

노즐 챔버 형상이 부족팽창 스월제트 유동에 미치는 영향에 관한 연구

김중배[†] · 이권희* · 토시아키 세토구치** · 김희동***

The Influence of the Supply Chamber Configuration on Under-Expanded Swirling Jets

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

Key Words : Supersonic swirling jet(초음속 스월제트), Supply chamber configuration(공급 챔버형상), Shock wave(충격파), Recirculation Zone(재순환 영역)

Abstract

The present study addresses experimental results to investigate the effect of the jet supply chamber configuration on the sonic/supersonic swirling jets, as the case study. The experiment is carried out using the convergent nozzle with a various different chamber configurations upstream the nozzle throat, which is composed of four tangential inlet holes for the swirling flows. The jet pressure ratio is varied between 3.0 and 7.0. The sonic/supersonic swirling jet flows are specified by the pitot impact and static pressure measurements and visualized using the Shadowgraph method. The results show that the major structures of the sonic/supersonic swirling jet are strongly influenced by the jet supply chamber.

1. 서 론

음속/초음속 스월제트는 엔진 연소실 제트 소음 경감, 두 유동의 혼합성능 및 절단성능 향상, 연소실내의 화염 안정 등 여러 산업 분야에서 널리 이용되고 있다. 스월제트는 제트내에서 충격파가 발생하거나, 유체의 회전운동과 난류 유동의 복합적인 기체역학적 특성을 가진 회전운동이 노즐상류에서 주어질 때 발생하며, 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 따르면,

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 스월제트 중심축 부근에 역압력 구배영역이 존재하게 된다⁽³⁾. 이로 인하여 발생하는 재순환영역은 연소실내의 화염안정과 밀접한 관계를 가지고 있어 주요한 연구대상이 되어 왔다. 또한 이러한 스월유동을 발생시키기 위하여 많은 방법이 연구되어졌으며, 대표적인 것으로 법선방향 유입구 및 적당한 베인(vane)을 사용하거나⁽⁴⁾, 회전이 가능한 유입구의 사용⁽⁵⁾, 축방향 및 접선방향의 스월 발생기⁽⁶⁾, 그리고 블레이드⁽⁷⁾. 등이 사용되고 있다. 초음속 스월제트에 대한 연구로는 Carpenter^(8,9)가 일차원 이론 해석을 사용해 라발노즐에서 발생하는 초음속 스월제트 특성을 계산하였다. 그결과 스월이 노즐의 목(질식 조건)을 기준으로 노즐 내부 유동과 외부 역류유동으로 나누짐을 확인하였으나 노즐의 형상, 스월강도 등의 다양한 분석은 이루어 지지 않았다. Dutton⁽¹⁰⁾은 초

[†] 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

음속 노즐내 유동에서 노즐형상, 입구 스윙 형상, 및 스윙 강도의 영향에 관하여 조사하였다.

최근에 Culter 등⁽¹¹⁾은 노즐 내부에 링이나 베인을 설치하여 스윙제트나 와류를 발생시키는 이전의 방법보다 축소확대 노즐의 유입구에 접선방향의 스윙러를 사용하는 것이 더 높은 피크 helix angle 를 발생시키고 유동 혼합에 효율적이라는 것을 보고하였다. 또한, Yu 등⁽¹²⁾은 접선방향 유입구에 의해 발생하는 스윙유동은 제트의 충격과소음을 감소시키는데 효과가 있음을 밝혔다. 그러나, 일반적으로 이러한 노즐을 사용하는 연구에서, 노즐 상류 정체 영역 특성을 측정하기 위해 노즐내부에는 정압공, 피토 프로브 및 원통형의 열전대(thermocouple) 등이 사용되고 있다. 현재까지, 노즐을 통하는 초크된 유동의 제트 구조는 단지 상류와 하류의 압력비에만 의존하는 것으로 알려져 있어 노즐목 상류 챔버 형상의 영향은 음속/초음속 스윙제트의 구조를 결정하는 주요 변수로 고려되지 않고 있다.

