

# 비행중 대기 외란을 고려한 초음속 엔진 제어용 모델링 기법 연구

박익수\* · 박정우\*\* · 탁민제\*\* · 김선경\*\*\* · 김성진\*\*\* · 성홍계\*\*\*

## Dynamic modeling of supersonic engine for control law design considering the air disturbance

Iksoo Park\* · Jungwoo Park\*\* · Minjea Tahk\*\*  
Sunkyeong Kim\*\*\* · Sungjin Kim\*\*\* · Honggye Sung\*\*\*

### ABSTRACT

Dynamic model for supersonic engine is proposed to design control law. The model structure is constructed to capture the local characteristics of supersonic and subsonic flow by using conservation equations. To evaluate the stability of control law under the disturbances, the air turbulence model is incorporated with the engine model. The combined model shows analogous results compared to performance analysis model which is good coincidence with CFD results and disturbance effects.

### 초 록

제어법칙 설계를 위한 초음속 엔진의 동적 모델링을 수행하였다. 초음속 유동장과 연소 유동장에 대한 적절한 보존 방정식을 이용하여 관심 있는 위치에서의 유동 특성을 관측할 수 있도록 모델을 구성하였고, 제어기 설계 후 대기 외란에 의한 제어 안정성을 평가하기 위하여 비행 중 엔진이 받게 되는 공기의 외란을 모델링하였다. 모델링 결과 CFD에 의해 비교 검토된 성능해석 모델과 정상상태 성능이 매우 일치한 결과를 보였으며 자유흐름의 외란 특성이 엔진 모델과 결합하여 엔진 유동장의 다양한 형태로 표현됨을 확인 하였다.

Key Words: Supersonic engine, Engine control, Air disturbance

### 1. 서 론

초음속 엔진은 고속의 압축 공기에 액체 연료를 분사하여 복잡한 화학 반응을 수반하는 연소 반응과 노즐 팽창을 통해 추력을 얻는 메커니즘을 가지고 있다. 이러한 다양한 물리적 현상을 수학적인 모델로 표현하기 위하여 복잡한 형태의 모델링이 시도되었지만, 엔진 제어법칙을 설

\* 국방과학연구소

\*\* 한국과학기술원

\*\*\* 한국항공대학교

연락처, E-mail: gaunst@hanmail.net

계하기 위한 모델은 보다 간단한 수식 구조를 가지면서 관심 있는 운전특성을 정확하게 표현할 수 있는 형태가 요구된다.

본 연구에서는 엔진 제어를 설계하기 위하여 참고문헌[1]에 제시된 결과를 수정하여, CFD를 통하여 그 성능이 비교 검증된 엔진성능 모델의 결과와 비교하였다. 아울러 Tank가 제안한 대기 외란 변수가 흡입구의 매개변수와 연결되도록 하여 흡입구로 유입된 대기 외란에 의한 영향을 엔진 내부에서의 다양한 유동변수로 나타내도록 모델링 하였다.

## 2. 대기외란 모델링

### 2.1 배경

대기외란에 의한 비행체에 미치는 영향에 대한 관심은 기체 구조적 관점에서 불특정한 하중에 대한 영향을 살펴보는 데서 출발하여, 근래에는 비행제어 및 엔진제어 분야에서 시스템의 성능, 제어 안정성, 비행성 평가를 목적으로 많이 활용되고 있다. 이전에 제안된 Dryden 및 Von Karman 모델은 대기외란의 속도성분을 표현하여 엔진 설계자에게 제한적인 이용가치를 가지고 있었으나, 1996년 보잉사의 Tank에 의해 제안된 모델은 밀도, 온도, 압력과 같은 열역학적 변수를 추가적으로 시뮬레이션 할 수 있는 방법을 제안함으로써 외란에 의해 엔진에 미치는 영향에 대한 연구를 가능하게 하였다.[2] 또한 1997년도에 NASA의 McMinn은 Tank 모델을 근거로 하여 고도, 위도, 경도에 따른 외란의 특성을 고려하여 시간영역에서 효과적으로 시뮬레이션 할 수 있는 방법을 고안하여 엔진분야에서 표준으로 사용할 것을 제안하였다.[3] 본 논문에서는 Tank에 의해 고안되고 McMinn에 의해 제안된 시뮬레이션 기법을 이용하여 대기 외란을 시뮬레이션 하였다.

