액체로켓엔진 산화제 배관 시스템 전산유동해석

문인상[†], 문일윤, 이수용
한국항공우주연구원, 발사체미래기술연구실

Computational Analysis of an LOx Supply Line System of an Liquid Rocket Engine

Insang Moon[†], Il Yoon Moon, and Soo Yong Lee
Korea Aerospace Research Institute, Launch Vehicle Future R&D Division, Daejeon 305-333, Korea
E-mail: insang@kari.re.kr

(Received November 9, 2009; Accepted November 25, 2009)

요 약

액체로켓엔진의 구성품 중 하나인 산화제 라인 시스템의 3차원 모델과 유동해석을 수행하였다. 전체 시스템의 유동해석에 앞서 각 구성품들의 개별적인 유동해석과 단순화된 모델을 통해 최적의 위치를 결정하였다. 그 결과 가스발생기 라인의 입구는 압력보상이 필요하며 오리피스 위치의 위치에 따라 출구 유동의 형태가 달라지는 것을 확인할 수 있었다. 전체적으로 해석된 라인 시스템은 주어진 요구조건을 만족하는 것으로 나타났으며 이는 실제 제품 제작과 시험을 통해 확인할 예정이다.

Abstract

A computational fluid analysis was performed on an LOx line system of a liquid rocket engine. The model was created with 3D CAD and imbedded to the 3D CFD program. Before the full scale analysis on the system was carried out, each components with simplified models was analyzed to save time and cost. As a result, the inlet pressure of the gas generator should be compensated with a certain device unless the inlet pressure of the line system is sufficiently high. The flow pattern of the exit of the system was dependant upon the location of the orifice as well as the size. As a whole the line system analyzed met the requirements, and will be tested and confirmed after being manufactured.

Keywords: liquid rocket engine, kerosene, LOx, liquid oxygen line, gas generator, bellows, orifice, misalignment

1. 서 론

터보펌프 방식 액체로켓엔진 중 가스발생기 타입 엔진에 사용되는 산화제 공급 라인은 산화제 펌프로부터 연소기와 가스발생기까지 액체 산소가 흐르는 구간으로 정의되며 벨로우즈, 각종 조인트,

[†]corresponding author

그림 1. 액체로켓엔진과 산화제 라인 시스템의 전체적인 구조.

분기구, 오리피스 등이 결합되어있는 일종의 작은 시스템이다. 이 작은 시스템 안에는 작동압력, 허용압력손실, 유량, 수직현상 등의 특수상황을 고려한 최대 예상 작동압력(MEOP, Max. Expected Operating Pressure)(Douglas et al. 1976, Fitch & Hong 2000) 등이 고려되어야 한다. 또한 배관의 라우팅이 다른 부품과 간섭이 없어야하며 조립성, 배치의 효율성 등 역시 고려되어야 한다(정용현 외 2006).

따라서 산화제 라인을 개발하기 위해서는 엔진시스템 차원에서의 연구와 검토를 거쳐(정용현과 이은석 2007) 전체 라인의 요구조건에 따라서 각종 부품들을 적절한 위치에 배분하여 터보펌프로부터 연소기/가스발생기까지의 라우팅을 정한다. 각 부품들은 배열 순서와 위치에 따라 그 규격이 차이가 나기 때문에 실험적 혹은 전산해석을 통해 결정되어야 한다.

이 연구는 산화제 라인 시스템에 소요되는 각종 구성품들의 특성 해석과 압력강하 예측, 유동의 균일성 등을 구현할 수 있도록 각 구성품들의 배열을 결정하여, 궁극적으로 엔진시스템이 요구하는 각종 규격을 만족할 수 있도록 하는데 그 목적이 있다. 이를 위해 먼저 오리피스 위치, 가스발생기 라인으로의 분기점 및 분기점 형상 등의 모델을 정의하고 정의된 모델을 사용해 수치해석을 수행하는 케이스 스터디를 통해 각각의 경우에 알맞은 형상과 위치를 도출하였다. 그리고 도출된 형상과 위치에 따라 라인을 결합한 뒤 유동해석을 실시하여 전체 시스템의 유동특성을 살펴보았다.

