

研究論文

액체로켓엔진 천이작동 예측을 위한 구성품 동특성 모델링

김형민* · 이국진** · 윤웅섭***†

Modeling of Liquid Rocket Engine Components Dynamics at Transient Operation

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

ABSTRACT

Mathematical modelling for liquid rocket engine(LRE) main components were conducted to predict the dynamic characteristics when the LRE operates at the transient condition, which include engine start up, shut down, or thrust control. Propellant feeding system is composed of fuel and oxidizer feeding components except for regenerative cooling channel for the fuel circuit. Components modeling of pump, pipe, orifice, control valve, regenerative cooling channel and injector was serially made. Hydraulic tests of scale down component were made in order to validate modelling components. The mathematical models of engine components were integrated into LRE transient simulation program in concomitant with experimental validation.

초 록

액체로켓엔진 시스템의 시동 및 정지 또는 추력 제어와 같은 천이 작동 시 동특성을 예측하기 위한 선행 연구로서 추진제 공급 시스템의 구성품에 대한 동특성 모델링을 수행하였다. 연료 공급 계통과 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 수류시험을 통해 각 구성품의 동특성 모델링을 검증하였다. 수치적인 방법을 바탕으로 구성품에 대한 동특성 모델링을 통합하였으며 축소 모형으로 연결된 수류시스템을 사용한 수류시험을 통해 통합 동특성 예측프로그램을 검증하였다.

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

접수일 2010. 7. 28, 수정완료일 2011. 1. 15, 게재확정일 2011. 1. 21

* 정회원, 연세대학교 기계공학과

** 학생회원, 연세대학교 기계공학과

*** 종신회원, 연세대학교 기계공학과

† 교신저자, E-mail: wsyoon@yonsei.ac.kr

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 구성품에 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 정지 시 터보펌프에 의한 급격한 압력변화로 인해 발생하는 수격현상이나 추력 제어 시 주기적인 압력 변화에 의한 저주파 불안정이 발생하기 때문이다[6, 9].

우주발사체 선진국인 미국의 경우, 천이 작동 시 문제점을 해결하기 위해 실제 엔진의 구성품에 대한 실험 데이터와 모델링을 바탕으로 액체로켓엔진 시스템 천이 특성 예측 프로그램인 ROcket Engine Transient Simulation(ROCETS)을 개발 하여 동적성능설계에 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 동특성을 예측하기 위해 Rocket Engine Dynamic Simulator(REDs)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 보존 방정식과 운동량 방정식, 그리고 에너지 방정식

을 사용하여 시간에 따른 각 체적 요소내의 밀도, 속도, 압력 등의 물리량을 계산 하였다. 관로에 설치된 밸브, 오리피스, 인젝터 등은 각각에 대한 저항계수를 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 동특성 계수가 많다는 단점이 있다. 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. 수류 시험을 통해 모델링에 필요한 동특성 계수를 측정하였으며 모델링 검증에 필요한 데이터를 획득 하였다.

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

또한 각 구성품의 동특성 모델링을 통합하는 과정에서 펌프 하류의 구성품에 의한 유로저항이 펌프의 토출 압력에 미치는 영향을 고려하기 위해 implicit method를 도입하였다. 통합된 동특성 모델링 검증하기 위해 각 구성품들을 사용하여 액체로켓엔진 시스템의 연료 공급 계통을

모사한 수류 시스템을 구성, 원심형 펌프의 시동 시 각 구성품의 상류와 하류에 대한 압력과 시스템의 유량을 측정 하였다.

2. 동특성 계수 측정 및 동특성 모델링
검증을 위한 수류 시험

실제 액체로켓엔진 시스템의 구성품에 대한 동특성 계수를 측정하고 모델링을 검증하기 위해서는 정상성능설계과정을 통해 결정된 구성품의 형상과 성능데이터를 사용하게 된다. 그러나 본 연구에서는 실기형 엔진의 구성품을 사용하는데 있어 부품 제작에 필요한 설계 데이터나 제작 기술, 비용 등에 대한 문제가 있기 때문에 실제 구성품과 유사한 장치를 제작 또는 상용품으로 대체하였다.

