

다양한 $k-\epsilon$ 난류모델에 의한 단이 진 벽면분류에 대한 수치해석

서호택* · 윤순현** · 부정숙**

Numerical Analyses on Wall-Attaching Offset Jet with Various Turbulent $k-\epsilon$ Models

H. T. Seo, S. H. Yoon, J. S. Boo

Key words : Wall Jet (벽면분류), Reattachment Length(재부착길이), $k-\epsilon$ Model,
Convergence (수렴), Upwind Scheme

Abstract

Four turbulent $k-\epsilon$ models (i.e., standard model, modified models with streamline curvature modification and/or preferential dissipation modification) are applied in order to analyze the turbulent flow of wall-attaching offset jet. The upwind numerical scheme was adopted in the present analyses. The streamline curvature modification results in slightly better prediction, while the preferential dissipation modification does not. The obtained analytic results will be used as references for further study regarding Reynolds stress model. In addition, this paper introduced a method of increasing nozzle outlet velocity gradually for numerical convergence. Even though the method was simple, it was efficient in view of convergent speed, CPU running time, computer memory storage, programming, etc.

기호 및 약어

C_{ps} : 정압계수 $[=(P_s - P_{atm})/(\frac{1}{2}\rho U_j^2)]$ C_{pw} : 벽면정압계수 $[=(P_w - P_{atm})/(\frac{1}{2}\rho U_j^2)]$ D : 노즐출구 폭 (=21 mm) H : 단 높이 (=2.5D)	k : 난류운동에너지 P_s, P_{atm}, P_w : 정압, 대기압, 벽면 정압 U, V : X, Y 방향의 평균속도 U_j, U_m : 노즐출구 평균속도, 최대 평균속도 $\bar{u}_i \bar{u}_j$: 레이놀즈 응력 tensor X_c, X_R : Potential core 길이, 재부착길이
---	---

* 한국전력기술주식회사(원고접수일 : 99년 1월)

** 부산대학교 기계공학과, 기계기술연구소

- $Y_{1/2}$: U_m 의 반폭(half width)되는 Y축 위치
- ϵ : 난류운동에너지소산율
- ν, ν_{eff} : 동점성계수, 유효 동점성계수
시간평균값의 표시
- STUP** : result of **ST**andard $k-\epsilon$ model by **UP**wind scheme
- MOCUP** : result of **MO**dified $k-\epsilon$ model with streamline **Curvature** by **UP**wind scheme
- MOPUP** : result of **MO**dified $k-\epsilon$ model with **P**referential dissipation modification by **UP**wind scheme
- MOCPOP** : result of **MO**dified $k-\epsilon$ model with streamline **Curvature** and **P**referential dissipation modifications by **UP**wind scheme

1. 서론

단이진 2차원 벽면분류(wall-attaching offset jet ; 이하 WAOJ)는 Fig.1에 나타낸 바와 같이 자유분류와 벽면분류의 복합구조에 더불어 Coanda 효과에 의해 야기되는 재부착, 재순환유동 및 유선의 급격한 곡률 등 복잡한 난류유동장을 형성한다. 특히 재순환영역에서 유동은 유체의 흐름을 머물게 하는 특성이 있으므로 불순물 또는 침전물이 고여 부식을 유발하는 등 공학적으로 매우 중요한 현상을 나타낸다.¹⁾

한 예로 영광3,4호기 원자력발전소 증기발생기

내의 입구 유동은 Fig.1과 유사한 유동을 가지며, 재순환영역에 고인 불순물을 제거하기 위해 모서리와(corner vortex)가 발생하는 하부 벽면에 구멍을 뚫어 불순물을 외부로 방출하는 취출계통(blowdown system)이 설비되어 있다.²⁾

이와 같은 재부착에 관한 연구는 최근 들어 측정장비의 발달과 측정기술의 고도화에 힘입어 더욱 활발해지고 있는 실정이다.^{3,4)}

Sawyer^{5,6)}는 단이진 평판에 평행하게 분사되는 2차원 곡률진 재부착분류에 대한 실험적 연구에서 유선의 곡률이 분류의 유입 특성에 상당한 영향을 미친다고 밝혔다.

Nozaki 등⁷⁾은 WAOJ에 대해 두 벽의 각도를 둔 각으로 변화시킴에 따른 재부착길이에 대한 연구를 하였는데, 두 벽의 교각이 150° 이상이 되면 재부착 현상이 일어나지 않는 단순한 자유분류가 됨을 밝혔다.

부정숙 등⁸⁾은 WAOJ에 대해 열선풍속계와 피토판으로 난류인자를 측정하여 이들 측정치의 통계적 처리에 의해 난류구조를 연구한 바 있으며, 윤순현 등⁹⁾은 WAOJ와 평면 벽면분류에 있어 난류구조를 비교 분석하였다.

Durst & Rastogi¹⁰⁾는 수직벽을 지나는 유동에서 표준 $k-\epsilon$ 모델은 재부착 길이가 실제의 측정값보다 매우 짧게 나타났으며, 유선의 곡률효과를 고려한 수정된 $k-\epsilon$ 모델의 경우 비슷하게 예측되고 있음을 보였다.

Ljuboja & Rodi¹¹⁾는 정지 및 균일유동장에 분사되는 평면벽면분류에서 $k-\epsilon$ 모델이 레이놀즈 응력모델보다 더 간편하게 적용될 수 있음을 밝혔으며, Gibson & Younis¹²⁾는 곡률진 벽면분류에 관해 곡률효과를 고려한 난류모델의 수치적 예측 결과를 연구하였는데, 평균유동장에 대해서는 다른 연구의 실험결과와 잘 일치하나, 난류유동장에 대해서는 잘 맞지 않음을 보였다.

