

## 제트 편향기에 충돌하는 초음속 제트에 관한 연구

이택상\*, 정조순\*\*, 신완순\*, 박종호\*, 김윤곤\*\*\*

### Study of Supersonic Jet Impinging on a Jet Deflector

Teak-Sang Lee\* · Jo-Soon Cheong\*\* · Wan-Soon Shin\* · Jong-Ho Park\* · Yoon-Gon Kim\*\*\*

#### ABSTRACT

In this paper, Supersonic jets impinging on a wedge were investigated in order to acquire fundamental design data for jet deflectors. Surface pressure distributions and pressure contours were obtained using a cold flow tester producing Mach 2 supersonic jets. Schlieren system was used to visualize the flow structure on the wedge surface. Numerical computations were performed and compared with the experimental results. Both results were in good agreement. The results showed that underexpansion ratio did not affect on the surface pressure distribution when the wedge is located at the nozzle exit. With increasing underexpansion ratio, pressure recovery decreased as the wedge is located farther from the nozzle exit. In the pressure contour, it was possible to locate the region where the peak pressure on the wedge surface was occurred.

#### 초 록

본 논문은 제트 편향기 기초 설계 자료를 제시하기 위하여 쐐기 형상의 제트 편향기에 충돌하는 초음속 제트에 관한 연구이다. 설계 마하수 2, 초음속 유동장치를 이용하여 초음속 제트가 꼭지각 90° 쐐기에 충돌할 때 중심선에서 표면압력분포, 유동 가시화, 압력 등 분포에 대해 실험 연구를 수행하고 유동해석 결과와 비교하였다. 쐐기가 노즐 출구면에 위치할 때는 제트가 충분히 발달하지 못해 과소팽창비의 영향이 없었지만, 노즐 출구로부터 거리가 멀어지면서 과소팽창비가 커지면 쐐기 표면에서 압력 회복율은 저하했다. 압력 등 분포에서는 쐐기 표면에서 최대 압력이 형성된 영역을 확인하였다.

#### Nomenclature

$P_c$  : Jet stagnation pressure ( $kg/cm^2$ )  
 $D_e$  : Nozzle exit diameter ( $mm$ )  
 $C_p$  : Specific heat at constant pressure ( $J/kg \cdot K$ )

\* 충남대학교 기계공학과(Chungnam Univ. Dept. of Mechanical Eng.)

\*\* 성균관대학교 기계공학부(SungKyunKwan Univ. Dept. of Mechanical Eng.)

\*\*\* 국방과학연구소(Agency for Defence Development)

- $Z_n$  : Distance between nozzle exit and wedge apex point ( *mm* )  
 $S$  : Perpendicular distance from the apex measured along the wedge surface( *mm* )  
 $M_e$  : Mach number at the exit of the nozzle  
 $P_r$  : Prandtl number  
 $\theta$  : Apex angle (  $^\circ$  )  
 $P$  : Gage pressure (  $kg_f/cm^2$  )  
 $k$  : Coefficient of thermal conductivity (  $W/m$  )  
 $X$  : Distance parallel to the wedge apex measured from centerline ( *mm* )  
 $PR$  : Underexpansion ratio (nozzle exit pressure/atmospheric pressure)  
 $\gamma$  : Specific heat ratio

## 1. 서 론

각종 장애물에 충돌하는 초음속 제트에 관한 연구는 1970년대 이후 서구 유럽이나 미국에서 많은 연구가 수행되어 왔으며 특히 초음속 제트가 평판에 충돌하는 경우에 대한 실험 및 수치적 연구 결과가 대부분을 차지하고 있다.[1~2] 그러나 제트 편향기로 사용되는 썰기나 원뿔 등의 모델에 초음속 제트가 충돌하는 경우는 구조적으로 복잡한 3차원 유동장이 형성되고, 실험적 연구도 어려워 이를 연구한 자료들은 제한적이다.

