

# PI 제어를 이용한 초음속 엔진 버즈마진 및 추력제어에 관한 연구

공창덕\* · 기자영\*\* · 고성희\*\*

## A Study on Buzz Margin and Thrust Control of Supersonic Engine using PI Controller

Changduk Kong\* · Jayoung Ki\*\* · Seonghee Kho\*\*

### ABSTRACT

Dynamic behavior simulation of supersonic engine was performed and PI control algorithm was studied for the buzz control in the inlet and the thrust control. Firstly, required thrust was tracked according to the fuel flow control and then inlet pressure was regulated through the nozzle throat area control so that the buzz margin has the positive all the time. The control was performed according to the change of flight Mach number, altitude and angle of attack. The proportional gain and the integral gain for regulating the buzz margin was induced and simulated. In the results, it was confirmed and satisfied that control target in the operating area was changed the angle of attack from 0° to 10° at the flight Mach number of 2.1~3.0.

### 초 록

초음속제트 엔진의 동적거동 모사를 수행하고 흡입구에서의 버즈 마진 확보와 추력 제어를 위한 PI 제어 알고리즘을 연구하였다. 먼저 연료유량 제어를 통해 요구추력을 추종하고 노즐 목 면적 제어를 통해 흡입구에서의 버즈마진이 항상 양의 수를 갖도록 흡입구 출구 압력을 조절하였다. 비행 마하 수, 고도, 받음각 변화에 따라 추력제어와 버즈 마진 제어를 위한 비례 게인과 적분 게인을 각각 구하고 시뮬레이션 하였다. 그 결과 비행 마하 수 2.1에서 3.0, 받음각 0°에서 10° 사이의 운용영역에서 제어목표를 만족함을 확인하였다.

Key Words: Intake Buzz Margin Control(흡입구 버즈마진 제어), Thrust Control(추력제어), PI Controller(PI 제어기), Multivariable Control(다변수제어)

### 1. 서 론

비행체가 고속으로 대기권을 비행하며 발생하는 운동에너지를 감속시키게 되면 감속된 만큼의 운동에너지가 압력으로 전환된다. 이렇게 압축된 공기에 연료를 분사하여 연소시켜 고온고

\* 조선대학교 우주항공공학과

\*\* (주)이지가스터빈

연락처, E-mail: young@ezgtc.com

압의 가스를 생성시킨 후 노즐을 통해 분사하여 추력을 얻는 엔진을 초음속제트 엔진이라고 한다. 초음속제트 엔진은 디퓨저 형태의 흡입구에서 생성된 램 압력을 이용하므로 별도의 압축기와 터빈이 없는 단순한 구조를 갖는다. 그러나 초음속제트 엔진이 다양한 비행조건과 대기환경에서 안정적으로 작동하기 위해서는 흡입구에서의 유동특성이 매우 중요하다[1].

흡입구에서 공기유동의 감속을 위해서 충격파를 유도하게 되는데 이때의 전압력 회복율이 초음속제트 추진기관 전체의 작동특성에 결정적인 영향을 주게 된다.

이와 같이 초음속제트 엔진이 다양한 비행환경에서 요구하는 추력을 만족하며 안정적인 작동을 하기 위해서는 제어가 요구된다.

본 연구에서는 노즐의 목면적과 연료유량을 제어하여 흡입구에서의 전압력회복율 특성을 만족하며 요구추력을 추종하기 위한 PI 제어기 설계를 수행하였다.

## 2. 성능 모델링 및 동적거동 모사

연구대상 엔진은 Fig. 1과 같이 흡입구, 연소기, 노즐로 이루어진 기본적인 초음속제트 엔진 형상을 갖는다.

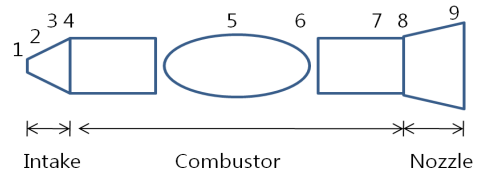


Fig. 1. The Schematic and Station No. of the Study Engine

Figure 1의 Station No.에 따른 구성품은 다음과 같다.

