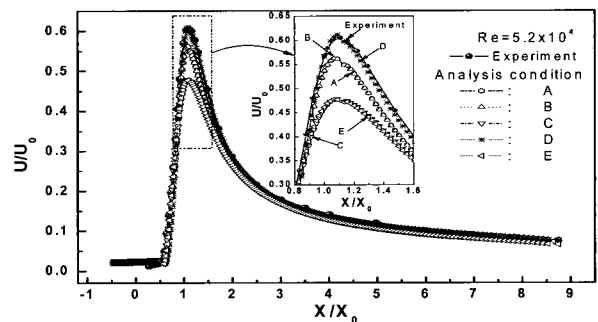


Fig. 3 Comparisons of axial mean velocity along the centerline

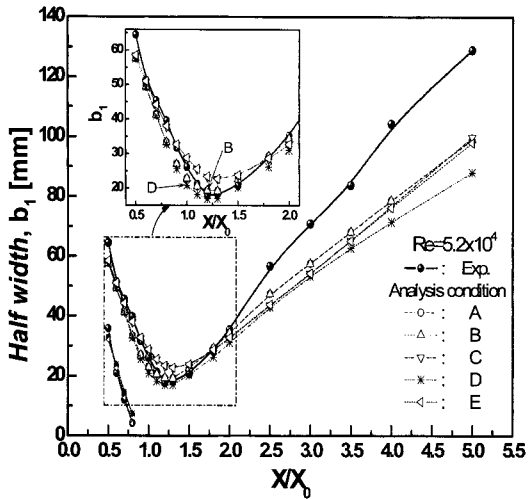


Fig. 4 Comparisons of half-width( $b_1$ ) along the centerline

림이다. Table 1에서 보는바와 같이 각 난류모델별로 해석한 결과, 실험값과 가장 잘 일치하는 모델은 near-wall 처리에 사용한 조건들에 관계없이  $RLZ k-\epsilon$ 임을 알 수 있다. 그러나  $RLZ k-\epsilon$  난류모델조차도  $U/U_0$ 가 peak값을 보이는 약  $X/X_0=1.1$ 에서는 다소 큰 차이를 보이고 있다. 이것은 두 원형분류가 약  $X/X_0=1.1$ 까지는 충돌이 진행되어 가는 중이기 때문에, 충분히 확산 발달하지 못하는 데 반해, 기본 난류모델상수들을 사용한  $RLZ k-\epsilon$  난류모델들(해석조건 A와 B)은 충분히 확산 발달한 경우를 대상으로 하였기 때문에 오는 차이로 볼 수 있다. 따라서 본 연구의 실험결과에 적용 가능한 난류모델상수들을 차례로 변화시켜 본 결과, 식 (6)의 난류모델상수들 중  $C_2$ 를 기본값인 1.9에서 1.87로 변경하였을 때,  $RLZ k-\epsilon$  난류모델(해석조건 D)이 실험값과 X축 방향 전체의 위치에서 잘 일치하고 있음을 알 수 있었다. 반면에 난류모델  $STN k-\epsilon$ (해석조건 C)과  $SST k-\omega$ (해석조건 E)들로 예측한 peak 속도들은  $RLZ k-\epsilon$  모델로 예측한 결과보다 현저히 작게 나타났는데, 이것은 두 모델들이  $RLZ k-\epsilon$  모델보다 난류혼합이 훨씬 더 확산적인 성질을 가졌기 때문이다.<sup>21)</sup>

### 3.2 유동반쪽 발달에 의한 난류모델비교

Fig. 4는  $Y=Z=0$ 인 충돌분류 중심선 상에서 X축 방향의 위치 변화에 따라 얻어진 Y축 방향으로 발달하는 유동반쪽  $b_1$ 의 분포를 실험값과 난류모델별로 예측한 값들을 서로 비교한 것이다. 여기서 유동반쪽은 중심선 상에서 얻어진 X축 방향의 평균속도

값의 절반에 해당하는 Y축 방향의 위치로 정의하였다.

유동반쪽  $b_1$ 의 분포는 약  $X/X_0=1.0$  이전의 영역에서는 해석조건 C와 해석조건 E들로 예측한 결과가  $RLZ k-\epsilon$  난류모델에 비해 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 그러나 두 원형분류가 충돌한 이후, 즉 약  $X/X_0=1.1$  이후의 영역에서부터 약  $X/X_0=2.0$ 까지는  $RLZ k-\epsilon$  난류모델이 가장 잘 일치함을 보여주고 있다. 특히 기본값의 모델상수들을 적용시킨 해석조건 A와 B의 예측 결과가 Fig. 3에서 peak 값의 X방향성분의 평균속도의 크기를 맞추기 위해서 모델상수  $C_2$ 를 변화시킨 해석모델 D보다도 더 넓은 범위에서 일치함을 보여주고 있다. 그러나  $X/X_0=2.0$  이후부터는 예측값들이 실험값보다 작게 나타나 현저한 차이를 보여준다.

