



J. Korean Soc. Aeronaut. Space Sci. 50(5), 339-347(2022)

DOI:https://doi.org/10.5139/JKSAS.2022.50.5.339

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

## 파라핀-왁스를 사용하는 하이브리드 로켓 연소의 비정상 압력 진동

현원정<sup>1</sup>, 이창진<sup>2</sup>

### Unsteady Pressure Oscillations of Liquefied Paraffin Wax Combustion in Hybrid Rocket

Wonjeong Hyun<sup>1</sup> and Changjin Lee<sup>2</sup>

Department of Aerospace Engineering, Konkuk University, Seoul, Republic of Korea

#### ABSTRACT

The post chamber in hybrid rocket is installed to induce additional increase in combustion enthalpy by allowing continuous burning of the liquefied fuels. When paraffin wax fuel is used, unsteady pressure oscillations are observed only at the beginning of combustion. This study intends to investigate the effect of additional combustion of liquefied fuel droplets on the occurrence of unsteady pressure fluctuations. For this, the combustion in post-chamber was visualized and image analysis using POD(Proper Orthogonal Decomposition) technique was performed. In addition, the hypothesis was proposed on the occurrence of unsteady pressure oscillations by identifying the modes including the behavior of droplets through mode reconstruction. Conducting a series of combustion tests, the amount of liquefied fuel flowing into the post chamber and the generation of fuel droplets were controlled. Also, the changes in frequency characteristic of unsteady pressure oscillation were monitored. As a result, the unsteady pressure oscillations observed in paraffin wax combustion were the result of additional combustion of fuel droplets generated in the post chamber.

#### 초 록

하이브리드 로켓의 후연소실(post chamber)은 액화된 연료의 추가적 연소를 유도하여 엔탈피 상승으로 이어지도록 한다. 후연소실이 있는 하이브리드 로켓에 파라핀 왁스를 연료로 사용하는 경우, 연소초기에만 비정상 연소 압력진동이 관찰된다. 본 연구는 비정상 연소 압력진동의 발생과 액적의 추가적 연소 사이의 상관관계를 확인하는 것을 목적으로 하고 있다. 이를 위해 후연소실 연소를 가시화하고 POD 기법을 활용한 이미지 분석을 수행하였다. 또한 모드 재구성을 통해 액적의 거동을 포함하고 있는 모드를 분리하여 비정상적인 연소압력의 진동과 액적의 연소 사이의 상관관계를 조사하였다. 일련의 실험에서는 후연소실로 유입되는 액화 연료량과 액적발생을 조절하여 비정상 연소압력 진동의 변화를 유도하였다. 실험결과에 의하면 파라핀 왁스의 연소 초기에만 관찰되는 비정상 연소압력 진동은 후연소실에서 발생하는 액적의 추가적인 연소가 그 발생원인임을 알 수 있다.

**Key Words** : Visualization(가시화), Post Chamber(후연소실), Unsteady Combustion Pressure Oscillation(비정상 연소압력 진동), Fuel Droplet(연료 액적), Additional Combustion(추가적 연소)

† Received : February 9, 2022    Revised : March 22, 2022    Accepted : March 24, 2022

<sup>1</sup> Graduate Student, <sup>2</sup> Professor

<sup>2</sup> Corresponding author, E-mail : cjlee@konkuk.ac.kr

© 2022 The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences

## I. 서 론

하이브리드 로켓은 추력 조절이 가능할 뿐 아니라 비추력이 우수하고 다른 화학로켓에 비해 친환경적이며 개발비용이 매우 경제적인 로켓으로 알려져 있다. 그러나 액체 산화제와 고체 연료를 사용하는 경우, 연료의 후반부에 발생하는 미연연료가 연소에 참여하지 못한 채 노즐 밖으로 배출되어 연소 성능이 낮은 단점이 있다. 후연소실(post chamber)은 미연연료가 배출되기 전에 연소에 필요한 추가적인 공간을 제공하여 엔탈피 상승을 유도하는 역할을 한다. 따라서 하이브리드 로켓의 추력 성능을 향상시키려면 적절한 길이의 후연소실을 장착하여 추가적인 엔탈피 상승을 얻는 것이 필요하다. Jerome[1] 등은 수치계산을 통해 후연소실로 유입된 미연연료가 추가적으로 연소하는 것을 확인하였고 연소효율이 증가한다고 보고하였다.

Figure 1은 각각 PMMA(Poly-Methyl Meth-Acrylate)와 파라핀 왁스(paraffin wax)를 연료로 사용한 하이브리드 로켓에서 후연소실 유무에 따라 측정된 연소압력 변화를 비교하고 있다. 여기서  $L_{pc}$ 는 후연소실 길이이다. 이때 후연소실 유무를 제외한 다른 실험 조건은 모두 동일하게 유지되었다. 그림에서 보듯이 후연소실이 없으면 두 경우에서 모두 안정한 연소가 유지되지만, 평균 연소압력은 상대적으로 낮아진다. 후연소실을 장착하면 특성속도(characteristic velocity)는 PMMA 연소는 10%, 파라핀 왁스의 연소는 14% 정도 증가하여 추가적인 연소로 인한 엔탈피 상승이 있음을 알 수 있다.

그러나 후연소실이 있는 경우에는 Fig. 1에서 보듯이 모든 경우에서 비정상적인 연소 압력진동이 관찰된다. 특히 PMMA 연소에서는 갑작스럽게 저주파수 연소불안정이 나타나는데, 이는 후연소실에서 추가적 연소에 의한 열방출 진동( $q'$ )과 연소압력 진동( $p'$ )의 주기적인 결합에 의해 발생하는 것으로 보고되었다[2,3]. 한편 파라핀 왁스 연소도 후연소실이 있는 경우에는 연소 초반에 비정상적인 연소 압력진동(unsteady combustion pressure oscillations)이 발생한다. 그러나 이 경우의 비정상적인 연소압력 진동이 발생하는 원인에 대해서는 액적의 발생과 밀접한 관계가 있는 것으로 의심된다. 한편, 불안정한 압력진동은 연소 초기에만 관찰된다는 점에서 고체연료를 사용하는 로켓 연소에서 발생하는 침식연소(erosive burning)와 유사하다. 그러나 Fig. 1(b)에서 볼 수 있듯이 불안정한 압력진동은 오직 후연소실이 장착된 경우에만 관찰되기 때문에 침식연소와는 다른 것으로 생각할 수 있다.

