

하이브리드 로켓에서의 Negative DC-shift 발생 특성

강동훈* · 이창진**

Negative DC-shift Instability in Hybrid Rocket

DongHoon Kang* · ChangJin Lee**

ABSTRACT

DC-shift phenomenon can be observed in Hybrid rocket combustion. This phenomenon makes performance drop which is structure problem or reduce thrust. Understanding of DC-shift phenomenon, the condition of the hybrid rocket combustion stability can be found. In this paper, the condition of Negative DC-shift was found and made by changing oxidizer flow with pre-post chamber. The Negative C-shift phenomenon and characteristic were defined from the experimental study.

초 록

하이브리드 로켓의 연소 과정에서 DC-shift 현상을 관찰할 수 있다. 이와 같은 현상은 갑작스런 구조적 문제를 일으키거나 추력의 상승 또는 감소를 가져와 추력 성능의 저하를 유발한다. DC-shift 현상에 대한 이해를 통해 하이브리드 로켓의 연소 안정의 조건을 알 수 있다. 이 논문에서는 예-혼합실과 후-연소실을 장착하고 산화제 공급 유동 조건을 달리 함으로서 Negative DC-shift 현상을 유도하고 다양한 산화제 공급 유동 조건에 따른 Negative DC-shift 현상의 발생 조건과 특징에 대하여 알아보았다. Negative DC-shift 현상에 대한 실험적 연구를 통하여 Negative DC-shift 현상의 발생 원인과 현상의 특징에 대해 정의하였다.

Key Words: DC-shift, Hybrid Rocket(하이브리드 로켓), Combustion Instability(연소불안정), Acoustic mode(음향모드), Vortex shedding frequency(와류유출 주파수)

1. 서 론

비선형 불안정성의 대표적인 예인 DC-shift 현

상은 연소 압력이 갑자기 상승하는 양의(positive) DC-shift 현상과 연소 압력이 하강하는 음의(negative) DC-shift 현상으로 나눌 수 있다. Carmicino[1] 등은 음향가진(acoustic excitation)이 있는 경우, 로켓 후반부의 후-연소실(aft-chamber)의 음파 교란과 예-혼합실(pre-chamber)의 와류유출 주파수에 의한 공진 현상과 양의

* 건국대학교 항공우주정보시스템공학과

** 건국대학교 항공우주정보시스템공학과
이창진, cjlee@konkuk.ac.kr

DC-shift 발생과의 관계를 실험적으로 연구하였다. 그의 연구 결과 양의 DC-shift 현상은 연소 중 나타나는 주파수의 공진 현상에 의한 것으로 나타났다.

Arves의 실험에서는 음의 DC-shift 발생시 산화제 유량이 0.2% 감소한 것에 비해 연료의 연소는 12%나 감소한 것으로 나타났다. 이 실험에서 Arves 등은 특성 속도(characteristic velocity)가 음의 DC-shift 현상과 깊은 관련이 있는 것으로 추측하였다[2]. 이와 같은 현상은 순간적인 압력 상승과 압력 하강으로 인한 구조적인 문제나 추력 감소로 하이브리드 로켓의 성능에 커다란 영향을 주고 있다.

DC-shift 현상은 원래 고체 로켓에서 발생하는 비선형 연소불안정 현상으로 알려져 있다[1]. 고체 로켓에서 관찰되던 DC-shift 연소 불안정 현상이 하이브리드 로켓에서도 나타난다는 사실은 두 종류의 로켓 연소 과정이 공통적으로 갖는 특성이 존재한다는 것을 의미한다. 따라서 고체 로켓의 DC-shift 현상의 원인으로 알려진 음향모드(acoustic mode)와 와류유출 주파수(vortex shedding frequency)의 간섭이 하이브리드 로켓의 DC-shift 현상에서도 원인이 될 것으로 생각된다. 또한 고체 로켓의 경우에는 연소실로 유입되는 co이 없지만, 하이브리드 로켓에서는 연소실 외부에서 유입되는 산화제의 난류 유동이 있으므로 외부에서 유입되는 산화제 유동이 하이브리드 로켓 연소의 DC-shift 현상의 또다른 발생 원인이 될 것으로 판단된다[3].

