

PSP를 적용한 스크램제트 연소기 내부의 cavity 크기 변화에 따른 혼합특성에 관한 연구

정 희* · 서형석* · 최원혁* · 변영환** · 이재우*

The Study of Mixing Characteristics for the cavity sizes in SCRamjet Combustor using PSP

Hui Jeong* · Hyungseok Seo* · Wonhyeok Choi* · Yunghwan Byun** · Jaewoo Lee*

ABSTRACT

The PSP(Pressure Sensitive Paint) is a technique to measure continuous pressure distribution on medel surface by oxygen quenching. The objective of this study is to apply PSP which is measured pressure for analyzing that air-fuel mixing characteristics in SCRamjet combustor. Experimentation is performed at freestream Mach number of 2.5 and used fuel jet injection. The result shows that growing air-fuel mixed proportions by increasing in cavity size. Also, PSP results compared with conventional pressure tap and CFD. They are coincided with qualitative and the inclination.

초 록

PSP는 산소퀀칭원리에 의해 모델표면의 전역적 압력정보를 측정할 수 있는 기법이다. 본 연구는 자유류 마하수 2.5에서 수직 제트 분사와 Cavity를 이용한 스크램제트의 연소실 내부에서의 공기와 연료의 혼합 특성을 알아보기 위해 PSP를 사용하여 표면압력을 측정하였다. 그 결과 Cavity의 크기가 커질수록 공기-연료의 혼합정도가 커지는 것을 알 수 있었다.. 또한 CFD와 압력공을 이용하여 측정 압력 값을 비교하였다. 그 결과 충격파의 형태 및 전단경계층의 두께 변화 등의 정성적 결과가 모두 일치하였으며, 압력측정 결과 약간의 오차는 발생하였으나 3D Bow Shock이 위치한 지점에서의 압력 및 Vorticity가 크게 나타나는 경향성이 모두 일치하였다.

Key Words: Pressure Sensitive Paint(감압도료), Mixing Characteristics(혼합특성), Cavity(공동), SCRamjet(스크램제트)

* 건국대학교 항공우주정보시스템공학과

** 건국대학교 항공우주정보시스템공학과

연락처, E-mail: yhbyun@konkuk.ac.kr

1. 서 론

공기역학적 실험 연구에 있어서 모델 표면에

서의 압력은 유동현상을 분석 및 비행체의 성능 및 설계에 있어서 중요한 요소이다. 일반적으로 사용되는 압력 측정 방법으로는 압력 탭 (Pressure taps)을 이용하거나 압력 변환기 (Pressure transducer)를 이용하여 측정하는 방법이 있다. 이 방법들은 표면에서의 압력을 정확히 측정할 수는 있지만 압력 탭을 가공해야하는 광범위한 설계시간 및 비용, 제한된 공간 분해능 (spatial resolution)등의 단점을 가지고 있다. 이를 보완하기 위해 대두된 측정방법이 바로 PSP(Pressure sensitive paint)이다. 다른 압력 측정 장비가 필요 없이 일정공간상에서의 연속적인 압력분포를 측정할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 모델표면에 도포된 페인트의 두께와 농도가 일정하지 않으며, 온도 및 시간이 경과함에 따라 그 밝기가 변화하는 PSP는 압력 데이터값에 여러 요인으로 작용한다. 이에 PSP실험에서 페인트 검정 (paint calibration)은 매우 중요하다.

대표적인 PSP 검정 방법으로는 In-situ calibration, A priori calibration이 있다. In-Situ 방법은 풍동이 가동되는 동안 압력 탭의 값과 탭 주위의 발광강도를 대응시키는 방법이고, A priori 방법은 압력과 온도가 조절 가능한 챔버 내부에서 검정하는 방법이다.

본 연구에서는 In-situ, A priori 검정 방법을 Cavity와 수직 제트 분사 (Vertical Jet Injection) 실험 및 이미 수행된 CFD 결과[1,2]에 적용하여 PSP의 정확성 및 유동장의 특성을 확인하고자 한다.

2. 배경 이론

2.1 광물리학적 원리

PSP 기법은 발광분자가 빛의 흡수를 통한 산소와의 광화학적 반응인 산소 퀸칭(Oxygen Quenching)에 기초를 두고 있다. Fig. 1은 발광분자의 발광 과정과 산소 퀸칭이 발생하는 과정을 보여준다. PSP의 발광분자는 짧은 파장의 특정 빛을 흡수하면 에너지 준위 상태가 바뀌어 여기상태(excited state)가 된다. 이때, 이 분자에

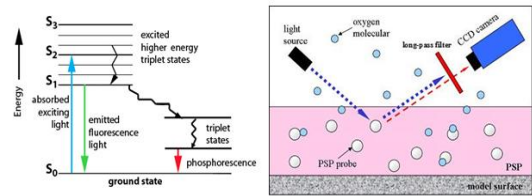


Fig. 1 Basic Photophysics of Oxygen Quenching[3]

게 아무런 현상도 가하지 않는다면 긴 파장의 광자를 방출하면서 기저상태(ground state)로 돌아가게 된다. 그러나 이때, 여기상태의 발광분자가 산소분자와 충돌하게 되면 산소분자가 발광분자의 에너지를 흡수하게 되어 발광분자는 광자를 방출하지 않고도 기저상태로 돌아가게 된다. 이를 산소 퀸칭이라고 한다.

