

환형동축 초음속 자유 제트유동에 관한 실험적 연구

이권희* · 이준희** · 김희동**

The Experimental Study of Supersonic, Dual, Coaxial, Free, Jets

K.H Lee*, J.H Lee** and H.D. Kim**

Key Words: Supersonic Nozzle(초음속 노즐), Compressible Flow(압축성 유동), Supersonic Jet(초음속 제트), Assistant Jet(보조제트), Shock Wave(충격파), Jet Core(제트 코어), Gas Cutting(가스절단)

Abstract

Supersonic coaxial, axisymmetric, jets issuing from various kinds of dual coaxial nozzles were experimentally investigated. Four different kinds of coaxial, dual nozzles were employed to characterize the major features of the supersonic, coaxial, dual jets. Two convergent-divergent supersonic nozzles with an impinging angle in the jet axis of the annular jets were designed to have the Mach number 2.0 and used to compare the coaxial jet flows with those discharging from two sonic nozzles. The primary pressure ratio was changed in the range from 4.0 to 10.0 and the assistant jet ratio from 1.0 to 4.0. The results obtained show that the assistant jets from the annular nozzle affect the coaxial jet flows and an increase of both the primary jet pressure ratio and assistant jet pressure ratio produces longer supersonic length of the dual, coaxial jet.

1. 서 론

일반적으로 초음속 제트유동은 고압의 기체를 오리피스나 노즐을 통하여 방출시킬 때 발생하며, 비상체의 추진, 금속분말의 제조, 섬유제직, 고전류 차단 스위치, 공기블라스트가공 등 다양한 산업분야에 응용되고 있다. 현재까지 노즐이나 오리피스로부터 방출되는 음속 및 초음속 제트유동에 관한 많은 실험적 및 해석적 연구가 수행되었다. 종래의 연구⁽¹⁻²⁾에 의하면 제트 압력비는 노즐출구에서 형성되는 유동상태 뿐만 아니라 제트유동장 내부에서 발생하는 충격파구조 및 위치, 제트경계의 구조, 제트코어 그리고 제트폭 등의 유동특성을 결정하는 중요한 변수로 보고하였으며, 유동장의 물리적 기구 등은 현재 비교적 상세하게 알려져 있다.

그러나 가스절단 노즐(gas cutting nozzle), 기체

역학레이저(gasdynamics laser), 초음속이젝터(supersonic ejector), 제트소음 경감, 추력증강 등의 많은 응용에서는 대부분 초음속동축노즐(supersonic coaxial nozzle)⁽³⁾을 사용하고 있다. 이 경우 보조제트유동이 초음속 노즐로부터 방출되는 주제트 유동특성에 큰 영향을 미칠 것으로 판단되지만, 현재 까지 이에 대한 상세한 연구는 수행되지 않았으며, 초음속 동축노즐의 실제적인 응용 및 설계를 위해서는 이에 관한 체계적인 연구가 요구된다.

최근 Masuda 등⁽⁴⁾은 실험과 수치계산을 통하여 음속노즐을 통하는 초음속 부족팽창 동축제트를 연구하여, 노즐의 형상 및 보조제트의 충돌각도, 압력비 등이 주제트에서 발생하는 충격파 마하디스크의 형상에 미치는 영향을 조사하였다.

Lee 등⁽⁵⁾은 Navier-Stokes 방정식의 수치계산법을 이용하여, 보조제트의 압력비 및 전온도가 주제트 내부에서 발생하는 전압력, 마하수, 제트코어, 충격파 위치, 속도분포 등의 유동특성에 미치는 영향을 광범위하게 조사하였다.

