

다양한 k-ε 난류모델과 Skew-Upwind 기법에 의한 단이진 벽면분류에 대한 수치해석

서호택* · 부정숙**
(1999년 7월 5일 접수)

Numerical Analyses on Wall-Attaching Offset Jet with Various Turbulent k-ε Models and Skew-Upwind Scheme

Ho Taek Seo and Jung Sook Boo

Key Words: Wall Jet(벽면분류), Reattachment Length(재부착길이), Convergence(수렴), Skew-Upwind 기법, k-ε 모델

Abstract

Four turbulent k-ε 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. For numerical convergence, this paper develops a method of slowly increasing the convective effect induced by skew-velocity in skew-upwind scheme (hereafter called Partial Skew-upwind Scheme). Even though the method was simple, it was efficient in view of convergent speed, computer memory storage, programming, etc. The numerical results of all models show good prediction in first order calculations (i.e., reattachment length, mean velocity, pressure), while they show some deviations in second order (i.e., kinetic energy and its dissipation rate). Like the previous results obtained by upwind scheme, the streamline curvature modification results in better prediction, while the preferential dissipation modification does not.

기호설명

Cps : 정압계수 $[= (P_s - P_{atm}) / (\frac{1}{2} \rho U_j^2)]$
 Cpw : 벽면정압계수 $[= (P_w - P_{atm}) / (\frac{1}{2} \rho U_j^2)]$
 D : 노즐출구 폭 (= 21 mm)
 H : 단 높이 (= 2.5D)
 k : 난류운동에너지
 Ps, Patm, Pw : 정압, 대기압, 벽면 정압
 U, V : X, Y 방향의 평균속도
 Uj, Um : 노즐출구 평균속도, 최대 평균속도
 uiuj : 레이놀즈 응력 tensor
 Xc, XR : Potential core 길이, 재부착길이
 Y1/2 : Um의 반폭(half width)되는 Y축 위치

ε : 난류운동에너지소산율
 μ, μ_{eff} : 점성계수, 유효 점성계수
 ν, ν_{eff} : 동점성계수, 유효 동점성계수
 — : 시간평균값의 표시
 PD : Preferential Dissipation
 STSK : result of STandard k-ε model by SKew-upwind scheme
 MOCSK : result of MOdified k-ε model with streamline Curvature by SKew-upwind scheme
 MOPSK : result of MOdified k-ε model with Preferential dissipation modification by SKew-upwind scheme
 MOCPSK : result of MOdified k-ε model with streamline Curvature and Preferential dissipation modifications by SKew-upwind scheme

* 회원, 한국전력기술주식회사

E-mail : htseo@ns.kopec.co.kr

TEL : (042)868-8738 FAX : (042)861-3619

** 회원, 부산대학교 기계공학과, 기계기술연구소

1. 서론

최근들어 컴퓨터의 급격한 발달에 의해 유체 유

동을 수치해석하기 위한 난류모델의 적합성 및 개발 등에 관련된 많은 연구가 이루어지고 있다.

Hanjalic & Launder⁽¹⁾는 고 레이놀즈 형식의 $k-\epsilon$ 모델에서 난류운동에너지소실률방정식에 비회전 변형에 의한 소실률의 생성을 첨가시켜 평면 및 원형 분류와 역압력 구배가 작용하는 경계층 유동에 대한 계산을 수행한 결과, 난류에너지소산을 촉진하는데 수직응력이 전단응력에 비해서 더 큰 영향을 준다고 결론지었다.

김형수 등⁽²⁾은 튜브 뱅크와 같은 곡선경계를 갖는 유동에 대해 표준 $k-\epsilon$ 모델과 Hanjalic & Launder가 개발한 수정 $k-\epsilon$ 모델을 적용한 결과, 모델의 개선효과는 본래의 수정 목적과는 달리 역압력 구배가 작용하는 영역보다는 순압력구배가 작용하는 영역에서 크게 나타났으며, 이는 유선의 휨이 큰 유동의 경우에는 역압력 구배에 의한 영향이 유선의 휨에 의한 영향에 상쇄되기 때문으로 생각하였다.

Isomoto & Honami⁽³⁾는 후향계단유동에서 난류강도의 영향에 대해 연구했는데, 박리 경계층의 벽 가까이에서의 난류강도가 후류에 큰 영향을 미치며, 난류강도가 클수록 재부착길이가 짧아짐을 관찰하였다.

