

# 액적 분사/연소를 고려한 초음속 엔진의 buzz 특성

김성진\* · 염효원\*\* · 성홍계\*\*\* · 길현용\*\*\*\* · 윤현걸\*\*\*\*

## Buzz Characteristic of Supersonic Propulsion System with Spray Injection and Combustion

Seong-Jin Kim\* · Hyo-Won Yeom\*\* · Hong-Gye Sung\*\*\* · Hyun-Yong Gil\*\*\*\* · Hyun-Gull Yoon\*\*\*\*

### ABSTRACT

In supersonic propulsion system, the inlet buzz phenomenon in the subcritical operation arises large pressure oscillation, combustion instability, and thrust loss, etc. Inlet Buzz phenomenon and the spray injection/combustion are figured out by the unified unsteady numerical analysis. TAB(Taylor Analogy Breakup) model was applied. Acoustic mode of the entire engine was investigated by detail analysis of pressure fluctuation at each location of the engine

### 초 록

초음속 엔진에서 흡입구의 buzz현상은 큰 압력진동과 연소 불안정성 그리고 추력 감소 등을 야기한다. 흡입구의 buzz현상과 액적 분사/연소의 동적인 상호관계를 이해하기 위하여 통합된 비정상 연소수치해석을 수행하였으며, 액적 모사를 위하여 TAB(Taylor Analogy Breakup) model을 적용하였다. 흡입구에서의 충격파거동과 주요 위치에서 압력거동을 분석하고 초음속 엔진 전영역에서의 음향모드를 분석하여 현 시스템의 동적거동을 파악하였다.

Key Words: Super Sonic Propulsion System(초음속 엔진), Unsteady Numerical Combustion Analysis(비정상 연소수치해석), Terminal Shock(종말 충격파), Acoustic Pressure Mode(압력파), Spray Injection(액적 분사), Spray Combustion(액적 연소)

### 1. 서 론

초음속 엔진은 외부의 공기를 산화제로 사용

하며, 초음속으로 유입되는 공기는 별도의 장치 없이 흡입구의 형상을 이용하여 압축된다. 또한 엔진 내부의 별도의 분리 장치가 존재 하지 않기 때문에 비행 조건 및 흡입구의 충격파 구조와 연소실 화염은 매우 밀접한 관계를 갖는다. 따라서 초음속 엔진이 안정적인 성능을 갖기 위해서는 흡입구와 연소실사이의 동적인 상호간섭의 이해가 필요하다.

\* 한국항공대학교 우주정보 시스템 공학과

\*\* 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과

\*\*\* 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

\*\*\*\* 국방과학연구소 1본부 5부

연락처, E-mail: hgsung@kau.ac.kr

본 논문에서는 초음속 엔진에 적용하고 있는 액적 분사와 연소를 고려하여 비정상 연소수치 해석을 수행하였으며 해석된 결과를 바탕으로 엔진 전 영역에서의 음향모드를 분석하였다.

## 2. 수치 해법

지배방정식은 질량, 운동량, 에너지 보존 방정식과 N개의 화학종 방정식에 시간평균 및 질량가중 평균을 취한 방정식을 사용하였다.

초음속 엔진은 복잡한 충격파 시스템이 존재하며 충격파/충격파, 충격파/경계층 간의 강한 간섭이 발생한다. 이러한 난류 유동 특성을 고려하기 위하여 난류의 압축성 효과를 고려하는 Sarkar 모델과 Yang & Shin에 의해 제안된 레이놀즈수  $k-\epsilon$  모델을 사용하였다. 난류 연소 모델은 hybrid kinetic/eddy-dissipation model을 적용하였다. 또한 액적의 거동을 계산하기 위하여 액적의 변형과 진동이 스프링-질량계와 유사하다는 가정을 바탕으로, 액적 변형 파라미터가 1보다 클 때 분열하는 TAB (Taylor Analogy Breakup) model을 적용 하였다. 효율적인 계산을 위하여 계산영역을 다중블록으로 구성하였으며, 각 블록마다 MPI (Message Passing Interface) 병렬 계산 기법을 적용하였다. [1]

## 3. 연구 결과

### 3.1 해석 대상 및 계산 조건

Figure 1은 초음속 엔진 흡입구의 전단(leading edge)에서부터 노즐 출구까지 유로를 개략적으로 나타낸 것이며, Fig. 1에 표시된 지점에서 압력 진동을 측정하였다.

