

공동 상류 경사 분사를 이용한 초음속 연소기의 실험적 연구, Part 1 : OH-PLIF 측정

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

Experimental Study on Supersonic Combustor using Inclined Fuel Injection with the Cavity, Part 1: OH-PLIF Measurement

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. Different shock tube fill pressures have various inflow conditions. 15° inclined hydrogen fuel injection is located before the cavity. Oblique shock is generated from the cavity and reflects off the top and bottom wall. For non-reacting flow, fuel makes the shear layer thicker above the cavity therefore, the shock is generated just before the trailing edge. This research has self-ignition in the combustor. For reacting flow, as the equivalence ratio increases, flame starts to generate near the injector or occur in the recirculation zone before the injector. High fuel injection sustains the jet shape in the cross flow and air can mix with fuel along the shear layer. Therefore, two flame layers find above the cavity for high equivalence ratio.

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

1. 서 론

현재까지 초음속 연소에 관한 가장 효율적인 연료 분사 방법에 대해서는 일반적인 의견 일치가 되어 있지 않다. 우선, 연료분사 방법은 효율적인 연료/공기 혼합 뿐 만 아니라 연소기 내 공기역학적 저항도 최소화 시켜야 한다[1]. 초음속 연소에서 점화와 화염유지는 연료 분사 시스템을 설계하는데 있어서 초점을 맞추어야 할 두 가지 중요한 요소이다. 우선 연료-공기로 점화가 이루어지면, 연소는 혼합 정도에 직접적으로 영향을 받는다. 연료와 공기가 혼합된 유동에서 자발점화가 이루어지기 위해서는 정온도, 정압력, 연료-공기 혼합 정도, 유동의 연소기내 체류시간이

적절한 값을 가져야 한다. 비록 상당한 열이 발생하지 않더라도, 반응 시스템을 시작하는데 충분한 자유 활성기가 형성되면 점화가 발생하게 되는데, 자발 점화가 되는 조건에서, 유동 속도가 U 일 때 필요한 거리 l_i 는 $l_i = U\tau_i$ 이다. 이 때 τ_i 는 점화지연시간이다. 즉, 연소기내 유동 속도가 커질수록 점화하는데 더 긴 거리가 필요하게 된다. 따라서 초음속 연소에서 화염유지의 주요 목적은 점화 지연시간을 줄이고, 화학 반응이 가능한 가장 짧은 거리에서 이루어지도록 지속적인 활성기의 원천을 제공하기 위함인데, 일반적으로 이러한 보염기(flameholder)는 1)연료와 공기가 부분적으로 낮은 속도에서 혼합될 수 있는 재순환 영역의 구성, 2)충격파와 부분적 또는 완전 혼합된 연료-산화제와의 상호작용, 3)연료와 공기가 후류로 이동함에 따라 확산 화염이 발생하는 곳에서 연료와 공기의 혼합되지 않은 간섭 구조 형성에 의해 이루어진다.

이 세 가지 안정화 기술 중 가장 간단한 방법

* 서울대학교 항공우주공학과

† 연락처자, newaerol@snu.ac.kr

** Australian Defence Force Academy, Australia

*** Australian National University, Australia

은 벽면 오리피스로부터 연료를 수직으로 분사하는 것이다. 연료 제트가 초음속 유입 유동과 상호작용하면 궁형 충격파가 발생된다. 그 결과, 상류의 벽면 경계층은 박리되고, 제트 출구의 상류에서 경계층내 공기와 제트 유동이 혼합된다. 많은 논문들에서도 언급되어 있듯이 이 영역은 연소가 가능한 상태에서 화염 유지를 가능하게 하므로 수직 분사 유동장에서 매우 중요하다. 그러나, 이러한 분사 형태는 특히 높은 비행 속도에서는 수직 제트 분사에 의해 발생하는 강한 3차원 궁형 충격파 때문에 전압력 손실을 가진다.

화염을 안정화 시키는 또 다른 방법은 후방단을 이용하여 수직분사 하는 것이다. 후방단은 연속적인 점화원으로서 고온 기체를 포함하는 큰 규모의 재순환 영역을 만든다. 이 방법은 지속적인 연소를 발생시킬 수 있지만, 앞서 나타낸 방법과 마찬가지로 전압력 손실과 후방단 이후에서 낮은 유동 압력으로 인한 저항의 증가와 같은 단점이 있다.

마지막으로, 분사 각도를 조절함으로써 분사로 인한 압력 손실을 줄이므로 궁형 충격파는 약해진다. 마하수 10-13의 비행 엔탈피 조건에 수직으로 수소를 분사하였을 때, 궁형 충격파 뒤, 제트의 상류 재순환 영역에서 자발 점화가 발생하였다. 그러나, 훨씬 더 낮은 전엔탈피 유동 조건에서 유사한 형상의 실험에서는 제트로부터 후류에서 점화가 발생하였다[2]. 따라서 각도를 가지는 분사는 특히 마하수 10 이하의 비행속도에서는 자발 점화나 화염 안정화가 잘 일어나지 않을 것으로 예상되므로, 따라서 자발 점화와 후류에서의 연소 안정을 얻기 위한 새로운 기술이 요구된다.

이에, 최근 연료 분사 및 화염 유지 방법을 통합한 공동 보염기는 초음속 연소기내 화염 유지와 안정화에 새로운 개념으로 제안되어 왔다. CIAM에 의해 처음 설계된 공동 보염기는 러시아와 프랑스의 듀얼모드 스크램제트 비행 시험(수소 연료 사용)에서 처음으로 사용되었다. 더 나아가 경사면을 이용한 분사구 이후에 공동을 장착하였을 경우, 초음속 유동에서 탄화수소 연료의 연소 효율이 현저히 상승하였고, 이후 공동 화염 유지기에 관한 연구를 더욱 북돋우었다. 1994년, NASA와 CIAM에서는 자발점화와 화염 유지 도구로서 공동이 다소 효과적임을 나타내었다[3].

