

고압 축소형 재생냉각형 연소기 개발

김종규* · 이광진** · 서성현** · 한영민** · 최환석**

Development of High Pressure Sub-scale Regeneratively Cooled Combustion Chambers

Jonggyu Kim* · Kwang-Jin Lee** · Seonghyeon Seo** ·
Yeoung-Min Han** · Hwan-Seok Choi**

ABSTRACT

The development of high-pressure sub-scale combustion chambers is described. A total of four high-pressure sub-scale combustion chambers having either a detachable structure of the mixing head and the chamber or a single welded regenerative cooling structure have been developed. The sub-scale combustion chambers have a chamber pressure of 70 bar and propellant mass flow rate of 5.1~9.1 kg/s. The propellant mass flow rate and the recess number of the injector were changed for the improvement of combustion performance and they were validated through hot firing tests. The design and manufacturing techniques of regenerative cooling channel and film cooling to be applied to the full-scale combustion chamber were adopted through the present development and verified.

초 록

고압 축소형 연소기의 개발에 관하여 기술하였다. 헤드부와 챔버부가 분리형인 연소기와 일체형 재생냉각 방식의 연소기 등 총 4기의 연소기가 개발되었다. 축소형 연소기의 연소 압력은 70 bar이고, 추진제 유량은 5.1~9.1 kg/s이다. 연소성능의 향상을 위해 추진제 유량, 분사기의 recess 수 등을 변화시켰고, 이를 연소시험을 통해 확인하였다. 또한 실물형 연소기에 적용할 재생냉각 채널과 막냉각의 설계 및 제작 기술을 본 축소형 연소기에 적용, 검증하였다.

Key Words: Sub-scale Liquid Rocket Combustion Chamber (축소형 액체로켓 연소기), Coaxial Swirl Injector (동축 와류 분사기), Regenerative Cooling (재생냉각), Film Cooling (막냉각)

1. 서 론

† 2009년 7월 2일 접수 ~ 2009년 11월 7일 심사완료

* 정회원, 한국항공우주연구원 연소기팀

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

액체로켓엔진 연소기를 개발하기 위해서는 여러 단계를 거치게 된다. 먼저 몇 개의 후보 분사

기들을 설계, 제작, 시험하여 상호 비교를 통해 최종적으로 실물형 연소기에 적용할 분사기를 선택하는 단일 분사기의 개발이 선행되어야 한다. 이 때 제작 시간과 비용이 많이 소요되는 실물형 연소기에 이 분사기를 바로 적용하기에 앞서 축소형 연소기에 먼저 적용하여 검증하는 단계가 필요하다. 이는 이웃하는 분사기들 간의 상호 작용도 성능에 큰 영향을 미치기 때문에 몇 개의 분사기들로 구성된 축소형 연소기를 제작하여 시험을 통해 검증한다[1]. 액체 로켓 엔진 연소기의 연소 성능에 관련된 인자는 여러 가지가 있는데, 연소기 헤드에 장착되는 분사기의 종류, 개수 및 배열 등에 따라 연소기의 성능이 달라진다. 즉, 연소기 헤드의 설계가 연소기의 성능을 좌우하는 중요한 요소가 된다. 연소기의 성능에 있어서 또 하나의 중요한 요소는 연소실의 냉각 설계이다. 이는 연소기의 안정적인 작동성에 가장 기본이 되는 요소이기 때문에 축소형 모델에서 연소실의 냉각 설계를 검증하는 것 또한 먼저 선행되어야 할 과정이다. 최종적인 실물형 연소기의 형상은 연소실을 냉각한 연료가 연소기 헤드로 유입, 분사기를 통해 분무되어 연소가 되는 재생냉각 방식의 형상이다. 이에 총 4기의 축소형 연소기 모델을 통해서 최종적으로 고성능 연소기이면서 실물형 연소기의 설계에 적용할 재생냉각 방식의 연소기를 개발하였다.

본 논문은 연소 압력 70 bar에서 작동하는 고압 축소형 연소기의 개발에 관한 것으로서, 각 축소형 연소기의 형상, 성능 및 특성을 비교하였다. 또한 실물형 연소기 설계에 적용할 재생냉각 방식의 채널과 막냉각 설계를 본 축소형 연소기에 적용, 검증하였다.

