초음속 충돌제트의 유동특성에 대한 실험적 연구

신필권* · 신완순* · 이택상* · 박종호* · 김윤곤**

An Experimental Study on Flow Characteristics of a Supersonic Impinging Jet

P. K. Shin* · Y. S. Shin* · T. S. Lee* · J. H. Park* and Y. G. Kim**

ABSTRACT

When an under-expanded supersonic jet impinges on an inclined flat surface, a complex flow structure is established due to the intersection between the flat surface and the shock system of the free jet. This study reports on an experimental results of flows due to under-expanded axisymmetric sonic jets impinging on flat plate. Plate inclination from 60° ~ 90° were investigated by means of detailed measurements of the surface pressure and schlieren photograph and surface flow visualization.

The schlieren photograph are consistent with the pressure distribution and the surface flow visualization pictures are clearly related to the pressure distributions. The maximum wall pressure is found to be large on the inclined plate than on the perpendicular plate.

초 록

초음속 부족팽창제트가 충돌할 때 유동장은 매우 복잡한 유동구조를 나타낸다. 본 연구에서는 음속노즐 출구 직경의 1.5배 거리에 경사각 60° ~90° 로 설치된 평판에 미치는 초음속 제트에 대해 쉴릴렌 장치를 이용하여 유동구조를 가시화 하였으며, 평판 위에 작용하는 압력분포를 측정하였고 감열지를 이용하여 평판 표면 유동을 가시화하여 기존의 연구결과와 비교하였다. 연구결과 간단한 방법으로 저마하수에서의 평판 유동을 가시화 할 수 있는 방법을 제시하고 충돌제트의 유동구조를 규명하였다.

*충남대학교 기계공학과(Chungnam National University, Dept. of Mechanical Eng.)
**국방과학연구소(Agency for Defense Development)

1. 서 론

평판에 충돌하는 초음속 제트에 관한 연구는 수직/단거리 이착륙기의 발진, 미사일 발사시스템, 다단계 로켓 분리 등 실제적인 분야에 응용되고 있으며[1], 고속 냉각 및 화염에 의한 가열과 관련된 산업분야에서도 관련장비의 설계에 활용되고 있다.[2~3] 초음속 부족팽창(under-expansion)제트가 평판에 충돌할 때 barrel shock, exhaust gas boundary, Mach disk, reflected shock, plate shock, stagnation bubble 등이 발생하게 되며, 유동장은 매우 복잡한 형태로 된다.

충돌제트에 대한 연구는 Vick 등[4]에 의하여 초음속 부족팽창제트가 평판에 충돌하는 경우에 대하여 압력분포를 측정하였다. 그들은 높은 부족팽창을 얻기 위해 진공실를 이용하여 배압을 53Pa 까지 낮추어 실험하였다. Henderson[5]은 20°~90°의 경사판을 이용하여, 제트 마하수를 1.8, 2.01, 2.14로 변화시켜 경사판상의 유동장을 조사하였다. 이와 유사한 연구로 Donaldson 등[6]은 15°~90°의 각도에서 평판과 노즐사이의 거리변화에 따른 평판의 압력분포를 고찰하였다. Lamont 등[7]은 30°~90° 범위에서 부족팽창제트의 압력비 및 평판과 노즐사이의 거리를 변화시키며 평판표면의 압력분포를 측정하였으며, shadow-graph를 이용하여 stagnation bubble, plate shock의 위치 등을 규명하였으며, 수직력(F_P) 및 수직력 계수(C_F)는 노즐과 평판사이의 거리에 독립적이라는 것을 밝혔다.

본 연구에서는 음속노즐을 통해 부족 팽창하는 제트가 경사평판에 충돌할 때 유동특성을 조사하여 기존의 연구결과와 비교하고, 비교적 간단한 방법인 감열지를 이용하여 저 마하수에서 평판 표면 유동을 가시화 할 수 있는 방법을 제시하고자 한다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험장치

본 연구에서는 경사 평판상에 충돌하는 음속 부족팽창제트를 얻기 위해 충격파 터널을 사용하였다. 충격파 터널은 이중 분리막, 단면수축형으로 저압관 출구에 노즐을 부착한 것으로 입사 충격파 뒤의 가스를 이용할 수 있고, 부족팽창 제트의 구동압력으로 입사충격파가 저압관 끝벽에서 반사되어 형성되는 고온 고압의 가스를 노즐에서 가속시켜 이용할 수도 있는 장치로 개략도는 Fig. 1과 같다. 구동가

