

환형 유동을 수반하는 초음속 스월 제트 유동의 가시화

김중배* · 이권희** · Toshiaki Setoguchi*** · 김희동*

Visualization of the Supersonic Swirl Jet with Annular Stream

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

Abstract

The present study addresses experimental results to investigate the details of the near field flow structures produced in the under-expanded, dual, coaxial, swirling, jet. The sonic swirling jets are emitted from a sonic inner nozzle and the outer annular nozzle produces the co/counter swirling streams against the primary swirling jet, respectively. The interactions between both the secondary annular swirling and primary inner supersonic swirling jets are quantified by the pitot impact and static pressure measurements, and visualized by using the Schlieren optical method. The experiment has been performed for different swirl intensities and pressure ratios. The results obtained show that the secondary co-swirling jet significantly changes the inner under-expanded swirling jet, such as the recirculation zone, pressure distribution, through strong interactions between both the swirling jets, and the effect of the secondary counter-swirling jet on the primary inner jet is similar to the secondary co-swirl jet case.

Key Words : Compressible Flow(압축성 유동), Supersonic Swirl Flow(초음속 스월 유동), Shock Wave(충격파), Recirculation Zone(재순환 영역), Annular Shock Wave(환형충격파)

1. 서론

연소실, 스프레이 드라이어 및 버너설계 등에서 유동의 혼합성능 향상이나 화염제어를 위하여 스월제트가 많이 응용 되어지고 있다. 지금까지의 연구들^(1,2)에 의하면 스월제트는 비스월제트에 비해 주위기체의 제트내부로 혼입을 증가시켜 제트코어의 길이를 감소시키고, 스월강도가 임계값 이상이 되면 제트 중심축 부근에서 형성되는 역압력 구배가 재순환 영역을 발생시키고, 이 재순환 영역 연소실내의 화염안정에 기여한다는 것이 알려져 있다. 그러나 이러한 연구의 대부분은 아음속 스월 제트에 관한 것으로, 최근 초음속 연소기 성능향상, 제트소음 경감, 절단 성능향상 등의 산

업분야에서 관심이 높아지는 초음속 스월 및 이중 동축제트⁽³⁾에 관한 연구는 매우 미미한 실정이다. 특히 초음속 이중 동축 스월제트에 대한 연구는 거의 이루어지지 않아 이중 동축 제트에서 외부 제트가 내부 초음속 스월제트 구조 및 특성에 미치는 영향은 거의 알려져 있지 않다. 따라서 본 연구에서는 초음속 스월제트 주위에 환형의 이차 스월, 비스월 유동 및 주제트 노즐의 출구 두께가 동축 제트내의 충격파 구조 및 재순환 영역 특성에 미치는 영향을 조사하였다.

2. 실험 장치 및 방법

본 연구에서는 압축기, 1차 정체실, 2차 정체실, 피토펙압관, 계측 시스템 및 슈리렌 시스템으로 구성된 실험 장치⁽⁴⁾를 사용하여 초음속 이중동축 스월제트의 특성을 조사하였다. Fig.1 및 Table.1 에는 본 연구에 사용된 이중 동축 노즐의 상세 형상 및 치수를 나타내었다. 내부노즐은 초음속 스월제

* 안동대학교 기계공학과

E-mail : Kimhd@andong.ac.kr

** 사가대학교 기계공학과 대학원, 일본

*** 사가대학교 기계공학부, 일본

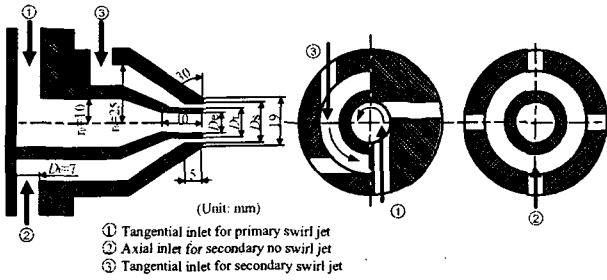


Fig.1 Schematics of the dual, coaxial swirl nozzle

트를 형성하기 위하여 접선방향으로 4 개의 유입구를 가지며 출구직경(D_e)는 8.0mm 이다. 이차제트는 노즐 목 길이가 5mm 이며 축방향과 접선방향으로 각각 4 개의 유동 유입구를 가지는 음속 환형노즐을 통해 발생한다. 주스윙 제트에 대하여 동일한 방향을 가지는 스윙유동(co-swirl stream)과 주제트에 대하여 반대 방향인 역스윙 유동(counter-swirl stream)은 접선방향 유동입구의 위치를 변경함으로써 얻어진다. 또한 각각의 유입구는 2차 정체실과 연결되어 있으며 비스윙, 스윙 그리고 역스윙 이차유동을 발생시킬 수 있도록 독립적으로 개폐된다.

