

Vortex-Edge 의 상호작용에 의한 유동소음의 수치계산

강호근[†] · 김정환^{*} · 김유택^{*} · 이영호^{*}

Numerical Investigation of Aerodynamic Sounds by Vortex-Edge Interaction

Ho-Keun Kang, Jeong-Hwan Kim, Yu-Taek Kim and Young-Ho Lee

Key Words : Edge Tone(Edge 음), Aerodynamic Sound(유동소음), Lattice Boltzmann Method(격자볼츠만법), Feed Back(피드백)

Abstract

An edge tone is the discrete tone or narrow-band sound produced by an oscillating free shear layer impinging on a rigid surface. In this paper we present a two-dimensional edge tone to predict the frequency characteristics of the discrete oscillations of a jet-edge feedback cycle by the finite difference lattice Boltzmann method. We use a new lattice BGK compressible fluid model that has an additional term and allow larger time increment comparing a conventional FDLB model, and also use a boundary fitted coordinates. The jet is chosen long enough in order to guarantee the parabolic velocity profile of the jet at the outlet, and the edge consists of a wedge with an angle of $\alpha = 23^\circ$. At a stand-off distance ω , the edge is inserted along the centreline of the jet, and a sinuous instability wave with real frequency f is assumed to be created in the vicinity of the nozzle and to propagate towards the downstream. We have succeeded in capturing very small pressure fluctuations result from periodically oscillation of jet around the edge. That pressure fluctuations propagate with the sound speed. Its interaction with the wedge produces an irrotational feedback field which, near the nozzle exit, is a periodic transverse flow producing the singularities at the nozzle lips.

1. 서론

유동소음(aerodynamic sounds)은 공기 등의 유체가 물체에 닿을 때, 흐름과 물체의 간섭에 의해 발생하는 음(sounds)으로서, 바람이 강한 야외에서 전선주위로부터 들리는 음, 자동차의 사이드미러 및 flute 등으로부터 발생하는 유동소음 등이 이에 속한다. 이러한 유동소음의 한 종류인 edge tone 은 노즐로부터 나온 jet-edge 의 상호작용으로 인한 음압의 차에 의해서 소음이 발생하며, 이 음압은 다시 상류의 분류에 영향을 미친다. 즉, 어떠한 조건 하에서, 피드백 메카니즘에 기인한 주기적인 운동

이 발생하며, 이로 인한 압력파가 발생한다. 이와 같은 피드백(feed back) 메카니즘을 갖는 edge tone 현상은 이론검증이나 실험은 예전부터 연구되어져 왔다.^{[1],[2]} 특히, Powell(1953)^[3]에 의해서 처음으로 주요한 특성들이 체계화 되었다. 유속 U_0 를 갖는 분류의 섭동(perturbation)은 결국 훨씬 더 하류쪽에 와류(vortex)를 발생시킨다. 이러한 분류는 상속도 c_p 와 더불어 하류로 흘러가며, 노즐출구와 거리 w 떨어져 있는 edge 에서 만난다. 여기서 와류는 edge 와 상호작용을 하며, 분류의 상류측으로

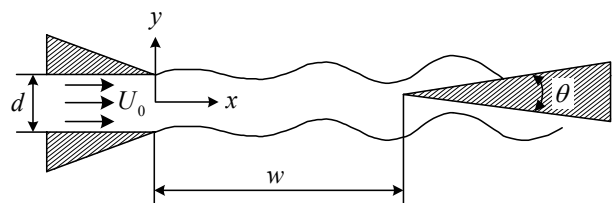


Fig. 1 Schematic of the edgetone configuration

[†] 경상대학교 기계항공공학부
E-mail : kang88@gacchuk.gsnu.ac.kr
TEL : (055)640-3064 FAX : (055)640-3128

