수직평판에 충돌하는 축대칭 초음속 제트의 수치 연구

신완순 · 이택상 · 박종호 · 김윤곤* · 심우건**

Numerical Simulation of Axisymmetric Supersonic Jet Impingement on a Flat Plate

W. S. Shin · T. S. Lee · J. H. Park · Y. G. Kim* · W. G. Sim**

ABSTRACT

When supersonic underexpanded jets are exhausted from the nozzle, complex shock cell configurations such as barrel shock, expansion fan, Mach disc, and exhaust-gas jet boundary are appeared repetitively. The shock cell is smeared by turbulence dissipation and disappeared in long distance from the nozzle. When underexpanded jet is suddenly impinged on a flat plate, it forms very complex flow structure. In this paper, we solve compressible Navier-Stokes equation adapting finite volume method to obtain jet impingement flow structure and compare calculated data with experimental ones. It is shown that numerical simulation data are in good agreement with experimental one in a short distance between nozzle exit and flat plate and little influence of underexpanded ratio is appeared in jet impingement flow distribution.

초 록

초음속 노즐 뒤에서 형성되는 과소팽창 제트(Underexpanded jet)가 분사될 때 베럴 충격파(Barrel shock), 팽창파(Expansion fan), 마하 디스크(Mach disc), 제트 경계면(Exhaust-gas jet boundary), 그리고 반사 충격파(Reflected shocks)와 같은 구조의 충격파 셀(Shock cell)이 연속적으로 나타난다. 이러한 충격파 셀은 난류 소산에 의해 희미해지며 거리가 멀어지면 사라진다. 과소팽창 제트가 수직 평판에 충돌하게 되면 챔버 압력 및 출구 마하수 등 여러 인자들에 따라 달라지는 복잡한 유동장을 형성하게 된다. 본 논문에서는 평판에 충돌하는 과소팽창 제트가 형성하는 유동장을 압축성 Navier-Stokes 방정식에 유한체적법을 적용하여 수치적으로 구한 해를 실험 데이터와 비교 검증하였다. 실험 데이터와 계산 결과의 압력구배 및 유동가시화 사진 비교 결과 노즐과 평판이 가까운 경우에 충돌제트유동을 잘 예측할 수 있었으며, 과소팽창비가 작을 때 과소팽창비에 따른 충돌제트 유동분포의 영향은 작게 나타남을 알 수 있었다.

충남대학교 기계공학과 (Chungnam Univ. Dept. of Mechanical Eng.)
* 국방과학연구소 (Agency for Defence Development)
** 한남대학교 기계공학과 (Hannam Univ. Dept. of Mechanical Eng.)

1. 서 론

초음속 과소팽창 제트는 베럴 충격파(Barrel shock), 팽창파(Expansion fan), 반사충격파(Reflected shocks), 마하 디스크(Mach disc), 그리고 제트경계면(Exhaust-gas jet boundary)로 이루어지는 여러 충격파 셀(Shock cell)의 유동 형태를 나타난다. 이러한 초음속 과소팽창 제트가 수직 평판에 충돌하면 초음속 자유 제트와는 다른 변형된 유동장이 형성된다.

고체 물체 표면이나 지표면에 초음속 제트가 충돌할 때 발생되는 문제들은 다단 로켓의 분리, 우주공간에서의 도킹, 수직 이-착륙기, 제트엔진의 배기가스, 가스터빈 블레이드, 지상 로켓 발사 등의 다양한 상황에서 일어난다. 이러한 충돌제트의 유동은 일반적으로 아음속과 초음속 혼합영역, 충격파가 교차하는 영역, 팽창파, 난류 전단층 등의 매우 복잡한 구조를 이루고 있는 것으로 알려져 있다.[1]