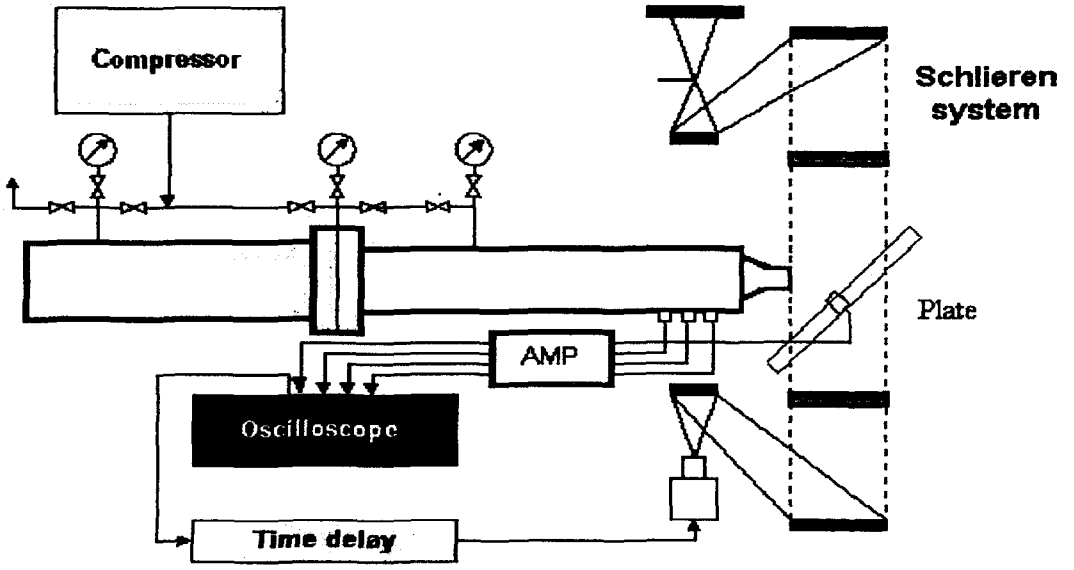


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus

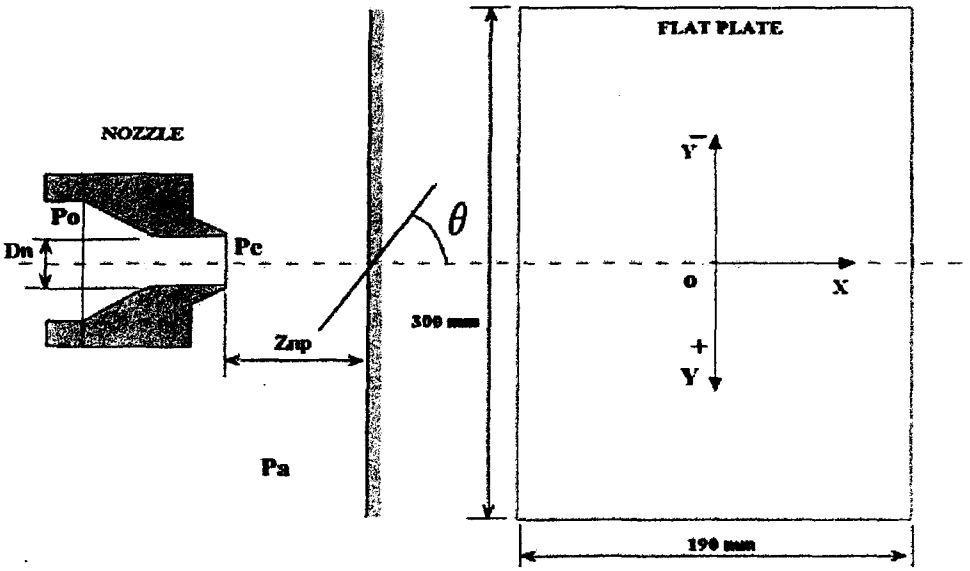


Fig. 2. Experimental arrangement and flat plate axis

스와 시험 가스는 모두 공기를 사용하였으며, 고압관과 저압관 사이에 2중 분리막을 설치하였다. 분리막으로는 0.35mm의 셀로판 필름을 사용하였다. 고압관은 내경 80mm, 길이 2m로 200기압까지 가압할 수 있으며, 저압관은 내경 68mm 길이, 4m로 경계층의 영향을 최소화하기 위하여 내부표면은 호닝가공을 하였다. 충격파의 속도와 압력은 저압관 끝단으로 부터 150mm, 250mm, 350mm에 설치한 센서(PCB 112A)에 의해 측정되며 시간지연회로(time delay)는 1 μsec~99msec의 범위의 시간만큼 지연되며, 1~5V의 전압에서 작동한다.

저압관 끝에 부착한 음속 노즐의 목, 출구(D_n)직경은 10 mm이며 노즐 내면은 매끄럽게 가공되었다. 음속노즐을 이용할 경우 노즐입구와 배압의 비(P_o/P_a)가 1.83 이상이면 부족팽창하는 제트를 얻을 수 있다.

Fig. 2는 실험에 사용된 노즐과 평판의 평판 좌표를 나타낸 것이다. 여기서 P_o는 노즐입구의 압력, P_e는 노즐 출구압력, P_a는 배압으로 대기압(1atm) 상태이다.

충돌 평판은 두께 10mm, 폭 190mm, 길이 300mm며, 평판의 경사각 θ는 나사의 체결에 의해 고정되고, 노즐출구와 경사평판 중심까지의 거리(Z_{np})와 X 및 Y방향으로 이동이 가능하도록 설계하였다. 충돌 평판에는 1개의 압력센서(PCB 105B22)를 설치하여 평판을 이동시키면서 압력을 측정하였다.

충돌제트 유동장과 경사평판상의 유동장 가시화에는 쉴리렌 장치와 감열지를 이용하였다.

2.2 실험 방법

충격파 터널의 고압부에 1000kPa 까지의 공기를 충전한 후 분리막을 순간적으로 파열시키면 노즐을 통해 고온 고압의 공기가 대기중에 분사되며, 이때 노즐 입구와 출구의 배압비(P_o/P_a)는 6.16, 부족팽창비(underexpansion ratio) (P_e/P_a)는 3.25이다. 정상상태의 시험시간을 측정하기 위해 노즐 출구에서의 압력신호를 측정한 결과 Fig. 3과 같이 정상상태 유지시간이 0.27~1.05sec로, 약 0.78sec 동안 정상유동이 지속됨을 알 수 있다. 따라서 유동 지연시간을 0.27~1.05sec의 범위 내에서 조정해 가며 시험하였다.

