대한기계학회 2001년도 추계학술대회논문집 B pp. 664~669 KSME 01F255

초음속 동축제트의 구조에 대한 외부 정체압력의 영향

김명종*· 우상우*· 이병은**· 권순범**

Effect of Outer Stagnation Pressure on Jet Structure in Supersonic Coaxial Jet

Myoung-Jong Kim, Sang-Woo Woo, Byeong-Eun Lee and Soon-Bum Kwon

Key Words: Supersonic Coaxial Dual Jet(초음속 동축제트), Mach Disk(마하 디스크), Annular Shock(환형 충격파), Underexpansion(부족팽창), Impact Pressure(충돌압력)

Abstract

The characteristics of dual coaxial jet which composed of inner supersonic nozzle of 26500 in constant expansion rate with 1.91 design Mach number and outer converging one with 40° converging angle with the variation of outer nozzle stagnation pressures are experimentally investigated in this paper. In which the stagnation pressure for the inner supersonic nozzle is 750kPa thus, the inner jet leaving the nozzle is slightly underexpanded. The plenum pressures of outer nozzle are varied from 200 to 600kPa. Flow visualizations by shadowgraph method, impact pressure and centerline static pressure measurements of dual coaxial jet are presented. The results show that the presence of outer jet affects significantly the structures and pressure distributions of inner jet. And outer jet causes Mach disk which does not appear for the case of single jet stream. As the stagnation pressure of outer jet increases, impact pressure undulation is severe, but the average impact pressure keeps high far downstream.

기호설명

p_b : 배압(=대기압)
p_{0i} : 내부노즐의 plenum 압력
p_{0o} : 외부노즐의 plenum 압력
p_{0c} : 제트 중심선에서의 충돌압력
p_i : 충돌전압
p_s : 정압
M_d : 설계 마하수
d_t : 내부노즐의 목직경
d_e : 내부노즐의 출구경
D_e : 외부노즐의 출구경
l : 내부노즐의 확대부 길이
r : 제트중심에서 반경방향 거리
x : 노즐 출구에서 축방향 거리
β : 외부노즐의 분사각

* 경북대학교 기계공학과 대학원
** 경북대학교 기계공학부

1. 서 론

최근 산업의 발달과 더불어 초음속 노즐은 보일러 전열관에서 전열효율이 높이기 위해 연소재를 제거하는 sootblower, 고온의 연소가스를 분사하여 분쇄· 건조하는 제트 버너, 전투기나 민간 항공기의 추진시스템 및 모재의 가공과 재료의 절단 등 광범위한 산업분야에서 사용되고 있다. 초음속 제트가 대기로 분사될 때, 노즐의 압력비에 따라 노즐출구에서 유동의 팽창정도는 달라지며, 분출되는 초음속 제트 내에서 복잡한 wave 시스템이 발생한다.(1) 즉, 노즐출구의 유동상태가 적정팽창된 경우를 제외하고 유동이 부족팽창 및 과팽창되는 경우 제트 유동 내에는 팽창파와 충

격파 및 마하 디스크 등이 발생하는 복잡한 제트 구조로 된다.

가스를 사용하여 모재의 가공과 재료의 절단하는 가스절단용 노즐의 내부노즐은 음속노즐이나 축소-확대 노즐(초음속 노즐)이고, 외부노즐은 음속노즐이 사용되며, 내부 및 외부제트의 작동압력은 각각 다른 것이 일반적이다. 이러한 동축제트의 구조는 단일 제트와 다르며, 제트의 공기역학적 특성과 절단속도는 매우 밀접한 관계가 있다는 것이 밝혀졌다.[2] 즉, 노즐의 최대 절단속도는 제트가 공작물과 충돌하는 지점에서의 국소압력과 비례하는 상관관계가 있다. 그러나, 단일노즐에서는 상류 정체 압력이 높아짐에 따라 제트 내에 마하 디스크(Mach disk)가 형성되어 충돌압력을 높이지 못하게 된다. 이러한 경우, 외부 보조제트의 사용은 내부제트에서 마하 디스크의 발생을 억제하므로 산소절단용 노즐에서 보조제트의 사용은 매우 유용하다고 알려져 있다.[3]

