

압력파동에 대한 고체추진제의 연소응답함수 측정 및 응용

이길용* · 임지환* · 윤웅섭** · 유지창***

Measurement and Application of Pressure-Coupled Combustion Response of Solid Propellant with T-Burner

Gilyong Lee* · Jihwan Im* · Woongsup Yoon** · Jichang, Yoo***

ABSTRACT

Combustion response function of a solid propellant is measured and calculated to study and model the feedback process between acoustic waves and combustion field. Standard Pulsed DB/AB method and related one-dimensional approximate analysis of T-burner are used to obtain the response function at a driving natural frequency. The problems related with simultaneous ignition of propellant samples are also mentioned and treated.

초 록

고체추진 로켓엔진의 자발성 음향불안정 특성 예측 및 평가를 위해 대상 고체추진제의 연소응답함수를 측정하였다. Pulsed DB/AB 방법에 기초한 T-버너 실험을 통해 특정 주파수에서의 연소응답함수를 구하였다. 연소응답함수 계산식은 근사해석법에 기초한 연소불안정 이론으로부터 유도·적용하였다. 추진제 동시점화 및 시편 동시점화 등 연소응답의 측정에 관련된 문제들에 대해 해결방안을 제시하였다.

Key Words: Solid Propellant(고체 추진제), Combustion Response(연소응답), T-Burner(T-버너)

1. 서 론

로켓엔진의 고주파 연소불안정성은 대상 추진제의 화학반응 매커니즘, 대상 시스템의 연소 및 에너지 발생구조와 음향학적 거동 등이 갖는 개별적인 특성 및 상호연관성에 의해 결정된다. 그러나 이들 물리현상의 개별적인 해석은 상대적

으로 용이하고 정확도도 높은 반면, 그 상관관계를 다루는 경우에는 서로 상이한 특성시간과 특성길이 때문에 해석의 정확도와 효율성이 현저히 저하된다. 따라서 이러한 상관관계 및 연소불안정의 연구를 위해 정확도와 효율성이 보장되는 관련 실험기법과 해석이론은 필수적이다.

Culick[1]이 연소응답을 정의한 이후 고체추진 로켓엔진의 연소불안정성을 연구하는 과정에서 다양한 연소응답 측정방법들[2]이 시도되었다. 이 중 회전 Tube와 임피던스 Tube의 경우, 측정 범위의 제한성이 문제가 되며, 직접적인 연소응답 측정법은 비용과 신뢰도 면에서 단점이 있다.

* 연세대학교 대학원 박사과정

** 연세대학교 기계공학과 부교수

*** 국방과학연구소

연락처, E-mail: gleeekostka@paran.com

그러므로 일반적으로 경제적이고 제한성이 적은 T-버너가 널리 사용된다[3,4].

본 논문에서는 Pulsed DB/AB 방법에 기초하여 T-버너 실험을 수행하고 특정 구동주파수에 대한 추진제의 연소응답을 구하는 과정과 실험상의 문제 및 이에 대한 해결방안을 제시한다.

2. Pulsed DB/AB 방법

T-버너를 이용한 실험방법은 크게 Pulsed DB/AB 방법과 VATB(Variable Area T-Burner) 방법으로 나뉜다[5]. 전자는 인위적인 펄스를 통해 음향파동을 유발시키는 방법이고 후자는 추진제 시편의 연소단면적을 연속적으로 증가하게 성형하여 음향파동을 유발시키는 방법이다. 각각은 나름의 장단점이 있으나 본 연구에서는 추진제 시편제작이 보다 간단하고 실험 후 해석이 용이한 Pulsed DB/AB 방법을 사용하였으며, 시스템 개략도는 Fig. 1과 같다.

Pulsed DB/AB 방법은 기본적으로 DB 펄스에 의한 음향파동은 추진제 연소에 의해 증폭되고 시스템 감쇠구조에 의해 감쇠되는 반면 AB 펄스에 의한 음향파동은 시스템 감쇠구조에 의한 감쇠만이 일어나므로 이 두 음향파동의 증폭율의 차이가 추진제 연소에 의한 음향파동의 증폭을 의미한다는 개념에 기초한다.

T-버너 실험의 이론적 근거는 다음과 같다. 우선 T-튜브 내부에서 인위적인 펄스에 의해 형성되는 음향파동은 Eq. 1과 같이 선형이라고 가

정한다. 아래 식에서 p' , p_0 , α , t , ω 는 각각 압력섭동, 평균압력, 증폭계수, 시간, 각주파수이다.

$$p' \approx p_0 \exp(\alpha t) \cos(\omega t) \quad (1)$$

이제 위에 표현한 선형 음향파동의 증폭계수와 연소응답의 상관관계로부터 연소응답을 구하게 된다. Pulsed DB/AB 방법에서 측정된 선형 음향파동의 증폭계수로부터 연소응답함수를 계산하는 식은 Eq. 2와 같다. 이 식은 Culick의 근사해석법에서 유도된 증폭계수에 대한 이론식 중 압력섭동과 연관된 항만을 분리하여 1차원적으로 가정한 T-튜브에 적용함으로써 유도한다. Equation 2에서 \bar{u}_b , L , R_b 는 각각 연소면에서 연소가스 평균속도, T-튜브 축방향 길이, 연소응답함수를 가리킨다. 또한 α_d 와 α_a 는 각각 DB 펄스와 AB 펄스에 의한 음향파동의 감쇠계수이며 D_0 와 D_i 는 추진제 시편의 외경과 내경이다.

