

초음속 환형동축 자유 제트유동에 관한 실험적 연구 (보조제트 압력비 영향에 관하여)

이권희* · 이준희** · 김희동**

The Experimental Study of Supersonic, Dual, Coaxial, Free, Jets (The effects of the assistant jet pressure ratio)

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, axisymmetric, jets issuing from several 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 different impinging angle on the jet axis of 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 lead to a longer supersonic length of the dual, coaxial jet.

초록

본 연구에서는 이중동축노즐로부터 대기로 방출되는 초음속 자유제트유동을 실험하였다. 출구마하수가 2.0이고 총돌각이 다른 축소확대노즐 및 출구마하수가 1.0이고 총돌각이 다른 축소노즐을 사용하고, 주제트 압력비와 보조제트 압력비를 각각 4.0~10.0, 1.0~4.0으로 변화시켜 가면서 자유제트 유동장 특성을 조사하였다. 본 연구의 결과로부터 보조제트 압력비가 동축자유제트유동 특성에 영향을 미치며, 주제트 및 보조제트 압력비가 증가할수록 동축제트의 초음속 길이도 증가한다는 것을 알았다.

1. 서론

일반적으로 초음속 제트유동은 고압의 기체를 오리피스나 노즐을 통하여 방출시킬 때 발생하

*국립안동대학 BK21 연구원

**국립안동대학 기계공학과

제작하여 사용하였다. 환형노즐은 노즐목과 출구단면적이 동일한 유속노즐이다. Table 1에는 노즐목의 직경(D_t), 노즐출구 직경(D_e), 노즐확대각(α), 보조유동 충돌각(β) 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 설계하였다. 또 보조제트 유동의 공급라인에서 발생하는 유동의 초크현상 및 압력 손실을 줄이기 위하여 유로를 노즐출구 단면적 보다 충분히 크게 설계하였다.

2.2 측정 방법

실험은 제트 유동의 가시화와 압력측정을 통하여 수행되었다. 유동의 가시화는 Fig. 1에 나타낸바와 같이 슈리렌법 및 shadowgraph를 이용하였으며, 유동장의 가시화 Image는 CCD를 통하여 PC로 전송하였다. 가시화용 광원은 발광시간이 대략 $2\mu s$ 인 마그네슘 스파크광을 사용하

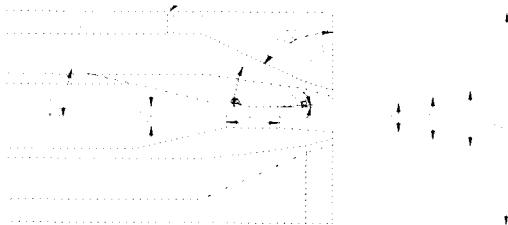


Fig. 2 Details of supersonic, dual, coaxial nozzle

Table 1 Dimensions of dual, coaxial nozzles

	D_t (mm)	D_e (mm)	$D1$ (mm)	$D2$ (mm)	L (mm)	α ($^\circ$)	β ($^\circ$)	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

였다. 정체실 압력은 반도체형 압력센서(Kulite, XT-190)를 사용하여 측정하였으며, 자유제트 내부의 흐름장은 압력센서를 부착한 외경이 0.5mm인 전압관을 3차원 이송장치에 부착하여 측방

향 및 반경방향으로 이송시키면서 수회 반복 측정하였다.

전압관(직경 0.5mm 스테인레스 관)의 이송속도는 약 17mm/s로 제트의 유동속도에 비하여 매우 작아 실험결과에 미치는 영향은 무시할 수 있었으나 실험의 신뢰성을 위하여 이송방향을 유동의 상·하류방향으로 바뀌가면서 반복실험을 실시하였다. 전압측정에는 정체실 압력을 일정하게 유지하면서 전압관을 이송하기 약 0.2초 전부터 압력을 기록하며 노즐출구에서 약 300mm($x/De \approx 46$)까지 이송하였으며, 본 연구에서 제트유동의 정상지속 시간은 전압관을 이송하는데 필요한 시간보다 충분히 큰 약 30초 이상 일정하게 유지시킬 수 있었다.