이와 같은 충돌제트의 유동영역에 관한 연구들은 주로 수직 평판에 대해서만 행해졌다. 수직 평판을 이용한 연구는 1971년 Gummer & Hunt[2], 1973년 Ginzburg[3], Gubanova, Lunew & Plastinina[4], 1976년 Kalghatgi & Hunt[5]등에 의해 이루어졌으며 Gubanova등은 판 충격파(plate shock) 하부 중심영역에서 재 순환하는 stagnation bubble에 주로 관심을 두었다. 또한, 장(6) 등은 수직 및 경사 평판에 대한 비점성 모델을 이용한 수치해석을 수행하여 압력구배와 충격파 구조의 데이터를 실험 데이터와 비교하였다. 최근에는 박(7~8) 등이 노즐과 평판과의 거리, 노즐출구압과 대기압과의 비, 그리고 평판의 기울기각 등의 인자를 고려하여 과소팽창비의 영향, 버블현상 등에 대한 연구를 발표한 바 있다. 그러나, 대분분의 연구가 실험연구에만 치중되어 있으며, 점성을 고려한 충돌제트에 대한 수치해석은 거의 이루어지지 않았다.

따라서, 본 논문에서는 과소팽창하는 초음속 제트가 수직평판에 충돌할 때 나타나는 현상을 압력과 거리에 따라 유동해석하여 실험과의 비교를 통한 타당성을 확인하고 충돌제트 유동해석의 가능성을 제시하고자한다.

2. 수치기법 및 경계조건

2.1 지배방정식

본 연구에서 수행된 충돌제트는 유동구조가 축방향에 대칭인 구조로 이루어져 있으므로 축대칭 압축성 유동으로 정상상태로 가정하여 수행하였다. 충돌제트 유동은 압축성 난류 점성 유동으로 일반적인 지배방정식은 다음과 같다.[9]

연속방정식 :

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0$$

운동량방정식 :

$$\frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\mu\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3}\frac{\partial u_k}{\partial x_k}\delta_{ij}\right) - \rho\overline{u_i' u_j'}\right]$$

에너지방정식 :

$$\frac{\partial(\rho u_j h)}{\partial x_j} = -\frac{\partial}{\partial x_j}\left(k\frac{\partial T}{\partial x_j}\right) + \frac{\partial p}{\partial t} + u_j\frac{\partial p}{\partial x_j} + \tau_{ij}\frac{\partial u_j}{\partial x_j} + S_h$$

위 식에서 u_i는 i 방향의 평균속도를 나타낸다. 난류유동을 해석하기 위하여 2 방정식 모델을 사용하였으며 와점성 계수 μ_t는 표준 k-ε 모델을 사용하여 계산하였다.

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon}$$

난류운동에너지방정식 :

$$\frac{\partial(\rho u_j k)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_i}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_i}\right] + \mu_t\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) - \rho\varepsilon\left(1 + 2\frac{k}{a^2}\right)$$

난류소산방정식 :

$$\frac{\partial(\rho u_j \varepsilon)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_i}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i}\right] + C_1 \mu_t \frac{\varepsilon}{k}\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) - C_2 \frac{\rho \varepsilon^2}{k}$$

여기서, 사용되어진 상수는 다음과 같다.

C_μ=0.09, C_1=1.44, C_2=1.92, σ_k=1.0, σ_ε=1.3

2.2 기본형상 및 경계조건

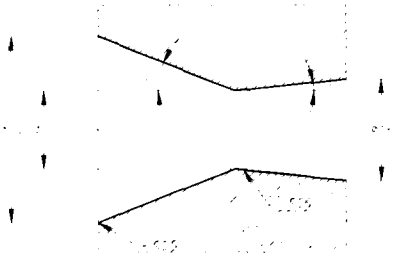
수치계산에서 사용한 물리적 좌표계 및 노즐의 형상은 Fig. 1과 같다. 노즐은 축소확대형으로 노즐 출구 마하수는 2.1, 노즐 출구 지름(D_n)은 13mm이다. 계산 조건을 간략히 나타내기 위하여 노즐 출구와 평판사이의 거리(Z_n)는 노즐 출구지름으로, 노즐 출구압(P_e)과 대기압(P_a)과의 비를 과소 팽창비(PR)로 무차원화하여 나타내었다. PR은 초음속 과소팽창하는 충돌 제트의 특성인자로써 선행 연구들에서 사용되어 왔기 때문에 본 연구에서도 해석 인자로써 PR을 이용하였다.[1] 노즐 출구압은 1차원 등엔트로피 관계식으로부터 계산된 값이다.

