

로켓엔진 헤드용 냉각 매니폴드의 해석 및 시험

박진수* · 최지선* · 유이상* · 고영성*† · 김선진** · 신동순***

Numerical Study and Firing Test of a Liquid Rocket Engine Head with a Coolant Manifold

Jinsoo Park* · Jiseon Choi* · Isang Yu* · Youngsung Ko*†
Sunjin Kim** · Dongsun Shin***

ABSTRACT

Numerical heat/flow analysis was performed on a liquid rocket engine head with the cooling water manifold to ensure the durability of a ground test facility for heat exchanger. Through these studies, the shapes of the injector and the flow path were determined and applied to the head of the engine under development. Firing tests were conducted to verify the designed coolant manifold and no thermal damage was found on the engine-head-face. Comparing the combustion test results with the numerical analysis, the outlet temperature of coolant showed a difference of about 15°C. This trend is reasonable considering existence of LOX manifold, thermal barrier coating, and the actual location of flame.

초 록

열교환기 지상시험 설비의 내구성 확보를 위해 필수적인 냉각수 매니폴드에 대해 열/유동해석을 진행했으며, 분사기와 유로의 배열 등의 형상을 결정해 개발 중인 엔진의 헤드에 적용하였다. 제작된 엔진 헤드에 대한 검증시험이 진행됐으며, 엔진의 분사기면에 도포된 열차단코팅(TBC) 등에서 열적 손상이 확인되지 않았다. 연소시험 결과와 수치해석을 비교하면 냉각수 출구온도가 15°C 정도의 차이를 보이지만 냉각수 매니폴드 상부에 위치하는 액체산소 매니폴드, 열 차폐코팅, 화염면의 위치 등을 감안하면 합당한 수준으로 판단된다.

Key Words: Liquid Rocket Engine(액체로켓엔진), Ground Test Facility(지상시험설비), Head Cooling(헤드 냉각), Coolant Manifold(냉각수 매니폴드)

1. 서 론

* 충남대학교 항공우주공학과

** 충남도립대학교 소방안전관리과

*** 한국항공우주연구원 발사체추진제어팀

† 교신저자, E-mail: ysko5@cnu.ac.kr

우주발사체의 로켓엔진 연소실의 온도는 약 3000 K 이상의 고온이며, 일반적으로 연소효율과

안정성 등의 장점을 바탕으로 채용되는 동축 스웰(coaxial swirl)형식의 분사기는 화염면이 분사기와 비교적 근접하여 형성된다. 따라서 엔진의 연소과정 중에 열에 의한 손상이 없이 최적의 성능을 유지하려면, 헤드 분사기면에 냉각이 필수적이다. 대부분의 비행용 로켓엔진은 매니폴드 내부에 흐르는 추진제를 이용해 냉각효과를 얻는다. 따라서 냉각이 충분히 이뤄지지 않으면 헤드의 분사기면에 열손상이 생겨 큰 사고로 이어질 가능성이 있다. 실제 엔진의 설계과정에서는 엔진의 연소과정에 의한 열량과 추진제 유량, 매니폴드 페이스 두께 등을 고려하여, 이런 위험을 회피하도록 설계한다. 비행용 엔진의 경우, 우주발사체로서 미션을 수행하는 시간동안 버틸 수 있도록 최적설계가 이뤄지는 것이다.

한편, 열교환기의 성능 평가를 위한 지상 시험용 엔진의 경우에는 비행용과는 다르게 장기간에 걸쳐 운용되고, 새로운 엔진이나 설비를 검증하는 경우가 많기 때문에 이러한 열적 손상에 대한 위험이 크다. 이런 이유로 지상시험용 엔진의 경우에는 냉각수 매니폴드를 연소실과 가장 가까운 면에 위치시켜 충분한 냉각이 이루어지도록 하여 내구성을 향상시킨다. 선행연구에서는 지상시험용 엔진의 열적 내구성을 향상시키기 위해 배치되는 냉각수 매니폴드에 대한 연구를 진행했다[1]. 4개의 분사기를 갖는 엔진 헤드의 냉각수 매니폴드로서 분사기나 유로의 배열에 따른 여러 형상에 대해 유동해석을 진행했다.

본 연구에서는 선행연구에서 선정된 냉각수 매니폴드 후보에 대한 열 해석을 진행하여, 최종형상을 선정했다. 또한 이를 적용한 지상시험용 엔진을 제작하여 검증을 위한 연소시험을 수행하고 결과를 분석한 내용을 담고 있다.