Table 1. The Station No. of Components

Station No.	Location
1	Spike
2	Start of Cowl
3	Intake throat
4	Intake exit
5	Fuel Injection
6	Ignition point
7	Combustor exit
8	Exhaust nozzle throat
9	Exhaust exit

엔진 제어를 설계하기 위해서는 먼저 동특성 분석이 선행되어야 한다.

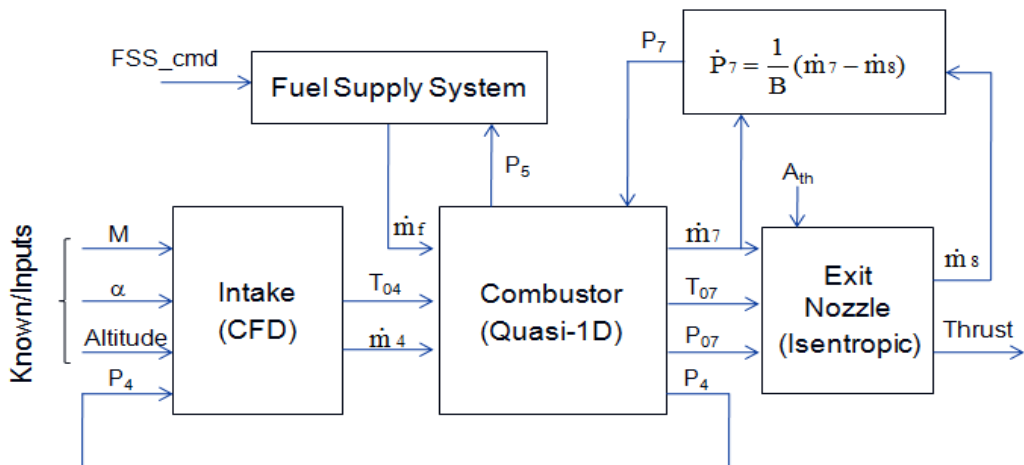


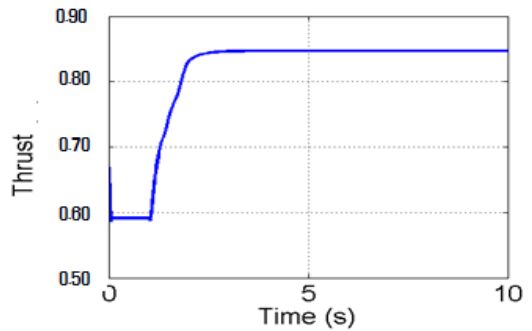
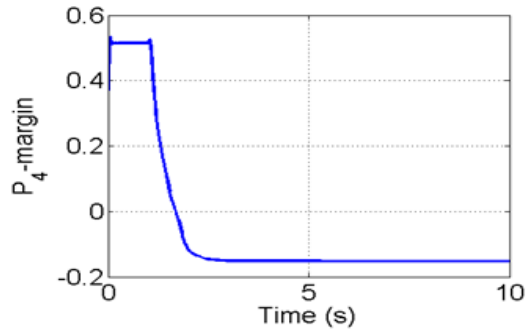
Fig. 2. Calculation Interface between Components

동적거동 모사를 위한 성능모델링을 Fig. 2와 같이 수행하고 비행마하수, 고도, 받음각 변화에 따라 연료유량을 증가시키며 흡입구의 전압력 회복율과 추력 특성을 모사하였다.