한편 파라핀 연료는 녹는 온도가 낮으므로 연료 표면에는 액체층의 형성과 함께 액적이 발생한다[4]. 연료 표면의 액체층은 연료 표면을 떠나 연소 영역으로 유입되어 연소된다. 또한 액체층의 일부는 연소 가스와의 상대적인 속도 차이에 의해 후연소실로 유

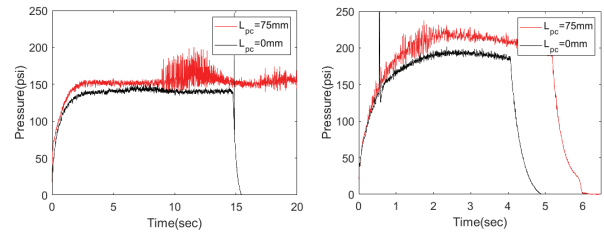


Fig. 1. Comparison of combustion pressure trajectories with and without post chamber for (a) PMMA/GOx, (b) Paraffin/GOx

입되어 또 다른 연료 액적을 형성하기도 한다. 이런 과정들은 다른 폴리머(polymer) 계열 연료에서는 관찰되지 않는 현상이며 낮은 용융점을 갖는 연료의 독특한 특징이다. 이때 후연소실로 유입된 액체층으로부터 발생하는 액적은 추가적으로 연소하면서 비정상적인 연소압력 진동으로 이어질 수 있다.

주연소실의 액체층은 연소가스와의 상대적인 속도 차로 인하여 후연소실로 유입되어 유동에 의해 액적 발생으로 이어진다. 일차적으로 연소가스의 속도, 액화된 연료의 물리적 특성을 변화시키면 유입되는 액화 연료의 양과 액적발생을 조절할 수 있다. 이때 연소가스의 속도는 산화제 질량플럭스에 비례하므로 연료의 내경이 증가할 경우 유입되는 액화 연료의 총 질량이 감소한다. 또한 액체층의 점성과 표면장력은 유입되는 액화 연료의 질량을 결정하는 중요한 물리적 특성이다. 따라서 연소가스의 속도와 액체층의 물리적 특성이 변화함으로써 유입 연료량을 감소시켜 궁극적으로 후연소실에서의 액적 발생이 줄어들 것으로 기대하였다.

따라서 본 논문의 주요한 목적은 파라핀 연료의 액화와 후연소실로 유입, 그리고 액적발생으로 이어지는 물리적 과정이 비정상적인 연소압력 진동의 발생에 미치는 영향을 조사하는 것이다. 액화 연료의 유입속도를 변화시키기 위해 연료의 내경을 변화한 연소 시험과 저밀도 폴리에틸렌(LDPE, Low Density Polyethylene)를 첨가한 파라핀 연료를 사용하여 액화된 연료의 점성과 표면장력을 증가시킨 연소시험을 수행하였다. 또한 후연소실 가시화를 통해 액체층의 움직임과 및 액적의 거동을 촬영하고 영상정보에 대한 POD(Proper Orthogonal Decomposition) 분석 등을 수행하였다.

## II. 실험 장치 및 조건

### 2.1 실험 장치 구성

Figure 2는 로켓 연소실의 개략도이며 연소실은 예연소실, 주연소실 그리고 후연소실로 구성되었고 각각의 길이는 45mm, 400mm, 75mm이며 연소실 직경은 50mm이다. 연소 유동과 액적 거동을 가시화하

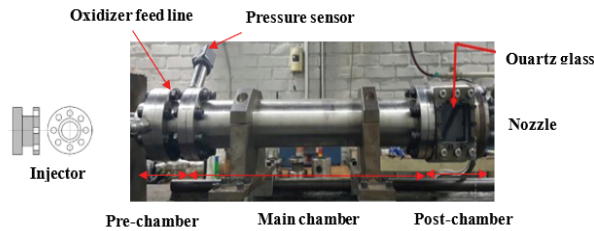


Fig. 2. Configuration of combustion chamber

기 위해 후연소실의 한 면에 50\*50mm의 석영 유리창을 장착하였다. 후연소실에서 액화된 파라핀과 연소가스가 누출되는 것을 방지하기 위해 테프론 링과 구리 링으로 밀봉하였다. 예연소실에 위치한 압력 센서(UNIK 5000)는 최대 1,000psi까지 측정가능하며 샘플링 속도는 10,000Hz로 하이브리드 로켓 연소에서 발생하는 저주파수 성분부터 실험에서 관찰되는 고주파수 진동 성분을 측정하기에 충분하다. 연료와 산화제는 파라핀 왁스, LDPE가 혼합된 파라핀 왁스 그리고 기체산소(GOx)를 각각 사용하였다.

연소의 밝기 변화는 Hamamatsu의 H10722 광전자 증배관(PMT)를 사용하였고 후연소실의 연소반응은 고속 카메라(PCO-1200s)로 촬영되었다. LED 라이트를 사용하여 압력의 측정과 초고속 영상 이미지의 분석 시작점을 일치시켰다. 가시화 실험은 연소 및 액적 거동의 명확한 이미지 촬영을 위해 완전히 어두운 방에서 수행하였으며 카메라의 촬영 속도는 1,200fps이다. 이 속도는 최대 600Hz의 주파수 특성을 갖는 연소 특성을 분석할 수 있다.

## 2.2 실험 조건

Table 1은 본 연구에 사용한 여러 가지 실험 조건을 요약한 표이다. Test 1은 연소 초반에 불안정한 연소 압력진동이 명확하게 나타나는 경우이며, Test 2는 연료의 내경을 증가시켜 연소가스의 속도를 감소시킨 경우이다. 연소가스 속도가 감소하면 후연소실로 유입되는 액체층의 질량도 감소할 것으로 예상되며, 따라서 후연소실 내의 액적 형성도 감소할 것으로 예상된다. 액적 형성이 감소하여 연소가 안정화된다면 액적 형성이 연소 초반의 불안정한 압력 진동을 유발한다고 추론할 수 있다.

