



액체로켓엔진 공급배관 내 오리피스 위치에 따른 유동해석

김혜민,^{*1} 김완조,¹ 노태성²

COMPUTATIONAL FLOW ANALYSIS ACCORDING TO ORIFICE POSITION IN FEEDING LINE OF LRE

H.M. Kim,^{*1} W.J. Kim,¹ T.S. Roh²

In this study, the various supply system of LRE such as a feed-line, an elbow, and an orifice as a part of integrated analyzing has been combined to develop the performance analysis program. Computational analysis has been used to compare the results and to verify the validity and limitation conditions of the performance analysis program by changing orifice positions.

Key Words : 액체로켓엔진(LRE, Liquid Rocket Engine), 오리피스(Orifice), 압력강하(Pressure Drop), 공급배관(Feeding Line)

1. 서 론

액체로켓엔진 시스템은 연소기, 터보펌프, 가스발생기, 공급계 부품들로 구성되며, 어느 한 부분의 설계가 잘못되면 로켓 전체 성능에 영향을 미치게 된다. 따라서 액체 로켓 시스템의 문제 발생을 최소화하기 위해 각 구성품의 예비 성능 해석을 수행한 후 제작, 시험의 면밀한 단계를 거친다. 그러나 액체 로켓 시스템이 영향을 미치는 영역은 전반적인 구성품의 유기 관계로 인하여 일련의 개발단계를 반복하여 수행하기 때문에 막대한 비용과 시간이 소요된다. 특히 액체로켓 엔진에서는 개발 중 설계 변경은 불가피하며, 개발단계가 반복되면서 검증되므로, 개발비용과 시간을 줄이기 위해 예비 설계 단계에서부터 시험단계까지 액체로켓 시스템의 각 부품의 설계 사양에 따른 성능을 예측해 보고 이를 통합하여 액체 로켓을 개발하게 된다. 따라서 액체 로켓의 각 구성품을 수학적으로 모델링하고 모듈화 하여 그 결과를 유기적으로 결합한 후 통합하여 주어진 조건에서 각 구성품이 원하는 성능을 발휘하는지를 파악하고 핵심 설계 인자를 도출하여, 결과적으로 로켓의 성능이 어떻게 변화되는지를 전산모사 하는

전용 프로그램의 개발이 요구된다.

현재 국내에서는 양희성 등에 의해 액체로켓 엔진 시스템 모듈과 프로그램 개발 및 최적 설계에 관련된 연구가 진행된 바 있다[1,2]. 그러나 국내의 경우에는 액체로켓 엔진 시스템의 서브시스템 해석 모듈을 통한 통합 해석 프로그램 개발에 대한 연구가 충분하게 이루어지지 않았으며, 이를 모델링하고 개발 할 수 있는 기술 및 자료가 부족한 상태이다. 또한 현재 액체로켓 시스템 개발에 사용되는 대부분의 기술이 선진국에 의존하고 있고 기술 이전에 의해 부분적인 연구가 진행되고는 있으나 지금까지 액체로켓 시스템 통합 해석 프로그램 개발에 대한 연구는 아직 기초 단계이다. 이처럼 액체 로켓추진 기관에 대한 연구는 국가 주도로 활발히 연구되고 있지만 대부분 기초적인 연구수준이고, 시스템 개발에 대한 연구는 많이 부족한 상태이다.

이 중 공급계 부품 모듈 시스템 통합 해석 프로그램은 공급계 부품 모듈의 형상설계, 열/구조해석, 성능해석을 수행할 수 있어야 한다. 또한, 다양한 공급계 부품은 연속적으로 연결되어 있으므로 이들을 통합적으로 해석해야 하는데, 이는 각각의 부품에 대한 성능 해석이 선행되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 공급계 부품의 핵심 부품인 배관, 굽힘관, 오리피스를 조합하여 성능 해석 프로그램을 개발하고, 오리피스 조합 위치에 따른 성능해석 프로그램의 신뢰성과 제약 조건을 확인하기 위해 전산해석 결과와 비교하였다.

