

## 경사 평판에 충돌하는 초음속 과소팽창 제트에 관한 실험적 연구

이택상\* · 신완순\* · 이정민\* · 박종호\* · 윤현걸\*\* · 김윤곤\*\*

### An Experimental Study of Supersonic Underexpanded Jet Impinging on an Inclined Plate

T. S. Lee\* · Y. S. Shin\* · J. M. Lee\* · J. H. Park\* · H. G. Yoon\*\* and Y. G. Kim\*\*

#### ABSTRACT

Problems created by supersonic jet impinging on solid objects or ground arise in a variety of situations. For example multi-stage rocket separation, deep-space docking, V/STOL aircraft, jet-engine exhaust, gas-turbine blade, terrestrial rocket launch, and so on. These impinging jet flows generally contain a complex structures. (mixed subsonic and supersonic regions, interacting shocks and expansion waves, regions of turbulent shear layer)

This paper describes experimental works on the phenomena (surface pressure distribution, flow visualization) when underexpanded supersonic jets impinge on the perpendicular, inclined plate using a supersonic cold-flow system. The used supersonic nozzle is convergent-divergent type, exit Mach number 2,

The maximum on the plate when it was inclined was much larger than perpendicular plate, owing to high pressure recoveries through multiple shocks. Surface pressure distribution as to underexpanded ratio showed similar patterns together.

#### 초 록

고체 물체 표면이나 지표면에 초음속 제트가 충돌할 때 발생하는 문제들은 다단 로켓의 분리, 우주공간에서의 도킹, 수직 이/착륙기, 제트 엔진의 배기가스, 가스터빈 블레이드, 지상 로켓 발사 등의 다양한 상황에서 일어나며 이러한 충돌제트의 유동은 아음속과 초음속 혼합영역, 충격파가 교차하는 영역, 팽창파, 난류 전단층 등의 매우 복잡한 구조를 이루고 있는 것으로 알려져 있다.

본 연구에서는 출구마하수 2, 축소-확대형 초음속 노즐을 통해 과소 팽창된 제트가 수직, 경사평판에 부딪힐 때 형성되는 표면압력분포 및 유동가시화 등을 초음속 유동시험장치를 이용하여 연구하였다.

평판에서의 최대압력은 수직일 경우보다 경사졌을 때 훨씬 더 컸으며, 이는 여러 충격파를 통한 압력

\* 충남대학교 기계공학과(Chungnam National University, Dept. of Mechanical Eng.)

\*\* 국방과학연구소(Agency for Defense Development)

회복 때문이다. 또한, 평판이 자유제트의 첫 번째 충격파 셀 내에 위치할 때 과소 팽창비에 따른 표면압력분포는 서로 유사한 경향을 보여주었다.

## 기호설명

- $D_n$  : 노즐출구 내경  
 $M_e$  : 노즐출구 마하수  
 $P$  : 게이지 압력  
 $P_c$  : 저압 챔버 압력  
 $PR$  : 과소 팽창비(노즐출구압력/배압)  
 $R_n$  : 노즐출구 반경  
 $Y_n$  : 평판중심으로부터 반경방향거리  
 $Z_n$  : 노즐출구로부터 평판중까지의 거리  
 $\theta$  : 평판의 경사각

## 1. 서론

고체 물체 표면이나 지표면에 초음속 제트가 충돌할 때 발생하는 문제들은 다단 로켓의 분리, 우주공간에서의 도킹, 수직 이/착륙기, 제트 엔진의 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.<sup>(1)</sup>

이와 같은 충돌제트의 유동영역에 관한 과거 연구들은 주로 수직 평판에 대한 것으로 우주공간에서의 충돌에 관한 모사실험을 진공상태를 이용해 많은 연구결과를 발표하였다. 한편, 대기압에서 수직 평판을 이용한 연구는 Hunt 등<sup>(2)</sup>, Ginzburg<sup>(3)</sup>, Gubanova 등<sup>(4)</sup> 그리고 Kalghatgi 등<sup>(5)</sup>에 의해 이루어졌으며 Gubanova 등은 판 충격파(plate shock) 하부 중심영역에서 재 순환하는 stagnation bubble에 주로 관심을 두었다.