본 연구에서는 초음속 동축제트 유동의 특성을 조사하기 위하여, 4종류의 초음속 및 음속 노즐을

* 회원, 안동대학교 BK21 연구원

** 회원, 안동대학교 기계공학과

E-mail : kimhd@andong.ac.kr

제작하며 슈리렌 시스템을 이용한 유동장 가시화 및 제트 유동장의 압력측정 실험을 실시하여, 보조 제트의 충돌각, 노즐형상 그리고 압력비가 동축제트 유동에서 발생하는 충격과구조 및 위치, 전압력, 제트코어 길이등 동축제트의 특성값에 미치는 영향을 상세하게 조사하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험장치

본 연구에서는 Fig. 1에 나타난 바와 같이 압축기, 1차 정체실, 2차 정체실, 전압관, 계측시스템 및 슈리렌 시스템으로 구성된 실험장치를 이용하여 초음속 공기제트의 유동을 실험하였다. 1차 정체실(1.5Mpa, 30m³)에 저장된 압축공기는 건조필터와 감압밸브를 거쳐 주유동과 보조유동을 위한 2개의 독립된 2차 정체실로 안내되며, 정체실 하부에 부착된 이중동축노즐의 내부노즐(주노즐)인 원추형 노즐과 외부노즐인 환형노즐을 통하여 대기로 방출된다. 2차 정체실 내벽에는 압력을 측정하기 위하여 압력센서가 부착되어 있으며 2차 정체실 압력은 각각의 압력조절 밸브로 독립적으로 조정하도록 되어있다.

Fig. 2에는 본 연구에서 사용된 이중동축노즐의 상세형을 나타내었다. 주제트 유동은 출구마하수가 2.0인 초음속 노즐과, 출구마하수가 1.0인 음속 노즐(sonic nozzle)에서 발생하며, 각 경우에 대하여 충돌분류각이 0°와 20°인 환형노즐을 가지는 4개의 이중동축노즐을 제작하여 사용하였다. 환형노즐은 노즐목과 출구단면적이 일정한 음속노즐이다. Table 1에는 노즐목의 크기, 노즐출구 직경, 노즐확대각, 보조유동 분류각 등을 정리하였다.

본 연구에 사용된 각 노즐에 대하여 노즐목까지의 형상 즉 노즐 수축부의 형상은 수축부 입구와 노즐목의 단면적비에 따라 다소 달라질 수 있지만, 노즐목까지의 손실을 줄이기 위하여 적당한 곡률을 가지도록 하였다. 또한 보조제트유동을 위한 2차 정체실과 환형노즐과의 연결부를 통하는 유동의 초크현상 및 압력 손실을 줄이기 위하여 유로를 노즐출구 단면적 보다 충분히 크게 설계하였다.

2.2 측정방법

실험은 제트 유동의 가시화와 압력측정을 통하여 수행되었다. 유동의 가시화는 Fig.1에 나타난바와 같이 슈리렌법 및 shadowgraph를 이용하였으며,

유동장의 가시화 Image는 CCD를 통하여 PC로 전송하였다. 가시화용 광원은 발광시간이 대략 2μs인 마그네슘 스파크광을 사용하였다. 정체실 압력은 반도체형 압력센서(Kulite, XT-190)를 사용하여 측정하였으며, 자유제트 내부의 흐름장은 압력센서를 부착한 외경이 0.5mm인 전압관을 3차원 이송장치에 고정하고 축방향 및 반경방향으로 이송시키면서 수회 반복 측정하였다.

