

경사충격파와 와류 상호작용에 대한 수치적 연구

Numerical study on the oblique shock wave/vortex interaction

문성목*, 김종암, 노오현(서울대학교)

ABSTRACT

For the prediction on the onset of oblique shock wave-induced vortex breakdown, computational studies on the Oblique Shock wave/Vortex Interaction (OSVI) are conducted and compared with both experimental results and analytic model. A Shock-stable numerical scheme, the Roe scheme with Mach number-based function (RoeM), and a two-equation eddy viscosity-transport approach are used for three-dimensional turbulent flow computations. The computational configuration is identical to available experiment, and we attempt to ascertain the effect of parameters such as a vortex strength, streamwise velocity deficit, and shock strength at a freestream Mach number of 2.49. Numerical simulations using the $k-\omega$ SST turbulence model and suitably modeled vortex profiles are able to accurately reproduce many fine features through a direct comparison with experimental observations. The present computational approach to determine the criterion on the onset of oblique shock wave-induced vortex breakdown is found to be in good agreement with both the experimental result and the analytic prediction.

1. 서론

경사충격파와 와류간의 상호작용(Oblique Shock wave/Vortex Interaction, OSVI)에 관한 문제는 흥미로운 물리적 현상과 다양한 실용성으로 인해 최근 들어 매우 중요한 연구과제가 되고 있다. 이를테면 높은 받음각에서 비행하고 있는 비행체의 끝에서 발생한 와류가 주익의 제어면 주위에 이미 형성되어 있는 충격파에 떠내려 와서 부딪치는 경우가 흔히 발생한다. 혹은 헬리콥터 로터가 초임계 마하수 상태에서 작동하고 있는 경우, 블레이드면에 형성된 충격파와 바로 앞 블레이드에서 떠내려 온 깃끝 와류(tip vortex)와 부딪쳐 소위 “블레이드 슬랩(blade slap)”이라는 공력현상을 일으키기도 한다. 그리고 엔진흡입구로 와류가 유입되므로써 엔진성능을 저하시키고, 공기 흡입구에서 blockage 현상을 야기하는 등 역효과를 낳기도 한다. 흥미롭게도 와류의 세기와 충격파의 세기가 약한 경우의 상호작용이라면 와류와 충격파 어느 것에도 큰 변화를 보이지 않지만, 상대적으로 강한 와류세기와 충격파 세기에서의 상호작용이라면 와류와 충격파 모두 급격한 유동장 변화를 관찰할 수 있다. 본 논문에서는 전자의 경우를 “약한 상호작용”이라고 명

칭하며, 후자의 경우를 “강한 상호작용”이라고 명칭한다. 강한 상호작용에서는 Fig. 5에서 보는 바와 같이 와류와 충돌한 지점에서는 원래 경사충격파로부터 분리충격파가 형성되고 있다. 또한 와류 핵(vortex core)의 팽창, 충격파 생성면(shock generating surface)에서 커다란 압력변화를 관찰할 수 있다. 이러한 강한 상호작용에서는 비행체의 성능에 심각한 영향을 미치게 되는 데, 즉 양력이 감소하고 항력이 증가할 뿐 아니라 피칭 모멘트가 갑작스럽게 변화함으로써 공력 특성을 저해하고 안정성과 동적 제어 특성에 악영향을 끼친다. 이러한 현상은 와류붕괴(vortex breakdown)와 밀접한 관련이 있는 것으로 알려져 있다. 와류붕괴는 회전하는 와류 핵(core) 직경의 급격한 증가, 원주방향 속도성분의 감소, 그리고 축방향 속도 성분의 급격한 감소, 혹은 역방향 속도(reverse axial velocity) 성분의 존재, 와류 축중심에서의 정체점 형성, 정체영역 내부에서의 재순환 흐름(recirculation flow)등으로 특징지을 수 있다[1].

