

# 액체로켓엔진 천이 동특성 예측

## Part- I : 주요 구성품 동특성 모델링 및 검증

김형민\* · 이국진\* · 윤용섭\*

### Dynamic Characteristics Prediction of Liquid Rocket Engine for the Transient Sequence

#### Part-I : Engine Component Modelling and Validation

Hyungmin Kim\* · Kukjin Lee\* · Woongsup Yoon\*

#### 초 록

액체로켓엔진 시스템의 시동 및 정지 또는 추력 제어와 같은 천이 작동시 동특성을 예측하기 위한 선행 연구로서 추진제 공급 시스템의 구성품에 대한 동특성 모델링을 수행하였다. 연료 공급계통과 산화제 공급 계통의 구성품들은 재생냉각채널을 제외하고 같은 것으로 가정하였다. 동특성 모델링의 대상 구성품은 펌프, 관로, 오리피스, 제어 밸브, 재생냉각채널, 인젝터 등이며 실제 엔진 시스템의 축소 모형에 대한 수력시험을 통해 각 구성품의 동특성 모델링을 검증하였다.

**Key Words:** Liquid Rocket Engine(액체로켓엔진), Dynamic Characteristic(동특성), Propellant Feeding System(추진제 공급 시스템), Hydraulic Experiment(수력시험)

#### 1. 서 론

액체로켓엔진의 설계과정은 크게 정적성능 설계과정과 동적성능 설계과정으로 나눌 수 있다.

정적성능설계는 엔진 시스템의 목표추력을 기준으로 시스템의 세부 구성품의 형상 및 성능을 결정하는 과정으로 국내에서는 항공우주연구원을 중심으로 KSR-III 개발과 더불어 노즐 설계 및 성능해석, 터보펌프 설계 그리고 가스발생기 등의 설계와 해석이 수행 되었다[1, 2, 3]. 또한 Yang et al.에 의해서는 액체로켓엔진의 주요 구

성품에 대한 설계와 이를 바탕으로 통합 모듈화 프로그램이 개발 되었다[4, 5].

각 구성품의 형상과 성능 범위가 결정되면 이를 바탕으로 엔진 시스템의 시동 및 정지 그리고 추력제어와 같은 엔진의 천이 작동 구간에서의 동특성을 예측하기 위한 동적성능 설계과정을 수행한다. 그 이유는 엔진 시동 및 정지시 터보펌프에 의한 급격한 압력변화로 인해 발생하는 수격현상이나 추력 제어시 주기적인 압력 변화에 의한 저주파 불안정이 발생하기 때문이다 [6, 9].

우주발사체 선진국인 미국의 경우, 천이 작동시 문제점을 해결하기 위해 실제 엔진의 구성품에 대한 실험 데이터와 모델링을 바탕으로 액체

\* 연세대학교 기계공학과  
연락처, E-mail: wsyoon@yonsei.ac.kr

로켓엔진 시스템 천이 특성 예측 프로그램인 ROCETS(ROcket Engine Transient Simulation)을 개발 하여 동특성능설계에 사용하고 있다[7].

ROCETS에 포함된 구성품 모델링 중 터보펌프 모델은 펌프 회전수와 유량에 따른 양정을 실험 데이터로부터 찾고 그 값을 Polytropic equation에 대입, 펌프에 의한 압력 상승을 계산한다. 관로는 경우에 따라 관성과 압축성을 고려하도록 모델링 하였다. 유로내의 저항으로 작용하는 나머지 구성품들은 오리피스 모델링으로 대신하였다.

일본의 경우, 엔진 시스템의 천이 동특성 예측을 위해 REDS(Rocket Engine Dynamic Simulator)를 개발하였다[8]. REDS의 모델링 중 가압 장치인 터보펌프는 양정을 펌프의 회전수와 유량으로부터 구하게 되며 양정을 펌프의 회전수와 유량으로 정의하기 위해 동특성 계수를 사용한다. 관로는 체적 요소의 연결로 모델링 하였으며 각 체적요소에 대해 1차원 보존방정식과 운동량 방정식, 그리고 에너지 방정식을 사용하여 시간에 따른 각 체적 요소내의 밀도, 속도, 압력 등의 물리량을 계산 하였다. 관로에 설치된 밸브, 오리피스, 인젝터 등은 각각에 대한 저항 계수를 특정 체적 요소에 배치하여 압력 강하와 유량 변화를 계산하도록 모델링 하였다. 또한 각 구성품에 의한 저항을 계산하기 위해 실제 엔진 구성품에 대한 실험 데이터를 사용한다.