^{*} 한국해양대학교

음압파를 방출한다. 여기서, 주어진 jet-edge 계에서 주파수 f 는 노즐출구와 edge 사이의 노즐출구에서의 분류의 속도 U_0 와 그 거리 w (edge stand-off distance)에 의존한다(Fig. 1). 또한 이와 비슷한 현상으로는 cavity 흐름에서도 발생하며, 소위 cavity tone 이라 불려진다.^[4]

그러나 edge tone 을 포함한 유동소음의 수치계산은, 소음장의 압력의 변동이 유체의 압력변동에 비해서 매우 작을 뿐만 아니라 음파의 측정범위가 광범위하게 미치기 때문에 넓은 계산영역을 설정할 필요가 있는 등의 이유로 인하여 계산기에 걸리는 부하가 매우 커서 직접계산이 곤란하였다. 최근에 이르러 계산기의 비약적인 발달로 유동소음을 직접적으로 계산하기 위하여 여러 수치계산 방법에 의한 연구들도 활발하게 이루어지고 있다. 즉, 음향학적 유추에 기초한 hybrid method, acoustic/viscous method 및 direct numerical simulation(DNS) 등에 의한 음파를 직접적으로 계산하는 많은 시도들이 수행되어져 왔으며, 이에 따른 음원의 추정, 음파 발생의 모양 및 그 전파 과정 등을 상세하게 파악할 수가 있게 되었다. 지금까지 차분격자볼츠만법 (Finite Difference Lattice Boltzmann Method, FDLBM)에 의한 유동소음의 연구로는 Aeolian 음의 수치계산이 행하여져, Karman 와열의 발생주기와 같은 2 중극음(dipole sound)을 모사하였으며, 작은 계산부하를 갖고서 양호한 정도에서 음장의 직접계산이 가능하다는 것이 확인되었다.^[5] 본 연구에서는 수치계산방법으로서 FDLBM 을 이용하여 aeolian 음보다 더 복잡한 음의 발생 메커니즘을 갖는 edge tone 의 직접계산을 수행하여, edge tone 의 발생 메커니즘과 그 소음의 전파과정을 해석 고찰하고자 한다.

2. 수치해석 기법

LBM 은 유체를 충돌과 병진을 반복하는 다수의 이산적인 입자의 집합체로 간주되며, 이것들의 규칙적인 입자운동을 계산함으로써 거시적인 유체운동을 모사하는 수치계산법이다. 또한 FDLBM 은 LBM 에 차분방법을 도입하여 격자와 이산적 입자속도를 별개로 취급함으로써 격자형성의 용이성과 계산의 안전성을 도모하기 위한 방법이다. 본 연구에서는 압축성 유체모델을 갖는 2D21V 모델을 이용한다. 또한 일련의 입자운동은 시간 t , 위치 x 의 격자점 상에서 속도 \mathbf{c}_i 을 갖는 입자수밀도를

나타내는 속도분포함수 $f_i(x, t)$ 을 이용하여 다음식과 같이 나타낸다. 본 연구에서는 격자 BGK 모델에 수정항을 첨가한 모델(식(1))을 사용하며, 기본방정식은 다음과 같이 나타낸다.

$$\frac{\partial f_i(x, t)}{\partial t} + c_{i\alpha} \frac{\partial f_i(x, t)}{\partial x_\alpha} - \frac{Ac_{i\alpha}}{\phi} \frac{\partial}{\partial x_\alpha} (f_i(x, t) - f_i^{(0)}(x, t)) = -\frac{1}{\phi} (f_i(x, t) - f_i^{(0)}(x, t)) \quad (1)$$

여기서, $f_i^{(0)}$ 는 국소평형분포함수, ϕ 는 단일시간완화계수를 의미한다. 식(1)의 우변은 충돌에 의한 입자분포의 변화를 나타내는 충돌연산자(collision operator)이며, 충돌시에 질량, 운동량 및 에너지가 보존되는 규칙을 따른다. 충돌은 입자간의 상호작용에 의한 운동의 변화이기 때문에, 우변은 입자분포함수 f_i 의 합으로 나타낸다.