2.3 실험 조건

본 연구에서는 이중동축제트의 내부노즐인 원추형 노즐을 통하는 주제트 유동의 공급압력을 p_0 , 외부노즐인 환형노즐을 통하는 보조제트의 공급압력을 p_{0s} , 대기압(배압)을 p_a 로 그리고 전압관에 의해 측정된 압력(Impact pressure)을 p_{pitot} 로 정의하였다. 또한 주제트의 압력비 p_0/p_a 를 PR_i 로, 보조제트의 압력비 p_{0s}/p_a 를 PR_o 로 정의하였다. 따라서 $PR_o=1.0$ 인 경우에는 보조제트 입구에서 공급압력이 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 레이놀즈수는 노즐 압력비 PR 에 따라 변화하였으나, 대략 $1.53 \times 10^5 \sim 5.38 \times 10^5$ 의 범위에 있었다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 3에는 보조제트 충돌분류각 $\beta = 0^\circ$ 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 노

즐출구에서 주제트 유동의 적정팽창에 요구되는 압력비 PR_i 는 약 7.8이다. 따라서 Fig. 3에 보여지는 제트 유동은 과팽창 상태에 해당한다. 그러나 이 값은 보조제트 유동을 고려하지 않은

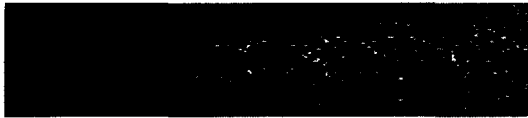
(a) $PR_o = 1.0$ (b) $PR_o = 1.5$ (c) $PR_o = 2.0$ (d) $PR_o = 4.0$

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

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 초음속 제트유동을 의미한다.

Fig. 3(a)에서 주제트유동은 전형적이 과팽창 상태로 노즐출구에서 경사충격파가 발생하며 제트경계 폭은 노즐출구부근에서 감소하는 것을 알 수 있다. 그러나 Fig. 3(b)에서 보조제트가 주제트에 충돌하는 경우, 노즐출구에서 제트경계폭은 약간 증가후 감소하며, 경사충격파의 위치도 유동하류 방향으로 이동하고 있다. 또 경

사충격파의 경사각도 약간 커짐을 알 수 있다. 이는 노즐 하류에서 두제트가 혼합하여 경사충격파 바로 하류의 압력이 증가하기 때문이라 생

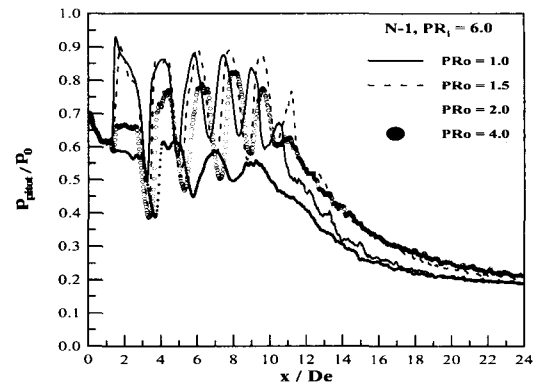


Fig. 4 Impact pressure distributions along the center line of the coaxial jet (N-1, $PR_i=6.0$)

각된다. 압력비 PR_o 가 더욱 증가하여 보조제트가 초음속으로 팽창하는 Fig. 3(c), (d)에서는 노즐 출구에서 환형 충격파가 발생하며, 보조제트가 노즐출구에서 팽창하여 제트경계가 뚜렷이 구분되고 있다. $PR_o=4.0$ 인 경우, 주제트내의 충격파시스템은 보조제트에서 발생하는 환형충격파와 간섭하여 복잡한 구조를 형성하고 있다. 이것은 PR_o 가 증가할수록 환형노즐 출구에서 발생하는 팽창파의 영향으로 주유동의 유효압력비를 증가시키며, 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 노즐 출구직경 De 로, 그리고 그림의 종축의 값은 피토압력을 주제트 정체실 전압력 p_0 로 무차원 하였다. 주제트 유동은 노즐 출구에서 PR_o 에 상관없이 팽창하나 $PR_o=1.0, 1.5$ 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 PR_o 가 증가할수록 팽창 및 압축의 주

기가 조금씩 증가하고 있다. $PRo=4.0$ 에서는 전술한 바와 같이 환형노즐 출구에서의 초음속 팽창으로 인한 주제트유동의 유효압력비증가 영향으로 팽창도 및 팽창영역이 증가하며, 주제트내의 압축 및 팽창의 강도는 약하나 제트유동의 피토압력은 전반적으로 낮아진다.

