

論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 44(7), 585-592(2016)

DOI:http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2016.44.7.585

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

하이브리드 로켓 후연소실 전단유동과 연소반응의 상호 간섭

문영주, 이창진*

Flame Interaction with Shear Layer Flow
in the Post Chamber of Hybrid Rocket

Young Joo Moon and Changjin Lee*

Dept. of Aerospace Engineering, Konkuk University

ABSTRACT

Visualization was done by using CH^* chemiluminescence images and PMT measurements in order to understand the origin of fluctuating pressure and chemical luminosity at about 500 Hz frequency even in stable combustion, which was observed in recent experimental tests, and to find the physical correlation leading to Low Frequency Instability(LFI) in terms of phase angle. In stable combustion, chemical reactions are distributed along the shear layer flow showing a negative coupling(about 180 degree in phase angle) with combustion pressure. However, phase difference is shifted to a positive coupling showing less than 90 degree in unstable case. Also a periodic change in the distribution of chemical reactions is observed along with local flame extinction and the appearance of big scale vortex flow. In the transition to LFI, local flame extinction and small vortex flow start to appear in a row. As seen in the bluff body wake in reactive flow, the periodic appearance of vortex flow seems to share the same physical process of BVK(Bernard Von Karman) instability generation. Thus, the appearance of local extinction in 500 Hz fluctuations is gradually amplified to complete extinctions of about 20 Hz, and it leads into LFI.

초 록

하이브리드 로켓의 연소실험에서 관찰된 500 Hz 대역의 연소압력과 연소반응 변동이 안정한 연소에서 발생하는 원인과 LFI로 발전하는 과정을 분석하기 위하여 CH^* 화학발광 이미지와 PMT(photomultiplier tube)에 의한 광자방출 측정으로 연소반응 변화를 가시화하였다. 안정한 연소에서는 500 Hz 대역의 연소압력과 연소반응 변동의 위상차이가 180 도 정도를 이루며 전단층 유동을 따라서 정상적인 연소가 발생하였다. 그러나 불안정 연소가 발생하면, 500 Hz 주파수의 두 변동의 위상차는 60~70 도로 양의 관계(positive coupling)를 이루며 상하 대칭의 와류 발생과 국부적 소멸이 나타나는 주기적 변화를 반복한다. 또한 천이구간에서는 매우 불규칙적인 와류와 상하 대칭의 전단층 유동 형상이 번갈아 관찰되고 있다. 이것은 연소의 영향으로 와류가 발생하는 것으로 보임기 후류에서 발생한 BVK 유동불안정과 유사한 특성을 보여준다, 따라서 하이브리드 로켓 연소의 저주

† Received : February 2, 2016 Revised : June 6, 2016 Accepted : June 7, 2016

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

과수 연소불안정은 500 Hz 대역의 연소반응 변동에 의한 와류의 발생과 이로 인한 국부적인 소염이 점진적으로 발전하여 완전한 주기적 소염으로 이어졌고, 20 Hz의 연소불안정으로 발전하는 것으로 판단하였다.

Key Words : Hybrid Rocket(하이브리드 로켓), Combustion Visualization(연소 가시화), Combustion Instability(연소 불안정), Flame Extinction(소염)

1. 서 론

하이브리드 로켓은 낮은 주파수(<100 Hz)의 연소압력 진동이 증폭하는 저주파수 연소불안정(Low Frequency Instability, LFI) 특징을 갖고 있다. 특히 저주파수의 압력 진동과 연소반응 진동이 상호 간섭하여 연소불안정으로 발전하며, 후연소실에서 발생하는 비정상 연소(unsteady combustion)는 전단유동의 진동과 매우 밀접한 관련이 있는 것으로 밝혀졌다[1,2,3]. 최근, 최고은[4] 등은 후연소실 내부의 연소에 의한 화염변화를 가시화하였으며, 영상처리 자료를 사용하여 POD(Proper Orthogonal Decomposition) 분석을 수행하였다. 그 결과에 의하면, 20 Hz 저주파수의 연소불안정 압력진동의 증폭은 후연소실 전단유동(shear flow)이 수력불안정(hydrodynamic instability)으로 변화하면서 나타나는 커다란 크기의 회전유동과 밀접한 관련이 있음을 보고하였다. 그러나 전단유동이 어떤 과정을 거쳐 수력불안정으로 발달하는지 그리고 수력불안정에 의한 회전 유동과 연소불안정 발생과의 상관관계는 아직 밝혀지지 않았다.

한편, Carmicino[5]는 하이브리드 로켓의 고체 연료 끝단에서 형성되는 와류가 미연 연료와 산화제, 그리고 고온연소 가스를 포함하고 있어 노즐 벽면과 충돌에 의한 비정상 열발생(unsteady heat release)이 일어나고 이로 인하여 LFI가 발생한다고 제안하였다. 그러나 이 경우, 비정상 열발생은 전단유동의 진동 주파수와 비슷한 수백 Hz 주파수 특성이 나타나야 하지만, LFI는 20 Hz 근처의 낮은 주파수 특성을 보여준다. 따라서 후연소실의 비정상 열발생은 와류 충돌이 아닌 다른 물리적 현상에 의한 것으로 추정할 수 있다.

