

고압 축소형 연소기의 연소 성능 시험

김종규* · 이광진* · 서성현* · 임병직* · 안규복* · 한영민* · 최환석*

Combustion Performance Tests of High Pressure Subscale Liquid Rocket Combustors

Jong-Gyu Kim* · Kwang-Jin Lee* · Seonghyeon Seo* · Byoungjik Lim*
Kyubok Ahn* · Yeoung-Min Han* · Hwan-Seok Choi*

ABSTRACT

Combustion performance and characteristics of high-pressure subscale liquid rocket combustors were studied experimentally. Four different models of combustor were considered in this paper. The high-pressure subscale combustor is composed of the mixing head, the water cooling cylinder and the nozzle. One model of the combustors employed regenerative cooling combustor in that the kerosene used for the chamber cooling is burned. This combustor was damaged due to a high frequency combustion instability occurred during a firing test. The results of the firing tests, comparison of performance, and characteristics of static and dynamic pressures of the combustors are described.

초 특

본 논문은 고압 축소형 액체로켓엔진 연소기의 연소 성능과 특성에 관한 것이다. 4개의 고압 축소형 연소기 모델에 대하여 연소시험을 수행하였다. 고압 축소형 연소기는 크게 분사기 헤드부, 재생냉각 방식의 연소실부, 그리고 강제 물냉각 노즐부로 구성되어 있고, 1개의 모델은 연소실을 냉각한 연료가 헤드부로 유입되는 재생냉각 방식의 연소기이다. 연소압력은 70 bar이며 재생냉각 방식의 연소기 모델은 연소시험 중 고주파 연소불안정이 발생하여 하드웨어가 손상되었다. 각각의 고압 축소형 연소기의 연소시험 결과, 성능 비교 및 정압, 동압 특성에 대해 기술하였다.

Key Words: Subscale Liquid Rocket Combustor (축소형 액체로켓 연소기), Coaxial Swirl Injector (동축 와류 분사기), Regenerative Cooling (재생 냉각), Combustion Performance(연소 성능)

1. 서 론

액체로켓 엔진용 연소기를 설계함에 있어서 고려해야 할 인자들이 상당히 많다. 그 중 가장 기본이 되는 것이 분사기이며, 또한 이러한 분사기들을 적절히 배열, 구성하여 추진체를 분사하여 접화가 될 수 있도록 하는 연소기 헤드 또한

* 한국항공우주연구원 연소기그룹
연락처, E-mail: bellstar@kari.re.kr

중요한 인자라고 할 수 있다. 연소기 헤드는 크게 분사기, 연료 및 산화제 매니폴드와 공급 배관, 그리고 분사기면 등으로 구성되어 있다. 연소기의 성능에 영향을 미치는 변수들은 분사기 형태, 분사기 배열, 연소실 형상 등 여러 가지가 있다. 최종적으로 실물형 연소기를 설계, 제작함에 있어서 시간적, 비용적 문제 등을 감안할 때, 곧바로 실물형에 접근하는 것은 상당한 무리가 따른다. 이에 실물형 연소기의 설계 및 제작에 앞서 축소형 연소기를 설계, 제작하여 보다 안정적이고 높은 성능에 영향을 미치는 변수들을 선별하는 것이 합당할 것이다.

본 논문은 연소 압력 70 bar에서 작동하는 4가지 모델의 고압 축소형 연소기의 연소시험에 관한 것으로서, 각 축소형 연소기의 설계점 및 탈설계점 연소시험을 통해 성능 비교 및 연소 특성을 살펴보고, 또한 각각의 정압 및 동압 특성을 살펴보았다.