OSVI는 수많은 연구자[2-6]들에 의해 연구되어 왔으며, 그 중에서 Smart와 Kalkhoran[3](1995)은 OSVI에 대해 마하수 2.5인 초음속 유동장에서 격

입각을 22° , 25° , 29° 로 달리하였으며 와류세기도 받음각을 5.4° , 10.7° 로 나누어 실험하였다. 이들의 연구에서 강한 상호작용일 때 원래 경사충격파로부터 전방으로 분리충격파가 국부적으로 떨어져 나온 형상을 관찰하였고, 와류가 충격파와 충돌한 후 와류붕괴 현상이 일어나고 있음을 보여 주었다. 본 연구에서 수행한 OSVI 계산은 이들의 실험 조건을 모델로 하였다. 이론적으로 Mahesh[6]

(1996)은 와류축에서 역압력상승이 축방향 모멘트 플럭스보다 큰 경우를 와류붕괴로 가정하여 와류 회전율과 전방마하수의 함수로 와류붕괴제한곡선을 만들었다. 본 논문에서는 Ref. 3의 실험조건을 모델로 하여 수치적으로 모사하였고 Mahesh의 와류붕괴제한곡선에 근거하여 본 연구 수치결과의 타당성을 검증하고자 한다. 그리고 실험적으로 얻기 어려운 OSVI의 유동을 가시화하므로써 장차 OSVI의 메커니즘을 밝히는데 도움이 되고자 한다.

II. 본 론

1. 지배방정식 및 수치기법

경사충격파와 와류간의 상호작용을 해석하기 위해 3차원 비정상 압축성 Navier-Stokes 방정식을 이용하였다. 공간 차분법으로 Roe의 FDS(Flux Difference Splitting)기법에 기반을 두고 충격파 안정성을 지닌 RoeM기법[7]을 사용하였고, 고차의 공간 정확도를 얻기 위해 MUSCL(Monotone Upstream Centered Scheme for Conservation Law)기법은 Van Albada 제한자(limiter)와 함께 사용하였다. 시간 이산화 방법으로는 AF-ADI(Approximate Factorization - Alternating Direction Implicit)기법을 채택하였고, 비정상 유동의 정확한 모사를 위하여 이중적 시간 전진법(dual time stepping)을 적용하여 2차의 시간 정확도를 얻을 수 있었다. 난류 효과를 고려하기 위해 압축성 모델을 첨가한 2-방정식 난류 모델($k-\omega$ SST)을 사용하였다.

2. Burger의 와류모델

OSVI문제를 정확히 수치적으로 모사하기 위해서는 불가피하게 정확한 와류모델이 절실히 필요한 실정이며 이러한 상황에서 Ref. 8의 실험결과와 부합되는 Burger의 와류모델이 채택되었다. 원주방향 속도 성분이 중심에서 멀어질수록 지수함수적(exponential)으로 급격히 줄어드는 Burger의 와류 모델은 다음과 같이 표현된다

$$v_\theta(r) = \frac{\Gamma_0}{r} [1 - e^{-a(r/r_c)^2}] \quad (1)$$

여기서 r_c 는 와류핵 반지름(vortex core radius)으로써 중심으로부터 $|v_\theta|$ 가 최대값이 되는 지점

까지의 반경 방향 거리를 말하며 Γ_0 은 와류 순환(vortex circulation)으로 정의된다. 위의 두 변수는 와류의 세기를 결정하는 중요한 역할을 한다. 축방향 속도성분은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 와류 중심축에서의 속도가 주위속도보다 작은 후류형태(wakelike)의 속도 분포를 가진다.

$$u_s = u_\infty [1 + (\Phi - 1)e^{-c(r/b)^2}] \quad (2)$$

여기서 b 는 $u_s - u_\infty$ 이 주어진 $u_{axis} - u_\infty$ 와 같게 되는 지점이다. 그리고 Φ 는 와류축중심에서의 속도와 자유류 속도간의 비(u_{axis}/u_∞)를 나타낸 것이다. 와류에서의 압력과 밀도는 다음과 같은 식으로 구할 수 있다.

