

액체로켓엔진 시스템 정현파 진동 구조해석

정용현* · 이은석** · 박순영** · 양창환*** · 정진택***

Structural Analysis of Sinusoidal Vibration Load for Liquid Rocket Engine System

Yong-hyun Chung* · Eun-seok Lee** · Soon-young Park** ·
Chang-hwan Yang*** · Jin-taeg Jung***

ABSTRACT

The structural analysis of liquid rocket engine was performed in the case of sinusoidal vibration load to verify structural safety. The finite element model is composed with main liquid rocket engine components, combustion chamber, turbopump, gas-generator, pyro-starter, main pipes, main valve, heat-exchanger, gimbal-mount and brackets. Natural vibration mode analysis and structural analysis for sinusoidal vibration load were performed.

The natural mode frequency of liquid rocket engine is twice than that of launch vehicle. In the case of stress result of sinusoidal vibration load, the part of maximum stress has 1.4 margin, so the engine structure is safe for sinusoidal vibration load.

Key Words: Liquid Rocket Engine, Structural analysis, Natural mode frequency, Sinusoidal vibration, Combustion chamber, Turbopump

1. 서 론

고성능 액체로켓엔진 개발은 향후 국내에서 수행할 중요한 연구 과제중의 하나이다. 국내에서는 현재 터보펌프(turbopump)를 사용하는 재생냉각형 액체로켓엔진(regenerative liquid rocket engine)을 개발하고 있다. 본 연구에서는 엔진의 진동해석에서 고유모드 해석과 정현파 진동하중에 대한 구조진동 해석을 수행하였

다. 일반적으로 저주파 진동모드의 경우 고주파 진동모드 보다 상대적으로 거동이 크기 때문에 구조물에 미치는 영향도 크게 된다. 따라서 발사체와 엔진 시스템 간에도 공진에 의한 손상을 고려하여 발사체의 고유진동수에 따른 엔진시스템의 최소진동수를 고려하여야 한다. 이에 따라 엔진의 고유진동 모드 해석을 수행하였다.

엔진의 정현파 진동 하중은 엔진의 지상 이송 중 발생하는 진동하중이나 포고(pogo)현상, 플러터 현상, 기타 엔진 작동 및 비행 중 발생하는 진동 하중 등을 고려하여 주로 100Hz 이내의 주파수 범위 내의 하중이다. 따라서 이와 같은

* 정회원, 한국항공우주연구원

** 비회원, 한국항공우주연구원

*** 비회원, (주)대한항공 기술연구원
연락처, E-mail: cyh01@kari.re.kr

정현파 하중에 대하여 진동해석을 수행하였다.

2. 본론

2.1 엔진 유한요소 모델 구성

Fastrac 60k엔진 [1], [2]의 경우 엔진의 고유모드 해석과 진동하중에 대한 구조해석을 위해 엔진의 주요 구성품으로 연소기, 터보펌프, 가스발생기, 메인 배관류, 브라켓류, 김발마운트 등에 대해 유한요소 모델링을 하였다. 연소기는 쉘요소, 배관류는 빔요소, 터보펌프, 가스발생기는 포인트 요소, 기타 브라켓류는 솔리드 요소를 이용하여 유한요소 모델링을 구성하였다. 유한요소 모델링 및 전처리, 후처리는 MSC Patran 소프트웨어를 이용하였고 해석을 위해서는 MSC NASTRAN을 이용하였다.

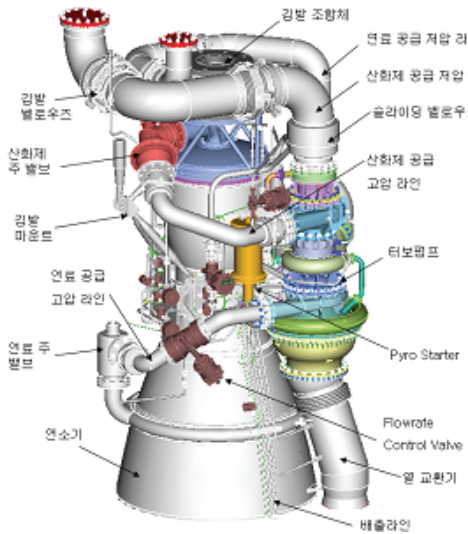


Fig. 1 Engine system

본 연구에서는 Fastrac 60k엔진[1] 경우를 참고로 하여 Fig. 1과 같은 엔진 모델에서 구조해석을 위한 엔진 유한요소 모델로서 연소기, 터보펌프, 김발마운트, 김발지지대, 터보펌프 지지대, 배관류, 가스발생기, 파이로스타터, 메인 밸브 등으로 구성하였다. 유한요소모델은 Fig.