터보펌프 회전수에 대한 모델링의 경우, ROCETS나 REDS 모두 펌프와 터빈의 동력(토크)차이에 의한 가속을 모델링 하여 회전수 증가를 계산 하였다. 그러나 펌프의 출구 압력을 계산하는데 있어 ROCETS는 펌프의 성능곡선과 Polytropic process를 사용하지만 REDS는 펌프의 양정이 회전수와 유량의 함수로 표현된 식을 사용하였다. 이러한 차이로 인해 REDS의 터보펌프 모델링은 ROCETS의 터보펌프 모델링에 비해 상대적으로 많은 변수와 동특성 계수를 고려해야 하며 실험을 통해 측정해야 하는 계수가 많다. 또한 실험 데이터가 확보된 상황에서 굳이 각 관로에 대한 유동장을 계산하는 것보다는 관로 모델링과 실험데이터를 바탕으로 계산하는

것이 계산 시간이나 비용 면에서 효율적이다.

따라서 본 연구에서는 ROCETS, REDS 등과 같은 액체로켓엔진 시스템의 천이 동특성 예측 프로그램 작성에 필요한 엔진 시스템의 주요 구성품인 터보펌프, 관로, 오리피스, 제어밸브, 재생냉각채널, 인젝터에 대한 수학적 모델링을 수행하였다. 수력 시험을 통해 모델링에 필요한 동특성 계수를 측정하였으며 모델링 검증에 필요한 데이터를 획득 하였다.

구성품에 대한 동특성 모델링과 수력 시험 결과를 비교하였으며 이를 통해 모델링의 타당성을 확인 하였다.

## 2. 구성품의 동특성 모델링 및 검증

동특성 모델링의 대상이 되는 개방형 사이클 엔진 시스템은 Fig. 1과 같으며 본 연구에서는 수력 시험을 통해 검증이 가능한 구성품(굽은선 사각형)인 터보펌프와 관로, 오리피스, 제어밸브, 재생냉각채널, 인젝터에 대한 모델링을 수행하였다.

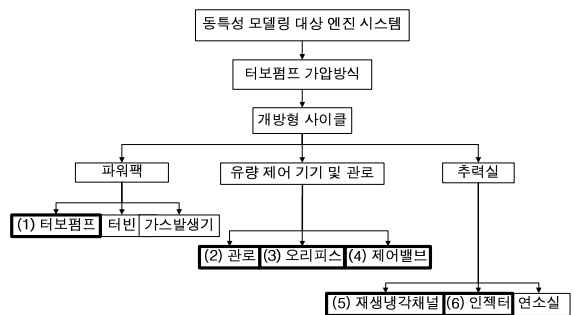


Fig. 1 The LRE system for modelling

터보펌프의 경우 모델링이 단순하고 실험을 통해 측정해야 하는 데이터가 상대적으로 적은 Polytropic process를 사용 하였다[7]. 관로의 경우 모델링을 통해 일정 길이의 관로에 채워진 부피의 유체에 대한 관성과 마찰에 의한 손실을 고려하였다. 제어밸브는 주어진 개도율에 대한 밸브의 유량 계수 정의를 통해 모델링 하였으며 재생냉각채널, 인젝터는 오리피스의 유량계수 관계식을 사용하여 모델링 하였다.

구성품의 동특성 모델링에 대한 검증을 위해 수력 시험을 수행하였다. 또한 동특성 계수와 구성품의 상류 조건을 입력값으로 하여 구성품의 하류 압력 및 유량 조건을 계산하였으며 계산 결과와 수력 시험 결과를 비교 하여 구성품 모델링을 검증 하였다.

### (1) 터보펌프

터보펌프는 Polytropic process를 사용하여 주어진 펌프의 입구 조건에 따른 펌프의 출구 조건을 계산하였으며 아래의 Eq. 1을 사용하였다.

$$P_2 = \rho_2 \left[ \frac{gH}{\beta} + \frac{P_1}{\rho_1} \right] \quad \text{Eq. 1}$$

$$\text{Where, } \beta = \ln(P_2/P_1) / \ln \left[ \left( \frac{P_2}{P_1} \right) \left( \frac{\rho_1}{\rho_2} \right) \right]$$

Eq. 1의  $P_1$ ,  $P_2$ 는 펌프의 입구와 출구 압력을 나타내며  $H$ 는 펌프의 양정,  $g$ 는 중력가속도,  $\rho_1, \rho_2$ 는 펌프의 입구 및 출구 압력을 나타낸다.

