

## 모형 로켓 연소실에서 배플형 분사기의 간극에 의한 음향 감쇠 효과에 관한 수치적 연구

손채훈\* · 이중연\*\*

### A Numerical Study on Acoustic Damping Induced by Gap between Baffled Injectors in a Model Rocket Combustor

Chae Hoon Sohn\* · Jungyun Lee\*\*

#### ABSTRACT

Acoustic damping induced by gap width between baffled injectors is investigated numerically, which are installed to suppress pressure oscillations in a model rocket combustor. The previous work reported that the baffled injectors show larger acoustic damping with the gap width between injectors. It is simulated numerically and its mechanism is examined. Damping factors are calculated as a function of gap width and it is found that the optimum gap is 0.1 mm or so. For understanding of the improved damping induced by the gap, dissipation rate of turbulent kinetic energy and vorticity are calculated as a function of the gap. Both parameters have their maximum values at the specific gap and especially, the dissipation rate has the same profile as that of damping factor. It verifies that the improved damping made by the gap is attributed to the increased acoustic-energy dissipation.

#### 초 록

로켓 엔진의 음향 불안정을 제어하기 위해 모형 연소실에 배플형 분사기가 장착된 경우의 음향 감쇠 특성을 수치해석적으로 조사하였다. 기존에 보고된 배플형 분사기의 효율성을 확인하였고 분사기간 간극이 존재할 때 음향 감쇠 효과가 증대되는 메커니즘을 규명하였다. 여러 가지 크기의 간극에 따라 음향학적 감쇠능력을 조사하였고, 본 연소실에서는 0.1 mm 정도의 간극에서 최적의 감쇠능력을 가짐을 알 수 있었다. 음향 감쇠 효과가 증대되는 메커니즘을 규명하기 위해, 분사기 사이의 간극에 따른 에너지 소산율과 와도를 계산하였고, 소산율 변화 추이와 감쇠인자 변화 추이가 유사함을 알았다. 이를 통해, 간극에 의한 에너지 소산의 증대로 음향 감쇠 효과가 증가함을 알았다.

Key Words: Acoustic Damping(음향감쇠), Baffled Injector(배플형 분사기), Energy Dissipation(에너지 소산), Dissipation Rate(소산율), Vorticity(와도)

† 2007년 5월 15일 접수 ~ 2007년 6월 20일 심사완료

\* 정회원, 세종대학교 기계항공우주공학부

\*\* 학생회원, 조선대학교 대학원 항공우주공학과  
연락처, E-mail: chsohn@sejong.ac.kr

## 1. 서 론

로켓엔진 연소실을 개발하는 과정에서, 설계자가 유념해야 할 여러 가지 항목 중의 하나로 연소과정에 의해 유발되는 고주파 연소불안정(또는 음향 불안정; acoustic instability)이 있다. 음향 불안정은 설정된 연소기의 작동조건에서 안정한 성능을 발휘할 수 있느냐의 여부를 좌우하며, 지난 수 십년동안 여러 연소 시스템의 개발에 큰 장애요소로 인식되어왔다. 특히, 음향불안정이 가장 유해하게 그리고 파괴적으로 나타나는 연소 시스템은, 고압에서 작동하여 에너지 밀도가 높은 상태로 연소가 발생하는 로켓엔진인 것으로 알려져 있다[1-4]. 음향 불안정 발생의 부정적인 결과로서 분사기면과 연소실 벽면으로의 과도한 열전달 및 그로인한 열 손상, 심한 구조물의 진동, 설계된 작동조건의 예기치 못한 변화가 초래되는 것으로 알려져 있으며, 최악의 경우 연소실의 열적/기계적인 파괴에까지 이르기도 한다[4, 5]. 따라서 연소 시스템의 안정적인 운용을 위해 연소실의 연소 안정성(음향 안정성)을 확보하는 것이 연소기 개발의 필수요소이다.

