

초음속 이중 동축 제트유동에서 발생하는 충격파 구조에 관한 연구

이권희*·이준희**·김희동**

Study of the Shock Structure of Supersonic, Dual, Coaxial, 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), Mach Disk(마하디스크)

Abstract

The shock structure of supersonic, 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 of the supersonic, coaxial, dual jets. Four convergent-divergent supersonic nozzles having the Mach number of 2.0 and 3.0, and are used to compare the coaxial jet flows discharging from two sonic nozzles. The primary pressure ratio is changed in the range between 4.0 and 10.0 and the assistant jet pressure ratio from 1.0 to 4.0. The results obtained show that the impinging angle, nozzle geometry and pressure ratio significantly affect the near field shock structure, Mach disk location and Mach disk diameter. The annular shock system is found depending the assistant and primary jet pressure ratios.

1. 서 론

노즐이나 오리피스로부터 방출되는 초음속 자유제트 유동은 다양한 산업분야에서 많이 사용되어지고 있으며, 이에 관해서는 현재까지 많은 연구가 수행되어, 노즐의 압력비가 알려지는 경우, 제트유동에서 발생하는 충격파 구조 및 위치, 제트 경계의 구조, 제트코어, 제트 폭 그리고 마하디스크 위치 및 직경 등 유동현상이 비교적 상세하게 알려져 있다.^(1,2) 그러나 가스절단(gas cutting nozzle), 기체역학레이저(gasdynamics laser), 초음속 이젝터(supersonic ejector), 제트소음 경감, 추력증강, 두 유동의 혼합증진 등에 사용되어지는 이중 동축 노즐로부터 방출되는 동축 초음속 자유제트 유동은 매우 복잡하여, 노즐 출구 부근의 상세한

유동구조는 완전히 알려져 있지 않으며, 초음속 이중 동축 노즐의 실제적인 설계 및 응용을 위해서는 이에 관한 체계적인 연구가 요구된다.

최근 Kumar⁽⁴⁾ 등이 동축 노즐 끝단부 형상이 전단 경계층의 성장과 유동의 혼합에 미치는 영향을, Narayanan⁽⁵⁾ 등이 초음속 부속팽창 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 방정식의 수치계산법 및 실험을 통하여, 보조제트의 압력비, 전온도, 충돌분류각 등이 주제트 내부에서 발생하는 전압력, 마하수, 제트코어, 충격파 위치, 속도분포 등의 유동특성에 미치는 영향을 광범위하게 조사하였다.

본 연구에서는 노즐형상이 각각 다른 8종류의 초음속 및 음속 노즐을 제작하여 슈리렌 시스템을 이용한 유동장 가시화 및 제트 유동장의 압력측정

* 회원, 안동대학교 BK21 연구원

** 회원, 안동대학교 기계공학과

E-mail : kimhd@andong.ac.kr

실험을 실시하여, 보조제트의 충돌 분류각, 노즐 형상, 노즐출구 마하수 그리고 노즐 압력비가 이중 동축 초음속 노즐 끝단 부에서의 충격파구조, 마하 디스크 위치 및 직경, 전압력분포 등 동축제트의 주요 특성값에 미치는 영향을 조사하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치

본 연구에서 사용된 실험장치는 압축기, 1차 정체실, 2차 정체실, 전압관, 계측시스템 및 슈리렌 시스템으로 구성되어 있으며 상세한 제원 및 측정 방법은 참고문헌⁽⁹⁾에 잘 나타나 있다.

Fig. 1에는 본 연구에서 사용된 이중 동축 노즐의 상세 형상을 나타내었다. 주제트 노즐은 출구 마하수가 2.0, 3.0인 초음속 노즐과, 출구 마하수가 1.0인 음속노즐(sonic nozzle)이며, 보조제트 노즐은 주제트 노즐 중심축에 대하여 충돌 분류각 β 가 0° 와 20° 인 환형 노즐이다. 실험은 위와 같은 주제트 및 보조제트 노즐로 이루어진 8개의 이중 동축 노즐을 제작하여 사용하였다. 환형노즐은 노즐목과 출구단면적이 동일한 음속노즐이다. 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 보조제트유동의 공급 라인에서 발생하는 유동의 초크현상 및 압력 손실을 줄이기 위하여 유로를 노즐출구 단면적 보다 충분히 크게 설계하였다.

