

2차원 후방계단유동에 대한 URANS와 DES의 수치해석 평가

송지수¹, 박승오^{*2}ASSESSMENT OF URANS AND DES SIMULATIONS
FOR TWO-DIMENSIONAL BACKWARD FACING STEP FLOWC.S. Song¹ and S.O. Park^{*2}

A two-dimensional backward facing step flow is simulated by using URANS and Detached Eddy Simulations(DES) approaches. Turbulence models adopted for URANS and DES simulations are Spalart-Allmaras(S-A) model and Shear Stress Transport(SST) model. The target flow with $ER=1.125$, $Re_H=37,500$ is experimentally studied by Driver & Seegmiller. Various versions of DES have been tested in this paper. Results of the simulations are compared with the experimental data available to evaluate the merits and demerits of URANS and several versions of DES. URANS simulation converges to a steady state and hence unsteady characteristics are not featured. DES simulations in general successfully mimic large scale structures and oscillation characteristics of the flow.

Key Words: 후방계단유동(Backward facing step flow), URANS, Detached Eddy Simulation

1. 서 론

유동의 박리와 재부착 현상은 에어포일 주변의 유동장이나 빌딩주변의 유동장 등 다양한 공학적인 문제에서 흔히 발견된다. 그 중에서도 후방계단유동(backward facing step flow)은 기하학적으로 단순하면서도, 전단층(shear layer)의 박리(separation) 및 재순환(recirculation), 재부착(reattachment)과 재발달(redevelopment) 등 여러 유동 현상을 포함하고 있다. 또한 박리점이 계단의 끝단에 고정되어 있어서, 익형 표면위의 유동장처럼 박리점이 비정상적인 경우와 다른 특성도 갖는다. 이와같이 단순한 형상에 비해 여러 가지 난류 전단층의 거동을 포함하는 유동구조를 갖기 때문에 후방계단유동은 실험적으로, 수치적으로 많은 연구들이 수행되어져 왔다.

Eaton & Johnston[1]은 여러 연구 결과를 정리하여 재부착점의 위치에 영향을 미치는 요인으로 초기 경계층의 상태, 경계층의 두께, 자유흐름의 난류강도, 압력구배 그리고 종횡비를 지적하였다. 또한 Driver & Seegmiller[2]은 계단의 높이

를 기준으로 한 레이놀즈 수(Re_H)가 37,500일 때, 레이저 도플러 유속계 등을 이용해 실험적인 연구를 수행하여 채널 윗벽의 각도를 변화시키면서 압력구배와 재부착점 사이의 관계를 분석하였다. Neto 등[3]은 계단 전후의 높이의 비를 의미하는 확장비(ER)가 1.6이고 Re_H 가 38,000일 때 LES(Large Eddy Simulation) 계산을 수행하여 후방계단 뒤 유동의 응집구조(coherent structure)와 유동의 진동 주파수가 실험치와 유사하게 예측됨을 확인하였다.

LES 계산에서는 벽 근처에 아주 조밀한 격자가 필요하므로, 전산기의 용량이나 계산비용에 상당한 부담이 된다. 이러한 단점을 보완하기 위해 Spalart 등[4]은 RANS와 LES 방법을 혼합하여 사용하는 DES 방법을 제안하였는데, 이는 격자수가 많이 요구되어지는 벽 근처에서는 RANS 계산을, 박리가 수반되는 detached 영역에서는 LES 계산을 하는 방법이다. Strelet[5]은 DES 방법을 2차원 후방계단 유동에 적용하여, 그 결과를 Jovic & Driver[6]등의 실험결과($Re_H=5,000$)와 비교하였다.

본 연구에서는 기존의 RANS 방법인 Spalart-Allmaras(S-A) model[7]과 Shear Stress Transport (SST) model[8]을 이용한 URANS 계산과 Spalart 등[4]이 제안한 S-A DES, Travin 등[9]이 제안한 SST DES 방법을 이용하여 후방계단유동의 수치해석 연구를 수행하고 이 결과를 실험결과와 비교하였다.

접수일: 2006년 3월 4일, 심사완료일: 2006년 5월 30일.

