

〈論 文〉

# 후향계단을 지나는 박리류에 대한 레이놀즈응력 모델의 성능평가

김광용\* · 오명택\*\*

(1994년 12월 21일 접수)

## Assessment of Reynolds Stress Turbulence Closures for Separated Flow over Backward-Facing Step

Kwang-Yong Kim and Myung-Taek Oh

**Key Words :** Reynolds Stress Model(레이놀즈응력모델), Backward-Facing Step(후향계단), Separated Flow(박리류), Pressure-Strain Rate Interaction(압력-변형률 상관), Finite Volume Method(유한체적법)

### Abstract

This study is carried out in order to evaluate the performances of the Reynolds stress turbulence models such as SSG and GL models in the calculation of separated flow over backward-facing step. In addition, two slow return-to-isotropy models, YA and Rotta models combined with rapid part of SSG model are also tested. The finite volume method is used to discretize the governing differential equations, and the power-law scheme is used to approximate the convection terms. The SIMPLE algorithm is used for pressure correction in the governing equations. The results show that SSG model gives the better prediction near the reattachment point than GL model. In cases that the rapid term of SSG model is combined with Rotta and YA slow models, the results show the better predictions of stress components in recirculation zone, but indicate inaccuracy in the predictions of mean velocity.

### 1. 서 론

후향계단유동(flow over backward-facing step)은 전단층의 박리 및 재순환 유동, 이에 따른 재부착과 새로운 전단층이 발달하는 유동현상을 포함하고 있으며, 공학적으로도 디퓨저, 열교환기, 연소기 등에서 많이 관찰되는 중요한 유동형태이다.

이 유동에 관한 실험적인 연구로 Eaton과 Johnston<sup>(1)</sup>이 재부착길이에 영향을 미치는 다섯가

지 인자에 대해 연구한 바 있으며, Adams<sup>(2)</sup>는 입구유동의 경계층두께에 따른 영향을 연구하였다. 또한 Isomoto와 Honami<sup>(3)</sup>는 상류유동을 변화시켜 실험한 결과 박리점에서 경계층내의 난류강도가 재부착길이에 중요한 영향을 미치는 인자라는 것을 발견하였고, Kim 등<sup>(4)</sup>은 정압의 수직적인 분포를 조사한 결과 정압은 주류에서 가장 크고 재순환영역에서는 이보다 약간 작고, 전단층내에서 가장 작다는 것을 보고한 바 있다. 수치적인 연구로는 표준 k-ε모델<sup>(5)</sup>을 근간으로 하여 다양한 수정모델<sup>(6,7)</sup>을 사용한 연구가 수행된 바 있으며, Amano와 Goel<sup>(8)</sup>은 레이놀즈응력모델과 대수응력모델을 이용

\*정회원, 인하대학교 기계공학과

\*\*인하대학교 대학원

하여 수치적 해를 얻었고, Chung 등<sup>(9)</sup>은 레이놀즈 응력모델에 유선곡률효과를 반영하여 다소 개선된 해를 얻었다. 최근에는 슈퍼컴퓨터의 비약적인 성능향상에 힘입어 비록 낮은 레이놀즈수에 국한되었으나 Navier-Stokes 방정식의 직접계산<sup>(10)</sup>도 수행된 바 있다.

난류모델로서 레이놀즈응력모델(Reynolds stress model)은 와점성계수의 개념을 사용하는 k-ε 모델 등과는 달리 레이놀즈응력방정식을 모형화하여 난류응력성분 각각에 관한 방정식들을 계산함으로써 난류점성의 비등방성이나 유선의 곡률 등의 효과를 자체적으로 반영할 수 있는 것으로 알려져 있다. 그러나 k-ε 모델에 비해 많은 계산시간을 필요로 하고 레이놀즈응력방정식의 모형화과정에 아직 개선의 여지가 많아 여러 유동의 예측에서 일관된 정확성을 보이지 못하고 있어 아직은 널리 실용화되지 못하고 있다.

최초의 체계화된 레이놀즈응력모델은 1970년대 중반 Launder 등<sup>(11)</sup>에 의해 제시되었으며, 이후 이 모델은 Gibson과 Launder<sup>(12)</sup>에 의해 보다 실용적인 모델로 발전하였다. 이와 아울러 Lumley<sup>(13)</sup>에 의해서도 레이놀즈응력모델에 관한 일련의 연구가 진행되어 왔다. 그러나 이러한 연구들은 기본적인 난류유동장에 관한 한정적인 실험치들만을 바탕으로 이루어져, 복잡한 전단류들의 예측에서 일관된 정확성을 보장하지는 못하였다. 레이놀즈응력모델들 중 가장 실용적인 모델로 인정되어온 Gibson과 Launder의 모델<sup>(12)</sup>은 그간 곡면상의 경계층유동과 선회류와 같이 유선의 휨이 있는 유동이나, Coriolis 효과가 작용하는 회전하는 유로내의 유동 등에 대한 적용에서 모델의 보편성과 정확성을 인정받아 왔으나, 후향계단을 지나는 유동과 같은 박리류(separated flow)에 대해서는 그 계산결과가 실험치와의 상당한 차이를 보였다.

