

탭의 방향과 노즐내부 표면 거칠기가 초음속제트 유동장에 미치는 영향의 비교에 관한 연구

진원진* · 조창권* · 이 열**

A Comparison of the Effect of Tabs-Direction and Surface Roughness of Nozzle Surface on Supersonic Jet Flowfields

Won-jin Jin*, Chang-kwun Cho* and Yeol Lee**

Key Words: Supersonic Jet (초음속제트), Supersonic Nozzle (초음속노즐), Supersonic Mixing Enhancement (초음속 혼합증대), Nozzle Tab (노즐탭), Vortices (와류).

Abstract

The effects of vortex generators, in the form of small tabs projecting into the flow at the axisymmetric supersonic nozzle exit and triangular thin tapes attached on the inner surface at the nozzle exit, on the characteristics of supersonic mixing enhancements are experimentally investigated. Delta-shaped tabs as small as 1% of the nozzle exit area produce strong counter-rotating vortices, and is found to produce significant effects on the jet flowfield downstream of the nozzle. The effects is larger on the under-expanded cases than over- and perfect-expanded cases. Nozzle inner surface roughness also can do a role of centerline pressure decay for highly under-expanded jet cases. The effects of the angle of tabs with respect to flow direction are also investigated.

기호설명

- M : 마하수
- P_t : 노즐내 전압
- P_{t0} : 피토투관 전압
- T_t : 노즐내 전온도
- t : 테이프 두께
- r : 노즐중심으로부터 반경방향의 거리
- θ : 탭의 설치방향과 축방향이 이루는 각도
- k : 노즐내부 표면 거칠기
- D : 노즐 내경
- X : 노즐출구로부터 중심축방향의 거리
- \dot{m} : 측정점에서의 질량유량
- \dot{m}_e : 노즐출구에서의 질량유량
- Theta C : 원주방향 각도

1. 서론

초음속 제트유동의 혼합현상에 관한 연구는 제트엔진의 소음을 줄이고 이러한 엔진의 보다 효과적인 추진을 위한 설계에 매우 중요하다. 고속 비행체의 air-breathing 엔진의 연소효율은 연소실내 연료와 산화물의 혼합정도에 따라 크게 좌우된다. 그러나 일반적으로 초음속 mixing-layer의 혼합정도는 그 유동의 압축성이 높아질수록 떨어지는 것으로 보고되고 있다.⁽¹⁾ 따라서 제트노즐 출구의 기하학적 형상을 변화시키거나 노즐내부나 외부에 탭이나 기타 돌출부 (protuberance)등을 설치함으로써 제트 유동장의 혼합증대 (mixing enhancements)를 유도하는 많은 연구가 진행되어 왔다. 그 예로 축대칭 노즐보다는 비축대칭 노즐의 경우가 혼합에 더 효율적이라는 연구결과⁽²⁾⁻⁽⁴⁾ 등을 비롯하여 노즐출구에 설치된 작은 탭으로 인하여 나타나는 counter rotating vortices의 역할

* 한국항공대학교 대학원 항공공학과

** 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과

에 관한 연구⁽⁵⁾⁽⁷⁾등이 있다. 그러나 그 동안 대부분의 연구들은 실험적 어려움 때문에 제트 중심축을 따라 나타나는 속도변화로써 전체 제트유동장의 혼합도를 평가하여 왔으며, 이는 경우에 따라서는 잘못된 결론을 유도시킬 수 있다. 본 연구에서는 초음속 축대칭 제트 (axisymmetric circular free jet)의 노즐 출구에 두 개의 삼각형 탭을 원주방향 180도 각도사이에 설치하고 이러한 탭이 유동방향과 이루고 있는 각도를 변화시켰을 때 나타나는 제트와 주변 유동장과의 혼합정도의 차를 실험적으로 측정해 보았고, 아울러 노즐 출구 내부표면에 각각 60도 간격의 얇은 두께의 테이프를 부착하여 변화된 노즐표면의 거칠기 (roughness)가 제트의 혼합에 미치는 영향을 알아보았다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 초음속제트발생장치