### 2.2 대기외란모델

대기외란은 Kolmogorov 스펙트럼 밀도(PSD) 함수 구조를 가지며 식 (1)과 같이 정의된다.

$$E(k) = \alpha \epsilon^{\frac{2}{3}} k^{-\frac{5}{3}} \quad (1)$$

여기서  $k$ 는 공간 주파수,  $\epsilon$ 은 돌풍 소실율, 그리고  $\alpha$ 는 해당 외란 변수(속도, 압력, 온도)에 따른 특화 상수이다.  $\epsilon$ 은 Dryden 모델에서 정의된 특정 지역에서의 고도별 대기외란 분산값( $\sigma$ )을 이용하여 구할 수 있으며 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$\epsilon = \frac{\sigma^3}{(1.5\alpha)^{3/2} L_0} \quad (2)$$

여기서  $L_0$ 는 scale length로 관심 있는 가장 긴 파장을 의미하고, 돌풍 소실율  $\epsilon$ 은 특정 고도(18 km)에 대해 데이터 수집이 가능한 영역에서 정의되어 있으며, 영역별 돌풍 소실율 비(ratio)는 전 고도의 모든  $\epsilon$  값에 적용하여 사용된다.

스펙트럼 함수를 시간영역으로 변환하기 위하여 Fairall이 제안한 방법을 이용하여 시뮬레이션 하면 각각의 외란에 대하여 Fig. 1,2와 같은 결과를 얻을 수 있다.[4]

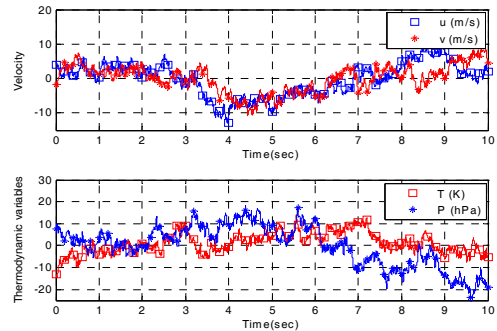


Fig. 1. Disturbance of Velocity and Thermodynamic Variables

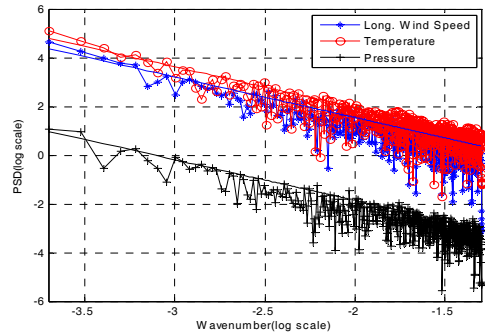


Fig. 2. PSD of Air Disturbances

### 3. 엔진 모델링

#### 3.1 모델 구조

엔진 모델은 참고문헌[1]에 제시된 모델을 이용하여 몇 가지의 손실계수와 종말 충격파의 위치를 계산할 수 있는 모델을 추가하였다.

참고문헌에 제시된 방법으로 얻은 종말 충격파 후단에서의 전압력( $P_{0s2}$ )과 흡입구에서의 압축 손실에 의한 충격파 전단의 전압력( $P_{0s1}$ )을 이용하여 식 (3)을 적용하면 종말 충격파 전단의 마하수( $M_{s1}$ )을 구할 수 있다.

$$\frac{P_{0s2}}{P_{0s1}} = \left[ \frac{\frac{\gamma+1}{2} M_{s1}^2}{1 + \frac{\gamma-1}{2} M_{s1}^2} \right]^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \left[ \frac{1}{\frac{2}{\gamma+1} M_{s1}^2 - \frac{\gamma-1}{\gamma+1}} \right]^{\frac{1}{\gamma-1}} \quad (3)$$

위 식에서 얻은 종말 충격파 전단 마하수와 흡입 공기량, 엔트로피 관계식 및 질량 보존식을 이용하면 식 (4), (5)와 같이 표현할 수 있고 식 (6)과 같이 충격파가 위치한 단면적( $A_{shock}$ )을 구할 수 있다.

