Gas generator의 초음속 연소현상에 대한 연구

김성진* · 서봉균** · 염효원** · 성홍계*** · 길현용**** · 윤현걸****

A Numerical Study of Supersonic Combustion of Gas Generator

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

ABSTRACT

An unsteady numerical combustion analysis was performed to investigate the combustion characteristics of A Dual Combustion Ramjet(DCR) engine using a gas generator. According to a variance of the equivalence ratio of the gas generator, the flow pattern in the combustor was analyzed. A typical acoustic frequency in the combustor was observed by detail analysis of pressure fluctuation at each location of the combustor.

초 록

이중연소 램제트 엔진의 연소기 내부의 연소 현상을 이해하기 위하여 gas generator를 포함하고 있는 이중연소 램제트 엔진의 연소기에 대한 비정상 연소 수치해석을 수행하였다. Gas generator의 당량비 변화에 따른 연소기 내 유동의 변화를 파악하였으며, 주요 위치에서의 압력거동을 분석하고 연소기 전 영역에서의 음향모드를 분석하여 본 연구에 사용된 연소기의 동적거동을 파악하였다.

Key Words: Dual Combustion Ramjet Engine(이중연소 램제트 엔진), Unsteady Numerical Combustion Analysis(비정상 연소수치해석), Gas generator(가스 발생기)

1. 서 론

램제트 엔진과 스크램제트 엔진은 로켓 엔진보다 더 나은 비추력을 제공하지만, 제한된 비행 조건 때문에 하나의 엔진으로는 광범위한 마하수의 비행을 만족 시킬 수 없다. 이러한 문제점을 극복하기 위하여 미국, 유럽 등 기술 선진국에서는 램제트와 스크램제트 엔진을 모두 사용하는 이중모드 램제트(DMR, Dual Mode Ramjet)엔진과 이중연소 램제트(DCR, Dual Combustion Ramjet)엔진과 같은 복합엔진 개발에 많은 관심을 가지고 있다. 이중모드 램제트 엔진은 초음속 비행 영역에서는 램제트 엔진을

* 한국항공대학교 우주정보 시스템 공학과
** 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과
*** 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부
**** 국방과학연구소 1본부 5부
연락저자, E-mail: hgsung@kau.ac.kr

그리고 극초음속 비행영역에서는 스크램제트 엔진에 적합하도록 흡입구와 노즐의 형상을 조정하는 가변 형상을 사용하여 추력을 얻는 추진기관이다. 그리고 이중연소 램제트 엔진은 흡입구 및 노즐이 고정된 형상이며 하나의 추진기관 내부에 램제트용 연소기와 스크램제트용 연소기가 동시에 존재하며 모든 비행 영역에서 두 가지연소기가 작동하지만 초음속 비행영역에서는 램제트 연소기가 대부분의 추력발생을 제공하며, 극초음속 비행영역에서는 스크램제트 연소기가 추력발생을 담당한다.

본 연구에서는 이중연소 램제트 엔진의 연소기를 모사한 초음속 연소기를 설계하여 Gas generator의 당량비에 따른 초음속 연소기 내부의 연소현상을 비정상 수치해석을 통하여 관찰하였다.

2. 수 치 해 법

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

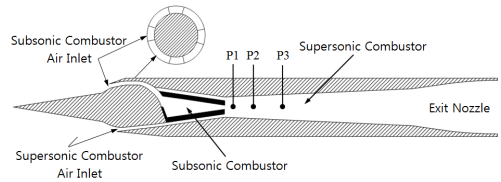
초음속 엔진은 복잡한 충격파 시스템이 존재하며 충격파/충격파, 충격파/경계층 간의 강한 간섭이 발생한다. 이러한 난류 유동 특성을 고려하기 위하여 난류의 압축성 효과를 고려하는 Sarkar 모델과 Yang & Shin에 의해 제안된 저레이놀즈수 k-ε모델을 사용하였다. 난류 연소모델은 hybrid kinetic/eddy-dissipation model을 적용하였다. 또한, 효율적인 계산을 위하여 계산영역을 다중블록으로 구성하였으며, 각 블록마다 MPI (Massage Passing Interface) 병렬 계산 기법을 적용하였다. [1]

3. 연 구 결 과

3.1 해석 대상 및 계산 조건

Figure 1의 (a)는 이중연소 램제트 엔진의 흡입구와 각 연소기 그리고 노즐 출구까지의 내부 유로를 개략적으로 나타낸 그림이며, 표시된 지점에서 압력진동을 측정하였다. 그리고 Fig. 1의 (b)는 계산에 사용된 격자를 나타낸 그림이다.