한편, 연속체로서의 거시적(macroscopic) 상태에서의 유체의 변수들은 미시적(microscopic) 상태에서의 입자분포 c_i 를 갖는 분포함수 f_i 로부터 다음과 같은 관계가 있다.

$$\text{밀도: } \rho = \sum_i f_i = \sum_i f_i^{(0)} \quad (2)$$

$$\text{운동량: } \rho \mathbf{u} = \sum_i f_i \mathbf{c}_i = \sum_i f_i^{(0)} \mathbf{c}_i \quad (3)$$

$$\text{에너지: } \frac{1}{2} \rho u^2 + \rho e = \sum_i \frac{1}{2} f_i c^2 = \sum_i \frac{1}{2} f_i^{(0)} c^2 \quad (4)$$

여기서 e 는 단위질량당의 내부에너지를 나타낸다.

3. 해석방법

본 연구에서는 Fig. 2 에서 나타난 좌와 같이 계산 설정을 하였으며, edge 근방의 격자를 밀집시간 2 차원 물체적합좌표(body fitted coordinate)를 이용하고 있다. 격자수는 x 방향으로 301, y 방향으로 301 의 총 90601 개를 발생하였다. 노즐직경 d 를 대표길이, 분류의 평균유속 u 를 대표속도로 하였으며, 계산영역은 $145d \times 240d$ 을 설정하였다. 노즐출구로부터 wedge 선단까지의 거리는 $6d$ 를 주었으며, wedge 는 선단의 각도가 23° , x 방향의 길이 $8.5d$ 를 주었다. 계산조건으로서 Reynolds 수는 $Re=1000$, 초기 유입속도 $U_0 = 0.1, 0.2$ 및 0.3 ($e=0.5$)을 주었다. 경계조건으로서 물체상에서는 점착조건(no slip)과 단열조건(adiabatic)을 적용하였으며, 노즐부의 좌단은 일정유속 흐름을 주었으

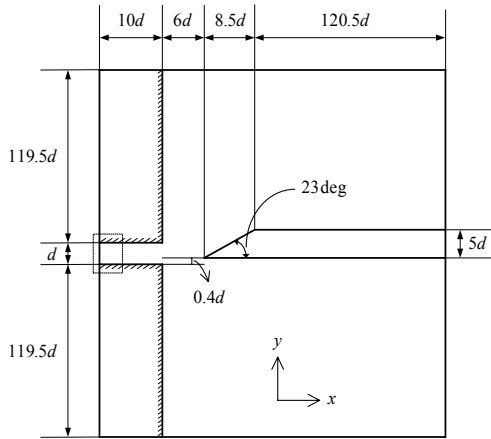


Fig. 2 Edgetone geometry for the simulation

며, 노즐이외의 계산영역의 상단, 하단 및 우단의 유체부는 정지유체를 가정하였다. 유체부의 전 격자에서 초기조건으로서 평형상태의 정지유체를 가정하였으며, $t > 0$ 에 있어 노즐부의 좌단으로부터 일정유속의 흐름 $u_i(t=0) = (U_0, 0)$ 을 주었다. 기초방정식의 이산화 방법은 식(1)의 시간항을 2차정도의 Runge-Kutta 법, 공간을 3차정도의 풍상차분법 (UTOPIA)를 이용하였다.

본 연구에서 적용하고 있는 FDLBM 에서의 압력 p 는 밀도 ρ 와 내부에너지 e 를 이용해 $p = \rho e$ 로 주어지며, 시간은 무차원시간 $T(=Ut/d)$ 로 표시된다. 따라서 본 연구에서는 초기상태의 유체의 압력을 기준압력 $p_0 = \rho_0 e_0$ 와 같으며, 기준압력과의 차를 무차원화 시키면 다음과 같다.