$$\frac{dp_s}{dr} = \frac{\rho_s v_\theta^2}{r} \quad (3)$$

그리고 일정한 엔탈피를 가지는 유동에 대한 에너지 방정식은 다음과 같다.

$$-\frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{p_s}{\rho_s} + \frac{1}{2}(v_\theta^2 + u_s^2) = H_0 \quad (4)$$

$H_0 = H_{\infty,0} =$ 일정하다고 가정한 다음, 상태방정식을 이용하면 다음과 같은 식으로 정리할 수 있다.

$$\frac{dp_s}{dr} = \rho_s \frac{v_\theta^2}{r} = \frac{p_s}{\rho_{\infty,0}} \frac{v_\theta^2}{\frac{\gamma-1}{2\gamma}(v_\theta^2 + u_s^2)} r(5)$$

(1)-(5)식을 4차 Runge-Kutta기법을 이용하여 풀면 와류에 의해 유도된 압력 p_s 과 밀도 ρ_s 를 계산할 수 있다. Fig. 1은 강한 와류와 약한 와류에서의 원주방향 속도 성분과 축방향 속도 성분을 나타낸 것이다.

3. 와류붕괴제한곡선(vortex breakdown limit curve)

본 연구에서 수행한 수치적 해석의 타당성을 검토하기 위해 Mahesh에 의해서 이론적으로 제시된 와류붕괴제한곡선을 이용하였다. 기본적인 관계식으로 (3)식과 Rankine 와류 모델식을 이용하였으며, 와류축에서 역압력상승이 흐름방향 모멘트 플럭스보다 큰 경우에 와류붕괴현상이 일어난다고 가정하여 와류 회전수(swirl number of the vortex)와 전방자유류마하수의 함수로 다음과 같은 와류붕괴제한곡선을 제시하였다.

$$1 + \frac{2\gamma}{\gamma+1} [(M_\infty \sin \beta)^2 - 1] - [1 - (\gamma-1)I_{crit}^2 M_\infty^2]^{1/\gamma} \\ = \gamma M_\infty^2 (1 + \frac{\Delta u}{u_\infty^2} [1 - (\gamma-1)I_{crit}^2 M_\infty^2]^{1/\gamma-1})$$

여기서 β 는 충격파각, M_∞ 은 전방자유류마하수, I_{crit} 는 임계 와류 회전수로 정의되며 원주방향 속도의

최대치와 자유류 속도간의 비를 의미한다. Δu 는 와류 중심에서의 축방향속도와 자유류 속도간의 차이를 말한다. Ref. 8의 실험결과에 의해 $\Delta u/u_\infty$ 는 강한 와류인 경우 -0.33, 약한 와류인 경우 -0.28의 값을 사용하였고 β 값은 경사충격파 관계식에 의하여 이론적으로 구하였으며, 격임각이 22°인 경우 45.75°, 25°인 경우 50.5°, 29°인 경우 60.69°을 각각 사용하였다. 위 식은 Newton-Raphson기법을 이용하여 Δu 값과 격임각에 따라 Fig. 2에 나타내었다.

III. 수치 계산 결과

본 논문에서는 OSVI문제를 해석하기 위해 격임각을 22°, 25°, 29°로 나누어 해석하였으며 와류 세기는 약한 경우와 강한 경우로 나누어 계산하였다. 와류축중심에서의 속도와 자유류속도간의 비로 정의되는 Φ 는 Kalkhoran[8]의 실험결과에 따라 약한 와류인 경우는 0.72, 강한 와류인 경우는 0.67을 사용하였다. 상호작용의 형태는 약한 경우와 강한 경우로 나누어 구분하였으며 계통적 연구(parametric study)를 위해서 격임각과 와류세기에 따라 Table 2에 분류해 놓았다. 쇄기의 자유류 방향 길이 D 는 6.6646, 자유류 마하수는 2.49, 정체온도는 298 K로 Kalkhoran[3]의 실험조건과 동일한 내용으로 정하였다. 시간 간격은 무차원화된 값으로 0.02로 정하였으며 반복 계산(sub-iteration)횟수는 400회로 제한하였다. 그리고 이 시간 간격에 대해서는 CFL값을 3정도로 정하였다. 그리고 본 계산을 위해 사용된 격자수는 $120 \times 56 \times 86$ 이며 와류가 떠나려 할 때 수치 점성을 최소화하기 위해 격자를 적절히 모아 주었다.

