

Research Paper

DOI: <https://doi.org/10.6108/KSPE.2021.25.2.001>

## 초음속 연소기 내 공동 형상에 따른 유동 특성

임건욱<sup>a</sup> · 노태성<sup>a</sup> · 이형진<sup>a,\*</sup>

### Flow Characteristics in a Supersonic Combustor with a Configuration of a Cavity

Geon Wook Yim<sup>a</sup> · Tae-Seong Roh<sup>a</sup> · Hyung Jin Lee<sup>a,\*</sup><sup>a</sup>Department of Aerospace Engineering, Inha University, Korea<sup>\*</sup>Corresponding author. E-mail: [hyungjin.lee@inha.ac.kr](mailto:hyungjin.lee@inha.ac.kr)

#### ABSTRACT

The cavity inside the combustor increases the mixing efficiency of fuel and air by inducing a oscillation of the flow and the recirculation area with a low speed, and enables continuous combustion by maintaining the flame. In this study, the characteristics of the internal flow by change in the shape parameters of the cavity were analyzed through experiments and two-dimensional computational analysis. It was observed that the flow in the supersonic combustor was greatly influenced by various shape parameters of cavity besides L/D. Even with the same L/D, it was confirmed that the flow type varies depending on the depth of the cavity, either open or closed type, and the aft ramp angle of the cavity and the height of the combustor also affect the flow characteristics. As a result, the change in the shape parameters of the cavity had a great influence on the total pressure loss.

#### 초 록

연소기 내부의 공동은 낮은 속도의 재순환영역과 유동의 진동을 일으켜 연료와 공기의 혼합 효율을 증대시키고, 화염을 유지함으로써 지속적인 연소를 가능하게 한다. 본 연구에서는 공동의 형상 인자에 따른 내부 유동의 특성을 실험과 2차원 전산해석을 통해 관찰하였다. 초음속 연소기 내 유동은 단순히 L/D 이외에도 다양한 공동 형상인자에 따라 크게 영향을 받는 것이 관찰되었다. 동일 L/D에서도 공동의 깊이에 따라 open과 closed 형태가 나타남을 확인하였고, 공동의 후방 경사각, 연소기 높이도 유동 특성이 달라지며, 이는 전압력 손실에 큰 영향을 미치는 것을 확인하였다.

Key Words: Scramjet(스크램 제트), Cavity(공동), Closed Cavity(Closed 공동)

#### 1. 서 론

Received 28 December 2020 / Revised 19 February 2021 / Accepted 24 February 2021  
Copyright © The Korean Society of Propulsion Engineers  
pISSN 1226-6027 / eISSN 2288-4548

최근 여러 국가에서 극초음속 비행체의 개발 및 운용을 위한 노력을 하고 있다. 그중 스크램

제트 엔진은 군사 및 수송의 목적으로 다양한 연구가 이루어지고 있다. 스크램제트 엔진 개발에 있어 연소기에서 공기의 체류시간이 매우 짧기 때문에 연료와 공기의 혼합과 보염 효과의 증대는 매우 중요한 요소 중 하나이다. 이를 위해 다양한 연구가 이루어지고 있으며, 그 중 연소기 내부의 공동(Cavity)은 가장 현실적인 방안 중 하나로 널리 연구되고 있다[1].

공동 주위의 초음속 유동은 공동의 형상에 크게 의존한다. 따라서 공동 형상에 따른 유동 특성에 대한 연구가 주로 수행되었으며, 먼저 길이 직경비(L/D)의 영향에 많은 관심을 두었다. Yakar와 Hanson은 공동의 L/D에 따라  $L/D < 7-10$ 을 전단층이 공동 후류 벽면에 부착되는 open 공동이라 하였으며,  $L/D > 10-13$ 을 전단층이 공동의 바닥면에 부착되는 closed 형태로 구분하였다[2]. Palharini 등은  $10 < L/D < 14$ 에서 open과 closed의 형태를 반복하는 유동 천이 특성을 보고한 바 있고[3], Baysal과 Tallings는  $L/D = 6, 12, 16$ 을 가지는 공동에서 실험 및 전산 해석을 통해  $L/D = 12$ 에서 유동 천이 특성을 관찰하였다[4]. Das 등은  $L/D = 2$ 에서 공동의 폭에 따른 공동 부근의 유동장에 대해 실험적으로 관찰하였으며, 공동의 폭이 증가할수록 난류의 크기가 증가함을 보였다[5]. Kumar 등은  $L/D = 5 \sim 10$ 의 직사각형 공동의 깊이가 후류 연소기의 경계층 두께에 영향을 미치는 것을 관찰하였고, 경계층 두께는 깊이가 감소할수록 증가하는 것을 확인하였다[6]. 또한 공동의 후방 경사각이 공동 주위 유동 안정화에 미치는 연구도 수행되었다. Moradi는 사다리꼴, 직사각형, 원형 공동을 적용한 전산 해석을 통해 사다리꼴 공동이 연료/공기 혼합에 가장 효과적임을 주장하였고[7], Gruber와 Maurya 등은 공동의 후방 경사각이 감소할수록 유동장이 안정화되는 것을 보고한 바 있다[8-9]. 최근에는 연료/공기의 혼합 성능 증대를 위해 다수의 공동을 연소기에 적용하는 연구도 활발히 진행되고 있다. 선행 연구 결과에서 2개의 직렬형 공동배치가 단일 공동보다 연소기의 효율이 증가하는 것을 실험적으로 관찰하였고, 다양한 L/D의 조합에서의 연소기의 효율을 관

찰하였다[10-11]. 국내에서도 공동에 관한 다양한 연구[12-17]가 수행된 바 있지만, 형상에 관한 연구는 많지 않다. Seo는  $L/D = 1$  공동에 대해 크기에 따른 전산 해석과 실험 연구를 수행하였고, 공동의 크기가 혼합 효과를 개선하는 요소임을 보였다[18]. Oh는 L/D가 클수록 vorticity의 값이 증가하고, 이에 따라 전압력 회복율이 증가하는 것을 확인하였다[19].

