

고공시험설비에서 로켓엔진의 지상시험 플룸 거동 해석

김성룡* · 이승재* · 한영민*

An Analysis on Plume Behaviour of Rocket Engine with Ground Condition at High Altitude Engine Test Facility

Seong-Lyong Kim* · SeungJae Lee* · YoungMin Han*

ABSTRACT

We analyzed the rocket engine flow to check whether the possibility of the ground test and the equipment safety problems in the high altitude engine test facility. The test condition is that the vacuum chamber is open and the coolant water is injected into the supersonic diffuser. The analysis uses two-dimensional axisymmetry with a mixture of plume, air, and cooling water. As a result, the ground test was possible up to the cooling water flow rate of 200 kg/sec. However, due to the back flow of the initial plume, the vacuum chamber is exposed to high temperature, and at the same time, the inside of the vacuum chamber is contaminated due to the reverse flow of the cooling water. Therefore, sufficient insulation measures and work for pollution avoidance should be preceded.

초 록

고공엔진시험설비에서 지상 시험 조건의 시험 가능 여부와 설비 안전 문제를 점검하고자 로켓 엔진 유동을 해석하였다. 진공 챔버를 개방한 상태에서 냉각수를 초음속 디퓨저로 분사하면서 엔진이 작동하는 상황이며, 2차원 축대칭과 플룸, 공기, 냉각수의 3원 혼합물로 가정하였다. 해석 결과 냉각수 유량 200 kg/sec까지 지상 조건 시험이 가능하였다. 그러나 시동 초기 플룸의 역류로 인해 진공 챔버가 고온에 노출되고, 동시에 냉각수 역류로 인해 진공 챔버 내부가 오염되었다. 따라서 충분한 단열 대책과 오염 회피를 위한 작업이 선행되어야 한다.

Key Words: KSLV-II(한국형발사체), Altitude Engine Test Facility(고공엔진시험설비), Rocket Plume (로켓플룸), Ground Test(지상시험)

1. 서 론

나로우주센터에는 한국형발사체 엔진시험을 위해 지상시험설비와 고공시험설비가 구축되었다. 고공시험설비는 고공환경에서 엔진 작동을

* 한국항공우주연구원 엔진시험평가팀

† 교신저자, E-mail: SaintL@kari.re.kr

위해 진공 챔버와 초음속 디퓨저로 구성되었으며 설비인증이 완료되었다[1,2]. 그러나 엔진 시험의 원활한 수행을 위해 고공시험설비에서 지상 조건으로 시험을 할 필요가 있다. 본 연구는 이러한 시험의 타당성을 사전에 검증하고자 수행하였다.

해석 과정에서 냉각수 유무에 따른 플룸 전개 과정, 냉각수 분사 설정에 따른 차이, 그리고 진공 챔버 내의 플룸 역류 현상의 영향이 파악되어야 한다. 특히 엔진 주위에는 제어 및 계측 라인이 복잡하게 설치되어 있어 고온의 플룸 역류는 시험 진행에 치명적인 위험을 초래한다.

2. 해석 모델링

2.1 형상 모델링

지상 조건 구현을 위해 진공 챔버는 대기로 개방하고 초음속 디퓨저 입구에서 냉각수를 분사하여 고온으로부터 보호한다. 진공 챔버의 개방은 한 방향이므로 축대칭이 아니지만 진공 챔버가 실린더 형태로 충분히 크고 외부 공기 유입 과정에서 다소 차이가 있을 뿐이므로 플룸 해석에는 큰 차이가 없으므로 2차원 축대칭으로 가정하였다. 진공 챔버와 초음속 디퓨저 후방은 원방경계조건을 위해 충분히 확장하였다. 해석 대상 엔진은 한국형발사체 75톤 엔진이다.

2.2 해석방법

로켓 플룸은 화학 반응 유동으로 연소기, 확장 노즐, 대기 혼합 과정에서 화학반응이 동반된다. 모든 과정을 고려하는 대신 진공 챔버 내의 플룸 역류와 냉각수 분사 과정에 초점을 두어 플룸, 공기와 냉각수의 3원 화학종만 고려하였다.

냉각수 분사는 많이 적용되는 이산 상 모델 (Discrete Phase Model)로 가정하였으며[4], 분사 속도와 유량 등은 여러 케이스로 나누어 비교하였다. 해석을 위한 격자는 노즐 벽면에 충분히 밀집시켰고 Fluent V13[3]에 SST k- ω 난류모델을 적용하였다.