가압 장치인 펌프는 전기 모터에 의해 구동되는 설계 유량 8 m³/h, 양정 18 m의 단단 원심형 펌프를 가압 장치로 사용하였다. 관로는 길이 1.44 m, 내경 15.5 mm인 상용 파이프를 사용하였으며 오리피스는 관로의 내경에 대해 개도율 60%인 것을 사용하였다. 제어밸브는 상용품인 선광자동밸브사의 글로브 타입 밸브인 SPCV-1을 사용하였다. 재생냉각채널은 직경 92 mm, 길이 230 mm의 아크릴 기둥에 직경 5 mm의 채널 10개를 36도 간격으로 가공하였다. 또한 아크릴 기둥의 중심축으로부터 각 채널의 중심까지의 거리는 42 mm이다. 인젝터의 경우 직경 2 mm, 분사공 16 개인 단공노즐 집합으로 가정하여 장치를 가공하였다.

Figure 1은 각각의 구성품에 대한 수류시험을 위한 기본 실험 설비를 나타내며 Test section 부분에 실험의 대상이 되는 구성품이 장착된다.

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 15.5 mm인 것을 사용하였다. 회전수의 경우 비접촉식 타코메터를 통

해 측정하였으며 펌프를 구동하는 전기모터를 제어하기 위해 인버터를 사용하였다.

구성품의 연결 상태를 확인하기 위해 Fig. 1에 나타낸 실험장비에서 압력센서-2 하류에 밸브를 설치하여 밸브를 폐쇄한 후 펌프를 가동에 따른 누수여부를 확인 하였다. 압력 센서, 타코메터, 유량계의 작동 상태와 재현성 확보를 위해 펌프 가동에 의한 유량과 압력을 반복 측정하였으며 아래 Fig. 2는 펌프의 반복 가동에 따른 토출 압력 변화를 나타낸다.

수류 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 0 RPM에서 최대 회전수인

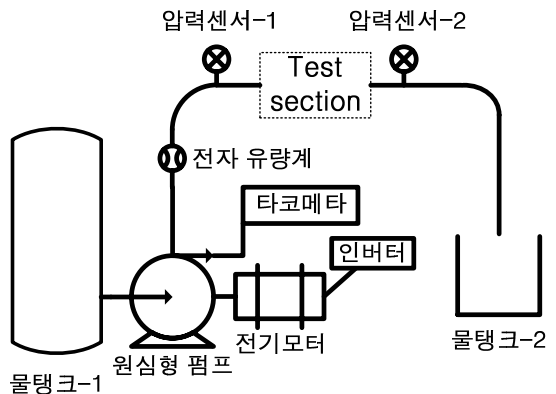


Fig. 1 Set up of the component hydraulic tests

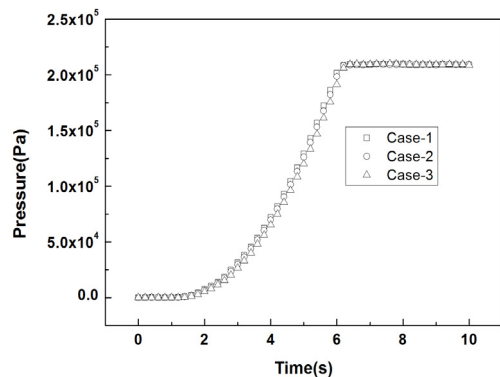


Fig. 2 Reproducibility of the test result

1750 RPM에 도달하는데 걸리는 시간을 5초로 하였다. 인젝터의 경우 펌프의 설정은 다른 구성품과 같으나 출구 압력을 대기압으로 가정하였기 때문에 압력센서-2를 통한 압력 측정은 이루어지지 않았다.

3. 구성품의 동특성 모델링 및 검증

동특성 모델링의 대상이 되는 개방형 사이클 엔진 시스템은 Fig. 3과 같으며 본 연구에서는 수류 시험을 통해 검증이 가능한 구성품(굵은선 사각형)인 터보펌프와 관로, 오리피스, 제어밸브, 재생냉각채널, 인젝터에 대한 모델링을 수행하였다.

