

부족팽창 동축 스월 제트유동 특성에 관한 실험적 연구

김중배[†] · 이권희^{*} · 토시아키 세토구치^{**} · 김희동^{***}

An Experimental Study of Under-Expanded Coaxial, Swirling Jets

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

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 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/supersonic swirling jets are emitted from the sonic inner nozzle and the outer annular nozzle produce the co-swirling and counter swirling 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 is performed for different swirl intensity and pressure ratio. 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 effects of the secondary counter-swirling jet is similar to the secondary co-swirl jet case.

1. 서론

일반적으로, 스월제트는 연소실내의 화염 제어 나 여러 형태의 스프레이 드라이어 및 버너설계에 응용되어 지고 있다. 스월제트는 제트내에서 충격파가 발생하거나, 유체의 회전운동과 난류 유동의 복잡한 기체역학적 특성을 가진 것으로 회전운동이 노즐상류에서 주어질 때, 노즐로부터 방출되는 기체유동은 비스월제트 유동과는 달리, 축방향 및 반경방향 속도 성분 뿐만 아니라 법선방향 속도 성분을 가지게 된다. 지금까지 스월제트에 대한 많은 연구가 수행되었으며, 이들의 연구에 따

르면, 스월제트는 비스월제트에 비해 주위 기체의 제트 내부로의 혼입을 증가시켜 제트 코어의 길이를 감소시킨다고 보고하였다.^(1,2) 또한 스월 강도 (swirl intensity)는 스월제트의 특성을 결정하는 주요한 변수라는 것이 알려졌으며, 스월강도가 임계값을 초과하면 이중동축 스월제트의 중심축 부근에 역압력 구배영역이 존재하게 된다⁽³⁾. 이로 인하여 발생하는 재순환영역은 연소실내의 화염안정 기술에 있어 중요하다.^(4,5) Vu & Gouldin⁽⁶⁾은 스월 이중동축 연소실에 있어서 외부 스월 유동은 재순환 영역의 형성에 크게 영향을 미침을 보고하였다. Champagne & Kromat⁽⁷⁾은 재순환 영역은 스월강도 뿐만 아니라 두 유동의 질량유량의 비에 크게 의존함을 밝혔다. 하지만 이러한 연구들의 대부분 아음속 단일(single) 및 이중 동축 제트 유동에 관한 것이다. 비록, Carpenter⁽⁸⁾와 Dutton⁽⁹⁾등이 초음속 싱글 스월 제트의 충격파 구조와 압축성 효과가 혼합 성능이나 화염을 안정화 시키는 재순환 영역에 미치는 영향은 아음속 스월 제트와는 전혀 다른 것임을 보고 하였으나 아음속 스월제트 연구

[†] 안동대학교 기계공학과 대학원

E-mail : kimhd@andong.ac.kr
TEL : (054)820-5622 FAX : (054)823-5495

^{*} 사가대학교 기계공학과 대학원, 일본

^{**} 사가대학교 기계공학과, 일본

^{***} 안동대학교 기계공학부

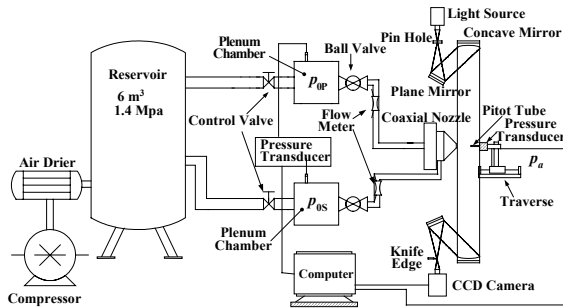


Fig. 1 Schematic outlook of experimental facility.

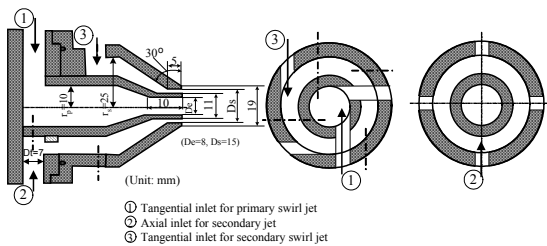


Fig. 2 Details of dual, coaxial, nozzle.