1976년 Lamont[3] 등은 썰기에 충돌하는 초음속 파소 팽창 제트에 관한 실험적 연구에서 제트의 유동패턴을 결정하는 주요 인자들은 유동 마하수, 썰기의 꼭지각(apex angle), 그리고 배럴 충격파의 강도 및 형성되는 위치임을 표면 압력분포와 샤도우그래프 이미지의 분석을 통해 밝히고 있다. 또한 1980년 Jennions[4] 등은 3종의 원뿔형 제트 편향기를 이용해 파소팽창비, 거리를 변화시키면서 원뿔과 노즐 출구 사이에

서 형성되는 충격파의 구조 및 표면압력분포 등을 고찰하였다. 이외에도 국외에서는 꾸준히 연구되어오고 있으나[5] 국내에서는 아주 미미한 실정이다.

본 연구에서는 추후 제트 편향기 설계에 대한 기초 자료를 제공하기 위하여 설계 마하수 2의 초음속 노즐에서 분출되는 초음속 제트가 꼭지각  $90^\circ$ 인 썰기에 충돌할 때 노즐과 썰기 꼭지점 사이, 썰기 상부에서 형성되는 충격파의 구조 및 간섭 등의 유동 특성을 고찰하기 위하여 노즐과 썰기 꼭지점 사이거리, 파소팽창비 변화 등의 인자에 따른 썰기 중심선에서의 표면압력분포, 썰기 표면에서의 등 압력분포 및 슈리렌 장치를 이용한 썰기 주위에서의 유동 가시화를 통한 실험적 연구를 수행하고 유동해석 결과와 비교하였다.

## 2. 유동해석

충돌제트 주위에서 발생하는 유동구조를 해석하기 위하여 유한 체적법의 상용 유동해석 소프트웨어인 FLUENT 5를 사용하였으며 3차원 압축성 난류, 정상유동으로 해석하였고 난류 유동은 표준  $k-\epsilon$  모델을 이용하였다. 거리에 따른 유동의 변화를 고려하기 위하여  $Z_n/D_e = 0, 1, 2$ 에 대하여 격자를 구성하여 계산을 수행하였다.

Fig. 1은 노즐 출구와 썰기 꼭지점까지 거리가 노즐 출구 지름의 1배일 때를 나타내며 다중 격자를 이용하였고 충격파가 형성되는 중심부분에 격자를 밀집시켰다. 또한, 충돌된 제트가 충분히 발달되어 대기압까지 압력회복을 할 수 있도록 썰기의 길이 방향거리를 노즐 출구지름의 10배로 하였다.

유동해석에서 기체는 공기로 가정하였으며, 점성계수는 Sutherland law를 이용하였고, 그 외 사용된 상수는 다음과 같다.

$$\gamma = 1.4, \quad Pr = 0.7, \quad k = 0.0242 (w/m \cdot K)$$

$$C_p = 1006.43 (J/kg \cdot K)$$

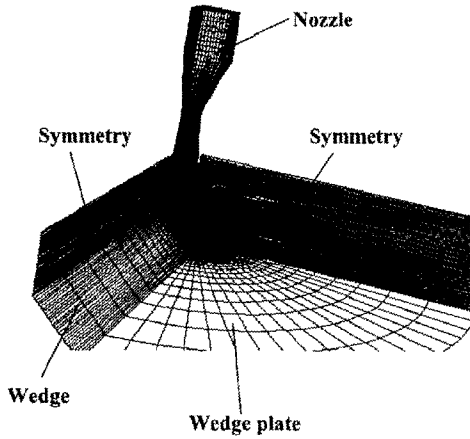


Fig. 1 Grid for jet deflector

### 3. 실험장치 및 방법

썰기에 충돌하는 초음속 제트를 모사하기 위해 초음속 유동장치[6]를 이용하였고 시험시간은 약 2초이었다.

본 연구에서는 축소부 반각 22°, 확대부 반각 7°, 노즐 출구지름 13 mm, 설계 마하수 2인 de-Laval 노즐을 이용하였다. 노즐은 노즐 출구에서의 정압과 대기압과의 비인 과소팽창비(PR)를 1.2, 1.7, 2.27로 변화하여 작동하며, 노즐 출구로부터 썰기 꼭지점까지의 거리는 노즐 출구지름의 0~2배로 변화하여 측정하였다.

