

초음속 유입 유동 조건에 따른 공동을 포함한 덕트 내 초음속 연소 현상에 관한 실험적 연구

정은주[†] · 정인석^{*} · Sean O'Byrne^{**} · A.F.P Houwing^{***}

Experimental Study on Supersonic Combustion Phenomena in the Cavity Duct by the Supersonic Inflow Conditions

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 at the trailing edge of the cavity and reflects off the top and bottom wall. For non-reacting flow, static pressures in low equivalence ratio are similar to those in no fuel injection. As equivalence ratio is increased, static pressures are increased in the duct. In the similar equivalence ratio, static pressures are increased when total enthalpy is decreased. For reacting flow, the flame is occurred near the cavity. The combustion is weak locally in the middle of the duct. The up and down pressure distribution in the duct means that the supersonic combustion is generated.

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

1. 서 론

극초음속 공기 흡입 추진기관의 성공 여부는 초음속 연소기 내에서 적합한 연소기 형상, 효율적인 연료 분사, 연료-공기 혼합 및 연소과정에 있다고 해도 과언이 아니다. 특히 비행 마하수 5 이상의 극초음속 비행 속도에서 연소기 내부로 들어오는 공기가 과도한 과열과 공기의 해리되지 않게 하기를 막기 위해서는 반드시 연소기로의 유입 공기 유동이 초음속을 유지하여야 한다. 그 결과 연료 분사, 연료-공기 혼합 및 연소가 1 msec 단위로 이루어져야 하는데, 이러한 제약 조건을 해결하기 위해 현재 다양한 연료 분사 방법 및 연료-공기 혼합 증대에 관한 연구가 진행 중에 있다[1]. 뿐만 아니라 극초음속 공기 흡입

추진기관은 빠른 속도로 인한 기체의 열적 부하 및 공기 저항, 높은 유입 유동 밀도로 인한 엔진의 불발(unstart) 등을 피하기 위해 그 운용 고도에 있어서도 제약 조건이 따르게 된다. 따라서 본 연구에서는 shock tube의 공급 압력을 변화시킴으로써 초음속 연소기 내부로 들어오는 유동의 압력, 온도, 밀도, 속도 등을 변화에 따른 연소 현상에 대한 실험을 수행하였다. 초음속 연소기 내 압력분포와 화염 영역을 살펴보기 위해 고 주파수 압력 센서와 OH-PLIF 기법을 이용하였다. 또한 유입 유동 변화와 더불어 당량비도 함께 변화시킴으로써 연소기 내부의 화염 형태 및 정압력 분포를 살펴보았다.

* 서울대학교 항공우주공학과

† 연락처자, newaerol@snu.ac.kr

** Australian Defence Force Academy, Australia

*** Australian National University, Australia

2. 실험방법

2.1 초음속 연소기 설명

본 연구에 사용된 초음속 연소기는 길이 500mm, 폭 52mm, 높이 25mm를 가지는 사각형 덕트이다(figure 1). 덕트의 입구로부터 152.5mm 지점의 아랫면에 위치한 공동은 깊이가 5mm이며, 22.5°의 경사각을 가지고 있다. 이 공동의 가로세로비는 4.8이며, 개방형 공동이다[2]. 시험부의 위와 옆면에 PLIF 시스템의 가시화를 위해 UV 용융-실리카 가시화 장을 장착하였다[3].

연료 분사 시스템으로는 Ludwieg 투브를 사용하였다. 본 실험에서는 이 투브에 상온과 초기 설정 압력의 수소 기체를 채우는데, 이 때 초기 연료 압력을 시험 시간 동안 연소실 내의 전체적 당량비를 결정하게 된다. 수소 연료는 시험 기체가 덕트 내로 유입되기 약 50ms 전에 분사되며, 연료 분사의 지속시간은 shock tunnel에서 시험 기체의 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 70mm 지점에, 공동 내부의 압력을 측정하기 위해 공동 전단으로부터 15mm 지점에 압력 센서를 설치하였다. 또한, 덕트 입구로부터 203mm부터 20mm 간격으로 덕트 내 중심선을 따라 압력 센서를 설치하였다.

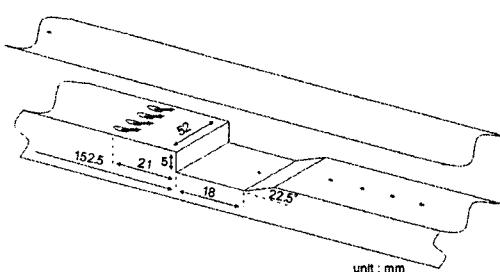


Fig. 1 Schematic of Supersonic Combustor

2.2 T3 자유 충격파 터널과 유동 조건

본 실험은 호주의 Australian National University에서 수행되었다. Compression tube 내 피스톤은 고압 공기 저장소에 의해 밀어내지게 되어 compression tube 내 존재하는 헬륨과 아르곤으로 구성된 driver gas를 압축시킨다. 피스톤이 compression tube의 맨 끝에 도달하면 compression tube내에 존재하는 driver gas와 shock tube내에 존재하는 test gas를 분리시키고 있던 철제 격막이 정체 상태의 driver gas에 의해 파열된다. 곧이어, shock tube 내에서 강한 충격파가 전파되고, 시험 기체가 가속된다. 이후 shock tube의 끝에서 충격파가 반사되어 정체되고, 노즐을 통해 빠져나간다.

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 0.5ms와 2ms 사이이다. 이러한 충격파 터널에서 시험 시간을 결정하는 주요한 두 가지 요소는 1)노즐 출구에서의 균일한 유동의 형성, 2)노즐 정체실로 driver gas가 도착함에 따라 시험 기체가 driver gas로 인해 혼탁해지는 점이다. T3 자유 충격파 터널을 이용한 앞 선 연구에 따르면[4], 전 엔탈피(h_0)가 4MJ/kg 일 때, 충격파가 노즐의 정체실에서 반사된 후 4ms 정도 까지는 시험 기체가 driver gas와 혼합이 되지 않는다. 또한, University of Queensland의 T4 자유 충격파 터널 실험에서는 전 엔탈피가 6MJ/kg 일 때, 충격파가 노즐 정체실에서 반사된 후 2.5ms 까지는 10%정도의 혼탁 정도를 보인다[5]. 따라서 본 실험에서는 레이저 평면광이 충격파가 정체실에서 반사된 후 1.5ms에서 동기화되므로 driver gas에 전혀 영향을 받지 않는다.

