

DES 방법을 이용한 비압축성 열린 공동 유동의 수치적 모사

장 경 식¹, 박 승 오², 권 오 준³, G. Constantinescu⁴

Detached Eddy Simulation of an incompressible flow past an open cavity

K. S. Chang, S. O. Park, O. J. Kwon and G. Constantinescu

The three-dimensional incompressible flow past an open cavity in a channel is investigated using Detached Eddy Simulation(DES). The length to depth ratio of the cavity is 2 and the Reynolds number defined with the cavity depth is 3,360. The DES methods are based on the Menter's SST model. In the present work, two types of inflow conditions are used; one is RANS profile, the other is LES inflow from another Large Eddy Simulation(LES) of fully developed channel flow. The results are compared with experimental data and LES results in terms of the mean statistics and temporal physics of the flow.

Key Words: 열린 공동(Open Cavity), Detached Eddy Simulation, Large Eddy Simulation

1. 서 론

열린 공동 유동은 많은 공학적 문제에 나타나는데, 예를 들면 자동차의 sunroof, 항공기의 폭탄 투하 장치, 레이저 발생 장치이다. 공동 유동에 대한 많은 연구가 이루어 졌지만 대부분 압축성 유동에 대해 초점을 맞추고 있다. 비압축성의 경우, Sarohia[1]는 축대칭 공동 유동에 대한 실험을 통해 공동 유동의 특성을 살펴보고 공동 유동이 진동하기 시작하는 최소 길이를 구하였다. Rockwell[2]은 linear stability theory를 2차원 비압축성 공동 유동에 적용하여 진동 주파수와 모드를 연구하였으며 이를 실험치와 비교하여 잘 일치함을 보였다. Yao *et al.*[3]은 길이대 깊이비가 4인 3차원 공동 유동에

해 DNS/LES를 수행하여, 입구에서 층류 유동이 들어올 때 레이놀즈수에 따른 후류의 유동 구조를 살펴보았다.

일정 이상의 레이놀즈 수가 되면 DNS와 LES를 수행하기 위해서는 많은 격자수와 계산시간이 필요하게 된다. 이러한 단점을 보완하기 위해 Spalart *et al.*[4]는 RANS와 LES 방법을 혼합하여 사용하는 DES 방법을 제안하였는데, 이는 격자수가 많이

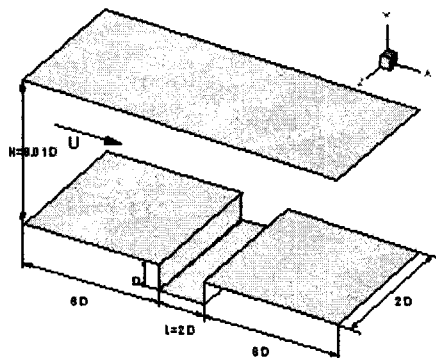


Fig. 1 계산 영역

*1 학생회원, KAIST 항공우주공학과

*2 정회원, KAIST 항공우주공학과

*3 정회원, KAIST 항공우주공학과

*4 Professor, University of Iowa, IIHR

*E-mail : kschang76@kaist.ac.kr

요구되는 벽근처에서는 RANS 계산을, 박리가 수반되는 detached 영역에서는 LES 계산을 하는 방법이다.

본 연구는 입구에서 완전 발달된 난류(fully developed turbulent) 유동이 들어오는 열린 공동 유동을 DES 방법으로 모사하고 이를 해석 할 것이다.

2. 수치해석

2.1 DES

이번 연구에서는 Menter's SST model[5]을 바탕으로 수정한 DES 방법을 이용하여 수치해석을 수행하였다. SST DES 방법은 k -transport equation에서의 dissipative 항에 나타나는 length scale을 RANS와 LES의 length scale로 바꾸어, 벽근처 attached 영역에서는 RANS 방법을 이용하고 detached 영역에서는 LES의 length scale을 적용하여 식의 해를 구하게 된다.[6]

$$D_{DES}^k = k^{3/2} / \tilde{l} \quad (1)$$

$$\tilde{l} = \min(l_{k-\omega}, C_{DES}\Delta) \quad (2)$$

C_{DES} 계수 값은 Menter[5]가 제안한 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.