최근의 연구에서 500 Hz 대역의 연소압력 진동과 화염 소염이 관찰되었는데 이 현상들은 앞서 언급한 수력불안정의 발달과 매우 깊은 관련이 있는 것으로 판단된다. Fig. 1은 연소압력과 CH* 화학발광 기법으로 측정된 화염밝기(luminosity)변화의 FFT(Fast Fourier Transform)

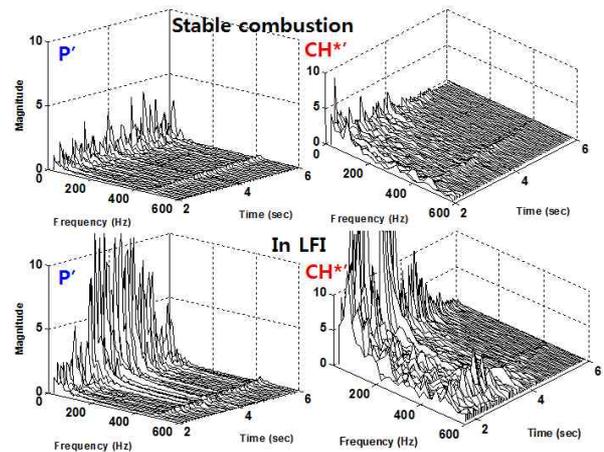


Fig. 1. Comparison of FFT results of pressure and CH* chemiluminescence in stable, unstable combustion

결과이다. 안정적인 연소에서 500 Hz 대역의 압력 진동과 연소반응 진동이 함께 관찰되었으나, 불안정 연소에서는 20 Hz 대역의 압력진동 증폭과 함께 500 Hz 압력진동의 약한 증폭이 나타나고 있다. 특히 흥미로운 것은 500 Hz 대역의 화염 밝기 변화도 증폭하고 있으며 두 진동의 위상차(phase difference)는 $\pi/2$ 보다 작은 양의 관계(positive coupling)를 유지하고 있는 것이 확인되었다. 따라서 500 Hz 대역의 연소압력과 화학반응의 변동은 LFI 발생과 매우 밀접한 관계가 있음을 유추할 수 있다. 그러나 500 Hz 주파수의 연소압력과 연소반응 변동이 발생하는 물리적 원인은 아직 밝혀지지 않았다.

앞서 언급한 것처럼, 후연소실의 전단유동에서 커다란 크기의 회전 유동구조가 발달하는 것은 연소에 의한 열발생 분포의 변화가 원인일 것으로 판단된다. 참고문헌에 의하면, 분사된 연료가 비유선형 물체(bluff body) 후류의 전단유동을 따라 연소하는 경우, 열발생이 전단유동 불안정에 많은 영향을 미친다는 다양한 연구결과를 제시하고 있다[6,7]. 특히, Lovett[6] 등은 비유선형 물체를 이용한 실험에서 연료의 분사위치 변경에 따른 열발생 분포 변화가 후류유동 특성에 미치는 영향을 관찰하였다. 즉, 비유선형 물체 앞부분

에서 산화제 유동과 수직으로 연료를 분사하여 후류에 확산화염이 형성되면, 전단유동이 크게 증폭하는 현상을 발견하였다.

또한 Tuttle[7] 등은 당량비를 변화하며 비유선형 물체 후류의 연소와 전단유동 변화를 관찰하였다. 그 결과에 의하면, 특정한 당량비일 때, 전단유동의 와류가 증폭하여 국부적인 화염소멸(local flame extinction)이 발생하며, 어떤 조건에서는 유동에 날려 화염이 꺼지는 화염날림(flame blowoff)으로 발전하는 것을 관찰하였다. 이들 결과는, 특정한 조건을 만족할 때 연소에 의한 열 발생이 비유선형 물체 후류의 전단유동 특성을 변화시키며, 국부적인 화염 소멸이 발생할 수 있음을 의미한다.

본 연구는 저주파수 연소불안정 발생의 원인을 확인하기 위하여 전단유동을 따라 이루어지는 연소반응이 유동에 미치는 영향을 실험적으로 분석하였다. 이를 위하여 우선, 안정한 연소에서 500 Hz 대역의 연소압력과 연소반응 변동이 발생하는 원인을 분석하고, 두 변동이 LFI로 발전하는 과정을 확인하였다. 특히 연소반응의 시간적, 공간적 변화를 분석하기 위하여 CH*의 화학발광 이미지와 PMT(Photomultiplier tube)에 의한 광자방출 변화를 측정하여 연소가시화를 수행하였다. 500 Hz 대역의 압력진동과 연소반응 진동의 위상차를 비교하였으며 가시화 영상으로부터 화염소멸과 위상차 변화의 상관관계를 확인하였다.