Table 1. Summary of test conditions

Test	LDPE (wt%)	*D <sub>in</sub> (mm)	Burn time (s)	Remarks
1	0	17	5	Baseline
2	0	22	5	Increase in diameter
3	5	17	7	PR95+PE05
4	10	17	7	PR90+PE10

\*D<sub>in</sub>: fuel inner diameter

Test 3과 4는 점성, 표면 장력과 같은 액체층의 물리적 특성을 변화시키기 위해 파라핀 왁스에 LDPE를 혼합한 경우의 실험이다. 점성, 표면장력이 증가하면 액적 형성이 감소하고 궁극적으로 불안정한 연소압력의 진동이 감소할 것으로 추정된다. 이전 연구는 LDPE와 파라핀 왁스의 혼합 연료를 사용할 때 연소가 안정화된다고 보고하였다[5]. 소량의 LDPE 첨가만으로 연료의 표면장력과 점도는 크게 변화할 수 있으나, LDPE 첨가가 증가할수록 후퇴율 등의 연소특성이 크게 변화하므로 10 wt% 이상의 첨가는 시도하지 않았다. 따라서 Test 3과 4는 LDPE의 첨가가 후연소실에 축적되는 액체층의 두께 변화와 액적의 발생 그리고 연소압력 진동에 미치는 영향을 조사하기 위해 설계되었다.

연소 초반 비정상 연소압력 진동이 나타나는 Test 1과 Test 2의 연소시간은 5초로 유지하였다. 그러나 Test 3과 Test 4의 연소시간은 3초 이후에 나타나는 불안정성을 관찰하기 위해 7초로 유지하였다.

## III. 실험 결과

### 3.1 Test 1 (Baseline)

#### 3.1.1 주파수 분석

Figure 3은 Test 1의 연소 압력 변화와 압력 진동 및 열방출 진동에 대한 주파수 분석 결과이다. 그림에서 보듯이 비정상 연소압력 진동은 연소 초기인 1.5~2.5초 동안에만 발생한다. 이 구간에서 평균 연소압력은 230psi이며, 평균 진폭은 약 29psi로 매우 큰 값을 나타내며 30Hz 근처의 저주파수 피크가 관찰된다. 그러나 연소시간 2.5초 이후에는 압력 진동이 발생하지 않고 안정한 연소로 변화한다. 또한 같은 구간 동안 열방출진동도 압력진동과 동일하게 30 Hz의 저주파수 피크가 나타난다. 동일한 피크 주파수를 갖는 두 개의 진동이 동일한 구간에서 동시에 관찰된다는 것은 두 진동의 발생이 매우 밀접하게 관련되어 있음을 의미한다.

#### 3.1.2 후연소실 액적 연소의 가시화

가시화 창을 보호하고 선명한 영상을 확보하기 위해 연소 압력을 230psi에서 200psi로 낮추어 가시화를 시도하였다. 그러나 다른 실험조건은 본래의 실험조건과 동일하게 유지하였다. 연소압력을 감소시켰음에도 Fig. 3에서 관찰된 진동 특성과 동일한 주파수 대역의 진동을 확인하여 연소특징이 변하지 않았음을 확인하였다. 한편, 불안정한 압력진동이 나타나는 1.5~2.5초 사이의 구간을 영역 A, 안정적인 연소가 유지되는 4.0~4.8초 사이의 구간을 영역 B로 각각 구분하여 가시화 이미지를 비교하였다.

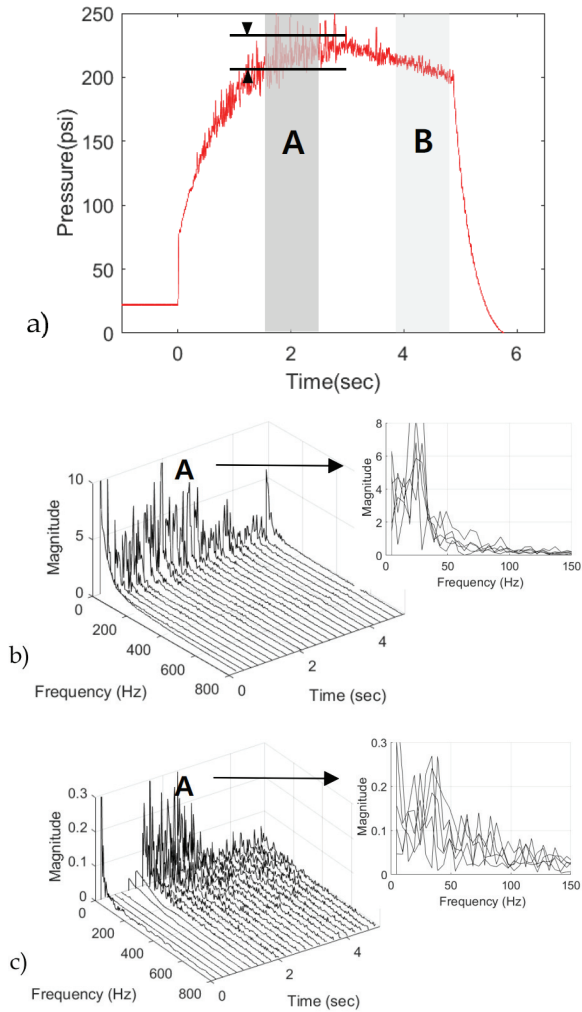


Fig. 3. (a) Time trace of pressure and (b) FFT analysis of pressure and (c) luminosity in Test 1