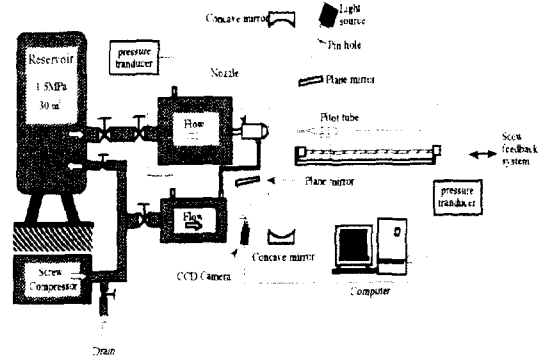


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

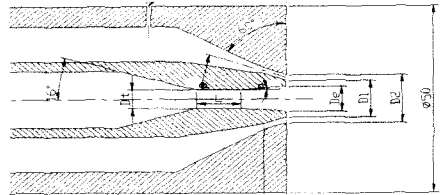


Fig. 2 Details of supersonic, dual, coaxial nozzle

Table 1 Dimensions of dual, coaxial nozzles

	D_t (mm)	D_e (mm)	D_1 (mm)	D_2 (mm)	L (mm)	α (°)	β (°)	M_d
N-1	5	6.5	9.5	12.5	0	5	0	2.0
N-2	5	6.5	9.5	12.5	0	5	20	2.0
N-3	5	5	8	11	10	0	0	1
N-4	5	5	8	11	10	0	20	1

전압관(직경 0.5mm 스테인레스 관)의 이송속도는 약 17mm/s로 제트의 유동속도에 비하여 미미하여 실험결과에 미치는 영향은 무시할 수 있으나 실험의 신뢰성을 위하여 이송방향을 유동의 상·하류 방향으로 바꿔가면서 반복실험을 실시하였다. 전압 측정에는 정체실 압력을 일정하게 유지하면서 전압관을 이송하기 약 0.2초전부터 압력을 기록하며

노즐출구에서 약 300mm($x/De=46$)까지 이송하였으며, 본 연구에서 제트유동의 정상지속 시간은 전압관을 이송하는데 필요한 시간보다 충분히 큰 약 30초 이상 일정하게 유지시킬 수 있다.

2.3 실험조건

본 연구에서는 이중동축제트의 내부노즐인 원추형 노즐을 통하는 주제트 유동의 공급압력을 p_0 , 외부노즐인 환형노즐을 통하는 보조제트의 공급압력을 p_{os} , 대기압을 p_a 로 그리고 전압관에 의해 측정된 압력(Impact pressure)을 p_{pitot} 정의하였다. 또한 주제트의 압력비 p_0/p_a 를 PR_i 로, 보조제트의 압력비 p_{os}/p_a 를 PR_o 로 정의 하였다. 따라서 $PR_o=1.0$ 인 경우에는 보조제트 입구에서 압력이 대기압과 동일하다. 본 연구에서는 제트의 압력비 PR_i 를 2.0에서 10.0까지의 범위에서 변화시켰으며, 보조제트의 압력비 PR_o 를 1.0에서 4.0까지의 범위에서 변화시켰다. 한편 본 연구에 적용된 제트유동에 대하여 노즐출구 직경을 대표길이로 하는 Reynolds수는 노즐 압력비 PR 에 따라 변화하였으나, $1.53 \times 10^5 \sim 5.38 \times 10^5$ 의 범위에 있었다.

3. 결과 및 고찰

Fig.3에는 보조제트 충돌분류각 $\alpha = 0^\circ$ 인 N-1에 대하여, $PR_i=6.0$ 인 경우, PR_o 의 변화에 따른 유동장을 가시화한 사진들을 나타내었다. N-1의 주유동의 설계마하수는 2.0이며, 이때 노즐출구에서 주제트 유동의 적정팽창에 요구되는 압력비 PR_i 는 7.8이다. 따라서 Fig. 3에 보여지는 제트 유동은 과팽창 상태에 해당한다. 그러나 이 값은 보조제트 유동을 고려하지 않은 것으로, 보조제트 유동이 있는 경우, 보조제트는 노즐출구에서 발생하는 배압에 영향을 미칠 것이다. 따라서 보조제트를 수반하는 초음속 동축제트의 경우 적정팽창의 압력비를 정확하게 예측하는 것은 곤란하다. 여기서 $PR_o=1.0$ 인 경우는 보조제트유동이 없는 전형적인 단일 초음속제트유동을 의미한다.