썰기 모델은 꼭지각  $\theta=90^\circ$  이고 베이스 너비는 노즐 출구지름의 2배인 26 mm로 하였다. 썰기의 길이는 노즐 출구 직경의 10배인 130 mm로 하였다. 썰기는 이송장치를 이용하여 꼭지각에 평행하게 이동하였으며 지지대는 유동장치와 썰기 사이에서 발생할 수 있는 간섭을 없애기 위해 제트의 영향이 전혀 없도록 설치하였

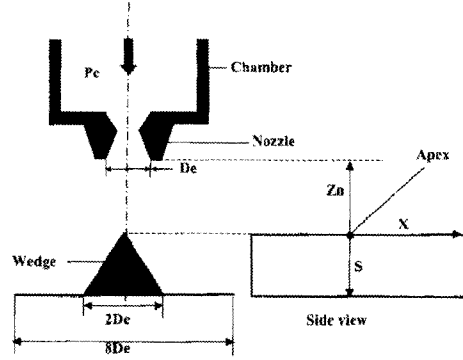


Fig. 2 Coordinates

다. 썰기 표면에 제작된 외경 1 mm의 압력공은 스테인레스 관으로 압력센서에 연결하였으며 6.5 mm 간격으로 2열로 설치하였다. 이는 압력공 상호간의 간섭을 피하고, 또한 1열로 압력공을 설치하면 썰기의 크기가 제한되어 있으므로 high resolution 압력 값을 얻을 수 없기 때문이다. 본 연구에서 설치한 압력공의 배열은 제트를 통해 2열의 압력공을 이동시키면서 1.5 mm 간격으로 한 개의 압력 값을 얻을 수 있다. 또한 각각의 압력공에 연결된 관에는 30 kg/cm<sup>2</sup> 압력센서(Sensys PMHB0130KAAB)를 설치하였고 각각의 압력센서에서 출력된 신호들은 A/D 변환기를 이용해 초당 1000 개씩 수집하여 평균 값을 취하였다. 유동장을 가시화하기 위하여 쉬리렌 장치를 사용하였으며, 광원으로는 할로겐 연속광원을 사용하였다.

Fig. 2는 본 연구에서 사용된 좌표계이다.

### 4. 결과 및 고찰

Fig. 3은  $Z_n/D_e=1, 2$ 일 때 PR의 변화에 따라 등 Mach No. 선포에 대한 유동해석 결과 나타낸 것이다. (a), (b)는  $Z_n/D_e=1$ 일 때 다른 경우로, PR이 커지면 노즐 출구로부터 형성되는 제트 경계면의 폭이 넓어졌고, 꼭

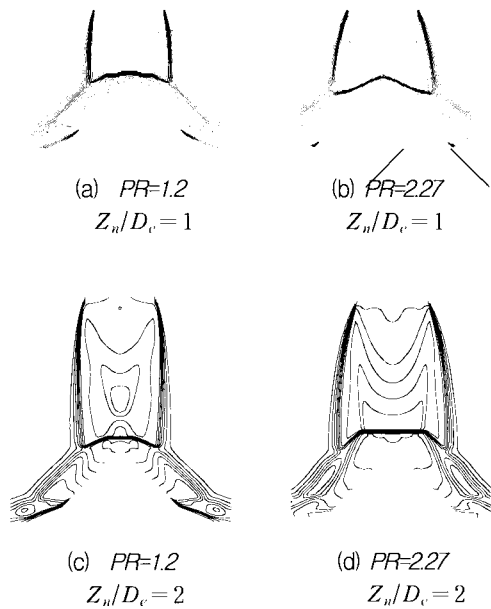
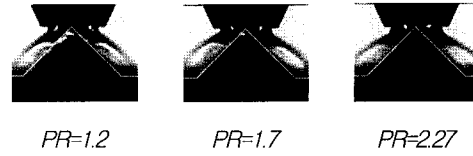


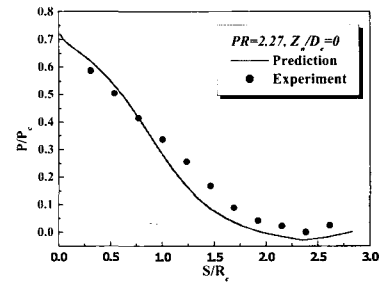
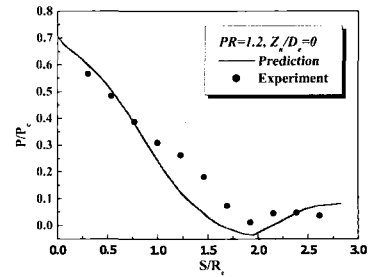
Fig. 3 Mach Number Contours

