

# 전단 동축형 분사기에서 횡방향 음향 가진에 대한 화염반응의 실험적 연구

## Experimental Study of the Flame Response to Transverse Acoustic Excitation in Shear Coaxial Injectors

### 서론

액체로켓엔진에서 연소불안정은 1930년대 처음으로 발견된 이후 F-1 엔진과 Ariane 발사체 등 다양한 엔진의 개발과정에서 심각한 문제가 되어져 왔다. 하지만 현재까지도 연소불안정은 완전히 해결되지 못한 분야이며 광범위한 연구가 수행되어오고 있다. 연소불안정은 연소실 내 압력진동과 열방출섭동이 동일한 위상일 때 발생하는 것으로 알려져 있다. 이는 연소실 벽면에 과도한 열전달이나 진동을 유발하며 궁극적으로 엔진의 파괴를 이끌 수 있다. 액체로켓엔진에서는 저주파수의 종방향 연소불안정에 비해 고주파수에 해당하는 횡방향 연소불안정이 더욱 치명적인 결과를 야기할 수 있다. 따라서 많은 연구들은 고주파수의 음향을 횡방향으로 동축형 분사기에 공급하여 화염반응에 대한 연구를 수행하였다.

횡방향 음향파는 연소기의 종방향 공진 모드에 커플링되어 열방출 섭동과 상호작용 할 수 있다. 이러한 메커니즘은 가스터빈 분야에서 주로 연구되었으나 로켓 분야에서는 제한된 범위에서만 연구가 수행되어져 왔다. 액체로켓엔진에서는 수많은 동축형 분사기가 설치되기 때문에 각 분사기의 출구 위에서 형성된 압력의 형상에 따라 화염반응이 달라질 수 있다. 따라서 횡방향 음향이 화염에 미치는 영향을 다양한 조건에서 분석하는 것은 중요하다.

본 연구에서는 전단 동축형 분사기가 설치된 횡방향 연소불안정 모사 실험장치를 이용하여 연소기의 종방향 모드에 커플링된 횡방향 음향이 화염반응에 어떤 영향을 미치는지 실험적으로 연구하였다. 넓은 조건에서 포괄적인 결과를 도출하기 위해 분사기 형상, 연소실 길이, 당량비, 가진 주파수 및 진폭, 그리고 음향 위상을 독립적으로 변경시켜가며 실험하였다.

### 실험 장치 및 방법

Fig. 1은 본 연구에 사용된 실험장치와 전단 동축형 분사기의 개략도를 보여준다. 연료와 산화제는 모사 추진제로써 기체 메탄과 기체 산소를 사용하였다. 연소기의 길이는 170과 360 mm로 변경이 가능하다. 음향 발생기는 연소실 양쪽 벽에 설치되어 있으며 동시에 음향을 공급하여 정상파를 형성시키고자 하였다. 1번 분사기는 리세스 길이가 0 mm이며, 2번 분사기는 5 mm로 제작되었다.

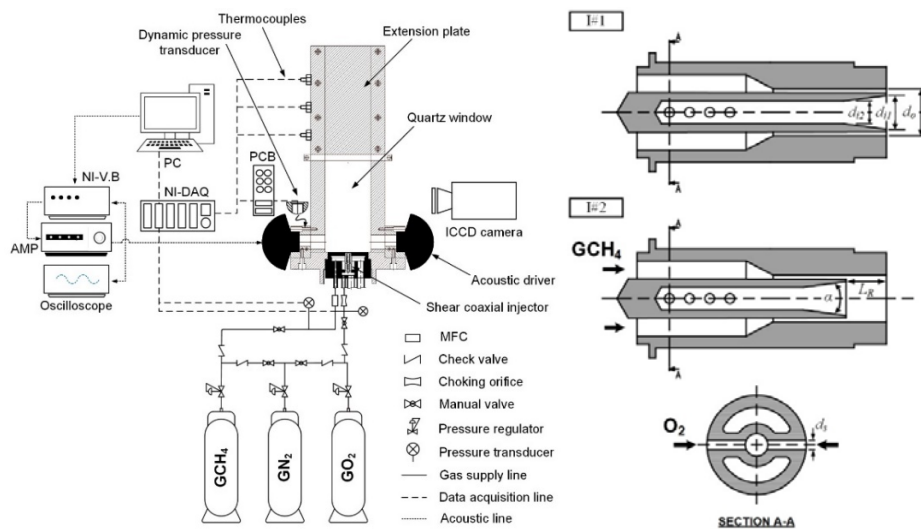


Fig. 1 Schematic of experimental set-up (left) and shear coaxial injectors (right)