연소실 내에서 발생할 수 있는 음향과 모드를 억제하기 위해 수동제어기구의 하나인 배플(baffle)을 장착하는 경우가 있다[4, 6, 7]. 배플은 연소장내에 장착되는 일종의 장애물 벽이다. 이 장애물에 의해 음향 공진성(resonance)이 파괴되므로 확실한 음향 감쇠(damping), 즉 연소 안정화의 효과를 볼 수 있으나, 연소실내 배플 장착에 의해 연소에 사용되는 실효 체적이 감소하므로 불가피하게 연소 성능 저하가 야기된다. 그러나, 충돌형 분사기가 아닌 동축형 분사기를 사용하는 경우에는, 분사기의 일부를 연소장 내부로 돌출시켜 장착하는 것이 가능하므로 연소 성능의 저하를 최소화하면서 돌출된 분사기가 배플의 역할을 하게 만들 수 있다[8, 9]. 이를 배플형 분사기(baffled injector)라 부른다.

이와 같은 사실은 과거 러시아의 과학자들에 의해 제시되었고, 개발 과정 중에 돌출된 분사기 사이의 간극(gap)이 존재하면 간극이 없는 경우

보다 음향 감쇠 효과가 증대됨을 발견하였다[9]. 이를 토대로 최근에 국내에서도 이를 검증하는 실험이 수행되었고, 간극이 0.1~0.2 mm 가량 존재하는 경우 최적의 감쇠 효과가 나타남을 확인하였다[10]. 그러나, 그러한 현상에 대한 원인 규명이나 감쇠 증대 메커니즘에 대해서는 아직 명확하게 밝혀내지 못하고 있는 상태이다.

배플형 분사기에서 돌출된 분사기사이의 간극을 두어 음향 감쇠 효과를 증대시킬 수 있다면, 분사기의 돌출 길이를 감소시킬 수 있기에 바람직하다. 이러한 관점에서, 본 연구에서는 배플형 분사기의 음향학적 감쇠 특성과 간극에 의한 감쇠 증대 메커니즘을 규명하고자 한다. 실험적 방법에 의한 연구는 미시적인(microscopic) 규명에 한계가 있기에 수치해석적 방법을 취하였다.

## 2. 지배방정식과 수치해석 방법

### 2.1 지배방정식

본 연구에서는 연속방정식과 운동량 방정식, 즉, Navier-Stokes 방정식, 에너지 방정식, 상태 방정식의 풀이를 통해 연소실내의 압력 섭동을 풀이하였다. 한 예로, 주요 보존 방정식인 Navier-Stokes 방정식은 다음과 같이 유도할 수 있으며, Eq. 1과 같다[11].

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i u_j) = & \\ - \frac{\partial P}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \mu \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) & \quad (1) \\ - \frac{2}{3} \mu \left( \frac{\partial u_m}{\partial x_m} \delta_{ij} \right) + \rho f_i & \end{aligned}$$

여기에서,  $t$ 는 시간,  $x_i$ 는  $i$ 방향의 좌표계,  $u_i$ 는  $i$ 방향으로의 속도,  $\rho$ 는 유체의 밀도,  $P$ 는 압력,  $\mu$ 는 점성계수,  $\delta_{ij}$ 는 Kronecker 델타,  $f_i$ 는  $i$ 방향의 체적력을 나타낸다.

### 2.2 수치해석 방법

채택한 수치해석 방법은 일반적인 편미분 형태의 보존방정식의 풀이 방법과 본질적으로 동일하다[11, 12]. 난류 모델로는  $k-\epsilon$  모델을 사용하였다[11]. 연소실의 벽면과 분사기 면에는 벽 경계조건을 부여하였고, 노즐 목 또한 음향학적으로 닫혀 있다고 가정하고 벽 조건을 부여하였다. 초기조건으로는 정지상태의 공기가 연소실 내에 있다고 가정하였으며, 공기의 압력은 1기압으로, 온도는 300 K으로 설정하였다.