2.2 실험 조건

본 연구에서는 이중 동축 제트의 내부노즐인 원추형 노즐을 통하는 주제트 유동의 공급압력을 p_0 , 외부노즐인 환형 노즐을 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 변화시켰으

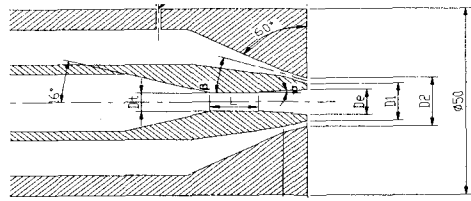


Fig. 1 Details of supersonic, dual, coaxial nozzle

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		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

며, 보조제트의 압력비 PR_o 를 1.0에서 4.0까지의 범위에서 변화시켰다. 한편 본 연구에 적용된 제트 유동에 대하여 노즐출구 직경을 대표 길이로 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

3.1 압력비에 따른 영향

Fig. 2는 주제트 압력비가 동축 초음속 제트 유동에 미치는 영향을 알아보기 위하여 충돌 분류각 $\beta = 0^\circ$, $M_d=2.0$ 인 N-1에 대한 유동장을 가시화 사진을 나타내었다. 여기서 보조제트 압력비 $PR_o=4.0$ 으로 동일한 경우이다. Fig. 2(a)는 보조제트 유동만 있는 경우로, 환형 노즐 출구에서 유동장은 팽창하여 도우넛형의 환형충격파가 발생하고 있음을 알 수 있다. 환형 충격파의 직경은 유동장 하류로 갈수록 작아지고 있다. 이것은 환형 제트유동의 전단작용에 의하여 주제트 유동영역의 압력이 동축제트 주위의 대기압보다 적어지기 때문이라 생각된다. 주제트 유동이 있는 Fig. 2(b)~(d)의 경우, 노즐 출구에서 유동장 내부로 향하는 경사충격파(이하 우향 경사충격파로 정의)가 발생하며, 노즐 하류에 주제트 경계와 환형충격파의 간섭에 의

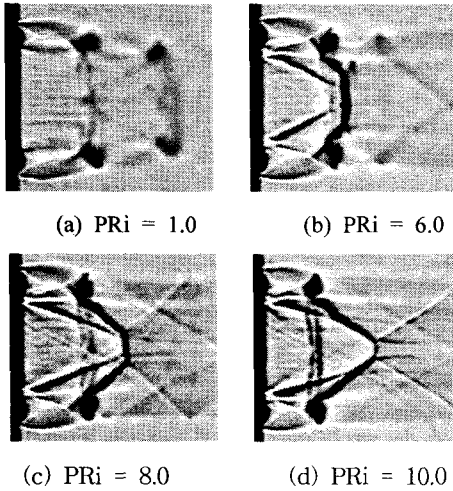


Fig. 2 Flow visualization showing dual coaxial jet (N-1, $PR_o = 4.0$)

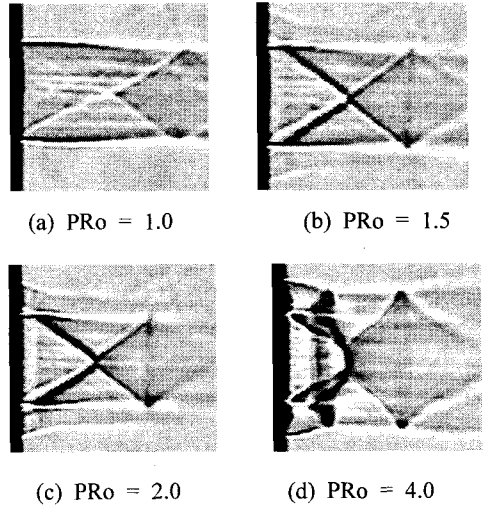


Fig. 3 Flow visualization showing dual coaxial jet (N-3, $PR_i = 8.0$)

한 충격파(이하 궁형충격파로 정의)가 존재한다. 주제트 압력비가 증가할수록 주제트 노즐출구에서의 우향 경사충격파의 기울기는 감소하며, 궁형충격파의 강도는 약해짐을 알 수 있다. 또한 환형충격파의 위치는 노즐 출구 쪽으로 이동하고 있다. 이것은 주제트의 팽창도가 증가할수록 보조제트와의 혼합에 따른 영향으로 충격파 전후의 압력변화에 따른 결과라 생각된다.

