

초음속 이중 동축 제트유동에서 발생하는 충격파 구조에 관한 연구

이권희* · 이준희** · 김희동*** · 박종호****

Study of the Shock Structure of Supersonic, Dual, Coaxial, Jets

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

ABSTRACT

The shock structure of dual coaxial jet is experimentally investigated. Eight different kinds of coaxial, dual nozzles are employed to observe the major features of the near field shock structure on the supersonic, coaxial, dual jets. Four convergent-divergent supersonic nozzles having the Mach number 2.0 and 3.0 are used to compare the coaxial jet flows discharging from two sonic nozzles. The primary pressure ratio is changed in the range between 1.0 and 10.0, and the assistant jet ratio from 1.0 to 4.0. The results show that the impinging angle, nozzle geometry and pressure ratio significantly affect the near field shock structure, Mach disk location and Mach disk diameter.

초 록

본 연구에서는 이중 동축 노즐로부터 대기로 방출되는 초음속 자유제트유동을 실험하였다. 출구마하수, 보조제트 충돌각 및 주제트 노즐 형상이 다른 8종류의 노즐을 사용하고, 주제트 및 보조제트 압력비를 각각 1.0~10.0, 1.0~4.0으로 변화시켜 노즐 출구 근방에서의 자유제트 유동장 특성을 상세히 조사하였다. 본 연구의 결과로부터 노즐의 형상 및 보조제트 분류각이 노즐 출구의 충격파 시스템에 영향을 미치며, 노즐출구로부터 마하디스크까지의 거리는 주제트 압력비가 증가할수록, 보조제트 압력비가 감소할수록 증가하나 마하디스크의 직경은 주제트 및 보조제트 압력비의 조합에 따라 달라진다는 것을 알았다.

* 안동대학교 BK21 연구원

** 안동대학교 기계공학과 대학원

*** 안동대학교 기계공학부

****충남대학교 기계공학과

1. 서 론

노즐이나 오리피스로부터 방출되는 초음속 자유제트 유동은 다양한 산업분야에서 많이 사용되고 있다. 이에 관해서는 현재까지 많은 연구가 수행되어, 노즐의 압력비가 알려지는 경우, 제트에서 발생하는 충격파 구조 및 위치, 제트 경계의 구조, 제트코어, 제트 폭 그리고 마하디스크 위치 및 직경 등 유동현상이 비교적 상세하게 알려져 있다.⁽¹⁻³⁾ 그러나 가스절단(gas cutting nozzle), 기체역학레이저(gasdynamics laser), 초음속 이젝터(supersonic ejector), 제트 소음 경감, 추력증강, 두 유동의 혼합증진 등에 사용되는 이중 동축 노즐로부터 분사되는 동축 초음속 자유제트 유동은 매우 복잡하기 때문에, 노즐 출구 부근의 상세한 유동구조는 완전히 알려져 있지 않으며, 초음속 이중 동축 노즐의 실제적인 설계 및 응용을 위한 체계적인 연구가 필요한 실정이다.

최근 Kumar⁽⁴⁾ 등이 동축 노즐 끝단부 형상이 전단 경계층의 성장과 유동의 혼합에 미치는 영향을, Narayanan⁽⁵⁾ 등이 초음속 부족팽창 동축 제트 유동을 연구하여 압력비가 마하디스크 위치 및 직경에 미치는 영향을 조사하였다. 또한 Rao⁽⁶⁾ 등은 주제트 노즐의 형상, 압력비, 노즐 단면적비 등이 충격파구조에 미치는 영향을 연구하였으며, Dosanjh⁽⁷⁾ 등은 초음속 동축 제트에서 발생하는 소음의 경감을 위한 연구를 수행하였다. Lee^(8,9)은 Navier-Stokes 방정식을 사용한 수치계산과 실험을 통하여, 보조제트의 압력비, 전온도, 충돌각 등이 주제트의 전압, 마하수, 제트코어, 충격파 위치, 속도분포 등과 같은 유동특성에 미치는 영향을 광범위하게 조사하였다. 본 연구에서는 노즐형상이 각각 다른 8 종류의 초음속 및 음속 노즐을 제작하고 슈리렌 시스템을 이용한 유동장 가시화 및 제트 유동장의 압력을 측정하여 보조제트의 충돌각, 노즐형상, 노즐출구 마하수 그리고 노즐 압력비가 이중 동축 초음속 노즐 끝단부에서의 충격파구조, 마하디스크 위치 및 직경, 전압분포 등 동축제

