

실물형 재생냉각 액체로켓엔진 연소기(확대비3.5) 연소시험

양승호* · 김희태* · 강동혁* · 안규복*
서성현* · 한영민* · 최환석*

Combustion Test of Regenerative Cooling Combustor for Liquid Rocket Engine

Seung-Ho Yang* · Hee-Tea Kim* · Dong-hyuk Kang · Kyu-Bok Ahn
Seong-Hyeon Seo* · Yeoung-Min Han* · Hwan-Seok Choi*

ABSTRACT

Firing tests have been performed for a 30 tonf-class full-scale regeneratively cooled combustion chamber. It was the first model which has welded construction of the injection head and the combustion chamber. A number of firing tests have been performed to evaluate combustion efficiency, regenerative cooling performance and durability of the combustor. This paper describes the results of firing tests performed at the design and off-design conditions which correspond to the chamber pressure of 60 bar, 68 bar respectively and the O/F ratio of 2.5 and 2.8 respectively. The data at each test condition have provided successful results in terms of combustion performance, combustion stability and durability. The tests are considered to be quite meaningful in the sense that the technologies for kerosene regeneratively cooled combustion chamber are successfully proven.

초 록

추력 30톤급 액체로켓엔진의 실물형 연소기에 케로신을 이용한 재생냉각 방식을 적용하여 연소시험을 수행하였다. 30톤급 실물형 연소기로는 처음으로 연소기 헤드와 연소실이 일체형으로 제작되었으며, 연소성능 및 재생냉각 성능, 그리고 연소기 내구성 확인을 위하여 여러 차례 연소시험이 수행되었다. 본 논문에서는 연소압력 68 bar 혼합비 2.8의 탈설계점 조건과 연소압력 60 bar, 혼합비 2.5의 설계점 조건을 적용한 연소시험의 성능결과에 대하여 기술하였다. 각각의 연소시험 결과 연소성능 및 연소안정성, 그리고 연소기 내구성 측면에서 충분히 성공적인 데이터를 얻었으며, 이로써 30톤급 액체로켓엔진 케로신 재생냉각 연소기 개발의 기술적인 검증을 완료했다는 의미를 부여할 수 있게 되었다.

Key Words: Full-scale Combustor(실물형 연소기), Liquid Rocket Engine(액체로켓엔진), Regenerative Cooling(재생냉각), Combustion Performance(연소성능), Combustion Stability Test(연소안정성 시험평가)

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

1. 서 론

액체로켓엔진은 많은 구성품으로 이루어져 있으며, 그중에서 추진제를 연소시켜 추력을 발생시키는 연소기는 엔진의 성능에 매우 큰 영향을 미치는 핵심부품이다. 액체로켓엔진의 연소기는 추진제를 균일하게 분포시켜 분사하고 혼합한 다음 점화하여 연소시키는 분사기 헤드, 연소되는 가스가 고온 고압을 유지하면서 궁극적으로 완전연소가 되게 하는 연소실, 연소가스를 높은 속도로 방출시켜 추력을 얻는 노즐, 그리고 점화 시스템 및 추력전달 구조물 등으로 구성되어 있다.[1]

액체로켓엔진 연소기는 다량의 추진제와 산화제를 고압으로 연소시켜 노즐을 통해 고속으로 분사하여 그 반작용을 이용하여 추력을 얻게 되는데, 이 과정에서 연소실 내부는 고밀도 에너지를 갖는 고온/고압의 환경에 노출이 된다. 이때 연소기는 고온/고압의 작동조건에서 장시간동안 안정적으로 작동하기 위해서 연소실 벽면을 효과적으로 냉각하는 동시에 연소기 효율을 저하시키지 않는 다양한 방식의 연소기 냉각방식이 사용되어 지고 있는 상황이며, 그중에서도 고압의 고성능 연소기 개발을 위해서 꼭 필요한 냉각기술이 재생냉각과 막냉각 방식을 이용한 연소기이다.

재생냉각(Regenerative Cooling)은 액체로켓엔진에서 광범위하게 사용된다. 이것은 연소실에 분사하기 전의 추진제를 연소실 벽 속의 채널을 통해 흘려보내 연소실의 벽면을 냉각하는 방법이며, 연소가스로부터 벽면을 통해 냉각유체에 유입된 열은 결국 연소가스의 엔탈피에 포함되어 효과적으로 사용되기 때문에 재생이라는 표현을 쓴다. 또한 막냉각(Film Cooling)은 고온가스에 접촉되는 벽면을 따라 가스 혹은 액체의 냉각제를 흘려 연소실 벽면으로의 열전달을 막는 방법으로, 액체로켓에서 냉각제로서 추진제의 하나인 연료를 사용하면 벽면 근방이 연료과농 가스가 되어 연소가스 온도가 저하되며 연소실 벽면으로의 열전달 양이 감소되는 냉각방식이다.[2]