이처럼 초음속 유동에서 공동의 다양한 형상 인자에 대한 연구가 진행되었으나, 공동의 L/D에 따라서만 open과 closed의 형태로 구분하고 있다. 그러나 같은 L/D에서도 길이와 깊이에 따라 다양한 형상을 가질 수 있고, 이에 따라 유동의 형태가 변할 수 있다. 또한 open 공동은 공동의 스케일이 큰 closed 공동보다 압력손실이 적어 연소기 성능이 더 좋다고 알려져 있지만, 최근에는 open과 closed의 조합으로 안정성과 불안정성을 모두 보유한 연소기 제작으로 혼합과 보염의 효과에 대한 연구가 진행되고 있다. 그러나 closed 공동의 경우 불안정한 유동 특성으로 인해 상대적으로 진행된 연구가 많지 않다. 이에 본 연구에서는 공동에 갖는 초음속 연소기 모델에 대해 실험 및 전산 해석을 통해 내부 유동의 특성을 관찰하고 closed 공동에서 공동의 길이(length)와 깊이(depth), 연소기의 높이(height), 후방 경사각(ramp angle)을 변경해가며 내부 유동의 변화를 관찰하였다.

## 2. 연구 수행 기법

### 2.1 실험 장치 및 모델

본 실험은 전형적인 불어내기식 초음속 풍동을 이용하여 수행되었다. 초음속 풍동은 압축 공기 저장 탱크, On/Off 밸브, 압력 조절밸브, 정체실, 노즐, 시험부, 디퓨저로 구성되어 있으며, 본 연구에서는 시험부가 연소기 모델에 해당한다. Fig. 1은 실험에 적용된 풍동의 모습과 연소기 모델을 나타낸다. 정체실은 Vitiated heater 방식으로 고온의 가스를 공급할 수 있도록 설계 제작되었으나, 본 연구에서는 유동 특성 만에 초

점을 두어 상온의 공기만을 공급하도록 하였다. 정체실 후방에는 2차원 contoured nozzle을 이용하여 초음속 유동을 발생하였으며, 노즐 끝단에 일정 길이를 갖는 고립부(isolator)를 두고 이후에 2차원형 연소기 모델을 연결하였다. 노즐부터 연소기까지는 내부 가시화를 위해 양 옆은 강화유리를 이용하였고, 연소기 모델 하부에 공동을 적용하였다. 본 연구에서는 형상이 다른 공동부를 교체할 수 있도록 실험 장치를 블록형으로 설계 제작하였다.

실험에 적용된 초음속 노즐의 설계 마하수는 2.0으로, 길이 110 mm, 폭 30 mm, 노즐 출구에서의 높이는 10 mm 로 설계 제작하였다. 노즐 하류에는 100 mm 길이의 고립부를 두었으며, 그 후에 연소기를 연결하였다. 고립부를 지난 유동은 경계층의 영향으로 마하수 1.8로 감소한 후 연소기에 들어간다. 연소기의 상부는 유동의 질식을 감안하여 3°의 확산 각을 적용하였고 하부

에는 혼합 및 보업을 위해 공동을 적용하였다. 연소기에 적용된 공동은 이미 알려진 open과 closed의 특성을 관찰하기 위해  $L/D=2, 7, 12$ 를 제작하여 적용하였다. 실험 연구에서는 공동의 깊이(D)는 고정하고, L을 조절하여  $L/D$ 를 변경할 수 있도록 하였다. 공동의 후방 경사각은 20°를 적용하였다.

## 2.2 실험 데이터 획득

연소기에서의 유동 특성을 관찰하기 위한 실험 데이터는 일반적인 쉘리렌 가시화 기법을 이용한 이미지와 연소기 벽면에서의 압력을 획득하였다. 쉘리렌 이미지는 초고속 카메라를 이용하여 초당 10000이미지를 획득하였다. 압력계측은 Kulite사와 Sensys사의 압력센서를 이용하였다. Sensys사의 압력센서를 사용하여 정체실에서의 압력을 측정하였으며, 이는 정체실과 노즐 목의 비가 충분히 커서 연소기 모델로 유입되는 유동의 전압력( $P_0$ )을 대신하는 것으로 하였다. 연소기모델의 상부면에서 Kulite 센서를 이용하여 압력을 측정하였다.

## 2.3 전산해석 기법

공동의 기본 형상에 대한 실험적 관찰 외 다양한 형상 변수에 따른 유동 형태를 관찰하기 위해 전산해석을 병행하였다. 본 연구에서는 상용 전산유체 해석 프로그램인 Star-CCM+, 14.02를 사용하였다. 밀도 기반 압축성 해석 솔버를 이용해 2차원 RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes equations) 정상상태 해석을 수행하였다. 비점성 대류항에 AUSM+ FVS 기법을 적용하고 3차 정확도를 유지하기 위해 MUSCL 기법을 적용하였다. 난류 모델로는 Wilcox의 압축성 효과가 보정된  $k-\omega$  SST 모델을 적용하였다. 실험 연구와 동일하게 공기를 작동유체로 하였으며 이상 기체로 가정하였다. 기체 점성은 sutherland's law, 비열은 온도에 따른 다항식을 이용하여 계산하였다. 해석영역은 계산비용을 줄이기 위해 노즐을 제외한 연소기 형상만으로 제한하였으며, Fig. 2에 제시된바와 같이 Polygonal 형태의 13만개 격자를 적용하였다. 난류 경계층

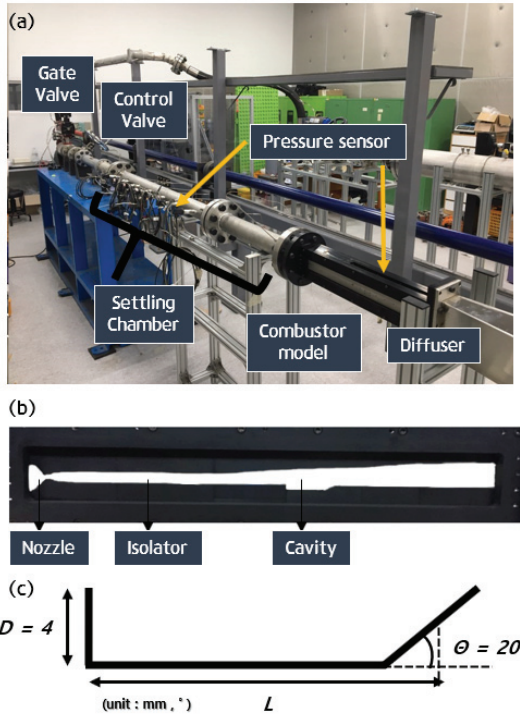


Fig. 1 (a) supersonic wind tunnel (b) combustor model (c) cavity configuration.