유동 해석에서 사용된 경계조건은 입구 경계, 충돌되는 평판 및 노즐 벽에서의 벽면 경계, 유동 중심축인 축 경계, 그리고 유동이 충돌된 후 유출되는 출구 경계로 구성된다. 입구 경계는 챔버내에서의 유동을 Table. 1과 같이 전압력으로 주어졌으며, 출구 경계는 정압을 일정하게, 압력을 제외한 유동변수는 내부유동 영역으로부터 외삽하였다. 벽면 난류경계조건은 벽함수를 사용하여 벽면근처의 격자수를 줄였으며 벽면에서는 속도가 0이 되도록 하였다.

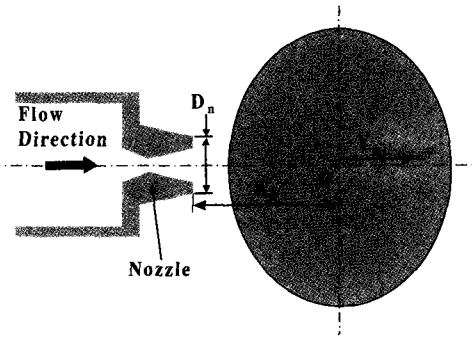
2.3 수치해석방법

충돌제트 주위에서 발생하는 유동구조를 해석하기 위해 압축성 난류유동을 축대칭 유동으로 해석하였다. 본 연구에서는 널리 사용되고 있는, 유한체적법의 상용 유동해석 소프트웨어인 FLUENT 5를 사용하였고, Fig. 2 와 같은 격자를 이용하였다. 거리에 따른 유동의 변화를 고려하기 위하여 $Z_n = 1, 2, 3, 4, 5D_n$ 각각에 대하여 격자를 구성하여 계산을 수행하였다.

Fig. 2는 노즐출구와 평판의 거리가 노즐 출구 지름의 4배일 때를 나타낸다. 축대칭 유동으로 가정하여 계산하였기 때문에 다중 격자(Multi-grid)를 이용하여 상부면 만 계산하였으며, 충격파가 형성되는 중심부분에 격자를 밀집시켰다. 또한, 충돌된 제트가 충분히 발달되어 대기압으로 압력회복을 할 수 있도록 세로 방향의 길이를 노즐 출구 지름의 10배로 정하였다.



(a) Nozzle geometry



(b) Coordinates

Fig. 1 Schematics of Physical domain

Table. 1 Inlet boundary condition

PR	입구압력(psi)	입구속도(m/s)	입구온도(K)
1.2	147	50	300
1.5	166	50	300
1.7	191	50	300

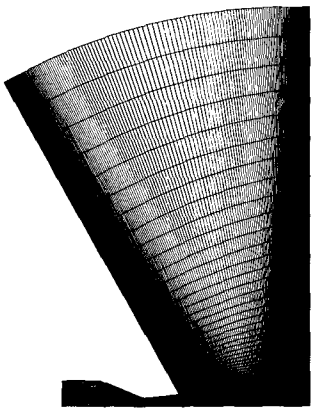


Fig. 2 Grid generation($Z_n = 4D_n$)