II. 연소가시화와 연소압력의 특성

2.1 연소가시화

2.1.1 실험장치 구성

본 연구에서는 기체산소(GOx)와 PMMA (Poly Methyl Meth Acrylate)를 산화제와 연료로 하여 하이브리드 로켓 연소실험을 실시하였다. 연소불안정성 판단을 위하여 연소압력을 측정하였고 후연소실 (post chamber)에 수정(quartz) 창을 설치하여 화염변화의 가시화를 시도하였다. 실험 장치의 상세한 규격과 실험 방법, 가시화 이미지의 후처리에 대한 자세한 설명은 참고문헌[4]에 잘 언급되어 있다.

Figure 2는 연소 실험에 사용한 하이브리드 로켓의 형상과 가시화 방법을 보여주고 있다. 주연소실 길이는 400 mm, 후연소실의 길이는 각각 75 mm, 105 mm인 두 형상을 대상으로 실험을 수행하였고, 예연소실의 길이는 45 mm로 고정하

였다. 연소반응의 가시화를 위하여 반사율 50%의 특수유리를 가시화 유리 전방에 설치한 후, 연소반응에 의한 빛을 두 방향으로 나누었다. 나누어진 빛은 Casio Ex-1 카메라와 Hamamatsu사가 제작한 PMT H10722를 이용하여 동시 촬영하였다. 또한 카메라와 PMT 전면부에 BPF(Band Pass Filter)를 장착하여 연소반응을 보다 명확히 촬영하였다. 카메라의 촬영속도는 1200 fps이며, 이 속도는 최대 600 Hz의 주파수 특성을 갖는 변화를 측정할 수 있다.

Table 1은 수행된 각 실험의 기하학적 형상과 실험조건을 요약하였고, Fig. 3은 각 실험에 사용

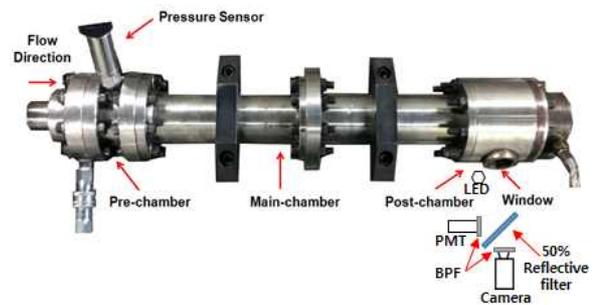


Fig. 2. Experimental setup of hybrid rocket combustion and visualization

Table 1. Summary of test configurations

Test	Chamber length mm	Post chamber length mm	LFI	Remark
Test A	400	105	X	reference
Test B	400	75	O	-
Test C	400	75	O	24 mm diaphragm
Test D	400	75	O	30' cutting end

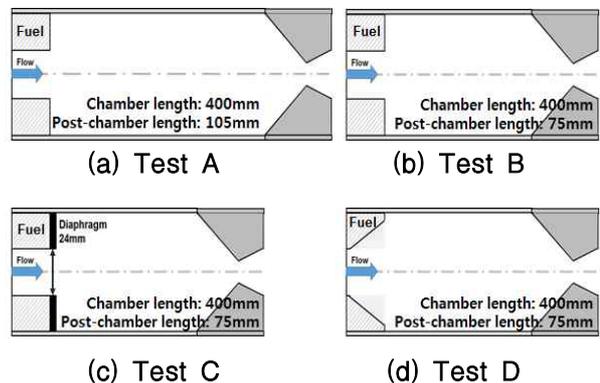


Fig. 3. Post chamber configurations

된 후연소실 형상을 나타내었다. Test A는 저주파수 연소불안정이 발생하지 않는 기본실험(reference test)이며, Test B, C, 와 D는 모두 20 Hz 대역의 압력진동이 크게 증폭하여 저주파수 연소불안정이 나타나는 경우이다. 특히, Test C는 연료 끝단에 내경 24 mm의 금속 링을 장착하여 연소 중 연료 내경 변화에 의한 후향 계단형상 변화를 억제하였다. 또한 Test D에서는 후연소실 유동에 의해 생성되는 와류의 강도를 감소시킬 목적으로 끝단을 30 도로 절삭한 연료를 사용하였다. 이와 관련된 내용은 참고문헌[1]에 자세히 언급되어 있다.

2.1.2 연소압력과 연소반응 진동(Test A)

Figure 4는 안정한 연소에서 경우에서 측정된 압력과 CH* 화학발광의 밝기 변화에 대한 FFT 결과이다. 우선 측정된 평균 연소압력은 170 psi 정도로 일정하게 나타났다. 화학발광의 밝기가 급격하게 감소하는 것은 가시화 창에 붙는 검댕(soots)의 양이 증가하기 때문이다.

FFT 결과를 살펴보면, 안정한 경우에도 연소압력은 20 Hz 부근의 주파수 특성이 나타난다. 다른 연구에서도 밝혀졌듯이, 이는 고체 연료의 열적지연(thermal lag)에 의해 나타나는 주파수 특성이다. 또한 매우 약한 진동 특성이 500 Hz 근처에서 관찰되고 있는데 이러한 진동은 후류의 전단유동에서 발생하는 와류가 그 원인인 것으로 판단된다.