에 비하여 매우 미미한 실정이다. 최근에는, 동축 스웰제트가 엔진 연소실 제트소음 경감, 두 유동의 혼합성능 증대, 플라즈마 절단 능력 향상등과 같은 여러 산업분야에서 널리 이용되고 있고, 특히 초음속 연소기, 램젯 등에서 아음속 이중동축 스웰제트에 비해 성능을향상시킬 수 있는 초음속 이중동축 스웰제트에 대한 관심이 높아지고 있다. 그러나 초음속 스웰 및 이중동축 스웰제트에 대한 연구는 거의 이루어지지 않아 이중 동축제트에서 외부 제트가 내부 초음속 스웰 제트 구조 및 특성에 미치는 영향등은 거의 알려져 있지 않다.

따라서 본 연구에서는 초음속 스웰제트 주위에 환형의 이차 스웰 및 비스웰 제트가 주어지는 경우와 그 특성에 따른 재순환 영역의 크기, 충격과 구조 및 압력 분포등을 조사하였다. 실험은 일정한 형상스웰 강도에서 내부제트와 외부 환형 제트의 압력비를 조절하여 질량 유량비를 변화 시켰으며, 제트내부에서 발생하는 충돌압 및 정압을 측정하여 유동장을 정량화하였다

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치

본 연구에서는 Fig.1 에 나타난 바와 같이 압축기, 1 차 정체실, 2 차 정체실, 피토펙압관, 계측 시스템 및 쉬리렌 시스템으로 구성된 실험 장치를 사용하여 초음속 이중동축 스웰제트의 특성을

Table. 1 Experimental condition

Flow	NPRp	NPRs	S _{gp}	S _{gs}	Remarks
Case A	1.0-7.0	1.0-4.0	0.81	0.00	No Swirl
Case B	1.0-7.0	1.0-4.0	0.81	0.41	Co-Swirl
Case C	1.0-7.0	1.0-4.0	0.81	-0.41	Counter-Swirl

조사하였다. 또한 질량 유량을 측정하기 위하여 벤투리미터를 노즐 입구배관에 각각 설치하였다. 압축 탱크(6m³)에 저장된 압축공기는 건조 필터와 감압밸브를 거쳐 주유동과 이차유동을 위한 2 개의 독립된 1, 2 차 정체실로 안내되며, 정체실 하부에 부착된 이중동축 노즐의 내부노즐(주노즐)인 음속노즐과 외부노즐(이차노즐)인 환형음속 노즐을 통하여 대기로 방출된다. 1, 2 차 정체실 및 노즐 내벽에는 압력을 측정하기 위한 압력센서가 부착되어 있으며, 정체실 압력은 각각 독립적으로 구성된 압력조절 밸브를 이용하여 조절하도록 되어있다. Fig.2 에는 본 연구에 사용된 이중동축 노즐의 상세 형상을 나타내었다. 내부노즐은 초음속 스웰제트를 형성하기 위하여 접선방향으로 4 개의 유입구를 가지며 출구직경(De)는 8.0mm 이다. 이차제트는 노즐 목 길이가 2mm 이며 축방향과 접선방향으로 각각 4 개의 유동 유입구를 가지는 음속 환형노즐을 통해 발생한다. 주제트에 대하여 동일한 방향을 가지는 스웰제트(co-swirl)와 주제트에 대하여 반대방향인 역스웰(counter-swirl)제트는 접선방향의 유동입구의 위치를 변경함으로 얻어진다. 또한 각각의 유입구는 2 차 정체실과 연결되어 있으며 비스웰, 스웰 그리고 역스웰 이차제트를 발생시킬수 있도록 독립적으로 개폐된다.