2. 하드웨어 및 시험

2.1 고압 축소형 연소기 모델 #1, 2, 3, 4

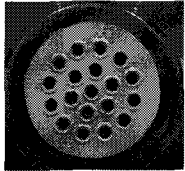
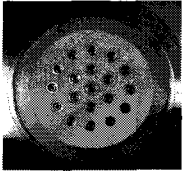
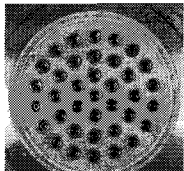
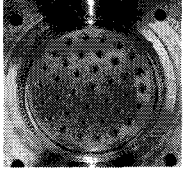
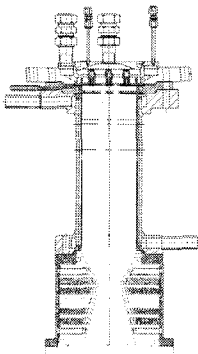
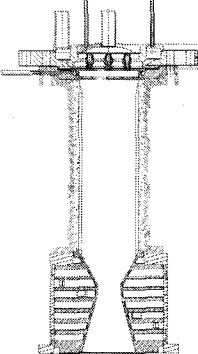
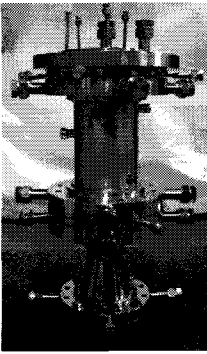
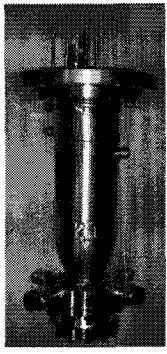
본 연구에서 고려된 고압 축소형 연소기 헤드에 장착되는 분사기는 동축 와류형 분사기이다. Table. 1에 고압 축소형 연소기 각각의 모델에 대해 정리하였다. 우선 모델 #1은 연소기 헤드, 연소실 벽면 냉각을 위한 막냉각링, 재생냉각 방식의 실린더부, 강제 물냉각 방식의 노즐부로 구성되어 있다. 모델 #1에 적용된 분사기는 recess 수가 0.6이며 총 19개의 분사기로 구성되어 있고 분사기 간의 간격은 17mm이다. 실린더부는 냉각을 위한 채널이 가공되어 있으며, 물을 이용하여 냉각을 한다. 노즐부는 8채널로 구성된 칼로리미터방식의 노즐이다. 모델 #2는 연소기 헤드, 막냉각링, 내열재 방식의 실린더부, 강제 물냉각 방식의 노즐부로 구성되어 있다. 분사기의 개수, 분사기의 recess 수, 분사기의 배열은 모델 #1과 동일하나 추진제의 유량이 모델 #1 유량의 약 82%인 유량 축소 분사기를 적용하였다. 모델 #1과 #2의 막냉각 유량

은 전체 연료 유량의 약 12%가 유입되도록 하였다. 모델 #3은 축소형 레벨에서 재생냉각 연소기의 재생냉각 방식을 구현하기 위하여 모델 #1, 2에 비해 추진제 총유량이 증가되었으며, 분사기 배열이 1열 더 추가되어 분사기 개수는 37개이며, 분사기 간의 간격은 17mm이다. 분사기의 recess 수는 0.6이며, 몇 번의 연소시험 후 recess 수를 1.25로 재가공하여 연소 시험을 다시 수행하였다. 연소실의 벽면 냉각을 위한 막냉각링이 헤드와 실린더부 사이, 그리고 실린더부와 노즐부 사이에 각각 삽입하였다. 실린더부와 노즐부의 냉각 채널은 냉각 성능을 증가시키기 위해 각각 30°와 15°의 나선 각을 갖도록 설계하였다[1]. 모델 #4는 실제적인 재생냉각 방식의 연소기를 구현한 모델이다. 즉 연소실을 냉각한 연료가 연소기 헤드로 유입, 분사기를 통해 분무되어 연소가 이루어지는 방식이다. 분사기는 recess 수가 1.25인 분사기로 recess 후 가공을 한 모델#3과 동일하며 37개로 구성되어 있다. 분사기 간의 간격은 독립적인 추진제 공급이 가능한 중앙 분사기의 삽입으로 1열의 간격이 21 mm, 2열과의 간격은 16.5 mm, 3열과의 간격은 16.5 mm, 연소실 벽면과의 간격은 10 mm이다. 막냉각링은 분사기면으로부터 각각 36 mm, 278 mm 떨어진 곳에 존재하고 냉각 채널은 직선형으로 설계하였다. 모델 #4에서의 막냉각링은 모델 #3과 같은 삽입식이 아닌 연소실 벽면에 막냉각 홈을 가공하여 분무되도록 설계하였다. 모델 #3, 4에서의 막냉각 유량은 전체 연료 유량의 약 15%가 유입되도록 하였으며, 분사기면과 가까운 막냉각링에서 4%, 노즐목과 가까운 막냉각링에서 11%가 유입되도록 설계하였다[2].