평판은 노즐 출구직경(D_n)의 1.5배 거리에 설치하였고, 평판에 압력센서를 설치한 후 노즐 출구중

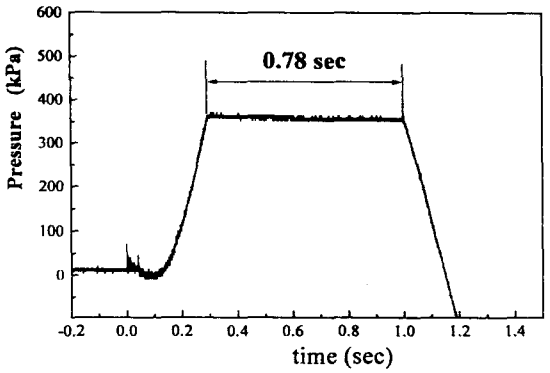


Fig. 3. Pressure distribution according to operating time

심의 수직(Y), 수평(X) 방향으로 2mm씩 평판을 이동하며 압력을 측정하였다. 평판의 경사각은 60° ~90°까지 10° 간격으로 변화시켰으며 각각의 경사각에서 감열지를 이용하여 표면 온도분포를 가시화하고, 쉴릴렌 장치를 이용해 유동장 사진을 얻었다. 종래의 표면유동 가시화는 파라핀 유에 파우더를 알맞은 점도로 섞은 후 이를 평판에 분무하는 방법을 주로 사용해왔다. 이 방법은 비교적 긴 시간(30~60 sec)동안 정상유동이 이루어질 때, 충돌제트의 유동형태나 방향을 자세히 얻을 수 있으나 충돌제트의 압력 및 거리에 따라 알맞은 점도와 두께로 분무하여야 하고 평판에 작용하는 압력의 영향을 감지할 수 없는 단점이 있다.[8~9] 평판표면의 유동가시화는 충돌제트현상의 해석에 많은 도움을 주므로 본 연구에서는 정상유동 시간이 0.73sec로 짧아 압력변화에 따라 발생하는 온도에 감응하는 감열지를 사용하였다. 감열지를 사용한 가시화는 간단한 설치로 쉽게 가시화 결과를 얻을 수 있으나 종이의 열적 민감성이나 강도가 가시화 결과에 크게 영향을 미치며 유동방향이나 형태를 정확히 예측하기가 어려운 단점이 있다.

표면유동의 가시화 결과는 표면 압력 측정점 사이의 거리를 결정하기 위한 지침으로 사용되었다. 표면 유동가시화 결과 동심원사이의 거리가 좁거나 명암이 갑자기 변하는 영역에서는 측정점 사이의 간격을 1mm로 하였으며, 그 외 영역에서는 2mm 씩 평판을 이동시켰다.

3. 연구결과 및 고찰

Fig. 4는 평판과 노즐사이의 거리를 충분히 두고 얻은 자유제트의 쉴리렌 사진이다. 본 실험과 동일한 음속노즐을 사용한 신[10]의 노즐 후류 유동에 대한 실험에서 부족팽창하는 plume의 형상은 음속노즐이 초음속 노즐에서보다 3%오차 이내로 계산치에 더 잘 일치하는 것으로 나타났다. 사진에서 노즐로부터 두 번째 shock cell까지는 선명하게 나타나고 있으나 이 보다 더 하류에서는 난류 혼합으로 인해 희미하게 나타난다. 사진분석을 통해 부족 팽창비 $P_e/P_a=3.25$에서는 첫 번째 shock cell 내에 평판이 위치할 때 충격파 간섭을 명확히 관찰할 수 있을 것으로 생각되어 평판의 중심을 $Z_{np}/D_n=1.5$에 고정하였다.

Fig. 5는 각도변화에 따른 평판표면유동 가시화 결과와 표면압력 분포(P_{gage}/P_a)의 상관관계를 알아보기 위해 감열지 이미지의 일부분을 Y방향 압력구배와 실척으로 대응시킨 것으로 노즐출구로부터 $1.5D_n$거리에서 얻은 결과이다. 감열지 이미지의 명암에 따라 다음과 같이 네 부분으로 나누었다. a-a′영역은 제트의 중심영역으로 가장 긴 시간(4~5sec)동안 고온의 제트에 노출되므로 가장 검게 나타나있다. b-b′는 (a)의 b′를 제외하고 거의 원형 그대로인 영역이며 c-c′에서는 다시 짙은 영역이 나타난다. d-d′ 영역은 가장 외곽의 마지막 원이며, 이 보다 하류에서는 더 이상 동심원이 형성되지 않았다. 이러한 다수의 원은 재 압축 충격파에 의한

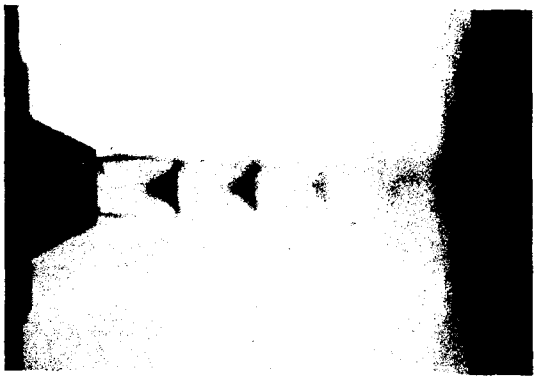


Fig. 4. Free jet (Pe/Pa = 3.25, Znp/Dn = 5)