트의 주요 특성값에 미치는 영향을 조사하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치

본 연구에서는 Fig. 1과 같이 압축기, 1차 정체실, 2차 정체실, 전압관, 계측시스템 및 슈리

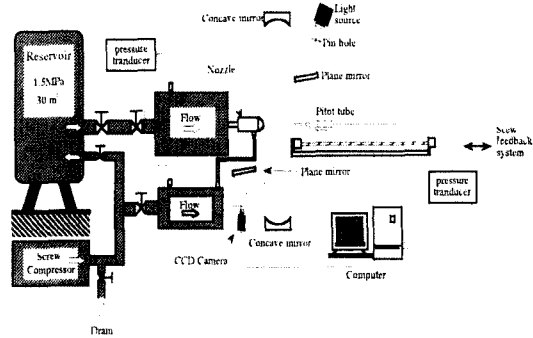


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

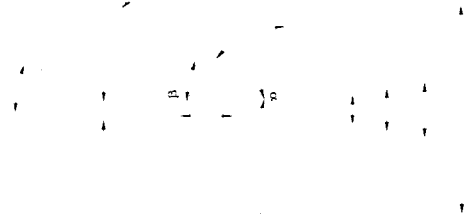


Fig. 2 Details of supersonic, dual, coaxial nozzle

Table 1 Dimensions of dual, coaxial nozzles

	D_t (mm)	D_e (mm)	D_1 (mm)	D_2 (mm)	L (mm)	α ($^\circ$)	β ($^\circ$)	M_d
N-1	5	6.5	9.5	12.5	0	5	0	2.0
N-2		10.3	13.3	16.3	0	5	0	3.0
N-3		6.5	9.5	9.5	0	5	20	2.0
N-4		10.3	13.3	16.3	0	5	20	3.0
N-5		6.5	9.5	12.5	10	5	0	2.0
N-6		5	8	11	10	0	0	1.0
N-7		5	8	11	10	0	20	1.0
N-8		10.3	13.3	16.3	0	5	0	3.0

렌 시스템으로 구성된 실험장치를 이용하여 초음속 공기제트의 유동을 실험하였다. 1차

정체실(1.5MPa, 30m³)에 저장된 압축공기는 건조장치와 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 위해 압력센서가 부착되어 있으며, 2차 정체실 압력은 각각의 압력조절 밸브로 독립적으로 조절된다.

Fig. 2에는 본 연구에서 사용된 이중 동축 노즐의 상세 형상을 나타내었다. 주제트 노즐은 출구 마하수가 2.0 와 3.0인 초음속 노즐(supersonic nozzle)과, 출구 마하수가 1.0인 음속노즐(sonic nozzle)이며, 보조제트 노즐은 주제트 노즐 중심축에 대하여 총돌각 β 가 0° 와 20° 인 환형 노즐이다. 실험은 위와 같은 주제트 및 보조제트 노즐의 조합으로 이루어진 8개의 이중 동축 노즐을 제작하여 사용하였다. 환형노즐은 노즐목과 출구단면적이 동일한 음속노즐이다. Table 1에는 노즐목의 직경(D_i), 노즐출구 직경(D_e), 노즐확대각(α), 보조유동 총돌각(β) 등을 정리하였다.

본 연구에 사용된 각 노즐에 대하여 노즐목까지의 형상, 즉 노즐 축소부의 형상은 축소부 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 단면적보다 충분히 크게 설계하였다.