지금까지 30톤급 연소기 개발을 목표로 여러 모델의 재생냉각방식 연소기가 제작 시험[1,3,4]되었으며, 본 논문에서는 그중에서 열전도가 높은 구리합금 채널을 사용한 재생냉각, 액체필름을 이용한 막냉각, 그리고 열차폐코팅(TBC) 등의 연소실 벽면 보호방식을 조합하여 제작된 연소기의 연소시험 결과를 제시하였다. 시험에 사용된 실물형 연소기는, 연소시험 시 만약에 생길 수 있는 하드웨어 손상 등에 대비하기 위하여 연소기 헤드와 연소실이 조립식으로 되어있던 기존 모델들과는 달리 연소기 헤드와 연소실이 용접 결합된 최초의 일체형 재생냉각방식의 연소기이며, 기존의 조립형으로 제작되었던 실물형 연소기보다 연소압력이 다소 높은 60 bar와 노즐확대비 3.5를 갖도록 설계되었다. 작동성 확인 및 연소성능 확인, 그리고 TBC 및 연소기 전반의 내구성 확인을 위해 3번의 연소시험[3]을 통해 누적 연소시간 73초에 이르는 연소시험이 수행된 후에, 고압/고혼합비 조건의 탈설계점(Off-design Point)에서 연소성능 확인 및 연소안정성평가지험 등 10초의 연소시험이 수행되었고, 설계점(Design Point)에서 재생냉각 내구성 확인을 위한 50초 연소시험이 수행되었다.

일체형 재생냉각 액체로켓엔진 연소기 연소시험에서 연소기의 손상은 없었으며, 연소성능, 연소안정성, 연소기 내구성 등에 대한 결과 또한 충분히 만족할 만한 결과를 보여주었다.

2. 실물형 재생냉각 연소기 및 시험 조건

2.1 실물형 재생냉각 연소기

본 연구에서 사용된 액체로켓엔진 연소기는 가스발생기 사이클 엔진에 적용되는 최초의 일체형 재생냉각 연소기로서[3], 연소기 고성능화를 위하여 지난 일련의 연소시험에 사용되었던 연소기의 연소압력 52.5 bar보다 다소 높은 60 bar의 연소압력을 갖도록 설계되었다. 액체산소와 케로신을 추진제로 사용하고 혼합비는 2.44, 전체 추진제 유량은 88.8 kg/s, 연소실 직경은 380 mm, 노즐목 직경은 180.5 mm, 노즐출구직

경은 340 mm(노즐 확대비 3.55)로 연소특성속도는 약 1710 m/sec을 목표로 개발되었다.

연소기 내부의 높은 온도와 열유속에 견디기 위하여 연소실 내벽에 열차폐코팅과 연료를 이용한 막냉각을 적용하였으며, 대부분의 내피는 열전도율이 높은 구리합금을 사용하였고 내부 채널을 이용한 재생냉각방식 등이 사용되었다. [3] 또한 1, 2, 3차 접선방향 공진모드(1T, 2T, 3T)와 1차 반경방향 공진모드(1R)을 억제할 수 있도록 38개의 분사기형 배플이 배치되어 있다.[5]

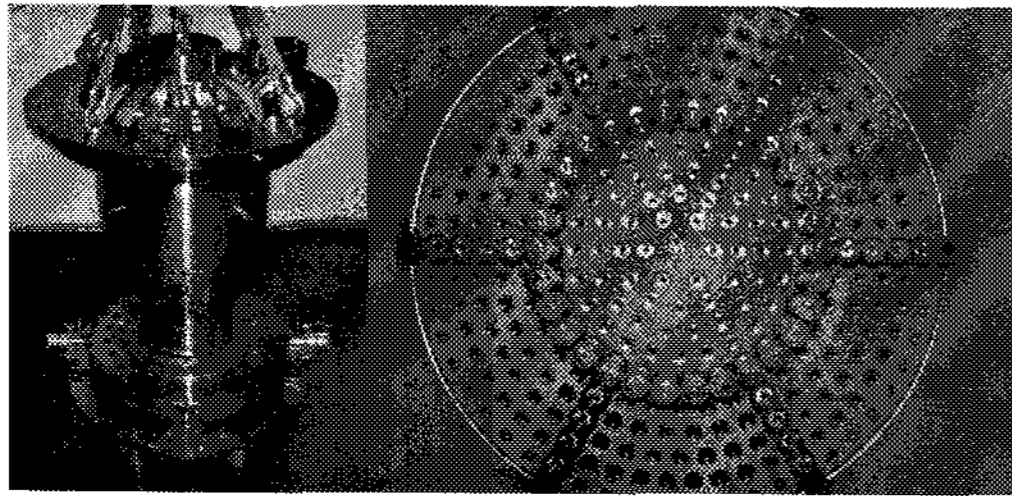


Fig. 1 실물형 재생냉각 연소기와 분사기

2.2 시험 조건

본 연구에서 제시된 연소시험은 Table 1과 같이 두가지 조건에서 수행하였다. 첫 번째로는 고압의 연소압력과 높은 혼합비를 갖는 탈설계점에서 연소성능확인 및 연소안정성 평가시험이며, 두 번째는 설계점에서의 연소기 전반에 걸친 내구성 확인을 위한 연소시험이다.

