

230mm급 고체 추진기관의 연소불안정 거동 현상 분석

권태훈* · 노태호* · 서혁*

An Analysis on Combustion Instability in Solid Rocket Motor of 230mm Grade

Taehoon Kwon* · Taeho Rho* · Hyuk Suh*

ABSTRACT

A Possibility of combustion instability on longitudinal mode has a high level at large scale of L/D. Solid propellant has a metal particle and a grain of control to pressure oscillation. Solid rocket motor in slotted-tube grain controls pressure oscillation of longitudinal mode. If slot length is shot, pressure oscillation of longitudinal mode is amplified by cylinder part after middle phase of total burn time. A study has analyzed pressure oscillation of longitudinal mode at spectrum and acoustic modal analysis at pressure of result on static firing test.

초 록

직경 대 길이비(L/D)의 값이 큰 고체 추진기관에서는 축방향 연소불안정 현상이 발생할 가능성이 높다. 일반적으로 이러한 현상을 억제하기 위해 추진체에 금속입자를 포함시키거나 그레인 설계시 축방향 압력 진동을 억제할 수 있도록 형상을 고안한다. Slotted-Tube형 그레인을 적용한 고체 추진기관은 연소시 Slot의 영향으로 인해 축방향 압력진동이 억제되나 Slot의 길이가 짧을 경우 연소 중반이후부터 실린더부의 영향으로 축방향 압력진동이 증폭될 수 있다. 본 연구에서는 230mm급 고체 추진기관의 연소 시험 결과 중 압력에 대해 스펙트럼 분석 및 음향모드 해석을 수행하여 축방향 압력 진동 현상을 분석하였다.

Key Words: Solid Rocket Motor(고체 추진기관), Combustion Instability(연소 불안정성), Spectrum Analysis(스펙트럼 분석), Acoustic Modal Analysis(음향모드 해석)

1. 서 론

일반적으로 직경 대 길이비(L/D)의 값이 큰

고체 추진기관에서는 축방향 연소불안정성이 발생할 가능성이 높다. 로켓 모터와 같이 많은 에너지를 순식간에 변환시키는 장치에서는 소량의 에너지가 음향에너지(Acoustic Energy)로 변환되는 것을 막을 수는 없다. 실제 압력 진동이 갖고 있는 음향에너지는 추진체가 갖고 있는 총 에너

* (주)한화 대전공장 개발부
연락처, E-mail: alkaid@hanwha.co.kr

지의 1%에도 미치지 못한다.[1] 이와 같은 음향 에너지로 인해 연소실내의 압력파를 지속시키거나 증폭시킨다. 정확하게는 모든 로켓 추진기관은 이러한 압력파를 갖고 있다. 압력파의 진폭의 크기가 연소실 평균 압력의 5% 이상이 될 때 로켓 모터는 연소불안정현상이 일어나고 있다고 판단한다.[2]

고체 추진기관에서는 연소불안정성 현상을 억제하기 위해 추진체에 금속입자를 포함시키거나 그레인 설계시 축방향 압력 진동을 감소하도록 형상을 고안한다.[3]

본 연구에서는 230mm급 고체 추진기관에서 발생한 압력진동의 현상 고찰과 ABAQUS를 이용한 음향모드 해석을 통해 연소불안정 현상을 분석했다.

2. 본 론

2.1 연소 현상 분석

230mm급 추진기관은 추진제 충전율을 증가시키면서 연소 경향을 중립형과 유사하게 하기 위해 4개의 Slot을 가지는 Slotted-Tube형 그레인으로 설계했다. 특히 Slotted-Tube형 그레인은 직경대 길이비(L/D)가 큰 추진기관에서 초기 추력을 향상시키며 연소가스의 축방향 압력 진동을 억제하는 효과가 있다. 그러나 예측과 달리 시험 결과는 점화 후 1.0초부터 압력 진동이 발생했으며 2.8초이후부터는 연소불안정성과 유사한 현상의 압력 진동이 발생했다. Fig. 1은 추진기관 압력의 예측과 시험결과이다.

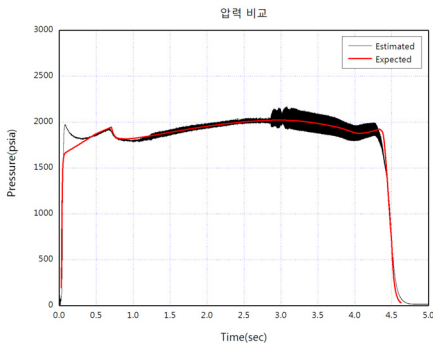


Fig. 1 추진기관 압력(예측, 시험결과)

Fig. 2, 3, 4는 초기 그레인 및 압력 진동이 발생하는 시점의 그레인 형상을 나타낸다.