경사 평판에서의 충돌제트에 대한 연구는 수직 평판에 대한 연구에 비해 미약하나 Henderson<sup>(6)</sup>, Snedeker 등<sup>(7)</sup> 그리고 Lamont 등<sup>(1)</sup>에 의해 이루어졌다. Henderson은 출구 마하수 1.8, 2.01, 2.14

의 균일한 제트를 이용해 평판의 경사각을 20° ~ 90° 범위에서 실험했지만 압력공 간격을 너무 넓게 설치하여 압력분포에서 정확한 결과를 얻지 못했다. Snedeker 등<sup>(7)</sup>은 과소 팽창비 1.42와 3.57에서 작동되는 Sonic Orifice를 사용하여 평판의 경사각 15° ~ 90°에서 연구를 하였다. 대부분의 충돌제트에 관한 데이터들은 대칭축에서의 표면압력분포와 수직 평판에 대한 쉬리렌 사진들이었다. 이들의 주요 관심은 난류혼합에 있었으며 자유제트에서의 난류와 평균속도에 대한 연구를 하였다. 그러나 이들은 난류혼합보다 충격파 구조가 지배적 영향력을 가지는 near jet에서는 만족할 만한 결과를 얻지 못했다. Lamont 등<sup>(1)</sup>은 출구 마하수 2.2의 초음속 노즐을 이용해 과소 팽창비를 1.2, 2로 변화시키고 경사각 30° ~ 90°에서 노즐과 평판사이의 거리 변화에 따른 다양한 충격파 구조를 확인하였고, 평판에서의 최대 압력이 존재하는 영역을 규명하였다.

본 연구에서는 초음속 유동 모사를 위해 제작한 초음속 유동시험장치를 이용해 출구 마하수 2, 축소-확대형 초음속 노즐을 통해 과소 팽창된 제트가 과소 팽창비 1.2, 1.5, 1.7, 경사각 50° ~ 90° 범위에서 노즐과 평판 사이의 거리 변화에 따라 평판에 충돌할 때 형성되는 표면압력분포 및 쉬리렌 장치를 이용한 유동특성에 대해 연구를 수행하였다.

## 2. 이론 고찰

수직 평판에 과소 팽창제트가 충돌할 때 형성되는 충격파 구조는 판 충격파(Plate shock), 배럴 충격파(Barrel shock), 반사 충격파(Reflected shock) 등 비교적 단순한 구조를 하고 있다.<sup>(8)</sup> 이와 달리 경사 평판에서는 매우 복잡한 유동구조를 이룬다.

Fig. 1은 경사 평판에서의 충격파 구조의 개략도를 나타낸 것으로 판 충격파는 중간 3중점에 의해 상부 판 충격파, 하부 판 충격파로 나누어지며, 반사 충격파 또한 상부 반사 충격파, 중간 반사 충격파,

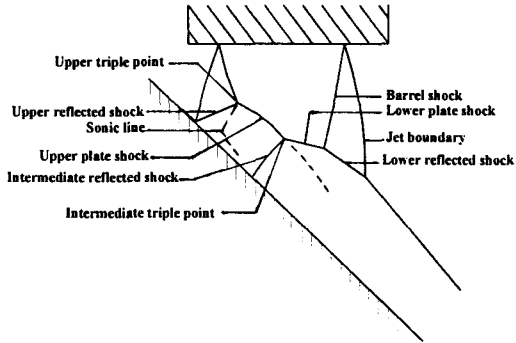


Fig. 1 Shock structure on Inclined plate

하부 반사 충격파 등과 같이 다수의 충격파를 이루며 이는 평판에서의 압력분포에 있어 상당한 영향을 준다.

3. 실험 장치 및 방법

경사 평판에 충돌하는 초음속 과소 팽창제트의 유동 모사를 위해 초음속 유동시험장치를 이용하였다.