압력진동을 해석하기 위해서는 과도해석(transient analysis)을 수행해야 하며, 인위적인 압력교란을 위해 다음과 같은 압력가진 함수를 적용하였다.

$$p_{ext} = p_{amp} \delta(t - 0.0001) \quad (2)$$

여기서  $p_{amp}$ 는 교란 압력파의 진폭(500 Pa로 설정함)을 나타내며,  $\delta$ 는 델타(delta)함수를 나타낸다. Fig. 1에 나타낸 바와 같이 압력 가진부(acoustic excitation point)는 분사기 장착면의 하단부 연소실 벽 근처에 위치시켰고, 압력진동을 관찰하기 위한 관찰점(monitored point)은 압력 가진부의 180도 맞은편에 위치시켰다.

예비 계산을 통해 격자수에 따른 가진부의 영향, 관찰점의 위치에 따른 영향을 조사하였으며, 그 영향이 미약함을 확인하였다. 공간차분에는 2차 전방차분법(upwind scheme)을, 시간적분을 위해서는 Crank-Nicolson법을 사용하였다. 과도해석을 위한 시간간격은 10  $\mu s$ 로 설정했으며, 시간간격을 더 짧게 하여도 계산결과의 변화가 거의 없음을 확인하였다.

본 연구에서는 위와 같은 방법과 모델들을 채택하여 CFD-ACE[12]라는 수치해석 코드를 solver로 사용하여 계산을 수행하였다. 관련된 물리적 현상들의 상세한 모델링과 지배방정식 및 수치 해법들은 참고문헌[11-15]에 자세히 기술되어 있으므로 여기서는 생략한다. 또한, 본 연구에서 채택한 수치해석 방법론과 이를 통해 얻은 결과들의 타당성은 선행 연구[14, 15]에서 실험 결과와의 비교를 통해 충분히 검증하였다.

### 2.3 해석 대상 연소실

수치해석에 사용된 격자계와 연소실 및 배플형 분사기의 기하학적 형상을 Fig. 1에 나타내었다. 참고문헌 [10]에서 실험에 사용한 연소실의 크기를 따라 직경과 길이를 선정하였다. 연소실은, 직경 380 mm, 축방향 길이 475 mm인 실린더 형태를 가지고 있으며, 허브는 내경이 145 mm, 두께 17 mm인 원통형으로 모사하였다. 그림에 나타낸 바와 같이, 배플형 분사기는, 즉 배플 모양을 형성하는 부분의 분사기는 연소실 내부로 돌출되어 있다. 배플은 6개의 블레이드(blade)와 1개의 원형 허브(hub)로 구성하였다(단, 허브 부분은 돌출된 분사기로 구성하지 않음. 이를 실험 결과[10]와의 비교를 위해서임). 배플형 분사기가 설치될 때, 최적의 감쇠를 가지는 간극을 찾기 위하여 간극이 없는 경우(0.0