계산에 사용된 형상은 축대칭 형상이며, 계산영역은 Gas generator, 초음속 연소기와 연결된 isolator, 초음속 연소기 그리고 노즐까지 총 4개의 block으로 구성하였다. 총 격자수 대략 66,000개를 사용하였으며, 고도 20km의 대기조건을 바탕으로 계산을 하였다.



(a) Schematic of Dual Combustion Ramjet

(b) Computational domain

Fig. 1 Physical model and computational model [2]

3.2 Gas generator의 연소 생성물

Gas generator에서 Jet A1의 당량비에 따른 연소 생성물의 질량분율과 온도를 결정하기 위하여 CEA Code (Chemical Equilibrium with Applications)를 사용하였으며, 연소 생성물로는 메탄과 일산화탄소 그리고 물이 주로 발생하는 것을 알 수 있다 (Fig. 2).

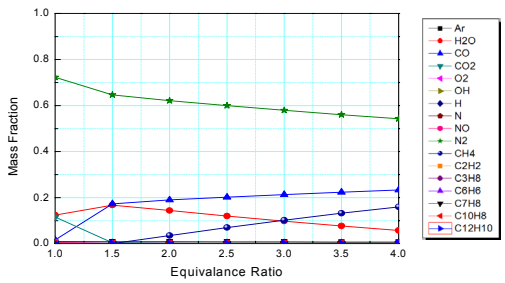


Fig. 2 Mass fraction of species according to the equivalence ratio

또한, 당량비가 증가 할수록 일산화탄소와 메탄의 질량분율은 증가하며 이산화탄소와 물의 질량분율은 줄어드는 것을 확인할 수 있으며, 위와 같은 연소 생성물의 질량분율을 고려하여 계산을 수행하였다.

3.3 결　과

Figure 3은 당량비에 따른 연소기 내부의 온도 분포와 CH_4의 분포를 나타낸 것이다. 당량비가 증가함에 따라 gas generator 내부 연소가스의 온도는 낮아지지만 isolator에서 들어오는 초음속 유동의 공기와 혼합되어 gas generator 후단에서 2차 연소가 일어나는 것을 확인 할 수 있다. 또한, isolator에서 들어오는 초음속 유동에 의해 생성된 충격파와 gas generator 노즐 출구에서 초음속으로 분사되는 연소가스와의 간섭에 의해서 gas generator 후단에 생성된 화염면이 굴곡진 것을 확인 할 수 있다.

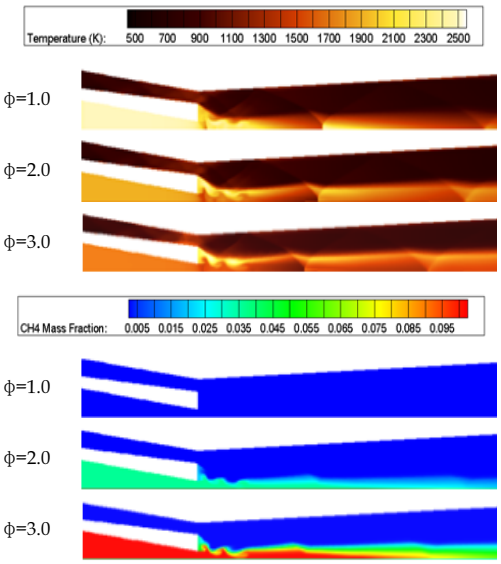


Fig. 3 Temperature and CH_4 mass fraction according to the equivalence ratio

초음속 연소기 내부의 충격파의 위치 역시 당량비가 증가함에 따라 노즐 출구에 근접 한 부분에 형성되는 것을 확인 할 수 있다. 충격파의 강도가 당량비가 증가함에 따라 강해지는 것을 나타내며, 이는 gas generator의 당량비가 증가할수록 연소기 내부의 압력이 증가하기 때문이다. 이는 Fig. 4의 결과에서도 확인 할 수 있다.

