

論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 41(1), 40-47(2013)

DOI:<http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2013.41.1.40>

하이브리드 로켓 연소실의 와류발생과 연소압력 진동

박경수*, 신경훈**, 이창진***

Vortex sheddings and Pressure Oscillations in Hybrid Rocket Combustion

Kyungsoo Park*, Kyung-Hoon Shin** and Changjin Lee***

Dept. of Aerospace Engr., Konkuk University*.,***, Hanwha Co.,Ltd.**

ABSTRACT

The similarity in internal flow of solid and hybrid rocket suggests that hybrid rocket combustion can be susceptible to instability due to vortex sheddings and their interaction. This study focuses on the evolution of interaction of vortex generated in pre-chamber with other types of vortex in the combustor and the change of combustion characteristics. Baseline and other results tested with disks show that there are five different frequency bands appeared in spectral domain. These include a frequency with thermal lag of solid fuel, vortex shedding due to obstacles such as forward, backward facing step and wall vortices near surface. The comparison of frequency behavior in the cases with disk 1 and 3 reveals that vortex shedding generated in pre-chamber can interact with other types of vortex shedding at a certain condition. The frequency of Helmholtz mode is one of candidates resulting to a resonance when it was excited by other types of oscillation even if this mode was not discernable in baseline test. This selective mechanism of resonance may explain the reason why non-linear combustion instability occurs in hybrid rocket combustion.

초 록

하이브리드 로켓은 고체로켓과 매우 흡사한 내부유동 특성을 가지고 있으므로 와류홀림(vortex shedding)은 하이브리드 로켓에서도 연소안정성에 영향을 미치는 중요한 인자로 판단된다. 본 연구에서는 예연소실에서 와류를 발생시켜 연료 표면와류와의 간섭과 연소 특성 변화를 관찰하였다. 기본 형상과 디스크를 장착한 실험 결과, 5개의 주파수 특성이 관찰되었으며 이들은 각각 추진제의 열적지연에 의한 주파수, 디스크, 연료 단면, 후연소실 단면 변화에 의한 와류홀림과 관련된 주파수임을 확인하였다. 특히 디스크 1과 3의 결과를 비교해 보면 디스크 위치에 따라 변화하는 와류홀림이 연소실의 특정 주파수 특성과 상호 간섭하여 공진이 발생하기도 하지만, 또 다른 경우에는 어떠한 간섭도 일어나지 않는 것을 확인하였다. 이러한 선택적 공진현상은 하이브리드 로켓의 비선형 연소안정성 발생을 설명할 수 있는 중요한 메카니즘으로 판단된다.

Key Words : Hybrid Rocket Motor(하이브리드 로켓 모터), Vortex Shedding(와류홀림), Nonlinear Combustion Instability(비선형 연소불안정)

† Received: August 1, 2012 Accepted: December 29, 2012

<http://journal.ksas.or.kr/>*** Corresponding author, E-mail : cjlee@konkuk.ac.kr

pISSN 1225-1348 / eISSN 2287-6871

I. 서 론

고체로켓에서 발생하는 여러 현상 중 와류홀림(vortex shedding)은 연소안정성에 영향을 미치는 매우 중요한 인자 중 하나이다. 많은 연구자들은 와도 발생(vorticity generation)과 와류홀림(vortex shedding)이 연소안정성에 어떤 영향을 미치는지 연구하였다. 특히 비선형 연소불안정의 원인으로 파악된 와도발생은 최소한 다음 다섯 단계의 과정을 거쳐 발생한다. 1) 유동방향 선회, 2) 펌핑작용, 3) 음향 모드와 와도와의 상호작용, 4) 노즐과 와도와의 상호작용, 5) 연소실 내의 와도파(vorticity waves)와 난류간의 상호작용이다. Fig. 1은 와도 생성 메커니즘과 관련된 두 가지 현상에 대한 그림이다. 수직방향으로 분출되는 유동이 펌핑작용을 하고 축 방향의 유동과 간섭하면 유동방향 선회가 이루어지며, 이로 인하여 추진제 표면 근처에서는 작은 크기의 와류홀림이 발생한다[1,2].

또한 와류홀림은 타이탄 IV, 아리안 5 부스터 등과 같이 길이가 긴 대형 고체로켓 압력진동의 원인으로 알려져 있다[3]. 와류홀림의 발생 원인은 1) 연소 지연제(inhibitor)와 같은 장애물 2) 후향 계단(backward step) 등의 기하학적 형상 3) 연소면 근처의 불안정한 유동에 의해 발생하고 있다.