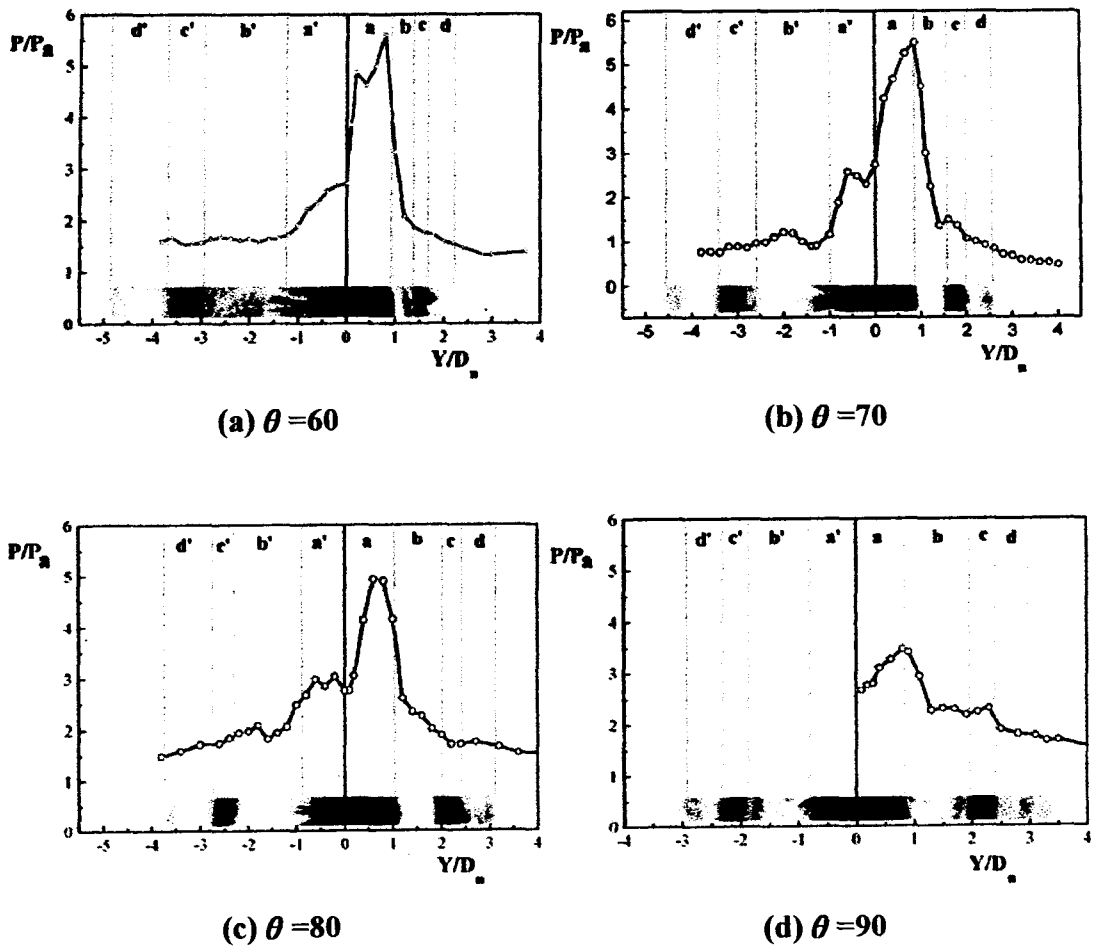


Fig. 5. Comparison of wall pressure distribution and surface flow patterns.(Pe/Pa = 3.25, Znp/Dn = 1.5)

것이며 기존의 오일을 이용한 표면유동 가시화에 의한 결과와 거의 유사한 결과를 나타냈다.

초음속 제트(M≤1.6)가 수직평판에 충돌할 때 벽면근처에서는 Fig. 6과 같은 유동이 형성된다.[11] 축대칭의 제트가 평판에 충돌할 때 중심부에 위로 볼록한 plate shock이 발생하며, plate shock 아래는 아음속 유동영역이다. shock layer 유체가 방사상으로 퍼져 나갈 때 속도가 증가하게 되고 jet edge 아래 영역에서 sonic line이 형성된다. 이 후 유체는 본래 초음속인 wall jet 영역으로 진입한다. 그러나 고체표면의 경계층과 wall jet의 상부 일정압력 상부 경계층과 고체 표면의 경계층을 따라 전단층이 성장하고 이러한 점성층은 서로 합쳐지고 wall jet에서의 속도를 아음속으로 감소시킨다.

고 점도의 오일을 혼합하여 표면유동을 가시화한 Carling 등[9]은 wall jet 영역에서 나타나는 연속적인 동심원이 중심부에서 방사상으로 유동이 있을 때 전단응력이 발생하고 이러한 전단응력과 점성력 그리고 연속적인 압축파와 팽창파로 인한 압력의 상승, 하강의 반복으로 인해 오일이 쌓여 형성되는 것으로 해석하고 있다.

감열지에 나타난 동심원은 wall jet 영역에서의 평판과 제트사이의 충격파 간섭으로 인한 열 유속이 주 원인이므로 wall jet에서의 재압축 충격파와 밀접한 관련이 있을 것으로 생각된다. Fig. 5의 전체적인 압력구배를 살펴보면 b-b'는 급강하 영역,

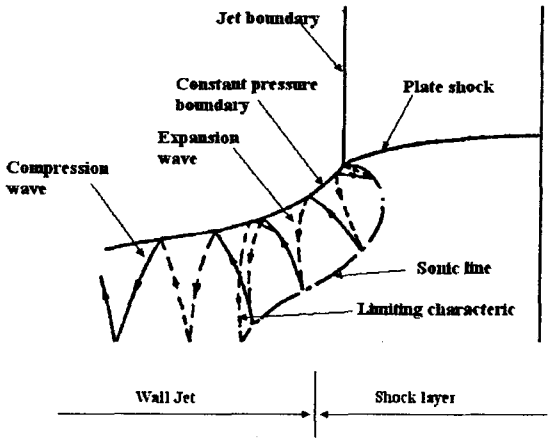


Fig. 6. The shock layer and transonic zone at low mach number(M≤1.6)

c-c'는 상승-하강 영역으로, c-c'의 경우는 오일이 방사상으로 밀려서 형성되는 링의 위치와 일치한다. 즉, 압력이 하강-상승하는 영역이나 그 부근에서 나타나고 있다.

