

액체로켓엔진 가스발생기 사이클의 배관망 해석

임태규* · 이상복* · 노태성**†

Pipe Network Analysis for Liquid Rocket Engine with Gas-generator Cycle

Taekyu Lim* · Sangbok Lee* · Tae-Seong Roh**†

ABSTRACT

A liquid rocket system consists of a combustion chamber, a gas generator, a turbo pump, and a turbine, etc. Each component is connected by supply components such as valves, pipes, and orifices. Since each component has a combined effect on engine performance, preliminary analysis for overall system must be required before the conceptual design stage. Comprehensive analysis program considered the supply system has not been developed yet. In this paper, a supply component model of the liquid rocket engine has been designed after verification of each component. The gas generator cycle with supply components has been composed. The results of the cycle has been compared to those of the F-1 engine with the representative gas generator cycle.

초 록

액체로켓은 연소기, 가스발생기, 터보펌프, 터빈 등으로 구성된 시스템이며, 각 요소들을 연결해주는 공급계 부품들로 구성되어 있다. 각 부품들이 액체로켓 성능에 복합적인 영향을 미치기 때문에 개념설계 전 시스템의 전체적인 예비해석이 반드시 필요하다. 액체로켓 엔진 시스템의 각 구성품 모듈을 고려한 통합 해석 프로그램의 개발은 이루어지지 않았다. 본 논문에서는 액체로켓 공급계 부품의 모델 구성 및 검증은 거친 후 가스발생기 사이클 구성하였으며, 대표적인 가스발생기 사이클인 F-1 엔진의 결과와 비교하였다.

Key Words: Supply System(공급계 시스템), Pipe Network(배관망), Resistance Coefficient(저항 계수), Friction Coefficient(마찰 계수), Gas Generator Cycle(가스 발생기 사이클)

1. 서 론

액체로켓 엔진은 연소실, 터보펌프, 터빈 등

여러 가지 부품의 조합들로 이루어진 시스템이며, 액체로켓 엔진 통합 설계에 있어 엔진 구성품별 압력과 무게는 액체로켓의 성능에 큰 영향을 미치는 변수라고 할 수 있다. 각 부품들은 파이프나 밸브 등의 공급계 부품들로 연결되어 추

* 인하대학교 대학원 항공우주공학과

** 인하대학교 항공우주공학과

† 교신저자, E-mail: tsroh@inha.ac.kr

진제 및 연소가스가 이동한다. 액체로켓엔진 시스템의 예비설계를 위해 기존 연구들에서는 공급계 부품에서의 손실압력을 통계적인 방법에 근거하여 연소실 압력에 대한 일정 비율로 가정하였다. 무게 추정도 마찬가지로 연소실 압력에 대한 함수로 표현하여 시스템 통합 해석 및 최적화를 수행하였으나 이러한 방법은 정확도가 떨어지며, 공급계 부품의 구성이 획일화 되어 있지 않고 사이클 및 엔진 규모에 따라 다양하기 때문에 현실적인 설계에 반영하기 어렵다는 문제가 있다[1]. 따라서 액체로켓엔진 해석 및 설계에 있어서 정확성을 높이기 위해 주어진 조건에 대한 공급계 부품 및 배관 시스템에 대한 해석이 요구된다.

액체로켓엔진 공급계 부품은 고압, 극저온, 진동, 공동현상 등 다양한 조건에서 작동하기 때문에 규격화된 부품이 아닌 사용조건에 맞는 제작품을 사용한다. 그러므로 규격화된 부품을 선택하는 방법이 아닌 주어진 조건에 따라 손실압력과 무게 등을 구할 수 있는 해석이 수행되고 그 결과에 따른 설계가 되어야 한다.

본 논문에서는 공급계 부품의 수치적 해석 모델을 이용하여 가스발생기 사이클에 대한 배관망 시스템 해석을 수행하였다.