하이브리드 로켓은 고체로켓과 매우 흡사한 내부유동 특성을 가지고 있다. 고체로켓은 증발된 추진제의 질량 축적이 축 방향 난류유동으로 발전하지만 하이브리드 로켓은 완전히 발달한 난류 산화제 유동이 유입된다. 그러나 고체로켓과 마찬가지로 하이브리드 로켓은 예연소실(pre-chamber) 과 연소효율 향상을 위한 후연소실(post-chamber)을 갖고 있으므로 후방 계단이나 장애물에 의한 와류홀림이 발생한다. 그리고 연료로 유입되는 축 방향 산화제 유동과 고체연료 표면에서 발생하는 연료의 기화유동 사이의

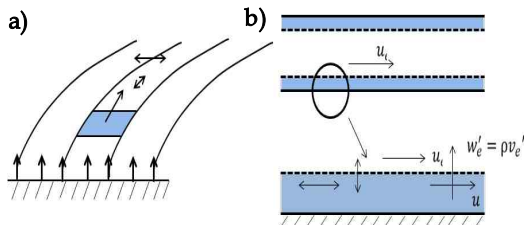


Fig. 1. Mechanism of Vorticity generation
a) flow-turning b)pumping action[1]

간섭은 벽면 와류홀림으로 발생한다고 확인되었다[4]. 따라서 고체로켓과 하이브리드 로켓은 다른 연소 특성을 보여주지만 와류발생과 홀림, 유동간섭 등과 같은 내부 유동 특성은 두 로켓에서 모두 흡사하게 나타나고 있다.

한편 프랑스 연구자들은 고체로켓의 벽면 와류와 연소지연제에 의하여 발생하는 와류의 상호 간섭과 유동 특성 변화에 대한 연구를 수행하였다[5,6,7]. 연구 결과에 의하면 두 와류의 상호 간섭은 새로운 형태의 와류로 진화하여 압력진동의 진폭을 증가시키지만 어떤 경우에는 압력진동이 상쇄되는 현상이 발생하는 것을 관찰하였다. 즉, 두 종류의 와류가 간섭하는 경우 연소특성의 변화를 가져올 수 있음을 확인하였다.

고체로켓과 하이브리드 로켓은 연소실 내부 유동이 매우 흡사하며 후방 계단이나 장애물, 연료면 근처에서의 불안정한 유동으로 인한 와류홀림이 발생하는 공통점을 갖고 있다. 따라서 본 연구에서는 예연소실에서 와류를 발생시켜 연료 표면 와류와의 간섭과 연소 특성 변화를 관찰하였다.

II. 본 론

2.1 실험장치

실험은 기체 산소(GOx)를 산화제로 사용하였고, PMMA(Poly Methyl Meth Acrylate)를 고체 연료로 사용하였다. Fig. 2는 본 연구에서 사용한 하이브리드 로켓 모터의 내부도와 사진이다. 예연소실, 연소실, 후연소실을 갖는 형태의 연소 실험장치이다. PLC(Programming Logic Controller)

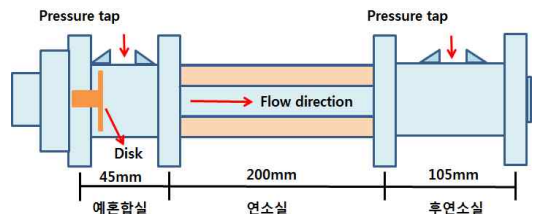


Fig. 2. Schematic of the experimental setup

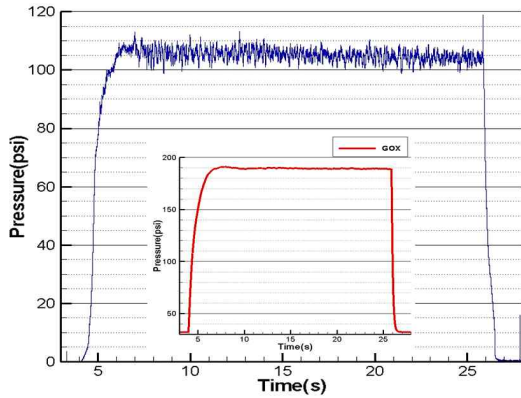


Fig. 3. P-t results in baseline test

와 솔레노이드 밸브를 이용하여 정해진 시간 동안 산화제 공급을 제어하였다. 또한 SEGA사의 질량유량조절기로 산화제 유량을 조절하였으며, 수냉식으로 노즐을 냉각하였다.