본 연구에서는 음속/초음속 스윙제트 유동의 공급 챔버 형상이 충격과 구조 및 압력분포에 미치는 영향을 실험을 통하여 조사하였으며, 노즐 공급 챔버형상이 초음속 스윙제트 구조에 큰 영향을 미침을 확인하였다. 실험에서 노즐 챔버 형상의 변화를 위해 제거가 가능한 플러그와 스윙유동을 위한 4 개의 유입구로 구성된 노즐을 이용한 여러

가지 형태의 챔버 형상이 사용되었다. 노즐 압력비는 3.0 에서 7.0 까지 변화시켰으며, 피토 총돌압력 및 정압을 측정하고 샤도우법을 사용하여 유동장을 가시화하였다.

2 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치

본 연구에서는 Fig.1 에 나타낸 바와 같이 압축기, 정체실, 플립 챔버, 피토 프로브, 계측 시스템 및 가시화 시스템으로 구성된 실험 장치를 사용하였다. 압축탱크(3.0m³)에 저장된 압축공기가 노즐 상류에 연결된 접선방향 유입구를 가지는 플립챔버에 공급되며, 플러그가 플립 챔버 형상을 바꾸기 위해 사용되었다. Fig.2 에 본 연구에서 사용된 노즐과 플러그 형상을 상세하게 나타내었다. 노즐은 목길이가 10mm 이며, 출구직경 De=8.0mm 인 음속 노즐이 사용되었다. 스윙유동은 4 개의 접선방향 유입구에 의해 발생하며, 노즐 공급 챔버의 형상을 변화시키기 위하여 그림에서와 같은 9 개의 서로 다른 형상의 플러그가 사용되었다.

2.1 실험 조건과 측정 방법

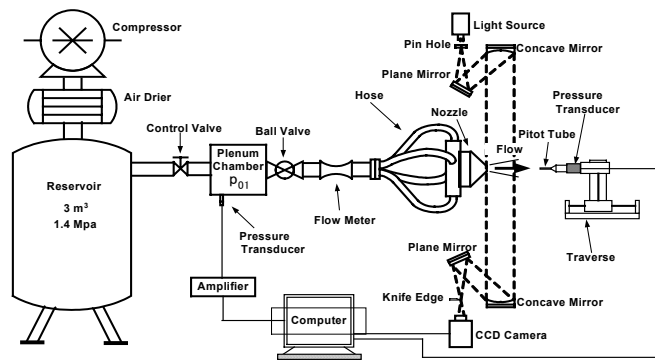


Fig. 1 Schematic outlook of experimental facility.

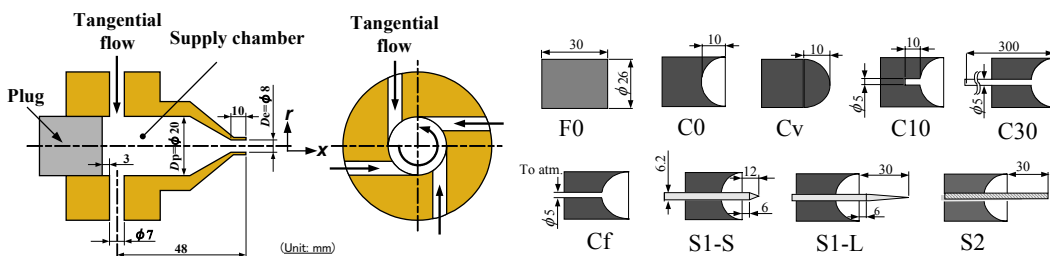


Fig. 2 Details of supply chamber, nozzle, and plug configurations (Unit : mm).

스월 유동에 대하여, 기하학적 스월수(S_g)는 다음과 같은 스월강도로 정의된다⁽¹²⁾.

