

# 공동 내부로의 평행분사방법을 이용한 초음속 연소의 실험적 연구

정은주\* · 정인석\* · Sean O'Byrne\*\* · A.F.P Houwing\*\*\*

## Experimental Study on Supersonic Combustion with Parallel Fuel Injection Method in the Cavity

Eunju Jeong, In-Seuck Jeung, Sean O'Byrne and A.F.P Houwing

### ABSTRACT

The supersonic combustion experiments are carried out using T3 free-piston shock tunnel. Hydrogen Fuel is injected in the cavity parallel with air(or nitrogen) flow. The equivalence ratios in this study are 0.132 and 0.447. Experimental measurements use OH-PLIF near the cavity and pressures in the combustor. For parallel fuel injection case, direct fuel add into cavity leads to increase of cavity pressure. And Flame exists just near the bottom wall for low equivalent ratio. There is no flame in the cavity because of no mixing in it. Compared to the inclined fuel injection, ignition delay length is longer for low equivalence ratio in both case. OH distribution is not a single line but a repeatable fluctuation flame structure by turbulence. Pressure distributions have nothing to do with the fuel injection position.

**Key Words** : Supersonic Combustion, Cavity, Parallel Fuel Injection, OH-PLIF

### 1. 서 론

초음속 유동장내에서의 공동(cavity)은 스크램 제트 엔진 내에서 화염 안정화부와 연료/공기 혼합 증진과 초음속 노즐과 제트 유동의 제어를 위해 다년간 연구되어왔다. 공동을 포함하는 초음속 연소 유동장 내에서의 적절한 연료분사 위치는 공동이 연료/공기 혼합 증진과 더불어 점화기, 보염기 역할까지 할 수 있게 한다[1-3]. 호주 국립대학교와 호주국방대학에서 공동을 지니는 모델 스크램제트 엔진에 관한 실험을 수행하였는데, 여기서 사용된 연료 분사 방식은 Fig. 1에 제시한 바와 같이 공동 내부의 벽면에서 유동의 역방향으로 연료를 분사하는 것이었다[4-5]. 이 연하는 충격파에 따라 화염이 구에서, 연료 분사

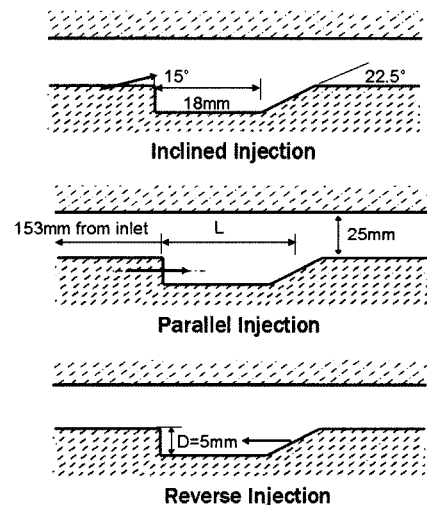


Fig. 1 Fuel Injection Position with the cavity

\* 서울대학교 항공우주공학과

† 연락처, newaerol@snu.ac.kr

\*\* Australian Defence Force Academy, Australia

\*\*\* Australian National University, Australia

Table 1 Shock Tube and Nozzle Stagnation Properties

Shock Tube Fill Pres. [kPa]	Primary Shock Vel. [km/s]	$h_0$ [MJ/kg]	$P_0$ [MPa]	$T_0$ [K]
50	$2.57 \pm 0.03$	$6.45 \pm 0.14$	$15.7 \pm 0.68$	$4422 \pm 64$

Table 2 Freestream Conditions of Combustor Inlet

$h_0$ [MJ/kg]	$P_\infty$ [kPa]	$T_\infty$ [K]	$\rho_\infty$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$u_\infty$ [m/s]	$M_\infty$
6.45	$111 \pm 7$	$1667 \pm 55$	$0.23 \pm 0.009$	$2952 \pm 28$	$3.71 \pm 0.03$

Table 3 Fuel Injection Conditions

Ludwig Tube Fill P. [kPa]	900	2500
Fuel Plenum Pres. [kPa]	$631 \pm 21$	$1906 \pm 33$
Fuel Injection Pres. [kPa]	$333 \pm 11$	$1005 \pm 18$
$h_0$ [MJ/kg]	Equivalence ratio	
6.45	$0.132 \pm 0.009$	$0.447 \pm 0.034$