을 모사하기 위해 벽면에 격자가 밀집되도록 하였으며, 벽면에서의  $Y^+$ 는 1정도로 유지하도록 하였다. Fig. 3은  $L/D=12$ 의 모델에 대한 격자의존성 결과이다. 0.1, 0.2, 0.5, 1.0 mm의 격자 크기를 고려하였다. 0.1 mm와 0.2 mm를 적용한 결과에서 연소기 벽면 압력 값은 거의 동일하였으며, 이에 격자 크기는 0.2 mm로 설정하였다.

전산해석에 적용된 경계조건으로는 연소기 입구에서는 실험 결과를 통해 추정된 마하수와 계측된 압력을 바탕으로 초음속 경계 조건을 적용하였다. 앞서 언급한 바와 같이 고립부 중단, 즉 연소기 입구에서는 경계층의 관찰과 계측된 압력을 바탕으로 마하수 1.8을 도출하였다. 3차원 노즐 및 고립부 유동 해석을 통해 고립부 출구 유동의 마하수가 실험을 통해 도출한 마하수와 거의 일치하는 것을 확인하였고, 출구 중앙면에서의 유동 특성값을 연소기 입구 조건으로 적용하였다. 본 연구에서 적용된 주유동의 압력과 온도는 1.047 bar, 182.04 K에 해당한다. 또한 연소

기 입구 단위 레이놀즈 수는  $7.38 \times 10^7$ 이다. 연소기 출구에서는 마찬가지로 초음속 조건으로 외삽조건을 적용하였다. 연소기 벽면에서는 no-slip, 단열 조건을 적용하였다.

공동 주위 유동 특성에는 여러 요인이 영향을 미치지만, 유동 마하수에 크게 의존하므로 본 연구에서는 실험이 용이한 조건에서 가시화 결과를 확보하였다. Fig. 4에 동일한 마하수에 대해 유동의 온도 조건을 변경하여 수행한 전산해석 결과로 공동 주위에서 발생하는 유동 특성은 큰 차이가 없는 것을 확인할 수 있다.

#### 2.4 전산해석 기법 검증

본 연구에 적용된 전산해석 기법에 대한 검증은 일차적으로 다음절에 제시한 가시화 결과의 비교로부터 수행하였다. 공동 주위 충격파 및 팽창파의 위치가 미세하게 다르지만, 비교적 잘 일치한 것을 확인하였다. Fig. 5에 전산해석 및 실험에서 측정된 압력 결과 그래프를 제시하였다.  $L/D$ 에 따른 P2 압력은 실험과 전산해석 결과가 유사하지만 P3에서는 다소 차이가 관찰된다. 이는 3차원 효과와 비정상 유동 특성에서 발생하는 것으로 판단된다. 앞서 언급한 바와 같이,  $L/D=2$ 와 7의 경우, Fig. 6과 Fig. 7에서 볼 수 있듯이, 공동에서 발생한 충격파와 공동 후방에서 발생하는 팽창파의 각도가 약간의 차이가 발

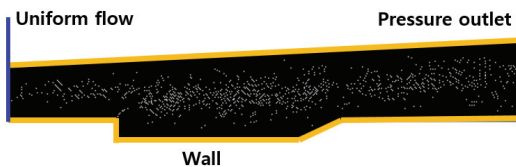


Fig. 2 Analysis domain

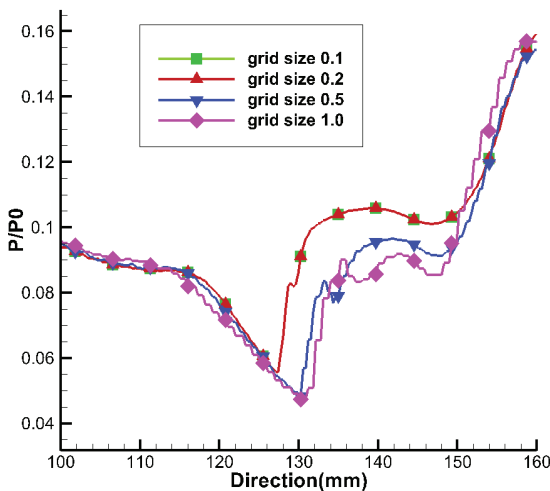


Fig. 3 Simulation results with grid size.

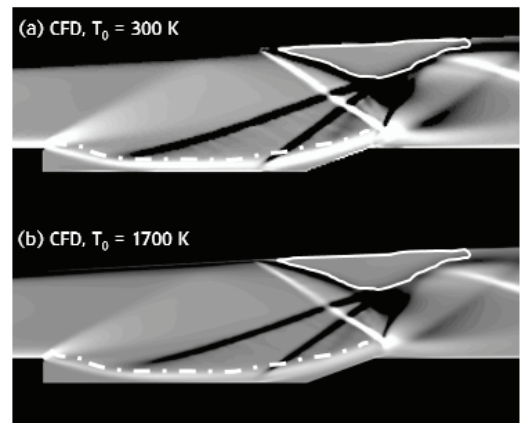


Fig. 4 Flow visualization images (a)  $T_0=300$  K (b)  $T_0=1700$  K.