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

\dot{m}_p 및 \dot{m}_s 는 각각 축방향 및 접선방향 유입구를 통하는 질량유량이다. r_p , D_e , A_t (유입구전체면적)는 Fig.2에 나타내었다. 실험에서 \dot{m}_θ 및 \dot{m}_a 는 노즐 상류 유입구에 설치된 벤튜리메타를 통해 측정되었다. Eq. (1)에 의해 정의된 기하학적 스월수는 출구속도 분포를 고려하지는 않았다. 본 연구에서는 접선방향의 유동만 있는 경우로 노즐형상에 의해서만 결정되며 스월수 $S_g=0.81$ 로 고정되었으며, 노즐입구의 상류 정체압(P_{01})과 출구의 대기압(P_a)에 대한 압력비(NPR)를 3.0~7.0까지 변화시켰다. 외경이 0.8mm, 내경이 0.5mm인 피토 프로브가 초음속 스월제트 유동장의 축방향 및 반경방향으로의 충돌 압력을 측정하기 위해 사용되었다.

3. 결과 및 고찰

Fig.3은 F0 경우에 대한 대안 가시화 사진과 노즐 중심축 부근에서의 충돌압력 분포를 나타내며, 노즐 압력비는 3.0~7.0까지 변화한다. 일반적으로 스월유동에서 스월 강도가 일정값 이상이 되면 유동장 내에 역류영역, 즉, 노즐 중심축부근에서의 역압력구배 영역이 존재하게 된다. 본 연구에서도 NPR=3.0인 경우 제트는 약간 부족 팽창이 되며 노즐 출구에 경사 충격파가 형성된다. 그러나 경사 충격파는 비스월 유동인 경우에서와 같이 노즐 중심축에서 반사하지 않고, 제트 중심부에 발생한 재순환 영역의 경계에서 반사하는 것을 볼 수 있다. NPR를 더욱 증가시키기에 따라 제트 유동은 노즐 출구에서 더욱 크게 부족팽창되며 바렐 충격파(barrel shock wave)를 볼 수 있고 유동장은 초음속 유동영역과 스월 유동으로 인한 재순환 영역으로 분리됨을 명확히 알 수 있다. 이는 Yu & Chen⁽¹²⁾의 연구에서도 확인한 바 있다. NPR=7.0으로 증가하면 Fig. 3(b)에 비해 재순환 영역의 크기는 증가하며 바렐충격파는 더욱 강해지게 된다. 또한 재순환 영역의 최대 직경은 압력비에 따라 증가하고 대략적으로 다이아몬드 형상을 나타내고 있다. 이러한 유동특성은 충돌압력분포에서 좀더 정량적으로 확인 할 수 있다. 적용된 모든 압력비에 대하여 노즐 출구에서 충돌압력은 음(negative)의 값을 가지며 이는 이 영역의 유동이 역류함을

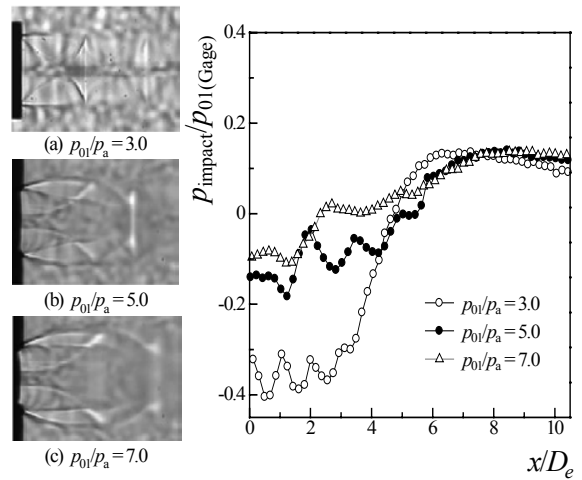


Fig.3 Shadowgraph pictures and impact pressure distributions(F0)

의미한다. NPR이 증가함에 따라 역류영역은 감소하게 되며, 평균충돌압력은 증가하고 있어 부족팽창 스월제트 구조는 노즐 압력비에 크게 영향을 받는다는 것을 알 수 있다. 재순환 영역내에서 충돌압력분포의 증가와 감소는 스월제트내에 발생하는 충격파의 재순환 영역경계에서 입사 및 반사에 따른 영향이라 생각되어 진다.