위치로 인해 공동위에서 발생점화되는 위치가 결정되었다. 또한 연료가 공동 내부를 채우게 되므로 공동 내부에서 연료와 공기가 혼합될 가능성이 희박했다. 이후 서울대학교와 호주국립대학교의 공동 연구로 진행된 스크램제트 연소기 연구 [6] 중 일부인 공동 상류에서 연료가 분사되는 모델 스크램제트 엔진 실험의 경우 공동 이전에서 경사 분사된 연료가 공기와 혼합되고 공동 내부로 흘러 들어가게 되므로, 공동이 보염기로서의 역할을 하고 있음을 확인할 수 있었으나, 여전히 연료 분사가 유입유동을 방해하고 있다. 따라서 본 연구에서는 공동 내부에서 연료를 공기 유동의 진행방향으로 분사함으로써 연소특성을 보고자 한다. 또한 이 실험결과를 동일한 유동조건인 경사분사의 실험결과와 비교하고, 그 차이를 살펴보고자 한다.

## 2. 실험방법

### 2.1 초음속 연소기 설명

본 연구에 사용된 초음속 연소기는 길이 500 mm, 폭 52 mm, 높이 25 mm를 가지는 사각형 덕트이다. 덕트의 입구로부터 152.5 mm 지점의 하류에 위치한 공동은 깊이가 5 mm이며, 22.5°의 경사각을 가지고 있다(Fig. 2). 이 공동의 가로세로비는 4.8이며, 개방형 공동이다[1]. 시험부의 위와 옆면에 PLIF 시스템의 가시화를 위해

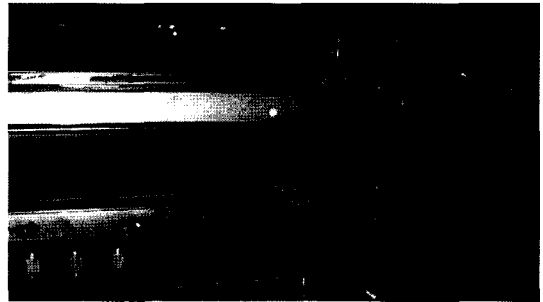


Fig. 2 Supersonic Combustor Model

UV 용융-실리카 가시화 창을 장착하였다[5].

연료 분사 시스템으로는 Ludwig 튜브를 사용하였다. 본 실험에서는 이 튜브에 상온과 초기 설정 압력의 수소 기체를 채우는데, 이 때 초기 연료 압력은 시험 시간 동안 연소실 내의 전체적 당량비를 결정하게 된다. 수소 연료는 시험 기체가 덕트 내로 유입되기 약 50 ms 전에 분사되며, 연료 분사의 지속시간은 연소기 내 시험기체의 지속시간보다 훨씬 더 길다. 따라서 시험 시간동안 연료의 질유량은 전반적으로 일정하다.

연소기 내의 압력을 측정하기 위해서 총 16개의 PCB 社의 압력 센서를 사용하였다. 자유류의 압력을 측정하기 위해 덕트 입구로부터 70 mm 지점에, 공동 내부의 압력을 측정하기 위해 공동 전단으로부터 17.5 mm 지점에 압력 센서를 설치

하였다. 또한, 덕트 입구로부터 203 mm 부터 20 mm 간격으로 덕트 내 중심선을 따라 압력 센서를 설치하였다.

### 2.2 T3 자유-피스톤 충격파 터널과 유동 조건

본 실험은 호주국립대학의 T3 자유-피스톤 충격파 터널에서 수행되었다. 연속적인 형태의 풍동 장비와는 달리 펄스 형태의 장치이므로, 실험 시간은 shock tube의 부피와 노즐로부터의 질유량에 의해 결정된다. 본 실험장치의 경우 일정한 압력의 시험 시간은 노즐 정체실의 전 엔탈피에 따라 다르지만, 일반적으로 0.5 ms 와 2 ms 사이이다. 충격파의 속도와 노즐 정체실 압력은 PCB 사의 압력센서를 이용하여 측정하였으며, 이 값들은 노즐의 출구 조건을 위해 사용되는 ESTC (Equilibrium Shock Tunnel Code)[7]와 STUBE nozzle code의 입력값으로 이용된다. 따라서 이들을 이용하여 계산된 자유류 조건들을 Table 1, 2에 제시하였다. 또한 연료 분사 압력에 따른 당량비 값을 Table 3에 제시하였다. 유입 유동에 대한 자세한 내용은 참고문헌 6에 나타내었다.

