

# 모따기된 전향계단에 부딪치는 와류에 의한 비정상 벽면압력 변동

유기완\*, 이준신\*\*

## Unsteady Wall Pressure Fluctuation Generated from the Impinging Vortex on the Chamfered Forward Step

Ki-Wahn Ryu, and Jun-Shin Lee

**Key Words:** Self-sustained Oscillation(자려 진동), Reattachment Edge(재부착 모서리), Unsteady Pressure Fluctuation(비정상 압력변동), Vortex Flow (와류), Rectangular Forward Step(직각 전향계단), Chamfered Forward Step(모따기된 전향계단), Cavity(공동)

### Abstract

Modifying effects of the rectangular forward step for suppressing the unsteady pressure fluctuation during interaction between the upstream vortical flow with the edge are studied numerically. The vortical flow is modeled by a point vortex, and the unsteady pressure coefficient is obtained from the velocity and the potential field. To investigate the effects of the edge shape the rectangular forward step is chamfered with various angles. Calculation show that the pressure peaks become decreased by increasing the vortex height as well as the chamfering angle. The pressure amplitudes are very sensitive to the change of the initial vortex height. From this study we can find out that the chamfered edge has two effects; the one is that it suppresses the pressure amplitude generated from the edge, and the other is that it decreases the time variation of unsteady pressure fluctuation. These modifying concepts can be applied to attenuate the self-sustained oscillation mechanism at the open cavity flow.

### 1. 서론

와류와 물체의 상호작용에 의한 벽면 압력 변동은 물체에 강한 하중 변동을 일으켜 이에 의한 소음의 발생 뿐 만 아니라 유동유발 진동(flow-induced vibration)에 따른 기기의 마모나 피로의 원인을 일으키기도 한다. 배관계통을 예로 들면 게이트 밸브의 공동에서 와류 홀림 현상은 보통 주기성을 가지며 이에 따른 비정상 압력변동(unsteady pressure fluctuation)은 밸브 계통의 진

동 특성과 맞물려서 급기야 밸브 계통을 파손시키는 사례가 발생하는 것으로 알려져 있다 [1]. 특히 이 밸브가 안전을 위한 차단 밸브라면 적절한 시점에서 그 기능을 다하지 못할 수도 있다.

와류와 모서리의 상호 작용에 대한 연구는 주로 실험을 통해 많이 수행되어졌다. 와류와 모서리의 상호작용에 의한 에지 톤(edge tone) 현상은 Brown [2]에 의해서 실험적으로 밝혀졌으며, Rossiter [3]는 잘 발달된 와류가 모서리에 부딪치는 현상을 실험적으로 구현하였고, 공동에서 되먹임 현상에 의한 와류 이탈 주기를 나타내는 Strouhal 수를 반경험적으로 제안하였다. Rockwell 과 Knisely[4]는 직각 전향계단(rectangular forward step)에 부딪치는 와류 유동 형태를 완전포획

\*정회원, 전북대학교 공과대학 기계항공시스템공학부

\*\*정회원, 한전 전력연구원 원자력연구실

(complete clipping), 부분포획(partial clipping), 와류 이탈(escape) 등, 세 가지 유동 형태로 구분 지었으며, 실험적으로 위 세가지 형태를 번갈아 가며 바꾸는 불안정한 현상(jittering) 확인하였다.

와류와 물체의 상호 작용에 대한 이론적인 접근의 예로 Lee [5]는 입사와류를 여러 개의 와점들로 이루어진 하나의 랭킨 와운(Rankine vortex cloud)으로 모델링할 필요성을 인식하고 받음각이 없는 2차원 대칭 날개에 와류가 부딪치고 변형되는 형상을 계산의 정확도를 높이기 위해서 물체 표면은 적응 패널(adaptive panel)방법을 적용하였다. 와류와 모서리의 상호작용 시에 와류의 변형이 심하지 않은 경우에는 와점(point vortex) 하나로 모델링 하여 좋은 결과를 얻을 수 있음이 알려져 있다. Conlisk와 Rockwell [6]은 직각 전향계단에 와점이 접근할 때 압력변동과가 발생함을 수치적으로 확인하였으며, 와점의 세기를 바꾸면서 와점의 이동 경로를 실험치와 비교하였다.