본 논문에서는 두 단계로 나누어 연구과정이 진행되었다. 첫번째 단계에서는 경사충격파가 정상상태로 형성되기까지 과정을 수행하였고, 두번째 단계에서는 Fig. 3에서 보는 바와 같이 충격파와 와류가 서로 충돌할 수 있게 초음속 유입류 경계조건으로 자유류값 대신 이미 모델링되어 있는 와류를 경계조건으로 삼입하여 유동장을 해석하였다. 특히 교란 방법(perturbation method)을 이용하여 계산영역안에 와류를 삼입하였는데, 이 방법은 적은 수의 격자계에서도 와류의 확산 현상을 해결할 수 있어 최근까지 널리 사용되고 있다.

Fig. 4는 격임각이 22°이고 약한 와류세기인 약한 상호작용(case 1)의 전형적인 유동장을 나타낸 것이다. 충격파가 경미한 변형을 일으키고 있으며 충돌을 일어난 지점에서는 약한 팽창파가 발생하고 있음을 알 수 있다. Fig. 5는 case 6에 대한 전형적인 강한 상호작용을 보여 주고 있다. 와류와 경사충격파가 충돌하게 되면 경사충격파 전방으로 분리충격파가 형성되며, 분리된 충격파와 경사충격

파가 만나는 지점에서 높은 압력의 파가 쇄기쪽으로 반사됨으로 말미암아 쇄기 앞부분에는 강한 흡입(suction)현상이 일어난다. 그리고 분리충격파 후방에는 정체영역으로 둘러싸인 아음속영역이 존재하는데, 그 내부흐름이 역방향속도성분을 가지는 것으로 보아 와류붕괴가 실제로 일어나고 있음을 알 수 있었다. 또한 와류붕괴영역에서의 속도벡터를 보여주고 있으며 와류붕괴의 특징이라고 할 수 있는 재순환 흐름(recirculating flow)을 관찰할 수 있다. 와류가 경사충격파에 부딪치게 되면 와류핵 내부의 낮은 마하수 분포 때문에 충격파 후방으로 아음속영역을 형성시킨다. 와류내부의 낮은 마하수 분포는 결국 경사충격파의 급격한 압력구배에 의해 아음속 영역을 포함한 분리충격파가 형성하고 있다. Fig. 6은 각 격임각에 대하여 와류와 경사충격파가 충돌하였을 때 표면압력을 실험치와 비교하였다. 대체로 실험치와 일치하는 결과를 보여주고 있으며, 격임각 29°의 경우는 와류가 삼입되지 않은 경우와 마찬가지로 3차원 효과로 인하여 발생된 오차로 여겨지고 있다. 격임각이 29°이고 강한 와류인 경우 $x/c=0.2$ 부근에서 압력이 급격히 증가하면서 최대값을 가지고 되는데, 이것은 분리충격파와 경사충격파간의 상호작용으로 인하여 생긴 높은 압력의 파가 쇄기표면으로 반사되어 강한 흡입(suction)현상을 보이고 있다. 그리고 $x/c=0.4$ 부근에서 압력이 감소하면서 최소값을 가지게 되는데, 이것은 아음속영역인 재순환영역에서 초음속영역으로 재가속되는 과정에서 생긴 팽창파편의 낮은 압력이 쇄기표면에 부딪치면서 생기는 현상이다.