두 스윙 유동에 대한 스윙 강도는, 기하학적 스윙수(S_g)를 이용하여 다음과 같이 정의된다.⁽⁵⁾

$$S_g = (\pi r_p D_e / 2 A_t) \left\{ \frac{\dot{m}_p}{(\dot{m}_p + \dot{m}_s)} \right\} \quad (1)$$

여기서 \dot{m}_p 및 \dot{m}_s 는 축방향 및 접선방향 유입구를 통하는 질량 유량이다. r_s , r_p , D_s , D_e , A_t (유입구 전체면적)는 Fig.1 에 상세히 나타 내었으며, 이차 유동의 스윙수 계산에는 이차노즐의 정체부 및 출구부의 수력 직경을 이용하였다. 본 연구에서 스윙제트 유동은 단지 접선방향 유입구에 의해서만 발생하므로 두 스윙제트의 스윙강도는 스윙 주제트에 대해서는 $S_{gp}=0.81$, 이차 스윙 및 역스윙제트에 대해서는 $S_{gs}=0.41$ 및 -0.41 로 고정되었다. 두 스윙제트의 노즐압력비(NPR)는 주유동과 이차유동 사이의 질량 유량비를 변화시킨다.

실험은 노즐 압력비를 변화시키면서 실시하였으며 Table.2 에 상세히 요약하였다. 주노즐 및 환형노즐 압력비는 노즐 내부 및 외부 유동의 각각의 정체 압력 p_{0p} , p_{0s} 를 대기압 p_a 로 무차원하여 각각 NPR_p 및 NPR_s 로 정의하였다. NPR_s=1.0 은 이차유동이 없는 경우이며 NPR_p=1.0 은 주유동이 없는 경우이다. 외경이 0.8mm, 내경이 0.5mm 인 피토포관 및 확대반각이 10°, 직경이 1.26mm 이며

	D_e	D_L	D_s	$t((D_e-D_L)/2)$
Nozzle I	8	11	15	1.5
Nozzle II	8	9	13	0.5

Table. 1 Dimensions of the coaxial nozzle

Flow	NPR _p	NPR _s	S_{gp}	S_{gs}	Remarks
Case A	1.0-7.0	1.0-5.0	0.81	0.00	No Swirl
Case B	1.0-7.0	1.0-5.0	0.81	0.41	Co-Swirl
Case C	1.0-7.0	1.0-5.0	0.81	-0.41	Counter-Swirl

Table. 2 Experimental conditions

관 끝단으로부터 14D 의 위치에 직경 0.3mm 의 4 개의 정압공을 가지는 정압관을 3 축이송장치 전면부에 부착하여 총돌압력과 피토포정압을 측정하기 위해 사용하였고, 슈리렌 광학법을 이용하여 유동장을 가시화하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 2 에 $S_{gp}=0.81$, NPR_p =3.0-7.0 에 대해 이차유동이 없는 경우, 즉 단일 초음속 스윙제트의 가시화 사진을 나타내었다. NPR_p=3.0 인 경우는 약한 부족 팽창제트로 노즐 출구에서 경사 충격파가 형성된다. 그러나 경사 충격파는 일반 비스윙제트와는 달리 노즐 중심축에서 반사하지 않고 제트 중심부에 발생한 재순환 영역의 경계부에서 반사하는 것을 볼 수 있다. NPR_p 를 더욱 증가시키면, 제트 유동은 노즐 출구에서 강한 부족팽창이 되어 바렐 충격파(barrel shock wave)가 형성되고 유동장은 초음속 유동영역과 스윙 유동으로 인한 재순환 영역으로 명확하게 분리됨을 알 수 있다. 또한 재순환 영역의 크기는 NPR_p 의 증가에 따라 커지고 있다. 이러한 스윙유동장 내의 중심축 압력분포 특성을 Fig.3 에 나타내었다. 모든 경우에서 노즐 출구부근의 총돌압력은 음(negative)의 값을 가지고 NPR_p 가 감소할수록 증가하나 x/D_e 약 5.0 이상에서는 큰 영향이 없음을 알 수 있다. 총돌압력이 음의 값을 가지고 NPR_p=3.0 및 5.0 의 경우 노즐 출구부근에서 진동하는 것은 스윙에 의하여 제트중심부에서 형성된 재순환 영역에서 유동이 역류하고 압력비 특성에 따라 발생한 충격파가 제트중심으로 입사 및 반사함으로 재순환 영역 경계가 팽창 및 축소 하기 때문이라 생각한다. 이러한 재순환 영역을 확인하기 위하여 부드러운 섬유실을 이용하여 제트 중심 유동을 가시화 한 사