2.2 기본실험과 주파수 분석

우선 기준을 설정하기 위하여 예연소실에 아무 것도 장착하지 않은 기본실험을 수행하였다. Fig. 3은 기본실험의 연소압력 변화를 측정된 그림이다. 연소압력은 105psi 부근에서 유지되고, 5psi 정도 압력진동이 발생하고 있다. 산화제 공급 압력은 190psi로 연소가 진행되는 동안 일정하게 유지되는 것을 확인하였다.

Figure 4는 시간에 따른 연소 압력진동에 대한 FFT (Fast Fourier Transform) 분석을 보여주고 있다. 100Hz 미만의 낮은 주파수 진동이 주로 발생하고 있음을 알 수 있다. 진폭이 작은 100Hz 이상의 주파수 특성은 따로 분리하여 0~80Hz 와 50~900Hz 영역으로 나누어 연소압력의 진동 특성을 분석하였다. 10Hz에서 우세한 주파수가 나타나고 400~250Hz, 600~400Hz, 650~500Hz에 걸쳐 여러 주파수 특성이 나타난다. 각각의 영역을 주파수 f_1 , f_3 , f_4 , f_5 로 구분하였다.

주파수 f_1 은 10Hz 근처의 진동 특성을 보여주고 있으며 연소하는 동안 가장 우세한 크기를 가진다. 하이브리드 로켓연소에서 축 방향으로 유입되는 산화제 유동과 고체연료가 기화되어 발생하는 수직 방향의 유동이 서로 간섭하며 경계층을 형성한다. 형성된 경계층은 산화제 유입 양이나 흐름에 따라 변화하는데, 이것은 연료로 전달되는 대류 열전달량을 변화시키고 고체연료가 증발하는데 열적 지연(thermal lag) 현상을 일으킨다. 이러한 현상 때문에 발생하는 주파수는 대략 8~12Hz

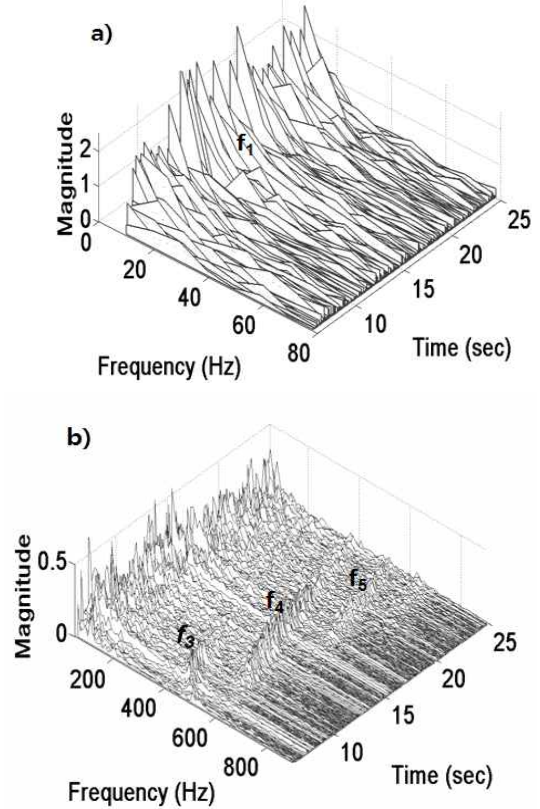


Fig. 4. FFT waterfall in baseline test
a) 0~80Hz b) 50~900Hz

정도의 진동 특성을 갖고 있다[8]. 따라서 10Hz 근처에서 나타나는 주파수 f_1 은 고체연료의 열관성에 의한 고유의 특성으로 볼 수 있다.

400~250Hz 영역에서 발생하는 주파수 f_3 은 연소 시작 후 5초 정도 지속하다 사라진다. 산화제의 유동이 예연소실에서 연료면 입구로 유입될 때 연료의 형상으로 인해 유동 단면적이 축소되는데, 이로 인하여 와류홀림 현상이 발생한다. Largeau 등은 평판에서 높이 h 의 장애물이 있을 때 발생하는 와류홀림에 대한 실험연구를 진행하였다. 그 결과에 의하면 레이놀즈수 Re_h 가 $2.88 \times 10^4 \sim 1.28 \times 10^5$ 영역에서 발생하는 와류홀림에 의한 Strouhal 수는 0.5 인 것으로 확인되었다[9].

$$St = \frac{fh}{U_c} \approx 0.5 \quad (1)$$

그러나 식(1)은 연소가 포함하지 않은 유동에 대한 결과이다.