상부에서 췌기 충격파는 부착되지 않고 이탈된 형태를 나타내며,  $PR=1.2$ 보다는  $PR=2.27$ 일 때 제트의 강도가 더 크기 때문에 췌기 충격파는 꼭지점 가까이로 이동을 하고, 췌기의 모서리 주변영역에서 제트의 재 압축 지점도 꼭지점에서 점점 더 멀리 떨어져서 형성되었다. (c)와 (d)는  $Z_n/D_c=2$ 일 때  $PR$ 이 다른 경우이며,  $PR$ 이 커지면서 (a), (b)에서와 유사한 경향을 보인다. 그러나 (c)는 노즐 출구에서 분출된 제트가 계속 팽창하면서 배럴 충격파와 반사 충격파를 통과한 후 췌기에 충돌하여 꼭지점 상부에서 췌기 충격파를 형성하였다. 또한  $Z_n/D_c=2$ 에서는  $Z_n/D_c=1$ 에서와 달리 췌기 충격파가 거의 마하 디스크 형태를 보이며, 정점에서 멀리 떨어져 췌기 충격파가 나타났다.

Fig. 4는  $Z_n/D_c=0$ 일 때  $PR$ 의 변화에 따른 실험과 유동해석 결과를 비교한 것이다. 가시화 결과에서는 제트의 3차원 유동 현상 및 빛의 굴절 등으로 인해 이미지가 명확히 나타나지는 않았다.  $PR$ 에 대해 췌기 충격파는 꼭지점에서 이



(a) Flow visualizations



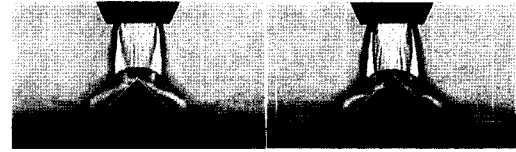
(b) Surface pressure distributions on the centerline of wedge

Fig. 4 Experiment and Prediction ( $Z_n/D_c=0$ )

탈되고, 위로 볼록한 형태를 보이며  $PR$ 이 커지면서 췌기 충격파의 폭이 넓어지는 것을 확인할 수 있다. 췌기 중심선에서의 표면압력 분포에서 압력은 시험챔버압력  $P_c$ 를 사용하여 무차원화 하였고,  $S$ 는 췌기 꼭지점으로부터 수직한 거리를 나타낸다. 췌기의 꼭지점에는 압력공을 설치할 수 없기 때문에 췌기 표면에서 첫 번째 압력공의 위치는 꼭지점으로부터  $2\text{ mm}$  떨어져 있다. 실험 및 해석결과에서  $PR=1.2, 2.27$ 일 때 압력분포 경향은 유사하게 나타나고 있으며, 꼭지점에서 압력은  $P_c$ 의 약 70%를 나타내며, 췌기 표면을 따라 압력은 계속해서 감소하다가 시험챔버 압력 차이로 인해  $PR=1.2$ 의 경우

$S/R_e \approx 1.9$ ,  $PR=2.27$ 의 경우  $S/R_e \approx 2.3$ 에서 재압축파의 위치만 변화하였다. 이와 같이  $Z_n/D_e=0$ 에서  $PR$ 이 표면압력에 큰 영향을 주지 않은 이유는 썸이 노즐 출구면에 위치하여 제트가 노즐 출구로부터 충분히 발달하지 못하였기 때문이다.

