

KSR-III 추진기관 추진제 공급배관 수치해석

조인현*, 오승협*, 강선일*, 김용욱*

Numerical Analysis of KSR-III Main Propulsion System Feedlines

InHyun Cho *, Seung-Hyub Oh *, SunIl Kang * and YongWook Kim *

Key Words: LOX(액체산소), Propellant Feed-line(추진제 공급배관), Venturi(벤츄리)

Abstract

The KSR-III Main Propulsion System configuration of the liquid oxygen (LOX) feed line is analyzed. This feed line includes a tighter radius and cavitation venturi for flow mass flow-rate passive control. There were concerns that these configurations might generate a great flow distortion at the engine interface. Also both the pressure drop at the feed line and any presence of separation area are a great concern according to the propellant flow. To resolve these issues, a computational fluid dynamic analysis was conducted to determine the flow field in the LOX feed lines.

기호설명

ρ	유체의 밀도
v	속도벡터
ϕ	입의의 스칼라량
k	난류강도
ϵ	소산률
μ	점성계수
I	단위 텐서
p	압력
D	변형률 텐서
σ_ϕ	프란틀 수
δn	벽에서 미소체적 중심까지의 수직거리

1. 서론

엔진 입구에서의 유동장은 성능과 구조적인 강성 결정에 많은 영향을 미친다, 교란이 심한 유동장은 엔진 매니폴드에서 필요 없는 수두손실을 유발할 수 있고 유동 동적 하중의 필요 없는 증가는 압력 손실로 이어진다. KSR-III는 가압방식의 로켓이기 때문에 이러한 수두 손실은 가능한 피해야 할 부분이며 설계 단계에서 이에 대한 정확한 예측이 필요하다.

본 연구는 KSR-III 추진제 배관 중 LOX 배관에 대한 유동장 해석을 수행하는 과정을 기술하였고 유동형태를 분석하였다. 이상의 결과는 현재 항공우주연구원에 설치중인 공급계 수류 시험장치(Propulsion Test Article -1 : PTA-1)의 결과와 비교 분석하여 비행용 배관 개발에 활용될 예정이다.

* 항공우주연구원 추진기관 체계그룹

2. 수치모델

LOX 배관 유동해석을 위한 수치모델작업을 수행하였다. 배관에는 추진제 탱크에서 배관을 연결하는 점프, 케비테이션 벤추리, 벨로우즈등이 포함된다. 본 해석에서는 실제로 크지 않은 벨로우즈의 단면 변화를 무시하고 해석하였다. Fig 1에 LOX 배관의 형상을 보여준다. 해석은 Fluent v5.3을 사용하였다. 3차원 Navier-Stokes 방정식을 k-ε 난류모델과 함께 사용하였으며 에너지 방정식을 동시에 풀었다. 유동은 single phase, 비압축성, 정상상태로 간주하였다.

유동장에 대한 기준조건은 table 1에 보여지는 바와같다.

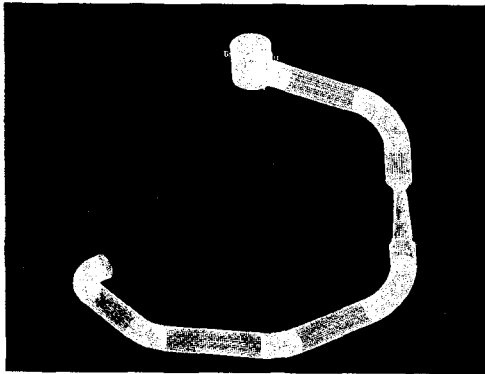


Fig. 1 LOX feed-line configuration

Table 1 LOX condition

질량유동률	40.9 kg/m ³
입구압력	350 psi
입구온도	93 K
입구밀도	1070 kg/m ³

유로에서 유동에 대한 정상상태의 지배방정식 [1]은 좌표계에 관계없이 다음과 같이 기술된다.

$$\text{div}(\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (1)$$

$$\text{div}(\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) = \text{div} \mathbf{T} + \rho \mathbf{b} \quad (2)$$

$$\text{div}(\rho \phi \mathbf{v}) = \text{div}(\Gamma \text{grad} \phi) + S_\phi \quad (3)$$