연료분사, 혼합 및 화염 유지를 위해 고안된 몇 가지 잠재적인 분사 방법 중 하나는 연소기 벽면에서 하나 또는 그 이상의 공동을 이용하는 것이다. 경사면을 이용한 연료 분사구 후방에 공동을 설치할 경우 초음속 유동장 내에서 탄화수소 연소의 효율을 증대시켰다[4-5]. 또한 몇몇 실

험적 연구가 US Air Force Research Lab.에 의해서 수행되었으며, 비행 마하수가 약 6 정도 되는 영역에서 연료/공기의 혼합 및 화염지지를 증대시키기 위한 공동의 가능성을 보여주었다[6-8]. 본 연구 이전에 Australian National University와 University of New South Wales의 Australian Defence Force Academy에서 공동을 지니는 모델 스크램제트 엔진에 관한 실험을 수행하였는데, 여기서 사용된 연료 분사 방식은 공동의 뒷전 벽면에서 유동의 역방향으로 연료를 분사하는 것이었다[9-10]. 그 결과, OH기 신호는 공동 윗부분에서만 발생하였고, 공동 내부에서는 OH기 신호가 나타나지 않았다. 그 결과, 공동 내부에서의 연료 역분사 방법은 보염기의 역할로서는 바람직하지 않다고 볼 수 있다. 따라서, 본 연구는 공동 위치 이전에서 연료가 분사되는 모델 스크램제트 엔진 실험에서 공동으로 인한 연료와 공기의 혼합 및 연소 증대에 대해 제시하였다. 이전 논문에서 사용된 공동 내부 역분사의 경우, 연료가 공동 내부를 채우게 되므로 공동 내부에서 연료와 공기가 혼합될 가능성이 희박했다. 따라서 본 논문에서 결정된 실험 모델 형상은 공동 이전에서 분사된 연료가 공기와 혼합되고 공동 내부로 흘러 들어가게 되므로, 공동이 보염기로서의 역할을 좀 더 할 수 있게 유도하기 위함이다.

2. 실험방법

2.1 초음속 연소기 설명

본 연구에 사용된 초음속 연소기는 Fig. 1에 제시한 바와 같이 길이 500 mm, 폭 52 mm, 높이 25 mm를 가지는 사각형 덕트이다.

연소기 입구는 시험 시간 동안 마하 3.8의 노즐 출구 직후에 위치하도록 하였다. 연소기 입구로부터 152.5 mm 지점에 위치한 공동은 깊이가 5 mm이며, 22.5°의 경사각을 가지고 있다. 이 공동의 길이-깊이비는 4.8이며, 개방형 공동이다[3]. 보다 자세한 공동의 치수는 Fig. 1에 제시하였다. PLIF (Planar Laser Induced Fluorescence) 이미지를 촬영하기 위해 시험부의

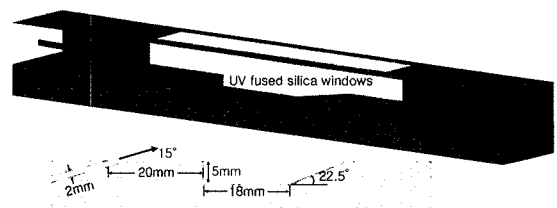


Fig. 3 Schematic of Supersonic Combustor

위와 옆 벽면 일부에 UV fused silica 가시화 창을 장착하였다[4]. Laser sheet은 모델의 윗 가시화 창을 통하여 아래로 덕트 내부로 입사되며, 옆 벽면의 가시화 창을 통해 ICCD 카메라를 이용하여 OH 형광 신호를 포착하였다.

연료 분사 시스템으로 Ludwig tube를 사용하였다. 상온 상태의 수소 기체를 Ludwig tube 내로 주입하고, 이 때 tube 내 수소 기체의 주입 압력은 실험 조건에 따른 당량비에 맞추어 조절하였다. 연료는 시험 기체가 연소기 내로 유입되기 약 30 ms 전에 연소기 내부로 분사된다.(Fig. 2) 이 때 연료 분사의 지속시간은 연소기 내에서 시험 기체의 지속시간보다 훨씬 더 길다. 따라서 시험 시간 동안 연소기 내 연료의 질유량은 전반적으로 일정하다.

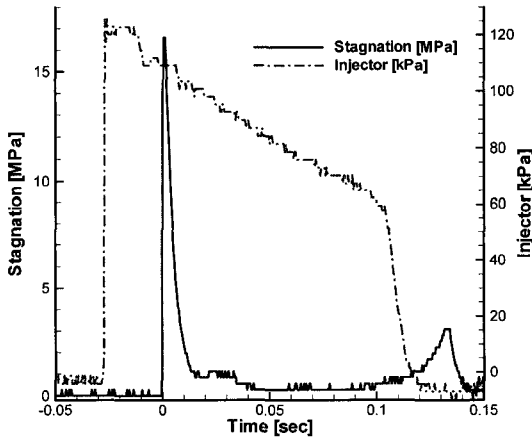


Fig. 4 Pressure Traces at Stagnation of Freestream and Injection Position

2.2 T3 자유-피스톤 충격파 터널과 유동 조건

본 실험은 호주의 Australian National University에 있는 T3 자유-피스톤 충격파 터널 (free-piston shock tunnel)에서 수행되었다.(Fig.

3) 고압으로 충전된 공기는 피스톤을 밀어내고, 이 피스톤에 의해 compression tube 내에 있던 driver gas가 압축된다. 이때, driver gas로는 20 % 아르곤과 80 % 헬륨 기체의 혼합으로 이루어져 있다. 피스톤이 driver gas를 압축하며 compression tube의 끝으로 도달하게 되면 driver gas와 shock tube 내 test gas를 분리하고 있던 철제 격막이 고압의 driver gas에 의해 파열된다. 철제 격막이 파열되는 즉시, 강한 충격파가 shock tube를 따라서 전파되면서 test gas를 가속화 시키다가 shock tube 끝에서 충격파가 반사되면서 멈추게 되는데, 이 지점이 극초음속 노즐의 정체 상태가 된다.

