

## 노즐 압력비와 충돌면까지의 거리 변화에 따른 초음속 충돌 제트 유동의 진동 특성

김성인<sup>\*1</sup>, 박승오<sup>\*2</sup>, 이광섭<sup>\*3</sup>

### Oscillatory Features of Supersonic Impinging Jet Flows; Effects of the Nozzle Pressure Ratio and Nozzle Plate Distance

S. I. Kim, S. O. Park and K. S. Lee

Numerical simulations of supersonic impinging jet flows are carried out using the axisymmetric Navier-Stokes code. This paper focuses on the oscillatory flow features associated with the variation of the nozzle pressure ratio and nozzle-to-plate distance. Frequencies of the surface pressure oscillation from computational results are in accord with the measured impinging tones for various cases of nozzle-to-plate distance. The variation of this frequency with distance show a staging behavior. Computed results for the case of nozzle pressure ratio variation for a fixed nozzle-to-plate distance also demonstrate a staging behavior. These two seemingly different staging behaviors are found to obey the same frequency-distance characteristics when the frequency and the distance are normalized by using the length of the shock cell.

**Key Words:** 초음속충돌제트유동(Supersonic Impinging Jet Flow), 진동유동(Oscillatory Flow), 축대칭충류계산(Axisymmetric Laminar Computation), Shock cell structure

#### 1. 서 론

초음속 충돌 제트 유동은 수직 발사체에서 볼 수 있는 기초 유동이다. 초음속 충돌 제트 유동은 단순한 형상(simple geometry)에도 불구하고 복잡한 유동 구조를 가진다. 초음속 충돌 제트 유동은 초음속과 아음속 영역이 모두 존재하며, 충격파와 팽창파가 제트 전단층과 상호 작용하는 양상을 보인다.

초음속 충돌 제트 유동장에서 가장 큰 문제는 고

온, 고속의 제트 유동에 의하여 충돌면에 과도한 열적, 기계적 하중이 발생하는 것이다. 또한 작동 조건에 따라 다른 주파수로 진동하는 특성을 가지는 것으로 알려져 있다. 진동 현상은 충돌면의 열적, 기계적 하중을 증가시킬 뿐만 아니라 큰 소음을 동반하는 것으로 알려져 있다. 이 소음은 소음 파괴(sonic fatigue) 등의 또 다른 문제를 야기할 수 있다.

그동안의 많은 연구들[1-5]로 인하여 기본적인 충돌 제트 유동 구조와 충돌면에서의 압력, 온도 분포 등이 잘 알려져 있다. 지금까지의 대부분의 연구들은 평균적 유동장 특성에 대한 연구들이 주를 이루었으며, 진동하는 유동 특성에 대한 연구는 비교적 최근에 이루어지고 있다. 진동하는 초음속 충돌 제트가 동반하는 충돌음(impinging tone)에 관점을 둔

\*1 학생회원, 한국과학기술원 항공우주공학전공

\*2 정회원, 한국과학기술원 항공우주공학전공

\*3 정회원, 국방과학연구소

\*E-mail : si.kim@kaist.ac.kr

연구들[6-9]로 충돌음의 특성 및 진동 메커니즘에 대한 연구들이 수행되었다. 제트의 shear layer instability와 충돌에 의한 acoustic wave가 feedback loop를 이룬다고 하였으며, 작동 조건에 따라 충돌음이 어떻게 달라지는지 알려졌다. 이때 가장 큰 특징으로는 충돌음의 주파수가 충돌면까지의 거리 변화에 따라 연속적으로 변화하는 것이 아닌 staging behavior를 보이는 것이다[7]. 하지만 그 원인 및 조건에 대한 설명은 아직 부족하다. 최근에 초음속 충돌 제트 유동의 진동을 고려한 수치적, 실험적 연구가 진행되었으나[6,10,11], 충돌면까지의 거리의 변화에 따라 충돌면에서의 압력 진동 주파수가 달라지며, 이 압력 진동 주파수는 충돌음 주파수와 거의 일치함이 알려졌을 뿐이다.