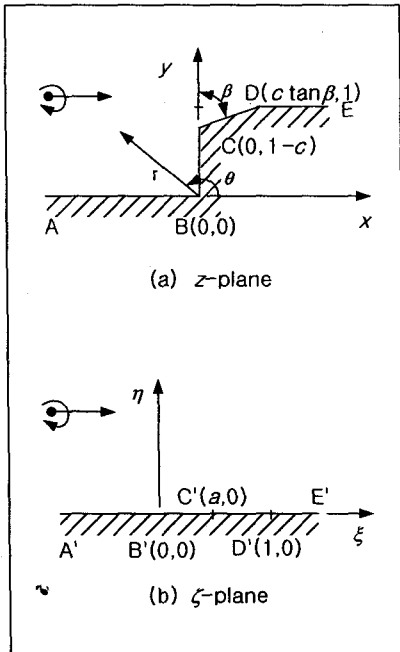


Fig. 1. Schematics of physical and transformed planes.

물체의 형상 변화에 대한 벽면 압력변동의 수치적 연구는 Panaras [7]에 의해서 처음 시도되어

졌다. 그는 전향계단은 아니지만 와점이 무한 평판에 돌출된 형상(삼각형, 원형, 타원형, 등)에 입사될 때 와점의 패적과 물체 표면에서 와점의 위치에 따른 벽면 압력 변동을 계산하였다. 그러나 이러한 이론적인 접근 문헌들은 직각 전향계단에 대해서 와점의 작용에 의한 비정상 압력 변동에 대한 내용들이며 모서리의 형상 변화를 통한 비정상 압력 변동의 제어에 관한 접근은 실험적으로만 시도된 바 있다 [8].

## 2. 수치적 접근

비압축성 비점성 비회전 유동장에 대한 유동의 지배방정식은 다음과 같이 Laplace방정식을 만족하는 특성을 갖는다.

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad (1)$$

여기서  $\phi$ 는 속도 포텐셜을 의미한다.

일반적으로 무한 평판에 대해서는 해석적인 해를 쉽게 얻을 수 있으므로 Schwarz-Christoffel 변환을 이용하여 Fig. 1(a)에 나타난 전향계단 형태를 아래의 등각사상 식을 통해 Fig. 1(b)와 같이 무한 평판으로 옮긴다.

$$\frac{dz}{d\xi} = A \sqrt{\frac{1-\xi}{\xi}}^{\frac{\pi}{\beta}} \sqrt{\frac{a-\xi}{1-\xi}} \quad (2)$$

$$z = f(\xi) = A \int_0^\xi \sqrt{\frac{1-\xi}{\xi}}^{\frac{\pi}{\beta}} \sqrt{\frac{a-\xi}{1-\xi}} d\xi + B \quad (3)$$

여기서 경계조건은 다음과 같다.

$$\begin{cases} \xi=0, & z=0 \\ \xi=a, & z=(1-c)i \\ \xi=1, & z=c \tan \beta + i \end{cases} \quad (4)$$

위 경계조건을 이용하여  $A, B, a$ 를 결정하게 된다. 여기서 물리공간에서의 복소변수는  $z = x + iy$ 이고, 수치공간에서의 복소변수는  $\xi = \xi + i\eta$ 이며,  $i = \sqrt{-1}$ 이다. 길이  $z, \xi$ 는 계단 높이가  $h$ 로 무차원된 값으로 정의한다.

복소 포텐셜은  $F(z) = \phi + i\psi$ 로 나타낼 수 있다. 여기서  $\phi$ 는 속도 포텐셜 함수이고,  $\psi$ 는 유량 함수가 된다. 자유흐름장과 와점들이 놓여져 있는 경우에 대한 유동장은 각각의 유동을 지배하는 복소포텐셜 함수들을 합하면 된다. 총 복소포텐셜은

$$F(\zeta) = F_M(\zeta) + \sum_{j=0}^N \frac{ik_j}{2\pi} [\ln(\zeta - \bar{\zeta}_j) - \ln(\zeta - \zeta_j)] \quad (5)$$

여기서  $k_j$ 는  $j$ 번째 와점의 무차원 세기를 나타내며 무차원은 계단의 높이와 균일 흐름 속도로 한다.  $F_M(\zeta)$ 는 균일 흐름에 대한 복소포텐셜로 다음 값을 갖는다.

$$F_M(\zeta) = 2\zeta/\pi \quad (6)$$

복소 속도는 다음과 같이 복소포텐셜을 미분함으로써 나타낼 수 있다.