2. 액체로켓엔진용 산화제 라인 시스템의 특징

액체로켓엔진에 사용되는 산화제 라인은 일반 배관보다 설계, 제작에서 많은 어려움이 있다. 먼저 기본적으로 액체로켓엔진이 요구하는 고압, 고유량, 낮은 압력 손실 등의 매우 높은 요구사항을 만족시켜야하며 무게 또한 매우 가벼워야한다. 그리고 액체산소가 흐르는 약 93K의 극저온 환경에서 작동을 하므로 열수축을 고려하여 설계가 이루어져야 하며 엔진 조립 시 제작 오차에 따른 정렬 오차(misalignment)을 보상해주는 기구가 라인 시스템에 장착되어 있어야한다.

그림 2. 산화제 라인 시스템 유동해석을 위한 격자 생성.

개략적인 전제구조는 그림 1과 같다. 가장 왼쪽의 그림은 액체로켓엔진의 3차원 모델을 단순화 시킨 것으로 이 가운데 산화제 배관 부분만을 확대하면 가운데 그림과 같다. 그리고 수치해석을 위해 단순화 시킨 모델이 가장 오른쪽의 그림이다. 그림 1에 명칭이 표시되지 않은 나머지 배관은 Inconel 718을 사용하여 무게와 극저온 환경에 대비하였다.

3. 수치해석 방법 및 격자 생성

3차원 캐드 프로그램인 Pro-E¹⁾를 활용하여 각 구성품을 모델링 하고 그림 1과 같은 시스템을 구성하였다. 그리고 완성된 결과를 Fluent²⁾로 임베딩하여 해석작업을 실시하였다. 해석 절차로서 먼저 각 주요 구성품을 단독으로 해석하고 그 결과를 토대로 형상을 재정의 한 뒤 전체 시스템을 해석하여 그 특성을 파악하고 설계 요구조건에 부합하는지를 판단하였다. 해석시 난류모델은 Hirsch(1988)에 잘 나타나 있듯이 매우 다양한 모델이 연구되고 있으나 여기서는 배관이나 밸브에 통상적으로 많이 사용하는 $k-\omega$ SST모델을 사용하였다.

그림 2는 산화제 라인 시스템의 해석을 위해 생성된 격자의 모양을 보여준다. 기본적으로 테트라 프리즘 격자를 사용하여 약 440만 개의 격자를 생성하였고 벽면 근처에서는 보다 정확한 계산을 위해 프리즘 레이어를 사용하였다. 특히 벨로우즈의 주름 형상을 반영하기 위하여 노력하였으며 벨로우즈 내부의 고정링이 차지하고 있는 용적을 유동에서 제외함으로 보다 정확한 모사가 가능하도록 하였다. 이 밖에 오리피스, 태핑챔버, 리듀서 등은 시스템과 유사한 정확도를 갖도록 격자를 생성하였다.

¹⁾<http://en.wikipedia.org/wiki/Pro/ENGINEER>

²⁾<http://www.anst.co.kr/>

그림 3. 태핑챔버 형상. (a) 모델 1 (b) 모델 2 (c) 모델 3

그림 4. 가스발생기 라인 분기점 부근의 압력 분포. (a) 모델 1 (b) 모델 2 (c) 모델 3

표 1. 산화제 배관 시스템 입구 조건.