3.1 챔버 끝단부 형상의 영향

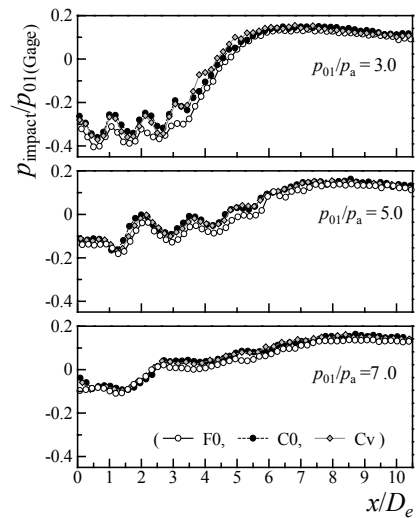


Fig.4 Impact pressure distributions

Fig.4에는 챔버 끝단부 형상이 충돌압력 분포에 미치는 영향을 비교하였다. 끝단부의 형상이 평면(F0), 오목(C0) 및 볼록(Cv) 형태의 플러그가 사용되었으며 NPR=3.0~7.0까지 변화한다. NPR=3.0인

경우, F0 경우가 C0와 Cv보다 평균충돌압력이 낮고, C0와 Cv 경우는 거의 유사한 충돌 압력분포 값을 보여주고 있다. 그러나 이러한 차이도 NPR가 증가함에 따라 점차 감소하고 있으며 적용된 모든 경우에 대하여 동일한 분포경향을 보여주고 있어 챔버 끝단부의 형상은 부족팽창 스웰 제트특성에 큰 영향을 미치지 않는다고 생각되어 진다.

3.2 정압공 (Pressure tap)의 영향

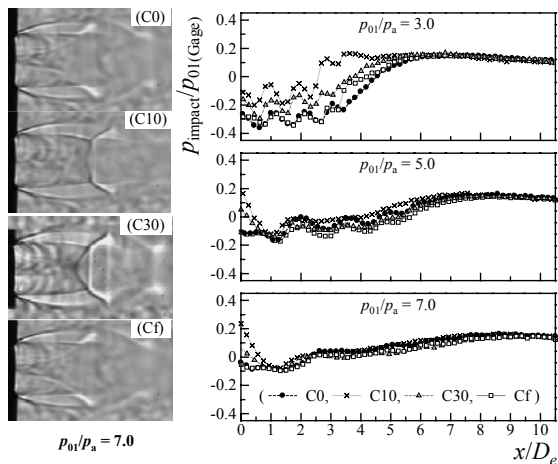


Fig.5 Shadowgraph pictures and impact pressure distributions

앞에서도 서술하였듯이, 일반적으로 노즐을 이용한 연구에서는 노즐상류의 정체점 압력을 측정하기 위하여 직경 1mm-10mm 정도의 정압공을 이용하고 있다.

이러한 정압공이 스웰 제트에 미치는 영향을 확인하기 위하여 챔버 끝단부에 직경 5mm의 정압공을 가공하고 노즐내면에서 압력센서까지의 거리를 변화시키면서 조사한 결과를 Fig.5에 나타내었다. 가시화 사진을 보면, 홀(정압공)의 깊이(노즐내면에서 부터 압력센서 부착위치까지의 거리)에 따라 충격과 구조는 크게 달라 지는 것을 알 수 있다. 특히 C10 플러그가 사용된 경우 제트유동내에 재순환 영역이 보이지 않고 비스웰제트에서 발생하는 마하디스크가 형성되고 있음을 볼 수 있다. C30의 경우도 노즐출구 쪽으로 만곡된 충격파가 형성되고 있으며 재순환 영역의 구조는 C0 경우에 비해 크게 다른 형상을 보여주고 있다. 이러한 정압공이 부족팽창 스웰제트 특성에 미치는 경향은 충돌 압력분포에서 좀더 명확히 알 수 있다. NPR=3.0인 경우에 충돌압력분포는 정압공 깊이에 따라 큰 차이를 보이거나 적용된 모든 경우에 음

(negative)의 충돌압력 값을 나타내고 있어 재순환 영역이 존재함을 알 수 있다. 평균 충돌압 분포는 C10 경우가 경우가 가장 높으며, C0 경우가 가장 낮게 나타나고, 노즐 압력비가 증가할수록 그 차이는 점차 감소하고 있다. NPR=5.0, 7.0인 경우, C10의 경우는 플러스 충돌압력값을 나타내고 있어 재순환 영역이 없음을 알 수 있다. 이러한 노즐 압력비에 따른 영향은 노즐 압력비에 따라 발생하는 선회류 및 충격과 강도에 관련이 있다고 생각되어 진다.

