

램제트 추진 시스템의 동적 제어 모델링 기법(I)

김선경* · 염효원* · 전창수** · 성홍계** · 박익수*** · 이규준***

Dynamic Modeling Scheme for Control of the Ramjet Propulsion Systems(I)

Sun-Kyeong Kim* · Hyo-Won Yeom* · Chang Soo Jeon** · Hong-Gye Sung** ·
Ik-Soo Park*** · Kyu-Joon Lee***

ABSTRACT

In this paper, prototype dynamic modeling scheme to control ramjet propulsion systems were proposed. From the physical understandings of engine system, a typical 2nd-order system model was applied to simulate the dynamic characteristics of fuel supply system. The shock location variance in diffuser to chamber pressure fluctuation is calculated so that the out of phase between two signals was observed.

초 록

램제트 추진 시스템 제어를 위한 모델링 기법에 대한 연구를 수행하였다. 연료공급시스템은 동적 메커니즘을 묘사하기 위해 전형적인 2차 시스템 모델을 사용하였으며, 이로부터 연료공급시스템의 계단 응답특성을 계산하고 이에 상응되는 연소실 압력섭동과 종말 충격파의 위치 변화 관계를 파악하였다. 압력섭동과 종말 충격파 간의 상관관계를 도출하기 위하여 연소실 압력은 일정한 주기와 진폭을 갖는 사인파로 모델링하여 종말충격파의 거동에서 나타나는 위상차를 확인하였다. 본 연구를 통해 시스템의 작동에 대한 물리적인 이해를 도모하며, 시스템의 동적 특성이 엔진 작동에 미치는 영향을 살펴보았다.

Key Words: Ramjet (램제트), Fuel Supply System (연료공급시스템), Pressure Fluctuation (압력섭동), Terminal Shock (종말 충격파)

1. 서 론

램제트 엔진은 공기의 램압축을 이용하여 아음속 연소를 통해 추력을 얻으므로 구조가 단순

하고 초음속 비행에 적합하지만 흡입구와 연소기 간의 직접적인 상호간섭이 발생하는 고유 특성을 가진다. 따라서 이에 대한 물리적인 이해와 함께 이를 제어하기 위한 기술이 확보되어야 엔진의 성능을 보증할 수 있다.

이를 위해 본 논문에서는 램제트 추진 시스템의 제어를 위한 모델링 기법에 대해 연구를 수행하였다. 추진 시스템의 동적 특성을 구현하기

* 한국항공대학교대학원 항공우주 및 기계공학과

** 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

*** 국방과학연구소 1본부 5부

연락처, E-mail: hgsung@kau.ac.kr

위해 연료공급시스템과 연소진동에 대한 간단한 모델을 제안하였으며, 이러한 모델에 대한 램제트 엔진의 순항모드에서의 작동특성에 대해 살펴보고자 한다.

2. 동적 시스템 모델링

연료 공급 시스템 및 연소진동이 엔진의 동적 특성에 미치는 영향을 살펴보기 위해 다음과 같은 모델링을 수행한다.

2.1 연료 공급 시스템 모델링

Figure 1은 초음속 공기흡입식 추진기관용 연료공급 시스템을 나타낸다.[1] 연료 공급 시스템은 크게 터보펌프 (ATP, Air Turbo Pump), 연료조절밸브 시스템 (FMU, Fuel Metering Unit), 연료 탱크 및 가압부로 구성된다.

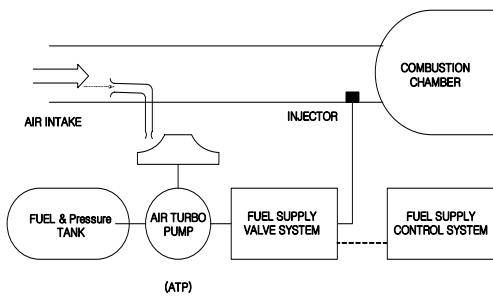


Fig 1. Schematic of Fuel Supply System[1]