실험조건들은 간략하게 Table 1에 정리되었다. 가진 주파수( $f$ )는 연소실 길이( $L_c$ )의 1차 종방향 모드를 모두 포함하도록 설정하였다. 음향 진폭( $p'/p_{atm}$ )은 대기압 대비 압력섭동의 값으로 정의하였고 주파수에 관계없이 동일한 진폭으로 음향을 공급하였다. 음향 위상( $\theta_{s1-s2}$ )은 각 스피커에서 공급되는 신호의 위상차이를 의미한다. 스피커로부터 동일한 위상으로 사인파가 공급되면 분사기 중심축 위에서 Fig. 2의 좌측과 같이 pressure antinode가 형성된다. 이는 강한 축방향 압력섭동을 유도하지만 횡방향 속도섭동은 존재하지 않는다. 신호가 서로 반대 위상으로 공급되면 Fig. 2의 우측 이미지처럼 pressure node가 발생한다. 이는 반대로 횡방향 속도섭동을 야기하고 축방향 압력섭동은 나타나지 않는다.

Table 1. Experimental conditions

Fuel	GCH <sub>4</sub>
Oxydizer	GO <sub>2</sub>
$L_c$ [mm]	170, 360
$f$ [Hz]	150 ~ 1,000, $\Delta 50$
$p'/p_{atm}$ [%]	0.50, 0.25
$\phi$	0.60, 1.00, 1.40
$\theta_{s1-s2}$ [°]	0 (pressure antinode), 180 (pressure node)

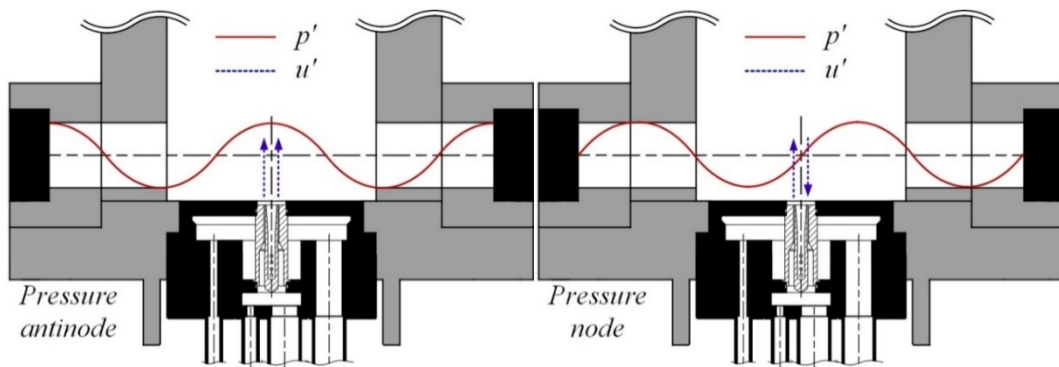


Fig. 2 Examples of the transverse acoustic excitation:  $\theta_{s1-s2} = 0^\circ$  (left) and  $\theta_{s1-s2} = 180^\circ$  (right)

### 실험 결과

횡방향 음향파에 대한 화염반응을 분석하기 위해 분사기 외경으로 정규화된 화염길이는 주파수에 따라 Fig. 3에 제시되었다. 이는 1번 분사기에서 연소실 길이 360 mm일 때 결과이다. 빨간색 점선은 ICCD 카메라를 이용하여 촬영 가능한 최대 화염길이이다. 검은 선은 각 당량비에서 측정된 비가진 조건의 화염길이이다. Fig. 3의 좌측 이미지에서 나타났듯이 동일한 위상의 사인파가 공급되었을 때 연소실의 1차 종방향 공진 주파수인 300 Hz에서 화염소멸 현상이 발생하였다. 공진 주파수 근처에서도 화염이 급격하게 짧아지는 것을 보여준다. Fig. 3의 우측 이미지는 횡방향 속도섭동이 발생한 경우이다. 공진 주파수에서 화염길이가 약간 감소하지만 모든 조건에서 화염이 유지되는 것을 보여주었다.