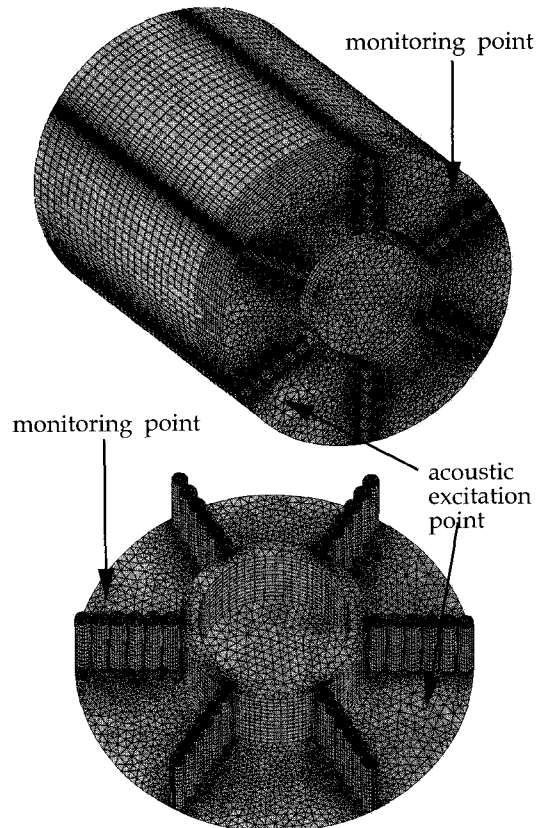


Fig. 1 Computational grids of the baffled injector and combustion chamber

mm)를 포함하여 0.1 mm, 0.2 mm, 0.3 mm, 0.4 mm, 0.6 mm, 1.0 mm의 7가지 경우에 대하여 격자계를 생성하였다. 분사기의 직경은 16.75 mm로 설정하였고, 간극이 존재하는 경우에는 최외곽 분사기의 직경을 작게 만들었다.

배플에 의한 음향파의 감쇠정도를 나타내는 인자로서 감쇠인자(damping factor),  $\eta$ , 를 사용하였으며, 이것은 bandwidth 방법을 토대로 다음과 같이 정의된다[7].

$$\eta[\%] = \frac{f_2 - f_1}{f_{peak}} \times 100 \quad (3)$$

여기서  $f_{peak}$ 은 분석하고자 하는 음향모드 진동수 대역에서 가진 음원에 대해 최대응답( $p_{peak}$ )이 나타내는 주파수이고,  $f_1$ 과  $f_2$ 는  $p_{peak}/\sqrt{2}$  값의 응답을 보이는 주파수들( $f_2 > f_1$ )이다. 가진 주파수 응답 그래프 상에서  $f_{peak}$ 을 중심으로 곡선의 벌어진 정도가 클수록 감쇠인자가 큰을 의미한다. 즉, 음향 감쇠가 크게 나타남을 의미한다.

### 3. 계산 결과 및 분석

#### 3.1 기본 음향 특성

분사기형 배플의 음향 감쇠 특성을 계산하기에 앞서 먼저, 배플이 장착되지 않은 기본 연소실의 공진 모드를 먼저 조사하였다. 계산 결과, 1L(제1 종방향), 1T(제1 접선방향) 등의 음향모드를 가지는 응답을 확인할 수 있었다.

Table 1. Resonant Frequencies in an Unbaffled Chamber

Mode	1L	1T	1T1L
Analytic [Hz]	357.9	524.3	634.8
Experimental [Hz] [10]	359.9	533.4	643.0
Error[%]	+0.56	+1.74	+1.29
Numerical [Hz]	364.8	512.7	620.6
Error[%]	+1.9	-2.2	-2.2

이론 식[16]에 의해 계산된 주요 공진주파수 값과 본 수치해석 결과 값을 비교하여 Table 1에 나타내었다. Table 1에서 볼 수 있듯이 이론해와 수치해석적 결과가 거의 일치하는 것을 볼 수 있다. 따라서 본 연구에서 채택한 해석 방법 및 기법의 타당성을 확인할 수 있었다. 기본 연소실에서의 1T 모드 감쇠인자는 1.7%였으며, 본 계산을 통해 얻은 대표적인 음향 응답 신호를 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 3에 보인 음향장으로부터 가시적으로 1T 모드가 뚜렷이 나타남을 확인할 수 있었다. 이러한 점은 본 수치계산 결과의 타당성을 입증한다.