여기에서 ρ 는 유체의 밀도, \mathbf{v} 는 속도벡터, ϕ 는 임의의 스칼라 량으로 난류강도 및 소산률이에 해당한다. \mathbf{b} 와 S_ϕ 는 운동량과 스칼라 량에 대한 생성항을 나타내며 운동량에 대해서는 중력을 예로 들 수 있다. 난류해석에는 표준 k-ε이 적용되었으므로 스칼라 량에 대해서는 난류생성과 소산에 관련된 항들이 생성항을 이루며 자세한 식은 기존의 문헌[2]을 참조할 수 있다. 뉴턴유체의 경우 응력텐서는 속도와 압력으로부터 다음과 같이 기술된다.

$$\mathbf{T} = -\left(p + \frac{2}{3} \mu \text{div} \mathbf{v}\right) \mathbf{I} + 2\mu \mathbf{D} \quad (4)$$

μ 는 점성계수, \mathbf{I} 는 단위 텐서, p 는 압력, \mathbf{D} 는 변형률 텐서를 나타낸다.

위의 식을 적분하여 이산화 방정식을 구성하고 이에 대한 해를 구하는 작업을 반복하여 최종적으로 수렴된 해를 구하는 유한체적법을 사용하였다. 특히 대류항의 차분은 수치해의 정확도에 큰 영향을 미치므로 정확성과 안정성이 잘 알려진 QUICK 기법[3]을 적용하였고 확산항에는 중앙차분법을 사용하였다. 하지만 전체적인 수렴성을 고려하여 난류강도와 소산률에 대해서는 안정성이 높은 상류도식을 채택하였다. 전체 유동영역에서 각 방정식에 대한 유수의 합이 10⁻³보다 작아질 때를 수렴판정 조건으로 하였으며 동시에 지정된 특정 위치에서 각 변수의 변화가 없음을 확인하였다.

입구에서 유속은 일정하게 주어졌고 입구면에 수직인 방향의 성분만을 가진다. 입구에서 난류강도는 입구 평균유속의 10%를 주었고 이때 소산률은 다음의 식을 적용하여 구하였다.

$$\epsilon_m = C_\mu^{0.75} k_m^{1.5} / l \quad (5)$$

여기에서 C_μ 는 표준 k-ε 난류모형에서 사용되는 계수이고 l 은 입구의 난류 길이척도로서

수력직경의 10%를 적용하였다. 출구에서는 유동이 방향성을 가지므로 지배방정식의 특성이 국부적으로 지배방정식이 포물선형태의 특성을 가지는 것으로 간주하여 입구에서의 유량이 보존되도록 유량은 일정하게 유지하면서 다른 종속변수는 의삽하였다.

난류유동에서의 열전달률은 Gosman 과 Ideriah[4]가 제시한 다음의 관계식을 이용하여 계산할 수 있다.

$$h_w = \frac{\rho C_\mu^{1/4} k^{1/2}}{\phi_P^+} \quad y_P^+ > 11.63 \quad (6)$$

$$h_w = \frac{\mu}{\sigma_\phi \delta n} \quad y_P^+ \leq 11.63$$

위 식에서 k , σ_ϕ , δn 은 난류강도, 프란틀 수, 벽에서 미소체적 중심까지의 수직거리를 나타내며 나머지 변수는 다음과 같이 정의된다.

$$y^+ = \frac{\rho C_\mu^{1/4} k^{1/2} y}{\mu} \quad (7)$$

$$\phi_P^+ = \sigma + \phi^t \left[v_P^+ + P \left(\frac{\sigma_\phi}{\sigma_\phi^t} \right) \right] \quad (8)$$

σ_ϕ^t : turbulent Prandtl number

$$P \left(\frac{\sigma_\phi}{\sigma_\phi^t} \right) = 9.24 \left\{ \left(\frac{\sigma_\phi}{\sigma_\phi^t} \right)^{3/4} - 1 \right\} \times \left\{ 1 + 0.28 \exp \left(-0.007 \frac{\sigma_\phi}{\sigma_\phi^t} \right) \right\} \quad (9)$$