$$\epsilon_{s1} = \frac{A_{shock}}{A_{s1}^*} = \frac{1}{M_{s1}} \left[ \left( \frac{2}{\gamma+1} \right) \left( 1 + \frac{\gamma-1}{2} M_{s1}^2 \right) \right]^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}} \quad (4)$$

$$A_{s1}^* = \frac{\dot{m}_a}{P_{0s1} \sqrt{\gamma R T_{0s1}} \left( \frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}} \quad (5)$$

$$A_{shock} = A_{s1}^* \epsilon_{s1} \quad (6)$$

여기서  $\dot{m}_a$ 는 흡입 공기량,  $T_{0s1}$ 는 충격파 전단 전온도,  $R$ ,  $\gamma$ 는 각각 기체상수 및 비열비이다.

#### 3.2 모델 성능

엔진 성능 모델은 “Brayton” 사이클을 기반으로 한 열역학적 해석을 통하여 획득한 모델로, 엔진의 주요 구성품 작동 특성을 다양한 손실 및 효율 계수를 통하여 시험 결과가 쉽게 보정될 수 있는 구조를 가지고 있다. 공기 흡입구에서의 충격파 및 열손실, 마찰손실을 고려하였고 연소 반응으로 인한 유동의 상태량 변화는 CEA (Chemical Equilibrium and Application)를 이용하여 계산하도록 하였다.[5] 이러한 특성을 가진 엔진 성능 모델은 시험결과를 이용하여 쉽게 보정할 수 있는데, CFD 해석 결과를 모의 엔진 시험으로 가정

하여 보정되었으며 엔진 제어모델의 기준 모델로 사용하였다. Fig. 3은 엔진이 특정 비행조건에서 당량비 변화에 따른 엔진 성능모델과 제어용 모델을 비교한 결과로, 내부 유동 변수들이 매우 근사한 결과를 보이고 있음을 알 수 있다. 또한 그림에는 나타나 있지 않지만 엔진 제어용 모델의 주요 관심 변수인 추력, 종말 충격파 위치 또한 매우 일치하는 결과를 보였다.

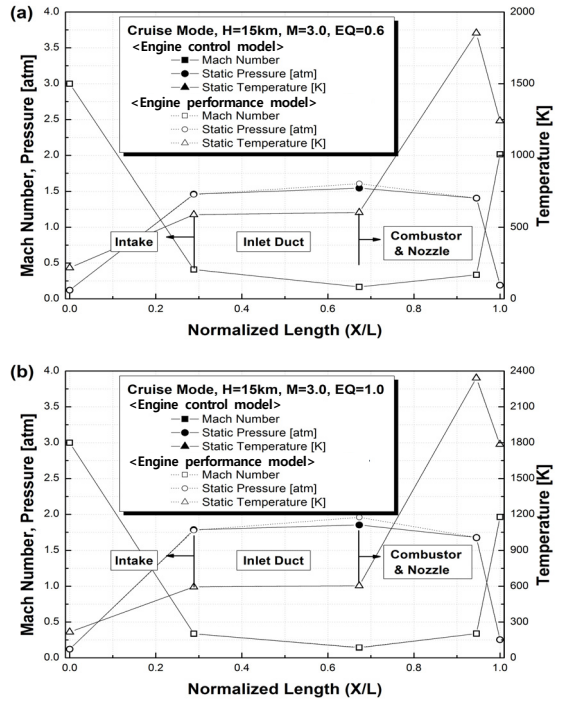


Fig. 3. Comparison of Engine Control and Performance Model: Equivalence Ratio (a) 0.6 and (b) 1.0

### 4. 시뮬레이션 결과

엔진에 미치는 대기 외란의 영향에 대해 살펴보기 위하여, 연료를 당량비 0.5에서 1.0까지 변화시키고 동시에 대기의 속도, 압력, 온도 외란을 각각 모사하여 추력 및 충격파 위치 응답을 살펴보았다. 그림 Fig. 4는 비행방향과 같은 속도의 외란에 의한 응답이고 Fig. 5는 온도 및 압력 외란에 의한 결과이다. 압력 외란에 대한 추력 및 충격파 위치 응답은 낮은 민감도를 보였

으나, 속도 및 온도외란의 경우에는 자유흐름 마하수 및 공기 밀도에 보다 큰 영향을 주어 압력 외란에 비해 보다 큰 응답을 보였다. 또한 연료의 공급이 매우 큰 범위에서 시뮬레이션 되었다는 것을 고려하면 외란에 의한 영향이 작지 않음을 의미한다.