Fig. 2는 압축기, 건조기, 고압용기, 레귤레이터, 저압 챔버 그리고 노즐 등으로 구성되어 있는 초음속 유동시험장치의 개략도를 보인 것이며 저압챔버와 충돌평판의 사진을 Fig. 3에 나타내었다.<sup>(8)</sup>

노즐출구에서 PR 1.2, 1.5, 1.7을 얻기 위해 저압 챔버의 압력을 각각 138psi, 172psi, 195psi로 변화시켰다. 평판의 경사각은 50°~90° 범위에서 10° 간격으로, 노즐과 평판과의 거리는 평판이 노즐출구 내경의 3배가 되는 위치까지 변화시켰다. 또한 노즐과 평판사이에서의 유동가시화를 위해 슈리렌 장치를 이용해 사도우그래프 이미지를 얻었다. 평판에서의 압력을 측정하기 위해 직경 400mm의 스테인레스 원판중심으로부터 반경방향으로 직경 1mm의 홀을 10mm 간격으로 3개를 설치하였으며, 이송장치를 이용하여 평판을 1mm 간격으로 이송하며 반복 실험하였다. 충돌평판의 압력 공 및 저압챔버에는 정압센서(SENSOTEC LJS)를 설치하고 센서에서 출력된 신호는 A/D 변환기(Iotech, Wavebook/516)를 통해, PC에서 데이터를 획득하였다.

Fig. 4는 본 실험에서 사용한 노즐과 평판사이의 좌표계를 나타낸 것이며 평판에서 압력측정 범위는

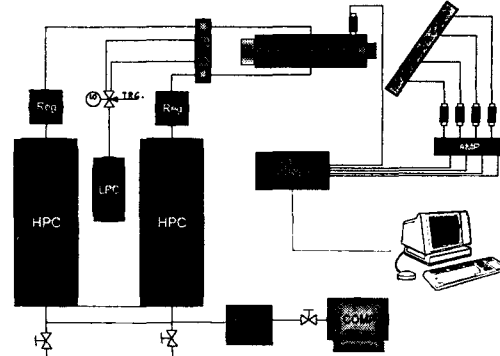
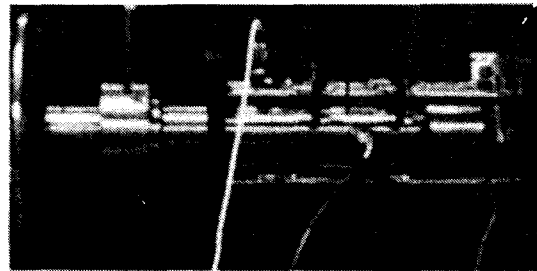


Fig. 2 Schematic diagram of supersonic cold flow system



1. Flat plate
2. Supersonic nozzle
3. Pressure transducer
4. Low-pressure chamber
5. Loadcell

Fig. 3 Photograph of supersonic cold flow system

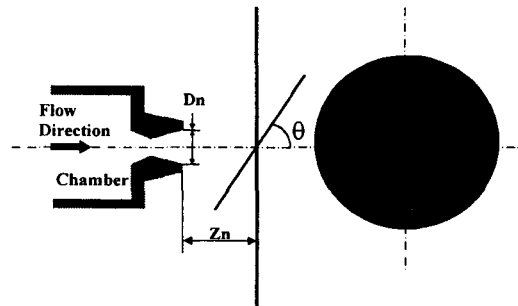


Fig. 4 Schematic diagram of coordinate system

평판중심으로부터 반경방향으로 노즐출구반경의 4.5배가 되는 거리까지 평판을 이송시키면서 측정하였다.

4. 실험 결과 및 고찰

PR의 변화에 따라 평판을 자유제트의 두 번째 충격파 셀 내에 위치하는 노즐과 평판과의 거리  $Z_n = 1 \sim 3D_n$ 의 범위에서 위치를 변화하며 시험하였다.<sup>(8)</sup>

Fig. 5는 PR 1.2  $\theta = 60^\circ$ 일 때 거리에 따른 압력분포와 샤도우그래프를 나타내었다. 평판 중심으로부터 반경방향의 거리는 노즐출구 반경으로, 평판 표면에서의 압력은 저압 챔버의 압력으로 무차원화하여 도시하였다.