초음속 충돌 제트 유동은 충돌면까지의 거리나 노즐 압력비와 같은 작동 조건에 따라 그 특성이 달라진다. 또한 초음속 충돌 제트 유동 구조의 변화는 충돌음이나 충돌 제트 유동의 진동 특성과 밀접한 관련을 가지고 있다. 하지만 유동 구조의 변화와 진동 현상의 상호 관계에 대한 연구는 미흡한 실정이다. 본 연구에서는 진동하는 초음속 충돌 제트 유동에 대한 비정상 수치 해석을 수행하여, 진동하는 초음속 충돌 제트 유동에서 작동 조건(노즐 압력비와 충돌면까지의 거리)의 변화에 따라 충돌면의 압력 진동 특성은 어떻게 달라지는지, 작동 조건에 따른 유동 구조의 변화가 주파수의 staging 현상과 어떠한 관계를 가지고 있는지 살펴보고자 한다.

## 2. 수치 해석 방법

압축성 유동의 Navier-Stokes 방정식을 축대칭 직교 좌표계( $x, r$ )로 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial E}{\partial x} + \frac{\partial F}{\partial r} + G = \frac{\partial E_v}{\partial x} + \frac{\partial F_v}{\partial r} + G_v \quad (1)$$

위의 식에서 Q는 보전 변수 벡터를 의미하고, E, F는 각각 x, r 방향의 비점성 유동 벡터를 아래첨자 v는 점성 유동 벡터를 나타낸다. G와 G<sub>v</sub>는 축대칭에 의한 생성항이다. 압력은 상태 방정식으로부터 주어진다.

지배방정식을 적분하기 위한 수치 해석 기법으로 유한 체적법(finite volume method)을 사용하였는데,

이때 공간이산화 기법으로 셀 경계면에서 수치 플럭스를 계산하기 위하여 먼저 점성 플럭스는 중앙차분식(central difference)으로 계산하였고, 비점성 수치 플럭스의 계산에는 MLDFSS (Modified Low Diffusion Flux-Splitting Scheme)을 사용하였다[12]. 정확한 시간 적분을 위해서 Pulliam[13]의 subiteration method를 도입하였으며, 2차 정확도를 갖는 three point backward implicit scheme을 사용하였다.

본 연구에서는 convergent sonic nozzle로부터 axisymmetric choked flow가 나온다고 가정하여, 노즐 출구면부터 계산을 수행하였다. 노즐 출구 직경(D)은 10mm이며, 외부 조건은 P<sub>a</sub>=1atm, T<sub>a</sub>=288.15K 이다. 충돌면 등의 벽면에는 no slip 및 adiabatic 벽면 조건이 사용되었다. 격자 구성에는 정렬 격자계와 multi block system이 사용되었으며, 제트 plume 및 충돌 영역내에서 최소 격자 크기는 Δx<sub>min</sub>=0.001D, Δr<sub>min</sub>=0.001D이고, 최대 격자 크기는 Δx<sub>max</sub>=0.013D, Δr<sub>max</sub>=0.0114D 으로 총 격자수는 약 8만개 이다. 비정상 계산을 위하여 고정된 time step이 사용되었으며, 내재적(implicit) 방법을 사용하여 CFL 수의 제약은 없으나, CFL 수가 6을 초과하면 발산하는 것으로 나타났다. CFL 수가 6일 때의 time step은 약 Δt=0.003D/V<sub>e</sub> (V<sub>e</sub>: 노즐 출구 속도)의 값을 가진다. 선행연구[14] 결과 사용된 격자계와 time step은 진동하는 초음속 충돌 제트 유동을 모사하기에 충분한 것으로 나타났다.

## 3. 계산 결과 및 토의

### 3.1 거리비(H/D)의 영향

먼저 충돌 제트 유동의 특성에 영향을 주는 중요한 인자 중 하나인 충돌면까지의 거리(H)를 변화시켜 가며 계산을 수행하였다. 충돌면까지의 거리는 노즐 출구 직경(D)의 2배에서 4배까지 변화시켰으며(H/D=2.0~4.0), 이때 노즐 압력비(NPR=P<sub>0</sub>/P<sub>a</sub>)는 3.0으로 고정하였다. 충돌면의 중심에서 압력 변화를 측정 한 후, 압력 변화의 주파수 특성을 살펴보았다. 충돌면까지의 거리(H/D)의 변화에 따른 압력 진동 주파수를 Fig. 1에 제시하였다. 같은 초음속 충돌 제트 유동에서의 충돌음 주파수 특성과 비교하기 위하여 Powell[7], Tamura & Iwamoto[15]들이 측정 한