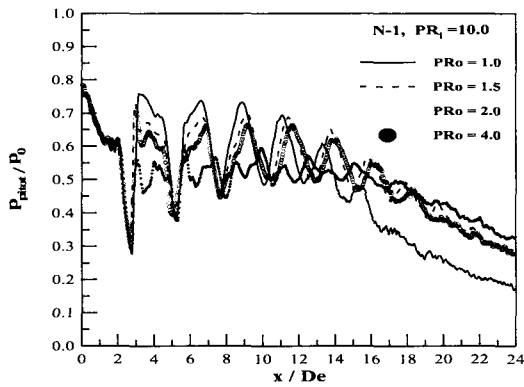


Fig. 5 Impact pressure distributions along the center line of the co-axial jet.(N-1,PRi=10.0)

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 주제트유동의 충격파의 강도는 감소하며 팽창과 압축의 주기는 증가한다. 그러나 PRo 가 노즐출구의 팽창경향에 미치는 영향은 Fig. 4의 과팽창상태 유동보다는 크지 않다.

Fig. 6은 $\beta=0^\circ$, $\alpha=0^\circ$ 주제트 유동의 출구마하수가 1.0의 음속 노즐인 N-3인 경우, $PRi=8.0$ 에 대하여 유동장을 가시화한 사진들이다. Fig. 6(a)에서 주제트의 유동은 노즐출구에서 부족팽창상태로 되어 제트내부에서 충격파는 마하디스크를 형성하게 된다. 따라서 뚜렷한 바렐형의 제트 경계가 형성됨을 관찰할 수 있다. 그러나 보조제트유동의 PRo 가 증가할수록 마하디스크의 직경이 감소하며, 그의 위치도 노즐 출구쪽으로 이동하고 있어 보조제트가 주제트내의 마하디스크의 강도 및 위치에 큰 영향을 미치는 것으로

보인다. 이러한 경향은 동축제트 중심의 피토압

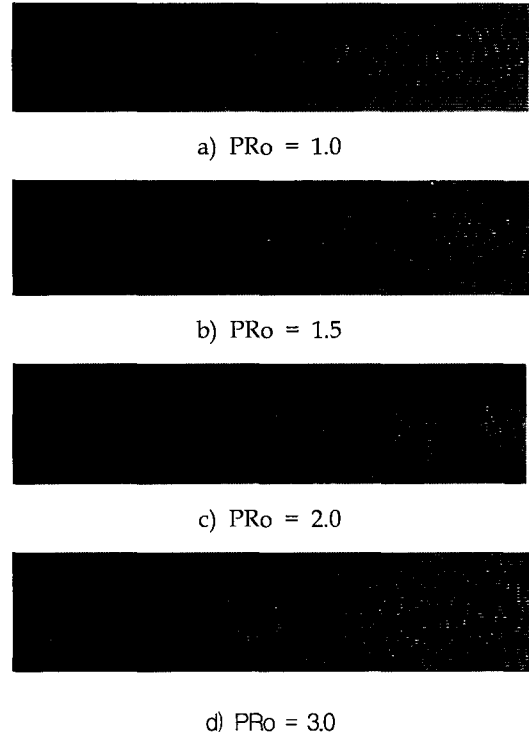


Fig. 6 Shadowgraphs of free jets issuing from N-3 ($PRi = 6.0$)

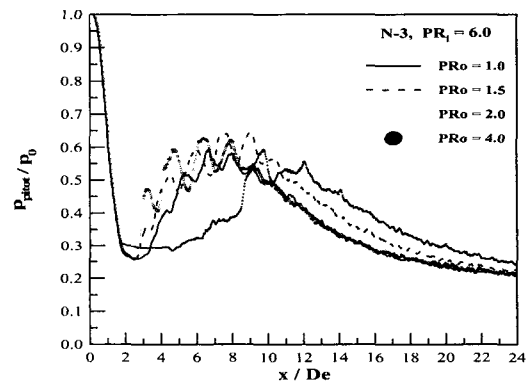


Fig. 7 Impact pressure distributions along the center line of the co-axial jet (N-3, $PRi = 6.0$)

력분포를 나타낸 Fig. 7에서 더 잘 알 수 있다.