Items	Value
Temperature (K)	~ 93
Inlet pressure (bar)	~ 90
Mass flow rate to the combustion chamber (kg/sec)	~ 170
gas generator (kg/sec)	~ 3.2

4. 해석 결과

4.1 가스발생기 분기점 형상 결정

가스발생기의 분기점에서는 유로가 갑자기 둘로 나뉘기 때문에 압력의 변화가 생기고 이러한 압력의 변화량은 가스발생기 쪽 유량에 영향을 주게 된다. 이러한 효과를 상쇄하기 위해서 분기점 근방에서 정압과 동압을 재분배하여 정압을 높여 주어야 한다. 이러한 압력 보상을 위하여 크게 두 가지의 모델이 많이 사용된다. 첫 번째는 그림 1과 같이 태핑챔버를 장착하여 전체 배관의 유속을 줄여 압력을 높이는 방법이고 두 번째는 분기점에 리듀서를 장착하여 분기점 주위만 압력을 높여주는 방법을 연구해보았다.

태핑챔버에 대한 연구로 그림 3과 같이 3가지 형상을 모델링하고 각각의 특징을 살펴보았다. 그림 3a와 3b는 길이와 너비가 다른 태핑챔버이며, 그림 3c는 태핑챔버를 장착하지 않았을 때의 경우이다. 또한 계산속도를 높이기 위하여 그림 1과 같이 전체적인 배관을 해석하지 않고 그림 4와 같이 'ㄱ'자 모양의 관에 태핑챔버를 장착하였다.

표 1은 수치해석의 초기 조건을 수록해 놓은 것이며 완전발달유동(fully developed flow)를 만들

그림 5. 가스발생기 라인 분기점 부근의 유동분포.

그림 6. 리듀서 개략도.

표 2. 각 모델의 입구압과 출구압.

	모델 1	모델 2	모델 3
Inlet	90	90	90
C.C Outlet	87.	86.8	87.4
G.G Outlet	84.	84.2	83.0

기 위해 입구와 출구의 길이를 최소 5D(직경의 5배)로 하였다.

그림 4를 살펴보면 역시 형상변화가 최소화 되어있는 모델 3의 경우에 연소기 방향으로 최소의 압력강하가 일어나는 것을 알 수 있다. 그러나 이런 형상으로는 가스발생기로 향하는 유동에 충분한 압력을 공급하지 못하는 것으로 결과가 나타났다. 이를 뒷받침하기 위해 분기점 부근의 유동을 좀 더 자세히 살펴보면 그림 5와 같다. 그림 5의 타원으로 표시된 부분을 자세히 보면 가스발생기 분기 입구 부근에서 재순환 영역이 존재하는 것을 알 수 있다. 이는 가스발생기 라인의 입구압력이 연소기로 향하는 동압에 비해 지나치게 낮기 때문에 생기는 현상으로 파악된다. 그러므로 태핑챔버와 같은

표 3. 리듀서 파라미터와 GG 라인 압력강하.

	angle (°)	길이 (mm)	압력강하 (bar)
Case I	15	20	1.4
Case II	15	10	1.7
Case III	30	10	1.4
Case IV	30	5	1.5

그림 7. 리듀서 형상에 따른 가스발생기 라인 입구압 변화.

그림 8. 오리피스 위치. (a) 급은관 이전 (b) 급은관 이후 (c) 출구 근처

압력보상장치가 꼭 필요할 것으로 예측이 되며 각 모델의 입구압과 출구압은 표 2에 정리하였다.

4.2 리듀서의 형상에 따른 가스발생기 라인 입구 압력 변화

가스발생기 라인 입구압(정압)을 높이기 위한 또 다른 방법으로 태핑챔버가 아닌 리듀서를 사용하여 유동해석을 실시하였다. 그림 6은 리듀서의 개략도를 보여준다. 리듀서는 표 3과 같이 4가지의 모델을 사용하였으며 그 결과는 표 3과 그림 7에 나타 내었다. 태핑챔버 대신 리듀서를 장착한 경우에도 박리를 통한 재순화 영역은 생기지 않았으며 Case I부터 IV까지 모두 요구 압력강하치를 만족시켰다. 또한 리듀서는 CC 라인에는 거의 영향을 주지 않는 것으로 나타났으며 리듀서의 길이가 길어지고 각도가 커질수록 압력강하량이 작은 것으로 계산되었다.