한편 연소반응의 변화를 나타내는 화학발광의 밝기변동도 안정한 연소에서 500 Hz 근처의 주파수 특성을 보여주고 있다. 그러나 연소압력에서

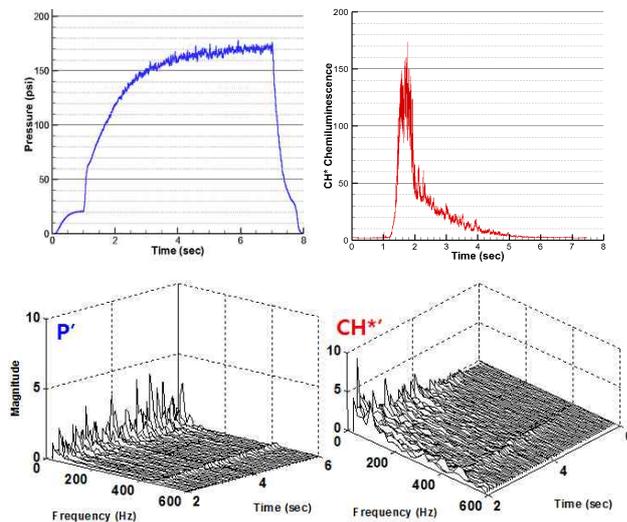


Fig. 4. Pressure and CH* chemiluminescence measurements and FFT results in Test A

관찰되고 있는 20 Hz 부근의 주파수 특성은 없으며 오히려 150 Hz 부근까지 넓은 스펙트럼 분포가 나타나고 있다. 연소반응의 변동이 500 Hz 부근의 주파수 특성을 보이는 것은 후류의 전단유동을 따라 미연연료가 추가적인 연소를 하기 때문인 것으로 보이나 아직도 자세한 과정은 알려지지 않았다.

Figure 5는 안정한 연소에서 측정된 연소압력(실선)과 연소반응 변동(점선)의 위상차를 보여주는 그림이며 Fig. 6은 Fig. 5의 각 지점에 해당하는 화학발광 이미지를 배열한 그림이다. Fig. 5은 0.0045 초 구간을 분석하였으며, 20 Hz 신호의 영향을 배제하기 위해 신호의 기울기를 제거하였다. 그림에서 두 변동의 위상차이가 180 도 정도를 이루고 있어 시간에 대하여 증폭 없이 서로 상쇄되고 있다. 또한 화학발광 이미지를 살펴보면, 전단유동을 따라서 연소가 진행하고 있는

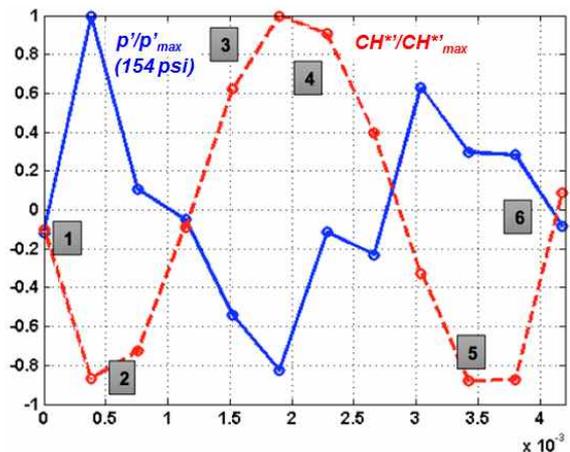


Fig. 5. Phase difference between pressure and CH* chemiluminescence fluctuations during one cycle of 500 Hz in stable combustion

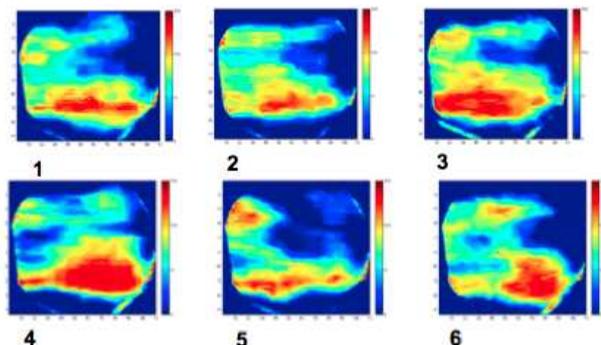


Fig. 6. A series of CH* chemiluminescence images at 500 Hz in stable combustion (Test A)

것이 관찰되며, 특히 아주 약하지만 연소반응이 대략 500 Hz의 변동 특성을 나타내고 있는 것을 가시화 이미지에서도 확인할 수 있다.

2.2 저주파수 연소불안정(LFI)

2.2.1 저주파수 연소불안정과 연소반응 진동

하이브리드 로켓의 저주파수 연소불안정 발생 연구를 위해 Table 1에 요약한 Test B, C, 그리고 D에 대한 연소실험을 수행하였다. Fig. 7은 각 실험에서 측정된 연소압력의 변동을 보여주고 있으며, 모든 경우, 연소압력이 증폭하여 연소불안정으로 진행되었음을 볼 수 있다. 특히 Test C는 연료 끝단에 직경 24 mm 링을 장착하여 연소불안정이 실험이 끝날 때 까지 유지되고 있어 연소불안정 발생이 후연소실의 유동과 관련이 있음을 제시하고 있다.

