초음속 이중동축 스월제트 유동특성에 관한 연구

김중배† · 김희동* · 이권희** · 세토구치***

Study of Supersonic, Dual, Coaxial, Swirl Jet

Jung-Bae Kim, Heuy-Dong Kim, Kwon-Hee Lee and T. Setoguchi

Key Words : Compressible Flow(압축성 유동), Annular Shock Wave(환형 충격파), Secondary Swirl Flow(이차 스월유동), Mach Disk(마하 디스크), Supersonic Flow(초음속 유동)

Abstract

The supersonic swirl jet is being extensively used in many diverse fields of industrial processes since those lead to more improved performance, compared with the conventional supersonic no swirl jet. In the present study, an experiment is carried out to investigate the effect of annular swirl jet on the supersonic dual coaxial jet. A convergent-divergent nozzle with a design Mach number of 1.5 is used for the supersonic primary jet, and the sonic nozzles with four tangential inlets are used to make the secondary swirl jet. The primary jet pressure ratio is varied in the range from 3.0 to 7.0 and the outer annular jet pressure ratio is from 1.0 to 4.0. The interactions between the annular swirl and the inner supersonic jet are quantified by the pitot impact and static pressure measurements and visualized by using the Schlieren optical method. The results show that annular swirl jet alters the shock structure and impact pressure distributions compared with no swirl jet.

1. 서 론

고압의 기체를 노즐이나 오리피스를 통하여 방출시킬때 발생하는 제트는 많은 응용 분야를 가지고 있다. 제트를 이용하는 응용기기들의 성능은 제트내의 충격파 구조, 제트코어 길이 및 제트 폭, 마하디스크 강도 및 위치, 충격압 분포 등과 밀접한 관계를 가지고 있다. 이러한 제트특성은 선행 연구들에 의해 노즐압력비 및 노즐형상이 주요한 변수로서 그 메카니즘이 비교적 상세히 알려져 있다[(1)(2)]. 그러나 최근 엔진 초음속 연소실[(3)], 및 추진기등에서 주요한 혼합성능 향상이나 절단기와 용접기[(4)]의 고속화 및 성능 향상에 필요한 높은 충돌압력을 얻거나 제트에 의해 발생하는 소음 경감등을 위하여 주제트에 이차유동을 가지는 동축제트가 많이 사용되고 있다. 이와 같은 동축제트는 노즐압력비와 노즐형상이 중요한 변수인 단일제트와는 달리 이차제트(외부유동) 유동특성이 주제트(내부유동)특성에 보다 많은 영향을 미치는 중요한 변수이고, 두 유동의 간섭으로 인하여 주제트 형성 메카니즘이 매우 복잡하다고 알려져 있다[(5)]. 이러한 이차유동 영향에 대한 연구로는, Buckely 등[(6)]이 동축제트에 마하디스크의 위치는 이차유동에 의해 변하지 않고 이는 마하디스크 상류의 마하수분포가 이차 유동에 영향을 받지 않기 때문이라고 보고하였다. 그러나 D'Attorre[(7)], Masuda[(8)]등은 이차유동이 동축제트내의 마하디스크 직경을 감소시키는 효과가 있고, Narayanan[(9)], Rao[(10)] 등의 연구에서는 이차제트의 압력비가 증가함에 따라 마하디스크 직경과 노즐출구로부터의 거리는 증가하고 마하디스크 상류의 마하수 분포가 변화 한다고 보고 하였다. 저자들[(11)] 또한 수치해석과 실험을 통하여 이차제트의 유동특성이 주제트 특성에 미치는 영향을 조사하여 이차제트가 주제트의 유효압력비를 변화시키고 팽창정도에 영

† 안동대학교 기계공학과 대학원
E-mail : kjb@anuis.andong.ac.kr
* 안동대학교 기계공학부
** 사가대학교 기계공학과 대학원
*** 사가대학교 기계공학과, 일본

향을 주며, 이차제트 내부에서 발생하는 환형충격파의 강도 및 위치가 주제트 마하디스크의 특성에 영향을 미치나 이러한 이차제트의 영향은 두 유동의 팽창상태에 따라 달라진다는 것을 알았다. 그러나 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 비스월유동(no swirl flow)으로 현재 혼합촉진이나 플라즈마, 레이져등의 안정화에 많이 응용되고 있는 스월유동이 주제트 특성에 미치는 영향에 관한 연구는 전무한 상황이다. 이차유동이 스월제트가 되면 동축제트내의 압력분포나 충격파 구조, 제트코어, 마하디스크 강도 및 위치등에 미치는 영향은 비스월 이차유동과 비교하여 많이 달라질 것으로 예상되어진다.