2.2 실험 방법

실험은 제트 유동의 가시화와 압력측정을 통하여 수행되었다. 유동의 가시화는 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 shadowgraph를 이용하였으며, 유동장의 가시화 이미지는 CCD를 통하여 PC로 전송하였다. 가시화용 광원은 발광시간이 대략 2 μ s인 마그네슘 스파크광원을 사용하였다. 정체실 압력은 반도체형 압력센서(Kulite, XT-190)를 사용하여 측정하였으며, 자유제트 내부의 유

동장은 압력센서를 부착한 외경이 0.5mm인 전압관을 3차원 이송장치에 부착하여 축방향 및 반경방향으로 이송시키면서 수회 반복 측정하였다. 전압관(직경 0.5mm 스테인레스 관)의 이송속도는 약 17mm/s로 제트의 유속에 비하여 매우 작아 실험결과에 미치는 영향은 무시할 수 있었으나 실험의 신뢰성을 위하여 이송방향을 유동의 상·하류방향으로 바꾸면서 반복실험을 실시하였다. 전압측정에는 정체실 압력을 일정하게 유지하면서 전압관을 이송하기 약 0.2초전부터 압력을 기록하며 노즐출구에서 약 300mm($x/D_e \approx 46$)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 이중 동축 제트의 내부노즐인 원추형 노즐을 통하는 주제트 유동의 공급압력을 p_0 , 외부노즐인 환형 노즐을 통하는 보조제트의 공급압력을 p_{os} , 대기압(배압)을 p_a 로 그리고 전압관에 의해 측정된 압력(Impact pressure)을 p_{pilot} 로 정의하였다. 또한 주제트의 압력비 p_0/p_a 를 PR_i 로, 보조제트의 압력비 p_{os}/p_a 를 PR_o 로 정의하였다. 따라서 $PR_o=1.0$ 인 경우에는 보조제트 입구에서 공급압력이 대기압과 동일하다. 본 연구에서는 주제트의 압력비 PR_i 를 1.0에서 10.0까지의 범위에서 변화시켰으며, 보조제트의 압력비 PR_o 를 1.0에서 4.0까지의 범위에서 변화시켰다. 한편 본 연구에 적용된 주제트에 대하여 내부의 노즐출구 직경을 대표 길이로 하는 레이놀즈수는 노즐 압력비 PR_i 에 따라 변화하였으나, 대략 $1.53 \times 10^5 \sim 5.38 \times 10^5$ 의 범위에 있었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 압력비에 따른 영향

Fig. 3은 주제트 압력비가 동축 초음속 제트 유동에 미치는 영향을 알아보기 위하여 총돌분

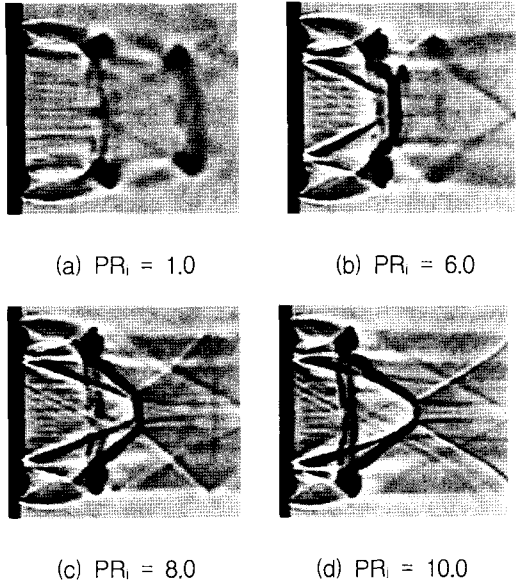


Fig. 3 Flow visualization showing dual coaxial jet
(N-1, $PR_o = 4.0$)