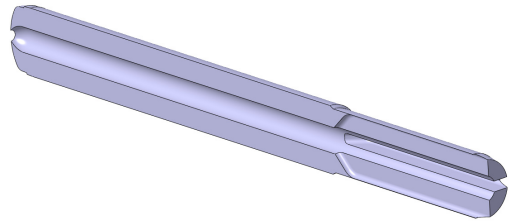


Fig. 2 연소시간 0.0초

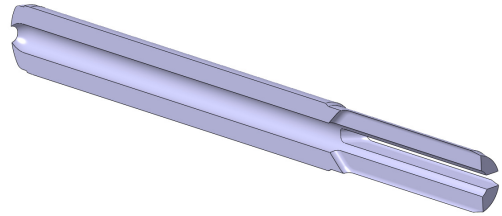


Fig. 3 연소시간 1.0초

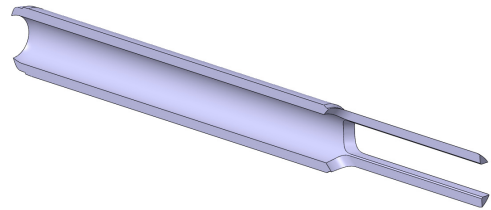


Fig. 4 연소시간 2.8초

2.2 스펙트럼 분석

시험에서 획득한 압력 데이터를 분석하기 위해 우선 추진기관의 길이방향모드의 주파수를 계산했다.

$$a = \sqrt{\gamma RT} \quad (1)$$

$$f = \frac{a}{2L} \quad (2)$$

여기서 f 는 길이방향모드의 주파수, a 는 연소가스의 음속, L 은 그레인 길이이다. 식 (1)에서 CEA에서 구한 추진제 특성값을 입력하여 음속을 구했으며 식 (2)에 음속 1,136.45m/s와 길이 2.253m를 대입하여 주파수를 계산했다. 주파수는 252.2Hz이다.

압력 데이터에 대해 Spectrum Analysis를 수행한 결과 Fig. 5와 같이 기본 압력 진동이 발생하는 주파수는 240Hz 대역에서 발생하며 최대 압력 진동은 509.6Hz에서 발생하고 있다. 또한 230mm급 추진기관의 경우 기본 주파수의 n배 형태로 길이방향 진동이 나타나고 있음을 확인할 수 있다.

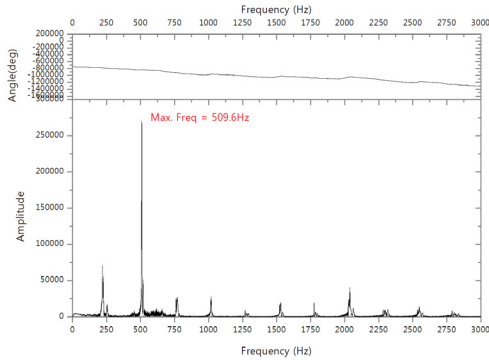


Fig. 5 스펙트럼 분석 결과

Fig. 5와 같이 발생하는 주파수 현상을 분석하기 위해 압력 데이터를 각각의 주파수 대역별로 분석하였다. 주파수는 200~300, 450~550, 700~800, 950~1,050Hz로 분할했으며 이 때 대역별로 압력 진동이 발생하는 구간을 세분화하였다. Fig. 6은 Origin의 Band Pass 기능을 이용하여 압력 데이터를 필터링한 결과이다. 그림에서 나타나듯 200~300Hz로 필터링 했을 경우 연소 시간 1.0초부터 2.8초 구간에서 압력 진동이 발생하고 있음을 알 수 있다. 이 구간에서는 일반적으로 고체 추진기관에서 발생할 수 있는 압력 진동 현상으로 판단된다. 그러나 450~550Hz로 필터링한 결과 연소시간 2.8초 이후 구간에서 압력 진동이 명확하게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이는 Fig.5에서 확인했듯이 주파수 509.6Hz에서 압력이 최대 크기로 진동하고 있는 것과 일치된 결과를 보이고 있다. 700~800, 950~1,050Hz 대역에서는 연소시간 2.8초 이후에서 미약한 압력 진동으로 나타나고 있다. Fig 5의 분석 결과에서도 750, 1,000Hz대역의 압력 진동은 미약하게 발생하고 있다.

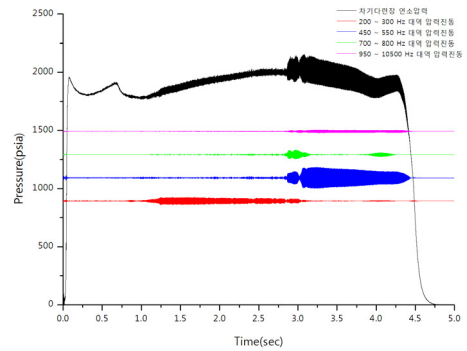


Fig. 6 대역별 주파수 필터링 결과

2.2 음향모드 해석

압력계 신호의 스펙트럼 해석으로부터 압력 진동의 기본 주파수는 240Hz 대역이며 식 (2)로부터 구한 주파수가 252.2Hz임을 고려하여 230mm급 추진기관의 음향특성을 얻기 위해 유한요소법에 기초한 상용프로그램인 ABAQUS를 이용하였다.