Fig. 3은 보조제트 압력비가 주제트 노즐출구 충격파 구조에 미치는 영향을 알아보기 위하여, N-3, $PR_i=8.0$ 인 경우, PR_o 를 증가시키면서 유동장을 가시화한 사진이다. N-3의 주유동 설계마하수는 2.0으로 이때 노즐 출구에서 주제트 유동의 적정팽창에 요구되는 압력비 PR_i 는 약 7.8이다. 따라서 Fig. 3에 보여지는 제트유동의 적정팽창상태에 가깝다. 보조제트가 없는 경우인, Fig. 3(a)을 보면 유동장은 노즐 출구에서 조금 팽창을 하며 유동장 내에 약한 우향 경사충격파가 발생함을 알 수 있다. 보조제트의 압력비가 증가할수록 주제트 경계의 팽창은 억제되어지며 우향 경사충격파의 각도가 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 주제트 유동에 궁형충격파가 발생하는 복잡한 충격파 구조를 이루고 있다.

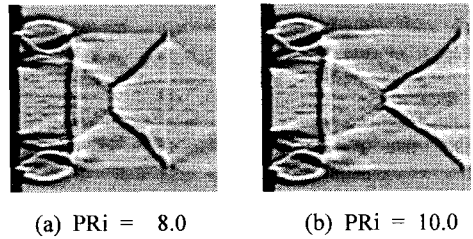


Fig. 4 Flow visualization showing dual coaxial jet (N-5, $PR_o = 4.0$)

조를 이루고 있다.

3.2 노즐형상에 따른 영향

Fig. 4는 노즐 목 길이변화가 충격파 구조에 미치는 영향을 알아보기 위하여, 압력비 및 노즐 설계조건은 Fig. 2의 N-1과 동일하나, 노즐 목 길이가 다른 N-5에 대한 유동장을 가시화 사진이다. Fig. 4에서는 Fig. 2에는 보이지 않던 주제트 노즐 출구에서 주제트 유동장 외부로 향하는 경사충격파(이하 좌향 경사충격파로 정의) 및 바렐충격파가 나타나고, 우향 경사충격파 및 궁형충격파는 없애지고 있어 노즐목 길이 변화가 충격파 구조에 영향을 미침을 알 수 있다. 이것은 노즐목 길이가 노즐 목과 출구의 단면적비를 변화시켜 유동의 팽창상태를 변화시킨 결과라 생각된다. 따라서 주유동

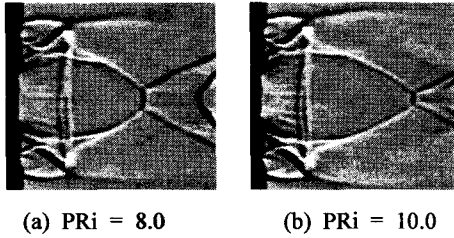


Fig. 5 Flow visualization showing dual coaxial jet (N-6, P_{Ro} = 4.0)

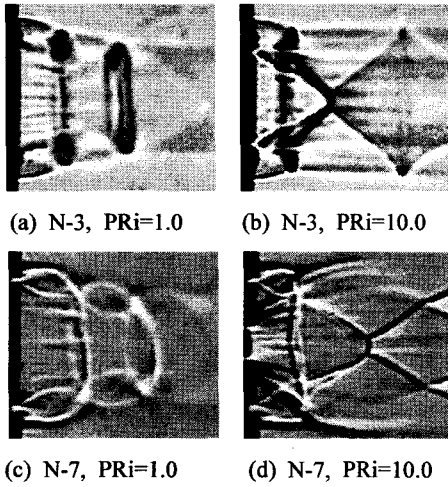


Fig. 6 Flow visualization showing dual coaxial jet (P_{Ro}=4.0, $\beta = 20$)

의 팽창상태가 충격과 구조에 크게 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

Fig. 5는 주제트 노즐의 형상에 따른 영향을 알아보기 위하여 주제트 노즐이 음속노즐인 N-6에 대한 유동장을 가시화 한 사진이다. Fig. 5에서도 Fig. 2에 보여지는 우향 경사충격파와 궁형충격파 대신 좌향 경사충격파 및 바벨 충격파가 나타나며, 압력비가 증가할수록 마하디스크의 위치는 유동의 하류로 이동하며, 마하디스크의 직경은 적어진다. 또한 환형충격파는 유동장 상류로 이동하며, 출구 충격파의 기울기는 증가한다. 동일한 주제트 압력비에 대하여 단면적이 일정한 음속 노즐이 축소화 대의 초음속 노즐보다 노즐 출구에서 팽창도가 크다. 이것으로 보아 제트유동의 팽창정도가 노즐 출