연소불안정이 발생하면 연소압력은 20 Hz 근처의 저주파수로 증폭하는 것을 Fig. 8의 FFT 결과에서 확인할 수 있다. 또한 연소반응도 연소압

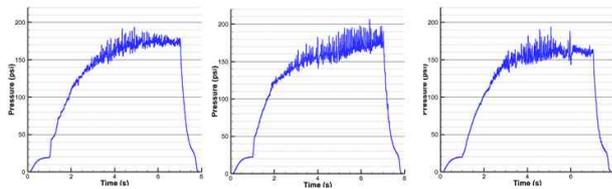


Fig. 7. Pressure measurements of Test B, C, and D in LFI

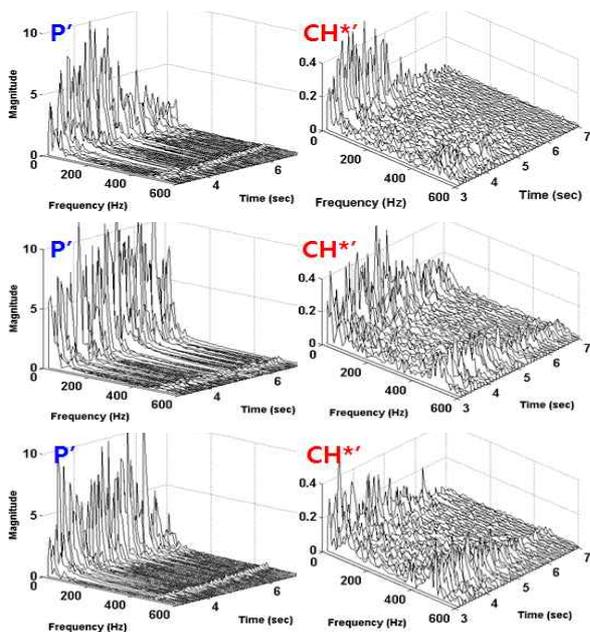


Fig. 8. FFT results of pressure and CH* chemiluminescence in Test B, C, and D

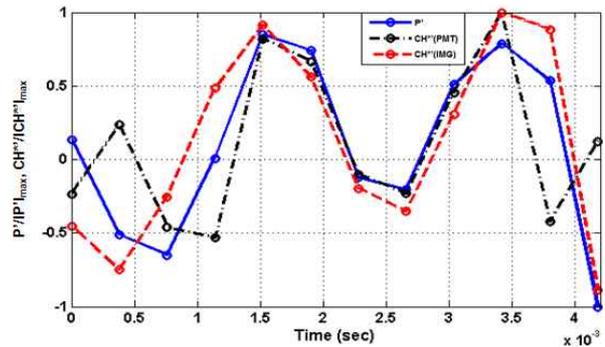


Fig. 9. Phase difference between pressure, CH* chemiluminescence and PMT measurements in Test B

력 특성과 유사한 20 Hz 근처의 주파수 특성을 보이며 증폭하는 것이 관찰된다. 이것은 후연소실에서 발생하는 비정상적인 열방출이 20 Hz 부근의 주파수 특성을 갖고 있음을 의미하며 음향 진동이 아닌 다른 물리적인 현상에 의한 것으로 판단된다.

더욱 흥미로운 것은 안정한 연소에서 관찰된 500 Hz 부근의 연소반응 진동이 불안정 연소에서 증폭한다는 점이다. 특히 증폭하는 시점은 연소압력이 LFI로 발전하기 바로 직전으로, 연소반응의 증폭이 LFI 발생의 직접적인 원인일 것으로 추측되나 자세한 물리적 연관과정은 아직 알려지지 않았다.

Figure 9는 연소불안정이 발생하였을 때 500 Hz 부근의 주파수 특성을 보이는 연소압력과 연소반응의 위상차를 보여주고 있다. 안정한 연소에서 보이던 위상특성과 달리(Fig. 5) 저주파수 연소불안정이 나타난 세 가지 실험에서 연소압력과 연소반응 변동의 위상차가 90 도 이하를 유지하고 있음을 알 수 있다. Fig. 9는 Test B에서 측정된 CH* 화학발광과 PMT를 이용한 연소반응 그리고 연소압력 변동의 위상차를 보여주는 그림이다. 그러나 흥미로운 것은 두 변동의 위상차가 90 도 이하를 유지하지만 상호 간섭에 의한 두 변동의 증폭은 그리 크지 못하여 연소불안정의 저주파수 특성으로 발전하지 못하고 있다는 점이다. 그럼에도 불구하고 500 Hz 대역의 연소압력과 연소반응의 양의 관계는 궁극적으로 LFI 발생으로 이어지는 데 매우 중요한 역할을 하는 것으로 보인다.