평판 중심부에서의 압력은  $Z_n = 3D_n$ 일 때  $P/P_c \approx 0.61$ 의 가장 큰 값을 보인 것은 샤도우그래프에서 평판이 자유제트의 두 번째 충격파 셀 내에 위치한 경우로서 평판 상부에 판 충격파가 형성되었

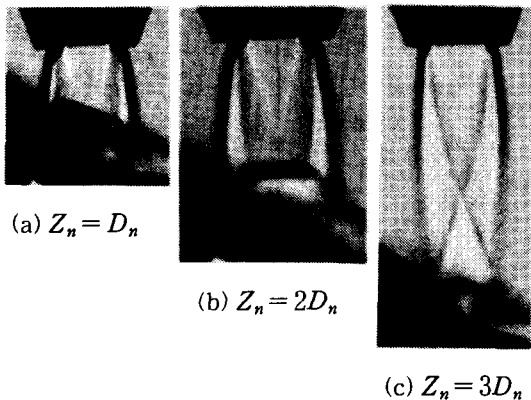
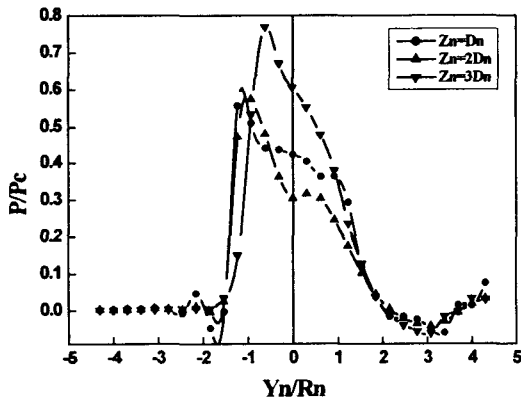


Fig. 5 Surface pressure distributions and Shadowgraphs (PR 1.2,  $\theta = 60^\circ$ )

고 상대적으로 평판의 중심과 판 충격파와의 높이차이가 큰  $Z_n = D_n, 2D_n$ 에서 보다 중심부에서 큰 압력을 나타낸다. 각각의 거리에 대해 최대 압력값은 대체적으로 노즐출구의 끝단과 같은 위치에서 발생하며 이는 샤도우그래프에서 제트경계와 반사 충격파가 교차하는 지점과 잘 일치한다.

Fig. 6은 PR 1.7,  $\theta = 60^\circ$ 일 때 거리에 따른 압력분포와 샤도우그래프를 나타낸다. 이와 같은 파소 팽창비에서는 평판이 모두 자유제트의 첫 번째 충격파 셀 내에 위치하고 있다. 노즐출구로부터 평판이 멀어지면서 유동 마하수는 증가하여 전 압력 손실도 증가하고 평판의 중심부에서 압력도 감소하여  $Z_n = D_n$ 일 때 평판 중심부에서  $P/P_c \approx 0.43$ 의 최대값을 보이고  $Z_n = 3D_n$ 일 때  $P/P_c \approx 0.17$ 로 가장 작은 값을 나타낸다. PR 1.2일 때와 달리 평판 중