류각 $\beta = 0^\circ$, $M_d = 2.0$ 인 N-1에 대한 유동장을 가시화 사진을 나타내었다. 여기서 보조제트 압력비는 4.0으로 동일한 경우이다. Fig. 3(a)는 보조제트 유동만 있는 경우, 즉 $PR_i = 1.0$ 으로, 환형 노즐 출구에서 유동장은 팽창하여 도우넛형의 환형충격파가 발생하고 있음을 알 수 있다. 환형 충격파의 직경은 제트 하류로 갈수록 작아지고 있다. 이는 환형 제트유동의 전단작용에 의하여 주제트 유동영역의 압력이 동축제트 주위의 대기압보다 작아지기 때문이라 생각된다. 주제트 유동이 있는 Fig. 3(b)~(d)의 경우, 노즐 출구에서 유동장 내부로 향하는 경사충격파가 발생하며, 노즐 하류에 주제트 경계와 환형충격파의 간섭에 의한 충격파(이하 궁형충격파로 정의한다)가 발생한다.

주제트 압력비가 증가할수록 주제트 노즐출구에서의 경사충격파의 기울기는 감소하며, 궁형충격파의 강도는 약해짐을 알 수 있다. 또한 환형충격파의 위치는 노즐 출구쪽으로 이동하고 있다. 이는 주제트의 팽창도가 증가할수록 보조제트의 팽창을 억제하여 환형충격파의 강도가

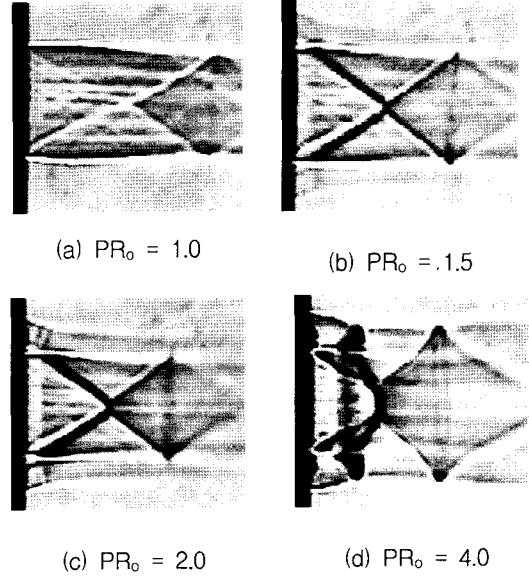


Fig. 4 Flow visualization showing dual coaxial jet
(N-3, $PR_i = 8.0$)

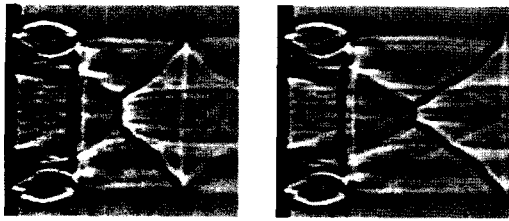
약해지고 위치가 노즐 출구쪽으로 이동하며, 주제트 내의 경사충격파의 기울기가 감소하여 궁형충격파와 간섭하고 보조제트의 유동이 주제트 내로 혼합하는 정도가 증가하여 충격파 전후의 압력변화에 영향을 미친 결과라 생각된다.

Fig. 4는 보조제트 압력비가 주제트 노즐출구 충격파 구조에 미치는 영향을 알아보기 위해, N-3, $PR_i = 8.0$ 인 경우, PR_o 를 증가시키면서 유동장을 가시화한 사진이다. N-3의 주유동 설계마하수는 2.0이므로 노즐 출구에서 주제트 유동의 적정팽창에 요구되는 압력비 PR_i 는 약 7.8이다. 따라서 Fig. 4의 제트유동은 적정팽창상태에 가깝다. 보조제트가 없는 경우인, Fig. 4(a)에서 유동장은 노즐 출구에서 조금 팽창을 하며 유동장 내에 약한 경사충격파가 발생함을 알 수 있다. 보조제트의 압력비가 증가할수록 주제트 경계의 팽창은 억제되며 경사충격파의 각이 증가하여 마하디스크가 형성됨을 알 수 있다. 보조제트가 아음속이거나 적정팽창에 가까운 $PR_o = 1.5$ 와 2.0인 경우는 주제트의 충격파 시스템에 큰 영향이 없으나, 부족팽창상태가 되는 $PR_o = 4.0$ 인

경우에는 환형 노즐 출구에서 환형충격파와 주 제트 유동에 공형충격파가 발생하는 복잡한 충격파 구조를 이루고 있다.