서호택¹³⁾은 WAOJ에 대한 실험결과⁹⁾를 표준 $k-\epsilon$ 모델과 Leschizner 및 Rodi¹⁴⁾가 제시한 유선곡률효과 및 preferential dissipation을 모두 고려한 $k-\epsilon$ 모델(LRM)을 upwind 기법으로 해석하였는데, LRM이 표준 $k-\epsilon$ 모델보다 오히려 실험치와 상이하였다.

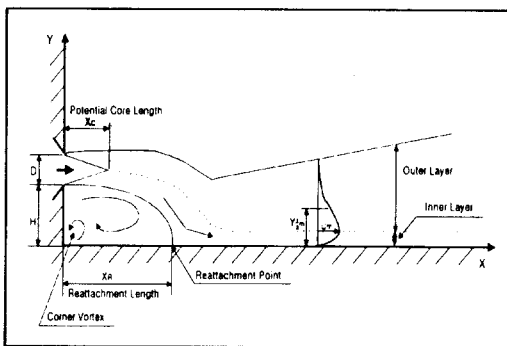


Fig. 1 Flow field of wall-attaching offset jet

윤순현 등¹⁵⁾은 상기 유동에 대해 표준 $k-\epsilon$ 모델과 LRM 및 박상우 모델을 모두 적용한 모델과 비교 분석하였는데, 포텐셜 코어 길이의 경우에는 유선곡률 효과에 대한 물리적 의미가 가미된 박상우 모델이 좋은 결과를 보임을 밝혔다.

이상과 같은 연구동향을 살펴보면, 최근 들어 재부착과 같은 복잡한 유동을 가지는 분류에 관한 연구는 많이 수행하고 있지만, WAOJ에 대한 적합한 난류모델의 검증에 대해서는 더 많은 연구가 필요함을 알 수 있다.

따라서, 본 논문은 Fig.1의 유동에 대한 부정속 등⁸⁾ 및 윤순현 등⁹⁾의 실험 연구를 토대로 이전 수치해석 연구^{13),15)}에서 수행하지 못했던 격자수 및 격자선 간격 등에 대한 민감도분석(sensitivity study) 수행 및 유선곡률수정과 preferential dissipation 수정에 따른 영향을 개별적으로 비교 분석하며, 특히 발산을 막기 위해 사용되었던 간단하면서도 효과적인 기법을 소개하고자 한다.

본 해석시 사용된 수치적 기법은 일차정확(first-order accurate) upwind 기법¹⁴⁾이며, 이로 인해 얻어진 결과는 추후 계속될 대수 레이놀즈 응력모델에 의한 해석결과와의 정량적 비교 및 분석을 위한 기초자료로 활용될 것이다.

2. 난류모델

2.1 표준 $k-\epsilon$ 모델

표준 $k-\epsilon$ 모델¹⁶⁾은 연속방정식, 운동량방정식, 그리고 난류운동에너지(k)와 난류운동에너지소산율(ϵ)에 관한 2개의 전달방정식으로 구성되어 있으며, 기본식인 연속방정식과 운동량방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

$$U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \overline{u_i u_j} \right) \tag{2}$$

여기서 U_i, U_j 와 $\overline{u_i}, \overline{u_j}$ 는 각각 평균속도 성분과 난류변동 성분을 의미하며 P, ρ, μ 는 각각 압력, 유

체의 밀도, 점성계수를 뜻한다. 식 (2)의 레이놀즈 응력을 Boussinesq의 와점성 (eddy-viscosity) 개념으로 나타내면

$$-\overline{u_i u_j} = \nu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \tag{3}$$

로 되고, 여기서 ν_t 는 유체의 성질이 아니라 난류 상태를 나타내는 와점성계수이다. 식 (2)에 식 (3)을 도입하면

$$U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P_t}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu_{eff} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) \tag{4}$$

$$\nu_{eff} = \nu + \nu_t = \nu + C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \tag{5}$$

로 되며, 상기 식 (4)에서 $P_t = P + \frac{2}{3} \rho k$ 이다.

k 및 ϵ 에 대한 전달방정식(표준 $k-\epsilon$ 모델)은

$$\frac{\partial(\rho U_i k)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G - \rho \epsilon \tag{6}$$

$$\frac{\partial(\rho U_i \epsilon)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\frac{\mu_{eff}}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right] + C_1 \frac{\epsilon}{k} G - C_2 \frac{\epsilon^2}{k} \tag{7}$$

로 되고, 여기서 G 는 평균유동에 의한 난류에너지의 생성항을 뜻하며

$$G = \mu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \tag{8}$$

로 표현된다. 상기 식 (5), (6) 및 (7)에 나타나는 실험상수값 $C_\mu, \sigma_k, \sigma_\epsilon, C_1, C_2$ 는 각각 0.09, 1.0, 1.3, 1.44, 1.92 이다¹⁷⁾.

2.2 수정 $k-\epsilon$ 모델

표준 $k-\epsilon$ 모델은 유동의 외적변형률 효과를 잘 반영하지 못하기 때문에 많은 수정된 모델이 개발되었으나, 본 연구에서는 널리 사용되고 있는 유선곡률효과를 고려한 유선곡률수정모델과 난류운동에너지소산율방정식에서 생성항을 수정한 preferential dissipation 수정모델을 적용하였다.

(1) 유선곡률수정

Leschziner & Rodi¹⁸⁾는 대수레이놀즈 응력모델로부터 유선곡률의 기하학적인 수식을 유도하여

난류점성계수의 비례상수를 수정한 $k-\epsilon$ 모델을 개발했다. 난류에너지가 국부적 평형상태에 있다고 가정하면 대수방정식은

$$\frac{\overline{u_i u_j}}{k} = \frac{1-\beta}{\alpha\epsilon} P_{ij} - \frac{2}{3} \frac{\delta_{ij}}{\alpha} (1-\alpha-\beta) \quad (9)$$

와 같이 된다. 여기서 α, β 는 Launder 등¹⁹⁾에서 사용된 난류모델 상수로서 각각 1.5 및 0.6이다.