초음속 엔진은 축대칭 형상이며, 연료분사기를 갖고 있다. 계산 영역은 흡입구 외부에 2개, 흡입구 내부와 디퓨저에 각각 1개, 보임기에 3개, 연소실 및 노즐에 1개의 block으로 구성하였다.

입구 전단에서의 유동 조건은 마하수 2.1 이며 압력과 온도는 고도 1 km에서의 조건을 사용하였다. [2]

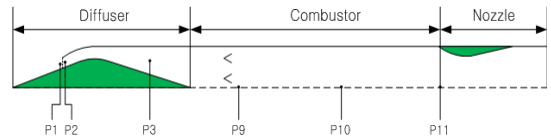


Fig. 1 Physical Model and Computation Model with Location of Pressure Measurement

### 3.2 결과

Figure 2는 초음속 엔진 내부의 각 지점(Fig. 1)에서의 압력 진동(a)과 주파수 스펙트럼(b)을 나타낸 것이다. P1 지점에서의 압력진동은 그 이외의 부분에서보다 높은 진폭을 갖는 것을 확인할 수 있다. 이는 흡입구에서 발생하는 종말 충격파가 P1 지점을 앞, 뒤로 통과하는 시간에 큰 압력 차이를 유발시키기 때문이다.

P2 지점은 종말 충격파 뒤 부분이며 P1 지점에 비해서는 작은 압력진폭을 갖는다. P2 지점에서 상대적으로 큰 압력 진폭을 갖는 시간대는 종말 충격파가 상대적으로 P2 지점에 근접하였을 때이며, 이 시간대의 P1 지점은 낮은 압력이긴 시간동안 유지된다. P3 지점은 다른 지점과 달리 고주파(3333.3Hz)의 압력 진동이 발생한다. 이는 P3 지점이 흡입구와 연소실의 압력파의 간섭과 경계층의 불안정 영역이기 때문에 일어나는 현상이다.

Figure 2에서는 엔진 흡입구로 유입되는 공기의 유량의 진동과 주파수를 나타내었다. 흡입구로 유입되는 질량유량의 진동 주파수는 압력진동의 주파수와 비슷한 132.7 Hz 이지만, 압력파는 다른 위상을 갖는다. 흡입구(inlet cowl)에서 충격파의 움직임은 엔진으로 유입되는 공기의 유량을 변동시키며, 변동된 공기의 유량은 연소실로 유입되어 연소실 압력을 변동시킨다. 이러한 현상 때문에 엔진 전체에 약 132.7 Hz의 주기가 지배적으로 발생된다.

Figure 4는 한 주기(132.7 Hz) 내에서 흡입구 충격파의 거동과 연소실의 연료분포 그리고 온도분포를 알아보기 위해서, Fig. 3에 표시된 a, b, c, d 에서의 밀도구배, 연료의 질량분율 그리고 온도분포를 나타낸 것이다. 흡입구의 거동(Fig.4 left)을 살펴보면 흡입되는 질량유량이 많

