

PID 제어를 이용한 초음속 엔진 흡입구의 버즈마진 제어에 관한 연구

공창덕* · 기자영** · 고성희* · 강명철**

A Study on Buzz Margin Control in Supersonic Engine Intake using PID Controller

Changduk Kong* · Jayoung Ki** · Seonghee Kho** · Myoungcheol Kang**

ABSTRACT

Total pressure recovery ratio in intake is crucial factor to the operational characteristics of supersonic propulsion system because it does not compress inlet air mechanically by compressor, but does compress inlet air by ram compression.

As the result of that the dynamic characteristic analysis of engine was performed before the controller was designed, it could be ascertained when the AoA of flight vehicle increases, the buzz margin decreases so that the shock wave produced outside intake in the specified area according to flight operation's characteristics.

Therefore the PID control algorithm was designed to be controlled buzz margin that the characteristic of shock wave could meet the requirement of performance in intake. The PID controller was designed that the buzz margin value is being positive number using the control variables; fuel flow and nozzle throat area.

초 록

초음속 추진기관은 기계적인 압축기를 통해 흡입공기를 압축하는 방식이 아니라 램 압축 현상을 이용하여 흡입공기를 압축하기 때문에 흡입구에서의 전압력 회복율이 초음속 추진기관 전체의 작동 특성에 결정적인 영향을 주게 된다.

제어기 설계에 앞서 엔진의 동특성 해석을 수행한 결과 비행체의 받음각이 커질수록 버즈마진 값이 작아져 일부영역에서는 충격파가 흡입구 외부에서 발생하게 됨을 확인할 수 있었다.

따라서 흡입구 내의 충격파 특성이 성능요구조건을 만족할 수 있도록 버즈마진을 제어하기 위한 PID 제어알고리즘을 설계하였다. 제어변수는 연료유량과 노즐 목면적이며 버즈마진 값이 양의 값을 갖도록 PID 제어를 설계하였다.

Key Words: Supersonic Engine(초음속 엔진), Intake Buzz(흡입구 버즈), Buzz Margin Control(버즈마진 제어), PID Control(PID Controller)

* 조선대학교 항공우주공학과

** (주)이지가스터빈

연락처자, E-mail: young@ezgtc.com

초음속 추진기관의 추력이나 비추력 특성은 비행속도와 고도에 의한 비행조건과 공기와 연료의 혼합비 및 노즐에서의 배출 속도 등에 의해 좌우되게 되는데, 초음속 비행체의 임무 및 작동가능 속도범위의 제한성과 작동고도 제한성 등의 제약조건들을 고려하여 비행고도와 비행속도 및 받음각 변화 등에 따라 최적의 출력 특성을 나타낼 수 있도록 엔진 제어가 이루어져야 한다.

초음속 엔진의 경우에는 흡입 공기량, 연료 공급량, 노즐 목 제어를 통해 연소실의 압력을 조절함으로써 비행 상황에 따라 최적의 추력이 생성되도록 엔진 제어를 수행하게 된다 [1].

특히 초음속 추진기관은 기계적인 압축기를 통해 흡입공기를 압축하는 방식이 아니라 램 압축 현상을 이용하여 흡입공기를 압축하기 때문에 흡입구에서의 전압력 회복율 (Total Pressure Recovery Ratio)이 초음속 추진기관 전체의 작동 특성에 결정적인 영향을 주게 된다.

충격파가 흡입구 외부에서 발생하게 되면 엔진으로 흡입되는 공기가 흡입도관 내에서 충분한 감속과 압력증가를 얻지 못하고 연소기로 유입될 수 있으며 이러한 조건에서는 엔진의 작동이 불가능하게 된다.

이에 본 연구에서는 흡입구 내의 충격파 특성이 성능요구조건을 만족할 수 있도록 버즈마진을 제어하기 위한 PID 제어알고리즘을 설계하였다.

제어기 설계를 위해 표준 엔진의 동적거동 해석을 수행하고 비행 마하 수, 고도, 받음각 변화에 따른 충격파 발생 위치 특성을 분석하였다. 연구대상 엔진의 제어변수인 연료유량과 노즐 목 면적 제어를 통해 충격파 위치가 흡입구 내에서 발생할 수 있도록 제어기를 설계하였다.