2. 수치해석

2.1 냉각수 매니폴드 형상

Fig. 1과 같이 검증용 연소기 헤드 내부에 냉각수 매니폴드가 위치하며, 연소실과 가장 가까운 면에 배치된다.

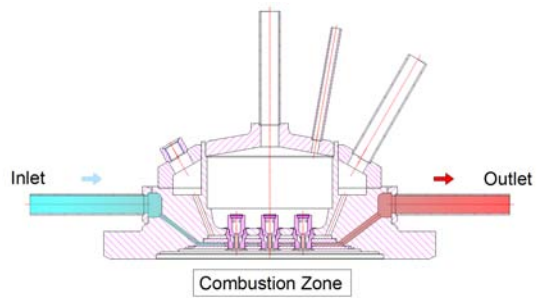


Fig. 1 Schematic of Coolant Manifold on Head

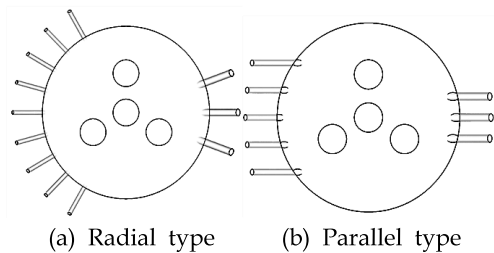


Fig. 2 3D model for Numerical Analysis

냉각수 매니폴드에서는 내부에서 유체의 끓음에 따른 냉각효과 손실과 국부적인 고온현상 등이 없어야하며, 입구온도와 출구온도만으로 냉각성능을 평가할 수 없는 것이 특징이라 할 수 있다. 이를 수치해석을 통해 효과적으로 분석할 수 있으며, 본 연구에서 다룰 해석모델은 Fig. 2와 같다. 각 해석모델은 공통적으로 중앙 분사기 후방에 다른 분사기가 놓이지 않으며, 이는 선행연구의 해석결과로서 결정된 사항이다[1]. 또한 입구유로의 개수가 출구유로 대비 많으며, 이는 유입된 유동이 화염면이 위치하는 중앙부로 유도될 수 있도록 구성한 결과이다.

Fig. 2(a)는 방사형 유로배치, 9개와 3개의 입출유로를 가지는 형상의 매니폴드 모델이다. 한편, Fig. 2(b)는 평행형 유로배치, 5개와 3개의 입출유로를 갖는다.

2.2 해석 조건

Fluent V13을 이용해 수치해석을 진행했으며, Fig. 2에 나타난 냉각수 매니폴드 유동영역 전체에 대해 해석했다.

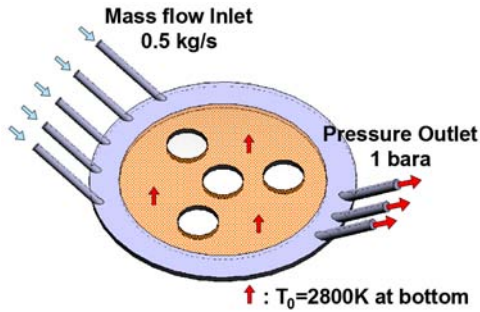


Fig. 3 Schematic of Boundary Conditions

공급유체는 비압축성의 물을 적용했으며, 입구 온도는 10℃로 설정했다. 압력기반의 해석자를 이용했으며, 난류 모델로는 비압축성의 내부유동과 보편적인 난류유동에 적합한 k-epsilon standard로 선정했다[2].

제약조건으로는 입구유로에 500 g/s의 mass flow inlet을 적용했으며, 출구유로에 pressure outlet으로 1 bar(a)을 적용했다.

또한 열 해석과 관련하여 적용재질인 SUS304의 물성을 적용했으며, 벽두께 2mm, 일정온도 조건으로 2800K의 연소실 온도를 연소실 면적에 대해 부여했다. Fig. 3은 구성한 제약조건을 나타낸 개략도이다. 주황색으로 표시된 면적이 연소실 면적이다. 실제 물리적 환경과 비교해 연소화염이 냉각수 매니폴드 페이스와 직접 접촉하지 않으므로 해석결과는 실제보다 약조건으로 부여됐으며, 이를 동일조건으로 해석 대상 모델에 부여해 해석을 진행했다.

수렴은 Residual과 입출구의 유량균형을 통해 판단했으며, 각 변수별 허용 Residual은 10⁻⁶미만으로 형성되도록 기준을 설정했다. 또한, 수치적 정밀도를 확인하기 위해 격자의 수를 증가시켜도 결과에 변화가 없음을 확인했다.