2.2 실험 장치

두 스웰유동에 대해서, 기하학적 스웰수(S_g)는 다음과 같이 스웰강도로 정의된다⁽¹⁰⁾

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

m_p 및 m_s 는 축방향 및 접선방향 유입구를 통하는 질량유량이다. r_s, r_p, D_s, D_e, A_t(유입구 전체면적)는 Fig.2 에 상세히 나타 내었으며, 이차 유동의 스웰수 계산에는 이차노즐의 정체부 및 및 출구부의 수력 직경을 이용하였다. 본 연구에서 스웰제트 유동은 단지 접선방향 유입구에 의해서 만

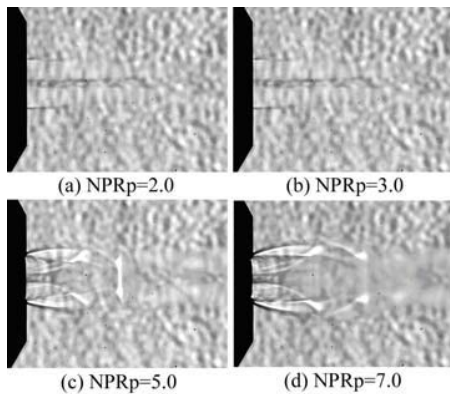


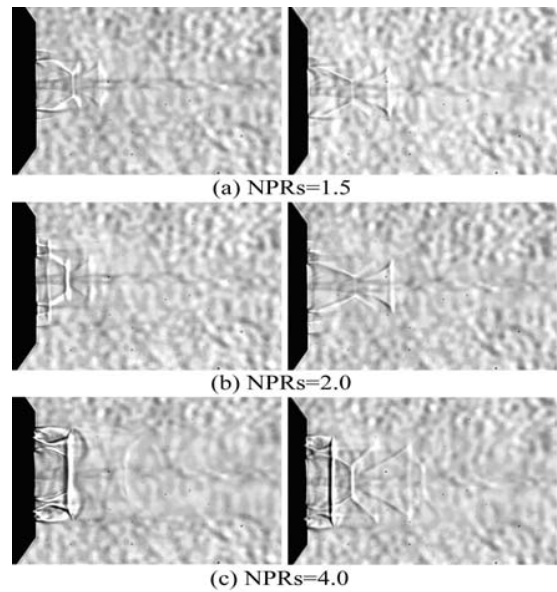
Fig. 3 Flow visualization showing supersonic swirling jet ($S_{gp}=0.81$).

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.

\NPR=1.0~7.0 의 범위에서 변화하며 Table.1 에 상세히 요약 하였다. 주노즐 및 환형노즐 압력비는 노즐 내부 및 외부 유동의 각각의 정체 압력 p_{0p} , p_{0s} 를 대기압 p_a 로 무차원하여 각각 NPRp 및 NPRs 로 정의하였다. NPRs=1.0 은 이차유동이 없는 경우이며 NPRp=1.0 은 주유동이 없는 경우이다. 외경이 0.8mm, 내경이 0.5mm 인 피토관 및 확대 반각이 10° , 직경이 1.26mm 이며 관 끝단으로부터 14D 의 위치에 직경 0.3mm 의 4 개의 정압공을 가지는 정압관을 3 축이송장치 전면부에 부착하여 충돌압력과 피토정압을 측정하기 위해 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 3 에 $S_{gp}=0.81$, $NPRp=2.0\sim 7.0$ 에 대해서 이차제트가 없는 단일 초음속 스윙제트의 가시화 사진을 나타내었다. $NPRp=2.0$ 인 경우, 노즐출구에서의 제트 유동은 거의 적정 팽창상태에 가까우며, 스윙제트유동으로 인한 재순환 영역은 스윙제트 중심에서 나타나지만 명확한 충격파 구조는 생성되지 않는다. $NPRp=3.0$ 인 경우는 비스윙 제트 유동의 경우⁽¹¹⁾와 유사하게 제트는 약간 부족 팽창이 되며 노즐 출구에 경사 충격파가 형성된다. 그러나 경사 충격파는 노즐 중심축에서 반사하지 않으며 제트 중심부의 재순환 영역의 경계에서 반사하는 것을 볼 수 있다. $NPRp$ 를 더욱 증가시키기에 따라 제트 유동은 노즐 출구에서 강한 부족팽창 되어 바렐 충격파(barrel shock wave)가 형성됨 을 알 수



(A) Case A (B) Case B

Fig. 4 Flow visualization showing supersonic dual, coaxial, swirling jet ($NPRp=3.0$).

