

단일공급 스월 혼합챔버 내의 와류유동에 대한 실험적 연구

김형민* · 윤웅섭*

Experimental Investigation on the Vortical Flows in a Single-Entry Swirl Mixing Chamber

Hyungmin Kim* · Woongsup Yoon*

ABSTRACT

Swirling flows inside a swirl mixing chamber are investigated for simple configuration where swirl is produced by a tangential entry type swirl generator. The flow downstream of the swirl generator has been quantified by measurements two velocity components and their corresponding mean values along axial and radial direction using Particle Image Velocimetry(PIV). The mass flow rate of the tangential entry is increased in order to study their effect on the flow field. From the measurement profile of velocity and vorticity, flow mixing characteristics in a swirl mixing chamber are evaluated.

초 록

금속분말을 연소시키기 위한 스월 연소기 설계의 기초단계로써 단일 접선 공급유로를 갖는 스월 혼합챔버를 제작하고 Particle Image Velocimetry(PIV)를 사용하여 스월 혼합챔버의 내부 유동장 측정실험을 수행하였다. 상온의 공기를 작동유체로 사용하였으며 접선 공급유량이 증가하는 경우의 스월 혼합챔버 내 축방향 및 접선방향 성분 속도를 획득하였다. 측정된 유동장을 바탕으로 스월유동과 역압력구배로 인해 발생하는 외부 유입유동간의 혼합특성을 평가 하였다.

Key Words: Swirl flow (스월유동), Swirl generator (스월발생기), Vortical flow (와류유동), Recirculating flow (재순환유동), Entrainment(유입), Particle Image Velocimetry (PIV)

1. 서 론

스월유동이란 주방향 유동에 대하여 접선방향

의 운동량이 존재하는 경우의 유동을 의미하며 연료와 산화제의 혼합속도를 증가 시키거나 반응 속도를 제어하고 화염을 안정화 시키는 특성을 갖고 있다[1].

스월유동에 대한 특성은 Chigier et al.과 Gupta et al., Lilley 등이 스월유동의 정도를 나

* 연세대학교 기계공학과

† 교신저자, E-mail: wsyoon@yonsei.ac.kr

타내는 선회비의 증가에 따라 제트의 펼쳐짐, 폭, 성장, 감쇠, 그리고 유입 및 혼합에 대한 변화를 연구하였다[2-4]. 특히 0.6 이상의 높은 선회비에서 발생하는 노즐 출구의 재순환 유동이나 주변 대기의 유입 현상은 혼합성능의 향상과 화염의 길이를 감소시킨다는 연구 결과를 제시하였다[3].

이러한 특성 때문에 스윙유동은 이미 연료의 상태(기체, 액체, 고체상의 연료)에 관계없이 연소 시스템에 적용되고 있으며 특히 가스터빈, 자동차 엔진 그리고 전력생산을 위한 연소기 등에서 광범위 하게 사용되고 있다[5].

이처럼 광범위한 연소기에 사용되는 스윙유동은 근래에 들어 화석 연료 뿐만 아니라 대체 에너지로 사용하려는 금속 연료의 연소에 적용되고 있다[6].

금속 연료의 경우 석탄과 유사하게 유동층을 사용하여 연소실 내로 공급 하게 되는데 이때 중요한 점이 어떠한 유동 패턴을 사용하여 연소실내 연료와 산화제를 혼합할 것인가에 대한 문제이다[7].

따라서 본 연구에서는 금속 분말 연소기를 설계하는데 필요한 스윙 혼합챔버 내 유동혼합 특성의 이해를 위해 한 개의 접선 공급유로를 갖는 스윙 혼합챔버 형상을 결정하였으며 PIV를 통한 2차원 속도장 측정 실험을 진행하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 스윙 혼합챔버

스윙유동에 의한 유동혼합 특성을 측정하기 위한 스윙 혼합챔버의 형상과 기본적인 유동 패턴은 Fig. 1과 같다.