수산화(OH)기는 고온 화학반응 중 나타나는 중간 생성물로서 연소가 발생하는 영역에서는 일종의 지표로서 사용된다[8]. 따라서, 화염면을 측정하기 위해 Fig. 3와 같은 OH-PLIF 시스템을 구축하였다. OH-PLIF을 위해서 주파수 배가 (frequency doubled, 532nm) Nd:YAG laser를 사용하여 rhodamine 590과 rhodamine 610의 혼합물을 이용한 색소 레이저를 여기 시키는데, 이 색소 레이저는 560 nm 와 570 nm 사이에서 작동하게 된다. 이 색소 레이저로부터 나온 빛은 280 nm 와 285 nm 사이의 파장대로 주파수 배가 되고, 이 빛은 원추형 렌즈와 구형 렌즈의 조합을 이용하여 sheet의 형태로 변형되어, 덕트

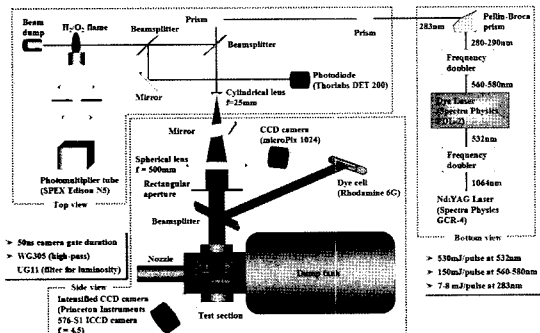


Fig. 3 OH-PLIF System

내로 통과하게 된다. 이 레이저 평면은 연료 분사구 위에 위치하도록 설치하였으며 연료 분사구 직전에서 레이저 평면의 위치가 시작되도록 설치하였다.

OH-PLIF 신호는 ICCD 카메라를 통해서 받아들여진다. 발광성(luminosity)을 제거하기 위하여 게이트(gate) 시간은 50 ns로 설정하였고, 레이저 산란과 광대역의 유동 발광성의 영향을 줄이기 위해 카메라의 렌즈 이전에 WG305와 UG11 필터를 장착하였다[5].

## 3. 결과 및 분석

### 3.1 평행분사

Fig. 4과 5는 공동 근처에서의 초음속 화염을 촬영한 OH-PLIF 결과 사진이다. Laser sheet이 통과하는 부분과 그렇지 않은 부분의 이미지 차이가 확연하게 나타나므로, 본 실험에서 laser를 알 수 있다.