3.3 삽입된 원통형 봉의 영향

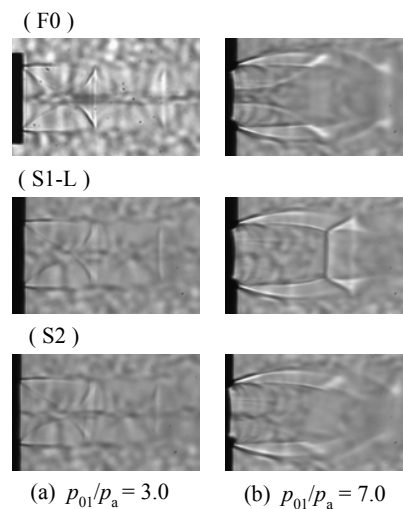


Fig.6 Shadowgraph pictures

Fig.6에는 F0 경우를 기준으로 노즐 공급 챔버 내에 썬기 형상(S1-L) 및 볼트 형상(S2)의 봉을 이용하여 노즐 내부에 설치되는 열전대의 영향을 조사하기 위한 가시화 사진을 나타내었다. S1-1 및 S2의 형상은 Fig.2에 자세히 나타내었다. NPR=3.0인 경우, 모든 경우에 대하여 유동장은 큰 변화가 없는 것으로 보여진다. 그러나 NPR가 7.0으로 증가한 경우, 봉의 존재 및 형상에 따라 스웰제트 구조는 다르고 S1-L의 경우, C10 경우와 마찬가지로 재순환 영역은 보이지 않으며 강한 마하디스크가 형성되고 있음을 알 수 있다.

이것을 정량적으로 조사하기 위하여 각각의 경우에 대한 축방향 및 반경방향으로의 충돌 압력분포를 Fig.7 및 Fig.8에 나타내었다. S1-L 경우 모든 압력비에서 음(negative)의 충돌압력값은 나타나지 않으며 일반적인 초음속 비스웰 제트와 매우 유사한 경향을 보이고있다⁽¹³⁾. 반면에 S2 경우 F0 경우