본 해석의 목적은 길이방향 압력 진동을 연소 시간대별로 해석하여 각각의 주파수를 분석하는 것이 목적이다. 그레이의 자유체적은 고정된 벽으로 둘러싸여 있고 내부 유동은 없다고 가정한다. 유체의 밀도는 14.709kg/m^3 으로 CEA를 통해 구했으며, 음속 $1,136.45\text{m/s}$ 는 식 (1)을 이용하여 구했다.

Fig 7은 연소초기 그레이인 내부의 음향모드 해석의 결과로 길이방향 1차 모드의 음압분포를 보이고 있으며 233.04Hz 의 고유 진동수를 갖고 있다. 추진제 그레이의 자유 체적은 연소가 진행됨에 따라 커지는데 Fig. 8은 연소시간 1.0초의 길이방향 1차 모드의 음압분포로서 225.59Hz 의 고유 진동수를 나타내고 있다. 또한 Fig. 9는 연소시간 2.8초의 길이방향 2차 모드의 음압분포로서 517.41Hz 의 고유 진동수를 나타내고 있다.

Table 1. Natural Frequency for Burn Time

연소시간(초)	1차(Hz)	2차(Hz)
0.0	223.04	525.68
1.0	225.09	525.87
2.8	242.90	517.41

3. 결 론

230mm급 고체 추진기관의 연소시험시 발생한 압력 진동 현상에 대해 분석을 수행했다. 연소시작 1.0초이후부터 발생한 진동의 원인을 파악하기 위해 연소가스의 음속 및 축방향 기본 주파수를 계산했으며 압력 데이터에 대한 스펙트럼 분석을 실시하여 압력 진동이 축방향 모드임을 확인하였다. 또한 연소시간 2.8초 이후에 발생한 진동의 경우도 축방향 진동의 2차모드임을 확인할 수 있었다. 그리고 대역별 주파수 필터링을 통해 연소 2.8초 후에 발생한 진동은 축방향 2차 모드 진동이 지배적인 영향을 가한 것을 알 수 있었다.

정확한 분석을 위해 ABAQUS를 이용하여 음향모드 해석을 시행했으며 해석 결과 각각의 시간대별 축방향 모드의 압력 진동 현상을 명확히 확인할 수 있었다.

추후 연구에서는 시간 변화에 따른 압력 진동의 경향 변화를 수행하여 도출된 인자를 통해 압력 진동을 저감시킬 수 있는 그레인 및 추진기관 설계를 진행할 예정이다.

참 고 문 헌

1. 김경무, 강경택, 윤재건, 1995, “고체추진 로켓모터에서의 선형 안정성해석” 대한기계학회논문집, 제19권, 제10호, pp. 2637~2646
2. Price E.W. and Flandro G.A., 1990, "Combustion Instability in Solid Propellant Rockets", Air Force Office of Scientific Research, AD-A216740, pp. 1~21
3. 강경택, 윤재건, 1994, “무연추진제 로켓모터에서의 연소불안정 해석”, 대학기계학회논문집, 제18권, 제11호, pp. 3032~3038

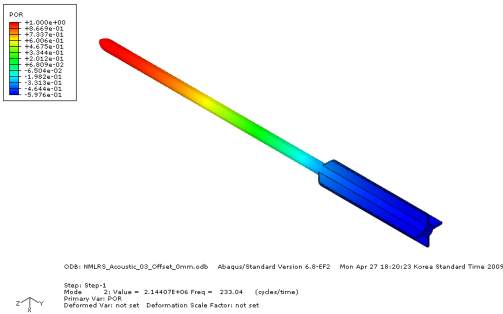


Fig. 7 연소시간별 진동수(0.0초)

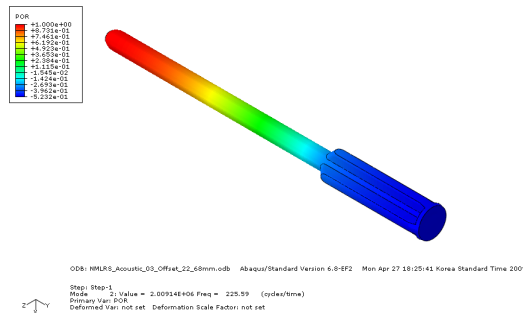


Fig. 8 연소시간별 진동수(1.0초)

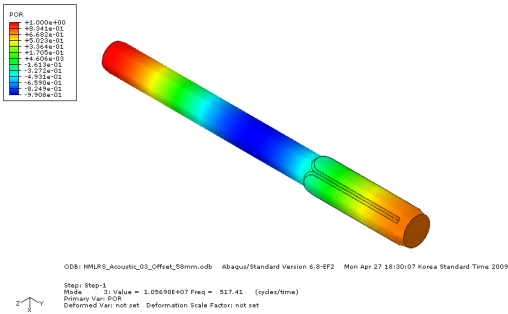


Fig. 9 연소시간별 진동수(2.8초)