1980년대 이후에 모형화에 필요한 직접계산결과가 풍부하게 제공되기 시작하면서 레이놀즈응력에 대한 연구는 활발하게 진행되었다. 특히, Shih 등,<sup>(14)</sup> Fu 등,<sup>(15)</sup> Speziale 등<sup>(16)</sup>은 레이놀즈응력방정식에서 가장 중요한 역할을 하는 압력-변형률상관항에 대해서 많은 모델들을 제시하였다. 난류의 이상적인 유동인 균질류에 대한 직접계산결과를 바탕으로 개발된 이 모델들의 성능평가는 최근 Kim<sup>(17)</sup> 및 Demuren과 Sarkar<sup>(18)</sup>에 의해 단순전단류인 2차원 유로내의 유동을 대상으로 수행되었을 뿐, 보

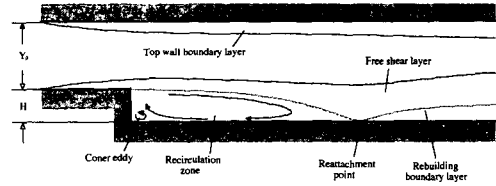


Fig. 1 Illustration of backward-facing step flow

다 복잡한 전단류에 대한 평가는 아직 이루어지지 못하였다.

Kim<sup>(17)</sup> 및 Demuren과 Sarkar<sup>(18)</sup>의 연구결과에 의하면 벽면상의 단순전단류의 예측에서 기존의 Launder 등<sup>(11)</sup>의 모델에 비해 최근 개발된 Speziale 등<sup>(16)</sup>의 모델이 향상된 결과를 보여주고 있어, 박리류와 같이 복잡한 전단류에서도 이러한 결과가 재현될 수 있을지가 관심을 끌고 있다. 특히 위의 Speziale 등의 모델은 Launder 등의 모델에서 채택하고 있는 벽면효과 반영항을 포함하지 않고 있어서 모델이 단순해짐과 아울러 이항의 불합리성으로부터 탈피할 수 있다는 장점을 가지고 있다.

본 연구에서는 박리를 수반하는 난류유동의 대표적인 예인 Fig. 1의 후향계단을 지나는 2차원 난류에 대해 Speziale 등<sup>(16)</sup>의 새로운 레이놀즈응력모델을 기존 Gibson과 Launder의 모델<sup>(12)</sup>과 비교함으로써 그 성능을 평가하였다.

## 2. 난류모델

정상상태, 비압축성, 2차원, 난류에 대한 직교좌표계에서의 연속방정식과 운동량방정식들은 다음과 같다.

- 연속방정식

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} = 0 \tag{1}$$

- 운동량방정식

$$\begin{aligned} \rho U \frac{\partial U}{\partial x} + \rho V \frac{\partial U}{\partial y} = & \frac{\partial}{\partial x} \left[ \mu \frac{\partial U}{\partial x} - \rho \overline{u^2} \right] \\ & + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \mu \frac{\partial U}{\partial y} - \rho \overline{uv} \right] - \frac{\partial P}{\partial x} \end{aligned} \tag{2}$$

$$\begin{aligned} \rho U \frac{\partial V}{\partial x} + \rho V \frac{\partial V}{\partial y} = & \frac{\partial}{\partial x} \left[ \mu \frac{\partial V}{\partial x} - \rho \overline{uv} \right] \\ & + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \mu \frac{\partial V}{\partial y} - \rho \overline{v^2} \right] - \frac{\partial P}{\partial y} \end{aligned} \tag{3}$$

여기서,  $U$ 와  $V$ 는 각기 유동방향( $x$ )과 유동에 수직하는 방향( $y$ )의 평균속도들이며,  $u$ 와  $v$ 는 각 방향의 난류변동 속도성분들이다.  $P$ 는 평균압력,  $\mu$ 는 절대점성계수,  $\rho$ 는 유체의 밀도를 나타낸다.