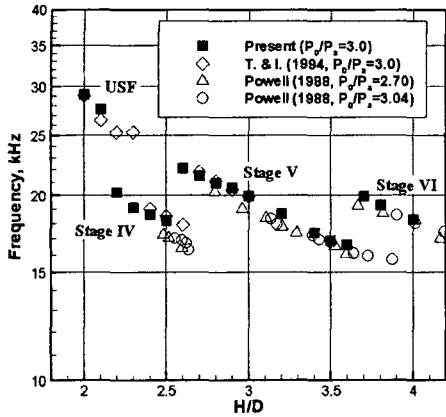


Fig. 1 Characteristics of the pressure oscillation and impinging tones with varying the H/D and fixed NPR

충돌음의 주파수들도 함께 나타내었다. Powell에 의하면 충돌음은 7 stages (labeled II through VIII) 또는 그 이상의 단을 가지며, 튕니 모양의 특성을 보인다고 하였다. Fig. 1에서 알 수 있듯이 본 계산 결과에서는 세 개의 stages가 나타났으며, 이는 충돌음과 동일한 staging 특성을 보이고 있음을 알 수 있다. 주파수 특성에서 staging 현상은 보고되었지만, 그 발생 원인 및 조건에 대한 설명은 아직 부족하다.

일정 범위 내(동일한 stage 내)에서 충돌면까지의 거리가 증가함에 따라 압력 진동 주파수가 감소하는 것은 진동을 유지하는 feedback loop에서 충돌면까지의 거리(geometrical length)가 증가하여 충돌영역에서의 교란(disturbance)이 상류로 전파되는데 더 많은 시간이 소요되기 때문이다. 또한 제트는 하류로 멀어질수록 그 평균 제트 속도가 감소하므로 feedback loop를 구성하는데 걸리는 소요 시간이 증가할 것이므로, 주파수가 감소하는 경향은 타당하다.

다음으로 충돌면 중심에서의 표면 압력 진동폭이 거리비(H/D)의 변화에 따라 어떻게 달라지는지 살펴보자(Fig. 2). 특정 범위(H/D=2.6~3.6, stage V)에서 충돌면까지의 거리가 증가할수록 압력 진동폭은 증가하는 경향을 보이고 있다. 하지만 모든 경우에 그런 것은 아니며, 주파수가 급격히 상승하는(staging) 특정 거리에서 압력 진폭은 감소하는 특징을 보이고 있다. 또한 충돌면의 중심에서의 평균

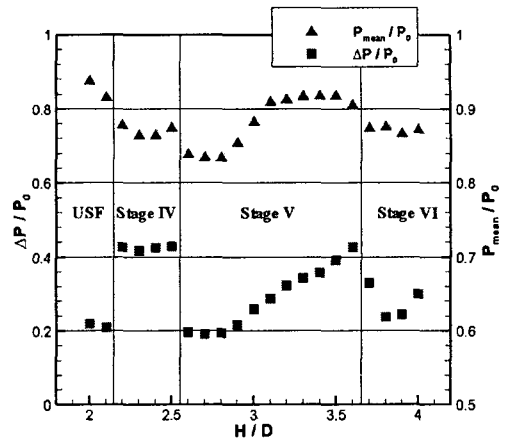


Fig. 2 The amplitude and mean value of the surface pressure oscillation at the center of the plate,  $P_0/P_a=3.0$

압력을 살펴보면 충격파 등으로 인한 압력 손실에 의하여 평균적으로 stagnation pressure의 약 88% 정도의 값을 가지며, 그 변화는 stagnation pressure의 10% 이내로 크지 않으나, 진동 주파수가 급격히 증가할 때(jump up, stage가 바뀔 때), 오히려 약 3~4% 감소하는 것으로 나타났다. 결과적으로 진동 주파수가 가장 낮은 거리에서(H/D=2.5 & 3.6) 상대적으로 높은 평균 압력과 큰 진동폭을 갖는 진동이 발생하며, 이때 과도한 하중으로 심각한 문제를 일으킬 수 있다.

초음속 충돌 제트 유동이 진동하면, 충돌면 압력의 진동뿐만 아니라 plate shock, shock cell의 유동 구조의 변화 및 진동 현상을 동반하게 된다. Plate shock의 진동을 살펴보면, 제트 축 방향으로 plane wave의 주기적인 진동 현상과 같은 모습을 보인다. 그 진동 주파수와 진동폭은 표면 압력의 진동 주파수와 진동폭의 경향성과 일치하는 것으로 나타났다. plate shock의 평균 위치는 충돌면으로부터 0.4~0.6D 만큼 떨어진 범위내에 위치하는 것으로 나타났다.