Figures 4, 5는 영역 A와 B에서 촬영한 이미지를 각각 0.002초 간격으로 나열한 그림이다. 이미지에서 유동의 방향은 왼쪽에서 오른쪽이며, 오른쪽 끝에는 노즐이 장착되어 있다. Fig. 4의 우측 하단을 관찰하면 액체층에서 분리된 액적 발생이 점차 좌측으로 이동하는 것으로 보인다. 시간이 흐름에 따라(Fig. 4 (a)-(f) 일부는 연소 가스 흐름에 유입되어 추가적인 연소로 이어지고 일부는 연소실 앞쪽으로 이동하여 다시 액체층으로 유입되는 현상이 관찰된다. 특히 흑백 이미지로 표현된 액적의 시간 흐름에 따른 궤적을 분석함으로써 생성된 액적의 거동을 보다 명확히 이해할 수 있다(Fig. 4(g)). 또한 공동(cavity) 형상의 후연소실에서 형성된 전단층(shear layer) 흐름에 의해 액적이 우측에서 좌측으로 이동하는 것으로 보인다. 한편, 영역 B에서는 영역 A와는 대조적으로 동일한 시간 간격 내에서 액적의 거동이 관찰되지 않고 연소가 연속적으로 발생하며, 오로지 화염영역이 좌

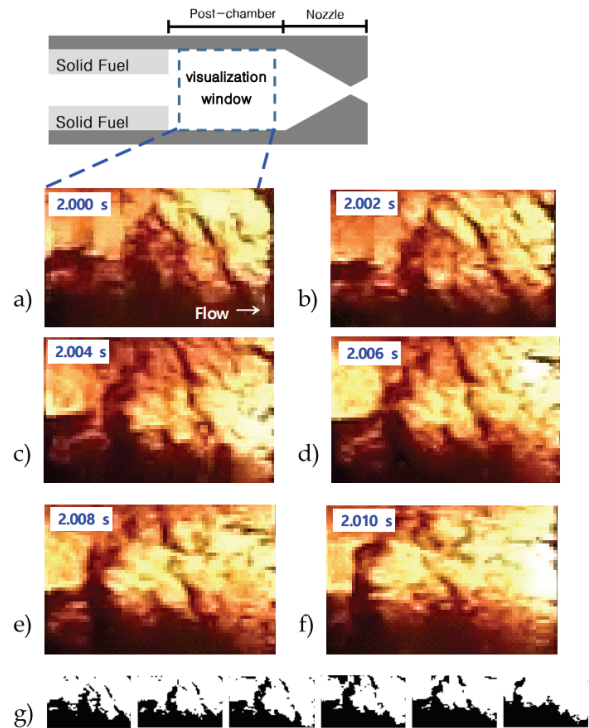


Fig. 4. (a)-(f) Captured images of combustion flow and droplet formation (region A), (g) Corresponding binary images from (a) to (f) (black; droplet, white; combustion flow)

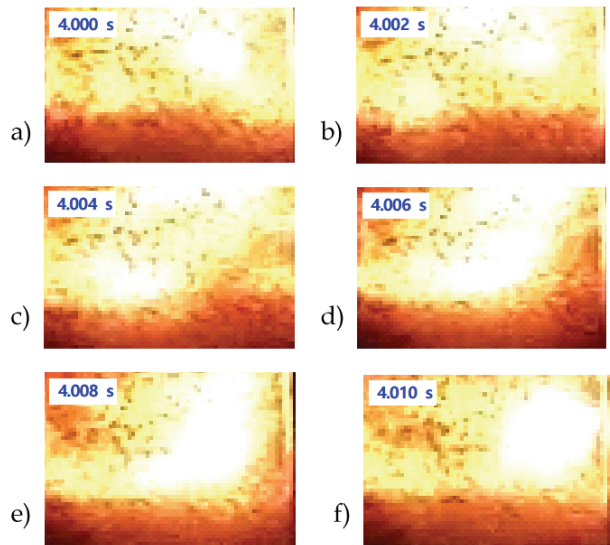


Fig. 5. Captured images of combustion flow and droplet formation (region B)

우로 미약하게 변동하는 움직임이 관찰된다. 따라서 연소 초기에 발생하는 비정상 연소압력 진동과 후연소실에서 발생하는 액적이 매우 밀접하게 관련되어 있음을 확인할 수 있다.

### 3.1.3 후연소실 액체층의 축적

후연소실의 액체층의 축적은 액화 연료가 후연소실로 얼마나 많이 유입되는지와 연소를 통해 얼마나 유출되는가에 달려 있다. 후연소실에 축적되는 액체층은 액적 형성을 결정하는 중요한 물리적 과정이다. 액체층으로부터 액적 발생(entrainment)은 액체층의 두께와 압력에 비례하고 액체층의 점성, 표면 장력에 반비례한다[6]. 따라서 후연소실에 축적된 액체층의 두께를 측정함으로써 액적 형성의 변화를 이해하고자 하였고 연소 종료 후 원통형 후연소실 내에 축적된 액체층의 가장 두꺼운 부분을 측정하였다. 액체층의 두께는 연소 1.5~4.5초 동안 1초 간격으로 측정하였으며, 약 9mm의 일정한 두께가 유지되었다.

연소 초기 단계에서 파라핀 연료는 연소압력 및 연소 온도가 상승함에 따라 연료가 용융되어 액체로 급속한 상(phase) 변화를 한다. 고온의 액화연료의 점도는 저온일 때에 비해 75% 이상 급격히 감소하지만 대략 430K 이상의 온도에서 점도의 변화는 그 이전에 비해 그리 크지 않다[7]. 따라서 연소 초기에는 액체연료의 과도한 유입과 더불어 과도한 액적 형성이 가능하나 점차 액체연료의 유입과 유출이 균형을 이루어 액적이 발생하지 않을 것으로 예상할 수 있다. 후연소실의 액체층 두께 측정 결과는 나머지 연소 기간 동안 액체 연료의 유입과 유출이 균형을 이루고 있음을 잘 보여준다.

한편, 파라핀 연료의 흥미로운 특징은 연소에 참여하는 과정에서 액체 상태를 거치지 않고 기체로 변하는 임계점(critical point)이 존재하며 임계압력은 약 94psi, 임계온도는 약 860K이다[7]. 또한 이는 연소 환경에 비해 상대적으로 낮다. 다수의 연구 사례에 의하면 초임계 영역에서는 파라핀 왁스 액화연료의 점성 및 표면장력이 유효하게 작용하지 않아 액적의 형태가 유지될 수 없다고 보고하였다[8]. 따라서 연소 초기에 관찰된 연료 액적은 온도와 압력이 초임계 상태로 변화함에 따라 더 이상 관찰되지 않는 것으로 판단된다.