Figure 1의 (a)는 스윙 발생기상의 접선 공급유로의 배치를 나타내고 있으며 (b)는 스윙 혼합챔버의 전체 형상이다. 접선 공급유로를 제외한 스윙 혼합챔버의 내부 유로는 실린더 형태이며 직경이 51 mm, 길이는 200 mm이다. 스윙유동을 발생시키기 위한 구성품은 ①-스윙 발생기와 ②-접선 공급유로이며, ③은 PIV를 사용하여 유

동장을 측정하기 위한 두께 2 mm의 아크릴 관 로이다.

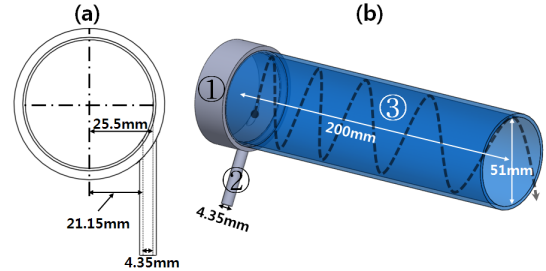


Fig. 1 Schematic of Swirl Mixing Chamber and Flow Pattern

Figure 1의 (b)에 나타낸 바와 같이 스윙 혼합챔버 내의 유동은 접선 공급유로를 통해 공급되는 기체가 스윙 발생기와 아크릴 실린더의 벽면을 타고 도는 나선형의 유동 패턴을 갖으며 유동장 측정 실험을 통해 확인한 결과 스윙 혼합챔버의 중심축에 대한 대칭성은 거의 없다.

2.2 스윙 혼합챔버 유동장 측정 장치(PIV)

Figure 2는 스윙 혼합챔버의 내부 유동장을 측정하기 위한 PIV 시스템을 나타내고 있다. 스윙 혼합챔버의 측정단면은 ①-챔버의 중심축에 평행한 직사각형 단면, ②-챔버의 중심축과 수직인 원형단면이다.

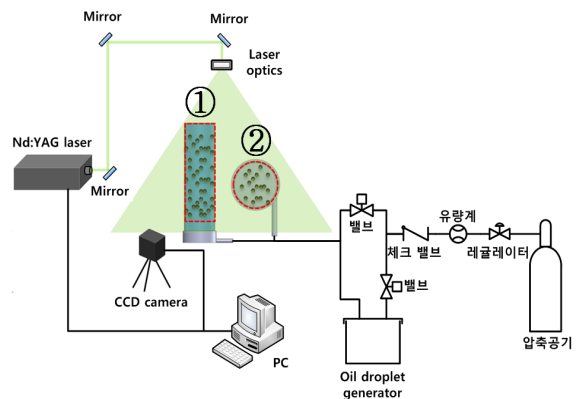


Fig. 2 Experimental Set-up: PIV

측정에 사용된 PIV 시스템의 구성품으로는 PowerView 4M Pixel CCD(2k×2k resolution)와 Nd:YAG laser(120mJ), laser와 CCD를 동기화 시켜주기 위한 Synchronizer, 그리고 각 구성품을 제어하기 위해 사용되는 PC가 있다. Laser 조사 시간 간격은 20 μ s로 설정 하였다. PIV 시스템을 구동, 제어하고 측정된 이미지에 대한 후처리를 위해 TSI사에서 제공하는 소프트웨어인 Insight 3G를 사용하였다.

속도벡터를 추출하는 방식은 두 장의 입자 분포 이미지에 대한 Cross-correlation을 계산하여 입자의 이동거리와 방향을 찾아낸 다음 시간으로 나누는 방법을 사용하였다[8].

2.3 실험 조건 및 방법

스월은 3차원의 복잡한 현상으로 스월유동으로 인한 유입, 혼합 그리고 와류 유동을 이해하기 위해 아래 Fig. 3의 (a)와 같이 스월 혼합챔버의 중심축에 평행한 단면을 ①~④처럼 45° 간격으로 회전하며 측정하였으며 스월유동의 정도를 알기 위해 Fig. 3의 (b)와 같은 중심축에 수직인 단면(a~f)에 대한 속도벡터를 측정하였다. Fig. 3의 (a)와 (b)에 표시한 점선의 사각형과 원은 PIV를 사용하여 속도벡터 측정영역을 나타낸다.