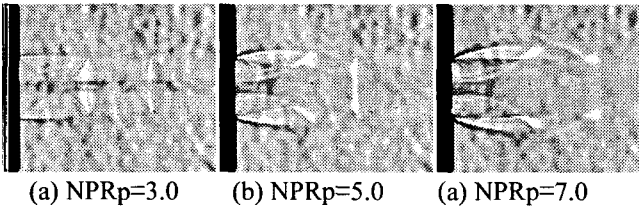


Fig. 2 Shadowgraphs without the secondary stream

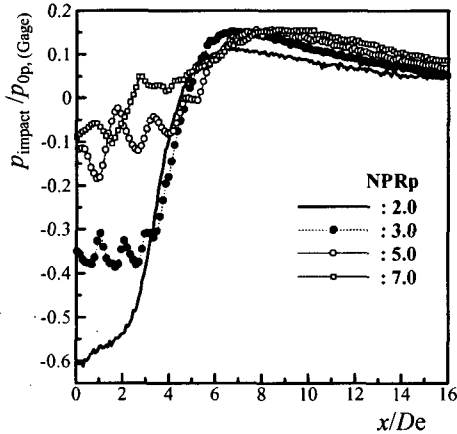


Fig. 3 Impact pressure distributions along the nozzle axis

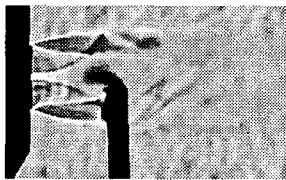


Fig. 4 Visualization of the recirculation region

진을 Fig. 4 에 나타내었다. 섬유실이 노즐쪽을 향하고 있어 유동장이 역류되고 있음을 명확히 알 수 있다. Fig. 5 에는 이차유동 압력비가 주 스윙 제트 충격파 구조에 미치는 영향을 알아 보기 위한 가시화 사진을 나타내었다. NPRs 가 2.0 이 되면 환형충격파가 발생하고, 더욱 증가하면 주 노즐 출구에서 이차 환형제트로의 경사충격파(이후 출구 충격파로 정의)가 발생하여 주스윙 제트 경계와 간섭하여 유동장은 매우 복잡해짐을 알 수 있다. 또한 재순환 영역은 NPRs 에 크게 영향을 받는다는 것을 알 수 있으나, NPRp 에 의존하는 것으로 보여진다. 즉, NPRp=3.0 의 경우 재순환 영역의 직경은 NPRs 에 따라 증가하는 것으로 보여지나, NPRp=7.0 의 경우는 감소하는 것으로 보여진다. 이것은 이차유동이 주제트의 실질 팽창비에 미치는 영향이 다르기 때문이라 생각한다. Fig. 6 에는 이차 제트가 스윙유동인 경우를 나타낸 가시화 사진이다. Fig. 5 와 비교할 때, 동일한 NPRs 에서 환형충격파의 위치가 좀더 상류에 위치

