대한기계학회 2001년도 추계학술대회논문집 B pp. 300~305 KSME 01F194

비정상 층류 경계층 박리에 의한 유동 소음

최효원*· 문영준**

Aeroacoustic Noise Generation in Unsteady Laminar Boundary-layer Separation

Hyo Won CHOI and Young J. MOON

Key Words: unsteady(비정상), laminar(층류), separation bubble(박리 기포), vortex shedding(와류 쉐딩), aeroacoustic noise(공력 소음)

Abstract

The unsteady flow structure and the related noise generation, which are caused by the separation of a two-dimensional, incompressible, laminar boundary-layer on the flat plate under the influence of local adverse pressure gradient, are numerically examined. The characteristic lines of the wall pressure are examined to understand the unsteady behavior of vortex shedding near the reattachment point of the separation bubble. Also, the generation and propagation of the vortex-induced noise in the separated boundary-layer are calculated by the method of computational aero-acoustics (CAA), and the effects of Reynolds number, Mach number and the strength of the adverse pressure gradient on the unsteady flow and noise characteristics are examined.

1. 서 론

층류 경계층 박리에 의한 버블 형성(laminar separation bubble)은 국부적으로 가해지는 강한 역압력 구배의 영향을 받는 익형 선단부 등에서 흔히 볼 수 있는 유동 현상이다. 예를 들어, 실속 이하의 범위에서의 경우, 얇은 익형의 선단부에서는 경계층 박리에 의하여 층류에서 난류로 천이가 발생하게 된다. Fig. 1은 Horton[1] 에 의해서 기술된 전형적인 시간 평균된 층류 경계층 박리 버블의 구조를 보여주고 있다.

박리의 비정상 특성은 구가지로 구분된다: (i) 박리의 성장과 (ii) 주기적인 와류의 분리. Koromilas and Telionis[2]는 박리 버블에서의 강한 와류의 성장과 주기적 분리를 가시화 하였고, Bestek, Gruber and Fasel[3]은 박리 버블이 저주파수를 가지고 비정상 거동을 하게됨을 보였으며 이로 인해 층류 경계층이 난류로 천이된다고 간주하였다. Pauley등[4]은 또한 비정상 층류 경계층 박리에서의 주기적 와류 분리 현상의 임계조건을 수치해석적으로 고찰한 바 있다.

박리 버블의 재부착점 부근에서의 벽면과 상호작용하는 와류의 비정상 거동을 이해하는 것은

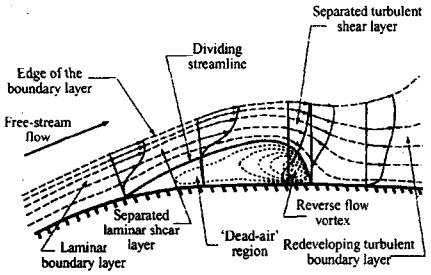


Fig. 1 Time-mean flow structure of a laminar separation bubble (Horton, 1968)

* 고려대학교 기계공학과 대학원
** 고려대학교 기계공학과

매우 중요한데, 이러한 와류의 비정상 거동이 벽 압력의 변화를 일으키고 따라서 소음 발생의 원인이 되기 때문이다. 본 연구에서는 CAA (Computational Aero-Acoustic) 기법을 이용하여 비압축성, 비정상 층류 경계층 박리에서의 소음 발생 메카니즘과 그 소음의 전파 과정을 해석 고찰하고자 한다.

2. 수치해석 기법

유동의 마하수가 비압축성 유동의 한계에 가까워지면 공력학적인 스케일과 음향학적인 스케일 사이에 큰 차이가 존재하게 된다. 이러한 이유로 본 연구에서는 Hardin과 Pope[5] 그리고 Shen과 Sorensen[6]이 제안한 splitting 기법이 사용되었는데, 이 기법은 유동/음향 직접 수치 모사법(DNS)의 접근방법을 비압축성 유동문제와 음향학적인 교란문제로 분리시킨다. 본 연구에서는 비압축성 Navier-Stokes 방정식을 유한체적법으로 풀고 난 후 주기적으로 변하는 유동해를 음향 교란 방정식의 원천항으로 결합시켜 음향장을 계산한다.