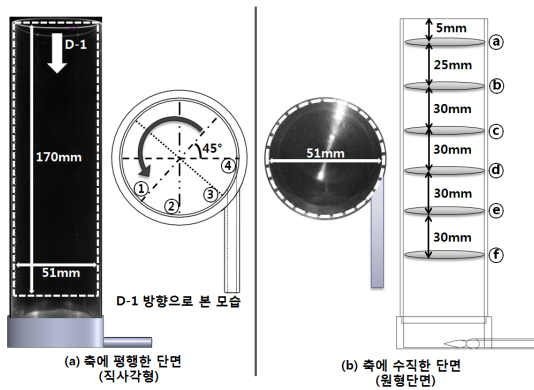


Fig. 3 Cross-section for the Velocity Measurement

스월 혼합챔버 내의 유동특성을 측정하기 위한 점선 유로의 공급유량과 PIV Seed, 이미지 측정 횟수는 아래 Table 1과 같으며 Fig. 3에 나

타낸 각 측정 단면에 대하여 Table 1의 조건을 적용하였다.

Table 1. Test Condition

작동 유체	상온 공기
PIV Seed	오일 액적(평균직경1 μ m)
공급유량	30LPM(0.000616,kg/s) 40LPM(0.000821,kg/s) 50LPM(0.001027,kg/s)
이미지 측정횟수	200

3. 실험결과 및 분석

3.1 스월 혼합챔버 내부유동

스월 혼합챔버 내부의 주(主) 유동은 Fig. 4에서 알 수 있듯이 스월 발생기에 의해 벽면을 타고 회전하면서 스월 혼합챔버의 출구로 배출되는 스월유동 이며 유동의 속도분포는 중심에서 스월 혼합챔버의 벽면으로 진행할수록 증가하게 된다.

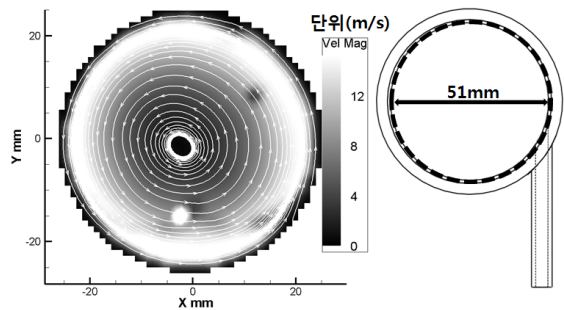


Fig. 4 Velocity Magnitude and Stream Line of the Circular Cross Section

스월유동이 발생되면 Fig. 5에 나타난 것과 같이 앞서 언급한 스월 혼합챔버 외부로부터 유입되는 유동과 스월유동과의 상호작용으로 인해 스월 챔버 내부에는 복잡한 유동장이 형성된다.

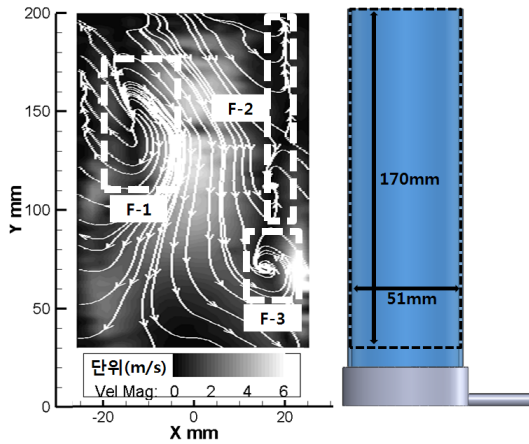


Fig. 5 Velocity Magnitude and Stream Line of the Rectangular Cross Section

Figure 5의 F-1, F-2, F-3의 유동은 외부로부터 유입되는 유동과 벽면을 타고 나선형태로 회전하는 유동간의 전단응력에 의해 발생하는데 외부로부터 유입되는 유동의 진행 방향에 영향을 미친다.

