

論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 46(12), 1021-1027(2018)

DOI:https://doi.org/10.5139/JKSAS.2018.46.12.1021

ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

하이브리드 로켓 연소실험에서의 고주파수 진동과 저주파수 연소불안정

채희상*, 이창진**

High Frequency Oscillations and Low Frequency Instability
in Hybrid Rocket Combustion

Heesang Chae* and Changjin Lee**

Konkuk University***

ABSTRACT

Experimental studies have been conducted to verify that the positive coupling between pressure oscillation (p') and combustion oscillation (q') of high frequency range is a prerequisite for the initiation of low frequency instability in hybrid rocket combustion. The post-chamber length and combustion equivalence ratio were selected as critical parameters to control the phase difference between p' and q' , and p' amplitude in relation to the suppression of LFI. In the results, even if the post-chamber length increases, the phase difference between p' and q' maintains below $\pi/2$, which is a necessary condition for the LFI development, but the amplification of RI (Rayleigh index) was substantially decreased leading to a stable combustion. In addition, results confirmed that combustion stability is achieved by changing the momentary equivalence ratio and/or by suppressing the positive coupling status of p' and q' . Thus, the periodic amplification of RI was identified as the middle path of the mechanism of occurrence of LFI.

초 록

하이브리드 로켓에서 고주파수 대역의 압력진동(p')과 열 방출 진동(q')이 양의 결합이 저주파수 연소불안정 발생에 필수조건임을 검증하기 위한 실험연구를 수행하였다. 후연소실 길이와 연소 당량비를 변수로 설정하여 p' 진폭과 p' , q' 의 위상차를 조절하였으며 저주파수 연소불안정의 억제 여부를 판단하였다. 실험 결과에 의하면, 후연소실 길이가 증가하여도 p' , q' 의 위상차는 $\pi/2$ 이하로 연소불안정 발생조건을 유지하지만 p' , q' 의 결합강도인 RI (Rayleigh index)의 주기적 증폭이 약화되면서 연소불안정이 억제됐다. 또한 특정한 당량비에서 연소불안정이 발생하므로 순간 당량비를 변화시켜 p' , q' 의 결합을 음의 결합으로 천이시켜 연소 안정화가 이루어짐을 확인하였다. 따라서 고주파수 p' , q' 이 양의 결합과 RI의 주기적인 증폭으로 연결될 때 저주파수 연소불안정이 나타나는 발생 메커니즘의 중간 경로도 확인하였다.

Key Words : Hybrid Rocket(하이브리드 로켓), Low Frequency Instability(저주파수 연소 불안정), High Frequency Oscillations(고주파수 진동), Positive Coupling(양의 결합)

† Received : September 17, 2018 Revised : October 16, 2018 Accepted : October 21, 2018

** Corresponding author, E-mail : cjlee@konkuk.ac.kr

1. 서 론

하이브리드 로켓은 다른 화학 로켓에 비해 상대적으로 안정적 연소를 나타낸다. 그럼에도 고체 연료의 열 관성으로 인한 열적 지연(thermal lag) 때문에 100Hz 미만의 저주파수 압력진동이 관찰된다. 또한 특정한 조건에서 저주파수 압력진동이 증폭하여 연소불안정으로 발전하며 이를 저주파수 연소불안정(LFI: Low Frequency Instability)라 한다[1,2].

한편 PMMA/O₂를 사용하는 하이브리드 로켓 연소에서 저주파수 압력진동 외에도 500Hz 대역의 고주파수 압력진동(p')도 함께 관찰되고 있다. 여러 연구에 의하면 고주파수 압력진동의 발생은 연소실의 기하학적 형상에 의한 음향파(acoustic wave)에 의한 현상이 아니라 수직 방향의 연료 기화유동이 축 방향 산화제 유동과 간섭하여 발생하는 작은 크기의 와류가 후연소실로 유입되면서 나타나는 것으로 밝혀졌다[1,4].