초음속 제트에 관한 연구는 현재까지 많이 수행되어왔다. Kashiani[4]등은 축대칭 초음속 제트에서 충돌압력에 미치는 Re수의 영향을 조사하였으며, Kim[5]등은 가스 미립화용 노즐에서 분출되는 초음속 분류에 대한 실험적 연구를 수행하였다. Masuda[2,3]등은 음속노즐에서 내부/외부 노즐의 출구경의 직경비에 따른 제트유동의 충돌압력분포를 측정하였고, 섀도우 그래프 법을 사용한 가시화 결과로부터 제트와 제트 내의 충격파 구조는 노즐의 형상에 크게 의존한다는 것을 밝혔다. 또한 그들은 부족팽창된 동축 충돌제트의 유동에 대한 수치 해석과 실험으로 외부제트가 동축제트에 미치는 영향을 조사하였다. 또한, Yu[6]등은 부족팽창된 초음속 동축제트에서 발생하는 소음을 감소시키기 위한 연구를 수행하였으며, Naraynan[7]등은 내부/외부 노즐의 압력비에 따른 제트 내부에 발생하는 마하 디스크의 변화를 실험적으로 연구하였다.

일반적으로 동축노즐에서 분사되는 제트의 구조에 미치는 가장 중요한 변수로는 노즐출구에서 내부노즐과 외부 노즐의 직경비, 외부 노즐의 분사각 및 내부노즐과 외부노즐의 plenum 압력비 등이 있다. 그러나, 현재까지 동축노즐에서 외부노즐의 정체압력의 변화가 동축제트의 구조에 미치는 자세한 연구는 아직 미흡한 상태이다. 따라서, 본 연구는 초음속 내부노즐과 음속 외부노즐로 구성된 동축노즐을 사용하여 외부노즐의 plenum 압력 변화가 제트 내에서 발생하는 충격파와 팽창파를 포함한 제트의 구조에 미치는 영향을 조사하는 것을 그 목적으로 하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

본 연구에서 사용한 실험장치의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 실험장치는 고압공기 압축기, 고압탱크, plenum 실, 동축노즐, 자동 이송장치 및 압력 scanning 시스템과 가시화장치로 구성되어 있다.

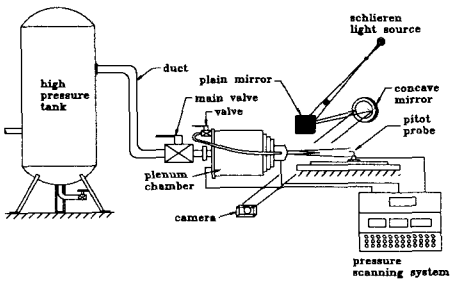


Fig. 1 Schematic of experimental apparatus

작동기체는 공기이며, 고압 공기압축기에 의해 압축되어 고압탱크에 저장된다. 고압탱크 내의 공기는 정체실과 연결된 관을 통해 정체실로 유동한 후 노즐을 통해 대기로 분출된다. 본 실험에서는 정체실의 압력과 충돌압력 및 정압은 압력 변환기(PTX-1400, Druck Co.)를 사용하여 측정하였다. 충돌전압을 측정하기 위한 외경이 0.7mm인 피토관을 자동이송장치에 장착하였고, 피토관에 의해 측정된 압력신호는 압력 스캐닝 시스템을 통해 컴퓨터로 전달된다. 자동이송장치와 압력스캐닝 시스템은 컴퓨터로 동시에 제어되고 얻어진 압력 데이터는 컴퓨터에 저장된다.

초음속 제트의 유동장은 섀도우 그래프법을 사용하여 가시화하였다. 1kW의 Xe-광원에서 발생한 빛은 평면경과 초점거리가 1500mm인 요면경을 지난 후 측정부를 평행으로 통과한다. 측정부를 지난 빛은 카메라에 도달한다.

Fig. 2는 본 실험에서 사용한 내부노즐과 외부노즐의 개략도이다. 내부노즐은 노즐 내 유동의 파동(undulation)을 방지하기 위하여 팽창률이

$26500s^{-1}$로 일정한 노즐을 설계하여 사용하였다. 1차원 등엔트로피 유동 이론으로부터 계산한 내부노즐의 설계마하수와 적정팽창 압력비는 각각 M_d=1.91과 p_{0i}/p_b=6.8이다. 또한, 상류 plenum의 상태량과 출구조건 및 초음속노즐 출구의 직경등을 사용하여 계산한 레이놀즈 수는 약 $Re_{de}=4.5\times 10^5$이다. 초음속 노즐의 목직경 d_t와 출구경 d_e는 각각 4mm와 5mm이며, 확대부의 길이 l=20mm이다. 외부노즐은 외경 D_e=9mm이고 출구각 β =40° 인 단순 축소형의 음속노즐이며, 내부노즐과 결합된 상태에서 외부노즐의 노즐출구 내경은 7mm이다.