본 연구에서는 test gas의 조건을 변화시키기 위하여 shock tube에 채우는 test gas의 압력을 조절하였다. 즉, 철제 격막 파열에 의해 발생한 충격파는 그 속도가 test gas의 압력에 따라 달라지게되고, 따라서 shock tube 끝에서 충격파가 반사될 때, 정체 조건들을 변화시킨다.

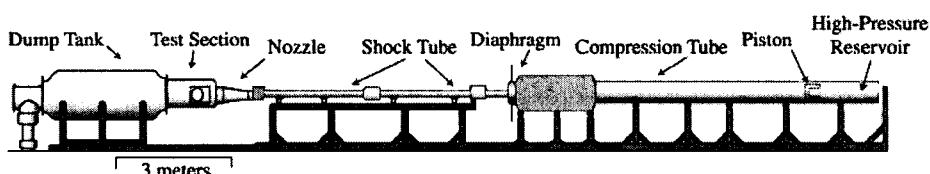


Fig. 2 T3 Free-Piston Shock Tunnel

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 1 Shock Tube and Nozzle Stagnation Properties

h_0 [MJ/kg]	P_∞ [kPa]	T_∞ [K]	ρ_∞ [kg/m³]	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 2 Freestream Conditions of Combustor Inlet

Ludwieg 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

Table 3 Fuel Injection Conditions

충격파의 속도와 노즐 정체실 압력은 PCB 사의 압력센서를 이용하여 측정하였으며, 이 값들은 노즐의 출구 조건을 위해 사용되는 ESTC(Equilibrium Shock Tunnel Code)[6]와 STUBE nozzle code의 입력값으로 이용된다. 따라서 이들을 이용하여 계산된 자유류 조건들을 표 1, 2에 제시하였다.

본 연구에서는 당량비에 따른 덕트 내의 초음속 연소 현상을 살펴보기 위해 Ludwieg 튜브 내에 Table 3에 제시한 세 가지 압력으로 수소 기체를 채웠다. 각 압력에 해당하는 당량비는 Table 3에 제시한 바와 같다.

수산화(OH)기는 고온 화학반응 중 나타나는 중간 생성물로서 연소가 발생하는 영역에서는 일종의 표지로서 사용된다[7]. 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 560nm와 570nm 사이에서 작동하게 된다. 이 색소 레이저로부터 나온 빛은 280nm와 285nm사이의 광장대로 주파수 배가 되고, 이 빛은 원주형 렌즈와 구형 렌즈의 조합을 이용하여 sheet의 형태로 변형되어, 덕트 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 50ns로 설정하였고, 레이저

산란과 광대역의 유동 발광성의 영향을 줄이기 위해 카메라의 렌즈 이전에 WG305와 UG11 필터를 장착하였다[3].

3. 결과 및 분석

3.1 No Fuel Injection

초음속 연소기 내 연료 분사로 인한 비화학 반응과 화학 반응에 대한 현상을 살펴보기에 앞서, 연료 분사 없이 주 유동에 의한 덕트 내 유동장의 특성을 먼저 살펴보았다.

Figure 3은 공동위를 지나는 공기 유동의 발광성(luminosity) 사진이다. 발광성 사진은 기체 원소가 고온, 고압에 의해 해리되면서 방출하는 빛이다. 이 사진으로 미루어보아 공동위에서 형성된 전단 유동이 더 이상 덕트 면에 평행하게 흐르지 못하고 기울어져 공동의 뒷 벽면에 부착하는 것을 확인할 수 있다. 또한 공동의 후반부에서 강한 발광 현상으로 살펴보아 이 부분에서 고온, 고압의 유동이 발생하고 있고, 이는 figure 4에서 나타낸 바와 같이 재 부착되는 전단 유동과 공동의 형상으로 인해 경사 충격파가 형성됨을 확인할 수 있다. 이 경사 충격파는 덕트의 뒷 벽면에서 부딪히고 반사되어 다시 아래 벽면에 반사되면서 덕트 후반부로 흘러간다. 이러한 사실은 figure 5에 나타난 압력 분포를 통해서도 알 수 있다.

Figure 5는 서로 다른 유입 유동 조건(본 실험에서 가장 낮은 전 엔탈피와 가장 높은 전 엔탈피)에 대한 덕트 내 압력 분포를 나타낸 것이다. 두 유입 유동에 대한 조건은 table 1, 2에 제시하였다.

우선, 두 유입 유동의 압력, 밀도, 속도, 마하수 등이 다름에도 불구하고 공동 내부 및 공동 뒷전 이후 확장부에서의 압력값은 서로 유사하였다. 그러나 공동의 뒷전에서 발생한 충격파가 덕트의 뒷 벽면에서 반사되어 덕트 아랫면 300mm 부근에서 다시 반사될 때, 두 유입 유동의 압력 최대치가 차이가 났다. 즉, 유입 유동의 전 엔탈피가 $h_o=6.45\text{ MJ/kg}$ 에서 $h_o=3.82\text{ MJ/kg}$ 로 감소함에 따라 압력값이 25% 정도 감소하였다. 이는 두 유입 유동의 서로 다른 마하수가 공동의 뒷전에서 다른 각도의 충격파를 발생시키기 때문이다. 이렇게 서로 다른 각도의 경사 충격파는 덕트 아랫면에서 반사되는 위치가 달라지게 된다. 그러나 압력 센서의 위치는 고정되어 있으므로 반사된 충격파의 위치에 의해 서로 다른 압력값을 나타내게 된다. 따라서 $h_o=6.45\text{ MJ/kg}$ 의 경우 $h_o=3.82\text{ MJ/kg}$ 보다 낮은 마하수로 인해 공동의 뒷전에서 상대적으로 높은 파각을 가지게 되어,