2.1 비압축성 비정상 유동해석기법

비압축성 Navier-Stokes 방정식을 Projection 기법을[7] 기반으로한 SMAC 알고리즘에 의해 해석한다.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1a}$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{Re}\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}\right) \tag{1b}$$

지배방정식 (1)은 공간상으로는 셀 중심을 기반으로한 유한체적법에 의해 이산화 된다. 대류항에 대해서는 이차의 정확도를 가진 풍상차분법을 이용하고 점성항에 대해서는 중앙차분법을 이용하여 이산화 한다. 시간 적분은 4단계 Runge-Kutta 기법을 이용하였다.

2.2 음향 지배방정식 및 해석기법

음향장은 Shen과 Sorensen[6]이 제안한 splitting 기법에 의해서 계산된다. 속도, 압력, 밀도는 각각 다음과 같이 비압축성항과 압축성 교란항으로 나뉘어 진다.

$$u_i = U_i + u'_i$$

$$p = P + p' \tag{2}$$

$$\rho = \rho_0 + \rho'$$

분리된 변수를 압축성 Navier-Stokes 방정식에 대입하고 비압축성 Navier-Stokes 방정식을 빼면 다음과 같이 음향장의 지배방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial \rho'}{\partial t} + \frac{\partial f_i}{\partial x_i} = 0 \tag{3}$$

$$\frac{\partial f_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}[f_i(U_j + u'_j) + \rho_0 U_i u'_j + p'\delta_{ij}] = 0 \tag{4}$$

$$\frac{\partial p'}{\partial t} + c^2\frac{\partial f_i}{\partial x_i} = -\frac{\partial P}{\partial t} \tag{5}$$

여기서, $f_i = \rho u'_i + \rho' U_i$, $c^2 = \gamma p/\rho$ 그리고 $\gamma = 1.4$ 는 비열비이다. 식(2)-(5)는 이차의 정확도를 가지는 MacCormack Predictor-Corrector 기법을 이용하여 푼다. 본 기법을 사용할 경우 수치해의 dispersion과 diffusion 오차를 막기 위하여 한 파장당 20~25개의 격자수가 사용된다.

소음 계산시에 실제의 물리 영역을 제한된 계산 영역으로 한정 시켜야 하므로 음파의 반사가 중요한 문제가 된다. 따라서, 계산 영역의 경계면에서 비물리적인 음파의 반사가 발생하지 않도록 하기 위하여 비반사 또는 흡수 경계조건이 필요하게 된다. 본 연구에서는 이러한 목적을 위하여 계산 영역의 경계면에 일정한 두께를 가지는 Buffer Zone을 설정하고 Perfectly Matched Layer(PML) 기법[8]을 적용시킨다.

3. 결과 및 고찰

3.1 박리 버블에서의 주기적 와류 분리

층류 경계층에서의 소음 발생을 고찰하기 위하여 본 연구에서는 Henk와 Pauley등[4]이 수행했

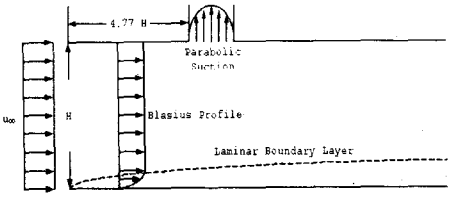


Fig. 2 Hydrodynamic computational domain

Table 1 Flow conditions

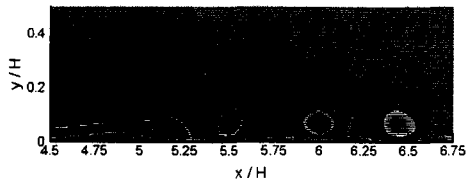
Re_x	120544			241088			361632		
M_∞	0.1			0.2			0.3		
δ/H	0.0687			0.0486			0.0397		
S	0.22	0.27	0.32	0.22	0.27	0.32	0.22	0.27	0.32

던 것과 같은 유동을 사용하였다. Fig. 2에서 볼 수 있는 것처럼, 압력 구배가 없는 층류 경계층 유동이 채널 상부의 포트를 통한 흡입 유동에 의해 역압력 구배의 영향을 받게 된다. 임계값 이상의 흡입 유동을 가하면 층류 경계층 박리가 발생하게 되며 버블의 재부착점 주위에서 주기적인 와류의 분리가 발생한다. 한편, 레이놀즈수, 마하수, 흡입 강도등의 유동 조건이 변하면 유동의 물리적 특성이 달라지므로 본 연구에서는 Table 1에서와 같이 모두 아홉 가지 경우에 대해서 parametric study를 수행하였다.