하이브리드 로켓의 연소에서 또 다른 흥미로운 현상은 연소에 의한 열 방출 진동(q')도 연소압력과 매우 흡사한 500Hz 대역의 고주파수로 진동한다는 사실이다. 문영주[1] 등은 CH* 화학발광과 광전증폭관(photo multiplier tube)을 이용하여 열 방출 진동을 측정하였는데 연소압력과 매우 유사한 고주파수 진동 특성을 갖고 있음을 확인하였다. 더욱이 이들 고주파 진동은 연소불안정이 발생하면 위상차가 $\pi/2$ 이하를 유지하며 양의 결합(positive coupling)을 형성하지만, 안정한 연소에서는 음의 결합(negative coupling)으로 천이하는 등 LFI 발생과 매우 밀접한 관계가 있음이 관찰되었다. 또한 최근 연구에 의하면 고주파수 열 방출의 진동은 주 연소실에서 기화하여 연소에 참여하지 못한 채 후연소실로 유입된 연료가 와류와 함께 이동하면서 추가적인 연소를 함으로 발생하는 것으로 밝혀졌다[3]. Jerome[4] 등은 하이브리드 로켓 연소에서 관찰된 다양한 주파수 대역 압력진동의 발생 원인에 대한 연구를 수행하였다. 그들의 결과에 의하면 약 470Hz 대역의 고주파수 압력진동의 발생은 후연소실로 유입되는 와류의 흘림 현상(vortex shedding) 때문인 것으로 분석하였으며 LES의 수치계산에서도 이를 확인하였다. 따라서 고주파수 대역의 연소압력과 열 방출 진동은 연료표면에서 생성되는 작은 크기의 와류와 미연연료 기체가 후연소실로 유입되며 발생한 현상으로, 유동의 특성과 매우 밀접한 관계가 있다.

한편, 하이브리드 로켓 시스템에서의 압력과

열 방출 진동사이의 위상 변화를 유도하는 물리적 인자에 대한 연구는 아직 충분히 이뤄지지 못하였다. 이와 유사한 연구로 Hong[5] 등은 후향 계단(backward facing step) 연소기에서 발생하는 압력진동과 열 방출 진동 사이의 위상 변화에 대한 실험 연구를 수행하였다. 결과에 의하면 당량비 변화에 따라 압력진동과 열 방출 진동 사이의 위상차가 변화하였으며 위상차에 따라 불안정성이 발생할 수 있음을 관찰하였다. 또한 Cross[6] 등은 몽푁한 물체 후방의 반응유동(reactive flow)에서 와류흘림과 열 방출 사이의 상호 작용과 불안정성 발달에 대하여 연구하였으며, 희박연소일 때 당량비를 조절하면 재순환 영역의 연소가 와류흘림에 의한 유동 진동에 직접적인 영향을 미쳐 유동 불안정으로 발달할 수 있음을 확인하였다.

비록 하이브리드 로켓 연소는 몽푁한 물체의 후류의 연소와 다른 유동특성을 갖고 있지만, 당량비 변화에 대한 연소압력의 진동특성과 위상 변화에 대한 연구결과는 고주파수 연소압력과 열 방출 진동의 특성변화를 이해하는 데 도움이 될 수 있다. Ditaranto[7] 등은 갑작스럽게 팽창하는 연소기에서 급격하게 발달하는 것을 확인하였다. 또한 Marsh 등[8]은 당량비의 변화가 연소의 동적 거동에 영향을 미쳐 열 방출과 화염의 위치를 변화시키며 연소불안정의 발달에 직접적인 요인이 될 수 있음을 보고하였다. 따라서 하이브리드 로켓 연소 실험에서 관찰된 저주파수 불안정의 발생은 연료직경 증가에 의한 당량비 천이와 밀접한 관계가 있으며, 고주파수 압력진동과 열 방출 진동의 위상에 영향을 미쳤을 것으로 추정할 수 있다.

최근, 이동연[9] 등은 하이브리드 로켓 연소의 동적 거동에 영향을 미치는 두 가지의 중요한 물리적 인자를 선정하였다. 첫째 인자로 당량비 변화, 두 번째는 압력진동의 진폭에 영향을 미치는 후연소실 길이를 사용하였다. 두 변수 변화에 대한 연소불안정 발생여부를 실험적으로 관찰하여 연소불안정 발생 지도를 작성했으며 불안정 연소가 발생하면 고주파수 대역의 p', q'이 양의 결합을, 안정한 연소가 유지되면 음의 결합으로 천이함을 확인하였다. 따라서 고주파수 대역 p', q'의 양의 결합이 저주파수 연소불안정 발생의 필요충분조건임을 제안하였다.