1 인하대학교 대학원 항공우주공학과

2 인하대학교 항공우주공학과

* TEL : (032) 860-8652

* Corresponding author, E-mail: mini8129@hotmail.com



2. 공급계 부품 성능 해석 프로그램 개발

액체로켓엔진의 공급계 부품은 용도에 따라 배관, 벨로우즈, 벤츄리관, 분기관, 각종 조인트, 밸브, 단열재, 필터, 오리피스 등으로 그 종류와 형태가 다양하며, 유량 및 Pressure Drop 등 각각의 성능변수를 산출하는 방법이 다르다. 공급계 부품 통합 해석 프로그램은 이들 모두에 대한 해석 방법이 내재되어 모듈화로 구성한다. 개별 부품의 성능 해석 방법은 수많은 실험과 실제 개발에 사용되어 신뢰성이 확보되어 있으나, 조합에 따른 성능 해석의 신뢰성은 아직 확보되지 않았다. 따라서 이에 대한 신뢰성 및 제약 조건 등을 공급계 부품 통합 해석 프로그램에 포함시켜야 한다. 본 연구에서는 공급계 부품의 핵심 부품인 배관, 굽힘관, 오리피스를 조합하여 성능 해석 프로그램을 개발하고 오리피스 조합 위치에 따른 성능 해석 프로그램의 신뢰성과 제약 조건을 확인하기 위해 전산해석 결과와 비교하였다.

2.1 수학적 모델링

공급계통의 각 부품들은 수력학적 방정식을 통해 각각의 유량 및 압력 등을 계산한다. 수학적 모델링에서는 주로 공급 배관, 오리피스 및 굽힘관의 직경, 길이 및 Pressure Drop, 표면 거칠기 등의 변수를 기본으로 한다.

2.1.1 배관

배관에 흐르는 유체가 Turbulent Flow일 경우의 배관 Pressure Drop은 식 (1)로부터 계산한다.

$$\frac{\Delta P}{L} = f_{turb} \frac{\rho V^2}{2Dg} \quad (1)$$

여기에서 ΔP 는 Pressure Drop, L 은 배관 길이, ρ 는 밀도, V 는 유속, D 는 배관 직경, g 는 중력가속도, f_{turb} 는 Turbulent Flow에서의 Friction Coefficient이다.

매끈한 배관이라고 가정을 한다면, 고 레이놀즈수에서의 f_{turb} 는 식(2)와 같다[3].

$$f_{turb} = 0.0032 + \frac{0.221}{Re^{0.237}} \quad \text{for } 10000 \leq Re \quad (2)$$

배관의 직경이 25mm보다 큰 경우에는 유속(V) 대신 유량(Q)으로 표현한다.

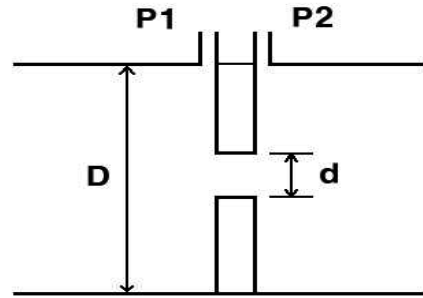


Fig. 1 Corner Tap

2.1.2 오리피스

오리피스를 통과하는 유량을 이론적으로 계산하기 위해서 Incompressible, Inviscid, Steady State라 가정한다.

오리피스를 통과하는 유체가 액체라고 한다면 다음과 같은 유량 방정식을 사용한다.

$$Q = \frac{C_q A_{throat} \sqrt{2\rho \Delta P}}{\sqrt{1 - \beta^4}} \quad (3)$$

여기에서 Q 는 오리피스를 통과하는 유량을 나타내며, C_q 는 유량계수, A_{throat} 는 오리피스 면적, ΔP 는 오리피스 전후의 Pressure Drop, ρ 는 밀도, $\beta (= d/D)$ 는 오리피스와 배관의 직경비를 나타낸다.