백세진 등⁽⁴⁾은 박리-재부착 이후의 재발달 난류경계층에 대한 실험 및 수치연구에서 표준 $k-\epsilon$ 모델의 경우 재순환 영역에서 역방향의 평균속도가 실험치에 비해 조금 크게 계산됨을 밝혔다.

최동규 등⁽⁵⁾은 표준 $k-\epsilon$ 모델 및 Rodi의 수정 모델을 난류선회제트에 적용한 결과, 표준 $k-\epsilon$ 모델은 난류운동에너지를 실제보다 작게 예측하여 제트의 전개가 느리게 계산됨을 밝혔다.

박태선 등⁽⁶⁾은 감쇄함수의 독립변수를 새로이 정의하여 벽면근접효과 및 벽면에서 떨어진 지역에서의 비평형효과를 반영한 새로운 저 레이놀즈 수 $k-\epsilon$ 모델을 개발하여 후향계단 유동에 적용해 본 결과, 비평형효과를 고려한 경우가 평형상태의 모형보다 좋은 결과를 얻었다.

단이 진 2차원 벽면분류(wall-attaching offset jet; 이하 "WAOJ")는 Fig. 1과 같이 자유분류와 벽면분류의 복합구조에 더불어 Coanda 효과에 의해 야기되는 재부착, 재순환유동 및 유선의 급격한 곡률 등 복잡한 난류유동장을 형성한다. 따라서 난류모델의 적합성을 파악하기 위한 좋은

유동장중 하나이다.

윤순현 등⁽⁷⁾은 상기 유동에 대해 표준 $k-\epsilon$ 모델과 유선곡률수정/Preferential Dissipation (이하 "PD") 수정/박상우 모델을 모두 적용한 모델과 비교 분석하였는데, 수치해석 결과는 난류모델보다는 수치해석기법에 크게 좌우됨을 파악하였다.

하지만, 상기 연구에서 수정모델의 경우 개별적인 분석이 아니라 종합적으로 적용하였기에 개별 수정모델에 의한 개선효과를 파악하기에는 부족하다. 따라서, 서호택 등⁽⁸⁾은 WAOJ에 대해 upwind 기법으로 $k-\epsilon$ 모델과 유선곡률수정 및 PD 수정을 고려한 수정모델을 개별적으로 적용한 결과, 기존 연구결과와는 달리 유선곡률수정을 고려한 경우는 해석결과가 다소간 개선되었으나, PD 수정을 고려한 결과는 오히려 실험치와 많은 차이를 보였다.

본 논문은 Fig. 1의 유동장에 대해 upwind 기법으로 해석한 연구⁽⁸⁾의 후속연구로서 skew-upwind central 기법 (이하 "SK 기법")으로 해석한 연구이며, 부정숙 등⁽⁹⁾ 및 윤순현 등⁽¹⁰⁾의 실험 연구와 기존 수치해석 연구^(7,8)를 토대로 (1) SK 기법 사용에서 발산을 막기 위해 개발한 간단하면서도 효과적인 기법을 소개하고, (2) 표준 $k-\epsilon$ 모델과 유선곡률수정 및 PD 수정을 고려한 수정모델에 따른 영향을 비교 분석하고자 한다.

2. 난류모델

본 연구에 사용된 난류모델은 이미 참고문헌 (8)에 이미 상세히 기술되어 있으므로 제 2절은 이를 간략히 요약하였다.

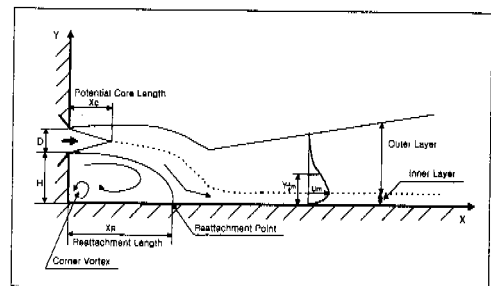


Fig. 1 Flow field of wall-attaching offset jet

2.1 표준 k-ε 모델

표준 k-ε 모델의 k 및 ε에 대한 전달방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial(\rho U_i k)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G - \rho \epsilon \tag{1}$$

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

여기서 G는 평균유동에 의한 난류에너지의 생성항을 뜻하며,

$$G = \mu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) \tag{3}$$

$$\mu_t = \frac{C_\mu}{\rho} \frac{k^2}{\epsilon} \tag{4}$$

로 표현된다. 상기 식 (1)~(4)에 나타나는 실험상수값 $\sigma_k, \sigma_\epsilon, C_1, C_2, C_\mu$ 는 각각 1.0, 1.3, 1.44, 1.92, 0.09이다.