한편, 유선곡률의 국부적 반경을 R_c , 대칭축으로부터의 거리를 r 이라 하고, 직교좌표계 (i, j) 에서의 평균유동에 의한 난류에너지 생성항(P_{ij})을 유선좌표계 (s, n) 로 나타내면 다음과 같다. 여기서, s 및 n 은 각각 유선의 접선 및 법선 방향 좌표를 뜻한다.

$$P_{ss} = -2\overline{u_s^2} \frac{\partial U_s}{\partial s} - 2\overline{u_s u_n} \left(\frac{\partial U_s}{\partial n} + \frac{U_s}{R_c} \right) \quad (10)$$

$$P_{nn} = -2\overline{u_n^2} \frac{\partial U_n}{\partial n} + 4\overline{u_s u_n} \frac{U_s}{R_c} \quad (11)$$

$$P_{ns} = -\overline{u_n^2} \frac{\partial U_s}{\partial n} + (2\overline{u_n^2} - \overline{u_n^2}) \frac{\partial U_s}{R_c} + \overline{u_n u_s} \frac{U_r}{r} \quad (12)$$

식 (9) ~ (12)로부터 레이놀즈 난류응력은

$$-\overline{u_s u_n} = \frac{-K_1 K_2}{[1+8K_1^2 \frac{k^2}{\epsilon^2} (\frac{\partial U_s}{\partial n} + \frac{U_s}{R_c}) \frac{U_s}{R_c}]} \frac{k^2}{\epsilon} \left(\frac{\partial U_s}{\partial n} - \frac{U_s}{R_c} \right) \quad (13)$$

와 같이 얻을 수 있고, 식 중에서 K_1, K_2 는 각각

$$K_1 = \frac{1-\beta}{\alpha}, \quad K_2 = \frac{2}{3} \frac{1-\alpha-\beta}{\beta} \text{이다.}$$

이상으로부터 식 (5)의 C_μ 의 수정항이 다음과 같이 얻어진다.

$$C_\mu = \frac{-K_1 K_2}{[1+8K_1^2 \frac{k^2}{\epsilon^2} (\frac{\partial U_s}{\partial n} + \frac{U_s}{R_c}) \frac{U_s}{R_c}]} \quad (14)$$

(2) Preferential Dissipation 수정

Leschziner & Rodi¹⁴⁾는 식 (7)에서 생성항 ($P_\epsilon = C_1 \frac{\epsilon}{k} G$)을 유선방향의 전단변형률 S_{ns} 를

이용해서

$$P_\epsilon = \frac{\epsilon}{k} (C'_1 G - C''_1 v_t S_{ns}^2) \quad (15)$$

와 같이 변형시켰으며, 상수의 값 C'_1 및 C''_1 이 각각 2.24 및 0.8이 된다고 하였다.

3. 수치적 해석 방법

3.1 주요 가정

본 해석을 위해 비압축성 유체 및 정상상태를 가정하였으며, 특히 2차원 유동으로 가정하고 부력장을 무시하여 모델링에서 부력에 의한 항은 생략하였다.

3.2 해석방법

수치적 해석방법은 프로그래밍의 방법, 제어체적의 선정, 격자수 및 간격, 경계조건, 컴퓨터 기종 등에 따라 그 결과가 달라지므로 다음과 같은 주요 관점을 민감도분석을 통해 하나씩 최적화시켜가며 해석을 하였다. 본 연구에서는 난류유동 해석을 위해 개발된 CHAMPION 코드¹⁸⁾를 연구목적에 부합하도록 프로그래밍을 수정하여 Pentium-II PC 및 MS-FORTRAN Ver. 4.0을 사용하여 수치해석을 수행하였다.

(1) 제어체적 선정

열선풍속계와 피토판에 의한 실험치를 분석한 결과^{8,9)}, $X=14D$ 이후부터 정압은 거의 균일하게 대기압이었으며, $X=18D$ 이후부터 유동이 등방성이고 국부적 평형상태에 도달함을 알았다. 또한, 실험결과에 의하면 $Y=6D$ 이후부터는 주류방향 속도 $U \approx 0$, 레이놀즈 전단응력 $uv \approx 0$ 이므로 이를 토대로 본 해석목적에 부합하기에 충분한 $X=34D$, $Y=9.7D$ 되는 부분을 최대 격자범위로 잡았다.

(2) 격자수

수치해석 결과에 영향을 주지 않을 정도의 적정 격자수를 결정하기 위해 표준 $k-\epsilon$ 모델을 사용하여 서로 다른 3가지 격자계 (40×32 , 55×37 , 70×45)의 격자수 변화에 따른 해의 의존성을 검토하

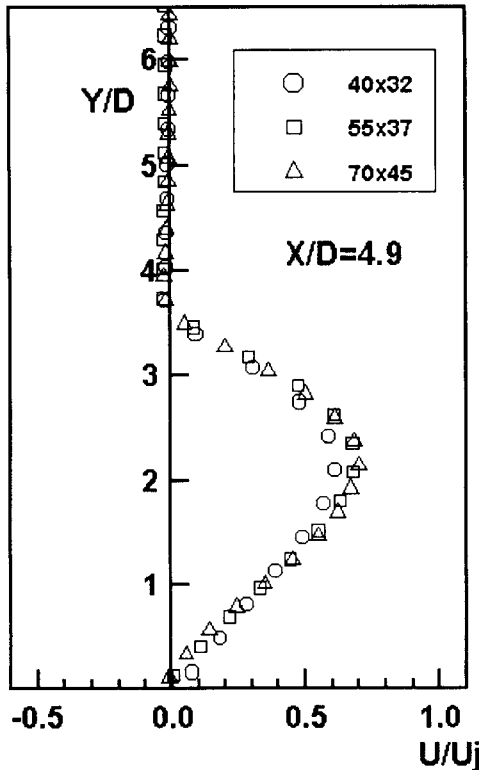


Fig. 2 Grid dependency of standard $k - \epsilon$ model

였다. 그 결과, Fig.2에서와 같이 55×37의 격자계에서부터 해의 비의존성을 발견하였으며, 본 해석에서는 이를 적용하였다.

