

초음속 동축 스월제트의 유동특성에 대한 연구

김중배* · 이준희* · 이권희** · 김희동***

Study of Supersonic, Dual, Coaxial, Swirl Jet

Jung-Bae Kim* · Jun-Hee Lee* · Kwon-Hee Lee** · Heuy-Dong Kim***

ABSTRACT

The present study addresses an experimental investigations of the near field flow structures of supersonic, dual, coaxial, swirl jet. The swirl stream is discharged from the secondary annular nozzle and the primary inner nozzle provides the sonic and supersonic free jets. The interactions between the secondary swirl and inner sonic/supersonic jets are quantified by a fine pitot impact and static pressure measurements and are visualized by using a shadowgraph optical method. The pressure ratios of the secondary swirl and primary sonic/supersonic jets are varied below 7.0. Experiments are conducted to investigate the effects of the secondary swirl stream on the primary sonic and supersonic jets, compared with the secondary stream of no swirl. The results show that the presence of annular swirl stream causes the Mach disk to move more downstream, with the increased diameter, and remarkably reduces the fluctuations of the impact pressures in the supersonic dual coaxial jet, compared with the case of the secondary annular stream of no swirl.

1. 서 론

제트를 이용하는 응용기기들의 성능은 제트내의 유동장의 구조와 밀접한 관계를 가지고 있다. 이러한 제트특성은 선행연구들에 의해 노즐 압력비 및 노즐형상이 주요한 변수로서 그 메카니즘이 비교적 상세히 알려져 있다. 그러나 최근 엔진 초음속 연소실⁽¹⁾, 및 추진기등에서 주요한 혼합성능 향상이나 절단기와 용접기⁽²⁾의 고속화 및 성능 향상에 필요한 높은 충돌압력을 얻거나 제트에 의해 발생하는 소음 경감등을 위하여 주제트에 이차유동을 가지는 동축제트가 많이 사용되어 지고 있다. 이와 같은 동축제트는 노즐압력비와 노즐형상이 중요한 변수인 단일제트와는 달리 이차제트(외부유동) 유동특성

이 주제트(내부유동)특성에 보다 많은 영향을 미치는 중요한 변수이다. 이러한 이차유동 영향에 대한 연구로는, D'Attorre⁽³⁾, Masuda⁽⁴⁾등이 이차유동은 동축제트내의 마하디스크 직경을 감소시키는 효과가 있음을 밝혔으며, Narayanan⁽⁵⁾, Rao⁽⁶⁾ 등의 연구에서는 이차제트의 압력비가 증가함에 따라 마하디스크 직경과 노즐출구로부터의 거리는 증가하고 마하디스크 상류의 마하수 분포가 변화한다고 보고 하였다. 저자들⁽⁷⁾ 또한 수치해석과 실험을 통하여 이차제트의 유동특성이 주제트 특성에 미치는 영향을 조사하여 이차제트가 주제트의 유효압력비를 변화시키고 팽창 정도에 영향을 주며, 이차제트 내부에서 발생하는 환형충격파의 강도 및 위치가 주제트 마하디스크의 특성에 영향을 미치는 것을 알았다. 그

* 안동대학교 기계공학부 대학원(Andong University, Graduate School Dept. of Mechanical Eng.)

** 사가대학교 기계공학과, 일본(Saga University, Dept. of Mechanical Eng. Japan.)

*** 안동대학교 기계공학부(Andong University, Dept. of Mechanical Eng.)

러나 위의 연구에서도 동축제트의 마하디스크 및 압력분포에 미치는 이차제트 특성에 대한 견해가 다르며 다양한 압력비에 따른 상세한 분석이 충분히 이루어져 있지 않다. 더구나 지금까지의 모든 연구가 이차제트가 비스윙유동(no swirl flow)으로 현재 혼합축진이나 플라즈마, 레이저등의 안정화에 많이 응용되어지고 있는 스윙유동이 주제트 특성에 미치는 영향에 관한 연구는 전무한 상황이다.

본 연구에서는 초음속 동축 제트에서 이차유동의 분류방법(스윙, 비스윙), 노즐 압력비 등이 주제트내의 마하디스크 위치 및 직경, 충격압 분포, 및 혼합특성에 미치는 영향을 조사하기 위하여 노즐 출구 마하수 1.0을 가지는 음속 내부 노즐(주노즐)과 환형인 외부노즐(이차노즐)로 구성된 동축노즐을 제작하여 실험을 수행하였다. 동축제트 구조의 상세한 분석을 위하여 슈리렌 광학 시스템을 이용하여 유동장을 가시화하고, 유동장의 피토충격압력 및 정압력을 측정하였다.