Fig. 3 No Fuel Injection (Luminosity)

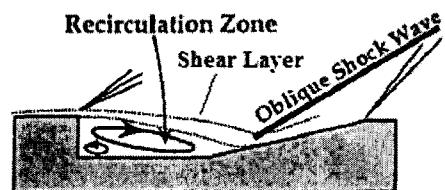


Fig. 4 Concept of Cavity Flow[2]

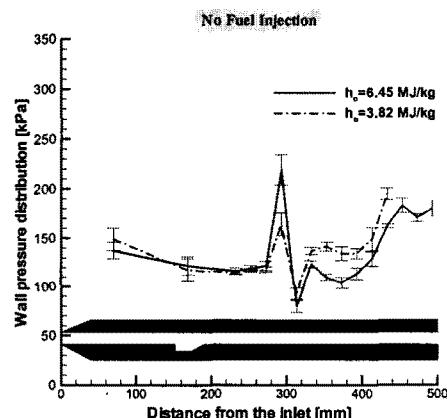


Fig. 5 Wall Pressure Distribution in no fuel injection case

$h_o=6.45\text{ MJ/kg}$ 의 경우 충격파가 압력 센서 이전, $h_o=3.82\text{ MJ/kg}$ 의 경우에는 충격파가 $h_o=6.45\text{ MJ/kg}$ 일 때 보다 압력 센서 근처에서 반사된 것으로 생각된다. 비록 두 유동의 절대적인 압력 최대치는 차이가 나지만, 압력 센서의 간격은 20mm이고, 전체적으로 덕트 내에서 압력의 높낮이는 두 유동 모두 동일하므로, 충격파의 구조는 동일하게 이루어진다고 볼 수 있다.

$x=300\text{mm}$ 이후 덕트 후반부로 갈수록 두 유동 모두 압력이 상승하였는데, $h_o=3.82\text{ MJ/kg}$ 의 압력이 $h_o=6.45\text{ MJ/kg}$ 의 압력보다 전체적으로 높았으며, 크게는 40% 정도 차이가 났다.

3.2 Non-Reacting Flow

초음속 연소기 내 비화학 반응을 모사하기 위하

여 주 유동으로 질소 기체를 이용하여 수소 연료와의 화학 반응이 일어나지 못하도록 유도하였다.

Figure 6의 그래프 (a)에서 $\phi = 0.132$ 의 경우, 덕트 내 압력분포가 연료를 분사하지 않았을 때의 압력분포와 거의 일치한다. 그러나 연료 분사 압력을 증가시켜 덕트 내 당량비를 증가시키면 점차적으로 덕트 내 압력분포가 증가함을 확인할 수 있다. 이는 0.132의 당량비의 경우, 덕트 내로 유입되는 연료 질유량은 연료 분사가 없을 때와 비교해보아 덕트 내 정압력을 크게 변화시키지 못한다는 것을 알 수 있다. 그러나 당량비를 2배, 4배로 증가시키면 당량비 0.223과 0.447의 덕트 내 정압력 분포는 서로 유사하며, 덕트 후반부에서 압력이 최대 25% 상승함을 확인할 수 있다. 뿐만 아니라, 덕트 내 정압력 분포 구조가 연료 분사가 없을 때나 있을 때 모두 유사하게 나타났는데, 이로써 세 경우에 대해 덕트 내부의 충격파 구조는 유사함을 확인할 수 있다.

또한 figure 6의 그래프 (a)에서 연료의 분사 압력을 증가시켜도 공동 내부의 정압력은 자유류의 정압력보다 낮거나 유사하게 나타났다.

Figure 6의 (b) 그래프는 (a)보다 낮은 전엔탈피에 대해 살펴본 것이다. (b)의 경우, 우선 당량비에 관계없이 공동 내부의 정압력이 자유류의 정압력보다 증가함을 확인할 수 있다. 특히 동일한 유입 질소 유동의 조건에 대해, 연료를 분사하지 않았을 때는 공동 내부의 정압력이 자유류의 정압력보다 낮았는데, 연료를 분사하였을 때 공동 내부의 정압력이 증가하였다. 이는 유입 유동의 전 엔탈피가 6.45MJ/kg에서 3.82MJ/kg로 감소하면서 속도 또한 감소하게 되고, 이로 인해 분사된 연료가 공동 내부로의 질량 유입으로 인해 전 압력을 증가시키고 더불어 정압력도 증가시켰을 것이라 생각된다.