본 실험에서 사용한 Re수가 2.5×10^4 정도로 참고문헌 [9]의 Re수와 비슷한 영역이므로 연료 면의 높이 h 를 1.5cm, $U_c=12\text{m/s}$ 로 할 때, 식 (1)에 대입하여 와류홀림 주파수를 계산하면 400Hz 정도의 주파수 특성을 얻을 수 있다. 이 주파수 영역은 연소 초기에 나타났다가 바로 사라지는데 연소가 진행될수록 연료 입구가 점차 확장되어 둥근 형태로 변화되는 것을 고려할 때, 이에 해당하는 주파수임을 간접적으로 확인할 수 있다. 따라서 주파수 f_3 는 유동이 연료 면으로 유입될 때 갑자기 축소되면서 나타나는 와류홀림 주파수인 것으로 판단된다.

연소 초기를 제외하고 연소가 끝날 때 까지 지속적으로 나타나는 600~400Hz 영역의 주파수 f_4 는 연료 표면에 근접한 영역에서 발생하는 와류와 관련된 것으로 판단된다. 산화제의 난류유동과 연료 기화에 의한 벽면 분출 유동 간 상호 간섭한다. 이로 인해 발생하는 와류현상에 대하여 김보훈 등은 수치해석을 통해 일정한 주파수 특성을 갖고 있음을 확인하였고, 압력섭동 주파수 특성은 $\omega^*(\text{angular frequency})=8.5\sim 9.0$ 으로 분석되었다[10]. 산화제 유속 15m/s, 연소실 지름 5cm를 사용하면 식(2)로 부터 주파수는 500Hz 정도로 계산된다.

$$f_4 = \frac{\omega^* U_b}{2\pi D} \quad (2)$$

이 때 ω^* 는 연소가 포함되지 않은 유동에서의 값이지만 산화제 유속 차이 등으로 인한 오차를 고려했을 때, 정성적으로 f_4 주파수 영역임을 의미한다고 판단된다.

주파수 f_5 는 650~500Hz 영역으로 연소가 끝나기 전 짧은 시간동안 작은 진폭으로 나타난다. 유동이 연료 면에서 후연소실로 나오면서 갑자기 확장되므로, 이로 인한 와류홀림이 발생하고 f_5 주파수 특성이 나타난다.

2.3 예연소실에서 발생하는 와류의 영향

예연소실 내부에 디스크를 장착하여 인젝터로부터 분사되는 산화제 유동을 부분적으로 차단하여 와류를 발생시키고, 유동의 특성을 변화시켰다. 또한 디스크의 위치를 변경하여 와류의 강도를 조절하였고, 연소특성 및 압력진동에 어떠한 영향을 미치는지 살펴보았다. Fig. 5는 실험에 사용한 3개의 디스크이며, 각각 Disk 1, 2, 3으로 구분하였다. 지름은 33mm로 모두 같고, 예연소실 길이 방향의 1/4, 2/4, 3/4에 디스크가 위치하도록 하였다.



Fig. 5. Disk Configuration

2.3.1 Disk 1 에 대한 실험결과 및 주파수 분석

Disk 1을 장착하여 수행한 연소실험의 압력진동은 기본실험의 압력진동과 비교할 때, 안정된 진동 특성을 나타낸다. 이것은 산화제의 불규칙한 흐름이 디스크를 거치면서 일차적으로 안정화되기 때문이다.

Figure 6은 4개의 영역에서 주파수 특성이 나타나고 있음을 보여준다. 기본실험에서의 주파수 특성과 흡사하게 10Hz 영역의 주파수가 우세하고, 200Hz 이상에서 3개의 주파수 영역이 나타나고 있다.

Figure 7은 진폭이 작은 100Hz 이상의 주파수 영역을 따로 분리하여 0~80Hz와 50~900Hz로 나누어 연소압력 진동특성을 분석한 그림이다. 기본실험 결과와 비교할 때 10Hz의 진폭이 0.5 정도로 작아졌음을 알 수 있다. 그에 비해 100Hz 이상의 영역에서는 상대적으로 진폭의 크기가 커진 것을 볼 수 있다. 또한 기본실험에서 나타나지 않았던 40~80Hz 영역의 진동이 측정되었는데 이를 주파수 f_2 라 하였다. Miao 등은 원형 Disk에 의하여 발생하는 와류홀림의 주파수특성에 대한 실험연구를 수행하였다. $Re=10^3\sim 10^5$ 의 범위에서 디스크 후방에 발생하는 와류특성을 분석