국제표준기구(ISO)에서 제시하는 유량계수 식은 다음과 같다.

$$C_q = 0.5959 + 0.0312\beta^2 - 0.184\beta^8 + 0.0029\beta^{2.5} \left(\frac{10^6}{Re} \right)^{0.7} + 0.09L_1 \left(\frac{\beta^4}{1 - \beta^4} \right) - 0.337L_2\beta^3 \quad (4)$$

본 연구에서는 오리피스 전후 Pressure Drop을 계산하기 위해 Fig. 1과 같은 코너 탭(Corner Tap)을 사용하였으며, 이는 식 (4)에서 $L_1 = L_2 = 0$ 의 값을 갖는다.

2.1.3 굽힘관(Elbow)

굽힘관에서의 Pressure Drop은 다음과 같은 식으로 계산된다[4].

$$\Delta P = K \frac{\rho}{2A^2} Q^2 \quad (5)$$

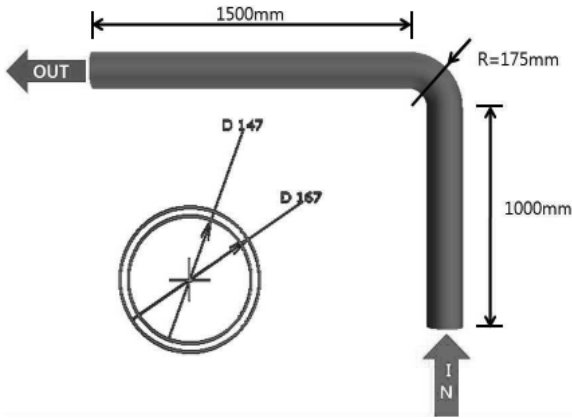


Fig. 2 Modeling of Feeding Line

여기서 ΔP 는 Pressure Drop, A 는 굽힘관의 단면적, ρ 는 밀도, Q 는 굽힘관을 통과하는 유량, K 는 압력 손실 계수 (Pressure Loss Coefficient)를 나타낸다.

Smooth하게 90°로 굽은 Elbow의 압력 손실 계수 K 는 식 (6)과 같이 구한다.

$$K = 30f_{turb} \tag{6}$$

여기에서 f_{turb} 는 Turbulent Flow에서의 Friction Coefficient 로서 앞의 식 2)와 같이 구한다.

2.2 공급계 부품 성능 해석 프로그램

배관, 오리피스, 굽힘관의 수학적 모델링 식을 이용하여 각 부품별 전후 Pressure Drop 계산이 가능하도록 하였으며, 모델링에 사용된 공급계 부품의 개수 및 위치에 따른 전체 Pressure Drop을 계산할 수 있도록 하였다. 또한, 밸브 및 벨로우즈 등의 공급계 부품 모델링을 추가하여 공급계 부품 성능 해석 프로그램을 보완할 계획이다.

3. 공급계 부품 성능 해석 프로그램의 비교 검증

3.1 배관 및 오리피스 형상 모델링

오리피스는 엔진 조립을 마친 뒤 엔진시험을 하면서 미세하게 압력을 조정하기 위해 사용되는 부품으로 공급라인의 특정 부위에 위치하게 된다. 본 연구에서는 오리피스 조합 위치에 따라 공급계 부품 성능 해석 프로그램의 압력저하 특성을 전산해석을 통해 비교 검증한다. Fig. 2가 공급라인의 형상이며, Fig. 3은 오리피스의 형상이다.