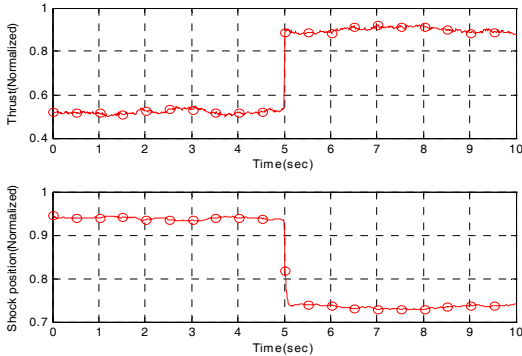


Fig. 4. Response of Thrust and Shock Position under Disturbance of Longitudinal Wind Speed

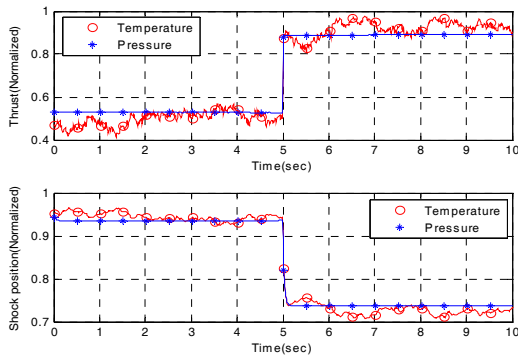


Fig. 5. Response of Thrust and Shock Position under Disturbance of Thermodynamic Variables

#### 4. 결 론

초음속 엔진의 엔진 제어용 모델에 대하여 수직 충격과 위치를 계산할 수 있도록 하였고, 그 결과를 엔진 성능 모델과 비교하였다. 또한 대기 외란에 대한 엔진의 응답을 살펴보기 위하여 흡

입구 유동변수와 외란 변수의 관계를 이용하여 시뮬레이션 하였다.

시뮬레이션 결과 엔진 제어용 모델은 성능모델과 매우 근사한 정상상태 결과를 보였고, 외란의 특성에 의해 제어 목적변수가 큰 영향을 받는다는 것을 확인하였다. 따라서 엔진 및 제어를 설계할 경우에 외란에 대한 특성을 고려하여 설계 여유 및 안정성 해석을 수행해야 하며, 보다 정확한 외란에 대한 평가를 위해 흡입구 및 연소기의 비정상 고차 모델링을 통하여 추가적인 영향을 살펴볼 필요가 있다고 판단된다.

#### 참 고 문 헌

1. 박익수, 박정우, 민병문, 김선경, 성홍계, 탁민제, "초음속 엔진제어를 위한 동적모델링 기법," 한국항공우주학회 2008 추계 학술 논문 발표집, 2008, pp821-824.
2. William G. Tank, and James R. Gillis, "Atmospheric disturbance models for linear and nonlinear system response," AIAA 34th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, NV Jan 15-18, 1996.
3. John D. McMinn, "Extension of Kolmogorov Atmospheric Turbulence Model for Time-Based Simulation Implementation," AIAA, 1997, pp. 322-334.
4. Fairall, C.W., White, A.B., Thompson, and Dennis W. "A Stochastic Model of Gravity-Wave-Induced Clear-Air Turbulence, J. Atmos. Sci. Vol. 48, No. 15, August, 1991.
5. 염효원, 김선경, 성홍계, 길현용, 윤현걸, "통합 수치해석기법으로 초음속 엔진의 가속과 순항 비행시 추진체의 성능연구," 한국추진공학회, 2008년 춘계학술대회논문집, 2008, pp. 299-302.