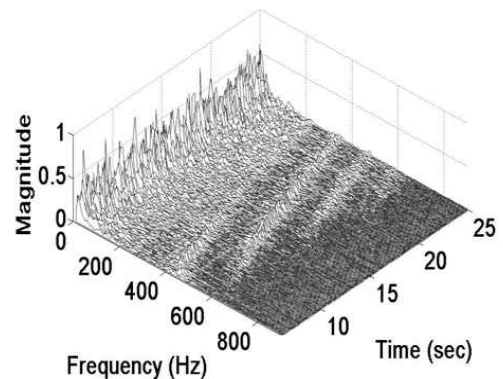


Fig. 6. FFT waterfall in Disk 1 test

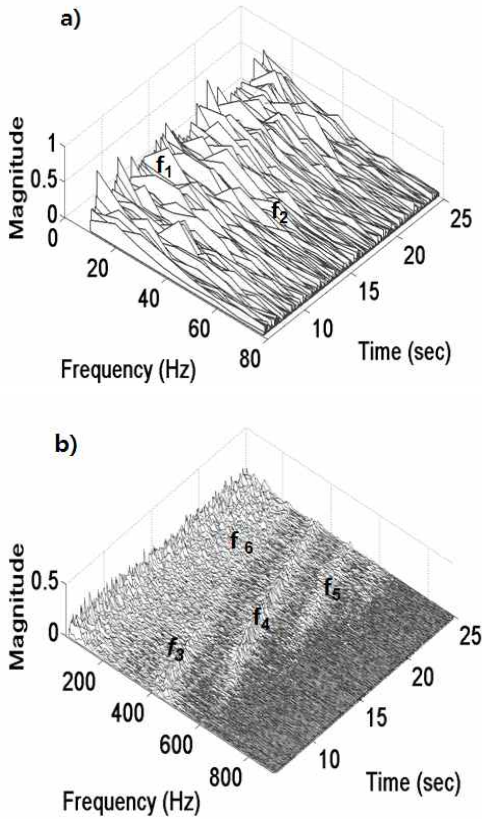


Fig. 7. FFT waterfall in Disk 1 test
a) 0~80Hz b) 50~900Hz

한 결과 Strouhal 수는 0.134의 값을 나타내고 있음을 확인하였다[11].

$$St = \frac{fD}{U} \approx 0.134 \quad (3)$$

따라서 디스크 지름 33mm, 산화제 유속 15m/s 일 때, 식(3)을 이용하여 주파수 영역을 계산하면 60Hz 정도의 주파수 특성을 나타낸다. 측정된 주파수 f2와 같은 영역이며 디스크에 의한 것임을 알 수 있다.

한편 연소를 효율적으로 발생시키기 위해 연소실 양 끝에 예연소실과 후연소실이 장착되어 있고 Helmholtz 진동 현상이 발생할 수 있다. 이때 발생하는 진동 주파수를 f6으로 정하였다. 음속 $c = 516\text{m/s}$, 연소실 길이 $L=0.2\text{m}$, 단면적 $A = 3.46 \times 10^{-4}\text{m}^2$, 후연소실 부피 $V=2.06 \times 10^{-4}\text{m}^3$ 를 사용하면 Helmholtz 모드에 의하여 발생하는 진동 주파수를 식(4)를 이용하여 계산할 수 있다.

$$f_6 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{A}{VL}} \quad (4)$$

계산된 주파수는 대략 200Hz 부근이다. 그러나 기본실험이나 Disk 3을 장착한 실험에서 Helmholtz 모드의 진동 특성은 나타나지 않고 있다. 이것은 Helmholtz 모드 진동을 여기(excite) 하기에 연소교란이 매우 작기 때문이라고 판단된다. Disk 1의 경우 연소가 진행됨에 따라 f3이 점점 작아져 200Hz 부근으로 근접하면서 공진에 의한 Helmholtz 모드의 진동 특성이 나타나고 있음을 볼 수 있고, 연소시간 15초 이후에 잘 나타나고 있다.

2.3.2 Disk 2 에 대한 실험결과 및 주파수 분석

Disk 2를 장착하여 수행한 연소압력 변화는 Disk 1을 장착하고 수행한 실험결과와 같이 전반적으로 안정된 진동 특성을 갖는다. Fig. 8은 0~50Hz 까지 주파수 특성을 분석한 그림이다. 10Hz 근처의 주파수 진폭이 기본실험과 비교하여 0.5 정도로 작아졌고, 디스크에 의한 와류홀림 주파수 f2가 나타난다.