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 천이 동특성을 예측하기 위해 필요한 동특성계수는 앞서 설명한 Fig. 1의 실험 장치를 통해 측정된 펌프의 유량계수-양정계수와 관로, 오리피스, 밸브, 재생냉각채널, 인젝터의 유량계수를 사용하였다.

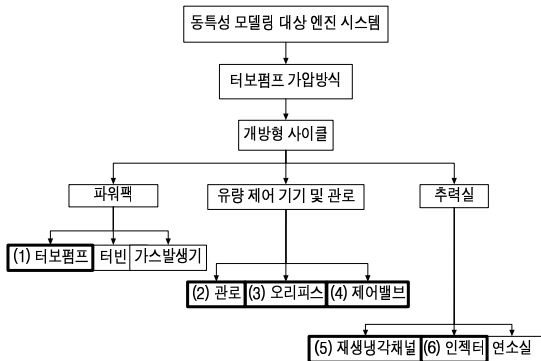


Fig. 3 Modeling cascade

구성품의 동특성 모델링을 바탕으로 작성된 구성품별 천이 동특성 예측프로그램은 수류시험을 통해 측정된 구성품의 동특성 계수와 상류 압력, 밀도, 유량 등을 입력 값으로 하여 구성품의 하류 압력 및 유량 조건을 예측하며 예측 결과를 수류 시험 결과와 비교, 이를 바탕으로 구성품 모델링을 검증 하였다.

3.1 터보펌프

터보펌프는 Polytropic process를 사용하여 주어진 펌프의 입구 조건에 따른 펌프의 출구 조건을 계산하였다. 실제 터보펌프의 경우, 200 bar에 가깝게 압력을 상승시키기도 하는데 이 경우 높은 압력상승으로 인해 추진제의 밀도가 증가하는 압축성 효과가 발생한다. 따라서 추진제의 밀도 변화를 고려하여야 하며 이를 위해 Polytropic process에 압축성 효과를 동시에 고려한 Eq. 1을 사용하였다[7].

$$P_2 = \rho_2 \left[\frac{gH}{\beta} + \frac{P_1}{\rho_1} \right] \tag{1}$$

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

$$\rho_2 = \rho_1 / \{1 - (P_2 - P_1)/E\}$$

Equation 1의 P_1, P_2 는 펌프의 입구와 출구 압력을 나타내며 H 는 펌프의 양정, g 는 중력가속도, ρ_1, ρ_2 는 펌프의 입구 및 출구 밀도를 나타낸다. E 는 유체의 탄성 계수를 나타낸다. 펌프의 주어진 유량에 따른 양정은 펌프의 성능을 나타내는 유량계수와 양정계수의 관계로부터 얻을 수 있다.

Figure 4는 Polytropic process를 사용한 원심형 펌프의 모델링과 실제 원심형 펌프의 시동시 출구 압력을 비교 한 것이다. 펌프 출구의 압력을 예측하기 위해 Eq. 1에서의 H 는 실제 모델링의 대상이 되는 펌프의 유량에 따른 양정을 사용하였으며 예측 결과와 실험 결과간의 오차는 최대 5% 이내이다.

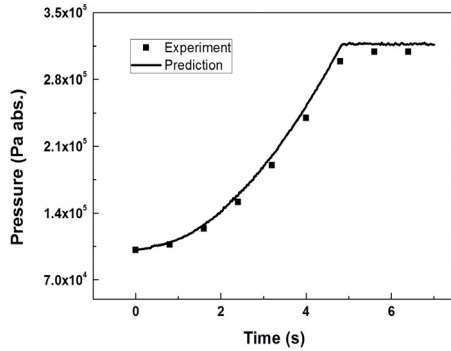


Fig. 4 History of the pump outlet pressure

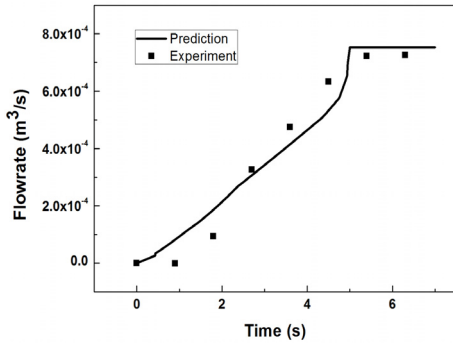


Fig. 5 History of the pipe outlet flow rate

3.2 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].