2. 하드웨어 및 시험

2.1 고압 축소형 연소기 모델

고압 축소형 연소기 헤드에 장착되는 분사기는 동축 와류형 분사기이다. 분사기에서 산화제 측은 와류실을 가지고 있는 닫힘형이고 분사기

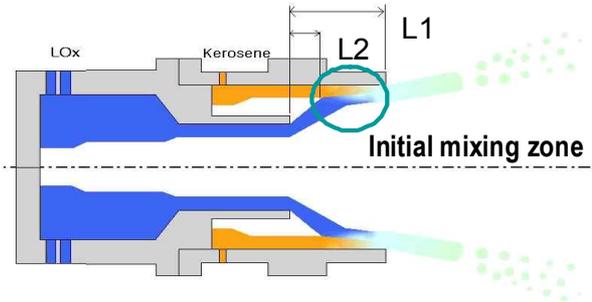
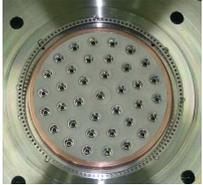
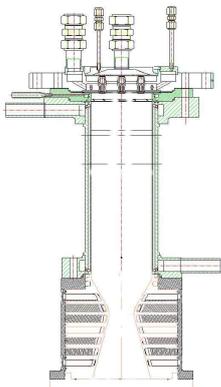
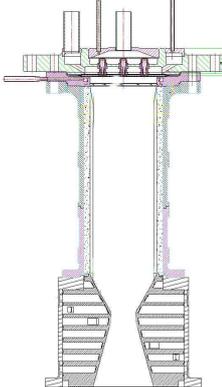


Fig. 1 Schematic of mixed type coaxial swirl injector.

의 중앙에서 분무된다. 연료측은 산화제를 감싸면서 분무되며 와류실이 없는 열림형 구조이다. Table. 1에 고압 축소형 연소기 각각의 모델에 대해 정리하였다. 우선 모델 #1은 연소기 헤드부, 연소실 벽면 냉각을 위한 막냉각링부, 물냉각 방식의 실린더부와 노즐부로 구성되어 있다. 모델 #1에 적용된 분사기는 recess 수가 0.6이며 총 19개의 분사기로 구성되어 있다. 여기서 recess 수는 산화제 노즐 끝단에서부터 연료 노즐 끝단까지의 거리와 산화제 노즐 끝단에서부터 산화제와 연료가 만나는 지점까지의 거리의 비($L1/L2$)로 정의한다. 분사기 간의 간격은 17 mm이고, 최외곽 분사기와 연소실 벽면과의 거리는 20 mm이다. 실린더부는 냉각을 위한 채널이 가공되어 있으며, 물을 이용하여 냉각을 한다. 노즐부는 8채널로 구성된 칼로리미터방식의 노즐이다. 모델 #2는 연소기 헤드부, 막냉각링부, 내열재 방식의 실린더부, 물냉각 방식의 노즐부로 구성되어 있다. 분사기의 개수 및 분사기의 recess 수는 모델 #1과 동일하나 추진제의 유량이 모델 #1 유량의 약 82%인 유량 축소 분사기를 적용하였다. 분사기 배열은 모델 #1과 같으나 최외곽 분사기와 벽면사이와의 거리가 14.9 mm이다. 모델 #1과 2의 막냉각 유량은 전체 연료 유량의 약 12%가 유입되도록 설계하였다. 모델 #3은 연소기 헤드부, 1차 막냉각링부, 물냉각 방식의 실린더부, 2차 막냉각링부, 물냉각 방식의 노즐부로 구성되어 있다. 노즐부 출구 끝단에서 물이 유입되어 노즐부를 냉각한 후 배관을 통해 실린더부에 유입, 냉각이 되는 구조이다. 모

Table 1. High Pressure Sub-scale Combustion Chamber

	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	재생냉각
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

모델 #3의 추진제 유량은 재생냉각 방식을 구현하기 위하여 모델 #1, 2에 비해 유량이 증가되었으며, 분사기 배열이 1열 더 추가되어 분사기 개수는 37개이며, 분사기간의 간격은 17 mm이다. 최외곽 분사기와 연소실 벽면 사이의 거리는 13 mm이다. 실린더부와 노즐부의 냉각 채널은 냉각 성능을 증가시키기 위해 각각 30°와 15°의 나선 각을 갖는다[2]. 분사기의 recess 수는 0.6이며, 수회의 연소시험 후 연소성능 향상의 효과를 검증하기 위해 recess 수를 1.25로 수정 가공하여 연소 시험을 다시 수행하였다. 연소실의 벽면 냉각을 위한 1차 막냉각링부를 헤드부와 실린더부 사이, 그리고 실린더부와 노즐부 사이에 2차 막냉각링부를 각각 삽입하였다. 모델 #4는 실제