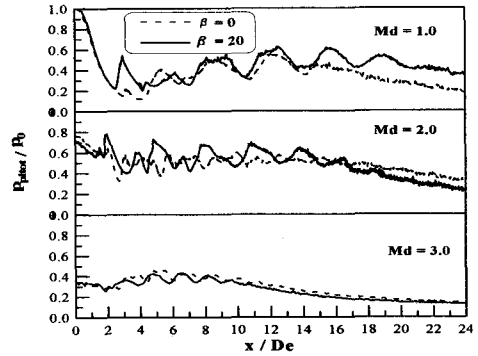


Fig. 7 Impact pressure distribution along the center line (P_{Ri} = 10.0, P_{Ro} = 4.0)

구에서의 충격과 구조에 영향을 미침을 알 수 있다.

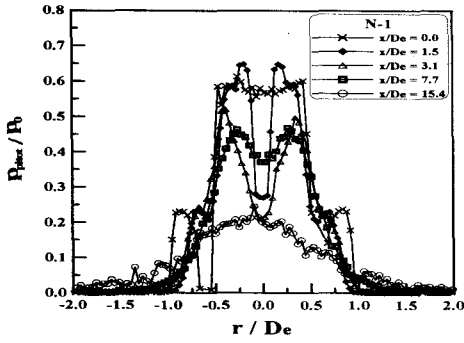
3.3 보조제트 분류각에 따른 영향

보조제트 분류각(β)이 주제트에 미치는 영향을 알아보기 위하여, $\beta=20^\circ$ 인 N-3 및 N-7에 대한 유동장 가시화 사진을 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6을 보면, 압력비 및 주제트 노즐 설계조건이 동일하고, $\beta=0$ 인 Fig. 1의 N-1 및 Fig. 5의 N-6에 비하여 충격과 기울기는 증가하며, 마하디스크 직경은 작다는 것을 알 수 있다. 이것은 보조제트가 주제트의 팽창을 억제시킨 결과로 보조제트 분류각이 주제트의 팽창상태에 영향을 미친다고 생각한다.

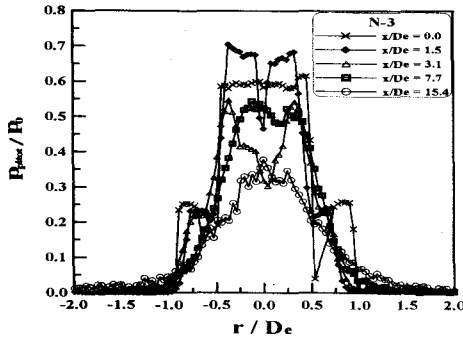
이러한 경향을 좀더 상세히 알아보기 위하여 Fig. 7에 동축제트 중심에서 유동방향으로의 피토 압력분포를 나타내었다. 그림의 횡축은 노즐출구로부터 하류거리 x 를 주제트 노즐 출구직경 De 로, --중축의 값은 피토압력을 주제트 정체실 전압력 p_0 로 무차원 하였다.

Fig. 7을 보면 설계마하수 $Md=1.0$ 과 2.0 인 경우, 즉, 주제트 노즐출구에서 각각 부족팽창상태와 적정팽창상태가 되는 경우는 β 가 클수록 평균적인 피토압력은 크나, $Md=3.0$ 인 경우, 즉 주제트 유동이 충분한 과팽창 상태인 경우는 β 의 크기에 큰 영향을 받지 않는다.

Fig. 8은 동축 제트유동장의 반경방향 피토압력 분포를 나타내었다. 그림의 횡축은 노즐 중심축에서 반경방향으로의 거리 r 을 주제트 노즐 출구직경 De 로, 중축의 값은 피토압력을 주제트 정체실 전



(a) N-1



(b) N-3

Fig. 8 Impact pressure distribution in radial direction (PRi=8.0, PRo=3.0)

