

장시간 연소에 따른 단일 인젝터 분사기면 냉각 특성연구

전준수* · 신희철* · 이석진* · 정해승** · 김용욱*** · 고영성* · 김유****

Experimental Study on Regenerative Cooling Characteristics for Uni-element Injector Face during prolonged Combustion Time

Junsu Jeon* · Hunchchol Shin* · Seokjin Lee* · Haeseung Chung** · Youngwook Kim*** · Youngsung Ko* · Yoo Kim****

ABSTRACT

The purpose of this study is to propose a method for protecting injector face for prolonged combustion time and heat flux measurement technique at the injector face. To obtain basic design data and verify the performance of the proposed method, a regenerative cooling injector face was designed and manufactured for the hot firing test. Due to the safety reason, hot fire test were performed 3, 10, 30, 60 and 120 seconds time step. The discrepancy between analytical results adapting to combustion and nozzle and experimental results is believed due to the over estimation of the convection heat transfer calculation. For the injector face, flow velocity is almost negligible, therefore radiation is more important than convection. Consecutive hot firing test during 10, 30, 60 and 120 seconds combustion time shows good repeatability.

초 록

본 연구의 목적은 장시간 연소로 인한 인젝터 면의 열로부터 인젝터를 보호하고 열전달량을 측정하는 기술을 확립하는 것이다. 기존 설계 데이터베이스를 참고로 하여 물을 이용한 재생냉각 분사기를 설계/제작 하였으며, 기존 분사기와의 성능 검증을 위한 실험을 수행하였다. 안전을 위해서 연소실험은 3, 10, 30, 60초 120초순으로 단계적으로 시행하였다. 연소실 및 노즐에 적용되던 기존 식과 실험 결과와 차이는 대류 열전달량의 과도한 계산으로 인한 것으로 사료된다. 인젝터 면에서의 경우 유속은 거의 무시가 가능하므로 대류 열전달 보다 복사 열전달이 중요한 요인이 된다. 10, 30, 60, 120 초의 연소실험은 좋은 재현성을 보여주고 있다.

Key Words: Regenerative Cooling(재생 냉각), Heat Flux(열유속), Injector Face(분사기 면)

* 충남대학교 항공우주공학과

** 국방과학연구소

*** 한국항공우주연구원 추진체그룹

**** 충남대학교 기계공학과

연락처, E-mail: ysko5@cnu.ac.kr

1. 서 론

비교적 장시간에 걸친 내열재 연소/삭마 실험

시 연소실에서 과도하게 발생하는 열유속으로 인한 분사기면의 파괴가 예상되며 이에 대비하기 위하여 본 연구를 진행하였다. 스윙 동축형 인젝터의 경우, 추진제가 연소실 유입 전에 혼합이 이루어져 분사기면 가까운 곳에서 연소 화염이 생성된다. 연소실에서 발생한 열유속은 Fig. 1과 같이 분사기면 만이 아닌 인젝터 Post에 손상을 가져올 수 있다. 따라서 장시간 연소에 대두된 문제점인 분사기면 보호와 분사기면에 도달하는 열유속(heat flux) 측정 방법을 제시하고자 한다. 이를 위하여 물을 이용한 재생냉각 분사기를 설계·제작하고 단계적인 연소 실험을 통하여 재생냉각 단일분사기의 성능을 검증과 냉각 분사기면 설계 기초 자료를 확보하여 장시간 연소가 가능한 분사기 개발에 그 목적이 있다.

2. 장시간 연소를 위한 인젝터 개발

장시간 연소가 가능한 분사기를 만들기 위해서 Fig. 2의 절차대로 개발하였다. 단일 분사기 인젝터 형상은 모사하려는 연소 환경에 적합한 것을 선정하여야 하며 기존 연구를 참고하여 분사기면에 대한 타당한 열유속 계산을 통해 재생냉각 채널을 설계하였다. 선택된 인젝터 형상과 재생냉각 채널 설계를 바탕으로 최종 분사기를 설계/제작하였다. 연소 실험을 위해 주어진 실험 조건에 따른 연소실을 설계/제작 하였다. 또한 선정된 인젝터 형상 설계에 들어간 설계 예측치를 검증하기 위하여 물을 이용한 수류 실험을 수행하였다.

위와 같은 절차에 의해 개발된 재생냉각 분사기의 성능 검증과 내열 특성을 파악하고 장시간 연소 가능성을 확인하기 위하여 단계적으로 연소 시간을 늘려가면서 실제 연소 실험을 수행하였다. 연소 실험에서는 채널에 공급되는 냉각수 입·출구에서의 온도와 압력과 유량을 측정하고 이를 비교 고찰 하였다.