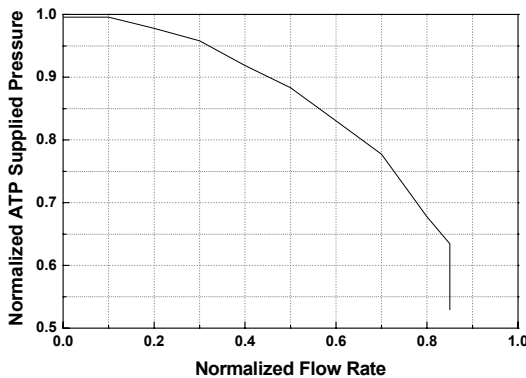


Fig 2. Air Turbo Pump Characteristics

터보펌프 (ATP)는 엔진 흡입구로부터 유입되는 공기에 의해 터보 구동되며 연료를 밸브 시스템으로 공급한다. 또한 터보펌프는 요구되는 연료유량에 따라 공급압력을 결정한다. 터보펌프의 공급압력과 유량의 관계는 Fig. 2의 특성 곡선을 이용하도록 한다.

연료조절 밸브 시스템은 오리피스를 조절하여 요구된 양의 연료를 공급하며, 밸브로부터 공급되어진 연료는 인젝터를 통해 분사된다. 연료 공급 시스템의 과도응답 과정을 구현하기 위해 이를 2차 시스템으로 모델링하였으며, 이에 대한 전달함수는 Eq. 1과 같다.

$$\frac{Q(s)}{I(s)} = \frac{K\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (1)$$

여기서 K 는 연료공급시스템의 이득, ω_n 는 시스템의 고유진동수, ζ 는 감쇠계수를 나타내며, 이들은 시스템의 특성에 의해 결정되어지는 값이다. 입력신호를 당량비에 대한 계단입력으로 가정한다면, 위와 같은 2차 시스템에 대하여 계단응답특성을 해석함으로써 연료공급시스템의 동적 거동 특성에 의한 영향을 확인할 수 있다.

2.2 연소 진동 및 종말 충격파

연소실 내의 압력 파동은 연소반응으로부터의 비정상 상태의 열에너지 방출과 연소실 내의 음향파에 의해 발생한다. 압력파동은 엔진 작동 초기 점화 과정동안 급격히 불안정하게 나타나며, 점화과도기간을 거쳐 정상 상태에 도달하게 되면 균일한 진폭과 주기성을 갖게 된다. 본 해석에서는 정상 연소를 가정, 이때의 압력 파를 평균 연소실 압력에 대한 5% 진폭과 380 Hz의 주파수를 갖는 사인파로 가정하여 연소실 압력 파동에 의한 동적 거동 특성을 해석하는데 사용하였다.[2]

연소실에서 발생한 압력파는 디퓨저로 전파되며, 종말 충격파는 연소실 압력파동에 따라 위상차를 가지며 움직인다. 압력파동에 의해 연소실의 압력이 상승하게 되면 충격파 후단의 압력이 상승하게 되어 종말 충격파는 상류 방향으로 이동하게 되며, 반대로 연소실 압력이 감소하게 되면 배압의 감소로 종말 충격파는 하류 방향으로

이동하게 된다. 연소실 내의 압력파가 디퓨저로 전달되기까지는 일정 시간이 소요되며 이는 시간상수(τ)를 이용하여 나타낼 수 있다.

$$\tau = \int_{comb}^{diff} \frac{1}{a(x) - u(x)} dx \quad (2)$$

여기서 $a(x)$ 는 임의의 x 위치에서의 음속을 뜻하며, $u(x)$ 는 x 위치에서의 유동속도를 나타낸다.

종말 충격파의 위치는, 종말 충격파를 수직 충격파로 가정함으로써 등엔트로피 과정에 대한 기체 방정식과 충격파 전후의 압력관계로부터 얻을 수 있다.[3] 배압의 급감으로 종말 충격파가 디퓨저를 벗어나 연소기로 빠져나갈 경우, 연소중단이 될 수 있으므로 이를 램제트 엔진의 작동한계지점으로 설정한다. 또한 압축과정에서의 온도상승으로 인해 흡입공기의 해리가 일어나지 않을 조건도 작동한계지점으로 선정한다.