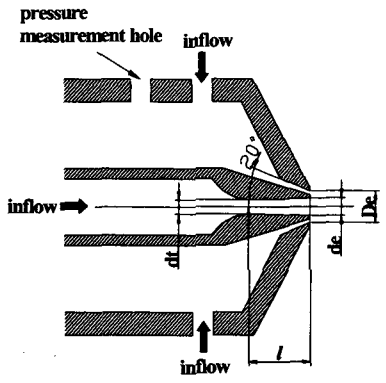


Fig. 2 Schematic of dual coaxial nozzle

실험 순서는 먼저 공기 압축기를 작동시켜 고압탱크에 작동유체인 공기를 채우고, 밸브를 개방하여 대기로 제트를 분사시킨다. 그 다음, 밸브를 사용하여 내부 노즐의 plenum 압력을 750kPa로 조절한 다음 외부노즐의 압력을 각각 200kPa, 400kPa, 600kPa로 변화시킨다. 피토관이 장착된 자동이송장치로 1mm 간격으로 제트 축 방향으로 x/d_e=20, 제트 반경방향으로 r/d_e=1.0의 범위에서 측정하였다. 또한 외경이 0.9mm인 스테인리스 관을 사용하여 제트 중심축을 따라 1mm 간격으로 x/d_e=20까지 정압을 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 3은 설계 마하수 M_d=1.91인 내부노즐의 plenum 압력 p_{0i}=750kPa로 일정한 상태에서 충돌각 β =40° 인 외부노즐의 압력을 각각 p_{0o}=200, 400, 600kPa로 변화시킬 때 노즐로부터 분사되는

(a) single jet

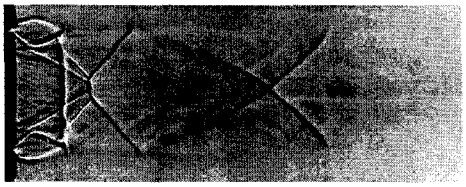
(b) p_{0o}=200kPa

(c) p_{0o}=400kPa

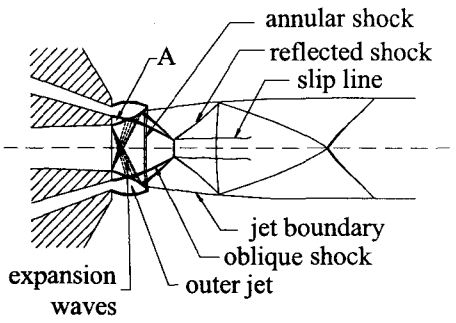
(d) p_{0o}=600kPa

Fig. 3 Shadowgraphs with the variations of outer stagnation pressure(p_{0i}=750kPa)

초음속 제트의 섀도우그래프이다. Fig. 3(a)은 p_{0i}=750kPa인 단일제트가 부족팽창된 상태로 대기에 분사되는 가시화 사진이다. 내부노즐의 적정팽창 압력비는 p_{0i}/p_b=6.8이므로 출구에서의 유동상태는 약간 부족팽창된 상태이다. 일련의 팽창파와 충격파가 제트 내에 발생한다. 그러나 부족팽창의 정도가 약하기 때문에 마하 디스크는 발생하지 않는다. 또한 제트하류로 갈수록 제트와 주위기체와의 전단효과와 운동량 교환으로 인해 혼합영역이 발달하게 된다. 외부노즐의 압력이 200kPa인 Fig. 3(b)의 경우 노즐출구에서 외부제트의 경계가 뚜렷이 나타나며, 외부제트가 노즐출구에서 제트중심으로 향하므로 내부제트의 팽