본 연구에서는 초음속 동축 제트에서 이차유동의 분류방법(스월, 비스월), 노즐 압력비 등이 주제트내의 마하디스크 위치 및 직경, 충격압 분포, 및 혼합특성에 미치는 영향을 조사하기 위하여 노즐 출구 마하수 1.5 를 가지는 초음속 축소 확대 내부 노즐(주노즐)과 환형인 외부노즐(이차노즐)로 구성된 동축노즐을 제작하여 실험을 시행하였다. 동축제트 구조의 상세한 분석을 위하여 슈리렌 광학 시스템을 이용하여 유동장을 가시화 하고, 유동장의 피토충격압력 및 정압력을 측정하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험장치

본 연구에서는 Fig. 1 에 나타낸 바와 같이 압축기, 1차 정체실, 2차 정체실, 피토 전압관, 계측시스템 및 슈리렌 시스템으로 구성된 실험장치를 이용하여 초음속 동축제트 특성을 조사하였다. 또한 질량유량을 측정하기 위하여 벤튜리메터를 노즐 입구배관에 설치하였다. 1차 정체실(1.3Mpa, 5m^3)에 저장된 압축공기는 건조필터와 감압밸브를 거쳐 주유동과 이차유동을 위한 2 개의 독립된 2 차 정체실로 안내되며, 정체실 하부에 부착된 이중 동축노즐의 내부노즐(주노즐)인 축소 확대형 노즐과 외부노즐(이차노즐)인 환형 노즐을 통하여 대기로 방출된다. 2차 정체실 및 노즐 내벽에는 압력을 측정하기 위하여 압력센서가 부착되어 있으며 정체실 압력은 각각 독립적으로 구성되어진 압력조절 밸브로 조정 하도록 되어있다. Fig. 2 에는 본 연구에서 사용된 이중 동축노즐의 상세 형상을 나타내었다. 주제트는 노즐

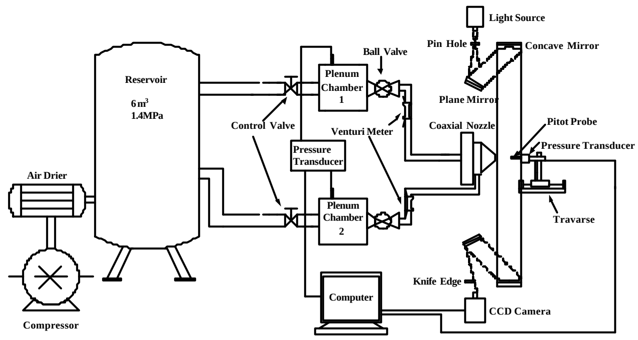


Fig. 1 Schematic outlook of experimental facility

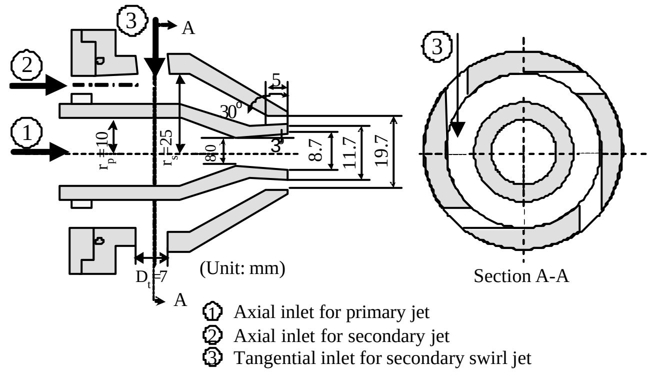


Fig. 2 Details of dual, coaxial, nozzle(Md=1.5)

목직경 8mm 및 출구 직경이 8.7mm, 내부노즐 두께 1.5mm, 설계마하수(Md)가 1.5 인 초음속 노즐(supersonic nozzle)에서 발생하며, 노즐입구에서의 유동은 축방향 속도성분만 가진다. 이차제트는 노즐목 길이 5mm 이며 축방향과 접선방향으로 4 개의 유동 유입구를 가지는 음속 환형노즐을 통하여 발생한다. 이차유동의 축방향 제트는 Fig. 2 에서 보여지듯이 노즐축에 대하여 접선방향인 4 개의 유입구로부터 유입되는 유동에 의해 형성된다.