본 연구에서는 위의 운동량방정식들내에 포함된 레이놀즈응력성분들을 구하기 위해 이들 각각에 관한 미분형전달방정식을 계산하는 레이놀즈응력모델을 난류모델로 사용하였다. 이 모델에서 계산하는 레이놀즈응력 텐서,  $\overline{u_i u_j}$ 에 관한 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial(\overline{U_k u_i u_j})}{\partial x_k} = D_{ij} + P_{ij} + \Pi_{ij} - \varepsilon_{ij} \quad (4)$$

여기서,  $D_{ij}$ ,  $P_{ij}$ ,  $\Pi_{ij}$ 와  $\varepsilon_{ij}$ 는 각기 확산, 생성, 압력-변형률상관 및 소멸을 나타내는 항들로서 다음과 같은 형태를 가진다.

$$D_{ij} = -\frac{\partial}{\partial x_k} (\overline{u_i u_j u_k}) - \frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial \overline{u_i p}}{\partial x_i} + \frac{\partial \overline{u_j p}}{\partial x_j} \right) : \text{확산항}$$

$$P_{ij} = -\left[ \overline{u_j u_k} \frac{\partial U_i}{\partial x_k} + \overline{u_i u_k} \frac{\partial U_j}{\partial x_k} \right] : \text{생성항}$$

$$\Pi_{ij} = \frac{p}{\rho} \left[ \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} \right] : \text{압력-변형률 상관항}$$

$$\varepsilon_{ij} = 2\nu \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_k} \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_k} : \text{소멸항}$$

여기서,  $p$ 는 변동압력이며,  $\nu$ 는 동점성계수이다. 위항들 중에서 부가적인 모형화가 필요한 항들은  $D_{ij}$ ,  $\Pi_{ij}$  및  $\varepsilon_{ij}$ 이다.

압력-변형률 상관항  $\Pi_{ij}$ 는 일반적으로 rapid 등방성회귀항으로 불리워지는 난류-평균유동 상호작용항  $\Pi_{ij,1}$ 과 난류운동간의 상호작용에 의한 slow 등방성회귀항  $\Pi_{ij,2}$ 로 다음과 같이 나뉘어진다.

$$\Pi_{ij} = \Pi_{ij,1} + \Pi_{ij,2} \quad (5)$$

그런데, 난류의 등방성문제는 압력-변형률 상관항 뿐 아니라 소멸률항과도 관계되기 때문에 순수난류 변동치들의 상관관계로 나타나는  $\varepsilon_{ij}$ 를  $\Pi_{ij,2}$ 와 결합하여 Lumley<sup>(13)</sup>가 제시한 방법대로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Pi_{ij} - \varepsilon_{ij} = \Pi_{ij,1} + \pi_{ij} - \frac{2}{3} \varepsilon \delta_{ij} \quad (6)$$

여기서,  $\varepsilon$ 는 난류운동에너지 소멸률( $\varepsilon = \varepsilon_{ii}/2$ )이며,  $\pi_{ij}$ 는 slow항과 소멸률항을 다음과 같이 묶은 새로운 등방성회귀항으로서  $\varepsilon_{ij}$ 에 의한 등방화특성까지 포함한다.

$$\pi_{ij} = \Pi_{ij,2} - \left( \varepsilon_{ij} - \frac{2}{3} \varepsilon \delta_{ij} \right) \quad (7)$$

Rapid항인  $\Pi_{ij,1}$ 에 관한 모델은 선형항(linear term)들만을 포함할 때 다음과 같은 일반적인 형태로 쓸 수 있다

$$\Pi_{ij,1} = \alpha_1 k S_{ij} + \alpha_2 P b_{ij} + \alpha_3 k \left( b_{ik} S_{jk} + b_{jk} S_{ik} - \frac{2}{3} \delta_{ij} b_{kl} S_{kl} \right) + \alpha_4 k (b_{ik} W_{jk} + b_{jk} W_{ik}) \quad (8)$$

윗식에서  $k$ 는 난류운동에너지( $k = \overline{u_i u_i}/2$ )이고  $P$ 는 난류운동에너지의 생성률( $P = P_{ii}/2$ )이며,  $b_{ij}$ ,  $S_{ij}$  및  $W_{ij}$ 는 각기 비등방성, 변형률 및 회전을 나타내는 텐서로서 다음과 같이 정의된다.

$$b_{ij} = \frac{\overline{u_i u_j}}{2k} - \frac{1}{3} \delta_{ij}$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right)$$

$$W_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right)$$

여기서,  $\delta_{ij}$ 는 Kronecker delta이다. 식 (8)에서 계수들인  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\alpha_3$ ,  $\alpha_4$ 는 일반적으로 비등방텐서  $b_{ij}$ 의 함수이다.

$\pi_{ij}$ 에 관한 모델들은 다음과 같은 일반적인 형태로 나타낼 수 있다.

$$\pi_{ij} = -\beta_1 \varepsilon b_{ij} + \beta_2 \varepsilon \left( b_{ik} b_{jk} - \frac{1}{3} \Pi \delta_{ij} \right) \quad (9)$$

여기서,  $\Pi$ 는  $\Pi = b_{im} b_{ml}$ 로 정의되는 비등방텐서의 2차 invariant이다.