Fig. 3(a)에서 볼 수 있듯이 유동은 전형적인 과팽창상태로 노즐출구에서 경사충격파가 발생하며 제트경계는 줄어들고 있는 것을 알 수 있다. 그러나 Fig. 3(b)에서 보조제트가 주제트에 충돌하는 경우, 주 제트내의 경사충격파의 발생위치는 노즐출구에서 하류쪽으로 약간 이동하며 충격파의 경사

각도 약간 커짐을 알 수 있다. 보조제트 압력비 PR_o 가 더욱 증가하는 Fig. 3(c),(d)에서는 노즐 출구

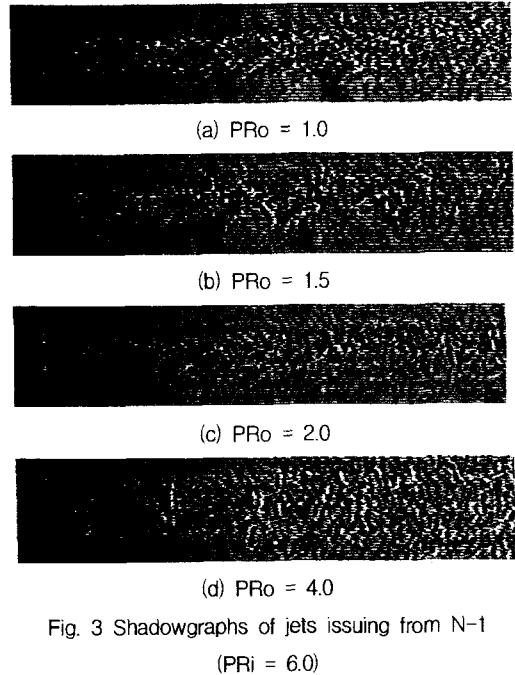


Fig. 3 Shadowgraphs of jets issuing from N-1 ($PR_i = 6.0$)

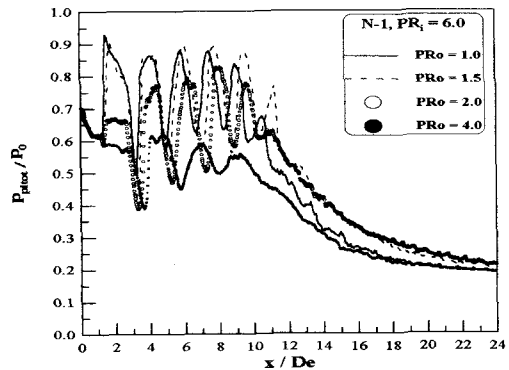


Fig. 4 Pitot pressure distributions along the center line of the coaxial jet (N-1, $PR_i = 6.0$)

에서 환형 충격파가 발생하며, 경사충격파의 크기는 약해짐을 알 수 있다. 이것은 PR_o 가 증가할수록 환형노즐 출구에서 발생하는 팽창파의 영향으로 주유동의 유효압력비를 증가시키는 역할과 제트 경계에서의 두 제트유동의 전단작용 및 보조제트 유동을 주제트 경계층에 평행으로 유지시키기 위한 것으로 생각된다. 이러한 경향을 더욱 상세히 알아보기 위하여 Fig. 4에 동축제트중심에서 유동방향의 피토압력(pitot pressure)분포를 나타내었다.

그림의 횡축은 노즐출구로부터 하류거리 x 를 노즐출구직경 De 로, 그리고 그림의 종축은 피토압력을 주체트 정체실 전압력 p_0 로 무차원 하였다. 주체트 유동은 노즐 출구에서 PRo 에 상관없이 팽창하나 $PRo=1.0, 1.5$ 및 2.0 의 경우는 노즐출구에서 발생하는 경사충격파에 의한 영향으로 $x/De \approx 1.2$ 에서 압축이 시작되며, 이후 팽창과 압축이 반복되면서 강도는 조금씩 약해지고 있다. 또한 PRo 가 증가할수록 팽창 및 압축의 주기가 조금씩 증가하고 있다. $PRo=4.0$ 에서는 전술한 바와 같이 환형노즐 출구에서의 초음속 팽창으로 인한 주체트유동의 유효압력비증가 영향으로 팽창도 및 팽창영역이 증가하며, 노즐출구에서 발생한 환형충격파의 영향으로 주체트유동의 압축정도가 약해지고 영역이 증가함을 알 수 있다.