3.2 노즐형상에 따른 영향

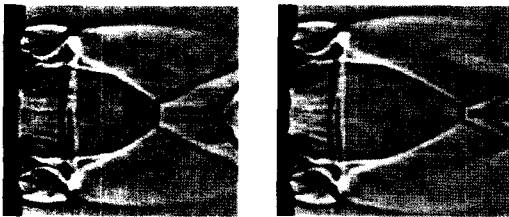
Fig. 5는 노즐목의 길이변화가 충격파 구조에



(a) $PR_1 = 8.0$

(b) $PR_1 = 10.0$

Fig. 5 Flow visualization showing dual coaxial jet (N-5, $PR_0 = 4.0$)



(a) $PR_1 = 8.0$

(b) $PR_1 = 10.0$

Fig. 6 Flow visualization showing dual coaxial jet (N-6, $PR_0 = 4.0$)

미치는 영향을 알아보기 위하여, 압력비 및 노즐 설계조건은 Fig. 3의 N-1과 동일하나, 노즐 목 길이가 다른 N-5에 대한 유동장을 가시화 사진이다. Fig. 5에서는 Fig. 3에는 보이지 않던 주 제트 노즐출구에서 주 제트 유동장 외부로 향하는 립충격파(lip shock) 및 바렐충격파가 나타나지만 경사충격파는 발생하지 않는다. 이로부터 노즐목 길이가 노즐 목과 출구의 단면적비를 변화시켜 유동의 팽창상태를 변화시킨 결과라 판단된다. 따라서 주유동의 팽창상태가 충격파 구조에 크게 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

Fig. 6은 주 제트 노즐의 형상에 따른 영향을 알아보기 위하여 주 제트 노즐이 유속노즐인 N-6에 대한 유동장의 가시화 사진이다. Fig. 6에서도 Fig. 3에서 발생한 경사충격파와 공형충격파 대신 립충격파 및 바렐충격파가 나타나며, 압력비가 증가할수록 마하디스크의 위치는 유동의 하류로 이동하며, 마하디스크의 직경은 작아진다.

또한 환형충격파는 유동장 상류로 이동하며, 출구에서 충격파의 기울기는 증가한다. 동일한 주 제트 압력비에 대하여 단면적이 일정한 유속 노즐이 축소-확대의 초음속 노즐보다 노즐 출구에서 팽창도가 크다. 이로부터 제트유동의 팽창정도가 노즐 출구에서의 충격파 구조에 영향을 미침을 알 수 있다.

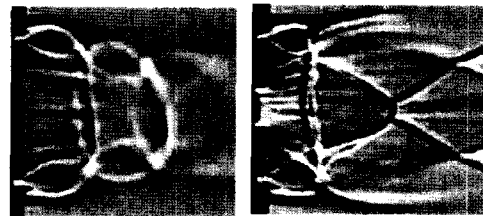
3.3 보조제트 분류각에 따른 영향

보조제트 분류각(β)이 주제트에 미치는 영향을 알아보기 위하여, $\beta = 20^\circ$ 인 N-3 및 N-7에 대한 유동장 가시화 사진을 Fig. 7에 나타내었다.



(a) N-3, $PR_1 = 1.0$

(b) N-3, $PR_1 = 10.0$



(c) N-7, $PR_1 = 1.0$

(d) N-7, $PR_1 = 10.0$

Fig. 7 Flow visualization showing dual coaxial jet ($PR_0 = 4.0, \beta = 20^\circ$)

Fig. 7을 보면, 압력비 및 주제트 노즐 설계조건이 동일하고, $\beta=0$ 인 Fig. 3의 N-1 및 Fig. 6의 N-6에 비하여 충격파 기울기는 증가하며, 마하 디스크 직경은 작다는 것을 알 수 있다. 이것은 보조제트가 주제트의 팽창을 억제시킨 결과로 판단되며 보조제트 분류각이 주제트의 팽창상태에 영향을 미친다고 생각한다.