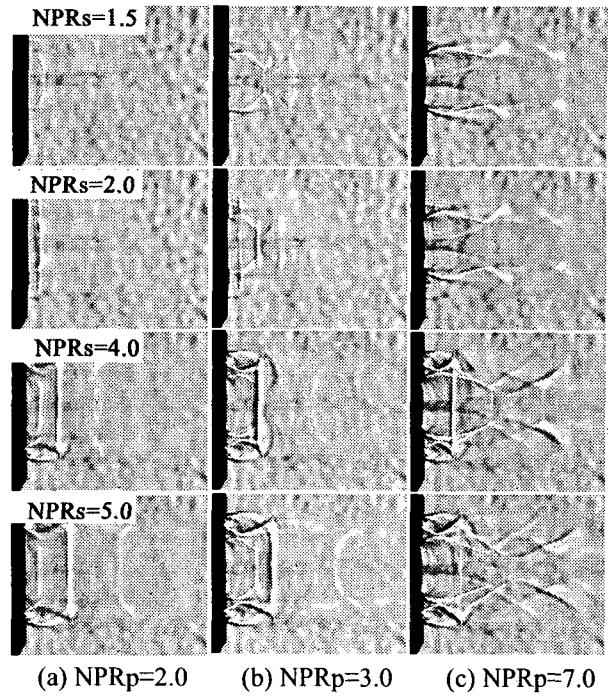


Fig. 5 Flow visualization showing the under-expanded dual, coaxial, swirling jet (Nozzle I, Case A)

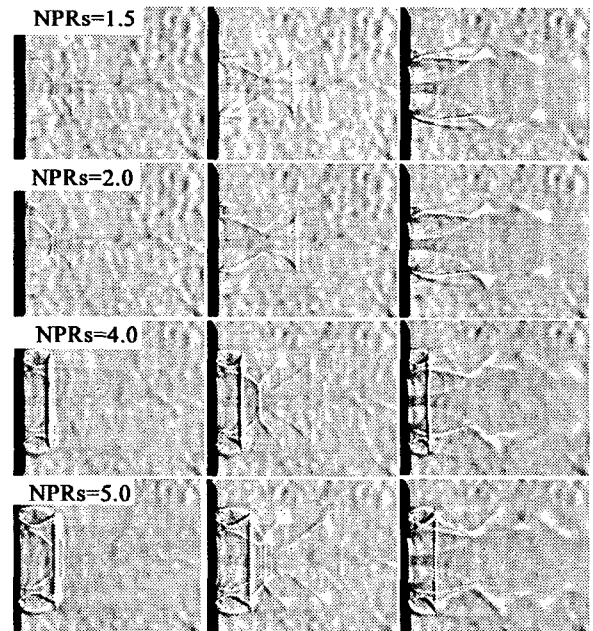
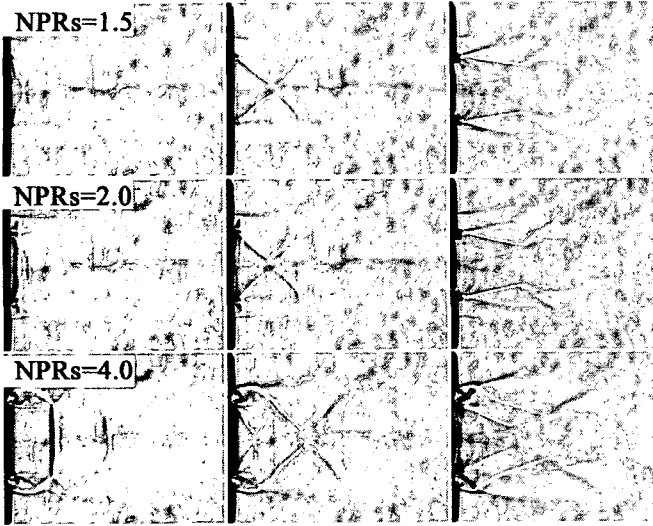


Fig. 6 Flow visualization showing the under-expanded dual, coaxial, swirling jet (Nozzle I, Case B)

하고 출구 충격파의 강도도 약해진 것으로 보인다. 또한 주제트 내에서 발생하는 재순환 영역 크기는 Fig. 5 경우에 비하여 증가한 것으로 보인다. 이것은 스윙유동이 갖는 운동에너지 소산 및 원심력의 영향으로 주스윙 유동의 경계조건에 영향을 준 결

과라고 생각된다.

Fig.7에는 주제트 노즐 출구 두께가 초음속 이 NPRs=1.5



(a) NPRp=2.0 (b) NPRp=3.0 (c) NPRp=7.0

Fig.7 Flow visualization showing the under-expanded dual, coaxial, swirling jet (Nozzle II, Case A)

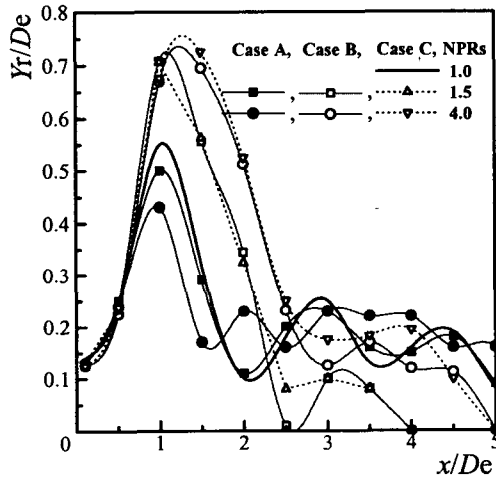


Fig.8 Diameter of the recirculation zone vs NPRs (Nozzle I, NPRp=5.0)