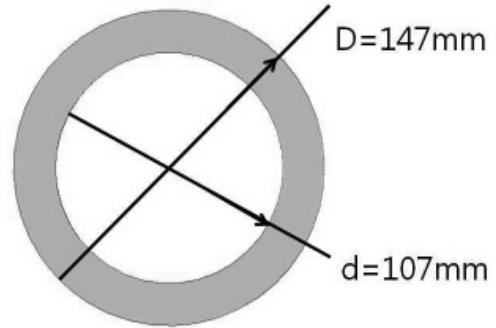


Fig. 3 Modeling of Orifice

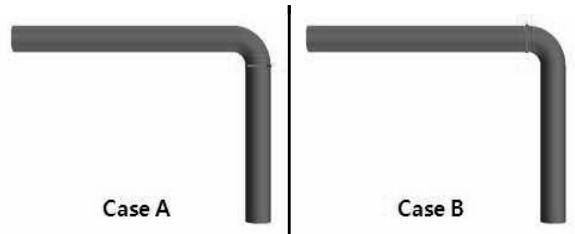


Fig. 4 Position of Orifice

공급배관은 외경 167mm, 내경 147mm인 공칭두께 10mm의 ‘ㄱ’자 관이고, 여기서 D는 공급배관의 내경을 의미한다. 오리피스는 기본적인 원형 오리피스를 사용하였으며, ISO 규격인 12.5mm 이상의 0.2D~0.75D를 만족하는 것을 사용하였다. 본 논문에서는 이 조건을 만족하도록 107mm로 모델링하였다. 오리피스의 두께 규정은 0.005D~0.02D를 만족하도록 0.735mm로 하였다.

오리피스의 위치가 공급계 부품의 성능 해석에 미치는 영향을 알아보기 위하여 Fig. 2의 ‘ㄱ’자형 배관의 굽힘관 전후에 오리피스를 배치시켰으며, Fig. 4와 같이 Case A, Case B로 나누었다.

3.2 유동 해석 조건

정상상태(Steady), 정지계(Stationary), 분리된 유동(Segregated Flow), 일정한 밀도를 가진 비압축성(Incompressible) 난류 유동(Turbulent Flow)이라 가정하였다. 난류유동에 대한 지배방정식은 연속방정식과 Reynolds-averaged Navier-Stokes 방정식을 사용하였다. 초기 경계 조건으로 입구는 유체의 질량 유량을 입력할 수 있도록 ‘질량유동 입구’로 설정하였고, 출구는 ‘유동분리 출구’를 적용하였다. 유체의 점성으로 인한 배관의 벽면과 유체의 마찰은 점착(No-slip) 조건을 사용하였고, 기타 초기 조건은 Table 1과 같다.

해석모델은 비유선형이며 대단히 높은 레이놀즈수에 지배



Table 1 Initial Condition of Feeding Line Inlet

Items	Value
Fluid Type	Liquid, H_2O
Turbulent Model	Standard $k-\epsilon$ Model
Pressure	90 bar
Mass flow rate	170 kg/s

되는 유동으로 비정상 박리와 재부착 및 와열 생성 등이 혼재하는 난류 유동이기에 때문에 고 레이놀즈수로 인해 박리점 (Separation Point) 주위와 벽면에서 상당한 격자 밀집을 요구하게 된다[5]. 따라서 해석격자는 사면체 체적 요소(Tetrahedral Volume Mesh)를 사용하였으며, 배관의 벽면으로는 벽면 효과를 고려하기 위해 프리즘 층(Prism Layer)을 통해 벽면에서의 격자를 좀 더 조밀하게 충분한 수의 격자를 생성하였다.

CATIA를 이용하여 형상 모델링을 하였고, 전산해석은 상용 Tool인 STAR-CCM+를 사용하였고, 수치기법은 2nd-Upwind Scheme을 사용하였다.

3.3 해석 결과

3.3.1 압력 분포

각 Case 별 배관 내부의 압력 분포는 Fig. 5와 같다. 배관의 입구 압력은 90bar로 고정시켰지만, 배관 내부에 설치된 오리피스에 위치에 따라서 압력 분포에 차이를 보였다. ‘ㄱ’자로 굽은 관 영역에서는, 관이 휘어지는 순간에 벽면의 안쪽에서는 낮은 압력을 갖고, 벽면의 바깥쪽에서는 최대 압력을 갖는다. 이는 유동이 배관 중심부를 기준으로 배관의 바깥쪽에서 안쪽으로 반경방향으로 운동하기 때문에 속도구배가 커지고, 그로 인해 압력구배도 커지기 때문이다.