Fig. 4는 Fig. 3과 동일한 분사기와 유동조건에서 연소실 길이가 170 mm로 감소되었을 때 실험결과이다. Fig. 3과 마찬가지로 축방향 압력섭동이 부과된 경우에는 600 Hz의 종방향 공진 주파수에 근접하면서 화염길이는 감소하다가 일부조건에서는 소멸이 관측되었다. 횡방향 속도섭동의 경우에도 Fig. 3과 유사한 결과를 보여주었다.

Fig. 5는 Fig. 3과 동일한 조건에서 2번 분사기의 결과를 보여준다. 약간의 감소된 화염이 측정되었지만 공진 주파수와 관계가 없으며 전반적으로 음향에 큰 영향을 받지 않았다. 결과는 리세스 영역이 횡방향 음향에 대한 화염반응을 감소시킬 수 있음을 가리킨다.

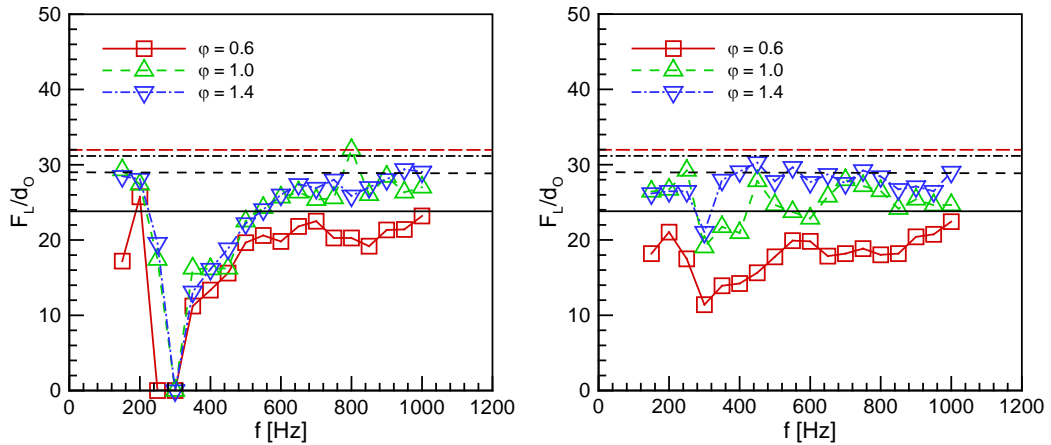


Fig. 3 Normalized flame lengths using I#1 and  $L_C = 360$  mm:  $p'/p_{atm} = 0.50\%$  (left),  $\theta_{s1-s2} = 0^\circ$  and  $p'/p_{atm} = 0.50\%$ ,  $\theta_{s1-s2} = 180^\circ$  (right)

