

초음속 동축 제트의 구조에 미치는 외부노즐 분사각의 영향

백승철* · 권수영* · 주성열* · 권순범**

Effect of Outer Nozzle Ejection Angle on Jet Structure issuing from Supersonic Dual Coaxial Nozzle

Seung-Cheol Baek, Soo-Young Kwon, Seong-Yeol Joo and Soon-Bum Kwon

Key Words: Supersonic Flow(초음속 유동), Dual Coaxial Jet(동축제트), Ejection Angle(분사각), Annular Shock(환형 충격파), Underexpansion(부족팽창)

Abstract

This paper experimentally investigates the characteristics of dual coaxial jet issuing from inner supersonic nozzle and four kinds of outer converging nozzle of 40, 50, 60° and 70° in outer ejection angle. The pressure ratio of the stagnation to the exit ambient pressures in the inner supersonic nozzle of constant expansion rate is 7.5, which is corresponded to the condition of a slightly underexpanded, and that of outer nozzle is 4.0. Flow visualizations by using of shadowgraph method, impact pressure and centerline static pressure measurements are presented. It is found that the jet structure is changed significantly by the variation of outer nozzle ejection angle. Impact pressure level is lower and undulation of static pressure is higher, as the injection angle of outer jet increases.

기호설명

x : 노즐 출구에서 축방향 거리
 β : 외부노즐의 분사각

p_b : 배압 (=대기압)
 p_{0i} : 내부노즐의 plenum 압력
 p_{0o} : 외부노즐의 plenum 압력
 p_{0c} : 제트 중심선에서의 총돌압력
 p_i : 총돌전압
 p_s : 정압
 M_d : 설계 마하수
 d_i : 내부노즐의 목직경
 d_e : 내부노즐의 출구경
 D_o : 외부노즐의 출구경
 l : 내부노즐의 확대부 길이
 r : 제트중심에서 반경방향 거리

1. 서론

비행체나 항공기의 로켓 추진 시스템 및 모재의 가공과 재료의 절단 등 다양한 산업분야에서 초음속 제트가 사용되고 있다. 초음속 제트가 분사될 때, 노즐의 상·하류 압력비에 따라 노즐출구에서 유동은 과팽창(overexpansion), 적정팽창(correct expansion) 및 부족팽창 된다. 노즐출구의 유동상태가 적정팽창된 경우를 제외하고 유동이 부족팽창 및 과팽창되면 제트 내에는 팽창파와 충격파 및 마하 디스크 등의 wave system으로 구성되는 복잡한 유동구조로 된다.⁽¹⁾

현재 가스를 사용하여 모재의 가공과 재료를 절단하는 가스절단용 노즐의 경우, 내부노즐은 음속노즐 혹은 축소·확대 노즐(초음속 노즐)이고 외부노즐은 음속노즐이 사용되며, 내부 및 외부

* 경북대학교 기계공학과 대학원

** 경북대학교 기계공학부

제트의 작동압력비는 각각 다른 것이 일반적이다. 가스절단용 노즐의 주 제트로 산소가, 보조 외부제트로서는 가연성 기체가 분사된다. 이러한 동축제트의 구조는 단일 제트와 다르며, 제트의 공기역학적 특성과 절단속도 및 절단면의 품질등은 매우 밀접한 관계가 있다는 것이 밝혀졌다.⁽²⁾ 즉, 노즐의 최대 절단속도는 외부제트가 공작물과 충돌하는 지점에서의 국소 충돌압력과 비례하고 절단면의 품질을 높이기 위해서는 제트의 분사거리의 변화에 따르는 충돌전압의 변화가 적게 되어야 된다.

단일노즐에서 공작물에 대한 충돌압력을 높이기 위해 상류 저기실의 압력을 높이는 것은 부족팽창의 정도를 강화시켜 제트 내에 보다 강한 마하 디스크(Mach disk)를 발생시켜 오히려 충돌압력이 감소되고 제트구조는 위치의 변화에 따라 상태량의 변화가 큰 복잡한 구조로 된다. 한편, 차폐 분위기를 만드는 역할에 더불어 외부 보조제트의 사용은 내부제트에서 발생하는 마하 디스크를 억제하는 역할을 하는 것으로 판단되는 바 산소절단용 노즐에서 보조제트의 사용은 거의 일반화 되어있다.⁽³⁾