$$R_b = \frac{L}{2\bar{u}_b} \left(\frac{D_0^2}{D_0^2 - D_i^2} \right) (\alpha_d - \alpha_a) \quad (2)$$

3. T-버너를 통한 연소응답함수 측정

3.1 점화보조제 : 개별시편의 단면 동시점화특성

연소응답함수 계산식 Eq. 2은 T-튜브를 1차원적으로 가정하여 유도하였으므로, T-튜브 내부에서 추진제 시편은 Fig. 3(a)와 같이 최대한 축단면을 일정하게 유지하면서 연소되어야 한다. 이를 위해서는 추진제 시편의 축단면 전체에 대한 동시점화가 반드시 이루어져야 한다. 또한 T-버너 실험에서는 Fig. 2(a)에서와 같이 T-튜브 내부가 일정압력으로 유지되는 구간이 나타나야 하는데 이를 위해서도 개별시편의 단면 동시점화는 반드시 이루어져야 한다. 동시점화에 실패할 경우 점화기에 의해 추진제 시편 단면의 일부에 우선적으로 점화가 되면서 Fig. 3(b)와 같이 추진제가 연소되므로 Fig. 2(b)에서와 같이 T-튜브 내부의 압력이 연소면의 면적에 따라 증가하다가 감소하는 결과를 보이게 된다.

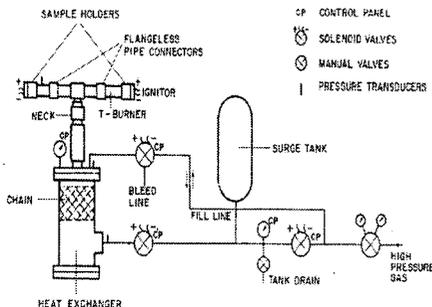
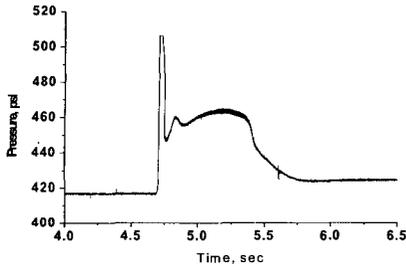
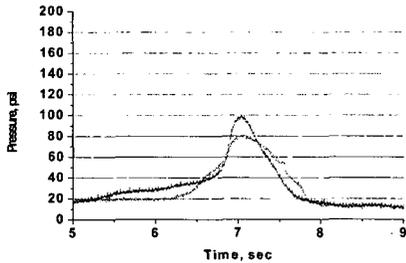


Fig. 1. Schematic Diagram of T-Burner System[5]

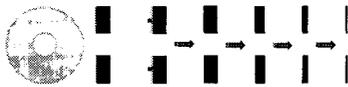


(a) with Fast Ignition Disk

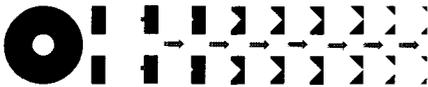


(b) without Fast Ignition Disk

Fig. 2 Effect of Fast Ignition Disk



(a) with Fast Ignition Disk



(b) without Fast Ignition Disk

Fig. 3 Combustion of Propellant Sample

동시점화 문제는 다양한 해결방법이 있으나 본 연구에서는 실험대상 추진제 시편보다 5~6배 빠른 연소속도를 가진 추진제를 얇은 디스크 형태로 추진제 시편에 부착하는 방법을 채용하였다. 이를 통해 초기 점화과정에서 점화보조제 디스크의 일부가 점화기에 의해 우선 점화되고 추진제 시편으로 화염이 전파되기 전에 점화보조제의 반경방향으로 화염이 전파되게 함으로써 점화보조제가 우선적으로 모두 연소한 후 추진제 시편 전면이 동시에 점화되는 효과를 얻는다.

3.2 복수시편에 대한 동시점화특성

T-버너에서 궁극적으로 발생시키고자 하는 음향파동은 정제파 형태의 선형 음향파동이다. 하지만 T-튜브 양단에 설치한 추진제 시편의 점화 시간에 차이가 심할 경우 우선적으로 점화된 쪽은 고압영역이 되고 점화가 이루어지지 않은 쪽은 저압영역이 되므로 비대칭적인 압력분포가 만들어져 진행파 형태의 음향파동이 발생한다. 점화보조제에 의한 압력섭동이 충분히 크고 추진제의 연소에 의해 음향파동이 증폭되기 때문에 일단 발생한 진행파는 쉽게 감쇠되지 않으며, 실험자가 원하지 않는 음향파동이 T-튜브 내에 형성되는 결과를 초래한다. 이 문제의 해결을 위해서는 2개의 추진제 시편에 설치하는 점화장치의 사양을 동일하게 유지하고 기타 전기적인 저항 및 간섭요인을 최소화하여 양단 시편의 점화 타이밍을 최대한 일치시켜야 한다.