비록 덕트 내로 유입되는 질소 유동이 초음속이라 하더라도 공동 내부에서는 유동의 박리에 의해 아음속 영역이 형성되고 재순환 영역이 발생

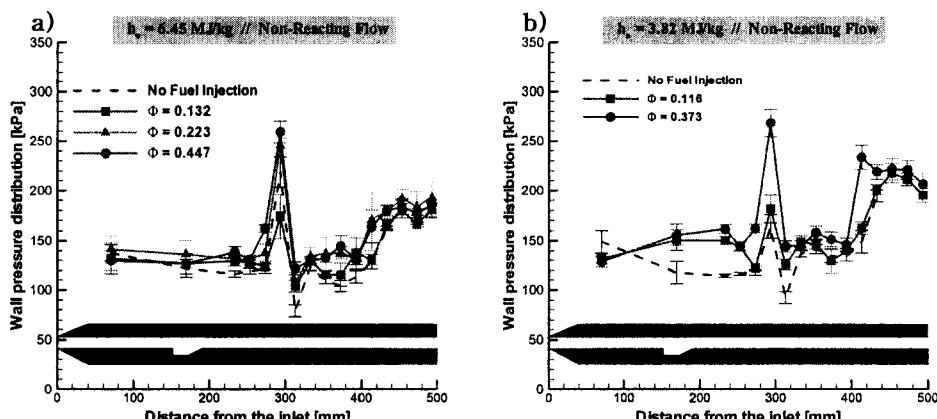


Fig. 6 Wall Pressure Distribution according to the Equivalence Ratio

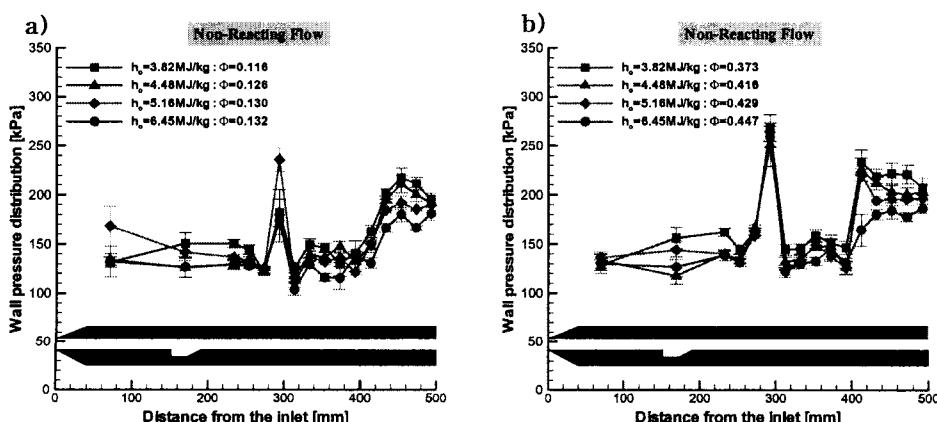


Fig. 7 Pressure Distribution according to the Total Enthalpy in Non-Reacting Flow

하므로, 재순환 유동의 속도에 따라 정압력이 달라지게 된다. 따라서 공동 내부의 압력에 대해서는 좀 더 많은 토의가 요구된다.

Fig. 7는 비화학 반응에서 낮은 당량비와 높은 당량비에 대한 덕트 내 압력 분포를 나타낸 것이다. 당량비에 관계없이 (a), (b) 모두 전엔탈피가 감소할수록 덕트 내 정압력은 증가함을 알 수 있다. 또한 두 그래프에서 길이 270mm와 410mm 부근에서 특히 당량비가 높아짐에 따라 정압력이 증가하는 것을 알 수 있는데, 이는 당량비를 증가시키기 위해 증가된 연료가 연료 분사구 앞에서의 경사 충격파 각도를 변화시키고, 따라서 덕트내 서로 다른 충격파의 구조를 만들기 때문이다.

뿐만 아니라 연료의 분사 압력을 변화시킴으로써 달라지는 덕트 내 연료의 질유량은 공동 뒷전에서 발생되는 경사 충격파의 각도와 위치를 변화시킴으로써 결국 덕트의 공동 후반부의 경사 충격파의 구조를 변화시킨다. 즉, $x=293\text{mm}$ 지점에서 압력값을 살펴보면, 낮은 당량비인 (a)에서보다 높은 당량비인 (b)에서 정압력이 더 크게 나타남을 알 수 있다. 이는 높은 당량비(b)의 경우, 증가된 연료의 질유량에 의해 공동 뒷전에서 발생하는 경사 충격파의 각도 및 위치를 변화시키게 되므로, 높은 당량비의 경우에는 낮은 당량비의 경우보다 경사 충격파가 압력 센서 근처에 반사됨으로써 보다 높은 압력을 나타낼 것으로 생각된다. 그러나 $x=293\text{mm}$ 지점에서의 압력의 표준편차 값이 다른 지점의 값들보다 크게 나타나는 것으로 보아 공동 뒷전에서 유동의 진동으로 인해 경사 충격파가 앞뒤로 진동하듯 발생되고 이로 인해 충격파가 반사되는 지점이 앞뒤로 진동하듯 변화하는 것으로 생각된다. 이러한 변화에도 불구하고 (a), (b) 그래프 모두 대해 주요하게 압력이 증가되는 지점은 공동의 뒷전으로부터 대략 100mm 후반부임을 알 수 있다.

덕트 입구로부터 $x=250\text{mm}$ 부근에서는 (a), (b) 모두 정압력 분포가 유사함을 확인할 수 있는데, 이는 공동 뒷전의 형상에 의해 유도된 강한 팽창파가 정압력을 감소시킴을 확인할 수 있다.

3.3 Reacting Flow

3.3.1 압력 측정

덕트 내 초음속 연소 현상을 살펴보기 위해, 공기 유입 유동과 수소 연료를 이용하였다.

Fig. 8은 전엔탈피에 따른 비화학 반응과 화학 반응의 덕트 내 압력을 비교한 그래프이다. (a)-(c) 모두 화학 반응의 경우 비화학 반응의 비해 공동 내부의 압력이 상승한 것으로 보아 공동 부근에서 화염의 발생으로 인해 압력이 상승

하였다. 그러나 (d)의 경우 공동 근처에서 비화학 반응과 화학 반응의 압력이 유사하게 나타난 것으로 보아 (d)와 같이 낮은 전엔탈피의 경우에는 공동 근처에서 연소 현상이 다른 경우에 비해 작은 것으로 생각된다. 또한, (a)-(d) 모두 $x=293\text{mm}$ 근방에서 강한 압력이 발생하는 위치가 동일한 것으로 보아 덕트 내부에서 연소가 발생하더라도 충격파가 반사되는 위치는 크게 달라지지 않음을 알 수 있다.

Fig. 8의 (a)-(d) 모두 당량비 0.11-0.13의 경우에는 화학 반응의 압력 분포가 비화학 반응의 압력 분포와 유사하게 나타났다. 이는 낮은 당량비의 경우 비록 덕트 내에서 연소가 발생한다 하더라도 그 정도가 매우 약하여, 덕트 내부 압력분포에는 거의 영향을 끼치지 않음을 알 수 있다. 또한, (a)-(d) 모두 $x=250\text{mm}$ 부근에서 비화학, 화학 반응 및 당량비에 관계없이 서로 유사하게 낮은 압력값을 나타내는 것으로 보아, 이 부근에서 일시적으로 화염이 약해지거나 꺼졌을 것이라 유추해 볼 수 있다. 이는 공동의 뒷전 이후 확산부에 의해 발생되는 팽창파가 연소를 약하게 만들었을 것이라 생각된다. 뿐만 아니라, $x=310\text{mm}$ 부근에서도 압력이 감소하는 것을 볼 수 있는데, 이는

반사된 충격파에 의해 유도된 확산부에 의해 국소적으로 압력이 감소되었을 것이라 생각된다. 이러한 부분들을 제외하고는 높은 당량비의 경우, 낮은 당량비에 비해 압력이 50% 이상 증가하는데, 전엔탈피가 감소함에 따라 이러한 증가 비율은 더욱 커짐을 알 수 있다. 뿐만 아니라 높은 당량비의 화학 반응의 경우에는 덕트 후반부로 갈수록 압력의 고저가 반복하여 나타나는데, 이는 덕트 내부에 충격파가 덕트 위/아래로 반사되어 후류로 진행하고 있음을 나타낸다. 이러한 압력 분포로 살펴보아 본 실험 조건들에서 초음속 연소 현상이 발생하고 있음을 확인 할 수 있다.