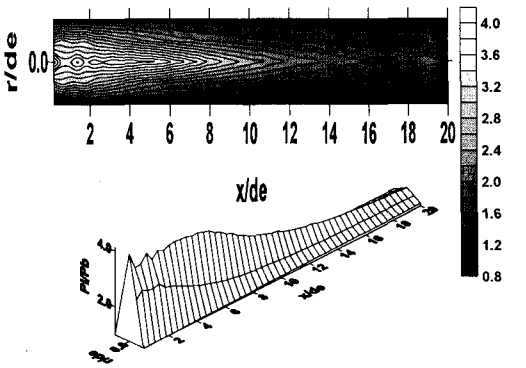


(a) Shadowgraph

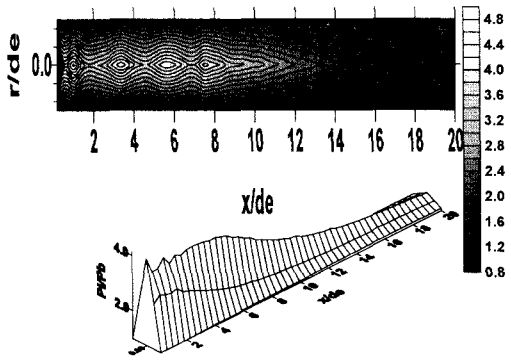


(b) Schematic

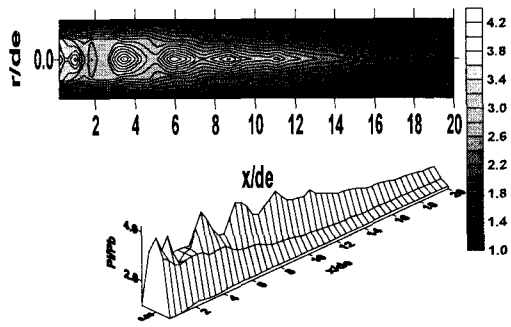
Fig. 4 Coaxial jet structure for highly underexpanded oute jet (p_{0i}=750kPa and p_{0o}=600kPa)



(a) p_{0o}=200kPa



(b) p_{0o}=400kPa



(c) p_{0o}=600kPa

Fig. 5 Impact pressure contour of coaxial jet (p_{0i}=750kPa)

창을 가속시키고 제트의 경계를 평행하게 만든다. 또한 내부제트의 경사충격파의 각은 커지고 있다. 그러나, Fig. 3(b)의 경우보다 외부노즐 정체압이 큰 p_{0o}=400kPa인 Fig. 3(c)의 경우 외부 분류에는 부족팽창의 정도가 큰 마하 디스크가 발생된다. 이 외부 환상틈에 발생된 마하 디스크를 환형 충격파(annular shock)라 한다. 제1 환형 충격파에 의해 외부 분류에 있어서의 부족 팽창의 정도가 해소되지 않는 경우에는 제2 환형 충격파가 발생된다. 그러나 외부 제트의 부족 팽창의 정도가 가장 큰 Fig. 3(d)의 경우에는 보다 강한 제1 환형 충격파에 의해 부족 팽창이 거의 해소된 결과 제2의 환형 충격파는 발생되지 않는 것으로 나타났다. 한편 외부제트의 정체압력이 높을수록 내부제트를 더욱 팽창시키는 효과를 가져와 내부제트에서 발생하는 마하 디스크의 길이를 길게 하고 또한 마하 디스크의 발생위치가 노즐 출구에 가깝게 된다. 즉, 경사충격파 길이의 감소와 제트 중심축과 충격파가 이루는 각의 증가를 야기한다.

Fig. 4는 외부 제트의 압력이 600kPa인 경우인 Fig.3(d)의 섀도우 사진과 그 개략도를 나타낸 그림이다. Fig. 4에서 알 수 있듯이, 외부노즐의 정체압력이 높아짐에 따라 노즐출구에서 외부제트의 부족팽창정도는 더욱 증가하고, 내부제트와 외부제트 사이에는 제트로의 혼입(entrainment)과 외부기류의 유입이 일어날 수 없게 된 결과 영역

A에는 부압으로 되며, 그에 따라 외부제트의 안쪽 경계면은 바깥 경계면보다 노즐 중심축으로 굽게 된다. 또한, 외부제트의 환형 충격파와 내부제트와의 간섭으로 인해 제트 내에 새로운 경사충격파가 발생하며, 내부제트의 경사충격파와 마하디스크 후방은 slip line이 발생하는 등 제트는 전체적으로 매우 복잡한 충격파 구조로 된다. Fig. 3(c)의 섀도우그래프 사진과의 비교로부터, 외부노즐의 압력이 증가함에 따라 환형 충격파는 점차 노즐 출구로부터 멀어지며, 마하 디스크의 길이도 증가함을 볼 수 있다.