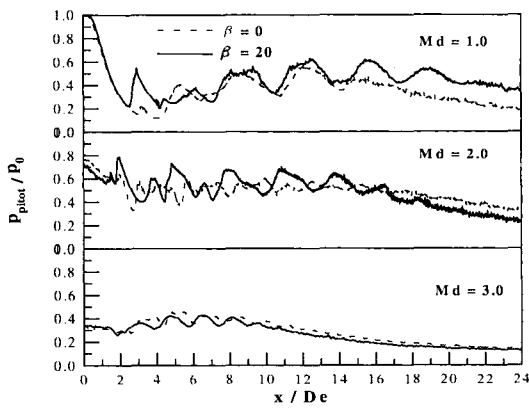
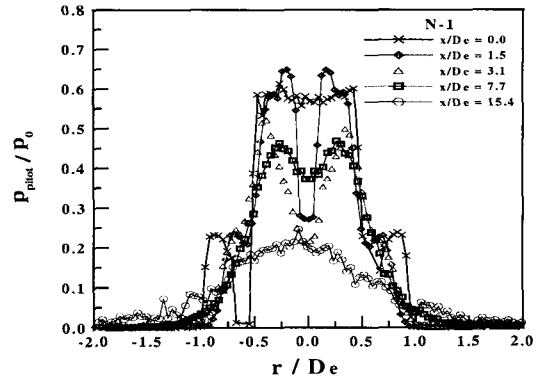


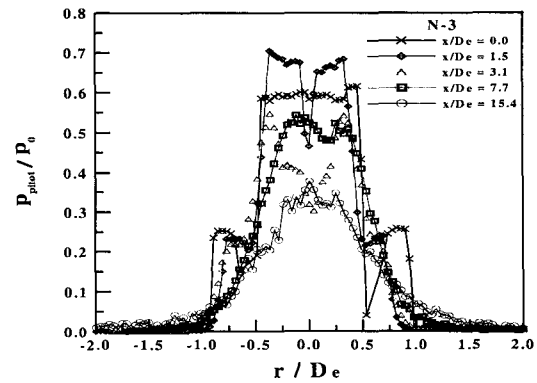
Fig. 8 Impact pressure distribution along the center line ($PR_i = 10.0, PR_o = 4.0$)

Fig. 8은 동축제트 중심에서 유동방향으로의 피토 압력분포를 나타낸 그림이다. 그림의 횡축은 노즐출구로부터 하류거리 x 를 주제트 노즐 출구직경 De 로, 종축의 값은 피토압력을 주제트 정체실 전압 p_0 로 무차원화하였다.

Fig. 8을 보면 설계마하수 $Md=1.0$ 과 2.0 인 경우, 즉 주제트 노즐출구에서 각각 부족팽창상태와 적정팽창상태가 되는 경우는 β 가 클수록 평균 피토압력은 크나, $Md=3.0$ 인 경우, 즉 주제트 유동이 충분한 과팽창 상태인 경우는 β 에 큰 영향을 받지 않는다.



(a) N-1



(b) N-3

Fig. 9 Impact pressure distribution in radial direction ($PR_i=8.0, PR_o=3.0$)

Fig. 9는 동축 제트유동장의 반경방향 피토압력 분포를 나타낸 그림이다. 그림의 횡축은 노즐 중심축에서 반경방향으로의 거리 r 을 주제트 노즐 출구직경 De 로, 종축의 값은 피토압력을 주제트 정체실 전압 p_0 로 무차원화하였다. Fig. 9(a)에서, 제트는 노즐 축을 중심으로 대칭분포를 이루고 있다. 노즐출구인 $x/De=0.0$ 에서는 주제트 영역과 보조제트 영역이 뚜렷이 구분되며, 반경방향으로 일정한 피토 압력 분포를 이루고 있어 유동장은 충분히 발달한 것을 알 수 있다. $x/De=1.5$ 에서는 두 유동장은 혼합하기 시작하여 제트경계는 약해지며, 노즐중심부의 제트코어 영역과 주위의 초음속 및 아음속 영역