2.2 실험조건과 측정 방법

실험은 제트 유동장의 가시화와 압력측정을 통하여 수행되었다. 유동장의 가시화는 Fig. 1 에 나타낸바와 같이 슈리렌법을 이용하였으며, 유동장 가시화 Image 는 CCD(C3077-70) 및 Labview 이미지보드(IMAQ PCI-1409) 를 통하여 PC 에 저장된다. 가시화용 광원으로는 연속광인 Xe 을 사용하였다. 반도체형 압력센서(Kulite, ITQ-1000)를 사용하여 측정한 정체실 압력은 정체실로 부터 동축노즐까지의 손실을 보상한 값을 이용하였으며, 자유제트 내부 흐름장은 압력센서(Kulite, XT-190)를 부착한 외경이 0.8mm, 내경이 0.5mm, 센서까지의 거리가 25mm 인 피토관 및 외부 사양은 피토관과 동일하나 관 끝단으로부터 10D 위치에 0.2mm 의 구멍을 가지는 정압관을 3 차축 이송장치에 고정하고

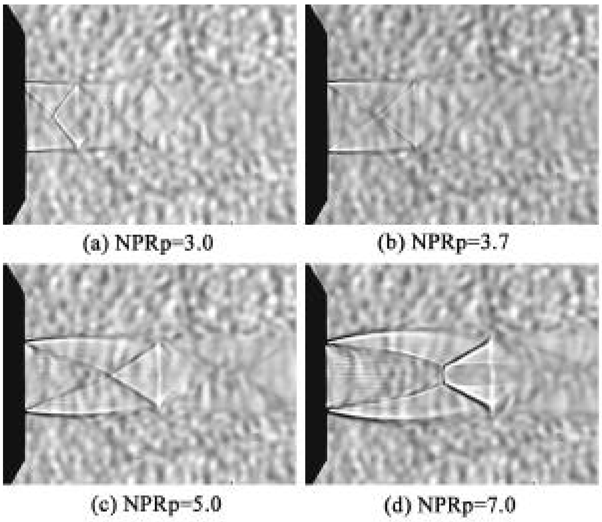


Fig. 3 Flow visualizations showing single jet

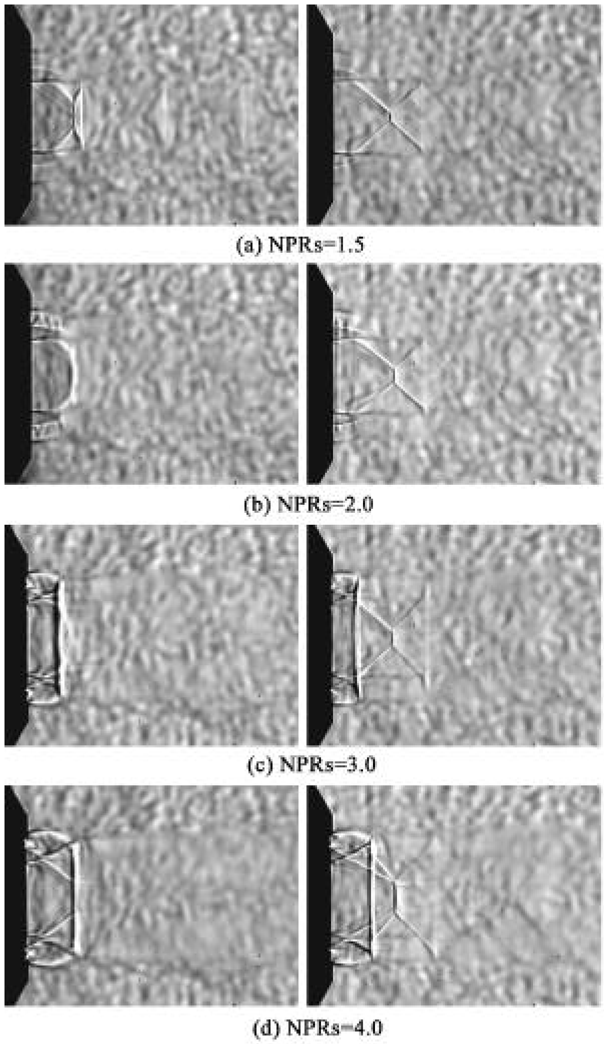
축방향 및 반경방향으로 이송시키면서 수회 반복 측정하였다.

