

# 액체로켓엔진 공급시스템 모듈 개발

김혜민\* · 이상복\* · 김완조\* · 노태성\*\*

## Development of Supply System Module for Liquid Rocket Engine

Hyemin Kim\* · Sangbok Lee\* · Wanjo Kim\* · Tae-Seong Roh\*\*

### ABSTRACT

The supply system module of the liquid rocket engine has been developed, which consists of the various supply system components such as pipes, orifices, elbows, bellows, valves and flanges. This module can size the components and calculate pressure drops between them. For the assembly of the supply system components, the supply system module can evaluate the number of the components, total pressure drop, outlet pressure and total system weight.

### 초 록

액체로켓엔진 공급시스템을 구성하는 배관, 오리피스, 굽힘관, 벨로우즈, 밸브, 플랜지 등의 공급계 부품들에 대한 액체로켓엔진 공급시스템 모듈을 개발하였다. 이 모듈은 각 부품별로 Sizing이 가능하며 압력강하를 계산할 수 있다. 또한, 공급시스템이 구성되면 시스템 전체 부품 개수, 압력강하, 출구압력, 무게를 도출할 수 있다.

Key Words: Liquid Rocket Engine(액체로켓엔진), Supply System Components(공급계 부품), Pressure Drop(압력강하), Supply System Module(공급시스템 모듈)

### 1. 서 론

액체로켓엔진의 공급시스템은 액체로켓엔진을 구성하는 연소기, 가스발생기, 터보펌프 등 각각의 구성품을 연결시켜주며, 산화제 및 연료의 공급을 원활하게 해준다. 또한 액체로켓엔진 공급시스템은 고압과 극저온, 높은 진동하중 하에서

작동한다. 그러므로 공급시스템을 구성하는 부품은 일반적으로 규격화된 부품을 사용하기 보다는 시스템 전용으로 맞추어진 단일 제품을 사용하는 경우가 많다. 그리고 공급계 부품은 용도별로 그 종류와 형태가 다양하고, 각각의 설계인자 산출 방법이 다르므로 각 부품에 대한 수학적 모델링 및 DB 구축이 필요하다. 또한, 공급계 부품들은 연속적으로 연결되어 있으므로, 이들을 통합하여 해석하는 것이 효율적이다[1]. 그러므로 각 부품별 수학적 모델링과 구축된 DB를 바탕으로 액체로켓엔진 공급시스템 모듈을 개발하

\* 인하대학원 항공우주공학과

\*\* 인하대학교 기계공학부 항공우주공학과  
연락처, E-mail: mini8129@hotmail.com

는 것이 본 논문의 목표이다. 개발된 모듈을 STAR-CCM+와 AMESim을 통하여 검증하고, 이 모듈이 요구조건을 만족하는 값을 도출할 수 있는지 확인하기 위해 액체로켓엔진 가스발생기 사이클에 적용하였다.

## 2. 액체로켓엔진 공급시스템 모듈 개발

### 2.1 공급계 부품별 설계 및 성능 인자

공급시스템 모듈 개발에 사용된 입출력 변수는 Table 1과 같다. 액체로켓엔진에 주로 사용되는 산화제 및 연료에는 메탄, 액체 산소, 액체 수소, 케로신(JP-10) 등이 있다[2]. 이 유체들은 온도나 압력에 따라 물성치가 바뀌게 되므로, 그에 대한 계산이 필요하다. 유체 물성치의 Input을 바탕으로 유체 종류별 온도와 압력에 따른

물성치가 계산되는 프로그램을 거쳐 Output을 얻게 된다. 배관, 오리피스, 굽힘관, 벨로우즈, 밸브, 플랜지 각 모듈은 기본적으로 개수, 외경, 재질을 입력받아 압력강하, 무게 및 Count를 출력한다. Count는 계산 횟수로서 부품의 개수와 일치하면 더 이상 계산이 불가하다. 개발된 모듈은 압력강하가 주어지면, 배관과 벨로우즈는 길이와 두께, 오리피스는 내경, 굽힘관은 굽힘각과 두께, 밸브는 개폐 정도, 크기를 계산할 수 있다. 반대로 부품별 Sizing이 완료되면, 각 부품별 압력강하가 계산된다. 플랜지는 배관과 배관, 배관과 다른 기계 부분을 결합할 때 사용되는 부품으로, 배관에 맞는 크기의 플랜지를 사용하기 때문에 압력강하는 무시할 수 있을 만큼 작다. 또한 열적, 구조적 영향도 아주 미미하므로 플랜지의 형상이 결정되면 그에 따른 무게 평가만 한다[3].