본 연구에서는, Table 1에 나타난 바와 같은 네 가지 모델을 시험하였다. Gibson과 Launder(GL)의 모델<sup>(12)</sup>은 그간 가장 널리 사용되어 왔던 레이놀즈응력모델이며, Speziale 등(SSG)<sup>(16)</sup>의 모델은 최근에 개발된 모델로서 단순전난류의 계산에서 Gibson과 Launder의 모델<sup>(12)</sup>을 능가하는 성능을 보인다고 Demuren과 Sakar<sup>(18)</sup>에 의해 보고된 바 있다. Table 1에서 slow모델인 Rotta는 Rotta<sup>(19)</sup>에 의해 1950년대 발표되어 GL모델에서 slow항의 모델로 사용되는 모델이며, YA모델은 Yamamoto와 Arakawa(YA)<sup>(20)</sup>에 의해 발표된 모델로서, 두 모델 모두 Kim<sup>(17)</sup>에 의해 단순전난류에서 SSG의 slow항 모델과 함께 우수한 평가를 받았던 모델들이다.

Gibson과 Launder<sup>(12)</sup>는 벽면의 효과 즉, 벽면의 존재가 난류의 비등방성을 증가시키는 효과를 고려

Table 1 Models for pressure-strain interaction term

	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\alpha_4$	$\beta_1$	$\beta_2$
GL	0.8	0.	1.2	1.2	3.6	0.
SSG	$0.8-1.3 \text{ II}^{1/2}$	-1.8	1.25	0.4	3.4	4.2
SSG+Rotta	$0.8-1.3 \text{ II}^{1/2}$	-1.8	1.25	0.4	3.6	0.
SSG+YA	$0.8-1.3 \text{ II}^{1/2}$	-1.8	1.25	0.4	$2-12F[-0.65 \text{ II}^{0.4} +  \text{III} ^{0.45}\text{sign}(\text{III})]$	$-3(\beta_1-2)$

\*  $\text{II} = b_{im}b_{mi}$ ,  $\text{III} = b_{im}b_{mn}b_{ni}$ ,  $F = 1 - 4.5 \text{ II} + 9 \text{ III}$

해 주기 위해 고체경계면을 갖는 유동에 대해서는 벽값최함수  $f$ 를 포함하는 부가적인 항들을 식 (8) 과 (9)에 각각 첨가하여 사용하였다.

$$f = \frac{0.32k^{3/2}}{\epsilon y} \tag{10}$$

여기서,  $y$ 는 벽에서 떨어진 거리이다. 이 함수의 값은 벽근처 영역에서 1에 접근하며 벽에서 떨어질 수록 감소하게 된다.

레이놀즈응력 방정식내 확산항,  $D_{ij}$ 에 대한 모델로 본 연구에서는 다음과 같은 Daly와 Harlow<sup>(21)</sup>의 단순구배모델을 사용하였다.

$$D_{ij} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left[ c_s \frac{k}{\epsilon} \overline{u_k u_i} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] \tag{11}$$

여기서, 모델상수  $c_s = 0.22$ 이다.

난류운동에너지 소멸률,  $\epsilon$ 에 관한 방정식은 보편적으로 사용되어 왔던 다음과 같은 형태를 갖는다.

$$\frac{D\epsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left[ c_\epsilon \frac{k}{\epsilon} \overline{u_k u_i} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right] + c_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} P - c_{\epsilon 2} \frac{\epsilon^2}{k} \tag{12}$$

여기서, 모델상수들  $c_\epsilon$ ,  $c_{\epsilon 1}$ 과  $c_{\epsilon 2}$ 는 각기 0.18, 1.45와 1.9의 값을 갖는다.

### 3. 수치계산

경계조건에서 입구조건으로는 Kim 등<sup>(4)</sup>의 실험에서 측정된 평균속도와  $\overline{u^2}$  및  $\overline{v^2}$ 를 그대로 사용하였으며, 실험치가 주어지지 않은  $\overline{w^2}$ 는  $\overline{u^2}$ 와  $\overline{v^2}$ 의 평균치로 주었다. 난류소멸률은  $\epsilon = c_\mu k^{3/2} / 0.03H$  ( $c_\mu = 0.09$ )로 가정된 값을 사용하였다. 출구에서는 수직방향 속도성분을 0으로 주고 나머지 변수들은 구배를 무시하였다. 계산영역에서는 확대부로부터 30H 하류에 출구면을 설정하였다. 계산된 유

동의 레이놀즈수는 하류단면의 높이인 3H와 상류의 평균속도  $U_0$ 를 기준으로 한  $1.52 \times 10^4$ 이다.