Fig. 7은 재순환 영역에서의 축방향속도성분을 각 격임각에 대해서 나타낸 것이다. 여기서 격임각 $\theta = 22^\circ, 25^\circ$ 이고 약한 와류인 경우(case 1, 3)를 제외하고 나머지 경우에서 역방향속도성분이 존재함을 알 수 있었다. 앞서 언급한 대로 축방향속도 성분에서 역방향속도성분의 존재는 와류붕괴의 결정적인 증거가 된다. Mahesh에 의해서 이론적 제시된 와류붕괴곡선(Fig. 2)에서는 격임각이 22°, 25°이고 약한 와류인 경우(case 1, 3)가 와류붕괴가 일어나지 않는 영역에 속해 있다. 이것은 case 1, 3을 제외하고 case 2, 4, 5, 6의 경우는 와류붕괴가 발생하고 있다는 것을 이론적으로 예상하고 있다. 이것은 수치적 결과와 일치된 결과를 보여주고 있으며 Fig. 2와 Fig. 7에서 본 바와 같이 격임각 $\theta = 22^\circ, 25^\circ$ 이고 약한 와류인 경우(case 1, 3)를 제외하고 나머지(case 2, 4, 5, 6) 모두 와류붕괴가 일어나고 있음을 확인할 수 있었다.

IV. 결론

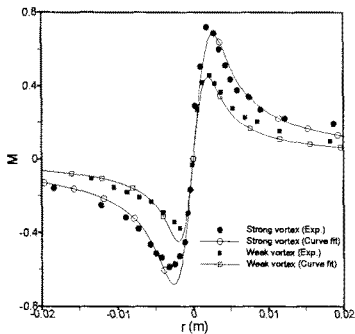
본 논문에서는 3차원 쇄기에서 발생하는 OSVI문

제를 해석하기 위해 3차원 비정상 압축성 Navier-Stokes 방정식을 사용하였다. 와류세기과 격입각의 변화에 따른 상호작용의 영향을 연구하였고, 특히 축방향 속도성분을 고려한 와류모델을 사용하여 와류붕괴에 미치는 영향을 관찰하였다. OSVI문제를 정확하게 해석하기 위해 실험치와 일치하는 Burger의 와류모델을 이용하였고, 교란방법을 이용하여 유동장에 와류모델을 삽입하였다.

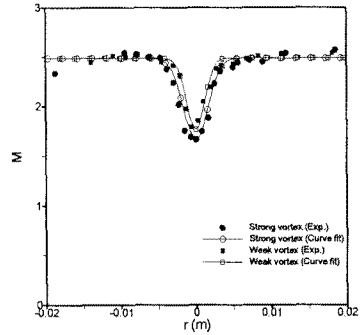
본 연구에서는 상호작용의 형태를 약한 상호작용과 강한 상호작용으로 나누어 분류하였으며, 그 중에서 와류붕괴를 일으키는 경우를 강한 상호작용으로 정의하였다. 약한 상호작용에서는 와류와 충격파 충돌지점에서 작은 아음속영역을 형성하였고 약한 팽창파면이 발생하였다. 강한 상호작용에서는 아음속 재순환영역으로 구성된 분리충격파가 형성되고 있음을 확인할 수 있었고, 와류붕괴와 관련된 각각의 특성인 와류축에서 정체영역의 형성, 역방향 축방향속도성분의 존재, 정체영역 내부에 재순환흐름을 관찰하였으며 실험으로 파악하기 어려운 유동장 구조를 가지적으로 모사할 수 있었다. 축방향속도성분을 고려하여 와류붕괴형성기준을 이론적으로 제시한 Mahesh의 예상과는 일치하였으며, 경사충격파에 대한 와류붕괴제한곡선의 타당성을 최초로 검증하였다.