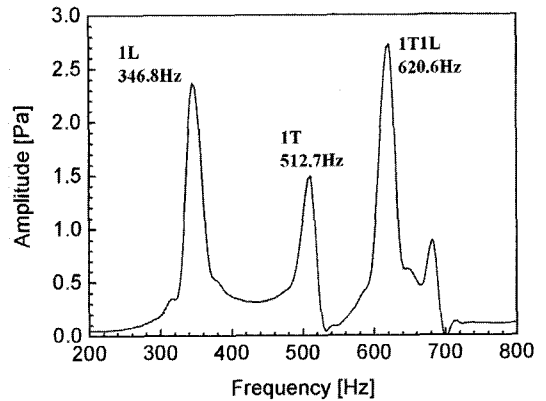


Fig. 2 FFT Spectrum of Acoustic Oscillations in an Unbaffled Chamber

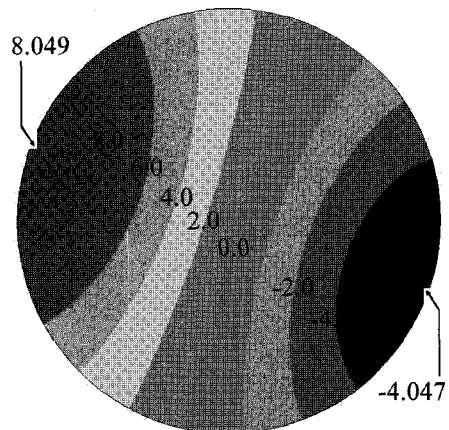


Fig. 3 Pressure Field at the First Tangential (1T) Acoustic Mode at 10 ms in an Unbaffled Chamber (unit: Pa)

## 3.2 배플형 분사기가 장착된 연소실 응답

Figure 1에 나타낸 바와 같은 배플형 분사기의 축방향 길이는 임의로 70 mm로 설정되었다. 배플형 분사기 사이의 여러 가지 간극 크기에 따른 1T 모드의 주파수 응답 특성을 Fig. 4에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 간극이 없다가 0.1 mm 간극을 가지면서 음향 진폭이 크게 감소하고 이와 동시에 밴드폭이 넓어지는 특성을 보인다. 그러나 간극이 점차 증가함에 따라 밴드폭이 점점 감소함과 동시에 공진 주파수는 점점 증가하는 것을 알 수 있는데, 이것은 간극으로의 음향파 입/출입이 가능하게 되기 때문이다. 간극이 계속 증가하게 되어 무한대에 이르면 배플이

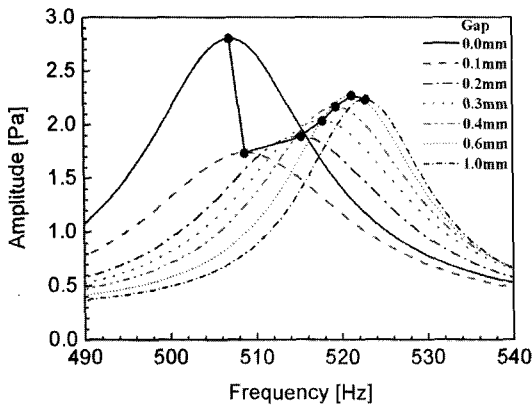


Fig. 4 Acoustic Pressure Responses of 1T Mode in a Chamber with Baffled Injectors

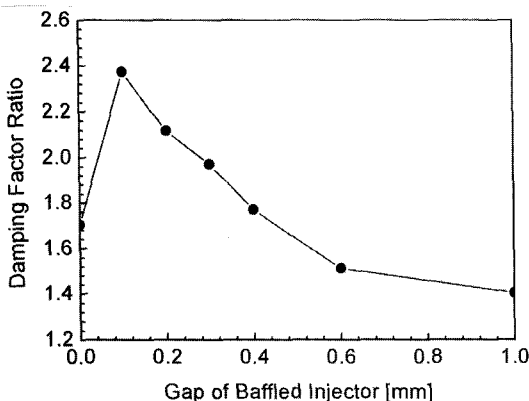


Fig. 5 Damping Factor Ratio of 1T Mode as a Function of Gap of Baffled Injectors

없는 경우와 정성적으로 같게 되므로, 공진 주파수와 진폭이 기본 연소실에서의 음향 응답에 접근하게 되고 감쇠인자 역시 크게 줄어들게 된다.