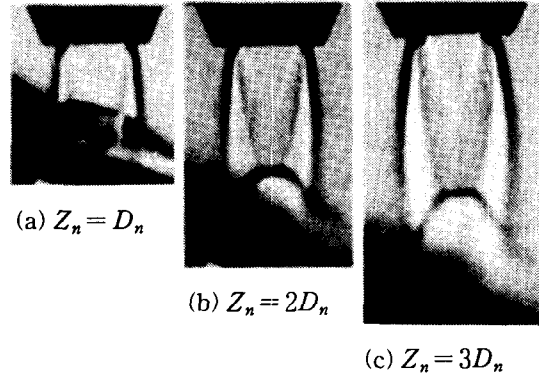
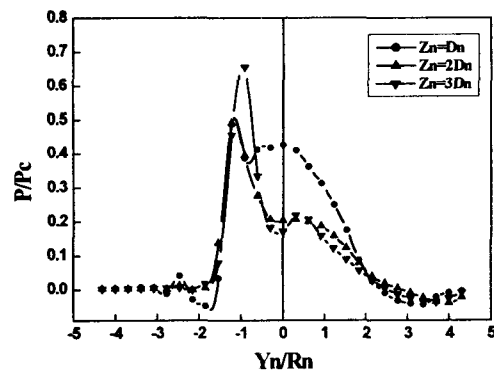
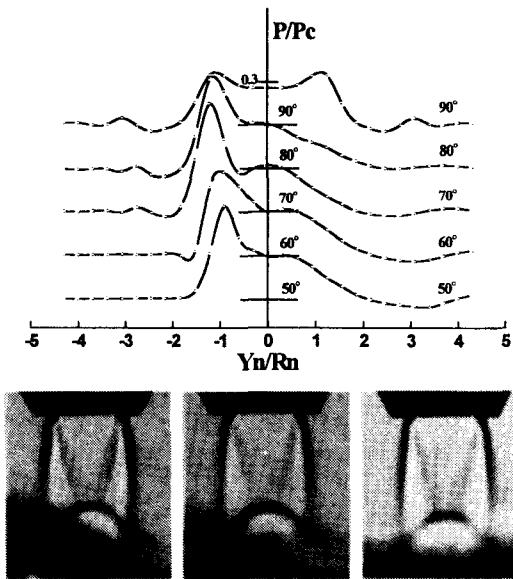


Fig. 6 Surface pressure distributions and Shadowgraphs (PR 1.7,  $\theta = 60^\circ$ )

심과 판 충격파와의 높이 차이가 가장 큰 경우는  $Z_n = 3D_n$ 이다. 한편,  $Z_n = 3D_n$ 의 경우 최대 압력값은  $Y_n/R_n \approx -1.23$ 에서  $P/P_c \approx 0.66$ 인데 이것은 정체점이 형성된 것으로 고찰된다. Sub-tail plate shock이 발생하는데 사도우그래프에서는 어렵게 나타나 볼 수 없지만 이 영역에서 제트경계와 난류를 발생시키고 파의 구조를 흐트러뜨리는 상부 3중점의 전단층 때문에 Sub-tail plate shock을 얻기는 힘들다.

Fig. 7은 PR 1.2  $Z_n = 2D_n$ 일 때 각각의 경사각에 대한 압력분포 및 사도우그래프를 나타낸 것이다. 90°일 때 배렬 충격파와 판 충격파가 간섭을 일으켜 판 충격파와 평판 사이에 형성되는 공기막의 내부에 재 순환영역이 발달하게 되어 최대압력이 평판의 중심이 아닌 주변에서 나타나 버블이 발생된 경우로서 버블은 판의 중심부에서 압력의 저하를 초래한다. 50°~80°에서의 압력분포는 서로 유사하게 나타나고 있으며 버블은 나타나지 않은 것으로 보이는데 Lamont 등<sup>(1)</sup>에 의하면 85°이하에서는 버블이 발생되지 않는 것으로 보고되고 있다. 최대 압력값

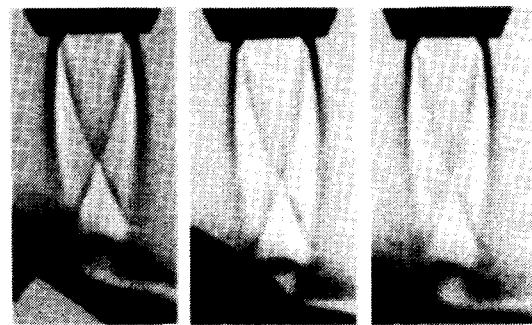
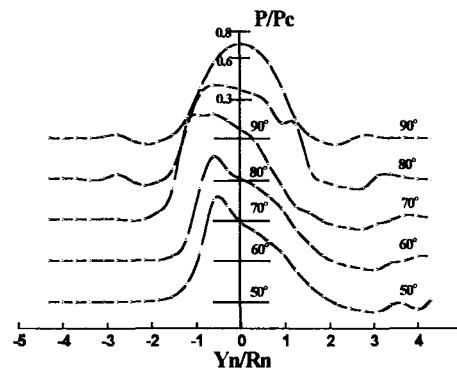