또한 본 연구에서는 이중동축제트의 내부노즐인 축소 확대 노즐을 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 NPR_P 로, 이차제트 노즐 압력비 p_{0s}/p_a 를 NPRs 로 정의하였다. 따라서 NPRs=1.0 인 경우에는 이차유동이 없는 주제트만, NPRp=1.0 인 경우에는 이차제트만 발생하는 경우이다. 실험 조건은 주제트 압력비 NPRp=3.0~7.0, 이차제트 압력비 NPRs=1.0~4.0, 의 범위에서 연구를 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig.3 에 동축노즐의 내부노즐로부터 방출되는 단일제트에 대한 가시화 사진을 나타내었다. 출구 마하수 Me=1.5 에 대한 적정 팽창압력비 NPRp =3.67 이며, Fig. 3(b)는 적정팽창에 가까운 유동장 구조를 나타내고 있다. 적정팽창 압력비보다 낮은 압력비의 Fig.3 (a) 에서는 노즐 출구에서 제트 경계가 압축되고, 내부에는 경사충격파 (oblique shock)가 형성되는 과팽창(overexpanded)제트의 특성을 나타내고 있다. 반면에 Fig. 3 (c),(d)는 부족팽창(updderexpanded) 제트의 가시화사진이며, Fig. 3 (d) 에서는 부족팽창비가 증가함에 따라 노즐 출구에서 유동이 크게 팽창하여 경사충격파가 바렐충격파(barrel shock)로 바뀌며 마하디스트(Mach disk)를 생성하게 된다.

Fig. 4 는 주제트 주위에 환형의 정상 및 스월



(A) Without swirl (B) With swirl

Fig. 4 Flow visualizations showing dual, coaxial jet (NPRp=3.0)

이차제트가 방출되는 이중 동축제트의 가시화 사진이다. NPRp=3.0 이며 NPRs=1.5~4.0 까지 변화할 때 보조제트 압력비 변화에 대한 유동장의 변화를 나타내고 있다. 먼저 이차제트로 정상제트가 사용된 Fig. 4(A)를 보면 NPRs=1.5 에서는 아직 환형충격파는 생성되지 않았지만, 이차제트의 영향으로 주제트내에 마하디스크가 생성된다. 또한 이차제트 압력비가 증가함에 따라 마하디스크의 직경은 증가하며, 좀 더 노즐 출구쪽으로 이동하고 있다. 그러나 Fig. 4(A)의 (d)는 NPRs=4.0 으로 주제트 보다 높은 보조제트 압력비에 의해 오히려 마하디스크의 직경은 감소하였으며, 위치 또한 하류쪽으로 이동함을 알 수 있다. 또한 환형충격파도 Fig. 4(A)의 (c)에 비해 좀 더 노즐 출구에서 떨어져 형성된다. 이차제트가 스월인 경우는 스월이 없는 경우와 비교하여 매우 다른 유동장 구조를 형성하는