일반적으로 LES 계산에서 upwind scheme을 이용할 경우 central scheme을 이용하는 경우보다 수치적 dissipation이 크게 되어 틀린 해를 얻을 수가 있으므로, 본 계산에서는 Travin *et al*[6]이 제안한 hybrid central/upwind approximation을 이용한다. Inviscid fluxes(F_{inv}) 항에 대하여 RANS가 적용되는 영역에서는 upwind scheme으로 차분하고 LES 영역에서는 central scheme을 이용하는 방법으로써, blending function σ 을 통해서 구현된다.

2.2 수치기법

3차원 비압축성 Navier-Stokes 방정식을 fully implicit fractional step 방법을 이용하여 계산하였다. 기본적으로 대류항에 대해서는 fifth order upwind scheme를 이용하여 차분하였으며 나머지 항들에 대해서는 second order central difference scheme을 적용하였다. Double time stepping algorithm을 이용하여 2차의 정확도를 가지고 시간적분을 수행하였다

2.3 유동 조건 및 격자

이번 연구에서의 유동 조건 및 열린 공동의 형상은 Pereira and Sousa[7]의 실험을 바탕으로 결정되었다. 열린 공동의 길이대 깊이비(L/D)는 2이며 공동의 깊이를 기준으로 한 레이놀즈 수는 3,360의 값을 가진다. 완전 발달된 난류 유동이 흐르는 채널 내부에 열린 공동이 존재하는 형상으로 전체적인 형상과 계산 영역은 그림 1과 같다.

X,Y,Z 방향으로 150×100×32 격자계로 구성되었으며 공동 내부에 51×41×32의 격자를 분포시켰다. 채널의 높이는 6.092D 이며 spanwise 방향 크기는 2D이다. 벽근처에서의 난류 유동을 정확히 모사하기 위해 벽근처에 격자를 조밀하게 분포시켰으며 그 크기는 벽으로부터 떨어진 첫 번째 지점이 $\Delta y_1^+ \approx 1$ 이다. Spanwise 방향으로 격자 간격 Δz 는 일정하며 그 크기는 대략 $10\Delta y_1^+$ 정도이다.

벽면에는 no-slip 경계조건을 주었으며 출구는 Neumann 조건을, spanwise 방향으로는 periodic 조건을 이용하였다.

이번 연구에서는 유동이 흘러들어오는 입구에서 두 가지 유동 조건을 이용하여 계산을 수행하였으며 이에 따른 유동 결과의 차이를 살펴보았다. 입구에서의 완전 발달된 난류 유동에 대해서 하나는 RANS를 이용하여 얻은 정상 상태의 결과를, 다른 하나는 LES를 통해 얻은 비정상 유동을 시간에 따라 저장한 데이터를 이용하여 입구 조건으로 주었다.

3. 결과 및 고찰

이번 연구에서는 Menter's SST 모델을 바탕으로 URANS(SST URANS), RANS 입구 조건을 가지는 DES(SST DES-R), LES 유동 결과를 입구 조건으로 가지는 DES(SST DES-L), 세 가지 경우에 대해 계산을 수행하였으며 계산 결과를 Pereira and Sousa[7]의 실험 결과와 같은 조건에서 수행한 LES 해석 결과를 바탕으로 비교하였다.

3.1 Mean quantities

그림 2는 시간과 spanwise 방향에 따른 속도 평균값들을 이용하여 mean streamline을 나타낸 것이다. 공동 내부에는 가장 큰 첫 번째 에디와 이와 반대 방향으로 회전하는 두 번째 에디가 존재하는데, 이는 Rowley[8]가 같은 L/D에 대해 수행한 DNS를 통해 얻은 전단층 모드에서의 유동 구조와 잘 일치한다. 세 가지 방법 모두 전체적인 에디 구조는 잘

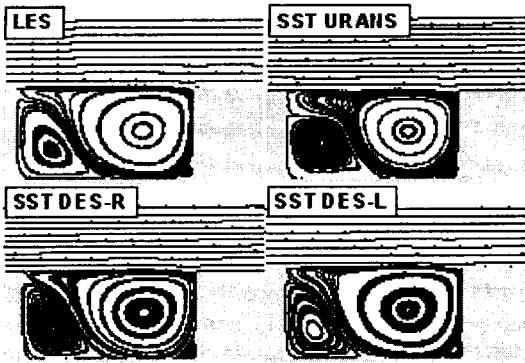


Fig. 2 Mean streamline

예측하지만 SST URANS의 경우 두 번째 에디의 크기와 모양이 LES 결과와 차이를 보이고 있다.