본 연구에서는 한국항공대학교 고속공기역학 실험실 (HAUGDL)의 초음속제트발생장치가 사용되었다. Fig. 1에 나타난 바와 같이 제트발생 장치는 다음과 같은 주요 부분으로 이루어져 있다. 실험실 외부에 설치된 고압용 공기압축기 (명수리 MS-2(C))는 2단계로 약 25atm까지 공기를 압축시킬 수 있으며 압축된 공기는 cooler와 3단계의 필터를 통과하여 공기저장탱크로 보내어진다. 공기저장탱크의 크기는 3 m³이며, 역시 25atm까지 공기저장이 가능하다. 탱크의 압축된 공기는 파이프를 통하여 실험실 내부에 설치된 압력 조절기를 거치며, 압력조절기 전후에는 각각 압력과 온도를 측정할 수 있는 센서가 부착되어 있다. 미리 세팅된 압력으로 압력조절기를 통과한 공기는 파이프 출구에 위치한 노즐을 통하여 실험실내로 유출된다. 축대칭 converging-diverging 노즐은 MOC (Method Of Characteristic)방법을 이용하여 설계 제작되었다. 네 개의 서로 다른 노즐이 제작되어 제트마하수(Mach number)를 1.0, 1.5, 2.0, 2.5로 조절할 수 있으며, 이때 노즐출구 직경을 기준한 레이놀즈수는 7.8E+5 ~ 5.4E+6의 범위에 있다. 이때 노즐출구의 내경은 출구마하수 1.0노즐은 20 mm 이고 나머지는 모두 26 mm 이다.

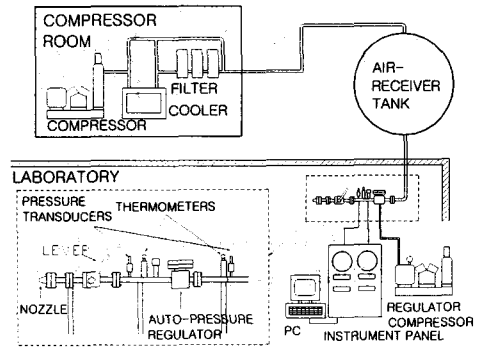


Fig. 1 Schematic of the Supersonic Jet Testing Facility in the HAUGDL.

2.2 유동가시화와 피토우관 압력측정

두 개의 spherical mirror (직경 130 mm, focal length=1000 mm)와 두 개의 광학거울을 사용한 변형된 Z-type Schlieren 장치를 이용하여 제트유동장의 가시화가 이루어졌다. 이때 사용된 광원은 연속적인 (continuous), tungsten filament (100 W)이며, horizontal knife edge가 응용되었다.

유동장내의 전압을 측정하기 위한 초음속용 피토우관이 제작되어 3축 이송장치에 부착되어 사용되었으며, 이때 사용된 피토우관의 측정부 내경과 외경은 각각 0.5 mm와 2 mm 이다.

2.3 탭의 설치

노즐출구에 위치한 탭은 삼각형 모양으로 제작되었으며 (밑변 2.5 mm, 높이 3 mm 두께 1 mm), 노즐출구 상하부에 원주방향 180도 간격으로 두 개가 설치되었다. 한 개의 탭에 의하여 막히는 (blocking) 면적은 노즐 출구면적의 약 1%에 해당된다. 현재 본 연구에서 노즐출구에서의 경계층 두께의 정확한 측정은 불가능하나, 연구에 사용된 탭의 높이는 노즐출구에서의 경계층 두께보다 클 것으로 추측된다. Fig. 2에 나타난 바와 같이 각 탭은 유동방향에 대하여 두가지 서로 다른 방향 ($\theta=90, 135$ 도)으로 설치되어 그 방향변화가 유동장에 미치는 영향이 평가되었다.