2. 공급계 부품의 해석 모델링

2.1 공급계 부품 설계인자

공급계 부품은 파이프, 밸브, 플랜지, 분기구(Manifold), 오리피스, 벨로우즈, 굽힘관(Bend) 등으로 구성되어 있다. 이 중에서 엔진의 전체 시스템의 손실압력과 무게에 큰 영향을 미치는 부품인 파이프, 밸브, 플랜지, 굽힘관을 해석 대상으로 선정하였다. 공급계 부품 해석 모델의 입력 변수는 Table 1과 같이 직경과 길이 등 형상과 입구 압력, 속도로 하였으며 출력 변수는 손실압력과 무게로 설정하였다. 파이프의 경우 재질에 따른 내벽의 거칠기(Roughness) 또한 주요한 변수로 작용하므로 입력변수로 사용하였다.

Table 1. Performance variable of supply system components

Component	Input	Output
Pipe	Inlet Diameter Pressure Length Roughness	Pressure loss Weight
Valve	Type Pressure Velocity	Pressure loss Weight
Flange	Inlet Diameter Pressure	Weight
Bend	Inlet Diameter Pressure Bend angle	Pressure loss Weight

2.2 공급계 부품의 압력손실

기본적으로 유체의 압력손실은 네 가지 요인에 의해 발생한다. 벽면과의 마찰, 유로면적의 변화, 유체흐름의 장애물, 흐름방향의 전환으로 나눌 수 있다. 이러한 압력손실은 저항계수(Resistance Coefficient) 또는 손실계수(Loss Coefficient)와 관계가 있으며, 일반적으로 K 또는 ζ 로 나타낸다[2]. 이러한 저항계수 K 는 식(1)과 같이 표현되는 Darcy-Weisbach equation에서 수두손실 (Differential water head loss) h_f 를 구하는 데 중요한 변수가 된다[3]. V 는 유체의 속도, g 는 중력가속도를 나타낸다.

$$h_f = K \frac{V^2}{2g} \quad (1)$$

식(1)에 의해 구해진 수두손실을 식(2)에 적용하면 부품별 압력손실을 알 수 있다.

$$\Delta P = \rho g h_f = \left(\frac{1}{2} \rho V^2 \right) (K) \quad (2)$$

따라서 공급계 부품의 저항계수 K 를 구하는 것이 압력손실 추정의 주요한 부분이며, 저항계수는 부품의 종류마다 구하는 방법이 다르다.

파이프의 손실계수는 식(3)과 같이 구할 수 있다. L 은 파이프의 축 방향 길이이며 D_H 는 수력학적 직경(Hydraulic diameter)이며 단면이 원형

인 경우 내경과 일치한다.

$$K = f \frac{L}{D_H} \quad (3)$$

파이프에서 마찰계수(Friction factor)는 Moody chart나 Darcy-friction equation을 이용하여 도출할 수 있으며 본 연구에서는 Darcy-friction equation을 이용하여 구하였다[2]. Darcy-friction equation은 식(4)와 같으며, 레이놀즈 수가 4000 이하 영역인 층류의 흐름과 4000이상의 영역인 난류의 흐름으로 나누어 계산한다. ϵ 은 유로벽면의 거칠기이다.

$$\begin{cases} f = \frac{64}{Re} \\ \text{for } 0 \leq Re \leq 4,000 \\ \\ \frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left(\frac{\epsilon/D_H}{3.7} + \frac{2.51}{Re \sqrt{f}} \right) \\ \text{for } 4,000 \leq Re \end{cases} \quad (4)$$

밸브의 압력강하 원인은 앞에서 언급한 네 가지 요소가 복합적으로 일어난다. 또한 사용용도에 따라 밸브의 종류가 다르기 때문에, 종류에 따른 손실계수 Data를 추출하여 적용할 필요성이 있다. 밸브의 손실계수는 밸브의 종류와 형상에 따라 결정되는 계수로 종류와 내경에 따라 변할 수 있는 값이다. 참고문헌의 기준값을 바탕으로 하여 Globe, Gate, Direct Globe Valve의 직경에 따른 손실계수를 적용하였다[2].