2.3 해석결과

선행연구에서와 동일하게 Fig. 4와 같은 속도 분포도를 얻었다. 헤드에 배치된 분사기 후단에 형성되는 재순환영역의 크기는 방사형에서 작게 형성됐지만, 매니폴드 측면의 재순환영역이 해소될 수 없는 구조였다. 실제 고온영역인 연소실의

크기를 고려하면 실제로 냉각이 요구되는 면적이 달라 방사형 배치 측면에 형성되는 재순환영역을 무시할 수 있다[1].

이에 대해 본 연구에서 진행한 열 해석결과는 Fig. 5와 같다. 선행연구에서 예상하였듯이, 평행형 배치에서 분사기 후방의 온도상승이 더 컸으며, 방사형 배치의 경우 측면 재순환영역에서 가장 온도가 높았다. 온도는 약 60℃미만인 수준으로 유지됐다. 출구온도는 약 30℃ 수준으로 비슷한 수준으로 유지됐다. 해석결과를 바탕으로 엔진의 냉각수 매니폴드를 Fig. 2(a)의 방사형 배치로 최종선정 및 제작했다.

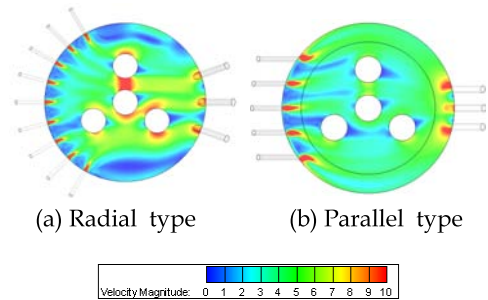


Fig. 4 Velocity Contour [m/s]

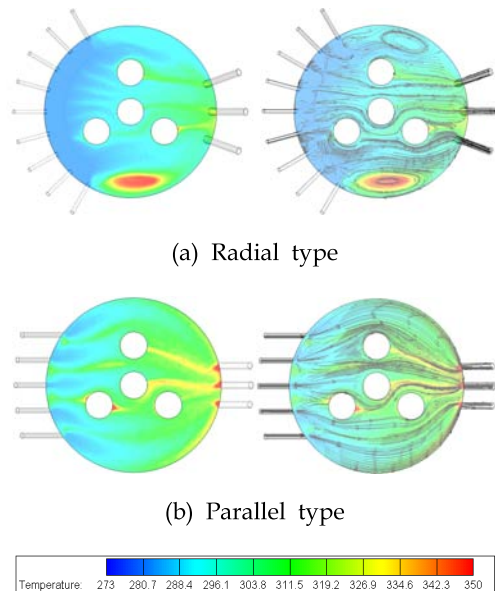


Fig. 5 Temperature Contour[K] and Streamline

3. 연소 시험

3.1 시험 설비 구성

수치해석의 결과로 설계된 냉각수 매니폴드의 검증에 위해 개발엔진의 연소시험이 진행됐다. 냉각매니폴드로 공급되는 냉각수와 가압설비, 그리고 유량조절장치의 시험설비구성은 Fig. 7과 같다. 냉각수의 유량조절을 위해 유량계수가 검증된 오리피스와 압력센서를 이용했다. Fig. 6은 검증시험을 위한 스탠드 구성모습이다.

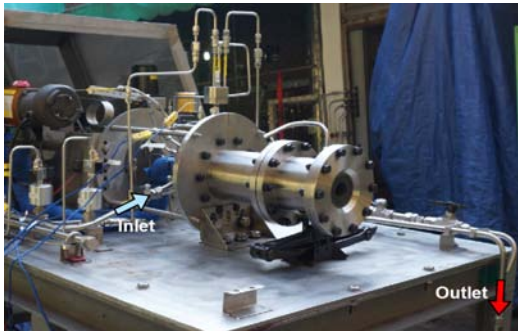


Fig. 6 Test Stand to Validate Radial type Coolant Manifold

3.2 연소시험 결과

연소시험은 설계유량에서 약 5% 미만의 오차 수준에서 공급됐으며, 결과적으로 설계 O/F인 1.166을 다소 벗어났다. 해당 O/F에서의 이론온도는 수치해석과 설계의 기준인 2800 K에서 4%