앞에서 소개한 난류모델이 적용되지 않는 벽근처의 낮은 레이놀즈수 영역에 대해서는 실험적인 벽법칙을 사용하였다. 이를 위해 벽면위의 첫번째 격자점을 log-law 영역내에 위치시켰고, 사용된 벽법칙은 다음과 같다.

$$\frac{U_p}{\left(\frac{\tau}{\rho}\right)_w} c_\mu^{1/2} k_p^{1/2} = \frac{1}{\chi} \ln \left[ E y_p \frac{(c_\mu^{1/2} k_p)^{1/2}}{\nu} \right] \tag{13}$$

여기서,  $\tau$ 는 전단응력을 나타내고, 하첨자  $w$ 와  $p$ 는 각기 벽면과 첫번째 격자점을 나타내며, 상수  $E$ 는 9.793의 값을 갖는다.

수치해석에서는 미소검사체적을 적분하여 대수방정식을 얻는 유한체적법을 바탕으로 하여 SIMPLE 알고리즘<sup>(22)</sup>을 사용하였다. SIMPLE 알고리즘은 운동량방정식과 속도-압력보정식을 연립하여 계산하기 위한 방법이다. 사용된 격자계는 검사체적의 표면에서 속도성분을 보간하지 않아도 되고 이산화 방정식의 수립이 용이한 엇갈림격자계로서 평균속도  $U_1$ ,  $U_2$ 는 각각  $x_1$ ,  $x_2$ 방향의 중간셀(half-cell)에서, 수직응력성분들과  $P$ 와  $\epsilon$ 은 스칼라 격자점에서 계산한다. 그러나, 전단응력성분은 스칼라셀 남서쪽에 위치시켰는데 그 이유는 전단응력의 주요인이  $\partial U_2 / \partial x_1$ ,  $\partial U_1 / \partial x_2$ 이므로 어떠한 보간도 없이 쉽게 전단응력을 결정할 수 있게 하기 위해서이다. 대류항의 처리는 멱승도식(power-law scheme)<sup>(22)</sup>을 이용하였고, 이산화방정식의 해는 TDMA를 이용한 반복해법에 의해 얻었다.

### 4. 계산결과 및 검토

본 연구의 주된 목적은 단순 전단류의 계산에서

좋은 성능을 나타낸 Speziale 등(SSG)<sup>(16)</sup>의 압력-변형률 상관항의 모델이 Fig. 1과 같은 복잡한 난류구조를 갖는 후향계단을 지나는 유동의 계산에서도 일관된 타당성을 갖는지를 기존의 Gibson과 Launder(GL)<sup>(12)</sup>의 모델과 비교해서 파악하는 데 있다.

Fig. 2에서는 GL모델을 사용할 때의 격자계에 따른 해의 의존성을 검토하였다. 그림에서와 같이 계산격자계를 60×30, 80×30, 80×40, 100×40으로 변화시켜가며 격자수에 따른 영향을 비교한 결과 80×40의 격자계에서부터 해의 비의존성을 발견할 수 있었으므로 Fig. 3에 나타난 바와 같은 80×40의 격자계로 계산을 수행하였다. 계단하류의 재순환영역에서는 유동변화가 매우 심할 것이므로 계산영역내의 좌벽면 및 하류 바닥면 가까운 영역에 상대적으로 조밀한 격자점들을 분포시켰다. 아울러, 벽면으로부터 첫번째 격자점들은 log-law영역에 위치시켰다.

평균속도분포에 관한 계산결과들이 Fig. 4에서 비교되고 있다. 여기에 비교된 모델들은 SSG모델과 벽감쇠함수( $f$ )를 사용한 GL모델 및 그렇지 않은 GL모델이다. 이 그림에서 GL모델에 대해 벽감쇠함수를 사용해야 할 필요성이 있음을 벽 가까운 곳에서 두 결과를 비교해 봄으로써 알 수 있고, SSG모델은 이와 같이 벽의 영향을 부가적으로 고려하지 않았음에도 불구하고 GL모델보다 재부착점 근처에서 좋은 결과를 나타내고 있음을 알 수 있

다. 그러나, 재발달영역에서는 SSG모델이 다른 두 모델들에 비해 발달이 다소 지연되는 경향을 보이고 있다.