2.2 수정 k-ε 모델

2.2.1 유선곡률수정

Leschziner & Rodi⁽¹¹⁾는 식 (4)의 C_μ 를 다음과 같이 수정하였다.

$$C_\mu = \frac{-K_1 K_2}{[1 + 8K_1^2 \frac{k^2}{\epsilon^2} \left(\frac{\partial U_s}{\partial n} + \frac{U_s}{R_c} \right) \frac{U_s}{R_c}]} \tag{5}$$

여기서 K_1, K_2 는 각각 $K_1 = \frac{1-\beta}{\alpha}$,

$K_2 = \frac{2}{3} \frac{1-\alpha-\beta}{\alpha}$ 이며, α, β 는 난류모델 상수로서 각각 1.5 및 0.6 이다.

2.2.2 Preferential Dissipation 수정

Leschziner & Rodi(11)는 식 (2)의 생성항 ($P_\epsilon = C_1 \frac{\epsilon}{k} G$) 을 유선방향의 전단변형률 Sns를 이용해서

$$P_\epsilon = \frac{\epsilon}{k} (C_1' \cdot G - C_1'' \nu_t \cdot S_{ns}^2) \tag{6}$$

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 해석방법

본 연구는 CHAMPION 코드를 본 연구목적에 부합하도록 수정하여 Pentium-II PC 및 MS-FORTRAN Version 4.0을 사용하여 수치해석을 수행하였다. 아울러, 수치적 해석기법 변경에 의한 난류모델의 해석결과를 정확히 분석하기 위해 제어체적, 격자수, 격자선 간격, 이완계수, 경계조건 등은 격자의존도, 수렴도 및 수렴속도 등에 대한 민감도 분석을 토대로 이루어진 참고문헌(8)의 upwind 기법을 사용한 경우와 동일하게 하였다. 즉, 제어체적은 X= 34D, Y=9.7D 되는 부분으로 하였으며, 격자수는 55x37, 격자선 간격은 Fig. 1의 원점을 기준으로 X축 및 Y축 방향으로 각각 1.04, 1.02로 하였다. 그리고 U 및 V의 이완계수는 0.5로, k, 및 ν의 이완계수는 0.3으로 선정하였다.

경계조건중 노즐출구에서 초기값은 실험값과 동일하게 하였는데, 노즐출구속도 U_j 는 30m/sec, V=0인 균일 유동으로, 초기 난류운동에너지는 실험결과에서 중력장 방향의 속도변동치를 고려해서 $k_j = \frac{3}{4}(\bar{u}^2 + \bar{v}^2)$ 로 가정하였고 u, v의 난류강도는 모두 실험값인 0.2%로 선정하였다. 노즐출구의 난류운동에너지소산율(ϵ_j)은 Prandtl에 의한 혼합길이를 참조하여 $k_j^{3/2} / (\frac{1}{2} C_D D)$ 을 대입하였다. 여기서 D는 노즐의 폭이고, C_D 는 0.09이며, 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.	-
	Y/D=0	Wall Fun.	0	Wall Fun.	-

한편, 운동량방정식의 경계조건 및 난류운동에너지 전달방정식의 생성항으로서 대수변함수를 적용하였다.

3.2 부분 skew-upwind 기법

Upwind 기법⁽¹²⁾은 Fig. 2(a) 및 다음 식과 같이 격자점 P에서의 변수값(ϕ_P)을 구하기 위해 5개의 격자점을 이용한다.

$$a_P \phi_P = (a_E \phi_E + a_W \phi_W + a_N \phi_N + a_S \phi_S) + \text{Source Term} \quad (7)$$

여기서, a_P, a_E, a_W, a_N, a_S 는 참고문헌 (12)에 기술된 바와 같이 격자점 P, e, w, n, s에서의 대류 및 확산에 의해 생성된 계수이다.

Upwind 기법은 식 (7)에서와 같이 격자면에 대해 사각으로 유입 또는 유출되는 속도(skew-velocity) 성분에 의해 발생하는 skewness-error를 피할 수 없음을 알 수 있다.

Raithby⁽¹³⁾는 Fig. 2(b) 및 식 (8)과 같이 9개의 격자점을 이용하여 skewness-error에 의한 오류확산을 크게 감소시킨 SK 기법을 개발하였다.

$$a_P \phi_P = \Pi_1 + \Pi_2 + \text{Source Term}$$

$$\Pi_1 = a_E \phi_E + a_W \phi_W + a_N \phi_N + a_S \phi_S$$

$$\Pi_2 = 2K_w \phi_{\ell w, mw} + 2K_s \phi_{\ell s, ms} - 2K_e \phi_{\ell e, me} - 2K_n \phi_{\ell n, mn} \quad (8)$$

식 (8)의 각 변수에 대한 정의는 참고문헌 (13)에 기술된 바와 같다.