2. 본 론

2.1 실험 장치 및 방법

2.1 실험장치

본 연구에서는 Fig.1에 나타낸 바와 같이 압축기, 1차 정체실, 2차 정체실, 피토 전압관, 계측시스템 및 슈리렌 시스템으로 구성된 실험장치가 사용되었다. 1차 정체실(1.3MPa, 5m³)에 저장된 압축공기는 건조필터와 감압밸브를 거쳐 주유동과 이차유동을 위한 2개의 독립된 2차 정체실로 안내되며, 정체실 하부에 부착된 이중 동축노즐을 통하여 대기로 방출된다. Fig.2에는 본 연구에서 사용된 이중 동축 노즐의 상세 형상을 나타내었다. 주제트는 노즐 목직경 $D_c=8\text{mm}$ 이며 설계마하수(M_d)가 1.0인 음속 노즐(sonic nozzle)에서 발생하며, 노즐입구에서의 유동은 축방향 속도성분만 가진다. 이차제트는 축방향과 접선방향으로 각각 4개의 유동 유입구를 가지는 음속 환형노즐을 통하여 발생한다.

2.2 실험조건과 측정 방법

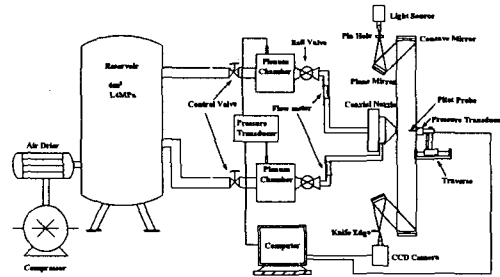


Fig.1 Schematic of experimental facility

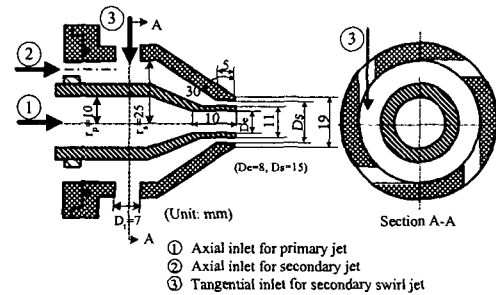


Fig. 2 Details of dual, coaxial, nozzle

실험은 제트 유동장의 가시화와 압력측정을 통하여 수행되었다. 유동장의 가시화는 Fig.1에 나타낸바와 같이 슈리렌법을 이용하였으며, 유동장 가시화 Image는 CCD(C3077-70) 및 Labview이미지보드(IMAQ PCI-1409)를 통하여 PC에 저장된다. 가시화용 광원으로는 연속광인 Xe를 사용하였다. 반도체형 압력센서(Kulite, ITQ-1000)를 사용하여 측정한 정체실 압력은 정체실로부터 동축노즐까지의 손실을 보상한 값을 이용하였으며, 자유제트 내부 흐름장은 압력센서(Kulite, XT-190)를 부착한 외경이 0.8mm, 내경이 0.5mm, 센서까지의 거리가 25mm인 피토관 및 외부 사양은 피토관과 동일하나 관 끝단으로부터 10D위치에 0.2mm의 구멍을 가지는 정압관을 3차축 이송장치에 고정하고 축방향 및 반경방향으로 이송시키면서 수회 반복 측정하였다. 또한 본 연구에서는 내부노즐인 축소 확대노즐을 통하는 주제트 유동의 공급압력을 p_{0p} , 이차노즐인 환형노즐을 통하는 이차제트의 공급압력을 p_{0s} , 대기압을 p_a 로 그리고 피토관 및 정압관에 의해 측정된 게이지 압력을 각각 p_{impact} , p_s 로 정의하여, 주제트 노즐압력비 p_{0p}/p_a 를