2. 초음속 엔진 동적 특성분석

엔진제어기 설계를 위해서는 먼저 동특성 분석이 선행되어야 한다. SIMULINK를 이용한 동특성 해석을 위한 엔진 성능 모델링을 이용하여

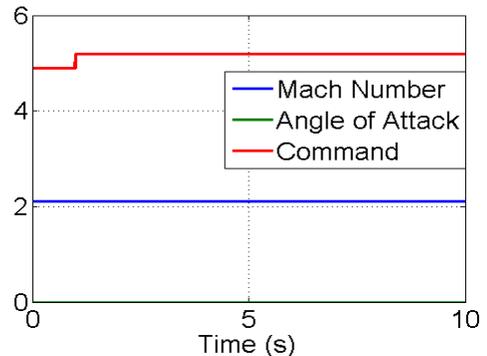
비행 마하 수, 고도, 받음각 변화에 따라 연료유량을 증가시키며 흡입구 출구의 압력 변화를 통해 충격파 발생 위치를 분석하였다 [2]. 해석 범위는 표 1과 같다.

Table 1 초음속 엔진 동적 거동 해석 범위

Flight Mach No.	초음속
Angle of Attack	0°, 5°, 10°
Nozzle Throat Area (m ²)	0.0335

연소기 입구 압력인 P_4 와 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. 본 연구에서는 P_{4_margin} 값을 통해 충격파의 발생 위치를 확인하고 흡입구 외부에서 발생하는 경우 연료유량과 노즐 목 면적 제어를 통해 내부에서 발생하도록 하는 연구를 수행하였다.

저고도에서 받음각이 각각 0°인 경우 해석 결과는 Fig. 1과 같다. 주어진 조건에서 P_{4_margin} 계산 결과 0보다 커 충격파가 흡입구 내부에서 안정적으로 발생함을 확인할 수 있다.



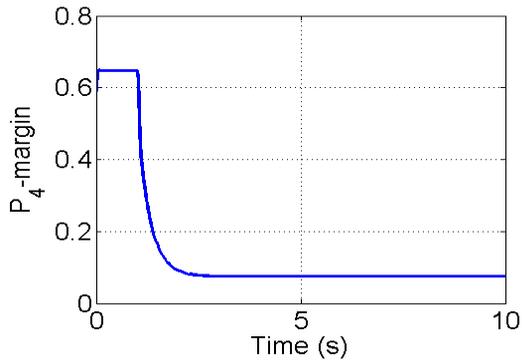


Fig. 1 P_4 -margin as Dynamic Behavior Simulation (Without Buzz)

저고도에서 받음각이 10° 경우 해석 결과는 Fig. 2와 같다. 주어진 조건에서의 해석 결과 P_4 -margin이 음의 영역에 있어 충격파가 흡입구 외부에서 발생하는 것으로 확인되었다.

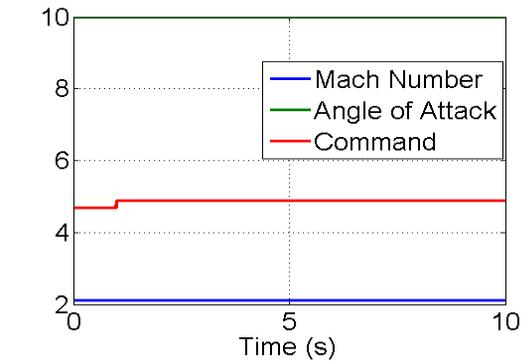


Fig. 2 P_4 -margin as Dynamic Behavior Simulation (With Buzz)

고고도에서 받음각이 0° 경우 해석 결과는 Fig.

3과 같다. 해석 결과 P_4 -margin이 0보다 크기 때문에 충격파가 흡입구 내부에서 발생함을 확인할 수 있다.

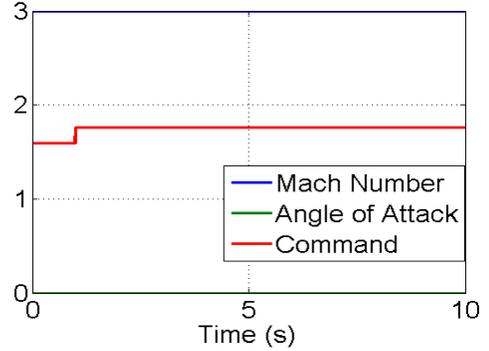
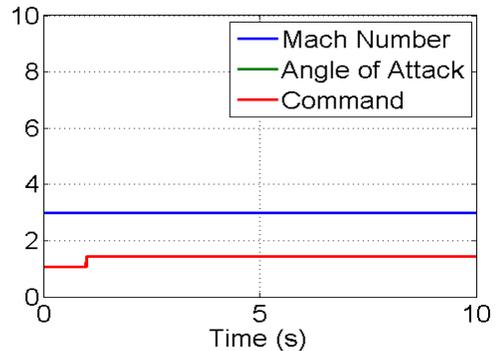


Fig. 3 P_4 -margin as Dynamic Behavior Simulation (Without Buzz)

고고도에서 받음각이 10° 경우 해석 결과는 Fig. 4와 같다. 해석 결과 P_4 -margin이 0보다 크기 때문에 충격파가 흡입구 내부에서 발생함을 확인할 수 있다.