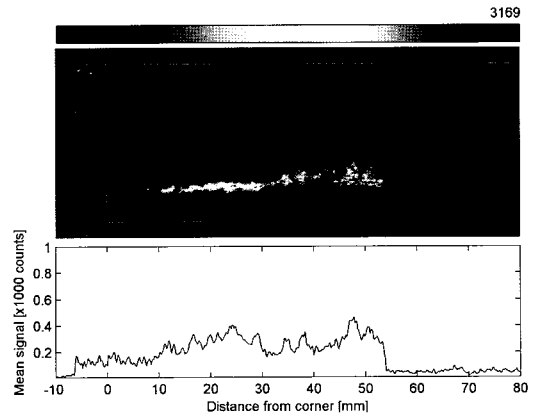


Fig. 4 OH-PLIF Image for  $\phi=0.132$

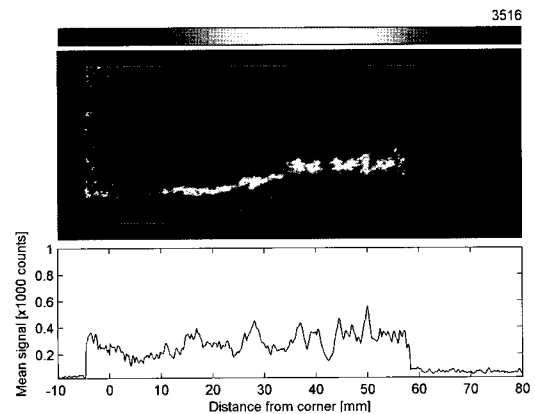


Fig. 5 OH-PLIF Image for  $\phi=0.447$

공동 주위의 화염 형상에 대해 화염이 연소기 내부에서 넓게 분포하지 못하고, 연소기 바닥면에서 이루어지고 있음을 확인할 수 있다. 반면, 높은 당량비에서는 공동의 뒷전부근에서 화염이 공동 뒷전의 형상과 같이 기울어져 나타나는 것을 알 수 있는데, 이는 연료층이 공동의 형상을 타고 후류로 이동하고 있음을 알 수 있다. 또한 공동을 지난 후에는 화염의 평균 높이가 높은 당량비에는 그 위치가 낮은 당량비에 비해 2배 정도 높은 곳에서 형성되고 있는데, 이는 증가된 연료량으로 인해 연료가 연소기 바닥면에서 연료층을 이루고 있다는 것을 알 수 있다. 낮은 당량비의 경우, 강한 OH 신호가 공동의 앞전으로부터 약 10 mm 이후 부분부터 나타나기 시작하는데 비해, 높은 당량비에서는 공동의 앞전 이전에서도 약하게나마 나타나는 것으로 보아, 낮은 당량비에서는 높은 당량비에 비해 점화 지연이 더 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 뿐만 아니라 이는 높은 당량비에서는 연료가 공동의 앞전 이전의 경계층 영역에 존재할 가능성을 나타내고 있다.

강한 OH기 신호가 하나의 띠로 이루어지는 것이 아니라, 연소기 길이 방향으로 주기적으로 나타나고 있으며, 또한 당량비가 증가함에 따라 그 경향성을 뚜렷이 나타내고 있다.

두 당량비 모두 공동 내부에서는 OH signal이 거의 나타나지 않는데, 이는 공동 내부에서 화염이 형성되고 있지 않음을 나타낸다. 이는 본 실험의 경우 공기가 연소기 내부로 들어오기 약 30 ms 전부터 연료가 분사되므로, 공동 내부가 대부분 수소 연료로 채워지게 된다. 그 결과 공기와의 혼합이 제대로 이루어질 가능성이 적고, 따라서 공동 내부에서 화염이 발생하지 않게 된다.

평행분사에 대한 덕트 내 압력분포를 비연료 분사, 비화학 반응, 화학 반응의 경우에 대해서 Fig. 6에 제시하였다. 비연료 분사의 경우, 공동 내 압력이 공동 이전의 자유류 압력보다 낮음을 알 수 있는데, 이는 공동의 앞전에서 발생한 팽창파가 공동 내의 압력을 감소시키기 때문이다. 또한 공동 이후 약 100 mm까지의 압력도 공동 뒷전에서 발생하는 유동의 팽창으로 인해 자유류의 압력보다 낮음을 확인할 수 있다. 연소기 입구로부터 약 290 mm 되는 지점에서 높은 압력이 나타나는 이유는 공동 내부에서 발생한 경사 충격파가 덕트의 상단에 반사되고 다시 하단에 반사되면서 높은 압력이 형성된 것이다. 이후 연소기의 후반부로 가면서 충격파를 지나면서 압력 상승이 일어나고 따라서 연소기 내 압력 분포가 점차 증가한다. Fig. 6의 그래프에서  $\phi=0.132$  비화학 반응의 경우, 공동을 제외하고는, 연소기 내 압력분포가 연료를 분사하지 않았을 때의 압력

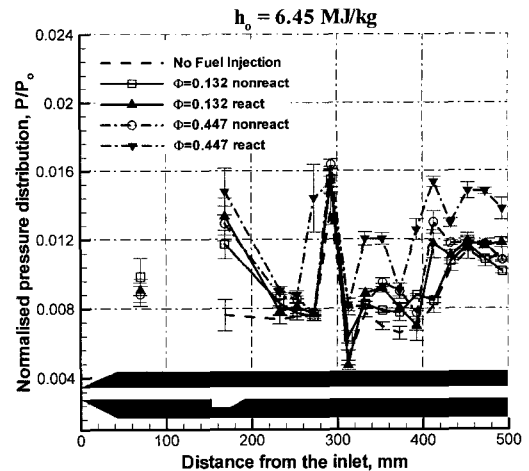


Fig. 6 Pressure Distribution in the Combustor for Parallel Fuel Injection

분포와 거의 일치하였다. 공동 내 압력이 연료를 분사하지 않았을 경우에 비해 그 값이 증가한 이유는, 본 실험의 경우 공동 내부로 연료를 직접 분사시켜 공동 내 질량을 증가시켰기 때문이다.