### 3.1.4 POD 분석

POD 분석은 난류유동과 같은 복잡한 구조의 유동을 분석하는 데 널리 쓰이는 이미지 후처리 기법이다. POD 분석을 통해 여러 특성이 포함된 고차원의 분석 대상을 직교좌표로 구성된 여러 개의 저차원 모드로 변환한다. 난류 유동에서 일관된 유동 구조를 추출하는 방식으로, 에너지 모드(energy mode)의 기저함수를 생성하고 2차원 데이터를 시간과 공간의 고유치 집합으로 분해한다. 따라서 연소실 내부 유동을 구성하고 있는 다양한 난류구조를 에너지 크기에 따른 모드 별로 관찰할 수 있다[9]. 또한 POD는 PIV 기법으로 측정된 데이터에 적용되어 측정된 속도장을 기반으로 한 모드 분석에 주로 쓰이지만, 연소 과

정 중 발생하는 광도 측정 데이터에 적용하여도 마찬가지로 정성적인 정보를 전달할 수 있다는 것이 입증되었다[10]. 따라서 하이브리드 로켓 연소 과정 중 후연소실에서 발생하는 광도 측정 데이터에 적용되어 후연소실의 유동을 분석하는 데에 사용된 바 있다[9]. Narayanan 등[11]은 POD 기법을 활용하여 2상 유동 내에 존재하는 분무(spray)의 거동이 나타나는 모드를 판별하고 분무의 경계 진동, 분무의 크기 등을 분석하였다. 따라서 분무와 유사한 형상을 가지는 액적 또한 POD를 통해 거동을 분리하고 그 특성을 분석할 수 있을 것이라 기대하였다. 따라서 이 절의 목표는 POD 방법을 이용하여 후연소실의 액적의 거동과 추가적인 연소가 미치는 영향을 분석하는 것이다. 어떤 물리량  $q(x,t)$ 는 식 (1)과 같이 평균 값과 시간과 공간변화의 합으로 구성된 변동량으로 분해가 가능하다.

$$q(x,t) = q_0 + \sum_{i=1}^M a_i(t) \phi_i(x) \quad (1)$$

$$q^n = \sum_{i=1}^M a_i^n \phi_i^n \quad (2)$$

여기서  $q_0$ 는 시간 평균 값이며,  $a_i$ 와  $\phi_i$ 는 각각  $i$ 번째 모드의 시간계수(time coefficients), 공간적 분포(spatial distribution)를 의미한다. 이 식은 물리량  $q$ 가  $M$ 개 차수의 모드의 합으로 분해하여 나타낼 수 수 있으며, 분석에 사용된 스냅 샷의 수만큼의 모드로 나타낼 수 있다. 또한 분리된 모드는 식 (2)와 같이 모드의 일부분이 재구성될 수 있다. 모드 재구성은 특정한 모드가 갖는 특성을 분석하기 위하여 사용되는 기법이며, 분석하고자 하는 범위의 모드 수만큼  $n$ 번째 스냅 샷의 시간계수와 공간분포를 곱하여 유동을 재구성 한다.

POD 분석에서 가장 중요한 것은 시간과 공간의 변화에 대한 정보를 갖고 있는 모드 중에서 분석하고자 하는 물리적 특성을 포함하는 모드를 판별하고 검증하는 것이다. 따라서 본 연구에서 관심을 갖고 있는 액적의 거동과 관련된 모드를 판별하고 그 특성을 알아보하고자 하였다. Figs. 4, 5에서 볼 수 있듯이 영역 B(안정한 연소)에서는 오직 연소가스 유동만 관찰되었고 영역 A(비정상 연소)에서는 그와 더불어 액적이 관찰된다. 액적은 후연소실을 흐르는 연소가스 유동에 비해 훨씬 느린 속도로 움직이기 때문에 액적의 거동이 나타내는 모드는 연소가스 유동이 나타나는 모드에 비해 상대적으로 모드 에너지가 작다. 이런 이유로 에너지가 높은 모드에서는 연소가스의 거동이 나타나고, 영역 A의 에너지가 낮은 모드에서는 액적 거동의 특징을 포함하고 있을 것으로 예상하였다.

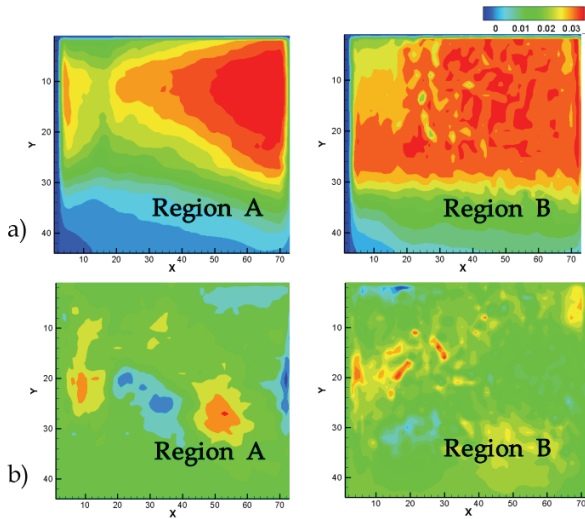


Fig. 6. Spatial distribution of a) mode 1 and b) mode 8 (region A and region B)

Figure 6은 영역 A와 B에서 분석한 모드 1과 모드 8의 공간분포를 보여주고 있다. 이때 x축과 y축은 분석에 사용된 픽셀(pixel) 수를 의미한다. Fig. 6(a)에서 확인할 수 있듯이 두 영역에서 분석된 모드 1은 동일하게 축방향 유동을 나타내고 있음을 알 수 있다. 영역 B에서 모드 1이 차지하는 유동영역이 더 넓게 나타나지만, 이는 연소가 진행됨에 따라 연료 포트의 직경이 넓어지기 때문인 것으로 확인된다. 한편, 영역 A와 영역 B에서 모드 1 이후부터 모드 7까지 유동 특성은 동일한 특징을 보인다. 그러나 Fig. 6(b)를 보면 모드 8부터 영역 A와 영역 B에서 특성이 달라지는 경향이 관찰된다. 영역 A와 다르게 영역 B에서는 작은 점 형태의 분포가 산발적으로 퍼져 있는 형태를 보이는데, 연소 후반부에 가시화창에 발생하는 검댕(soot)이나 화염의 미세한 진동에 의한 노이즈로 판단된다.