이러한 간극에 따른 감쇠인자비(배플이 없는 연소기에서의 감쇠인자값으로 무차원화하였음)를 Fig. 5에 나타내었다. 이 결과를 바탕으로 가장 감쇠 효과가 크게 나타나는 간극이 존재함을 알 수 있고, 그 최적 간극이 약 0.1 mm 정도의 크기를 가질 것으로 예측할 수 있다. 이는 기존의 실험 결과에서 제시된 값과 같은 정도의 크기를 갖는다[9, 10].

결과적으로, 분사기를 돌출시켜 배플을 형성하는 배플형 분사기를 적용하는 것은 음향학적으로 매우 효과적임을 알 수 있고, 이웃하는 분사기의 간극을 0.1 mm 내외에 배치한다면 우수한 음향 감쇠능력을 가지는 배플을 설계할 수 있을 것이다. 본 계산 결과는 1기압, 300 K에서 취득 되었으므로, 고온 고압의 실제 로켓 연소실에서의 최적 간극은 바뀔 수도 있겠으나, 최적의 간극이 존재한다는 사실에 주목해야 할 것이다.

## 3.3 간극에 의한 감쇠 효과 증대 메커니즘 분석

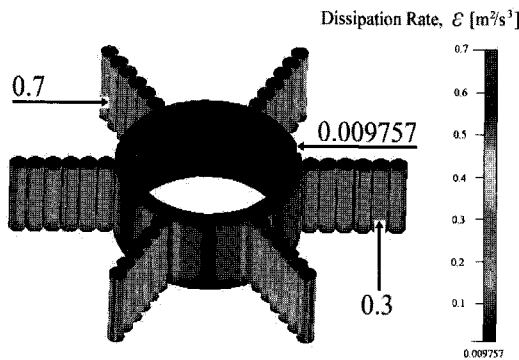
앞에서 기본연소실 대비 감쇠능력 향상 정도를 정량화하고, 이웃한 분사기 사이의 최적 간극을 제시하였다. 특정 모드의 음향 감쇠는 결국 그 모드의 음향 에너지가 소산(dissipation)되거나 다른 모드의 에너지로 분산(dispersion or scattering)되기 때문에 나타나는 것으로 볼 수 있다.

Figure 4의 결과로부터 1T 모드가 다른 모드로 바뀌거나 분할(split)되지는 않는다는 것을 알 수 있으므로, 소산이 원인일 가능성이 높다. 음향 에너지 소산은, 분사기 표면에서의 점성에 의한 소산과 와(vortex) 형성에 의한 소산으로 분류해 볼 수 있다. 이를 각각 난류 운동 에너지 소산율(dissipation rate),  $\epsilon$ , 과 와도(vorticity)로 정량화하였다. 와도는 각속도의 2배로서  $\nabla \times \vec{V}$ 로 표현되며, 와류의 강도를 나타낸다. 난류 운동 에너지 소산율은 점성에 의한 음향 에너지

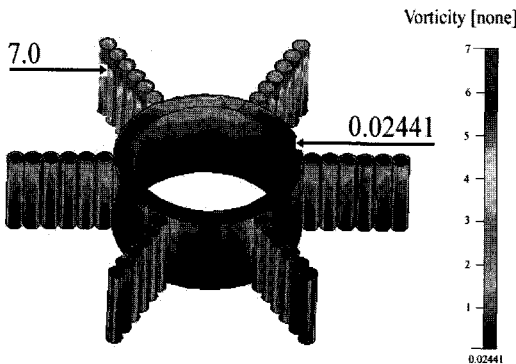
소산율과 비례하는 인자로서 선택되었다[2].

Figure 6에 난류 운동 에너지 소산율과 와도의 분포를 나타내었다. 소산율과 와도를 나타낼 때, 전체 표면에서 연소실 표면과 분사기 장착면(faceplate)을 제외한 돌출된 분사기의 표면에서의 에너지 소산율과 와도를 구해서 Fig. 6에 나타내었다. 그림에서 보듯이 소산율과 와도는, 배플 블레이드(blade)를 형성하는 분사기 주위 표면과 그 분사기에 인접한 허브(hub) 표면에 집중적으로 분포함을 알 수 있다. 허브 부분의 경우 분사기와 인접하지 않은 부분은 에너지 소산과 와도가 작음을 알 수 있었다. 특히, 배플 블레이드를 형성하는 분사기의 표면 중에서도 분사기 사이의 간극 부분에서 큰 값을 보였다.