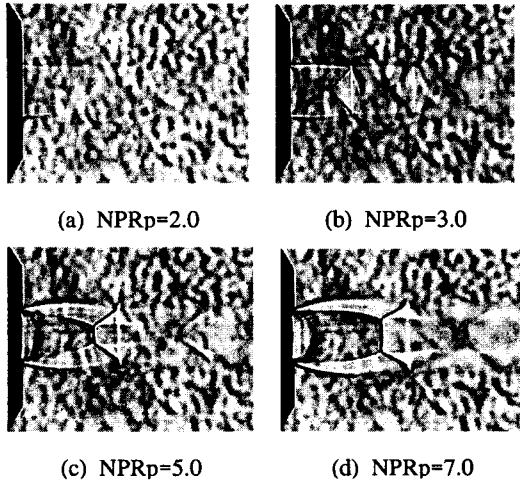


Fig.3 Flow visualizations showing single jet

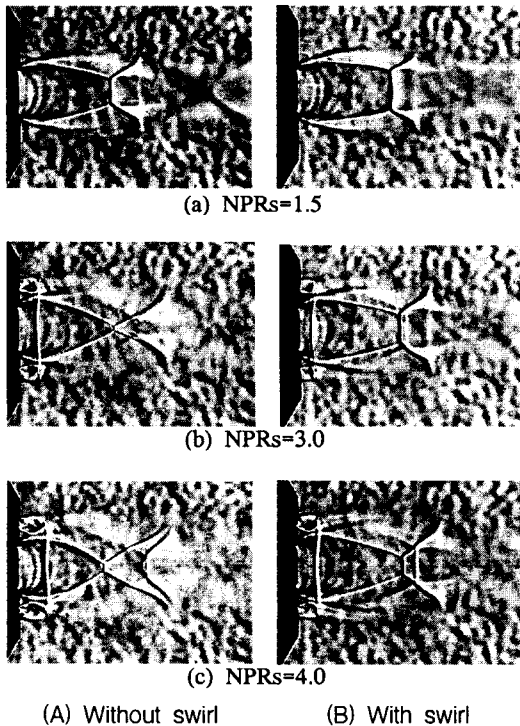


Fig.4 Flow visualizations showing dual, coaxial, jet(NPRp=7.0)

NPRp로, 이차제트 노즐 압력비 p_0/p_a 를 NPRs로 정의하였다. 실험 조건은 주제트 압력비 $NPRp=3.0\sim 7.0$, 이차제트 압력비 $NPRs=1.0\sim 4.0$,의 범위에서 연구를 수행하였다.

2.1 결과 및 고찰

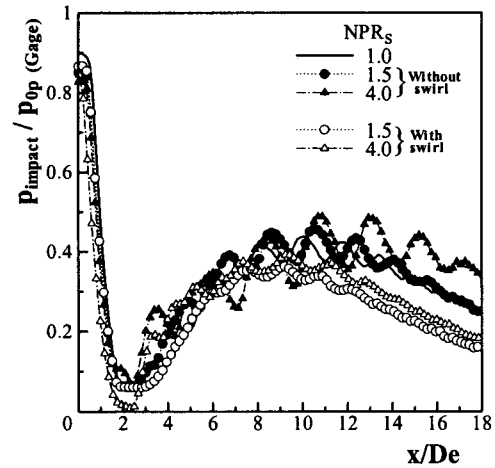


Fig.5 Impact pressure distributions along the nozzle axis(NPRp=7.0)

Fig.3에 단일 자유제트의 가시화 사진을 나타내었다. $NPRp=2.0$ 일때, 제트유동은 노즐 출구에서 거의 적정 팽창상태에 가까우며, 명확한 충격파 구조를 볼 수 없다. Fig.3(b)에서 $NPRp=3.0$ 으로 증가함에 따라 제트유동은 약간 부족 팽창되며, 노즐 중심축을 따라 교차하며 제트 경계에서 반사하여 반복되는 경사 충격파를 형성하는 것을 볼 수 있다. $NPRp$ 를 좀더 증가시키면, 제트 유동은 노즐 출구에서 크게 부족 팽창되고 이에 따라 형성되는 바렐충격파 및 마하디스크를 Fig.3(c)에서 볼 수 있다. Fig.3(d)에서 $NPRp$ 를 더욱 증가시키기에 따라 마하디스크의 강도는 강해지고 하류로 이동하게 된다.

Fig.4에는 주제트가 강한 부족팽창, $NPRp=7.0$ 인 경우의 유동장 가시화 사진을 나타내었다. Fig.4(A)는 이차유동이 비스웰인 경우이며, 동일한 $NPRp$ 의 단일제트에 비해 이차제트에 의해 마하디스크의 직경이 점차 감소하게 되지만, $NPRs=4.0$ 으로 증가한 경우에는 오히려 그 직경이 증가했다. 비스웰 이차유동에 비해 스웰이차유동은 유동장내의 마하디스크의 직경을 증가시키는 것을 Fig.6(B)에서 볼 수 있다.