2.4 테이프의 설치

노즐 내부표면에 작은 돌출부 (protuberance)를 설치했을 때 나타나는 유동장 변화를 살펴보기 위하여 앞

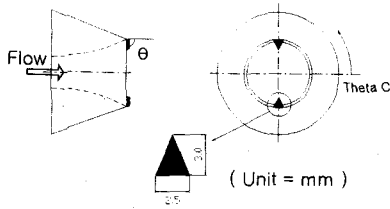


Fig. 2 Installation of 2 tabs at the nozzle Exit.

은 메탈테이프가 노즐출구 내부표면에 부착되었다. 테이프는 밀변 3 mm, 높이 7 mm, 꼭지각 20도인 삼각형 모양으로 제작되었으며 노즐출구 주위에 원주방향으로 60도 간격으로 6개가 설치되었다 (Fig. 3 참조). Novopashin과 Perepelkin⁽⁸⁾은 $k/D \geq 0.0013$ 이면 초음속제트 유동장에서 충분히 streamwise vortices를 형성할 수 있다고 하였고, 본 실험의 경우 두께가 얇은 테이프 ($t=0.12\text{mm}$)의 경우에는 $k/D=0.004$ 이고, 두께가 두꺼운 테이프 ($t=0.48\text{ mm}$)의 경우에는 0.018이다.

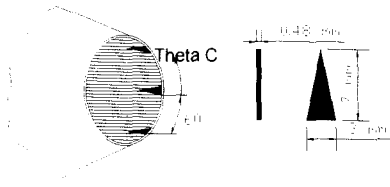


Fig. 3 Installation of tape elements.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 유동가시화의 결과

다음 Fig. 4에는 제트마하수 2.0인 노즐에 탭과 테이프의 설치에 따른 제트유동장의 변화가 완전 팽창 (그림좌단, $P_1=7.8\text{atm}$)과 과소팽창 (그림우단, $P_1=9.6\text{atm}$)일 경우에 대하여 가시화된 결과가 서로 비교되어 있다. 영상을 통한 제트경계의 확산 비교는 불가능하였지만, 탭을 설치하였을 때 매우 복잡한 wave structure가 제트후방에서 나타나고, 제트유동내 wave 변화는 상류의 노즐내부에서부터 시작되는 것을 알 수 있는데, 이는 탭의 상류에서 나타나는 충격파와 경계층의 간섭현상의 영향이 상당히 크며, 아울러 경계층을 통한

압력전달이 노즐내부의 상류쪽으로 발생함에 기인한다고 판단된다. 특히 이러한 간섭현상으로 인한 충격파는 과소팽창의 경우 더 강하고 확연하게 나타남을 알 수 있다. 테이프가 설치된 경우, 노즐상류에서부터 유동장내 wave의 변화가 나타나지만 탭의 경우보다 충격파의 강도가 비교적 약함을 볼 수 있고, 제트경계의 벌어지는 정도도 적은 것으로 판단된다. 그림에는 나타나 있지 않지만 과대팽창의 경우도 경향은 비슷하게 나타났다.

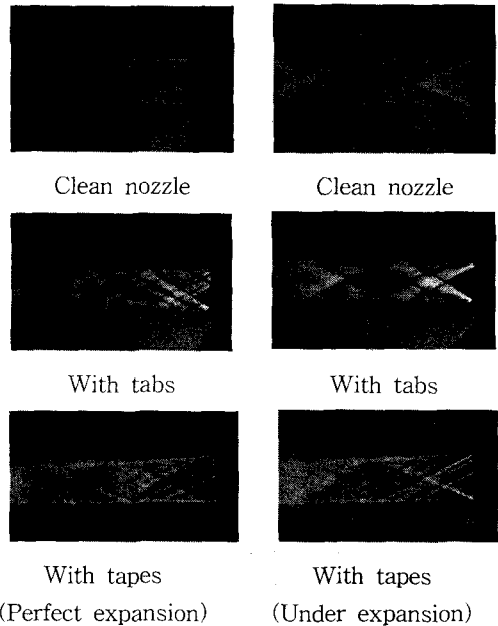


Fig. 4 Schlieren pictures of supersonic jets.