### 2.2 배관(Pipe) 수학적 모델링

배관의 압력강하는 Eq. 1로부터 계산한다.

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

여기에서  $\Delta P$ 는 압력강하,  $L$ 는 길이,  $\rho$ 는 밀도,  $V$ 는 유속,  $D$ 는 직경,  $g$ 는 중력가속도,  $f$ 는 Friction Coefficient이다.

### 2.3 오리피스(Orifice) 수학적 모델링

오리피스를 통과하는 유체가 액체라고 한다면 다음과 같은 유량 방정식을 사용한다.

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

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

### 2.4 굽힘관(Elbow) 수학적 모델링

굽힘관의 압력강하는 Eq. 3으로 계산된다[4].

Table 1 Input and Output of Supply System Components

모듈	Input	Output
유체 물성치	·종류 ·온도 ·압력 ·질유량	·밀도 ·추진제 ·물 ·Viscosity ·체적유량 ·비중
배관	·개수 ·외경 ·재질	·길이 ·압력강하 ·두께
오리피스	·개수 ·외경 ·재질	·압력강하 ·내경 ·길이 ·무게 ·Count
굽힘관	·개수 ·외경 ·곡률반경 ·재질	·압력강하 ·내경 ·굽힘각 ·무게 ·Count
벨로우즈	·개수 ·외경 ·재질	·길이 ·압력강하 ·두께
밸브	·개수 ·종류 ·재질	·압력강하 ·크기 ·개폐 정도 ·무게 ·Count
플랜지	·개수 ·외경 ·내경	·두께 ·종류 ·재질

$$\Delta P = K \frac{\rho}{2A^2} Q^2 \quad (3)$$

여기서  $K$ 는 압력 손실 계수를 나타낸다.

### 25 벨로우즈(Bellows) 수학적 모델링

벨로우즈의 압력강하는 다음과 같이 계산된다.

$$\Delta P = \frac{L\rho V^2}{2Dg} \quad (4)$$

### 26 밸브(Valve) 수학적 모델링

밸브를 통과하는 유체가 액체라고 한다면 다음과 같은 유량 방정식을 사용한다.

$$Q = C_v \sqrt{\frac{\Delta P}{(s.g)}} \quad (5)$$

여기에서  $C_v$ 는 유량계수이고, 밸브의 개폐 정도에 따라 결정된다. 또,  $s.g$ 는 비중을 나타낸다.

### 27 액체로켓엔진 공급시스템 모듈

공급계 부품별 수학적 모델링과, 구축된 공급계 부품별 DB를 바탕으로 액체로켓엔진 공급시스템 모듈을 개발하였으며, 이는 Fig. 1과 같이 구성된다. 이 모듈은 유체 물성치와, 공급시스템을 구성하는 배관, 오리피스, 굽힘관, 벨로우즈, 밸브, 그리고 플랜지에 대한 각 부품별 종류, 개수, 설계 및 성능 인자를 통해 공급시스템을 이루고 있는 부품의 개수와 압력강하, 출구 압력, 전체 무게를 얻을 수 있다.