Fig. 5는  $Z_n/D_e=1$ 일 때  $PR$ 의 변화에 따른 실험과 유동해석 결과를 비교한 것이다. (a)의 유동가시화 결과에서는  $PR$  변화에 대해 제트 경계면, 배럴 충격파, 썸 충격파, 반사 충격파 등 다수의 충격파 구조가 형성된 것을 확인할 수 있으며, 썸 충격파는 모두 이탈되었다.  $PR$ 이 커지면서 제트 경계면이 넓어지고, 썸 충격파는 꼭지점으로 이동해 가는 현상을 볼 수 있다. (b)는 실험결과와 유동해석 결과를 비교하기 위해  $PR=1.2$ 일 때 유동가시화 사진과 유동해석 결과의 등 밀도 선도를 동일한 축적으로 비교한 것이다. 제트 경계면과 충격파 구조 등 제트가 발달된 형태가 상호 유사하게 잘 나타나고 있다. (d)의 표면압력분포에서는  $Z_n/D_e=0$ 일 때와 같이 실험과 유동해석 결과의 경향은 잘 일치하고 있으며 꼭지점에서의 압력 회복율은  $Z_n/D_e=0$ 일 때보다는 다소 감소하여  $PR=1.2$ 에서는  $P_c$ 의 약 45%,  $PR=2.27$ 에서는  $P_c$ 의 약 25%를 나타내고 있다. 이것은 노즐 출구에서 제트가 어느 정도 발달하였기 때문이다. 또한  $PR=1.2$ 의 경우 압력이 계속해서 저하하다 재압축파에 의해 다시 상승하는 경향을 보이지만  $PR=2.27$ 일 때는 상당히 다른 경향을 보인다.  $S/R_e \approx 0.8$ 까지는 압력이 저하하다가 다시 급격히 상승하고 감소하는 경향을 보이는데 이와 같은 분포를 나타내는 이유는 이 영역에서 충격파가 발생된 것으로 예측되지만 유동 가시화 실험 결과에서는 명확히 나타나지 않고 있으나 유동해석 결과인 (c)에서는 잘 나타나고 있다. 꼭지점 상부에 썸 충격파의 형성으로 인해 밀도의 증가가 나타났고, 썸 표면을 따라 제트가 유동하면서 밀도가 감소하다가 썸 충격파와 반사 충격파의 간섭으로 인해 형성된 충격파에 의해  $S=5mm$ 에서 주위 공기의 흡입 등으로 인



PR=1.2

PR=1.7

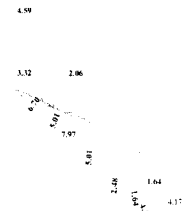


PR=2.27

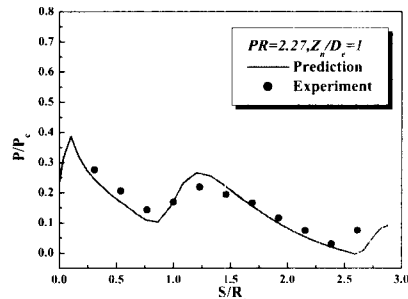
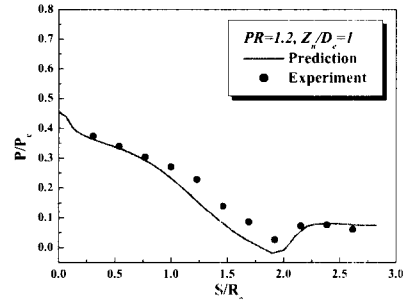
(a) Flow visualizations



(b) Density contour ( PR=1.2 )

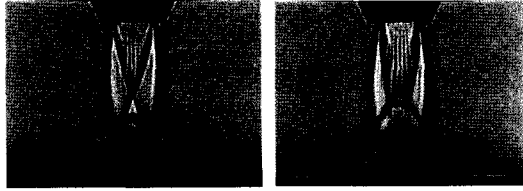


(c) Density contour ( PR=2.27 )



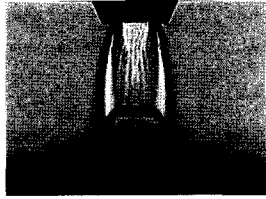
(d) Surface pressure distributions on the centerline of wedge

Fig. 5 Experiment and Prediction (  $Z_n/D_e=1$  )



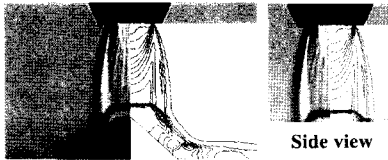
PR=1.2

PR=1.7



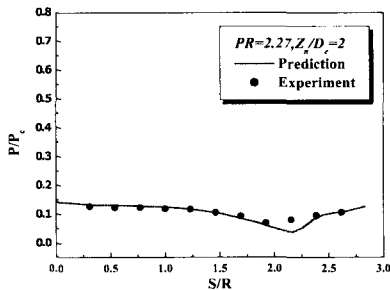
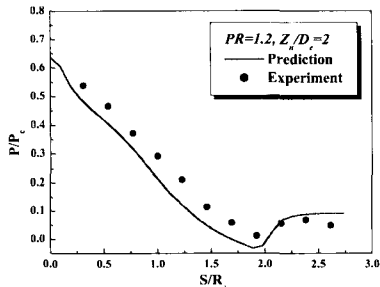
PR=2.27

(a) Flow visualizations



Side view

(b) Density contour  
( PR=1.7 )



(c) Surface pressure distributions on the centerline of wedge

Fig. 6 Experiment and Prediction (  $Z_n/D_e=2$  )

한 밀도의 급격한 증가현상을 보이고 있다.