$$W(z) = \frac{dF}{dz} = u - iv = \frac{dF}{d\zeta} \frac{d\zeta}{dz} \quad (7)$$

따라서  $N$  개의 와류와 자유 흐름장 안에서  $i$ -와점에 유도되는 속도는 식(5)와 식(7)로부터

$$u_i - iv_i = \left\{ \frac{dF_M}{d\zeta} + \frac{1}{2\pi} \left[ \sum_{j=1}^N \frac{ik_j}{\zeta_i - \zeta_j} - \sum_{j=i}^N \frac{ik_j}{\zeta_i - \zeta_j} \right] \right\} \cdot \frac{1}{f'(\zeta_i)} + \frac{ik_i}{4\pi} \frac{f''(\zeta_i)}{f'(\zeta_i)^2} \quad (8)$$

와점의 이동 경로는 와류와 자유 흐름에 대한 속도로부터 물리적 영역에서의 1차 미분 방정식을 적분함으로써 얻어 낼 수 있다. 본 연구에서는 미분방정식을 시간에 대해 4차 정확도의 Runge-Kutta 적분방법을 이용한다. 속도장은 수치 공간 변수  $\zeta$ 로 주어지므로 변환식  $z = f(\zeta)$ 를 이용하여 물리적 공간의 위치를 수치공간 위치로 변환 시켜준다. 이를 위해서 Newton-Raphson iteration 방법을 도입한다.

비압축성 비점성 흐름에서 정상유동인 경우 벽

면 압력 분포는 속도장만 알고 있으면 얻을 수 있으나 비정상 유동에서의 벽면 압력 변동은 벽면에서 속도의 변화와 포텐셜 변화를 필요로 한다. 와점이 물체 표면을 지날 때에는 국부적인 유속의 변화와 포텐셜 변화를 동반하게 되며 이는 식 (5)와 식 (8)로부터 얻을 수 있다. 본 연구에서는 무차원 압력 계수를 와점이 없는 경우를 기준으로 하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$c_p = \frac{(p - p_\infty) - (p_0 - p_\infty)}{q_\infty} \quad (9)$$

$$= (u_0^2 + v_0^2) - (u^2 + v^2) - \frac{\partial \phi}{\partial t}$$

여기서  $q_\infty$ 는 동압을 나타내며,  $u_0, v_0$ 는 와류가 없는 경우의 유동장에서의 유속을 나타낸다.

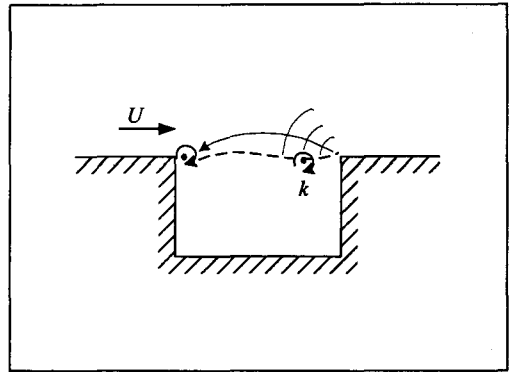


Fig. 2 Feedback mechanism on the open cavity flow

### 3. 결과 및 토의

공동에서의 실험결과를 종합해보면 주기적인 압력 교란과의 발생을 제거하기 위해서는 재부착 모서리(reattachment edge)의 형상을 바꾸거나 공동의 전단(leading edge) 높이보다 후단(trailing edge) 높이를 낮게 하는 것 등이 제안되어 있다. Fig. 2는 공동에서 전단에서 발생된 와류가 후단 모서리에 부딪치고 여기서 발생하는 압력 교란이 공동 전단에 되먹임 되는 구조를 나타낸 그림이다. 이러한 유동 형태는 전단과 후단의 흐름에 공진을 유발하여 주기적인 강한 압력변동을 지속

하는 자려진동(self-sustained oscillation) 흐름구조를 갖게되며 유동유발 소음진동(flow-induced sound and vibration)에 의한 소음발생과 기기 손상의 원인을 일으키게 된다.

본 연구에서는 모서리의 형상을 바꾸어 가면서 모서리에서의 압력교란 진폭과 그 압력 교란 기울기 두 가지에 대해 중점적으로 파악하고자 한다. 이를 위해 모서리 근방에 식 (9)로부터 압력을 계산 할 수 있는 6개 위치를 각각  $a, b, c, d, e, f$ 로 Table 1에 나타내었다. 여기서  $c$ 는 Fig. 1에서처럼 전향계단의 모따기 된 길이이고  $\beta$ 는 모따기 된 각도를 나타낸다.