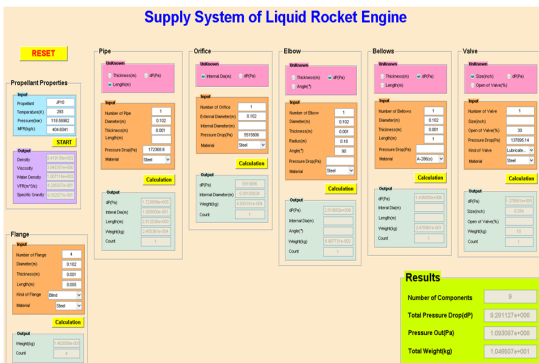


Fig. 1 Supply System Module of Liquid Rocket Engine

### 3. 액체로켓엔진 공급시스템 모듈 검증

개발된 공급시스템 모듈을 검증하기 위해 상용프로그램인 STAR-CCM+와 AMESim을 사용하였다. 액체로켓엔진 공급시스템을 구성하는 공급계 부품 중 배관, 굽힘관, 오리피스를 조합하여 굽힘관의 굽힘 정도에 따른 유동 해석, 오리피스 위치에 따른 유동 해석을 통해 액체로켓엔진 공급시스템 모듈을 비교 검증하여 신뢰성 및 제약 조건을 확인하였다.

#### 3.1 유동 해석 조건

배관에 흐르는 유체는 정상상태, 정지계, 분리된 유동, 비압축성 난류 유동이라 가정하였다. 난류에 대한 지배방정식은 Reynolds-averaged Navier-Stokes 방정식을 사용하였다. 초기 경계 조건으로는 유체의 질량 유량을 입력할 수 있도록 '질량유동 입구'로 설정하였고, '유동분리 출구'를 적용하였다. 유체의 점성으로 인한 배관의 벽면과 유체의 마찰은 점착(No-slip) 조건을 사용하였고, 기타 초기 조건은 Table 2와 같다.

Table 2 Pipe Inlet Initial Condition

Items	Value
Fluid Type	Liquid, $H_2O$
Turbulent Model	Standard $k-\epsilon$ Model
Pressure	90.0 bar
Mass Flow Rate	170 kg/s

#### 3.2 굽힘관 굽힘 정도에 따른 유동 해석

##### 3.2.1 배관 및 굽힘관 형상 모델링

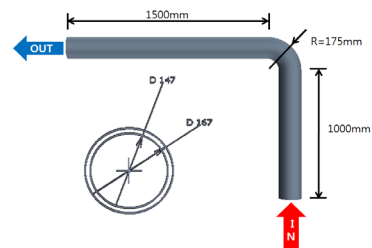


Fig. 2 Pipe and Elbow Modeling

배관은 Fig. 2와 같이 외경 167mm, 내경 147mm인 공칭두께 10mm의 'ㄱ'자 관이고, 여기서  $d$ 는

배관의 내경이다. 굽힘관의 곡률 반경은 175mm이며, 굽힘각을 60°, 45°, 30°로 변경해가며 유동 해석을 수행하였다.

### 3.2.2 해석 결과

굽힘각에 따른 전압력 분포 STAR-CCM+ 결과는 Fig. 3과 같다. 배관 내에 유동이 굽힘관을 지나면서 Circulation과 Separation, 공동 현상의 발생으로 인한 유동 불안정에 의해 압력강하가