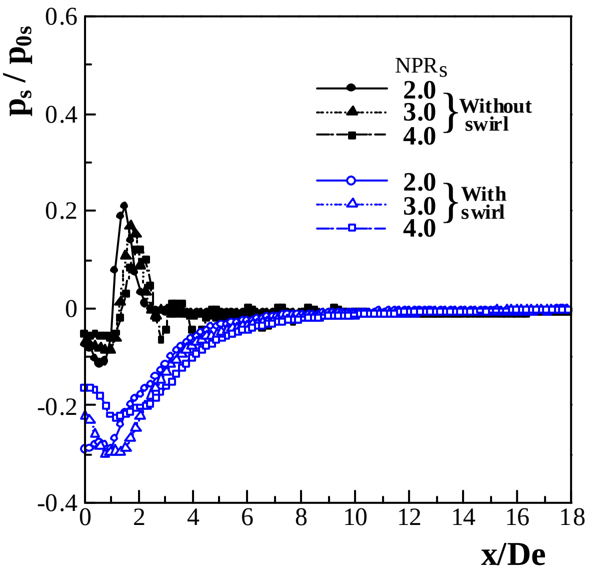
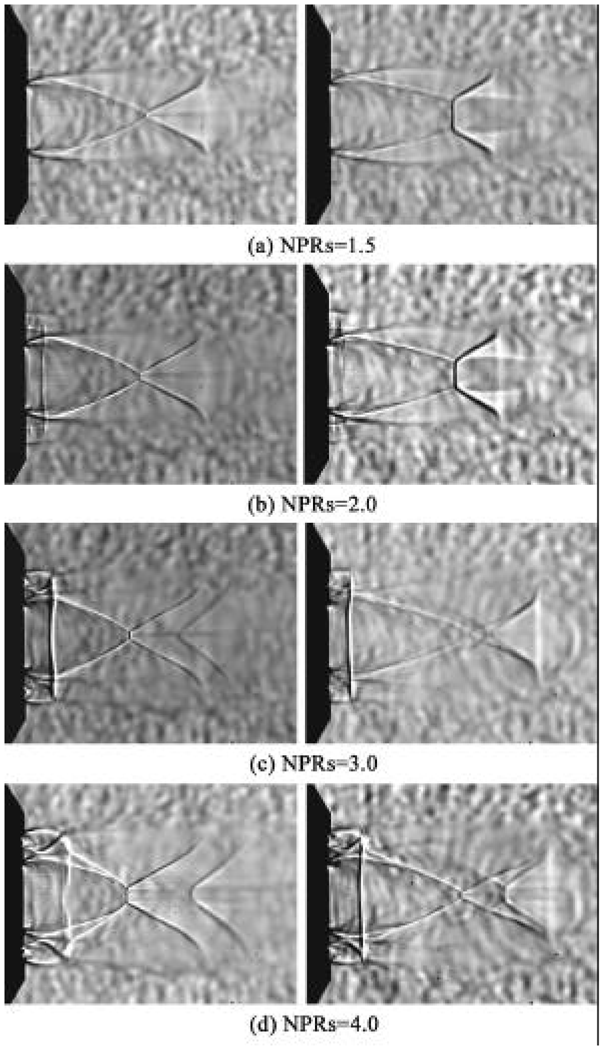


Fig. 5 Static pressure distributions along the coaxial jet axis (NPRp=1.0)

것을 Fig. 4(B) 에서 볼 수 있다. 이차제트 압력비가 증가함에 따라 마하디스크의 직경은 약간 증가하였지만 큰 차이를 보이지는 않는다. 그러나 NPRs=4.0 에서는 마하디스크의 직경이 크게 증가하는 것을 볼 수 있다. 정상 보조제트가 사용된 Fig. 4 (A)와 비교해 볼 때 마하디스크의 직경은 크게 감소하였으며 좀 더 노즐 출구에서 떨어져 생성되는 것을 볼 수 있다. 이는 스월이 있는 경우가 스월이 없는 경우에 비하여 주제트 팽창정도에 미치는 영향이 더 크기 때문이라 생각한다. 이러한 경향을 좀더 자세히 알아 보기 위하여 Fig. 5 에 주제트 압력비, NPRp=1.0 으로 주유동이 없는 외부환형 이차제트만이 방출될 때, 비스월 및 스월이차제트에 대한 주노즐 중심축을 따르는 정압분포를 나타내었다. x/De= 1.5까지의 영역, 즉 노즐 출구에서 가까운 영역에서는 모든 경우에 대하여 대기압보다 낮은 부압이 형성되나 그정도는 이차스월유동의 경우가 훨씬 크게 나타나고 스월이 없는 경우는 이차유동장이 노즐 중심부로 급격히 확산된다는것을 정압력의 상승에서 알수있다. 그러나 이차스월유동의 경우 노즐중심으로 확산은 약 x/De=5 근방에서 이루어 지며 그 강도는 약함을 알수 있다. 이러한 이차유동 정압분포 특성이 주제트의 팽창정도에 영향을 미친다고 생각한다.

Fig. 6에는 NPRp=7.0 일때의 이중동축제트 유동장에 대한 가시화 사진을 나타내었다. Fig. 6 (A)를 보면 이차제트 압력비가 증가함에 따라 점차 마하디스크의 직경이 증가하지만 단일제트, Fig. 3(d),에 비해 현저히 감소하였다. 하지만 NPRs=4.0 으로



(A) Without swirl (B) With swirl

Fig. 6 Flow visualizations showing dual, coaxial jet (NPRp=7.0)

증가하면서 외부환형노즐 경계면에서 바렐 충격파가 부가적으로 발생해 마하디스크의 직경은 오히려 증가하게 된다. 스월 이차제트가 사용된 동축제트의 유동장은 비스월 이차제트인 경우와 크게 차이가 나는 것을 Fig. 6(B)에서 볼 수 있다. NPRs=1.5, 2.0 에서는 정상제트에 비해 직경이 큰 마하디스크가 형성되었지만, NPRs=3.0, 4.0 에서는 오히려 마하디스크의 직경이 작아지는 경향을 나타내었다.