Fig.5에는 절단가공 등에서 중요한 충격압력 분포를 $NPRp=7.0$ 에 대해 나타내었다. 그림의 횡축은 노즐 출구로부터 하류방향 거리 x 를 주제

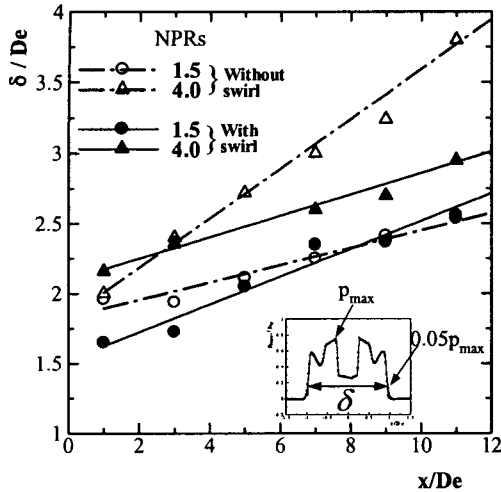


Fig.6 Spreading of jet width(NPRp=5.0)

트 노즐 출구직경 D_e 로, 종축의 값은 피토충격 압력을 주제트 정체실 압력 p_{0p} 로 무차원 하였다. Fig.5에서 알 수 있듯이 피토 충격압력의 최대값은 이차제트 압력비가 증가할수록 증가하며, 이차유동이 스월인 경우가 비스월인 경우에 비해 낮게 나타난다.

두 유동의 혼합촉진을 위하여 이용하는 동축 제트에서도 이차유동은 중요한 역할을 하게 된다. 본 연구에서도 이차유동의 압력비 및 분류 방법이 혼합특성에 미치는 영향을 알아 보기 위하여 Fig.6에 제트 폭의 변화를 나타내었다. NPRp=5.0이며, 본 연구에서 제트폭은 각각의 유동조건 및 측정위치에서의 최대충격압력의 5%로 감소되는 위치까지의 반경거리로 정의하였다. 그림의 종축은 제트폭을 노즐 출구 직경, D_e 로 무차원하여 나타내었다. 제트폭은 x/D_e 및 NPRs가 증가할수록 증가하고 있다. 전체적 경향은 이차유동이 비스월인 경우가 스월인 경우보다 크나 NPRs=4.0인 경우는 $x/D_e=3.0$ 이상에서 비스월의 경우가 크나, NPR=1.5인 경우는 $x/D_e \approx 7.0$ 이상에서 스월인 경우가 더 커지고 있다.

3. 결론

초음속 동축 제트에서 이차유동의 분류방법

(스월, 비스월), 노즐 압력비, 등이 주제트내의 마하디스크 위치 및 직경, 충격압 분포, 및 혼합특성에 미치는 영향을 실험적으로 조사하여 얻어진 결과들은 다음과 같이 요약되어진다.

1. 초음속 이중 동축제트의 이차제트 압력비 및 분류방법은 주제트의 마하디스크 위치 및 직경, 충격과 압력분포 등에 영향을 미친다.
2. 이차제트가 주제트 특성에 미치는 영향은 주제트의 팽창정도에 따라 달라지며, 본 연구에서는 동일한 이차제트 압력비 및 분류방법에서 주제트의 팽창정도가 적을수록 영향은 커진다.
3. NPRs가 동일한 경우, 이차제트가 스월인 경우가 비스월인 경우에 비하여, 마하디스크의 위치 및 직경은 증가하나 초음속 길이는 짧아지고 평균 충격 압력분포는 감소한다.

참고 문헌

- (1) Rogers, R.C., Capriotti, D.P., and Guy, R.W., 1998, Experiment Supersonic Combustion Research at NASA Langley, AIAA-98-2506
- (2) Niu, K., 1996, Shock waves in gas and plasma, Laser and Particle Beams, Vol. 14, No. 2, pp. 125-132.
- (3) D'Atorre, L., and Harshbarger, F., 1965, Parameters affecting the normal shock location in underexpanded gas jets, AIAA J., Vol. 3, pp. 530-531
- (4) Masuda, W., and Moriyama, E., 1994, Aerodynamic Characteristics of Underexpanded Coaxial Impinging Jets, JSME Int. Series B, Vol. 37, No.4, pp.769-775.
- (5) Narayanan, A. K., and Damodaran, K. A., 1993, Mach Disk of Dual Coaxial Axisymmetric Jets, AIAA, Vol. 31, No. 7, pp. 1343-1345.
- (6) Rao, T. V. R., Kumar, P. R., and Kurian, J., 1996, Near Field Shock Structure of Dual Coaxial Jets, Shock Waves, pp. 361-366.
- (7) Lee, K. H., Koo, B. S., and Kim, H. D., 2001, A Fundamental Study of Supersonic Coaxial Jets for Gas Cutting KSME Paper B, Vol. 25, No. 6, pp. 837-844.