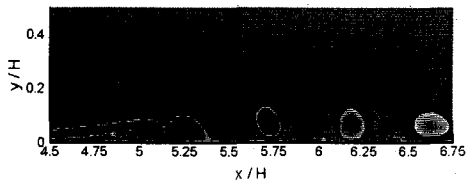
본 연구에서는 경계층과 흡입 포트 주위에 계산 격자를 집중시켰다. 벽면에 수직한 방향으로는 최소 격자 크기가 0.002가 되도록 전체 128개 중에서 80개의 격자(약 60%)를 $0 \le y/H \le 0.2$ 범위에 집중시켰고, 주유동 방향으로는 전체 301개 중에서 215개의 격자(약 70%)를 $4.5 \le y/H \le 6.0$ 의 범위에 균일하게 분포시켰다. 여기서 H는 채널의 높이를 나타낸다. 본 연구에서의 계산 결과, 벽면에 수직한 방향의 격자 밀집도 이외에 주유동 방향의 격자 밀집도가 경계층 유동의 주기적 거동을 잡아내는데 매우 중요한 요소로 작용하였다.

먼저 $Re_x = 361632$, $S = 0.22$ 인 경우에 대하여 한 주기 내에서의 유동의 비정상 거동 및 소음 발생 메카니즘을 고찰하여 보았다. 여기서, Re_x는 채널의 입구에서 흡입 포트 시작점까지의 거리와 자유 유동 속도를 각각 특성길이와 특성속도로 하는 값이며, S는 채널로 들어오는 유량에 대해 흡입 포트를 통해 나가는 유량의 비로서 경계층에 가해지는 역압력 구배의 강도를 조절하는 인자이다. Pauley등[4]에 의하면 S가 0.12 보다 커지면 주기적인 와류의 분리 현상이 발생한다.

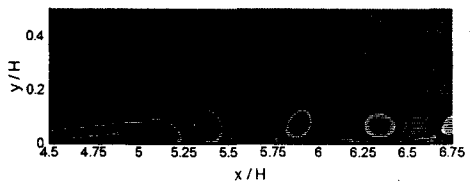
한 주기 내에서의 주기적 와류 분리현상 Fig. 3에서 보여지는 것처럼 박리된 경계층의 와류 선도에 의해 다음의 4 단계로 이루어진다:



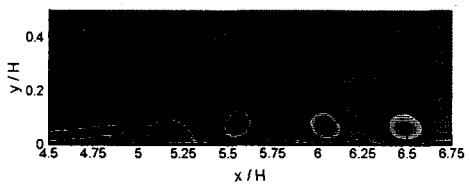
(a) roll-up



(b) break-up



(c) rolling



(d) ejection

Fig. 3 Instantaneous vorticity contours at four stages in a period ($Re_x = 361632$, $S = 0.22$) : based on ②

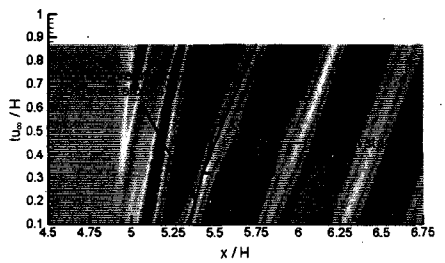


Fig. 4 Characteristic lines of the wall pressure ($Re_x = 361632$, $S = 0.22$)

(a) roll-up, (b)break-up, (c) rolling, (d) ejection. Ejection stage는 굴러서 이동하던 와류가 벽면으로부터 이탈하는 단계로서 이 단계를 거치면서 ②번 와류의 회전속도 및 이동속도가 증가하게 된다. Fig. 4는 또한, 한 주기 내에서의 벽압력의 characteristic line을 나타내는 것으로서 박리 버블과 하류 영역에서 와류가 움직이는 궤적을 나타내고 있다. 벽압력의 characteristic line의 기울기가 ejection 위치를 기준으로 달라지는 것을 볼 수 있는데, 이것은 와류의 움직임이 가속되며 따라서 압력의 시간 변화율의 변화를 발생시킴을 의미한다. 결론적으로, 와류 이탈 메카니즘이 박리된 층류 경계층에서의 공력 소음의 원인이 될 것으로 추측할 수 있다.