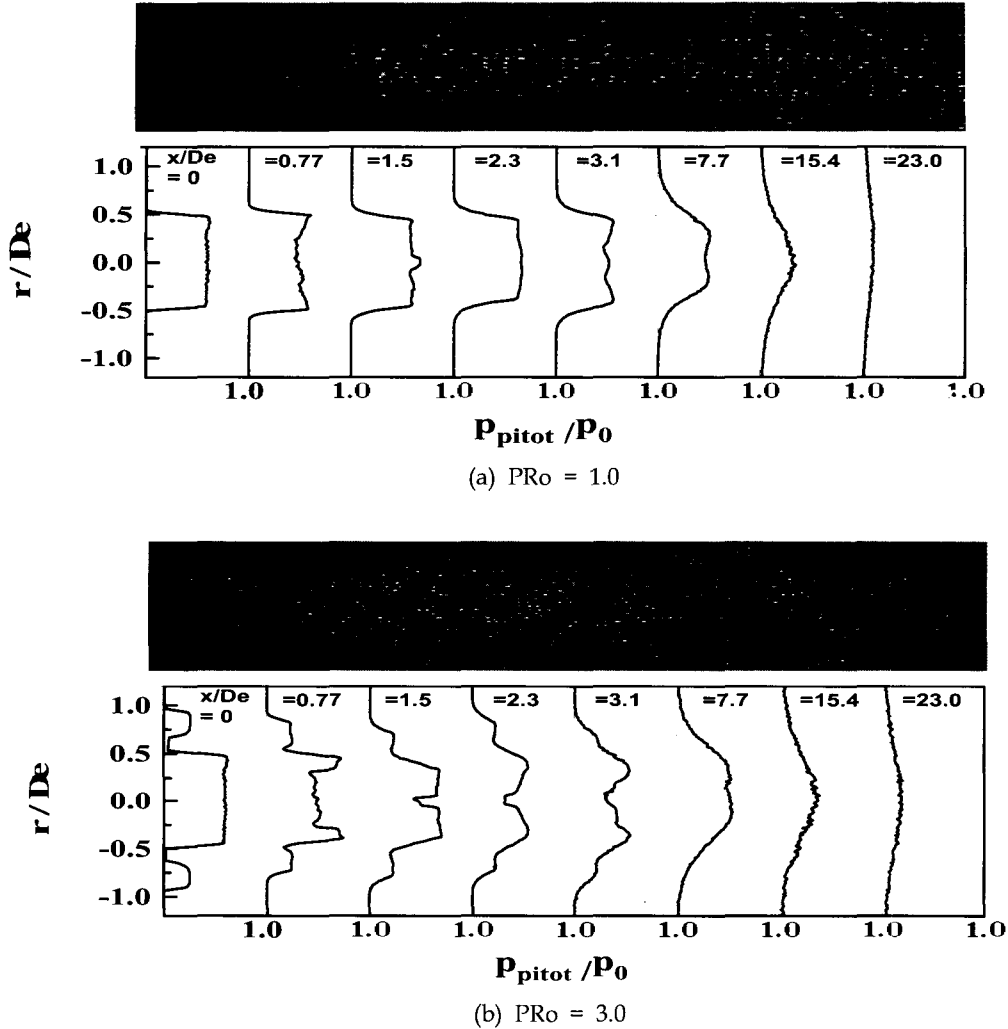
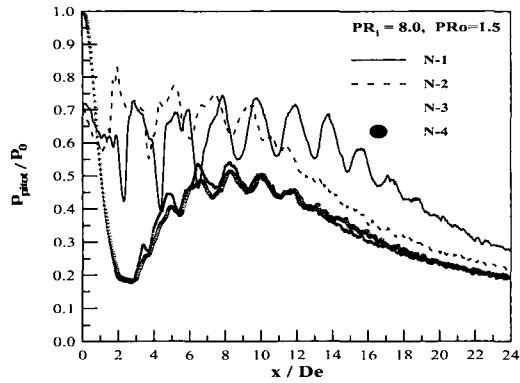