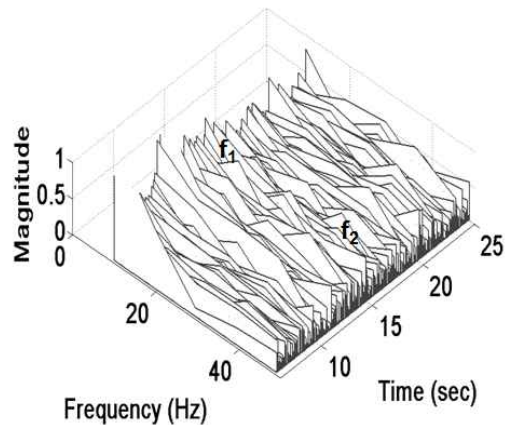


Fig. 8. FFT waterfall in Disk 2 test (0~50Hz)

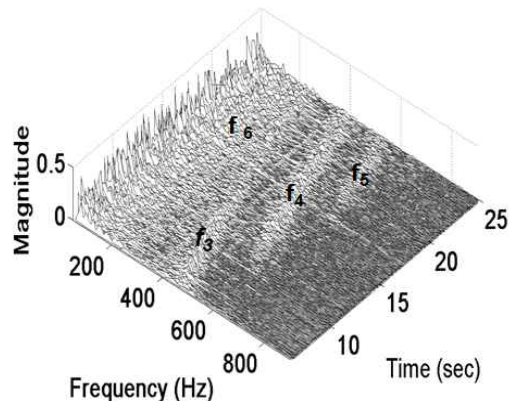


Fig. 9. FFT waterfall in Disk 2 test (50~900Hz)

Figure 9는 주파수 영역 50~900Hz 부분만 확대하여 나타낸 그림이다. 200Hz 이상의 영역에서 기본실험과 같은 주파수 f_3 , f_4 , f_5 가 나타난다. 그러나 Disk 1 실험결과와 비교했을 때 각 주파수의 진폭이 상대적으로 작아졌음을 볼 수 있다. 또한 200Hz 부근의 Helmholtz 모드 진동도 여기 되어 연소 후반부에 나타나고 있으나, Disk 1의 경우보다는 진폭의 크기가 작게 나타나고 있다.

2.3.3 Disk 3 에 대한 실험결과 및 주파수 분석

Disk 3을 장착하여 연소압력을 측정된 결과 Disk 1, Disk 2 실험결과와 같이 115psi 정도의 연소압력을 유지하였고, 압력진동이 매우 안정적인 특징을 보여준다.

Figure 10은 0~50Hz 사이의 저주파수 특성을 확대한 그림이다. Disk 1, 2의 주파수 특성과 비교해 보았을 때 10Hz 부근 영역에서 진폭이 0.5 정도로 동일한 크기이고, 디스크에 의한 와류홀림

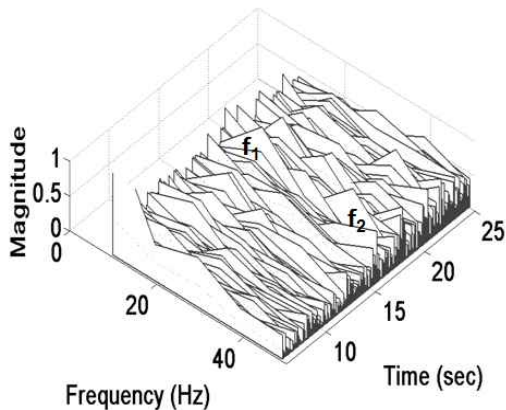


Fig. 10. FFT waterfall in Disk 3 test (0~50Hz)

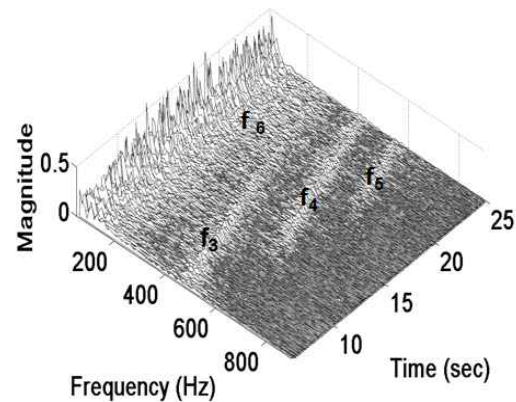


Fig. 11. FFT waterfall in Disk 3 test (50~900Hz)

주파수 f_2 도 나타난다. Fig. 11은 50~900Hz 주파수 영역을 확대하여 나타낸 그림이다. 기본실험과 같은 주파수 f_1 , f_3 , f_4 , f_5 의 특성을 볼 수 있다. 그러나 Disk 1 결과와 비교하였을 때, 150~200Hz 영역의 주파수 f_6 특성은 나타나지 않고 있다.