또한, K_w, K_s, K_e, K_n 은 참고문헌 (13)에 기술된 바와 같이 w, s, e, n 격자면의 사각속도(skew-velocity) 성분에 의한 유량(mass flow)이다.

한편, 식 (7)과 식 (8)을 비교하면, 식 (8)의 Π_1 은 격자면의 수직방향 속도성분에 의한 대류항 및 확산항의 합이고, Π_2 는 사각속도 성분에 의한 대류항이며, SK 기법은 upwind 기법 대비 사각속도 성분에 의한 대류항(Π_2) 만큼의 차이가 발생함을 알 수 있다.

이상과 같이 SK 기법은 upwind 기법에 비해 오류확산을 최소화하는 면에서는 탁월하나 예상외로 수치적 발산을 유도하기 쉽다.

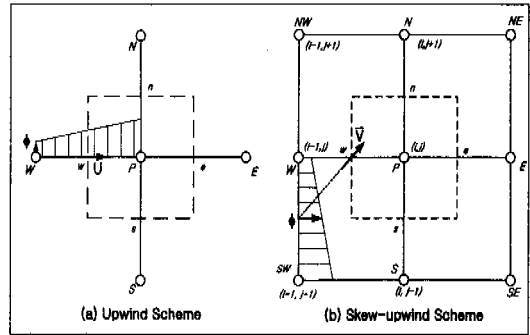


Fig. 2 Methods of obtaining control-volume-faces values

따라서, 윤순현 등⁽⁷⁾ 및 박상우 등⁽¹⁴⁾은 이런 문제점을 해결하기 위해 계산 초기에 표준 $k-\epsilon$ 모델과 upwind 기법 및 unsteady 방식의 fully implicit discretization equation (FIDE)으로 유동이 안정될 때까지 200회 정도 수행하여 모든 유동이 안정된 것을 확인한 후 수정모델 또는 SK 기법으로 전환하였다.

하지만, 본 연구에서는 참고문헌 (8)에서 기술한 바와 같이 FIDE 대신 수치적 계산 효율을 향상하기 위하여 노즐출구속도를 0.05, 1.25, 2.69 ... 25.0, 30.0m/sec로 증가시키는 기법을 사용하였으므로, 기존 연구방법과 같이 upwind기법으로 얻어진 최종 결과를 SK 기법의 초기값으로 전환하는 방법을 시도하였지만 전환초기에 발생하는 수치발산을 피할 수는 없었다.

따라서, 본 연구에서는 먼저 식 (8)을 다음과 같이 변환하여 Π_2 의 영향을 분석하였다.

$$a_P \phi_P = \Pi_1 + f * \Pi_2 + \text{Source Term} \quad (9)$$

여기서, f는 0과 1 사이의 임의의 상수이다. 이를 이용하여 노즐출구속도를 0.05~30 m/sec인 범위에서 임의의 f에 대해 모사한 결과, f가 0.2를 초과하게 되면 발산함을 알았다. 이는 Fig. 1과 같이 유선곡류성분이 심한 경우 Π_2 의 순간 변동폭이 매우 큼을 뜻한다.

따라서, 본 연구에서는 f를 다음과 같이 변환하여 수치해석을 시도하였다.