압력 p_0 로 무차원 하였다. Fig. 8(a)를 보면, 제트 유동은 노즐 축을 중심으로 대칭분포를 이루고 있다. $x/De=0.0$ 에서는 주제트 영역과 보조제트 영역이 뚜렷이 구분되며, 반경방향으로 일정한 피도 압력 분포를 이루고 있다. $x/De=1.5$ 에서는 두 유동장은 혼합하기 시작하여 제트경계는 약해지며, 노즐중심부의 제트코어 영역과 주위의 초음속 및 아음속 영역으로 나뉘어 지는 전형적인 초음속 유동장을 이루고 있다. 이러한 유동은 더욱 하류로 진행하면서 제트경계는 없어지며 제트코어영역이 급속히 감소하고 있다. $x/De=15.4$ 에서는 전형적인 아음속 유동장 형태를 이루고 있으며, 충격파 및 점성마찰 손실 등에 의하여 피도압력이 적어짐을 알 수 있다. $\beta=20$ 인 Fig. 8(b)를 보면 Fig. 8(a)에 비하여 제트코어는 빨리 감소되고 있으나, 유동장 하류의 피도압력 높게 나타난다. 이것은 앞서서도 언급한바와 같이 보조제트 분류각이 주제트의 팽창을 억제시켜 유동장내의 충격파 손실을 감소시킨 결과라 생각된다.

Fig. 9에는 주제트 및 보조제트 압력비가 마하디스크

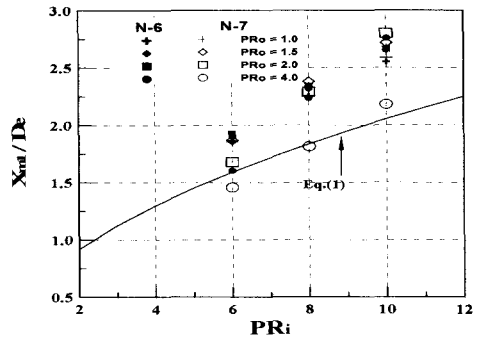


Fig. 9 Mach disk location vs with pressure ratio

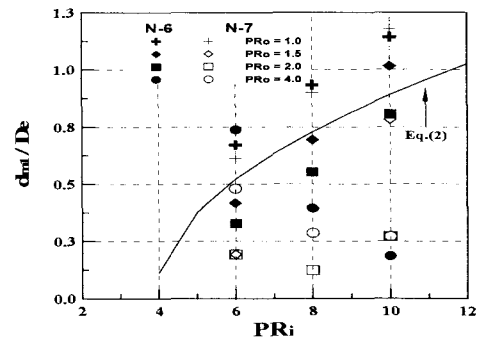


Fig. 10 Mach disk diameter vs with pressure ratio

스크의 위치에 미치는 영향을 나타내었다. 그림의 종축은 노즐출구로부터 첫 번째 마하디스크의 거리 X_{m1} 을 주제트 노즐 직경 De 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 $\beta=0$ 인 N-6의 경우는 보조제트 압력비에 큰 영향을 받지 않으나, $\beta=20$ 인 N-7의 경우는 동일한 주제트 압력비에서 보조제트 압력비가 증가할수록 마하디스크 거리는 감소하고 있다.

$$x_m / D_e = 0.65 \phi^{0.5} \quad (1)$$

Fig. 10은 주제트 및 보조제트 압력비가 마하디스크 직경에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 그림의 종축은 노즐출구로부터 첫 번째 마하디스크의 직경 d_{m1} 을 주제트 노즐 직경 De 로 무차원 한 값이다. 보조제트가 없는 경우는 주제트의 압력비가 증

가할수록 마하디스크 직경은 증가하여 Abby의 이론식(2)⁽¹⁰⁾와 유사한 경향을 보이고 있다.

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

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

4. 결론

본 연구에서는 형상이 다른 8종류의 이중, 동축 노즐을 제작하여, 초음속 공기제트 유동을 실험하였다. 실험에서 제트의 압력비와 보조제트의 충돌 분류각 및 주제트 노즐 형상등이 동축 초음속 제트에 미치는 영향을 조사하여 얻어진 결과들은 다음과 같이 요약된다.

1. 노즐 압력비, 충돌 분류각 및 노즐 형상은 초음속 이중 동축 초음속 자유 제트 유동내의 충격파 구조에 영향을 미친다.

2. 노즐 출구부근에서 발생하는 충격파들은 우향 경사충격파, 좌향 경사충격파, 환형충격파, 구형충격파 및 바렐 충격파 등으로 구성되어지며, 충격파의 구조는 제트 유동의 팽창 상태에 크게 달라진다.

3. 보조제트 충돌분류각이 초음속 동축 제트유동 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 환형동축 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.