3.2 질량유량 (mass flow rate) 측정 비교

탭에 의한 후방 제트유동장의 변화는 매우 복잡하기 때문에, 유동장의 혼합정도를 보다 정확하게 비교하기 위하여 피토우관을 이용한 제트경계내 질량유량이 측정 비교되었다. 이때 측정지점은 초음속 영역에서 발생하는 충격파와 속도벡터 및 정압변화로 인한 오차를 줄이기 위하여 유동장내 음속지점 후방영역에 한정하였다. 이 경우 유동장의 정압은 대기압으로, 속도벡터의 방향은 제트중심축과 나란하다고 가정하였다. 탭이 설치된 경우가 무설치 경우 (clean)와 비교하여 가장 큰 유동변화를 보였던 과소팽창 (노즐마하수=2.0, $P_1=9.6\text{atm}$)의 경우에 대하여 실험이 수행

되었다. 유동장의 제트경계 (jet boundary)는 측정 지점에서의 피토우압력이 유동장 음속지점 (sonic point) 속도의 3%에 해당하는 1.002atm으로 측정되는 지점을 제트경계로 정하였다. 다음 Fig. 5에서는 노즐후방 지점에서의 제트경계내 질량유량 (\dot{m})의 변화가 나타나 있다. 실험결과는 노즐출구 질량유량 ($\dot{m}_e = 0.637 \text{ kg/sec}$)에 대하여 무차원화 되었으며, 질량유량은 유입현상 (entrainment)으로 인하여 제트하류방향으로 증가함을 볼 수 있다. 또한 탭이 있는 경우가 없는 경우와 비교하여 질량유량이 크고 아울러 하류방향으로 증가하며, 동일한 위치 ($X/D=20$)에서 측정된 질량유량의 경우, 탭이 있을 때 없는 경우보다 약 60% 정도의 질량유량 증가를 보이고 있다.

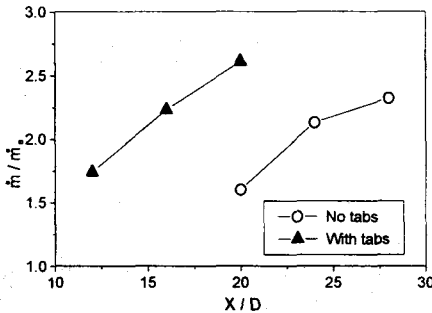


Fig. 5 Comparison of mass flux inside the jet boundary along the centerline

3.3 중심축에서의 피토우 압력변화

앞서 제시된 질량유량 측정은 정확한 혼합정도를 평가할 수 있는 장점이 있는 반면 측정점이 많아 많은 실험시간이 소요되는 단점이 있다. 이에 마하수 2.0노즐에서 제트가 완전팽창과 과소팽창되는 두 가지 조건에서 탭이 설치된 경우와 얇은 테이프 (두께=0.12 mm)가 설치된 경우의 제트 중심축을 따른 피토우 압력변화가 clean 노즐 (탭과 테이프 무부착) 경우와 서로 비교되었다.

Fig. 6은 완전팽창의 경우를 나타내는데, 두 개의 탭이 설치된 경우 중심축을 따른 압력감소가 clean 노즐 경우보다 크게 나타나며 이는 탭의 영향으로 제트의 경계의 벌어짐이 커지며 따라서 혼합도 증가함을 의미한다. 아울러 이와 비슷한 경향의 실험결과가 Zaman⁽⁵⁾에 의하여 보여진 바 있다.

유동장 내 국부 (local)마하수가 1.0이 되는 음속 지점 (sonic point)은 탭 설치의 경우 약 $X=11D$ 로, clean 노즐의 경우는 약 $X=16D$ 로, 나타나 탭의 설치로 이 위치가 노즐출구 쪽으로 당겨짐을 알 수 있다. 테이프가 설치된 경우는 음속지점이 clean 노즐 경우보다 조금 앞으로 당겨지나 압력 감소현상은 큰 차이를 보이지 않고, 노즐출구 근처에서의 압력진동현상도 거의 비슷한 경향으로 나타남을 볼 수 있다.