1 학생회원, KAIST 항공우주공학과

2 정회원, KAIST 항공우주공학과

* Corresponding author E-mail: sopark@kaist.ac.kr

2. 수치 해석 방법

2.1 DES 모델

Spalart는 S-A model에서 사용되는 길이척도 \tilde{d} 를 수정하여 DES를 구현하였다. 새로 정의된 길이척도는 $\tilde{d} = \min(d, C_{DES}\Delta)$ 로 표현된다. 여기서, d 는 기존 S-A model의 길이 척도로써 벽과의 거리를 의미하며, $C_{DES}\Delta$ 는 LES의 Smagorinsky model에 사용되는 특성길이이다. 벽 근처의 경계층 내에서는 $\tilde{d} = d$ 가 되어 기존의 RANS 모델이 작동하며, 벽과의 거리가 멀어지면 $\tilde{d} = C_{DES}\Delta$ 가 되어 LES의 SGS 모델이 작동하게 된다. 이때 Δ 는 $\max(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ 로 정의되며, C_{DES} 값은 0.65가 사용된다.

Travin 등[9]에 의해서 제시된 SST DES 방법은 난류 에너지(k) 방정식의 소산(dissipation)항(D_{DES}^k)에 나타나는 길이 척도를 수정하여, 벽근처에서는 RANS 방법을 이용하고, detached 영역에서는 LES 방법을 사용한다. 소산항(D_{DES}^k)은 $k^{3/2}/\tilde{l}$ 로 표현되고, 이 때 길이척도를 $\tilde{l} = \min(l_{k-\omega}, C_{DES}\Delta)$ 로 표현한다. Δ 는 $\max(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ 로 정의되며, C_{DES} 계수 값은 Menter[8]가 제안한 혼합함수 (blending function) F_1 을 이용하여 $C_{DES} = (1 - F_1)C_{DES}^{k-\epsilon} + F_1C_{DES}^{k-\omega}$ 와 같이 구해지는데, 이때 $C_{DES}^{k-\epsilon}$ 와 $C_{DES}^{k-\omega}$ 값은 각각 0.61과 0.78이다.

Spalart 등[4]은 DES 계산시 대류항 등의 차분에 있어서 특별한 언급이 없는 반면, Travin 등[9]은 일반적으로 LES계산에서 풍상차분법을 이용할 경우, 중앙차분법을 이용하는 경우보다 수치적 소산량이 크게 되어 정확한 해를 얻을 수가 없다고 알려져 있음[10]을 언급하면서, RANS가 적용되는 영역에서는 풍상차분법을 이용하고, LES 영역에서는 중앙차분법을 이용하는 혼합차분법(hybrid central/upwind approximation)을 제안하였다. 이 방법은 혼합계수 σ 을 이용하여, inviscid flux(대류항)의 차분시, σ 의 값이 1인 경우에는 풍상차분법이, 0일 경우에는 중앙차분법이 적용되게 된다. 본 연구에서는 S-A DES와 SST DES 계산 수행시 차분기법이 DES의 결과에 미

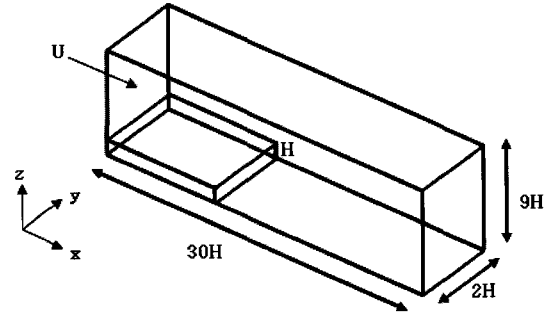


Fig. 1 Computational Domain

치는 영향을 검증할 목적으로, 모든 DES 계산에서 혼합차분법과 풍상차분법을 이용하였다. 계산한 경우를 Table. 1에 나타내었다.

2.2 수치기법

본 연구에서는 3차원 비압축성 Navier-Stokes 방정식을 완전 내재적 분할법(fully implicit fractional step)을 이용하여 계산하였다. 앞 절에서 언급한 혼합차분법의 경우, 2차의 중앙차분과 5차의 풍상차분으로 구성하였다. 그리고 URANS, DES 계산 시 나머지 항들에 대해서는 2차의 중앙차분법을 적용하였고, 모든 경우에 2차의 정확도를 가지고 시간적분을 수행하였다.

2.3 유동조건 및 격자

본 연구에서의 유동 조건 및 형상은 Driver & Seegmiller[2]의 실험을 바탕으로 정하였다. 완전 발달된 난류 유동이 흐르는 채널이 확장되는 형상으로 전체적인 형태와 계산 영역을 Fig. 1에 나타내었다. 확장비(ER)는 1.125이며 계단의 높이를 기준으로 한 레이놀즈 수는 37,500이다.