본 논문에서는 PMMA와 기체 산소를 이용하여 DC-shift 현상이 일어나는 조건에 대하여 알아보고, DC-shift 현상이 발생할 경우 어떠한 특징들이 나타나는지를 실험적으로 알아보았다. DC-shift 현상을 발생시키기 위해 산화제 공급을 달리 할 수 있는 각기 다른 인젝터와 평판(plate)을 제작하고 음의 DC-shift 현상을 알아보았다. DC-shift 현상이 발생할 때와 그렇지 않을 때의 연소 현상의 특징에 대해서 분석하였다.

2. 본 론

2.1 실험장치

하이브리드 로켓 연소에서 대부분의 DC-shift 현상은 예-혼합실, 연소실, 후-연소실을 갖는 형상에서 나타나고 있다[1]. 예-혼합실과 후-연소실의 길이는 음파 교란과 와류유출을 발생시키고, 이들 주파수의 간섭이 발생하도록 길이에 따른 주파수의 상관 관계를 고려하여 제작되었다.

Carmicino는 연료 입구에서의 와류 생성이 양의 DC-shift 현상과 깊은 관련이 있음을 밝혀내었다. 그의 실험에서는 반경 방향으로 산화제를 공급하는 인젝터를 사용하여 연료 입구에서 와류를 생성하였고, 연료 후반부에 링을 장착하여 양의 DC-shift 현상을 유도하였다. 이를 근거로 본 연구에서도 연료 입구에서 와류를 생성할 수 있도록 실험 장치를 구성하였다. 본 연구에서는 Carmicino가 와류를 생성하는데 사용한 인젝터 캡을 본 실험 장치에 적용 가능하도록 인젝터와 평판을 제작하였다[1].

평판을 장착하지 않은 실험은 로켓의 축방향으로 산화제가 공급되고 연료 입구에서 와류가 생성되므로 이를 축방향 산화제 공급 실험으로 정의하였다. 평판을 장착한 실험은 산화제가 로켓의 반경 방향으로 공급되고 연료 입구에서 와류가 생성되므로 이를 반경 방향 산화제 공급 실험으로 정의하였다.

2.2 주파수 예측

하이브리드 로켓 연소에서 고려되는 주파수는 모두 3 종류이며 각각의 음향모드, 와류유출 주파수, Helmholtz 주파수를 관찰할 수 있다.

음향모드의 주파수는

$$f_a = \frac{c}{2L} = \frac{\sqrt{\gamma RT}}{2L} \quad \text{Eq. (1)}$$

c =음속, L =연소실 길이, R =기체 상수, T =평균 온도, γ =비열비이다[4].

와류유출 주파수는

$$f_v = \eta c^* \psi^2 Sr \frac{D_t^2}{D^3} \quad \text{Eq. (2)}$$

η =효율, c^* =특성 속도, Sr =Strouhal number, D_t =노즐 목 직경, D =그레인 내경이다.

ψ 는 $\psi = \sqrt{\gamma \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}}$ 으로 표현된다[1].

Helmholtz 주파수는

$$f_H = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{A^*}{lV}} \quad \text{Eq. (3)}$$

A^* =목 면적, l =유효 길이, V =체적이다[5].

Equation (1)-(3)를 이용하여 제작된 실험장치에서는 20g/s의 산화제 공급 유량에서 980Hz의 음향모드와 600Hz의 와류유출주파수, 314Hz의 Helmholtz 주파수를 관찰할 수 있는 것으로 예측되었다. 이들 주파수를 관찰할 수 있도록 센서의 데이터 수집률은 초당 3000으로 설정하였다. Table 1에 각 산화제 유량에 따른 예측되는 주파수를 정리하였다.