으로 나뉘어 지는 전형적인 초음속 유동장을 이루고 있다. 이러한 유동은 더욱 하류로 진행하면서 제트경계는 없어지며 제트코어영역이 급속히 감소하고 있다. $x/D_e \approx 15.4$ 에서는 전형적이 아음속 유동장 형태를 이루고 있으며, 충격파 및 점성마찰 손실 등에 의하여 피토압력이 작아짐을 알 수 있다. $\beta=20^\circ$ 인 Fig. 9(b)는 Fig. 9(a)비해 제트코어는 빨리 감소되어 두 유동장의 혼합이 더욱 활발하다는 것을 알 수 있다. 또한 제트 하류의 피토압력은 높게 나타나고 있다. 이는 앞에서 언급한 바와 같이 보조제트 분류각이 주제트의 팽창을 억제시켜 유동장 내의 충격파 손실과 두 제트의 점성마찰 손실을 감소시킨 결과라 생각된다.

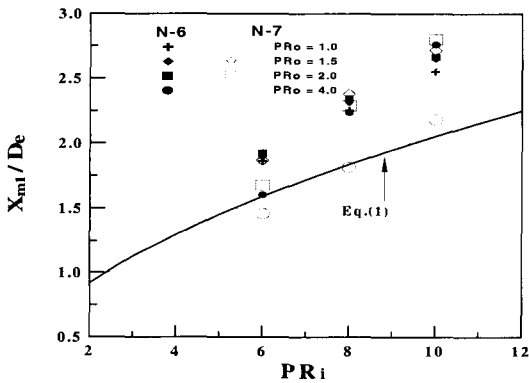


Fig. 10 Mach disk location vs pressure ratio

Fig. 10에는 주제트 및 보조제트 압력비가 마하디스크의 위치에 미치는 영향을 나타내었다. 그림의 종축은 노즐출구로부터 첫 번째 마하디스크의 거리 X_{m1} 을 주제트 노즐 직경 D_e 로 무차원 한 값이다. 주제트의 압력비가 증가할수록 노즐 출구로부터 마하디스크의 거리는 증가하며, Addy의 이론식(1)⁽¹⁰⁾과 유사한 경향을 보이고 있으나, 보조제트의 압력비에 따른 영향은 보조제트 분류각에 따라 다른 경향을 보이고 있다. 즉, 보조제트 분류각 $\beta=0^\circ$ 인 N-6의 경우는 보조제트 압력비에 큰 영향을 받지 않으나, $\beta=20^\circ$ 인 N-7의 경우는 동일한 주제트 압력비에서 보조제트 압력비가 증가할수록 마하디스크

의 위치가 노즐 출구로부터 가까워지고 있다.

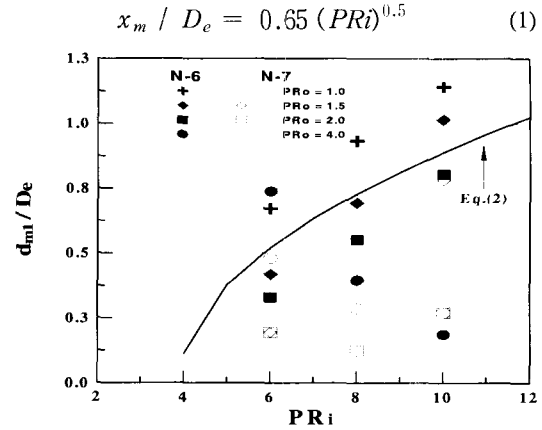


Fig. 11 Mach disk diameter vs pressure ratio

Fig. 11은 주제트 및 보조제트 압력비가 마하디스크 직경에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 그림의 종축은 노즐출구로부터 첫 번째 마하디스크의 직경 d_{m1} 을 주제트 노즐 직경 D_e 로 무차원화한 값이다. 보조제트가 없는 경우는 주제트의 압력비가 증가할수록 마하디스크 직경은 증가하여 Addy의 이론식(2)⁽¹⁰⁾와 유사한 경향을 보이고 있다.