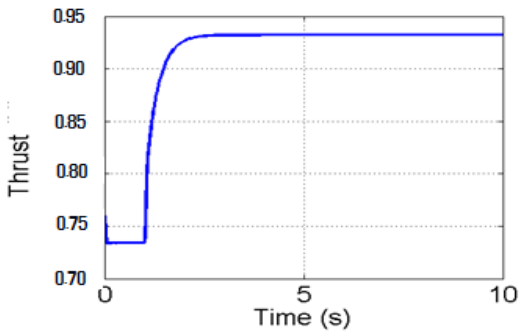
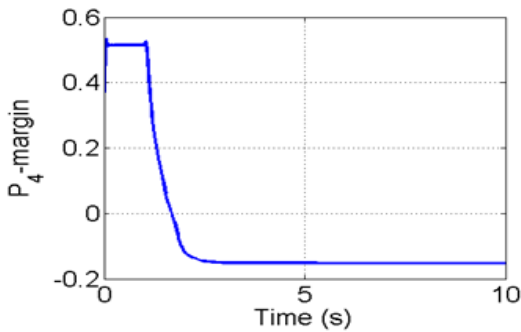
Figure 2에서 보는 바와 같이 비행 마하 수, 받음각, 고도 등의 비행 및 대기조건을 입력값으로 하여 흡입구, 연소기, 노즐 등 각 구성품의 입출구 온도, 압력 및 유량을 계산하고 엔진 추력을 최종 계산한다. 연소기에 유입되는 연료유량은 FSS\_cmd 변수를 입력으로 하는 연료유량 조절 밸브 모델을 통해 계산된다.

연소기 입구 압력인  $P_4$ 와 표준 엔진의 기준 연소기 입구 압력값의 차이를  $P_{4\_margin}$ 으로 정의하고  $P_{4\_margin}$ 이 0보다 크면 충격파가 흡입구 내에서 발생하는 것이며 0보다 작으면 흡입구 외부에서 발생하는 것으로 해석한다. 이론적으로는  $P_{4\_margin}$ 이 0에 가까울수록 흡입구 압력 손실이 최소가 되나 엔진의 사이클 해석을 통해 최적 설계값을 가져야 한다.

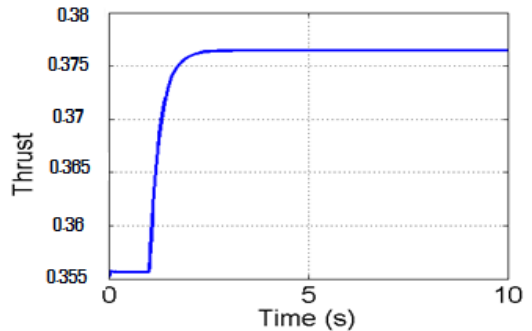
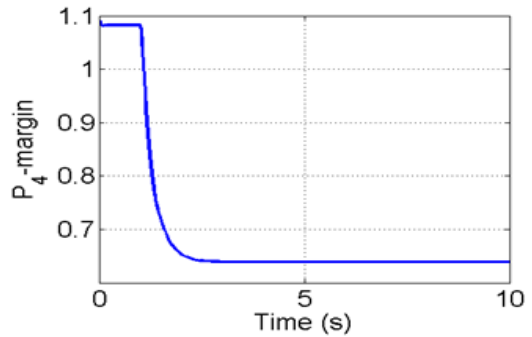
동적거동 모사 결과는 Fig. 3과 같다.