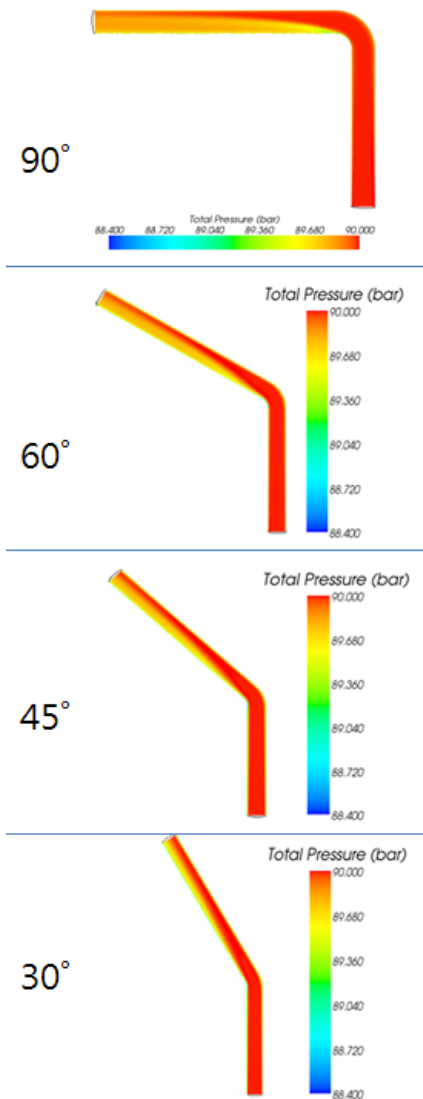


Fig. 3 According to Angle of Elbow, Supply System Pressure Drop

나타난다. STAR-CCM+와 AMESim, 그리고 공급시스템 모듈의 압력강하량 및 압력강하 비율은 Table 3에 나타내었다. 90°, 60°, 45°, 30° 굽힘관 모두 STAR-CCM+, AMESim, 공급시스템 모듈의 결과가 거의 일치하였다. 이를 통해 배관과 굽힘관에 대한 액체로켓엔진 공급시스템 모듈의 신뢰성을 확보하였다.

Table 3 According to Angle of Elbow, Supply System Pressure Drop

	STAR-CCM+	AMESim	Module
90°	0.1780 bar (0.20%)	0.1673 bar (0.19%)	0.1695 bar (0.19%)
60°	0.1284 bar (0.14%)	0.1226 bar (0.14%)	0.1244 bar (0.14%)
45°	0.1195 bar (0.13%)	0.1051 bar (0.11%)	0.0996 bar (0.11%)
30°	0.1124 bar (0.12%)	0.0905 bar (0.10%)	0.0922 bar (0.10%)

### 3.3 오리피스 위치에 따른 유동 해석

#### 3.3.1 오리피스 형상 모델링

Fig. 2의 굽힘관 전후에 오리피스를 삽입하였으며, Case A, B로 나누어 압력강하를 계산했다. 오리피스는 Fig. 4와 같이 기본적인 원형 오리피스이며, 내경을 107mm로 모델링하였다.

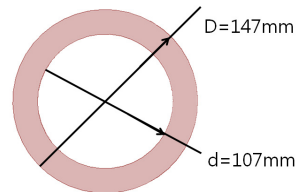


Fig. 4 Modeling of Orifice

#### 3.3.2 해석 결과

오리피스의 위치에 따른 전압력 분포 STAR-CCM+결과는 Fig. 5와 같다. Case A, B 모두 배관 내부에 흐르는 유체가 오리피스를 통과할 때 단면적이 축소되므로, 배관 중심부에서 압력이 줄어든다. 오리피스를 지난 직후에는 벽면 근처의 유체가 점성 효과에 의해 Separation이 발생하면서 압력이 증가하고, 오리피스를 통과한 후 유동이 전개됨에 따라 정상상태 압력을 얻는다.

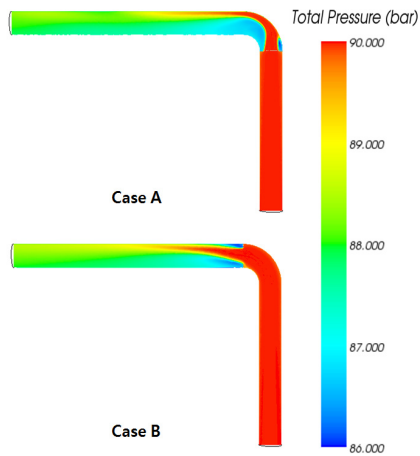


Fig. 5 According to Position of Orifice, Supply System Pressure Drop

Table 4 According to Position of Orifice, Supply System Pressure Drop

	STAR-CCM+	AMESim	Module
A	2.0852 bar (2.32%)	0.7421 bar (0.82%)	0.7084 bar (0.79%)
B	1.8353 bar (2.04%)	0.7423 bar (0.82%)	0.7084 bar (0.79%)