산소 퀸칭 과정은 산소 농도에 따라 발생비율이 다르기 때문에 방출되는 발광강도도 변하게 된다. 즉, 이 과정동안 발생하는 발광강도를 측정하게 되면 압력과 빛의 강도의 관계를 표현한 Stern-Volmer 식을 통해 측정하고자 하는 압력을 얻을 수 있다.

$$\frac{I_{ref}}{I} = A(T) + B(T) \frac{P}{P_{ref}}$$

여기서 I_{ref} 와 P_{ref} 는 유동이 없는(wind-off)상태일 때의 발광강도와 압력을 의미하며, A와 B는 검정 방법으로 구해지는 보정 값이다.

2.2 검정 방법(Calibration Method)

2.2.1 In-situ 검정

In situ 검정은 모델 표면에 압력 탭을 설치하여 탭 주위의 발광강도와 압력 탭의 값을 대응시켜 스텐-볼머 상수 A, B를 구하는 방법이다. 풍동이 가동되는 동안 압력 값을 측정하기 때문에 온도 보상을 하지 않아도 되지만, 표면은 등온이라는 가정 하에 실험하므로 온도 차이가 심하지 않은 실험에서 행한다.

압력 탭의 위치는 CFD로 계산된 결과를 기초로 압력의 최대, 최소점에 설치하고 그 주변에 몇 개의 압력 탭을 더 설치한다.

2.2.2 A priori 검증

A priori 검증은 PSP 실험 모델과 동일한 Paint를 일정한 크기의 시편에 도포하고 이를 외부에서 압력과 온도를 컨트롤 할 수 있고, 광원을 시편에 직접적으로 조사시킬 수 있는 챔버내에 위치시킨다. 챔버내의 압력과 온도를 일정하게 고정시키고, CCD 카메라로 발광정도를 촬영하여 일정한 온도와 압력을 가지고 있는 공간에서의 발광정도를 교정하게 된다.

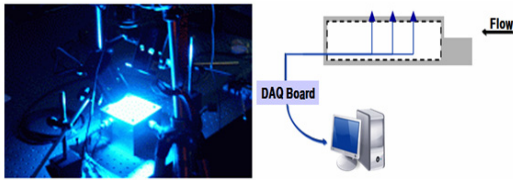


Fig. 2 Schematic of A Priori/In-Situ Calibration setup

3. 실험

3.1 초음속 풍동

건국대학교 교육용 초음속 풍동은 Blowdown 형태로 $M=2.5$ 의 유속을 낼 수 있다. Test Section은 $30(W) \times 35.6(H)$ mm이고, 유동장의 압력과 온도는 약 $P=0.2\text{MPa}$, $T=129\text{K}$ 이다.

3.2 실험 모델

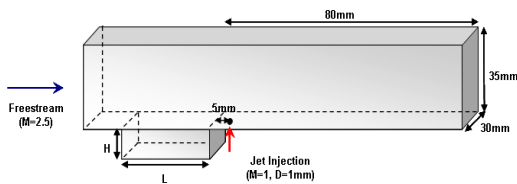


Fig. 3 Geometry of experiment model

본 연구에서는 Table 1과 같이 Cavity의 길이/높이비는 1로 고정하여 총 3가지의 크기를 고려하였다. 단일 분사되는 제트 분사구의 지름은 1mm이고 3가지 모두 Cavity의 뒷부분 5mm 지점에 위치하였다. 또한 Cavity에 의한 혼합효과를 비교하기 위해 Cavity가 없는 경우도 추가

해석하여 총 4가지 경우에 대한 실험을 수행하였다.

Table 1. Cavity Size(Unit : mm)

Case	Length	Height	L/H
1(No Cavity)	0	0	0
2	10	10	1
3	20	20	1
4	30	30	1

4. 실험 결과

4.1 Shadow Graph 가시화

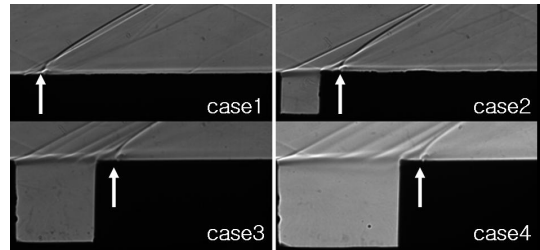


Fig. 4 Shadow graph image of cavity

Figure 4는 shadow graph 가시화 기법을 이용한 cavity 크기에 따른 그림으로 흰색 화살표를 이용하여 jet이 분사되는 곳을 표시하였다.

Cavity의 크기가 커질수록 앞전과 뒷전에서 발생하는 충격파의 크기가 증가하는 것을 볼 수 있다. 또한, 연소기와 cavity 사이에서 발생하는 전단경계층 및 Jet 분사구 이후에 연소기 바닥 부근에서 발생하는 전단경계층의 두께 역시 증가함을 알 수 있다.