본 연구에서는 NPARC[11]에서 다양한 난류모형의 검증을 위해 제안하였고, 현재 널리 이용되고 있는[12] 2차원 후방계단 흐름 격자계를 3차원으로 확장하여 사용하였다. 계산 격자는 X, Y, Z 방향으로 163×24×185 로 구성되어있다. 그리고 Fig. 1과 같이 계산영역은 계단 높이 H를 기준으로 하여 30H×2H×9H이다. 벽근처에서의 난류 유동을 정확히 모사하기 위해 벽근처에 격자를 조밀하게 분포시켰으며 가장 작은 격자크기는 $x+=1.748, y+=142, z+=1.285$ 이다. 계산시 사용된 시간간격은 0.05H/U이다.

유동의 입구에서는 완전발달된 난류흐름이 유입되며, 벽면에는 no-slip 경계조건을 주었다. 출구에는 Neumann 조건을, (spanwise) 방향으로는 주기(periodic) 경계조건을 주었다.

Table. 1 Simulation cases

| Simulation Cases | Treatment of convective term |
|------------------|---|
| S-A URANS | 5th upwind scheme |
| SST URANS | 5th upwind scheme |
| S-A DES-Upwind | 5th upwind scheme |
| S-A DES-Hybrid | Hybrid scheme (5th upwind scheme /2nd central) |
| SST DES-Upwind | 5th upwind scheme |
| SST DES-Hybrid | Hybrid scheme (5th upwind scheme /2nd central) |

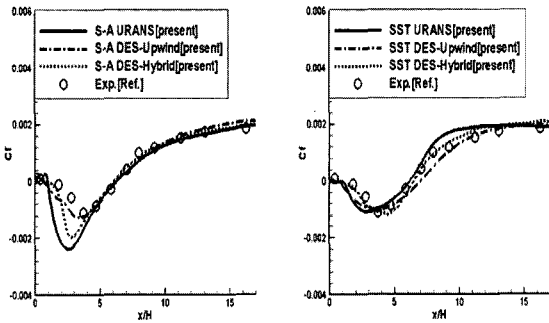


Fig. 2 Skin friction distribution

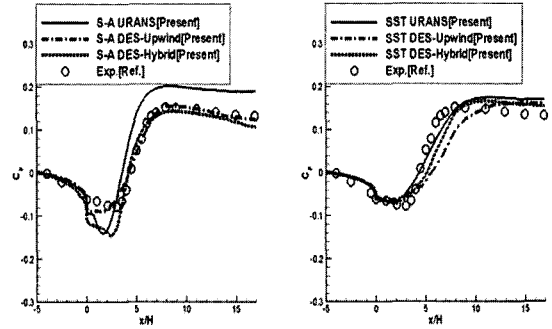


Fig. 3 Pressure coefficient distribution

3. 결과 및 고찰

3.1 마찰계수, 압력계수의 분포와 재순환 영역의 크기 비교

Fig. 2는 본 연구에서 사용된 계산 방법에 따른 마찰계수의 분포를 나타내었다.

S-A DES(Upwind and Hybrid)의 경우, 재발달영역($x/H > 6$)에서는 S-A URANS 결과와 큰 차이를 보이지 않는 반면, 재순환영역($0 < x/H < 6$)에서는 마찰계수의 예측 성능이 향상됨을 알 수 있다. 그리고 특히 이 영역에서는 S-A DES-Upwind 계산 결과가 S-A DES-Hybrid 계산 결과에 비해, 실험치에 더 근접하고 있음을 볼 수 있다. SST model의 경우, URANS나 DES(Upwind and Hybrid)계산 모두 대체적으로는 실험치와 유사한 경향을 보이고 있으나, 특히 SST DES-Hybrid 계산결과가 SST DES-Upwind 계산결과보다 실험치와 전체적으로 잘 일치하고 있음을 보여준다. Fig. 2에 나타난 결과는 수치기법과 난류 모델이 모두 결과에 영향을 미치고 있음을 예시하는 것이다. SST model을 이용한 DES는 혼합차분기법을, S-A model을 이용한 DES는 풍상차분기법을 사용하는 것이 좋을 것이라는 제안을 할 수 있겠다.

재순환 영역의 크기는 계단 벽면에서 마찰계수의 값이 0이

Table. 2 The difference of simulation result and experimental data

| model | Reattachment length(x/H) | Difference with exp.(%) |
|----------------|--------------------------|-------------------------|
| S-A URANS | 6.22 | -0.63 |
| SST URANS | 6.30 | +0.63 |
| S-A DES-Upwind | 6.31 | +0.79 |
| S-A DES-Hybrid | 6.10 | -2.55 |
| SST DES-Upwind | 7.00 | +11.8 |
| SST DES-Hybrid | 6.45 | +3 |
| Experiment[2] | 6.26 | / |

되는 지점까지의 거리로, 본 연구의 계산 결과들과 실험치를 Table. 2에 정리하였다. URANS(S-A and SST model) 계산 결과는 실험치와 1%이내의 차이를 보이며 잘 일치한다. S-A DES(Upwind and Hybrid) 계산의 경우, 예측된 재순환 영역의 크기는 실험치와 3%이내의 차이를 보인다. 그러나 SST DES(Upwind and Hybrid) 계산의 경우에는 대류항의 처리 방법에 따라 결과에 큰 차이를 보이는데, SST DES-Upwind 계산의 경우, 재순환 영역은 실험치보다 약 11%가량 크게 예측하고, SST DES-Hybrid 계산의 경우는 3% 정도 크게 예측한다.