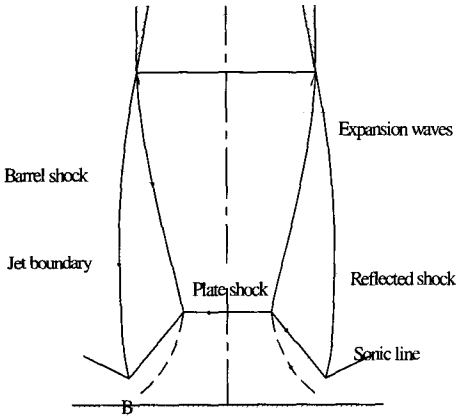
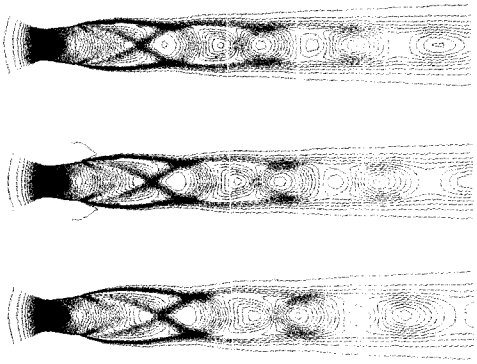
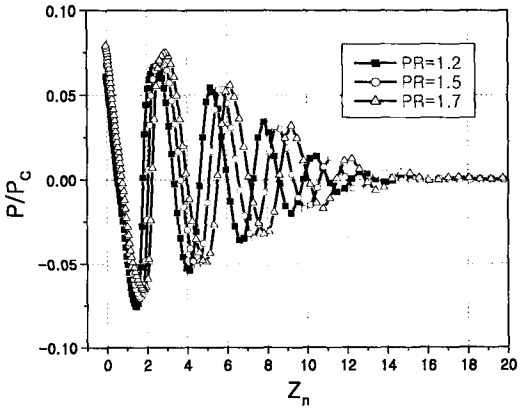


Fig. 3 Schematics of flow structure.



(a) Density contour(PR=1.2,1.5,1.7 from top)



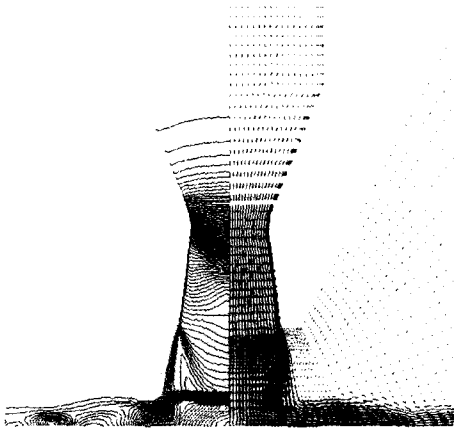
(b) Static pressure distribution along the axis

Fig. 4 Free jet characteristics

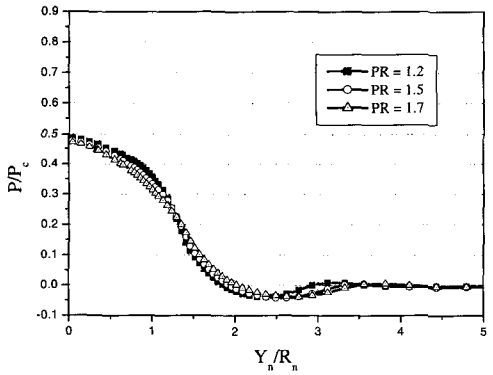
3. 계산 결과

초음속 노즐 출구로부터 첫 번째 충격파 셀 내의 임의의 거리에 설치되어있는 수직충격파에 과소 팽창된 제트가 충돌할 때 형성되는 유동장의 개략도를 Fig. 3에 나타내었다. 평판의 상부에 판충격파가 형성되고, 노즐을 통해 과소 팽창된 제트가 배럴 충격파의 교차를 하게되는 점에서 반사충격파가 발달하게 된다. 판충격파 아래 아음속 유동영역은 음속선(Sonic line)에 의해 반사충격파 아래의 초음속 유동영역과 분리된다. 반사충격파는 제트의 경계와 만나며 이 점을 경계로 제트가 분출된다.

Fig. 4는 PR에 따라 형성되는 초음속 자유제트의 유동분포를 나타낸 것이다. (a)는 PR에 따른 밀도선도를 나타내는 것으로 PR의 크기에 따라 충격파 셀의 크기가 성장한다. (b)는 자유제트의 중심축을 따라 나타나는 정압 분포로, 챔버 압력으로 무차원 하여 나타내었다. 같은 충격파 셀 내에서의 정압비의 크기는 PR에 따라 유사하게 나타나나, Z_n에 따라 충격파 셀 크기의 변화로 최대 압력비 위치의 차이가 나타나며, 노즐 축 방향으로 Z_n에 따른 난류 소산으로 충격파 셀이 점차 사라지고 압력이 대기압으로 회복된다.