생하며 이로부터 압력에서도 다소 차이가 발생한다. L/D=12 경우에는 정상상태로 가정한 전산 해석의 P3 압력은 실험에서 측정된 최대 최소 압력 범위와 유사한 것을 확인하였다. P3에 대한 실험 결과와 전산해석 결과가 다소 차이가 있지만, 유동 가시화 결과로부터 전반적인 유동 특성이 유사한 것을 확인하였고 본 연구의 목적이 특정한 공동 형상 조건에서 발생할 수 있는 특이한 유동 특성을 관찰하는 것에 있음을 감안하면 본 연구에 적용된 전산해석 기법이 적절한 것으로 판단한다.

### 3. 실험 및 전산해석 결과

#### 3.1 L/D에 따른 유동특성

보유한 연소기 모델의 공동의 L/D=2, 7, 12에 대해 실험 및 전산해석을 수행하였다. Fig. 6은 L/D=2에서 실험과 전산해석을 통한 가시화 이미지를 제시하였다.

앞서 언급한 바와 같이, 실험과 2차원 전산해석 결과는 공동 후방에서 발생하는 충격파의 각도가 다소 차이가 있지만 비교적 잘 일치한다. 실험과 전산해석 결과 모두 공동에서 발생한 전단층(흰색 표시 영역)이 하류 벽면에 부착된 후 closed 공동 대비 상대적으로 안정(stable)한 유동을 보인다. 이는 전형적인 open 공동에서 발

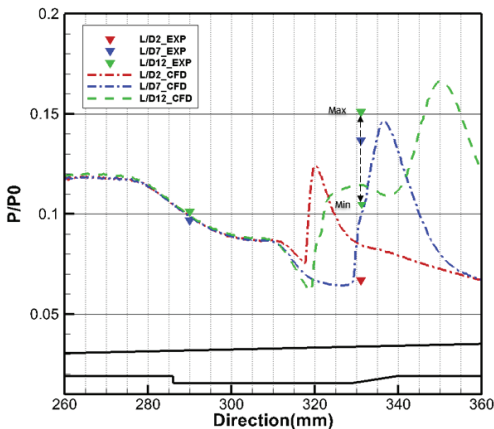


Fig. 5 Pressure data CFD & Experiment.

생하는 유동의 특성이며 ①의 팽창파와 ②의 exit shock을 확인할 수 있다. Fig. 7은 L/D=7에서 발생한 실험 결과이다. L/D=2와 마찬가지로 실험과 전산해석에서 모두 전단층이 하류 벽면에 부착되는 open 공동에서 발생하는 유동의 형태를 보인다. 마찬가지로 ①의 팽창파와 ②의 exit shock을 확인할 수 있다. 전산해석의 경우 후방 경사면에서 한 개의 exit shock이 발생하는 반면, 실험에서는 전단층에서 다수의 shock이 발생하고 ②-1지점에 반사되는 것이 관찰된다. Fig. 8은 L/D=2와 7에서 P2, P3지점에서의 시간에 따른 압력 데이터이다. 공동 상류에서의 압력 P2는 L/D=2와 7에서 동일하게 측정되지만, L/D=2에서는 팽창파로 인해 P2에 비해 P3가 감소하고 L/D 7에서는 공동 후류에서 생긴 충격파로 인해 압력이 증가한다. 또한 L/D=7에서

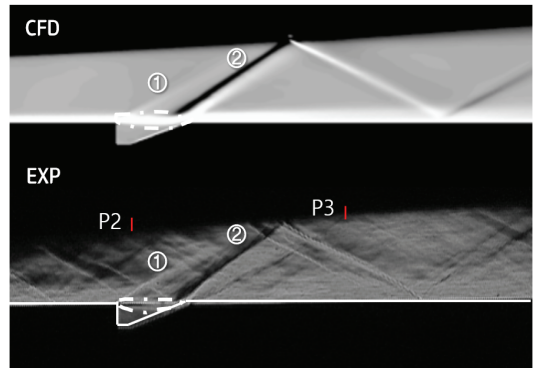


Fig. 6 Flow visualization images (L/D=2).

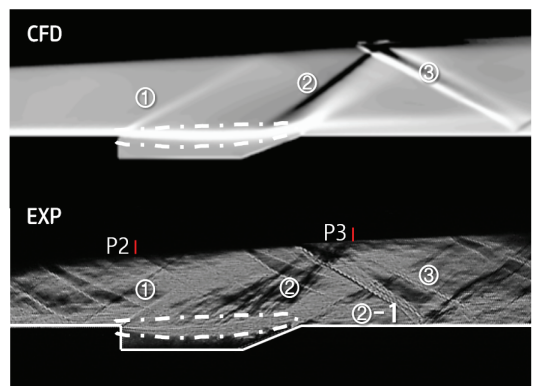


Fig. 7 Flow visualization images (L/D=7).

P3지점에서 미세하지만 진동이 관찰되었다.

Fig. 9는 L/D=12에서 유동 가시화 결과이다. L/D=12에서는 전단층이 바닥면에 붙는 closed 공동에서 발생하는 유동의 형태를 보인다. L/D=2와 7에서 보이는 것과 마찬가지로 ①의 팽창파와 ②의 exit shock이 관찰된다. 이 외 ④번 지점에서 공동 상류에서 발생하는 팽창파로 인하여, 전단층은 공동 바닥을 향하여 유동하게 되므로, 재압축 충격파가 발생한다. L/D=2와 7에서 발생하는 유동 특성과 가장 큰 차이는 ③번 지점의 유동박리 현상에 있다. 이러한 유동 특성은 발생한 박리 영역의 크기에 따라 연소기 전체의 유동 choking 현상을 일으키며, 이 경우