Table. 1. Frequency at each mass flow rate

| 산화제 유량(g/s) | 음향모드 (Hz) | Helmholtz 주파수(Hz) | 와류유출 주파수(Hz) |
|-------------|-----------|-------------------|--------------|
| 10 | 982 | 314 | 630 |
| 20 | 982 | 314 | 600 |
| 30 | 982 | 314 | 540 |

2.3 축방향 산화제 공급 실험

축방향 산화제 공급 실험을 수행하여 반경 방향 산화제 공급 실험과의 차이점을 알아보고자 하였다. 실험 결과는 이후 반경 방향의 산화제 공급 실험과 비교 자료가 되므로 여러 번 측정하여 정확한 데이터를 얻을 수 있도록 하였다.

Figure 1은 산화제 유량 20g/s 일 경우의 축방향 산화제 공급 실험의 연소 압력을 측정한다.

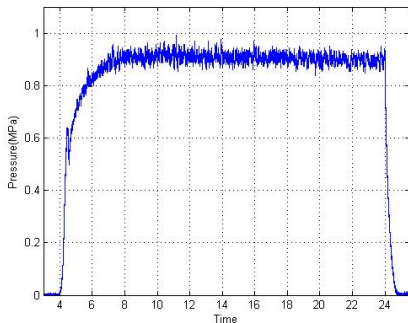


Fig. 1. Pressure of axial injector

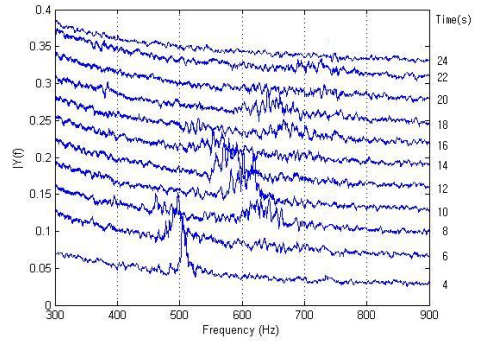


Fig. 2. Frequency moving vs time

결과이다. 축방향 산화제 공급 실험 결과 연소 압력은 0.9MPa 부근을 유지하면서 0.1MPa의 진폭을 갖고 진동하는 것을 볼 수 있다. Fig. 2는 축방향 산화제 공급 실험의 시간에 따른 압력 주파수를 나타낸 것이다. 축방향 산화제 공급 실험의 경우 연소 직후 연소 직후 520Hz-480Hz에서 주파수가 발생하였다가 점점 저주파 영역으로 이동하는 것을 볼 수 있다. 이후 4-6초마다 주파수가 고주파 영역으로 점프하는 것을 볼 수 있다. 처음 520Hz 이후 650Hz, 700Hz 부근에서 주파수가 정점을 이루며, 각각 주파수가 감소되면서 이동하는 것을 볼 수 있다.

2.4 반경 방향 산화제 공급 실험

Figure 3은 산화제 유량 20g/s에서의 평판-4 실험의 압력 측정 결과를 나타낸 것이다. 13.5초 이후에 연소 압력이 불연속적으로 하강한 후 지속적으로 연소 압력이 떨어지고 있다. 45mm의 직경을 갖는 평판으로 실험할 경우 음의 DC-shift 현상이 발생하였다. 이 경우에도 음의 DC-shift 현상이 일어난 구간을 제외하면 연소 형태가 축방향 산화제 공급 실험에 비해 안정하다고 할 수 있다.

Figure 4는 평판-4 실험에서의 시간에 따른 주파수의 변화이다. 주파수의 변화를 살펴보면 축방향 산화제 공급 실험에서 나타났었던 주파수가 감소되어 나타나지 않고 있다. 시간에 따른 주파수의 변화가 없으며, 연소 압력이 감소하는 부분에서도 주파수의 변화는 볼 수 없다.