Table 1. 연소시험 조건

시험조건	탈설계점(OD)	설계점(DP)
연소압력(bar)	69	60
전체유량(kg/s)	103.75	88.8
산화제유량(kg/s)	76.48	62.98
연료유량(kg/s)	27.27	25.82
혼합비	2.8	2.44
연소시간(sec)	10	50

탈설계점 조건에서의 연소시험은 연소압과 혼합비가 높아 열유속이 크게 증가하므로 분사기 및 연소기의 냉각성능을 검증할 수 있으며, 또한 같은 조건에서 펄스건(Pulse Gun)을 이용하여

연소기에 인위적인 교란을 인가하는 SRT(Stability Rating Test)[6]도 함께 수행하였다. 연소시험 시 펄스건은 단발 30도 관에 기폭제는 1.8 g이 사용되었고, 69 bar의 연소압력에 25 bar의 섭동을 예상하였다.

2.3 센서 위치

연소시험 시 데이터의 획득을 위하여 Fig 2와 같이 연소기의 중요 부위에 온도센서 및 정압관련 센서, 동압센서 등을 설치하였다.

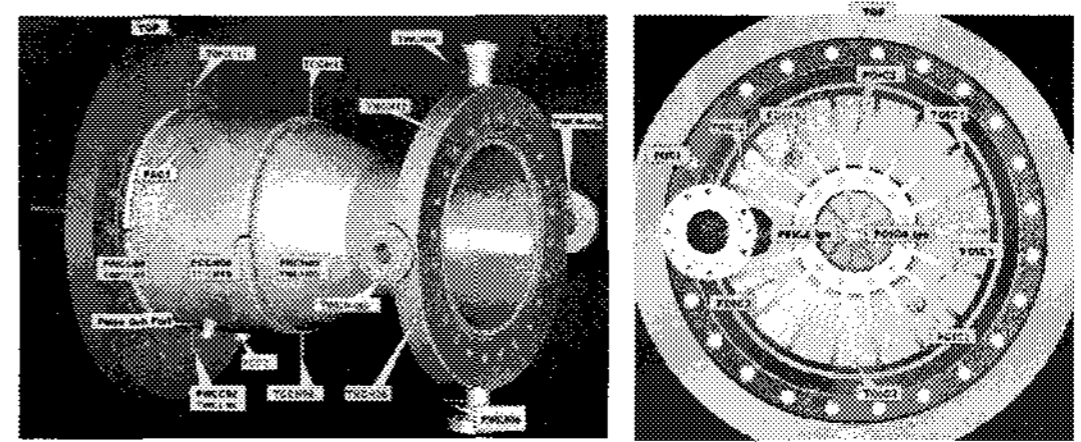


Fig. 2 실물형 재생냉각 연소기의 센서 위치

3. 연소시험 결과

3.1 탈설계점 연소시험(OD)

시험회수 3회, 누적연소시간 73초에 걸친 작동성능 및 연소성능, 내구성 확인 연소시험 중 연소기 헤드 및 연소실의 손상이 발생하지 않았고 냉각성능 또한 만족할 만한 수준이었기에, 연소기 운영영역 중 연소압력이 높고 혼합비가 높아 열유속이 가장 큰 탈설계점(OD3)에 대한 케로신 재생냉각 시험을 10초간 수행 하였다.

연소압력 67.3 bar, 혼합비 2.766, 산화제 유량 73.2 kg/s, 연료유량 26.4 kg/s로 연소특성속도는 약 1721 m/s 정도의 값을 나타내었다. Fig. 3과 Fig. 4는 각각 연소시험 중의 연소기 매니폴드 및 연소실의 압력과 재생냉각 과정의 냉각유 온도변화를 도시화 한 것으로, 케로신의 공급라인에서 연소실까지의 전체 차압은 약 19 bar, 또한 온도는 약 31 K 정도 상승하였고, 연소실 길이방향의 4개씩 같은 위치에 놓인 온도분포의 편차가 크지 않은 것으로 보아 연소실 내부에서 고른 혼합비를 갖고 고르게 연소장을 형성하는 것으로 판단되었다.