연속적으로 작동되는 풍동과는 달리 충격파 터널은 펄스 형식이므로, 시험 시간은 shock tube의 용적과 nozzle의 질유량에 의해 결정된다. 본 실험 장비에서는 노즐 정체실의 전 엔탈피에 따라 일반적으로 시험부 내에서 일정 압력 시험 시간은 0.5 에서 2 ms 정도이다. 충격파 터널에서 시험 시간을 결정하게 되는 가장 큰 두 가지 요인은 1)노즐 출구에서의 균일한 유동장이 형성되어야 하고, 2)노즐 정체실에 driver gas가 도달하여 시험 기체와 희석되기 전에 실험이 진행되어야 하는 것이다. T3 시험 장비를 이용하여 실험한 자료를 살펴보면[11], 전엔탈피가 4 MJ/kg 일 때 노즐 정체실에서 충격파가 반사되고 난 이후 4 ms 동안 까지는 test gas가 driver gas와 희석되지 않았다. 또한, University of Queensland의 T4 자유 피스톤 충격파 터널 실험에서는 전엔탈피 6 MJ/kg 일 때, 노즐 정체실에서 충격파가 반사되고 난 후 2.5 ms 동안까지는 시험 기체가 10 % 정도 driver gas와 희석되었다[9]. 따라서 실험 모델에 유입되는 주 유동은 시험 시간 1.5 ms 에서는 driver gas에 영향을 받지 않는다.

본 연구에서는 노즐 정체실에서 충격파가 반사되고 난 이후 1.25 ms 와 1.75 ms 사이인 0.5 ms 동안을 전체 시험 시간으로 설정하였다. PLIF 이미지를 획득하기 위해서 레이저는 충격파가 반사되고 난 뒤 1.5 ms 후에 동기화되는데, 이는 이 시간 동안에 연소기 내 연소 유동이 형성되기에 충분하기 때문이다. T3 충격파 터널에 대한 작동과 유입 유동 조건을 설정하기 위한 방

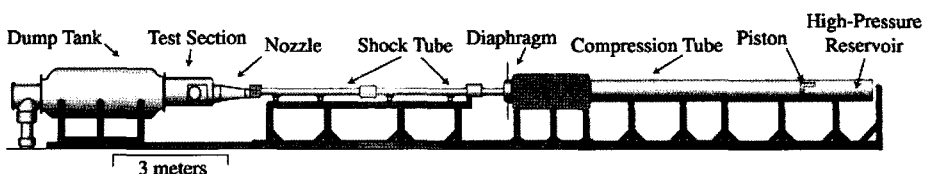


Fig. 3 T3 Free-Piston Shock Tunnel

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 ± 0.03	6.45 ± 0.14	15.7 ± 0.68	4422 ± 64
75	2.36 ± 0.03	5.16 ± 0.03	15.0 ± 0.46	3835 ± 18
100	2.23 ± 0.04	4.48 ± 0.06	15.5 ± 0.28	3483 ± 37
125	2.04 ± 0.01	3.82 ± 0.06	15.4 ± 0.64	3087 ± 41

Table 2 Freestream Conditions of Combustor Inlet

h_0 [MJ/kg]	P_∞ [kPa]	T_∞ [K]	ρ_∞ [kg/m ³]	u_∞ [m/s]	M_∞
6.45	111 ± 7	1667 ± 55	0.23 ± 0.009	2952 ± 28	3.71 ± 0.03
5.16	100 ± 4	1280 ± 14	0.27 ± 0.01	2680 ± 7	3.83 ± 0.01
4.48	98 ± 2	1095 ± 23	0.31 ± 0.006	2513 ± 15	3.87 ± 0.01
3.82	92 ± 4	899 ± 16	0.35 ± 0.01	2347 ± 17	3.97 ± 0.004

Table 3 Fuel Injection Conditions

Ludwig Tube Fill P. [kPa]	900	1500	2500
Fuel Plenum Pres. [kPa]	631 ± 21	1104 ± 17	1906 ± 33
Fuel Injection Pres. [kPa]	333 ± 11	583 ± 9	1005 ± 18
h_0 [MJ/kg]	Equivalence ratio		
6.45	0.132 ± 0.009	0.223 ± 0.015	0.447 ± 0.034
5.16	0.130 ± 0.002	-	0.429 ± 0.036
4.48	0.126 ± 0.002	-	0.415 ± 0.010
3.82	0.116 ± 0.008	-	0.372 ± 0.006

법은 참고문헌 10에 기술되어 있다.

마하 4의 유동을 발생시키기 위해 shock tube 끝에 converging-diverging nozzle를 설치하였다. 충격과 속도와 노즐 정체실의 압력은 PCB사의 압력 센서(shock tube 부분 : 113A22, 노즐 정체실 부분 : 113A23)를 이용하여 측정하였다. 측정된 충격과 속도와 노즐 정체실의 압력값은 ESTC (Equilibrium Shock Tube Code)[12]와 STUBE 노즐 코드에 이용되며, 노즐 끝에서 연소기 내부로 들어오는 유동의 조건을 결정하게 된다. 정체실과 연소기 내 유입 유동 조건에 관한 계산 결과는 Table 1, 2에 제시하였다.

앞서 설명한 바와 같이, Ludwig tube에 서로 다른 압력값을 이용하여 수소 기체를 채워 당량비를 조절한다. 전엔탈피 6.45 MJ/kg 에 대해, 수소 연료의 충전 압력이 900 kPa, 1500 kPa,

2500 kPa 일 때, 당량비는 각각 0.132, 0.223, 0.447이다. 전엔탈피가 감소함에 따라 유입 공기 유동의 질유량이 증가하므로 당량비가 약간 감소하게 된다. 연소기로의 유입 유동 조건에 따른 상세한 당량비는 Table 3에 제시하였다.