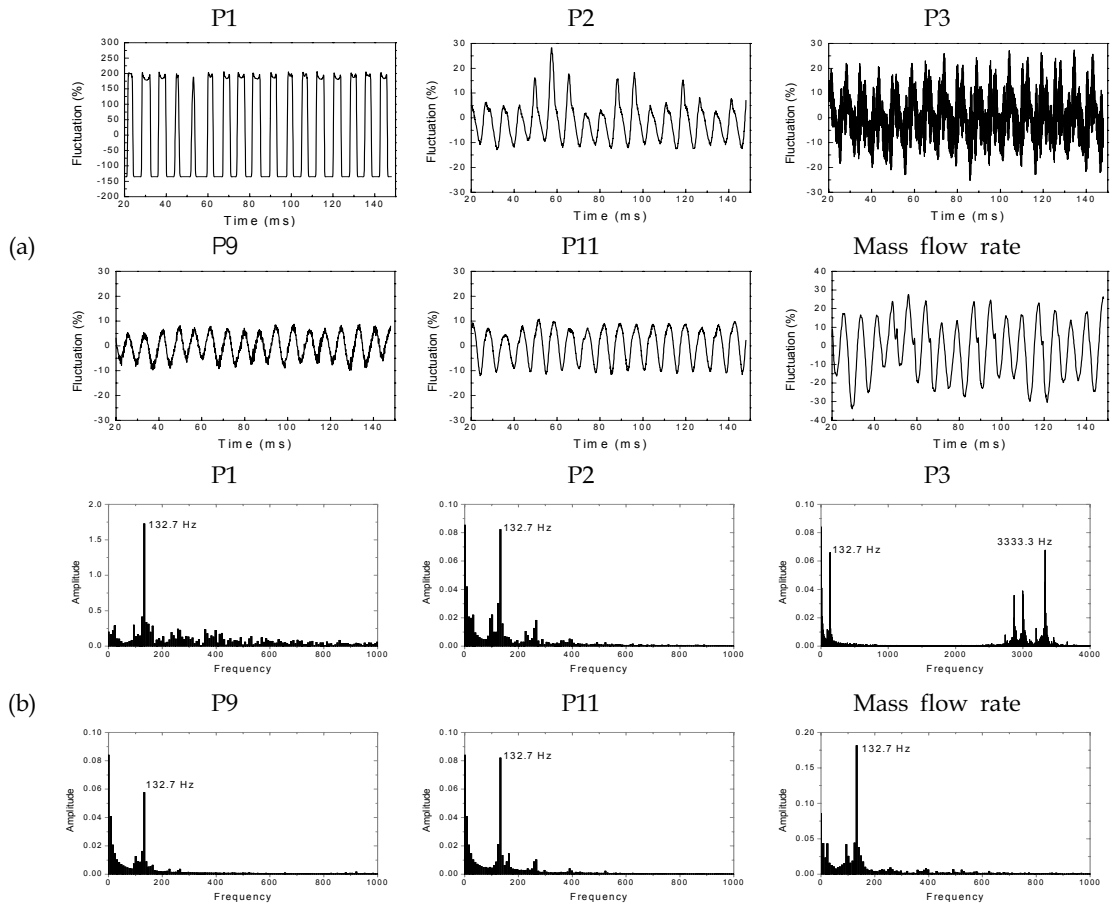


Fig. 2 Fluctuation of Pressure and Mass Flow Rate (a) and Their Frequency Spectra (b) Recorded at Different Location.

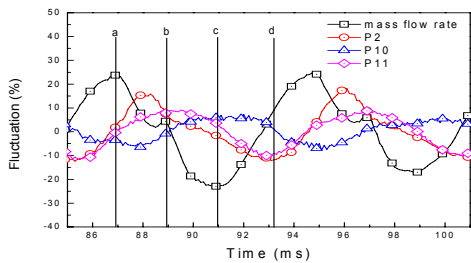


Fig. 3 Fluctuation history of mass flow rate and pressure at P2, P10, and P11

은 a의 경우는 흡입구에서 발생하는 충격파가 흡입구 내부로 들어와 있으며 흡입구의 박리가 작다. 하지만 흡입되는 질량유량이 적은 c의 경우는 흡입구의 충격파가 상대적으로 흡입구(inlet cowl)로 이동하며 흡입구에 형성되어 있는 박리

영역이 큰 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 연소실의 압력과 연관 지어 설명할 수 있다. 흡입되는 공기의 질량 유량이 많아지면 연소실에서 남는 연료(연소실 벽면과 중심부분)와 반응을 하여 연소실의 화염 영역이 넓어지며 이에 따라 압력이 증가한다. 이는 Fig. 4의 연소기 유동(right)에서 알 수 있다. a에 비해서 c의 연소실의 화염 영역이 넓은 것은 흡입되는 공기의 유량이 증가하기 때문이며, 이때 넓어진 화염영역으로 인하여 연소실 압력이 증가하게 되고 증가된 연소실의 압력이 흡입구 충격파를 흡입구로 밀어낸다.

이러한 주기적인 현상은 분사되는 액적의 분포(center)에서도 나타난다. 흡입되는 공기의 유량이 가장 많은 시점인 a에서는 엔진 내부의 유속이 빨라져 액적이 상대적으로 빨리 기화되어 분사기 뒷