2.3.4 주파수 특성 비교; Disk 1 VS. Disk 3

디스크를 장착한 실험결과를 살펴보면 우선 주파수 f_2 영역이 모두 나타나고, 기본실험 결과와 동일하게 주파수 f_1 , f_3 , f_4 , f_5 가 나타나고 있다. 그러나 저주파수의 진폭은 상당히 작은 값을 보여주고 있는데, 이것은 인젝터의 불규칙한 제트유동을 디스크가 일차적으로 막아 산화제의 유동을 안정화 시킨 후 연료 면으로 유입되기 때문이다. 유입된 산화제 유동이 연료 기화에 의한 벽면 분출 유동과 경계층을 형성하고 연료에 전달되는 대류 열전달이 상대적으로 안정하게 이루어져, 열적 지연 현상으로 인한 연소압력 진동은 10Hz 근처에서 진폭이 작은 특성을 보이는 것으로 판단된다.

그러나 진동 특성을 비교해보면 재미있는 현상을 발견할 수 있다. Fig. 12는 Disk 1, 3의 진폭 크기를 정규화하여 시간에 따른 주파수 특성 변화를 나타내었다. Disk 1의 결과를 보면 15초 이후에 400Hz에서 시작된 주파수가 200Hz 부근

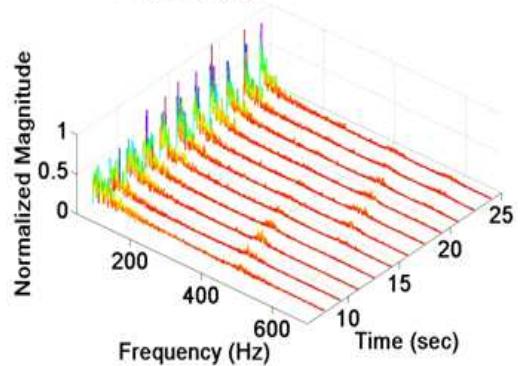
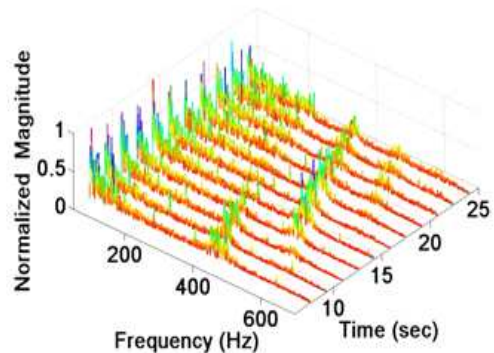


Fig. 12. Frequency waterfall of combustion Pressure with Disk1 and Disk3

영역까지 이동하여 상호 간섭을 하기 시작한다. 반면에 Disk 3에서는 400Hz 부근에서 시작된 주파수 진폭이 아주 미약하게 발생하며 이동하지만 200Hz 부근으로는 이동하지 못하고 있다. 따라서 Disk 1에서 볼 수 있었던 주파수 f6인 200Hz 영역과의 상호 간섭 현상이 나타나지 않는다. 즉, 예연소실의 와류홀림 현상은 어떤 경우에는 연소실의 주파수 특성과 상호 간섭하여 공진이 발생하기도 하지만, 또 다른 경우에는 어떠한 간섭도 일어나지 않는다. 이러한 와류홀림으로 인한 유동 진동의 상호 간섭은 비선형 연소불안정으로 발생할 수 있다는 것을 보여주고 있다고 판단된다. 그럼에도 불구하고 서로 다른 주파수 간섭이 연소압력에 직접적인 영향을 미쳤는지는 앞으로 더 많은 연구가 필요한 부분이다.

III. 결 론

하이브리드 로켓 연소실험 장치를 사용하여 예연소실에서 와류를 발생시켜 연료표면 와류와의 간섭과 연소특성 변화를 관찰하였다. 기본실험과 디스크 실험을 수행한 결과, 5개의 주파수 특성이 나타나는 것을 측정하였다.