굽힘관은 파이프의 변형된 흐름유도 부품으로 방향전환으로 인한 압력손실과 2차흐름(Secondary flow)에 의한 압력손실이 발생한다. 굽힘관에서의 손실계수는 경험적으로 식(5)와 같이 정리할 수 있다[4].

$$\begin{cases} K = 30f \cdot \alpha (0.0142 - 3.703 \cdot 10^{-5} \alpha) \\ \alpha < 90^\circ \\ \\ K = 30f \\ \alpha = 90^\circ \end{cases} \quad (5)$$

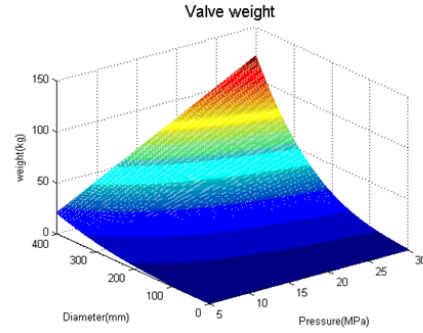


Fig. 1 Response Surface of Valve Weight

2.3 공급계 부품의 무게추정

공급계 부품의 무게추정의 대상은 파이프, 플랜지, 밸브로 한정하여 실시하였다. 각 부품들에 가해지는 압력과 직경을 바탕으로 반응면을 구성하여 무게를 추정하였다.

밸브는 우크라이나 Yuzhnoye社의 데이터를 바탕으로 하여 선형근사 한 후 압력과 무게의 관계를 확인하여 다양한 압력에 적용될 수 있도록 Fig. 1과 같은 반응면을 부품별로 구성하였다.

플랜지는 참고문헌에 대표되는 플랜지 형상을 참고하여 Hoop stress에 대해 계산하여 무게를 구하였다[5]. 식(6)은 Hoop stress의 식을 나타내며 F 는 직경과 중심축에 수직인 방향의 힘, t 는 두께, l 은 중심축 방향의 길이, σ 는 Hoop stress를 나타낸다.

$$\sigma = \frac{F}{tl} \quad (6)$$

2.4 공급계 부품 해석 모델링 검증

파이프의 검증은 층류영역의 흐름을 갖는 $0.001 \text{ m}^3/\text{min}$ ($1 \text{ l}/\text{min}$)의 유량과 0.0254 m (1 inch) 직경의 파이프를 대상으로 검증하였다. 참고문헌과 비교해 본 결과 참고문헌은 압력손실이 1.7 kPa , 해석결과는 1.14 kPa 의 손실을 보였다. 난류영역인 유량 $0.005 \text{ m}^3/\text{min}$ ($5 \text{ l}/\text{min}$)에 0.003175 m ($1/8 \text{ inch}$)의 직경을 갖는 파이프

Table 2. Flow Coefficient & Conversion Factor

	단위	Av
Cv	$USgal/min$	$Av/23.8 \times 10^{-6}$
Kv	m^3/h	$Av/27.8 \times 10^{-6}$
Av	m^3/s	1

의 해석 결과 1,483 kPa의 압력손실을 보였으며 참고문헌의 1,445 kPa의 압력손실과 비교하여 %의 차이를 보였다[6].

밸브의 검증은 식(7)을 이용하여 극저온 유사형상 밸브의 유량계수 Cv 값과 해석 결과에서 도출한 유량계수 값을 비교하여 검증하였다.

$$\Delta P = K \times \left(\frac{1}{2} \rho V^2 \right) = \rho \times \left(\frac{Q}{Av} \right)^2 \quad (7)$$

식(7)에서 Av 는 유량계수를 나타내는 표기로 일반적으로 사용되는 유량계수 Cv 와 단위만 다르며 같은 의미의 변수이다. 본 연구에서 사용되는 단위인 SI단위계에 적용할 수 있도록 Table 2와 같이 단위 환산을 수행하였다[3].

검증은 글로브밸브를 대상으로 실시하였으며 작동유체는 액체산소로 비중 1.2, 점성은 $1.9064 \times 10^{-4} \text{ kg/m} \cdot \text{s}$, 질유량은 374.88 kg/s 로 계산하였다.

해석결과의 유량계수를 문헌과 비교한 결과는 Fig. 2와 같다.

