

꼭지각이 60° 인 췌기에 충돌하는 초음속 제트의 공기역학적 특성

박종호* · 이택상** · 김윤곤***

Aerodynamic Characteristics of Supersonic Jets Impinging on 60° Wedge

Jong Ho Park* · Teak Sang Lee** · Yoon Gon Kim***

ABSTRACT

Supersonic jets impinging on 60° wedge were investigated to obtain fundamental design data for jet deflector. It was of interest to study flow phenomena such as shock interaction and separation induced by shear layer. Experiments using supersonic cold flow system were conducted for Schlieren flow visualization and measurement of surface pressure. Numerical results were compared with the experimental results. The major parameters are underexpansion ratio, distance from nozzle to apex and design Mach number. Flow conditions were obtained for the wedge shock to attach on or detach from the wedge. The dominant feature of flow-field is shock pattern induced by the interaction between the wedge shock and the barrel shock.

초 록

제트 편향기 설계를 위한 기초 자료로 활용하기 위해 꼭지각 60° 인 췌기에 충돌하는 초음속 제트에 대해 연구하였다. 초음속 제트가 췌기에 충돌할 때 발생하는 주요 특징은 충격파 간섭과 유동의 박리현상이다. 초음속 유동장치를 이용하여 유동가시화, 표면압력분포, 등압력분포를 측정하고 실험결과와의 비교 및 검증을 위해 유동해석을 하였다. 주요변수로는 과소팽창비, 노즐출구에서 꼭지점까지 거리, 설계마하수를 고려하였다. 췌기 충격파가 이격 또는 부착되는 조건을 확인하였으며 유동장에 지배적 영향을 끼치는 인자는 자유제트의 강도, 췌기 충격파와 배럴 충격파의 간섭에 의해 형성되는 충격파 패턴임을 알 수 있었다.

Key Words: Supersonic Impinging Jet(초음속 충돌제트), Shock Interaction(충격파 간섭), Jet Deflector(제트 편향기), Wedge(췌기)

1. 서 론

로켓이나 수직 이착륙기의 노즐에서 분출되는 플룸을 편향시켜 주변장비 등에 영향을 주지 않도록 하기 위해 제트 편향기가 이용되며 그 형상은 주로 췌기나 원추형이다.[1,2] 초음속 제트

† 2003년 8월 14일 접수 ~ 2003년 12월 4일 심사완료

* 종신회원, 충남대학교 기계공학과 유체공학실험실

** 학생회원, 충남대학교 기계공학과 유체공학실험실

*** 정회원, 국방과학연구소

연락처: E-mail: jhpark@cnu.ac.kr

Nomenclature

 D_e = Nozzle exit diameter D_t = Nozzle throat diameter P_r = Prandtl number R_e = Nozzle exit radius Z_n = Distance between nozzle exit and Apex point γ = Specific heat ratio C_p = Constant pressure specific heat P_c = Jet stagnation pressure P = Gage pressure k = Thermal conductivity PR = Underexpansion ratio S = Perpendicular distance from the apex measured along the wedge surface M_e = Design Mach number

가 썰기에 충돌하게 되면 썰기의 꼭지각 및 노즐 출구로부터 꼭지점의 위치 등 다양한 유동인자들로 인해 복잡한 유동장이 형성된다. 그러나 썰기나 원추에 충돌하는 초음속 제트에 대한 연구가 모델 제작의 어려움 등으로 미흡한 실정이며 국내에서는 박[3] 등이 90° 썰기에 대해 실험 및 유동해석을 수행하여 표면에서의 압력분포와 유동가시화를 통해 썰기 주위의 유동장을 분석하였다.

본 논문에서는 초음속 제트가 60° 썰기에 충돌할 때 발생하는 충격파 간섭과 박리현상 등 썰기 주위의 유동 현상을 규명하였다. 실험은 초음속 유동장치를 이용하여 과소 팽창비, 노즐 출구에서 썰기 꼭지점까지 거리변화, 노즐 설계 마하수 등의 변화에 대한 유동가시화, 표면압력분포 등을 측정하였다. 또한 60° 썰기에 대한 3차원 유동해석을 수행하여 실험결과와 비교하여 해석방법의 건전성을 확인하였다. 본 연구를 통해 얻은 결과는 제트 편향기의 공기역학적, 구조설계에 유용한 자료로 활용될 수 있을 것이다.