Fig. 8 Impact pressure distributions of the coaxial jet (N-2, PRI=8.0)

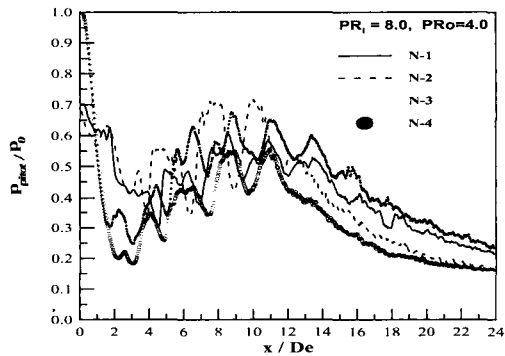
Fig. 7에서 PR_o 가 증가할수록 피토압력의 상승위치가 동축노즐 출구쪽으로 이동하며, 마하디스크 하류에서 유동의 압축영역도 짧아짐을 알 수 있다. 특히 $PR_o=4.0$ 의 경우, 노즐출구직 후에는 마하디스크가 존재하지 않으며, $x/De=8.5$ 부근에서 급격한 압축이 발생한다. 또 피토압력의 유동방향으로의 감소는 PR_o 가 증가할수록 작아진다는 것을 알 수 있다. 이것은 PR_o 가 증가할수록 보조제트 유동이 노즐출구에서 주제트의 팽창정도를 제한하게 되어, 충격파 마하디스크의 직경 및 강도를 감소시킨 때문이

다.

Fig. 8은 초음속 제트 유동장을 상세하게 관찰하기 위하여 축소확대노즐인 N-2에 대하여 반경방향으로의 피토압력 분포를 나타낸 것으로 x/De 는 노즐출구를 원점으로 하는 유동방향의 거리 x 를 주노즐 출구직경 De 로 무차원한 값이며, 종축의 값은 노즐 중심축으로부터 반경방향의 거리 r 을 주노즐의 출구직경 De 로 무차원한 값이다. 또 횡축은 피토압력을 주제트 정체실 압력 p_0 로 무차원한 값이다.



(a) PRo = 1.5



(b) PRo = 4.0

Fig. 9 Impact pressure distributions along the center line of the coaxial jet (PRi = 8.0)

Fig. 8(a)는 PRo=1.0인, 주제트 유동만 있는 경우로 노즐 출구에서 주제트 유동은 완전히 발달한 형태를 보인다. 그러나 노즐 출구 하류로 진행하면서 주위의 기체와의 전단작용 및 확산 작용으로 인하여 제트의 경계는 확대되며, 유동의 혼합영역은 주제트 경계로부터 내부로 진행하여 완전발달 영역은 점차 줄어들어 x/De=7.7에서는 중심축부근의 극히 제한된 영역으로 축소된다. x/De=7.7 이후 부터는 제트유동은 완전히 혼합하여 전형적이 아음속 유동장을 나타내고 있다. Fig. 8(b)는 PRo=3.0인, 동축제트 유동으로 동축노즐 출구에서 두제트의 경계는 뚜렷이 구분된다. 그러나 노즐 출구 하류로 진행하면서 두 제트의 전단 및 혼합작용으로 인하여 제트경계가 약해지며, 두유동의 혼합영역은 Fig. 8(a)에