초기 엔진 시동은 짧은 시간 동안 압력과 온

도의 급격한 변화가 수반되나, 간단한 해석을 위해 연소실과 노즐을 분리하여 연소기를 정상상태의 연소 환경으로 가정하고 대기 상태의 노즐로 분출한다고 가정하였다. 이 경우 실제보다 초기 압력 상승이 급격하고 과격한 플룸 전개가 예상되지만 본 해석의 결과를 최악의 케이스로 상정하면 연구 목적에 부합한다고 할 수 있다.

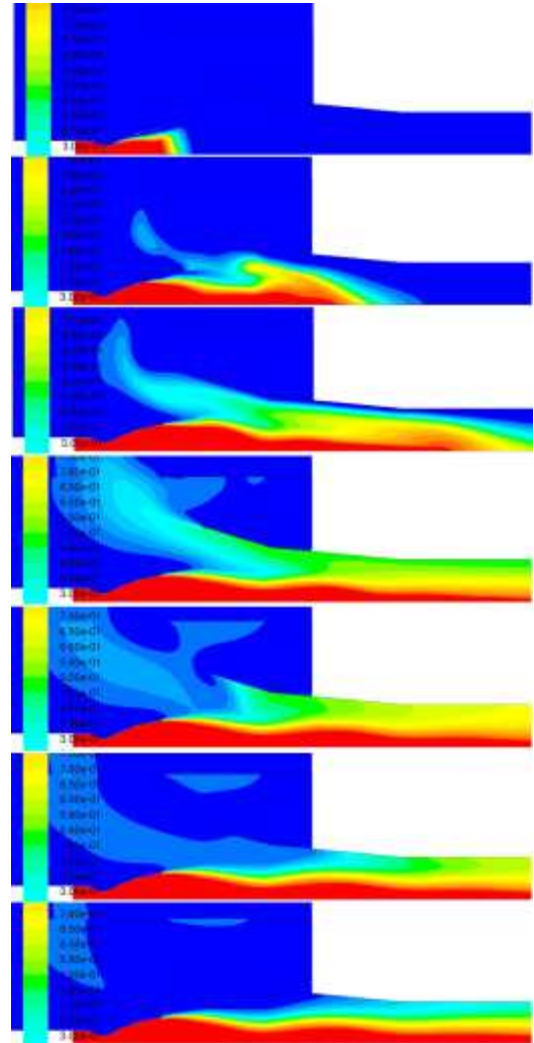


Fig. 1 Transient behaviour of plume mass fraction at engine start without coolant injection.

3. 수치 해석 결과

3.1 냉각수 분사 없는 시험 해석

엔진의 초기 시동 시에는 약간의 플룸 팽창과정에서 압력파가 발생하지만 지상시험설비의 경우 플룸이나 냉각수의 역류는 발생하지 않고 화염 유도로를 잘 빠져나간다[4]. 그러나 Fig. 1와 같이 진공 챔버와 초음속 디퓨저가 있으면 플룸이 디퓨저를 쉽게 통과하지 못하고 진공 챔버로 역류한다. 이는 지상시험설비의 넓은 화염유도로와 달리 디퓨저의 직경이 작고 진공 챔버의 개방상태가 충분치 않아 발생한다. 역류된 플룸은 고온 가스이기 때문에 Fig. 2에서처럼 챔버 내부는 잠시 동안이지만 고온에 노출된다. 시동 0.1초 후부터 플룸은 정상적으로 빠져나가고 챔버 내의 플룸도 같이 빠져나간다. 따라서 고온의 플룸이 진공 챔버 내에 머무는 것은 1초 미만이라 추정할 수 있다.

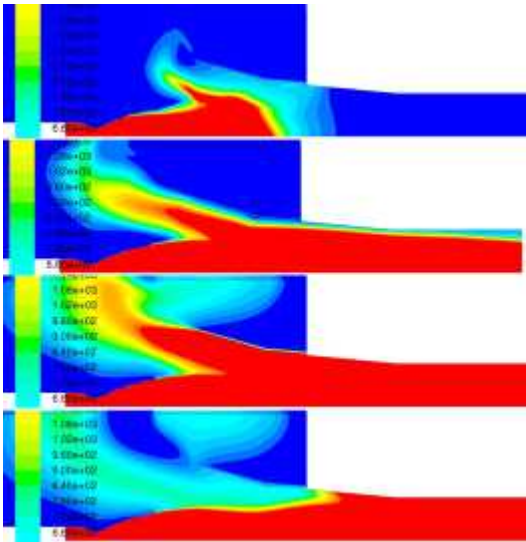


Fig. 2 Temperature variation at engine start without coolant injection. The contour field varies from 300 K to 1500 K.