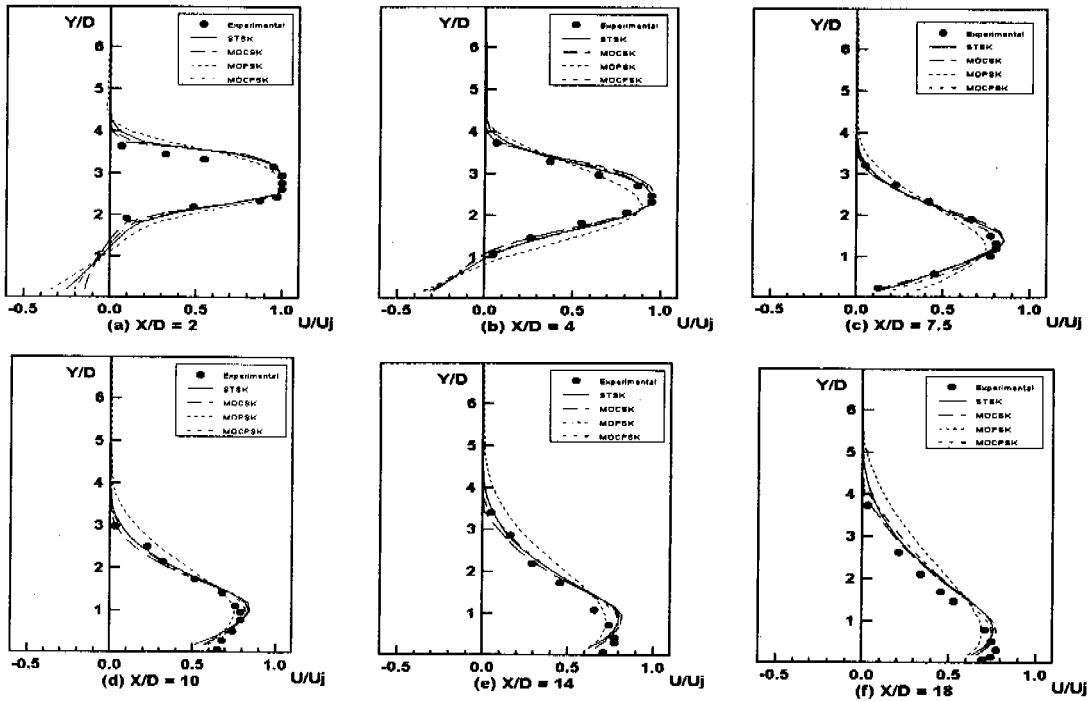


Fig. 3 Mean velocity profiles along streamwise

치적 결과(이하 STSK)는 2.75D, MOCCK는 2.66D, MOPSK는 2.19D, MOCPSK는 2.80D 를 보였다. 또한 이들 결과를 upwind 기법으로 수행한 결과⁽⁸⁾와 비교해보면 수치확산에 의한 오차가 상당히 축소되었음을 알 수 있다. 수치계산에서 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 나타낸 바와 같이 실험결과는 $X_R/D=7.5$ 인데 반해, STSK, MOCCK, MOPSK 및 MOCPSK의 경우 각각 6.85, 7.22, 6.02, 6.83으로서 MOPUP를 제외한 다른 경우들은 모두 실험치에 매우 유사함을 보이며, 특히 MOCUP의 경우가 가장 바람직하였다. 여기서, 재부착길이는 벽면전단응력을 기준으로 하여 산출하였다.

이들 결과를 토대로 기존 연구결과^(7,8)와 비교 분석하면 SK 기법의 해석능력은 upwind 기법에 비해 약 25%의 개선효과가 있음을 알 수 있고, 모델의 개선에 따른 정확성 증가보다는 수치해석

기법의 개선에 따른 정확성 증가가 큼을 알 수 있다. 또한, PD 수정은 upwind 기법을 사용한 경우와 같이 수치적 확산을 상당히 축소하는 SK 기법에서도 바람직하지 않은 것으로 나타났다. 이는 인위적인 점성계수(μ_{eff})가 물리적인 점성계수에 나쁜 영향을 주고, 또한 난류에너지 소산이 재순환유동 등에 의해 실질 유동보다 크게 나타나서 유동의 확산이 촉진되었기 때문으로 판단된다.

한편, 부분 SK 기법에 의해 수행된 현 연구결과를 unsteady 방식의 FIDE를 사용한 참고문헌(7)의 연구결과와 비교해 보면, 부분 skew-upwind 기법이 수렴도 및 계산속도 측면에서 상당한 효과가 있음을 인지할 수 있다.

4.2 평균속도

Fig. 3은 실험 및 수치해석결과에 의한 평균속도분포를 나타낸 것이다. $X/D=2$ [Fig. 3(a)]에서 $0 \leq Y/D \leq 2$ 는 재순환영역인데 MOPSK는 실험치와 다소간 상이하나 그 외 다른 경우들은 잘 일치하였다. 이런 현상은 Fig. 3의 전 구간에서 등

일함을 알 수 있다. 한편, Fig. 3(e) 및 (f)는 국부적 최대속도(U_m)의 지점이 실험치보다 다소간 높은 지점에서 형성됨을 보여준다. 이를 upwind 기법의 해당 결과⁽⁸⁾와 비교하면, skewness error의 축소로 인하여 수치해석이 상당히 개선됨을 알 수 있다. 한편, Fig. 3(e) 및 (f)와 같이 하류로 갈수록 U_m 의 지점이 실험치보다 다소간 높은 것은 대수벽함수가 완벽하지 않아 충분한 벽면효과가 나타나지 않은 것으로 생각되므로 저 레이놀즈수 모델 적용 등 추가적인 연구가 필요하다.