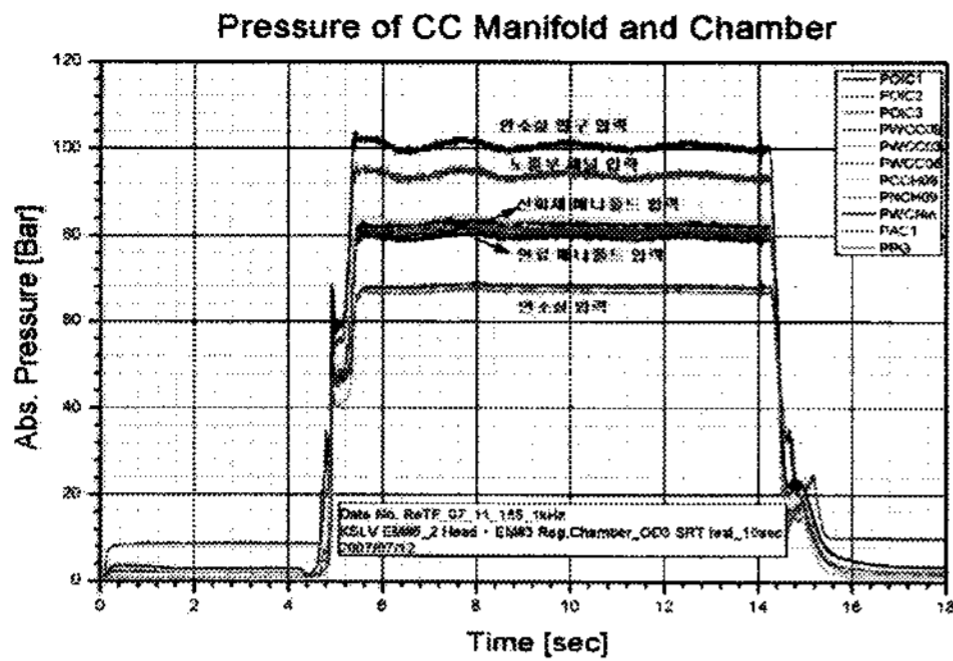


Fig. 3 연소기 매니폴드 및 연소실 압력 (OD)

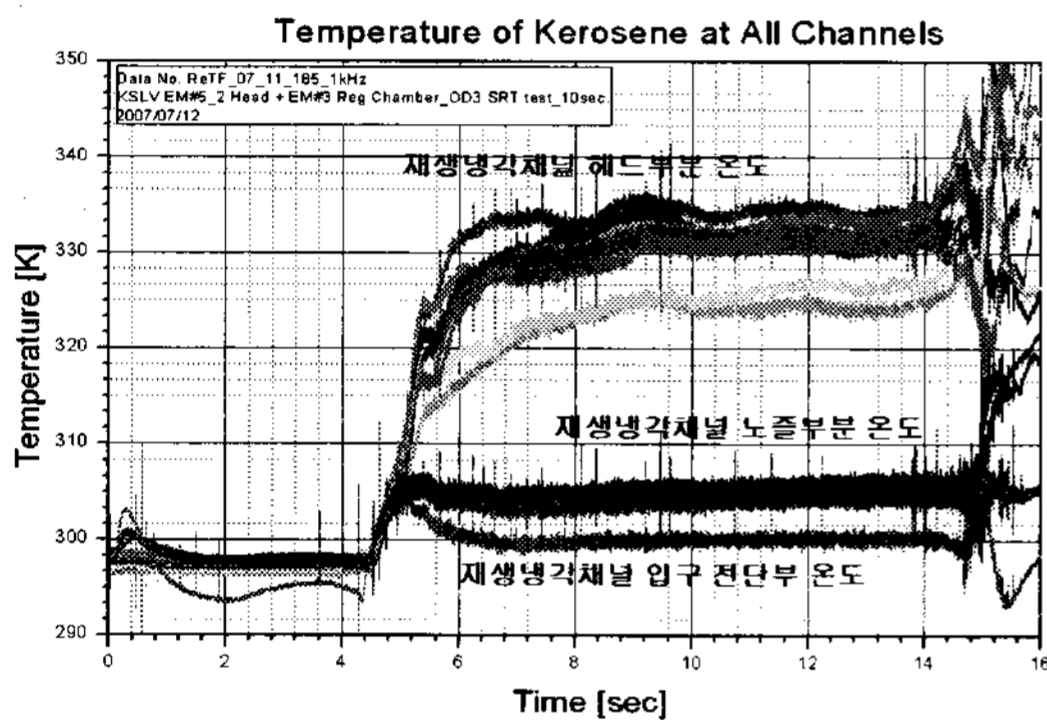


Fig. 4 연소기 재생냉각 케로신 온도 (OD)

연소시험이 종료된 후의 노즐부분의 사진이 Fig. 5에 보여지고 있다. 접선방향 공진모드를 억제하기 위하여 설치한 6개의 블레이드 역할의 분사기형 배플의 형상[5]에 따라 Soot가 형성됨을 볼 수 있으며, 열차폐코팅의 색이 드러난 노즐목 부분은 연소 중단 시 질소퍼지에 의하여 순간적으로 고혼합비의 화염이 발생하여 Soot가 벗겨진 것으로 생각된다.