(3) 격자선 간격

격자선 간격에 따른 계산정확도는 유동 형태 및 해석모델에 의해 달라지므로 최적 간격을 도출하기 위해 격자선 간격을 Fig.1의 원점을 기준으로 X, Y축 방향으로 1.00, 1.00의 균일 간격을 시작으로 하여 격자선 간격 증가비를 X축 및 Y축 방향으로 각각 0.005씩 증가하면서 비교한 결과, 1.04, 1.02로 선정한 경우가 가장 좋은 예측결과를 산출하였다. 즉, 재부착점길이에 대한 실험치는 7.5D이었는데, 표준 $k - \epsilon$ 모델의 예측결과는 4.88D에서 5.34D로 향상되었다. 이보다 증가된 격자 간격은 상대적으로 재부착점 및 하류 부근의 격자간격이 넓어짐을 뜻하므로 계산 결과가 부정확하였고, 경우에 따라서는 발산 또는 진동하는 요인이 되었다.

(4) 경계조건

분류입구, 즉 노즐출구에서 초기값은 실험값과 동일하게 하였는데, 노즐출구속도 U_j 는 30m/sec, $V=0$ 인 균일 유동으로, 초기 난류운동에너지는 실험결과에서 중력장 방향의 속도변동치를 고려해서 $k_j = \frac{3}{4}(u^2 + v^2)$ 로 가정하였으며, u, v 의 난류강도는 모두 실험치인 0.2%로 선정하였다. 노즐출구의 ϵ_j 은 Prandtl에 의한 혼합길이를 참조하여 $k_j^{3/2} / (\frac{1}{2} C_D D)$ 을 대입하였으며, 여기서 C_D 는 상수이며 k_j 는 노즐출구에서의 실험값이다. 그리고, 기타 경계조건은 Table 1과 같다.

Table 1. Boundary conditions for the flow geometry

Variable/ Boundary	U	V	k	ϵ	P	
Jet inlet X/D=0	Exper.	0	Exper.	$k_j^{3/2} / (\frac{1}{2} C_D D)$	-	
Free Surface Y/D=9.7	0	$\frac{\partial V}{\partial y} = 0$	$\frac{\partial k}{\partial y} = 0$	$\frac{\partial \epsilon}{\partial y} = 0$	P_{atm}	
Exit X/D=34	$\frac{\partial U}{\partial x} = 0$	$\frac{\partial V}{\partial x} = 0$	$\frac{\partial k}{\partial x} = 0$	$\frac{\partial \epsilon}{\partial x} = 0$	-	
Wall	X/D=0	0	Wall Fun.	Wall Fun.	Wall Fun.	-
	Y/D=0	Wall Fun.	0	Wall Fun.	Wall Fun.	-

한편, 운동량방정식의 경계조건 및 난류운동에너지전달방정식의 생성항으로서 대수벽함수¹⁸⁾를 적용하였다.

(5) 이완계수

이완계수 역시 수치해석의 수렴에 있어 중요한 요인으로 이에 대한 민감도분석을 수행한 결과 U 및 V의 이완계수는 0.5로, k, ϵ 및 ν 의 이완계수는 0.3으로 선정하는 것이 수렴속도가 가장 빨랐다.

3.3 노즐출구속도 증가 기법

상기 3.2절에 기술한 바와 같이 주요 변수에 대해 수치해 민감도분석을 수행하였지만, 본 유동과 같이 재순환영역을 형성하며 U_j 가 30m/sec되는 높은 레이놀즈 수의 유동인 경우 수치해석의 발산을 피할 수는 없었다. 이와 같은 발산이 시작되는 주요 지점은 기존 연구의 평가와는 달리 재부착점 부근이 아니라 Fig.1에서의 재순환영역과 분류의 경계지점이었다.

U_j 의 변화에 의한 재부착길이의 변화율을 기준으로 한 수렴도의 추이를 분석한 결과, Fig.3에 나타난 바와 같이 U_j 가 30m/sec인 경우에는 계산 초기에 발산하나, 그 속도가 0.05 m/sec인 경우 수렴이 가능함을 파악하였다. 그 주된 이유는 높은 레이놀즈수를 가진 유동인 경우 운동량방정식 및 압력수정방정식에서 수정된 속도 성분에 비해 유체가 확산되는 성분이 매우 작아 주로 재순환영역과 분류와의 경계 격자점 부근에서 주류속도가 국소적으로 급격히 증가되어 발산하는 것으로 추정된다. 이런 발산을 피하기 위해서 기존 수치해석 연구^{13),15)}에서는 unsteady 방식의 fully implicit discretization equation (FIDE)을 사용하였다.

하지만, FIDE의 모델링은 다소간 복잡하며 추가적인 전산기억용량을 요구하므로 본 연구에서는 초기조건을 변경하는 기법을 사용하였다. 즉, 본 연구에서는 U_j 가 15m/sec에서 30m/sec까지의 범위에서 재부착길이가 변하지 않는다는 실험결과⁸⁾에 착안하여 초기 속도를 다음과 같이 변환하였다.

$$\begin{aligned} \Delta U_{j,new} &= \gamma \cdot \Delta U_{j,old} \\ U_{j,new} &= U_{j,old} + \Delta U_{j,new} \end{aligned} \quad (16)$$

상기 식 (16)에서 ΔU 는 속도증가분으로서 해석 초기에는 1.0m/sec로 하였으며, γ 는 ΔU 의 증가비로서 1.2로 고정하였다. 또한, 해석초기 U_j 는 0.05 m/sec로 하였다. 이런 식으로 U_j 가 최종속도 30 m/sec가 될 때까지 점차로 증가시켰으며, 최종 원하는 속도 이전의 임의의 U_j 에서는 해석의 반복횟