비화학반응에서 낮은 당량비에서는 덕트 내로 유입되는 연료 질류량이 연료 분사가 없을 때와 비교해보아 공동이후 연소기 내 정압력을 크게 변화시키지 못한다는 것을 알 수 있다. 그러나 연료 분사 압력을 증가시켜 연소기 내 당량비를 증가시키면 연소기 내 압력분포가 증가함을 확인할 수 있다. 또한 비화학 반응임에도 불구하고 공동 내부의 압력은 낮은 당량비에 비해 증가되었다.

화학 반응의 경우 낮은 당량비에서의 압력분포는 높은 당량비의 비화학 반응의 분포와 유사하게 형성되었다. 따라서 낮은 당량비에서는 덕트 내 압력을 상승시킬 만큼의 연소 압력이 형성되지 않을 것이라 유추해 볼 수 있다. 낮은 당량비와는 달리 높은 당량비에서는 연소기 내에서 화염이 발생함에 따라 압력이 크게 상승함을 확인할 수 있으며, 특히 이러한 현상은 연소기 입구 300 mm 이후에서 압력이 크게 상승함을 알 수 있다. 따라서 연소기 후방으로 갈수록 연료와 공기의 혼합이 증가되고, 더불어 300 mm 부근에서 발생하는 충격파의 반사가 연소를 상승시키고 있음을 알 수 있다. 연소기 내 연소 발생 여부 및 당량비에 상관없이 그 압력 분포는 서로 유사함을 알 수 있는데, 이는 연소기내 압력 분포를 형성하는 주요한 영향은 연료의 양이 아닌 공동의 형상이라고 생각할 수 있다.

### 3.2 경사분사와의 비교

동일한 유입 유동 조건에 대해 연료분사의 위치가 다른 경우에 나타나게 되는 화염의 특성을 살펴보기 위해, 공동 상류에서 15° 경사 각도로 연료가 분사되는 경우[6]와 공동 내부로 평행하게 연료가 분사되는 경우에 대해 공동 부근의 화염 형상과 연소기 내 압력분포를 비교해 보았다.

### 3.2.1 공동주위 화염특성 비교

Fig. 7은 경사분사와 평행분사에 대한 공동 주위 OH-PLIF 사진이다.

두 연료분사 방법 모두, 낮은 당량비에서는 점화 지연 길이가 높은 당량비에 비해 상대적으로 길어지게 되고, 따라서 연료분사 위치에서 후류로 떨어진 지점에서 화염이 발생하기 시작하였다.(Fig. 7 (a), (c)) 또한, 공동 이후에서는 발생하는 화염의 높이는 두 연료분사 방법 모두 서로 동일한 당량비에서는 그 값이 서로 유사함을 알 수 있다.

그러나 경사분사와 평행분사의 가장 큰 차이점은 공동 내부에서 화염의 유무라고 말할 수 있다. 즉, 경사분사에서는 당량비에 관계없이 공동 내부에서 비록 OH기의 신호가 약하다 하더라도 신호를 확인할 수 있으므로, 공동 내부에서 화염이 형성되고 있다고 볼 수 있다. 이와 달리, 평행분사에서는 공동 내부에서 OH기의 존재를 전혀 확인할 수 없고, 따라서 화염의 발생 유무를 판단하기 힘들다.