Fig. 1 Destruction of Coaxial Swirl Injector Face

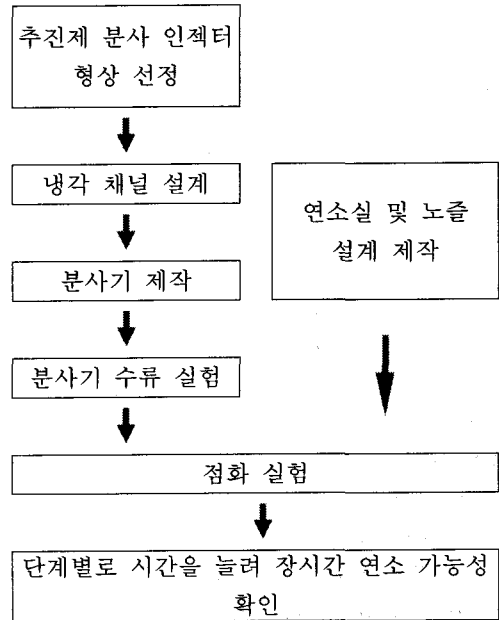


Fig. 2 Development procedure for Regenerative Cooling Uni-element Injector

3. 엔진 제작 및 연소 조건

설계 결과를 토대로 Table 1과 같은 실험용 액체로켓 엔진을 제작 하였다. 분사기는 산화제가 중심에서 분사되는 스윙 동축형 단일 분사기이며 분사기 면 냉각 채널은 Fig. 3과 같이 slit 형상으로 폭 3mm의 원형의 모습이다. 열전달이 이루어지는 면의 두께는 2mm로 제작하였다.

연소 조건은 Table 2와 같이 연소 압력 7 bar, O/F ratio 2.0, Total mass flow 300 g의 조건으로 연소 하였으며 냉각수의 유량은 초당 600 g을 공급하였다.

Table 1. Specifications of the model LRE

| | | |
|----------|----------------------|------------------|
| Material | | SUS-316 |
| Injector | Shape | swirl type |
| | Number | 1 ea |
| | coolant channel type | slit |
| Chamber | Shape | Cylindrical type |
| | Diameter | 81.18 mm |
| | Length | 193 mm |
| Nozzle | Shape | Conical type |
| | Diameter | 31 mm |
| | Convergent angle | 45° |
| | Divergent angle | 15° |

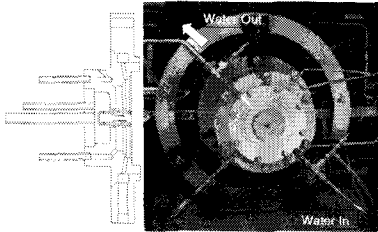


Fig. 3 Schematic of Cooling Channel in the Injector Face

Table 2. Fire conditions of LRE

| | |
|-----------------------------------|------------------------|
| Chamber pressure | 7bar |
| Fuel | kerosene |
| Oxidizer | liquid oxygen |
| Coolant | water |
| Propellant mass flow rate | 300 g/s |
| Mixture ratio | 2.0 |
| Pressure drop across the injector | 10 kgf/cm ² |

4. 결과 및 고찰

4.1 재생 냉각 시스템 설계를 위한 계산 방법

재생 냉각 시스템 설계를 위해 Fig. 4의 과정을 통해 분사기 면으로의 열전달량을 예측, 설계 하였다. 분사기 면 에서 발생한 열유속량과 냉각제가 흡수한 열유속량과의 평형조건에 의해 연소가스 쪽 벽면온도와 냉각제 쪽 벽면온도 냉각제의 온도 등을 계산하였다[1]. 이를 실험 결과와 비교해 본 결과 연소실 및 노즐에서 주로 이용되어온 상용식[2]과 많은 차이를 보임을 확인하였다. 이는 단일 동축 스윙 분사기의 경우 분사기 면 쪽으로 입자의 튀김 현상이 적고 화염이 분사 cone 안쪽으로 형성되며 면 쪽으로의 유속이 매우 작아 대류열전달 값이 연소실에 비해 상대적으로 작기 때문이라고 사료 되어 진다.

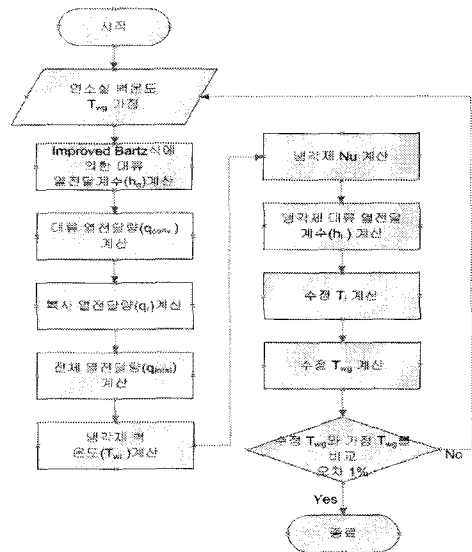


Fig. 4 Schematic of calculation

Table 3. Results of fire test

| 시험 | 연소실 | | | 냉각 채널 | | | |
|-----------|-----------|----------|-------------|---------|----------|--------------|----------|
| | O/F ratio | Pc[bara] | 추진제유량[kg/s] | Tin[°C] | ΔP[barg] | 냉각제 유량[kg/s] | Tout[°C] |
| 10s test | 1.97 | 5.71 | 0.294 | 24.22 | 3.68 | 0.609 | 27.15 |
| 30s test | 1.92 | 5.97 | 0.297 | 21.88 | 3.45 | 0.581 | 25.06 |
| 60s test | 1.99 | 5.91 | 0.296 | 25.73 | 3.88 | 0.623 | 28.79 |
| 120s test | 2.00 | 6.07 | 0.298 | 24.78 | 3.5 | 0.583 | 27.77 |