유동 조건의 변화에 따른 유동의 물리적 특성의 변화를 고찰하기 위하여 각각의 유동 조건에 대하여 주기의 20배되는 시간동안의 평균된 유동장을 이용하였다. Fig. 5는 위와 같은 방법으로 시간 평균된 유동장의 유선 및 박리점과 재부착점을 나타낸다. 박리 버블의 크기는 박리점으로부터 재부착점까지의 거리로 정의하였는데 레이놀즈수가 증가할수록 박리 버블의 크기가 감소하

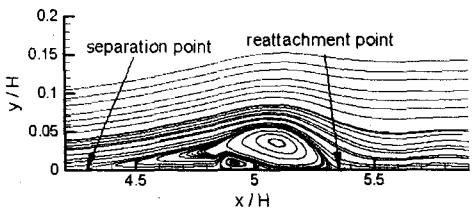


Fig. 5 A time-mean structure of the separation bubble ($Re_x = 361632$, $S = 0.22$)

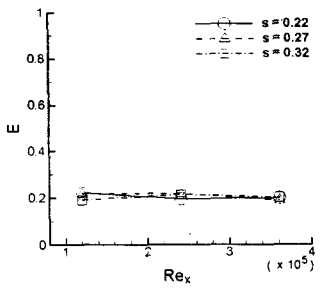


Fig. 6 Relative vortex ejection positions (normalized)

였다. 이와 달리 Fig. 6에서 볼 수 있는 것처럼 $E = (x_E - x_R)/L_B$에 의해서 정의되는, 재부착점에 대한 상대적인 와류의 이탈 위치(E)는 모든 유동 조건에 대하여 대략 0.2 정도로 거의 일정하였다. 여기서, x_R , x_E , L_B는 각각 재부착점, break-up stage로부터 약 주기의 5/8 시간만큼이 지난 후의 와류의 중심 위치, 박리 버블의 크기이다. 한편, 본 연구에서의 전산해석 결과는 레이놀즈수와 흡입 강도에 관계없이 스트롤수가 $St_\theta = 0.00686 \pm 0.6\%$와 같이 거의 일정하다는 Pauley등[4]의 계산결과를 뒷받침한다. 여기서 St_θ는 박리점에서의 경계층 모멘텀 두께(θ)와 국부 자유유동속도로 무차원화된 와류의 분리 주기이다.

3.2 공력 소음의 발생

박리된 층류 경계층에서의 주기적 와류 분리에 의한 공력 소음의 발생을 2.2절에서 기술한 CAA 기법을 이용하여 균일 격자에서 계산을 수행하였다. $Re_x = 361632$, $M_\infty = 0.3$인 유동 조건에 대하여, 채널 높이를 특성길이로하는 와류 분리의 스트롤 수가 1.15이고 $\lambda/H = 1/(St_H \cdot M_\infty)$ 관계에 의하여 계산된 음파의 파장 길이는 대략 2.9 정도로 계산될 수 있다. 따라서, Fig. 7에서 보여지는 것처럼 소음 계산 영역이 2~3파장을 포함하고 PML 영역이 최소한 한 파장정도를 포함하도록 x방향으로는 $-4.5H$ 부터 $15H$ 까지, y방향으로는 0 부터 $10H$까지로 소음 계산 영역을 선정하였다.

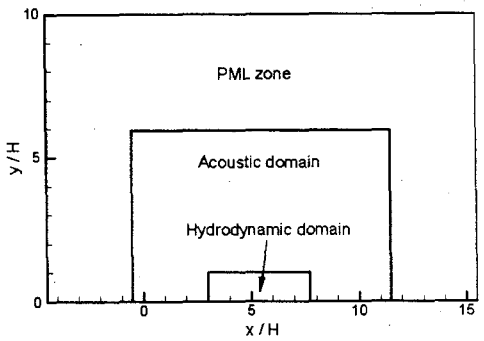


Fig. 7 Acoustic computational domain

Table 2 Absorption parameters for PML B.C.

Re_x	M_∞	S	λ/H	ΔS	Absorption function	D	σ_m	β
120544	0.1	0.22	15.9	0.06	Type A	6	100	1.5
		0.27	15.3					
		0.32	14.9					
241088	0.2	0.22	5.4	0.04	Type B	4	18	2.0
		0.27	5.25					
		0.32	5.15				17	
361632	0.3	0.22	2.9				5	
		0.27	2.87					
		0.32	2.83					