3.2 스윙 혼합챔버 내 위치에 따른 유동장

스윙 혼합챔버 내의 축방향 유동은 크게 벽면을 타고 회전하며 출구로 배출되는 유동과 외부에서 스윙 혼합챔버 내부로 유입되는 유동이 있다. Fig. 6은 이러한 두 가지 유동에 대한 속도 분포를 나타내고 있다.

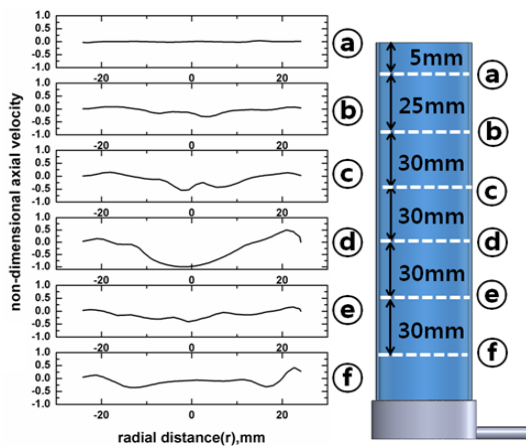


Fig. 6 Non-dimensional Axial Velocity

Figure 6에서 알 수 있듯이 스윙 혼합챔버의 출구에서 스윙 발생기 방향으로 진행 할수록 유입되는 유동의 속도는 증가한다. 그러나 ㉔를 지나면서 속도가 감소되는 경향이 있는데 이는 유동이 스윙 발생기의 바닥면을 만나면서 속도(동압)가 감소되고 정압이 증가하기 때문이다.

스윙 혼합챔버의 중심축에 대한 접선 속도는 Fig. 7과 같다. 이러한 속도 분포경향은 Steenbergen et al.의 연구에서 밝힌 wall jet의 형태이며 접선 방향의 유동이 가장 강한 스윙 발생기 방향으로 진행할수록 벽면근처의 접선속도가 증가한다[9].

특이한 점은 Fig. 6에서 스윙 혼합챔버로 유입되는 속도가 상대적으로 큰 지점인 ㉔와 ㉔지점의 접선 속도의 분포가 다른 지점과 차이가 있다는 것이다. 즉 Fig. 7에서 ㉔와 ㉔의 반경방향 -20 mm에서 20 mm지점의 속도 구배가 다른 지점의 속도구배와 다르다는 것이다. 이러한 현상이 나타나는 이유는 스윙 혼합챔버로 유입되는 되는 유동으로 인해 접선 성분의 유동이 스윙 혼합챔버의 중심으로 빨리 들어오기 때문으로 생각된다.

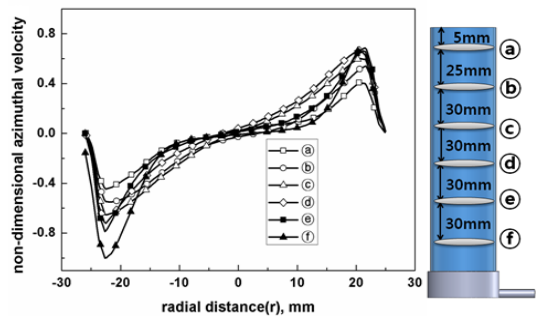


Fig. 7 Non-dimensional Azimuthal Velocity

3.3 접선 공급유량에 따른 유동장 변화

스윙 발생기에서 접선 공급유량이 증가한다는 것은 이 부분에서 발생하는 제트의 속도가 증가하는 것을 말하여 또한 스윙 발생기 근처의 정압의 감소를 의미한다. 이러한 현상은 스윙 혼합 챔버로 유입되는 유동의 속도를 증가시키는 원

인이 되며 Fig. 8의 ㉔ 지점에서 측정된 축방향 속도를 통해 정량적으로 알 수 있다. 즉, 접선 공급유량이 30 LPM에서 50 LPM으로 증가 할수록 스윙 혼합챔버의 중심축 근처의 유입 속도가 증가하기 때문이다.