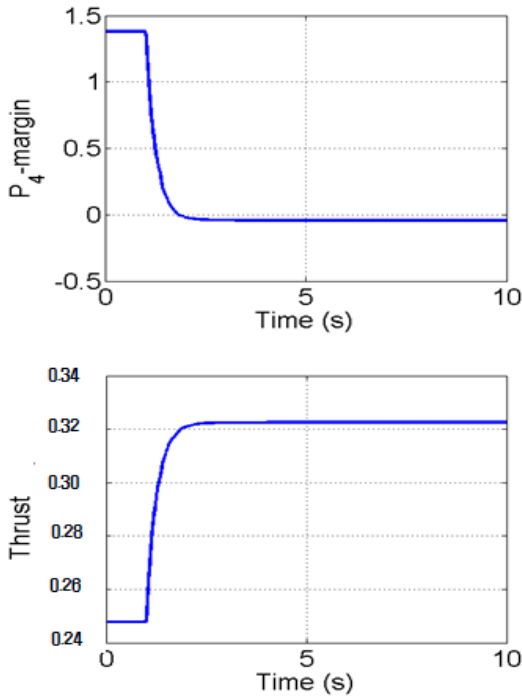
(b) Mach No.=2.1, Alt.=1400m, AoA=10°



(a) Mach No.=2.1, Alt.=1400m, AoA=0°



(c) Mach No.=3.0, Alt.=14500m, AoA=0°



(d) Mach No.=3.0, Alt.=14500m, AoA=10°  
 Fig. 3. The results of Dynamic Behavior

해석결과를 살펴보면 받음각이 커질수록 흡입구에서의 P4margin이 적어지며 저고도에서는 흡입구 외부에서 충격파가 발생하는 경우도 있음을 확인할 수 있었다.

이에 요구추력을 추종하며 충격파가 흡입구 내부에서 발생할 수 있도록 연료유량과 노즐 목 면적을 제어하기 위한 PI제어기를 설계하였다.

### 3. PI 제어기 설계

P4margin 값을 통해 충격파의 발생 위치를 확인하고 흡입구 외부에서 발생하는 경우 연료유량과 노즐 목 면적 제어를 통해 내부에서 발생하도록 제어기 설계를 수행하였다.

버즈 마진 및 추력 제어를 위한 PI 제어기 구조는 Fig. 4와 같다[3].

추력제어기는 요구추력을 추종하도록 연료유량을 증감하고 이때 노즐 출구의 압력이 적절한 값으로 유지되도록 버즈마진 제어기가 노즐 목 면적을 조절하도록 설계되었다.

PI 제어기의 비례 게인과 적분 게인 값은 추력제어기와 버즈마진 제어기 각각에 대해 비행 환경 변화에 따라 구하였으며 비행임무에 따라 자동제어가 가능하도록 게인 스케줄링을 수행하였다[2].

비행 마하 수 3.0, 고도 14.5km, 받음각 5°에서 요구추력이 트림조건 대비 0.01 증가하며 이때 흡입구에서의 충격파가 내부에서 발생하도록 제어기를 적용한 결과가 Fig. 5와 같다.

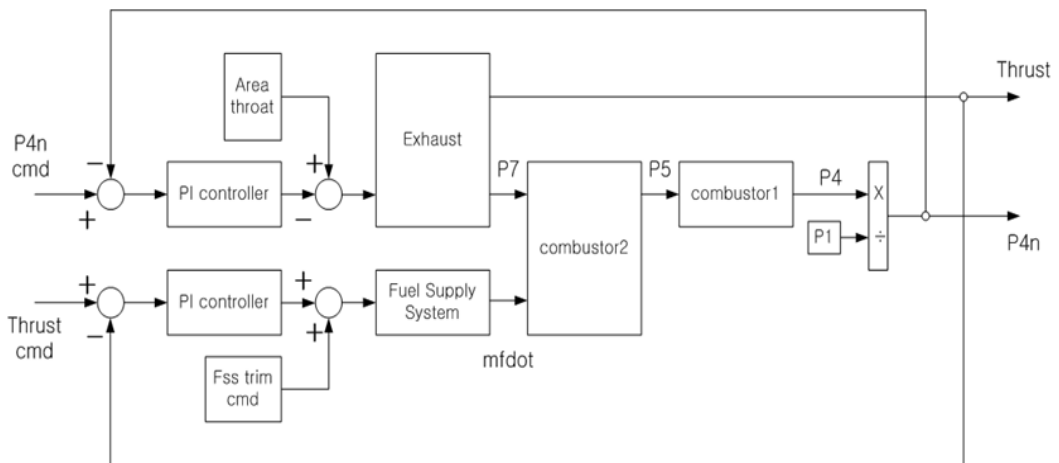


Fig. 4. PI Controller Structure for the Buzz Margin and Thrust Control

#### 4. 결 론

연료유량과 노즐 목 면적의 제어를 통해 초음속 제트 엔진의 요구추력을 추종하고 흡입구의 버즈마진을 확보하기 위한 PI 제어기를 설계하였다.