수는 10회(1회 반복시 약 0.5초의 CPU 시간소요)로 하였다. 이상과 같이 노즐출구속도를 점차로 증가시키면서 수치해석을 수행하는 방법(이하 노즐출구속도 증가 기법)을 적용한 결과, Fig.3에 나타난 바와 같이 해석의 안정성을 얻을 수 있었다. 이런 경우 기존의 계산방법보다 프로그래밍이 매우 간단하며, 필요한 컴퓨터의 기억용량을 최소화할 수 있었으며, CPU 가동시간의 단축, 수렴도 등에서 매우 좋은 결과를 산출하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 재부착길이

Fig.1에서 단의 높이(H)와 노즐출구 폭(D)의 비가 2.5인 WAOJ의 수치적 해석으로 식 (14)의 유선곡률수정 및 식 (15)의 preferential dissipation 수정의 적용여부에 따른 결과와 실험결과를 종합하고, 또한 기존 수치 연구결과^{13),15)}와 비교하여 Table 2에 나타내었다.

Potential core length(X_c)는 실험의 경우 3.8D 인데 반해 STUP는 2.19D, MOCUP는 2.69D, MOPUP는 2.10D, 상기 2가지 수정을 모두 반영한 MOCPOP는 1.92D를 보였다. 수치계산에서 구한 X_c 는 유한한 격자수로 인하여 U_j 대비 1%의 오차가 일어나는 곳까지로 하였다.

재부착을 가진 난류유동장의 해석에 있어서, 재부착길이(X_R)는 일반적으로 그 해석의 정확도를 평가하는 중요한 척도의 하나이다. Table 2에서 나타난 바와 같이 실험결과는 $X_R/D=7.5$ 인데 반해, STUP, MOCUP, MOPUP 및 MOCPOP의 경우 각각 5.34, 5.32, 4.91, 4.47로서 약 30% 이상의 오차를 보이고 있다. 여기서 재부착길이는 벽면전단 응력을 기준으로 하여 산출하였다.

이상으로부터 유선곡률을 고려한 경우 수치해석의 계산결과가 향상됨을 보이나, preferential dissipation 수정은 오히려 바람직하지 않은 것으로 나타났다. 이는 난류에너지 소산이 재순환유동 등에 의해 실질 유동보다 크게 나타나서 유동의 확산이 확대되었기 때문이다.

한편, 상기 계산결과를 이전의 연구결과와 비교

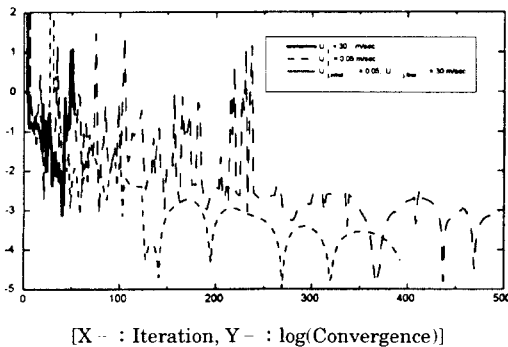


Fig. 3 Convergence according to nozzle exit velocity variation

Table 2. Analytic results and comparison with the previously analytic results

Character- istic Model	Grid	SCM ¹⁾	PDM ²⁾	CTS ³⁾	Potential Core Length (X/D)		Reattachment (X/D)		Iteration	Conver- gence	Remarks
					$X_c^{4)}$	Error ⁵⁾	X_R	Error ⁵⁾			
Standard $k-\epsilon$	55×37	X	X	X	2.19	42%	5.34	29%	590	0.001%	STUP
Modified $k-\epsilon$	55×37	O	X	X	2.69	29%	5.32	29%	600	0.003%	MOCUP
Modified $k-\epsilon$	55×37	X	O	X	2.10	45%	4.91	35%	620	0.002%	MOPUP
Modified $k-\epsilon$	55×37	O	O	X	1.92	49%	4.47	40%	610	0.002%	MOCUP
Standard $k-\epsilon$	36×34	X	X	X	2.20	42%	4.68	38%	700	1%	Ref. (13)
Modified $k-\epsilon$	36×34	O	O	X	2.05	46%	4.43	41%	800	1%	Ref. (13)
Standard $k-\epsilon$	40×37	X	X	X	1.89	50%	5.08	32%	700	1%	Ref. (15)
Modified $k-\epsilon$	40×37	O	O	O	2.33	39%	4.90	35%	700	1%	Ref. (15)

Note

1) SCM : Streamline Curvature Modification

3) CTS : Composite Time Scale

5) Error = $\frac{X_{exp} - X_{num}}{X_{exp}} \times 100(\%)$ (X_{exp} : Experimental result, X_{num} : Numerical result)

O : Application X : Non-Application

2) PDM : Preferential Dissipation Modification

4) Mean velocity in potential core ; $U = 0.99U_j$

해보면, 3.3절의 노즐출구속도 증가 기법을 사용한 경우가 unsteady 방식의 FIDE를 사용하는 경우보다 수렴도 및 계산속도에 있어 상당한 효과가 있고, 격자수의 증가에 따라 계산결과가 보다 더 정확해짐을 확인할 수 있다. 본 연구에서는 Fig. 3에서와 같이 재부착길이를 기준으로 한 최대 수렴도는 10^{-5} 부근이었으므로 어느 정도의 여유를 고려하여 5×10^{-5} 를 수렴판정조건으로 선정하였다.

4.2 평균속도

Fig.4는 실험 및 수치해석결과에 의한 평균속도 분포를 나타낸 것이다. $X/D=2$ [Fig.4(a)]에서 $0 \leq Y/D \leq 2$ 는 재순환영역인데 모든 $k-\epsilon$ 모델의 결과치가 실험치와 상이함을 알 수 있다. 한편, 재부착점 이후 하류로 갈수록 수치적 해석결과가 실험치와 상이함을 보이나, MOCUP의 경우 타 모델에 비해 개선 효과가 다소간 나타남을 보인다. 아울러, Fig.4(c), (d), (e) 및 (f)에서 보인 바와 같이 국부적 최대속도(U_m)의 지점이 실험치보다 높은 지점에서 형성됨을 보인다. 이는 upwind 기법이 보유했고

있는 skewness error 및 3.2절에서 기술한 대수벽 함수의 부적합성 때문인 것으로 파악되므로 저레이놀즈수 모델 적용 등 추가적인 연구가 필요하다.