Fig. 3은 아래 벽면을 따른 압력계수의 분포를 나타내고 있다. 기준압력은 Driver & Seegmiller[2]의 실험과 같이 $x/H=4$ 인 지점에서 벽면의 압력으로 정하였다. S-A URANS 계산결과, 전체적인 경향은 비슷하나 실험치와 차이를 보인다. S-A DES(Upwind and Hybrid) 계산 결과, 마찰계수의 분포와 비슷하게 재순환 영역($0 < x/H < 6$)에서의 예측성능은 S-A DES-Upwind 경우가 S-A DES-Hybrid 계산보다 우수하다. SST model(URANS, DES)의 경우, 전반적으로는 실험치와 경향은 유사하나, SST DES-Upwind 계산의 경우 실험치와 더 큰 차이를 보인다.

3.2 속도분포와 난류강도분포

Fig. 4는 $x/H=2.5, 5$ 그리고 10인 지점에서의 흐름방향 U속도분포를 나타내었다. 두 점($x/H=2.5, 5$)은 재순환 영역 내에, 나머지 한 점은 재발달 영역에 위치한다. 전반적으로 속도분포는 실험치와 유사한 경향을 보이고 있으나 모델의 특성과 대류항의 처리방법에 따라 조금씩 차이를 보인다. S-A URANS와 S-A DES-Upwind 계산 결과, 실험치와 전반적으로 잘 일치하고 있는 반면, S-A DES-Hybrid 계산은 계단 아래 부분($0 < z/H < 1$)에서 실험치와 차이를 보이고 있다. 그러나 계단 윗부분($z/H > 1$)에서는 모델간의 차이는 거의 없으며 실험치와도 잘 일치한다. SST URANS, SST DES-Upwind 그리고 SST DES-Hybrid 계산은 S-A model(URANS와 DES)과는 다르