주파수 f1은 유입된 산화제 유동이 연료 기화에 의한 벽면 분출 유동과 경계층을 형성하고, 연료에 전달되는 대류 열전달에 영향을 미쳐 열적 지연 현상을 일으킨다. 이러한 현상 때문에 발생하는 주파수 특성은 10Hz 부근이다. 주파수 f2는 예연소실 내부에 장착한 원형 디스크에 의하여 발생하는 와류홀림 주파수이며, 40~80Hz의 영역에서 나타난다. 400~250Hz 영역에서 나타나는 주파수 f3은 예연소실에서 연료 면으로 산화제 유동이 유입될 때 연료의 형상으로 인해 유동 단면적이 축소되면서 발생하는 와류홀림 주파수이다. 주파수 f4는 600~400Hz 영역에서 나타나며 산화제의 난류유동과 연료 기화에 의한 벽면 분출 유동 간 상호 간섭에 의해 발생하는 와류현상과 관계된다. 주파수 f5는 유동이 연료 면에서 후연소실로 나오면서 유동 단면적이 확장되므로 와류홀림이 발생하고, 이로 인해 650~500Hz 영역에서 나타난다.

연소실 형상으로 인한 Helmholtz 진동모드가 발생할 수 있으나, 기본실험에서 주파수 f6은 관찰되지 않았다. 그러나 Disk 1을 장착한 실험결과에서는 15초 이후에 400Hz에서 시작된 주파수 f3이 200Hz 부근 영역까지 이동하여 150~200Hz 영역인 주파수 f6과 상호 간섭하였으며, 이로 인

해 연소시간이 지날수록 주파수 진폭이 증가되는 것을 확인하였다. 기본실험이나 Disk 3의 실험에서는 공진현상이 일어나지 않는데, 그 이유는 Helmholtz 모드 진동을 여기하기에 연소교란이 매우 작기 때문이라고 판단된다. 따라서 디스크의 위치에 따라 예연소실의 와류홀림 현상이 연소실의 주파수 특성과 상호 간섭하여 공진이 발생하기도 하지만, 어떠한 간섭도 일어나지 않는다. 이러한 와류홀림으로 인한 유동 진동의 상호 간섭으로 공진현상이 발생할 수 있고, 진폭의 크기가 커지면 비선형 연소불안정으로 발전할 수 있다는 것을 실험적으로 확인하였다고 판단된다.

지금까지 분석한 주파수 특성을 바탕으로 앞으로는 연료 전방 및 후방에 Ring을 장착하여 주파수 f6과 인접한 다른 주파수 간의 상호 간섭을 통해 공진현상을 유도하고, 연소압력에 영향을 미치는지 알아보기 위한 실험을 진행할 예정이다.

후 기

본 연구는 한국연구재단의 중견연구자사업(2011-0027980) 지원을 받아 수행한 연구결과임을 밝히며 지원해주신 한국연구재단에 감사드립니다.

References

- 1) F. E. C., Culick, "Unsteady Motions in Combustion Chambers for Propulsion Systems," The Research and Technology Organization of NATO, 2006.
- 2) G. A., Flandro, "On Flow Turning," *AIAA paper* 95-2530, 1995.
- 3) R. A. Fiedler, B. Wasistho and M. Brandyberry, "Full 3-D simulation of turbulent flow in the RSRM," *AIAA 2006-4587*, 2006.
- 4) Changjin Lee and Yang Na, "Large Eddy Simulation of Flow Development in a Chamber with Surface Mass Injection," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 25, No. 1, 2009, pp.51~59.
- 5) Jerome Vetal, Frederic Plourde, and Son Doan-Kim, "Dynamics of an Internal Flow field Driven by Two Hydrodynamic Instabilities," *AIAA Journal*, Vol. 41, No. 3, 2003.
- 6) Jerome Vetal, Frederic Plourde, and Son Doan-Kim, "Amplification of Shear Layer Instability by Vorticity generation at an Injecting

Wall," *AIAA Journal*, Vol. 42, No. 1, 2004.

7) Chi Cong Nguyen, Frederic Plourde, and Son Doan-Kim, "Analysis of Injecting Wall Inclination on Segmented Solid Rocket Motor Instability," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 24, No. 2, 2008.

8) Changjin Lee, "Analysis of Non-Acoustic Combustion Instability of Hybrid Rocket," *KSAS Journal*, Vol. 29, No. 7, 2001, pp.96~102.

9) J. F. Largeau and V. Moriniere., "Wall

Pressure Fluctuations and Topology in Separated Flows over a Forward-Facing Step," *Experiments in Fluids*, 2007, pp.21~40.

10) Bohoon Kim, Yang Na, Changjin Lee, "LES for Turbulent Duct Flow with Surface Mass Injection," *KSAS Journal*, Vol. 39, No. 3, 2011, pp.232~241.

11) J. J. Miao, T. S. Leu, T. W. Liu, J. H. Chou., "On Vortex Shedding Behind a Circular Disk," *Experiments in Fluids*, 1997, pp.225~233.