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

Equation 2에서 W 는 질유량, ΔP 는 관로의 입구와 출구의 압력차, A 는 관로의 단면적, L 은 모델링 대상이 되는 관로의 길이, ΔP_{loss} 는 관로의 입구와 출구의 압력차에 의한 마찰 손실을 나타내며 아래의 Eq. 3과 같으며 관로의 수류 시험을 통해 얻을 수 있다.

$$\Delta P_{loss} = \frac{W^2}{\rho_{AV} \alpha} \quad (3)$$

Equation 3의 ρ_{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 정의된다[7, 10].

Figure 5는 관로 모델링을 통한 관로의 출구 유량 예측결과와 수류 시험결과를 비교한 것이다. 시동구간인 0~5 초에서의 유량증가 경향성에 대한 예측은 수류시험결과와 유사하다고 할 수 있다.

3.3 오리피스

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

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

위의 식에서 유량 계수인 C_F 는 Fig. 1에 나타난 실험장치의 시험부에 오리피스를 장착, 오리피스를 기준으로 상류 26 cm 지점과 하류 26 cm 지점에서의 측정압력과 측정된 유량을 Eq. 4에 대입하여 계산하였다. 계산된 C_F 값은 오리피스의 입구와 출구의 압력차에 따라 값이 증가하며 그 기울기는 감소하는 경향을 나타낸다. 펌프의 시동구간에서의 측정값을 바탕으로 계산하였으며 펌프 회전수가 최대일 때 C_F 는 0.877의 값을 갖는다. 펌프가 시동하여 최대 회전수에 이르는 동안 펌프의 토출 유량과 압력은 지속적으로 변하기 때문에 유량계수를 테이블화 하여 모델링에 적용하였다. $A_{orf,throat}$ 는 오리피스의 목 단면적이다.

Figure 6은 오리피스의 모델링 예측 결과와 수류 시험의 결과를 비교한 것이다. 수류시험을 통해 측정된 동특성 계수인 오리피스의 유량 계수를 입력 값으로 사용하였기 때문에 예측결과와 수류시험 결과간의 오차는 작은 것을 알 수 있다.

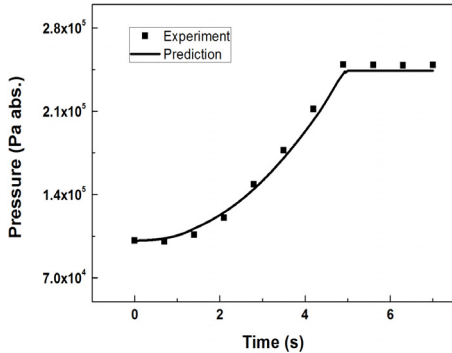


Fig. 6 History of the orifice outlet pressure

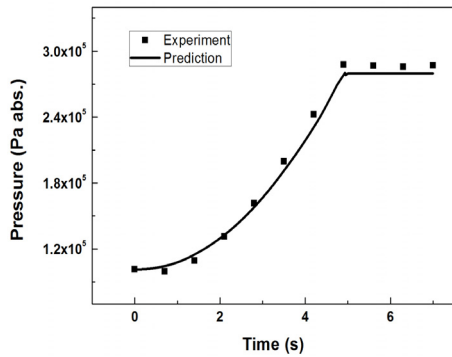


Fig. 7 History of the control valve outlet pressure

3.4 제어밸브

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

Figure 7은 제어밸브 모델링과 수류시험 결과를 비교한 것으로서 제어밸브의 개도율(밸브의 완전 개방을 100%로 함.)을 100% 하였을 때의 밸브 출구 압력을 나타낸다. 밸브의 경우 개도율에 따른 CF 값을 수류시험을 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.