Fig.7 에는 NPRp=7.0 일때 비스월 및 스월이차제트에 대해서 노즐 중심축을 따르는 피토충돌 압력분포를 나타내었다. 횡축은 노즐출구에서 하류방향으로의 거리 x 를 내부노즐 출구직경 De 로 무차원하여 나타내었으며, 종축은 피토충돌압력을 주정체실 압력 p_{0p} 로 무차원하여 나타내었다. 노즐 출구에서 제트가 팽창함에 따라 피토압력은 급격히 감소하며, x/De=2.0 부근에서 증가하여 이후

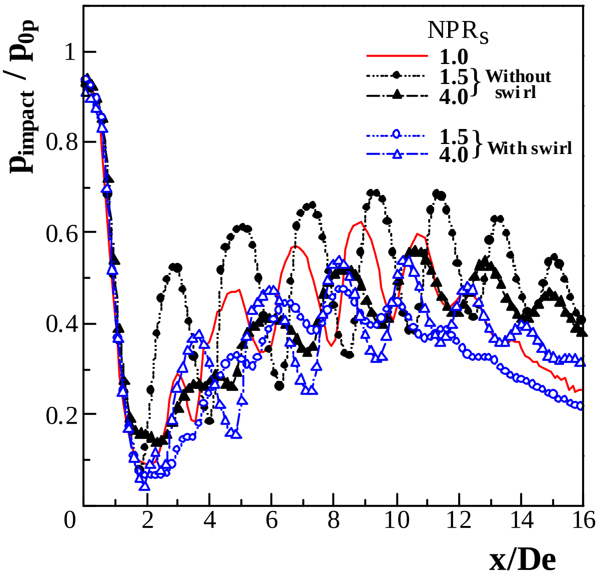


Fig. 7 impact pressure distributions along the nozzle centerline (NPRp=7.0)

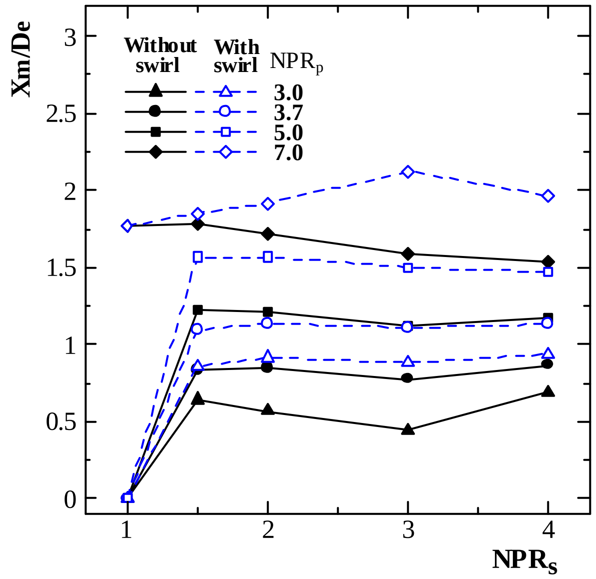


Fig. 8 Mach disk location vs NPRs

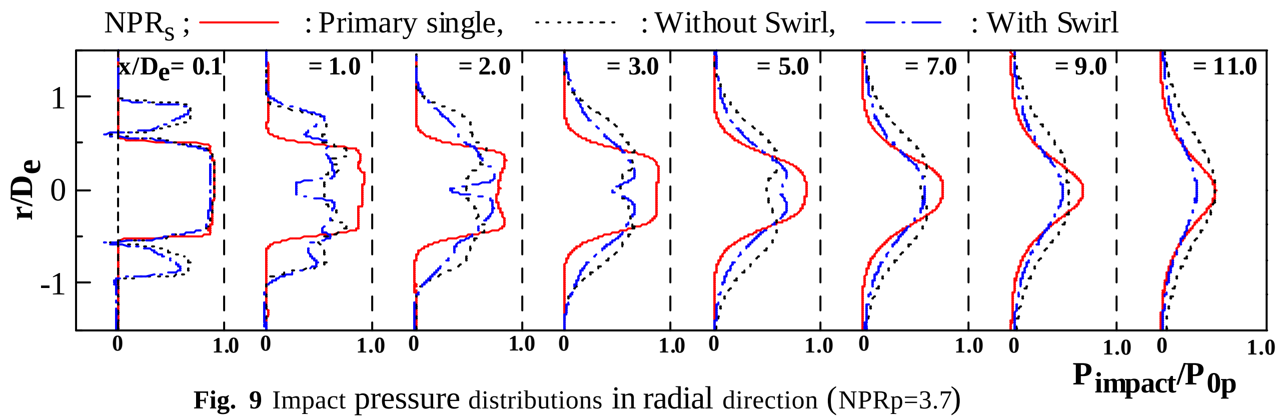


Fig. 9 Impact pressure distributions in radial direction (NPRp=3.7)