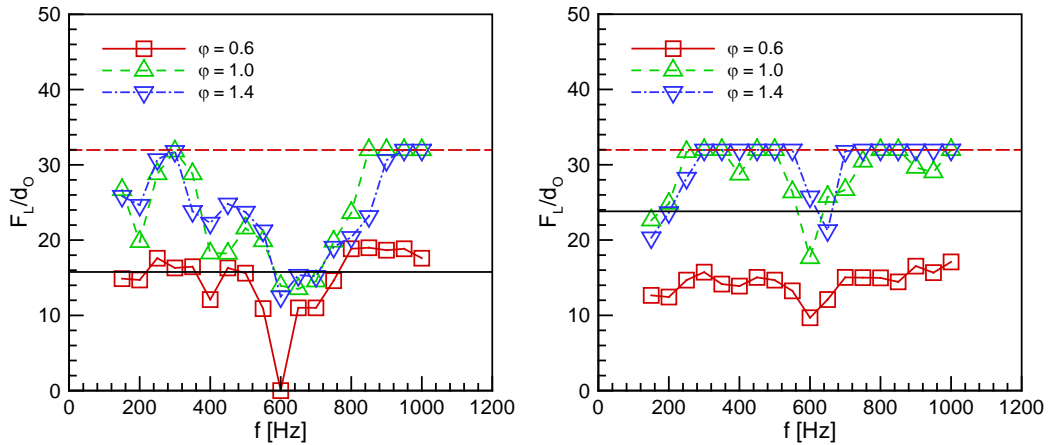


Fig. 4 Normalized flame lengths using I#1 and  $L_C = 170$  mm:  $p'/p_{atm} = 0.50\%$ ,  $\theta_{s1-s2} = 0^\circ$  (left) and  $p'/p_{atm} = 0.50\%$ ,  $\theta_{s1-s2} = 180^\circ$  (right)

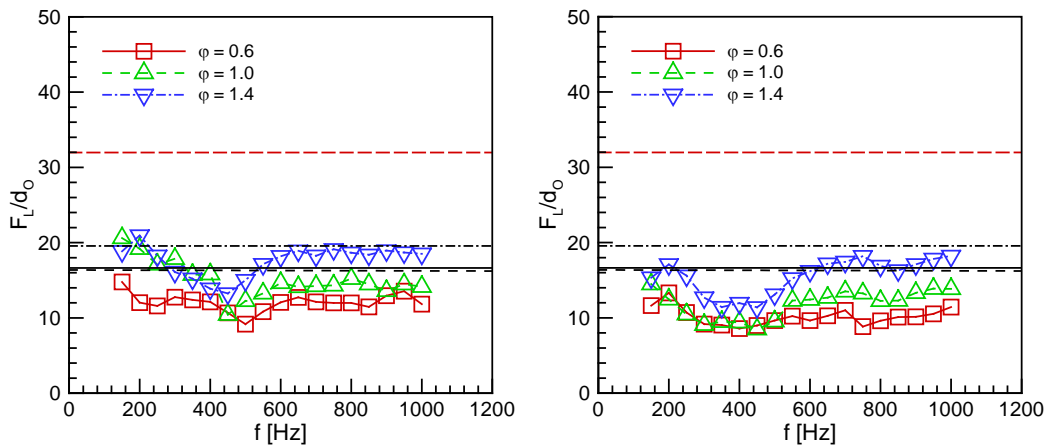


Fig. 5 Normalized flame lengths using I#2 and  $L_C = 360$  mm:  $p'/p_{atm} = 0.50\%$ ,  $\theta_{s1-s2} = 0^\circ$  (left) and  $p'/p_{atm} = 0.50\%$ ,  $\theta_{s1-s2} = 180^\circ$  (right)

Fig. 6은 동일한 작동조건에서 350 Hz의 가진 주파수가 같은 위상으로 공급되었을 때 분사기 형상에

따른 순간 CH\* 자발광 이미지를 나타낸다. 결과는 축방향 압력섭동이 분사기의 리세스 영역에 따라 나타나는 화염반응의 차이를 제시한다. 리세스 길이가 없는 좌측 두개의 이미지에서는 분사기 위에서 형성된 축방향 압력섭동의 위상에 따라 화염이 정착과 부상을 반복한다. 이는 연소실로 일정하게 공급되는 추진제의 유량을 방해하는 것이다. 반면 리세스 영역이 존재하는 2번 분사기에서는 화염이 분사기 평면에 모두 정착되어 있는 것을 확인된다. 리세스 영역에서 이미 반응이 일어나기 때문에 압력섭동이 유량에 큰 영향을 미치지 못하는 것으로 판단된다.