2. 실험장치 및 방법

썰기에 충돌하는 초음속 제트 실험은 자체 제작한 초음속 유동장치에서 수행하였으며 개략도는 Fig. 1과 같다[4].

노즐은 축소부 반각 22°, 확대부 반각 7°, 목 직경 10mm, 설계 마하수 2.0인 드라발 노즐과 동일 목 직경의 음속노즐 2가지를 이용하였다. 노즐 출구에서의 정압과 대기압과의 비인 과소 팽창비(PR)는 1.20, 1.70, 2.27로 하였으며, 노즐 출구로부터 썰기의 꼭지점까지 거리변화는 노즐 출구직경의 0~2배로 하였다.

썰기의 꼭지각은 60°로 하였으며 썰기의 바닥 길이는 노즐 출구 직경의 3배로 하고 재질은 황동을 이용하였다. 압력 측정은 표면에 11개의 홀을 제작하고 1.5mm의 스테인레스 세판으로 정확도 $\pm 0.25\%$ FS(Full span)인 0~3039.75 kPa 압력 센서(Sensys PMHB0130KAAB)와 연결하였다. 유동장의 가시화는 할로젠 연속 광원의 슈리렌 장치를 이용하였다.

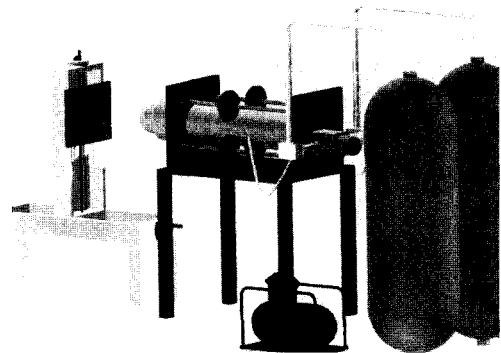


Fig. 1 Supersonic cold-flow system

3. 유동해석

실험으로 측정할 수 없는 인자에 대한 경향을 고찰하고 해석방법의 건전성을 확인하기 위해 상용코드인 FLUENT 5.3[5]을 이용하여 유동해석을 수행하였다.

썰기 주위의 유동장은 3차원 압축성 난류, 정상유동으로 가정하고, 이때 난류 유동장은 표준 $k-\epsilon$ 모델을 이용하였다.

경계조건으로는 입구경계, 충돌되는 썰기 및 노즐 벽면에서 벽면경계, 유동이 충돌된 후 유출되는 출구경계로 구성된다. 입구경계는 정체실 내에서의 유동을 Table 1과 같이 각 PR에 대한 전압으로 주어졌으며, 출구경계는 정압을 일정하게 하고 압력을 제외한 유동변수는 내부유동 영역으로부터 외삽(Extrapolation)하였다. 벽면 난류경계조건은 벽함수를 사용하여 벽면근처의 격자수를 줄였으며 벽면에서의 속도는 0으로 하였다.

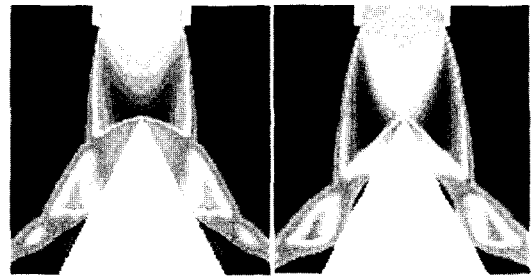
유동해석에서 유체는 공기로 가정하고 점성계수는 Surtherland law를 이용하였으며, 열전도도 $k=0.0242w/m \cdot K$, 비열비 $\gamma=1.4$, 프란틀수 $Pr=0.7$, 정압비열 $C_p=1006.43J/kg \cdot K$ 로 각각 정하였다.

Table 1. Inlet boundary conditions.