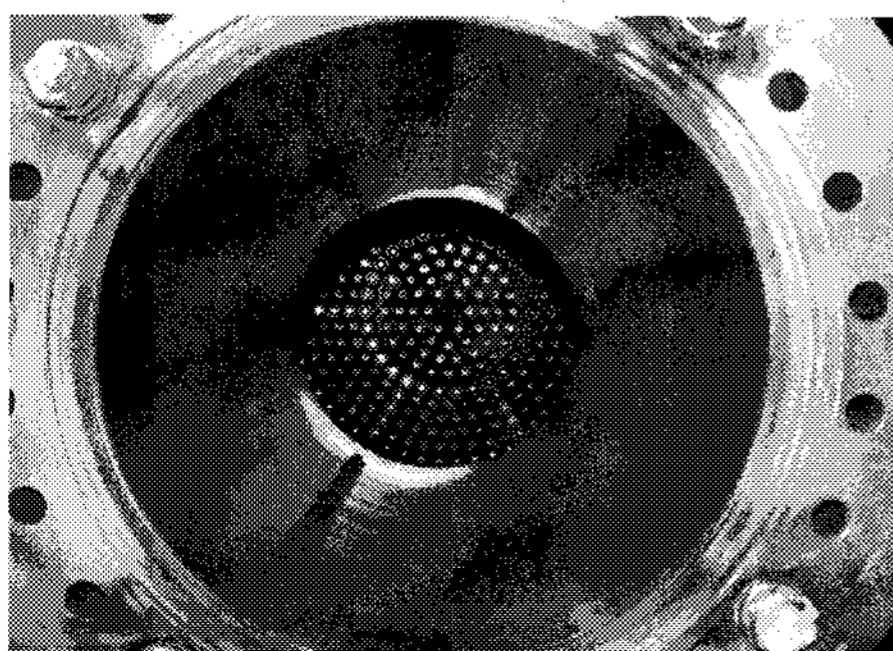


Fig. 5 연소시험 후 노즐부 (OD)

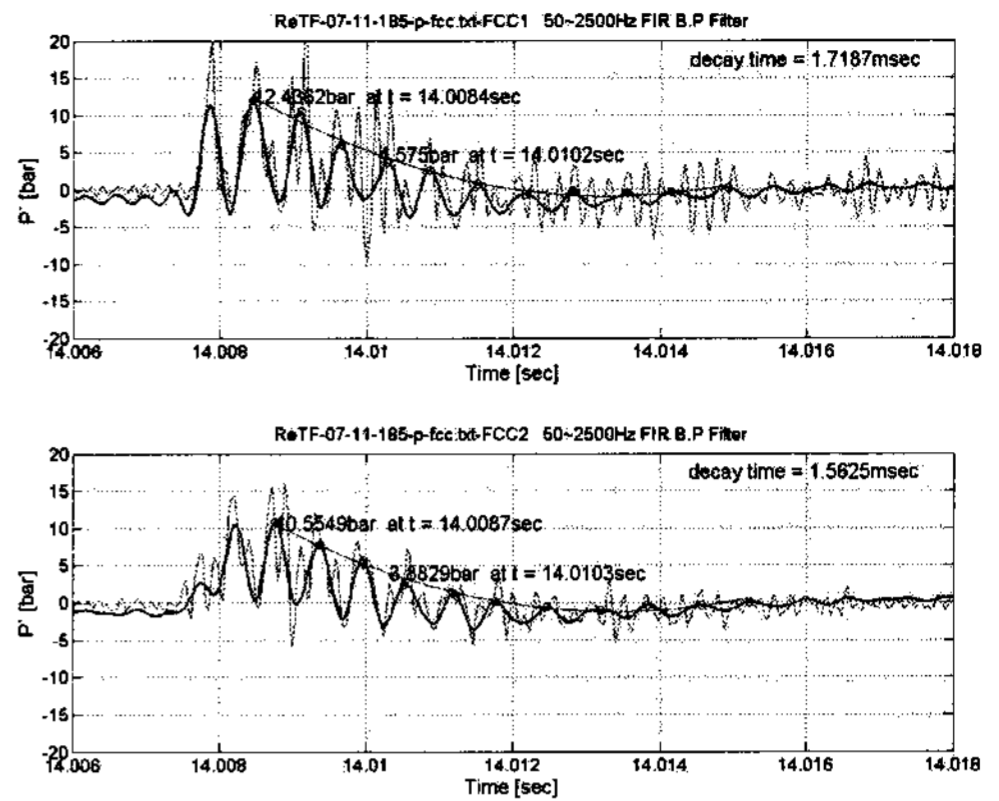


Fig. 6 연소시험 중 연소실의 동압변화1 (OD)