적인 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 수정 가공을 한 모델 #3과 동일하며 37개로 구성되어 있다. 분사기 간격은 1열이 21 mm, 2열과 3열은 모두 16.5 mm이고, 연소실 벽면과의 거리는 10 mm이다. 막냉각부는 모델 #3과 같은 삽입식 링이 아닌 연소실 내피 벽면에 홈을 가공하여 분무되도록 설계하였다. 냉각 채널은 직선형으로 설계하였다. 모델 #3, 4에서의 막냉각 유량은 전체 연료 유량의 약 15%가 유입되도록 하였으며, 분사기면과 가까운 막냉각부에서 4%, 노즐목과 가까운 막냉각부에서 11%가

유입되도록 설계하였다[3]. 설계 연소 압력은 모두 70 bar이며, 모델 #1과 2의 설계특성속도는 1716 m/s로 선정하였고, 모델 #3과 4는 좀 더 성능을 향상시키기 위해서 좀 더 높은 1720 m/s로 선정하여 설계하였다.

2.2 연소 시험

각각의 모델들에 대해서 설계점 및 탈설계점 연소 시험을 수행하였다. 각 모델들의 설계점 시험 조건은 Table. 1에 나타내었고, 탈설계점 조건은 설계점 연소 압력 및 O/F비의 변화범위 $\pm 15\%$ 로 설정하였다.

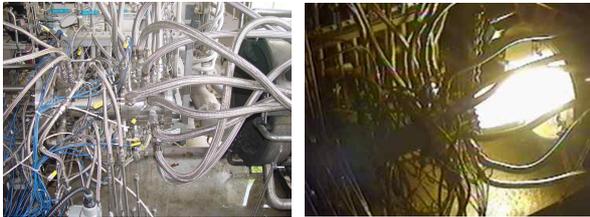


Fig. 2 Firing Test of High Pressure Subscale Combustor

3. 연소 시험 결과

3.1 시험 결과 분석 (설계점: 정압, 온도)

3.1.1 모델 #1, 2 연소 시험 결과

모델#1과 2에 대하여 수회에 걸쳐 시험을 수행하였다. 시험은 안정적으로 이루어졌고 하드웨어의 손상은 없었다. Fig. 3에 추진제 매니폴드와 연소실의 압력 선도를 나타내었다. 수회의 설계점 시험을 평균한 결과는 다음과 같다. 모델 #1의 연소 압력은 약 69.3 bar이며, 연료 및 산화제 매니폴드 압력은 약 80 bar이다. 모델 #2의 연소 압력은 약 69.1 bar, 매니폴드 압력은 약 81 bar를 보여 두 모델의 연소 압력은 거의 동일하였다. 그러나 두 모델 모두 설계 압력인 70 bar보다 약간 낮은 연소 압력을 보여 주었다. 설계압력보다 낮은 연소 압력을 보이는 원인은 분사기의 배열 때문으로 판단된다. 분사기 배열을 살펴보면 모델 #1과 2는 모델 #3, 4에 비해 상

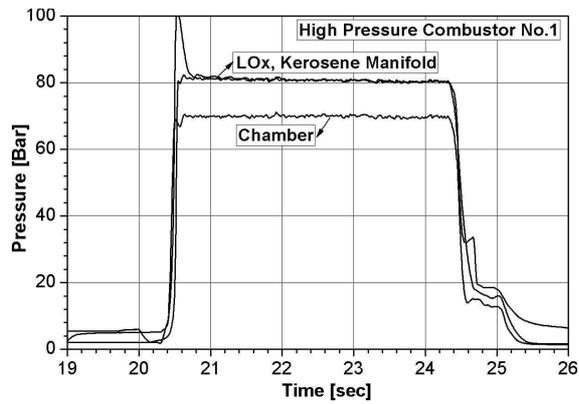
대적으로 중앙에 분사기가 집중되어 있고, 또한 최외곽 분사기와 연소실 벽면과의 간격도 상대적으로 크다. 이러한 구조적인 원인이 추진제의 혼합특성에 영향을 주고, 연소가 연소실 전체에서 균일하게 일어나지 못하고 중앙에 편중되어 나타나 발생하는 현상으로 판단된다. 뒤에 언급하겠지만 연소특성속도(C^*)도 예상치 보다 낮은 값을 보였다.