증가와 감소를 반복하게 된다. 단일제트의 경우 x/De=9.0 부근에서 최대 피토충돌 압력값 p_{impact}/p_{0p}=0.62 를 가지며 이후 감소하는데 반해, 이차 비스월제트 NPRs =1.5 에서는 x/De=9.5 에서 p_{impact}/p_{0p}=0.7 로 더 높은 충돌 압력을 나타내었다. 또한 증가와 감소의 폭도 단일제트에 비해 크게 나타난다. 이는 이차제트에 의해 마하디스크의 직경이 감소하여, 마하디스크로 인한 전압손실이 감소하였기 때문이다. 계속해서 NPRs= 4.0 으로 증가시키면, 첫번째 마하디스크 이후에 형성되는 두번째 마하디스크에 의해 x/De= 2.0~6.0 부근에서 비교적 완만한 피토충돌 전압의 증가와 감소를 나타낸다. 이차 스월제트가 사용된 경우, NPRs=4.0 이 NPRs=1.5 인 경우보다 좀 더 높은 피토압력 분포를 나타내었으며, 모두 비스월 이차제트 보다는 낮은 압력분포를 나타내었다.

Fig. 8 은 이차제트 압력비 변화에 따른 마하디스크 위치의 변화를 비스월 및 스월 이차제트에 대해 정량적으로 나타내었다. 횡축은 이차제트 압력비, 종축은 노즐출구에서 첫 마하디스크까지의 거리 Xm 을 내부노즐 출구직경으로 무차원하여 나타내었다. Xm/De=0 은 마하디스크가 생성되지 않았음을 의미하며, 이차제트 압력비 변화에 따른 마하디스크의 위치는 그리 크게 변화하지 않았다. 비스월 및 스월 이차제트 모두에서 주제트 압력비 증가에 따라 Xm/De 는 증가하였으며, 동일한 주제트 압력비에서 스월 이차제트를 사용하는 경우가 비스월인 경우보다 Xm/De 가 크다는 것을 알 수 있다.

Fig. 9는 NPRp=3.7, NPRs=3.0 일 때 반경방향으로의 피토 충돌압력분포를 나타낸다. x/De=01.~11.0 까지의 범위이며, 횡축은 피토충돌 압력을 종축은 반경방향 위치 r 을 내부노즐 출구직경 De 로 무차원하여 나타내었다. x/De=0.1 로 노즐 출구에서

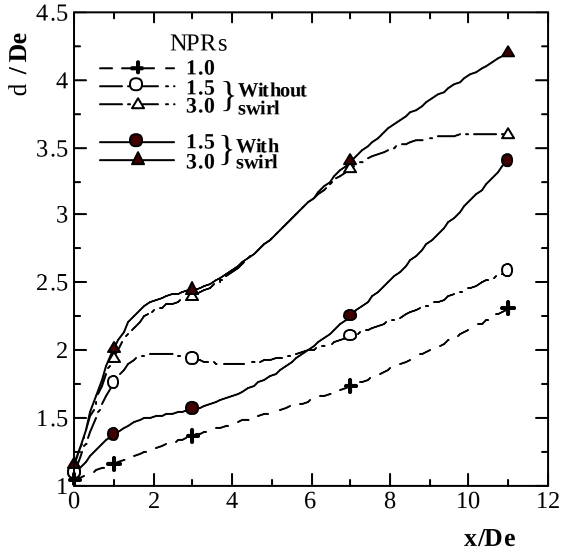


Fig. 10 Jet width (NPRp=3.7)

매우 가까운 영역에서는 비스월 및 스월 이차제트의 차이가 나타나지 않으며 유사한 압력 분포를 나타낸다. x/De=1.0에서 동축제트의 경우 단일제트에 비해 제트 중심부 부근에서의 압력이 크게 감소하는 경향을 나타내며, 이후 점차 감소하여 x/De=11.0 에서는 거의 아음속 유동장 형태의 압력 분포를 나타내고 있다. 두유동의 혼합특성은 유동내부 압력감소 분포 및 제트폭과 밀접한 관계가 있는것으로 잘 알려져 있다. 본 연구에서는 스월 이차제트경우가 비스월 이차제트경우에 비해 주제트 중심부근의 피토충돌 압력구배가 빨리 완만해지고 있어, 주제트와 이차제트의 혼합이 스월이차제트의 경우에 더 크다는 것을 알 수 있다.