2.3 PLIF 시스템

수산화(OH)기는 고온 화학 반응 중 나타나는 중간 생성물로서 연소가 발생하는 영역에서는 일종의 표지로서 사용된다[13]. 따라서 초음속 연소기의 설계에 있어서 중요한 특성인 점화가 일어나는 위치를 결정하는 데에 OH기를 여기시켜 기저상태로 변할 때 발생하는 형광 발광을 사용할 수 있다. 본 실험에 적용한 OH-PLIF 시스템으로는 532 nm 로 주파수 배가된 Spectraphysics

GCR Nd:YAG laser를 이용하여 rhodamine 590 과 rhodamine 610 을 혼합한 PDL2 dye laser를 펄핑시키고, 560 nm 와 570 nm 사이의 파장대를 형성한다. Dye laser로부터의 방사선은 280 nm와 285 nm 사이의 beam을 형성시키기 위해 주파수 배가 시킨다. 각 단계에 따른 laser beam의 에너지를 살펴보면, Nd:YAG laser로부터 주파수 배가된 532 nm beam의 에너지는 530 mJ, dye laser로부터 방사된 560-580 nm beam의 에너지는 150 mJ, 280-285 nm 에서 beam의 에너지는 7-8mJ이었다.

원하는 laser 파장인 283 nm를 얻기 위해, dye laser를 조정하고, Pellin-Broca prism을 이용하여 532 nm 와 566 nm 로부터 283 nm beam을 분리한다.

이 beam은 cylindrical lens와 spherical lens의 조합으로 laser sheet을 형성하고 조리개를 통한 후 초음속 연소기 내부로 들어간다. 이 laser sheet은 측면 가시화 창으로부터 네 개의 분사구 중 두 번째 분사구 위에 위치하고, 분사구 바로 직전부터 시작된다. sheet의 길이는 60 mm 이다.

OH-PLIF 신호는 ICCD 카메라(Princeton Instrument 社)를 이용하여 감지된다. Intensifier gate time은 충격파 터널로부터 발생하는 불필요한 발광과 연소기 내 화염으로 인해 발생하는 화학적 발광을 제거하기 위해 50 ns로 설정하였다. 또한, Schott WG 305와 UG 11 필터를 카메라의 렌즈 앞에 장착하여 laser 산란에 의한 영향과 광대역 유동의 발광을 줄였다.

형광 신호는 laser의 에너지에 의존하는데, laser beam은 공간적으로 불균일한 분포를 가지고 있고, 이상적으로는 가우스 분포를 가진다. 따라서 laser sheet에서의 공간적 불균일성에 대한 이미지 표준화 작업을 위해 dye-cell을 이용하여 이미지를 보정하였다.

실험에 적용하였던 OH-PLIF 시스템은 Fig. 4에 제시하였으며, PLIF 신호의 형성, 인지에 대한 장비 등은 참고문헌 9에 자세히 제시되어 있다.

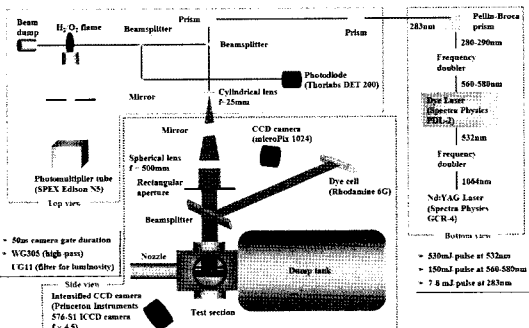


Fig. 4 OH PLIF System

3. 결과 및 분석

3.1 비연료 분사

초음속 연소기 내 연료 분사로 인한 비화학 반응과 화학 반응에 대한 현상을 살펴보기에 앞서, 연료 분사 없이 주 유동에 의한 연소기 내 유동장의 특성을 먼저 살펴보았다. 이는 연료 분사가 없을 때 공동 위를 흐르는 유입 유동의 특성을 살펴보기 봄으로써 연료 분사의 경우와 비교하기 위함이다.

Fig. 5은 유입 유동의 luminosity image이다. 이 사진에 제시된 바와 같이 전단층으로 추정되는 공동 위 어떤 층이 모델에 대해 평행하게 흐르지 못하고, 공동 내부 아래로 휘어져 흐르면서 공동의 뒤 경사면에 부딪히게 된다. 즉, 유입 유동은 공동의 앞전에서 박리되고, 공동 내 전단층을 따라 흐르다가 공동의 뒤 벽면에 부딪히게 된다. 따라서 공동 내부로 흐르는 유입 유동의 일부는 재순환 영역을 형성하고, 다른 일부는 공동의 뒷전을 지나 연소기 후방으로 흐르게 된다. 재부착된 shear layer와 공동의 형상은 Fig. 5의 아래 개념도에 제시된 바와 같이 재압축 영역(recompression region)과 경사 충격파를 형성 시킨다. 공동 뒷전에서 발생하는 강한 발광은 이 영역에서 높은 온도가 형성되고 있음을 나타낸다. 이 경사 충격파는 연소기 뒷 벽면에 부딪히고, 다시 반사되어 아래 벽면에 부딪히게 된다.

3.2 비화학 반응

연소 실험에 앞서, 두 유동 사이에서 나타나는 혼합 현상에 대해 살펴보기 위해 충격파 터널의 시험 기체를 공기 대신 질소 기체를 사용하여, 연소기 내부로 수소 기체가 분사되더라도 연소 반응이 발생하지 않도록 유도하였다.