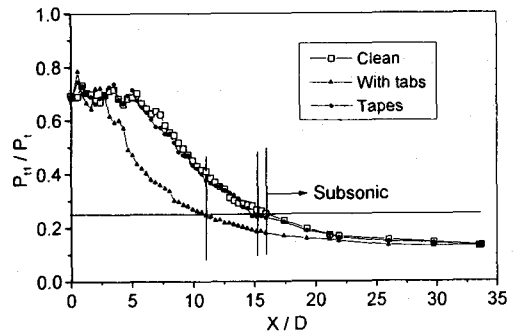


Fig. 6 Comparison of the pitot pressure variation along the jet line ($P_t = 8.2 \text{ atm}$, $T_t = 290 \text{ K}$).

다음 Fig. 7은 같은 노즐에서 과소팽창 ($P_t = 9.6 \text{ atm}$, isentropic expansion을 가정했을 때 노즐출구 마하수는 2.13)의 경우로써 음속지점은 탭이 설치된 경우는 약 $X=12D$ 로 나타나 clean 노즐의 경우 ($X/D=20$)와 비교하여 음속지점의 감소가 확연함을 알 수 있다. 제트중심축에서의 압력변화도 크게 감소함으로써 과소팽창의 경우가 탭의 설치로 인한 제트혼합증가현상이 더 민감하게 나타남을 알 수 있다.

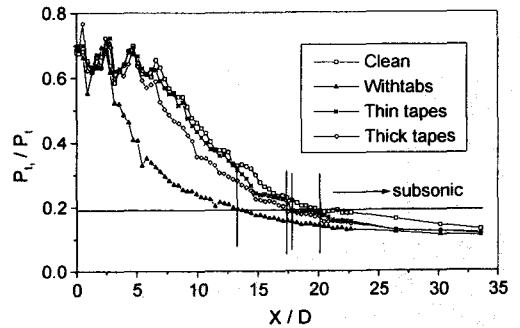


Fig. 7 Comparison of the pitot pressure variation along the jet line ($P_t = 9.6 \text{ atm}$, $T_t = 290 \text{ K}$).

테이프의 경우는, 두꺼운 두께 ($t=0.48$ mm) 경우도 포함하여 실험한 결과, 두꺼운 경우와 얇은 경우 모두 탭의 설치 경우보다 음속지점감소 및 축방향 압력감소는 미미하지만, 두꺼운 테이프의 경우가 그 감소 폭이 얇은 경우와 비교하여 크므로 노즐내부의 표면거칠기가 제트혼합증가에 영향을 나타냄을 알 수 있다.

3.4 탭의 설치각도의 영향

Fig. 2에 나타난 탭의 설치각도가 유동전방으로 구부러져 있을 때 ($\theta = 135^\circ$) 나타나는 유동장 변화가 비교되었다. 다음 Fig. 8에는 제트가 과대팽창될 때 ($P_1 = 5.3\text{atm}$), $\theta = 90^\circ$ (좌측그림)인 경우와 $\theta = 135^\circ$ (우측그림)인 경우 각각 나타나는 Schlieren 영상이 서로 비교되어 있다.

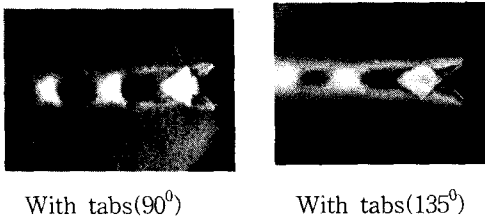


Fig. 8 Schlieren pictures for different tab angles. (overexpansion, $P_1 = 5.3\text{atm}$, $T_1 = 290\text{K}$)

노즐안으로 구부러진 ($\theta = 135^\circ$) 탭의 끝에서 발생하는 새로운 secondary vortices의 영향으로 노즐출구에서의 제트경계가 $\theta = 90^\circ$ 인 경우에 비하여 약간 밖으로 벌어지며, 강한 Mach disc는 나타나지 않는다. 아울러 waves의 반사로 인한 diamond cells의 사이거리도 더 벌어지고 있다.