4.3 오리피스 위치 결정

오리피스는 엔진 조립을 마친 뒤 엔진시험을 하면서 미세조정을 하기 위해 필요한 부품이다. 최적의 위치를 찾기 위해서 4.1절과 마찬가지로 ‘ㄱ’자 관에 3가지 위치를 선정하여 해석을 수행하였다. 그림 8에 나타나 있는 것처럼 모델 a는관이 굽기 바로 전, 모델 b는 바로 다음, 모델 c는관이 굽은 뒤 상당히 먼 거리에 오리피스를 위치하였다. 그리고 일관성을 지키기 위해 각 모델의 오리피스

그림 9. 오리피스 위치에 따른 유동해석 결과(속력의 분포).

그림 10. 배관 중간 단면에서 속도 분포. 모델 c는관이 굽은 부분부터 거리가 멀기 때문에 오리피스 주위의 속도장 만을 나타내었다.

그림 11. 출구 단면의 압력 분포.

직경은 83.6mm로 고정 하였다. 해석의 초기 조건은 표 1과 동일하다.

그림 9는 유동해석 결과의 하나로 속도장을 나타낸 것이다. 모델 b와 c의 경우는 오리피스를 지난 유동이 전개되는 길이에 따라 속도구배가 달라지는 것을 보여주고 있다. 모델 a의 경우는 오리피스를 통과한 유동이 배관 중심축을 중심으로 반경방향으로 속도구배가 형성되고 이 속도구배가 곡관을 지나면서 회전 중심에 대하여 더욱 비대칭적으로 발전함을 알 수 있다. 그 결과 배관 내에 커다란 속도 변화를 형성하게 된다. 이는 그림 10에 잘 나타나있다.

그림 10을 보면 3가지 모델 모두 다 재순환 구간은 발견되지 않고 있으나 (a)의 경우에 가장 큰 속도구배를 보이는 것을 알 수 있으며 (c)가 가장 고른 속도분포를 보여주고 있다는 것을 알 수 있다.

그림 11은 배관 출구에서의 압력분포를 나타낸 것으로, a는 그림 9에 나타난 바와 같이 중앙 부근의 낮은 동압과 상부 벽면에서 높은 동압을 보여주고 있으며, c는 오리피스로 인해 ‘ㄱ’형상에 따른 속도구배는 많이 상쇄되었지만 동시에 배관 벽면 부분 부분에 강한 압력구배가 있는 것을 알 수 있다.

그림 12. 오리피스 위치가 가스발생기 라인 입구의 압력에 미치는 영향.

그림 13. 산화제 라인 시스템 내에서의 압력분포.

오리피스 위치가 가스발생기 라인의 입구 압력에 미치는 영향을 알아보기 위하여 그림 8의 a, b, c모델을 사용하여 입구압을 계산하였다. 계산 결과는 그림 12에 나타내었다. 그림 12를 보면 모델 b와 c는 비슷한 압력분포를 보이고 있지만 a의 경우에는 오리피스의 영향으로 입구압이 약 0.1 bar 증가한 것을 알 수 있다. 그러므로 오리피스가 관이 굽기 전에 위치하면 연소기 라인의 압력강하에는 좋지 않은 영향을 미치지만 가스발생기 라인에는 오히려 장점으로 작용한다는 것을 알 수 있다.

4.4 라인시스템 해석 결과

라인 시스템 전체의 해석 결과를 그림 13과 14, 15에 나타내었다. 그림 13에 나타났듯이 오리피스와 가스발생기 분기를 통과하고 난 뒤에는 예상대로 압력강하가 크게 나타났지만 벨로우즈와 태핑챔버에서는 의외로 작은 압력강하량을 보였다. 이를 확인하기 위하여 그림 14와 같이 중앙단면에서 속도분포를 살펴본 결과 벨로우즈 내의 김벌링이 일종의 유동유도관(flow liner)로 작용을 하여 대

그림 14. 산화제 라인 시스템 내에서의 속도분포.