3. 결과

LOX 배관내의 압력 분포는 Fig 2에 보여지는 바와 같다. 섹프부의 높은 압력(350psi)는 출구로 유동이 지나가며 감소하는 경향을 보인다. 섹프에서 벤츄리 입구까지의 압력 강하는 약 20 psi 정도로 완만한 감소를 보인다. 벤츄리 입구에서 벤츄리 목 부위까지는 급격한 압력 감소를 보인다(약 335psi) 벤츄리 출구에서 압력을 회복한다. 섹프 입구에 비하여 약 80 psi 정도 강하된 정도

까지 압력을 회복하고 이 후 엔진 연결부 까지 서서히 감소한다. 섹프부에서 엔진 연결부까지의 전체적인 압력 감소는 약 85 psi 정도로 나타났다.

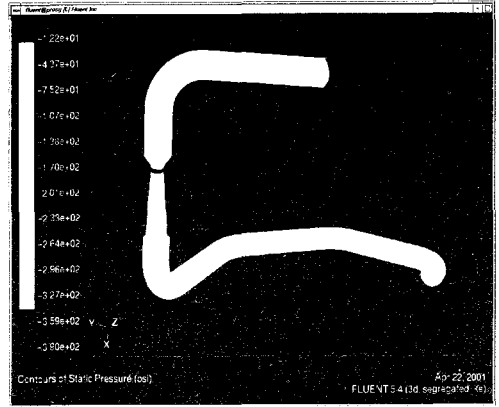


Fig 2 LOX feed-line pressure distribution

속도 분포는 대체적으로 이와 반대되는 경향을 보인다. 섹프 입구에서 평균 약 5.1m/sec의 속도로 유입되는 LOX는 벤츄리의 입구에서 급격히 가속되어 노즐목 부위에서 약 60 m/sec의 속도를 보이다 확장부를 지나며 감속된다.

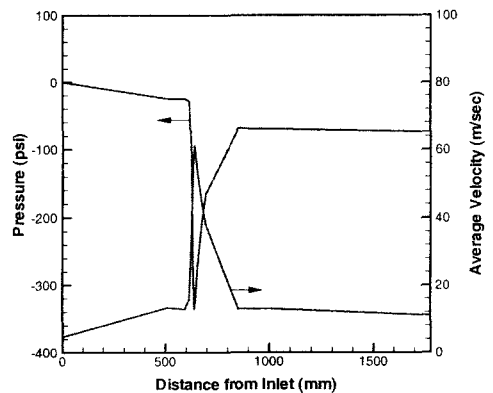


Fig 3 LOX feed-line mass average pressure-velocity (axis)

Fig 3에 배관의 중심축을 따른 압력과 속도 분포를 보여준다. 압력은 입구에서 350 psi 이나 기준압으로 350 psi를 잡아서 Fig 3에서는 입구에서 0 psi로 나타난다. 벤츄리의 하단부에서 압력이 회복된 이후에는 거의 변화가 없는 경향을 보여준다. 또한 벤츄리의 전,후 압력차이는 약 50 psi 정도로 보여진다.

로켓 추진제 배관으로서 특히 LOX 배관에서 유의해야할 사항은 유동 교란이 심하거나 박리 등이 일어나서 2상 유동이 되는 현상이다. 이를 위해 입구 부위에서 출구 부위까지 중심면에서의 속도와 압력 분포를 살펴보았다.

Fig 4의 입구 속도 분포에서 유동은 점프에 연결된 배관을 따라 흐르며 형성되는 것을 알 수 있다. 점프에 연결된 부분, 배관 상부에 작은 재순환 영역이 나타나는 것이 보이나 전체적인 유동의 흐름에 영향을 미치지 않는 것으로 보인다. 벤츄리 부에서 유동은 노즐부의 급격한 가속과 확장부의 감속을 보여준다.(Fig 5) 노즐목 약간 하부에서 최고 속도가 나타난다. Fig 6에 보여지는 바와 같이 벤츄리 하단부에서 엔진 연결부까지의 유동은 대체로 완만한 변화를 보이며 특이한 가속이나 박리 등의 현상은 관찰되지 않는다. Fig 7에서 보여지는 출구부의 속도분포에서 유동은 완전히 발달한 난류 유동을 보여주며 바깥 부분에서 좀더 큰 속도를 가지는 경향을 보여준다.