POD 재구성을 활용하면 액적 거동이 나타나는 모드를 보다 확실하게 관별할 수 있으며, 분리된 모드의 주파수 특성과 열방출 진동의 주파수 특성을 비교하여 비정상 연소압력 진동의 발생원인을 추론할 수 있다. Fig. 7은 영역 A의 어느 한 시점에 대한 원본 이미지와 모드 별로 재구성한 이미지를 비교한 그림이다. 모드 1부터 모드 8까지 재구성한 결과(Fig. 7(b)), 액적이 집중적으로 크게 뭉쳐진 부분의 형상이 나타나기 시작하였다. 모드 1부터 모드 34까지 수행한 결과(Fig. 7(c)) 원본 데이터에서 나타난 대부분의 액적의 형상이 모두 나타난 것을 확인할 수 있다. 모드 8부터 34까지 재구성하여 액적 거동에 해당하는 모드를 분리한 Fig. 7(d)를 보면 액적의 거동과 그에 따른 주변 유동의 변화가 뚜렷하게 분리된 것을 확인할 수 있다. 따라서 모드 8부터 모드 34까지의 특성을 분석하였다.

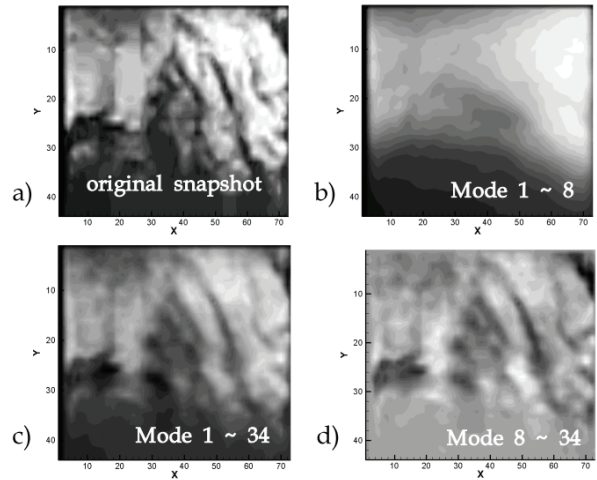


Fig. 7. a) Original snapshot, reconstruction from b) mode 1 to 8, c) mode 1 to 34, and d) mode 8 to 34 (region A)

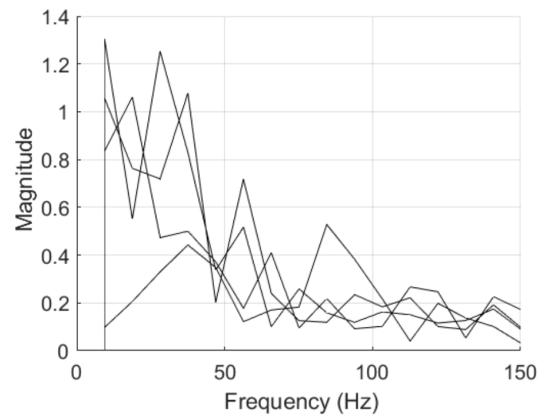


Fig. 8. Spectral analysis of time coefficient of mode 8 (region A)

Figure 8은 영역 A에서 나타나는 모드 8의 시간계수의 스펙트럼 분석결과를 보여주고 있다. 액적의 거동에 해당하는 모드 8에서 0-50Hz 대역에서 큰 증폭이 나타난다. 또한 Fig. 3(b), (c)에서 확인할 수 있듯이 영역 A에서 측정된 추가적 연소에 의한 열방출 진동과 압력진동이 0-50Hz 대역에서 크게 증폭한다. 따라서 액적의 발생이 액적의 추가적인 연소로 이어졌으며, 동일한 주파수 대역에서 비정상 연소압력진동이 발생했음을 알 수 있다. 주파수 0-50Hz 대역의 증폭은 모드 8 이상부터 동일하게 나타나며 고모드로 갈수록 증폭의 강도는 감소하였다.

### 3.2 Test 2

#### 3.2.1 주연소실 유동 속도 조절

주연소실의 액화 연료는 연소가스와 상대적인 속도 차로 인해 후연소실로 유입되어 액체층을 형성한다. 또한 연소가스의 속도는 연소실을 흐르는 질량플

럭스에 비례하므로 Test 2에서는 내경을 22mm로 증가시킨 연료를 사용함으로써 연소 초반, 연소가스의 속도를 낮추고자 하였다. CEA 코드를 이용하여 계산한 결과, 해당조건에서 1.5초~2.5초 사이의 연소가스 속도는 기본경우에 비해 40% 이상 감소하였다. 이는 후연소실로 유입되는 액화 연료의 양을 줄일만한 유의미한 수치로 판단하였고 궁극적으로 액체층의 두께가 감소함으로써 액적발생 조절의 영향을 알아보 고자 하였다.

### 3.2.2 주파수 분석

Figure 9는 Test 2의 연소압력 변화를 보여주고 있다. 1.5~2.5초 사이에서 Test 1과 동일하게 약 30Hz의 저주파수 피크가 나타났다. 평균 연소압력은 200 psi이고 평균 진폭은 17psi이다. 이는 Test 1의 평균 진폭(29psi)의 60% 수준으로 비교적 안정한 연소로 판단된다. 또한 동일한 방법으로 측정된 후연소실 액체층의 두께는 6mm로 유지되었고, 이는 Test 1의 두께(9mm)보다 매우 낮은 수준이다. Test 1과 비교하였을 때 Test 2에서 액체층 두께 감소 외의 다른 요인의 변화는 거의 없다. 따라서 이는 유속이 감소하여 액적의 발생이 줄어든 결과인 것으로 판단된다.