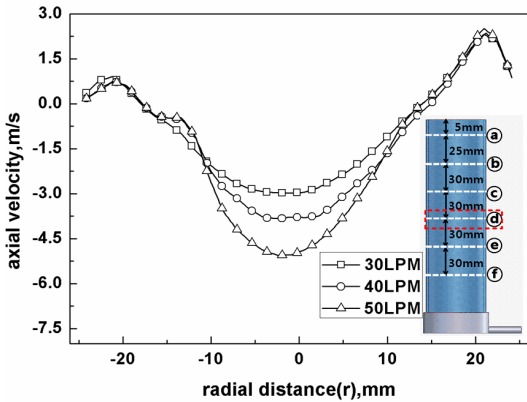


Fig. 8 Axial Velocity in accordance with Single-Entry Volumetric Flow Rate

Figure 9는 접선 공급유량 변화에 따른 ㉔ 지점에서 접선 속도성분을 나타내고 있으며 유량이 증가 할수록 속도 성분 역시 증가 하고 있다.

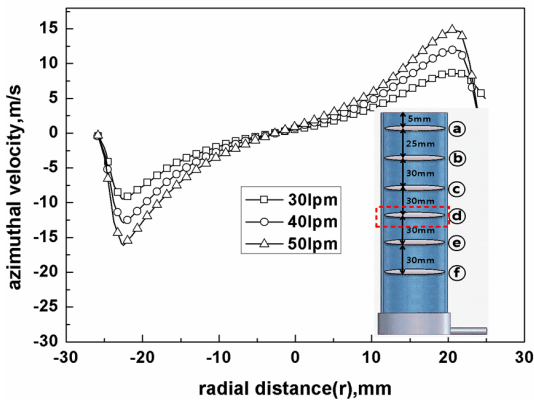


Fig. 9 Azimuthal Velocity in accordance with Single-Entry Volumetric Flow Rate

Figure 10은 접선 공급유량 50 LPM 조건에서 그림의 왼쪽 하단에 나타난 바와 같이 직사각형의 단면을 스윙 혼합챔버의 중심축을 기준으로

하여 45° 간격으로 회전하며 유동장을 측정한 결과이다. 그림을 통해 알 수 있듯이 스윙 혼합챔버로 유입되는 유동의 속도분포는 회전하며 측정된 단면에 따라 다르게 나타나는데 이는 스윙 유동에 의해 외부로부터 유입되는 유동이 나선형의 분포를 갖기 때문으로 생각된다. 또한 검은 색 화살표로 표시한 와류의 이동현상 역시 비슷한 원인 때문에 발생하는 현상으로 생각된다.

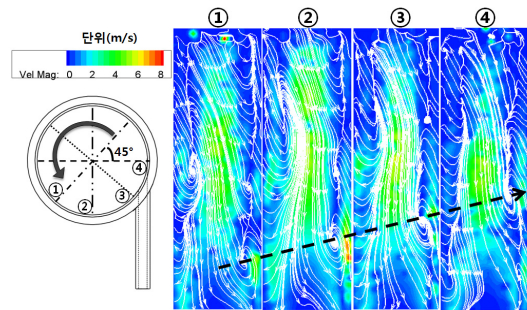


Fig. 10 Velocity Magnitude and Stream Line in accordance with Rectangular Plane

스윙 혼합챔버 내의 유동 혼합특성은 Fig. 11을 통해 알 수 있듯이 스윙 발생기에서 발생되어 출구로 진행되는 스윙유동과 외부로부터 유입되는 유동의 만나 전단유동이 발생하는 부분에서 와도가 가장 크게 나타난다.