(a) Density and vector plot(PR=1.2)

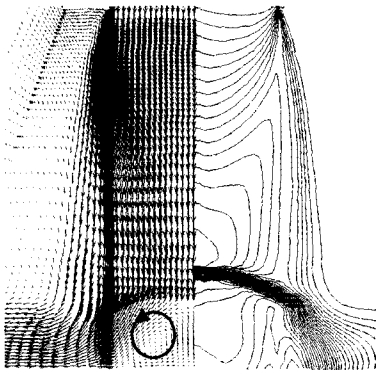


(b) Pressure distribution

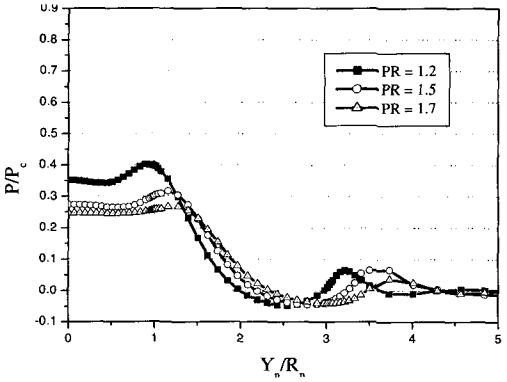
Fig. 5 Pressure distribution, density and vector plot ($Z_n = D_n$)

Fig. 5는 $Z_n = D_n$일 때 PR에 따른 충돌 제트의 유동분포와 평판의 압력분포를 나타낸 것이다. 평판상부의 판충격파가 발달하고, 배럴 충격파와 교차하는 점에서 발생한 반사충격파가 잘 나타나고 있다. 평판 중심에서 최대압력을 나타내고, PR이 커짐에 따른 재압축 영역의 위치는 다소 차이가 있으나 재압축 영역의 크기 및 중심부에서의 압력분포는 일치한다.

Fig. 6은 $Z_n = 2D_n$일 때, PR에 따른 압력과 유동분포를 나타낸다. 충돌제트의 유동분포는 Fig. 5와는 달리 판충격파는 좁은 영역에서 형성되나, 반사충격파는 넓은 영역에서 형성되고 있다. 노즐로부터 분출되는 제트는 노즐 축방향으로 계속 팽창되며, 배럴충격파 사이에 판충격파에 의해 아음속 유동이 형성된다. 배럴충격파를 통과한 제트는 충격파에 의해 유동방향이 변화되며 제트경계면과의 압축으로 형성되는 넓은 영역의 반사충격파가 나타난다. 이 경우, 판충격파와 반사충격파에 의해 둘러쌓인 정체구간이 형성되어, 중심부와 판충격파가 끝나는 점 사이에 압력의 차이로 재순환 영역이 나타난다. 재순환 영역에 의해 표면압력은 중심부에서가 아닌 주변에서 발생하게 되는데 이러한 현상은 정체 버블(Stagnation bubble)이라 한다. 버블의 발생으로 PR의 증가에 따라 중심부의 압력은 낮아지고, 최대 압력비의 위치가 노즐축으로부터 멀어진다. 또한, 재압축파의 위치와 크기도 같은 경향으로 나타난다.