4.2 PSP 압력 측정

Figure 5는 PSP와 이미 수행된 전산수치해석 [1]의 정성적인 결과를 비교한 그림이다. Cavity가 커질수록 Horseshoe Vortex는 커지고 3D Bow Shock, Recirculation Zone은 작아지는 것을 확인할 수 있다. 또한, Jet 분사구 앞의 3DBow Shock에 의하여 압력이 급격히 상승하고 이후에는 Vortex Structure에 의하여 압력이 하강하는 것을 볼 수 있다.

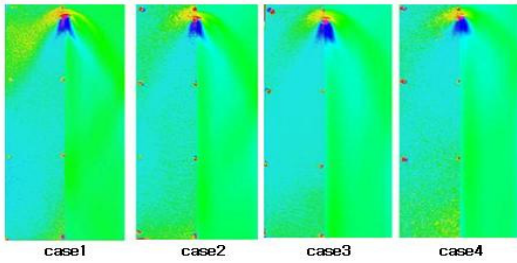


Fig. 5 Comparison of Pressure Distributions.
Left: PSP, Right: CFD

PSP의 압력측정 결과를 검증하기 위하여 Jet 분사구를 중심으로 center line의 압력탭, 전산수치해석, PSP 압력값을 Fig.6~9에서 비교하였다. 압력탭의 데이터는 jet분사구 이후의 center line의 세 점에서의 압력을 이용하였고, PSP의 결과는 In-Situ, A Priori 검정 방법 모두 10개의 이미지에서 얻은 압력을 평균하였다.

전체적으로 네 가지 Case 모두 Jet 분사구 ($x/D=5$) 이후 압력이 급증 하였다가 이후 급감 하였다가 후류로 내려갈수록 일정한 값을 유지하는 경향을 나타내었다. In-Situ 검정방법으로 얻은 압력값은 jet분사구를 전후로 발생하는 압력의 정확도는 차이가 났지만, 이후 압력탭, 전산수치해석 결과와 일치하는 것을 볼 수 있었다. 이는 압력탭의 부족으로 인해 오차가 발생한 것으로 볼 수 있다. 또한, A priori 검정방법으로 얻은 PSP 압력값은 전체적으로 오차가 크게 발생하였다. 이는 PSP 실험과정에서 발생한 여러 가지 error 요인이 원인이다. 온도에 민감한 PSP 실험에서 온도변화를 고려하지 않은 paint calibration, filtering으로 인한 데이터 손실, 광원의 부족으로 인한 불균일한 빛의 조사 등의 오

차의 원인을 해결한다면 좀 더 정확한 실험값을 얻을 것으로 기대한다.

5. 결론 및 향후 계획

Cavity의 L/H를 1로 고정 한 후, Cavity의 크기만을 변화하여 PSP를 적용하여 In-Situ, A priori 검정방법의 정확도를 비교해보았다. In-Situ와 A Priori 검정방법 모두 Jet 분사구 이후 압력이 급증하였다가 후류로 갈수록 일정한 값을 가지게 되는 정상적인 결과는 일치하였다. 그러나 압력탭을 이용한 In-Situ검정방법이 A Priori 검정방법에 비해 좀 더 정확한 값을 얻을 수 있었다. PSP 압력측정 기술은 광학적인 이미지를 이용한 실험이기 때문에 기본적인 데이터 획득 및 손실을 최소화 하는 것이 가장 중요하다. 현재는 PSP 실험에서 발생하는 error 요인을 제거, 정확도를 향상시키기 위한 연구를 진행 중이다.

참고 문헌

1. 서형석, 스크램제트 연소기 내부의 Cavity 크기 변화에 따른 혼합특성에 관한 연구, 건국대학교 석사학위논문, 2008
2. 서형석, 전영진, 변영환, 이재우, "3차원 Cavity 크기 변화에 의한 공기-연료혼합특성의 수치적 해석 연구", 한국추진공학회 추계 학술대회, 2007
3. 김기수, PSP 압력측정 시스템의 구축과 적용, 건국대학교 석사학위논문, 2007

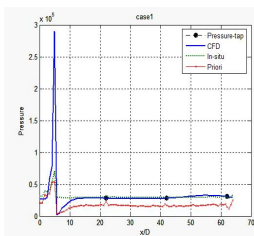


Fig. 6 Pressure(Case1)

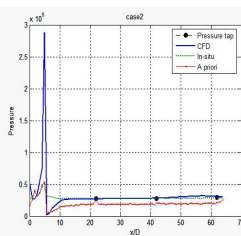


Fig. 7 Pressure(Case2)

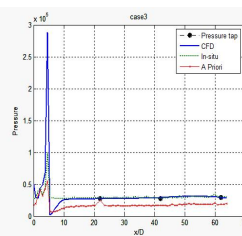


Fig. 8 Pressure(Case3)

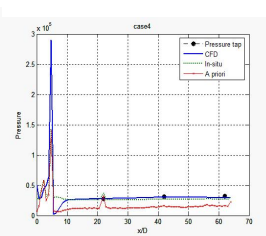


Fig. 9 Pressure(Case4)