## 3.3 Test 3-4

### 3.3.1 액화 연료의 물리적 특성 조절

후연소실로 유입되는 액화 연료의 질량을 조절하는 방안에는 연소가스의 속도를 조절하는 것 외에도 액화 연료의 점성, 표면장력과 같은 물리적 특성을 조절하는 방안이 있다. 그를 위해 파라핀 왁스와 특성이 비슷하면서 연료제작 시의 균일한 혼합이 가능한 같은 알케인 계열인 LDPE를 혼합한 파라핀 왁스를 사용하였다. 파라핀 왁스가 용해하여 생성되는 액체층의 두께는 액체층의 열 두께(thermal thickness)에 비례하며, 이는 고체연료의 밀도, 후퇴율에 반비례하며 액화 연료의 밀도, 열전도에 비례한다[4]. 본 실험에서 LDPE의 혼합율은 5, 10wt%에 불과하여 후퇴율을 제외한 다른 요인의 변화는 거의 없기 때문

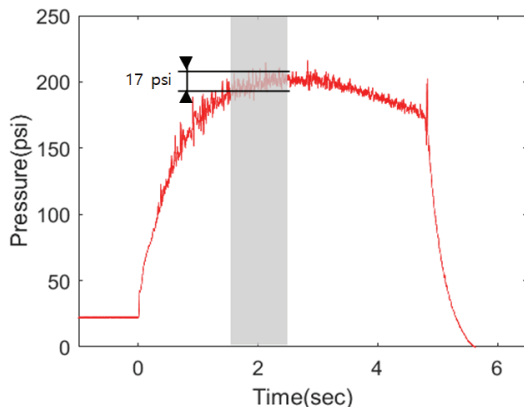


Fig. 9. a) Time trace of pressure in Test 2

에 액체층의 두께는 후퇴율에 의존한다. 따라서 해당 조건에서 1.5~2.5초 사이의 주연소실에서 생성되는 액체층 두께 변화는 1mm 내외에 불과하다.

반면에 LDPE를 혼합함으로써 연료의 점성과 표면장력은 크게 증가한다. 특히 점성의 경우 파라핀 대비 PR95+PE05가 약 361%, PR90+PE10가 약 1530% 증가한다(Table 2). 따라서 액체층의 점성과 표면장력이 비선형적으로 크게 증가함으로써 후연소실로 유입되는 액화 연료의 질량이 감소하는 효과를 기대하였다.

### 3.3.2 주파수 분석

Figure 10은 Test 3와 Test 4의 연소압력 변화를 보여주고 있다. Test 3와 Test 4에서 평균 연소압력은 모두 동일하게 230 psi이다. LDPE 함량이 5 wt%인 Test 3에서 평균 진폭은 30 psi로 Test 1과 동일한 수준이다. 하지만 Test 4에서의 평균 진폭은 10 psi로 나타났으며 Test 1에 비해 매우 낮은 수준이며 안정한 연소가 나타났다. 또한 후연소실의 액체층의 두께는 Test 3에서 9mm로 측정되어 Test 1과 거의 동일하였다. Test 4에서 액체층의 두께는 Test 1의 67% 수준인 5.5mm로 측정되었다. 따라서 액화 연료의 점성, 표면장력이 증가하여 액체층의 두께가 감소하였고 궁극적으로 액적의 발생이 감소함에 따라 안정한 연소가 나타난 것으로 확인된다.

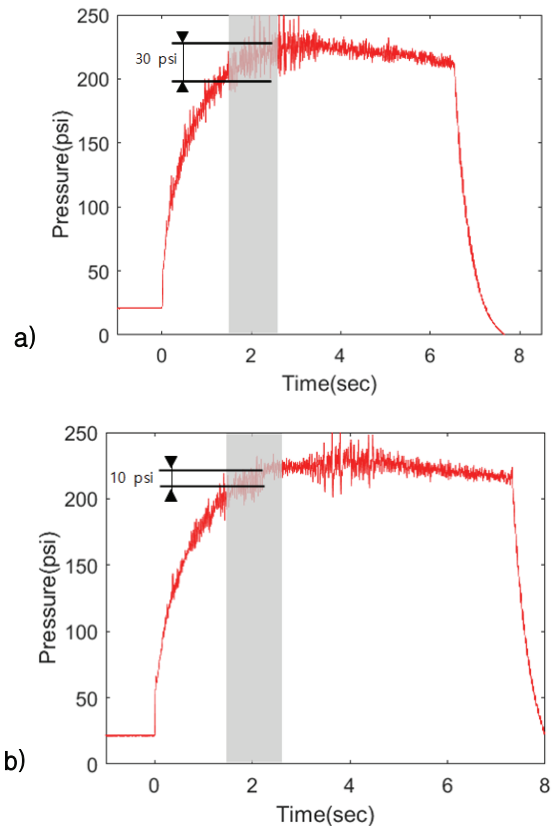


Fig. 10. Time trace of pressure and in a) Test 3 and b) Test 4

Table 2. Viscosity and surface tension of molten paraffin-based fuels [12]

	Paraffin	PR95+ PE05	PR90+ PE10
Melt viscosity ( $Pa \cdot s$ )	0.0013	0.0060	0.0212
Surface tension ( $N/m$ )	0.0228	0.0233	0.0237

Figure 11은 Test 3과 Test 4의 주파수 분석을 보여주고 있다. Test 1-3에서는 30Hz 부근에서 저주파수 피크가 강하게 나타나며 400Hz에서 600Hz로 증가하며 약하게 증폭하는 고주파수 성분이 존재한다. 하지만 Test 4에서는 500Hz 대역의 고주파수 성분이 비교적 강하게 증폭하며 동시에 연소 중반에 불안정성이 나타났다. 특이한 점은 LDPE 함량이 높아짐에 따라 PMMA/기체산소 연소 시 나타나는 연소불안정의 특성과 흡사한 특성이 관찰된다는 것이다. 이전 연구[2,3]는 이런 불안정성이 와류홀림에 의해 나타나는 고주파수 성분의 열방출 진동( $q'$ )과 연소 압력 진동( $p'$ )의 주기적인 결합에 의한 것으로 보고하였다. 따라서 액화연료의 점성과 표면장력이 증가함에 따라 나타난 Test 4의 성분 및 불안정성이 동일한 원인에 의해 발생한 것으로 추론된다.