Fig.5는 주류방향 최대속도 U_m 에 대한 변화를 대수로 나타낸 것으로 이로부터 각 모델들의 타당성 여부를 정확히 파악할 수 있다. 전반적으로 계산치는 정성적으로는 실험치와 잘 일치하고 있으며, 특히 유선곡률이 급격히 변하는 구간 및 자체 보존 (self-preserving) 구간에서의 대수 속도변화는 $-\frac{1}{2}$ 의 기울기를 가지고 있는 것으로 알려져 있는데, 본 해석결과 역시 이와 유사함을 보이고 있다. 한편, 정량적으로는 실험치와 비교적 큰 차이를 보이고 있으며, STUP 및 MOCUP의 경우는 MOPUP 및 MOCUP에 비해 보다 근접함을 보인다.

Fig. 6은 유동방향의 분류반폭(half width)의 변화를 나타낸 것으로 STUP 및 MOCUP는 재부착점 부근에는 실험치와 상이하나, 하류로 갈수록 근접하는 반면 MOPUP 및 MOCUP는 큰 차이를 보임을 알 수 있다. 이로써 기존 연구^{13), 15)}의 결과와

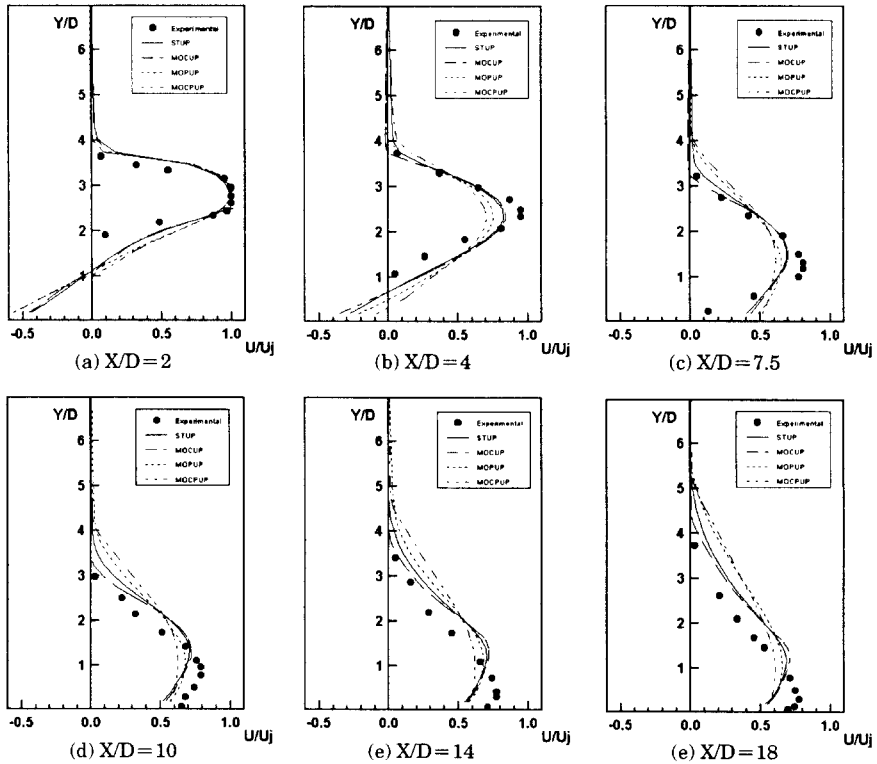


Fig. 4 Mean velocity profiles along streamwise

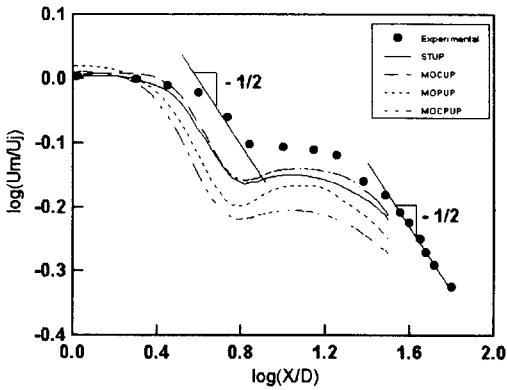


Fig. 5 Logarithmic plots of the maximum velocity variations

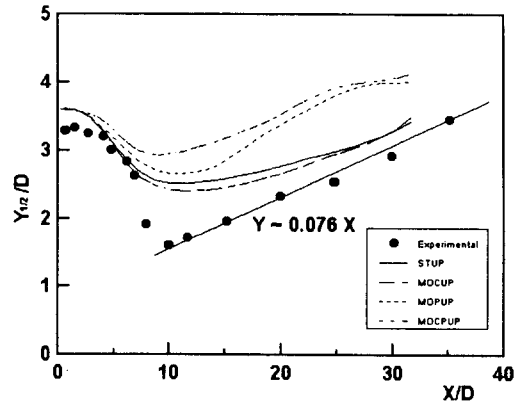


Fig. 6 Variation of jet half width

4.3 정압분포

는 달리 하류로 갈수록 preferential dissipation에 의해 추가된 소산율이 유동을 전반적으로 외부영역으로 확산시키고 있음을 파악할 수 있다. Fig. 4, 5 및 6에서 MOCFUP가 MOPUP보다 더 큰 오차를 보이는 것은 수치적 오차에 기인된 것이다.