아울러 Fig. 9에 나타난 노즐출구 제트중심축에서의 피토우 압력강하에서 (과소팽창, $P_1 = 9.6\text{atm}$), $\theta = 135^\circ$ 탭의 경우는 $\theta = 90^\circ$ 경우보다 완만하다가 sonic point 후방에 이르러 거의 비슷하여짐을 알 수 있다.

3.5 원주방향의 압력변화

탭설치시 제트의 팽창정도에 따른 현상차이는 노즐출구 탭 주위로 나타나는 압력구배 영향과⁽⁶⁾, 제트가 과소팽창 되었을 때 제트경계가 굽어짐으로 (concave curvature) 원주방향으로 발생하는 작은 streamwise vortices (Taylor-Goertler vortices⁽⁹⁾)의 존재 때문으로 판단된다. 이러한 작은 streamwise

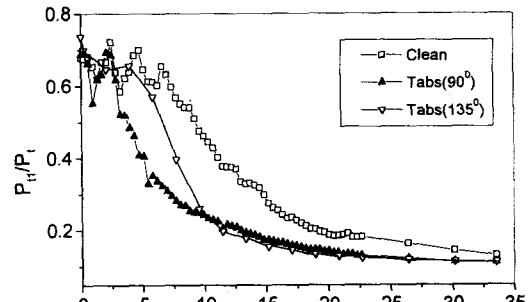


Fig. 9 Comparison of the pitot pressure variation along the jet line ($P_1 = 9.6\text{atm}$, $T_1 = 290\text{K}$).

vortices와 탭과 테이프 후방에서 발생하는 보다 큰 vortices와의 간섭관계는 매우 복잡하며 현재까지 지속적인 연구가 진행되고 있다.

이러한 연구의 한 방향으로 다음 Fig. 10에 테이프가 설치된 경우, 마하수 1.5노즐과 2.0노즐 (모두 전압=9.6atm, 과소팽창)을 각각 사용하여 streamwise vortices에 의한 노즐후방 원주방향의 피토우 압력변화가 나타나 있다. 여기서 ΔP 는 원주방향의 측정압력과 측정압력을 평균한 평균압력과의 차이를 나타낸다. 측정위치는 1.5노즐의 경우 노즐출구와 Mach disk 사이인 $X=1.4D$ 로 (Fig. 11 참조), 2.0노즐의 경우는 $X=1.0D$ 로 (모두 반경방향으로는 $r/D=0.55$) 정하였다. 이때 P_1/P_2 (P_1 : 완전팽창시 노즐설계전압, P_2 : 실험압력 = 9.6atm)의 값이 마하수 1.5 노즐 경우는 2.5로, 마하수 2.0 노즐의 경우는 1.2로 나타나 마하수 1.5 노즐이 보다 강한 과소팽창을 보이게 된다. 두 가지 실험의 차이를 더 확연히 하기 위하여 각 경우에 설치된 테이프의 두께도 달리하였다 (마하수 1.5: $t=0.12\text{mm}$, 마하수 2.0: $t=0.48\text{mm}$). 즉 앞서 제시된 Fig. 7의 결과에 비추어 볼 때 두꺼운 테이프를 사용한 마하수 2.0 노즐의 경우가 테이프 하나만의 영향에 의한 와류의 강도는 보다 셀 것으로 판단된다.

Fig. 10에서 볼 수 있듯이 원주방향 압력변화는 두 노즐 모두 테이프가 설치된 60도 간격부근에서 최저압력을 나타내고, 그 사이는 최대압력을 나타내므로 테이프 주위에서 강한 vortices가 발생함을 알 수 있다. 이러한 두 노즐의 원주방향의 압력분포 경향은 비슷하지만 최고압력과 최저압력은 마하수 1.5노즐의 경우가 평균값보다 약

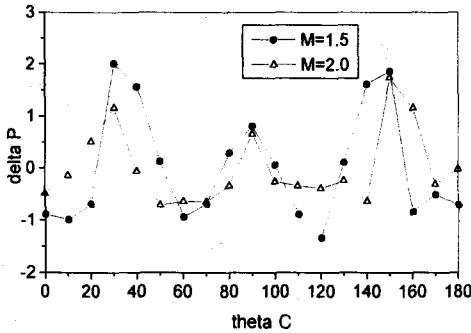


Fig. 10 Comparison of pressure variation with different nozzle ($P_t = 9.6\text{atm}$, $T_t = 280\text{K}$).