3.5 재생냉각채널

재생냉각채널의 경우 연료 공급 계통에만 적용되는 모델링이다. 모델링의 단순화를 위해 열 전달 효과를 무시하였으며 각 채널을 통과 하면서 발생하는 압력 손실의 합을 한 개의 오리피스 통과하면서 발생하는 압력손실이라고 가정하였다. 따라서 재생냉각채널의 모델링은 오리피스의 유량계수 계산식으로 대체 하였으며 Eq. 5와 같다.

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

Equation 5에서 A_{regen} 은 재생냉각채널의 전체 단면적의 합이며 C_F 는 재생냉각채널의 축소모형을 사용한 수류 시험을 통해 얻을 수 있다. 축소모형은 실제 재생냉각채널의 실제 형상보다는 하나의 관로에서 여러 개의 채널을 통해 유량이 분기되는 현상만을 모사하기 위해 제작한 구성품을 사용하였다. 실제 재생냉각채널과의 상사성보다는 물리적인 현상에 대한 유사성만을 고려하였다.

오리피스와 동일한 모델링을 사용한 재생냉각채널의 모델링 예측결과와 수류 시험 결과의 비교는 Fig. 8에 나타내었다. 이러한 결과를 바탕으로 재생냉각채널의 경우 열전달의 효과를 배제한 수력학적인 면에서 오리피스와 같은 압력 저항으로 모델링 하는 것이 타당함을 확인할 수 있다.

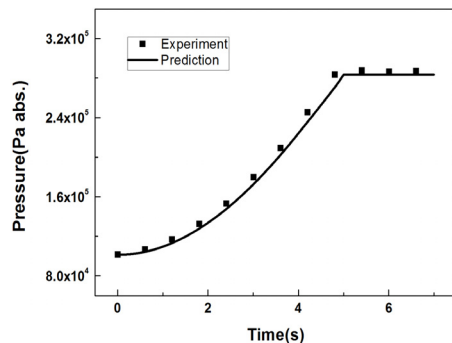


Fig. 8 History of the regenerative cooling channel outlet pressure

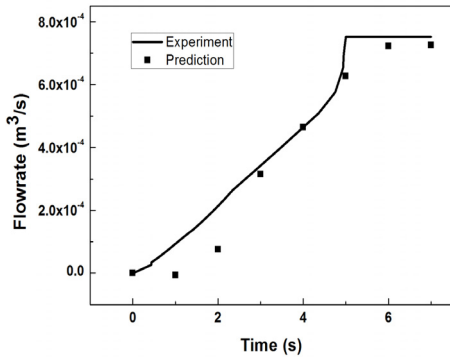


Fig. 9 History of the injector flow rate

3.6 인젝터

주연소실에 연료와 산화제를 분사해 주는 인젝터의 모델링은 출구가 대기로 노출된 여러 개의 오리피스 집합으로 가정하였으며 Eq. 6은 이러한 인젝터의 모델링을 나타낸 것이다.

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

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

Figure 9는 인젝터의 분사조건이 대기압인 경우에 인젝터의 출구 유량에 대한 예측 결과와 수류시험 결과를 비교 한 것이며, 인젝터를 여러 개의 오리피스로 가정한 모델링을 통해 인젝터의 출구 유량을 예측할 수 있다는 점을 알 수 있다.

4. 통합 동특성 예측 프로그램 작성 및 검증

구성품의 동특성 모델링을 사용하여 주어진 수류 시스템에 대한 동특성을 예측하기 위해서

는 구성품별 동특성 모델링이 주어진 수류 시스템에 맞게 통합 되어야 한다.