이러한 계산 결과를 바탕으로 간극 크기에 따

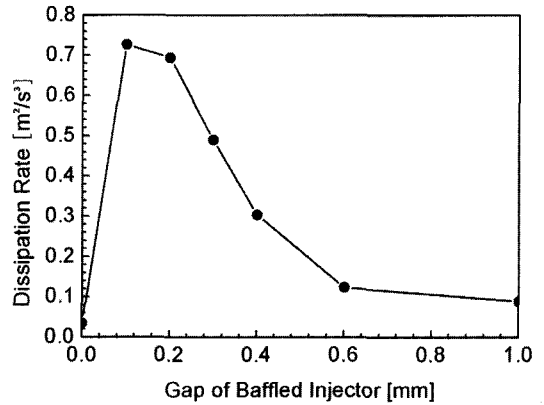


(a) Dissipation Rate field

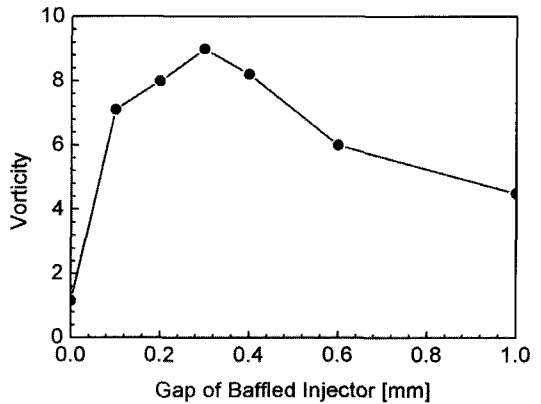


(b) Vorticity field

Fig. 6 Dissipation Rate and Vorticity Fields in a Chamber with Baffled Injectors (Gap = 0.1 mm)



(a) Dissipation Rate of Kinetic Energy



(b) Vorticity

Fig. 7 Dissipation Rate and Vorticity as a Function of Gap of Baffled Injectors

른 에너지 소산율과 와도를 나타내기 위해, 각각을 표면적에 대해 평균을 내어 이를 대표값으로 취하였다. 이렇게 구한 평균 소산율 값과 와도를 간극 0.0 ~ 1.0 mm 에 대해 Fig. 7에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이, 에너지 소산율의 간극에 따른 변화 추이는 간극에 따른 감쇠인자의 변화 추이(Fig. 5 참고)와 거의 일치하였다. 이러한 특성은 와도의 변화 추이를 통해서도 확인할 수 있었으나 극점을 갖는 간극의 값에서는 서로 차이를 보였다. 이를 통해서, '분사기간 간극이 존재하면 음향 에너지 소산이 증가하여 최적의 감쇠 효과를 발휘하는 최적 간극이 존재하게 된다'는 결론을 도출할 수 있다.

## 4. 결 론

로켓 엔진의 음향 불안정을 제어하기 위해 연소실에 배플형 분사기가 장착된 경우의 음향 감쇠 특성을 수치해석적으로 조사하였다. 본 연구에서는, 기존에 보고된 배플형 분사기의 효율성을 확인하였고, 분사기간 간극이 존재할 때 음향 감쇠 효과가 증대되는 메커니즘을 규명하는데 초점을 두었다.