Isolator를 통해 들어온 공기와 gas generator에서 발생 된 연소가스와의 2차 연소로 인하여 초음속 연소기 내부의 온도가 국부적으로 증가하며, 증가한 온도는 압력의 증가를 야기 시키며, 시간에 따라 압력이 전파되는 현상을 보인다. Fig. 5의 (a)는 Fig. 1의 각 지점에서의 시간에 따른 압력진동과 주파수 스펙트럼을 나타낸 것이며, 각 지점에서 특정한 압력 진동 주파수가 발생하는 것을 알 수 있다 (299.7 Hz). P1 지점에서의 압력진동 진폭은 다른 두 부분보다 더 큰 것을 확인 할 수 있다. 이는 2차 연소에 의해 국부적으로 증가한 온도에 의하여 압력이 증가했기 때문이다. 압력 진동은 연소기의 후단으로 갈수록 진폭이 줄어드는 것을 확인 할 수 있으며, 이는 연소기 후단으로 갈수록 전파되는 압력의 세기가 줄어들기 때문이다. P2 지점과 P3 지점에서의 압력 진동은 P1 지점에서의 압력진동 주파수(299.7 Hz)와는 다른 주파수(649.4 Hz)가 나타나는 것을 확인 할 수 있다. 이는 2차 연소에 의해 발생된 압력과 연소기 내부의 충격파와의 간섭현상 때문에 발생한 것이다.

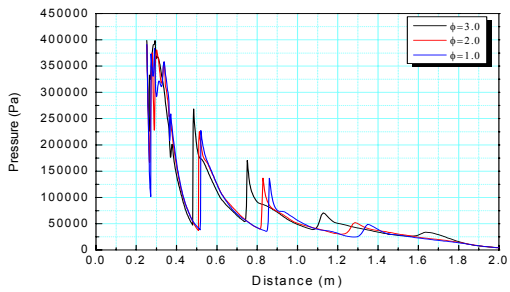


Fig. 4 Pressure distribution along the center line according to the equivalence ratio

Figure 5의 (b)에서는 특정 주파수(299.7 Hz)에서 초음속 연소기 내의 동적거동을 알아보기 위하여 한 주기 내에서의 온도분포와 밀도구배를 나타내었다. Gas generator 후단에서 형성되는 고온의 화염 덩어리가 연소기 뒤로 움직이면서 연소기 내부의 온도가 올라가는 것을 확인 할 수 있으며, 주기의 마지막 시점에서 gas generator 후단에서 다시 연소가스가 roll-up이 되면서 다시 고온의 화염 덩어리가 형성되는 것을 확인 할 수 있다. 이러한 현상은 isolator에서 들어오는 초음속 유동과 gas generator로부터 유입되는 초음속 유동의 간섭 때문에 발생하는 현상이다. 이러한 현상은 밀도구배에서 확연히 나타나는 것을 알 수 있다.