초음속 제트에 관한 연구는 현재까지 많이 수행되어왔다. Kashiani⁽⁴⁾ 등은 축대칭 초음속 제트에서 충돌압력에 미치는 Re수의 영향을 조사하였으며, Kim⁽⁵⁾ 등은 가스 미립화에 사용되는 초음속 제트에 대한 연구를 수행하였다. Masuda^(2,3) 등은 음속노즐에서 내부/외부 노즐의 출구경의 직경비에 따른 제트유동의 충돌압력분포를 측정하고 새도우 그래프 법을 사용하여 가시화하고, 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, Narayan⁽⁷⁾ 등은 내부/외부 노즐의 압력비에 따른 제트 내부에 발생하는 마하 디스크의 변화를 실험적으로 연구하였다.

일반적으로 동축노즐에서 분사되는 제트의 구조에 미치는 중요한 변수로는 노즐출구에서의 내부노즐과 외부노즐의 직경비, 외부 노즐의 분사각 및 내부노즐과 외부노즐의 plenum 압력비 등이 있다. 그러나, 현재까지 동축 노즐에서 외부

노즐의 분사각의 변화가 동축제트의 구조에 미치는 자세한 연구는 아직 미흡한 상태이다. 따라서, 본 연구는 초음속 내부노즐과 음속 외부노즐로 구성된 동축노즐을 사용하여 외부노즐의 분사각의 변화가 제트 내에서 발생하는 충격파와 팽창파를 포함한 제트의 구조에 미치는 영향을 조사하는 것을 그 목적으로 한다.

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 가시화 장치로 구성되어

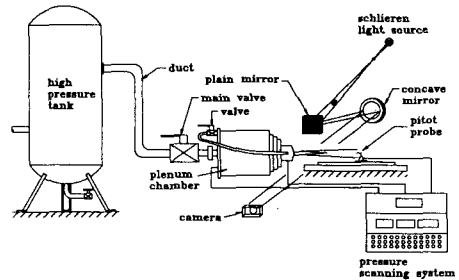


Fig. 1 Schematic of experimental apparatus

있다. 작동기체는 공기이며, 고압 공기압축기에 의해 압축되어 고압탱크에 저장된다. 고압탱크 내의 공기는 정체실과 연결된 관을 통해 정체실에 저장한 후 노즐을 통해 대기로 분출된다. 본 실험에서 정체실의 압력과 충돌압력 및 정압은 압력 변환기(PTX-1400, Druck Co.)를 사용하여 측정하였다. 충돌전압을 측정하기 위해 외경이 0.7mm인 피도관을 제작하여 자동이송장치에 장착하였고, 피도관에 의해 측정된 압력신호는 압력 스캐닝 시스템을 통해 컴퓨터로 전달된다. 자동 이송장치와 압력스캐닝 시스템은 컴퓨터로 동시에 제어되고 얻어진 압력 데이터는 컴퓨터에 저장된다.