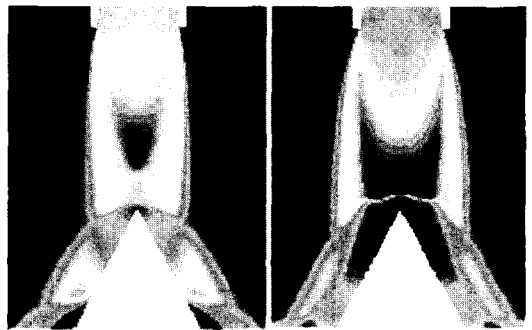
PR	Inlet pressure (kPa)	Inlet temperature (°C)
1.2	951.4	27
1.7	1347.6	27
2.27	1777.5	27

4. 결과 및 고찰

Figure 2는 $M_e=2.0$ 일 때 유동해석 결과의 마하수 분포를 나타낸 것으로 (a)는 썰기 꼭지점에 위로 볼록하고 부착된 강한 충격파가 발생하였다. (b)는 자유제트 마하 디스크의 후류에 썰기



(a)PR=1.2, $Z_n/D_e=1$ (c) PR=2.27, $Z_n/D_e=1$

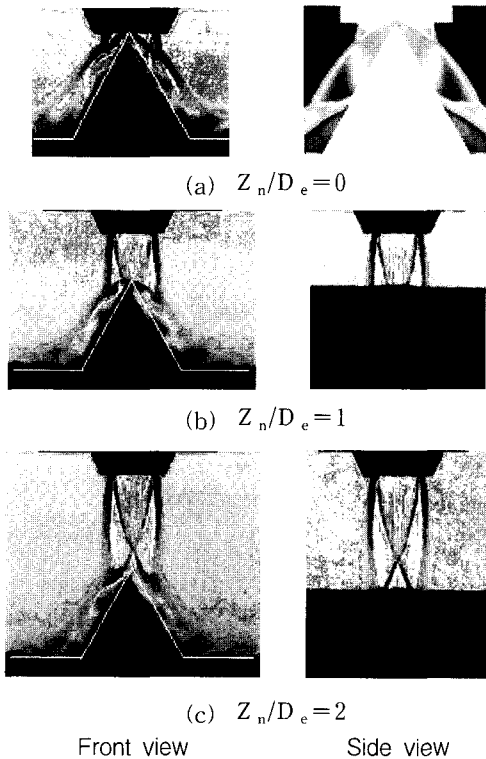


(b)PR=1.2, $Z_n/D_e=2$ (d)PR=2.27, $Z_n/D_e=2$

Fig. 2 Mach number contours ($M_e=2.0$)

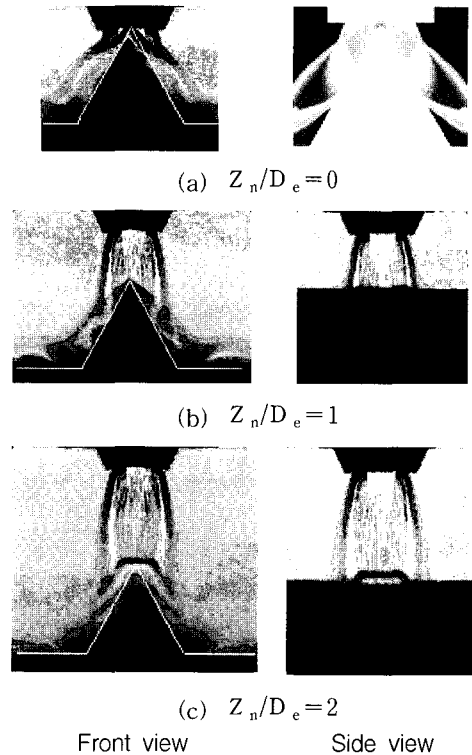
꼭지점이 위치하였으며 썰기 충격파는 마하 디스크 하부에서 위로 볼록하게 형성되었다. 선 연구 결과[3]로부터 PR=1.2일 때 자유제트에서는 노즐 출구로부터 마하 디스크의 위치가 대략 $1.54D_e$ 이었지만 (b)의 경우는 썰기에 충돌하였기 때문에 약 $1.42D_e$ 로 나타났다. (c), (d)는 썰기의 꼭지점이 자유제트 마하 디스크의 상류에 위치한 경우로 (c)는 충격파가 썰기 꼭지점에 부착되고 약한 경사 충격파를 형성하지만, (d)는 충격파가 離隔되고, 수직 충격파 형태의 썰기 충격파가 꼭지점 상부에 형성되었다.