2와 같이 연소기는 연소기의 헤드부와 챔버부로 나누어지고 헤드부는 하중전달이 직접적으로 이루어지는 부분으로 내부의 복잡한 형상을 고려하여 3차원 솔리드 요소를 사용하였고 챔버부는 내벽(inner jacket)과 외벽(outer jacket)으로 구성이 된다. 따라서 내벽과 외벽 각각 따로 쉘 요소로 구성하고 노드점을 공유하도록 유한요소 모델링을 구성하였다. 터보펌프는 해석에 영향을 미치는 질량은 포인트 요소로 모델링하고 전체 외형은 2차원 쉘요소로 구성하였다. 김발마운트, 김발지지대, 터보펌프 지지대 는 주요 하중 경로 상의 구성품으로 3차원 솔리드 요소를 사용하여 구성하였다. 메인밸브는 3차원 솔리드 요소, 메인 배관은 쉘요소를 사용하였다. 가스발생기, 파이로스타터는 무게 중심에 질량이 부가된 포인트 요소로 구성하였고, 터보펌프의 가스발생기 입구배관과 파이로스타터 입구배관은 빔요소로, 가스발생기와 파이로스타터 지지대는 3차원 솔리드요소로 구성하였다. 포인트 요소로 구성된 가스발생기와 파이로스타터는 강성요소(rigid element)를 이용하여 각각의 연결점에 구속하였다. 본 연구에서 엔진에 부가되는 하중은 엔진의 진동 시험 시 부가되는 하중으로 이와 같은 상황을 고려하기 위해 Fig. 3과 같이 진동시험기 베드(test bed)는 Large mass로 묘사하였고, 이는 포인트 요소에 Large mass를 부가하는 방법으로 구성하였다.

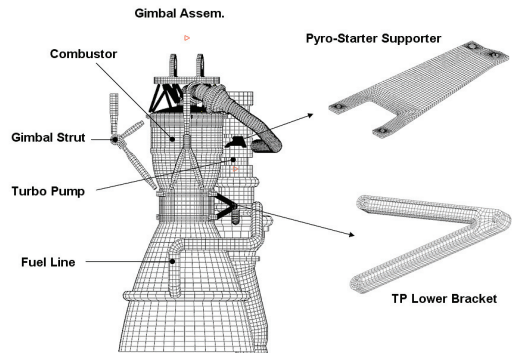


Fig. 2 Engine system finite element model 1

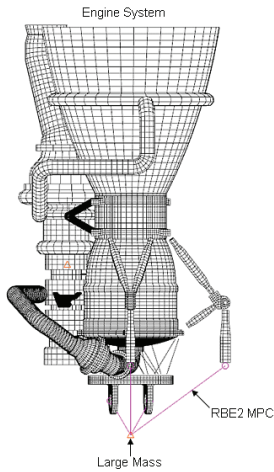


Fig. 3 Engine system finite element model 2

22 고유모드 해석

엔진시스템의 동적 특성을 파악하는 가장 기초 단계인 고유모드 해석을 수행하였다.

Fig. 4, 5와 같이 첫 번째 모드는 엔진의 수평방향 모드로 고유주파수는 21.5Hz로 나타났고 두 번째 모드는 엔진 노즐모드로 51.8Hz로 나타났다. 일반적으로 발사체의 첫 번째 모드는 약 10Hz 정도임으로 발사체와의 공진주파수는 2배 이상 차이가 있음으로 엔진의 고유주파수 측면에서는 안정적이라고 판단된다.