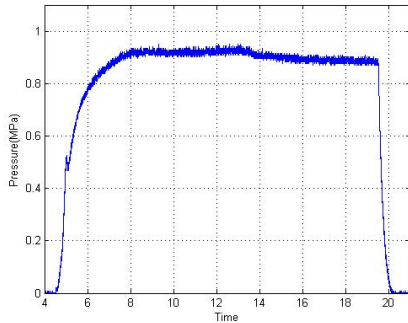


Fig. 3. Pressure of radial injector

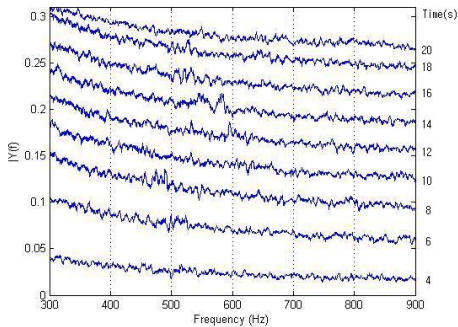


Fig. 4. Frequency moving vs time

평판을 사용하여 유동에 큰 교란을 가하여 실험한 결과 연소 압력이 평판을 사용하지 않았을 때보다 안정해지는 결과를 나타내었다. 평판-4 실험을 통해 연소 압력 주파수의 감쇠가 음의 DC-shift 현상의 특징인 것으로 나타났다.

실험전 관측할 수 있는 주파수를 예측하였으나, 실험으로 나타난 주파수는 600Hz 부근으로 예측되었던 연료 후반에서의 와류유출주파수만이 관측되었다. 이 결과 본 실험 장치에서 연소가 진행될 경우 음향모드가 감쇠되는 것으로 생각할 수 있다. 그러나 어떤 원인에 의해서 음향모드가 감쇠된 것인지에 대해서는 아직 연구가 필요하다.

3. 결 론

산화제 공급 유동을 변화시켜 실험하여 음의

DC-shift 현상이 일어나는 조건과 음의 DC-shift 현상의 특징에 대해서 실험적으로 연구하였다. 실험 결과에 의하면 산화제 공급 유동이 반경 방향으로 공급될 경우 연소 압력의 불연속적인 변화가 의 불연속적인 변화가 발생하였다. 이를 통해 유동에 가해지는 교란이 클수록 연소 압력의 변화를 관찰할 수 있음을 알 수 있다. 압력이 불연속적으로 변화하는 경우의 연소 압력의 특성은 주파수가 감쇠되었다. 음의 DC-shift 현상의 특징은 압력 주파수의 감쇠이지만, 압력 주파수의 감쇠가 음의 DC-shift 현상의 원인이 되지는 않는다.

축방향 산화제 공급 실험에서 음향모드가 왜 감쇠되는지, 연소 압력이 불연속적으로 변화하는 경우에 와류유출 주파수가 왜 감쇠되는지에 대해서는 아직많은 연구가 필요하다. 또한 어떠한 주파수가 어떤 원인에 의해서 감쇠되었는지 더 연구가 진행되어야 한다.

참 고 문 헌

1. C. Carmicino, A. Russo Sorge, " On the Role of Vortex shedding in Hybrid Rockets Combustion Instability," *AIAA Journal*, 2008 - 5016
2. J.P.Arves, H.Stephen Jones, " Explanation of the DC shift In Hybrid Motors," *AIAA Journal*, 97 - 2938
3. 나양, 이창진, "채널유동에서 질량분사에 의한 표면유동의 진동 특성", 한국항공우주학회 추계 학술발표회 논문집, pp. 776-779
4. M.Arif Karabeyogln, Shame De Zilwa, Brain Cantwell, Greg Zilliac "Transiednt Modeling of Hybrid Rocket Low Frequency Instabilities", *AIAA Journal*, 2003-4463
5. 서상현, 박순홍, 장영순, 이영무, 조광래, " 위성 발사체 탑재부 저주파 음향 모드 제어를 위한 공명기 배치 설계", 한국소음진동공학회 2005년도 춘계학술대회논문집, pp.521-524