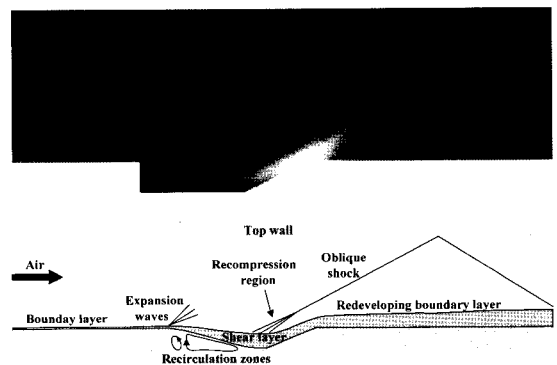


Fig. 5 Luminosity Image of No Fuel Injection(top) and Schematic View(bottom)

Fig. 6은 연료를 분사하였을 때 공동 근처에서의 luminosity image이다. 일반적으로 알려진 공동 위 유동장의 경우 연료분사가 없을 때는 앞전에서 박리된 shear layer가 공동 내부로 휘어져서 흐르다 공동 뒷전에서 재부착되고, 이 부분에서 재압축 영역과 경사 충격파가 발생한다. 그러나 공동 이전에서 분사되는 매체가 있는 경우는 공동에서의 free shear layer의 성장률을 증가시켜 주므로, shear layer가 분사가 없을 때보다 증가된다. 뿐만 아니라 공동의 뒷전에서 발생하게 되는 충격파의 경우도, 연료분사가 없을 때는 공동의 뒷전 부근에서부터 파들이 발생하여 충격파가 형성되는 데에 비해, 연료분사가 있을 때는 두꺼워진 shear layer로 인해 재순환 영역이 작게 형성이 되고 따라서 공동의 뒷전 끝 부분에서 충격파가 발생하는 것으로 보인다. 또한, 연료 분사가 없는 경우는 공동 뒷전에서 발생하는 경사 충격파가 공동 뒷전의 경사면 중간 부분에서부터 발생하였으나, 연료분사가 있는 경우에는 연료로 인해 shear layer의 두께가 증가되어 거의 공동의 뒷전 끝부분에서 경사충격파가 발생하기 시작하는 것으로 생각된다. 또한 공동 내부에서 shear layer와 재순환 영역의 경계선인 속도가 0이 되는 선은 연료분사가 없는 경우에는 연료 분사가 있는 경우에 비해, 충격파의 위치로 미루어 보아 공동 내부로 좀 더 깊이 들어가서 형성이 되고 있으며, 이는 공동이전 연료 분사로 인한 공동 내부 구조 특성이 달라지게 된다.

3.3 화학 반응

연소기 내부에 초음속 연소를 발생시키기 위해 앞의 내용과 달리 공기를 시험기체로 사용하였다. 연료가 공동 이전에서 분사되면 공동의 앞전에서 박리되고 공동 위 전단층을 따라 흐르다가 공동의 뒷 벽면에서 부딪히게 된다. 여기서, 연료의 일부분은 공동 안으로 유입되고 공동 내에서

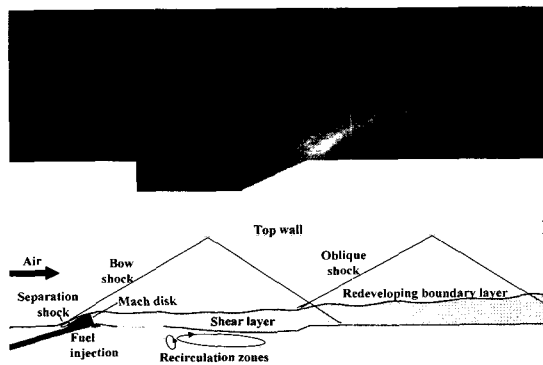


Fig. 6 Luminosity Image with Fuel Injection (top) and Schematic View(bottom)

재순환 영역을 형성시키고, 나머지는 공동의 뒷전을 지나 이동한다. 만일 공동 주위에서의 유동 온도가 연료를 점화시키기에 충분하고 국소적이거나 연료와 공기의 혼합이 충분히 이루어지면, 공동 주위에서 연소가 발생하게 된다. 낮은 마하수에서 공동은 화염유지부 역할을 하는데, 본 실험에서와 같이 연소가 공동 내부에서 일어난다면, 연료 분사 시스템은 화염유지부의 역할을 하게 된다.

Fig. 7과 8은 모든 당량비와 전엔탈피 조건에 대해 OH-PLIF 이미지와 각각 가로 방향과 세로 방향으로의 평균 신호를 그래프로 나타낸 것이다. OH-PLIF을 위한 laser sheet은 연료 분사구 직전에서부터 시작하여 약 60 mm 정도의 길이를 가진다. Fig. 7에 제시된 laser sheet은 화면 상에 뚜렷이 나타나고, laser 오른쪽 가장자리 면과 비교했을 때, 형광 신호와 유동의 발광신호의 상대적인 크기를 볼 수 있다. 여기서 각 이미지들의 color map 은 카메라의 최대수에 비례하고, 최대값은 각 이미지의 color bar 옆에 제시하였다. 일부 이미지들은 laser sheet의 가장자리에서 신호가 증가되어 나타나는 것을 볼 수 있는데, 이는 특히 Fig. 8(c)와 (d)의 이미지에서 이러한 현상이 강하게 나타났다. 이는 이 부분에서 PLIF 신호가 낮았기 때문이며, 이미지의 신호가 증가되어 나타나는 이유는 laser 신호를 laser sheet profile로 표준화 하는 과정에서 나타나게 된 인공적인 값이다. 따라서 sheet의 가장자리에서 나타난 낮은 신호들이 다른 영역과는 다르게 차별적으로 증폭된 것이다.

3.3.1 당량비 변화

Fig. 7은 유입 공기 유동의 전엔탈피가 6.45 MJ/kg 일 때, 당량비에 따른 공동 주위 OH-PLIF 이미지를 나타낸 것이다. 세 가지 당량비 모두 실험 시간 동안 자발 점화가 일어났다.