Fig 8, 9, 10에 입구, 벤츄리부, 출구부의 압력 분포를 보여준다. 입구부에서 점프 내 압력은 그 변화가 거의 없고 배관 연결부에서 구배가 나타난다. 이 구배는 배관 하부보다 상부에서 좀더 크게 나타난다. 벤츄리에서 압력은 입구에서 노즐목으로 가며 급격히 감소하다 팽창부에서 회복하는 경향을 보여준다. 출구부에서는 바깥쪽으로 더 높은 압력을 가지는 경향이 보여진다.

Fig 11에 엔진 유입부에서의 축방향 속도 크기를 도시하였다. 배관의 벽면에서는 경계층이 형성되어 급격한 속도 구배를 가지는 영역이 보이고, 중심부에서는 거의 균일한 속도 크기를 보여주지만 그림의 아래 부분, 즉, 배관의 바깥 부분에서 더 큰 속도 크기를 가지는 유동이 나타나

는 것을 알 수 있으며 이는 거의 성층화된 경향을 보여준다. 이때 속도는 약 11m/sec 정도의 크기를 가진다. 그림 12에 엔진 연결부의 압력분포와 횡방향 속도분포를 도시하였다. 단면의 중심부에서 바깥쪽을 향하는 형태의 큰 와가 대칭적으로 형성이 되며 그 크기는 최대 1m/sec 이내이다. 이에 따라 바깥 부분의 압력이 안쪽보다 더 큰 형태의 성층화 된 압력 구배를 보여준다.