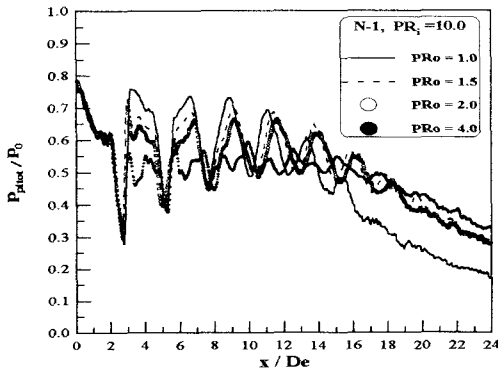


Fig. 5 Pitot pressure distributions along the center line of the co-axial jet(N-1, PRi = 10.0)

Fig. 5는 N-1, PRi=10.0, 즉 부족팽창 상태인 경우, 동축제트 중심에서 PRo 의 변화에 따른 피토압력(pitot pressure)분포를 나타내었다. 동축제트유동은 노즐 출구에서 급격히 팽창한 후 압축이 발생하며 PRo 가 증가할수록 충격파의 강도는 감소하며 팽창과 압축의 주기는 증가한다. 그러나 PRo 가 노즐출구의 팽창정도에 미치는 영향은 Fig. 4의 과팽창상태 유동보다는 크지 않다.

Fig. 6은 $\alpha = 0^\circ$, 주체트 유동의 출구마하수가 1.0의 음속 노즐인 N-3, PRi=8.0인 경우의 유동장 가시화 사진을 나타낸 것이다. Fig. 6(a)에서 주체트의 유동은 노즐출구에서 부족팽창상태로 되어 제트내부에서 충격파는 마하디스크를 형성하게 된다. 따라서 뚜렷한 바렐형의 제트 경계가 형성됨을 관찰 할 수 있다. 그러나 보조제트유동이 증가할수록

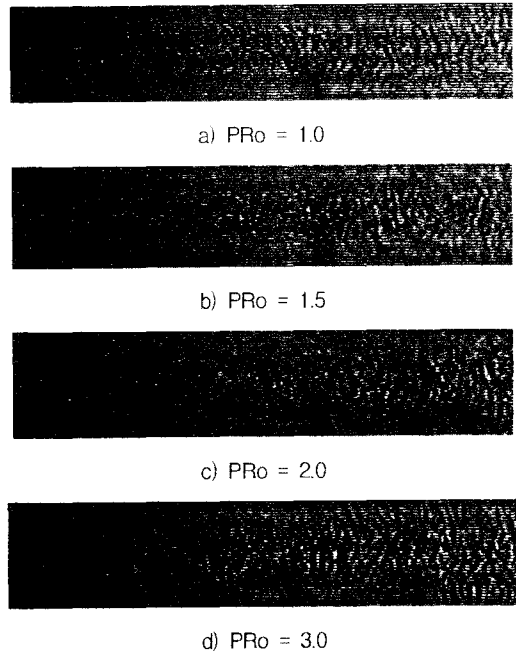


Fig. 6 Shadowgraphs of free jets issuing from N-3 (PRi = 6.0)

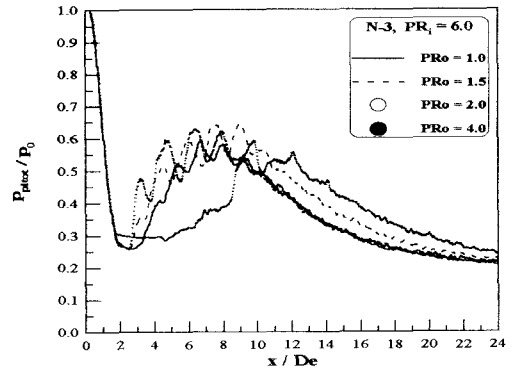


Fig. 7 Pitot pressure distributions along the center line of the co-axial jet (N-3, PRi = 6.0)