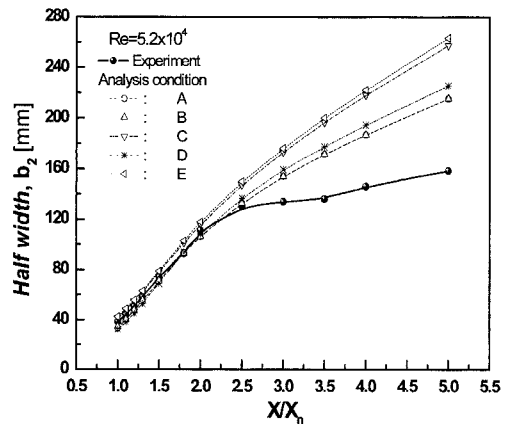


Fig. 5 Comparisons of half-width( $b_2$ ) along the centerline

Fig. 5는  $Y=Z=0$ 인 충돌분류 중심선 상에서 X축 방향의 위치 변화에 따라 얻어진 Z축 방향으로 발달하는 유동반쪽  $b_2$ 의 분포를 실험값과 난류모델별로 예측한 값들을 서로 비교한 것이다.

유동반쪽  $b_2$ 의 분포는  $X/X_0=1.1$  이후부터 약  $X/X_0=2.0$ 까지는 예측한 모든 해석조건의 결과들이 큰 차이를 보이지 않으나,  $RLZ k-\epsilon$  난류모델이  $X/X_0=2.5$ 까지도 실험값과 더 잘 일치함을 보여주고 있다. 그러나  $X/X_0=2.5$  이후부터는 해석조건에 의해 예측된 분류반쪽이 실험값보다 더 크게 분포됨을 알 수 있다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 두 개의 원형분류를 45°로 충돌 혼

합시켜 형성된 유동구조를 수치해석으로 예측한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 유동축 중심선 상에 따른 X축 방향 성분의 평균속도 분포는  $RLZ k-\epsilon$  난류모델이 가장 잘 일치하였으며, 그 중에서도 모델상수  $C_2$ 를 수정한 해석 조건 D의 경우가 가장 우수한 성능을 예측하였다.

2) X축 방향의 위치에 따라 얻어진 Y축 및 Z축 방향으로 발달하는 유동반폭  $b_1$  및  $b_2$ 의 분포는 각각  $1.1 \leq X/X_0 \leq 2.0$ 에서 그리고  $1.1 \leq X/X_0 \leq 2.5$ 에서 기본 모델상수 값들을 적용한  $RLZ k-\epsilon$  난류모델이 가장 잘 일치하고 있다.

이상의 연구결과들을 볼 때, 본 45° 원형충돌분류의 유동구조를 전체의 유동장 범위에서 정확히 예측할 수 있는 난류모델은 찾기가 어려웠으나, 제한적인 X축 위치, 즉  $1.1 \leq X/X_0 \leq 2.0$ 에서만 예측 적용한다면, 45° 원형충돌분류의 유동구조를  $RLZ k-\epsilon$  난류모델로도 충분히 해석 가능함을 알 수 있다.

## 후 기

본 논문은 2009년도 군산대학교 수산과학연구소의 연구비 일부 지원에 의하여 수행되었음.

## 참고 문헌

- 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.
- 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.
- 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.
- J. Andreopoulos and W. Rodi, 1984, "Experimental Investigation of Jets in a Crossflow", J. Fluid Mech., Vol. 138, pp. 93~127.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- M. Popovac and K. Hanjalic, 2007, "Large-Eddy Simulations of Flow over a Jet-Impinging Wall-Mounted Cube in a Cross Stream", Int. J. Heat and Fluid Flow, Vol. 28,

pp. 1360~1378.

16. B. J. Rho and J. K. Kim, 1984, "An Experimental Study on the Turbulent Flow of a 45° Free Cross Jet", Trans. of the KSME, Vol. 8, No. 5, pp. 442~449.
17. B. J. Rho and J. K. Kim, 1986, "Study on the Statistical Turbulent Characteristics of a 45° Circular Cross Jet Flow", Trans. of the KSME, Vol. 10, No. 1, pp. 110~120.
18. B. J. Rho and J. Kim, 1987, "A Comparative Study on the Round Jet and the 45° Cross Jet", J. of the KSAS, Vol. 15, No. 1, pp. 23~34.
19. B. J. Rho, J. C. Choi and S. J. Kang, 1989, "An Experimental Study on the Turbulence Characteristics of a Cross Jet with respect to Cross Angle Variations", Trans. of the KSME, Vol. 13, No. 5, pp. 991~998.
20. 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.
21. Fluent Inc., 2006, FLUENT User's Guide.