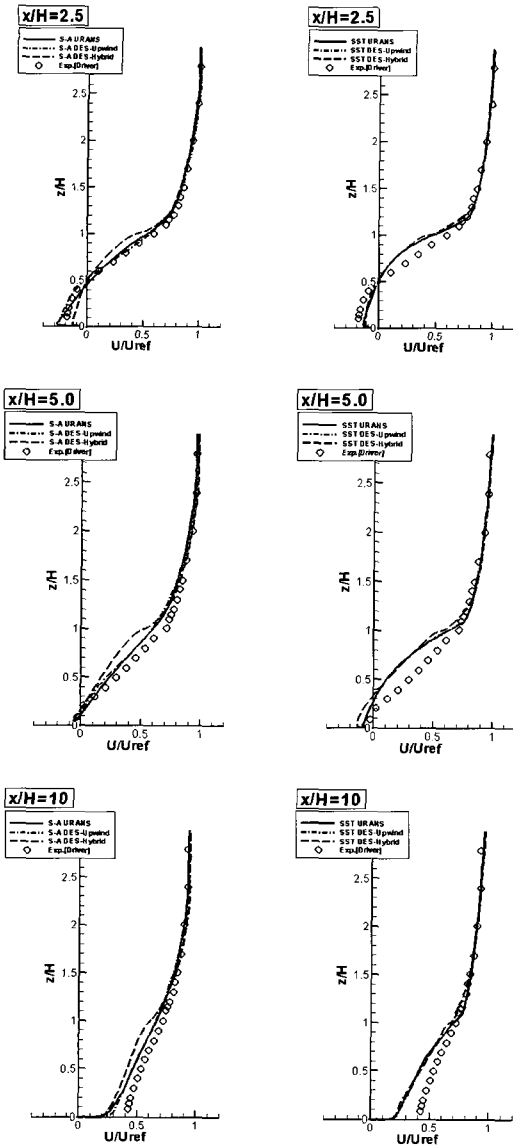


Fig. 4 Mean-velocity profiles in the recirculation and redevelopment region

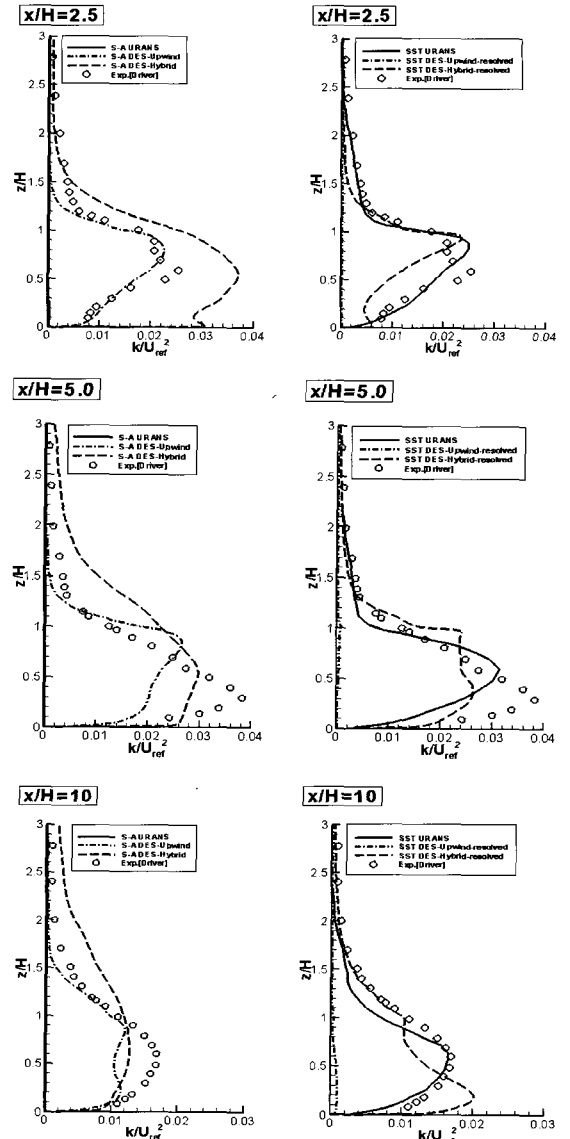


Fig. 5 Turbulent kinetic energy profiles in the recirculation and redevelopment regions

계 세 경우 모두 전체적으로 유사한 경향을 보였다.

Fig. 5는 여러 지점에서의 난류 에너지(k) 분포를 나타내고 있다. S-A DES(Upwind, Hybrid), SST DES(Upwind, Hybrid) 계산은 속도의 섭동량으로부터 resolved turbulent kinetic energy($K=u'u'/2$)를 구하여 도시하였다. SST URANS는 k 방정식을 직접적으로 풀기 때문에 모델된 난류에너지를 구할 수 있으나, S-A URANS 계산은 난류 에너지를 구하는 모델이 아니기 때문에 이에 해당하는 난류 에너지는 구할 수 없다.

S-A DES-Hybrid의 계산은 난류 에너지를 실험치에 비해

전체적으로 크게 예측하고 있는 반면 S-A DES-Upwind 경우는 전반적으로 실험치와 유사한 경향을 보인다. 특히 $z/H > 1$ 인 전단층 부분에서 실험치와 잘 일치한다.

SST DES의 경우 대류항의 처리방법에 따라 난류 에너지 분포가 크게 다를 수 있다. 다음 절의 결과에서도 확인할 수 있듯이, SST DES-Upwind의 경우, 속도의 섭동량이 SST DES-Hybrid 경우에 비해 훨씬 작기 때문에 난류에너지가 매우 작게 예측된다. 이런 경향은 Strelet[5]의 2차원 실린더주위의 유동해석에서도 언급되어 있다. 이는 SST DES의 경우, 대