Table 1. Summary of OSVI analysis results

Case no.	Flow deflection angle θ	vortex strength	Experimental observation	Analytic prediction	Computational result
1	22°	weak	Smooth Shock	No breakdown	No breakdown
2	22°	strong	Shock disruption	Breakdown	Breakdown
3	25°	weak	Smooth Shock	No breakdown	No breakdown
4	25°	strong	Shock separation	Breakdown	Breakdown
5	29°	weak	Smooth shock	Breakdown	Breakdown
6	29°	strong	Shock separation	Breakdown	Breakdown

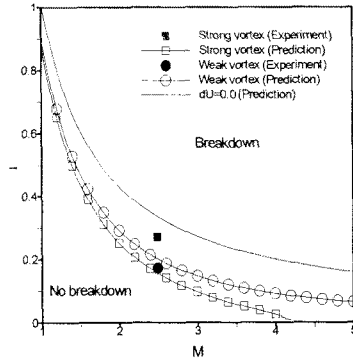
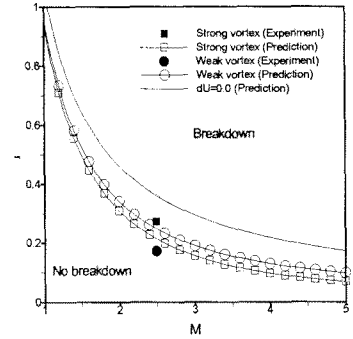


(a) Swirl Mach number distributions



(b) Streamwise Mach number distributions

Fig. 1. Vortex properties through the vortex core



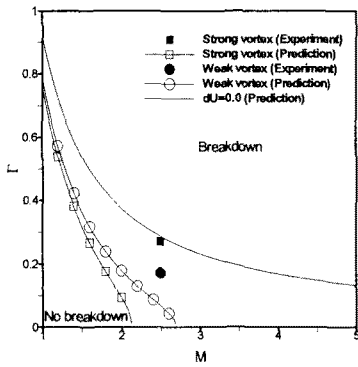


Fig. 2. Evaluation of Mahesh's analytic prediction of the onset of oblique shock-induced vortex breakdown (22°, 25°, 29° of flow deflection)

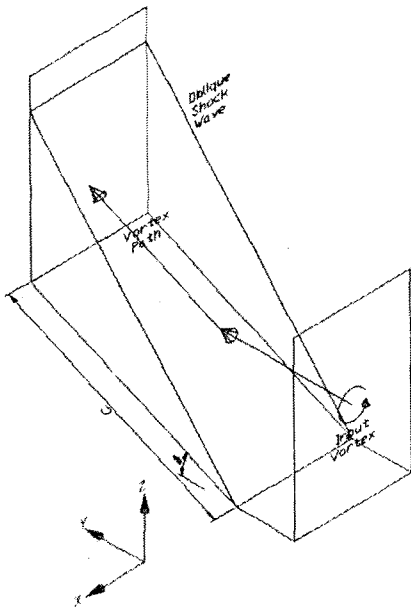
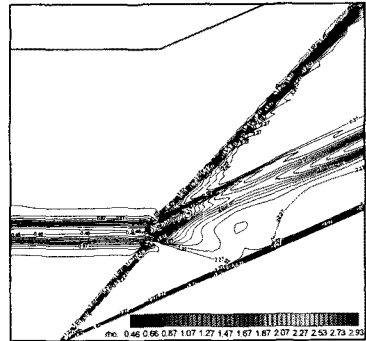
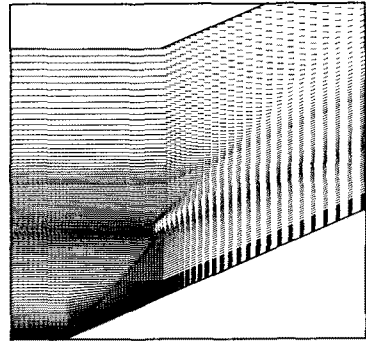


Fig. 3. Schematics of oblique shock wave/vortex interaction (OSVI)