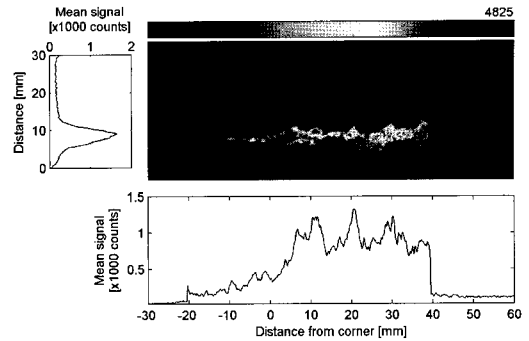
Fig. 7(a)에서, 연료 분사구로부터 약 10 mm 후류 지점에서 약한 OH 형광 신호가 나타나기 시작하였다. 연료가 벽면으로부터 수직으로 분사될 때에는 분사구 앞에서 궁형 충격파가 발생하므로, 충격파로 인해 공기의 온도가 증가하며 연료를 점화시키게 된다. 그러나 본 연구에서는, 연료가 바닥면에서부터 15°의 각도로 분사되므로 당량비 0.132의 경우에는 연료 제트가 공기중으로 침투되지 못하게 되고, 점화되기에 충분한 온도로 증가되지 못한다. 따라서, 화염이 연료 분사구 위치에서 시작되지 않는다. 유입 공기의 정온도가 1500 K 이상임에도 불구하고, 실험 장비 특성상 시험 시간동안에는 연소기 벽면과 연료 분

사구 근처는 300 K 이다. 또한 수소 연료의 전 온도가 300 K 이고 벽면에서 분사될 때 팽창에 의해 300 K 보다 더 낮아지게 된다. 이러한 실험 조건들로 인해 연료 분사구 근처에서 화염이 발생하지 않게 된다. 그러나 분사구로부터 10 mm 후방에서는 OH 형광 신호가 나타나기 시작하는데, 이는 shear layer 내 연료 유동의 온도가 증가되고 점화가 시작된다. 당량비 0.223의 경우 (Fig. 7(b)) 강한 OH 형광 신호가 연소기의 중간 부분인 연료와 공기 사이의 혼합층에서 뿐만 아니라 공동의 shear layer에서도 나타난다. 연료 유동 아래로 유입된 공기 유동은 shear layer 안에서 연료와 혼합되어 연소가 발생한다. Fig. 7(b)에서는 비록 연료가 15°의 각도로 분사된다 하더라도 연료가 높은 분사 압력으로 공기중으로 분사가 될 때, 벽면에서의 수직분사에서 나타나는 현상처럼 초음속 유동장 내에서 3차원 제트 유동 형태를 가진다. 특히, 당량비 0.447 (Fig. 7(c))에서는 이러한 3차원 현상을 더욱 뚜렷하게 살펴볼 수 있다. 높은 연료 분사 압력은 분사구 앞에서 구형 충격파를 형성시켜 충격파 뒤에서 높은 압력과 온도를 발생시키게 되고, 연료를 점화시키는 조건이 형성된다. 또한 연료 분사구 직전에서 OH 형광 신호가 나타나는데, 이는 연료 분사구 앞에서 벽면 경계층이 박리되고 이로 인해 형성되는 재순환 영역이 화염을 유지하기 위한 높은 온도에서 공기와 수소 연료의 혼합을 증가시킨다.

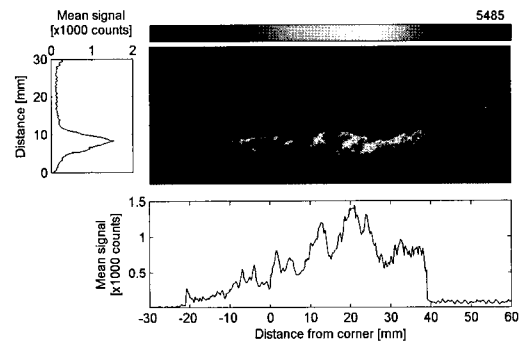
OH 형광 신호들의 가로선은 구형 충격파 뒤에서 제트 유동의 말굽 와류 유동이 형성되고 있음을 나타내고 있다. 이는 거의 구형으로 형성되는 충격파 뒤에서 형성되는 고온 유동 상태와 높은 전단 상태로 인해 나타나는 현저한 연료 혼합 영역이다. 이러한 조합은 연료 제트가 상류에서 즉각적으로 화염지지 역할을 할 수 있게 한다.

당량비 0.447 (Fig. 7(c))에서는 공동 위 전단층에서 나타나는 OH 형광 신호가 당량비 0.223 (Fig. 7(b))에 비해 더 크게 나타난다. 높은 연료 분사 압력의 경우 공동을 지난 부분에서도 계속적으로 제트 형상을 유지하며 초음속 유동장으로 침투하므로, 제트 아랫면으로 유입되는 공기 유동은 전단층을 따라서 좀 더 쉽게 연료와 혼합될 수 있다. 따라서 연소로 인해 더 강한 OH 형광 신호가 이 영역에서 나타나며, 그 결과 연소기 내 세로 단면 이미지에서 두 개의 화염 층이 보인다. 이는 당량비 0.132 (Fig. 7(a))나 0.223 (Fig. 7(b))과는 현저히 대조적인 현상이다.

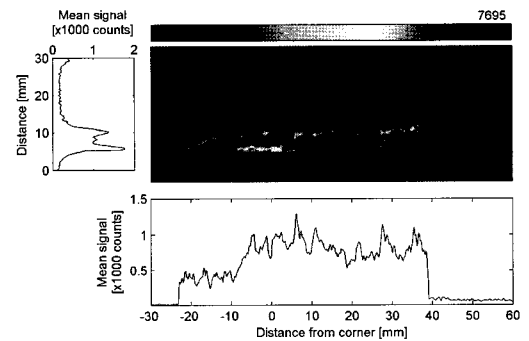
Fig. 7(a)-(c)에서 연소기를 따라서 규칙적으로 최대 OH 형광 신호가 나타나는 것을 살펴볼 수 있다. 특히 (a)에서 (c)로 당량비가 증가함에 따라 반복적으로 나타나는 OH 신호의 최대값의 간



(a) $h_0 = 6.45 \text{ MJ/kg}$ & $\phi = 0.132$



(b) $h_0 = 6.45 \text{ MJ/kg}$ & $\phi = 0.223$



(c) $h_0 = 6.45 \text{ MJ/kg}$ & $\phi = 0.447$

Fig. 7 OH-PLIF Image near the Cavity with Different Equivalence ratio Conditions

격이 더 짧아짐을 알 수 있다. 참고 문헌 8에서도 제시한 바와 같이, 이러한 강한 OH 신호가 간헐적으로 나타나는 이유는 공동에서 발생하는 진동 모드로 인한 자극에 의한 것이다.