그러나 원심형 펌프를 가압장치로 사용하는 수류 시스템은 펌프 하류의 유로 저항에 따라 펌프 출구의 압력과 유량이 반비례 하는 경향이 있다[12]. 이러한 문제점으로 인해 펌프하류의 유로 저항에 따른 펌프 토출압력 변화에 대한 고려가 없는 경우, 수류시스템의 측정데이터와 상이한 결과를 나타내게 된다. 즉 펌프 하류의 유로 저항 구성품에 의해 펌프 출구 유량은 감소하고 압력은 증가하는 현상에 대한 고려가 없기 때문에 전체 시스템에 대한 수류시험 결과와 동특성 예측 결과 사이의 오차가 발생하는 것이다.

본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해 수류 시스템의 최하단에 설치된 인젝터의 출구 압력 조건을 기준으로 인젝터의 상단에 압력을 보정할 수 있는 Implicit method를 사용 하였다.

4.1 통합 동특성 예측 프로그램

통합 동특성 예측 프로그램의 대상 시스템은 제어 밸브가 없는 액체로켓엔진 시스템의 연료 공급 계통을 모사한 수류 시스템이다. 즉 원심형 펌프를 통해 가압된 유체는 관로를 지나 오리피스를 통과하여 재생냉각채널을 지나 인젝터로 공급되며 인젝터를 통해 대기 중으로 분사되는 수류 시스템을 말한다.

Figure 10은 앞서 언급한 모사 수류 시스템의 동특성을 예측하기 위한 통합 동특성 예측프로그램의 순서도 이다. 통합 동특성 예측 프로그램의 각 구성품 모듈은 앞서 검증된 해당 구성품의 동특성 모델링을 사용하였다.

통합 동특성 예측프로그램은 초기 펌프의 양정을 계산하기 위해 초기 유량을 가정하며 계산된 펌프 출구의 유량과 압력을 바탕으로 관로에서의 유량 및 압력 변화를 계산한다. 오리피스는 관로의 출구 조건을 입구조건으로 하여 압력 강하를 계산하며 재생냉각채널은 오리피스의 출구 압력 조건으로부터 채널의 출구 압력을 계산한다. 최하단의 구성품인 인젝터는 재생냉각채널의

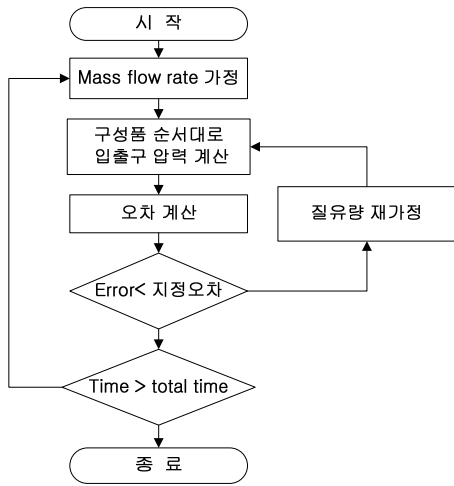


Fig. 10 Flow of the component modeling and calculation strategy

출구 압력을 입구 조건으로 하여 인젝터의 출구 압력을 계산한다. 그러나 인젝터의 실제 출구 압력은 항상 대기압이므로 동특성 예측 프로그램을 통해 예측된 인젝터의 출구 압력을 실제 압력과 비교, 지정된 오차 이상인 경우 질유량을 재가정하여 압력과 유량을 재계산 한다. 지정 오차 이하인 경우는 시간이 증분 되어 펌프 회전수가 증가, 펌프 출구 압력이 증가 하게 된다.

4.2 통합 동특성 예측 프로그램 검증을 위한 수류시험

통합 동특성 예측프로그램의 결과를 검증하기 위해 Fig. 11과 같이 유량제한이 없는 수류 시험장치를 구성하였다.