(a)  $\theta = 60^\circ$  (b)  $\theta = 70^\circ$  (c)  $\theta = 90^\circ$   
 Fig. 7 Surface pressure distributions and Shadowgraphs (PR 1.2,  $Z_n = 2D_n$ )

은 경사각 70°일 때  $Y_n/R_n = -1.23$ 에서  $P/P_c \approx 0.74$ 의 값을 갖는다.

Fig. 8은 평판이 자유제트의 두 번째 충격파 셀 내에 위치한 경우로서 90°일 때 평판이 판 충격파 바로 밑에 위치했기 때문에 평판 중심부 압력이  $P/P_c \approx 0.7$ 까지 나타나고 있다. 경사각 50°~80°의 경우도 PR 1.2,  $Z_n = D_n, 2D_n$ 일 때에는 달리 중심부에서 압력은 대체적으로 큰 값을 나타내고 있다. 이는 사도우그래프에서 볼 수 있는 것처럼 평판으로부터 판 충격파까지의 높이가 PR 1.2,  $Z_n = D_n, 2D_n$ 일 때 보다는 낮기 때문에 더 큰 압력값을 지닌다. 또한 각각의 경우 최대 압력값을 갖는 위치도  $Z_n = D_n, 2D_n$ 에 비해 제트의 축에 훨씬 가까이에서 나타나고 있다.

Fig. 9는 평판이 첫 번째 충격파 셀 내에 위치한 경우이며 이 과소 팽창비에서는 마하 디스크(Mach

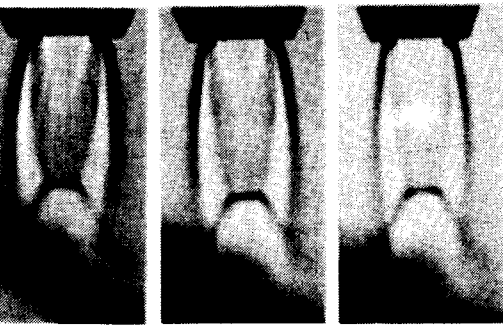
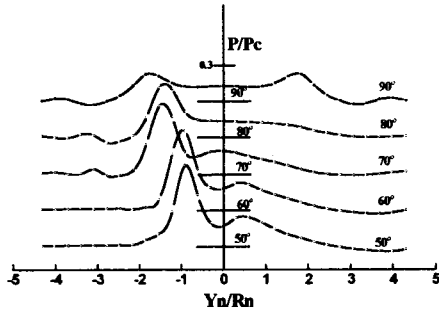


(a)  $\theta = 50^\circ$  (b)  $\theta = 60^\circ$  (c)  $\theta = 70^\circ$   
 Fig. 8 Surface pressure distributions and Shadowgraphs (PR 1.2,  $Z_n = 3D_n$ )