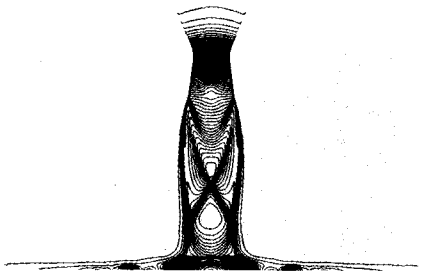


(a) Density and vector plot(PR=1.7)

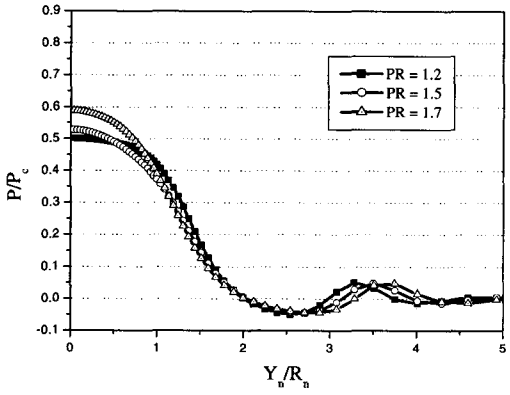


(b) Pressure distribution

Fig. 6 Pressure distribution, vector and density Contour ($Z_n = 2D_n$)



(a) Density contour(PR=1.2)



(b) Pressure distribution

Fig. 7 Pressure distribution and Density Contour ($Z_n = 4D_n$)

Fig. 7은 $Z_n = 4D_n$일 때, 평판이 두 번째 충격파 셀 내에 위치한 것으로 PR에 따른 압력, 유동분포를 나타낸다. 판충격파는 넓은 영역에서 평판 상부에서 낮게 형성되고 있으나, 반사충격파는 좁은 영역에서 나타난다. Fig. 5, 6과는 달리 판충격파의 영향으로 표면압력은 중심부를 따라 일정하고 넓게 나타나며, 재압축파의 위치는 PR이 커짐에 따라 중심으로부터 더 먼곳에서 형성되나, 그 크기는 동일하게 나타난다.

Fig. 8은 PR=1.2 일 때 Z_n에 따른 유동 및 압력분포를 나타낸 것이다. 첫 번째 충격파 셀 내에 있는 경우 $Z_n = 1, 2D_n$일 때 Z_n에 따른 최대 압력은 감소하며, 두 번째 충격파 셀 내에 있을 때 $Z_n = 3, 4, 5D_n$일 때도 동일한 결과가 나타난다. 평판의 최대압력 형성 위치는 첫 번째 충격파 셀 내에 있을 때 Z_n이 증가함에 따라 중심부에서 주변부로 넓게 분포한다. Z_n에 따른 재압축파의 위치는 유사하게 나타나며 크기 $Z_n = D_n$일 때 가장 낮게 나타나나, Z_n이 증가함에 따라 거의 유사하게 나타난다. 이러한 경향은 PR=1.5, 1.7 일 때도 유사하게 나타나므로, 충격파 셀의 반복으로 나타나는 충돌제트의 표면 압력분포는 반복적으로 나타남을 알 수 있다.

Fig. 9는 $Z_n = 2D_n$일 때 계산 결과와 실험치의 유동 및 압력 분포를 비교하여 나타낸 것이다. (a)는 PR=1.5일 때의 쉬리렌 사진과 밀도선도를 같이 나타낸 것으로 판 충격파 및 반사충격파의 크기 및 위치가 정성적으로 잘 일치하고 있다. (b)는 PR에 따른 압력분포를 나타낸 것으로 두 결과 모두 버블의 형성으로 인한 중심부 압력감소 특성을 나타내고 있다. 또한, PR에 따른 최대압력비 및 재압축 영역의 크기 및 위치가 서로 잘 일치하고 있다. 중심부에서의 실험치가 해석결과보다 좀더 낮게 나타나고 있는데 이 현상은 해석결과와 실험결과의 판 충격파의 길이 및 높이 차이로 인한 압력회복율의 차이로 나타난다. 본 결과로부터 동일 충격파 셀 내에서 초음속 제트가 충돌할 때 노즐 축 중심부에서 형성되는 압력비는 PR의 증가에 따라 감소하는 특성을 갖는 것을 확인하였다.