MOCUP의 경우 본 연구의 유동장에서 C_μ 는 약 -0.5에서 0.5 사이에서 변화하며 주로 0.1 정도의 값을 가진다. 실제계산에서 재순환영역 및 박리부근에서 C_μ 가 음이 되어, 이럴 경우 곡률수정의 기초가 되는 난류응력과 에너지의 평형상태의 의미가 없어지므로 본 계산에서는 $C_\mu = 0.025$ 로 하한값을 고정시켜 사용하였다.

Fig. 4는 주류방향 최대속도 U_m 에 대한 변화를 대수로 나타낸 것으로 이로부터 각 모델들의 타당성 여부를 정확히 파악할 수 있다. MOPSK는 실험치와 다소 상이하나 그 외 다른 계산치는 잘 일치하고 있으며, 유선곡률이 급격히 변하는 구간 및 자체보존(self-preserving) 구간에서의 대수 속도변화는 $-1/2$ 의 기울기를 가지고 있는 것으로 알려져 있는데, 본 해석결과 역시 이와 유사함을 보이고 있다. 특히, MOCUP은 보다 더 실험값에 근접함을 보인다.

Fig. 5는 유동방향의 분류반쪽의 변화를 나타낸 것으로 STSK, MOCSK, MOCPSK 모두 실험치에 근접함을 보여 주고 그 중 MOCPSK가 가장

예측을 잘 하였다. Fig. 5의 재부착점 이후 반쪽은 대략 0.076의 기울기를 가지고 있는데⁽¹⁵⁾ 수치해석의 결과 역시 이를 잘 모사하고 있음을 알 수 있다. 하지만, MOPSK는 하류로 갈수록 큰 차이를 보이고 있는데 이로써 기존연구⁽⁷⁾의 결과와는 달리 하류로 갈수록 PD에 의해 추가된 소산율이 유동을 전반적으로 외부영역으로 확산시키고 있음을 파악할 수 있다.

4.3 정압분포

Fig. 6은 주류방향의 벽면정압분포를 나타낸 것으로 수치적 결과들은 재순환영역에서는 실험치와 다소 상이하였지만, 그 외 영역에서는 MOPSK를 제외한 다른 경우들은 매우 유사하였다. 재순환영역에서 벽면정압계수가 실험치에 비해 다소 떨어지는 이유는 Fig. 3(a) 및 (b)의 재순환영역에서의 전단응력을 너무 크게 예측하기 때문으로⁽¹⁶⁾ 이로 인해 Table 2에서와 같이 $k-\epsilon$

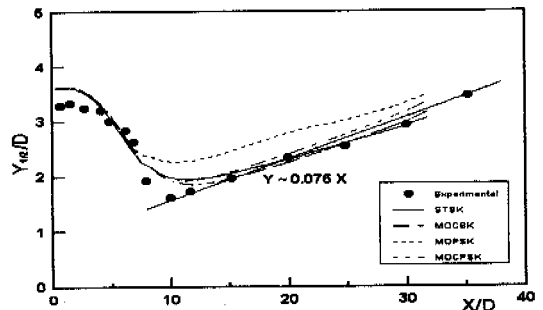


Fig. 5 Variation of jet half width

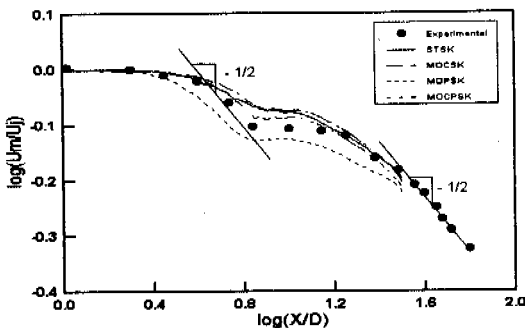


Fig. 4 Logarithmic plots of the maximum velocity variations

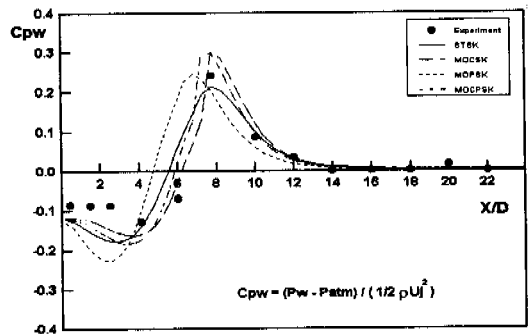


Fig. 6 Wall static pressure distribution

모델은 재부착길이를 실질보다 작게 예측하는 것으로 판단된다. Fig. 6을 upwind 기법으로 해석한 해당 결과⁽⁸⁾와 비교하면, 정압계수의 최저점, 최저점 위치, 최고점, 최고점 위치 등에서 SK 기법이 upwind 기법에 비해 계산 정도가 탁월함을 확연히 알 수 있었다.