충돌면까지의 거리(H/D)가 증가함에 따라 나타나는 shock cell의 수와 cell의 영역은 증가하게 된다. 본 계산 결과, 첫 번째 shock cell(팽창과 압축 영역으로 구성)은 거리 변화(H/D=2.0~4.0)에 상관없이 거의 동일한 구조와 길이를 보이고 있으나, 그 이후 plate shock까지의 유동 구조는 거리(H/D)에 따라 달라지며, 첫 번째 cell과 같이 명확히 구분되는 cell

을 보이지 않으며 주기적으로 변화하는 특징을 보인다. 거리가 증가함에 따라 나타나는 유동 구조 변화와 진동 특성의 변화는 상호 연관 관계가 있을 것으로 예측된다. 하지만 주기적으로 변화하며 명확한 cell 구조를 보이지 않는 유동 구조의 차이만으로 진동 특성의 변화를 설명하기에는 부족하다.

### 3.2 노즐 압력비( $P_0/P_a$ )의 영향

압력비에 의하여 제트의 shock cell 길이가 달라지므로, 자유 제트의 screech tone에서 그 주파수와 진동 모드가 달라지듯 충돌 제트의 진동 주파수 등도 압력비에 따라 달라질 것으로 기대된다. 충돌면까지의 거리가 고정된 초음속 충돌 제트 유동에서 압력비에 따라 나타나는 shock cell의 수와 plate shock이 위치한 영역은 달라지며, 이에 따라 그 진동 특성이 어떤 차이를 보이는지 살펴보고자 한다.

노즐 압력비가 클수록 shock cell의 길이는 증가하게 되며, 압력차가 더욱 커지면 압축영역에 충격파가 발생하게 된다. 처음에는 경사충격파가 나타나고, 어느값 이상이 되면 제트 중심부에 수직 충격파가 발생하게 되며, 이를 Mach disk라 부른다. 이와 같은 shock cell의 길이와 구조는 노즐 압력비( $P_0/P_a$ )와 노즐 출구 직경(D)에 의하여 결정된다. Prandtl[16]은 다음과 같이 압력비에 따른 첫 번째 shock cell의 길이,  $\Delta_1$ 에 대한 실험식을 제시하였다.

$$\Delta_1/D = 1.2\sqrt{(P_0/P_a - 1.9)} \quad (2)$$

제트가 반복되는 shock cells을 통과하면, 외기압과의 차이가 줄어들고, 초음속 영역도 감소하게 된다. 따라서 두 번째와 그 이후의 shock cells 크기는 점점 감소하게 된다.

이번에는 노즐 압력비(NPR= $P_0/P_a$ )를 2.0부터 5.0이상까지 변화시켰으며, 이때 충돌면까지의 거리는  $H/D=3.0$ 으로 고정하였다. 마찬가지로 충돌면 중심에서 압력 변화를 측정하고 그 주파수 특성을 살펴 보았다. 일정 범위내에서 압력비가 증가할수록 진동 주파수는 약간 증가하는 것으로 나타났다(Fig. 3). 이는 고정된 충돌면까지의 거리에서 압력비의 상승으로 팽창된 제트의 평균 속도가 다소 증가함으로 인한 것이다. 하지만 특정 압력비에서 주파수가 급격히 감소하는 특징을 보이는데, 이 staging pattern은 거리비( $H/D$ )에 따른 경우(Fig. 1)와 차이를 보인다.

압력비가 낮으면 shock cell의 길이는 짧고 고정된 충돌면까지의 거리내에 여러 cell이 나타나게 된다. 먼저 NPR=2.5, 3.0, 3.3, 3.5인 경우들(Group I in Fig. 3)은 노즐 출구부터 plate shock까지의 제트 유동에서 two cells을 확인할 수 있으며, 두 번째 cell의 팽창 영역을 거친 후 압축 영역에 plate shock이 위치하는 구조를 보이고 있다. 이들은 서로 비슷한 진동 주파수를 보이고 있다(Group I in Fig. 3). 다음으로 압력비를 더 증가시키면 shock cell의 길이는 증가하고 고정된 충돌면까지의 거리에서 나타나는 shock cell의 영역은 감소하게 된다. 따라서 NPR=3.7, 4.0, 4.2인 경우들(Group II in Fig. 3)은 두 번째 cell의 압축 영역은 나타나지 않으며, 팽창 영역에 plate shock이 나타나는 특징을 보이고 있다. 이때 Group II의 진동 주파수는 Group I의 진동 주파수에서 jump down하여 다른 주파수 군을 형성하고 있다(Fig. 3). 압력비가 계속 증가하면 앞서 언급 하였던 것과 마찬가지로 큰 압력차로 인하여 과도한 팽창 이후 normal shock (Mach disk)이 발생하며, Mach disk 이후는 subsonic region이 되기 때문에 초음속 유동의 충돌에 의한 plate shock은 더 이상 존재하지 않게 된다. 이때에는 Mach disk가 진동하며 plate shock과 같은 역할을 하게 되며, Group II와는 다른 진동 주파수를 가진다.