$$d_m / D_e = 0.36(PR_i - 3.9)^{0.5} \quad (2)$$

그러나 보조제트가 있는 경우는 일정한 경향이 없이 압력비 및 보조제트 분류각에 따라 복잡한 결과를 보이고 있다. 이것은 주제트와 보조제트의 팽창정도 및 보조제트 분류각이 서로 간섭하여 충격파 구조에 영향을 미치기 때문이라 생각한다.

4. 결론

본 연구에서는 형상이 다른 8종류의 이중, 동축노즐을 제작하여, 초음속 공기제트 유동을 실험하였다. 실험에서 제트의 압력비와 보조제트

의 충돌분류각 및 주제트 노즐 형상 등이 동축 초음속 제트에 미치는 영향을 조사한 결과는 다음과 같다.

1. 노즐 압력비, 충돌 분류각 및 노즐 형상은 초음속 이중 동축 초음속 자유제트 유동 내의 충격파 구조에 영향을 미친다.
2. 노즐 출구부근에서 발생하는 충격파들은 경사충격파, 립충격파, 환형충격파, 궁형충격파 및 바렐 충격파 등으로 구성되며, 충격파의 구조는 제트 유동의 팽창 상태에 크게 달라진다.
3. 보조제트 충돌분류각이 초음속 동축 제트 유동 및 충격파 구조에 미치는 영향은 주제트 유동의 팽창상태에 따라 다른 경향을 보이며, 노즐 목길이의 변화는 유동의 팽창상태에 영향을 미친다.
4. 이중 동축 초음속 제트유동내의 마하디스크의 거리는 PR_i 가 증가할수록, PR_o 감소할수록 증가하며, $PR_o=4.0$ 인 경우는 $PR_o=1.0$ 에 비하여 약 15% 적다. 또한 마하디스크의 직경은 $PR_o=1.0$ 인 보조제트가 없는 경우는 제트유동의 압력비 변화에 일정한 경향을 가지나 보조제트가 있는 경우는 제트유동의 압력비와 충돌분류각(β)의 영향으로 복잡한 경향을 보인다.

후 기

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. Karanoda H., Miyazato Y., Masuda M. and Matsuo K., 2000, "Pitot pressure of correctly-expanded and underexpanded free jets from axisymmetric supersonic nozzles." *Shock Waves*, Vol. 10, pp. 95~101.
4. Ramesh Kumar R. and Job Kurian, 1996, "Coaxial Jets from Lobed-Mixer Nozzles," *AIAA Journal*, Vol. 34, No. 9, pp. 1822~1828.
5. Anil K. Narayanan and K. A. Damodaran, 1992, "Mach Disk of Dual Coaxial Axisymmetric," *AIAA Journal*, VOL, 31, NO. 7, pp.1343~1345.
6. Rao T. V. R., Kumar P. R., Kurian J., 1996, "Near field shock structure of dual co-axial jets," *Shock Waves*, pp. 361~366.
7. Dosanjh, D. S., "Acoustic and Flow Characteristic of Cold High-Speed Coaxial Jets," *AIAA Journal*, No.2, pp. 153~159.
8. 이권희, 구병수, 김희동, 2001, "가스절단용 초음속 제트유동에 관한 기초적 연구," 대한기계학회 논문집 B권, 제 25권, 제 6호, pp. 837~844.
9. 이권희, 이준희, 김희동, 2001, "초음속 환형 동축 자유 제트유동장에 관한 실험적 연구(보조제트 압력비 영향에 관하여)," 한국추진공학회지, 제5권, 제2호, pp. 51~58.
10. Addy A. L., 1981, "Effects of Axisymmetric Sonic Nozzle Geometry on Mach Disk Characteristics," *AIAA Journal*, Vol. 19, No.1, pp. 121~122