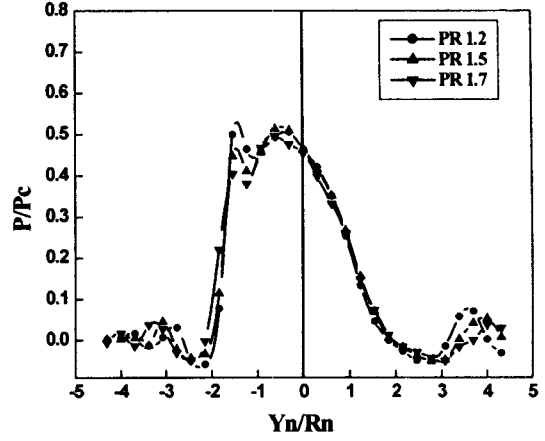
disk) 후류에 평판이 존재하며 후류의 유동은 아음속이다. 따라서 마하 디스크와 관련된 반사 충격파가 평판 상부에 존재를 하며 판 충격파를 이루게 된다. 90°일 경우 PR 1.2  $Z_n=2D_n$ 일 경우 마하 디스크 끝단에서 형성된 전단층에 의해 발생된 버블 때문에 최대 압력값은 제트축에서부터  $Y_n/R_n=1.85$  떨어져 나타내고 있다. 50°~80°의 경우 역시 PR 1.2, 1.5 경우보다 축에서 멀리 떨어져 최대 압력값을 가진다. 평판에서의 최대 압력값은 50°일 때  $Y_n/R_n \approx -0.92$ 에서  $P/P_c \approx 0.67$ 을 나타낸다.

Fig. 10은 PR에 따른 거리 및 각도별로 평판에서의 압력분포를 도시한 것으로 자유제트의 첫 번째 충격파 셀 내에 위치한 경우이다. 각각의 PR에 대해 압력분포는 유사하며 재 압축파의 위치가 약간씩 다르다. 이는 PR이 증가를 하면서 배럴 충격파의 직경이 커지기 때문에 조금씩 위치가 다르게 나타난다.

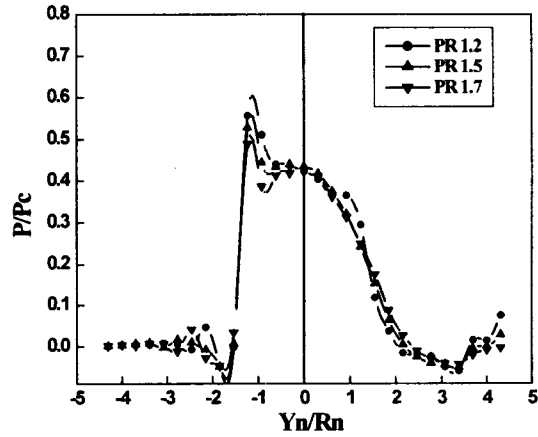
Table. 1은 지금까지의 결과들을 종합해 평판에



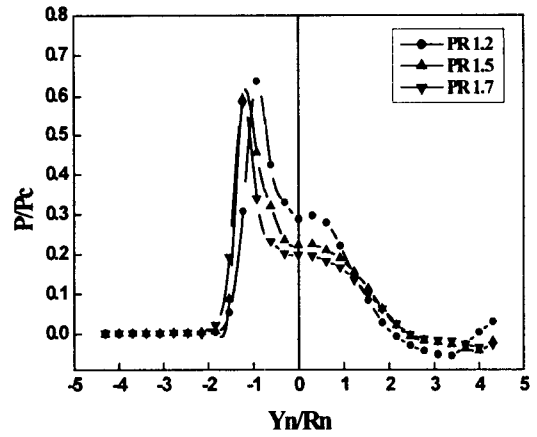
(a)  $\theta=50^\circ$  (b)  $\theta=60^\circ$  (c)  $\theta=70^\circ$   
 Fig. 9 Surface pressure distributions and Shadowgraphs (PR 1.7,  $Z_n=3D_n$ )



(a)  $\theta=70^\circ$ ,  $Z_n=D_n$



(b)  $\theta=60^\circ$ ,  $Z_n=D_n$



(c)  $\theta=50^\circ$ ,  $Z_n=2D_n$

Fig. 10 Surface pressure distributions as to PR

Table. 1 The maximum pressure

PR	Zn/Dn	$\theta$ (deg)	Yn/Rn	P/Pc
1.2	1	60	-1.23	0.56
	2	70	-1.23	0.74
	3	70	-0.62	0.78
1.5	1	60	-1.23	0.53
	2	50	-1.23	0.59
	3	80	-0.62	0.74
1.7	1	80	-0.31	0.52
	2	70	-1.54	0.58
	3	50	-0.92	0.67