Type A : $\sigma = \sigma_m(\tanh(\beta(x-0.35D)) + \tanh(0.5D\beta))$

Type B : $\sigma = \sigma_m(d/D)^3$

Table 2에서는 본 연구에서 각각의 유동 조건에 대하여 사용한 PML 영역에서의 유출 파동의 흡수 계수를 나타내고 있다. 여기서, D, d, σ_m, β 그리고 λ는 각각 PML 영역의 두께, 내부 영역과의 경계면으로부터의 거리, 흡수 계수 그리고 파장길이를 나타낸다. 소음장 계산을 위한 격자수는 박리된 경계층에서의 비정상 와류 거동을 적절히 모사할 수 있도록 선정하였다. 한편 본 연구에서 사용한 501×251의 균일 격자는 MacCormack 2-2 scheme[5]의 dispersion 및 diffusion 오차를 최소화하기 위하여 한 파장당 포함해야하는 20~25개의 격자 밀집도를 자동적으로 만족시킨다. PML 영역의 두께 또한 경계면을 통해서 나가는 파장을 효과적으로 감쇄시키기 위한 매우 중요한 인자가 된다.

본 연구에서는 roll-up stage로부터 ejection stage까지의 비정상 와류 거동에 의한 소음의 발생에 초점이 맞춰져있다. 따라서, 경계층 박리 버블 근처의 일부만 소음장으로 매핑되도록 하였다. 계산된 소음장은 Fig. 8에 나타나 있는데, 버블의 재부착점 근처 벽면에서의 비정상 와류 거동에 의한 음파의 방사가 잘 나타나 있다. 벽면으로부터의 와류의 이탈은 벽압력을 급격히 감소시키고 따라서 팽창을 발생시킨다. 또한, 와류의 이탈이 발생된 직후에 낮아졌던 압력은 압축을 발생시키면서 즉시 회복된다. 그 이외에, 와류가 벽 근처에서 구르는 움직임을 통해서 파장 길이가 짧은 음파가 계속해서 형성된다.

한편 유동 조건에 따른 소음 특성을 고찰해보기 위하여 음압의 변화를 각 경우별로 비교 해보았다. 앞 절에서 언급한대로 주 소음원은 재부착

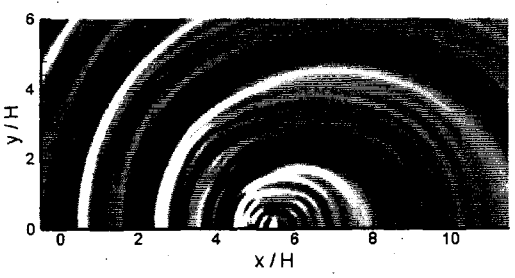
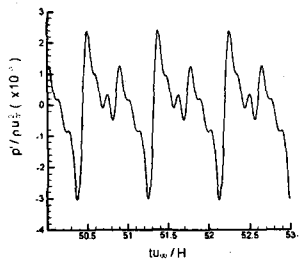
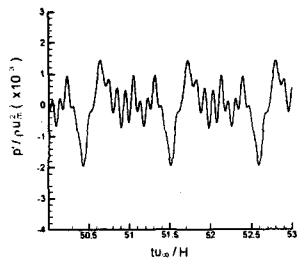


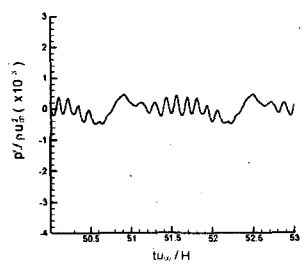
Fig. 8 Instantaneous acoustic pressure contours ($Re_x = 361632$, $M_\infty = 0.3$, $S = 0.22$)



(a) $Re_x = 361632$ ($M_\infty = 0.3$)



(a) $Re_x = 241088$ ($M_\infty = 0.2$)



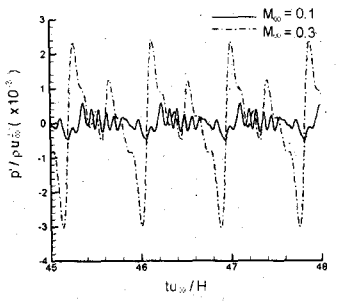
(a) $Re_x = 120544$ ($M_\infty = 0.1$)

Fig. 9 Acoustic pressures for various Re_x ($S = 0.22$)

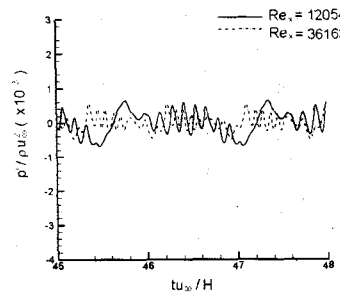
점 근처이고 방사되는 음파의 강도는 90°~180°에서 가장 강도가 높다. 따라서, 본 연구에서 고려되는 모든 유동 조건에 대하여 관찰자 위치는 재부착점으로부터 135°방향으로 버블 길이의 5배 되는 지점에 정하였다.