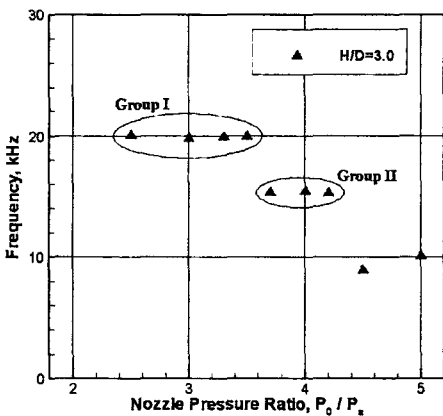


Fig. 3 Characteristics of the pressure oscillation with varying NPR and fixed distance,  $H/D=3.0$

### 3.3 유동 구조와 진동 주파수의 변화

파소팽창된 초음속 제트 유동은 노즐 압력비 ( $NPR=P_0/P_a$ )와 노즐 출구 직경( $D$ )에 따라 다른 shock cell의 길이를 가진다. 충돌면까지의 거리를 변화시키거나 압력비를 변화시켜가며 수치 해석을 수행해본 결과, 초음속 충돌 제트 유동에 나타나는 shock cell의 유동 구조와 진동 특성이 관련 있는 것으로 나타났다. 고정된 압력비에서 거리비( $H/D$ )를 증가시키면 나타나는 shock cell의 수가 증가하듯이 고정된 거리에서 압력비를 감소시키면 cell 길이가 감소하여 나타나는 cell의 수가 증가하는 유사한 유동 구조의 특징을 확인할 수 있다. 따라서 지금까지 압력비( $NPR$ )와 거리비( $H/D$ )를 변화시켜가며 살펴본 경우들에 대하여 진동 주파수 변화를 shock cell의 길이를 이용하여 무차원화 하여 나타내면 Fig. 4 (Square : 고정된 압력비에서 거리가 변화한 경우, Circle : 고정된 거리에서 압력비가 변화한 경우)와 같이 나타낼 수 있다. 그 결과 두가지 경우가 동일한 staging behavior를 보이고 있음을 알 수 있다. 즉 압력비의 변화에 따른 진동 주파수의 변화에서 Group I은 거리 변화에서의 stage V에, Group II는 stage IV에 해당하는 것으로 나타났다. 이때 진동 주파수도 shock cell 길이를 이용하여 무차원화 ( $f\Delta_1/C_a$ ) 하였다. 여기서  $\Delta_1$ 은 첫 번째의 shock cell 길이로 Prantal의 실험식(Eq. 2)으로부터 구하였으며,  $C_a$ 는 외기에서의 소리 속도이다. 결과적으로

$H/\Delta_1$ 은 근사적으로 충돌 제트 유동장에 나타나는 shock cell의 수를 나타내게 된다. 결과적으로 압력비( $NPR$ )와 거리비( $H/D$ )에 상관없이 제트 유동 구조가 비슷하면 비슷한 진동 특성을 가짐을 확인할 수 있다.

## 5. 결론

진동하는 축대칭 초음속 충돌 제트 유동에 대하여 비정상 수치 계산을 수행하였다. 초음속 충돌 제트 유동의 특성에 영향을 주는 주요 인자인 노즐 압력비( $NPR=P_0/P_a$ )와 충돌면까지의 거리( $H/D$ )를 변화시켜 가며, 그 진동 특성이 어떻게 달라지는지 살펴 보았다.