제트의 과소 팽창비는 충격파의 구조에 매우 강한 영향을 미친다. Fig. 2 (a)와 (c)는 $Z_n/D_e=1$ 일 때 과소 팽창비에 따라 (a)에서는 강한 충격파가 썰기의 꼭지점에 부착되었으나 (c)에서는 약한 충격파가 꼭지점에 부착되고 썰기 충격파와 자유 제트의 배럴 충격파가 간섭하여 형성된 삼중점(Triple point)으로부터 충격파

Fig. 3 Flow visualizations (PR=1.2, $M_e=2.0$)

가 발생하여 $S/R_e \approx 2.1$ 지점에 충돌하였다. 이와 같이 과소 팽창비 영향에 따라 배럴 충격파 강도와 위치가 변하며, 과소 팽창비가 증가할수록 충격파는 약하게 되고 부착 충격파가 형성되며 이 충격파는 뿔기 표면에 좀더 가깝게 이동하는 것으로 사료된다.

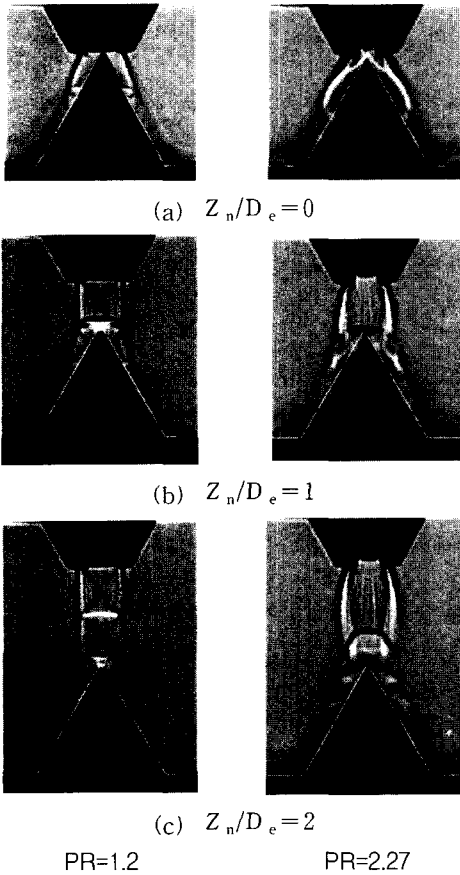
Figure 3은 PR=1.2, $M_e=2.0$ 일 때 노즐과 뿔기의 거리변화에 대한 샤도우그래프 장치를 이용한 유동가시화 결과를 보인 것이다. (a)에서는 노즐 출구에 뿔기 꼭지점이 위치하고 있기 때문에 제트가 충분히 발달하지 못하여 완전히 출구를 빠져 나가지 못하고 일부 유체는 노즐 안쪽으로 유입하게 되며, 제트 경계면과 뿔기 충격파가 간섭하여 제트 경계면이 외부로 편향되었다. (b)와 (c)에서는 뿔기 측면에서의 충격파 구조를 분석하기 위해 측면 가시화 사진을 나타내었다.

Fig. 4 Flow visualizations (PR=2.27, $M_e=2.0$)

뿔기 충격파는 모두 꼭지점에 부착되었고 측면 가시화 결과에서도 동일하였다. (b)에서는 강한 충격파가 형성되었고, (c)에서는 제트가 자유제트의 반사 충격파를 통과한 후 뿔기에 충돌하여 부착 충격파를 형성하였다.

Figure 4는 PR=2.27, $M_e=2.0$ 일 때 유동가시화 결과이다. (a)에서는 Fig. 3(a)와 유사한 유동장을 형성하나 압력비의 증가로 제트 경계면의 폭이 넓어졌다. (b)에서는 약한 충격파가 꼭지점에 부착되었지만, Fig. 3(b)에서는 강한 부착 충격파가 발생하였다. (c)는 Fig. 2의 유동해석 결과에서와 동일한 수직 충격파가 꼭지점 상부에 이격되어 형성되었으며 뿔기 충격파의 하부는 아음속 유동영역을 이루기 때문에 어떤 충격파도 발달하지 않았다.