중 동축 스윙제트 유동장에 미치는 영향을 나타낸 가시화 사진들이다. 동일한 NPRs 에서, 환형충격과는 동일한 유동조건인 Fig.5 에 비해 좀더 상류에 위치하며 주스윙 제트 압력비, NPRp 에 크게 의존함을 알 수 있다. 또한 충격과 구조 및 재순환 영역도 Fig.5 에 비교해 볼 때 크게 다름을 알 수 있다. 이것은 주제트 노즐 출구에서 주 제트 및 이차제트 사이에 제트의 실질 팽창비에 영향을 미치는 재순환 영역이 발생하지 않아 두 제트의 간섭이 노즐 출구 직후에서 더욱 강해지기 때문이라 생각된다.

연소기에서 화염 안정화에 주요한 역할을 하는

재순환 영역의 직경을 NPRs 및 이차 스윙 유동 특성에 따라 Fig.9 에 나타내었다. 이차유동이 스윙인 경우, 유동의 방향에 관계없이 재순환 영역은 증가 후 서서히 감소하는 것으로 나타나 아음속 스윙 제트 유동내의 재순환 영역 직경 변화⁽⁶⁾와 유사함을 알 수 있다. 그러나 이차 유동이 비스윙인 경우(Case A), 재순환영역 직경은 증가와 감소를 반복하고 있다. 최대 직경은 NPRs 및 유동 특성에 상관 없이 $x/De \approx 1.0$ 부근에서 나타나며 이차 스윙유동의 경우가 이차 비스윙 유동의 경우보다 조금 크게 나타나고 있다. 이것은 앞의 충돌 압력분포 특성에서도 설명하였듯이 이차제트내의 충격과 구조의 영향이라고 생각되어진다.

4. 결론

본 연구는 초음속 이중 동축 스윙제트에서 환형 이차 제트 및 주제트 노즐 출구 두께가 초음속 동축 주스윙 제트 유동 특성에 미치는 영향을 실험을 통하여 규명하였다. 그 결과, 이차 제트 압력비 및 유동 방법(스윙, 비스윙 및 역스윙)은 주 초음속 스윙 제트 중심부에서 발생하는 재순환영역 크기, 형상 등에 크게 영향을 미침을 알 수 있었다. 특히 재순환 영역의 직경은 이차 비스윙 제트인 경우, 증가와 감소를 반복하여 아음속 스윙 유동인 경우의 재순환 영역 형상과는 상당히 다르다는 것을 알 수 있었다. 또한 주제트 노즐 출구 두께 변화는 제트의 실질 팽창비 및 두 제트의 간섭 정도에 영향을 미쳐 동축 스윙제트내의 충격과 구조에 큰 영향을 미침을 알 수 있었다.

참고문헌

- (1) Lilley D.G., 1977, "Swirl Flows in Combustion: A Review," AIAA Journal, Vol. 15, No. 8, pp. 1063-1078.
- (2) Mauchton J. W., Cattafesta III L.N., and Settles G.S., 1996, "An experimental study of compressible turbulent mixing enhancement in swirling jets," J. Fluid Mech., Vol. 330., pp.271-305.
- (3) Lee K.H, Setoguchi T., Matsuo S., and Kim H.D., 2004, "An Experimental Study of the Under-Expanded Sonic, Coaxial, Swirl Jets," Journal of Mechanical Engineering Science. (to be published).
- (4) Lee K.H, Setoguchi T., Matsuo S., and Kim H.D., 2003, "The Effect of the Secondary Annular Stream on Supersonic Jet," KSME Int. (to be published).
- (4) Yu Y.K and Chen R.H., 1997, "A Study of Screech Tone Noise of Supersonic Swirling Jets," Journal of Sound and Vibration, Vol.205, No.5, pp 698-705.
- (5) Champagne F.H and Kromat S., 2000, "Experiments on the Formation of a Recirculation Zone in Swirling Coaxial Jets," Experiments in Fluids. Vol. 29, pp. 494-504.