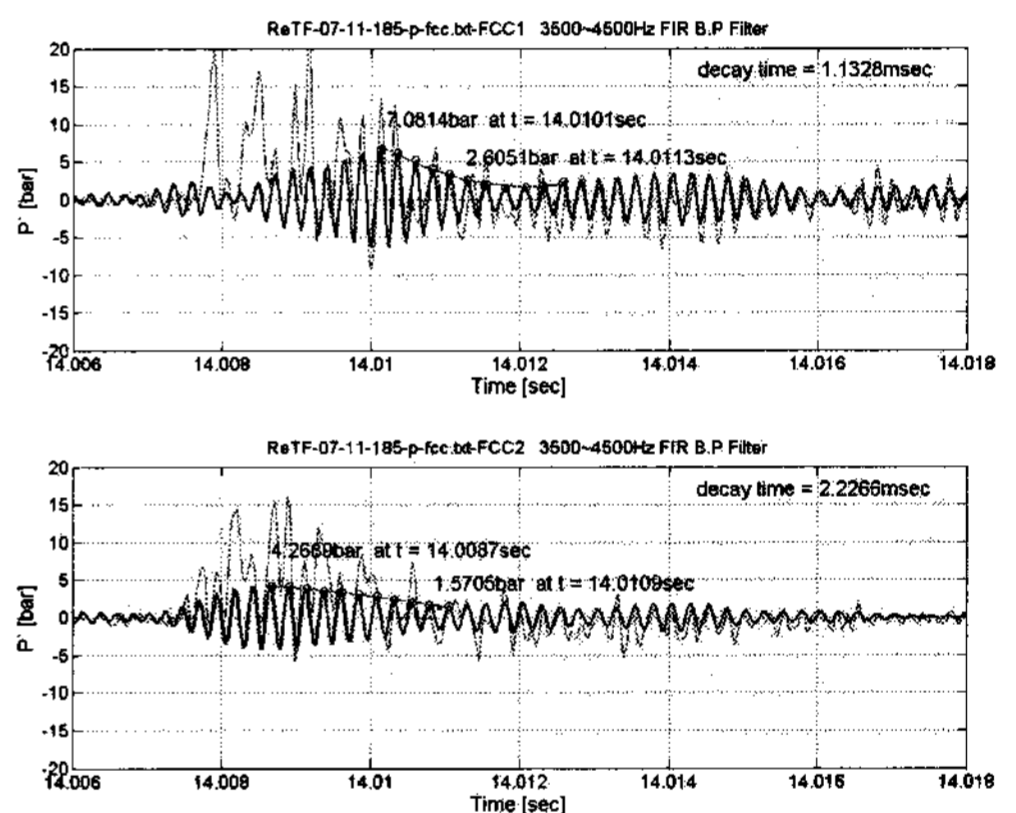


Fig. 7 연소시험 중 연소실의 동압변화2 (OD)

10초의 탈설계점 연소시험 진행 중에 펄스건을 이용한 연소안정성 평가시험도 동시에 수행되었다. 1.8 g의 기폭제를 충전한 펄스건 기폭시험에서 연소압 대비 대략 36%의 압력섭동을 인가하여 연소장을 교란시키고 그에 반응하는 압력섭동의 증감 및 감쇠시간[5] 등을 계산하였다. Fig. 6과 Fig. 7은 연소실로부터 측정된 압력섭동을 나타낸 것으로 각각 50~2500 Hz의 밴드패스 필터링과 3500~4500 Hz의 밴드패스 필터링을 수행한 결과이다. 압력섭동의 감쇠시간은 1.1 ~ 2.2 msec로 짧게 나타났으며, 이는 분사기형 배플의 뛰어난 압력섭동 감쇠 능력을 충분히 입증하는 결과로 생각할 수 있다.

3.2 설계점 연소시험(DP)

케로신 재생냉각 연소기 탈설계점 연소시험(10초)을 수행한 결과 열유속이 예상치보다 작으며 연소기 손상 및 연소불안정문제가 발생하지 않아 케로신 재생냉각 연소기의 성능과 연소안정성에 문제가 없는 것으로 판단하였고, 설계점에서 연소기 2차 내구성 연소 시험을 수행하였다.