3.3.2 Pressure Drop

Pressure Drop은 입구와 출구의 Total Pressure를 차이로 계산한다. Total Pressure 분포는 Fig. 6과 같고, 이를 공급계 부품 성능 해석 프로그램의 결과와 비교를 해 보았으며, Table. 3에 정리하였다. Case A, Case B와 같이 배관 내부에 오리피스를 위치시키면, 유체가 오리피스를 통과할 때 단면적이 축소되므로, 배관 중심부에서 압력이 줄어들었다가, 오리피스를 지난 직후에 벽면 근처의 유체가 점성 효과에 의해 Separation이 발생하면서 압력이 증가되고, 이로 인해 오리피스를 통과한 후 유동이 전개됨에 따라 정상상태의 압력을 얻게 된다. 유동은 굽은 관을 통과한 후 발생한 Circulation으로 인해 더 많은 Pressure Drop이 발생하였다. 이는 성능 해석 프로그

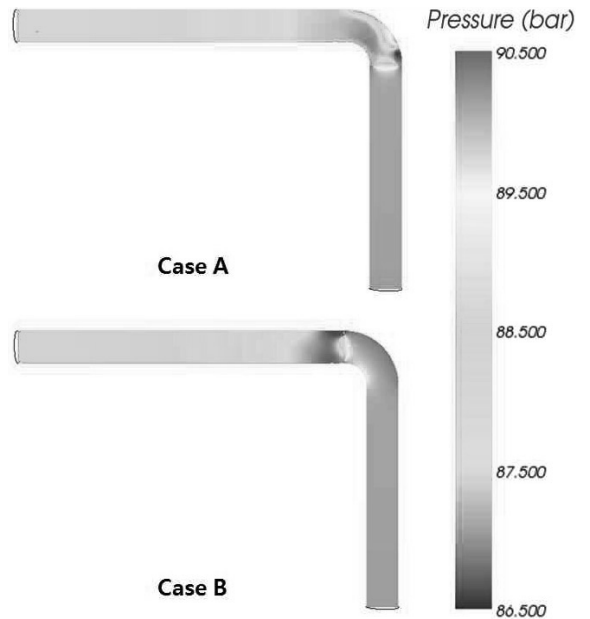


Fig. 5 Pressure Distribution

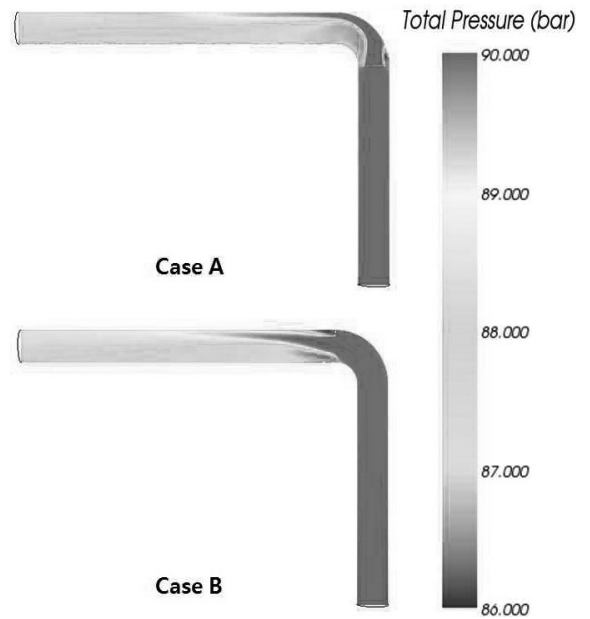


Fig. 6 Total Pressure Distribution

램에 사용된 수식들에는 조합에 따른 3차원 효과가 고려되지 않으므로 전산 해석의 결과와 차이가 발생하였다.