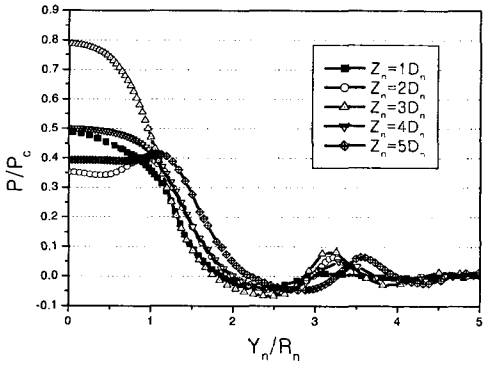
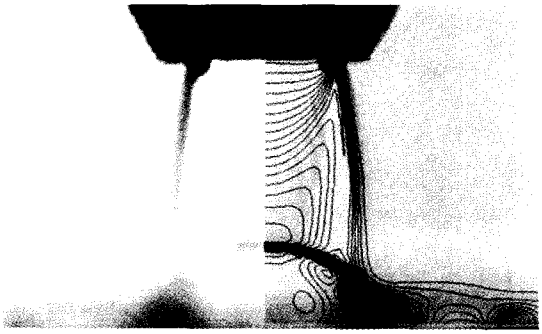
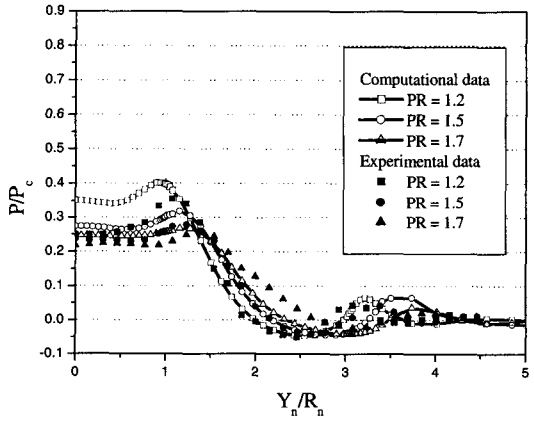


Fig. 8 Pressure distribution(PR=1.2)



(a) Schlieren picture(left) and density contour(right)



(b) Pressure distribution

Fig. 9 Comparison of between experiment and computation results.

Table. 2 Maximum pressure ratio(P/P_C)

Z_n \ PR	1.2		1.5		1.7	
	CFD	EXP.	CFD	EXP.	CFD	EXP.
1.0	0.52	0.49	0.52	0.48	0.51	0.47
2.0	0.40	0.36	0.32	0.28	0.27	0.25
3.0	0.79	0.67	0.76	0.62	0.58	0.54
4.0	0.50	0.35	0.53	0.48	0.59	0.46
5.0	0.41	0.54	0.44	0.33	0.33	0.28

Table. 2와 3은 Z_n와 PR에 따른 최대압력비와 최대압력형성 위치를 각각 나타낸 것으로 실험치와 같이 나타내었다. 최대 압력 형성위치는 주로 중심부에서 나타나나 버블이 형성되는 경우에만 주변에서 형성되었으며, 본 계산 조건하에 형성되는 최대 압력은 PR≈1.2, $Z_n = 3.0D_n$ 일 때 챔버압력의 79%로 실험데이터와의 오차는 15%로 나타났다.

Table. 3 Maximum pressure ratio location(Y/D_n)

Z_n \ PR	1.2		1.5		1.7	
	CFD	EXP.	CFD	EXP.	CFD	EXP.
1.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2.0	0.90	1.08	1.16	1.23	1.27	1.38
3.0	0.00	0.31	0.00	0.00	0.00	0.46
4.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5.0	1.06	0.31	0.90	1.231	0.00	1.23

4. 결 론

본 논문에서는 평판에 충돌하는 과소팽창 제트가 형성하는 유동장을 조사하기 위해 축대칭 압축성 Navier-Stokes 방정식에 유한 체적법을 적용하여 수치적으로 구한 해를 실험 데이터와 비교 검증하였다. 실험 데이터와 계산 결과의 압력구배 및 유동분석 결과로부터 PR와 Z_n에 따른 버블의 발생과 재압축파 영역에 대해 고찰하여, 노즐과 평판이 가까운 경우($Z_n < 3D_n$) 유동특성은 최대 오차 10% 이내로 잘 일치하였으나, Z_n이 멀어지는 경우($Z_n \geq 3D_n$)는 오차정도가 최대 30%로 다소 크게 나타났다. PR≈1.2~1.7인 경우 충돌제트 특성은 Z_n에 따라 유사하게 나타나 PR이 작을 때 PR이 유동에 미치는 영향은 작게 나타남을 알 수 있었다.