펌프의 주어진 유량에 따른 양정은 펌프의 성능을 나타내는 유량계수와 양정계수의 관계로부터 얻을 수 있다.

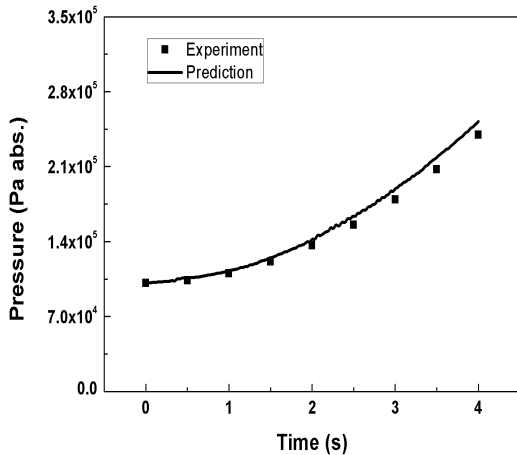


Fig. 2 Pump outlet pressure (prediction and experiment result)

Figure 2은 Polytropic process를 사용한 원심형 펌프의 모델링과 실제 원심형 펌프의 시동시 출구 압력을 비교 한 것이며 펌프 모델링이 실제 원심형 펌프의 출구 압력을 최대 오차 5% 미만으로 예측하는 것을 확인 하였다.

### (2) 추진제 관로

추진제 관로의 경우, 관로의 입구와 출구의 압력, 관로의 마찰 손실 그리고 관로를 흐르는 추진제의 일정 부피에 대한 관성을 고려하였으며 다음과 같은 Eq. 2를 사용하였다[7, 9].

$$\frac{dW}{dt} = (\Delta P - \Delta P_{loss}) \frac{A}{L} \quad \text{Eq. 2}$$

Eq. 2에서  $W$ 는 질유량,  $\Delta P$ 는 관로의 입구와 출구의 압력차,  $A$ 는 관로의 단면적,  $L$ 은 모델링 대상이 되는 관로의 길이,  $\Delta P_{loss}$ 는 관로의 입구와 출구의 압력차에 의한 마찰 손실을 나타내며 아래의 Eq. 3과 같으며 관로의 수력 시험을 통해 얻을 수 있다.

$$\Delta P_{loss} = \frac{W^2}{\rho_{AV} \alpha} \quad \text{Eq. 3}$$

Eq. 3의  $\rho_{AV}$ 는 유체의 평균 밀도이며  $\alpha = \rho_{AV} \cdot CF^2$ ,  $CF$ 는 입구와 출구 직경이 동일한 관로나 밸브에서 유량과 압력차에 대한 비율로써  $CF = \frac{Q}{\sqrt{\Delta P}}$ 와 같이 정의 된다[7, 10].

Figure 3는 관로 모델링을 통한 관로의 출구 유량 예측결과와 수력 시험결과를 비교한 것이다. 실제 액체로켓엔진 시스템의 관로에서는 관로의 직경이 100mm 가까이 되기 때문에 일정 길이의 관로 내에서의 유체가 압력을 받아 가속되기 까지 관성의 효과가 나타나지만 본 수류시험과 관로모델링의 경우 직경이 15.5mm, 길이 340mm로써 Fig. 3에서 관성에 의한 효과를 찾아보기 힘들다.

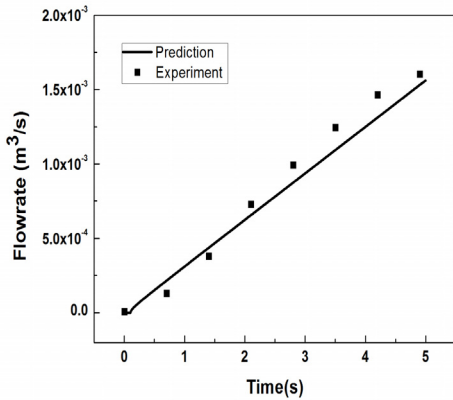


Fig. 3 Pipe outlet flow rate (prediction and experiment result)

### (3) 오리피스

오리피스 모델링의 경우 베르누이 방정식과 연속 방정식을 통해 유도되는 유량계수 식을 사용 하였으며 아래의 Eq. 4와 같다.

$$P_{outlet,orf} = P_{inlet,orf} - C_F \frac{\rho Q_{pump,out}^2}{2A_{orf,throat}^2} \quad \text{Eq. 4}$$

Eq. 4에서 유량 계수인  $C_F$ 는 수력 시험을 통해 구할 수 있으며  $A_{orf,throat}$ 는 오리피스의 목 단 면적이다.