비하여 빠르게 주제트 경계로부터 내부로 진행

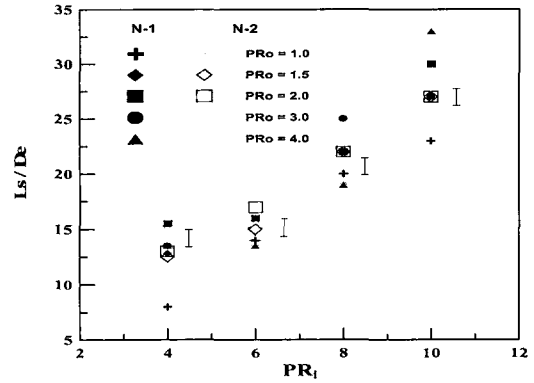


Fig. 10 Supersonic length of dual coaxial jets

하여 완전발달영역 및 포텐셜 코어는 점차 줄어들고 있다. Fig. 8(b)의 경우도 x/De=7.7 이후 부터는 두 제트유동은 완전히 혼합하여 전형적이 아음속 유동장을 나타내고 있다.

Fig. 9는 PRi=8.0, PRo이 각각 1.5와 4.0인 경우, 노즐의 형상에 따른 동축제트 중심에서의 피토 압력분포를 나타낸 것이다. 보조제트유동이 아음속인 PRo=1.5인 Fig. 9(a)경우에 음속노즐인 N-3과 N-4는 거의 동일한 경향을 나타내고 있어 음속노즐에서 보조제트가 아음속인 경우, 보조제트 충돌분류각이 큰 영향을 미치지 않는다. 그러나 출구마하수가 2.0의 초음속 노즐인 N-1과 N-2의 경우, 노즐출구의 팽창영역, 충격파 개수 및 진동 주기 등에서 차이를 보이고 있다. 보조분류의 충돌각도가 0°인 경우가 20°인 경우에 비하여 노즐출구에서 팽창정도가 크며, 초음속 제트길이는 길어진다. PRo가 증가하여 보조제트가 부족팽창상태의 초음속 유동이 되는 PRo=4.0인 Fig. 9(b)의 경우, 아음속과 초음속 노즐 모두 충격파 시스템이 보조제트 충돌각에 많은 영향을 받는다는 것을 알 수 있다. 이것은 보조제트가 환형노즐 출구에서 초음속으로 유동하므로 주제트 유동의 유효팽창비를 변화시켜 환형충격파가 발생하며, 보조제트내부에서 발생하는 팽창영역 및 충격파가 주제트 경계에 미치는 영향이 증가하기 때문이라 생각된다.

Fig. 10에는 PRi, PRo 및 β가 초음속 제트

코어길이에 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 초음속 제트의 길이는 Rayleigh Pitot 식⁽⁶⁾에서 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 PRi인 경우 PRO이 증가할수록 L_s 는 증가하는 것으로 보인다.

4. 결론

본 연구에서는 형상이 다른 4종류의 이중, 동축 노즐을 제작하여, 초음속 공기제트 유동을 실험하였다. 실험에서 주 제트 및 보조 제트의 압력비와 보조제트의 충돌 분류각 등이 동축 초음속 제트에 미치는 영향을 조사하여 얻어진 결과들은 다음과 같이 요약된다.

1. 동축 초음속 제트구조, 충격파 시스템, 초음속 길이, 피토펙 압력 분포 등은 PRO의 변화에 영향을 받으며, 주제트유동이 부족팽창상태보다 과팽창상태인 경우가 PRO에 더 큰 영향을 받는다.
2. 보조제트의 충돌각은 피토펙압력분포, 충격파강도 등에 영향을 미치며, 충돌각 및 PRO가 증가할수록 충격파 피토펙압력은 증가한다.
3. 초음속 제트길이는 주제트 및 보조제트 압력비가 증가할수록 증가하며, 충돌각의 변화에는

큰 차이가 없다.

4. N-1 (주제트 출구마하수 = 2.0, 보조제트 충돌각 = 0°), PRi=10, PRO=1.0인 경우에 초음속 길이 L_s/De 는 약 23에서 PRO가 4.0으로 증가하면 L_s/De 는 약 33으로 약 43% 증가한다.

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 통한 부족팽창 제트에 관한 수치해석적 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)
- (6) LIEPMANN. H. W. and ROSHKO. A., 1957, "ELEMENTS of GASDYNAMICS," Jone Wiley & Sons, Inc.