전형적인 shock train 특성이 관찰된다. Fig. 10은 L/D=12에서 발생하는 유동의 진동 특성을 나타낸다. Fig. 10에 보이는 바와 같이 충격파는 간헐적으로 진동하며, 전형적인 shock train의 비정상 특성을 보인다. Fig. 10의 (a)는 전단층이 바닥면에 가장 넓게 부착되고 exit shock이 전방으로 가장 많이 밀려나온다. 또한 공동 내부에 normal shock 형태의 shock이 발생한다. (b)는 전단층이 공동 바닥면에서 부착되어있고, exit shock이 공동 후방 ramp angle 쪽으로 밀려난다. (c)는 전단층이 바닥면에서 탈착되면서 floor impingement shock이 미약해지고 유동박리의 발달 또한 약해진다. 이처럼 전단층이 간헐적으로 바닥면에서 탈 부착되면서 내부 유동의 진동이 발생한다. 또한 Fig. 10의 아래 그래프에서 P2 지점은 시간에 따른 진동이 없지만 P3 지점

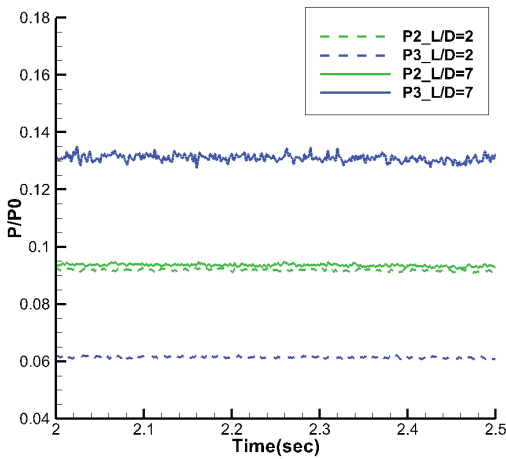


Fig. 8 Pressure data with time at points P2 and P3 (L/D=2, 7).

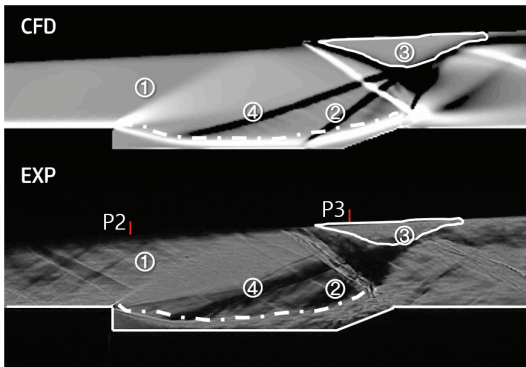


Fig. 9 Flow visualization images (L/D=12).

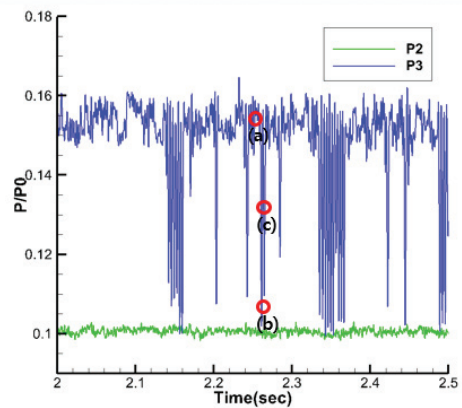
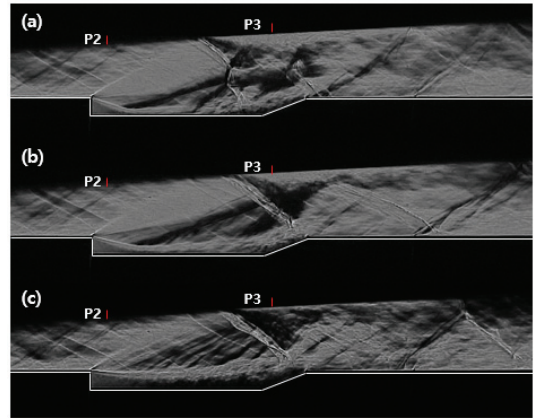


Fig. 10 Flow oscillation characteristic (L/D=12).

에서 간헐적으로 진동하는 것이 관찰되었다.

이와 같이 내부에 생기는 유동박리는 연소기 내부의 유효 면적을 줄여 유량의 흐름을 방해하고, 공동 주위의 전압력 손실을 증가시킨다. closed 공동에서 발생하는 불안정한 유동 특성을 혼합 증대를 목적으로 활용하는 경우, 이러한 박리현상의 발생은 유동의 질식을 야기하므로 이를 형상 설계에 고려하는 것이 필요하다.

### 3.2 공동길이에 따른 유동특성

공동의 깊이를 고정하고 길이를 변화시켜 전산해석을 통해 내부의 유동 특성 변화를 관찰하였다. L/D=2, 7, 12의 공동 형상 외 L/D에 대해 해석을 수행하였으며, Fig. 11에 대표적인 L/D에 따른 내부 유동특성을 제시하였다. L/D=10 이하에서는 전단층이 공동 후류 벽면에 부착되어 open 공동의 형태를 나타낸다. 또한, L/D=7까지는 floor impingement shock의 발달이 없으나, L/D=10에 가까워질수록 floor impingement shock이 미약하게 발달한다. 유동박리 또한 L/D=10에 가까워질수록 미약하게 발달한다.

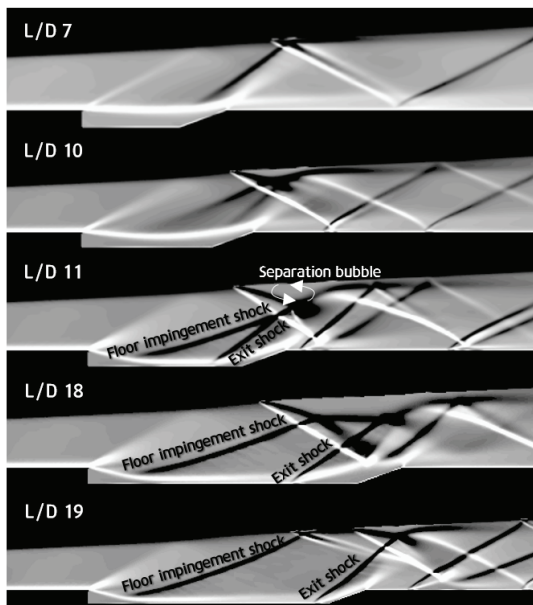


Fig. 11 Flow structures with cavity L/D (Depth = 4 mm, Ramp angle = 20°, Combustor height = 10 mm).