Fig. 8 재생냉각연소기 연소시험 화염사진 (DP)

연소시간은 50초로 진행되었고, 연소압력 59.6 bar, 혼합비 2.49, 산화제유량 62.47 kg/s, 연료유량 25.11 kg/s, 연소특성속도 1729.8 m/s를 나타냈으며, Fig. 8은 시험당시의 화염사진을 보여주고 있다. 연소특성속도가 기존에 개발된 연소기 모델에 비하여 다소 높은 값을 보이는 것은 연소압력 증가 및 재생냉각에 의한 연료 공급온도의 증가 등을 그 이유로 생각할 수 있다.

향후 재생냉각 연소기의 경우 연소실 냉각량 최적화, 노즐 확대비의 증가에 따른 연소실 연료 공급 초기 엔탈피의 증가 등, 연소 효율을 높일 수 있는 다양한 인자들로 인해 연소특성속도를 다소 증가 시킬 수 있을 것으로 기대한다.

연소시험 중 연소기 매니폴드 및 연소실의 압력과 재생냉각 케로신 온도를 Fig. 9와 Fig. 10에 나타내었다. 케로신 공급라인에서 연소실까지의 차압은 탈설계점 보다 작은 17 bar이었으며, 온도는 약 28 K정도 상승되었다.

내구성 확인을 위한 50초 연소시험은 매우 안정적으로 수행되었고, 연소기 주요부분에 물리적인 손상이 생기지 않았음이 확인되었으며, 선행된 음향해석을 통하여 우려되었던 접선방향의 공진현상(1T, 2T, 3T)으로 발생하는 연소불안정 [5]도 나타나지 않았다.

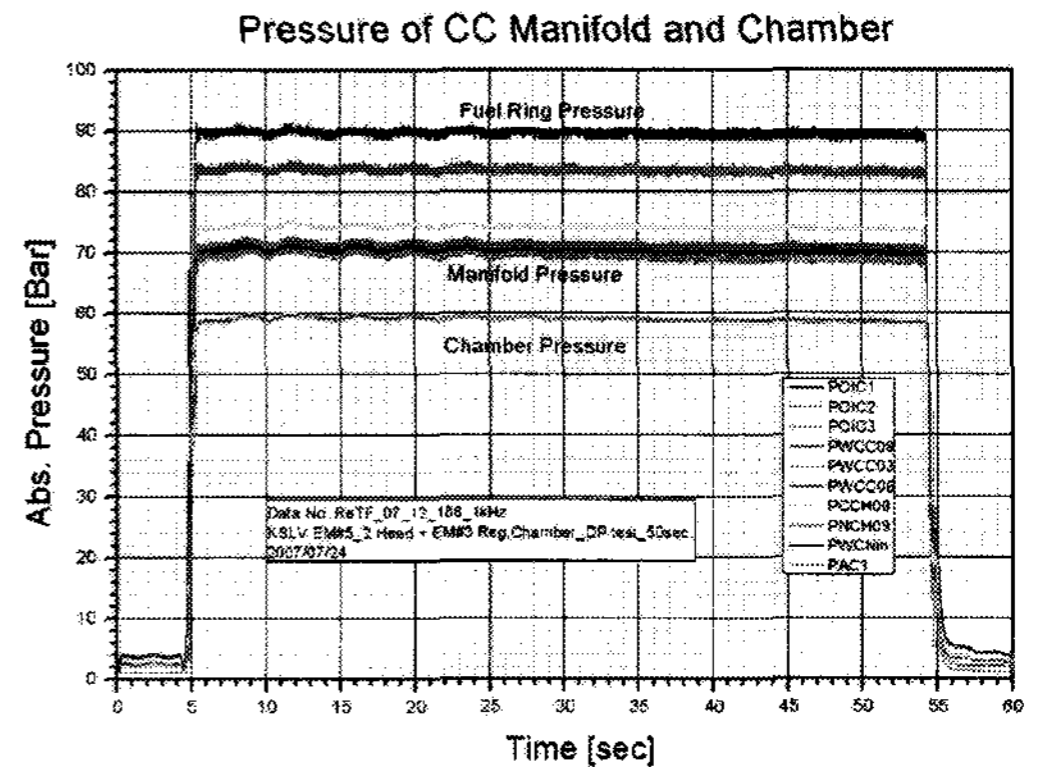


Fig. 9 연소기 매니폴드 및 연소실 압력 (DP)