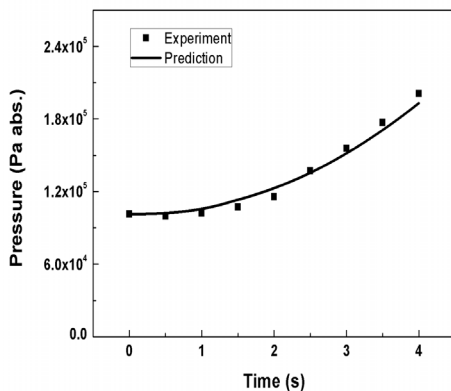


Fig. 4 Orifice outlet pressure(prediction and experiment result)

Figure 4는 오리피스의 모델링 예측 결과와 수력 시험의 결과를 비교한 것이며, 최대 4% 정도의 오차 내에서 실제 오리피스의 출구 압력을 예측하고 있다.

### (4) 제어밸브

제어밸브는 주어진 밸브의 개도에서 밸브의 입·출구의 압력차와 체적 유량과의 관계를 나타내는  $CF$ 를 사용하여 모델링 하였으며 관로에서 사용한 것과 같은 것이다. 수력 시험을 통해 주어진 개도에 따른  $CF$  값을 얻을 수 있으며 모델링에서 구하고자 하는 물리량은 밸브의 출구 압력이다.

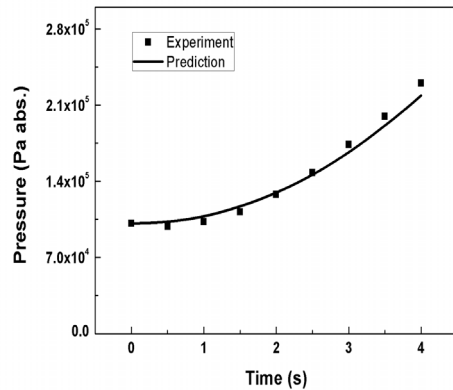


Fig. 5 Control valve outlet pressure(prediction and experiment result)

Figure 5은 제어밸브 모델링과 수력시험 결과를 비교한 것으로써 제어밸브의 개도율(밸브의 완전 개방을 100%로 함.)을 100% 하였을 때의 밸브 출구 압력을 나타낸다. 밸브의 경우 개도율에 따른  $CF$ 값을 수력시험을 통해 테이블화 하여 입구 압력에 따른 출구의 압력을 계산하기 때문에 데이터 확보에 대한 번거로움이 있으나 모델링을 통한 예측이 타당함을 검증 결과를 통해 알 수 있다.

### (5) 재생냉각채널

재생냉각채널의 경우 연료 공급 계통에만 적용되는 모델링이다. 모델링의 단순화를 위해 열전달 효과를 무시하였으며 각 채널을 통과 하면서 발생하는 압력 손실의 합을 한 개의 오리피스스를 통과하면서 발생하는 압력손실이라고 가정하였다. 따라서 재생냉각채널의 모델링은 오리피스스의 유량계수 계산식으로 대체 하였으며 Eq. 5 과 같다.

$$P_{outlet,regen} = P_{inlet,regen} - C_F \frac{\rho Q_{regen}^2}{2A_{regen}^2} \quad \text{Eq. 5}$$

Eq. 5에서  $A_{regen}$ 은 재생냉각채널의 전체 단면적의 합이며  $C_F$ 는 재생냉각채널의 축소모형을 사용한 수력 시험을 통해 얻을 수 있다.

오리피스스와 동일한 모델링을 사용한 재생냉각채널의 모델링 예측결과와 수력 시험 결과의 비교는 Fig. 6에 나타내었다. 이러한 결과를 바탕으로 재생냉각채널의 경우 열전달의 효과를 배제한 수력학적인 면에서 오리피스스와 같은 압력저항으로 모델링 하는 것이 타당함을 확인 할 수 있다.