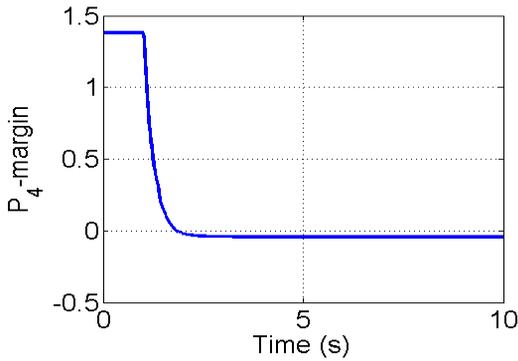


Fig. 4 P₄-margin as Dynamic Behavior Simulation (With Buzz)

해석 결과 받음각이 커지면 흡입구 내의 충격과 발생 특성이 나빠져 적절한 제어가 필요함을 확인할 수 있었다.

3. PID 제어기법을 이용한 버즈 마진 제어

표준 엔진의 동특성 해석을 통해 일부 운용 영역에서 충격과 흡입구 외부에서 발생됨을 확인하였다. 충격과 흡입구 외부에서 발생한다는 것은 엔진으로 흡입되는 공기가 흡입도관 내에서 충분한 감속과 압력증가를 얻지 못하고 연소기로 유입되는 것을 의미하며 이러한 조건에서는 엔진의 작동이 불가능하게 된다.

따라서 흡입구 내의 적절한 위치에서 충격과 발생되도록 제어하는 것이 필요하며 이를 위해 PID 제어기를 설계하였다.

엔진 성능의 최적화를 통한 최적의 충격과 발생 위치가 결정되지 않아 먼저 연료유량과 노즐 목 면적 제어를 통해 흡입구 외부에서 발생하는 충격과 위치를 흡입구 내부에서 발생되도록 하는 제어알고리즘을 설계, 적용하였다.

PID 제어기는 비례게인(Proportional Gain), 적분게인(Integral Gain), 미분게인(Derivative Gain)값의 조정을 통해 제어변수를 제어하는 것으로 강인성이 뛰어나 항공기와 같이 시스템의 신뢰성을 최우선으로 하는 제어기에서 가장 많이 적용되고 있는 알고리즘이다 [3].

PID 제어기의 각 게인값은 P₄-margin의 값이 양의 영역으로 회복하도록 trial-error 방법을 통해 구하였다.

3.1 연료유량 제어알고리즘 적용 결과

Figure 5는 P₄-margin이 0보다 작아 충격과 흡입구 외부에서 발생하는 것으로 예측되는 저고도, 받음각 10°인 운용조건에서 PID 연료유량 제어를 적용한 결과이다.