Fig. 6은  $Z_n/D_e=2$ 일 때 PR의 변화에 따른 실험과 유동해석 결과이다. (a)의 유동 가시화 실험결과에서 PR=1.2의 경우 썰기 충격파는 반사 충격파를 통과한 후 제트가 꼭지점에 충돌한 후 꼭지점 상부에 형성되었지만 PR=1.7과 2.27의 경우는 썰기 충격파가 배럴 충격파와 교차하면서 마하 디스크 형태로 평평하게 꼭지점 상부에 형성되었다. 또한 PR이 커지면서 충격파의 강도가 증가하여 썰기 충격파의 크기도 더 커짐을 알 수 있다. (b)의 등 밀도 선도 역시 동일한 축적으로 비교한 것이며, 측면 가시화 결과도 비교하였다. (c)의 압력분포에서도 PR=1.2는 반사 충격파를 통한 압력회복을 하여 꼭지점에서 압력회복은 노즐출구에서 거리가 멀어짐에도 불구하고  $Z_n/D_e=1$ 일 때보다 더 큰 회복율을 보이며, 그 값은  $P_c$ 의 약 63%를 나타내고 있다. 그러나 PR=1.7 이후로는 충격파의 구조가 PR=1.2일 때와 다르므로 PR이 커질수록 회복율은 점점 감소하여 PR=2.27에서는  $P_c$ 의 약 15%를 보이며 썰기 표면에서 모서리까지 압력은 거의 동일한 값을 나타내고 있다. 또한  $Z_n/D_e=0, 1$ 일 때와 동일하게 PR이 커지면서 재 압축파의 위치는 꼭지점에서 멀어졌고, PR=1.2의 경우  $S/R_e=2$ , PR=2.27의 경우  $S/R_e=2.2$ 에서 발생하였다.

Fig. 7은  $Z_n/D_e=2$ 일 때 노즐 중심 축에서

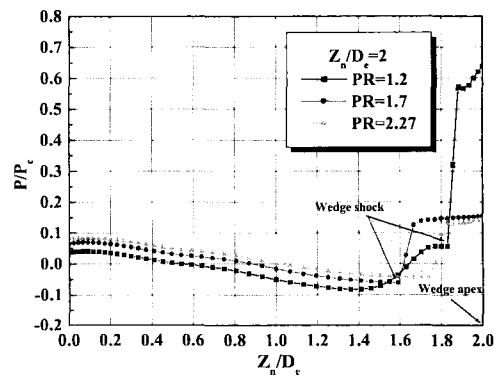
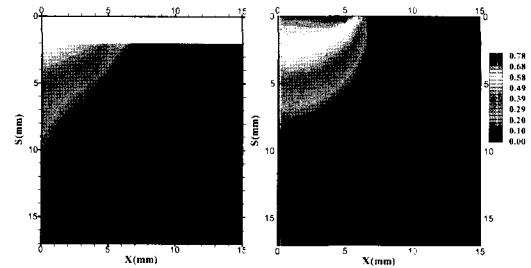


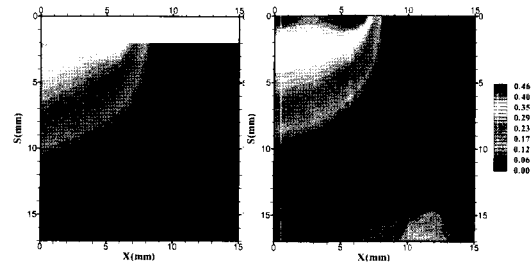
Fig. 7 Pressure distribution on the nozzle axis