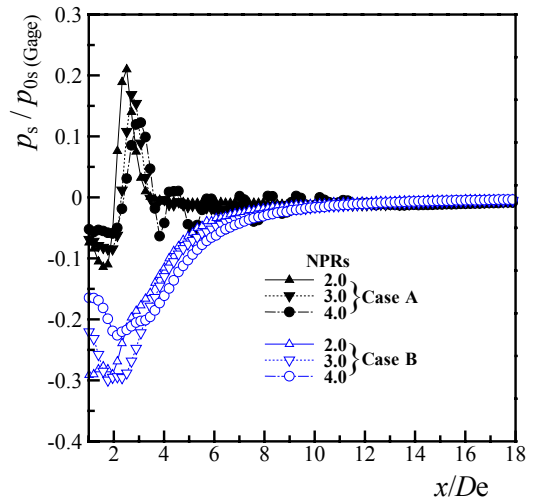
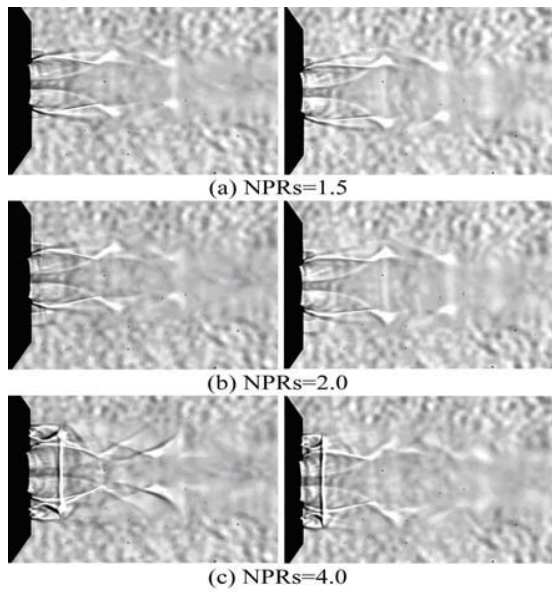


Fig. 5 Static pressure distribution of secondary jets along the nozzle axis ($NPRp=1.0$).

있다. 유동장은 초음속 유동영역과 스윙 유동으로 인한 재순환 영역으로 명확하게 분리됨을 알 수 있고 이는 Yu & Chen⁽¹²⁾의 연구 결과와 잘 일치 하고 있다. 또한 재순환 영역의 크기는 $NPRp$ 의 증가에 따라 커지며, 바렐충격파도 더욱 강해지고 있다.

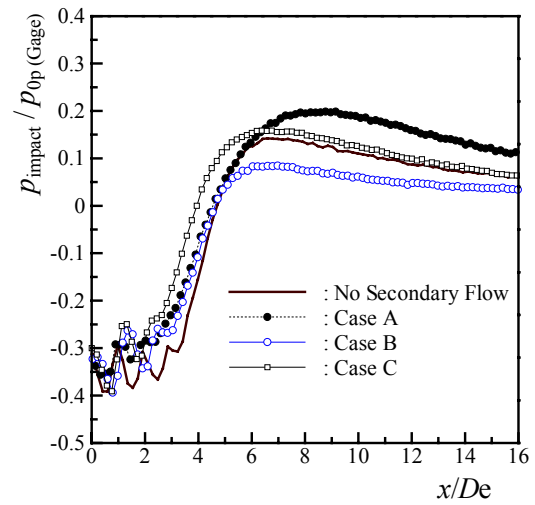
초음속 이중 동축 스윙제트에서의 이차제트의 특성(비스윙 및 스윙) 에 따른 근접유동장(Near flow field)의 변화를 Fig.4 에 나타 내었다. $NPRp=3.0$



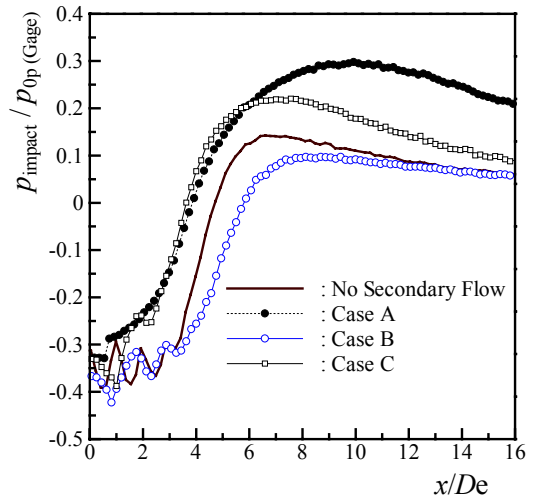
(A) Case A (B) Case B

Fig. 6 Flow visualization showing supersonic dual, coaxial, swirling jet (NPRp=7.0).