그림 3은 공동 위를 흐르는 전단층의 두께를 vorticity thickness($\delta_w = U / (dU/dy)_{max}$) 정의를 이용하여 나타낸 것이다. Momentum thickness를 이용할 경우 공동 내부의 recirculation 유동 때문에 정확한 값을 얻을 수가 없기 때문이다.[8] LES의 결과를 보면 $6\delta_{w0}$ 와 $13\delta_{w0}$ 사이에서 전형적인 growth rate를 가지며 전체적인 growth rate는 0.18과 0.27 사이의 값을 가진다. 이는 전형적인 난류 자유 전단층이 가지는 0.162[9] 값보다 약간 큰 값을 가진다. 전단층의 두께를 비교적 크게 예측하는 SST URANS와는 달리 나머지 두 방법은 비교적 잘 예측하며 growth rate도 0.26으로 LES 결과와 비슷한 값을 가진다.

이미 구한 평균 속도 장을 이용하여 resolved turbulent kinetic energy(TKE) budget을 구하여 보았다. 그림 4는 각각의 방법에 따른 resolved turbulent kinetic energy ($k = u'u'/2$)를 나타낸 것으로 입구에서의 u_r^2 으로 무차원화 시킨 값이다. 앞선 이

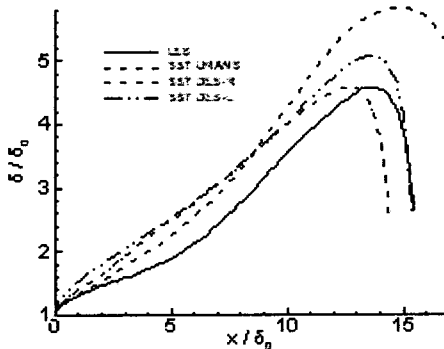


Fig. 3 Vorticity thickness along shear layer

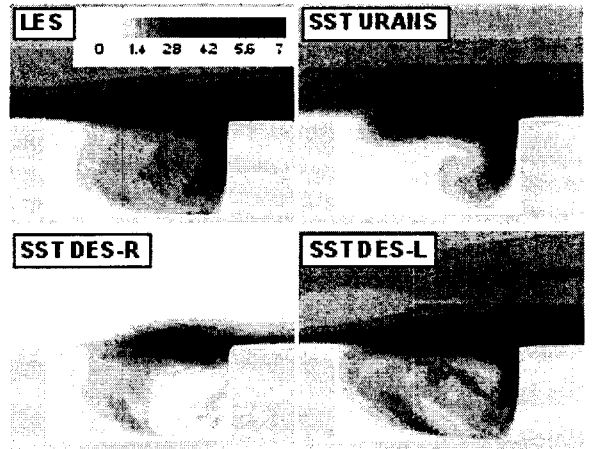


Fig. 4 Resolved turbulent kinetic energy (modeled TKE in SST URANS case)

후 전단층을 따라 TKE 값이 증가하면서 뒷전 근처까지 fluctuation 크기가 큰 것을 알 수 있다. SST URANS의 경우 해가 정상상태로 수렴하여 속도장의 fluctuation 값이 0이 되어 resolved TKE 값은 0이 되므로 그림 4에서는 modeled TKE를 나타내었다. 그림 4에서 알 수 있듯이 SST DES-L 방법이 LES 결과와 가장 비슷한 결과를 예측하고 있으며 DES-R의 경우 resolve 할 수 있는 fluctuation의 크기가 작음을 알 수 있다.