유량계수 Cv 는 평균적으로 $0.000454 \text{ m}^3/s(7.2 \text{ USgal/min})$ 의 차이를 보인다[7]. 이를 Av 로 환

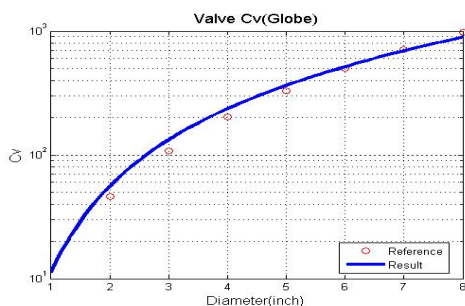


Fig. 2 Comparison of Flow Coefficient between Reference and Result

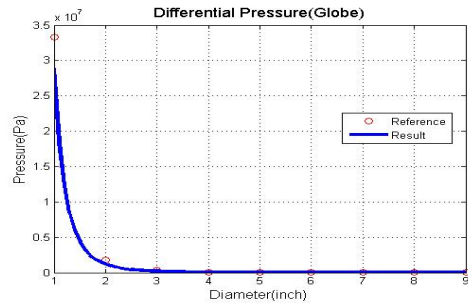


Fig. 3 Comparison of Differential Pressure between Reference and Result

산하면 $1.7136 \times 10^{-4} \text{ m}^3/s$ 로 매우 작은 값이다. Fig. 3에는 압력을 비교하여 그래프로 나타내었으며, 전체적으로 7.2%의 오차를 보인다.

3. 배관망 해석

3.1 배관망 구성

액체로켓엔진 사이클 중에서 가장 많이 이용되는 가스발생기 사이클을 대상으로 해석을 실시하였으며, 배관망 해석 방법은 키르히호프 법칙을 이용하여 모사하였다[8].

검증대상은 F-1엔진이며, 공급계 부품의 구성은 Schematic diagram을 참고하여 Fig. 4와 같이 해석에 용이하도록 단순화 하였다[9].

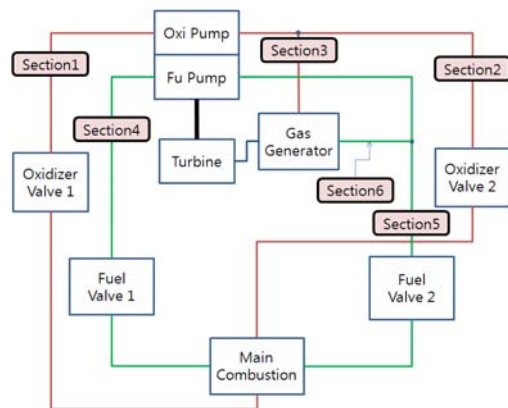


Fig. 4 Schematic Diagram of F-1 Engine Supply System

3.2 배관망 해석 및 결과

분기점에서는 비압축성 유체임을 가정할 때 유입량의 합과 출력량의 합은 같다. 따라서 식(7)에 적용하기 위해 유량을 식(8)의 형태로 바꾸어, 식(9)와 같이 q_i 라는 변수를 추가했다. 여기서 i 는 1부터 연결점(node point)+2사이의 숫자이며, 세분화된 흐름을 나타낸다.

$$Q = \frac{2A}{\rho v} \times \frac{1}{2} \rho v^2 = Av \quad (8)$$

$$q_i = \frac{2A_i}{\rho v_i} \quad (9)$$

$$[K_i(\rho, d, l, \alpha, v)] \left[\frac{1}{2} \rho v_i^2 \right] = [\Delta P_i] \quad (10)$$

$i: 1 \sim \text{node point} + 2$

저항계수 K는 밀도, 직경, 길이, 굽힘각 그리고 속도에 대한 함수이며, Fig. 4에서 구성한 Schematic diagram을 식(9)과 (10)에 의해 행렬로 구성하면 식(11)과 같이 구성할 수 있다. 1~6열까지는 Section 1부터 6의 저항계수를 나타내며, 7, 8열은 분기점의 유량을 나타내고 있다.

$$\begin{bmatrix} K_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & K_2 & 0 & K_4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & K_2 & K_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & K_5 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & K_6 & 0 & K_8 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & K_6 & K_7 & 0 & 0 \\ 0 & q_2 & -q_3 & -q_4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & q_6 & -q_7 & -q_8 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \\ I_7 \\ I_8 \\ I_9 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{O_1} - P_C \\ P_{O_2} - P_C \\ P_{O_2} - P_G \\ P_{F_1} - P_C \\ P_{F_1} - P_C \\ P_{F_2} - P_G \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

F-1 엔진에 대한 참고자료는 시스템 각 부분의 직경과 질유량을 알고 있으며, 주 연소실에 들어가기 전 Dome과 Injector의 압력 또한 알고 있는 입력변수이기 때문에 압력손실을 알 수 있다.