2.2 연소 시험

각각의 모델들에 대해서 설계점(DP) 및 탈설계점(OD) 연소 시험을 수행하였다. 설계점 조건은 연소압이 70 bar이며, 전체 추진제 유량은 Table. 1에 나타내었다. 탈설계점 조건은 연소압 및 O/F비의 변화범위 ±15%로 설정하였다.

Table 1. 고압 축소형 연소기 #1, 2, 3, 4 (규격 및 사진)

	Model #1	Model #2	Model #3	Model #4
분사기 개수	19	19	37	37
Recess 수	0.6	0.6	0.6 → 1.25	1.25
헤드부				
챔버부				
냉각방식	실린더부 : 물냉각 노즐부 : 물냉각	실린더부 : 내열재 노즐부 : 물냉각	실린더부 : 물냉각 노즐부 : 물냉각	재생(케로신)냉각
유량	LOx : 4.4 kg/s Kerosene : 1.8 kg/s	LOx : 3.6 kg/s Kerosene : 1.5 kg/s	LOx : 6.8 kg/s Kerosene : 2.8 kg/s	LOx : 6.8 kg/s Kerosene : 2.8 kg/s
연소압력	70 bar			
설계 특성속도	1716 m/s	1716 m/s	1720 m/s	1720 m/s

3. 결과 및 토론

3.1 각 모델의 시험 결과 분석 (정압)

3.1.1 모델 #1, 2 연소 시험 결과

모델 #1과 2에 대하여 수회에 걸쳐 시험을 수행하였다. 시험은 안정적으로 이루어졌으며, 또한 하드웨어의 손상은 없었다. Fig. 1에 추진제 매니폴드와 연소실의 압력을 나타내었다. 모델 #1의 연소실 압력은 약 69.3 bar이며, 매니폴드 압력은 약 80 bar이다. 모델 #2의 연소실 압력은 약 68.5 bar, 매니폴드 압력은 #1에 비해 다소 높은 약 92 bar를 보였다. 두 모델 모두 설계 압

력인 70 bar보다 약간 낮은 연소 압력을 보여주었다.

3.1.2 모델 #3 연소 시험 결과

모델 #3은 분사기의 recess 수가 0.6인 외부혼

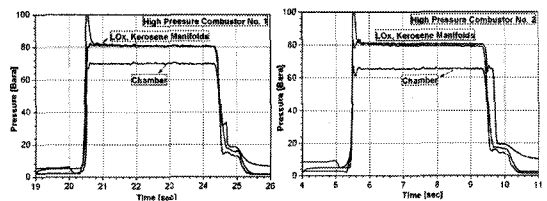


Fig. 1 모델 #1, 2의 추진제 매니폴드와 연소실 압력

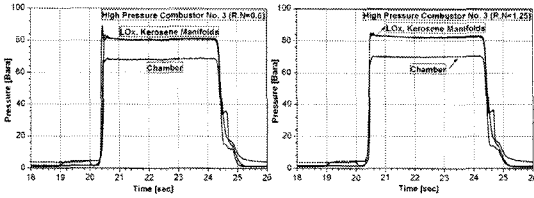


Fig. 2 모델 #3의 추진제 매니폴드와 연소실 압력

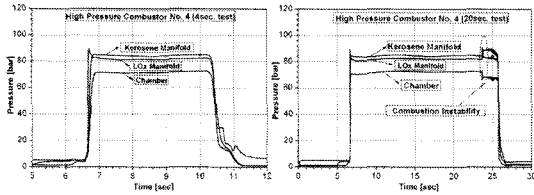


Fig. 3 모델 #4의 추진제 매니폴드와 연소실 압력

합형 분사기로 구성된 연소기이며, 막냉각 유량을 변화시켜 가면서 수회의 설계점 연소 시험을 수행한 후 분사기의 recess 수를 1.25로 변경한 후 설계점 연소 시험을 수행 하였다. 모든 시험은 안정적으로 이루어졌으며, 하드웨어의 손상은 보이지 않았다. Fig. 2에 recess 수의 변경 전후의 연소 시험 시 매니폴드와 연소실의 압력 선도를 나타내었다. Recess 수가 0.6인 분사기의 경우 연소 압력이 약 67 bar로 예상 압력인 70 bar보다 낮은 압력을 보였으나 Recess 수를 1.25로 변경한 후의 연소 시험에서는 70 bar의 압력을 보였다. 이는 분사기의 혼합특성이 연소 성능에 영향을 끼친다는 것을 의미한다. 즉 외부혼합 특성을 보이는 recess 0.6인 분사기 보다 내부 혼합 특성을 보이는 recess 1.25의 분사기의 혼합 특성이 우수하다고 볼 수 있다.