이는 앞서 언급했던 바와 같이 공급계 부품은 연속적으로 연결되어있기 때문에 각 부품의 성능 인자가 상호 영향인지를 판별하기 위해서 오리피스를 제외한 굽은 관의 Pressure

Table 3 Total Pressure Drop of between Inlet and Outlet (1)

Items Models	Inlet Pressure	Outlet Pressure	Pressure Drop
Case A			
전산 해석	90 bar	87.9148 bar	2.0852 bar
			2.32 %
성능해석 프로그램	90 bar	89.3873 bar	0.6127 bar
			0.68 %
Case B			
전산 해석	90 bar	88.1647 bar	1.8353 bar
			2.04 %
성능해석 프로그램	90 bar	89.4688 bar	0.5312 bar
			0.59 %

Table 4 Total Pressure Drop of between Inlet and Outlet (2)

Items Models	Inlet Pressure	Outlet Pressure	Pressure Drop
단순 굽은 관			
전산 해석	90 bar	89.8470 bar	0.1530 bar
			0.17 %
성능해석 프로그램	90 bar	89.8305 bar	0.1695 bar
			0.19 %

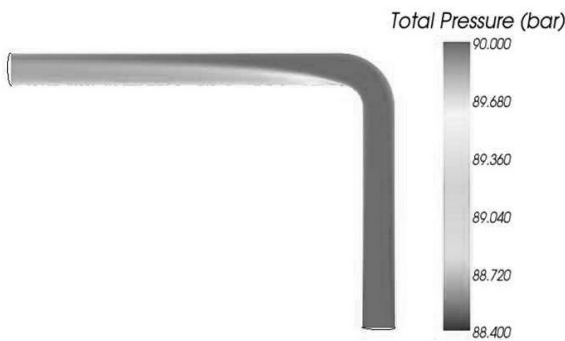


Fig. 7 Total Pressure Distribution in Simple Feeding Line

Drop의 비교를 해 보았고, 이는 Table 4와 같다. 또, 전산 해

석의 결과는 Fig. 7과 같다. 단순 굽은 관 모델을 전산 해석한 결과와 성능 해석 프로그램으로 해석한 결과가 별다른 차이를 보이지 않았다. 이는 굽힘관의 흐름과 오리피스의 흐름이 상호 영향을 주었기 때문이라 판단된다. 따라서 추후에는 굽힘관의 흐름과 오리피스의 흐름이 상호 영향을 미치지 않는 간격에 대한 연구가 필요하다.

5. 결 론

배관, 굽힘관, 오리피스로 구성된 액체로켓엔진의 공급계 부품 성능 해석 프로그램을 개발하였고, 각 부품간의 상호 영향에 대한 조사를 위해 전산해석의 결과와 비교하였다. 굽힘관 전후에 오리피스를 장착한 경우 굽힘관의 유동과 오리피스의 유동의 상호 영향성이 증가하여 압력손실 예측에서 많은 차이가 나타났다. 따라서 오리피스 위치 변경을 통해 굽힘관의 흐름과 오리피스의 흐름이 상호 영향을 미치지 않는 간격에 대한 연구가 필요하다.

후 기

본 논문은 항공우주연구원의 ‘학연협력사업 성과창출형 과제’ 사업으로 진행되었습니다.

참고문헌

- [1] 2007, 양희성, 외2인, “액체 로켓 엔진시스템 개념설계를 위한 모듈화 프로그램 Part I : 주요 구성품 설계,” *한국항공우주공학회지*, Vol.35, pp.805-815.
- [2] 2007, 박병훈, 외3인, “액체 로켓 엔진시스템 개념설계를 위한 모듈화 프로그램 Part II : 통합 모듈화 프로그램,” *한국항공우주공학회지*, Vol.35, pp.816-825.
- [3] 2003, Lester Thomas G., "Solving the Colebrook Equation for Friction Factors," *ASHRAE Journal July*, Vol.45, pp.41-44.
- [4] 2006, "Flow of Fluid Through Valves, Fittings, and Pipe," The Woodlands, Crane Valves North America, *Technical Paper No.410M*.
- [5] 1998, 이보성, 외2인, “ $k-w$ SST 난류 모델을 이용한 2차원 정사각주 주위의 비정상 난류 유동장 해석,” *한국항공우주학회 춘계학술발표회 논문집*, Vol.26, pp.104-107.