L/D=11 이상 L/D=18 이하에서는 전단층이 공동 바닥에 부착되어 closed 공동의 형태를 보인다. 해당 L/D에서 floor impingement shock의 발달이 명확해지고, L/D=18까지 유동박리의 크기가 점차 증가한다. L/D=19 이상부터는 유사한 closed 공동의 형태를 보이면서, floor impingement shock이 발달하지만 유동박리의 발달이 미약해진다. 이는 floor impingement shock과 exit shock의 물리적 거리가 멀어지면서 두 충격파의 상호작용이 완화되고 이로 인해 유동의 박리가 크게 감소하는 것으로 보인다. 이처럼 공동의 동일 깊이에서 길이가 바뀌에 따라, 즉 L/D가 커짐에 따라 open 공동과 closed 공동의 형태 역시 변경된다. 특히, closed 공동에서는 floor impingement shock과 exit shock의 상호작용에 따라 연소기 내 큰 유동박리가 발달할 수 있으며, 이는 연소기 형태에 따라 유동의 질식을 야기할 수 있는 것으로 관찰되었다. 따라서 초음속 연소기에 적용하는 closed 공동의 경우, 공동 형상에 따라 발생할 수 있는 충격파의 형태를 고려하는 것이 필요하다.

### 3.3 깊이에 따른 연소기 내부 유동특성

앞서 관찰한 현상이 동일한 L/D에서 동일하게 발생하는지 확인하고자 공동의 L/D는 12, 연소기의 높이는 10 mm로 고정하고 공동의 깊이를 변경하여 전산해석을 수행하였다. Fig. 12에 L/D=12에서 깊이 1~6 mm에 따른 전산해석 시각화 이미지를 제시하였다.

L/D가 12임에도 불구하고, 공동의 깊이가 1~2 mm 일때는 open 공동에서 발생하는 유동의 형태를 보인다. 이는 공동의 크기가 줄어 전단층이 바닥에 부착되지 못하고 공동의 후류 벽면에 부착되기 때문이다. 그러나 공동 내부의 shock의 구조가 L/D 10 이하의 open 공동과는 다르게 나타난다. 공동 깊이 1 mm에서는 floor impingement shock이 발달하고 exit shock의 발달이 미약하다. 2 mm에서는 exit shock이 좀 더 발달하는 모습을 확인할 수 있다. 공동 깊이 3~5 mm에서는 전단층이 바닥면에 붙는 closed 공동에서 발생하는 유동의 형태를 보인다. 6 mm

에서는 다시 전단층이 후류 벽면에 붙어 open 공동의 형태를 나타낸다. 유동박리 영역은 공동의 깊이에 따라 closed 공동에서 발생하는 유동의 형태로 바뀌면서 증가하며, 깊이 5 mm에서 가장 크게 발달한다. 그러나 6 mm에서 open 공동의 형태로 전환되면서 다시 박리영역이 감소하는 것으로 나타났다. 이는 공동의 깊이가 커지면서 전단층이 바닥면에서 떨어지면서 floor impingement shock의 강도가 약해지고 전단층이 공동의 하류 벽면에 부착되지 못해 exit shock의 효과 또한 감소되기 때문이다. 이상의

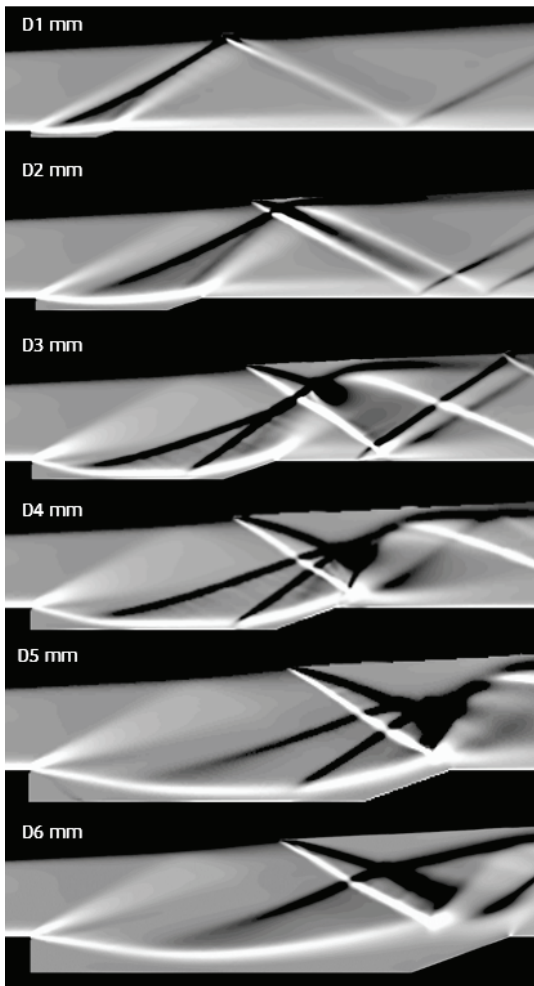


Fig. 12 Flow structures with cavity depth ( $L/D = 12$ , Ramp angle =  $20^\circ$ , Combustor height = 10 mm).

결과에서 공동의  $L/D$  뿐 아니라 공동의 깊이가 공동형 연소기의 유동 특성에 큰 영향을 미치는 것으로 확인되었다.

#### 3.4 후방 경사각에 따른 연소기 내부 유동특성

Exit shock의 강도에 따른 영향을 분석하기 위해 공동 후방 경사각에 따른 내부 유동의 변화를 관찰하였다. 후방 경사각은 실험 모델인  $20^\circ$ 를 기준으로  $10^\circ$ 와  $5^\circ$ 로 설정하였다. 공동의  $L/D$ 는 12이며 Fig. 13은 후방 경사각의 변화에 따른 유동 구조를 제시하였다.