압력분포를  $PR$ 에 따라 비교한 결과이다.  $PR=1.7, 2.27$  일 때는 노즐 출구면에서 제트가 계속 팽창하면서 유동 마하수는 증가하고, 압력이 저하하면서 썰기에 충돌하여 썰기 충격파를 형성한 후 압력 상승이 발생하고, 썰기 충격파는 각각  $Z_n/D_e \approx 1.6, Z_n/D_e \approx 1.8$ 에서 형성되지만,  $PR=1.2$ 에서는 반사 충격파가 형성된 지점인  $Z_n/D_e=1.4$ 까지 압력이 저하하다가 그 후에는 반사 충격파를 통한 압력회복을 이룬 후  $Z_n/D_e \approx 1.8$ 에서 썰기 충격파를 형성하여 급격한 압력상승이 일어난다

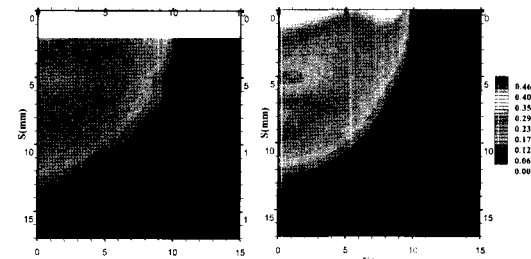
Fig. 8은  $PR$ 과  $Z_n/D_e$ 변화에 대한 썰기 표면에서 등 압력분포를 나타낸 것이다. 제트의 중심 축을 따라 썰기 표면은 좌우 대칭이기 때문에 한쪽 방향에 대해서만 실험은 수행하였다. 실험에서 압력분포는 꼭지점에 압력공을 설치할 수 없어 꼭지점에서  $2mm$ 인 지점부터 측정하여 나타내었으며, 꼭지점 영역에서의 압력분포는 유동해석 결과로 예측할 수 있었다.  $PR$ 과  $Z_n/D_e$ 변화에 대한 등 압력분포에 대한 실험과 유동해석 결과가 유사하게 나타나고 있으며,  $PR=1.2, Z_n/D_e=0$ 일 때의 결과인 (a)에서는 썰기의 꼭지점 주위에서 높은 압력영역이 발생하며,  $S=0mm, X=6.5mm$ 에서 노즐 립이 형성되었다.  $PR=1.2, Z_n/D_e=1$ 일 때의 결과인 (b)는  $Z_n/D_e=0$ 에서와 유사하게 실험과 유동해석 결과 꼭지점 주위 및 상부영역에서 높은 압력영역이 형성되고,  $S=0mm, X=8mm$ 에서 제트 모서리가 형성되었다. 그러나  $PR=2.27, Z_n/D_e=1$ 일 때의 결과인 (c)의 경우 꼭지점 영역에서 첫 번째 최대 압력영역이 나타나고,  $S=5mm, X=0\sim 2mm$  영역 주위에서 두 번째 최대 압력영역이 나타나고 있다. 이는 썰기 중심선에서 표면압력분포에서도 나타났듯이 썰기 충격파와 반사 충격파의 간섭으로 발생된 새로운 충격파의 영향 때문이며, 제트 모서리도 제트의 강도가 증가하여  $S=0mm, X=10mm$ 에서 나타나고 있다.  $PR=1.7, Z_n/D_e=2$ 일 때의



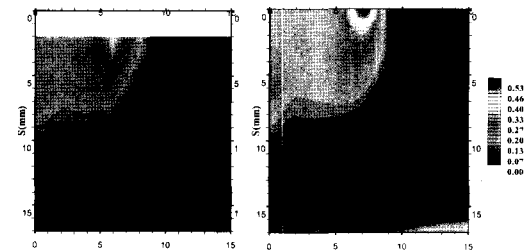
Experiment Prediction  
(a)  $PR=1.2, Z_n/D_e=0$



Experiment Prediction  
(b)  $PR=1.2, Z_n/D_e=1$



Experiment Prediction  
(c)  $PR=2.27, Z_n/D_e=1$



Experiment Prediction  
(d)  $PR=1.7, Z_n/D_e=2$

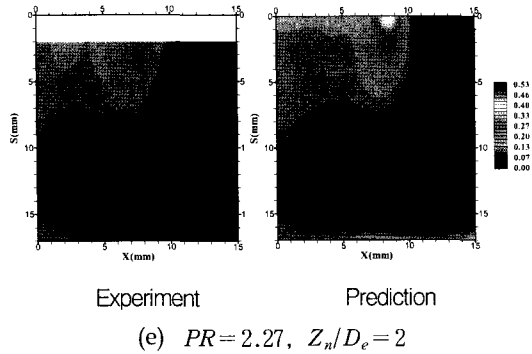


Fig. 8 Pressure Contours (continued)