먼저 충돌면까지의 거리비( $H/D$ )의 변화에 따라 그 압력 진동 주파수의 변화는 충돌음과 같이 staging pattern을 보였으며, 가장 낮은 진동 주파수를 갖는 거리에서 가장 큰 진동폭과 높은 평균 압력을 보이는 것으로 나타났으며, 이때 충돌면에 과도한 하중으로 인한 문제가 발생할 수 있다.

다음으로 압력비( $NPR$ )가 변화함에 따라 충돌면에서의 압력 진동 특성은 유동 구조에 따라 다르게 나타나는 특징을 보였다. 즉 압력비의 변화에 의하여 나타나는 shock cell의 수와 cell의 영역이 달라지면 다른 주파수를 가지는 것으로 나타났다. 압력비의 상승으로 Mach disk의 발생과 같이 shock의 구조가 달라져도 진동 특성에 차이를 보이는 것으로 나타났다.

충돌면까지의 거리나 압력비가 달라짐으로 충돌 제트 유동장에 나타나는 유동 구조의 차이를 보이고, 유동 구조의 차이는 진동 주파수의 staging 현상과 같은 진동 특성의 변화와 관련있는 것으로 나타났다. 따라서 shock cell의 길이를 이용하여 무차원화 한 후 진동 주파수를 살펴 보았더니, 두 작동 조건의 변화에 의한 진동 주파수의 변화가 같은 staging behavior를 보임을 알 수 있었다. 결론적으로 진동 특성의 변화는 유동 구조의 변화와 밀접한 관련이 있으며, 진동 특성의 명확한 이해와 제어를 위해서는 유동 구조의 변화를 진동 메커니즘, acoustic feedback 특성과 함께 살펴볼 필요가 있다. 또한 앞으로 유동 구조의 차이가 주파수 특성의 변화에 미치는 영향 및 원인에 대하여 살펴보고자 한다.

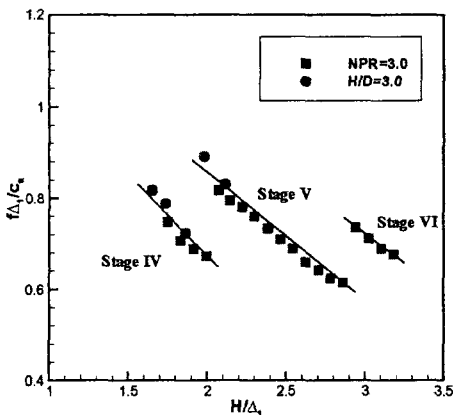


Fig. 4 Characteristics of the pressure oscillation normalized by shock cell length

## 참고문헌

- [1] Donaldson, C.D. and Snedeker, R.S., *J. Fluid Mech.*, Vol.45, (1971), p.281-319.
- [2] Ginzberg, I.P. et al., *J. Eng. Phys.*, Vol.19, (1973), p.1081-1084.
- [3] Carling, J.C. and Hunt, B.L., *J. Fluid Mech.*, Vol.66, (1974), p.159-176.
- [4] Kalghatgi, G.T. and Hunt, B.L., *Aero. Quart.*, Vol.27, (1976), p.169-185.
- [5] Lamont, P.J. and Hunt, B.L., *J. Fluid Mech.*, Vol.100, (1980), p.471-511.
- [6] Krothapalli, A., *AIAA J.*, Vol.23, (1985), p.1910-1915.
- [7] Powell, A., *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol.83, (1988), p.515-533.
- [8] Tam, C.K.W. and Ahuja, K.K., *J. Fluid Mech.*, Vol.214, (1990), p.67-87.
- [9] Krothapalli, A. et al., *J. Fluid Mech.*, Vol.392, (1999), p.155-181.
- [10] Sakakibara, Y. and Iwamoto, J., *J. Fluids Eng.*, Vol.120, (1998), p.477-481.
- [11] Alvi, F.S. and Iyer, K.G., *AIAA Paper 99-1829*, (1999).
- [12] Lee, C.H. and Park, S.O., *CFD J.*, Vol.10, (2002), p.490-500.
- [13] Pulliam, T.H., *AIAA Paper 93-3360*, (1993).
- [14] Kim, S.I. and Park, S.O., *AIAA Paper 2003-0621*, (2003).
- [15] Tamura, S. and Iwamoto, J., *Trans. Japan Soc. Mech. Eng.*, Vol.60, (1994), p.1-7 (in Japanese).
- [16] Prandtl, L., *Phys. Z.*, Vol.5, (1904), p.599-601.