2.2.2 연소반응에 의한 전단층 변화

앞서 언급하였듯이 연소의 안정, 불안정 여부와 상관없이 500 Hz 부근의 연소압력 진동이 나타나고 있음을 관찰하였다. 일반적으로 단면적이

갑자기 넓은 곳으로 팽창할 때, 전단층 유동 (shear layer flow)이 형성된다. 이때 전단층은 작은 크기의 와류로 이루어진 일종의 경계층이며 하류의 벽면의 어느 지점과 만나 재부착점 (reattachment point)을 형성한다. 재부착점은 지속적인 와류의 영향으로 진동하여 작은 압력 진동을 일으키는데 레이놀즈 수에 따라 변화하지만 $Re=5000$ 인 본 실험의 경우 Strouhal 수로 $St=O(0.1)$ 의 크기를 갖으며[8], 이를 차원화 하면 대략 100~150 Hz 근처의 주파수에 해당한다.

최근의 수치해석을 이용한 연구에서 김도영 [8] 등은 500 Hz 근처의 주파수 특성을 갖는 전단층 유동의 생성은 하이브리드 로켓 연료 표면에서 발생하는 기화유동에 의한 난류특성 변화임을 밝혔다. 따라서 안정한 연소에서 관찰되는 연소반응의 500 Hz 진동은 전단층을 따라서 발생하는 미연연료의 추가적인 연소에 의하여 나타나 는 특성이라 판단할 수 있다.

Figure 6에서 보듯이 안정한 연소에서 전단층 유동과 이를 따라서 발생하는 추가적인 연소가 축대칭을 이루며 형성되고 있다. 자세히 살펴보면 2번 이미지의 아래쪽은 전단층유동을 따라 발생하는 연소 밝기가 가장 낮지만 점차 밝아져 4번 이미지에서 가장 밝아진 후, 다시 줄어드는 주기적 변화를 보여주고 있다. 이때 밝기 변화의 주기는 대략 500 Hz의 주파수를 보여주고 있다.

그러나 연소불안정이 발생하면, 연소반응의 변동은 완전히 다른 특성을 나타낸다. Fig. 10은 LFI가 발생한 경우의 연소압력과 연소반응 측정값과 500 Hz 특성을 갖는 연소반응 변화의 이미지를 나열한 그래프이다. 두 변동은 동일한 시점에 측정을 시작하는 동기화 기법을 사용하여 측정하였다.

그림에서 보듯이 500 Hz로 변화하는 두 변동의 위상차는 대략 60~70 도 사이로 양의 관계를 이루고 있어 시간이 지남에 따라 연소압력의 증폭이 나타난다. 이때 연소반응도 주기적으로 변화하는데 연소반응의 이미지를 살펴보면 이를 확인할 수 있다. 즉, 2번 이미지에서 관찰되는 상하 대칭의 와류 모양의 연소 밝기가 점차로 줄어들어 5번 이미지에서 밝아진 와류 쌍이 다시 관찰된다. 흥미로운 점은 상하 대칭의 와류 모양을 이루는 연소가 강하게 발생한 뒤에 국부적 소염이 나타나는 주기적 변화가 관찰되는 점이다.

한편, 전단층유동에 연소반응이 추가되는 경우 연소에 의하여 유동 특성 변화가 발생한다는 연구가 많이 보고되었다[6,7,9,10]. 가스터빈 엔진의 화염 보염기(flame holder)는 비유선형 물체로

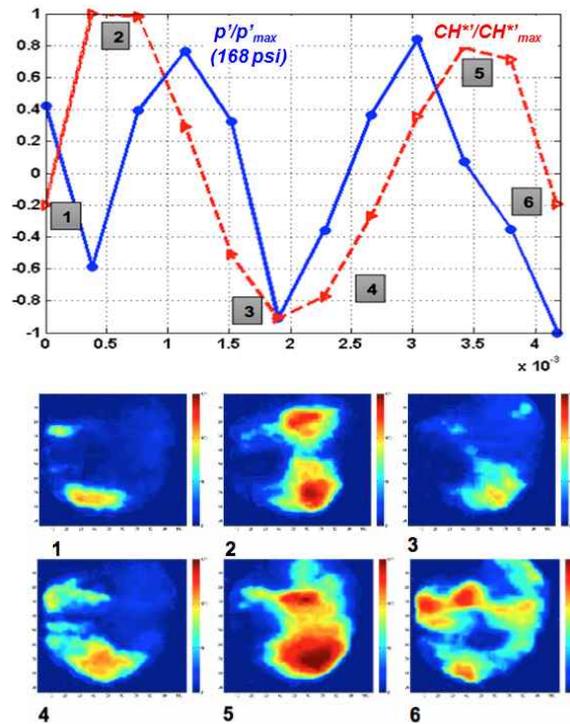


Fig. 10. Comparison of pressure and CH* chemiluminescence data fluctuating at about 500 Hz and a sequence of CH* chemiluminescence in Test B

이루어져 후류에서 발생하는 와류에 의하여 화염을 유지하여 지속적인 연소가 발생하도록 한다. Lovett[6] 등은 보염기 앞쪽에서 유동의 수직방향으로 연료를 분사하면 후류에서 커다란 크기의 와류가 발달하는 BVK(Bernard Von Karman) 불안정의 발생을 관찰하였다. 그러나 보염기 후류에서 예혼합연소가 있는 경우에는 어떤 유동특성의 변화도 관찰되지 않았다. 또한 특정한 연소 조건이 만족되면 유동이 크게 진동하며 국부적인 화염 소염이 발생하는 것을 보고하였다.