Fig. 9은 낮은 당량비와 높은 당량비에 대해 전엔탈피에 따른 덕트 내 압력 분포를 나타낸 것이다. (a)의 낮은 당량비에서는 전엔탈피 3.82MJ/kg의 경우를 제외하고는 전엔탈피에 관계없이 압력 분포가 유사함을 보여준다. 이는 적은 질유량의 수소 연료는 덕트 내로의 유입 공기의 속도나 온도에 민감하게 반응하지 않고 화염의 발생 정도가 유사할 것이라 생각된다. 그러나 (b)의 그래프에 제시된 바와 같이 높은 당량비에서는 전엔탈피가 낮아짐에 따라 덕트 내 압력이 점차적으로 증가함을 알 수 있고, 덕트 내에서 압력 고저가 동일하게 나타나는 것으로 보아, 충격파는 유입 공기의 전엔탈피에 상관없이 동일한 구조를 형성하였을 것이라 생각된다.

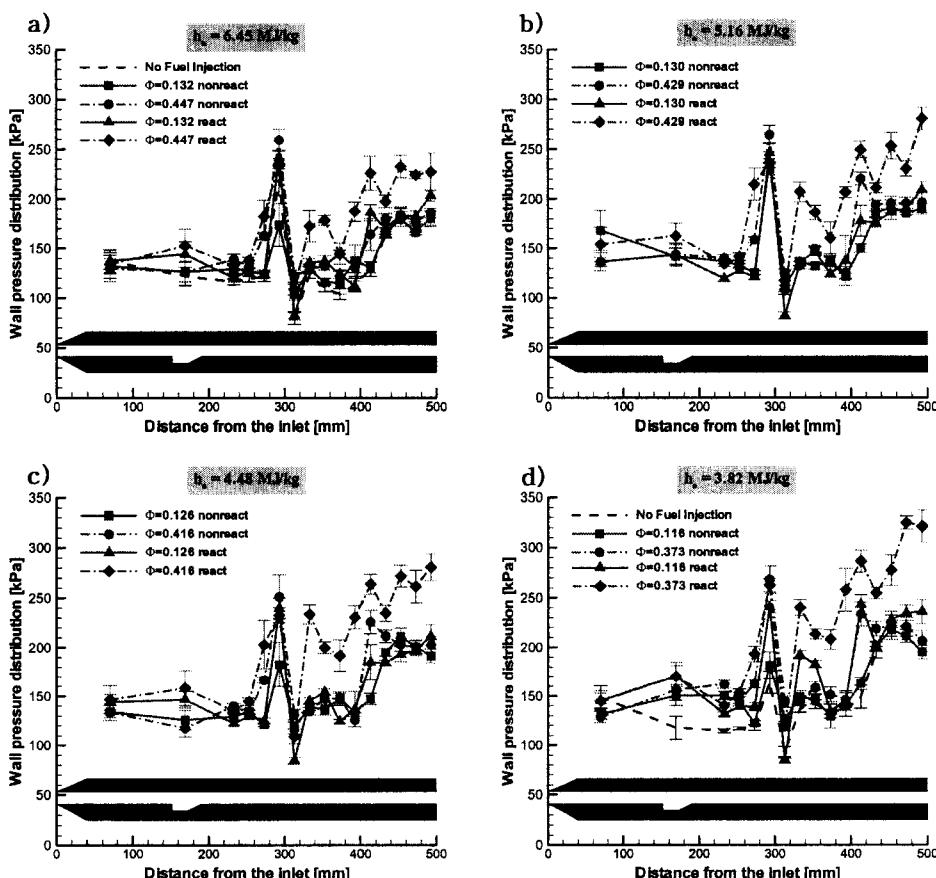


Fig. 8 Pressure Comparison between Nonreacting and Reacting Flow

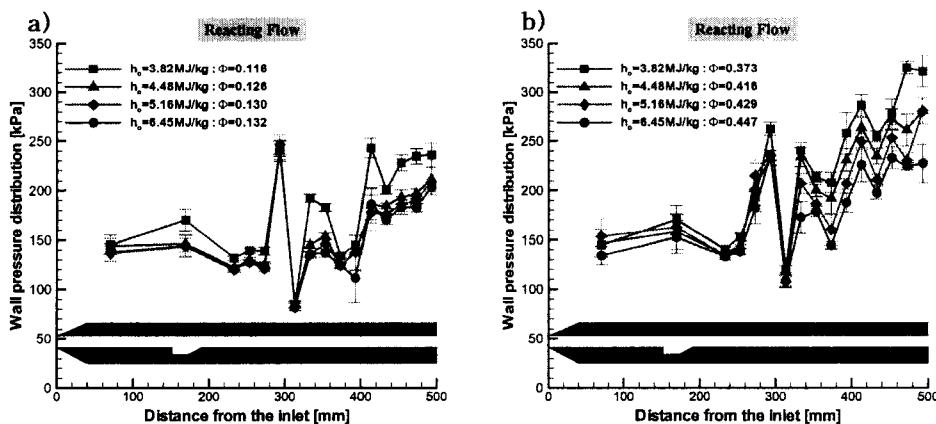


Fig. 9 Pressure Distribution according to the Total Enthalpy in Reacting Flow

Fig. 9의 (b)에서 전 엔탈피 3.82 MJ/kg 의 경우 덕트 마지막 500mm 부근에서의 압력이 다른 경우들에 비해 급격히 증가됨을 확인할 수 있는데, 이는 덕트 후반에서 과도한 연소로 인해 압력이

급격히 상승된 것으로 보인다.

