論文

원뿔에 충돌하는 초음속 제트에 관한 연구

박종호*, 이택상**, 김윤곤***

A Study of Supersonic Jets Impinging on Axisymmetric Cone

Jong-Ho Park*, Teak-Sang Lee** and Yoon-Gon Kim***

ABSTRACT

In this paper, supersonic jets impinging on axisymmetric cone were investigated to obtain fundamental design data for jet deflector; case of example being VTOL/STOL or rocket launch. It was of interest to study flow phenomena such as shock interactions and separation induced by shear layer. Experiments were conducted to obtain schlieren flow visualization and measurement of surface pressure. Numerical results are compared with the experimental result. The dominant feature of the flow is the shock pattern induced by the interaction between the cone shock and the barrel shock. This pattern can take a wide variety of forms depending on the structure of the free jet and strongly influences the form of the surface pressure distributions.

초 록

수직 이착륙기나 로켓 등을 발사시킬 때 사용되는 제트 편향기 설계를 위한 기초 자료를 얻기 위해 축대칭 원뿔에 충돌하는 초음속 제트에 대한 연구를 수행하였다. 본 논문에서는 충격파 간섭 또는 전단층에 의한 박리 등과 같은 유동 현상을 분석하기 위해 쉬리렌 장치를 이용한 유동가시화, 표면압력분포 등을 측정하였으며, 수치해석을 통해 실험결과와 비교, 검증하였다. 유동은 원뿔 충격파와 배럴 충격파 사이에서 간섭으로 인해 발생하는 충격파 패턴이었으며, 자유제트의 구조에 따라 다양한 형상을 나타내며 표면압력분포에 크게 영향을 미친다.

Key Words : Impinging Jet(충돌제트), Underexpansion Ratio(과소 팽창비), Shock Interaction(충격파 간섭), Jet Deflector(제트 편향기), Nozzle(노즐)

1. 서 론

고체 표면에 충돌하는 초음속 제트의 간섭 현상들은 다단 로켓, VTOL/STOL 등 공학 분야에서 많이 일어난다. 이 때 발생하는 충격파 간섭과 전단층에 의한 박리 등의 유동 현상에 대한 연구가 활발히 진행되어 오고 있다.

수직평판에서의 충돌제트에 대한 연구는 Gummer[1], Gubanov[2], Kalghatgi[3], Lamont[4] 등에 의하여 수행되었으며 또한 썬이나 경사진 평판에 충돌할 경우에 대해 Hunt[5-6] 박 등[7]에 의하여 진행되어 왔다. 썬이나 경사평판의 경우는 복잡한 3차원 유동장이 형성되나 실험과 수치해석을 통하여 규명되어 오고 있다. 그러나 원뿔에 대한 연구들은 모델 제작의 복잡성 및 실험의 어려움으로 인해 연구가 미흡한 실정이다.

따라서 본 논문에서는 원뿔에 충돌하는 제트의 유동장 특성을 규명하기 위해 쉬리렌 장치를 이용한 유동가시화와 표면에서의 압력을 측정 고

† 2003년 3월 6일 접수 ~ 2003년 4월 29일 심사완료

* 정회원, 충남대학교 기계공학과
연락처, E-mail : jhpark@cnu.ac.kr

대전시 유성구 궁동 220번지

** 정회원, 충남대학교 기계공학과 대학원

*** 정회원, 국방과학연구소

Nomenclature

D_e = Nozzle exit diameter	P_c = Jet stagnation pressure
D_t = Nozzle throat diameter	P = Gage pressure
Pr = Prandtl Number	k = Thermal conductivity
R_e = Nozzle exit radius	PR = Underexpansion ratio (nozzle exit pressure/atmospheric pressure)
Z_n = Distance between nozzle exit and Apex point	S = Perpendicular distance from the apex measured along the wedge surface
γ = Specific heat ratio	
C_p = Specific heat or gas constant	

찰하였으며 수치연구를 수행하였다. 본 연구 결과는 로켓 등이 발사될 때 사용되는 축대칭 제트 편향기와 산업현장에서 냉각시스템 설계 등에 유용한 자료로 활용될 수 있을 것이다.

II. 실험장치 및 방법

원뿔에 충돌하는 초음속 제트 시험은 자체 제작한 초음속 유동장치를 이용하였으며 시험 시간은 약 2초이었다[8].