분사기사이의 간극에 의한 음향학적 감쇠특성을 1T 모드에 대하여 조사하였다. 여러 가지 크기의 간극에 따라 음향학적 감쇠능력을 조사하였고, 본 연구에서 채택된 모형 연소실에서는 0.1 mm 정도의 분사기 간극에서 최적의 감쇠능력을 가짐을 알 수 있었다. 이는 기존의 실험 결과와 잘 부합하였다. 본 결과는 1기압, 300 K에서 취득되었으므로, 고온 고압의 실제 로켓 연소실에서의 최적 간극은 바뀔 수도 있을 것이며, 이는 실제 조건에서의 연소장 해석 또는 실험을 통해 파악될 수 있을 것이다.

음향 감쇠 효과가 증대되는 메커니즘을 규명하기 위해, 간극에 따른 에너지 소산율과 와도(vorticity; 와류강도를 나타내는 척도로 간주함)를 계산하였고, 결국 간극에 의한 음향 에너지 소산의 증대로 음향 감쇠 효과가 증가함을 알게 되었다. 따라서, 음향 감쇠의 관점에서 볼 때, 배플형 분사기를 사용하는 경우 최적 간극을 두어 설계하면 음향 감쇠 성능을 유지하면서도 분사기의 돌출 길이(즉, 배플의 축방향 길이)를 줄일 수 있다. 이를 통해, 기존 배플이 가지는 열적인 냉각부하 문제를 경감시키는 잇점을 얻을 수 있을 것이다.

## 후 기

이 논문은 2006년도 정부재원(교육인적자원부 학술연구조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 연구되었음(KRF-2006-511-D00090).

## 참 고 문 헌

1. Putnam, A. A., Combustion Driven Oscillations in Industry, Elsevier, New York, 1971
2. Williams, F. A., Combustion Theory, 2nd Ed., Addison-Wesley, Menlo Park, CA, 1985
3. Huzel, D. K. and Huang, D. H., Modern Engineering for Design of Liquid Rocket Engines, Vol.147, Progress in Astronautics and Aeronautics, AIAA, Washington, DC, 1992
4. Harrje, D. J. and Reardon, F. H., Liquid Propellant Rocket Combustion Instability, NASA SP-194, 1972
5. Sutton, G. P. and Biblarz, O., Rocket Propulsion Elements, 7th ed, John Wiley & Sons, Inc., New York, 2001
6. Keller, R. B., Jr. (Ed.), Liquid Rocket Engine Combustion Stabilization Devices, NASA SP-8113, 1974
7. Yang, V. and Anderson, W. E. (Eds.), Liquid Rocket Engine Combustion Instability, Vol. 169, Progress in Astronautics and Aeronautics, AIAA, Washington DC, 1995, pp.377-399
8. Sutton, G. P., "History of Liquid-Propellant Rocket Engines in Russia, Formerly the Soviet Union," Journal of Propulsion and Power, Vol. 19, 2003, pp. 1008-1037.
9. Shibanov, A. A. Personal Communication, 2001.
10. Kim, H. J., Lee, K. J., Choi, H. S., and Seol, W. S., "An Experimental Study on Acoustic Damping Enhancement by the Gap of Baffled Injectors," AIAA Paper 2005-4446, 2005.
11. Poinso, T. and Veynante D., Theoretical and Numerical Combustion, R. T.

- Edwards, Inc., Philadelphia, PA., 2001.
12. CFD-ACE-GUI Modules Manual, ver 2004, CFDRC, 2004
  13. Cannon, S. M., Adumitroaie, V. and Smith, C. E., "3D LED Modeling of Combustion Dynamics in Lean Premixed Combustors," ASME paper #2001-GT-0375, 2001
  14. Sohn, C. H. and Cho, H. C., "A CFD Study on Thermal-Acoustic Instability of Methane/Air Flames in Gas Turbine Combustor," Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 19, No. 9, 2005, pp. 1811-1820
  15. 손채훈, 박이선, "로켓엔진 연소기내 공명기에 의한 비선형 음향감쇠에 관한 수치해석적 연구", 한국추진공학회지, 제11권, 제2호, 2007, pp.1-8
  16. Zucrow, M. J. and Hoffman, J. D., Gas Dynamics Vol. II, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1997