미만의 차이로 검증시험은 양호하게 수행됐다. Table 1은 3회에 걸쳐 진행된 연소시험의 결과이며, 연소압력, O/F, 이론 연소온도를 나타냈다. 연소실 온도 약 2800 K의 접촉식 계측은 불가능하므로 시험이 수행된 O/F에서 CEA로 계산된 이론온도를 참고했다. Fig. 8은 Test #3에서의 헤드 냉각수의 온도변화그래프이다. 약 11°C의 온도로 냉각수가 공급됐으며, 최고온도 약 15°C에서 정상상태로 유지됐다. 냉각수의 온도는 모든 시험에 걸쳐 이와 같은 수준으로 형성됐다. 또한, 냉각수 매니폴드의 압력은 시험시간동안 안정된 압력으로 유지됐다. Fig. 9는 시험 전/후의 엔진 헤드페이스의 사진이다. 화염에 의해 손상되거나 흰색으로 도포된 Thermal Barrier Coating의 변색 등이 관찰되지 않았다.

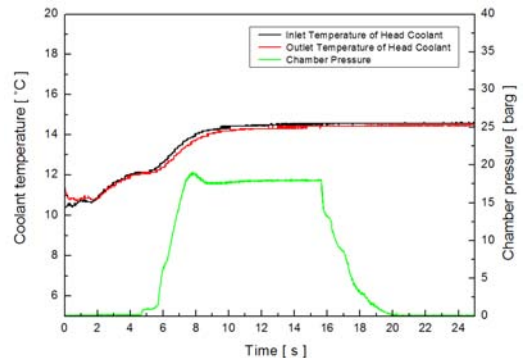


Fig. 8 Temperature of Head Coolant on 5s Combustion Test

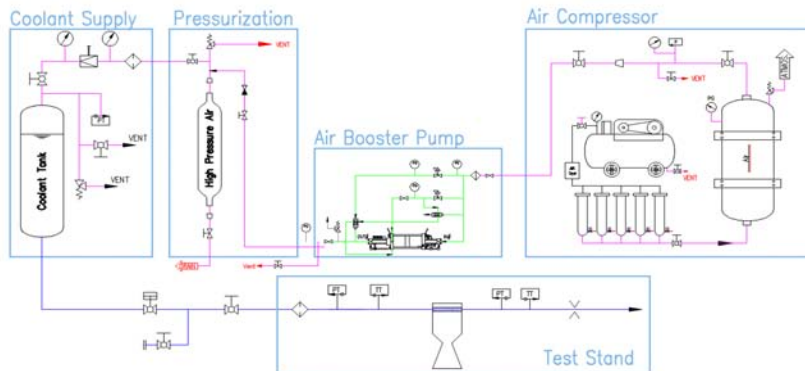


Fig. 7 Schematic Diagram of Test Apparatus for Coolant Supply System

Table 1 Results of Validation Firing Test

Test No.	#1	#2	#3
Propellant	95% Ethanol / LOx		
$P_{chamber}$	20 bar(a)		
O/F	1.196	1.211	1.235
T_{theory}	2855 K	2882 K	2922 K



(a) Before test (b) After test

Fig. 9 Engine head face (View at nozzle side)

4. 결 론

네 개의 분사기를 갖는 엔진 헤드의 냉각수 매니폴드의 냉각성능을 개선하기 위해 여러 형상에 대한 연구가 진행됐다. 열/유동해석을 통해 적합한 분사기와 유로의 배열을 결정했으며, 이를 설계 및 제작했다. 연소시험을 통해 제작품에

대한 검증이 진행됐으며, 수치해석의 결과와 비교했다. 수치해석에서 연소시험의 결과보다 냉각수 출구 온도가 약 15°C 정도 높았다. 이는 냉각수 매니폴드 상부에 위치하는 액체산소 매니폴드에 의한 냉각효과, 열 차폐코팅, 실제 화염면의 위치 등을 고려하면 수치해석 대비 실험에서의 온도가 낮은 점은 감안할 만한 수준이다. 결과적으로 본 연구를 통해 해당 냉각 유량에서 효율적인 냉각수 매니폴드 형상을 분석하여 적용했고, 개발 중인 엔진의 단독연소시험을 통해 이를 검증하였다.

후 기

본 연구는 한국형발사체개발사업의 지원을 받아서 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 박진수, 유이상, 최지선, 고영성, 한상엽, “로켓엔진의 분사기 및 유로의 배열에 따른 냉각수 매니폴드에 대한 수치적 연구”, 한국추진공학회 추계학술대회논문집, pp.385-390, 2016.12
2. H. K. Versteeg, An Introduction to Computational Fluid Dynamics, 2nd ed., edition Pearson, 2015