3.1.2 모델 #3 연소 시험 결과

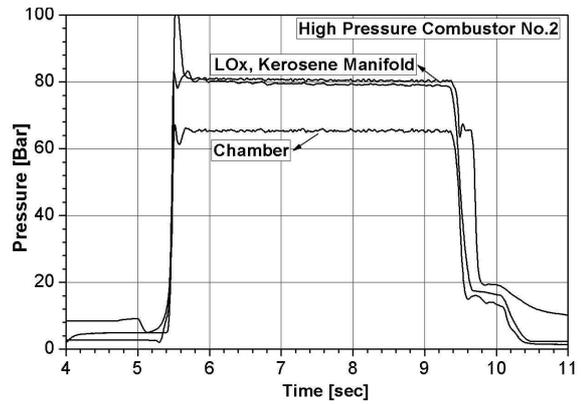
모델 #3은 분사기의 recess 수가 0.6인 분사기로 구성된 연소기이며, 막냉각 유량을 변화시켜가면서 수회의 설계점 연소 시험을 수행하였다. 그 후 분사기의 recess 수를 1.25로 변경한 후 설계점 연소 시험을 다시 수행하였다. 모든 시험은 안정적으로 이루어졌으며, 하드웨어의 손상은 보이지 않았다. Fig. 4에 분사기의 recess 변경 전후의 연소 시험 시 매니폴드와 연소실의 압력 선도를 나타내었다. 연소 압력은 추진제 유량과 혼합비에 따라 변하기 때문에 이들의 값이 비슷한 경우의 결과를 비교하여 보면, recess 수가 0.6인 분사기의 경우 약 67 bar로 예상 압력인 70 bar보다 낮은 압력을 보였으나, recess 수를 1.25로 변경한 후의 연소 시험(1회)에서는 70 bar의 압력을 보였다. 연소 압력의 차이를 보이는 이유는 recess 수가 0.6인 분사기는 두 추진제가 각각 분무된 후 혼합이 이루어지는 외부혼합 특성을 보이고, recess 수가 1.25인 분사기는 내부에서 혼합이 이루어져 분무되는 특성을 보이기 때문으로 판단된다.

3.1.3 모델 #4 연소 시험 결과

Figure 5 (a)에 모델 #4의 연소 시험 시 추진제 매니폴드와 연소실의 압력 선도를 나타내었다. 연소 압력은 예상 압력보다 약간 상승한 약 72 bar의 압력을 보였다. 모델 #4는 재생냉각방식의 연소기이므로 연소실을 케로신이 냉각을 하면서 헤드로 유입이 된다. 연소실의 각 부위에 온도센서를 장착하여 각 구간마다 케로신의 온도를 측정하였다. 그 결과를 Fig. 5 (b)에 나타내