$$\Delta p = \frac{p - p_0}{p_0} \quad (5)$$

4. 결과 및 고찰

4.1 Edge tone

Fig. 3 는, 마하수 $Ma=0.3$ ($e_0 = 0.5, U_0 = 0.3$) 에 있어서 계산결과를 나타내고 있다. 우선, 노즐로부터 나온 분류는 초기조건으로서 교란이 없는 일정유속을 주었기 때문에, wedge 의 선단에 충돌하여 분류가 상하로 균등하게 나누어진다. 그 후, 분류가 변동을 시작하며, wedge 에 충돌하면서 상하방향으로 주기적으로 변동한다. 이러한 변동은 노즐출구의 상하벽면 근방으로부터 발생하는 와 (vortex)의 주기와 같으며, 이러한 와에 의해 분류의 변동이 발생한다고 사료된다. 노즐출구의 상하벽면 근방으로부터 발생하는 와는 상하교대로 발

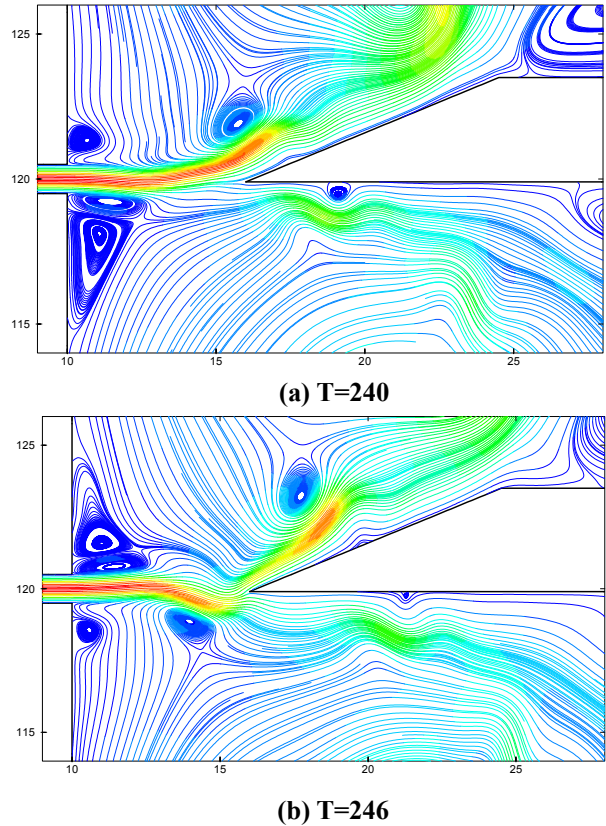
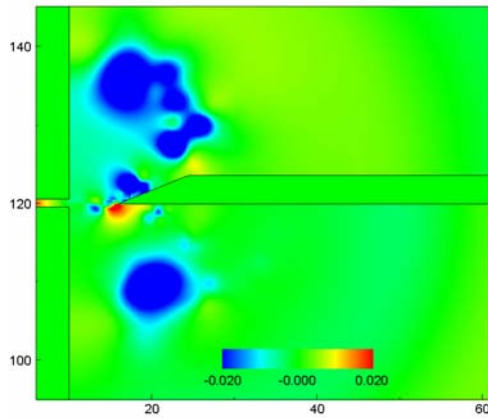