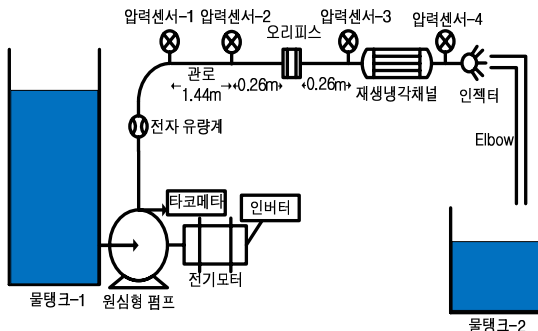


Fig. 11 Experimental set up for simple hydraulic system

수류시험 장치는 앞서 언급한 액체로켓엔진의 연료 공급계통의 구성품 배치와 같이 원심형 펌프, 관로 (길이: 1.44 m, 직경 15.5 mm), 오리피스(개도율: 관로 목직경의 60%), 재생냉각채널 그리고 인젝터 순으로 배치하였으며 인젝터의 출구는 대기압 조건이다.

각 구성품의 입구와 출구의 압력을 측정하기 위해 4개의 압력센서를 설치하였으며 펌프의 회전수를 측정하기 위해 비접촉식 타코메터를 사용하였고 수류시스템의 유량은 전자 유량계를 통해 측정 하였다. 워터해머와 같은 현상을 방지하기 위해 수류 시스템 전체를 물로 채워둔 상태에서 펌프를 시동 하였으며 펌프가동 조건은 최대 회전수 1750 RPM, 가속 시간 5 초로 설정 하였다.

4.3 수류 시스템 동특성 예측 결과 및 수류시험 결과 분석

통합 동특성 예측 프로그램을 통한 수류 시스템의 동특성 예측 결과를 비교하기 위해 앞서 언급한 수류시험 조건을 통합 동특성 예측 프로그램의 입력 값으로 설정 하여 계산을 수행하였다. 입력 값으로는 원심형 펌프의 시간에 따른 회전수 변화와 각 구성품의 동특성 계수 그리고 형상변수 등이며 아래 Fig. 12는 입력 값으로 사용된 펌프의 회전수 변화를 나타내고 있다.

통합 동특성 예측프로그램의 타당성을 확인하기 위해 Fig. 11에 나타난 압력센서 위치에서의 압력 변화와 수류시스템 전체 유량 변화 예측

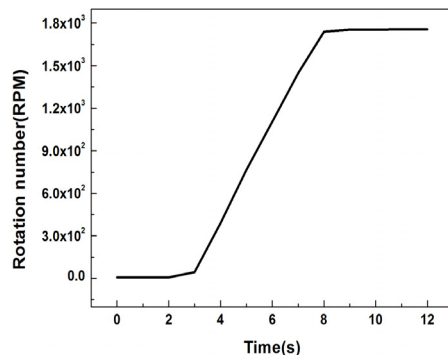


Fig. 12 History of the pump rotation speed

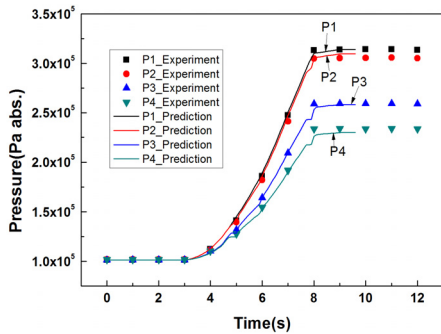


Fig. 13 History of the component outlet pressure (P1: Pump outlet, P2: Pipe outlet, P3: Orifice outlet, P4: Regenerative cooling channel outlet)

결과를 수류시험 결과와 비교 하였으며 Fig. 13에 나타내었다.

Figure 13에 나타난 압력변화는 동특성 예측 결과와 수류시험 결과간의 차이가 3% 이하로써 통합 동특성 예측 프로그램이 실제 수류 시스템의 압력변화를 예측하는데 있어 적합하다고 판단된다.

그러나 Fig. 14에 나타난 유량변화의 경우 실제 유량은 9초 이후에 최대 유량으로 수렴 하지만 예측 결과는 펌프의 최대 회전수 도달 시점인 8초에서 최대유량으로 수렴하기 시작한다. 즉 오차 발생의 원인은 펌프 회전수와 압력이 최대값에 이르는 시점이 동일하여 8 초 이후에는 펌프 압력상승에 의한 유량증가가 없는 것으로 예측하기 때문이다. 또한 8 초에서 예측된 급격한 유량 증가 역시 압력이 최대값에 수렴했기 때문으로 판단된다.