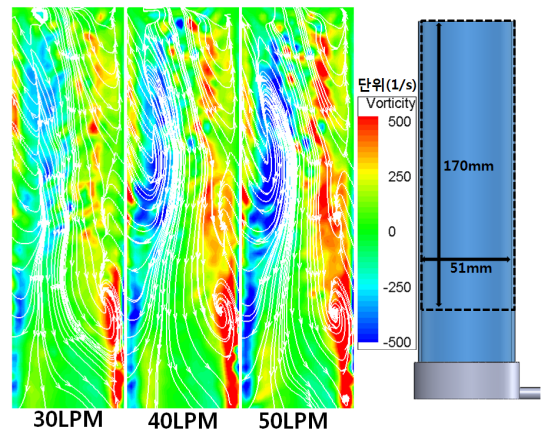


Fig. 11 Vorticity in accordance with Single-Entry Volumetric Flow Rate

또한 앞서 제시한 Fig. 8과 Fig. 9를 통해서도 언급했듯이 접선 공급유량의 증가 시 외부로부터 유입되는 유동과 접선 방향이 속도성분 역시 증가하는데 이러한 현상이 스월 혼합챔버 내의 와도를 증가시키는 원인이 된다.

본 연구를 통해 측정된 스월 혼합챔버 내의 스월 유동과 외부로부터 유입되는 유동 그리고 두 유동간의 전단응력에 의해 발생하는 와류유동의 혼합특성은 추후 금속분말과 액체 산화제의 혼합특성을 이해하는데 있어 기본적인 이해를 돕는데 기여할 것으로 기대된다.

4. 결 론

본 연구에서는 스월연소기를 설계하기에 앞서 스월유동에 의한 유동장과 혼합특성에 대한 이해를 높이기 위해 단일 공급유로를 갖는 스월 혼합챔버의 형상을 바탕으로 유동장 측정실험을 수행하였다.

실험을 통해 스월유동에 의해 발생하는 내부 유동장의 형태를 확인 하였으며 접선 공급유량 증가에 따른 축 방향 속도 성분과 접선방향 속도 성분의 변화 특성을 확인하였다.

스월유동에 의한 유동의 혼합특성은 스월 혼합챔버의 축방향 단면을 통해 확인하였으나 스월유동이 3차원의 복잡한 유동임을 감안하였을 때 추가적인 실험이 요구된다.

2차원 PIV 시스템을 사용하여 단일 접선유로를 갖는 스월 혼합챔버의 유동특성을 측정하였으며 스월유동의 특성과 이로 인해 발생하는 외부 유입 유동, 유동간의 상호작용에 의한 혼합특성을 평가 하였다.

5. 후 기

본 연구는 국방과학연구소의 지원으로 수행되었으며, 이에 대해 깊이 감사를 드립니다(계약번호 UD070027AD).

참 고 문 헌

1. 신현동, "선회유동과 난류", 자동차공학회지, 제9권 5호, 1987, pp.19-24
2. Chigier, N. A., Beer J. M., "Velocity and static pressure distributions in swirling air jets issuing from annular and divergent nozzles", Transactions of the ASME, J Basic Eng 86, 1964, pp.788-796
3. Gupta, A. K., Lilley D. G., Syred N. "Swirl flows", Abacuss Press, London
4. Lilley, D. G., "Swirl flows in combustion: a review", AIAA Journal Vol. 15, No. 8, 1976, pp.1063-1078
5. Syred, N., "A review of oscillation mechanisms and the role of the precessing vortex core (PVC) in swirl combustion systems", Progress in Energy and Combustion Science 32, 2006, pp.93-161
6. KO Taeho, LEE Sanghyup, KIM Hyungmin, KIM Sangmin, HAN Ho and YOON Woongsup, "Experimental Study for Flame Formation in the Magnesium Powder-Steam Swirl Combustor", IASPEP, 2011, pp.564-568
7. 고태호, 김형민, 이도형, 윤용섭, "금속분말 연소기를 위한 핀틀인젝터형 연료 공급 장치의 입자 분사량 측정" 한국추진공학회 추계 학술대회, 2010, pp.405-409
8. Raffel, M., Willert, C. and Kompenhans, J., Particle Image Velocimetry: A Practical Guide, 3rd ed., Springer., 1998
9. Steenbergen, W., and Voskamp, J., "Rate of decay of swirl in turbulent pipe flow", Flow Measurement and Instrumentation, Vol. 9, No. 2, pp. 67-78.