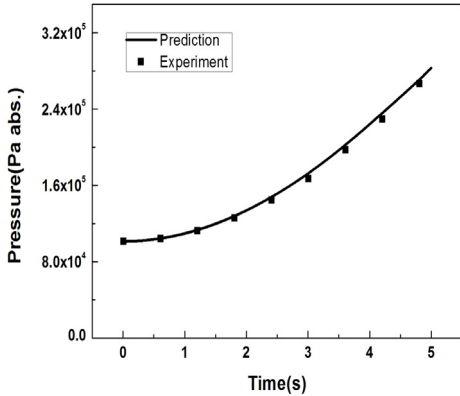


Fig. 6 Regenerative cooling channel outlet pressure (prediction and experiment result)

### (6) 인젝터

주연소실에 연료와 산화제를 분사해 주는 인젝터의 모델링은 출구가 대기로 노출된 여러 개

의 오리피스스 집합으로 가정하였으며 Eq. 6은 이러한 인젝터의 모델링을 나타낸 것이다.

$$Q_{inj} = C_F A_{inj} \sqrt{\frac{2(P_{inlet,inj} - P_{outlet,inj})}{\rho}} \quad \text{Eq. 6}$$

$A_{inj}$ 는 인젝터 분사공의 단면적의 합을 나타내며  $P_{inlet,inj}$ 는 인젝터의 플라넘에서의 압력이며  $P_{outlet,inj}$ 는 주연소실의 압력이다. 그러나 본 연구에서는 수력시험을 통한 모델링의 검증을 수행하였기 때문에 주연소실의 압력은 대기압으로 대체하였다.  $C_F$  값의 경우 다른 구성품들과 마찬가지로 수력시험을 통해 얻을 수 있다.

Figure 7은 인젝터의 분사조건이 대기압인 경우에 인젝터의 출구 유량에 대한 예측 결과와 수력 시험 결과를 비교 한 것이며, 인젝터를 여러개의 오리피스스로 가정한 모델링을 통해 인젝터의 출구 유량을 예측할 수 있다는 점을 알 수 있다.

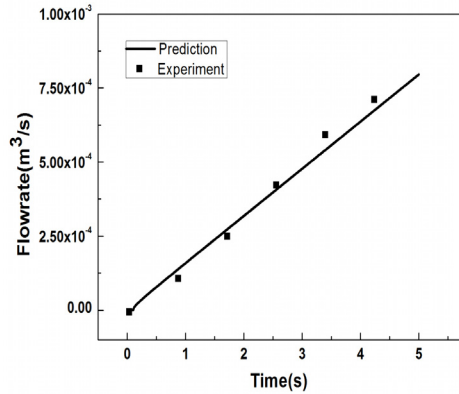


Fig. 7 Injector flow rate (prediction and experiment result)

### 3. 수력 시험 장치 구성 및 시험 방법

구성품의 동특성 모델링에 대한 검증과 동특성 계수 측정을 위해 전기 모터에 의해 구동되는 설계 유량  $8m^3/h$ , 양정  $18m$ 의 단단 원심형 펌프를 가압 장치로 사용하였다. Fig. 8는 각각

의 구성품에 대한 수력시험을 위한 기본 실험 설비를 나타내며 Test section 부분에 실험의 대상이 되는 구성품이 장착된다.

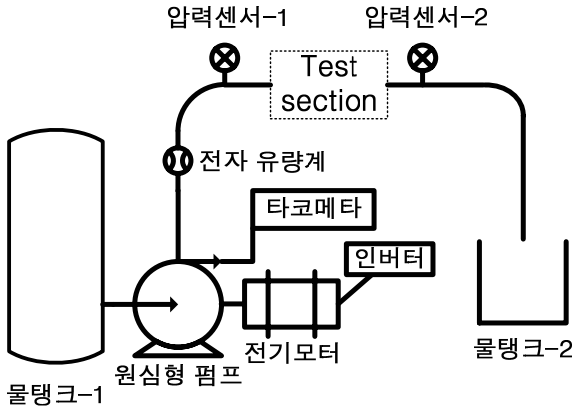


Fig. 8 Hydraulic experiment set up

구성품의 입구와 출구 부분의 압력을 측정하기 위해 Test section의 상류와 하류에 압력 센서-1과 압력센서-2를 설치하였으며 유량 측정을 위해 펌프 출구 부분에 전자 유량계를 설치하였다. 펌프와 전자유량계, 압력센서, Test section을 연결하는 관로는 직경이 15.5mm인 것을 사용하였다. 회전수의 경우 비접촉식 타코메터를 통해 측정하였으며 펌프를 구동하는 전기모터를 제어하기 위해 인버터를 사용하였다.