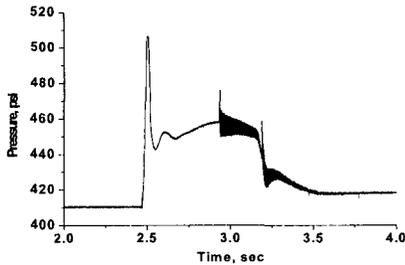
3.3 연소응답함수의 예측

본 연구에서는 HTPB 계열의 바인더와 AP 계열의 고체물질을 조합한 고체추진제의 연소응답함수를 측정하였다. 작동압력은 약 450 psia이며 실험 초기온도는 상온으로 하였다. Kulite 센서로 측정한 음향파동의 구동주파수는 약 420 Hz로서 이를 바탕으로 역산한 내부 연소가스 유효온도와 음속은 각각 2118 K, 840 m/sec 이었다.

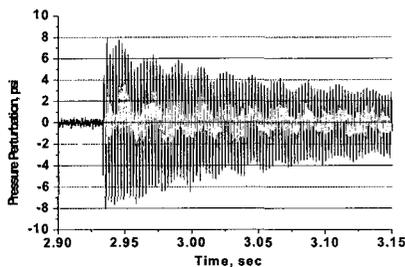
아래의 Fig. 4은 실험 후 압력신호의 후처리과정을 도시한 것이다. Figure 4(a)는 전체적인 압력-시간선도이며, Fig. 4(b)와 (c)는 DB 펄스와 AB 펄스에 의한 압력섭동이다.

DB 펄스와 AB 펄스에 의한 음향파동의 증폭계수인 α_d 와 α_a 를 Fig. 4(b)와 (c)로부터 구할 수 있는데, α_d 와 α_a 는 각각 -7.37과 -23.30이었다. 이 결과와 Eq. 3의 실험상수들을 모두 입력하면 실험대상 추진제의 연소응답값은 약 3.54이다.

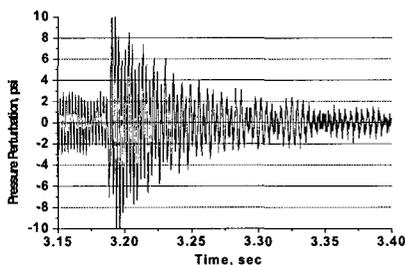
Figure 4(b)와 (c)에서 주목할 것은 DB 펄스와 AB 펄스에 의한 음향파동에서 공통적으로 보이는 저주파 신호의 특성이다. Figure 4(b)에서는 거의 일정한 주파수를 갖는 저주파가 음향파동에 실려있는 반면 Fig. 4(c)에서는 저주파의 주기가 점차로 길어진다. 이것은 연소 중에는 추진제



(a) Pressure Trace with Pulsation



(b) Acoustic Pressure by DB Pulse



(c) Acoustic Pressure by AB Pulse

Fig. 4. Acoustic Waves in T-Burner

시편의 연소에 의해 T-튜브 내부온도가 일정한 반면 연소가 종료되면 T-튜브 내부의 온도가 급격히 낮아짐을 의미한다. 실제로 Fig. 4(c)의 음향파동의 주파수는 360 Hz 인데 이론적으로는 DB 펄스에 대한 주파수인 420 Hz가 나와야 한다. 따라서 AB 펄스 타이밍(TABO)에 따른 이와

같은 주파수 변동을 어떻게 적절한 수준으로 유지할 것인가 혹은 어떻게 DB 펄스의 구동주파수 수준에 대한 AB 펄스의 감쇠계수를 예측할 것인가의 문제는 실험의 신뢰도와 재현성에 있어 매우 중요하다.

4. 결 론

본 연구에서는 Pulsed DB/AB 방법에 기초한 T-버너 실험을 수행하고 연소불안정 구동주파수에 대한 추진제의 연소응답함수를 측정하였다. 더불어 추진제 시편의 단면 동시점화와 T-버너 양단 시편의 동시점화 등 실험의 신뢰성과 재현성을 높이는 데 필수적인 문제들을 분석하고 대안을 제시하였다.

참 고 문 헌

1. F.E.C.Culick, "Stability of High Frequency Pressure Oscillations in Rocket Combustion Chambers," AIAA, Vol.1, No.5, 1963, pp.1 097-1104
2. M.M.Micci, "Methods for Measuring Solid Propellant Combustion Response," Work shop Report, pp.51-57
3. 김경무, 강경택, 윤재건, "고체추진 로켓모터에서의 선형 안정성 해석," 대한기계학회논문집, 제19권, 제10호, 1995, pp.2637-2646
4. F.S.Blomshield, J.E.Crump, H.B.Mathes, and R.A.Stalnaker, "Stability Testing of Full-Scale Tactical Motors," J. of Propulsion and Power, V.13, No.3, 1997, pp.349-355
5. "T-Burner Manual," CPIA Publication, No. 191, 1969