Fig. 3 Streamlines around the wedge

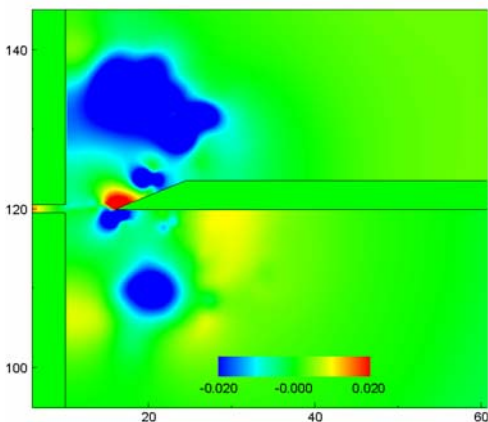
생하며, 분류의 영향을 받아 wedge 방향으로 이동한다. 이때 와는 그 회전에 의해 분류의 형상으로 파형된다. 그 결과, 와가 wedge 의 선단을 통과한 부근에서 와의 회전 에너지에 의해 분류가 방향을 바꾸며, wedge 의 편측으로 흘러 들어간다. 이러한 와는 상하교대로 발생하고 있기 때문에, 분류도 wedge 의 상하에 교대로 변동한다. 이러한 분류의 변동 때문에 Fig. 4 에 나타난 와와 같이 분류가 edge 에 닿은 면에서는 압력의 상승이(a), 반대측에서는 압력의 감소가(b) 주기적으로 발생한다. 그 결과 wedge 의 상하에서 역 위상을 갖는 압력파가 발생한다. 이 때 노즐부 이외에서 압력의 최대치 p_{max} 는 wedge 의 edge 근방에서 $p_{max} = 0.0663$ 및 최소치 $p_{min} = -0.0626$ 의 값을 갖는다.

Fig. 5 은 무차원시간 $T=245$ 에 있어서 각각의 초기유속에 대하여 음압의 변동을 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이, wedge 에서 상하교대로 (+) 및 (-)의 압력파가 대칭으로 전파하고 있는 것을 알 수가 있다.

Fig. 6 은 $U_0 = 0.2$ 및 0.3 에 있어서 $x_1(=2w/5)$ 및 $x_2(=w/5)$ 의 위치에서 분류의 변동속도를 나타내고 있다. 위의 그림에서 노즐로부터 나온 분류는 주기적으로 변화하고 있는 것을 알 수가 있



(a) T=245



(b) T=251

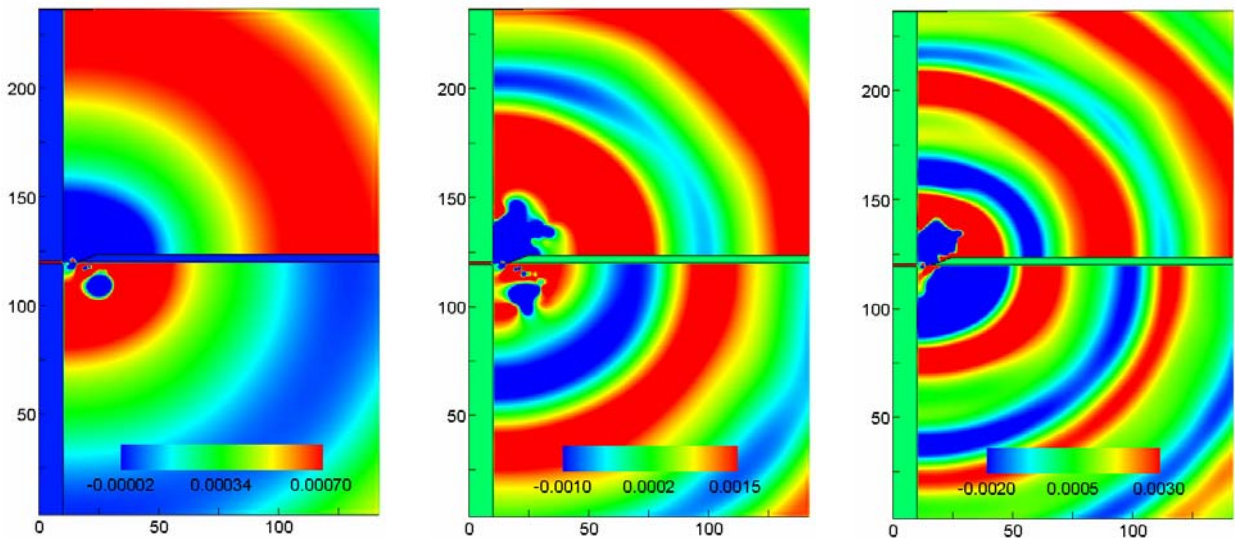
Fig. 4 Pressure distribution

다.