본 연구의 결과와 참고 문헌 8에서의 연구와의 가장 큰 차이점은 공동 내부에서 OH 신호가 예측 가능할 정도로 나타난다는 점이다. 이는 Fig. 7의 수평 평균값에서도 알 수 있다. Fig. 7(a)-(c)에서 형광신호의 분포를 나타내는 그래프를 살펴보면 연소기 내부에서는 거의 0에 가까운 평균 형광 신호수를 보이지만 공동 내 영역에서는

추가적인 신호가 나타남을 알 수 있다. 이는 적어도 공동 이전에서의 연료를 분사할 경우 공동이 화염 지지부의 역할을 할 수 있음을 나타낸다.

3.3.2 연소기 유입 유동 조건 변화

Fig. 8은 연료의 분사 압력이 일정한 상태에서 연소기 내부로 유입되는 공기의 조건이 변화에 따른 공동 주위의 OH 분포를 나타낸 것이다. Fig. 8(b)-(d)에서는 OH 신호가 Fig. 8(a)과 비교하여 전반적으로 약하게 나타지만 화염의 가장 자리는 구별이 가능하다. Fig. 8(b)는 유사한 당량비 조건인 Fig. 8(a)와 비교하여 OH 신호의 높이가 훨씬 낮았다. 그러나 비록 신호의 강도는 약하지만, 화염의 구조가 두 개의 층으로 이루어져 있으며, 또한 분사구 근처에서 화염이 발생되고 있음을 확인할 수 있다.

여기서, Fig. 8은 주시하여 살펴볼 필요가 있다. 동일한 연료 분사 압력 조건에서 유입 유동의 전 엔탈피가 감소함에 따라 공동 부근에서 OH 신호가 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 특히, Fig. 8(d)에서는 OH 신호를 거의 확인할 수가 없다. 이는 (1) 전 엔탈피가 줄어들어 따라 공동 부근의 연소가 약해지고, (2) 시험부로 들어오는 laser sheet 에너지의 강도가 약해져서 OH기를 충분히 여기시키지 못하였으며, (3) 실험시 ICCD 카메라의 초점이 laser sheet 위를 정확히 맞추지 못하였을 가능성이 있다. 그러나 여기서, 매 실험마다 laser sheet이 동일한 기준에서 시작하도록 하기 위해 카메라의 초점이 laser sheet에 위치하는지를 확인하였다. 연소기의 앞부분에서 질소 유입 유동에서의 분사 압력 분포와 공기 유입 유동에서의 분사 압력 분포가 서로 유사함으로 보아, 낮은 전 엔탈피 조건에서 유입 유동의 온도는 공동 근처에서 자발점화를 일으키기에 충분하지 못한 것으로 보인다. 그러나 연소기 후반부로 갈수록 연료와 공기의 혼합이 더 증대되고 또한 반사되는 충격파와의 상호작용으로 인해 연소가 더 활발히 발생하게 된다.

4. 결론

본 논문은 공동을 지나는 초음속 연소기에서의 연소 실험에 대해 OH-PLIF 측정을 수행하였다.

1) 연소기 입구로부터 들어온 유동은 공동 뒷전에서 강한 경사 충격파를 형성하고, 이는 덕트 위, 아래면으로 반사되어 나아간다.

서로 다른 전 엔탈피의 유입 유동의 경우, 압력 밀도, 속도 마하수 등이 다름에도 불구하고 덕트 내부에서 형성되는 충격파의 구조가 서로 유사하게 형성되었다.