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

Fig. 2는 본 실험에서 사용한 내부노즐과 외부

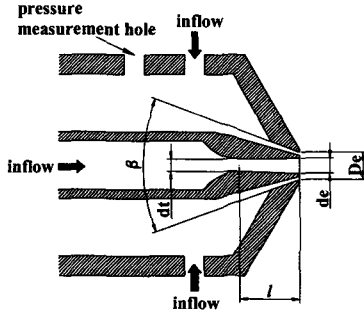


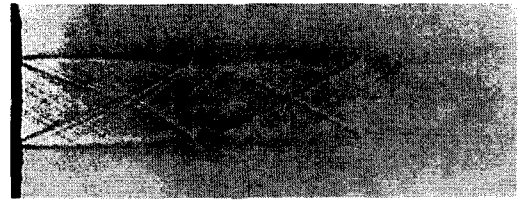
Fig. 2 Schematic of dual coaxial nozzle

노즐의 개략도를 나타낸 그림이다. 내부노즐은 노즐 내의 유동이 파동(undulation)하는 것을 방지하기 위해 팽창율이 $26500s^{-1}$ 으로 일정한 노즐로 설계 제작하였다. 1차원 등엔트로피 유동 이론으로부터 계산한 내부노즐의 설계마하수와 적정팽창 압력비는 각각 $M_d=1.91$ 과 $p_{oi}/p_b=6.8$ 이다. 또한, 상류 plenum의 상태량과 노즐 출구조건을 사용하여 계산한 레이놀즈 수는 약 $Re_{de}=4.5 \times 10^5$ 이다. 노즐의 목직경 d_i 와 출구경 d_e 는 각각 4mm와 5mm이며, 확대부의 길이 l 은 20mm이다. 출구에서 노즐 lip의 두께는 1mm이다. 외부노즐은 출구 내경이 7mm, 출구외경 $D_e=9$ mm이다. 본 실험에 사용한 4개의 단순 축소형의 음속노즐은 분사각이 각각 $\beta=40^\circ, 50^\circ, 60^\circ, 70^\circ$ 인 4종류이다. 외부 노즐의 환상틈새의 길이는 공히 1mm이다.

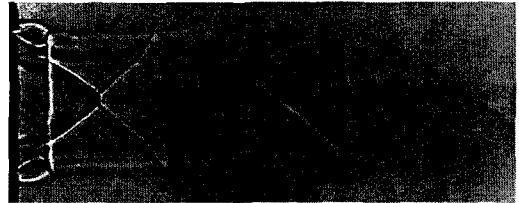
실험순서는 먼저 공기 압축기를 작동시켜 고압 탱크에 작동유체인 공기를 채우고, 밸브를 개방하여 대기로 제트를 분사시키면서 밸브로 내부 및 외부노즐의 plenum 압력을 각각 750kPa와 400kPa로 일정하게 조절한다. 피토티관이 장착된 자동이송장치로 1mm 간격으로 제트의 축 방향으로 $x/d_e=20$, 제트 반경방향으로 $r/d_e=1.0$ 의 범위에 걸쳐서 압력을 측정하였다. 또한 외경이 0.9mm인 스테인리스 관을 사용하여 제트 중심축을 따라 1mm 간격으로 정압을 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

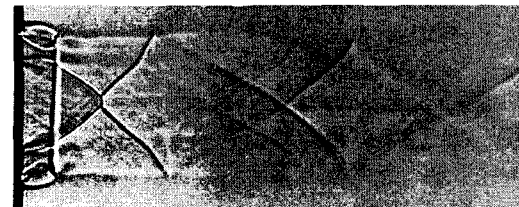
Fig. 3은 설계 마하수 $M_d=1.91$ 인 내부노즐과 외부노즐의 plenum 압력을 각각 $p_{oi}=750$ kPa, $p_{oo}=400$ kPa로 일정하게 고정시킨 상태에서 외부노즐의 분사각을 $\beta=40^\circ, 50^\circ, 60^\circ, 70^\circ$ 로 변



(a) single jet



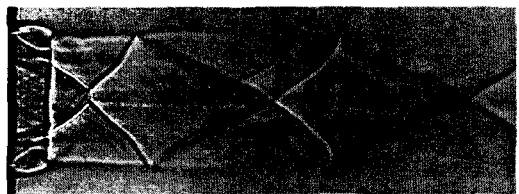
(b) $\beta=40^\circ$



(c) $\beta=50^\circ$



(d) $\beta=60^\circ$



(e) $\beta=70^\circ$

Fig. 3 Shadowgraphs of dual coaxial jet for $p_{oi}=750$ kPa, $p_{oo}=400$ kPa

화시켰을 때 노즐로부터 분사되는 초음속 동축제트의 새도우그래프이다. Fig. 4는 외부제트가 내부제트에 충돌할 때의 제트의 구조를 개략적으로 나타낸 그림이다. Fig. 3(a)은 내부노즐의 정체압

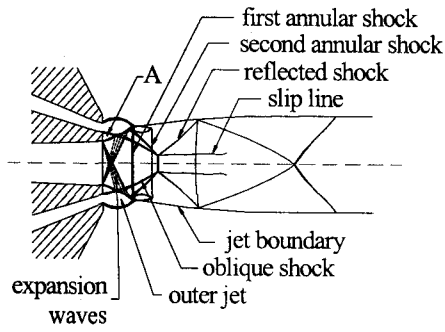


Fig. 4 Schematic of coaxial jet structure
($p_{0i}=750\text{kPa}$ and $p_{0o}=400\text{kPa}$)

이 750kPa로 된 내부제트가 출구에서 약간 부족 팽창된 상태로 대기로 분사되는 경우이다. 제트

내에는 일련의 팽창파와 충격파가 반복하여 발생하며, 제트하류에서 주위기체와 제트와 전단 효과로 인한 혼합영역이 발달하고 있다. 또한, 내부노즐의 압력이 이론적정 팽창 압력비보다 크게 높지 않기 때문에 제트 내에 마하 디스크는 발생하지 않는다.