한편, Fig. 7 은 각각의 유동조건에 따른 소음특성을 고찰하기 위하여 음압의 변화를 각 경우별($U_0 = 0.1, 0.2$ 및 0.3)로 비교해보았다. 즉, 계산영역중의 2 점에 있어서 압력과의 시간변동을

나타내고 있다. 관측점은 wedge 선단을 기준점으로 하여 방사형으로 2 개의 점을 선택하였다. A1 은 wedge 선단으로부터 x 방향으로 $109d$, y 방향으로 $100d$ 떨어진 곳이며, A2 는 wedge 선단으로부터 x 방향으로 $109d$, y 방향으로 $-20d$ 떨어진 지점을 선택하였다. 압력과의 상하 대칭에서 방사형 모양으로 전파하고 있음을 알 수가 있다. 또한, 초기 분류속도가 작아짐에 따라 음압의 변동이 작다는 것을 뚜렷이 관측됨을 보여준다. 아울러, Fig. 4 와 Fig. 7(c)에서 알 수 있듯이, 이러한 점들에게 있어서 압력과의 변동의 크기는 0.004 정도이며(Fig.7(c)), edge 근방의 압력변동(0.06, Fig.4)에 비해서 미소하다는 것이 확인되었다.

Fig. 5 및 7 로부터, feedback 의 발생은 다음과 같은 요인 때문이라고 사료된다. (i)노즐출구의 상하벽면 근방으로부터 발생하는 와가 분류에 의하여 edge 방향으로 이동하며, edge 의 근방에서 어떠한 이유로 인하여 와가 합체된다 (Fig.3). (ii) 그 결과 그때까지 보다 강한 와가 발생함에 따라, 이 와에 의해 유기되는 분류의 변동도 크게 된다. (iii) 그것에 수반되어, wedge 의 edge 부근으로부터 발생하는 압력도 크게 된다. (iv) 발생하는 압력변동이 크게 됨에 따라 노즐로부터 나오는 와의 주기 및 강도를 변화시킨다. 이상 (i)~(iv)의 변화가 일어난다고 사료된다. 즉, 와의 합체에 의해, 이제까지보다 더욱 큰 압력이 edge 의 근방으로부터 발생하며, 이러한 큰 압력이 전파하여 상류측의 분류에 의한 와의 발생주기 및 강도에 변화를 미친다. 그 결과, 새로운 와가 방출되어 분류에 변화를 미치게 하며, edge 근방에서의 압력변화를 유기하고, 압력이 다시 와의 방출에 영향을 미치는 feedback 구조를