본 연구는 LFI 발생과 고주파수 대역 p', q'의 결합상태 변화가 밀접한 관계가 있음을 실험적으로 검증하는 것을 목적으로 하고 있다. 가설의

검증을 위하여 후연소실 길이를 증가하여 p' 의 진폭을 감소하였고, 당량비 조절에 의한 고주파수 대역 p' , q' 의 위상 변화와 결합강도를 나타내는 RI의 변화를 분석하여 LFI 발생에 미치는 영향을 실험적으로 검증하였다.

II. 본 론

2.1 실험 장치 및 실험 조건

2.1.1 실험 장치

연소실험은 기체산소(GOx)와 PMMA(Poly-Methyl MethAcrylate)를 산화제와 연료로 사용하였으며, 솔레노이드 및 체크 밸브를 설치하여 산화제 공급을 제어하였다. 산화제 질량 유량은 MFC(Mass Flow Controller)를 사용하여 최대 40g/sec 로 제어하였으며, 질소 가스는 프로그램 논리 제어기에 의해 연소 후, 남아있는 연소가스를 제거하는데 사용하였다.

Figure 1은 연소실험에 사용된 하이브리드 로켓 모터 사진이다. 예연소실의 길이는 45mm로 고정되었으며 예연소실 중간부에 Piezo type 센서(General Electric 사의 UNIK 5000)를 장치하여 연소 압력의 변화를 측정하였다. 예연소실, 주연소실, 후연소실 모두 50mm의 내경을 가지며, 주연소실에 위치하는 고체연료의 내경은 20mm, 외경 50mm이며 실험 조건에 따라 주연소실과 동일한 길이를 갖는다. DAQ 보드와 LabVIEW 프로그램은 연소 과정을 제어하며 실험에서 얻어지는 데이터 수집과 처리에 사용하였다. 또한 열 방출 진동을 측정하기 위해 Fig. 1과 같이 후연소실에 석영 창을 설치하였으며 Hamamatsu사 제작한 PMT H10722(광전증폭관)를 사용하여 연소에 의해 방출되는 광량의 변화를 측정하였다. 압력과 광량 모두 1초에 10000회 측정되었으며, 이는 최대 5000Hz의 주파수 특성을 갖는 변화를

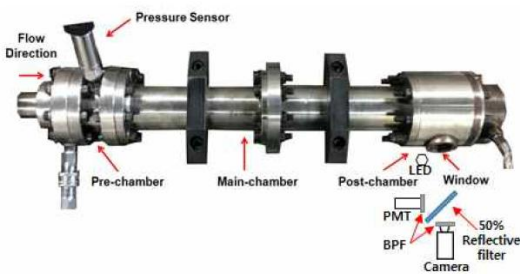


Fig. 1. Experimental set-up and combustion visualization

Table 1. Test cases and control factors

Test	Chamber length (mm)	Post chamber length (mm)	Control parameter
1	400	75	baseline
2	400	105	post chamber length
3	400	150	
4	200	75	equivalence ratio
5	200	105	

측정할 수 있다. 그 외의 실험장치의 수치와 측정에 대한 기초 자료는 참고문헌[1,3]에 잘 서술되어 있다. 또한 열 방출 진동의 신뢰도를 높이기 위해 CH*이 방출하는 430 nm 파장만 통과시키는 광학필터를 설치하여 CH* 발생량의 변화를 동시에 측정하였다.

2.1.2 실험 조건

앞서 언급하였듯이 고주파수 p' , q' 의 위상 변화가 저주파수 연소불안정 발생에 미치는 영향을 연구하기 위하여 Table 1과 같이 다양한 연소조건에 대하여 연소실험을 진행하였다.

Park[10]은 후연소실 길이 변화가 저주파수 연소불안정의 발생에 미치는 영향을 실험적으로 연구했으며 후연소실 길이를 변화시켜 고주파수 압력진동의 진폭이 조절됨을 관찰하였다. 후연소실 길이를 증가시키면 고주파수 압력진동의 진폭을 상당한 수준으로 감소시킬 수 있으며, 고주파수 대역의 두 진동의 결합 수준에 영향을 미칠 수 있음을 예측할 수 있다. 또 다른 방법으로 당량비 조절에 의해 고주파수 대역 p' , q' 의 위상차를 변화시킬 수 있다면 저주파수 연소불안정의 발생에 직접적인 영향을 미칠 수 있을 것으로 판단된다. 시스템 전체 평균의 순간 당량비는 참고문헌 [9]에서 제시한 방법으로 계산하였다. 따라서 후연소실 길이 변화에 의한 고주파수 연소압력의 진폭감소와 당량비 조절을 통한 고주파수 p' , q' 의 위상차 변화를 시도하여 어떤 물리적 현상이 발생하는지 확인하였으며 저주파수 연소불안정에 미치는 영향을 관찰하였다.