분사각이 $\beta=40^\circ$ 인 Fig. 3(b)의 경우, 외부제트의 분사압력이 400kPa이므로 상당히 부족팽창 상태이며, 부족팽창된 외부 제트가 내부노즐을 둘러싸고 환형으로 분사되고 있다. 내부제트와 외부제트의 경계와 노즐 고체벽으로 둘러싸인 영역 (Fig. 4의 A)은 주위공기의 혼입(entrainment)이 일어나지 않기 때문에 상대적으로 주위압력보다 낮은 부압으로 되고, 외부제트는 더욱 심하게 부족 팽창된다. 따라서 외부제트의 부족팽창이 커짐에 따라 환형 충격파의 강도는 커지고, 내부제트를

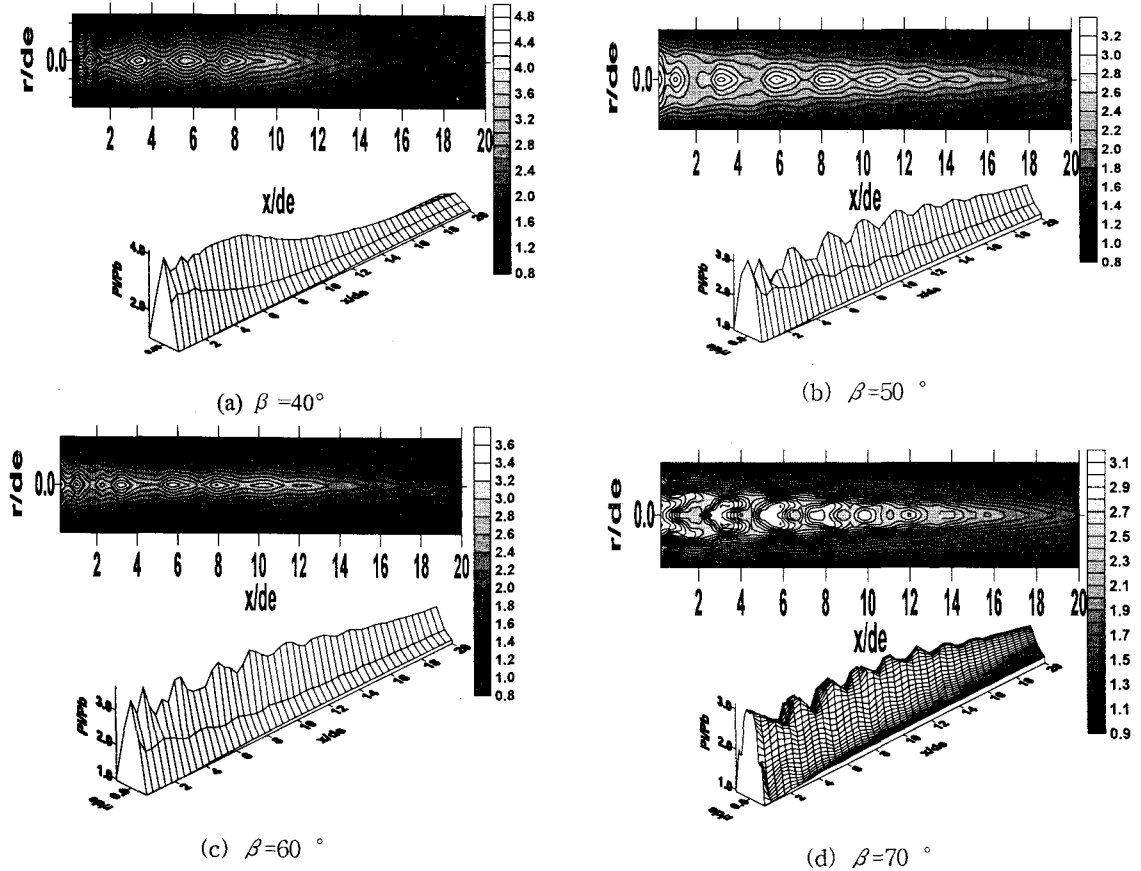


Fig. 5 Impact pressure contour of coaxial nozzle with the variation of outer nozzle ejection angle