Fig. 4 1st Lateral mode

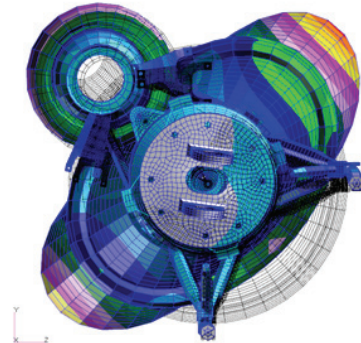
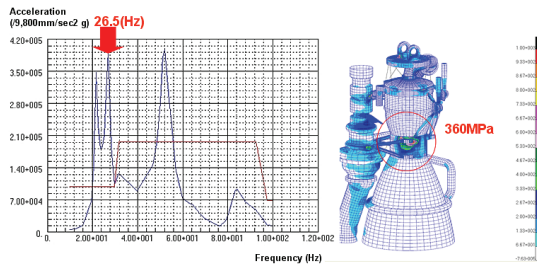


Fig. 5 2nd nozzle mode

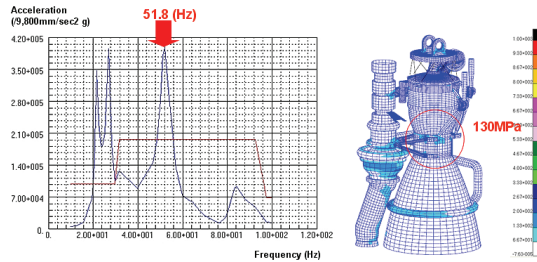
23 정현파 진동 해석

엔진에 가해지는 정현파 진동하중에 의한 엔진시스템의 구조 안정성을 확인하기 위하여 수행되는 정현파 해석은 Large Mass Method를 이용하여 해석모형을 구성하게 되는데 이것은 진동시험에서 시험기 베드(test bed)에 상응하는 모형을 Large Mass로 모사하여 시험기 베드(test bed)에 가해지는 가속도 형태의 진동하중을 Large Mass에 입력하게 된다. 가해지는 하중 조건은 현재 엔진의 초기개발단계임으로 타엔진의 하중조건을 참고로 하였다. 본 해석을 위해 먼저 주파수별 진동응답 해석(Frequency Response Analysis)을 수행하였다. 그리고 계산 결과는 주파수 별로 가속도의 응답결과를 계산하여 가장 높게 응답특성을 보이는 특정 주파수에서 응력을 계산하여 엔진 시스템의 구조 안정성을 확인하였다.

엔진에 가해지는 정현파 진동은 엔진의 수평방향의 응력 결과가 수직방향에 비해 더 높게 나왔다. Fig. 6은 수평방향의 폰미세스(von-mises) 응력 결과이다. 공진주파수 부근인 약 26Hz와 50Hz 부근에서 주파수 응답 결과가 크게 나왔고 이는 해당하는 응력을 각각 계산하였다. 응력이 가장 높게 나온 부위가 연소기의 마운트케이스 부위로 360MPa 정도이다. 해당되는 재료의 항복응력이 약 500MPa임으로 구조적으로 안정적이라고 판단된다.



(a) 1차 모드



(b) 2차 모드

Fig. 6 Stress result of lateral sinusoidal vibration

3. 결론

액체로켓엔진의 정현파 진동하중에 대한 구조 안정성을 확인하기 위하여 구조 해석을 수행하였다. 해석을 위해 엔진의 주요 구성품위주로 유한요소모델을 구성하여 고유모드 해석과 정현파 진동에 대한 구조해석을 수행하였다.

엔진의 고유진동수는 발사체의 고유진동수와 2배 이상의 차이를 보였고 정현파 진동하중에 대한 응력해석 결과는 가장 크게 응력이 나타나는 부위가 해당 재료의 항복응력에 비해 1.4의 마진을 갖는 것으로 나타나 정현파 진동하중에 대해 구조적으로 안정적인 것으로 판단된다.

참고문헌

- [1] Eric R. Christensen and Katherine Mims, STRUCTURAL DYNAMIC ANALYSIS OF THE X-34 ROCKET ENGINE, AIAA-98-2012
- [2] FASTRAC 60K ENGINE OPERATIONS AND MAINTENANCE MANUAL VOL. V: SERVICING PROCEDURES, MISSIONOPERATIONS LABORATORY. 1999