경사분사와 평행분사의 또 다른 차이점으로 화염구조를 들 수 있다. 경사분사의 경우, 높은 당량비에서는 연료의 높은 모멘텀으로 인해, 공기 유동장 내에 연료 기동이 형성되고 그 주위로 화염면이 형성되는 3차원적인 화염구조를 가지게 되므로, Fig. 7 (d) 사진에서 보는 바와 같이 연료 분사구 이후 공동 윗 부분에서 두 개의 화염 띠가 나타났다. 그러나, 평행분사의 경우 연료가 공동 내부를 채우고 있으므로, 화염은 공동 위 연료와 공기가 만나는 면에서 형성되어, Fig. 7 (d)와 같이 연소기 폭 방향으로 평면에 해당하

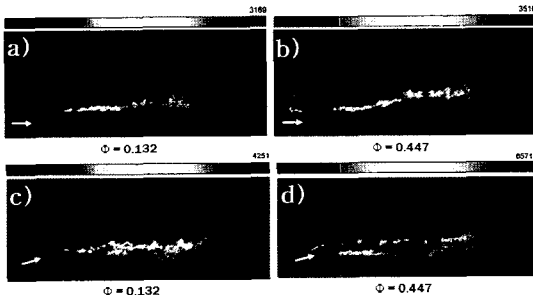


Fig. 7 OH-PLIF Comparison between Parallel and Inclined Fuel Injection

는 2차원적인 화염 구조가 형성 된다.

### 3.2.2 연소기내 압력분포 비교

Fig. 8과 9은 경사분사와 평행분사에 대해 비화학반응과 화학반응에 대한 연소기내 압력 분포를 비교한 그래프이다.

비화학 반응의 경우(Fig. 8), 공동 내부의 압력이 두 연료분사 방법에 대해 확연한 차이를 보이고 있다. 우선 경사 분사의 경우, 공동 내부 압력이 연소기 입구의 압력과 유사하거나 약간 낮은 값을 나타내고 있는데 비해, 평행분사의 경우 공동 내부로의 연료 부가로 인해, 압력값이 증가하

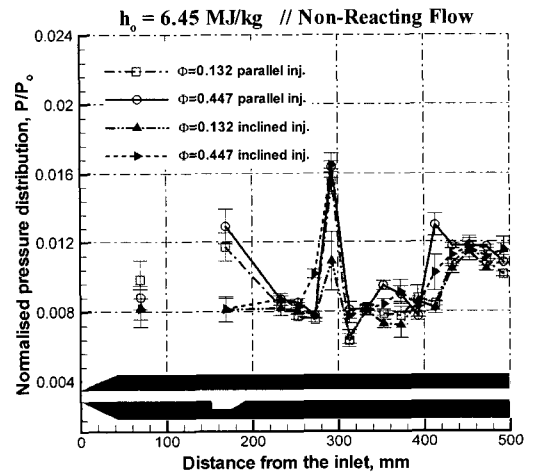


Fig. 8 Pressure Distribution Comparison of Non-Reacting Flow between Parallel and Inclined Fuel Injection

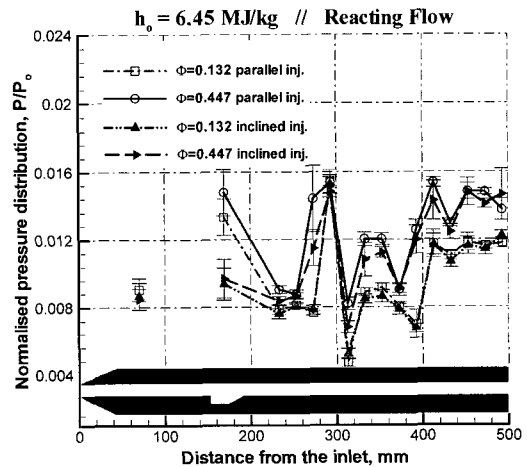


Fig. 9 Pressure Distribution Comparison of Reacting Flow between Parallel and Inclined Fuel Injection

게 된다. 이렇게 공동을 제외하고, 공동 이후 연소기 내 압력 분포를 살펴보면 두 연료분사 방법이 서로 유사한 압력분포를 보이고 있다. 이 사실로 미루어 보아, 연료분사 위치에 관계없이 연소기의 크기와 공동 형상은 동일하므로, 따라서 연소기내 압력분포는 공동의 형상에 의해 좌우됨을 알 수 있다. 즉, 공동의 뒷전에서 발생하여 연소기 내 위, 아래 벽면을 따라 반사되며 진행되는 충격파에 의해 연소기 내부 압력 분포가 결정된다.