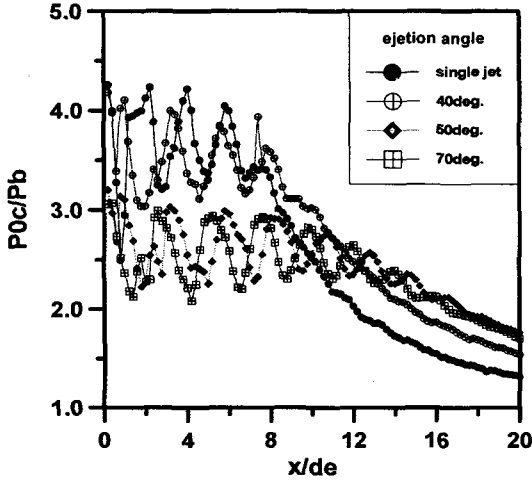


Fig. 6 Impact pressure distribution along the jet centerline

더욱 팽창시켜 입사 경사충격파의 각을 더욱 증가시키는 것으로 판단된다. 이러한 경사충격파 각의 증가로 인해 제트 중심축에서 마하 디스크가 형성되고, 마하 디스크와 반사 경사충격파 후방은 미끄럼 선(slip line)이 발생하는 매우 복잡한 충격파 구조가 형성된다. 이러한 경향은 단일제트를 제외한 Fig. 3의 새도우그래프에서 나타난다. 한편 단일 초음속 부족팽창의 경우 마하 디스크의 위치에 대한 Driftmyer의 일반식⁽⁸⁾을 본 연구의 실험조건을 적용하여 마하 디스크의 위치를 구하면 $x_m/d_c=1.7$ 이 되나 본 실험에서 구한 값은 외부 노즐 분사각에 관계없이 1.7보다 작은 1.2근방의 값으로 나타났다. 이는 본 연구의 경우 대기압보다 높은 외부 제트의 경계 때문에 내부 제트의 경계가 확장되지 못하였기 때문으로 생각된다. 내부 제트의 분사각이 $\beta=40^\circ \sim 60^\circ$ 범위로 변화되는 동안 제트의 구조는 새도우 그래프로부터는 큰 차이를 확인할 수 없었다. 그러나, 분사각이 $\beta=70^\circ$ 로 커지면, 환형 충격파는 노즐 출구로부터 더욱 하류에 위치하지만, 마하 디스크의 위치는 노즐 출구 쪽에 가깝게 위치하며 마하 디스크의 직경은 더 커진다. 이는 $\beta=70^\circ$ 로 커짐에 따라 노즐출구에서 내부제트에 대한 외부제트의 압축효과가 더욱 커져 노즐 출구에서 내부제트의 팽창을 약화시키는 효과 때문으로 판단된다.