STAR-CCM+와 AMESim, 그리고 공급시스템 모듈의 압력강하량 및 압력강하 비율은 Table 4에 나타내었다. STAR-CCM+ 결과를 보면, Case A가 Case B보다 상대적으로 많은 압력강하가 발생하였다. 이는 Case A는 굽힘관 직전에 오리피스를 삽입하기 때문에 굽힘관 직후에 오리피스를 삽입하는 Case B에 비해서 Circulation이 더 많이 발생했기 때문이다. 또, 이러한 STAR-CCM+의 결과는 개발된 모듈과 AMESim의 결과와는 약 1.5% 정도의 차이를 보였다. 오리피스를 통과하는 유체는 일정한 공급 유량을 유지해야 하지만, 공동 현상이 발생하여 공동의 생성과 소멸 때문에 압력의 변동이 발생하며 유효 유로를 감소시켜 유량 공급을 줄이게 된다. 따라서 이러한 차이를 보이는 것은 오리피스를 통과하는 유체의 공동 생성과 소멸이 유량의 일정한 공급을 방해하기 때문에 이에 따른 유체 공급 불안정으로 나타난 공급시스템의 성능저하 때문이다[5]. 또한, 개발된 모듈에 사용된 수식에는 Separation, Circulation과 같은 3차원 효과가 고

려되지 않았기 때문이라고도 할 수 있다. 그러므로 공급시스템에 여러 가지 부품들이 연결될 경우 발생할 수 있는 Separation, Circulation, 공동 현상에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

#### 4. 액체로켓엔진 공급시스템 모듈 활용

개발된 모듈은 공급시스템이 구성되었을 때, 각각의 요구조건에 따라 원하는 값을 도출할 수 있어야 한다. 따라서 액체로켓엔진 가스발생기 사이클의 산화제 및 연료 라인에 이를 적용시켰으며, 유체 물성치와 각 부품별 압력강하는 Fig. 6을 참고한다[6]. 가스발생기용 연료 라인의 배관, 오리피스, 밸브에서는 각각 25psia, 800psia, 20psia의 압력강하가 발생하고, 연소기용 연료 라인에서는 배관, 오리피스, 밸브가 각각 25psia, 110psia, 35psia의 압력강하가 발생한다. 또 가스발생기용 산화제 라인에서는 배관, 오리피스, 밸브에서 각각 25psia, 615psia, 10psia의 압력강하가 발생하고, 연소기용 산화제 라인에서는 오리피스 없이 배관과 밸브에서 각각 25psia, 35psia의 압력강하가 발생한다. Table 5는 이에 대한 부품별 Sizing 결과이며, N은 부품 개수, D는 부품 외경, ID는 부품 내경, L은 부품 길이, W는 부품 무게이다. 배관과 오리피스는 외경을 0.1m로 가정하였고, 압력강하를 기준으로 배관의 길이와 오리피스의 내경을 계산하였다. 밸브는 각 라인에 따라 현재 개발되어 사용되는 것을 선택

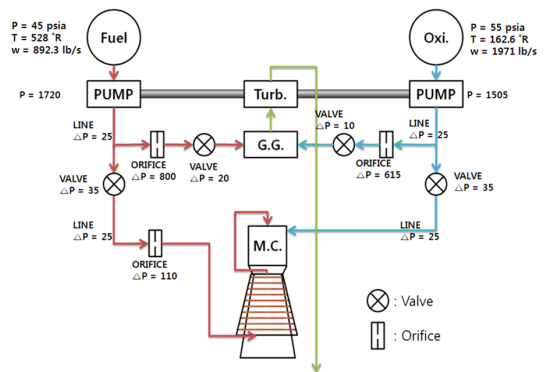


Fig. 6 Gas-Generator Cycle SEA-LEVEL Reference

Table 5 Supply System Components Sizing

Line	Fact.	Pipe	Orifice	Valve	Flange	
Gas Generator Fuel Line	N	1	1	1	3	1
	D(m)	0.1	0.1	0.04	0.1	0.04
	ID(m)		0.003			
	L(m)	2.51				
	W(kg)	6.2	0.61	3.5	0.110	0.013
Combustion Fuel Line	N	1	1	1	4	
	D(m)	0.1	0.1	0.1	0.1	
	ID(m)		0.0049			
	L(m)	1.005				
	W(kg)	2.48	0.609	10	0.148	
Gas Generator Oxidizing Agent Line	N	1	1	1	3	1
	D(m)	0.1	0.1	0.04	0.1	0.5
	ID(m)		0.0023			
	L(m)	1.52				
	W(kg)	2.76	0.448	2	0.110	0.447
Combustion Oxidizing Agent Line	N	1		1	3	
	D(m)	0.1		0.1	0.1	
	L(m)	1.52				
	W(kg)	2.76		21	0.110	