노즐은 축소부 반각 22° , 확대부 반각 7° , 출구 직경 $13mm$, 설계 마하수 2.0인 드라발 노즐을 이용하였다. 노즐 출구에서의 정압과 대기 압과의 비인 과소 팽창비(PR)는 1.20, 1.70, 2.27로 변화하면서 작동을 하며, 노즐 출구로부터 원뿔의 꼭지점(Apex point)까지 거리는 노즐 출구 직경의 1~3배로 변화시켰다.

원뿔의 꼭지각(Apex angle)은 90° 로 하였으며 베이스 길이는 끝단(Edge) 영향을 피하기 위해 노즐 출구 직경의 5배로 제작하였다. 원뿔은 이송 장치에 설치하고 지지대는 이송 장치와 모델 사이에서 발생할 수 있는 간섭을 없애기 위해 제트의 영향이 전혀 없도록 제작하였다. 내경 $1mm$ 의 압력 홀은 꼭지점으로부터 $2mm$ 떨어진 곳에서부터 $3mm$ 간격으로 제작하였다. 이는 압력 홀 상호간의 간섭을 피하기 위한 것과 유동해석을 통한 특정 지점의 압력을 확인하기 위한 것이다. 원뿔의 기하학적인 형상과 좌표는 Fig. 1에 나타내었다. 각각의 압력 홀에는 $1/16$ 인치 스테인레스 관으로 연결하고, 관에는 $30kg_f/cm^2$ 용 압력 센서(Sensys PMHB0130KAAB)를 설치하였다. 각 압력센서에서 출력된 신호들은 A/D 변환기를 거쳐 초당 1000개씩 데이터를 PC에 수집하여 평균값을 취하였다. 유동장 가시화는 할로젠 연속 광원의 쉬리렌 장치를 이용하였다.

Fig. 1. Sketch of experimental set up and location of pressure holes

III. 유동해석

유동해석은 실험결과와의 비교, 검증을 위해 수행하였다.

원뿔 주위의 유동장을 해석하기 위해 FLUENT 5.3을 이용하였으며 3차원 압축성 난류, 정상 유동으로 해석하고, 이때 난류 유동장은 표준 $k-\epsilon$ 모델을 이용하였다.

경계조건으로는 입구 경계, 충돌되는 원뿔 및 노즐 벽면에서의 벽면 경계, 유동이 충돌된 후 유출되는 출구 경계로 구성된다. 입구 경계는 챔버 내에서의 유동을 Table 1과 같이 전압력으로 주어졌으며, 출구 경계는 정압을 일정하게 압력을 제외한 유동변수는 내부유동 영역으로부터 외삽하였다. 벽면 난류경계조건은 벽함수를 사용하여 벽면근처의 격자수를 줄였으며 벽면에서의 속도는 0으로 하였다.

Fig. 2. Grid structure

Table 1. Inlet boundary conditions

PR	Inlet pressure (kg_f/cm^2)	Inlet Temperature (K)
1.2	9.39	300
1.7	13.30	300
2.27	17.76	300

Fig. 2에 보인바와 같이 다중 격자(4개 블록)의 경계조건을 나타내며 충격파가 형성되는 원뿔 주위에는 격자를 밀집시켰다. 충돌된 제트가 충분히 발달되어 대기압까지 압력을 회복할 수 있도록 원뿔의 길이 방향 거리는 노즐 출구 직경의 10배로 하였다.

원뿔 표면에서의 유동구조 및 등 압력분포를 확인하기 위해 3차원 축대칭으로 계산하였으며, 격자는 1/4만 구성하였고 $Z_n/D_e=1$ 일 때 셀의 수는 약 13만개이다. 유동해석에서 기체는 공기로 가정하고, 점성계수는 Surtherland law를 이용하였으며 $\gamma=1.4$, $P_r=0.7$, $k=0.0242(\text{w/mK})$, $C_p=1006.43(\text{J/kgK})$ 로 하였다.

IV. 결과 및 고찰

Fig. 3은 $PR=1.7$ 일 때 자유제트의 쉬리렌 장치를 이용한 가시화 사진과 유동해석의 밀도 등분포를 비교, 도시한 것으로 초음속 제트가 충돌하는 원뿔 주위의 유동장은 자유 제트의 구조에 따라 영향이 크다. 자유제트의 전형적 구조인 노즐 출구에서의 팽창파, 제트 경계면, 배럴 충격파, 마하 디스크, 삼중점(Triple point)이 형성됨을 확인할 수 있었다. 또한 노즐 출구면으로부터 첫 번째 마하 디스크까지의 거리는 대략 $2.18D_e$ 이었다.