Fig. 7은 주류방향의 벽면정압분포를 나타낸 것으로 실험치는 $X/D=2$ 부근에서 매우 큰 흡입압력을 나타내다가 $X/D=6$ 으로 접근하면서 급격히 증가하여 높은 압력구배로 인한 큰 압력요동을 나타내고 있으나, 수치결과들은 재순환영역에서는 실

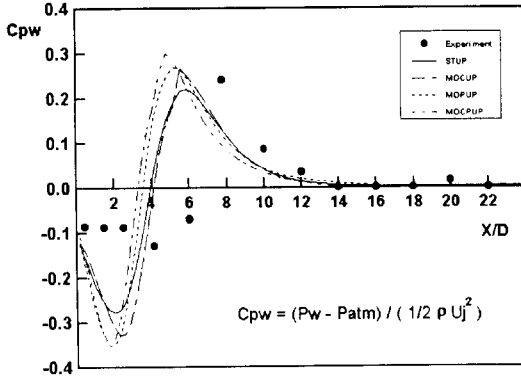


Fig. 7 Wall static pressure distribution

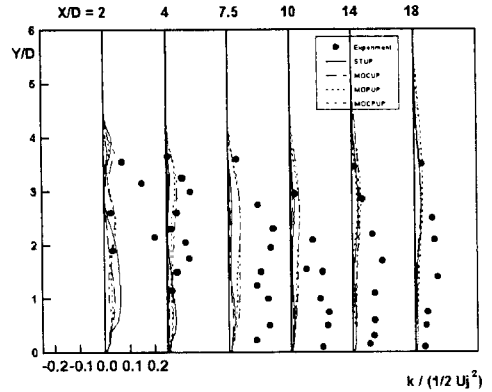


Fig. 9 Turbulent intensity distribution

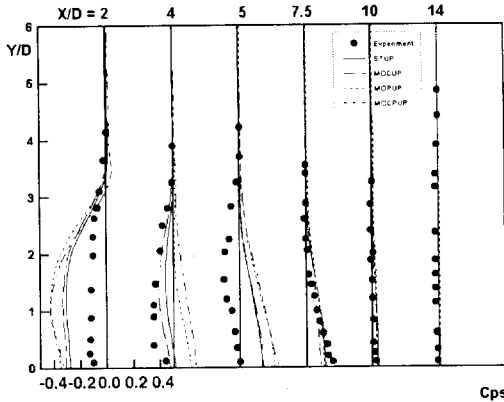


Fig. 8 Static pressure distribution

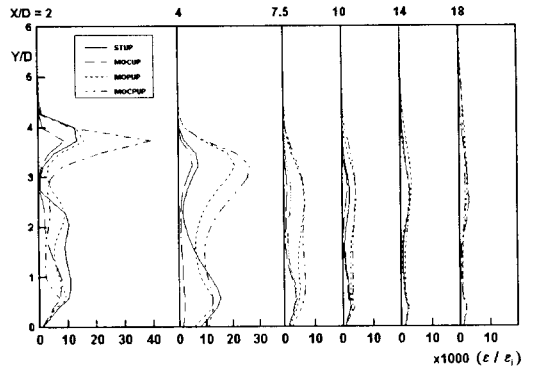


Fig. 10 Dissipation rate distribution

험치와 매우 상이하였다. 이와 같이 재순환영역에서 벽면정압계수가 실험치에 비해 크게 떨어지는 이유는 Fig.4(a) 및 (b)의 재순환영역에서의 속도가 실질 재순환 유체속도보다 매우 크게 해석되기 때문이다.

Fig.8은 X/D=2, 4, 5, 7.5, 10 및 14의 위치에서 Y-방향을 따라 정압분포를 나타낸 것인데 해석 결과들은 역압력구배가 일어나는 재순환영역에서는 실험치와 상이하나, 재부착점 이후에서는 모델의 구분없이 잘 일치함을 보여준다. 재순환영역에서의 불일치는 주로 수치적 오차에 기인된 것이다.

4. 4 난류강도와 난류운동에너지소산율

Fig.9는 난류강도의 분포를 나타내고 있는데 수치해석의 결과는 전구간에 걸쳐 실험치와 매우 상이함을 보이고 있다. 이는 수치적 오차에 기인한

것이 아니라, $k-\epsilon$ 모델이 속도 및 압력과 같은 1차순위(first order) 계산에는 잘 맞으나 난류강도와 같은 2차순위 계산에서는 부적합하기 때문이다. 따라서, 이를 정확히 모사하기 위해서는 고차원 모델 적용이 필요할 것으로 판단된다.

Fig.10은 초기경계조건 ϵ_j 로 표준화시킨 난류운동에너지의 소산율 분포를 나타낸 것인데, X/D=2 및 4에서 매우 큰 값을 가지나 하류로 갈수록 약해짐을 알 수 있다. 특히, 좌표 (X/D=2, Y/D=3.5) 부근에서 가장 큰 소산을 나타내고 있는데 이는 preferential dissipation이 소산율에 추가되었기 때문이다. 아울러, Fig.10에서 MOPUP의 경우가 STUP 및 MOCUP의 경우에 비해 전반적으로 큰 소산율을 보이고 있는데 이 이유는 식 (7) 및 (8)의 소산율이 유선곡률과 매우 밀접한 관계를 가지기 때문이다.

Fig.9 및 10의 경향과 Table 2의 X_R 에 대한 비

교표를 종합하면, 난류강도가 클수록 유동이 확산되어 재부착길이가 짧아짐을 알 수 있다.

5. 결 론

WAOJ의 난류 특성 및 난류모델에 대한 예측성을 평가하기 위하여 upwind 기법을 사용하여 표준 $k-\epsilon$ 모델과 유선곡률효과 및 preferential dissipation을 각각 및 종합적으로 고려한 수정 $k-\epsilon$ 모델들을 이용하여 수치적 해석을 한 결과, 다음과 같은 주요 결론을 얻었다 :

(1) WAOJ의 수치적 해석에 있어 주된 발산 시작지점은 재순환영역과 분류의 경계지점이었으며, 그 발산이유는 운동량방정식 및 압력수정방정식에서 수정된 속도 성분에 비해 유체가 확산되는 성분이 매우 작아 재순환영역과 분류와의 경계 격자점 부근에서 주류속도가 국소적으로 급격히 증가하기 때문이다.