Table 1. Positions of pressure sensing

Position	$x/h$	$y/h$	Remark
$a$	0.	0.50	
$b$	0.	0.75	
$c$	$(0.75+c)\tan\beta$	0.85	
$d$	$(0.85+c)\tan\beta$	0.95	
$e$	$c \cdot \tan\beta+0.05$	1.00	
$f$	$c \cdot \tan\beta+0.3$	1.00	

모서리에 근접하는 와류의 초기 위치  $(x_0, y_0)$ 는 충분히 모서리에서 떨어졌다고 판단되는  $(-7, 0.8)$ 로 하였으며, 와류의 세기와 계산을 위한 시간 증분을 각각  $k=-0.1$ 과  $\Delta t=0.02$ 로 하였다. 여기서 와류의 세기  $k=-0.1$ 로 한 것은 이 값을 이용한 궤적 계산이 참고문헌 [6]의 공동에서의 와류 궤적 측정 결과와 가장 근접하는 결과를 기준으로 한 것이다.

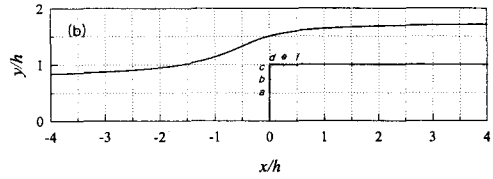
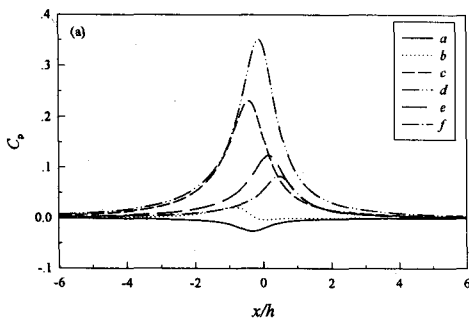


Fig. 3 Pressure pulses and vortex trajectory along a rectangular step

직각 전향계단의 모서리에서 압력변동을 측정 한 결과가 Fig. 3(a)에 나타나 있다. Fig. 3(b)는 직각 전향계단에 와류가 부딪치면서 이동하는 경로이다. 압력계수의 진폭은 모서리에 가장 인접한  $c, d$  점이 가장 큰 진폭을 보이며 둘 중에서  $d$  점 즉, 모서리 상부 부분이 모서리 전방 부분보다 큰 압력 변동을 보인다. 또한 계단의  $a, b$  위치 즉, 모서리에서 바닥 쪽으로 떨어진 부분의 압력 변동은 모서리에 비해서 크게 작은 값을 가지는 특성이 있다. 이는 모서리의 형상 변경 시에 바닥 부분은 압력 교란 진폭의 완화에 중요한 영향을 미치지 않음을 나타낸 결과이다.

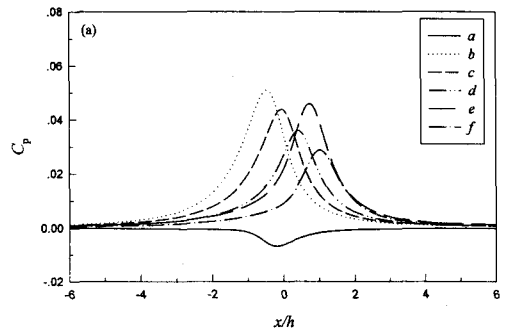


Fig. 4 Pressure pulses and vortex trajectory along a chamfered step,  $\beta = 75^\circ$

Fig. 4는 모따기 길이  $c = 0.2$ 로 하였을 때에

$\beta=75^\circ$ 에서의 압력 계수 분포를 나타낸 것이다. 직각 전향계단의 결과와 비교할 때 교란압력 진폭이 크게 감소됨을 보이며, 특히 모서리 근방에서의 압력 진폭이 크게 둔화 되었다.

이제 모따기 길이를  $c = 0.2$ 로 고정한 상태에서 모서리의 각도는  $\beta=15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$ 로 변화시켜가기로 한다. 여기서 모따기가 시작되는 높이를 일정하게 한 이유는 실제 공동이나 모서리의 모따기를 실시할 때에 모따기의 양에 제한이 발생하는 경우가 종종 있기 때문이다. 한 예로 밸브 시트면의 모따기는 밸브가 닫혔을 때 고압유체의 밀봉성과 관련이 된다.