축대칭 유동으로 가정하여, 난류 모델을 이용한 충돌제트의 유동 수치해석으로부터 평판에서 형성되는 최대압력 및 형성위치를 정량적으로 파악할 수 있었고, 충돌제트의 수치해석 활용가능성을 확인할 수 있었다.

후 기

본 연구는 학술진흥재단 '98년도 과학 기술 기초 중점연구(1998-018-E00032)연구비로 수행된 것으로 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. P. J. Lamont and B. L. Hunt, "The Impingement of Underexpanded Axisymmetric Jets on Perpendicular and Inclined Flat Plate", Journal of Fluid Mechanics, Vol. 100, No. 3, pp. 471~511., 1980.
2. J. H. Gummer and B. L. Hunt, "The Impingement of a Uniform, axisymmetric, Supersonic Jet on a Perpendicular Flat Plate", Aeronautical Quarterly, Vol 12, 1971, pp. 403~420.
3. I. P. Ginzburg, B. G. Semiletenko, V. S. Terpigor'ev, and V. N. Uskov, "Some Singularities of Supersonic Underexpanded Jet Interaction with a Plane Obstacle", Journal of Engineering Physics, Vol. 19, 1973, pp. 1081~1084.
4. O. I. Gubanova, V. V. Lunev, L. N. Plastinina, "The central breakaway zone with interaction between a supersonic underexpanded jet and a barrier", Fluid Dynamics, Vol. 6, 1973, pp. 298~301.
5. G. T. Kalghatgi and B. L. Hunt, "The Occurrence of Stagnation Bubble in Supersonic Jet Impingement Flows", Aeronautical Quarterly, Vol. 27, 1976, pp. 169~185.
6. K H Kim, K S, Chang, "Axisymmetric jet impingement on a flat plate : numerical simulation using a TVD scheme", Proc. ACFD Conf., 1991, pp. 205~211,
7. 박종호외 4명, "초음속 충돌제트의 유동 특성에 대한 실험적 연구", 한국추진공학회지 제2권 3호, 1998, pp. 10~19.
8. 박종호외 4명, "수직 평판 위에서 과소 팽창 제트의 충돌", 춘계한국추진공학회 학술강연회 논문초록집., 1999.
9. FLUNT INC., FLUENT User's Guide, 1998.
10. J. C. Carling and B. L. Hunt, "The near wall jet of a normally impinging, uniform, axisymmetric, supersonic jet", J. Fluid Mech, Vol. 66, 1974, pp. 159~176.
11. A.M. Al-Qutub and M.O. Budair, "Experiments on the Flow Over a Flat Surface Impinged by a Supersonic Jet", AIAA 95-2935, July 10-12. 1995
12. J. Iwamoto, "Impingement of Underexpanded Jets on a Flat Plate", Journal of Fluids Engineering, Vol. 112, 1990, pp. 179~184.
13. Coleman Dup. Donaldson and Richard S. Snedeker, "A Study of free jet impingement. Part 1. Mean properties of free and impinging jets.", Journal of Fluid Mechanics, Vol. 45, part2, 1971, pp. 281~319.
14. P. J. Lamont and B.L. Hunt, "The impingement of underexpanded axisymmetric jets on wedges", Journal of Fluid Mechanics, Vol. 76, part2, 1976, pp 307~336.
15. T.F. Zien, K.Y. Chien and R.T. Driftmyer, "Two-Dimensional Supersonic Jet Impingement on a Flat Plat", AIAA Journal, Vol. 17, No. 1, 1979, pp. 4~5.