서의 최대압력 분포를 과소 팽창비, 거리, 경사각에 대해 나타낸 것으로 평판이 자유제트의 두 번째 충격파 셀 내에 위치하는 경우 대체적으로 충격파를 통한 압력회복으로 인해 큰 압력값을 나타낸다. 본 연구에서 평판에서의 최대 압력값을 갖는 경우는 PR 1.2  $Z_n = 3D_n$ ,  $\theta = 70^\circ$ 일 경우  $Y_n/R_n \approx -0.62$ 에서 저압 챔버 압력의 약 78%까지 얻을 수 있었다.

## 5. 결 론

출구 마하수 2의 노즐로부터 초음속제트가 경사 평판에 충돌할 때 과소 팽창비, 노즐과 평판과의 거리 및 경사각 변화에 대한 유동구조를 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 버블은 배럴 충격파와 판 충격파 간 섭에 의한 평판 상부에 높은 전 압력의 재 순환 공기막이 형성되어 발생하며 경사각  $80^\circ$  이하에서는 발생하지 않는다.
2. 수직 평판에서 보다 경사 평판에서 압력이 큰 값을 나타내는 것은 여러 충격파들의 영향으로 발생하는 압력회복 때문이다.
3. 경사각 변화에 따라 자유제트의 첫 번째 충격파 셀 내에 평판이 위치해 있을 때 과소 팽창비에

대한 표면 압력분포는 서로 유사한 경향을 보여 과소 팽창비는 평판에서의 표면압력분포에 큰 영향을 주지 않는다.

## 후 기

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

## 참 고 문 헌

1. P. J. Lamont and B. L. Hunt, 1980, "The Impingement of Underexpanded Axisymmetric Jets on Perpendicular and Inclined Flat Plate," J. Fluid Mech., Vol. 100, No. 3, pp. 471~511.
2. J. H. Gummer and B. L. Hunt, 1971, "The Impingement of a Uniform, Axisymmetric, Supersonic Jet on a Perpendicular Flat Plate," Aeronautical Quarterly, Vol 12, pp. 403~420.
3. I. P. Ginzburg, B. G. Semiletchenko, V. S. Terpigor'ev, and V. N. Uskov, 1973, "Some Singularities of Supersonic Underexpanded Jet Interaction with a Plane Obstacle," J. Eng. Physics, Vol. 19, pp. 1081~1084.
4. O. I. Gubanov, V. V. Lunev, L. N. Plastinina, 1973, "The Central Breakaway Zone with Interaction between a Supersonic Underexpanded Jet and a Barrier," Fluid Dynamics, Vol. 6, pp. 298~301
5. G. T. Kalghatgi and B. L. Hunt, 1976, "The Occurrence of Stagnation Bubble in Supersonic Jet Impingement Flows," Aeronautical Quarterly, Vol. 27, pp.169 ~ 185.

6. L. F. Henderson, 1966, "Experiments on the impingement of a supersonic jet on a flat plate", *Angew, Math and Physics*, Vol. 17, pp. 553.
7. Coleman Dup. Donaldson and Richard S. Snedeker, 1971, "A Study of Free Jet Impingement. Part 1. Mean Properties of Free and Impinging Jets," *J. Fluid Mech.*, Vol. 45, part 2, pp. 281~319.
8. 이택상, 신완순, 이정민, 박종호, 김윤곤, 1999, "평판 위에 충돌하는 초음속 과소팽창 제트에 관한 실험적 연구," *한국추진공학회지* 제3권 3호, pp.53~61.
9. 박종호, 신필권, 신완순, 이택상, 김윤곤, 1998, "초음속 충돌제트의 유동 특성에 대한 실험적 연구," *한국추진공학회지* 제2권 3호, pp. 10~19.
10. A. M. Al-Qutub and M. O. Budair, 1995, "Experiments on the Flow over a Flat Surface Impinged by a Supersonic Jet," *AIAA 95-2935*, July 10-12.