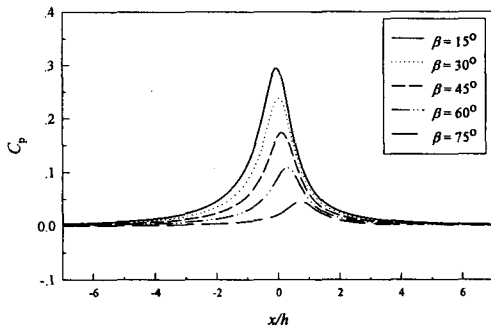


Fig. 5 The effect of the chamfering angle on the unsteady pressure coefficients at position  $e$

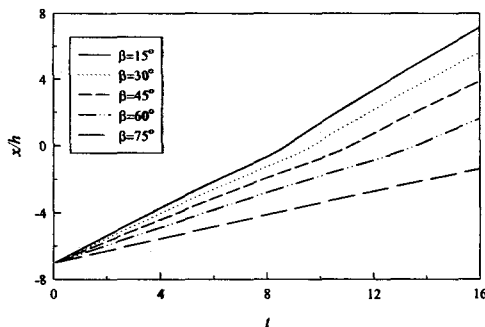


Fig. 6 Time variations of the  $x$ -coordinate vortex position with diverse chamfering angle

Fig. 5는 압력계산점  $e$ 에서 모따기 각도 변화에 따른 압력변동을 보여주고 있다. 모따기 각도를 크게 할수록 압력 교란의 진폭이 점점 줄어들고 있음을 보여준다. 이는 Fig. 3에서와 같이 압력 교란의 최대 값이 발생하는 부분이 모서리의 상부 근방임을 감안 할 때 이 영역에서의 압력교란 진폭을 크게 완화시키는 역할을 하고 있음을 알 수 있다. 또한 Fig. 3의 모따기가 없는 직각 전향계단과 Fig. 5의 모따기 각도  $\beta=75^\circ$ 의 전향계단에 대한 압력교란 결과는 대략 1/10 정도의 진폭 차이를 보여주고 있으며 이러한 압력 진폭의 감소는 결국 주기적인 압력교란의 발생을 제거하는 결과를 가져오게 하는 역할을 할 것으로 기대된다. Fig. 6은 모따기 각도를 크게 할수록 와점의 이동 속도는 점점 느려지는 특성을 보여주고 있다. 이는 그만큼 자려진동의 촉진기능이 둔화되고 있음을 나타낸다. 따라서 모따기의 영향은 비정상 압력변동의 진폭을 줄여줄 뿐만 아니라 압력 교란과의 시간에 따른 기울기를 감소시켜주는 두 가지 기능이 있음을 확인할 수 있다.

여기서 압력 교란과의 시간에 따른 변화율이 크면 클수록 음향장 관점에서는 더 세기가 큰 음파 발생을 의미하며 이 세기는 공동 전단의 와류의 형성에 영향을 주게 된다. 형상 변경을 통하지 않고 재부착 모서리에서 발생하는 압력교란 진폭의 감소 방법은 와류의 초기 입사 위치를 증가시키거나 입사 와류의 세기를 줄이는 것이다. Fig. 7은 직각 전향계단에 부딪치는 와류의 초기 입사 위치를  $y/h=0.6, 0.8, 1.0, 1.2$ 로 바꾸어 가면서 계산한 압력교란 변동을 나타내고 있다. 압력교란을 얻어내는 위치는  $x/h=0, y/h=0.95$ 인 점으로 하였다. 결과에서 알 수 있듯이 초기 와류의 위치가 모서리의 상부로 이동될수록 압력진폭의 값이 크게 감소되고 있음을 보여주고 있다. 여러 가지 실험을 종합해보면 와류의 입사 위치를 높여주었을 때 압력교란의 진폭이 크게 완화되는 결과를 보여주고 있다. 이러한 예로 공동에서 공동의 전단에 스포일러를 장착하여 초기 와류 위치를 높여주거나 공동 후단의 높이를 전단의 높이보다 낮게 하기도 하며, 공동 하부에서 유량을 공급함으로써 와류의 이동 경로를 상향시키는 방법 등이 실험을 통해 알려져 있다. 이러한 실험의 종합적인 결과는 압력 진폭의 크기를 어느 기준 이하로 떨어뜨려서 공동의 전단으로 되먹임