Fig. 5와 6은 각기 난류 전단응력과 유동방향 난류수직응력의 분포들을 나타내고 있다. 재순환영역에서는 두 응력에 대한 계산치들이 공히 실험치와 큰 차이를 나타내고는 있으나, 재부착점이후에는 실험치에 접근하고 있다. GL모델에서 사용하는 벽감쇠함수  $f$ 는 거리  $y$ 가 변수로 포함됨에 따라 두 벽면의 효과가 중첩되는 유동영역에서는  $f$ 값이 1

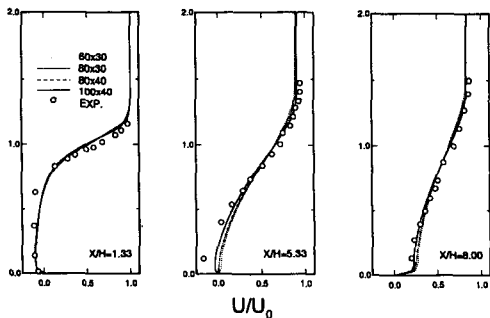


Fig. 2 Effects of grid system

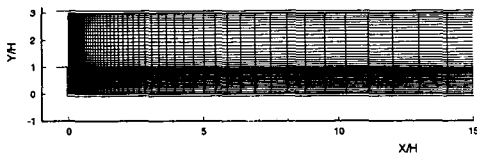


Fig. 3 Grid system

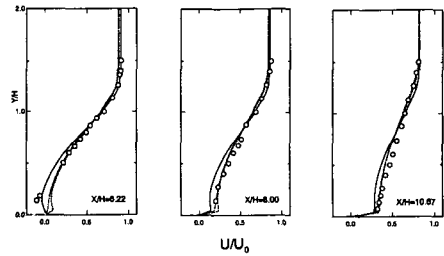
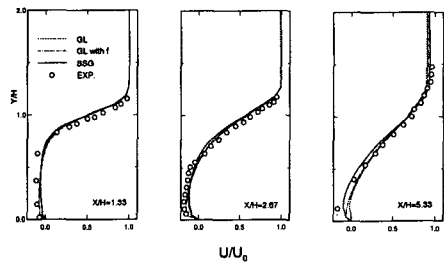


Fig. 4 Mean velocity profiles

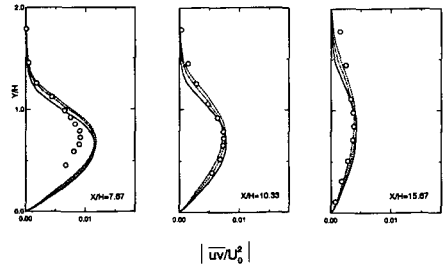
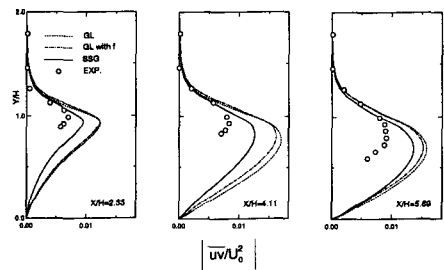


Fig. 5 Turbulent shear stress profiles

보다 커져 물리적으로 타당하지 않은 결과를 낳을 수 있어 그 문제점이 지적되어 왔다. 그러므로, 이러한  $f$ 함수를 사용하지 않고도 좋은 결과를 얻을 수 있는 모델이 등장하였다는 것은 레이놀즈응력모델의 실용화에 매우 고무적인 일이다.

본 연구에서는 SSG모델의 slow항에 대해 기존의 모델을 GL모델에서 사용되는 Rotta모델<sup>(19)</sup> 및 YA모델<sup>(20)</sup>로 대체하여 그 결과를 검토해 보았다. Fig. 7은 평균속도에 관한 결과로서, Rotta모델과 YA모델을 사용한 SSG모델이 기존의 SSG모델과

비교해 재부착거리를 길게 계산하고 있고 이로 인해 경계층의 재발달이 늦어지고 있음을 알 수 있다.

Fig. 8과 9에서는 전단응력과 수직응력에 관한 결과들을 보여주고 있다. Rotta모델 및 YA모델을 사용한 SSG모델이 재순환영역에서 계산치를 크게 향상시키고 있으며 이 중 YA모델이 보다 좋은 결과를 나타내고 있다. 그러나 이 두 모델은 재발달 구역의 경계층외곽에서 실험치와는 달리 응력성분들의 빠른 감쇠를 보인다.