Fig. 7은 $X/D=2, 4, 5, 7.5, 10$ 및 14 의 위치에서 Y-방향을 따라 정압분포를 나타낸 것인데 해석결과들은 역압력구배가 일어나는 재순환영역에서 MOPSK는 실험치와 다소간 상이하나, 재부착점 이후에서는 모델의 구분없이 잘 일치함을 보여준다.

4.4 난류강도와 난류운동에너지소산율

Fig. 8은 난류강도의 분포를 나타내고 있는데 실험의 경우 난류 강도의 침두값은 재부착점 이후에도 두 곳에 나타나다가 $X/D=14$ 이후부터는 침두값이 한 곳에 나타나면서 단조로운(monotonic) 경향을 띤다. 즉, $0 \leq X/D \leq 14$ 에서 두 개의 응집구조(coherent structure)가 나타나고 있는데, 이론치의 경우 전구간에서 정성적으로는 실험치와 유사하나 정량적으로는 작게 나타나고 있다. 따라서, $k-\epsilon$ 모델이 속도 및 압력과 같은 1차(first order) 계산에는 잘 맞으나 난류강도와 같은 2차 계산에서는 부적합하는 것으로 사료된다.

Fig. 9는 초기경계조건 ϵ_j 로 표준화시킨 난류운동에너지의 소산율 분포를 나타낸 것인데, $X/D = 2$ 및 4 에서 매우 큰 값을 가지나 하류로 갈수록

약해지고, 전반적으로 MOPSK가 타 경우에 비해 큰 소산율을 나타내고 있음을 보여준다. 이는 난류운동에너지 소실률방정식에서 PD가 추가되었기 때문이다. Fig. 8 및 9의 경향과 Table 1의 재부착점 길이에 대한 비교표를 종합하면, 난류강도가 클수록 재부착길이가 짧아짐을 확인할 수 있다. 식 (1)에서 ϵ 이 증가할수록 k 가 감소하고, Fig. 8에서 전반적으로 k 가 실험치보다 작으므로 Fig. 9의 ϵ 값은 실질값보다 크게 나타난 것으로 짐작된다.