Figure 2는 참고문헌 [9]에서 제시한 연소안정성 지도이다. Test 1~5는 연소안정성 지도에서 채택하였으며, 저주파수 연소불안정이 나타나는 Test 1을 기본실험 조건(baseline)으로 설정한 후에 당량비와 후연소실 길이를 변화하면서 모두 다섯 가지 경우에 대한 실험을 수행하였다. Test 1~3의 조건은 연소 당량비를 결정하는 고체연료 길이를 일정하게 유지하면서 후연소실의 길이를

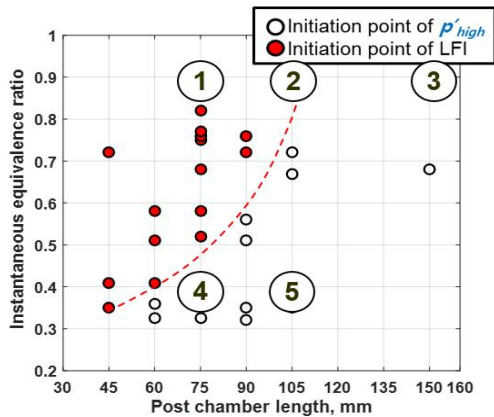


Fig. 2. Combustion instability map [9] and test cases

증가시켰으며, Test 4~5는 연료의 길이를 1/2로 줄여 연소 도중의 당량비 범위를 조절하였다.

2.2 실험 결과

2.2.1 고주파수 연소압력진동의 진폭 조절

Figure 3은 후연소실 길이를 증가시킨 Test 1, 2 그리고 3에서 측정한 연소압력 변화와 FFT 결과를 보여주고 있다. Magnitude는 주파수 별 크기(Power spectrum density)를 나타낸다. Test 1-3의 실험에서 연료 길이는 동일하며 연소시험

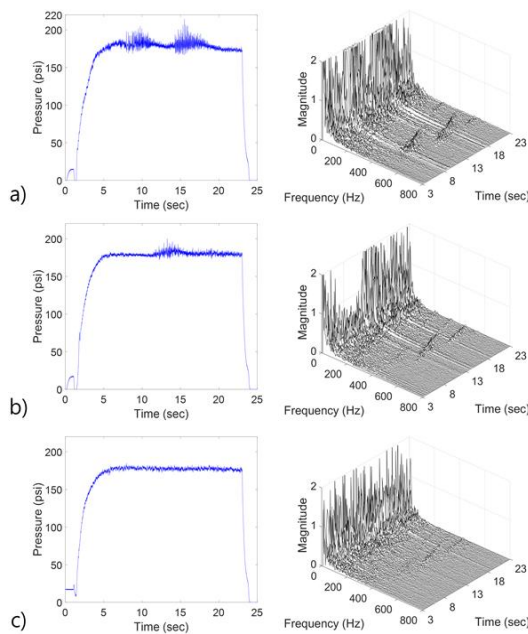


Fig. 3. Pressure trace and FFT results in Test a) 1, b) 2, and c) 3

동안 연료 내경이 증가하므로 당량비는 동일한 변화를 한다. 그림에서 알 수 있듯이 Test 1과 2의 연소압력 진폭은 불안정 연소가 나타나며, Test 3은 안정한 연소로 천이 된 경우이다. Fig. 4는 각 실험 조건에 대한 열 방출 진동과 FFT 결과를 도시하였다. FFT 결과를 보면 주파수 특성이 연소압력의 진동과 매우 흡사함을 알 수 있다. 고주파수 진동의 시작과 끝나는 시점이 동일하며, 후연소실 길이 변화에 대한 고주파수 피크의 위치도 동일함을 알 수 있다. 이것은 추가적인 연소가 와류발생과 직접적인 관련을 갖고 있기 때문으로 판단된다. 또한 Fig. 5는 각 실험의 고주파수 압력진동과 열 방출 진동의 주파수 특성을 비교한 그림이다. 후연소실의 길이가 증가하면 압력진동의 피크 주파수가 500Hz 부근에서 (Test 1) 420Hz 부근(Test 2)으로 감소하지만 감소가 그리 크지 않고, Test 2와 Test 3의 경우 후연소실의 길이가 증가함에도 고주파수 진동의 주파수 대역이 거의 변화하지 않음을 볼 때 이 주파수는 연소실 음향파와는 무관함을 알 수 있다.