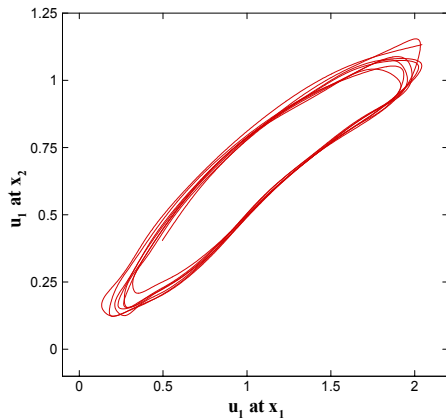


(a) $U_0=0.1$

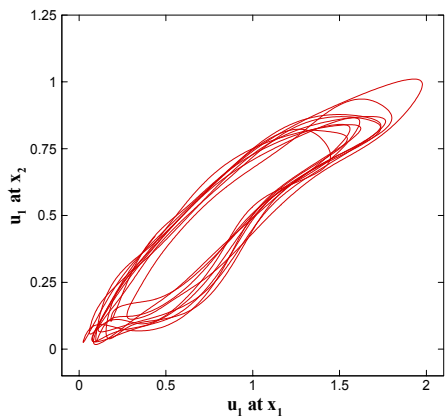
(b) $U_0=0.2$

(c) $U_0=0.3$

Fig. 5 Acoustic pressure distribution at three inflow velocity of the jet U_0



(a) $U_0=0.2$



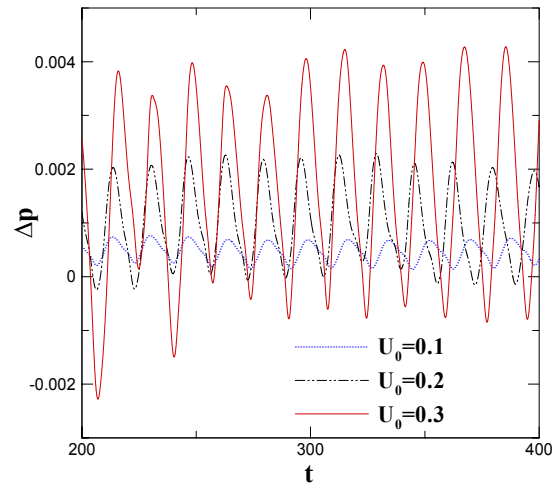
(b) $U_0=0.3$

Fig. 6 Phase diagram

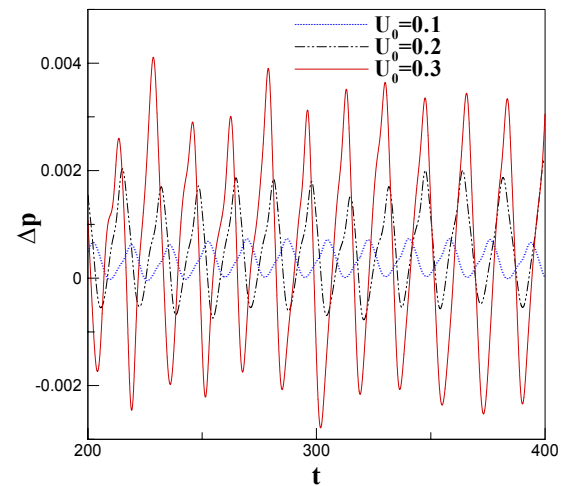
갖는다고 사료된다.

4.2 Wedge 와 노즐간 거리(w)의 영향

위에서 언급한 wedge 선단으로부터 노즐까지의 거리 w 는, $w = 6d$ 를 주었다. 그러나 feedback 메커니즘을 검토하기 위하여, $w = 9d$ 를 설정하여 wedge 와 노즐간 거리의 영향을 살펴보았다(x 방향으로 321 개, y 방향으로 301 개, 총 96621 개). 계산조건으로서 유속은 $U_0 = 0.2$ 및 내부에너지 e 는 $e = 0.5$ 를 주었다. Fig.8 은 edge 근방의 유선도를 보여주고 있다. Fig.3 와 비교를 하면, 노즐로부터 분출되는 분류의 유속이 빠른 부분은 직접 edge 에 닿지 않는다는 것을 알 수가 있다. Fig.9 은, 전향과 동일 관측점(A2)에서의 음압의 시간변동을 나타내고 있다. 무차원시간 900 이상까지 계산을 수행하였지만, 음의 주파수는 규칙적인 변동이 아닌 불안정한 변동을 보여주고 있다. 이것은 wedge 와 노즐간의 거리 w 가 크기 때문이며, 분류의 유속이 빠른 부분이 직접적으로 edge 에 닿지 않기 때문에 불규칙적인 주기에서 음파가 발생하기 때문이라고 사료된다. 즉, 불안정성이 강해서



(a) A1 (above the wedge)



(b) A2 (under the wedge)

Fig. 7 Time variation of acoustic pressure at two different points

feedback 현상과 같은 규칙적인 주기가 되지 않는다고 사료된다.

5. 결론

FDLBM 의 2D21V 압축성 모델을 이용하여 2 차원 edge 음의 직접계산을 행하여, 분류와 edge 의 상호간섭에 의해 발생하는 음파의 발생 메커니즘이 고찰되었다. 이러한 음파는 노즐출구의 상하 벽면근방으로부터 발생하는 와의 주기와 같이 발생하며, 분류가 wedge 의 선단에 충돌함으로써 edge 주위의 압력변동을 유기시키며, 그 결과 음파가 발생됨이 확인되었다.