Fig. 10은 시간에 따른 덕트 내 압력 분포를 나타낸 것이다. (a) 그래프는 $h_0 = 6.45 \text{ MJ/kg}$, $\Phi = 0.447$ 일 때의 화학 반응에 대한 덕트 내 압력 분

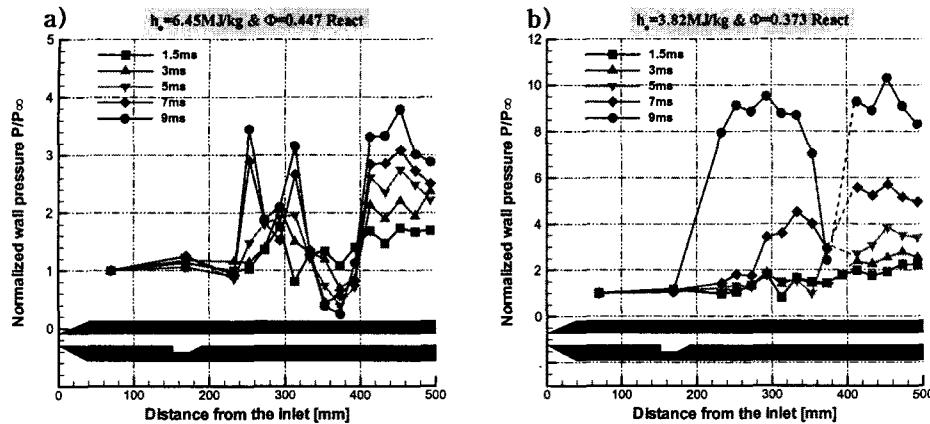


Fig. 10 Pressure Time Traces

포이고, (b) 그래프는 $h_0=3.82 \text{ MJ/kg}$, $\phi=0.373$ 일 때의 화학 반응에 대한 덕트 내 압력 분포를 시간에 따라 나타낸 것이다. 충격파 관 내 충격파가 노즐의 정체실에서 반사되었을 때의 시간을 0sec으로 보았을 때, 그 이후 시간 1.5ms, 3ms, 5ms, 7ms, 9ms일 때의 압력 분포를 자유류의 압력으로 평준화하였다.

(a)의 경우 시간이 지남에 따라 덕트 내에서 압력의 높고 낮음이 지속됨으로 보아 초음속 유동장이 유지되고 있음을 알 수 있다.

(b)의 그래프에서 1.5ms, 3ms, 5ms, 7ms, 9ms일 때, 각각 450mm, 370mm, 350mm, 260mm, 그리고 공동 뒷전까지 압력이 차츰 상승되어 덕트 앞으로 밀려오고 있음을 확인할 수 있다. 이는 덕트 후반부에서 연소로 인한 압력 상승으로 인해 열적 질식 현상이 나타나고 수직 충격파가 발생하며, 충격파 이후에서는 아음속 유동장이 형성되고 이로 인해 상승된 압력이 수직 충격파를 덕트의 상부로 밀어내는 것이다. 따라서 Fig. 7의 (b)에서 $h_0=3.82 \text{ MJ/kg}$, $\phi=0.373$ 일 때 450mm 부근에서의 압력 분포는 아마도 열적 질식으로 인한 압력 상승이 시작되고 있음을 나타내는 것 같다. 그러나 (b)의 그래프에서 9ms일 때, $x=370\text{mm}$ 부근에서 압력값이 갑자기 낮아지는 현상에 대해서는 좀 더 고찰이 요구된다.

3.3.2 OH-PLIF 신호 분석

Fig. 11은 연료 분사구 및 공동 주위에서 발생하는 초음속 화염의 OH-PLIF 신호를 나타낸 것이다. 그림 (a)-(c)는 $h_0=6.45 \text{ MJ/kg}$ 인 유입 공기 유동에 대해 서로 다른 당량비에 대한 OH기 신호를 촬영한 것이다. 당량비가 증가할수록 OH기

신호가 연료 분사구 근처에서부터 발생하기 시작하였다. 본 실험에서 당량비의 증가는 연료 유동의 운동량 증가를 의미하므로, 이러한 운동량 증가로 인해 연료 유동과 공기 유동과의 강한 전단층이 발생하고 이 층에서 점화가 시작된다. 또한, 당량비가 증가할수록 연료 분사구 앞에서 발생하는 경사 충격파의 강도는 점차 강해지므로 이 충격파 뒤에서 상승된 온도로 인해 점화가 더 쉽게 일어나게 된다.

Fig. 11의 (a)에서 OH기의 신호가 공동 앞점 근처에서 대략 25° 로 경사져 있다. 이는 공동 내부에서 유동의 공동 깊이 방향으로의 진동 현상이 발생함으로 인해 공동 앞전에서 경사 충격파가 발생하게 되고 이로 인해 화염이 발생한 것으로 보인다. 이러한 현상은 당량비가 증가된 경우에는 나타나지 않음을 알 수 있는데, 이로써 공동 앞전에서 발생하는 충격파는 당량비를 증가시킬 경우 당량비를 증가시킬 경우 화염 형성에 있어서 주요한 요인이 되지 않음을 알 수 있다.

Fig. 9의 좌측 사진의 그래프는 유동이 훌러감에 따라 OH기의 신호가 강하게 나타나는 부분이 반복적으로 되풀이 되어 나타났다. 특히, (a)에서 (c)로 당량비가 증가함에 따라 강한 OH기의 신호 반복 정도가 빈번해짐을 알 수 있다.