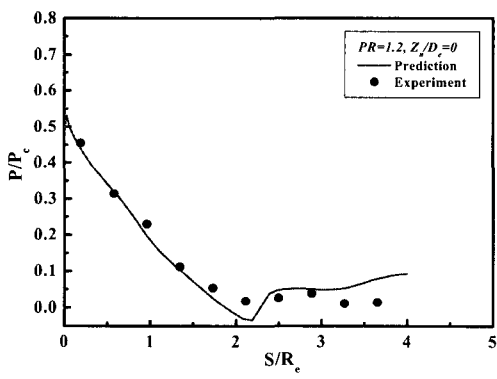
Figure 5는 $M_e=1.0$, PR=1.2, 2.27일 때 거리변

Fig. 5 Flow visualizations ($M_e = 1.0$)

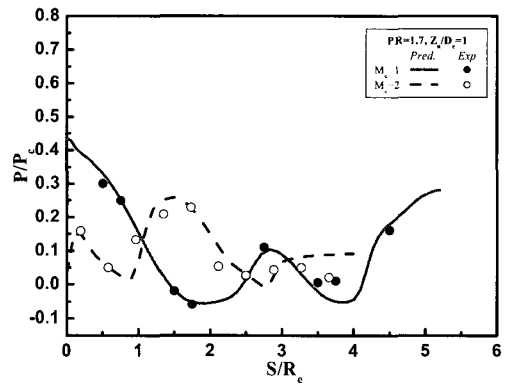
화에 대한 썰기 상부에서의 충격파 구조를 나타낸다. (a) $Z_n/D_e = 0$ 에서는 제트 경계면만 보일 뿐 썰기 충격파는 형성되지 않은 것으로 보인다. (b)와 (c)에서도 $M_e = 2.0$ 와는 다른 충격파 구조가 나타났다. (b)의 PR=1.2에서는 충격파가 이격되었지만 $M_e = 2.0$ 에서는 충격파가 부착되었다. 이는 꼭지점 상부의 유동마하수가 큰 영향을 미치는 것으로 생각되며 $M_e = 1.0$ 에서는 60°의 꼭지각에 대해 충격파는 부착될 수 없기 때문이다. (c)의 PR=1.2일 때 썰기 꼭지점은 자유제트의 두 번째 충격파 셀에 위치하며 꼭지점에서 이격되었다. 또한 PR=2.27일 때는 썰기의 꼭지점이 자유제트의 마하 디스크 하부에 위치하며

마하 디스크 하부에서 아음속 영역 기체가 꼭지점으로 유동을 진행하면서 자유제트의 초음속 유동 기체와 만나 썰기에 충돌하여 경사 충격파가 형성되었다. 이와 같이 동일 압력비와 거리비이지만 출구 마하수에 따른 충격파 셀의 길이와 유동마하수 차이로 인해 충격파 구조는 상호 달랐다.