부족 팽창비(P_e/P_a)를 4.29로 높였을 때는 동심원의 전체적인 크기가 커졌지만 갯수는 동일했으며 원의 경계가 더욱 확실하게 나타났다. 이로서 감열지에 의한 표면유동 가시화는 재압축 충격파에 의한 압력구배와 밀접한 연관성이 있음을 알 수 있다.

Fig. 8~11은 $Z_{nb}/D_n=1.5$, $P_e/P_a=3.25$ 조건에서 평판각도를 60°~90°범위에서 10° 간격으로 변화시키며 얻은 압력 분포와 표면유동 가시화 결과 및 쉴릴렌 사진을 비교하여 나타낸 것이다. 압력분포는 표면유동 가시화 이미지와 실척으로 대응시켰으며 압력크기는 대기압(P_a)으로 나누어 무차원화하여 나타내었다. 압력분포는 전체적인 압력구배를 고찰하기 위해 B-Spline 곡선으로 나타내었다.

평판을 유동방향과 수직($\theta=90°$)으로 충돌하였을 때 평판 중심부에 압력이 일정하게 유지되는 영역이 나타나는데 이것은 중심부에 stagnation bubble이 존재하는 것을 나타낸다. 이것은 free jet의 충격파와 plate shock이 간섭을 일으켜 높은 전 압력의 공기막을 형성해 나타나는 것으로 조사됐으며, 평판경계층의 박리를 일으키는 원인은 바로 이 막에 의한 것이다.[12] plate shock은 위로 볼록한 돔형을 이루고 있으며, 최대 압력은 $Y/D_n=0.8$에서 $P/Pa=3.47$로 나타났다. 하류에서 연속적인 요동이 나타나는데 이것은 전술한 바와 같이 벽면 제트와 제트 경계사이에서 팽창파와 압축파가 교대로 나타나기 때문이다

평판을 $\theta=80°$로 놓았을 때 평판의 압력분포가 $\theta=90°$일 때와는 상당히 바뀌었음을 볼 수 있다. 쉴릴렌 사진에는 90°일 때와 마찬가지로 위로 볼록한 돔형 충격파가 나타나고 있으나 중심부에서의 압력분포 결과에서는 stagnation bubble이 존재하지 않음을 알 수 있다. 최대 압력은 $Y/D_n=0.6$에서 $P/P_a=4.93$으로 90°일 때에 비해 급격히 증가하였으며 $Y/D_n=-0.6$에서 $P/P_a=2.98$로 두 번째 최대압력이 나타났다. 최대압력이 나타나는 지점은 upper triple point와 barrel shock의 교차점에서 시작되는 음속선(sonic line)이 sub-tail plat shock과 교차하는 지점 부근에서 형성되고 있다.

Fig. 7은 Fig. 9의 쉴리렌 사진에서 나타난 유동구조를 기초한 경사판에서의 충돌제트 개략도이다. tail shock 과 jet edge가 교차하는 점에서 생성된 여러 개의 팽창파가 사진에서는 점차 옅어지는 명암으로 나타나 있다. 이러한 다수의 팽창파는 마하수를 증가시켜 전압력 손실을 초래한다. 그러므로 압력구배가 최대 압력점 이후에서 급격하게 낮아지고 있다. X/D_n방향의 압력 크기는 Y/D_n방향에 비해 상당히 작음을 볼 수 있다.

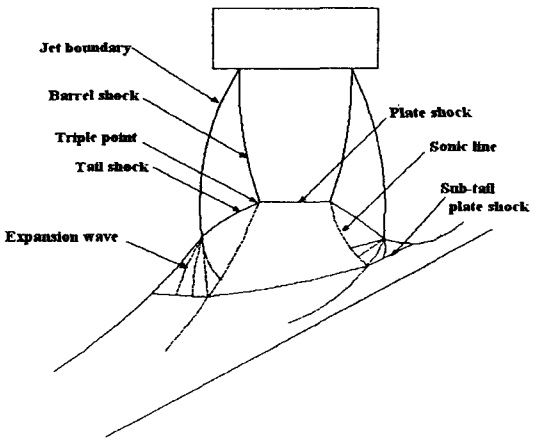


Fig. 7. Schematic of shock wave structure (sketch based on fig. 9)