후방 경사각이 감소하면 유동박리의 크기가 감소하였으며,  $5^\circ$ 에서는 유동박리가 매우 작게 관찰된다. 이는 후방 경사각이 줄어들면서 exit shock의 강도가 감소하기 때문이다. 예상한 바와 같이, 후방 경사각에 의해 발생하는 exit shock의 강도가 유동 특성에 큰 영향을 미치는 것이 확인되었다. 그러나 후방 경사각의 변화는 open과 closed의 유동 형태에는 영향이 미치지 않았으며,  $L/D=12$ 에 해당하는 조건의 해석 결과에서는 closed의 유동 형태를 유지하였다.

#### 3.5 연소기 높이에 따른 연소기 내부 유동특성

마지막으로 연소기 높이에 따른 영향을 관찰하였다. 공동의  $L/D$ 는 12로 고정하고 실험 모델의 높이인 10 mm를 기준으로 연소기 높이를 5 mm 간격으로 증가시켜 15 mm, 20 mm에 대해

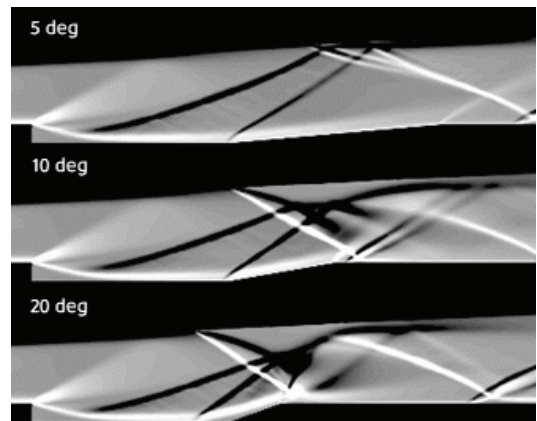


Fig. 13 Flow structures with ramp angle ( $L/D = 12$ , Depth = 4 mm, Combustor height = 10 mm).



전산해석을 수행하였다. Fig. 14는 연소기 높이에 따른 전산해석의 유동 가시화 결과이다. 연소기의 높이가 증가할수록 유동박리의 크기가 감소하는 모습을 볼 수 있다. 이는 exit shock과 floor impingement shock과의 상호작용은 존재하지만 연소기의 높이가 증가함에 따라 그 영향이 유동박리 감소 효과에 기인하기 때문이다. 후방 경사각의 영향과 마찬가지로 open과 closed의 유동 형태에는 영향을 미치지 않았다.

3.6 형상변수에 따른 전압력 손실

이상의 전산해석 결과를 바탕으로 연소기와 공동 내부의 형상변수에 따라 발생하는 유동의 전압력 손실을 분석하였다. 전압력 손실은 유동 방향에 따라 면평균하여 도출하였다. 실험 모델에 해당하는 L/D=12, 공동 깊이 4 mm인 closed 공동의 하류 66.5 mm지점에서 발생하는 유동의 전압력 손실은 0.21이다. 해당 조건은 고정인 상태에서, 즉 연소기 내 공동의 L/D와 공동 깊이는 결정된 상태에서 후방 경사각과 연소기 높이에 따른 동일지점에서의 전압력 손실을 Fig. 15에 제시하였다. 후방 경사각이 작을수록 또는 연소기 높이가 높아질수록 전압력 손실이

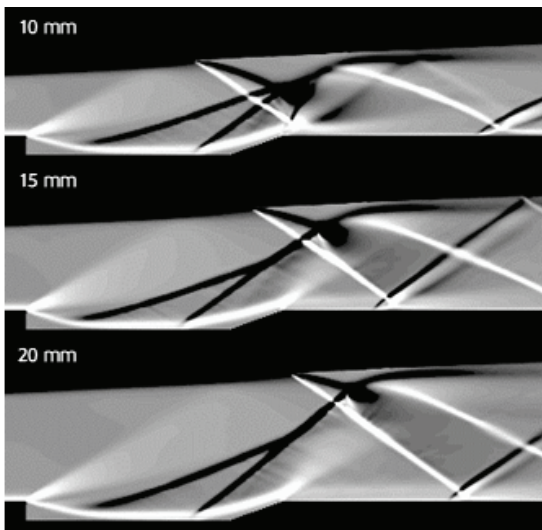


Fig. 14 Flow structures with combustor height (L/D = 12, Depth = 4 mm, Ramp angle = 20°).

감소하였으며, 후방 경사각이 5°이고 연소기 높이가 30 mm 일 때 전압력 손실이 최소로 나타났다. 이는 앞서 언급한 바와 같이, 두 충격파의 상호작용에 의한 유동 박리 영역의 크기와 연관되므로 해당 인자들에 대한 영향을 고려하는 것이 필요하다. 예를 들어, open 공동인 L/D=7, 공동 깊이 4 mm의 경우, 동일지점에서 전압력 손실이 0.15이다. 이를 기준으로 동일 이상의 closed 공동을 설계한다면, 후방 경사각을 10°이하, 연소기 높이를 20 mm 이상으로 설계하는 것이 적절함을 의미한다.

4. 결 론

후방 경사각을 갖는 L/D=2, 7, 12의 공동형 초음속 연소기 모델을 설계하고 실험 및 전산해석을 통해 연소기 내부 유동특성을 관찰하였다. 기존의 선행연구 결과와 유사하게 특정한 공동 깊이에 대해 L/D= 2, 7의 공동을 갖는 연소기에서는 전형적인 open 공동의 유동 형태를 나타냈고, L/D=12에서는 전형적인 closed 공동의 유동 형태를 보이는 것을 관찰하였다.

closed 공동을 갖는 연소기의 경우 공동 주위에 크게 2개의 충격파가 발생하며 이 충격파의 상호작용으로 연소기 내 큰 유동 박리가 발생할

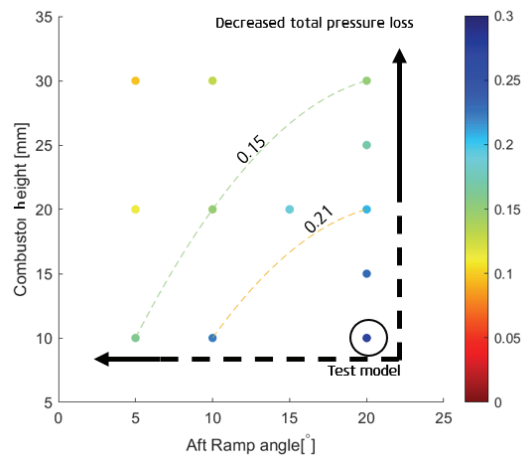


Fig. 15 Total pressure loss with cavity configuration (L/D = 12, Depth = 4 mm).