Fig. 11의 우측 사진의 그래프는 덕트 내 높이에 따른 평균 OH기의 신호를 나타내었다. 사진 (c)에서 신호의 높이가 (a)에서보다 높은 것으로 미루어보아 연료와 공기가 혼합되는 위치가 상승된다. 즉, 비록 덕트 바닥에서 경사 분사를 하더라도 당량비가 증가할수록 연료의 덕트 내부로 침투거리가 증가함을 알 수 있다. 그러나 사진 (c)의 경우 사진 (a), (b)와는 달리 OH기의 신호가 두 줄의 띠 형식을 이루고 있다. 이는 높은 압력

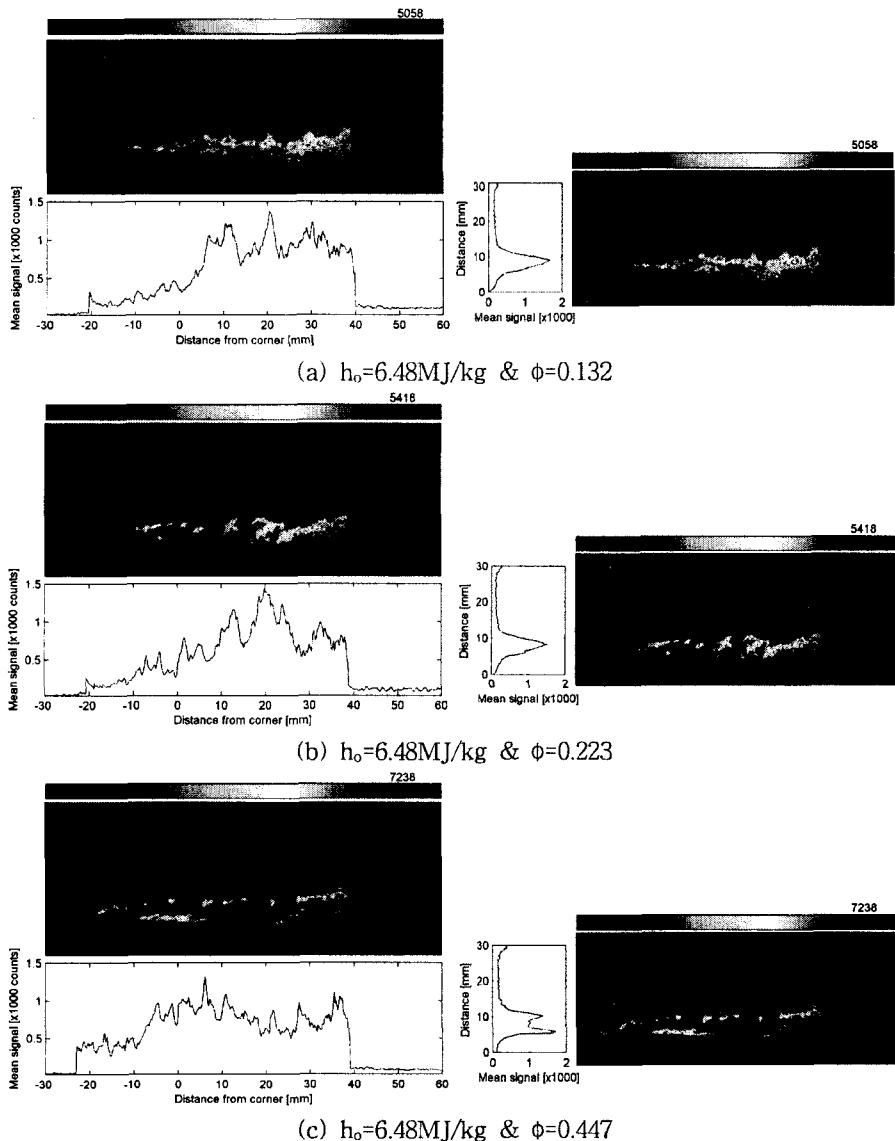


Fig. 11 OH-PLIF Image near the cavity

으로 분사된 연료가 높은 운동량을 가지고 후류로 이동하므로 공기 유동이 연료 유동의 위 아래로 침투하여 연료 주위 혼합층에서 화염이 발생하게 된다.

또한, Fig. 11 (a)-(c)의 OH기 신호로 미루어보아 높은 연료 유동의 운동량은 연료와 공기의 혼합이 잘 이루어지지 않음을 알 수 있다. 따라서 비록 공동이 있다 하더라도 높은 연료 운동량이 경우 공동으로 인해 공기와 연료의 혼합이 증진되거나 화염이 유지되지 않을 수 있다.

Fig. 11의 (d)의 좌측 그래프를 살펴보면, (a)와 마찬가지로 덕트의 길이 방향을 따라 강한

OH기 신호가 반복적으로 나타났다. 그러나 유사한 당량비 조건인 (a)와 비교해 볼 때, 최대 신호 간 간격이 더 넓게 나타났다. 또한, (d)의 덕트 높이 방향의 그래프를 살펴보면, 최대 OH기 신호의 높이가 유사한 당량비 조건인 (a)에 비해 낮게 나타났다.

Fig. 11의 (e) 사진의 경우 OH기 신호의 분포가 (a)-(d)에 비해 전반적으로 약하게 나타나긴 하였으나 화염면의 경계는 어느 정도 파악할 수 있다. 그 결과, (e)의 경우에도 유사한 당량비인 (c)에 비해 덕트 내 OH기의 신호 높이가 낮게 나타났으며, 약하기는 하나 공동 이전에서 OH기의