으로 고정되었으며 NPRs=1.5~4.0 까지 변화시켰다. Fig. 4(A)와 Fig. 4(B)는 각각 비스윙 및 스윙 이차 제트가 사용된 경우이다. 그림에서 주 스윙제트는 이차제트 유동에 의해 크게 영향을 받음을 알 수 있다. 비스윙 이차제트가 사용된 경우, Fig. 3(a)에 비해 바렐충격파와 부근의 재순환 영역의 직경이 증가하였으며 마하 디스크(Mach disk)가 형성되고 있다. 또한 NPRs의 변화도 재순환 영역의 크기에 영향을 미치는 것으로 보여진다. 이차 스윙제트가 사용된 Fig. 4(B) 경우, 이차 비스윙제트가 사용된 Fig. 4 (A)에 비해 마하디스크는 상대적으로 좀 더 하류에 형성되었으며 재순환 영역은 좀 더 커졌다. 또한 환형 충격파는 이차 비스윙 제트유동에 비하여 약간 상류에 형성되며, NPRs의 증가에 따라 마하 디스크의 직경은 증가하고 환형충격파는 하류로 이동하고 있음을 알 수 있다. 이것은 스윙유동이 갖는 원심력으로 인한 운동에너지의 소산 및 주 스윙유동의 경계조건에 영향을 준 결과라고 생각되어진다. 이차제트유동의 정압력 분포, Fig.5를 보면 스윙의 경우(Case B)와 비스윙의 경우(Case A)가 완전히 다른 압력분포 경향을 보이고 있다. 스윙의 경우, 노즐 출구 부근에서 대기압력 보다 현저히 낮은 압력분포 값을 보여주고 있다. 이러한 정압 분포는 주 스윙제트의 실질적인 노즐압력비에 변화를 주어 스윙제트 구조가 변화되고 있다. NPRp=7.0, 즉 강한 부족팽창인 경우에 대한



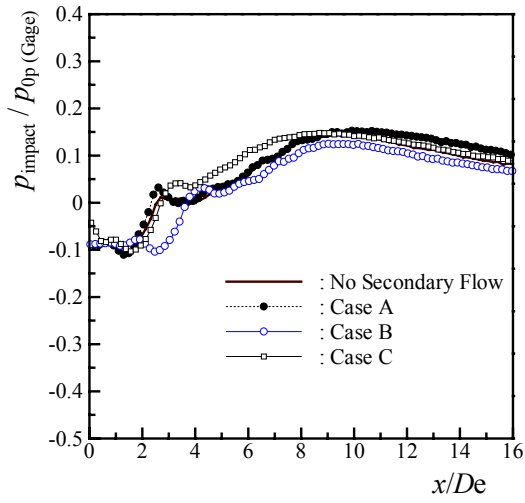
(a) NPRs=1.5



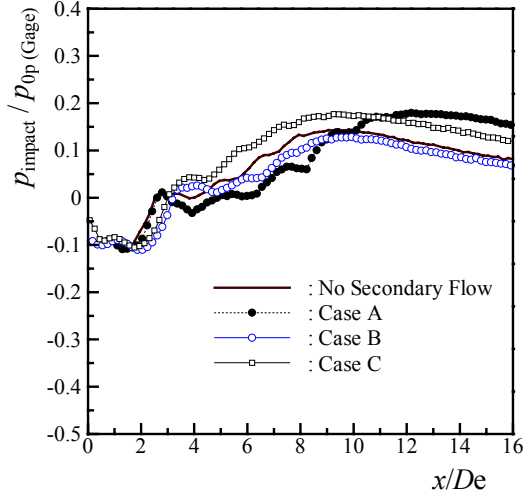
(b) NPRs=3.0

Fig. 7 Impact pressure distributions along the nozzle axis (NPRp=3.0).