후연소실 길이 증가에 따른 연소압력과 열 방출 진동의 특성변화는 그리 크지 않음을 알 수 있다. 그림에도 길이가 증가함에 따라 불안정 연소가 억제되고 연소안정화가 이루어졌음을 확인하였다.

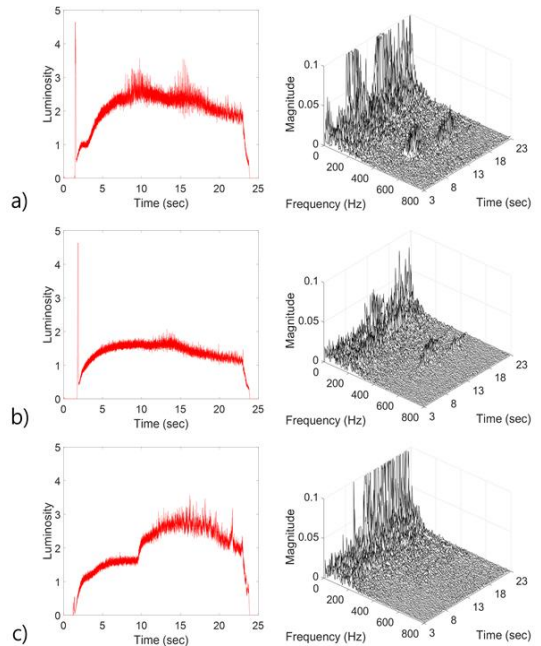


Fig. 4. Heat release trace and FFT results of Test a) 1, b) 2, and c) 3

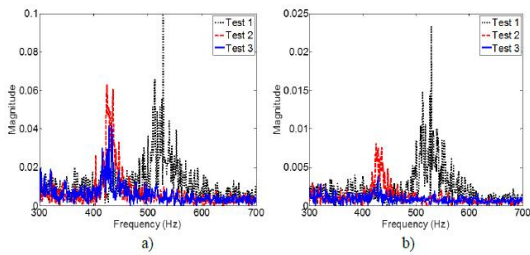


Fig. 5. Frequency distributions in a) pressure and b) heat release trajectory

Figure 6은 저주파수 연소불안정이 발생하는 구간 동안 고주파수 대역 p' , q' 의 결합관계를 판단할 수 있는 두 진동사이의 겹친 파형, 위상차, Rayleigh index를 보여준다. Rayleigh index(RI)는 두 진동의 결합관계를 확인하기 위한 도구이지만 두 진동의 크기가 매우 작을 시에는 RI 만으로 결합관계를 명확히 파악할 수 없다는 단점이 있다. 따라서 해당 위상각을 계산하고 p' , q' 의 겹친 파형을 확인하여 결합 여부를 보다 정확하게 확인하였다. Rayleigh index 및 위상차 계산 방법 등의 분석은 참고문헌 [2,9]에 자세히 서술되어 있다.

Figure 6을 보면, 후연소실 길이 증가와 무관하게 Test 1, 2, 3에서 고주파수 p' , q' 의 진동은 양의 결합을 유지하고 있음을 알 수 있다. 우선 두 진동의 겹친 파형을 보면 거의 같은 파형을 유지하고 있으며, 위상 차이는 모두 $-\pi/2 \sim \pi/2$ 사이에 있음을 확인할 수 있다. 이 결과는 참고문헌 [9]의 결과와 비교할 때 흥미로운 의문점이