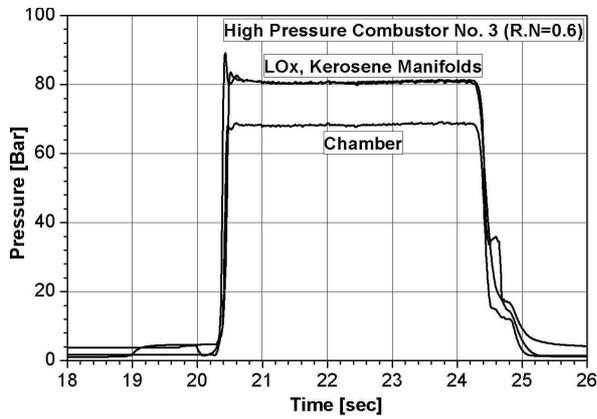


(a) Model #1

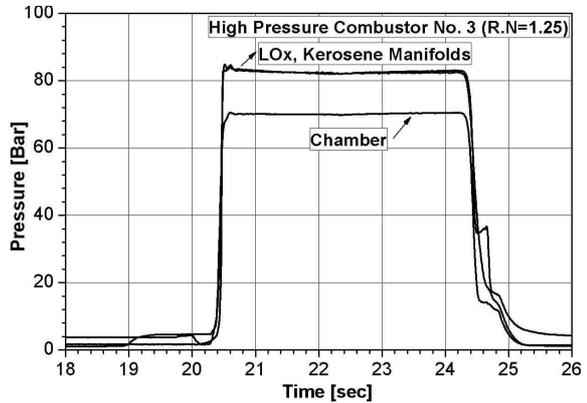


(b) Model #2

Fig. 3 Pressures of Manifolds & Chamber Model #1, 2

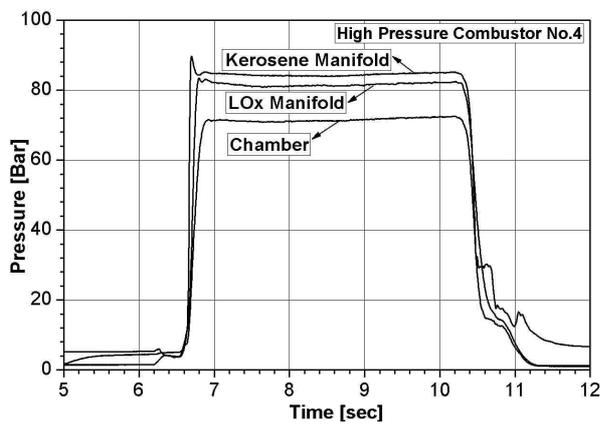


(a) Model #3 (R.N = 0.6)

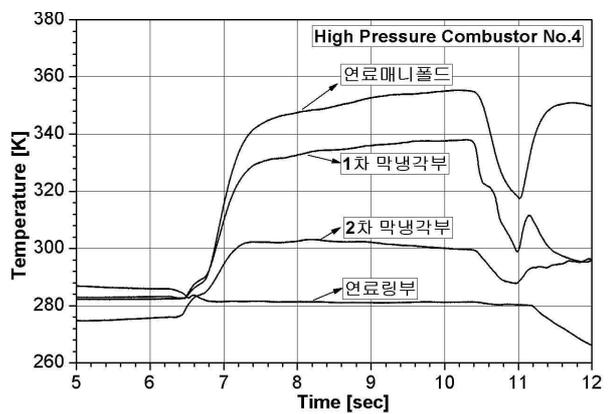


(b) Model #3 (R.N = 1.25)

Fig. 4 Pressures of Manifolds & Chamber Model #3 (R.N. 0.6 & 1.25)



(a) Model #4 (Pressure)



(b) Model #4 (Temperature)

Fig. 5 Pressures of Manifolds & Chamber and Temperature of Cooling Kerosene Model #4

었다. 연료가 연소실로 유입되는 연료링부, 노즐부를 냉각한 연료가 유입되는 2차 막냉각부, 실린더부를 냉각한 연료가 유입되는 1차 막냉각부, 그리고 최종적으로 헤드로 유입되기 직전에 위치한 연료 매니폴드에서의 케로신 온도를 보여준다. 연소가 시작되는 약 6.5초 이전과 연소가 종료된 약 11초 이후는 질소 퍼지로 인한 온도 변화이다. 연료가 연소실로 유입되어 연소실을 냉각한 후 헤드로 유입되기까지의 온도 상승은 최대 약 74 K이다. 즉 분사기로 유입되는 연료의 온도는 최대 약 355 K이다. 이는 케로신을 이용한 연소실 냉각 설계 시 주의해야 하는 코킹(Coking) 현상이 발생하는 평균 온도 범위보다 약간 낮은 온도를 보여[4], 본 케로신 냉각 설계는 양호한 것으로 판단된다.