4.2 연소 시험 결과

모든 연소 실험은 동일한 조건 아래 단계적으로 수행 되었으며 데이터는 연소압이 일정하게 형성된 구간을 기준으로 분석하였다. 연소 시험 결과는 아래 Table 3과 같다. 냉각수 입·출구 온도차이는 연소 시간이 증가함에 Fig. 5와 같이 증가 하였으며 그 경향 또한 일치함을 보였다. 이에 따른 열유속도 Fig. 6과 같이 연소압이 정상화된 상태에서 누적 시간에 따라 증가하였다. 인젝터 면으로의 열전달은 입·출구 온도차이가 정상상태에 도달한 초기 구간으로 약 $1.4 MW/m^2$ 의 열유속이 인젝터 면으로 전달되었다. 인젝터 면은 총 누적시간 226초를 수행하면서 단계적으로 확인한 결과 Fig. 7과 같이 장시간 연소 후에도 손상을 입지 않았다.

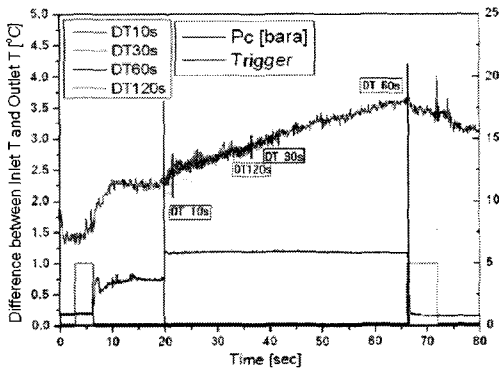


Fig. 5 Difference of Temperatures between Inlet T and Outlet T concerned with other test

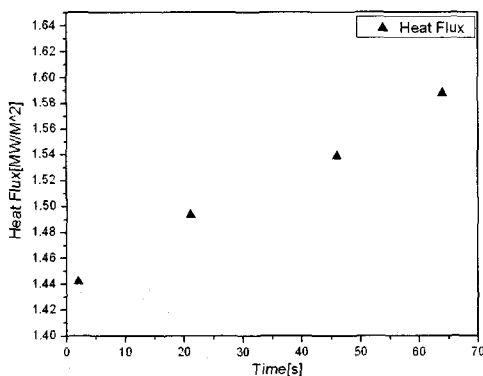


Fig. 6 Heat Flux along with steady state Time

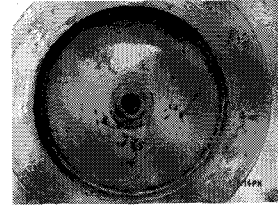


Fig. 7 Injector Face after 120s fire test

4. 결 론

본 연구에서는 스웰 동축형 단일 분사기 설계를 토대로 분사기면에 장시간 연소를 위한 재생냉각 채널을 설계하여 인젝터 면으로의 열전달을 실험적으로 규명하였다.

1. 장시간 연소 동안 열 부하로 인한 분사기 면의 손상을 방지하기 위해 본 실험실의 기존 설계 데이터베이스를 참고로 하여 물을 이용한 재생냉각 분사기를 설계/제작 완료하였으며, 기존 분사기와의 성능 검증에 대한 실험을 실시하여 동일한 성능을 가지고 있으며 이를 실험에 적용하는데 무리가 없음을 확인하였다.
2. 재생냉각 분사기를 이용하여 2번의 3초 연소 검증 실험을 수행하였다. 또한 장시간 연소를 위해 연소 실험을 10초, 30초, 60초, 120초 등 총 누적시간 226초를 수행하였다.
3. 이러한 일련의 실험을 통하여, 여러 가지 용도로 사용될 수 있는 장시간 연소가 가능한 단일 인젝터 연소기의 개발에 성공하였다.

참고문헌

1. 박희호, "액체로켓엔진의 재생냉각 시스템 설계에 관한 연구", 충남대학교 대학원 기계공학과 열·유체 박사학위논문, 2003년
2. Bartz. D.R., "A Simple Equation for Rapid Estimation of Rocket Nozzle Convective Heat Transfer Coefficient", Jet Propulsion, 1957
3. Васильев А.П., Кудрявцев В.М. Кузнецов В.А. и др. "Основы теории и расчета жидкостных двигателей." М.Высшая школа, 1967