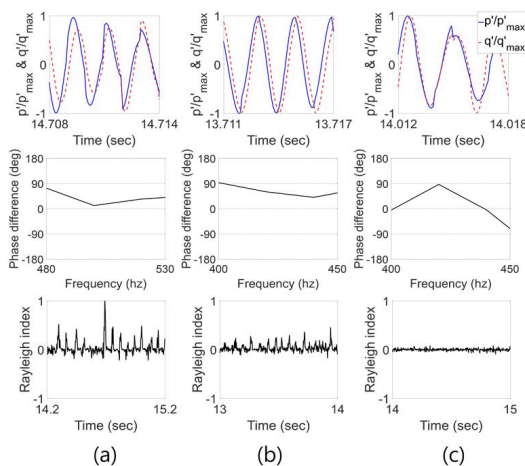


Fig. 6. Normalized overlay, phase difference, and Rayleigh index in Test (a) 1, (b) 2, and (c) 3

나타난다. 즉 고주파수 p' , q' 이 양의 결합을 유지하는 것이 저주파수 연소불안정이 발생하는 필요충분조건임을 제시하였는데, 본 연구의 Test 1, 2, 3의 결과를 살펴보면 고주파수 p' , q' 이 양의 결합을 유지하고 있음에도 연소가 안정화되었다. 또 다른 흥미로운 결과는, Fig. 6에서 볼 수 있듯이, 후연소실 길이 변화에 따른 RI의 변화에서 찾을 수 있다. 즉 p' , q' 이 양의 결합을 유지하고 있어도 p' 의 진폭이 작아지면(Test 3) RI가 주기적인 피크를 형성하지 못함을 볼 수 있다. 따라서 저주파수 연소불안정의 발생은 고주파수 p' , q' 의 양의 결합의 형성 뿐 아니라 RI가 주기적인 피크를 이루어 저야 가능하다는 것을 알 수 있다. 이런 관점에서 후연소실 길이 증가하는 고주파수 p' 의 진폭을 실질적으로 감소시켜 RI가 주기적 피크가 생성하는 것을 억제하여 연소 안정화가 이루어지는 것으로 설명할 수 있다.

2.2.2 고주파수 p' , q' 의 상호 결합

이전의 실험은 고주파수 p' 의 진폭을 실질적으로 감소시키는 방법으로 연소안정화를 유도하였다. 앞서 언급한 바와 같이 고주파수 p' , q' 의 상호 결합관계에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 당량비의 변화인 것으로 추정된다. 따라서 이 절에서는 연료길이를 변화시켜 저주파수 연소불안정이 발생하는 시점의 연소기 전체 평균의 순간당량비($\Phi=0.9$)를 0.4로 낮추어 고주파수 p' , q' 의 위상 변화를 유도하고 연소불안정의 발생 여부를 관찰하였다.

Figure 7과 8은 각각 Test 4, 5의 조건에 수행한 실험결과를 보여주고 있다. 앞서 언급하였듯이 기존 실험에서 연소불안정이 나타나는 당량비는 0.9이지만 연료 길이를 감소시킨 Test 4, 5에

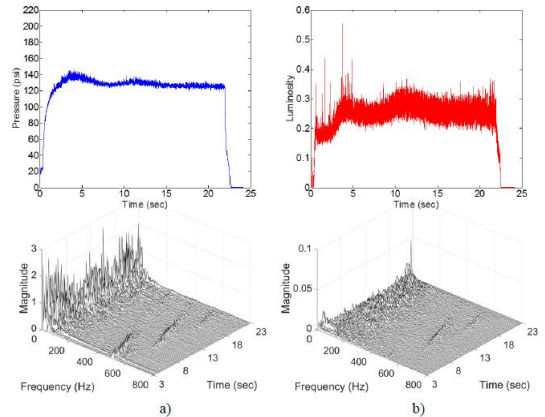


Fig. 7. Trace and FFT results of a) pressure and b) heat release in Test 4

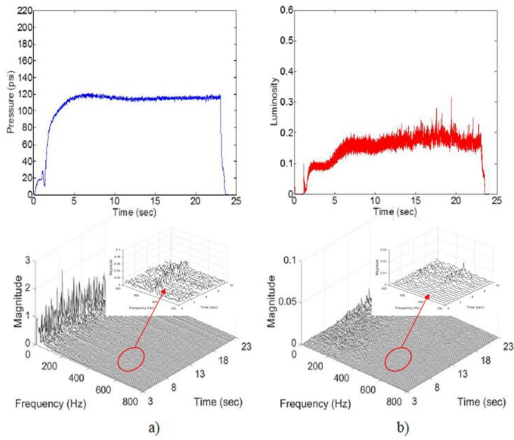


Fig. 8. Trace and FFT results of a) pressure and b) heat release for Test 5

서 동일한 연소시점의 당량비는 0.4로 감소하였다. 예상한 것처럼, 고주파수 p' , q' 이 발생하고 있으며, 연소는 매우 안정한 상태로 변화하였다. Fig. 9는 고주파수 p' , q' 의 상호결합에 대한 분석결과를 보여주고 있다. 즉, p' , q' 의 겹친 파형을 보면 두 진동이 거의 $\pi/2$ 의 위상차를 갖고 있으며, RI도 주기적인 피크가 나타나지 않는 안정한 특성을 보여주고 있다. 이 결과는 Fig. 6에