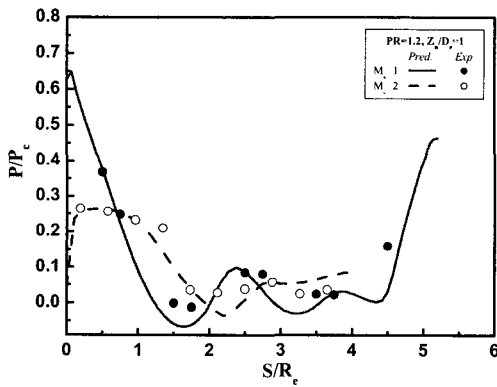
Figure 6은 $M_e = 1.0$ 과 $M_e = 2.0$ 일 때 썰기 표면에서의 압력분포에 대하여 유동해석과 실험결과를 비교 도시한 것으로 표면에서의 압력은 P_c 를 사용하여, S 는 R_e 로 무차원화 하였다. 썰기의 하부 저압영역에서는 해석과 실험결과가 약간 차이를 보이고 있으나 꼭지점 주변부에서는 1~2%의 오차를 보였다. (a)는 PR=1.2, $Z_n/D_e = 0$, $M_e = 2.0$ 일 때이며 $S/R_e = 2.2$ 에서 제트의 재 압축이 발생하였고, 꼭지점에서는 $P/P_c = 0.5$ 값을 보이나 하부로 이동하면서 압력은 감소하는 경향을 나타낸다. (b)~(f)는 $M_e = 1.0$ 과 $M_e = 2.0$ 일 때 PR과 거리변화에 대한 표면압력을 비교하였다. $M_e = 1.0$ 일 때 모든 경우 꼭지점에서 최대압력이 발생하였으며 $Z_n/D_e = 2$ 의 경우 시험 챔버 압력의 70%까지 나타나고 있다. Fig. 3~5의 유동가시화에서 알 수 있듯이 (b)에서 $M_e = 2.0$ 일 때는 충격파가 썰기 꼭지점에 부착되어 압력이 꼭지점으로부터 급격한 증가를 보이지만 $M_e = 1.0$ 일 때는 충격파가 이격되어 꼭지점에서의 압력이 매우 높다. 또한 썰기 끝단 주위에서는 제트의 재압축이 발생하여 압력이 상승하는 경향이 보이며, 끝단의 영향은 $M_e = 1.0$ 일 때 매우 크게 나타났다. (c)에서는 $M_e = 1.0$ 과 $M_e = 2.0$ 인 두 개의 노즐 모두 꼭지점에서 충격파가 이격되어 발생한 경우이며, 반사 충격파를 통해 압력회복을 한 제트가 초음속 영역에서 썰기와 충돌하여 압력이 크게 나타났다. (d)와 (f)의 $M_e = 2.0$ 에서는 PR 변화에 대하여 유사한 압력분포를 보이며 썰기 충격파와 자유제트의 배럴 충격파와의 간섭으로 인해 형성된 충격파의 충돌에 의해 표면에서의 압



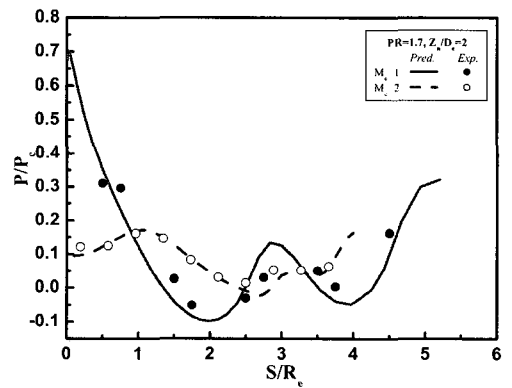
(a)



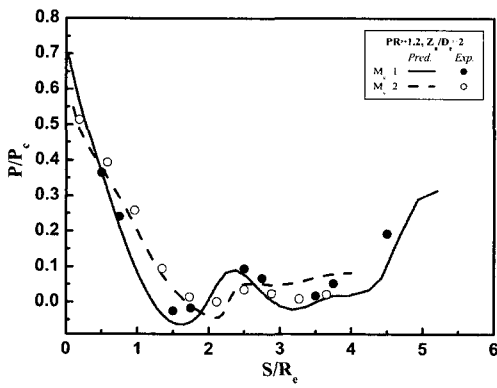
(d)



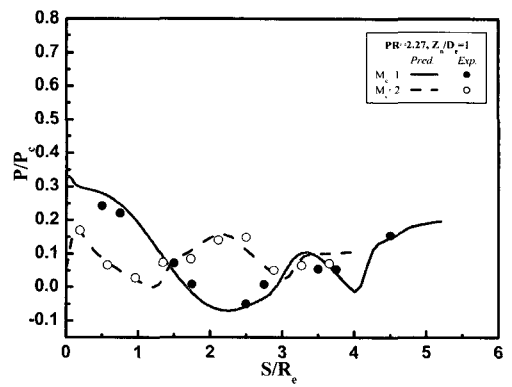
(b)



(e)



(c)



(f)

Fig. 6 Surface pressure distributions

력변화는 매우 급격하였다. (e) $M_e=2.0$ 는 수직 충격파로 인한 큰 압력손실 때문에 꼭지점에서 압력은 작게 나타나고, $S/R_e=1.2$ 에서 최대압력을 나타낸다. 수직 평판[6,7]에서와 물리적으로 동일한 재순환 불안정 영역이 형성되었기 때문에 판단되며, 이러한 현상은 Hunt[1] 등의 논문에서도 확인 되었다.