수 있으며, 이로부터 유동의 질식과 불안정한 진동특성을 갖는 shock train이 발생할 수 있음을 확인하였다. 이러한 현상은 공동의 여러 형상 변수에 따라 영향을 받는 것으로 나타났다. 특히, 동일 L/D에 대해서도 공동의 깊이에 따라 open과 closed 공동의 유동 형태가 다르게 발생할 수 있으며, 그 밖에 후방 경사각, 연소기 높이에 따라 유동 특성과 공동 하류 연소기 내 유동의 전압력 손실이 크게 달라짐을 확인하였다. 이상의 결과로부터 공동을 갖는 초음속 연소기 설계에 있어 L/D 외 다양한 공동의 형상 변수를 고려하는 것이 필요함을 확인하였다.

#### Acknowledgement

이 논문은 2017학년도 인하대학교의 지원(56743-01)에 의하여 연구되었습니다.

#### References

1. Choubey, G., Devarajan, Y., Huang, W., Mehar, K., Tiwari, M. and Pandey, K.M., "Recent Advances in Cavity-based Scramjet Engine-a Brief Review," *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 44, No. 26, pp. 13895-13909, 2019.
2. Yakar, A.B. and Hanson, R.K., "Cavity Flame-holders for Ignition and Flame Stabilization in Scramjet: An Overview," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 17, pp. 869-877, 2001.
3. Palharini, R.C., Scanlon, T.J. and White, C., "Chemically Reacting Hypersonic Flows over 3D Cavities: Flowfield Structure Characterisation," *Computers and Fluids*, Vol. 165, pp. 173-187, 2018.
4. Baysal, O. and Stallings Jr, R.L., "Computational and Experimental Investigation of Cavity Flowfields," *AIAA Journal*, Vol. 26, No. 1, pp. 6-7, 1988.
5. Das, R., Kim, H.D. and Kurian, J., "Experimental Study of Supersonic Entrainment Using a Cavity," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 30, No. 5, pp. 1143-1151, 2014.
6. Kumar, M. and Vaidyanathan, A., "On Shock Train Interaction with Cavity Oscillations in a Confined Supersonic Flow," *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 90, pp. 260-274, 2018.
7. Moradi, R., Mahyari, A., Gerdroodbary, M. B., Abdollahi, A. and Amini, Y., "Shape Effect of Cavity Flameholder on Mixing Zone of Hydrogen Jet at Supersonic Flow," *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 43, No. 33, pp. 16364-16372, 2018.
8. Gruber, M.R., "Fundamental Studies of Cavity-based Flameholder Concepts for Supersonic Combustors," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 17, No. 1, pp. 146-153, 2001.
9. Maurya, P.K., Rajeev, C., RR, V.K. and Vaidyanathan, A., "Effect of Aft Wall Offset and Ramp on Pressure Oscillation from Confined Supersonic Flow over Cavity," *Experimental Thermal and Fluid Science* Vol. 68, pp. 559-573, 2015.
10. Jialing, J. and Liu, W., "Recent Progress in our Scramjet Research," *17th International Symposium on Air Breathing Engines*, Munich, Germany, ISABE-2005-1009, Sep. 2005.
11. Shi, D., Song, W., Wang, Y. and Wang, Y., "Effects of Cavity Configurations on Flameholding and Performances of Kerosene Fueled Scramjet Combustor," *International Journal of Turbo & Jet-Engines*, Vol. 34, No. 3, pp. 211-220, 2017
12. Shin, S.S., Jeong, J.C., Suryan, A. and Kim, H.D., "A Study on the Reduction of

- Supersonic Cavity Pressure Oscillations Using a Sub-Cavity System," *The Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 13, No. 5, pp. 41-47, 2009.
13. Jin, S., Choi, H., Lee, H.J., Byun, J., Bae, J. and Park, D., "Combustion Characteristics Based on Injector Shape of Supersonic Combustor," *The Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 23, No. 5, pp. 76-87, 2019.
  14. Yang, I., Lee, Y., Kim, Y. and Lee, K., "Combustion Test of a Mach 5 Scramjet Engine Model," *The Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 17, No. 3, pp. 9-14, 2013.
  15. Hwang, S.W. and Rho, O.H., "Numerical Simulation of Unsteady Supersonic Viscous Flow over a Cavity," *The Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 21, No. 3, pp. 14-24, 1993.
  16. Chang, K., Park, O. and Choi, H., "Numerical Analysis and Control of Open Cavity Flow," *The Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 30, No. 3, pp. 101-108, 2002.
  17. Won, S., Jeong, E., Jeung, I. and Choi, J., "Combustion Characteristics of Hypersonic Scramjet Engine," *The Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 8, No. 1, pp. 61-69, 2004.
  18. Seo, H., Jeong, H., Lee, J. and Byun, Y., "A Study of the Mixing Characteristics for Cavity Sizes in Scramjet Engine Combustor," *Journal of the Korean Physical Society*, Vol. 55, No. 5, pp. 2180-2186, 2009.
  19. Oh, J., Seo, H., Byun, Y.H. and Lee, J., "Mixing Characteristics of Various Cavity Shapes in SCRamjet Engine," *The Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 12, No. 1, pp. 57-53, 2008.