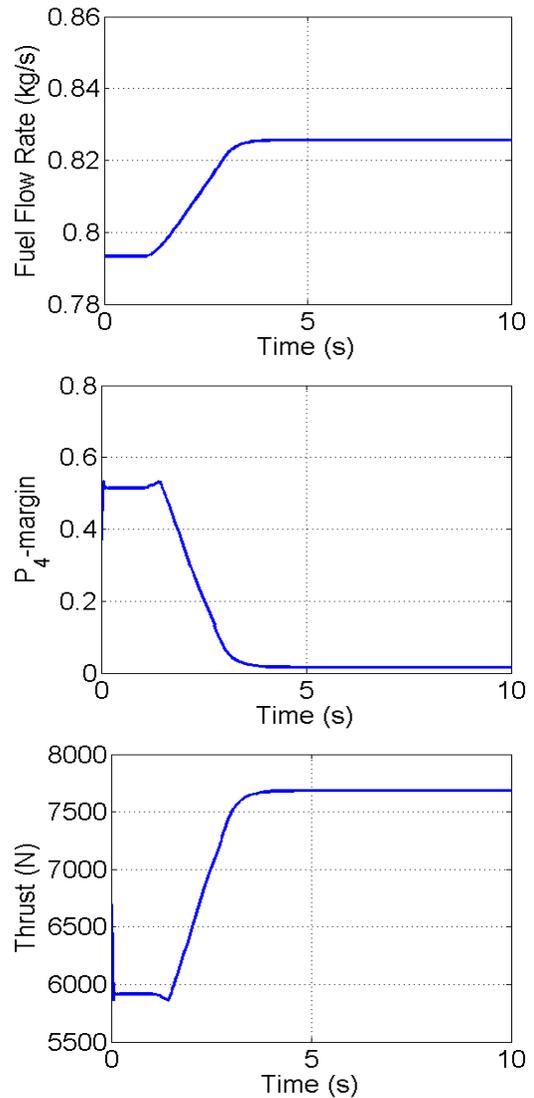


Fig. 5 PID 연료유량 제어 알고리즘 적용 결과

PID 제어기를 통해 연료유량의 증가 속도를 제어함으로써 P_{4_margin} 의 값이 양의 영역으로 회복되었음을 확인할 수 있다. 이때의 PID 게인값은 각각 0.6856, 0.95, 0.006이다.

3.2 노즐 목 면적 제어 알고리즘 적용 결과

Figure 6은 P_{4_margin} 이 0보다 작아 충격과 흡입구 외부에서 발생하는 것으로 예측되는 저고도, 받음각 10° 인 운용조건에서 PID 노즐 목 면적 제어기를 적용한 결과이다. PID 제어기를 통해 노즐 목 면적을 0.028m²에서 0.0335m² 사이에서 제어한 결과 P_{4_margin} 의 값이 양의 영역으로 회복되었음을 확인할 수 있다. 이때의 PID 게인값은 각각 0.062, 0.5, 0.005이다.

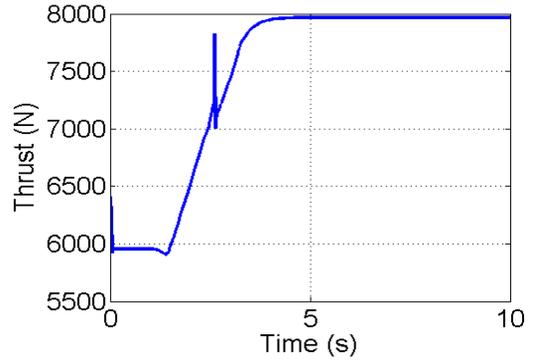
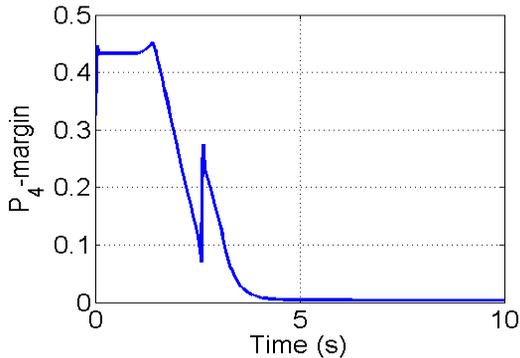
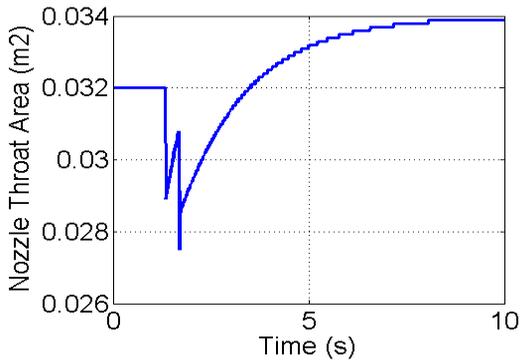


Fig. 6 PID 노즐 목 면적 제어 알고리즘 적용 결과

4. 결 론

초음속 엔진의 동특성 해석을 통해 흡입구에서의 충격과 발생위치를 모사한 결과 비행체의 받음각이 커짐에 따라 버즈마진이 작아지며 흡입구 외부에서 충격과 발생함을 확인할 수 있었다. 이에 연료유량과 노즐 목면적을 제어하여 최소의 버즈마진을 확보하기 위한 PID 제어기를 설계, 적용하였다.

참 고 문 헌

1. K.I. Harner and J.P. Patrick, "Control System Requirements for Advanced Ramjet Engines", *AIAA*, 1978.
2. D. P. Petters and J. L. Leingang, "Rapid Computer Simulation of Ramjet Performance", *AIAA 93-2049*, 1993
3. 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