3.2 시험 결과 분석 (열유속 및 연소특성속도)

각 모델의 실린더부 및 노즐부는 물 또는 케로신으로 냉각을 하여 연소 시험 시 발생하는 높은 열유속으로부터 연소기 벽면을 보호한다. 위에서도 언급하였듯이 연소 시험 시 실린더부와 노즐부의 냉각 채널에 온도 센서를 삽입, 측정 후 열유속을 구하였다. 각 모델의 열유속 및 연소특성속도는 다음과 같다. Fig. 6 (a)에 모델 #1과 #2의 노즐부에서의 열유속 분포와 연소특성속도를 나타내었다. 앞서 기술했듯이 모델 #1과 2의 노즐부는 8채널 칼로리미터 방식의 물냉각 노즐이다. 열유속 분포에서 열유속이 가장 높은 곳이 노즐목이며, 약 10 MW/m^2 의 열유속을 보였다. 또한 모델 #1과 2의 연소특성속도는 각각 1585 m/s 와 1636 m/s 을 보여 예상 연소특성속도인 1716 m/s 에 못 미치는 결과를 보였다. 이는 연소 성능이 낮은 연소기로 볼 수 있으며, 그 원인은 위에서도 언급하였듯이 분사기의 배열 때문으로 판단된다. 분사기의 recess 수가 클수록 연소 성능은 증가되는데 이는 추진제의 혼합 효과가 증가되기 때문이며, 이 결과는 모델 #3에서 확연히 나타난다. 모델 #1과 2는 분사기의 recess 수와 배열은 동일하나 모델 #2의 추진제 유량이 상대적으로 작다. 따라서 상대적으로

분사기당 유량이 작은 것이 미립화 특성이 좋고 이것으로 인해 모델 #2의 연소특성속도가 더 큰 것으로 판단된다[5].

Figure 6 (b)에 모델 #4의 연소실 전체의 열유속 및 연소특성속도를 나타내었다. 연소특성속도가 1749 m/s 의 값을 보여 연소 효율은 다른 모델에 비해 상당히 높았다. 이는 우선 분사기의 recess 수가 1.25이고, 분사기의 배열이 다른 모델에 비해 중앙으로 편중되어 있지 않고 전체적으로 분포되어 있는 구조이다. 또 하나의 이유는 분사기로 유입되는 연료의 온도가 연소실 냉각으로 인해 다른 모델에 비해 상대적으로 높다. 즉, 연소되어야 할 연료의 엔탈피 증가로 인한 결과라 판단된다. 열유속의 결과를 보면 연료가 연소실로 유입되어 노즐목을 거쳐 2차 막냉각부까지 냉각을 하면서 통과할 때 열유속이 증가함을 알 수 있고, 1차 막냉각부까지 실린더부를 냉각하면서 지나간다. 이 때의 열유속은 감소함을 보이는데 이는 1차 막냉각부의 막냉각 효과 때문으로 판단된다. 또한 1차 막냉각부에서 연소기 헤드로 유입되기 전까지의 열유속이 가장 높다. 그러나 그 값이 6 MW/m^2 이하의 값을 보여 채널냉각 및 막냉각을 이용한 냉각 설계는 효과적인 것으로 판단된다. Fig. 7의 (a), (b)에 모델 #3의 열유속과 연소특성속도, 열유속과 막냉각유량 선도를 각각 나타내었다. 먼저 모델 #3 분사기의 recess 수가 0.6일 때의 연소특성속도는 recess 수가 0.6인 다른 모델들과 유사하게 평균 1627 m/s 로 설계값보다 낮은 값을 보였다. 그러나 recess 수를 1.25로 변경한 후 연소 시험을 수행한 결과 연소특성속도가 약 1718 m/s 의 값을 보여 recess 수에 따라 연소 성능이 크게 좌우됨을 알 수 있다. 또한 연소특성속도가 증가할수록 실린더와 노즐부의 열유속은 증가함을 보였다. Recess 수가 0.6인 경우는 노즐부가 실린더부보다 열유속이 높은 반면, recess 수가 1.25인 경우는 그 반대로 실린더의 열유속이 더 높다. 이 이유는 두 경우 막냉각 유량이 동일하게 유입이 된 것이 아니기 때문에 막냉각 유량에 따른 영향도 있을 것으로 판단되나, 이 보다는