Fig. 4~6에는 노즐 출구로부터 원뿔 꼭지점까

지의 거리에 따라 가시화 사진 및 표면압력분포를 나타내었다. 자유제트의 경우와 달리 빛의 굴절 및 혼합효과로 인해 자세한 이미지는 얻을 수 없었으나 원뿔 충격파(Cone shock)의 상부 유동장은 자유제트의 유동장과 다소 유사하게 나타났다. 원뿔 표면에서의 압력은 시험 챔버 압력에 대해 무차원화 하였고, 표면에서 압력 공의 위치는 노즐 출구 반지름에 대해 무차원화 하였다.

Fig. 4의 $Z_n/D_e=1$ 일 때 가시화 사진에서는 PR변화에 관계없이 원뿔 충격파가 부착되어 나타나고 있다. 또한 PR이 증가하면 제트 경계면이 더 확장되고 노즐의 출구에서 팽창되어 가속을 하던 제트가 원뿔에 충돌하여 발생한 충격파는 원뿔표면에 더 가까이 부착하였다. 표면압력분포는 실험결과와 유동해석결과가 잘 일치하였다. 충격파가 꼭지점에 부착되어 있기 때문에 실험에서는 정체점에서 압력측정이 불가능하지만 해석결과를 통해 유추할 수 있었다. 원뿔 충격파로 인해 꼭지점 하부영역 $S/R_e \approx 0.1$ 까지 압력 상승이 일어난다. 원뿔 충격파 하부에서 유동은 아음

Fig. 3. Free-Jet Picture (PR=1.7)

Fig. 4. Shadowgraphs and surface pressure distributions($Z_n/D_e=1$)

Fig. 5. Shadowgraphs and surface pressure distributions($Z_n/D_e=2$)

Fig. 6. Shadowgraphs and surface pressure distributions($Z_n/D_e=3$)

속을 이루며 배럴 충격파와 원뿔 충격파가 상호 간섭을 일으켜 삼중점을 형성하고 그 점에서 반사 충격파가 형성되어 표면에 충돌하면서 두 번째 최대 압력을 발생시켰다. 그 위치는 시험 챔버 압력 차이로 인해 PR=1.7에서는 $S/R_e \approx 1.0$, PR=2.27에서는 $S/R_e \approx 1.2$ 이었다. 그 이후 제트는 원뿔 표면 하부로 유동을 진행하면서 각각

[3]. 하지만 원뿔의 경우에는 이 영역에서 재순환 영역이 형성되지 않기 때문에 정체버블로 인한 것으로 판단되지 않는다. 좀더 정확하게 분석하기 위해 Fig. 7 유동해석 결과인 Mach No. Contour를 고찰하여 보면 이 지점($S/R_c \approx 1.6$)이 초음속과 아음속 유동의 경계가 된다. $PR=1.2$ 에서는 꼭지점에서 $P/P_c \approx 0.55$ 로 높은 회복율을 보인다. 이와 같은 이유는 유동가시화에서도 나타났듯이 제트가 반사 충격파를 통해 압력회복을 한번 이룬 후 원뿔에 충돌하여 그 회복율이 커지기 때문이다. $Z_n/D_c=1$ 때처럼 제트는 표면을 따라 유동을 진행하면서 초음속을 이루며 외부영역에서의 기체와 만나 재 압축영역을 형성하게 된다. 그 위치는 PR 에 대해 각각 $S/R_c \approx 3.2, 4.2, 5.0$ 이다.

Fig. 6은 $Z_n/D_c=3$ 일 때 $PR=1.2$ 에서 원뿔의 꼭지점이 자유제트의 두 번째 충격파 셀 내에 위치한 경우이다. 이 경우는 난류혼합의 영향이 강하게 나타나며 $S/R_c \approx 0.7$ 에서 압력이 증가하는 현상이 나타난다. $PR=1.7$ 일 때는 $PR=1.2$, $Z_n/D_c=2$ 와 동일한 충격파의 구조를 이루고 있으며 압력분포도 매우 유사하게 나타난다. $PR=2.27$ 일 때는 원뿔 꼭지점 상부에서 이탈된 수직 충격파 형태의 원뿔 충격파가 형성되었으며 이 충격파로 인한 영향이 압력분포에 나타난다. 압력은 꼭지점에서 하부로 이동함에 따라 $S/R_c \approx 1.2$ 까지 점점 상승하는데 이것은 내부와 외부 사이에서 발달된 전단층 때문으로 판단된다 [5]. 또한 $Z_n/D_c=1, 2$ 일 때와 원뿔 표면에서는 노즐 출구 지점인 $S/R_c \approx 1$ 에서 급격한 압력의 하락현상이 나타난다.