Figure 7은 Fig. 6(e)의 $M_e=2.0$ 노즐을 이용한 썰기 주위에서의 유동장 설명을 위한 수치해석으로 구한 속도벡터 분포이다. 높은 전압의 유체가 썰기 외부영역으로부터 꼭지점 하부 평면 내로 유입하여 유체는 썰기 중심축 방향으로 썰기의 표면에 대해 내부방향으로 흐르며, 여기서 내부로 유동하는 유체에 대해 장벽처럼 작용하여 표면으로부터 유동이 박리되도록 한다. 따라서 Fig. 6(e)에서는 최대압력이 발생된 지점에서의 압력이 꼭지점에서 압력보다 크다.

Figure 8은 $M_e=2.0$ 일 때 썰기 표면에서 3차원 등압분포 선도이다. 그림에서 왼쪽은 유동해석 결과를 나타내며, 오른쪽은 실험결과를 나타낸다. 제트의 중심선을 따라 썰기의 표면은 좌우 대칭이기 때문에 한쪽 영역에 대해서만 압력을 측정하였다. 실험과 유동해석 결과는 최대압력 형성지

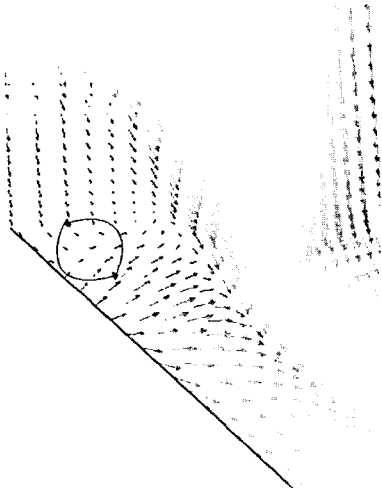
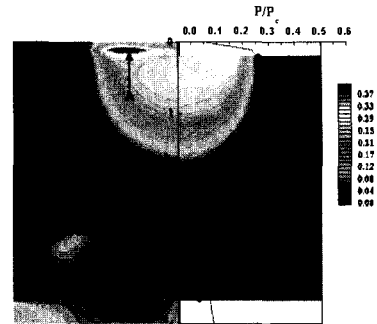
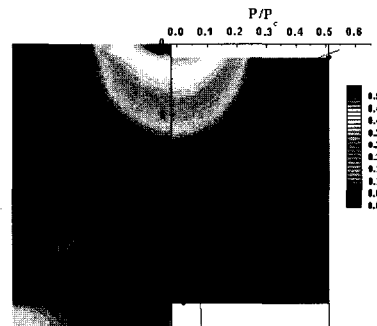


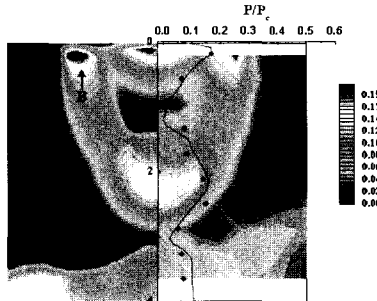
Fig. 7 Vector plot ($PR=1.7, Z_n/D_e=2$)



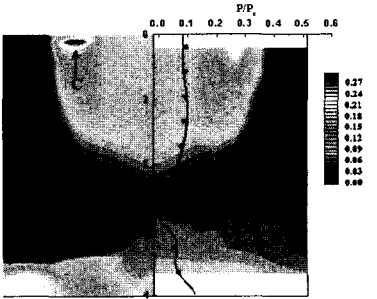
(a) $PR=1.2, Z_n/D_e=1$



(b) $PR=1.2, Z_n/D_e=2$



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



(d) $PR=2.27, Z_n/D_e=2$

Fig. 8 Pressure contours on the surface($M_e=2$)