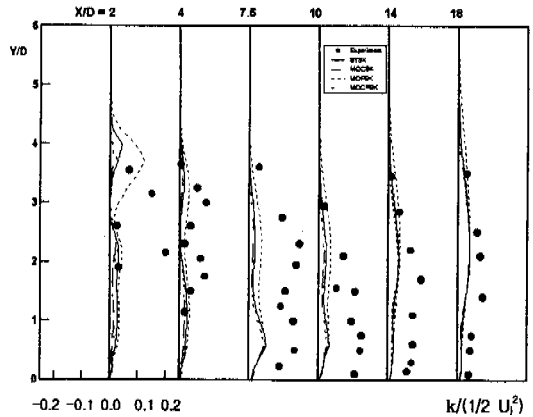


Fig. 8 Turbulent intensity distribution

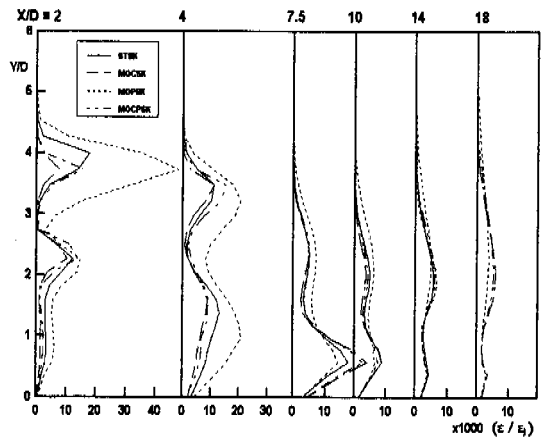


Fig. 9 Dissipation rate distribution

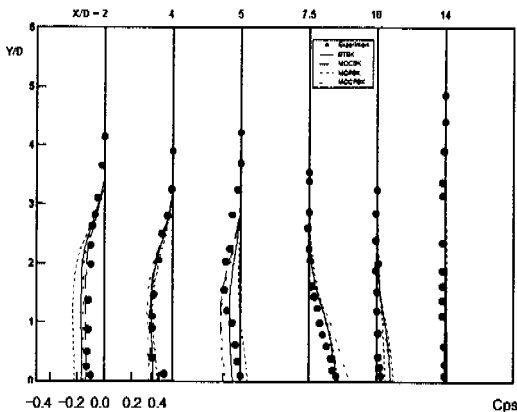


Fig. 7 Static pressure distribution

5. 결 론

WAOJ의 난류 특성 및 난류모델에 대한 예측성을 평가하기 위하여 SK 기법을 사용하여 표준 $k-\epsilon$ 모델과 유선곡률효과 및 PD를 각각 및 종합적으로 고려한 수정 $k-\epsilon$ 모델들을 이용하여 수치적 해석을 하여 실험치와 비교한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) SK 기법은 upwind 기법에 비해 재부착점 길이, 속도 및 압력과 같은 1차 계산에서는 약 25%의 향상을 보이며 실험치와 잘 일치함을 보였으나, 난류운동에너지 및 난류운동에너지소실률과 같은 2차 계산에서는 뚜렷한 개선효과를 나타내지 못하였다.

(2) 4 가지의 $k-\epsilon$ 모델중 유선곡률수정만을 고려한 수정 모델이 가장 좋은 결과를 산출하였으나, PD를 반영한 수정모델은 실험치와 차이를 보였다. 이런 결론은 upwind 기법으로 도출한 해석 결과와 일치하였다.

(3) SK 기법에서 skew-velocity 항을 서서히 적용시키는 기법(즉, 부분 skew-upwind 기법)이 수렴성, 프로그래밍, 컴퓨터의 기억용량, 전산시간 측면 등에서 매우 효과적이었다.

참고문헌

- (1) Hanjalic, K. and Launder, B.E., 1980, "Sensitizing the Dissipation Equation to Irrotational Strains," *J. of Fluid Eng. ASME*, Vol. 102, pp. 34~40.
- (2) 김형수, 정태선, 유홍선, 최영기, 1991, 대한기계학회논문집 제 15권 제 2호, pp. 668~676.
- (3) Isomoto, K. and Honami, S., 1989, "The effect of Inlet Turbulence Intensity on the Reattachment Process Over a Backward-Facing Step," *J. of Fluids Eng.*, Vol. 111, pp. 87~92.
- (4) 백세진, 유정열, 1989, 대한기계학회논문집 제 13권 제5호, pp. 999~1011.
- (5) 최동규, 최도형, 신현동, 김문현, 1990, 대한기계학회논문집 제14권 제2호, pp. 440~452.
- (6) 박태선, 성형진, 1995, 대한기계학회논문집 제 19권 제 8호, pp. 2051~2063.
- (7) 윤순현, 엄윤섭, 정명균, 1988, 대한기계학회논문집 제 12권 제 4호, pp. 865~875.
- (8) 서호택, 윤순현, 부정숙, 1999, "다양한 $k-\epsilon$ 난류모델에 의한 단이 진 벽면분류에 대한 수치해석," 대한박용기관학회지 Vol. 23, No. 2, pp. 106~116.
- (9) 부정숙, 김경천, 박진호, 강창수, 1985, 대한기계학회논문집 제 9권 제 6호, pp. 732~742.
- (10) Yoon, S.H., Kim, K.C., Kim, D.S. and Chung, M.K., 1993, *J. KSME*, Vol. 7, No. 2, pp. 101~112.
- (11) Leschziner, M.A. and Rodi, W., 1981, "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.
- (12) Patankar, S.V., 1980, "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow," *Hemisphere Publishing Co.*, pp. 79~109.
- (13) Raithby, G.D., 1976, "Skew Upstream Difference Schemes for Problems Involving Fluid Flow," *Comp. Meth. Appl. Mech. & Eng.*, Vol. 9, pp. 153~164.
- (14) 박상우, 정명균, 1987, 대한기계학회논문집 제11권 제3호, pp. 444~453.
- (15) Rajaratnam, N., 1976, "Turbulent Jets," *Elsevier Scientific Publishing Company*, pp. 211~225.
- (16) Nallasamy, M., 1987, "Turbulence Models and Their Applications to the Prediction of Internal Flows : A Review," *Computers & Fluids*, Vol. 15, No. 2, pp. 151~194.