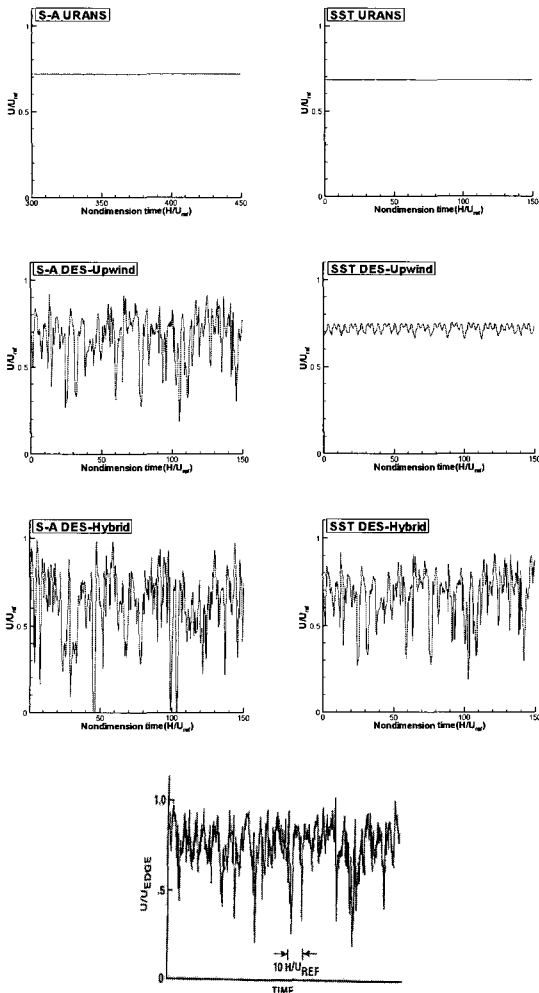


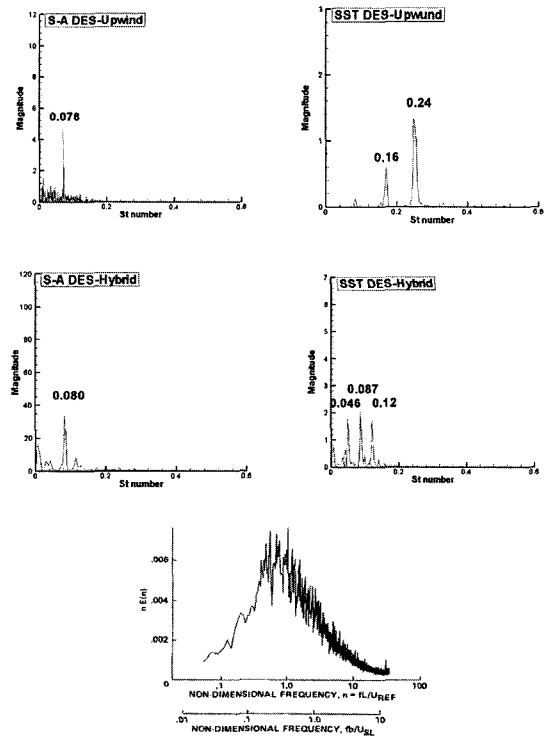
Fig. 6 Time-history of streamwise velocity

류상의 처리방법이 결과에 매우 큰 영향을 미침을 의미한다.

그리고 특히, $z/H=1$ 인 부근에서 난류에너지의 분포를 보면 변곡점 혹은 peak와 같은 부분이 보이는데, 이것은 RANS와 LES의 경계면에서 발생한다. $z/H>1$ 인 부분에서는 RANS결과와 대체로 일치하고, $z/H<1$ 인 부분은 LES가 주로 적용되는 부분이므로 두 계산방법의 차이에 기인한 현상으로 생각된다.

3.3 Frequency of oscillation

Fig. 6에는 Driver & Seegmiller[13]가 $x/H=6.5$, $z/H=1.0$ 인 지점에서 측정된 시간에 따른 흐름방향 속도변화와 $x/H=6.0$, $z/H=1.0$ 인 지점에서 본 연구에서 계산된 흐름방향 속도변화를 비교하였다. S-A URANS와 SST URANS 계산의 경우, 해가 정상상태로 수렴한다. 따라서 실험을 통해 알려진 바와 같이 계단에서 유동이 박리됨으로써 유발되는 유동의 진동 특



FFig. 7 Energy spectrum of streamwise velocity

성 등을 모사할 수 없다. 반면 SST DES-Upwind 계산을 제외한 나머지 DES 계산 결과, 흐름방향 속도의 섭동 폭이 실험치와 상당히 유사함을 알 수 있다. SST DES-upwind 계산의 경우, 유동의 섭동은 있으나 그 폭이 상당히 작고, 그 결과 앞장에서 언급한 바와 같이 난류에너지가 매우 작게 예측된다.