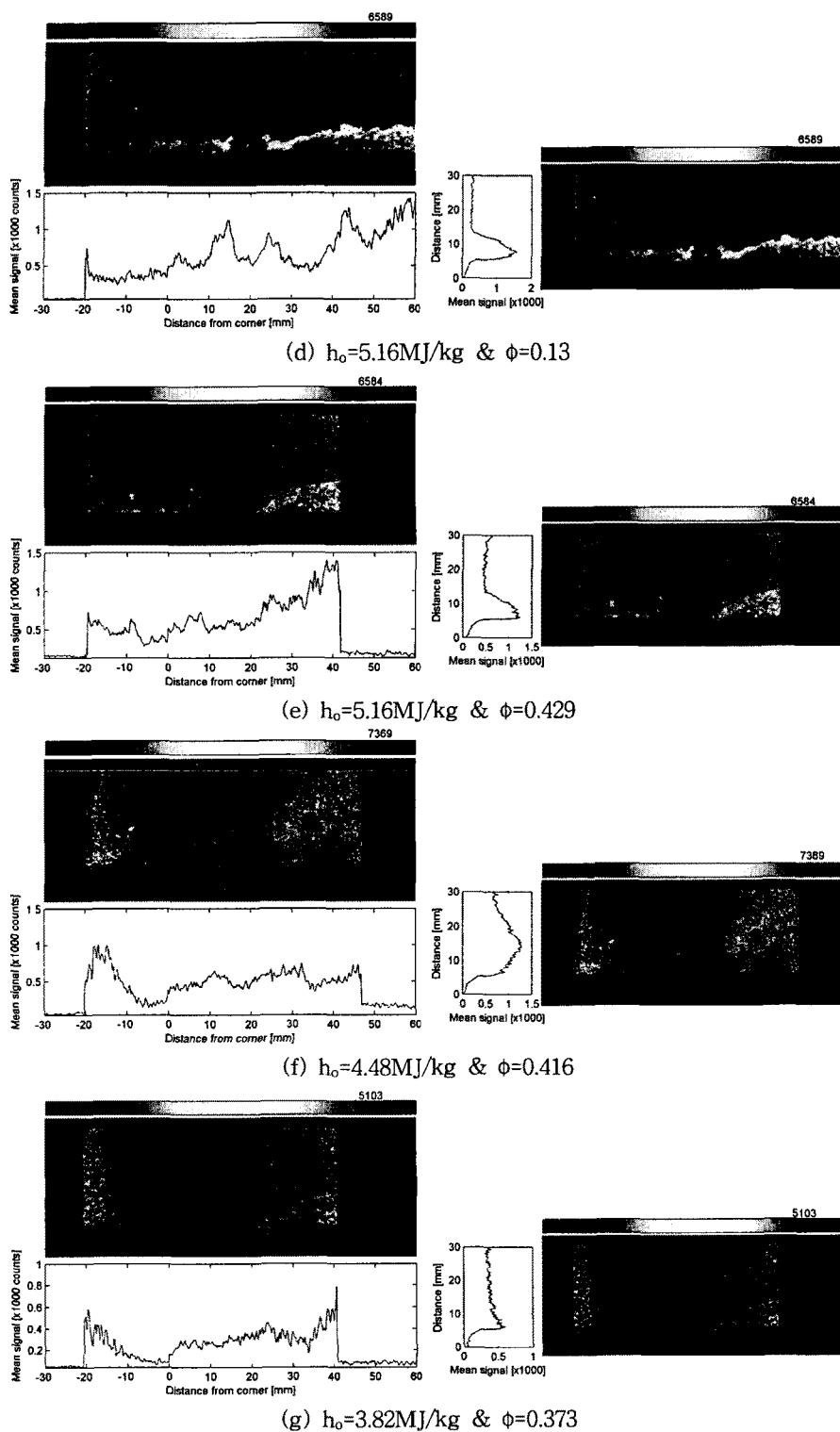


Fig. 11 OH-PLIF Image near the cavity (continued)

신호가 두 줄의 띠 형상을 이루고 있으며, 연료 분사구 근처에서 약한 OH기 신호를 볼 수 있다. 여기서 주시할만한 점은 (c), (e), (f), (g)의 OH PLIF 사진이다. 즉, 덕트 내로 유입되는 공기 유동의 전 엔탈피가 감소할수록 공동 주위에서 발생하는 OH기의 신호가 점차 약해짐을 확인할 수 있다. 특히, (g)의 사진에서는 OH기의 신호를 거의 찾아볼 수 없다. 이는 (1)본 실험에서 전 엔탈피가 감소할수록 공동 주위에서의 연소 현상이 약해지거나 (2)실험 당시 평면 레이저의 에너지가 약해져서 OH기를 충분히 여기시키지 못하였거나 (3)ICCD 카메라의 초점이 2차원 레이저 면을 맞추지 못하여 OH기의 신호를 제대로 포착하지 못하였을 가능성이 있다. 그러나 Fig. 8의 (d)에서 공동 내부의 압력이 화학 반응에서와 비화학 반응에서의 값이 서로 유사한 것으로 보아 (1)의 가능성이 클 것으로 예상된다.

4. 결 론

본 논문은 공동을 지니는 초음속 연소기에서의 연소 실험에 대해 정압력과 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 구조는 동일하게 형성되었다.

2) 비화학 반응의 경우, 낮은 당량비($\phi=0.1$)에서 덕트 내 정압력 분포는 연료분사가 없을 때의 정압력 분포와 유사하였고, 당량비가 증가할수록 덕트 내 정압력이 증가하였다. 유사한 당량비에서, 전 엔탈피가 감소할수록 덕트 내 정압력은 증가하였다.

3) 화학반응의 경우, 공동 부근에서 화염이 발생하여 공동 내부에서 압력이 상승하였다. 그러나 낮은 전 엔탈피의 경우 공동 내부의 정압력이 비화학 반응의 값과 유사하게 나타나는 것으로 보아 연소 현상이 약하게 발생함을 알 수 있으며, OH-PLIF 신호를 통해서도 확인 할 수 있었다.

모든 유입 유동 조건에서 낮은 당량비의 경우 덕트 내에서 미약한 연소가 발생하였다. 또한 덕트 중간 부분에서 모든 조건에 대해 연소가 국소적으로 약해졌다.

높은 당량비의 경우 낮은 당량비에 비해 압력이 50% 이상 증가하였으며, 전 엔탈피가 감소함에 따라 이러한 현상은 더욱 크게 나타났다.

덕트 내 정압력 분포에서 압력의 높고 낮음은 초

음속 연소가 발생함을 나타낸다.

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] 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
- [3] 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
- [4] O'Byrne, S.: Examination of Transient Mixing and Combustion Processes in a Supersonic Combustion Ramjet Engine, Mater's thesis, Australian National University, 1997
- [5] 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
- [6] McIntosh, M. K.: Computer Program for the Numerical Calculation of Frozen Equilibrium Conditions in Shock Tunnels, Tech. rep., Australian National University, 1968
- [7] 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