Fig. 7은 횡방향 속도섭동이 부과된 경우 나타난 화염구조를 다양한 조건에서 보여준다. 반대 위상을 갖는 음향이 공급된 경우에는 축방향 압력섭동과 관계가 없기 때문에 감소된 화염길이를 유도하는 메커니즘이 다르다. 강한 횡방향 속도섭동이 연소실 하류의 부력지배영역에 영향을 준다. 연소실 길이나 분사기 형상에 따라 화염이 뒤틀린 형태를 보여주기도 하며 좌/우로 심하게 흔들리기도 한다. 즉 하류에서 왜곡된 화염에 의해 화염길이가 감소된 것처럼 측정된 것이다. 하지만 모멘텀 지배영역에 해당하는 분사기 평면 근처의 화염은 횡방향 음향에 큰 영향을 받지 않았다.

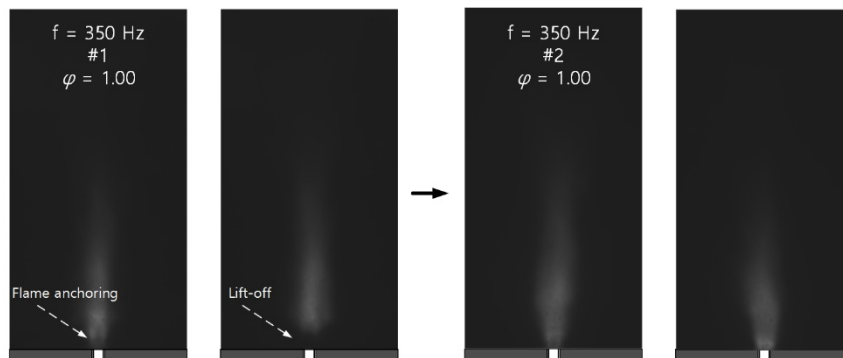


Fig. 6 CH\* chemiluminescence images using I#1,  $L_C = 360$  mm (left) and I#2,  $L_C = 360$  mm (right) at  $p'/p_{atm} = 0.50\%$ ,  $\theta_{s1-s2} = 0^\circ$

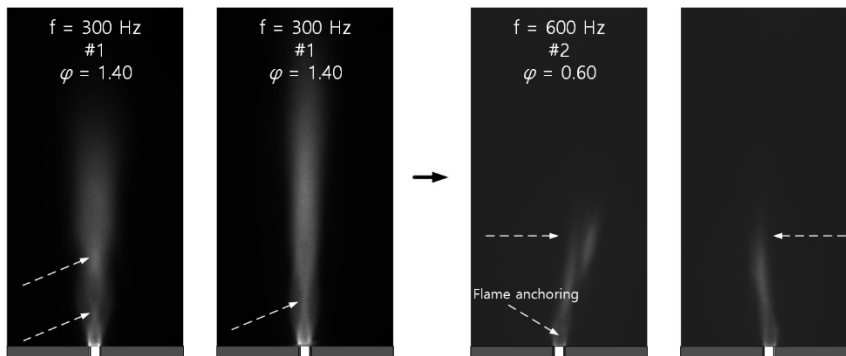


Fig. 7 Normalized CH\* chemiluminescence images using I#1,  $L_C = 360$  mm (left) and CH\* chemiluminescence images using I#2,  $L_C = 170$  mm (right) at  $p'/p_{atm} = 0.50\%$ ,  $\theta_{s1-s2} = 180^\circ$

### 결론

전단 동축형 분사기를 이용하여 횡방향 음향이 화염반응에 미치는 영향이 연구되었다. 횡방향 음향은 연소실의 종방향 공진 모드와 커플링 되어 화염과 상호작용하였다. 리세스가 없는 분사기에 pressure antinode가 부과된 경우, 공진 주파수에 근접하면서 화염길이가 급격하게 감소하다가 소멸 되었다. 하지만 리세스 영역이 존재하면 축방향 압력섭동에 대해 큰 영향을 받지 않았다. 횡방향 속도섭동이 형성되면 부력지배영역에서 화염구조가 심하게 왜곡되었다. 하지만 모멘텀 지배영역에서는 속도섭동이 큰 영향을 미치지 못하였다. 결과는 음향 위상과 리세스 영역이 화염반응에 영향을 미치는 주요한 인자임을 보여준다. 따라서 동일한 횡방향 불안정성이 액체로켓엔진에 발생하여도 분사기마다 나타내는 연소불안정 메커니즘은 다를 수 있음이 확인되었다.