하였다. 플랜지는 각 부품을 연결할 때 사용하는 데, 배관 및 오리피스와 연결되는 플랜지는 0.1m 로, 밸브와 연결되는 플랜지는 각 밸브의 크기와 동일하게 외경을 Sizing하였다. 또한 Sizing에 따라 무게를 도출하였다. 개발된 액체로켓엔진 공급시스템 모듈은 이와 같이 압력강하가 주어졌을 때 그에 따른 부품 Sizing이 가능하며, 부품 Sizing이 완료되면 그에 대한 압력강하 및 무게를 계산할 수 있다.

### 5. 결 론

액체로켓엔진 공급시스템을 구성하는 공급계 부품인 배관, 오리피스, 굽힘관, 벨로우즈, 밸브, 그리고 플랜지에 대해 이를 통합적으로 해석할 수 있는 공급시스템 모듈을 개발하였다. 이 모듈은 각 부품별 수학적 모델링과 구축된 DB를 통해 개발되었으며, 압력강하, 질유량, 부품별 크기, 개수, 무게, 재질을 입출력 변수로 적용가능하다. STAR-CCM+와 AMESim을 사용하여 모듈을 검증하였으며, Separation, Circulation, 공동 현상에 대한 추가적인 연구가 필요하다. 개발된 모듈이 요구조건을 만족하는 값을 도출할 수 있는지 알아보기 위하여 액체로켓엔진 가스발생기 사이클의 산화제 및 연료 라인에 따라 구성된 공급시스템의 압력강하를 바탕으로 부품 Sizing을 하고, 그에 따른 무게를 도출하였다. 개발된

모듈은 이와 같이 압력강하가 주어졌을 때 부품 Sizing이 가능하며, 부품 Sizing이 완료되면 압력강하 및 무게를 계산할 수 있다. 추가적으로 필터, 분기관 등 나머지 공급계 부품 모듈을 개발하고, 각 부품별 DB를 계속적으로 추가하여 공급시스템 모듈을 확장하고, 이를 액체로켓엔진 시스템 통합 해석 모듈에 적용할 수 있다.

### 후 기

본 연구는 항공우주연구원 학연협력강화사업 기반기술 개발을 위한 성과 창출형 과제 "액체로켓엔진 시스템 통합 해석 프로그램 개발"의 일환으로 진행되었습니다. 지원에 감사드립니다.

### 참 고 문 헌

1. 김혜민, 김완조, 노태성, "액체로켓엔진 공급 배관 내 오리피스 위치에 따른 유동해석," 한국전산유체공학회 춘계학술대회 논문집, 2010, pp.451-455.
2. 임석희, 정영석, 조규식, 이한주, 오승협, "우주발사체용 추진계 요구조건 및 해외 케로신 개발현황 검토," 항공우주기술 제6권 제1호, 2007, pp.181-189.
3. 김지훈, 이한주, 정동호, 오승협, "산화제 공급배관의 분기 위치에 따른 추진기관 성능 비교," 항공우주기술 제4권 제1호, 2005, pp.179-185.
4. 2006, "Flow of Fluid Through Valves, Fittings, and Pipe," The Woodlands, Crane Valves North America, Technical Paper No.410M.
5. 이세영, 이창진, "극저온 유체의 공동 발생에 의한 오리피스 후류의 유동 불안정," 한국항공우주학회지 제36권 제7호, 2008, pp.695-702.
6. Dieter K. Huzel, David H. Huang, "MODERN ENGINEERING FOR DESIGN OF LIQUID-PROPELLANT ROCKET ENGINES," AIAA, 1992.