(feed-back) 되는 양을 완화시켜 결국 공동 전단에서 발생하는 와류의 강도가 성장하지 않도록 하는 역할을 하는 것으로 기대된다. 또한 와류의 입사 위치가 작은 경우의 압력 진폭의 기울기가 더 급격히 형성되는 특징이 있어서 예를 들면  $x/h = -1$ 을 기준으로 볼 때 입사와류의 초기 위치  $y/h = 1.2$ 인 경우는 초기위치  $y/h = 0.6$ 인 경우보다  $x/h = -1$ 의 상부에서 압력교란이 더 큰 값을 가지나 그 위치를 지나면 훨씬 작은 값을 가지게 됨을 알 수 있다. 또한 모따기의 각도를 증가시키는 것은 상대적으로 계단의 높이를 감소시키는 결과와 매우 흡사하게 된다.

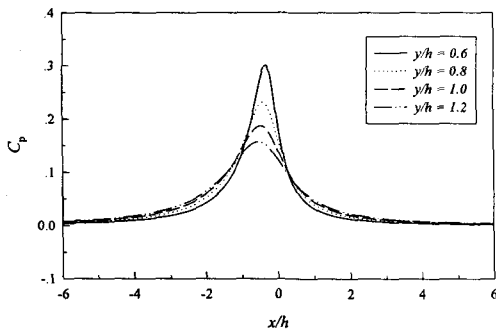


Fig. 7 The effect of the initial vertical vortex position on the unsteady pressure coefficients at position  $b$  for rectangular step

#### 4. 결론

직각 전향계단에서 비정상 벽면압력 변동은 와류가 모서리에 근접하면서 커다란 진폭을 발생시킴을 확인하였으며, 특히 모서리 근방에서 급격한 변화가 발생되므로 이 부분에 대한 형상 변경이 비정상 벽면압력변동의 완화에 크게 영향을 줄 수 있음을 예상할 수 있었다. 모서리의 형상 변경은 수직벽면 모서리에서 동일한 모따기 길이를 가지고 모따기 각도를 증가시키면서 벽면압력 변동의 변화를 계산하였다. 모따기 각도를 크게 할수록 비정상 압력 변동은 크게 줄어들었으며 직각 계단인 경우에 비해  $75^\circ$  모따기 하였을 때가 1/10 정도의 진폭 감소를 가져왔다. 또한 모따

기 각도 증가에 시간에 따른 벽면 압력변동의 완화를 가져왔다.

와류의 초기 높이 변화는 모서리의 벽면 압력 변동에 중요한 인자로 작용함을 확인 하였다. 특히 모서리에서의 와류의 높이가 작을수록 벽면 압력변동은 기울기와 진폭이 동시에 증가한다. 이를 통해볼 때 모따기 각도를 크게 했을 때 갖는 효과는 와류의 초기 위치를 모따기 길이만큼 증가시키는 효과로 볼 수 있다.

#### 참고문헌

- (1) Coffman, J.T., and Bernstein, M.D., 1980, "Failure of Safty valves Due to Flow-Induced Vibration," J. Pressure Vessel Technology, Vol. 102, pp. 112~118
- (2) Brown, G.B., 1937, "The Vortex Motion Causing Edge Tones," Proc. Phys. Soc. Vol. 49, pp. 493~507
- (3) Rossiter, J.E., 1964, "Wind Tunnel Experiments on the Flow Over Rectangular Cavities at Subsonic and Transonic Speeds," RAE Rep. and Memoranda No. 3438
- (4) Rockwell, D., and Knisely, C., 1979, "The Organized Nature of Flow Impingement Upon a Corner," J. Fluid Mech.. Vol. 93, pp. 413~432
- (5) Lee, D.J., 1988, "Surface Pressure Fluctuations Due to Impinging Vortical Flows Upon an Airfoil," AIAA Paper 88-3657-CP, July
- (6) Conlisk, A.T., and Rockwell, D., 1981, "Modeling of Vortex-Corner Interaction Using Point Vortices," Phys. Fluids. Vol. 24 pp. 2133~2142
- (7) Panaras, A. G., 1985, "Pressure Pulses Generated by the Interaction of a Discrete Vortex with an Edge," J. Fluid Mech. Vol. 154, pp.445-461.
- (8) Rockwell, D., and Naudascher, E., 1978, "Review - Self-Sustaining Oscillations of Flow Past Cavities," J. Fluids Engineering, Vol. 100, pp. 152~165