

**고체 로켓 내부 FSbI 해석을 통한
화염 전파 지연 및 이차 연소 현상 분석**
**FSbI simulation for solid propellant rocket interior
with flame propagation delay and secondary burning**

이창수* 김중암** 이방업*** 오종윤***
Changsoo Lee Chongam Kim Bangeop Lee Jong-Yun Oh
 * 서울대학교 기계항공공학부 대학원
 ** 서울대학교 기계항공공학부, 항공우주신기술연구소
 *** 국방과학연구소
 (82-2-880-1903, chongsoo89@snu.ac.kr)

Abstract

A fluid-structure interaction simulation of solid propellant rocket interior is carried out by employing the ALE (Arbitrary Lagrangian Eulerian) description, a hybrid model of continuum motion description combining the advantages of classical Lagrangian and Eulerian description. The integration process for fluid-structure interaction and an automatic re-meshing algorithm are included to analyze an unsteady fluid-structure interaction phenomenon with the deformation of solid grain during the simulation. The developed solver is applied for the simulation of a solid propellant grain with inviscid/viscous fluid model. Based on the integrated computed results, flame propagation delay and secondary burning phenomena are examined from the physical and numerical perspectives.

Keywords : Solid Rocket Motor, Propellant Grain, Fluid-Structure Interaction, Flame Propagation Delay, Secondary Burning

1. 서론

군사 및 우주 발사체의 추진 로켓으로 주로 사용되는 고체 로켓은 능동적인 추력 제어가 어렵기 때문에 추진체 자체의 연소 특성 및 연소실 내의 물리 현상을 파악하는 것이 개발 및 운영에 있어 중요한 문제이다. 고체 로켓 내부 연소실은 고체 추진체의 연소 및 유동압력에 의한 구조 변형으로 인해 유동 영역과 구조 영역이 지속적으로 변화하게 된다. 본 연구에서는 연소실 내부 유체-구조-연소 연동 해석을 위해 ALE 기법을 적용하여 유동 및 구조 해석에 있어서 해석 영역의 체적 변화를 고려하였다. 연동 해석에 있어 각 영역의 경계 면에서의 정보 전달 기법 및 영역 변화에 따른 자동 격자 재생성 기법에 관한 연구가 수행되었으며 추진체 연소 특성에 알맞은 연소 모델 및 연소 과정 중 그레이인의 형상 변화를 잘 모사할 수 있는 표면 격자 추적 기법을 개발, 적용하였다. 각 기법들은 통합 해석을 위해 하나의 프로그램으로 연동되었으며 이를 이용하여 연소실 내부 현상 해석을 수행하였다.

2. 수치 해석 및 결과

그림 1은 해석에 사용된 2차원 축 대칭 로켓 모델이다. 파란색 부분은 유동 영역이며 붉은색 부분은 고체 추진체를 나타낸다. 이 고체 추진체는 연소에 의해 점차 없어지며 이로 인해 유동 해석 영역이 증가하게 된다. 녹색 부분은 점화기, 로켓 케이스, 노즐 등의 로켓 구성 부분으로 본 해석에서는 움직이지 않는 강체로 가정한다. 본 연구에서는 비점성 / 점성 해석을 통해 로켓 전반부의 pyrogen type 점화기에서 가스가 분사되어 추진체의 점화가 진행되고 점화가 전파되는 과정을 중점적으로 분석하였으며 점성 해석 시 나타나는 화염 전파

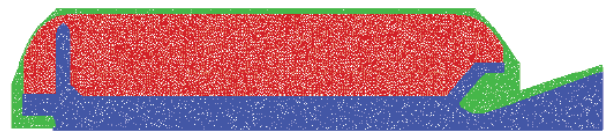


그림 1. 해석에 사용된 축 대칭 로켓 형상

지연 및 이차 연소 현상에 대해 알아보았다.

그림 2와 3은 각각 비점성 / 점성 해석 결과로 로켓 전반부에서 점화가 일어나는 시점의 온도 분포이다. 점화기에서 분출되는 고온 고압의 가스는 점화기 후방에서 급격하게 팽창되며 초음속으로 가속된다. 이 초음속 유동은 강한 충격파를 형성하여 충격파 후방의 온도를 상승시키고 추진체 그레이인을 가열하여 점화시킨다. 이후 표면을 따라 점화가 전파되며 이러한 현상은 두 결과에서 공통적으로 나타난다.

두 결과의 시간을 비교해 보면 점성 해석 결과에서 유동장의 발달이 지연되고 있다. 이것은 초기 연소실 내부를 채우고 있던 저온의 가스가 빠져나가지 못하고 내부에 남아있어 화염이 전파되지 못해 일어나는 현상이다. 그림 3을 보면 고온의 가스가 A에서 B지점을 모두 막고 있어 저온의 가스가 빠져나가지 못한다. 이러한 현상은 비점성 해석 결과에서도 나타나지만 점성 해석에서 더욱 뚜렷하게 나타난다. 그 이유는 비점성 해석의 경우 벽면에서 수평방향의 속도 성분을 가지기 때문에 화염이 벽면을 타고 전파되지만 점성 해석은 벽면에서 속도가 없어 화염이 벽을 타고 전파되지 않기 때문이다.