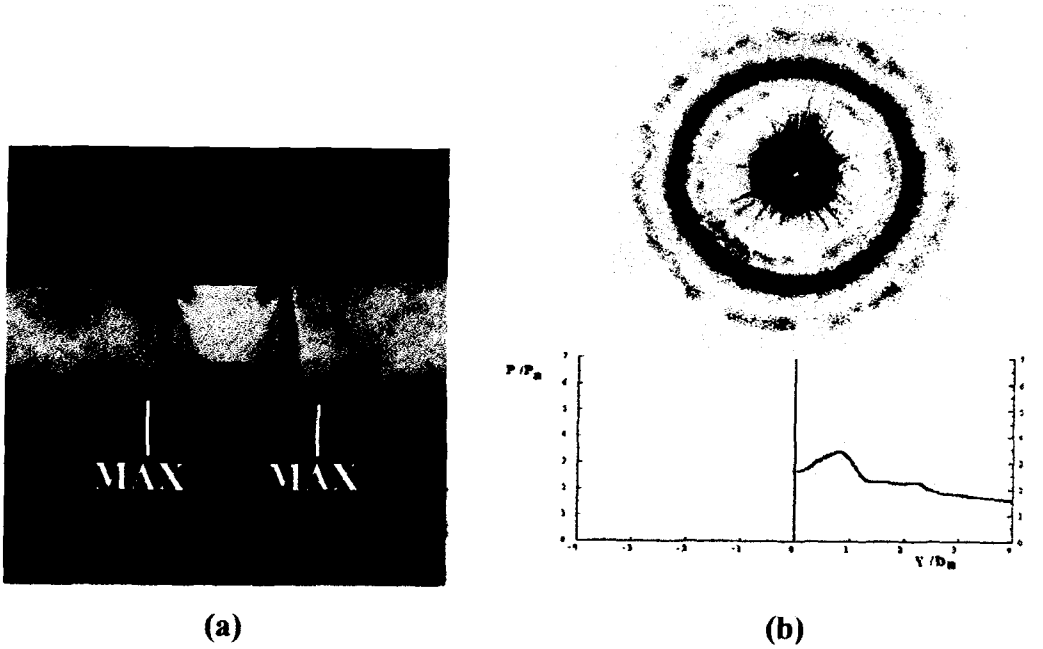


Fig 8. (a) Schlieren photograph, (b) Normalized pressure on the centerline of the impinging plate and surface flow visualization for θ =90°

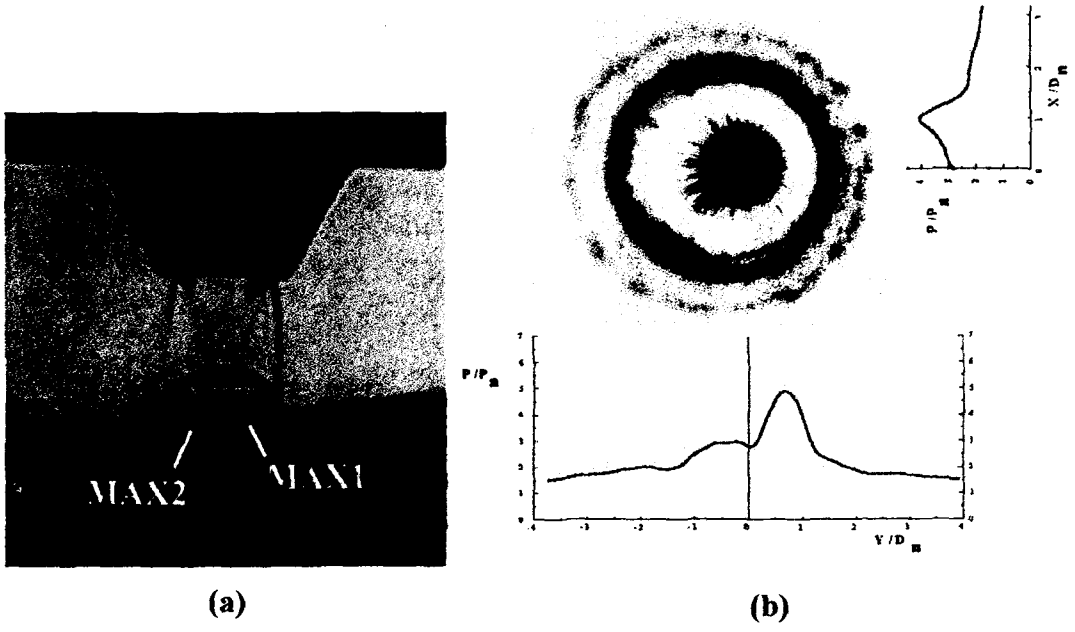


Fig 9. (a) Schlieren photograph, (b) Normalized pressure on the centerline of the impinging plate and surface flow visualization for θ = 80°

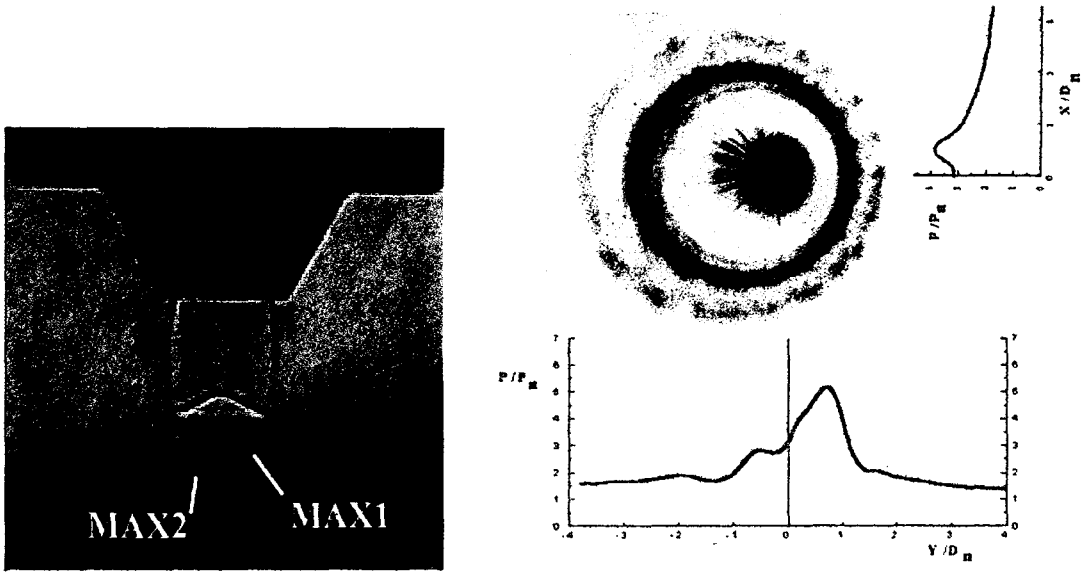


Fig 10. (a) Schlieren photograph, (b) Normalized pressure on the centerline of the impinging plate and surface flow visualization for θ =70°