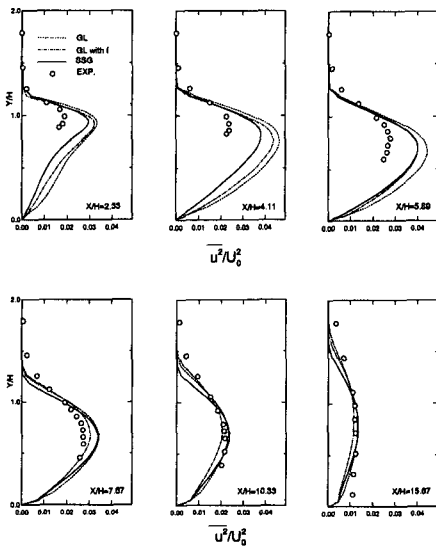


Fig. 6 Turbulent normal stress profiles

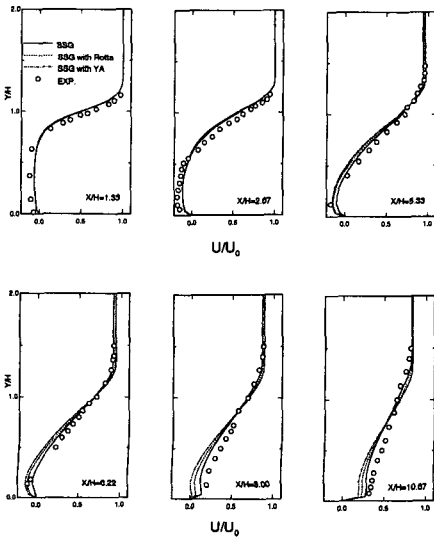


Fig. 7 Mean velocity profiles

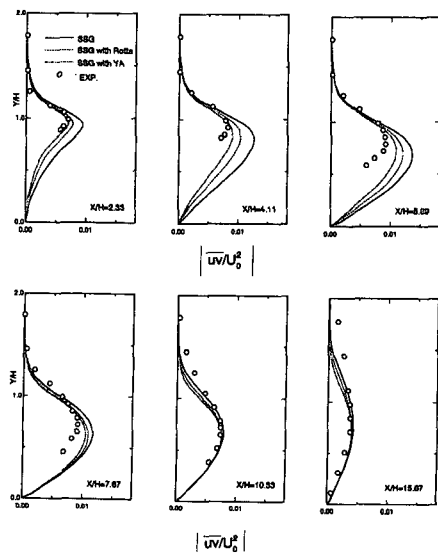


Fig. 8 Turbulent shear stress profiles

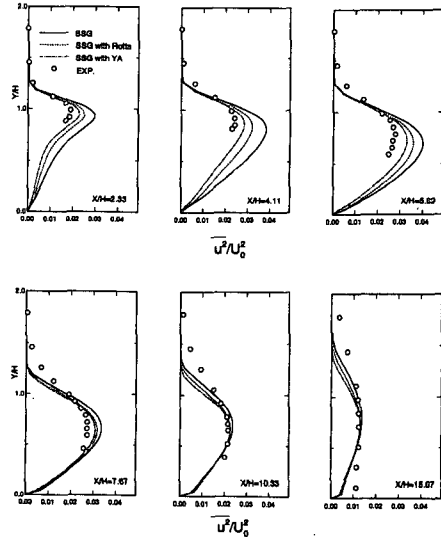


Fig. 9 Turbulent normal stress profiles

Table 2 Reattachment lengths

Model	Exp.	GL	GL with f	SSG	SSG with Rotta	SSG with YA
$X_r/H$	7.0	5.7	6.1	6.7	7.4	7.9

각각의 모델들에 의하여 계산된 재부착길이( $x_r$ )들이 Table 2에서 실험치와 비교되었다. 실험치( $x_r/H=7.0$ )와 비교시 GL모델과 벽반영향이 있는 GL모델 및 SSG모델은 재부착거리를 짧게 예측하고, Rotta모델 및 YA모델을 사용한 SSG모델은 재부착길이를 길게 예측함을 알 수 있다.

## 5. 결 론

본 연구는 난류박리류의 계산에서 최근 개발된 레이놀즈응력모델인 SSG모델과 기존의 모델인 GL모델의 성능을 비교 평가할 목적으로 수행되었다. SSG모델은 벽감쇠함수를 사용한 벽효과의 부가적 고려 없이도 재부착점 근처의 유동영역에서 GL모델보다 향상된 결과를 보였다. 이러한 결과는 단순 전단류에 대한 연구 결과와도 일치하는 것으로 기존의 벽감쇠함수가 갖는 불합리성을 극복할 수 있는 희망적 결과라고 사료된다. 아울러, SSG모델의 rapid항에 Rotta 및 YA의 slow항 모델들을 결합하여 계산을 수행한 결과 전단응력과 수직응력에 대해서는 재순환영역에서 SSG모델보다 더 좋은 결과를 예측하였으나 평균속도의 계산에서는 부정확성을 보였다.

## 후 기

본 연구는 1994년 인하대학교 교내연구비 지원에 의해 수행된 연구로서 이에 감사드린다.

## 참고문헌

- (1) Eaton, J. K. and Johnston, J. P., 1981 "A Review of Research on Subsonic Turbulent Flow Reattachment," *AIAA Journal*, Vol. 19, pp. 1093~1100.
- (2) Adams, E. W., 1984, Assessment of Reynolds Stress Turbulence Closures for Separated Flow over Backward-Facing Step Ph. D. Thesis, Dept.

of Mech. Eng. of Stanford Univ.