가시화 사진을 Fig.6에 나타내었다. 이차유동이 주유동에 영향을 미치지만 약한 부족팽창 경우인 NPRp=3.0(Fig.4)에 비해 상대적으로 적다는 것을 알 수 있다. 이러한 이차유동이 주 스윙유동의 압력비 변화에 따라 미치는 영향을 정량적으로 알아보기 위하여 동축 스윙제트의 중심축을 따르는 충돌 압력분포(게이지 압력값)를 NPRp는 각각 3.0, 7.0, NPRs는 각각 1.5, 3.0의 경우에 대하여 Fig.7과 Fig.8에 나타내었다. 모든 경우에서 노즐 출구 부근의 충돌압력은 음(negative)의 값을 가지며 이는 유동이 역류한다는 것을 의미한다. NPRp=3.0인 경우에 충돌압력 분포 및 역류 영역의 크기는 이차유동 및 그 특성에 크게 의존한다. NPRp=7.0



(a) NPRs=1.5



(b) NPRs=3.0

Fig. 8 Impact pressure distributions along the nozzle axis (NPRp=7.0).

인 경우에는 노즐 출구에서 주유동이 상대적으로 강한 부속팽창으로 제트 경계가 강하게 되어 NPRp=3.0 인 경우에 비해 이차유동이 노즐 중심축을 따르는 충돌 압력분포에 큰 영향을 미치지 못한다. 또한 $x/De=4.0$ 보다 작은 영역에서는 NPRp=3.0 인 경우가 NPRp =7.0 인 경우에 비해 충돌압력이 크게 진동하는 것을 볼 수 있는데, 이것은 제트유동내의 충격파 구조와 관련된 것으로 스윙 제트내의 충격파가 역류영역 경계로의 입사 및 반사의 영향으로 역류의 경계가 팽창 및 수축하는 결과라 생각되어 진다.

연소기에서 화염 안정화에 주요한 역할을 하는 재순환 영역의 길이를 주제트 및 이차 제트 압력비 그리고 이차제트 유동 방법에 대하여 Fig. 9에

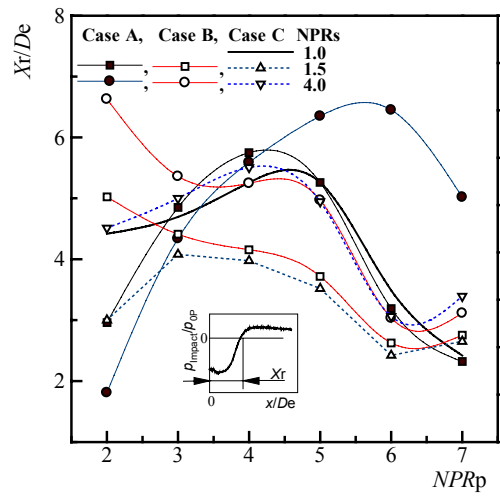


Fig. 9 Length of the recirculation zone vs. NPR.

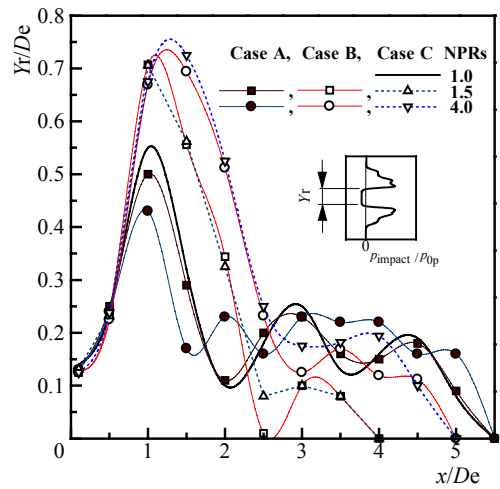


Fig. 10 Diameter of the recirculation zone vs. NPRs (NPRp=5.0).

나타내었다. 재순환 영역 길이는 노즐 중심선에서 측정된 충돌계이지 압력이 음의 값을 가지는 영역까지로 정의 하였다. 이차 제트가 스윙인 경우 (Case B), X_r 은 NPRp 가 증가 할수록, NPRs 는 감소할수록 감소하고 있다. 이차제트가 비스윙(Case A) 및 역스윙(Case C)의 경우는 NPRp 의 증가와 함께 증가 후 감소하고, NPRs 가 증가할수록 증가하고 있다. 이것은 앞에서 설명하였듯이 이차 유동 특성이 주스윙 제트의 팽창정도에 영향을 주기 때문이다. 그러나 이러한 영향은 그림에서도 볼 수 있듯이 주스윙 제트의 압력비, 즉 팽창정도에 따라 다르게 나타나며, $NPRp \leq 5.0$ 의 경우 재순환 영역 길이는 NPRs 에 큰 영향을 받으나 $NPRp=7.0$ 의 경우는 영향이 약하여 짐은 알 수 있다.