Fig. 5는 내부노즐의 plenum 압력이 p_{0i}=750kPa로 일정한 상태에서 외부노즐의 plenum 압력변화에 따른 제트 유동의 충돌압력의 contour를 나타낸 그림이다. 제트유동장의 충돌압력분포는 외부노즐의 압력에 따라 크게 달라짐을 알 수 있다. 외부압력이 p_{0o}=200kPa인 Fig. 5(a)에서 충돌압력분포는 큰 진동없이 노즐출구로부터 제트 하류로 감쇠한다. 이에 반해 외부노즐의 압력이 p_{0o}=400kPa인 경우, 내부제트에 미치는 영향이 내부제트에 미치는 외부제트의 영향이 점차 커짐으로 인해 충돌압력의 분포는 p_{0o}=200kPa인 경우와 다르다. 즉 Fig. 3(c)의 섀도우 사진과의 비교로부터, 내부제트에서 발생한 경사충격파의 각의 증가와 마하 디스크의 발생으로 인해 충돌압력분포는 Fig. 5(a)의 경우보다 충돌압력의 진동이 훨씬 분명해진다. 외부노즐의 압력이 p_{0o}=600kPa인 경우의 노즐출구 근방의 충돌압력분포는 외부제트와 내부제트의 심한 간섭으로 인해 매우 복잡한 압력분포를 보이고 있다. 이는 외부 노즐 정체압이 높을수록 외부제트에서 발생하는 환형 충격파의 강도는 커지고, 이것이 내부 제트에서 발생되는 경사충격파와 마하 디스크와 간섭하여 제트내의 wave 시스템의 구조가 매우 복잡해지기 때문으로 판단된다.

Fig. 6은 제트의 중심축을 따라 측정한 충돌압력분포를 나타낸 그림이다. 외부제트가 없는 단일제트는 노즐 출구에서 균일한 상태의 대기로 팽창하기 때문에 노즐 출구부터 $x/d_e \fallingdotseq 1.0$까지 마하수는 증가하고 충돌압력은 경사충격파가 위치하는 노즐 중심선에서 만나는 지점까지 감소한 후 충격파 후방에서 다시 증가한다. 이러한 일련의 반복하는 팽창과 압축에 관련되어 충돌압력의 분포는 노즐 중심축을 따라 진동한다. 이에 반해

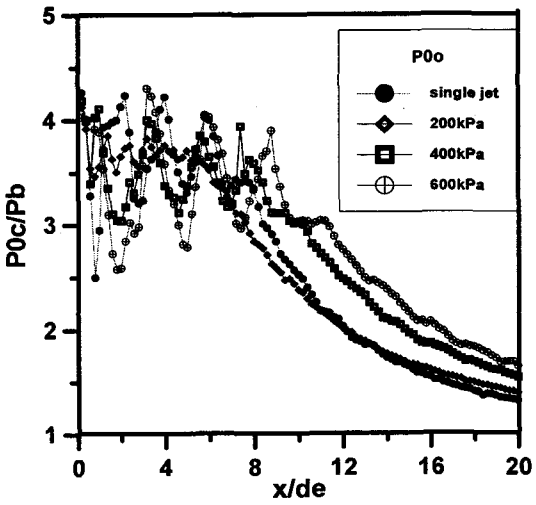


Fig. 6 Impact pressure distribution along the centerline

외부노즐의 압력이 p_{0o}=200kPa인 경우 충돌압력의 분포는 다른 외부 노즐압력 조건에 비해 진폭이 상대적으로 작게 나타났으며, 단일제트에 비해 빠르게 충돌압력의 감쇠가 빠르게 일어나는 것으로 나타났다. 이는 외부제트가 거의 적정팽에 가깝게 되어 제트의 구조가 거의 균일하고, 외부제트와 내부제트사이에 에너지 교환이 충분히 일어나기 때문이다. 그러나 외부노즐의 plenum 압력이 더욱 증가하면 제트 중심선에서 충돌압력의 진폭은 커지고, 제트 하류까지 높은 평균충돌압력을 유지하면서 진동한다. 이는 외부제트의 부족팽창의 정도가 증가할수록 외부제트의 구조는 복잡해지고 내부제트와의 간섭이 복잡해지게 때문으로 판단된다. 그러나 외부노즐의 plenum 압력이 높을수록 부족팽창의 정도가 크고 내부제트로의 에너지 공급이 크게되어 전체적인 제트의 감쇠가 적어지기 때문이다.