3.1.3 모델 #4 연소 시험 결과

모델 #4의 연소 시험은 2회, 각각 4초와 20초를 수행하였다. 4초 시험은 정상적으로 안정하게 수행이 되었으나, 20초 시험은 시험 도중 고주파 연소 불안정이 발생하여 하드웨어의 손상을 초래하였다. Fig. 3에 4초와 20초의 연소 시험 시 추진제 매니폴드와 연소실의 압력 선도를 나타내었다. 고주파 연소 불안정이 발생한 20초 연소 시험 압력 선도를 보면 연소실의 압력은 감소,

추진제의 매니폴드 압력은 상승, 추진제 유량은 감소하는 일반적인 연소 불안정 발생 시 나타나는 현상들이 보였다. 연소압력은 2회 모두 예상 압력보다 약간 상승한 약 72 bar의 압력을 보였다.

3.2 각 모델의 시험 결과 분석 (열유속 및 특성 속도)

각 모델의 실린더부 및 노즐부는 물 또는 연료(케로신)로 냉각을 하여 연소 시험 시 발생하는 높은 열유속으로부터 연소기 벽면을 보호한다. 연소 시험 시 실린더부와 노즐부에 온도 센서를 삽입하여 온도를 측정하여 열유속을 구하였다. 각 모델의 열유속 및 연소특성속도(C*)는 다음과 같다. 우선 앞서 기술했듯이 모델 #1과 #2의 노즐부는 8채널 칼로리미터 방식의 물냉각 노즐로 구성되어 있다. Fig. 4 왼편에 모델 #1과 #2의 노즐부의 축방향 거리에 따른 열유속 분포와 특성속도를 나타내었다. 열유속 분포에서 열유속이 가장 높은 곳이 노즐목이며, 약 10 MW/m^2 의 열유속을 보였다. 또한 특성속도의 값은 각각 1585 m/s 과 1636 m/s 을 보여 예상 특성속도인 1716 m/s에 못 미치는 결과를 보였다. 이는 연소 성능이 낮은 연소기로 볼 수 있으며, 그 원인은 분사기의 recess 수, 분사기의 배열, 추진제의 혼합 특성 및 미립화 특성 등으로 판단된다. 분사기의 recess 수가 클수록 연소 성능은 증가되는데 이는 추진제의 혼합 효과가 증가되기 때문이며, 이 결과는 모델 #3에서 확연히 나타난다. 또한 연소기의 헤드에 분사기가 배열이 되는데, 이 때 분사기의 간격 또한 연소 효율에 영향이 있음을 참고 문헌을 통해 알 수 있다[3]. 모델 #1과 2는 분사기의 recess 수와 배열이 동일하다. 다만 위에서도 언급하였듯이 모델 #2의 추진제 유량이 상대적으로 적다. 이는 추진제의 미립화에 의한 성능 향상 관점에서 모델 #2가 유리하다는 것을 의미한다. Fig. 4 오른편에 모델 #4의 연소실 열유속 및 특성속도를 나타내었다. 특성속도가 두 번의 시험 모두 1740 m/s 이상의 값을 보여 연소 효율은 상당히 다른 모델에 비해 높은 것으로 판단된다. 이는 위에서도 언급하였