2.3 램제트 엔진의 동적 모델 해석 과정

해석모델은 크게 연료 공급 시스템 모델, 연소 진동 및 충격파 거동 모델 그리고 램제트 엔진 성능모델로 구성한다. 연료공급 및 연소진동에 대한 해석은 앞서 제시한 모델을 사용한다. 램제트 엔진의 성능해석은 사이클 해석을 기반으로 한, 1차원 준 정상상태에 대해 압축성 기체 방정식을 이용하여 수행된다.[3-5] 연소 반응으로 인한 상태량 변화는 CEA (Chemical Equilibrium and Application)를 이용하여 계산한다. 램제트

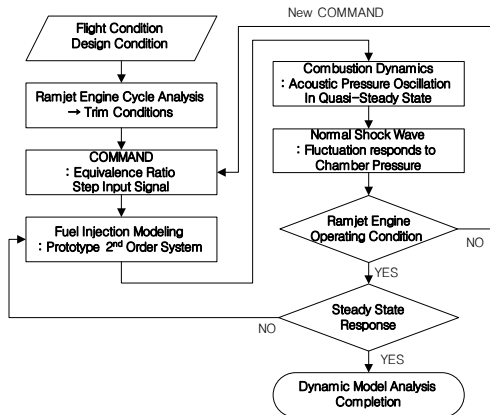


Fig 3. Fuel Supply and Control System

엔진의 동적 모델에 대한 해석 과정은 Fig. 3과 같다.

3. 해석결과

앞서 수행한 동적 시스템 모델링을 기반으로 하여 순항모드에 대한 램제트 엔진의 작동 특성 파악하였다.

3.1 연료 공급 시스템 모델의 계단응답특성

Figure 4와 Fig. 5는 연료 공급 시스템의 2차 시스템 모델에 당량비(또는 연료유량)에 대한 계단입력을 초기 트림조건인 0.6에서 $\pm 2\%$ 로 주었을 때, 연료 분사에 따른 연소실 압력과 충격파의 위치변화에 대해 해석한 결과이다. 해석시간은 총시간에 대해 무차원화 하였고, 터보펌프의 공급압력, 연소실 압력 및 연료 분사량은 각각의 초기 트림조건에 대해 무차원화 하였으며, 종말 충격파의 위치는 흡입구의 길이에 대한 비로 무차원화 하였다. 연소실의 압력진동에 대한 영향은 고려하지 않았다.

연료 분사량의 변화에 따라 터보펌프의 공급압력이 결정되며, 연소실 압력과 충격파의 위치도 이와 유사한 경향성을 띄며 변화하는 것을 확인할 수 있다. 첫 번째 계단입력에 대해서, 연료 분사량은 2% 허용오차범위 내에서 오버슈트가 발생하는 반면, 두 번째 계단입력에 대해서는 첫 번째 오버슈트에서 2% 허용오차보다 큰 값을 가지며 정착시간이 소요됨을 확인할 수 있다.

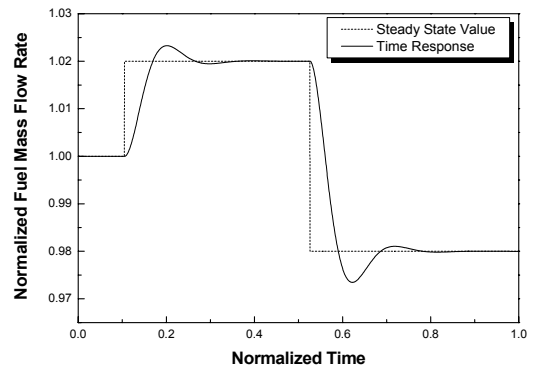


Fig 4. Step Input Response of FSS

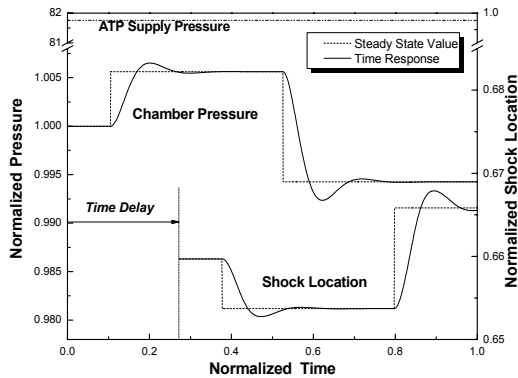


Fig 5. Variation of Chamber Pressure and Shock Location along with Fuel Injection