3.2 Unsteady quantities

시간에 따른 속도 변화에 대해 FFT를 이용한 power spectral density를 구하였다. 그림 5는 $(x/D, y/D) = (1.8, 0.0)$ 위치에서의 수직 속도(v) 성분 대한 결과이다. LES 결과를 살펴보면 입구에서 들어오는 완전 발달된 난류 유동 때문에 광범위한 에너지 스펙트럼 형태를 나타낸다. 이는 fluctuation이 없는 층류 유동이 들어왔을 경우 2-3개의 dominant peak만 존재하는 결과와 차이가 있다. 가장 큰 peak 값을 가지는 0.38과 그 다음의 0.51은 Rockwell[2]이 예측한 공동 유동의 무차원 진동수 결과에서의 첫 번째 모드와 두 번째 모드에 해당한다. SST DES-R의 경우 SST DES-L 경우보다 훨씬 작은 값의 속도 fluctuation이 들어오면서 0.31의 main frequency와 0.62의 harmonic frequency만 존재한다. SST DES-L은 $St < 1.0$ 에서의 광범위한 에너지 스펙트럼이 존재하게 되며 이때 나타나는 peak frequency도 LES 결과와 비슷하다.

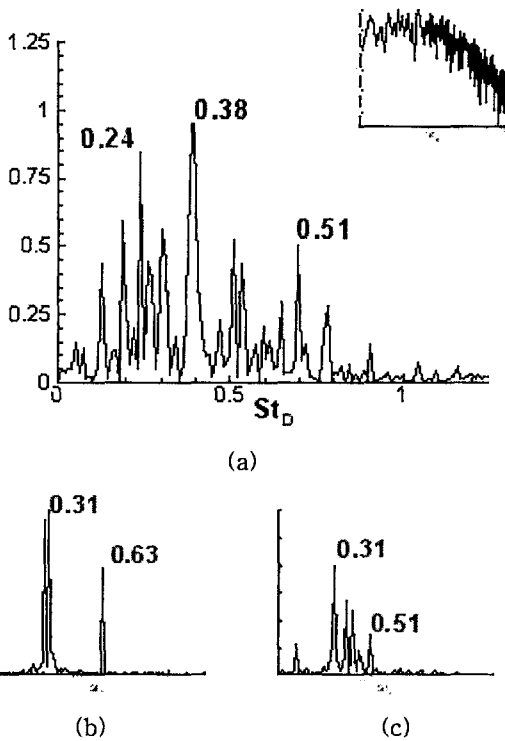


Fig. 5 Power spectra of the vertical velocity at $(x/D,y/D)=(1.8,0,0)$, (a)LES,(b)DES-R,(c)DES-L

3.3 Flow visualization

그림 6은 DES의 결과에 대해 어느 순간에 각각의 평면에 따른 vorticity magnitude ($|\omega|=\omega_x^2+\omega_y^2+\omega_z^2)^{0.5}$) contour를 나타낸다. SST DES-R의 경우 공동의 입구 전까지 2차원 유동의 형태를 보이다가 그 이후부터 3차원 구조의 유동을 잘 모사하고 있다. Upstream edge에서 발생한 vortices가 공동 위를 흘러가서 downstream edge에 부딪히며 심한 왜곡 현상을 나타내고 있다. 반면에 SST DES-L은 채널 입구부터 fluctuation를 가지는 유동이 들어오기 때문에 전체적으로 3차원 유동의 형태를 띠고 있으며, 그림 7을 통해 SST DES-R의 결과보다 공동내부에 강한 난류 유동 형태를 띠면서 downstream edge 이후에도 hairpin 구조와 같은 전형적인 난류 경계층의 vortical structure를 보이고 있다.