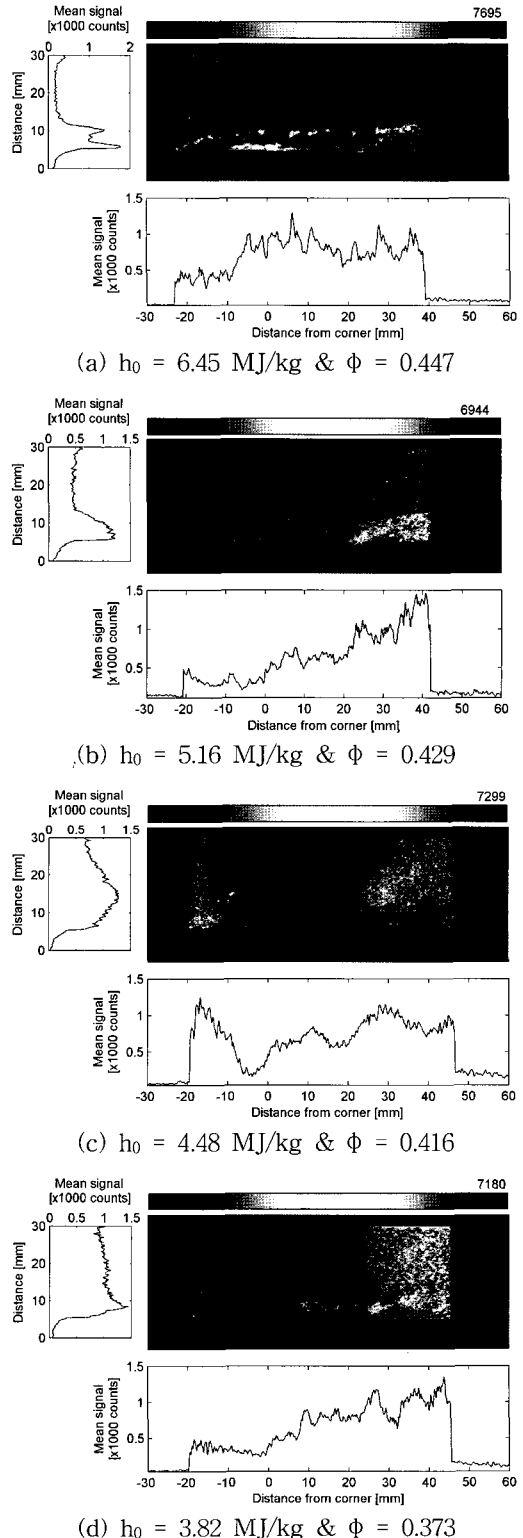


Fig. 8 OH-PLIF Image near the Cavity with Different Inflow Conditions

2) 공동 이전에서 연료를 분사하였을 경우에는 공동에서의 free shear layer의 성장률을 증가시켜 주므로, shear layer가 분사가 없을 때보다 증가된다. 뿐만 아니라 공동의 뒷전에서 발생하게 되는 충격파의 경우도, 연료분사가 있을 때는 두꺼워진 shear layer로 인해 재순환 영역이 작게 형성이 되고 따라서 공동의 뒷전 끝 부분에서 충격파가 발생하는 것으로 보인다. 또한 연료로 인해 shear layer의 두께가 증가되어 거의 공동의 뒷전 끝부분에서 경사충격파가 발생하기 시작하였다.

3) 화학반응의 경우, 당량비가 증가함에 따라 점차 화염이 분사구 근방에서 발생하게 시작하고, 분사구 이전에서 경계층의 박리로 인해 이 영역에서 재순환 영역이 발생하고, 화염이 유지된다. 높은 연료분사 압력의 경우 공동을 지난 부분에서도 계속적으로 제트 형상을 유지하며 초음속 유동장 내로 침투하므로, 제트 아랫면으로 유입되는 공기 유동은 전단층을 따라서 좀 더 쉽게 연료와 혼합될 수 있다. 따라서 연소로 인해 더 강한 OH 형광 신호가 이 영역에서 나타나며, 그 결과 연소기 내 세로 단면 이미지에서 두 개의 화염층이 보인다. 또한 공동 위에서 연소기를 따라서 규칙적으로 최대 OH 형광 신호가 나타났으며, 특히 당량비가 증가함에 따라 반복적으로 나타나는 OH 신호의 최대값의 간격이 더 짧아졌다. 동일한 연료 분사 압력 조건에서 유입 유동의 전 엔탈피가 감소함에 따라 공동 부근에서 OH 신호가 줄어들었다. 이는 여러 가지 가능성이 있으나, 연소기의 앞부분에서 질소 유입 유동에서의 분사 압력 분포와 공기 유입 유동에서의 분사 압력 분포가 서로 유사함으로 보아, 낮은 전 엔탈피 조건에서 유입 유동의 온도는 공동 근처에서 자발점화를 일으키기에 충분하지 못한 것으로 보인다. 그러나 연소기 후반부로 갈수록 연료와 공기의 혼합이 더 증대되고 또한 반사되는 충격파와의 상호작용으로 인해 연소가 더 활발히 발생하게 된다.

후 기

본 연구는 2005년 과학기술부 국가지정연구실 사업(NRL 과제 고유번호 M105000000-7205J000 007210)에 의해 지원된 연구과제 중 일부이며, 2005년도 두뇌한국21사업에 의하여 지원되었습니다. 이에 감사드립니다.

참고문헌

[1] Seiner, J. M., Dash, S. M., Kenzakowski,

D. C.,: Historical Survey on Enhanced Mixing in Scramjet Engines, Journal of Propulsion and Power, 2001, Vol.17, No.6, pp.1273-1286

[2] Adela Ben-Yakar, Ronald K. Hanson, "Hypervelocity combustion studies using simultaneous OH-PLIF and Schlieren imaging in an expansion tube," AIAA-1999-2453, AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, 35th, Los Angeles, CA, June 20-24, 1999

[3] 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

[4] Vinogradov, V., Kobigskij, A., Petrov, M. D., "Experimental Investigation of Kerosene Fuel Combustion in Supersonic Flow," Journal of Propulsion and Power, Vol. 11, No. 1, 1995, pp.130 - 134.

[5] Ortwerth, P., Mathur, A., Vinogradov, V., Grin, V., Goldfeld, M., Starov, A., "Experimental and Numerical Investigation of Hydrogen and Ethylene Combustion in a Mach 3-5 Channel with a Single Injector," AIAA - 1996 - 3245, ASME, SAE, and ASEE, Joint Propulsion Conference and Exhibit, 32nd, Lake Buena Vista, FL, 1 - 3 July, 1996.

[6] Gruber, M.R., Bauerle, R.A., Mathur, T., and Hsu, T.Y., "Fundamental Studies of Cavity-Based Flameholder Concepts for Supersonic Combustors," Journal of Propulsion and Power, Vol. 17, No. 1, 2001, pp.146 - 153

[7] Donbar, J.M., Gruber, M.R., Jackson, T.A., Carter, C.D. and Mathur, T., "OH Planar Laser-Induced Fluorescence Imaging in a Hydrocarbon-Fueled Scramjet Combustor," Proceedings of the Combustion Institute, Vol.2000, pp.679 - 687.

[8] Gruber, M.R., Donbar, J.M. and Carter, C.D., "Mixing and Combustion Studies Using Cavity-Based Flameholders in a Supersonic Flow," Journal of Propulsion and Power, Vol. 20, No. 5, 2004, pp.769 - 778.

[9] 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

[10] 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

- [11] O'Byrne, S.: Examination of Transient Mixing and Combustion Processes in a Supersonic Combustion Ramjet Engine, Mater's thesis, Australian National University, 1997
- [12] McIntosh, M. K. : Computer Program for the Numerical Calculation of Frozen Equilibrium Conditions in Shock Tunnels, Tech. rep., Australian National University, 1968
- [13] 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