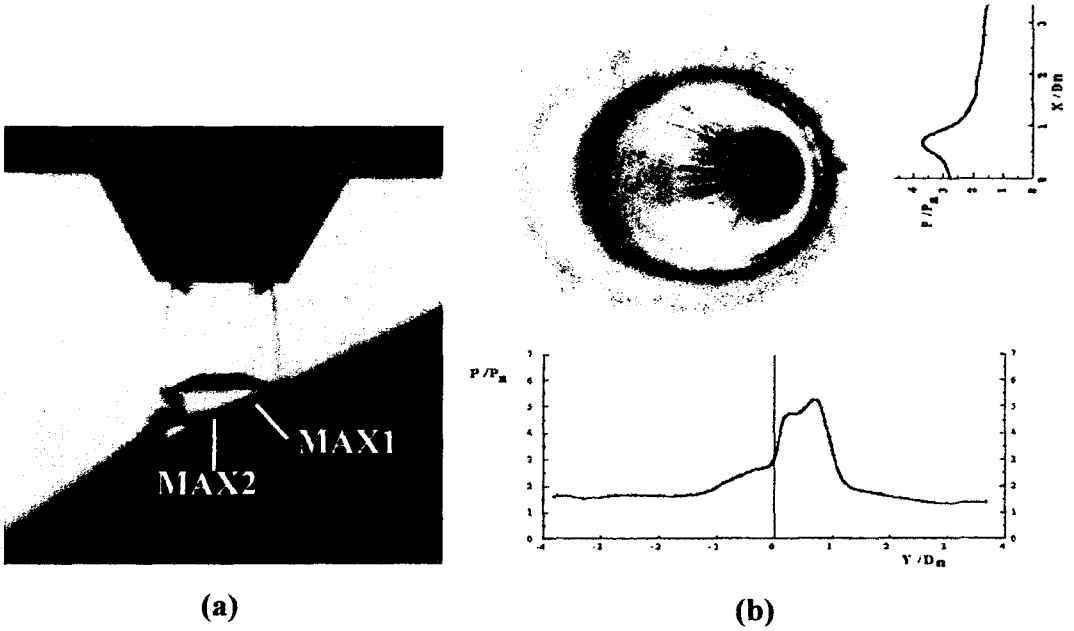
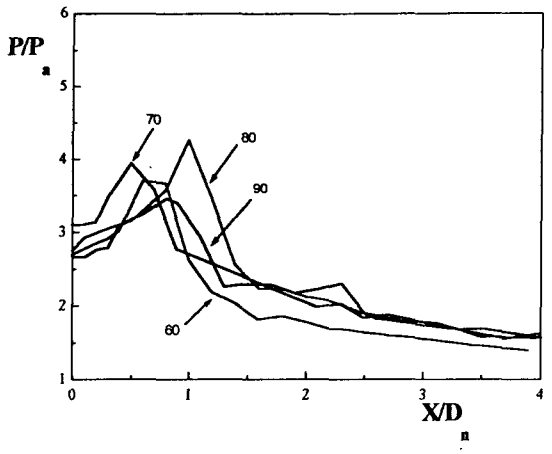


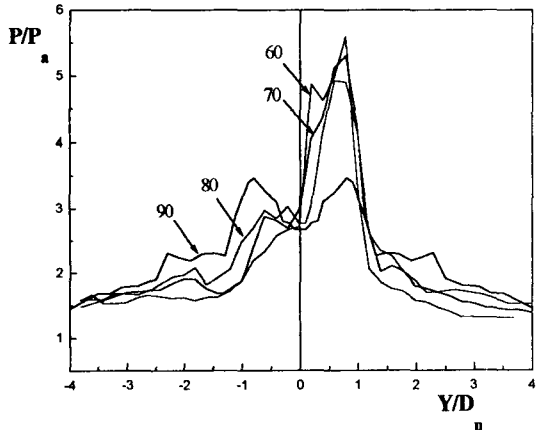
Fig 11. (a) Schlieren photograph, (b) Normalized pressure on the centerline of the impinging plate and surface flow visualization for θ = 60°

Table 1. Maximum pressure and its location on impinging plate

Plate inclination angle.deg	X/Dn		Y/Dn	
	P/Pc(max)	Location	P/Pc(max)	Location
90°	3.47	0.8	3.47	0.8
80°	4.27	1.0	4.93	0.6
70°	3.96	0.5	5.32	0.8
60°	3.72	0.6	5.61	0.8



(a)



(b)

Fig. 12. Normalized pressure distribution on the impinging plate (Znp/Dn=1.5, Pe/Pa=3.25)

평판을 $\theta=70°$로 놓았을 때 평판의 최대압력은 $Y/D_n=0.8$에서 $P/P_a=5.32$로 80° 일 때에 비해 약간 커졌고 위치는 동일하다. 두 번째 최고 압력점은 $Y/D_n=-0.6$에서 $P/P_a=2.876$로 약간 감소했다. X/D_n방향 압력 분포는 별다른 변화를 찾아 볼 수 없다.