Fig. 5는 내부노즐 및 외부노즐의 plenum 압력

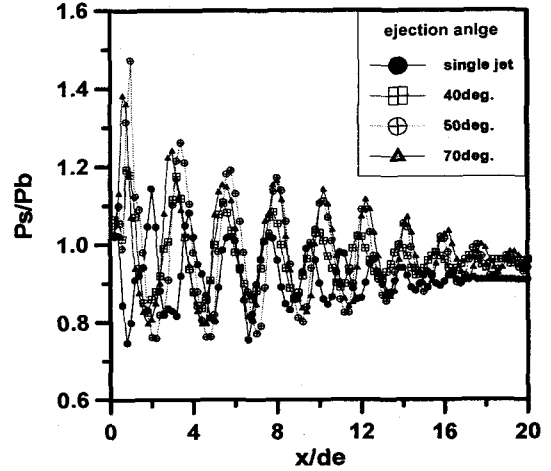


Fig. 7 Static pressure distribution along the jet centerline

이 각각 $p_{0i}=750\text{kPa}$, $p_{0o}=400\text{kPa}$ 인 상태에서 외부 노즐의 분사각 변화에 대한 제트 유동의 충돌압력 contour를 나타낸 그림이다. $\beta=40^\circ$ 인 Fig. 5(a)의 경우, 노즐출구로부터 유동이 팽창과 압축을 반복함에 따라 충돌압력의 분포도 감소와 증가를 반복하다가 제트하류에서 점차 감쇠함을 볼 수 있다. 외부분사각 $\beta=50^\circ$ 와 60° 인 경우는 $\beta=40^\circ$ 인 경우에 비해 충돌압력의 진동 횟수가 증가하며, 진동영역 또한 길게 된다. 이로부터 외부 분사각이 커짐에 따라 외부제트가 내부제트에 미치는 영향도 증가한다는 것을 예측할 수 있다. 외부 제트의 분사각이 가장 큰 $\beta=70^\circ$ 인 경우의 충돌압력은 다른 분사각의 경우와는 달리 매우 복잡하게 분포하고 있다.

Fig. 6은 제트의 중심축을 따라 측정된 충돌압력 분포를 나타낸 그림이다. 외부제트가 없는 부족 단일제트는 노즐 출구에서 팽창에 따른 가속 때문에 충돌압력이 경사충격파가 위치하는 지점까지 감소하다가 경사충격파를 지나고 난 후 다시 증가한다. 이러한 유동의 팽창과 압축이 반복함으로 인해 충돌압력의 분포는 노즐 중심축을 따라 진동하며, 내부제트에 운동량을 전달하는 외부제트가 있는 경우보다 빠르게 감쇠한다. 외부제트의 분사각이 증가함에 따라 외부제트가 내부제트에 미치는 영향은 더욱 커져 단일제트의 충돌압력분포와 상당히 달라지는 것으로 나타났다. 즉 외부제트의 분사각이 증가함에 따라 제트중심

축 충돌압력의 평균레벨은 점차 감소하며, 충돌압력이 진동하는 영역도 더욱 하류까지 분포한다.

Fig. 7은 외부노즐의 분사각 변화에 따른 제트 중심축에서의 정압분포를 나타낸 그림이다. 제트 내부에 발생한 팽창파와 충격파를 통해 유동이 팽창과 압축을 반복함에 따라 정압분포가 제트축을 따라 진동함을 볼 수 있다. 외부제트가 없는 단일제트는 노즐출구에서 부족팽창 상태이므로 제트 중심축에서의 정압은 경사충격파가 존재하는 $x/de \approx 1.0$ 의 근방까지 팽창파를 통해 감소하며, 경사충격파를 통해 다시 높아진다. 외부제트가 분사되면 외부제트와 내부제트와의 간섭으로 인해 제트 중심축을 따라 압력진동의 진폭은 분사각에 비례하여 커지는 것으로 나타났다. 이는 외부제트의 존재로 인해 내부제트는 단일제트보다 노즐 출구에서 팽창하지 못하기 때문으로 판단된다. 또한 외부노즐의 분사각이 증가함에 따라 내부제트에 대한 외부제트의 영향이 커져 팽창영역은 점차 짧아지는 것으로 나타났다.

4. 결론

팽창율이 일정한 축대칭 내부 초음속 부족팽창 유동과 외부 음속노즐 유동으로 구성된 동축제트의 구조에 미치는 외부노즐의 분사각의 영향을 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 외부노즐의 분사각이 커짐에 따라 제트 중심축에서 충돌압력의 평균레벨은 감소하고 진동은 더욱 제트하류까지 분포한다.
2. 외부노즐의 분사각의 증가는 제트 중심축에서의 정압의 진동을 크게 한다.
3. 동일한 내부노즐 유동조건인 경우 단일제트에서 발생하지 않는 마하 디스크가 외부제트의 영향으로 인해 발생되었다.
4. 외부노즐의 분사각이 커짐에 따라 외부제트에서 발생한 환형 충격파는 노즐출구로부터 하류로 이동하며, 마하 디스크의 직경은 증가한다.

참고문헌

- (1) Prasad, J. K., Mehta, R. C. and Srekanth, 1994, "Impingement of Supersonic Jets on an Axisymmetric Deflector," AIAA Journal, Vol. 32, No. 7, pp. 1535~1538.
- (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) Narayanan, A. K. and Damodaran, K. A., 1992, "Mach Disk of Dual Coaxial Axisymmetric Jets," AIAA Journal, Vol. 7, No. 7, pp. 1343~1345.
- (8) Driftmyer, R. T., 1972, "A Correlation of Freejet Data," AIAA Journal, Vol. 10, No. 8, pp. 1093~1095.