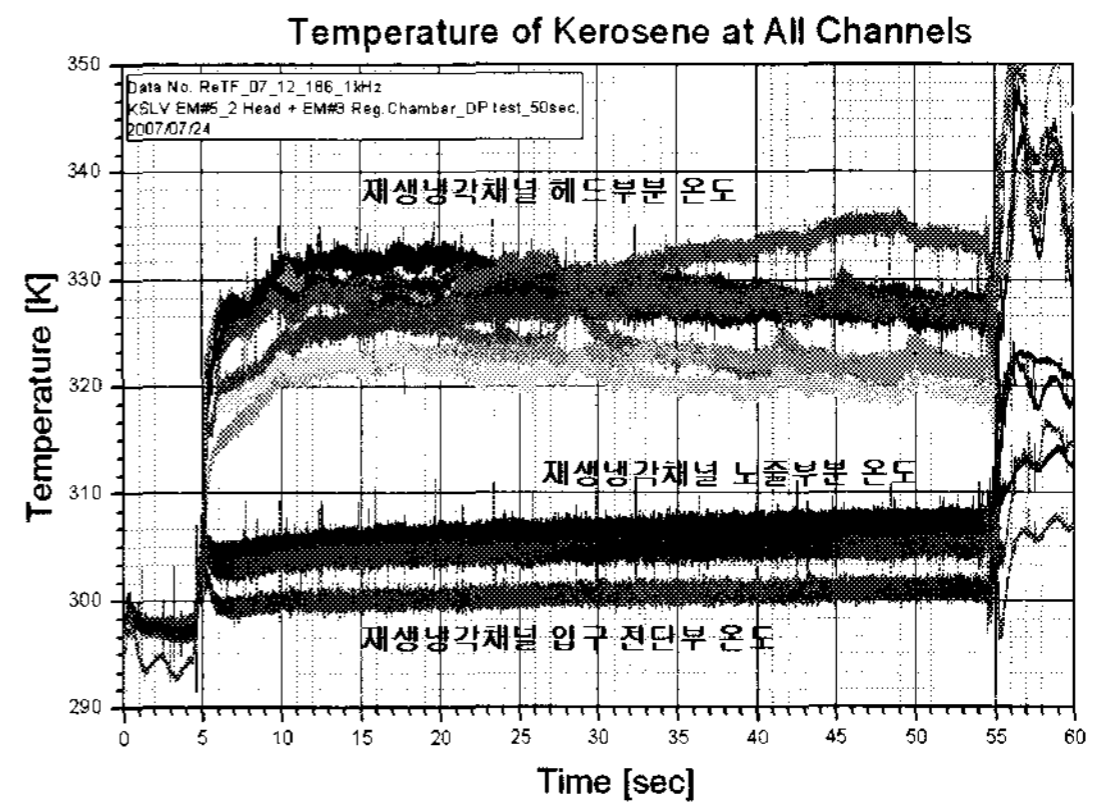


Fig. 10 연소기 재생냉각 케로신 온도 (DP)

4. 결 론

지금까지 케로신을 이용한 30톤급 재생냉각 연소기에 대한 설계점 및 탈설계점 연소시험을 성공적으로 수행하였다.

탈설계점 연소시험을 통하여 높은 연소압력과 열유속에서 분사기면과 연소실의 손상이 없음을 확인하였고, 또한 SRT를 통하여 접선 및 반경방향 공진모드에 대한 연소안정성도 입증되었다. 그리고 연소실 압력 60 bar의 설계점 조건에서는 50초 동안의 연소시험에도 불구하고 재생냉각 채널 및 막냉각, 열차폐코팅 등은 충분히 만족할 만한 성능을 보여주었다.

국내 최초로 일체형으로 제작된 실물형 재생

냉각 액체로켓엔진 연소기의 연소시험이 최장 50초간의 작동시간에도 불구하고, 연소기의 손상과 연소불안정의 발생 없이 성공적으로 수행되었다. 이것은 향후 국내에서 개발되어질 다양한 재생냉각 액체로켓엔진 연소기 개발에 필요한 설계기준을 제공 해 줄 것이다.

참 고 문 헌

1. 한영민, 김종규, 문일윤, 서성현, 최환석, 이수용 "실물형 액체로켓엔진 연소기 케로신냉각 연소시험 성능결과." 한국추진공학회, 2006년도 추계학술대회 논문집
2. 키무라 이츠로 (윤웅섭, 김영수 옮김) "로켓공학" 경문사
3. 한영민, 김종규, 이광진, 임병직, 서성현, 최환석 "실물형 재생냉각 액체로켓엔진 연소기 연소시험." 한국항공우주공학회, 2007년도 추계학술대회 논문집
4. 임병직, 김종규, 한영민, 김홍집, 강동혁, 최환석 "케로신 냉각 연소기의 냉각성능 고찰." 한국항공우주공학회, 2007년도 추계학술대회 논문집
5. 임병직, 이광진, 김성구, 김홍집, 한영민, "분사기형 배플을 장착한 액체로켓엔진 연소기의 연소안정성 평가시험." 한국항공우주공학회, 2006년도 추계학술대회 논문집
6. 이광진, 서성현, 한영민, 문일윤, 김종규, 임병직, 최환석 "실물형 액체로켓 연소기의 연소안정성 평가시험." 2006 항공우주기술, 한국항공우주연구원