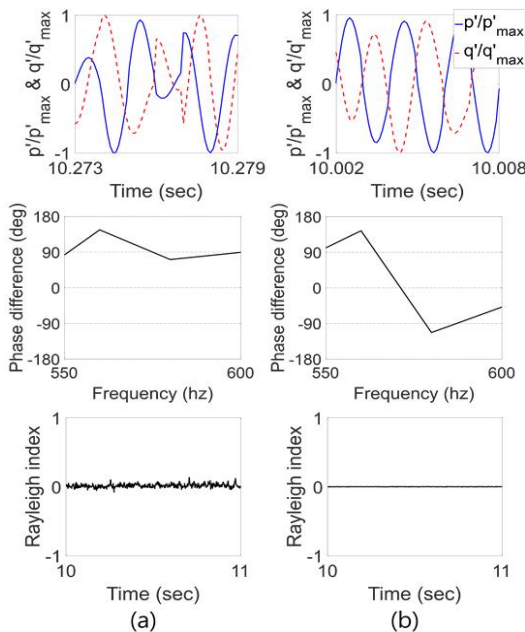


Fig. 9. Normalized overlay, phase difference, and Rayleigh index for Test (a) 4 and (b) 5

서 예측한 연소안정성의 변화와도 일치하고 있어, 하이브리드 로켓의 저주파수 연소불안정 발생에 대한 물리적 과정에 대한 이해를 넓히는 데 기여하고 있다.

즉, 고주파수 p' , q' 의 상호결합이 발생하면 RI가 주기적인 피크를 형성하는데(대략 14~18Hz) 이로 인한 교란이 연료의 열적연 주파수와 공진하여 저주파수 연소불안정으로 발달하는 것으로 추정된다[1]. 본 연구에서 수행한 Test 2, 3, 4와 5 등의 실험결과는 위에서 언급한 저주파수 연소불안정의 발생을 억제하는 메커니즘을 확인하는 결과를 제시하고 있다.

결과적으로 2.2.1과 2.2.2의 실험 결과의 분석을 통해 후연소실 길이와 순간당량비의 변화가 저주파수 연소불안정을 효과적으로 억제할 수 있는 변수임을 확인하였으며 특히 후연소실 길이의 변화는 고주파수 p' , q' 의 결합 강도를 순간당량비의 변화는 결합 상태를 변경시킴을 확인하였다. 또한 고주파수 p' , q' 의 양의 결합 성립이 일차적으로 저주파수 연소불안정을 발생시키는 필요충분조건임을 검증하였다.

III. 결 론

고주파수 압력진동과 열 방출 진동이 양의 결합으로 천이하도록 하는 연소조건 변화가 저주파수 연소불안정의 필요충분조건임을 검증하기 위한 실험연구를 수행하였다. 후연소실 길이와 당량비를 매개변수로 고주파수 연소압력의 진폭과 p' , q' 의 위상차의 조절을 시도하였으며 저주파수 연소불안정의 억제 여부를 판단하였다.

실험 결과는 저주파수 연소불안정의 발생이 후연소실 길이와 당량비 변화에 밀접하게 관련되어 있음을 확인하였다. 또한 후연소실 길이의 증가에 따라 고주파수 압력진동의 피크 주파수 값은 큰 변화가 없지만 진폭은 상당히 감소하는 것을 확인하여, 500Hz 대역의 고주파수 연소압력 진동은 음향파의 발생과 무관함을 확인하였다. 또한 후연소실 길이가 증가하더라도 고주파수 p' , q' 의 위상차는 $\pi/2$ 이하가 유지되어 연소불안정이 나타나는 연소조건을 유지하고 있지만 p' , q' 의 결합강도를 나타내는 RI의 주기적 증폭이 현저히 감소하면서 연소불안정이 억제되는 것이 확인됐다.