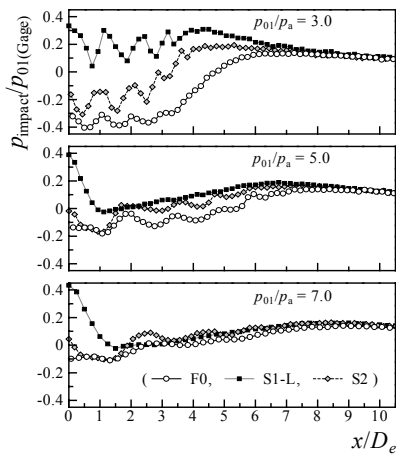


Fig.7 Impact pressure distributions

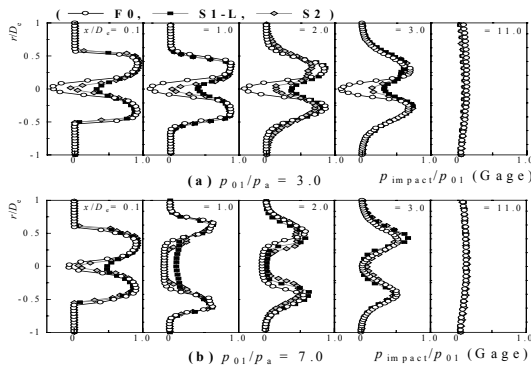


Fig.8 Radial impact pressure distributions

보다 평균 충돌압력이 높게 나타나며 재순환 영역이 존재하는 것을 알 수 있다. 특이한 것은 S2 경우, NPR 이 증가하면 노즐 출구에서는 플러스 충돌압력값을 가지고 조금 하류에서 음(negative)의 충돌 압력값을 가지고 있어 공급챔버 형상이 재순환 영역의 발생위치 및 형상에 영향이 있음을 알 수 있다. 재순환 영역의 직경 및 재순환 강도 특성은, 반경방향 충돌압력, 그림 8에서 알 수 있다. 그림의 횡축은 노즐 중심에서의 충돌압력을, 종축은 노즐중심축에서 반경방향으로의 거리를 노즐 출구 직경 D 로 무차원 한 거리를 나타내고 있다. 측정된 노즐 충돌압력이 음(negative)의 값을 가지는 영역이 유동이 재순환 되는 영역으로, 이 영역에서의 r/D_e 값은 재순환 영역의 반경을 의미한다. NPR=3.0 인 경우, S1-L 경우는 앞에서 서술한 것과 같이 재순환 영역을 가지고 있지 않으나, F0 및 S2 경우는 재순환 영역이 나타나고 있다. 그러나 S2 경우는 노즐 하류쪽으로 진행하면서 급속히 감소하여 x/D_e=2.0 에서는 재순환은 종료되고 있으나, F0 경우는 하류로 진행하면서 재순환 영역 직

경은 더욱 증가하고 하고 있음을 알 수 있다. NPR=7.0 인 경우 재순환 영역의 직경은 NPR=3.0 의 경우에 비하여 훨씬 크나 역 압력구배는 작은 것으로 보여 진다. 노즐 공급 챔버 내에 삽입되는 봉은(열전대) 스월 제트구조 특히 재순환 영역의 크기, 위치 및 재순환 강도에 크게 영향을 미침을 알 수 있다.

3.4 삽입된 원통형 봉의 위치에 따른 영향

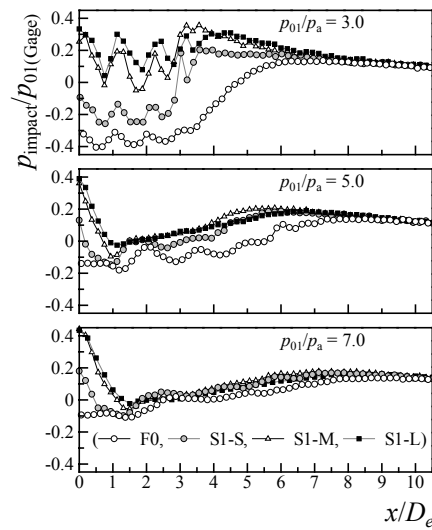


Fig.9 Impact pressure distributions

Fig.9 는 챔버에 삽입된 원통형 봉의 위치에 따른 충돌압력 분포 특성을 나타 낸 것이다. S1-L 의 경우는 원통 끝단부가 접선방향 유입구에 위치 하며, S1-M 과 S1-L 경우는 접선방향 유입구보다 하류에 위치한다. NPR=3.0 에서 S1-M 과 S1-L 경우는 재순환 영역을 가지지 않는 것으로 나타나고 압력비 및 봉의 위치에 따라 스월 제트구조가 큰 영향을 받는다는 것을 알 수 있다.

3.5 혼합 길이에 미치는 영향

Fig. 10 은 초음속 영역과 역류 영역으로 나뉘어진 초음속 스월유동장이 충분한 혼합이 이루어져 일정한 압력 단면을 가지는 위치까지의 노즐 출구로부터의 거리를 혼합길이라고 정의하여 노즐 출구 직경 D 로 무차원 한 값을 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 압력비가 증가할수록 혼합길이는 증가하고 노즐 챔버 형상에 영향을 받는것을 알 수 있다. S1-L 경우, F0 에 비하여 최대 약 42%, 최소 약 13% 감소하고 있다. 이러한 혼합영역의