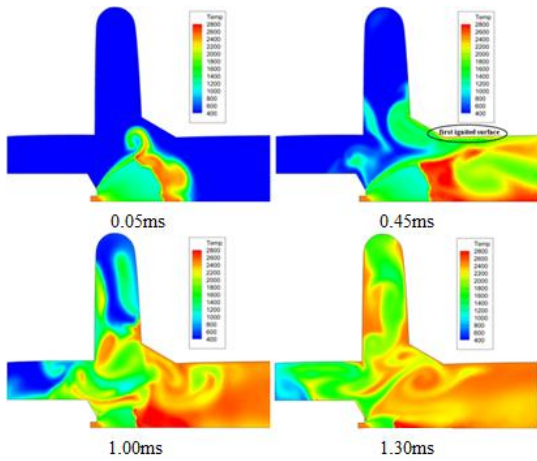


그림 2. FSbI 비점성 해석 결과

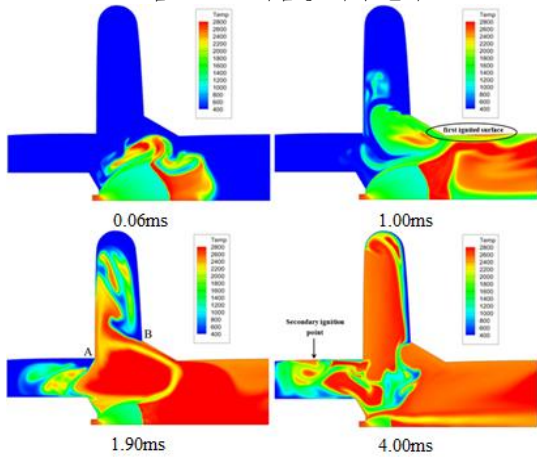


그림 3. FSbI 점성해석 결과

그림 4는 boots입구 부분의 유동 해석 결과로 이 부분에서도 화염 전파 지연 현상이 나타난다. Boots 입구에서 유동 박리 현상이 나타나며 박리기포가 생긴다. 이 박리기포는 상대적으로 낮은 온도를 가지며 화염이 전파되는 것을 지연하지만 동시에 이차 연소 현상도 만들어 낸다. 그림 4-(c)를 보면 박리기포가 고온의 가스를 끌어드려 경사면 중간을 연소 시킨다. 이후 추진체의 표면을 따라 다시 연소가 진행된다. 이러한 이차 연소는 앞서 설명했던 로켓 전반부에서도 일어난다. 그림 3을 보면 저온의 가스로 둘러 쌓여 있는 추진체 표면 중간 부분에서 연소가 시작 된다.

그림 5는 시간에 따른 압력 변화 결과이다. 비점성/점성 해석 모두 정상 상태에서의 압력은 같지만 점성 해석에서의 압력 발달이 지연되어 나타난다.

3. 결론

고체 추진 로켓 연소실 내부를 해석하기 위해 ALE기법이 적용된 유동/구조해석 프로그램을 개발하였다. 그리고 이들을 연동시키기 위해 자동 격자 생성 기법, 격자간 혹은 상 경계간 정보 전달 기법을 적용하여 통합 해석 프로그램을 개발하였다. 개발된 프로그램을 이용하여 비점성/점성 해석을 수행하여 점화 초기 현상을

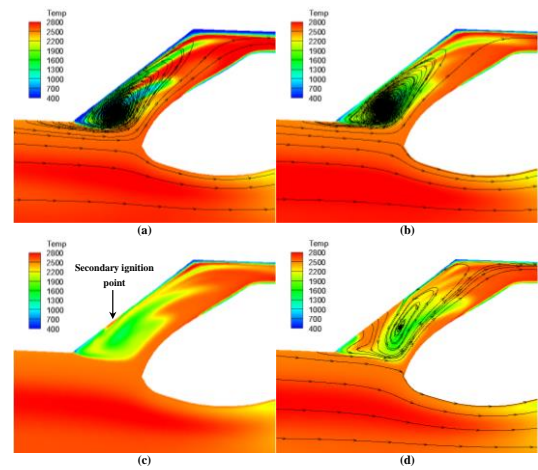


그림 4. Boots 입구에서의 유동 박리 및 이차 연소

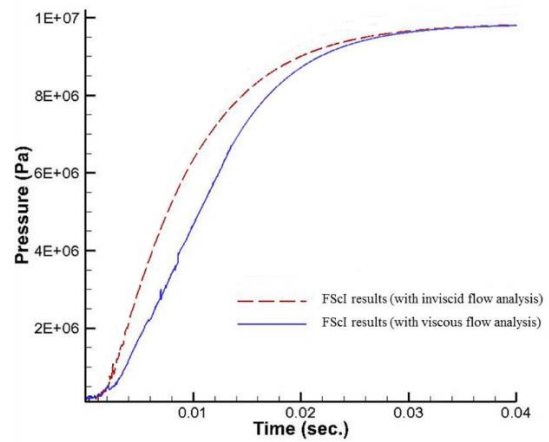


그림 5. 점화 단계에서의 내부 압력 변화

분석하였다. 점성 해석의 경우 비점성 해석에서는 확인할 수 없었던 화염 전파 지연 및 이차 연소 현상을 확인할 수 있었지만 두 경우 모두 정상상태에서의 내부 압력이 같았다. 이러한 결과로 볼 때 초기 점화과정을 분석할 때는 점성해석이 필수지만 정상상태를 분석할 때는 비점성 해석으로도 충분하다는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 로켓 개발 및 성능 향상 작업에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

후기

본 논문은 국방과학연구소로부터 지원을 받아 이루어 졌으며 이에 감사 드립니다.

참고문헌

[1] Han, S., Kim, C., AIAA Paper 2012-0038 (2012).
 [2] Johnston, W. A., and Murdock, J. W., J. Propulsion and Power, Vol. 11, No. 5, 998 (1995).
 [3] Hwang, C., Massa, R., Fiedler R., and Geubelle, P. H., AIAA Paper 2002-4342 (2002).
 [4] Kumar, M., and Kuo, K. K., Fundamentals of Solid-Propellant Combustion, Vol. 90, 305 (1984).