듯이 분사기의 recess 수가 증가함에 따른 결과라 판단된다. 이러한 높은 연소 효율은 연소실 벽면으로 높은 열전달이 수반되므로 냉각이 중요하다. 그림에서 보듯이 전체적으로 열유속이 6 MW/m^2 이하의 값을 보여 케로신을 이용한 재생냉각은 효과적인 것으로 판단된다. Fig. 5에 모델 #3의 열유속과 특성속도, 열유속과 막냉각 유량 선도를 각각 나타내었다. 먼저 특성속도가 증가할수록 열유속이 증가함을 보였고, recess 수가 0.6인 다른 모델과 유사하게 특성속도가 평균 1627 m/s 으로 낮은 값을 보였다. 그러나 recess 수를 1.25로 변경한 후 연소 시험을 수행한 결과 특성속도가 약 1718 m/s 의 값을 보여 recess 수에 따라 연소 성능이 크게 좌우됨을 알 수 있다. Recess 0.6 인 경우 막냉각 유량을 변화시켜 가면서 수회의 연소 시험을 수행한 결과 그림에서도 알 수 있듯이 막냉각 유량이 증가함에 따라 열유속은 감소됨을 보였고, 실린더 부에서의 열유속은 막냉각 유량 뿐만 아니라 추진제의 혼합비에도 많은 영향을 받는 것으로 판단된다.

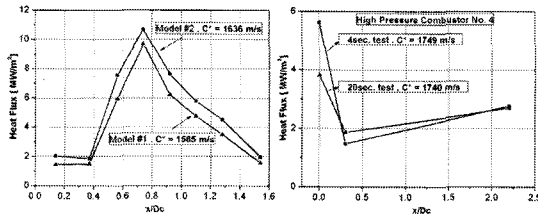


Fig. 4 모델 #1, 2, 4의 열유속 및 특성속도

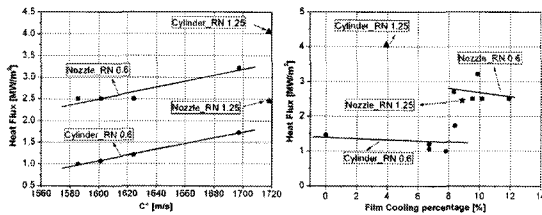
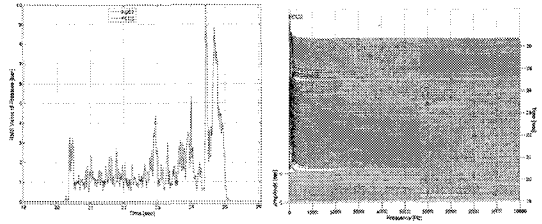
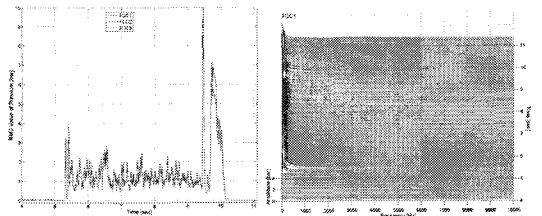


Fig. 5 모델 #3의 열유속 및 특성속도

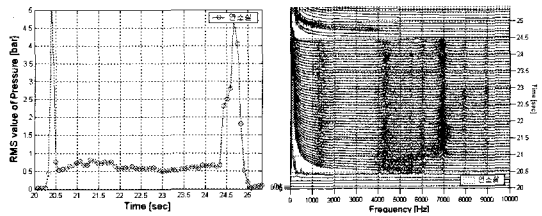
3.3 각 모델의 시험 결과 분석 (동압)



(a) Model #1



(b) Model #2



(c) Model #3

Fig. 6 모델 #1, 2, 3의 연소실에서의 압력 섭동 및 주파수 특성

Figure 6에 모델 #1, 2, 3의 연소실에서의 동압을 나타내었다. 왼쪽 그래프는 연소실에서의 압력 섭동을 측정하여 30~10000 Hz로 필터링한 후 root mean square (RMS) 한 값을 나타내었다. 오른쪽 그래프는 압력섭동에 대한 주파수 분석을 한 결과이다. 참고문헌에서 압력섭동의 RMS 값이 연소실 평균 압력의 약 10% 이하가 되도록 규제를 하고 있다[4]. 세 모델 모두 압력 섭동이 약 3 bar (연소실 평균압력의 약 4%) 이