1.5atm 낮고 마하수 2.0노즐의 경우는 약 0.5atm 낮음을 알 수 있다. 결국 두꺼운 테이프를 사용한 마하수 2.0노즐에 비하여 최종 와류의 강도는 마하수 1.5노즐의 경우가 더 강하며, 결국 과소팽창의 강도가 streamwise vortices 강도에 더 큰 영향을 미침을 알 수 있다

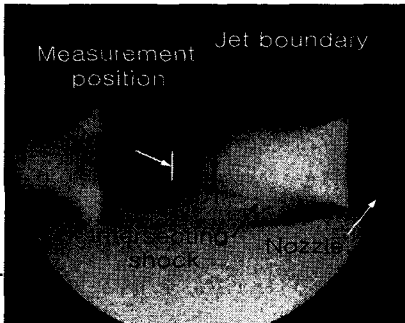


Fig. 11 Circumferential measurement of Pitot pressures ($M=1.5$ nozzle, $P_t=9.6\text{atm}$, $T_t=280\text{K}$)

4. 결론

본 연구에서는 축대칭 원형노즐 출구에 삼각형 형태의 작은 탭을 설치하고 그 설치각도를 변화시키고, 아울러 얇은 두께의 테이프를 노즐 내부에 설치하였을 때 나타나는 제트후방 유동장 변화를 피토우관 압력측정을 통하여 알아보았다.

과소팽창의 경우가 완전팽창과 과대팽창의 경우에 비하여 탭의 설치로 인한 제트혼합의 증가가 더 크게 나타남을 알 수 있었다. 아울러 작은 노즐내부 표면거칠기가 후방 유동장의 원주방향

으로의 큰 압력변화를 나타내며 이로서 작은 유동방향의 와류가 생성됨을 알 수 있었다. 그리고 과소팽창의 강도가 노즐 내부에 부착된 테이프의 두께보다 와류강도에 더 큰 영향을 미침을 알 수 있었다.

참고문헌

- (1) Papamoschou, D., and Roshko, A., "The Compressible Turbulent Shear Layer: Experimental Study," *J. of Fluid Mechanics*, Vol. 197, pp. 453-477, 1988.
- (2) Ho, C. M. & Gutmark, E., "Vortex induction and mass entrainment in a small aspect ratio elliptic jet," *J. of Fluid Mechanics*, Vol. 179, pp. 383-405.
- (3) Korthapalli, A., Baganoff, D., Karamcheti, K., "On the mixing of rectangular jet," *J. of Fluid Mechanics*, Vol. 107, pp. 201, 1981.
- (4) McCormick D. C. & Bennett, J. C., "Vortical and turbulent structures of a lobed mixer free shear-layer," *AIAA paper* 93-0219, 1993.
- (5) Zaman K. B. M. Q., "Spreading characteristics of compressible jets from nozzles of various geometries," *J. of Fluid Mechanics*, Vol. 383, pp. 197-228, 1999.
- (6) M. Samimy, Zaman, K. B. M. Q., M. F. Reeder, "Effect of Tabs on the Flow and Noise Field of an Axisymmetric Jet," *AIAA Journal*, Vol. 31, No. 4, 1993.
- (7) 조창권, 진원진, 이 열, "탭의 설치에 따른 축대칭 초음속 제트유동장의 변화에 관한 실험적 연구," 한국항공우주학회 '99 추계학술발표회 논문집, pp. 651-655, 1999.
- (8) Novopashin, S. A., and Perepelkin, A. L., "Axial Symmetry Loss of a Supersonic Preturbulent Jet," *physics Letters A*, Vol. 135, Nos. 4, 5, 1989, pp. 290-293.
- (9) Schlichting, H., *Boundary Layer Theory*, pp. 526-535, 7th edition, McGraw Hill, 1979.