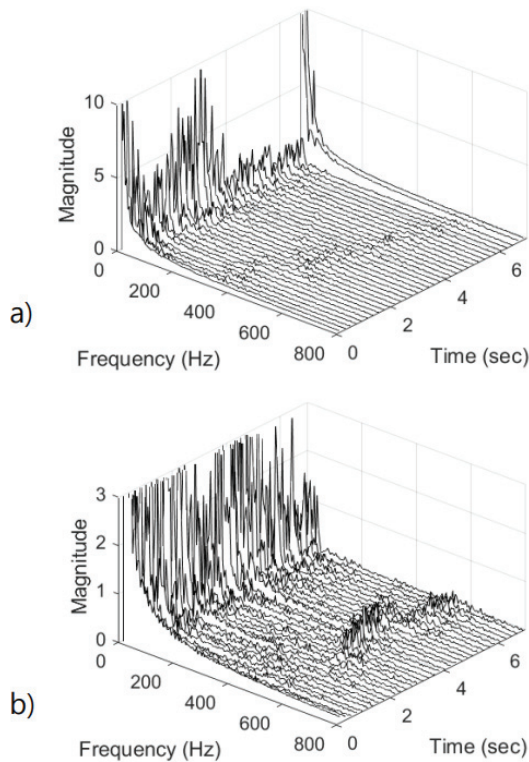


Fig. 11. FFT analysis of pressure in a) Test 3 and b) Test 4

## IV. 결 론

이 연구는 비정상 연소 압력진동과 후연소실에서 관찰되는 액적의 추가적 연소 사이의 상관관계를 확인하는 것을 목적으로 하고 있다. 이를 위해 후연소실 연소 가시화와 POD 기법을 활용한 이미지 분석이 수행하였다.

Test 1(Baseline)은 연소 초반에 비정상 연소압력 진동이 발생하는 경우이며 후연소실에는 축적된 액적이 관찰되었다. 연소가 진행됨에 따라 연소 압력 진동은 사라지고 액적도 관찰되지 않아 액적의 추가적인 연소와 비정상 연소압력 진동간의 상관관계가 있음을 알 수 있다. 또한 POD 분석과 모드 재구성을 통해 액적의 거동을 분리하였다. 액적 거동의 모드의 시간계수는 추가적 연소에 의한 압력진동의 주파수 대역과 일치하였으며, 이는 액적 거동과 추가적 연소에 의해 연소압력 진동이 발생하는 것으로 판단된다.

Test 2에서는 유동의 속도를 조절하여 후연소실에 축적되는 액화 연료의 질량을 조절하고자 하였다. 기본경우에 비해 유동속도가 40% 이상 감소하여 후연소실에 축적된 액체층이 9mm에서 6mm로 감소하였다. 따라서 그에 따라 연소압력 진폭 또한 감소하여 안정한 연소가 나타났다.

LDPE를 각각 5, 10wt% 첨가하여 점성 및 표면장력을 증가시켜 후연소실에 축적되는 액체 연료의 질량 조절을 시도하였다. LDPE를 10wt% 첨가한 경우 후연소실 액체층의 두께가 9mm에서 5.5mm로 크게 감소하였고 연소압력 진동도 사라져 안정한 연소가 나타났다.

따라서 파라핀 연료를 사용하는 하이브리드 로켓의 연소초기에 발생하는 연소압력의 진동은 후연소실로 유입되는 액체 연료의 액적발생과 추가적인 연소에 의한 것임을 확인하였다.

## 후 기

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2018R1D1A1B0704867613).

## References

- 1) Messineo, J., Lestrade, J. Y., 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.
- 2) Moon, Y. J. and Lee, C. J., "Pressure Oscillation and Combustion in Shear Layer of



Hybrid Rocket Post Chamber," *Proceeding of 52nd AIAA Joint Propulsion Conference*, July, 2016, AIAA Paper 2016-4869.

3) Kim, J. A. and Lee, C. J., "Low frequency instability and oscillating boundary layer in hybrid rocket combustion," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 34, No. 11, 2020, pp. 4831~4839.

4) Karabeyoglu, M., Cantwell, B. and Altman, D., "Development and testing of paraffin-based hybrid rocket fuels," *Proceeding of 37th AIAA Joint Propulsion Conference and Exhibit*, August, 2012, AIAA Paper 2001-4503.

5) Kim, J. A. and Lee, C. J., "Fuel Droplet Entrainment and Low Frequency Instability in Hybrid Rocket Combustion," *Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 49, No. 7, 2021, pp. 573~580.

6) Petrarolo, A., Kobald, M. and Schleichriem, S., "Understanding Kelvin - Helmholtz instability in paraffin based hybrid rocket fuels," *Experiments in Fluids*, Vol. 59, No. 4, 2018, pp. 59~62.

7) Shi, X., Bin, Y., Hou, D., Men, Y. and Matsuo, M., "Gelation/crystallization mechanisms of UHMWPE solutions and structures of ultradrawn gel films," *Polymer Journal*, Vol. 46, 2014, pp. 21~35.

8) Leccese, G., Bianchiy, D. and Nasutiz, F., "Modeling and Simulation of Paraffin-Based Hybrid Rocket Internal Ballistics," *Proceeding of 2018 Joint Propulsion Conference*, July, 2018, AIAA Paper 2018-4533.

9) Chio, G. E., Moon, Y. J. and Lee, C. J., "Combustion Dynamics in Postchamber of Hybrid Rocket Using CH\* Radical Chemiluminescence Images," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 33, No. 1, 2017, pp. 176~186.

10) Bizon, K., Continillo, G., Mancaruso, E., Merola, S. S. and Vaglieco, B. M., "POD-based analysis of combustion images in optically accessible engines," *Combustion and Flame*, Vol. 157, No. 4, 2016, pp. 632~640.

11) Narayanan, V., Lightfoot, M. D., Schumaker, S. A., Danczyk, S. A. and Eilers, B., "Use of Proper Orthogonal Decomposition Towards Time-resolved Image Analysis of Sprays," *Proceeding of 23rd Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems*, March, 2011, ILASS Paper 2011-086.

12) Kim, S. J., Moon, H. J. and Kim, J. K., "Evaluation of Paraffin - Polyethylene Blends as Novel Solid Fuel for Hybrid Rockets," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 31, No. 6, 2015, pp. 1750~1760.