또한, 유체의 압력변동에 비해서 매우 작은 압력변동이 발생하며, 그 전파속도는 음속에 일치하고 있다. 음압의 변동성분은 유체의 압력에 크게 영향을 받지 않고 전파하며, 이러한 음압변동의 크기는 분류의 속도에 비례하여 증가하는 것을 확인하였다. 이러한 결과로부터,

노즐출구의 상하벽면 근방으로부터 발생하는 와가 edge 근방에서의 합체에 의해 분류의 변동이 변화하며, edge 근방에서 발생하는 압력에 변화를 유발하며, 그 압력이 전파함으로써 노즐출구의 상하벽면 근방으로부터 새로운 와의 발생을 유기한다는 feedback 메카니즘에 의해서 일어난다고 사료된다.

한편, 노즐과 wedge 의 선단간의 거리가 크면, feedback 과 같은 주기적인 분류의 변동은 보여주지 않으며, 이는 분류의 불안정성에 기인한 것으로 사료된다.

참고문헌

- (1) Holger, D.K., Wilson, T.A. and Beavers, G.S., 1977, "Fluid Mechanics of the Edgetone," Journal of Acoustical Society of America, Vol. 62-5, pp.1116.
- (2) Crighton, D.G., 1992, "The Jet Edge-tone Feedback Cycle; Linear Theory for the Operating Stages," Journal of Fluid Mechanics, Vol. 234, pp. 361.
- (3) Powell, A., 1953, "On Edge Tones and Associated Phenomena," Acoustica 3, pp. 233.
- (4) Howe, M.S., 1981, "The Influence of Mean Shear on Unsteady Aperture Flow, with Application to Acoustical Diffraction and Self-sustained Cavity Oscillations," Journal of Fluid Mechanics, Vol. 109, pp. 125.
- (5) Kang, H.K., Bae, S.T., Ro, K.D., Tsutahara, M., Shikata, K. and Lee, Y.H., 2003, "Numerical Simulation of the Far-field Acoustic Sounds by the Finite Difference Lattice Boltzmann Method," 5th Asian Computational Fluid Dynamics, Vol. 1.

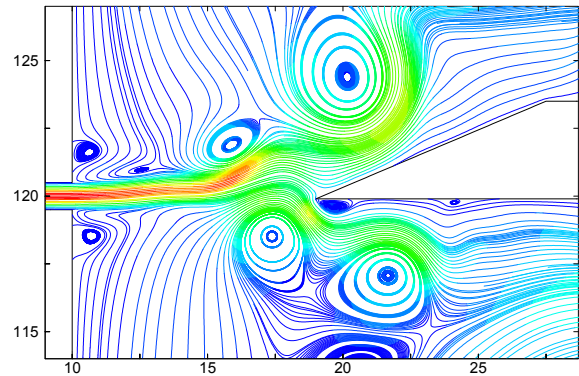


Fig. 8 Streamlines around the wedge (w=9d)

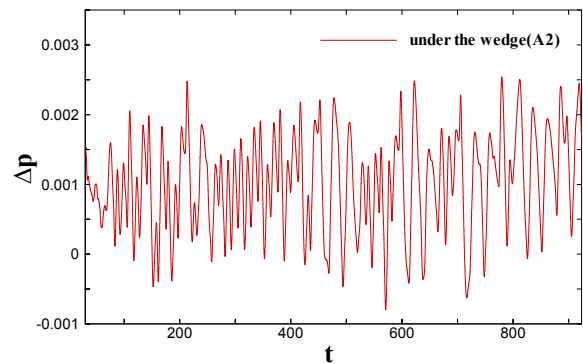


Fig. 9 Time variation of acoustic pressure (w=9d)