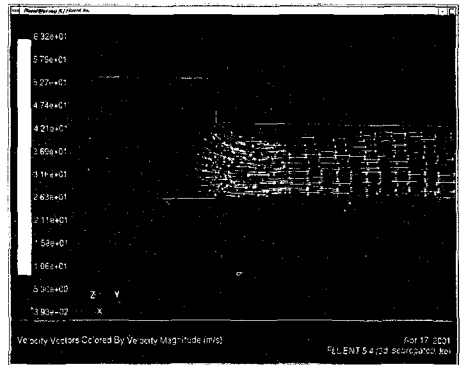


Fig 4 Engine inlet velocity distribution

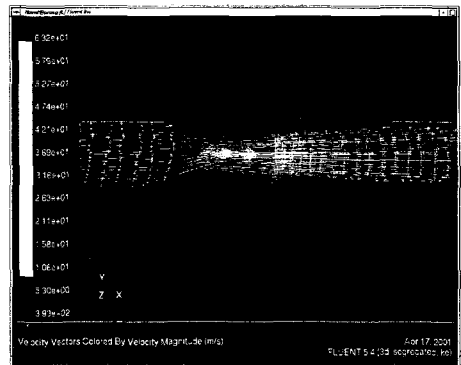


Fig 5 Velocity at venturi



Fig 6 Velocity at downstream of venturi

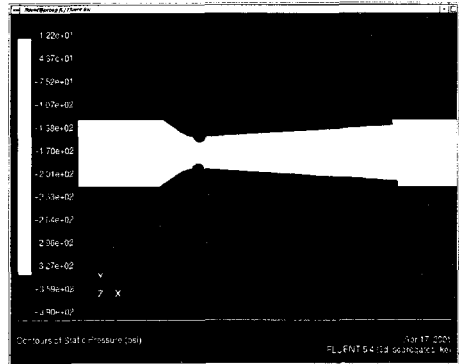


Fig 9 Pressure at venturi

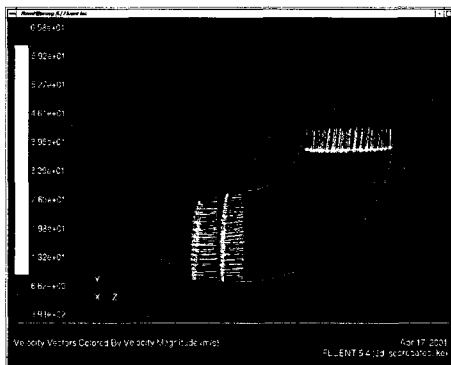


Fig 7 Velocity at outlet

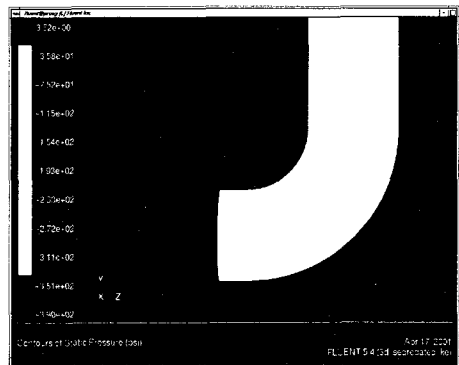


Fig 10 Pressure at outlet

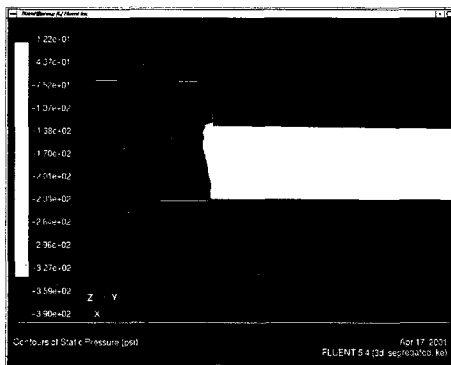


Fig 8 Pressure at inlet

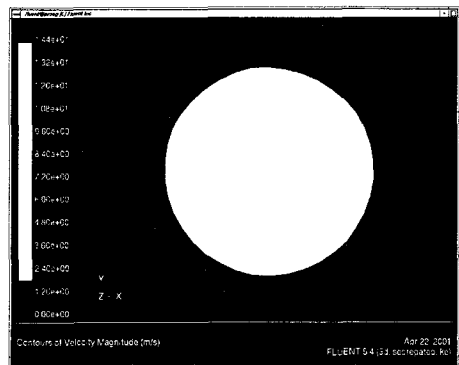


Fig 11 Axial velocity at engine interface

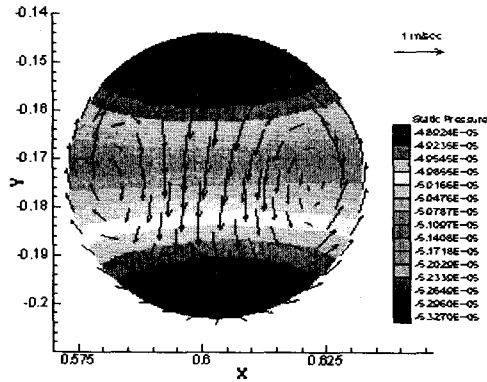


Fig 12 Velocity and pressure of engine interface

4. 결론

KSR-III LOX 추진제 배관의 유동형태를 살펴 보았다. 벤츄리 부에서 큰 압력 및 속도 구배를 보이며 설프부, 엔진 연결부에서 약한 압력 및 속도 구배를 보여준다. 전반적으로 유동의 박리는 관찰되지 않는다. 엔진 연결부에서의 유동은 큰 교란이 없으나 안쪽에서 바깥쪽을 향하는 약한 성층화 된 속도 및 압력 구배를 보여준다. LOX 배관부의 전체적인 압력 손실은 약 50 psi 이며 엔진 연결부에서의 평균 속도는 약 11.1 m/sec 이다.

참고문헌

(1) Ferziger, J.H. and Peric, M. 1996, Computational methods for fluid dynamics, Springer-Verlog.

(2) 허남건, 조원국, 윤성영, 김광호, 회전하는 2차형 관내의 유동에 관한 수치해석 연구, 1993, 대한기계학회논문집, 제17권 6호, pp.1621~1632.

(3) Leonard, B.P., 1979, A stable and accurate convective modelling procedure based on quadratic upstream interpolation, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol.19, 59-98.

(4) Gosman, A.D. and Ideriah, F.J.K., 1976, TEACH-2E: A general computer program for two-dimensional, turbulent, recirculating flows, Fluids section, Dep. of Mech, Eng., Imperial College, London