(2) 계산수행시 발산을 막기 위해 기존의 unsteady 방식의 fully implicit discretization equation 대신에 노즐출구속도를 점차로 증가시키는 방법을 사용하였는데, 수렴성, 프로그래밍, 컴퓨터의 기억용량, CPU 가동시간 측면 등에서 바람직하였다.

(3) 실험치와 4가지의 $k-\epsilon$ 모델의 해석 결과를 비교한 결과, 유선곡률수정만을 고려한 수정 모델이 가장 좋은 결과를 산출하였으나 개선효과는 크지 않았고, preferential dissipation을 반영한 수정모델은 만족할만한 결과를 산출하지 못하였다.

참고문헌

- 1) Kim, J., Kline, S.J. and Johnston J.P., "Investigation of a Reattaching Turbulent Shear Layer," Trans. of the ASME, Vol. 102, pp. 302~308, 1980.
- 2) KEPCO, "Final Safety Analysis Report for YGN 3&4," Vol. 15, Chap. 10, 1992.
- 3) 김사량, 유정열, "자유흐름 난류강도가 후향계단 유동에 미치는 영향에 미치는 영향에 대한 실험," 대한기계학회논문집 제 19권 제 9호, pp. 2297~2307, 1995.
- 4) Yoo, H.S., Yang, G.Y., Choi, M.S. and Lee, J.S., "An Experimental Study of Heat Transfer and Fluid Flow on the Semi-Circular Concave Surface Cooled by Jet Impingement," Trans. of the KSME, Vol. 20, No. 9, pp. 2991~3006, 1996.
- 5) Sawyer, R.A., "The flow due to a two-dimensional jet issuing parallel to a flat plate," J. Fluid Mech., Vol. 9, pp. 543~560, 1960.
- 6) Sawyer, R.A., "Two-dimensional reattaching jet flows including the effects of curvature on entrainment," J. Fluid Mech., Vol. 17, pp. 481~496, 1963.
- 7) Nozaki, T., Hatta, K. and Nakashima, M., "Reattachment Flow Issuing from a Finite Width Nozzle (Report 3)," Bulletin of the JSME, Vol. 25, No. 200, pp. 196~203, 1982.
- 8) 부정숙, 김경천, 박진호, 강창수, "2차원 난류 Stepped Wall Jet의 유동 특성," 대한기계학회논문집 제 9권 제 6호, pp. 732~742, 1985.
- 9) Yoon, S.H., Kim, K.C., Kim, D.S. and Chung, M.K., "Comparative Study of a Turbulent Wall-Attaching Offset Jet and a Plane Wall Jet," J. KSME, Vol. 7, No. 2, pp. 101~112, 1993.
- 10) Durst, F. and Rastogi, A.K., "Turbulent Flow over Two-Dimensional Fense," Proceedings of 2nd Symposium of Turbulent Shear Flows", Imperial College, pp. 16.30~16.38, 1979
- 11) Ljuboja, M. and Rodi, W., "Calculation of Turbulent Wall Jets With an Algebraic Reynolds Stress Model," Trans. of the ASME, Vol. 102, pp. 350~356, 1980.
- 12) Gibson, M.M. and Younis, B.A., "Modeling the Curved Turbulent Wall Jet", A.I.A.A., Vol. 20, pp. 1707~1712, 1982.
- 13) 서호택, "단이 진 2차원 벽면분류에 대한 수치적 해석", 석사학위논문, 부산대학교, 1987.
- 14) Leschziner, M.A. and Rodi, W., "Calculation of Annular and Twin Parallel Jets Using Various Discretization Schemes and Turbulence Model Variations," J. of Fluid Eng. ASME, Vol. 103, pp. 352~360, 1981.
- 15) 윤순현, 엄운섭, 정명균, "단이 진 2차원 벽면분류에 대한 수치 해석," 대한기계학회논문집 제 12권 제 4호, pp. 865~875, 1988.
- 16) Launder, B.E. and Spalding, D.B., "The numeri-

cal computation of turbulent flow," Trans. of the ASME, Vol. 3, pp. 269~289, 1974.

- 17) Launder, B.E, Reece, G.J. and Rodi, W., "Progress in the development of a Reynolds-stress turbulence closure," J. Fluid Mech., Vol. 68, pp. 537~566, 1975.
- 18) Kollman, W., "Prediction Methods for Turbulent Flows," McGraw-Hill International Book Co., pp. 259~349, 1980.

저 자 소 개



서호택 (徐鎭濤)

1960년 8월생. 1983년 부산대학교 공과대학 기계공학과 졸업. 1987년 부산대학교 대학원 기계공학과 졸업(석사). 1999년 동대학원 수료(박사과정). 1987년~1996년 한국원자력연구소 선임연구원. 1997년~현재 한국전력기술(주) 차장. 당학회 회원.
전화 : 042-868-8938
E-mail : htseo@ns.kopec.co.kr



윤순현 (尹燁鉉)

1950년 8월생. 1977년 부산대학교 공과대학 기계공학과 졸업. 1979년 한국과학기술원 기계공학과 졸업(석사). 1992년 한국과학기술원 기계공학과 졸업(박사). 1980년~현재 부산대학교 기계공학부 교수. 당학회 회원.
전화 : 051-510-2314
E-mail : yshyoon@hyowon.cc.pusan.ac.kr



부정숙 (夫積淑)

1944년 7월생. 1968년 부산대학교 공과대학 기계공학과 졸업. 1975년 경북대학교 대학원 기계공학과 졸업(석사). 1986년 동대학원 졸업(박사). 1972년~현재 부산대학교 기계공학과 교수. 당학회 회원.
전화 : 051-510-2302
E-mail : ysboo@hyowon.cc.pusan.ac.kr