하의 값으로 규제치를 만족함을 보였다. 또한 주파수 영역에서는 저주파 영역대의 값을 제외하면 고주파 영역에서는 안정적으로 작동함을 보여준다. 앞서 언급하였듯이 모델 #4는 20초 연소 시험 도중 연소 불안정이 발생하였다. Fig. 7에 모델 #4의 20초 연소 시험시의 연소실 및 추진제 매니폴드에서의 압력 섭동 및 주파수 분석을 한 결과를 나타내었다. 우선 산화제 매니폴드에서의 압력 섭동은 약 1 bar의 값을 보이고 주파수는 1200 Hz의 값이 지속적으로 유지되었다. 연료 매니폴드에서는 약 4000 Hz대의 고정 주파수와 약 2600 Hz대에서 시작하여 시간이 경과함에 따라 변화되는 주파수가 관측되었다. 이 2600 Hz대에서 시작한 주파수는 약 5300 Hz까지 변화되었고 4000 Hz의 고정 주파수와 만나는 시점에서 압력 섭동이 약 13.5 bar로 높은 값을 보였다. 이후 약 23초부터 본 연소기의 음향 공진 1T 모드의 주파수인 5300 Hz 근처에 해당하는 고주파 연소 불안정이 발생되었다. 고주파 연소 불안정의 원인은 연료 매니폴드에서의 연료 유동에 의한 것으로 판단된다. 이에 연료 매니폴드에 대한 수류시험을 실시하였다.

Fig. 8에 모델 #4의 헤드에 삽입되는 구조 보강용 링을 나타내었다. 연소실의 냉각 채널을 따라 이동한 연료가 이 링의 여러 홀을 통해 연소기 헤드로 유입되어 분사기를 통해 분무된다. 연료 수류 시험은 이러한 여러 홀이 존재하는 삽입링을 장착 및 탈착 후 각각 수행하였다.

Figure 9에 각각의 수류 시험 시의 연료 매니폴드에서의 압력 섭동과 주파수 분석의 결과를 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 삽입링이 장착된 경우 없는 경우보다 RMS 값이 커짐을 보였다. 또한 주파수의 특성도 500 Hz에서 시작하여 1000 Hz 까지 변화가 됨을 보였고 고정 주파수인 750 Hz와 만나는 시점에서 RMS가 최대가 됨을 보였다. 이는 연소 시험 시와 유사한 경향을 보여 준다. 따라서 구조 보강용 삽입링의 홀을 연료가 통과하면서 유동에 변화를 주었고, 이러한 변화가 불안정으로 이어지는 것으로 판단된다. 또한 연소 시험과 수류 시험에서 고정 주파수가 관측되는데 이것의 원인 분

석도 필요하다.

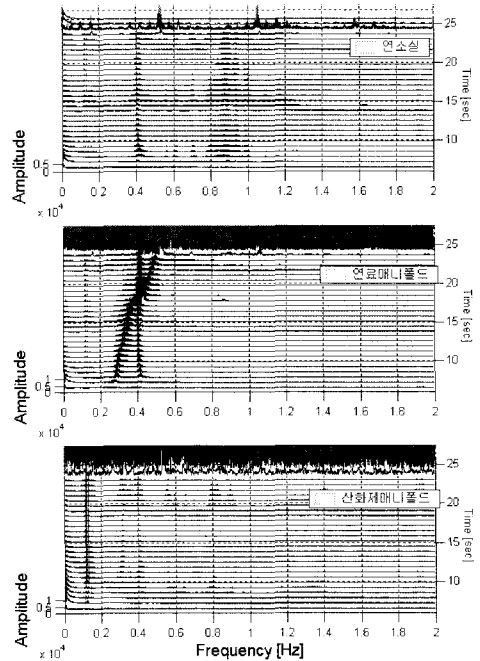
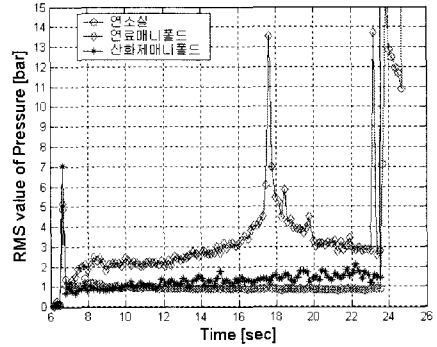