Fig. 9과 같이 연소기 내에서 화염이 발생하는 경우에도, 공동을 제외하고는, 당량비가 동일한 경우에는 서로 유사한 압력값을 가지며, 특히 낮은 당량비에서는 연소기 내 압력분포가 거의 동일함을 알 수 있다. 뿐만 아니라, 덕트 후류로 갈수록 압력의 높낮이가 나타나는 것으로 보아 연소기 내에서 초음속 연소가 발생하고 있음을 알 수 있다.

#### 4. 결론

본 논문은 공동을 지나는 초음속 연소기 내에서 평행 연료 분사에 대한 실험에서 압력측정과 OH-PLIF 측정을 수행하였고, 이전 실험인 경사 분사와의 실험 결과를 비교하였다.

평행분사의 경우, 공동 내부로의 직접적인 연료 분사로 인해 공동 내 압력이 증가하였다. 낮은 당량비의 경우 화염이 연소기 아랫면에서 주로 분포하고, 당량비가 증가함에 따라 연소기 아랫면을 흐르는 연료층으로 인해, 화염층이 위로 상승하여 나타났다. 또한 공동 내부에서는 연료와 공기가 혼합되지 못하고 따라서 화염이 존재하지 않았다.

동일한 실험조건에 대해 경사분사와 비교해 본 결과, 두 분사 방법 모두 낮은 당량비에서 점화 지연 길이가 더 길게 나타났다. 또한 두 경우 모두 강한 OH 신호가 하나의 띠로 이루어지는 것이 아니라, 주기성을 가지고 나타나고 있었다. 연료 분사 방법에 상관없이 동일한 당량비에 대해 연소기 내에서 서로 유사한 압력 분포를 가지는 것으로 보아, 본 실험 조건에서 연소기 내에 형성되는 압력 분포는 공동의 형상이 주요한 요인임을 알 수 있다.

#### 후 기

본 연구는 2005년 과학기술부 국가지정연구실 사업(NRL 과제 고유번호 M10500000072-05J000007210)에 의해 지원된 연구과제 중 일부이며, 2005년도 두뇌한국21사업과 서울대 항공우주신기

술연구소에 의하여 지원되었습니다. 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

- [1] Ben-Yakar, A., Hanson, R.K.: Cavity Flame-Holders for Ignition and Flame Stabilization in Scramjets-An Overview, *Journal of Propulsion and Power*, Vol.17, No.4, July-August 2001, pp. 869-877
- [2] R. Krishnamurthy, D'Anthony M. Woods and S. Chandra, "Mixing in Hypervelocity Flows," *Flow, Turbulence and Combustion* 64, pp. 29-41, 2000
- [3] J.-H. Kim, Y. Yoon, I.-S. Jeung, H. Huh, J.-Y. Choi, "Numerical Study of Mixing Enhancement by Shock Waves in Model Scramjet Engine," *AIAA Journal*, Vol.41 No.6 pp. 1074-1080, 2003
- [4] Neely, A., Stotz, I., O'Byrne, S., Boyce, R., Mudford, N., and Houwing, A.: Flow Studies on a Hydrogen-Fueled Cavity Flame-Holder Scramjet, AIAA-2005-3358, AIAA/CIRA 13th International Space Planes and Hypersonics Systems and Technologies Conference, Capua, Italy, May 16-20, 2005
- [5] O'Byrne, S., Stotz, I., Neely, A., Boyce, R., Mudford, N., and Houwing, F.: OH PLIF Imaging of Supersonic Combustion Using Cavity Injection, AIAA-2005-3357, AIAA/CIRA 13th International Space Planes and Hypersonics Systems and Technologies Conference, Capua, Italy, May 16-20, 2005
- [6] 정은주, 정인석, Sean O'Byrne, A.F.P. Houwing, "초음속 유입 유동 조건에 따른 공동을 포함한 덕트 내 초음속 연소 현상에 관한 실험적 연구", 한국연소학회 추계학술대회, 2006년 10월 20일, 제주 오리엔탈호텔
- [7] McIntosh, M. K.: Computer Program for the Numerical Calculation of Frozen Equilibrium Conditions in Shock Tunnels, Tech. rep., Australian National University, 1968
- [8] Seitzman, J. M., and Hanson, R. K.: Comparison of excitation techniques for quantitative fluorescence imaging of reacting flows, *AIAA Journal*, Vol.31, No.3, March 1993, pp. 513-519