3.2 연소실 압력 섭동 및 종말 충격파의 거동

Figure 6은 연료 공급 시스템의 동적 거동과 함께 연소실 압력섭동을 고려한 해석결과이다. 연소실 압력은 당량비 변화에 따른 압력변화와 함께 5% 압력편차를 가지고 변화한다. 이 압력파가 디퓨저로 전달되어 충격파 후단의 압력변화를 발생시키기까지는 총시간에 대해 약 27%의 시간지연이 발생하며, 이러한 지연으로 인해 동일한 시간에 대해 충격파의 위치가 연소실압력이 감소하면 상류로 이동하고, 연소실 압력이 증

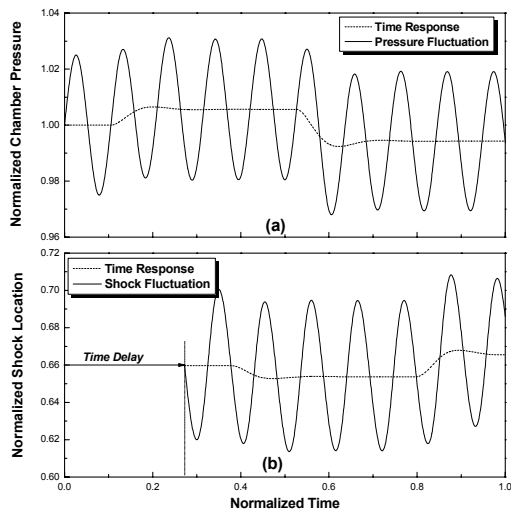


Fig 6. Dynamics of Combustor Pressure (a) and Terminal Shock Location (b)

가하면 하류로 이동하면서 서로 반대의 경향을 보이는 것을 확인할 수 있다. 또한 충격파의 위치가 디퓨저 영역을 벗어나지는 않기 때문에 순항 조건이 작동한계영역 내에 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

램제트 엔진의 연료공급시스템과 연소실 내 압력섭동에 의한 동적 모델링을 통해 추진 시스템의 작동특성을 살펴보았다. 연료 공급량에 대한 계단입력이 주어졌을 경우, 연료공급시스템의 동적 거동에 의한 연소실 압력변화 및 종말 충격파의 특성을 파악하였으며, 연소실 압력섭동이 종말 충격파 진동에 미치는 영향을 확인하였다. 이러한 모델링을 기반으로 램제트 엔진의 순항모드에서의 동적 거동에 대한 시뮬레이션을 수행함으로써, 이로부터 주어진 비행조건에 대해 램제트 엔진의 성능이 확보되어 있음을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1. 이도윤, 최현영, 박종승, 구자용, "공기흡입식 추진기관용 연료조절밸브시스템 개발에 관한 연구", 한국군사과학기술학회지 제 8권 제 4호, 2005, pp. 152~158
2. Hong-Gye, Sung and Vigor Yang, "A Unified Analysis of the internal Flow-field in an Integrated Rocket Ramjet Engine, Part II. Ramjet Sustainer", Aerospace Science and Technology, to be printed.
3. James E. John and Theo G. Keith, "Gas Dynamics", Pearson Education, Inc. 3th Edition, 2006.
4. D. P. Petters and J. L. Leingang, "Rapid Computer Simulation of Ramjet Performance", AIAA 93-2049, 1993
5. P. G. Hill and C. R. Peterson, "Mechanics and Thermodynamics of Propulsion", Addison-Wesley Pub. Co. inc., 2nd Edition.