마하디스크의 크기가 작어지고 위치도 노즐 출구 쪽으로 이동하고 있어 보조제트가 주체트내의 마하디스크의 강도 및 위치에 큰 영향을 미치는 것으로 보인다. 이것은 동축제트 중심의 피토압력분포를 나타낸 Fig. 7에서 더 잘 알 수 있다. Fig. 7에서 알 수 있듯이 PRo 가 증가할수록 마하디스크 하류의 아음속 영역은 보다 짧은 영역에서 초음속으로 가속되어지고 있다. 또한 피토압력의 감소는

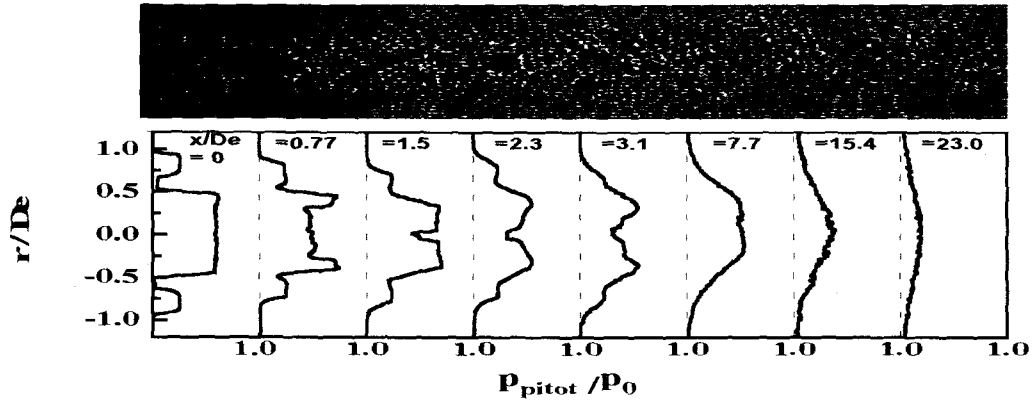
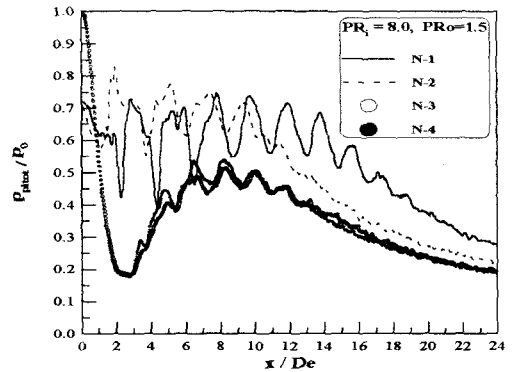


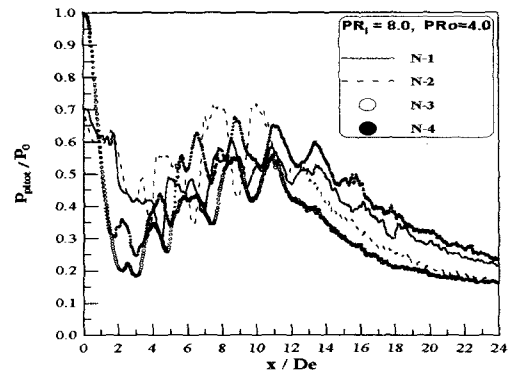
Fig. 8 Pitot pressure distributions of the coaxial jet (N-2, $PR_i=8.0$, $PR_o = 3.0$)

PR_o 가 증가할수록 작아진다는 것을 알 수 있다. 이것은 PR_o 가 증가 할수록 보조제트 유동이 노즐 출구에서 주제트의 팽창정도를 제한하게 되어, 충격과 마하디스크의 직경 및 강도를 감소시킨 때문이다. 또한 $PR_o=4.0$ 인 경우, 보조제트는 환형노즐 출구에서 강한 팽창제트 경계를 형성하여 주제트의 팽창을 더욱 억제시킴으로 마하디스크에 의한 유동의 압축정도도 다른 조건에 비하여 현저히 감소한다.