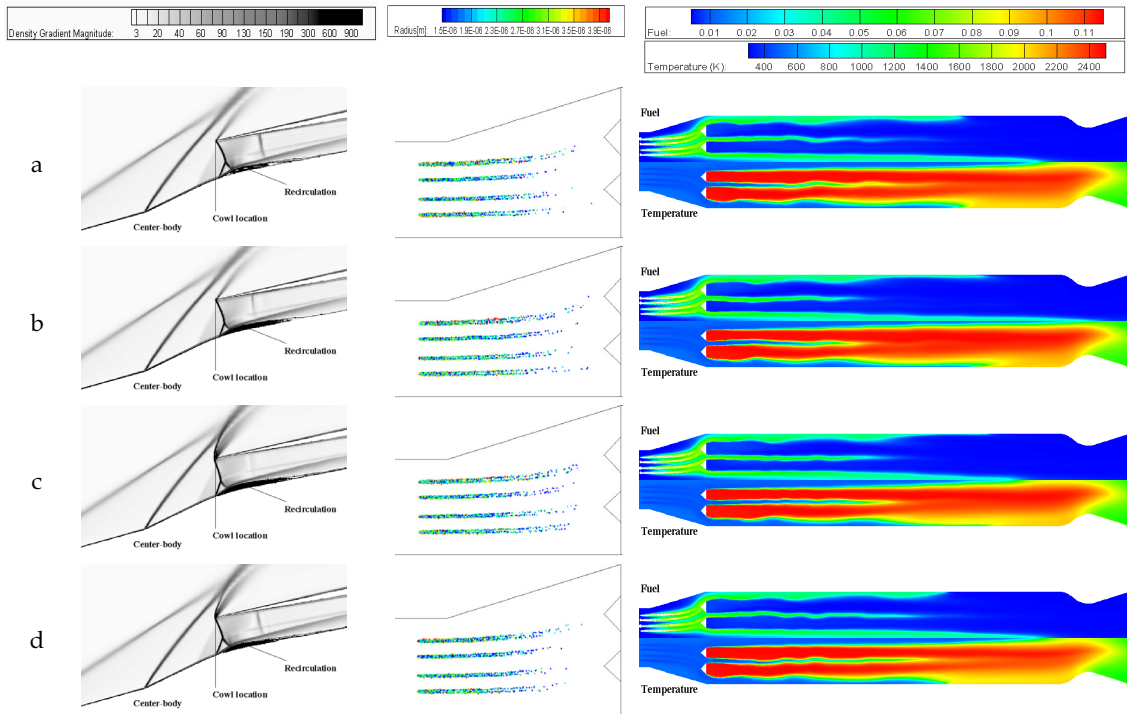


Fig. 4 Density Gradient Magnitude Contour Near The Inlet(left), Fuel Mass Fraction, and Temperature Contour in Combustor(right) and Injected Spray Particles(center) During The Buzz Cycle(132.7 Hz)

부분에서 액적의 밀도가 낮은 반면 흡입되는 유량이 적은 c에서는 액적이 높은 밀도를 갖는다. 흡입구에서 연소기까지 나타난 이러한 현상이 137.2 Hz의 주기를 갖고 엔진 전체에 걸쳐 나타난다.

탈피는 공기/연료 혼합물의 온도와 화염 온도를 떨어뜨림으로 buzz 종말 충격파의 동적거동은 액체연료의 연소를 고려하지 않은 가스연료연소 경우의 보다 완화된다.

#### 4. 결 론

#### 참 고 문 헌

흡입구의 buzz특성을 분석하기 위하여 액적분사/연소가 고려된 비정상 연소수치해석을 수행하였다. 흡입구의 buzz현상으로 흡입되는 질량 유량의 변동과 액적 분사/연소로 인한 연소실 압력진동 간 동적현상을 관찰하였다. 엔진 내부의 각 지점에서 나타나는 주된 압력진동은 buzz의 주파수인 137.2 Hz와 유사하지만 연소실에서의 압력진동과 흡입공기의 유량변동은 시간지연으로 phase-lag이 크게 나타난다. 연료의 액적기화는 buzz에 의한 흡입공기의 유량과 밀접한 관련이 있으며 공기량이 최대가 될 때 액적기화가 가장 활발하다. 액체연료의 연소에 필요한 엔

1. 염효원, 김선경, 김성진, 성흥계, 길현용, 윤현걸, "초음속 엔진의 흡입구 종말충격파와 연소실 화염의 상호간섭 동적연구," 한국추진공학회 2009년도 춘계학술대회 논문집, pp.79-82, 2009
2. Hyo-Won Yeom, Seong-Jin Kim, Hong-Gye Sung and Vigor Yang., "Inlet Buzz and Combustion Oscillation in an Axisymmetric Ramjet Engine.," AIAA-2010-756, 48th AIAA Aerospace Science Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, Orlando, Florida, Jan. 4-7, 2010