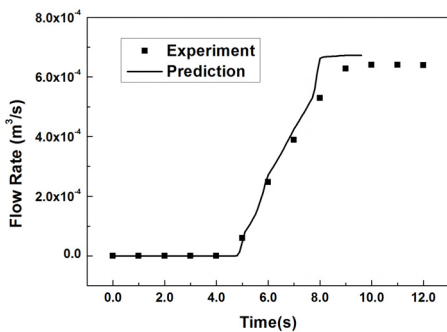


Fig. 14 History of the volumetric flow rate

따라서 이러한 문제를 해결하기 위해서는 유체가 받는 압력이 증가하다 수렴하는 경우, 즉 유체의 가속도가 점차적으로 감소되는 현상에 대한 고려가 필요할 것으로 생각된다.

5. 결 론

액체로켓엔진 시스템의 천이 동특성 예측 모델링을 위한 선행단계로써 주요 구성품에 대한 동특성 모델링을 수행하였으며 동특성 모델링에 필요한 구성품의 동특성 계수 측정과 모델링 검증에 물을 작동유체로 하는 수류시험을 수행하였다.

동특성 모델링의 대상 구성품은 수류시험을 통해 검증이 가능한 원심형 펌프와 추진제 이송관로, 오리피스, 제어밸브, 재생생각채널, 인젝터 등이다.

검증된 구성품별 동특성 모델링을 사용하여 통합 동특성 예측프로그램을 작성하였다. 이를 바탕으로 제어밸브를 고려하지 않은 액체로켓엔진의 연료 공급계통 모사 수류 시스템에 대한 예측을 수행하였다. 수류 시스템의 동특성 예측 결과를 수류시험 결과와 비교, 통합 동특성 예측 프로그램에 대한 타당성을 확인 하였다.

통합 동특성 예측 프로그램은 시스템의 형태나 동특성이 동일한 경우 일반적으로 사용할 수 있다. 시스템에서 특정 구성품이 바뀌는 경우에도 본 연구에서 대상으로 하는 구성품과 동특성이 같으면 바뀐 구성품에 대한 수류실험을 통해 측정된 동특성 계수 데이터를 사용하여 시스템의 동특성을 예측하는 것이 가능하다.

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, 제32권, 제3호, 2004, pp.102-110
2. 최창호, 김진환, 양수석, 이대성, “액체로켓용 터빈 시스템 설계,” 항공우주기술, 제1권, 제1호, KARI, 2002, pp.163-172
3. 공철원, 윤종훈, 장영순, 이영무, “KSR-III 복합재 가압탱크의 설계 및 제작,” 항공우주기술 제2권, 제2호, KARI, 2003, pp.124-132
4. 양희성, 박병훈, 윤웅섭, “액체 로켓 엔진시스템 개념설계를 위한 모듈화 프로그램 Part I : 주요 구성품 설계,” 한국항공우주학회, 2007, pp.805-815
5. 박병훈, 양희성, 윤웅섭, “액체 로켓 엔진시스템 개념설계를 위한 모듈화 프로그램 Part II : 통합 모듈화 프로그램,” 한국항공우주학회, 2007, pp.816-825
6. 김형민, 고태호, 김상민, 윤웅섭, “펌프 가압식 추진계 공급유로에서의 오리피스 개도에 따른 동적수력 특성 변화,” 한국추진공학회 2009년도 추계학술대회 논문집, 2009, pp.313-317
7. Mason, J. R. and 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, 제2호, 2009, pp.140-148
11. D. K. Huzel and D. H. Huang, Modern Engineering for Design of Liquid-Propellant Rocket Engines, AIAA, 1992
12. 박한영 외, “펌프 핸드북,” 동명사, 2002
13. 김형민, 이국진, 윤웅섭, “액체로켓엔진 천이 동특성 예측 Part-1 : 주요 구성품 동특성 모델링 및 검증,” 한국추진공학회 2010년도 춘계학술대회 논문집, 2010, pp.54-60