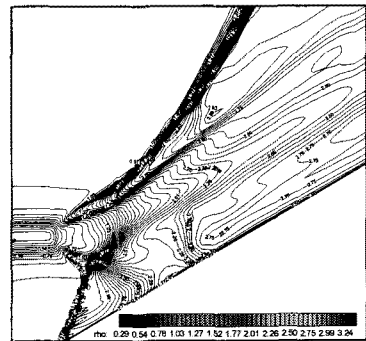


(a) Density contours in the symmetric plane

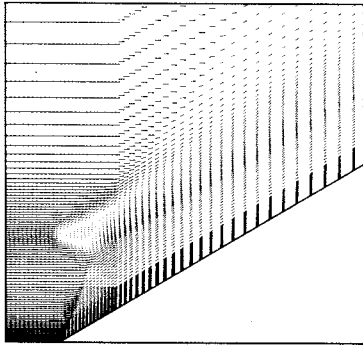


(b) Velocity vectors in the symmetric plane

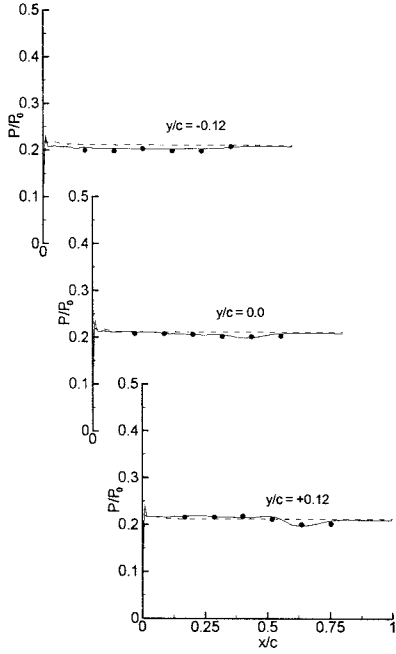
Fig. 4. Flowfields of the typical weak OSVI case



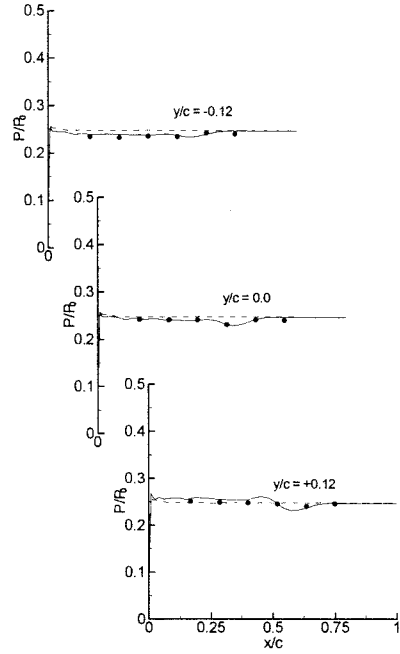
(a) Density contours in the symmetric plane



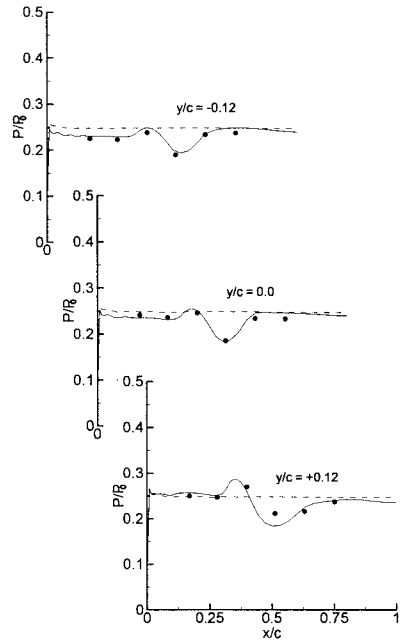
(b) Velocity vectors in the symmetric plane
 Fig. 5. Flowfields of the typical strong OSVI (case6)