Table 4에 F-1 엔진에 대하여 Section별 해석 결과를 나타내었다. Section 2, 4, 5는 2~5%의 차이를 보이며, 이는 빠른 유속과 방향전환으로 인한 유동박리와 부품을 연결하면서 생기는 공간

Table 4. Pressure Loss between Reference and Result

Section	Pressure Loss(Pa)		%
	Reference	Result	
1	1.54×10 ⁶	1.36×10 ⁶	-11.7%
2	1.21×10 ⁶	1.18×10 ⁶	-2.5%
3	3.00×10 ⁶	2.05×10 ⁶	-31.6%
4	3.81×10 ⁶	3.68×10 ⁶	-3.4%
5	3.56×10 ⁶	3.49×10 ⁶	-2.0%
6	2.40×10 ⁶	1.63×10 ⁶	-32.1%

으로 인한 오차로 보인다. Section 3, 6은 30% 정도의 큰 차이를 보이며, 산화제 공급라인과 연료 공급라인에서 크기가 상대적으로 작은 가스 발생기 관로로 들어가며 생기는 압력손실로 생각된다.

사이클과 배관의 연결방식에 따라 매트릭스의 형태가 다르지만 연결점(node point)과 연결선의 개수가 같기 때문에 다양한 사이클 모델에 적용할 수 있다. 요소별로 압력강하 값과 무게를 추정할 수 있으며, 산화제와 연료펌프의 요구 토출압을 구할 수 있다.

4. 결 론

공급계 부품의 압력손실과 무게평가 해석 모델링을 실시 및 검증하였다. 또한 다양한 액체로켓엔진 해석 및 설계에 적용하기 위해서 다양한 엔진에 적용할 수 있도록 하였다. 시스템 구성의 신뢰성 검증을 위해 가스발생기 사이클의 대표적인 엔진인 F-1 엔진의 공급계 시스템을 배관망 해석에 적용하였다. 그 결과 관로로 들어가며 생기는 손실압력으로 생각되는 Section 3, 6에서는 30%이내의 압력손실오차를 확인하였다. Section 1에서는 10%정도의 오차가 나타나며, Section 2, 4, 5에서는 2~3%의 오차가 나타남을 볼 수 있었다. Section 3, 6은 입구흐름에 대한 보정이 필요하며, Section 2, 4, 5에 대해서는 향후 요구조건에 따른 성능변수를 제시할 때 활용될 수 있을 것으로 보인다.

차후 유체의 속도 및 흐름에 따라 생성되는 박리(separation), 공동 현상 등을 고려한 압력강하 추정과 함께 다른 부품(Orifice, Bellows 등)들에 대한 추가적인 현상들을 고려해 더 적합한 모델링을 구성해야 한다. 또한 공급계 부품 모델링을 바탕으로 사용자가 요구하는 설계조건에 따라서 최적화된 유량 및 길이를 구할 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 한국항공우주연구원 학연협력강화사업(성과창출형과제 “액체로켓엔진 시스템 통합 해석 프로그램의 개발”)의 지원으로 수행되었으며, 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 이상복, “유전알고리즘을 이용한 액체로켓엔진 설계 최적화”, 한국추진공학회지 16권 제2호, 2011년, 25~33p
2. Robert D. Blevins, "Applied fluid dynamics handbook", Van Nostrand Reinhold Co., 1984
3. Peter Smith and R. W. Zappe, "Valve Selection Handbook", Fifth Edition, 2004
4. 김혜민, "액체로켓 엔진 공급시스템 연구", 인하대학교, 2011년
5. D. Huzel and D. Huang, "Modern Engineering for Design of Liquid Rocket Engine" Vol. 147, AIAA, 1992
6. "Flow of Fluids Valves, Fittings and Pipe" Metric edition, CRANE
7. Frank M. White, "Fluid Mechanics", McGRAW-HILL, Fifth edition
8. 하종만, "배관망 해석의 이해와 활용", 유체기계저널 : 제6권, 제2호, 2003
9. C. L. McDearmont and B. H. Henson and C. M. Webster, "Dynasar Simulation of the Saturn F-1 Engine Propulsion System", General Electric, 1965