평판을 $\theta=60°$로 놓았을 때 평판의 최대 압력은 $Y/D_n=0.8$에서 $P/P_a=5.61$로 약간 증가했고 특이한 것은 70°에서의 두 번째 최고 압력점이 $Y/D_n=0.2$에서 더 크게 발달한 것이다. 이 부분은 하부 중앙부에 길게 형성됐던 음속선의 중앙부분이 평판과 접촉되어 있는 지점으로 여기에서 새로운 tail shock 등의 형성에 그 원인이 있다고 생각되나 본 실험에서 얻은 쉴리렌 사진의 선명도로는 그 원인을 정확히 알 수 없다.

Table 1에 각각의 경사각에 대한 최대압력의 위치와 크기를 나타내었으며, Fig. 12에는 평판의 기울기를 $\theta=60°\sim90°$로 변화하였을 때 X, Y 방향 압력분포를 나타내었다. Fig. 12(a)는 평판의 중심으로부터 X방향의 압력변화를 X/D_n으로 나타낼 때 최대압력은 $X/D_n=0.6\sim1.0$사이에서 나타났으며 크기는 큰 변화가 없음을 알 수 있다. Fig. 12(b)는 평판의 중심으로부터 Y방향의 압력변화를 Y/D_n으로 나타낼 때 평판의 경사각이 작아질 수록 중심부에서의 최대압력은 커지고 두 번째 최대압력이 점점 발달함을 볼 수 있으며 하류에서의 압력분포는 반대로 작아짐을 알 수 있다.

4. 결 론

음속노즐 출구 중심축을 따라 $Z_{np}/D_n=1.5$에서 평판의 경사각 $\theta=60°\sim90°$로 설치된 평판에 미치는 초음속 충돌제트에 대하여 압력 분포를 측정하고, 쉴리렌 장치를 이용하여 유동장 구조를 가시화하였으며, 감열지를 이용하여 표면유동 가시화 이미지를 얻어 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 평판의 Y 방향 최대 압력은 90°에서 80°로 변할 때 42%의 급격한 증가를 나타냈고 80° 이하에

서는 5~8%의 미소한 증가를 보였다. X방향 압력 분포는 평판의 경사각에 관계없이 거의 일정한 경향을 나타냈다.

2. 평판이 수직일 때보다 경사졌을 때 최대압력이 크게 나타났는데 이는 upper triple point와 barrel shock의 교차점에서 시작되는 음속선이 sub-tail plat shock과의 교차점에서 생기는 충격파에 의한 영향 때문이다.
3. 충돌제트의 충격파 불안정성과 매우 밀접한 관련이 있는 것으로 알려진 stagnation bubble은 90°일 때 나타났다가 80° 이하에서는 나타나지 않았다.
4. 감열지에 나타나는 재압축 충격파에 의한 동심원은 기존의 오일을 이용하여 나타나는 동심원과 그 형성지점이 일치했다.

참 고 문 헌

1. Kemp, E. D. G., "Studies of Exhaust Gas Recirculation for VTOL Aircraft", AIAA No. 67~439
2. Sheriff, H. S., and Zumbrunnen, D. A., 1993, "Effect of Flow Pulsations on the Cooling Effectiveness of an Impinging Planar Water Jet," ASME, HTD, Vol. 249, 1993, pp.11~21
3. Love, J. G, and Ehresman, C. M., "Experimental Investigations of The Heat Transfer Characteristics of Impinging Jets", AIAA Paper 94-0262(A94-21054)
4. Vick, A. R., and Andrews, E. H. "An Experimental Investigation of Highly Under Expanded Free Jets Impinging upon a Parallel Flat Surface,", NASA TN D-2326, Washington, 1964
5. Henderson, L. F., "Experiment on the Impingement of a Supersonic Jet on a Flat plate," Angew, Math and Physics, Vol. 17, 1966, pp.553~568.
6. Donaldson, C. DuP, and Snedeker, R. S., "A Study of Free Jet Impingement. Part 1. Mean Property of Free and Impinging Jet," J. Fluid Mechanics, Vol.45. No.2, 1971, pp.281~319.
7. Lamont, P. J., and Hunt, B. L., "The Impingement of Underexpanded Axisymmetric Jets on Perpendicular and Inclined Flat Plates," Journal of Fluid Mechanics, Vol.100, 1980, pp.471~511.
8. Al-Qutub, A. M., and Budair, M. O., "Experiments on the Flows Over a Flat surface Impinged by a Supersonic Jet," AIAA Paper 95-2935
9. CARLING, J. C., and HUNT, B. L., "The Near Wall Jet of a Normally Impinging, Uniform, Axisymmetric, supersonic Jet," J. Fluid Mechanics, Vol.66. part I , 1974, pp. 159~176.
10. 신완순, "노즐 後流 에서 形成되는 超音速 流動場 硏究," 석사학위논문, 충남대학교 대학원, 1997
11. Gummer,J.H., and Hunt, B.L., "The impingement of a uniform, axisymmetric supersonic jet on a perpendicularflat plate," Aero. Quart., Vol. 22, No 197
12. Kalghatgi, G. T., and Hunt, B. L., "Occurrence of stagnation bubble in supersonic jet impingement flows," Aero. Quart. , Vol. 27 , No.3, 1976, pp.169~185.
13. Hong, S. K., and Jeon, H. J., "Computational Study of Supersonic Jet Impingement on Flat and Complex Surfaces," AIAA Paper 94~2362
14. Kim, K. H., and Chang, K. S., "Three-Dimensional Structure of Supersonic Jet Impinging on an Inclined Plate," J. Spacecraft and Rockets, Vol. 31, No.5, 1994. pp.778~782