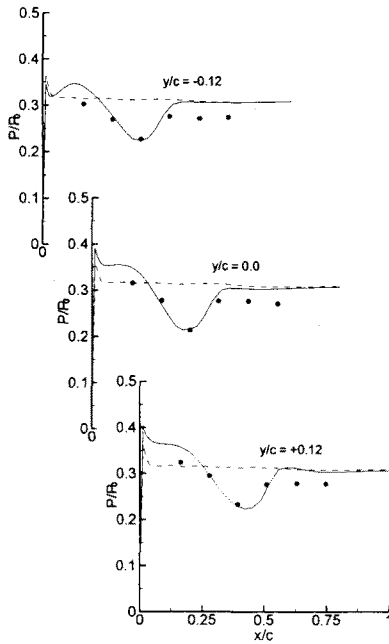
(a) $\theta = 22^\circ$ /weak vortex interaction (case 1)



(b) $\theta = 25^\circ$ /weak vortex interaction (case 3)



(c) $\theta = 25^\circ$ /strong vortex interaction (case 4)



(d) $\theta = 29^\circ$ /strong vortex interaction (case 6)

Fig. 6. Wedge surface pressure distributions

후 기

본 연구는 국방과학연구소의 기초연구 과제 지원 "CFD 유동 해석의 공용성 증대"에 의한 연구결과의 일부이며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

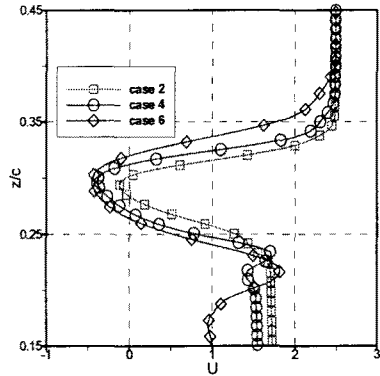
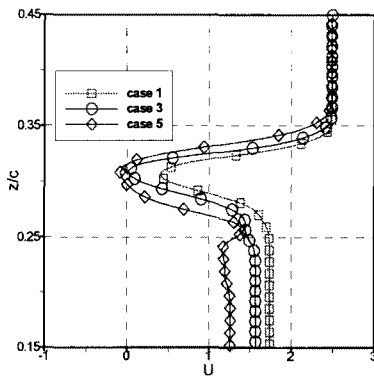


Fig. 7. Comparison of the axial velocity distributions at recirculating region: <upper>weak vortex <lower>strong vortex

참고문헌

- [1] T. B. Benjamin, "Theory of the Vortex Breakdown Phenomenon," J. Fluid Mech., Vol.14, 1962, pp.593-629.
- [2] L. N. Cattafesta and G. S. Settles, "Experiments on Shock/Vortex Interaction," AIAA Paper 92-0315.
- [3] M. K. Smart and I. M. Kalkhoran, "Effect of Shock Strength on Oblique Shock-Wave/Vortex Interaction," AIAA Journal, Vol.33, No.11, Nov. 1995, pp.2137-2143.
- [4] D. P. Rizzetta, "Numerical Simulation of Vortex-Induced Oblique Shock-Wave Distortion," AIAA Journal, Vol.35, No.1, Jan. 1997, pp.209-211.
- [5] A. Nedungadi and M. J. Lewis, "Computational Study of the Flowfields Associated with Oblique Shock/Vortex Interactions," AIAA Journal, Vol.34, No.12, Dec. 1996, pp.2545-2553.
- [6] K. Mahesh, "A Model for the Onset of Breakdown in an Axisymmetric Compressible Vortex," Phys. Fluids 8(12), Dec.1996, pp.3338-3345.
- [7] Kim, S. S., Kim C., Rho, O. H., and Hong S. K., "Cures for the Shock Instability: Development of a Shock-stable Roe Scheme," Journal of Computational Physics, Vol. 185, 2003, pp. 342-374.
- [8] M. K. Smart, I. M. Kalkhoran and J. Bentson, "Measurements of Supersonic Wing Tip Vortices," AIAA Journal, Vol.33, No.10, Oct. 1995, pp.1761-1768.