3.2 냉각수 분사를 동반한 시험 해석

냉각수가 작동한 상태에서 엔진 연소가 진행될 경우 플룸, 수증기, 냉각수의 전개 과정을 Fig. 3에서 5까지 나타냈다. 각 그림에서 변화되는 모습은 동일한 시간에서 나타냈다. 냉각수는 Fig. 4와 같이 초음속 디퓨저 입구에서 분사하는

것으로 가정하였으며 초기 속도 10 m/sec에 100 kg/sec이라 하였다.

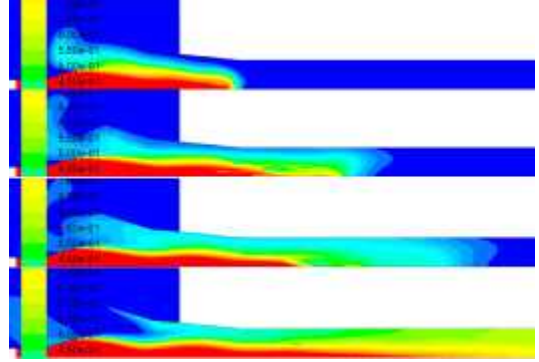


Fig. 3 Transient behaviour of plume mass fraction at engine start with coolant injection.

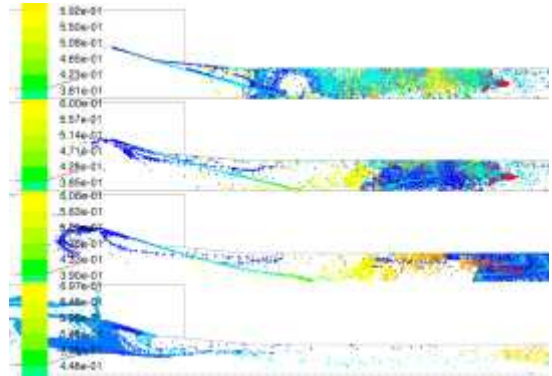


Fig. 4 Water droplet field at engine start.

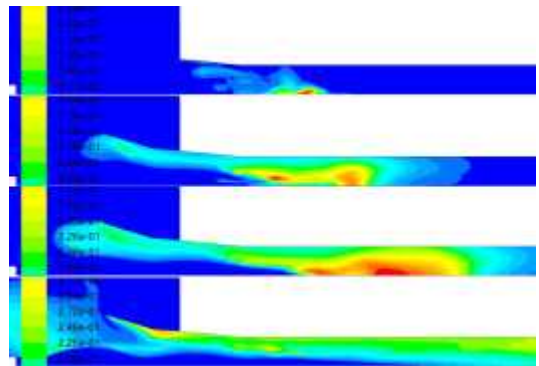


Fig. 5 Transient behaviour of plume mass fraction at engine start with coolant injection.

Fig. 3의 플룸의 전개과정은 냉각수 없는 경우와 비슷하지만 플룸 역류는 냉각수 분사가 없는 경우보다는 적다. 대신 Fig. 4와 5에서 보듯이 냉각수 역류가 발생한다. 이 경우에도 진공 챔버 내의 플룸이나 수증기는 시간이 지나며 초음속 디퓨저로 빠져나간다. 역류된 냉각수는 엔진 가까이 접근하여 계측 및 제어 라인에 문제를 야기할 수도 있다.

4. 결론

고공엔진시험설비에서 지상 시험 조건의 시험 가능 여부와 설비 안전 문제를 점검하고자 로켓 엔진 유동을 해석하였다. 해석 결과 냉각수 유량 200 kg/sec까지 지상 조건 시험이 가능하나, 지상 시험설비와 달리 플룸과 냉각수의 역류가 강하게 발생했다. 플룸의 역류로 인해 진공 챔버가 고온에 노출되고, 동시에 냉각수 역류로 인해 진공 챔버 내부가 오염되었다. 따라서 충분한 단열 대책과 오염 회피를 위한 작업이 선행되어야 한

다.

참고 문헌

1. Kim, S.H. et al., "Development Test of 75 tonf Engine System for KSLV-II," *Proceedings of the KSPE Fall Conference, 2016*
2. Kim, S.H, Chung, Y.G. and Han, Y.M., "Development of Liquid Rocket Engine Test Facility," *Proceeding of the KSPE Spring Conference, Gumi, Republic of Korea, 2012.*
3. Ansys Fluent V13.0 Manual, PA, U.S.A. 2010.
4. Kim, S.L., Kim, S.H., and Han, Y.M., "Numerical Study on the CO and NO of Rocket Plume as the type of water injection in the Flame Guiding Duct," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 19, No. 3, pp. 39-46, 2015.