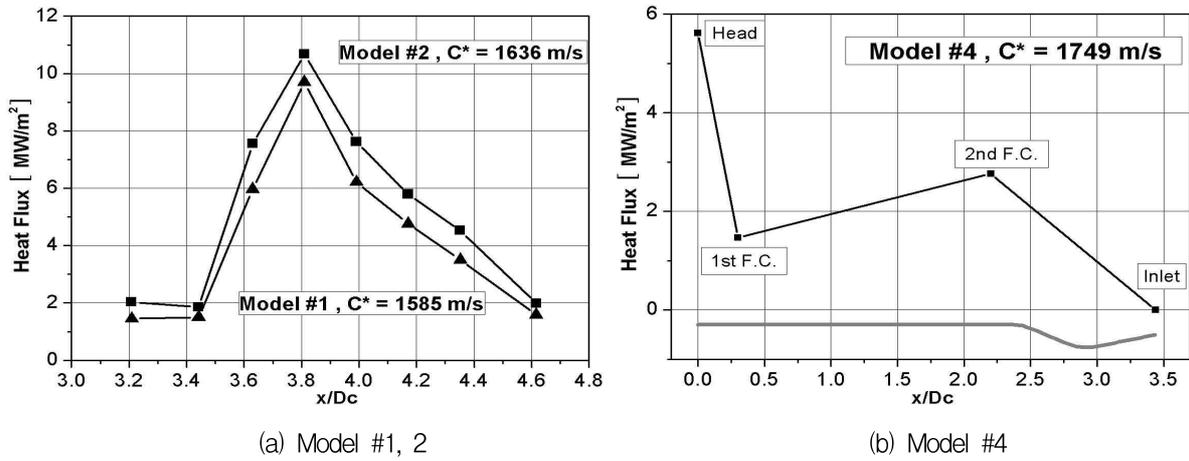


Fig. 6 Heat Fluxes & Characteristic Velocities of Model #1, 2, 4

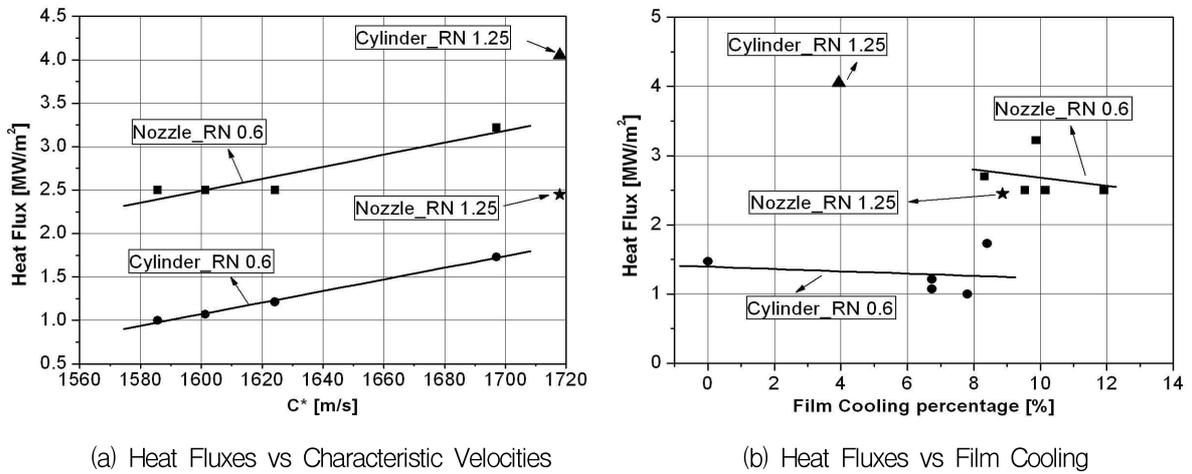


Fig. 7 Heat Fluxes & Characteristic Velocities of Model #3

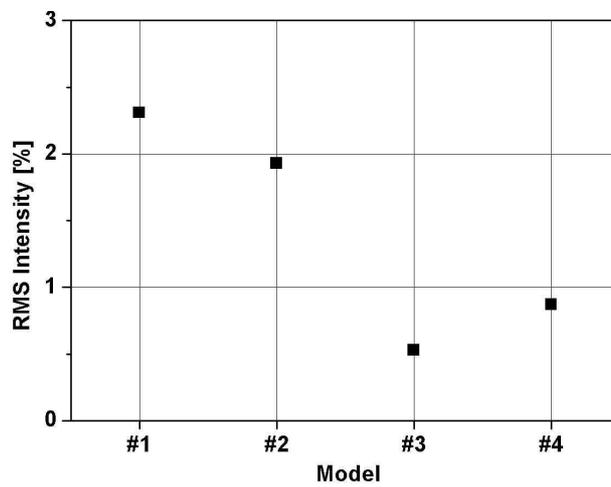


Fig. 8 Chamber Dynamic Pressure RMS Intensities

분사기의 recess에 따른 추진제의 외부혼합과 내부혼합의 효과 때문으로 판단된다. 즉 내부혼합일 경우는 분사기 내측에서 이미 혼합이 이루어져 분무가 되고, 그 만큼 헤드와 가까운 곳에서 활발한 연소가 일어나 에너지 밀도가 높은 것으로 판단된다. 열유속에 대한 막냉각의 효과를 보기 위해서 recess 수가 0.6인 경우 막냉각 유량을 변화시켜 가면서 수회의 연소 시험을 수행한 결과 그림에서도 알 수 있듯이 막냉각 유량이 증가함에 따라 열유속은 대체로 감소됨을 보였다. 실린더부에서 막냉각 유량이 가장 클 때의 열유속이 가장 크게 나온 것은 열유속이 막냉각 유량뿐만 아니라 추진제의 혼합비에도 많은 영향을 받는 것으로 보인다. 실물형에 적용할 막냉각의 유량은 좀 더 많은 시험을 통해 결정되어야 할 것으로 판단된다.

3.3 각 모델의 시험 결과 분석 (동압)

연소실과 각각의 추진제 매니폴드에서의 동압을 측정하여 연소 조건에서 발생하는 압력섭동 및 주파수를 분석하였다. 참고문헌에서 최대진폭을 갖는 압력파의 최대, 최소와의 차이가 평균 연소 압력의 약 10% 이하면 정적인 상태에서 동적으로 안정한 것으로 보고 있다[6]. Fig. 8과 같이 모든 모델에서의 값이 3% 이하의 값을 보여 권고치를 만족함을 보였고, 또한 주파수 영역에서는 저주파 영역대의 값을 제외하면 고주파 영역에서는 대체적으로 안정적으로 작동함을 보였다.

4. 결론