비스월 및 스월 이차제트에 따른 혼합 특성을 좀 더 정량적으로 알아보기 위해 Fig. 10 에 제트폭(Jet width) 분포를 나타내었다. NPRp=3.7 이며, 제트폭 δ 는 각각의 유동 조건 및 측정 위치에서의 최대 충격압력의 5%로 감소되는 위치까지의 반경거리로 정의하였다. Fig.10 에서 횡축은 x/De 를 나타내며, 종축은 제트폭 δ 를 내부노즐 출구직경 De 로 무차원하여 나타내었다. x/De 및 NPRs 가 증가할수록 δ/De 는 증가함을 볼 수 있다. NPRs=1.5 일 때 x/De=6.0 까지는 정상 이차제트의 δ/De 가 크지만 이후에는 스월 이차제트가 더 큰 δ/De 를 나타낸다. 계속해서 NPRs=3.0 으로 증가시키면 비스월 및 스월 이차제트는 비슷한 δ/De 를 나타내지만, x/De>7.0 에서는 스월 이차제트를 사용하는 경우가 더 증가하고 있다.

3. 결 론

본 연구에서는 주제트가 초음속 이중 동축제트에 대해, 주제트와 이차 제트의 압력비 변화 및 이차제트의 특성(비스월, 및 스월)에 따른 유동장내 충격파 구조의 변화, 충격압력의 분포 및 혼합특성을 실험을 통하여 조사하였으며, 얻어진 결론은 다음과 같이 요약된다.

(1) 초음속 이중 동축제트의 이차제트 압력비 및 유동 방법(스월, 비스월)은 유동장내의 마하디스크의 위치 및 직경, 피토 충격압력분포 등에 큰 영향을 미친다.

(2) 동일한 압력비에서 이차제트가 스월인 경우가 비스월인 경우보다 노즐 중심축을 따른 평균 압력분포는 낮으며, 그 증가와 감소의 폭은 감소한다.

(3) 스월 이차제트를 사용하는 경우, 비스월 이차제트를 사용하는 경우에 비해 주제트와 이차제트의 혼합 성능은 향상된다.

참고문헌

(1) Love, E. S., Grigsby, D. E., Lee, L. P., and Woodling, L. S., 1959, "Experimental and Theoretical Studies of Axisymmetric Free Jets," NASA TR R-6.

(2) Sheeran, W., and Dosanjh, D., 1968, "Observations on jet flows from a two-dimensional, underexpanded, sonic nozzle," AIAA J., Vol. 6, pp.540-542

(3) Rogers, R.C., Capriotti, D.P., and Guy, R.W., 1998, "Experiment Supersonic Combustion Research at NASA Langley," AIAA-98-2506

(4) Niu, K., 1996, "Shock waves in gas and plasma," Laser and Particle Beams, Vol. 14, No. 2, pp. 125-132.

(5) Cutler, A. D., and White, J. A., 2001, "An Experimental and CFD Study of a Supersonic Coaxial Jet," AIAA-2001-0143.

(6) Buckley, F., 1975, "Mach disk locationl in jet in co-flowing airstreams," AIAA J., Vol. 13, pp. 105-106

(7) D'Attorre, L., and Harshbarger, F., 1965, "Parameters affecting the normal shock location in underexpanded gas jets," AIAA J., Vol. 3, pp. 530-531

(8) Masuda, W., and Moriyama, E., 1994, "Aerodynami Characteristics of Underexpanded Coaxial Impinging Jets," JSME Int. Series B, Vol. 37, No.4, pp.769-775.

(9) Narayanan, A. K., and Damodaran, K. A., 1993, "Mach Disk of Dual Coaxial Axisymmetric Jets," AIAA, Vol. 31, No. 7, pp. 1343~1345.

(10) Rao, T. V. R., Kumar, P. R., and Kurian, J., 1996, "Near Field Shock Structure of Dual Co-Axial Jets," Shock Waves, pp. 361~366.

(11) 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.