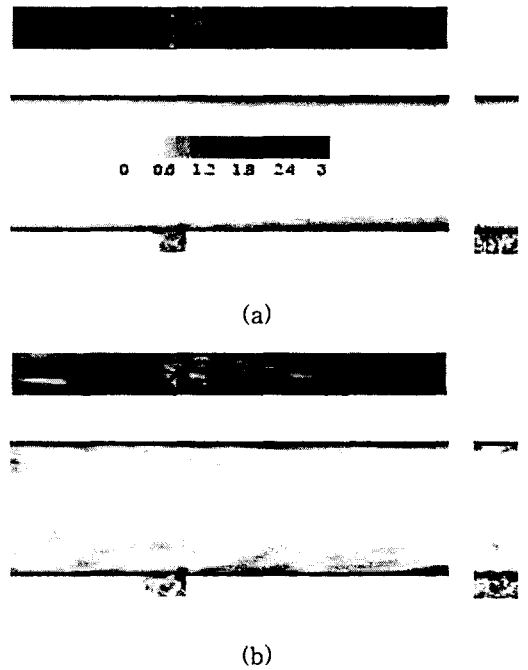


Fig. 6 Vorticity magnitude of each plane, (a)DES-R,(b)DES-L

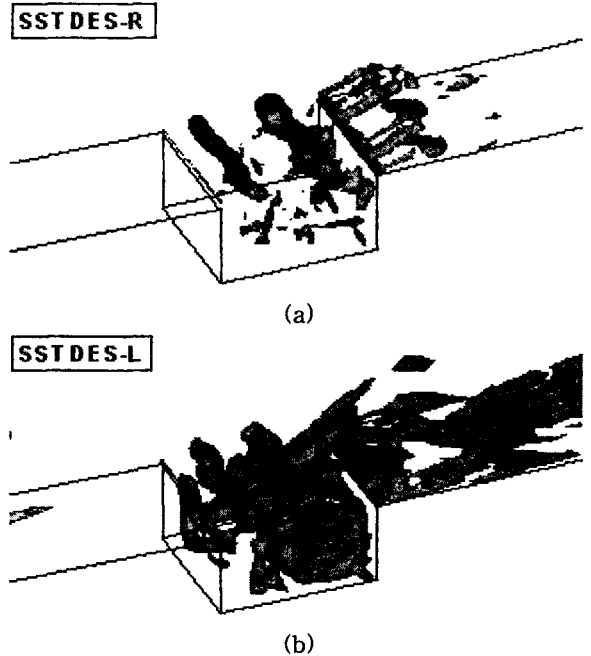


Fig. 7 Vortical Structures using Q-criteria $Q/(U_\infty/L)^2=0.5$, (a)DES-R,(b)DES-L

4. 결 론

Menter가 제안한 SST model을 바탕으로 제안된 SST DES 방법을 이용하여 길이대 깊이버가 2인 비압축성 열린 공동 유동을 해석하였다. 입구에서의 완전 발달된 난류 유동 조건에 1) RANS 결과를 이용한 정상 상태의 profiles 과 2) LES를 통해 얻은 비정상 유동 결과를 각각 이용하여 계산 결과를 비교하였다. SST URANS의 경우 해가 정상 상태로 수렴하여 유동의 fluctuation이 생기지 않았지만, 각각의 다른 입구조건을 가지는 DES 모두 비정상 해를 얻을 수 있었으며 유동의 mean streamline과 속도 profiles 값들은 LES 결과와 비교적 잘 일치하였다. 하지만 TKE budgets과 유동의 무차원 진동수 및 유동 구조는 LES inflow를 이용한 SST DES-L 경우에 가장 잘 예측됨을 알 수 있었다.

후기

본 연구는 한국과학기술정보연구원의 '제6차 전략 과제 지원 프로그램'을 통해 수행되었음. 컴퓨팅 자원을 제공해 준 슈퍼컴퓨팅센터와 기술지원을 해 준 이상민 박사께 감사드립니다.

참고문헌

[1] Sarohia, V., 1977, "Experimental investigation of oscillation in flows over shallow cavities," *AIAA J.*, 15, pp. 984-991.

[2] Rockwell, D. and Naudascher, E., 1978, "Review Self-sustaining oscillations of flow past cavities," *J. Fluids Eng.*, 100, pp.152-165.

[3] Yao, H., Cooper, R.K., and Raghunthan, S.R., "Large-eddy simulation of laminar-to-turbulent transition in incompressible flow past 3-D rectangular cavity," *AIAA paper*, 2001-31318.

[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] Menter, F.R., "Zonal two-equation k-omega turbulence models for aerodynamic flow," *AIAA paper*, 1993-2906.

[6] Travin, A., Shur, M., Strelets, M.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*.

[7] Pereira, C.F., and Sousa, J.M.M., 1995, "Experimental and numerical investigation of flow oscillations in a rectangular cavity," *J. Fluids Eng.* 117, pp.68-73.

[8] Rowley, C.W., Colonius, T., and Gasu, A.J., 2002, "On self-sustained oscillation in two dimensional compressible flow over rectangular cavities," *J. Fluid Mech.*, 455, pp.315-346.

[9] Brown, G.L., and Roshko, A., 1974, "On the density effects and large structure in turbulent mixing layer," *J. Fluid Mech.*, 64, pp.775-816.