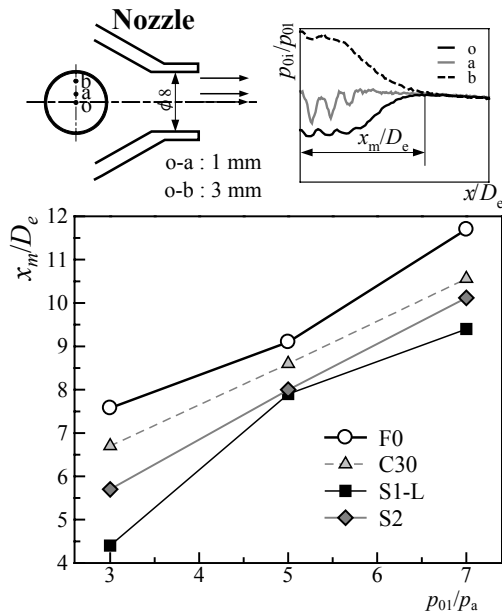


Fig.10 Mixing length of the swirling flow

위치는 연소에서 발생하는 화염의 길이 및 안정화에 중요한 변수로 작용하며, 노즐 챔버 형상을 이용하여 조절이 가능하다는 것을 보여 주고 있다.

4 결 론

본 연구는 노즐 공급 챔버 형상이 부족팽창 스윙제트 구조에 미치는 영향을 실험을 통하여 조사하였다. 이를 위하여 노즐 압력비 및 챔버 형상을 변화시키면서 슈리렌 광학법을 사용하여 유동장을 가시화하였고, 총돌압력 분포를 측정하였다. 그 결과, 노즐 챔버 형상은 부족팽창 스윙제트의 주요 특성, 즉 제트유동장 총돌 압력분포, 재순환 영역 거리 및 직경, 그리고 혼합거리등에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있었다. 초음속 노즐 및 접선 방향의 스윙 유동을 이용한 초음속 스윙 제트 특성 연구에서는 노즐내 열전대 및 정압공 설치에 특별한 주의를 해야하며, 노즐 챔버 형상을 이용하여 재순환 영역의 크기를 컨트롤 할 수 있음을 확인 하였다. 그러나 앞으로 노즐 챔버 형상이 스윙 유동특성에 미치는 메카니즘에 대한 상세한 연구가 필요하다.

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 flows," Combustion and Flame, Vol. 23, pp. 143-201.
- (4) Yu Y.K., Chen R.H, and Chew L., 1998, "A Screech Tone Noise and Mode Switching in Supersonic Swirling Jets," AIAA Journal, Vol. 36, No. 11, pp.1968-1974.
- (5) Rose W.G., 1962, "Swirling Round Turbulent Jet," Journal of Applied Mechanics, Vol. 29, pp. 616-625.
- (6) Chigier N.A. and Beer J.M., 1964, "Velocity and Static Pressure distributions in Swirling Air Jets Issuing from Annular and Divergent Nozzles," Journal of Basic Engineering, Vol. 86, pp. 788-798.
- (7) Kerr N.M. and Fraser D., 1965, "Swirl. Part 1 : Effect on Axisymmetrical Turbulent Jets,": Journal of the Institute of Fuel, Vol. 38, No. 299, pp. 519-526.
- (8) Carpenter P.W. and Johannesen N.H., 1974, "An Extension of One-Dimensional Theory to Inviscid Swirling Flow through Choked Nozzles," Aeronautical Quarterly, pp. 71- 87.
- (9) 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.
- (10) Dutton J.C., 1987, "Swirling Supersonic Nozzle Flow," J. Propulsion, Vol. 3, pp.342-349.
- (11) Culter A. D., Levey B.S., and Kraus D.K., 1995, "Near-Field Flow of Supersonic Swirling Jets," AIAA Journal, Vol. 33, No. 5, pp. 876-881.
- (12) 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.
- (13) Katanoda H., Miyajato Y., Masuda M., and Matsuo K., 2000, "Pitot Pressure of Correctly-Expanded and Underexpanded Free Jets form Axisymmetric Supersonic Nozzles," Shock Waves, Vol. 10, pp. 95-101.