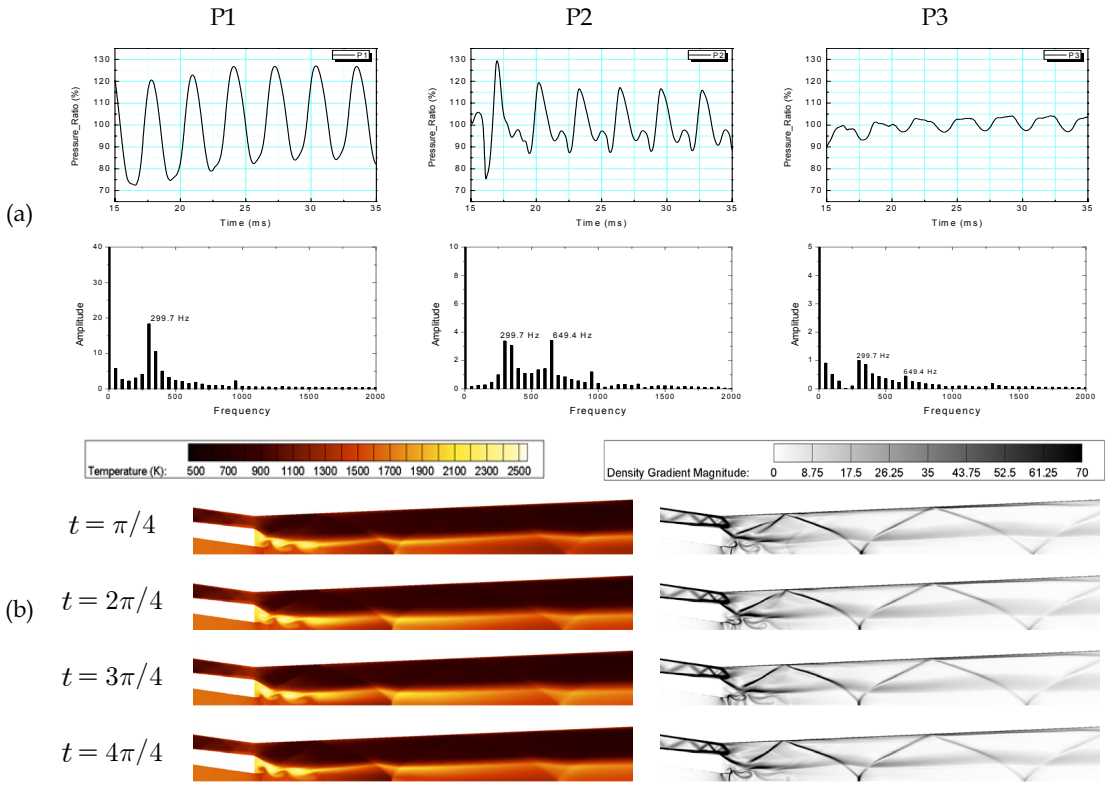


Fig. 5 Pressure fluctuations and their frequency spectra recorded at different location(a) and temperature contour in combustor(b) during one cycle (299.7 Hz).

4. 결 론

이중연소 램제트 엔진의 연소기를 모사한 형상에 대함 비정상 연소 수치해석을 수행하였다. Gas generator에서의 당량비가 연소기에 미치는 영향을 알아보기 위하여 당량비가 1에서 3까지 변화시키며 연소기 내부의 유동 현상을 관찰하였다. 당량비가 증가하면서 연소기 내부의 압력이 증가하고, 그에 따라 연소기 내부의 충격파의 강도가 달라지는 것을 확인 할 수 있었다. 또한, 엔진 내부의 각 지점에서 나타나는 주파수는 gas generator로부터 분사되는 연소가스와 isolator로 유입되는 초음속 공기와의 혼합으로 생성된 고온의 화염 덩어리가 뒤로 전파됨으로써 발생되는 압력의 진동이 연소기 전 영역에 걸쳐 동일한 주파수인 229.7 Hz를 형성하는 것을 확인하였다. Isolator에서 유입된 초음속 흐름과 gas generator로부터 분사되는 연소가스의 간섭으로 인하여 gas generator 후단에 매우 복잡한 유동 구조가 형성되며, 이로 인하여 연소생성물과 공기와의 혼합이 활발히 이루어져 그 부분에서 고온의 화염 덩어리가 생성되는 것을 확인 할 수 있다. 이러한 간섭은 일정 주기 299.7 Hz를 갖는다.

참 고 문 헌

1. 김성진, 염효원, 성홍계, 길현용, 윤현걸, “액적 분사/연소를 고려한 초음속 엔진의 buzz 특성,” 한국추진공학회 2010년도 춘계학술대회 논문집, pp.411-414, 2010
2. P. J. Waltrup, M. E. White, F. Zarlingo, E. S. Gravlin, "History of U.S. Navy ramjet, scramjet, and mixed-cycle propulsion development," AIAA, ASME, SAE, and ASEE, Joint Propulsion Conference and Exhibit, 32nd, Lake Buena Vista, FL, July 1-3, 1996