4기의 고압 축소형 연소기 모델을 통하여 연소 압력 70 bar에서 작동하는 고압 축소형 재생냉각형 연소기를 개발하였다. 그 과정 중에 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 분사기의 recess 수가 클수록, 단위분사기당 추진제의 유량이 작을수록 연소특성속도가 높음

을 재확인하였고, 연소 시 분사기의 recess에 따라 연소실에서의 에너지 밀도가 높은 구역이 다름을 알 수 있었다. 이에 재생냉각 연소실의 설계 시 이러한 점을 반드시 고려하여 설계하여야 한다.

2. 분사기의 배열이 연소기의 성능과 밀접한 관련이 있음을 확인하였다. 이는 단위분사기 개발 과정에서는 확인이 불가한 사항이므로 분사기의 배열은 축소형 레벨에서 반드시 확인되어야 할 요소이다.

3. 연소실의 냉각 성능은 모델 #3과 #4의 시험 결과로 보아 양호한 것으로 판단되며, 여기에 적용한 연소실 냉각 채널 및 막냉각 설계는 실물형 연소기의 설계에 활용될 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 김종규, 이광진, 송주영, 문일윤, 최환석, "축소형 액체로켓엔진 연소기 연소특성에 대한 연구," 한국추진공학회 2006년 춘계 학술대회, pp. 288-293, 5. 2006.
2. 이광진, 김홍집, 류철성, 한영민, 최환석, "고압 축소형 연소기의 설계 및 연소효율 평가," 한국추진공학회 2006년 추계 학술대회, pp. 169-174, 11. 2006.
3. 이광진, 임병직, 김종규, 안규복, 서성현, 김홍집, 한영민, 최환석, "재생냉각형 고압 축소형 연소기의 설계 및 연소성능시험," 제 8회 우주발사체기술 심포지움 pp. 121-127, 02. 2007.
4. 임병직, 이광진, 김종규, 양승호, 김희태, 강동혁, 김홍집, 한영민, 최환석, "로켓엔진 연소기 재생냉각채널을 모사한 탄화수소계 연료가열시험," 한국추진공학회지 제11권 제5호, 2007, pp78-84.
5. 문일윤, 김종규, 한영민, 유진, 이양석, 고영성, "유량 및 연소압에 따른 액체로켓 단위

분사기 연소 특성 변화,” 한국추진공학회
2005년 추계 학술대회, pp. 247-250, 2006.

6. 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.