따라서 500 Hz 대역의 유동 변동이 발생하며 국부적인 화염 소염이 관찰되는 것은 미연 연료의 유입과 이로 인한 연소반응이 유동특성 변화에 영향을 미치고 동시에 국부적인 화염 소염을 생성하는 것으로 보인다. 그러나 어떤 조건에서 화염 소염이 발생하는지에 대한 자세한 물리적 과정은 앞으로 더 연구해야 할 과제로 판단된다.

2.2.3 천이구간에서 연소와 전단층 유동변화

Figure 11은 Test B에서 나타난 천이구간의 연소압력과 연소반응의 변동을 함께 나타낸 그림이다. 그림에서 보듯이 연소반응의 진동이 20 Hz 부근의 특성이 먼저 나타나며 그 후에 연소압력의 증폭이 발생하여 저주파수 연소불안정으로 발

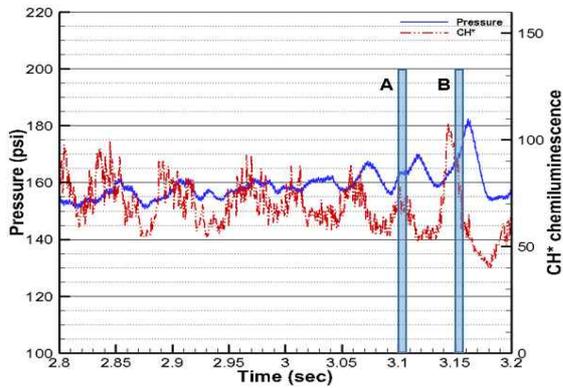


Fig. 11. Transition of pressure and CH* chemiluminescence fluctuations in Test B

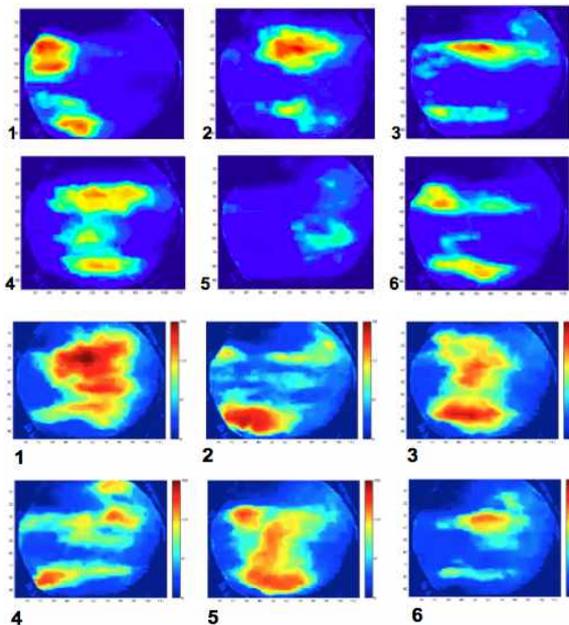


Fig. 12. Pressure and CH* chemiluminescence images at A (top), B during transient period in Test B (bottom)

전하고 있다.

아래의 Fig. 11에서 빗금친 부분 A와 B는 20 Hz 주파수 특성을 갖는 연소압력과 연소반응 변동의 증폭이 시작하여 LFI로 발전하는 서로 다른 두 시점으로 이때 500 Hz 대역의 전단유동과 연소반응의 시간적, 공간적 분포 변화를 Fig. 12에 도시하였다. 이 구간에서 연소반응은 20 Hz 주기의 피크를 거쳐 감소하기 시작하는 지점으로 전체적으로 화염 이미지가 뚜렷하게 보인다. 우선 A의 이미지를 보면 전단층 유동의 형태가 뚜렷이 관찰되나 국부적인 소염(1, 5)도 함께 보인다. 소염의 발생은 전단층 유동을 따라서 진행되고 있으나 유동특성의 변화는 보이지 않는다. 이

때 소염 발생은 대략 500 Hz 부근의 주파수 특성을 나타내고 있다.