Fig. 8은 초음속 제트 유동장을 상세하게 고찰하기 위하여 반경방향으로의 피도압력 분포를 나타낸 것이다. 그림에서 x/De 는 노즐출구를 원점으로 하는 유동방향의 거리 x 를 내부노즐 출구직경 De 로 무차원한 값을 나타내며, 그림의 종축의 값은 노즐 중심축으로부터 반경방향의 거리 r 을 내부노즐의 출구직경 De 로 무차원 한 값이다. 또 그림의 횡축은 피도압력을 주제트 정체실 압력 p_0 로 무차원한 값이다. 그림으로부터 초음속 동축제트의 유동은 노즐출구에서는 주제트 및 보조제트가 간섭하지 않으며 제트경계가 분명히 구분되고, 각 제트 유동은 완전히 발달한 형태를 보인다. 그러나 노즐 출구 하류로 진행하면서 두 제트의 전단 및 확산 작용으로 인하여 제트경계가 약해지며, 두유동의 혼합영역은 주제트 경계로부터 내부로 진행하여 포텐셜 코어는 점차 줄어들어 $x/De=7.7$ 에서는 중심축부근의 극히 제한된 영역으로 축소된다. $x/De=7.7$ 이후 부터는 두 제트유동은 완전히 혼합하여 전형적이 아음속 유동장을 나타내고 있다. Fig. 9는 $PR_i=8.0$, PR_o 이 각각 1.5와 4.0인 경우, 노즐의 형상에 따른 동축제트 중심에서의 피도 압력분포를 나타낸 것이다. 보조제트유동이 아음속인 $PR_o=1.5$ 인 Fig. 9(a)경우에 음속노즐인 N-3과 N-4는



(a) $PR_o = 1.5$



(b) $PR_o = 4.0$

Fig. 9 Pitot pressure distributions along the center line of the coaxial jet ($PR_i = 8.0$)

거의 동일한 경향을 나타내고 있어 음속노즐에서 보조제트가 아음속인 경우, 보조제트 층돌분류각이 큰 영향을 미치지 않는다. 출구마하수가 2.0의 초음속 노즐인 N-1과 N-2의 경우, 노즐출구의 팽창

영역, 충격과 개수 및 진동 주기 등에서 차이를 보이고 있다. 보조분류의 각도가 0°인 경우가 20°인 경우에 비하여 노즐출구에서 팽창정도가 크며, 초음속 제트길이는 길어진다. PR_o 를 더욱 높여 보조제트 분류가 부족팽창상태의 초음속 유동이 되는 $PR_o=4.0$ 인 Fig. 9(b)의 경우 아음속과 초음속 노즐 모두 충격과 시스템이 보조제트 분류각에 많은 영향을 받는다는 것을 알 수 있다. 이것은 환형노즐 출구에서 초음속으로 유동하므로 주제트 유동의 유효팽창비를 변화시켜 환형충격과 발생하고, 보조제트내부에서 발생하는 팽창영역 및 충격과가 주제트 경계에 미치는 영향이 증가하기 때문이라 생각된다.