그림 15. 각 주요부위의 단면에서의 속도분포.

부분의 유동은 김벌링 안쪽으로 흘러서 주름관 사이 공간으로 유입되는 유동이 매우 적었기 때문이라고 생각된다. 그 결과 벨로우즈에 의한 교란이 매우 작게 나타난 것으로 판단된다.

그림 15는 배관 각 부에서의 속도분포를 나타낸 것으로 전체적인 라인 시스템의 형상에 의해 입구에서는 균일한 유동이 유입이 되더라도 출구에서는 휘어진 덕트를 지나면서 유체의 관성력에 때문에 반경 바깥 방향으로 높은 속도 영역이 편중되는 경향을 보이고 있다. 또한 그림 14에서 보여준 바와 같이 벨로우즈와 태핑챔버는 유동의 형태에 큰 영향을 주고 있지 않다. 그리고 예상할 수 있는 바와 같이 오리피스를 통과한 후에는 덕트 중앙부분에 높은 속도 영역이 집중되며 속도의 편차도 크게 나타나고 있다.

5. 결 론

일반적으로 액체로켓엔진에 사용되는 배관은 부피와 무게를 줄이기 위하여 시스템이 지원할 수 있는 최소한의 크기로 만들어진다. 이 때문에 배관 내에는 매우 빠른 유동이 생기며 이로 내부 정압이 낮아지게 된다. 그런데 이 압력이 일정 이상 낮아지면 가스발생기로 분기되는 입구 부근에서 박리가 일어나므로 이 부분에 대한 압력 보상이 필요하다. 이는 전체 배관 크기를 조절하거나, 태핑챔버 혹은 가스발생기 라인 입구에 리듀서를 장착하는 방법 등을 사용할 수 있다. 또한 엔진시스템 조립을 마친 뒤 미세조정을 위한 오리피스는 전체 성능에 미치는 영향이 매우 크기 때문에 충분한 연

구를 통해서 그 위치를 결정하여야 할 것이다. 이 연구에서는 오리피스 장착 위치를 3가지로 설정하였으며 다행히 a, b, c, 3경우 모두 주어진 요구사항인 압력강하 3.5 bar 이내를 만족시켰다. 다만 b의 경우에 연소기 라인의 압력강하가 최소로 나타났으며 a의 경우에는 GG 입구압력이 높다는 강점이 있었다. 따라서 현재의 연구 결과만으로는 오리피스의 위치는 b로 결정하고 필요한 경우, 가스발생기 입구압력은 태핑챔버로 보완하는 것이 가장 효율적으로 나타났다.

전체 유동해석에서 벨로우즈와 태핑챔버로 인한 압력강하나 유동교란은 예상외로 미미한 것으로 나타났으며 전체적인 유동의 흐름은 원심력의 작용으로 바깥쪽에서 높은 압력을 가지는 것으로 나타났다. 다만 오리피스를 통과한 출구 쪽 유동에서는 원심력의 효과가 현저히 떨어져 비교적 고른 유동을 보였다. 그리고 전체적인 시스템의 압력강하는 각종 구성품의 차압이 매우 작기 때문에 오리피스의 크기에 의해 좌우되는 경향을 보였다.

참고문헌

- 정용현, 이은석 2007, 항공우주시스템공학회지, 1, 42
- 정용현, 이은석, 김철웅, 문인상 2006, 항공우주기술, 5, 132
- Douglas, H. W., Bailey, M. M, Stuck, D. E., Keller Jr., R. B., & Burr, M. 1976, NASA 기술문서 (Liquid Rocket Valve Components), NASA SP-8094
- Fitch, E. C. & Hong, I. T. 2000, Hydraulic Components Design and Selection (Stillwater: BarDyne Inc.), p.40
- Hirsch, C. 1988, Numerical Computation of Internal and External Flows (New York: John Wiley & Sons), pp.26-70