그러나 연소반응의 증폭이 시작되는 지점인 B의 이미지를 살펴보면 정상적인(steady) 상하 대칭을 유지하던 전단층 유동의 형태가 사라지고 매우 불규칙적인 와류의 형태(1, 3, 5번)와 상하 대칭의 전단층 유동 형태(2, 4, 6번)가 번갈아 관찰되고 있다. 이것은 전단층 유동을 따라서 발생하는 연소의 영향으로 와류 유동이 발생하고 있는 것으로 판단된다. 후연소실에서 발생하는 연소의 영향으로 전단층 유동으로부터 와류가 커지는 원인은 아직 명확하게 밝혀지지 않았지만 보염기 후류에서 발생한 BVK 불안정 발생과 유사한 특성이 나타나고 있다. 다만 500 Hz 유동불안정으로 발전하지 못하고 오히려 20 Hz 특성의 연소불안정으로 이전되는 현상은 앞으로 더 연구가 필요한 부분이다. 그러나 국부적인 화염 소염과 와류의 발생이 매우 밀접한 관계가 있고 이들 원인이 결합하여 연소압력이 급격히 증가하는 저주파수 연소불안정으로 발전하고 있음은 천이구간의 이미지 분석으로부터 알 수 있는 결과이다.

III. 결 론

실험에서 관찰된 500 Hz 대역의 연소압력과 연소반응 변동의 발생 원인을 분석하고 LFI의 발생과의 관련을 확인하였다. 연소반응의 시간적, 공간적 변화를 가시화하기 위하여 CH*의 화학발광 이미지와 PMT 광자방출을 측정하였다.

안정한 연소에서는 500 Hz 대역의 연소압력과 연소반응 변동의 위상차이가 180 도 정도를 이루고 전단층 유동을 따라서 연소가 진행되며, 아주 약하지만 연소반응이 대략 500 Hz의 주기적 변화를 하고 있다. 그러나 불안정 연소에서는, 500 Hz의 두 변동의 위상차는 60~70 도로 양의 관계를 이루며 연소반응도 주기적으로 변화하는 것이 관찰된다. 즉, 상하 대칭의 와류 모양을 이루는 연소가 강하게 발생한 뒤에 국부적 소염이 나타나는 주기적 변화가 관찰된다. 천이구간의 가시화에 의하면, 매우 불규칙한 와류와 상하 대칭의 전단층 유동이 번갈아 나타나고 있다. 이것은 연소의 영향으로 와류가 발생하는 것으로 보염기 후류에서 발생한 BVK 유동불안정과 유사한 특성을 보여준다.

종합하면, 하이브리드 로켓 연소의 저주파수 연소불안정은 500 Hz 대역의 연소반응 변동에서 시작한 와류의 발생과 이로 인한 국부적인 소염이 점진적으로 발전하여 완전한 주기적 소염으로

이어져 20 Hz의 연소불안정으로 변화하는 것으로 판단된다. 그러나 정확한 연계 메커니즘의 이해를 위해서 좀 더 연구가 필요한 부분이다.

후 기

본 연구는 한국연구재단의 이공분야기초연구사업 (NRF-2015R1D1A1A01058070)의 지원을 받아 수행한 연구결과임을 밝히며 지원해주신 한국연구재단에 감사드립니다.

References

- 1) Park, K., and Lee, C., "Low Frequency Instability in Laboratory-scale Hybrid Rocket Motors," *Aerospace Science and Technology*, Vol. 42, April - May 2015, pp. 148-157.
- 2) Park, K., and Lee, C., "Low Frequency Instability in Hybrid Rocket Post-chamber Configuration," *Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Science*, Vol. 41, No. 1, 2013, pp. 40-47.
- 3) Park, K., Choi, G. E., and Lee, C., "Flow Visualization by Light Emission in the Post-chamber of Hybrid Rocket," *Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Science*, Vol. 43, No. 8, 2015, pp. 677-683.
- 4) Choi, G. E., and Lee, C., "The Change in Flow Dynamics inside the Post Chamber of Hybrid Rocket," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 29, No. 11, 2015, pp. 4711-4718.
- 5) Carmicino, C., "Acoustics, Vortex Shedding, and Low-Frequency Dynamics Interaction in an Unstable Hybrid Rocket," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 25, No. 6, 2009, pp. 1322-1335.
- 6) Lovett, J. A., Cross, C., Lubarsky, E., and Zinn, B. T., "A Review of Mechanisms Controlling Bluff-Body Stabilized Flames with Closely-Coupled Fuel Injection", *ASME 2011, Turbo Expo: Turbine Technical Conference and Exposition*, American Society of Mechanical Engineers Paper GT2011-46676, June 2011, pp. 1275-1287.
- 7) Tuttle, S. G., Chaudhuri, S., Kostka, S., Kulakhmetov, M., Cetegen, B. M., and Renfro, M. W., "Transitional Blowoff Behavior of Wake-Stabilized Flames in Vitiated Flow," *48th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition*, AIAA Paper 2010-220, January 2010.
- 8) Kim, D., and Lee, C., "Destabilization of Shear Layer in Post-chamber of Hybrid Rocket," *Journal of Mechanical Science and Technology* (to be published)
- 9) Lieuwen, T., Shanbhogue, S., Khosla, S., and Smith, C., "Dynamics of Bluff Body Flames near Blowoff," *45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, AIAA Paper 2007-169, January 2007.
- 10) Bush, S. M., and Gutmark, E. J., "Reacting and Nonreacting Flowfields of a V-Gutter Stabilized Flame," *AIAA Journal*, Vol. 45, No. 3, 2007, pp. 662-672.