(a) $Z_n/D_c=1$ (b) $Z_n/D_c=2$ Fig. 9. Pressure contours($PR=2.27$)

Fig. 8~9는 원뿔 표면에서의 3차원 효과를 분석하기 위한 유동해석 결과의 등 압력분포와 표면에서의 압력분포를 나타낸 그림이다. Fig. 8은 $PR=1.2$ 일 때 등 압력분포에서 (a)의 경우 꼭지점 주변영역에서 높은 압력영역과 재 압축파로 인한 압력상승 영역이 잘 일치하게 나타난다. (b)는 꼭지점 주변의 높은 압력영역이 더 확장된 것을 알 수 있다.

Fig. 9는 $PR=2.27$ 일 때 (a)의 경우 원뿔 충격파와 반사 충격파의 간섭으로 발생한 충격파가 제트 경계면에 부딪혀 다시 표면에 반사되어 압력이 높게 나타나고 있다. (b)의 그림에서는 꼭지점으로부터 일정 거리 떨어진 지점까지 압력분포가 일정하게 나타나고 있으며 이에 대한 원인은 앞서 설명한 바와 같이 배럴 충격파와 원뿔 충격파가 만나는 삼중점에서 발생한 충격파(Tail shock) 경계 내 아음속 유동($M=0.25$) 영역이기 때문이다.

IV. 결 론

축대칭 원뿔에 충돌하는 초음속 제트에 대한 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. $PR=1.2$, $Z_n/D_c=2$ 일 때 $S/R_c \approx 0.3$ 에서 배럴 충격파가 서로 합착하여 원뿔에 충돌하였기 때문에 $P/P_c \approx 0.6$ 정도의 가장 높은 압력 회복율을 보인다.
2. 표면에 충돌하는 충격파와 팽창파 때문에 급격한 압력 변화가 발생하며, 수직 충격파 하부에서는 제트의 내부와 외부 영역 사이에서 혼합에 의한 영향이 크다.
3. 원뿔 충격파가 꼭지점에서 이탈 또는 부착되는 것은 자유제트의 구조에 의해 나타나며, 특히 배럴 충격파의 강도가 크게 영향을 미친다.
4. 동일한 과소 팽창비, 거리조건에서 수직평판과 비교하였을 때 표면에서의 압력값이 대체적으로 작게 나타나며 유동의 불안정이 발생하지 않았다. 따라서 본 연구에서 얻은 압력분포에 대한 결과들은 추후 공기역학적, 구조설계에 유용한 자료로 활용할 수 있을 것이다.

참고문헌

1. J. H. Gummer and B. L. Hunt, "The impingement of uniform axisymmetric

supersonic jet on a perpendicular flat plate, *Aeronautical Quarterly*, Vol. 22, 1971, pp.403~420.

2. O. I. Gubanova, V. V. Lunev and L. N. Plastinina, "The central breakaway zone with interaction between a supersonic under-expanded jet and a barrier, *Fluid Dynamics*, Vol. 6, 1974, pp.298~301.

3. 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.

4. 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.

5. I. K. Jennions and B. L. Hunt, "The Axisymmetric Impingement of Supersonic Air Jets on Cones.", *Aeronautical Quarterly*, Vol. 31, 1980, pp.26~41.

6. P. J. Lamont and B. L. Hunt, "The

Impingement of Underexpanded Axisymmetric Jets on Wedges." *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 76, 1976, pp.307~336.

7. 이택상, 정조순, 신완순, 박종호, 김윤곤, "제트 편향기에 충돌하는 초음속 제트에 관한 연구, *한국추진공학회지*, 제5권, 제3호, 2001, pp. 10~18.

8. 이택상, 신완순, 박종호, 김윤곤, "충격파 간섭에 따른 초음속 충돌제트의 실험 연구", *한국항공우주학회지*, 제29권, 제4호, 2001, pp.1~7.

9. Kyoung-Ho Kim and Keun-Shik Chang, "Three-Dimensional Structure of a Supersonic Jet Impinging on an Inclined Plate.", *Journal of Spacecraft and Rockets*, Vol. 31, No. 5, 1994, pp.778~782.

10. 이택상, 신완순, 이정민, 박종호, 김윤곤, "평판 위에 충돌하는 초음속 파소팽창 제트에 관한 실험적 연구.", *한국추진공학회지* 제3권 3호, 1999, pp.53~61.

11. 이택상, "충돌제트의 유동특성에 관한 실험적 연구.", *충남대학교 대학원 석사논문*, 2000.