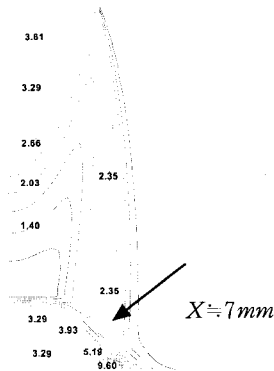


Fig. 9 Density Contour (PR=1.7)

결과인 (d)의 경우 제트 모서리는  $S=0mm$ ,  $X\approx 9mm$ 에서,  $PR=2.27$ ,  $Z_n/D_e=2$ 일 때의 결과인 (e)의 경우  $S=0mm$ ,  $X\approx 10.5mm$ 에서 형성되었다. 그리고  $Z_n/D_e=0, 1$ 일 때와는 달리 (d)의 경우  $S\approx 1mm$ ,  $X\approx 7mm$ 에서 (e)의 경우  $S\approx 1mm$ ,  $X\approx 8.5mm$ 에서 꼭지점에서보다 큰 압력영역이 나타나고 있으며, 이는 이 영역에서 충격파가 형성되었기 때문이다.

Fig. 9는  $PR=1.7$ ,  $Z_n/D_e=2$ 일 때 등 밀도 선도를 나타내며,  $X\approx 7mm$ 에서 새로운 충격파가 형성되어 급격한 밀도 증가현상이 발생함을 보여준다.

#### 4. 결 론

제트 편향기 설계의 기초 자료를 제시하기 위하여 꼭지가  $90^\circ$  쐐기에 초음속 제트가 충돌할 때 유동특성을 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 쐐기가 노즐 출구면에 위치할 때는 제트가 충분히 발달하지 못해 충격파 구조 및 압력 회복율은 크게 감소하였다.
2. 노즐 출구와 쐐기 꼭지점 사이 거리가 동일할 때 과소팽창비가 커지면 유동 마하수, 제트의 강도와 위치 차이 등으로 인해 압력 회복율은 크게 감소하였다.
3. 본 연구의 등 압력 선도에서  $Z_n/D_e=0\sim 1$ 에서는 쐐기 꼭지점과 상부 영역에서 높은 압력영역이 형성되었지만,  $Z_n/D_e=2$ 에서는 과소팽창비에 관계없이 꼭지점에서  $X$  방향으로 떨어진 임의의 위치에서 충격파가 형성되어 높은 압력영역이 나타났다.

#### 참 고 문 헌

1. 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.
2. 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, 1980, pp.471~511.
3. P. J. Lamont and B. L. Hunt, "The impingement of underexpanded axisymmetric jets on wedges.", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 76, part 2, 1976, pp.307~336.
4. I. K. Jennions and B. L. Hunt, "The Axisymmetric Impingement of Supersonic Jets on Cones.", *Aeronautical Quarterly*,



- Vol. 31, 1980, pp.26~41.
5. J. K. Prasad and R. C. Mehta, "Impingement of Supersonic Jets on an Axisymmetric Deflector.", AIAA Journal, Vol. 32, No. 7, 1994, pp.1535~1538.
  6. 이택상, "충돌제트의 유동특성에 관한 실험적 연구.", 충남대학교 대학원 석사논문, 2000.
  7. 이택상, 신완순, 이정민, 박종호, 김윤곤, "평판 위에 충돌하는 초음속 과소팽창 제트에 관한 실험적 연구.", 한국추진공학회지 제3권 3호, 1999, pp.53~61.
  8. 이택상, 신완순, 박종호, 김윤곤, "충격파 간섭에 따른 초음속 충돌제트의 실험 연구.", 한국항공우주학회지, 제 29권 4호, 2001, pp.1~7.
  9. 이택상, 신완순, 길경섭, 박종호, 조장형, 김윤곤, "썩기에 충돌하는 초음속 제트에 관한 연구.", 제 16회 한국추진공학회 학술발표논문집, 2001. pp. 23.