Fig.10 은 NPR_p=5.0 인 경우에서, 반경방향 압력 분포값에서 측정된 재순환 영역의 직경을 이차유동 압력분포 및 이차 스윙 유동 특성에 따라 나타낸 것이다. 이차 스윙 유동인 경우, 유동의 방향에 관계없이 재순환 영역은 증가후 서서히 감소하는 것으로 나타나 아음속 스윙 제트 유동내의 재순환 영역 직경 변화(7)와 유사한 것임을 알 수 있다. 그러나 이차 유동이 비스윙인 경우(Case A), 재순환 영역 직경은 증가 와 감소를 반복하고 있다. 최대 직경은 NPRs 및 유동 특성에 상관 없이 x/De =약 1.0 부근에서 나타 나며 이차 스윙유동의 경우가 이차 비스윙 유동의 경우보다 조금 크게 나타나고 있다. 이것은 앞의 충돌 압력분포 특성에서도 설명하였듯이 이차제트내의 충격파 구조의 영향이라고 생각되어 진다.

4. 결 론

본 연구는 초음속 이중 동축 스윙제트에서 환형 이차 제트가 초음속 동축 주 스윙제트 유동 특성에 미치는 영향을 실험을 통하여 규명하였다. 그 결과, 이차 제트 압력비 및 유동 방법(비스윙, 스윙, 및 역 스윙)은 주 초음속 스윙 제트 중심부에서 발생하는 재순환영역 크기, 형상, 바렐 충격파, 및 압력분포 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 재순환 영역 길이는 이차 스윙제트인 경우가 비스윙 및 역 스윙인 경우보다 길게 형성되고 있다. NPR_p=3.0 및 NPR_s=2.0 에서, 이차 스윙제트경우가 비스윙 제트 경우에 비하여 약 2.2 배정도 이상 크게 나타 났다. 그러나 이차 제트가 재순환 영역에 미치는 영향은 주제트 노즐 압력비에 크게 의존하고 있다. 재순환 영역 하류의 평균 충돌압 분포는 스윙보다 비스윙 및 역스윙 이차제트가 사용된 경우가 더 크게 나타났다.

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) Syred, N. and Beer, J. M., 1974, "Combustion in swirling floes," Combustion and Flame, Vol. 23, pp. 143-201.
- (4) Martin D.T., Gouldin F.C., and Yetter R.A., 1975, "Preliminary Evaluation of Vortex Breakdown Stabilized Combustion," Eastern states Section/Combustion Institute Fall Meeting, New York, Nov. 6-7.
- (5) Escudier M.P and Keller J.J., 1985, "Recirculation of Swirling Flow:A Manifestation of Vortex Breakdown," AIAA Journal, Vol. 23, No. 1, pp. 111-116.
- (6) Vu B. T. and Gouldin F.C., 1981, "Flow Measurements in a Model Swirl Combustor," AIAA Journal, Vol. 20, No. 5, pp.642-651.
- (7) 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.
- (8) Carpenter P.W., 1985, "A Linearized Theory for Swirling Supersonic Jets and Its Application to Shock Cell Noise," AIAA Journal. Vol. 23, No. 12, pp. 1902-1909.
- (9) Dutton J.C., 1987, "Swirling Supersonic Nozzle Flow," J. Propulsion, Vol. 3, pp. 342-349.
- (10) 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.
- (11) Lee K.H, Setoguchi T., and Kim H.D., 2003, "The Effect of the Secondary Annular Stream on Supersonic Je," KSME Int. (to be published).
- (12) Yu Y.K, Chen R.H., and Chew L. screech., 1998, "Screech Tone Noise and Mode Switching in supersonic Swirling Jets," AIAA Journal, Vol. 36, No. 11, pp. 1968-1974.