- (3) Isomoto, K. and Honami, S., 1989, "The Effect of Inlet Turbulence Intensity on the Reattachment Process Over a Backward-Facing Step," *ASME J. Fluids Eng.*, Vol. 111, pp. 87~92.
- (4) Kim, J., Kline, S. J. and Johnston, J. P., 1980, "Investigation of a Reattaching Turbulent Shear Layer: Flow Over a Backward-Facing Step," *ASME J. Fluid Eng.*, Vol. 102, pp. 302~308.
- (5) Launder, B. E. and Spalding, D. B., 1974, "The Numerical Computation of Turbulent Flows," *Computer Methods in App. Mech. and Eng.*, Vol. 3, pp. 269~289.
- (6) Leschziner, M. A. and Rodi, W., 1981, "Calculation of Annular and Twin Parallel Jets Using Various Discretization Schemes and Turbulence-Model Variations," *ASME J. Fluids Eng.*, Vol. 103, pp. 352~360.
- (7) 명현국, 한화택, 백인철, 1994, "수정난류모델에 의한 후향계단유동 예측," 대한기계학회 춘계 학술대회논문집(II), pp. 294~297.
- (8) Amano, R. S. and Goel, P., 1985, "Computations of Turbulent Flow Beyond Backward-Facing Steps Using Reynolds-Stress Closure," *AIAA J.*, Vol. 23, pp. 1356~1361.
- (9) Dong, S. K. and Chung, M. K., 1992, "Curvature Corrections to Reynolds Stress Model for Computation of Turbulent Recirculating Flows," *AIAA J.*, Vol. 30, No. 12, pp. 2968~2969.
- (10) Le, H., Moin, P. and Kim, J., 1993, "Direct Numerical Simulation of Turbulent Flow Over a Backward-Facing Step," *9th Symposium on Turbulent Shear Flows* (Kyoto Univ.), Japan, pp. 13-2.1~13-2.5.
- (11) Launder, B. E., Reece, G. J., and Rodi, W., 1975, "Progress in the Development of a Reynolds-Stress Turbulence Closure," *J. Fluid Mech.*, Vol. 68, pp. 538~566.

- (12) Gibson, M. M. and Launder, B. E., 1978, "Ground Effects on Pressure Fluctuation in the Atmospheric Boundary Layer," *J. Fluid Mech.*, Vol. 86, pp. 491~511.
- (13) Lumley, J. L., 1978, "Computational Modeling of Turbulent Flows," *Advances in Applied Mechanics* 18, Academic Press, pp. 123~178.
- (14) Shih, T. M., Mansour, N. N. and Chen, J. Y., 1987, "Reynolds Stress Modelling of Homogeneous Turbulence and Comparison with Numerical Simulation," Proceedings of the Summer Program 1987, Center for Turbulence Research(NASA/Ames-Stanford Univ., Stanford, C.A.), pp. 191.
- (15) Fu, S., Launder, B. E. and Tselepidakis, D. P., 1987, "Accommodating the Effects of High Strain Rates in Modeling the Pressure-Strain Correlation," UMIST Mechanical Engineering Dept. Rept. TFD/87/5.
- (16) Speziale, C. G., Sarkar, S. and Gatski, T. B., 1991, "Modeling the Pressure-Strain Correlation of Turbulence: an Invariant Dynamic Systems Approach," *J. Fluid Mech.*, Vol. 227, pp. 245~272.
- (17) Kim, K. Y., 1994, "An Evaluation of Reynolds Stress Turbulence Closures for Plane Channel Flow," *Proceedings of Third JSME-KSME Fluid Eng. Conf.*, Sendai, Japan, pp. 136~140.
- (18) Demuren, A. O. and Sarkar, S., 1993, "Perspective: Systematic Study of Reynolds Stress Closure Models in the Computation of Plane Channel Flows," *ASME J. Fluids Eng.*, Vol. 115, pp. 5~12.
- (19) Rotta, J. C., 1951, "Statistische Theorie Nicht-homogener Turbulenz," *Mitteilung. Zeitschrift fur Physik*, Vol. 129, pp. 547~572.
- (20) Yamamoto, M. and Arakawa, C., 1991, "Study on the Pressure-Strain Term in Reynolds Stress Model," *8th Symposium on Turbulent Shear Flows* (Technical Univ. of London), pp. 3-17.1~3-17.2.
- (21) Daly, B. J. and Harlow, F. H., 1970, "Transport Equations of Turbulence," *Phys. Fluids B*, pp. 2634~2649.
- (22) Patankar, S. V., 1980, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, McGraw-Hill, New York, pp. 79~134.