일반적으로 후방계단 유동의 무차원 진동수는

$$St_H = \frac{fH}{U_{ref}} \text{ 혹은 } St_L = \frac{fL}{U_{ref}} \text{ 으로 나타내어진다.}$$

여기서 H는 계단높이, L은 재순환영역의 크기를 의미한다. 확장비가 1.6이고, $Re_H=38,000$ 인 2차원 후방계단 유동의 실험결과에 의하면 무차원 진동수(St_H)가 0.07[14] 이었고, Neto 등[3]이 계산한 LES 결과는 St_H 가 0.09로 예측되었다. Driver 등[13]이 위에서 언급한 시간에 대한 흐름방향의 데이터를 FFT

처리하여 구한 유동의 진동수($St_L = \frac{fL}{U_{ref}}$)는 0.6이었고, 이를 계단높이를 기준으로 한 유동의 진동수로 환산하면, 약 0.096이 된다. 본 연구에서 DES 계산 결과로부터 얻은 Fig. 6의 데이터를 바탕으로 계단높이를 기준으로 한 유동의 진동수를 구하였고, 주된 주파수를 Table. 3에 나타내었다. Fig. 7은 Driver 등[13]의 주파수 스펙트럼과 본 연구의 주파수 스펙

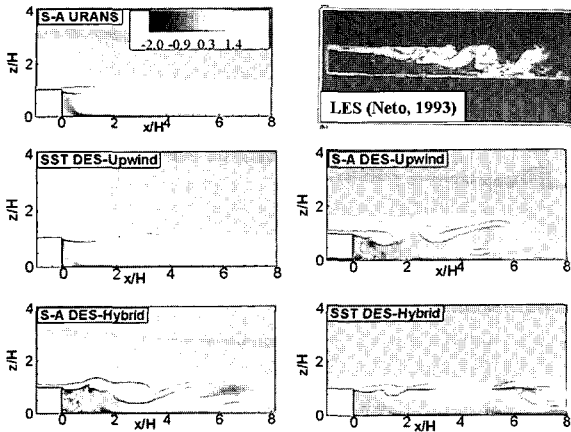


Fig. 8 Instantaneous vorticity contour

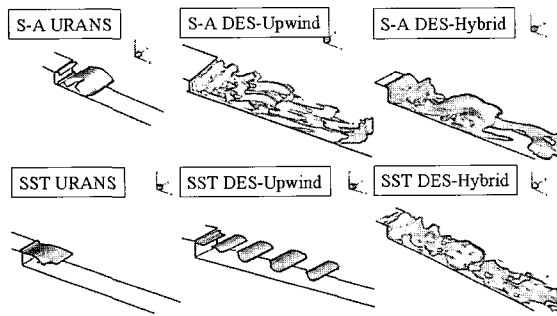


Fig. 9 Instantaneous coherent structures using Q-criteria=0.2

트럼을 도시한 것이다.

S-A DES-Upwind와 S-A DES-Hybrid 계산 결과는 모두 하나의 주된 주파수를 나타내며, 그 값도 거의 유사하다. 그러나 SST DES-Upwind의 경우, 2개의 peak 주파수가 예측되고 그 중 주된 주파수(0.24)도 실험치의 3배 가량 크게 예측되었다. 그러나 SST DES-Hybrid의 경우, 3개의 봉우리 주파수 (peak frequency)가 보이고 그 중에서 가장 큰 봉우리 주파수 (0.087)는 본 연구의 계산 결과 중 가장 실험치에 근접하게 예측한다.

Table. 3 Dominant frequency of flow

| | S-A model | SST model |
|----------|----------------|----------------|
| DES | Upwind : 0.078 | Upwind : 0.24 |
| | Hybrid : 0.080 | Hybrid : 0.087 |
| Exp.[13] | 0.096 | |

3.4 유동 가시화

어느 한 순간의 등와류강도선도(vorticity contour)를 Fig. 8에 나타내었다. URANS(S-A model and SST model)계산의 경우 해가 정상상태로 수렴하고, 와류 구조 또한 단순하다. 하지만 Neto 등[3]의 LES 계산 결과는 계단에서 떨어져 나온 와류 구조는 Kelvin-Helmholtz roll과 유사한 구조를 보여주고 있다. S-A DES, SST DES계산의 경우, SST DES-upwind 계산을 제외하는 모든 경우가 LES 결과와 비슷한 구조를 보여주고 있다.

와류 구조를 다른 관점에서 파악하기 위하여 Hunt 등[15]이 제안한 Q-criteria를 살펴보았다. Q-criteria 방법은 무질서해 보이는 난류 유동에서 일정한 응집 구조를 볼 수 있는 방법으로 아래의 식과 같이 와류 강도의 값과 변형률의 차이로 정의되며, 이 값이 양의 값을 가질 경우 vortex tube로 나타내어진다.

$$Q = \frac{1}{2}(\Omega_{ij}\Omega_{ij} - S_{ij}S_{ij}) > 0 \quad \text{여기서}$$

$$S_{ij} = (u_{i,j} + u_{j,i})/2, \quad \Omega_{ij} = (u_{i,j} - u_{j,i})/2$$

Fig. 9는 임의의 순간의 Q-criteria 응집구조를 나타내고 있다. URANS 경우와 SST DES-Upwind 경우는 비교적 단순한 2차원 구조를 보여주고 있는 반면 S-A DES, SST DES-Hybrid의 경우는 3차원적인 와류구조를 보여주고 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 S-A URANS와 SST URANS, S-A model을 바탕으로 한 S-A DES, SST model 바탕의 SST DES 방법을 이용하여 확장비가 1.125인 2차원 후방계단 유동을 해석하였다. DES 방법의 경우, 대류항의 처리 방법에 따라 DES의 결과가 어떻게 달라지는지도 비교하였다.

