

# 고체 로켓모터의 연소 불안정의 수치적 연구

최종근\*, 이윤용\*, 노태성\*\*

## Numerical Analysis of Combustion Instabilities in Solid Rocket Motors

Jong-Geun Choi\*, Yun-Yong Lee\*, Tae-Seong Roh\*\*

고체추진 로켓 모터 내부의 연소 불안정 문제는 오랫동안 광범위하게 연구되어 왔다. 추진제 연소과정과 내부 유동장의 상호작용은 연소실 내부의 연소불안정 문제를 야기한다. 공력 진동과 비정상 연소과정간의 상호작용의 여러 mode 중 압력과 속도 연계 반응이 중요하며 이는 국부적 압력과 속도 변화에 대한 민감성을 나타낸다.

Velocity Coupling은 비정상 연소 반응이 압력 변동보다는 추진제에 평행한 속도 변동에 크게 영향을 받을 수 있다. 압력 및 속도 coupling 외에 공력 진동과 비정상 연소간의 상호 작용에 vorticity 영향을 무시할 수 없으며 추진제 표면이나 근처의 연소과정은 반경방향 속도를 제어하므로 추진제 표면의 vorticity의 변동은 acoustic 압력과 연소과정과 couple되게 된다. 즉, vorticity 변동은 고려된 계의 안정성이 크게 의존적인 반경 방향 속도 성분과 긴밀히 연계되어 있다.

고체추진 로켓 모터의 극도로 복잡한 연소 불안정의 구조와 상세를 이해하는데 여러 접근 방법이 요구된다. 그 한 방법으로, 수치해석기법은 실제 로켓 모터에 적용할 포괄적이며 자세한 결과를 줄 수 있다. Acoustic 변동과 추진제 연소간의 상호작용에 대한 일련의 연구와 균질 추진제의 비정상 유동과 그 연소의 복잡한 물리-화학적 과정의 해석이 이차원과 축 대칭 연소실에 대하여 개발되었다. 난류 운동은 추진제 표면의 유동을 고려하여야 하므로  $k-\epsilon$  난류 모델이 사용되었다. 난류 유동은 추진제의 표면 근접 화염 영역을 침투하여 추진제의 연소율을 증가시켜 소위 추진제 부식성 연소라 불리는 로켓 모터에 치명적인 현상을 일으키게 된다.

난류 유동에 의한 gas phase 내로의 momentum과 에너지 전달의 증가에 의하여 유동장 변동 특성이 크게 바뀌게 된다. 이러한 연소실의 비정상 유동의 해석으로 gas dynamics와 비정상 추진제 연소반응에 대한 물리적 고찰이 행해졌으나 실제 로켓 모터 환경하의 정확한 모사에는 미치지 못했으므로 이 연구는 축대칭 로켓 모터의 포괄적 비정상 유동의 보다 정밀한 해석을 목적으로 acoustic 변동 환경 하의 로켓 모터의 비정상 유동장의 명확한 특성 해석에 중점을 두기 위하여 난류 모델을 선정하여 그 가능성을 확인하며, 최근 관심의 대상이 되고 있는 추진제 표면에서의 작은 스케일의 난류와 추진제 표면의 Vorticity의 상호 작용이 연소 불안정에 어떠한 영향을 미치는가 하는 것을 규명하는 수치 모사의 가능성을 확인하는 데 있다.

본 연구는 고체 추진 로켓 내부 연소실의 비정상 유동을 수치적으로 해석하였다. 완전 보존식을 이용하여 2차원 축-대칭 연소실 안의 연소 불안정을 해석하기 위한 수치 기법을 구성하였는데 비정상 유동을 해석하기 위한 수정된  $k-\epsilon$  난류 모델이 사용되었다. 이산화한 지배 방정식은 연관된 경계 조건을 포함하여 dual time-stepping 방법으로 시적분하였다. 정상상태의 해를 구한 후에 연소실내의 압력 변동을 모사하기 위해 압력 펄스와 압력 변동을 연소실 전방에 부과하였다. 연소실 내의 비정상 압력 변동의 반사 및 천이 과정을 해석하였으며, 압력 변동에 따른 Vorticity의 변동 특성을 해석하였다. 연소실 압력과의 불안정한 변동의 구동 또는 억제 기구를 판단하는 수단인 Acoustic Admittance로 연소실 내부의 압력 변동 추이를 해석하는 등, 로켓 모터 연소실 내의 다양한 정상 상태 및 비정상 상태의 특성을 계산 및 해석하였다.

\* 인하대학교 항공우주공학과 대학원

\*\* 정회원, 인하대학교 항공우주공학과