Fig. 7은 외부노즐의 plenum 압력변화에 따른 제트 중심축에서의 정압분포를 나타낸 그림이다. 외부제트가 없는 팽창률이 일정한 노즐을 통하여 분사되는 단일제트 경우의 유동은 노즐출구에서 약간 부족팽창된 상태이고 외부제트와 간섭 없이 팽창파와 약한 충격파가 교대로 반복되면서 분사된다. 그 결과, 정압은 반복하는 팽창과 압축에 의하여 진동을 반복한다. 한편, 단일제트 중심축에서의 정압은 경사충격파가 존재하는 위치 *x./de*

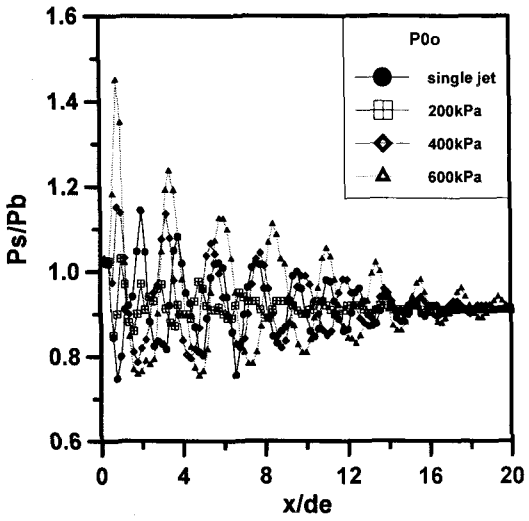


Fig. 7 Static pressure distribution along the jet centerline

≒1.0 근방까지 감소하며, 경사충격파를 통해 다시 상승한다. 외부노즐의 압력이 p_{0o}=200kPa인 경우에 대한 정압분포의 진폭은 적정팽창된 외부제트 때문에 상당히 감소하고, 진동하는 횟수는 증가한다. 그러나, 외부압력이 p_{0o}=400kPa과 600kPa로 높아짐에 따라 외부제트에서 발생된 강화된 환형 충격파의 영향 때문에 팽창되는 영역이 단일제트에 비해 짧게 되는 것으로 나타났다. 또한 외부노즐의 압력이 높아짐에 따라 제트 중심축에서의 정압분포의 진폭은 커지고, 제트의 더욱 하류까지 정압이 진동하는 것으로 나타났다.

4. 결론

팽창률이 일정한 초음속 내부노즐과 외부 음속노즐로 구성된 동축노즐에서 분사되는 동축제트의 구조에 미치는 외부노즐의 plenum 압력변화의 영향을 조사한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 적정팽창되는 외부제트의 경우가 동축제트 중심축방향으로의 정압 및 충돌전압 변동이 적다.

2. 외부제트의 plenum 압력이 증가함에 따라 제트 중심축 방향으로의 평균충돌압력은 하류까지 높게 되며, 제트 중심에서의 정압도 크게 진동한다

3. 외부노즐의 plenum 압력이 증가함에 따라 외부제트에서 발생한 환형 충격파는 제트 하류로 이동하며, 내부제트의 경계와 간섭하여 새로운 충격파를 발생시킨다.

참고문헌

(1) Gutmart, E., Schadow, K. C. and Wilson, K. J., 1991, "Effect of Convective Mach Number on Mixing of Coaxial Circular and Rectangular Jets," Phys. Fluids, Vol. 3, No. 1, pp. 29～36.

(2) Masuda, W and Nakamura, T., 1993, "Effects of Nozzle Contour on the Aerodynamic Characteristics of Underexpanded Annular Impinging Jets," JSME Int. Jour., Vol. 36, No. 2, pp. 238～244.

(3) Masuda, W. and Moriyama, E., 1994, "Aerodynamic Characteristics of Underexpanded Coaxial Impinging Jets," JSME Int. Jour., Vol. 37, No. 4, pp.769～775.

(4) Kashitani, M., Miyazato, Y., Masuda, M., Yano, H. and Matsuo, K., 1997, JSME Journal, Vol. 63, No. 616, pp 91～98.

(5) Kim, H. D. and Lee, J. S., 1996, "An Experimental Study on Supersonic Jet Issuing from Gas Atomizing Nozzle(1)," KSME Journal, Vol. 20, No. 2, pp. 697～709.

(6) Yu, Y. K., Chen, R. H. and Chew, L., 1998, "Screech Tone Noise and Mode Switching in Supersonic Swirling Jets," AIAA Journal, Vol. 36, No. 11, pp. 1968～1974.

(7) Narayaman, A. K. and Damodaran, K. A., 1992, "Mach Disk of Dual Coaxial Axisymmetric Jets," AIAA Journal, Vol. 7, No. 7, pp. 1343～1345.