제어기 설계를 위한 동적거동 모사에서 받음각이 커질수록 충격파가 흡입구 외부에서 발생하는 현상이 발생되어 이를 위한 제어가 요구됨을 확인하였다.

추력제어기를 통해 연료유량을 증감하여 요구추력을 추종하고 버즈제어기를 통해 노즐 목 면적을 조절하여 흡입구 버즈마진을 확보하는 다변수 PI 제어알고리즘을 적용한 결과 제어목표가 다양한 비행환경에서 만족됨을 확인할 수 있었다.

#### 참 고 문 헌

1. 김윤곤, 김경무, "초음속제트 추진기관 기술 및 발전 동향", 한국항공우주학회지, 23권5호, 1995
2. C.D. Kong, and S.C. Chung, "Real Time Linear Simulation and Control for the Small Aircraft Turbojet Engine", KSME, Vol.13, No.13, 1999
3. Mahmoud, S., McLean, D., "Effective Optimal Control of an Aircraft Engine", Aeronautical Journal, pp. 21~27, 1991

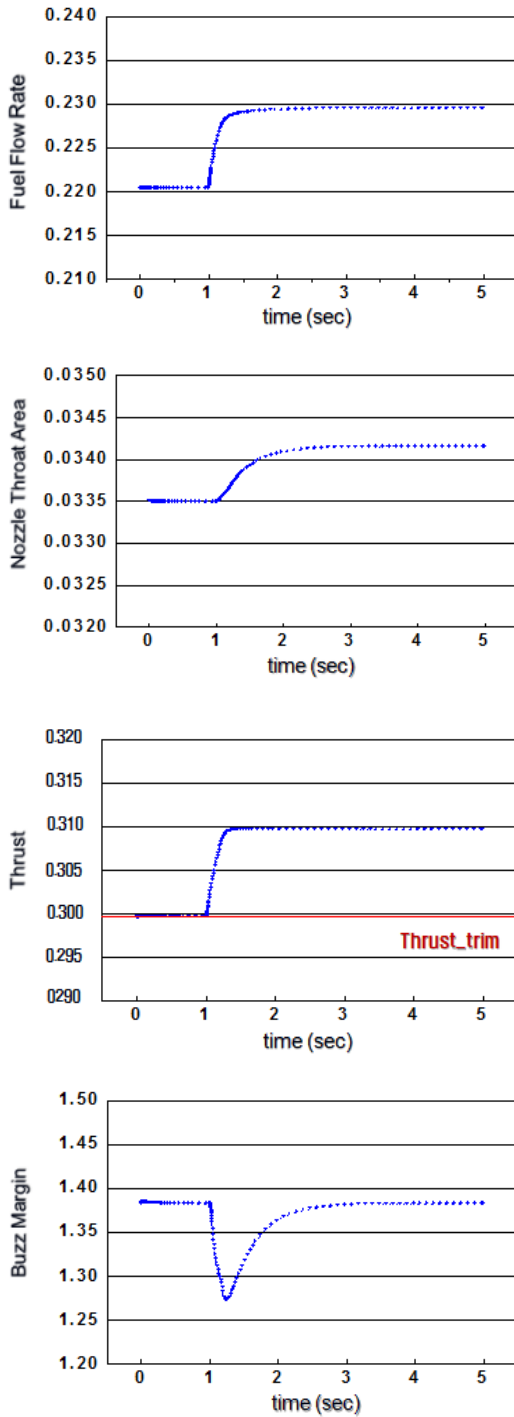


Fig. 5. The Result of PI Control