Fig. 9는 레이놀즈수가 작아짐에 따라서 음압이 감소되고 주 팽창-압축의 메카니즘에 의해서 발생되는 음파 이외에 짧은 파장을 갖는 음파가 보다 뚜렷이 관측됨을 보여준다. 그러나 흡입 강도는 음압에 큰 영향을 미치지 못하였다.

한편 본 연구에서는 레이놀즈수가 감소함에 따라서 마하수가 함께 감소하도록 유동 조건을 정하였기 때문에(Table 1 참조) Fig. 9에서 관찰되는 경향이 오직 레이놀즈수의 영향에 의한 것인지 확실하지 않다. 따라서, (i) 레이놀즈수를 같게 설정하고 마하수를 달리하는 경우, (ii) 마하수를 같게 설정하고 레이놀즈수를 달리하는 경우의 음압의 변화를 모니터링 해보았다. Fig. 10 (a) & (b)는 그 결과를 보여주는데, 단파장을 가지는 음파의 생성은 마하수에 의한 효과임을 알 수 있다.



(a) $Re_x = 361632$, $S = 0.22$



(b) $M_\infty = 0.1$, $S = 0.22$

Fig. 10 Acoustic pressures

4. 결 론

이차원 층류 경계층 박리에서의 유동 소음 발생을 CAA 기법을 이용하여 모두 아홉 가지 유동조건(세 가지 레이놀즈수와 세 가지 흡입 강도)에 대하여 고찰해 보았다.

한 주기 내에서의 주기적 와류 분리는 roll-up, break-up, rolling, ejection의 네 단계 비정상 와류 거동으로 이루어져 있으며, ejection stage에서는 압력의 시간 변화율이 가장 높으며 비정상 박리 버블에서의 주 소음원이 된다. 또한 모든 유동 조건에 대하여 고찰해 본 결과, 레이놀즈수와 흡입 강도에 관계없이 와류 분리 현상에 대한 스트롤 수가 $St_\theta = 0.00686 \pm 0.6\%$와 같이 거의 일정하며, 또한 재부착점에 상대적인 표준화된 와류의 ejection 위치는 대략 0.2정도로 일정하게 나타났다.

와류 ejection에 의해 형성되는 주 팽창-압축에 의한 음파 외에 파장 길이가 아주 짧은 음파가 마하수가 감소함에 따라 더욱 뚜렷이 나타나며, PML 기법은 파장 길이가 긴 경우를 처리하는데 상당히 민감한 것으로 나타났다.

참고문헌

(1) Horton, H. P., "Laminar Separation Bubbles in two- and three- dimensional incompressible flow," Ph.D. Thesis, University of London, (1968).

(2) Koromilas, C. A., and Telionis, D. P., "Unsteady Laminar Separation : an Experimental Study," Journal of Fluid Mechanics, Vol. 97 (1980) , p. 347-384.

(3) Bestek, H., Gruber, K. and Fasel, H., "Self-excited Unsteadiness of laminar separation bubbles caused by natural transition, In the Prediction and Exploitation of Separated Flow," The Royal Aeronautical Society (1989).

(4) Pauley, L. L., Moin, P. and Reynolds, W. C., "The Structure of Two-Dimensional Separation," Journal of Fluid Mechanics, Vol. 220 (1990) , p. 397-411.

(5) Hardin, J. C. and Pope, D. S., "An Acoustic/Viscous Splitting Technique for Computational Aeroacoustics," Theoretical Computational Fluid Dynamics, Vol. 6, No. 5-6 (1994) , p. 323-340.

(6) Shen, W. Z. and Sorensen, J. N., "Comment on the Aeroacoustic Formulation of Hardin and Pope," AIAA Journal, Vol. 37, No. 1, January (1999).

(7) Hirt, C. W. and Cook, J. L., "Calculating Three-Dimensional Flows around Structures and over Rough Terrain," Journal of Computational Physics, Vol. 10 (1972) , p. 324-340.

(8) Hu, F. Q., "On Absorbing Boundary Conditions for Linearized Euler Equations by a Perfectly Matched Layer," Journal of Computational Physics, Vol. 129 (1996) , p. 201-219.