한편 순간적인 연소 당량비의 변화가 고주파수 대역 p' , q' 의 위상차를 연화시키는 중요한 인자임을 확인하기 위하여 연료길이를 변화시킨 후, 연소불안정의 발생 여부를 확인하였다. 연소불안

정이 발생은 특정한 당량비에서 발생하는 것으로 분석되어 순간 당량비를 변화시키면 p' , q' 의 결합 상태가 음의 결합으로 천이하는 것이 확인되었다. 또한 결합 강도를 나타내는 RI의 주기적 증폭현상도 사라져 p' , q' 이 상호 무관한 상태를 이루어 연소 안정화가 가능하였다.

따라서 본 연구는 후연소실 길이와 순간 당량비 조절을 통하여 저주파수 연소불안정의 발생을 억제할 수 있음을 확인하였다. 또한 고주파수 대역의 p' , q' 이 양의 결합을 형성하여 주기적인 증폭으로 연결될 때 저주파수 연소불안정이 발달하는 발생 메커니즘의 중간경로도 확인하였다. 추가로 확인된 저주파수 연소불안정 발생 메커니즘을 활용하면 연소불안정의 능동적 억제가 가능하며 이에 대한 연구는 추후에 수행할 예정이다.

후 기

본 연구는 한국연구재단의 우주핵심기술연구사업(NRF-2018M1A3A3A02065968)의 지원을 받아 수행한 연구결과임을 밝히며 지원해주신 한국연구재단에 감사드립니다.

References

- 1) Moon, Y. J., and Lee, C., "Dynamics of Post Chamber Flame and Combustion Pressure in Hybrid Rocket," *52nd AIAA Joint Propulsion Conference*, AIAA Paper 2016-4869, 2016.
- 2) Karabeyoglu, A., De Zilwa, S., Cantwell, B., and Zilliac, G., "Modeling of Hybrid Rocket Low Frequency Instabilities," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 21, No. 6, 2005, pp.1107-1116.
- 3) Sulha L., Kim, D. Y., and Lee, C., "The frequency characteristics of the shear layer oscillation in hybrid rocket post-chamber," *Aerospace Science and Technology*. Vol. 70, November 2017, pp.388-395.
- 4) Messineo, J., Lestrade, J., Hijlkema, J., and Anthoine, J., "Vortex Shedding Influence on Hybrid Rocket Pressure Oscillations and Combustion Efficiency," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 32, No. 6, 2016, pp.1386-1394.
- 5) Hong, S., Santosh J., Shanbhogue, Raymond L. S., and Ahmed F. C., "On the phase between pressure and heat release fluctuations for propane/hydrogen flames and its role in mode transitions," *Combustion and Flame*, Vol. 160, Issue 12, 2013, pp.2827-2842.
- 6) Cross, C., Lubarsky, E., Shcherbik, D., Bonner, K., Klusmeyer, A., Zinn, B. T., and Lovett, J., "Determination of Equivalence Ratio and Oscillatory Heat Release Distributions in Non-premixed Bluff Body-stabilized Flames using Chemiluminescence Imaging," *Proceedings of ASME Turbo Expo 2011, Vancouver, Canada*, ASME paper GT2011-45579, 2011, pp.549-558.
- 7) Ditaranto, M., and Hals, J., "Combustion Instabilities in Sudden Expansion Oxy-Fuel Flames," *Combustion and Flame*, Vol. 146, Issue 3, 2006, pp.493-512.
- 8) Marsh, R., Runyon, J., Giles, A., Morris, S., Pugh, D., Valera-Medina, A., and Bowen, P., "Premixed Methane Oxycombustion in Nitrogen and Carbon Dioxide Atmospheres: Measurement of Operating Limits, Flame Locations and Emissions," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 36, Issue 3, 2017, pp.3949-3957.
- 9) Lee, D., Moon, Y. J., and Lee, C., "Equivalence Ratio Variation and Pressure Oscillations in the Hybrid Rocket Combustion," *53rd AIAA Joint Propulsion Conference*, AIAA Paper 2017-4904, 2017.
- 10) Park, K. S., and Lee, C., "Low Frequency Instability in Laboratory-scale Hybrid Rocket Motors," *Aerospace Science and Technology*, Vol. 42, April-May 2015, pp.148-157.