Fig. 7 모델 #4의 연소실 및 매니폴드에서의 압력 섭동 및 주파수 특성

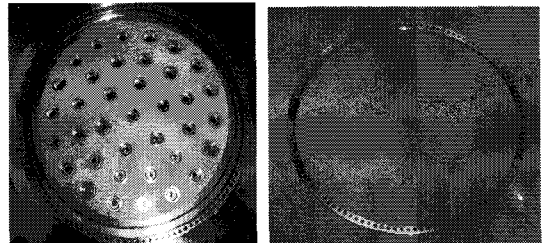


Fig. 8 모델 #4의 구조 보강용 삽입링

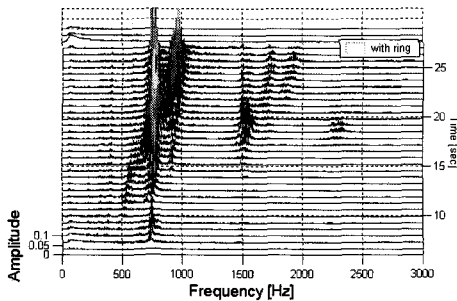
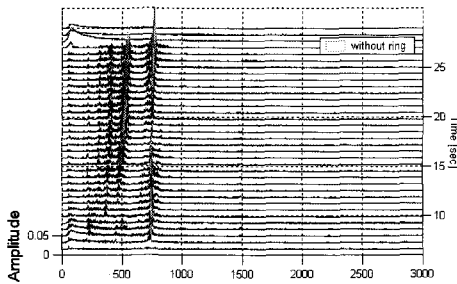
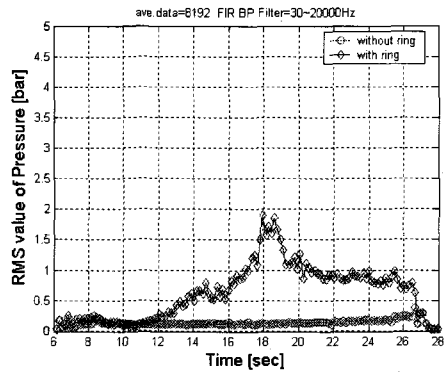


Fig. 9 모델 #4의 수류 시험 시 연료 매니폴드에서의 압력 섭동 및 주파수 특성

4. 맺음말

연소압 70 bar에서 작동하는 고성능 고압 축소형 연소기 네 가지 모델에 대해 연소시험을 수행하였다. 모델 #4를 제외한 모든 연소기는 안정한 연소를 보였다. 분사기의 recess 수가 증가함에 따라 연소 성능이 크게 향상되었고, 분사기

의 배열과 추진제의 미립화도 연소기 성능에 영향을 미침을 보였다. 모델 #3 연소기에서는 막냉각링을 실린더 앞부분과 노즐 앞부분에 각각 삽입하여 막냉각 유량에 따른 열유속의 분포를 알아보았다. 막냉각 유량이 증가할수록 열유속은 감소함을 보였으며, 연소기의 특성속도가 증가할수록 열유속은 증가함을 보였다. 또한 모델 #3을 통해 동일한 조건에서 분사기의 recess 수에 따른 연소 효율과 열유속의 변화를 알 수 있었다. 재생냉각 방식의 연소기인 모델 #4는 연소실의 냉각 측면에서는 양호한 성능을 보였으나 연소 불안정이 발생되었는데, 이의 원인은 연소실을 냉각한 연료가 구조 보강용 삽입링을 통해 연소기 헤드로 유입하는 과정에서 이 삽입링이 유동의 불안정성을 일으켰고, 결과적으로 연소 시험 시 고주파 연소 불안정을 발생하게 한 원인으로 판단된다. 이에 대한 것은 향후 좀 더 세부적인 분석이 필요할 것으로 보인다.

참고문헌

1. 이광진 등, "고압 축소형 연소기의 설계 및 연소효율 평가," 한국추진공학회 2006년 추계학술대회, pp. 169-174, 11. 2006.
2. 이광진 등, "재생냉각형 고압 축소형 연소기의 설계 및 연소성능시험," 제 8회 우주발사체기술 심포지움 pp. 121-127, 02. 2007.
3. 김종규, 이광진, 문일윤, 서성현, 한영민, "고압 축소형 연소기의 연소 성능 특성," 한국항공우주공학회 2006년 추계학술대회, pp. 995-998, 11. 2006.
4. Klem, M. D. and Fry, R. S., "Guidelines for Combustion Stability Specifications and Verification Procedures for Liquid Propellant Rocket Engines," CPIA Publication 655, January, 1997.