S-A URANS와 SST URANS의 경우, 유동의 평균적인 특성인, 마찰계수의 분포, 재부착점의 위치나 속도분포 등은 대체로 양호하게 예측되었으나, 해가 정상상태로 수렴하였기 때문에 유동의 진동주파수 같은 비정상 특성은 모사해내지 못하였고, 계단 뒤 유동의 구조 또한 2차원 구조만을 나타내는 한계가 있다. 반면, DES 계산의 경우, SST DES-upwind 경우를 제외하고는 유동의 평균적인 특성과 비정상 특성 및 3차원적 유동 구조를 예측하고 있음을 알 수 있었다. SST DES의 경우는 대류항의 차분 기법에 따라 예측 결과가 크게 달라져서, 반드시 Hybrid 차분기법을 사용해야 함을 확인할 수 있었다.

후 기

본 연구는 국방과학연구소 수중운동체 기술특화센터의 “전산유체역학을 이용한 수중운동체의 선체-제어판-추진기 상호작용 연구(SM-21)”과제의 지원에 의한 결과 중 일부이며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] Eaton, J.K. and Johnston, J.P., 1981, "A review of research on subsonic turbulent flow reattachment," *AIAA J.*, Vol.19, No.9, p.1093-1100.
- [2] Driver, D.M. and Seegmiller, H.L., 1985, "Features of a Reattaching Turbulent Shear Layer in Divergent Channel Flow," *AIAA J.*, Vol.23, No.2, p.163-171.
- [3] Neto, A.S., Grand, D., Metais, O. and Lesieur, M., 1993, "A numerical investigation of the coherent vortices in turbulence behind a BFS," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.256, p.1-25.
- [4] Spalart, P.R., Jou, W.H., Strelets, M. and Allmaras, S.R., 1997, "Comments on the feasibility of LES for wings and on a hybrid RANS/LES approach," *Advances in DNS /LES:First AFOSR Int. Conf. on DNS/LES*, edited by C. Liu and Z. Liu, Greyden, Columbus.
- [5] Strelets, M., 2001, "Detached eddy simulation of massiveiy separated flows," *AIAA paper* 2001-0879.
- [6] Jovic, S. and Driver, D.M., 1995, "Reynolds number effects on skin friction in separated flows behind a backward facing step," *Experiments in Fluids*, Vol.18, p.87-92.
- [7] Spalart, P.R. and Allmaras, S.R., 1993, "A one equation turbulence model for aerodynamic flow," *AIAA paper* 1992-0439.
- [8] Menter, F.R., 1993, "Zonal two-equation k-omega turbulence models for aerodynamic flow," *AIAA paper* 1993-2906.
- [9] Travin, A., Shur, M., Strelets, M. and Spalart, P.R., 2000, "Physical and numerical upgrades in the detached-eddy simulation of complex turbulent flows," *EUROMECH Colloquium on LES of complex transitional and turbulent flows*.
- [10] Mittal, R. and Moin, P., 1997, "Stability of Upwind-biased finite difference schemes for Large Eddy Simulation of turbulent flows," *AIAA J.*, Vol.35, No.8, p.1415-1417.
- [11] NPARC Ailliance validation site (NASA) (<http://www.grc.nasa.gov/WWW/wind/valid/validation.html>)
- [12] Kumar, S. and Loth, E., 2001, "Detached eddy simulations of an iced-airfoil," *AIAA paper*, 2001-0678.
- [13] Driver, D.M., Seegmiller, H.L. and Marvin, J.G., 1987, "Time-Dependent Behavior of a Reattaching Shear Layer," *AIAA J.*, Vol.25, No.7, p.914-919.
- [14] Eaton, J.K. and Johnston, J.P., 1982, "Low frequency unsteadyness of a reattaching turbulent shear layer," *Turbulent Shear Flows*, vol.3, p.162-170.
- [15] Hunt, J.C.R., Wray, A.A. and Moin, P., 1998, "Eddies stream and convergence zones in turbulent flows," in *Proceedings of the 1998 Summer Program(CTR)*, p.193-208.