수력 시험 방법은 Test section에 시험 대상이 되는 구성품을 장착 한 다음 관로와 구성품에 물이 채워진 상태에서 펌프를 가동시켜 전자유량계와 압력센서-1, 압력센서-2, 타코메터의 측정 신호를 저장하는 과정으로 이루어진다. 펌프의 설정은 초기 회전수 0RPM에서 최대 회전수인 1750RPM에 도달하는데 걸리는 시간을 5초로 하였다. 인젝터의 경우 펌프의 설정은 다른 구성품들과 같으나 출구 압력을 대기압으로 가정하였기 때문에 압력센서-2를 통한 압력 측정은 이루어지지 않았다.

#### 4. 결 론

액체로켓엔진 시스템의 천이 동특성 예측 모

델링을 위한 선행단계로써 주요 구성품에 대한 동특성 모델링과 수력 시험을 통한 구성품 별 동특성 모델링에 대한 검증을 수행하였다.

동특성 모델링의 대상 구성품은 수력시험을 통해 검증이 가능한 원심형 펌프와 추진제 이송 관로, 오리피스, 제어밸브, 재생냉각채널, 인젝터 등이다. 실제 액체로켓엔진 시스템의 각 구성품에 대한 축소 모형을 사용하여 수력시험을 수행하였으며 모델링의 예측결과와 수력 시험 결과를 비교, 주요 구성품에 대한 모델링을 검증 하였다. 또한 재생냉각채널, 인젝터는 일종의 변형된 오리피스로 가정하여 모델링 하였으며 모델링의 예측결과를 수력 시험 결과와 비교, 모델링의 타당성을 확인 하였다.

#### 후 기

본 연구는 한국과학재단을 통해 교육과학기술부의 우주기초원천기술개발 사업(NSL, National Space Lab)으로부터 지원받아 수행되었습니다 (2010-0015079).

#### 참 고 문 헌

1. 조원국, 설우석, "재생냉각 연소실 설계 프로그램 개발", 한국항공우주학회지, 제 32권 3호, 2004.
2. 최창호, 김진환, 양수석, 이대성, "액체로켓용 터빈 시스템 설계", 항공우주기술, 제1권 제1호, KARI, 2002.
3. 공철원, 윤중훈, 장영순, 이영무, "KSR-III 복합재 가압탱크의 설계 및 제작", 항공우주기술 제2권 제2호, KARI, 2003.
4. 양희성, 박병훈, 윤운섭, "액체 로켓 엔진 시스템 개념설계를 위한 모듈화 프로그램 Part I : 주요 구성품 설계", 한국항공우주학회, 2007
5. 박병훈, 양희성, 윤운섭, "액체 로켓 엔진 시스템 개념설계를 위한 모듈화 프로그램 Part II : 통합 모듈화 프로그램", 한국항공우주학회, 2007

6. 김형민, 고태호, 김상민, 윤웅섭, “펌프 가압식 추진제 공급유로에서의 오리피스 개도에 따른 동적수력 특성 변화”, 한국추진공학회, 2009
7. Mason, J. R., Southwick, R. D., “Large Liquid Rocket Engine Transient Performance Simulation System ”, NASA-CR-184099, 1991
8. Toshiya KIMURA, Masahiro TAKAHASHI, Yoshio WAKAMATSU, Keiichi HASEGAWA, Nobuhiro YAMANISHI, Atsushi OSADA, Rocket Engine Dynamic Simulator (REDS), JAXA, 2004
9. 윤웅섭, 김영수 역, “로켓공학”, 경문사, 2004
10. 홍문근, “CC 산화제 개폐밸브 유량계수 향상에 관한 연구”, 한국항공우주연구원, 항공우주기술, 제8권 2호 2009
11. Dieter K. Huzel and David H. Huang, Modern Engineering for Design of Liquid-Propellant Rocket Engines, AIAA, 1992