점이나 압력분포 경향이 잘 일치하였다. 쇄기 표면에서 높은 압력을 보이는 영역은 자유제트의 스펜 내에서 형성됨을 알 수 있었다. 제트의 축을 기준으로 표면을 따라 측정된 압력분포는 균일하였지만 꼭지점이 노즐로부터 멀리 떨어져 있을 때는 최대압력이 유동의 외부에서 발생하였다. 또한 모든 경우 쇄기 모서리(Edge) 유선의 팽창을 관찰할 수 있었다. (a)는 $PR=1.2$, $Z_n/D_e=1$ 로 외부영역의 유체는 쇄기 하부방향으로 급격히 가속이 진행됨을 알 수 있다. 또한 A 영역은 압력이 높게 나타나고 있으며 Tail shock 측면인 것으로 판단된다. 이 영역에서 정체압은 $P/P_c \approx 0.375$ 이며, 꼭지점에서 압력 $P/P_c \approx 0.1$ 보다 큰 값을 보인다. (b)에서는 꼭지점 주변 영역에 높은 압력 영역이 형성되고 주위로 이동함에 따라 점차 압력이 감소한다. 그러나 (d)의 경우에는 최대압력이 꼭지점 주변이 아닌 C 영역에서 $P/P_c \approx 0.21$ 로 나타났다.(c)에서는 두 지점에서 높은 압력 영역이 형성되었고 B 영역에서 $P/P_c \approx 0.2$ 로 중심부 영역보다도 상대적으로 높은 압력 영역이 형성되었다. 한편 (c)에서 $S/R_e \approx 0.8 \sim 1.4$, $X/R_e \approx 0 \sim 0.9$ 영역은 저압영역이 형성되었는데 이는 표면압력 분포에서도 나타났듯이 쇄기 충격파와 배럴 충격파와의 간섭으로 인해 발생한 충격파의 선단영역에서 압력 회복이 이루어졌기 때문으로 판단된다.

5. 결 론

60° 쇄기에 충돌하는 초음속 제트에 대해 파소 팽창비, 거리비, 출구마하수 변화에 따른 유동특성을 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 쇄기의 꼭지점에 충격파가 이격 또는 부착되는 것은 자유제트 셀의 길이가 큰 영향을 미친다.
2. 쇄기 주위에서 유동장 구조를 결정하는 주요 인자는 자유제트의 유동마하수, 배럴 충격파

의 강도와 위치이다.

3. $M_e=2$, $PR=1.7$, 2.27이고 $Z_n/D_e=2$ 일 때 수직평판에서 동일한 재순환 유동영역이 발생하였으며, 쇄기 충격파는 수직 충격파이었다. $PR=2.27$ 에서는 노즐 중심 축 최대압력 $P/P_c \approx 0.1$ 보다 큰 $P/P_c \approx 0.21$ 을 나타냈으며, 이는 중심영역에서 수직 충격파를 통한 전압손실이 크고, 외부 영역에서는 꼭지점 상부에 충격파가 형성되었기 때문이다.

참 고 문 헌

1. Lamont, P.J. and Hunt, B.L., "The impingement of Underexpanded Axisymmetric Jets on Wedges," Journal of Fluid Mechanics, Vol. 76, 1976, pp.307-336
2. Jennions, J.K. and Hunt, B.L., "The Axisymmetric Impingement of Supersonic Air Jets on Cones," Aeronautical Quarterly, Vol. 31, 1980, pp.26-41
3. 박종호, 이택상, 정조순, 신완순, 김윤곤, "제트 편향기에 충돌하는 초음속 제트에 관한 연구", 한국추진공학회지, 제5권 제3호, 2001, pp.10-18
4. 이택상, "충돌제트의 유동특성에 관한 실험적 연구", 충남대학교 대학원 석사논문; 2000.
5. FLUENT 5.3 USER'S GUIDE, FLUENT Inc.
6. Carling, J.C. and Hunt, B.L., "The Near Wall Jet of a Normally Impinging, Uniform, Axisymmetric, Supersonic Jet," Journal of Fluid Mechanics, Vol.66, 1974, pp. 159-176
7. Kalghatgi, G.T. and Hunt, B.L., "The Occurrence of Stagnation Bubble in Supersonic Jet Impingement Flows," Aeronautical Quarterly, Vol. 27, 1976, pp.169-185