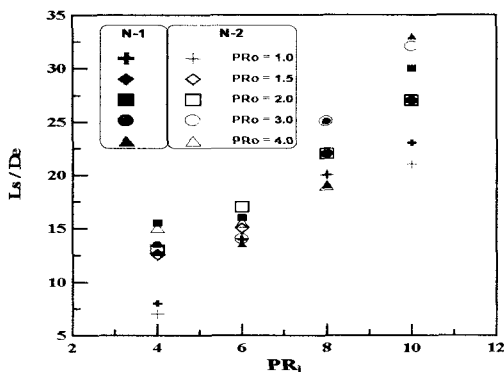


Fig. 10 Supersonic flow length of dual coaxial jets

Fig. 10에는 PR_i , PR_o 및 α 가 초음속 제트 코어 길이에 미치는 영향을 나타내었다. 그림의 종축은 초음속 동축 제트의 중심축에서 발생하는 음속점까지의 길이 L_s 를 노즐 목직경 De 로 무차원한 값을, 그리고 횡축은 주제트의 압력비를 나타낸다. 본 연구에서 음속의 길이는 Rayleigh Pitot 식에서 정압을 대기압으로, 마하수를 1.0으로 가정하여 피토펙압을 계산한 후 측정 피토펙압과 비교하여 도출하였다. 그림으로부터 주제트와 보조제트 압력비가 증가할수록 L_s 의 값은 증가한다는 것을 알 수 있다. 또 L_s 에 미치는 노즐형상의 영향은 과팽창인 경우는 충돌각이 0°인 N-1이 약간 길게 나타나며, 부족팽창인 경우 큰 차이가 없다. 동일한 PR_i 인 경우 PR_o 이 증가할수록 L_s 는 증가하는 것으로 보인다.

4. 결론

본 연구에서는 형상이 다른 4종류의 이중, 동축

노즐 제작하여, 초음속 공기제트 유동을 실험하였다. 실험에서 주제트 및 보조제트의 압력비와 보조제트의 충돌 분류각 등이 동축 초음속 제트에 미치는 영향을 조사하여 얻어진 결과들은 다음과 같이 요약된다.

1. 동축초음속 제트구조, 충격과 시스템, 초음속 길이, 피토펙압 분포 등은 PR_o 가 증가할수록, 주제트 유동이 부족팽창상태보다 과팽창상태인 경우에 더 큰 영향을 미친다.
2. 보조제트의 충돌분류각은 피토펙압분포, 충격과강도 등에 영향을 미치며, 주제트의 팽창상태 및 PR_o 에 따라 미치는 영향은 다르다.
3. N-1(주제트 출구마하수 = 2.0, 보조제트 충돌분류각 = 0°), $PR_i=10$, $PR_o=1.0$ 인 경우 초음속 길이 $L_s/De \approx 23$ 에서 PR_o 가 4.0으로 증가하면 $L_s/De \approx 33$ 으로 약 43% 증가한다. 또한 초음속 길이는 주제트가 부족팽창인 경우에 PR_o 의 영향을 더 크게 받는다.

후기

이 논문은 2001년도 두뇌한국21사업에 의하여 지원되었음.

참고문헌

- (1) Love, E. S., Grigsby, C. E., Lee, L. P. and Woodling, M. S., 1959, "Experimental and Theoretical Studies of Axisymmetric Free Jets," NASA TR R-6.
- (2) 김희동, 신현승, 1996, "초음속 노즐을 통하는 부족팽창 제트에 관한 수치계산적 연구(2)," 대한기계학회 논문집(B), 제 20권, 제 6호, pp. 1994~2004.
- (3) Crowe, J. J., 1942, "Divergent Nozzle Tips for Economical Oxygen Cutting," Weld. J., Vol. 21, No. 1, pp. 34~40.
- (4) Masuda, W. and Moriyama, E., 1994, "Aerodynamic Characteristics of Underexpanded Coaxial Impinging Jets," JSME Intl. Jour., Series B, Vol. 37, No. 4, pp. 769~775.
- (5) 이권희, 구병수, 김희동, 2001, "가스절단용 초음속 제트유동에 관한 기초적 연구," 대한기계학회 논문집 B권 (in press)