

축대칭 형상의 고체추진기관에 대한 FSbI 통합 해석

Integrated FSbI Simulation for Axisymmetric Solid Rocket Motor

이창수*, 조현주**, 김종암***, 이지호**, 정규동****, 이방업****, 오종윤****
 *서울대학교(chongsoo89@naver.com), **동국대학교(asonehyunjoo@naver.com,
 jeeholee@dgu.edu), *** 서울대학교, 항공우주신기술연구소(chongam@snu.ac.kr),
 ****국방과학연구소(vejung@add.re.kr, llbel130@add.re.kr, jongoh@add.re.kr)

요약문 : 고체 로켓 내부에서 발생하는 유동과 구조, 연소의 복잡한 상호작용을 분석하기 위해 유동-구조-연소 통합해석이 수행되었다. 추진제 연소에 따른 해석 영역의 변화를 고려하기 위한 기법들(ALE 운동 기술 방식, 격자 이동 및 재생성 기법)과 개별 해석 요소를 통합하기 위한 기법들(불일치 경계면에서의 정보 전달 기법, 통합 시간 전진 기법)이 적용되었다. 개발된 프로그램을 사용해 2차원 축대칭 형상의 고체추진기관, ACM(Attitude Control Motor)에 대한 통합 해석을 수행하였으며 이를 실험 결과와 비교하였다. 이 결과를 통해 본 연구에서 적용한 기법들이 고체추진기관 내부를 해석하기에 적합하다는 것을 확인한다.

Key Words : 고체추진기관(Solid Rocket Motor), 추진제(Propellant Grain), 유동-구조 연성(Fluid-Structure Interaction)

I. 서론

우주 발사체 및 군사 무기체계에서 추진기관은 다양한 방식으로 활용되고 있다. 그 중 액체추진기관은 구조가 복잡하고 장기적인 보관이 불가능하지만 능동적인 추력제어가 가능하며 상대적으로 큰 추력을 발생시킬 수 있어 우주 발사체의 메인 로켓에 주로 사용되고 있다. 반면 고체추진기관은 구조가 단순하고 장기적인 보관이 가능하여 우주 발사체의 보조 로켓, 군사 무기에 주로 사용되고 있다. 하지만 고체추진기관은 능동적인 추력제어가 불가능하기 때문에 추진제의 연소 특성을 파악하고 연소실 내부의 물리현상을 이해하여 발사체의 성능을 미리 예측하는 것이 매우 중요하다.

고체추진기관에 대한 연구는 주로 실험을 통해 이루어지고 있다. 하지만 실험을 통한 연구는 비용, 안정성 등 많은 문제점을 포함하고 있다. 또한 연소실 내부에서 발생하는 고온, 고압의 연소 가스로 인해 정밀한 실험장치의 사용에 제한이 있어 내부 압력 측정, 추진제 연소율 측정 등 정량적인 값을 얻기 위한 실험이 주로 이루어지며 내부 물리현상을 직접적으로 관찰하는 것을 사실상 불가능하다고 할 수 있다. 하지만 군사 무기체계의 발전에 따라 더욱 복잡한 형태의 고체추진기관이 요구되고 있으며 이러한 추진기관을 개발하기 위해서는 연소실 내부에서 발생하는 물리현상을 정확하게 파악할 필요가 있다. 이에 따라 수치 해석을 사용해 연소실 내부의 물리현상을 분석하려는 시도가 다양한 분야에서 진행되고 있다.[1]

수치 해석을 통한 연소실 내부 물리현상 분석은 주로 유

동, 구조, 연소 각 분야에서 독립적으로 진행되고 있다. 하지만 실제 고체추진기관 내부에서는 고온 고압의 연소 가스와 추진제 및 구조물의 변형, 추진제의 연소가 복합적으로 영향을 주고받는 물리현상이 발생하기 때문에 단일 분야의 독립적인 해석으로는 내부 현상을 모사하고 분석하는데 한계가 있다. 이러한 문제를 극복하기 위해서는 관련된 모든 분야를 통합한 해석이 수행되어야 한다. 본 연구에서는 이러한 연구의 일환으로 유동-구조-연소의 통합 해석을 구현하고 2차원 축대칭 형상의 고체추진기관 내부를 해석하는 것을 목표로 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 유동, 구조, 연소의 단일 해석 요소에 사용된 기법과 이 해석 요소들을 통합하기 위해 사용된 기법에 대해서 설명한다. 3장에서는 2차원 축대칭 형상의 ACM에 대해 통합해석을 수행한 결과를 바탕으로 기법들이 적용된 결과를 분석하고 내부 압력 변화를 실험 결과와 비교한다. 4장에서 더 정확한 해석을 위해 적용 및 개발되어야 하는 해석 기법에 대한 논의와 함께 결론을 짓는다.

II. 수치 기법

1. ALE 운동 기술 방법

연속체 역학에서는 일반적으로 Lagrangian 기술 방식과 Eulerian 기술 방식을 사용한다. 각 기술 방식은 수치 해석에 사용될 때 서로 상반되는 특징을 가진다. Lagrangian 기술 방식은 다상의 유동처럼 서로 다른 물질의 경계면을 정확하게 포착할 수 있지만 해석 대상이 과도하게 움직일 경우 격자가 움직이는 과정에서 꼬이는 문제가 발생할 수

있다. 반대로 Eulerian 기술 방식은 해석 대상의 움직임에 영향을 받지 않지만 서로 다른 물질의 경계면을 정확하게 포착할 수 없다는 단점이 있다.

ALE(Arbitrary Lagrangian Eulerian) 기술 방식은 격자의 움직임과 연속체의 상대운동을 모두 고려하여 앞서 언급한 두 가지 운동 기술 방식의 장점을 유지하고 단점을 보완한 운동 기술 방식이다.[2] 본 연구에서는 고체 추진체의 연소에 따른 유동 및 구조 해석 영역의 변화를 다루기 위해 ALE 운동 기술 방식을 사용하였다.

2. 유동 해석 기법

고체추진기관 내부를 해석하기 위해 2차원 축대칭 압축성 비정상 유동 해석을 수행하였다. 지배방정식은 ALE 운동 기술 방식을 적용한 2차원 Euler equation을 사용하였고 삼각형의 비정렬 격자를 사용하여 해석을 수행하였다. 공간 차분 기법으로는 RoeM[3] 기법을 사용하였고 시간 전진 기법으로는 TVD Runge-Kutta 3rd 기법을 사용하였다.

추진체의 연소가 진행되면 유동 해석 영역이 늘어나며 이에 맞추어 유동 격자도 변형되어야 한다. 이때 효율적으로 유동 격자를 이동시키기 위해 IDW(Inverse Distance Weighting) 격자 이동 기법을 이용하였다.[4] 격자의 질이 일정 수준 아래로 떨어질 경우 Delaunay point insertion 기법을 사용하여 자동으로 격자를 재생성하고 consistent interpolation 기법을 사용하여 새롭게 만들어진 격자에 유동 해석 정보를 전달하였다.

3. 구조 해석 기법

고체 추진체는 점탄성의 특성을 가지며 고체추진기관 내부의 구조물들은 연소실 내부 고압 유동에 의해 대 변형을 일으킨다. 고체 추진체의 점탄성 특성을 고려하기 위해 Generalized Maxwell visco-elastic 모델이 사용되었고 내부 구조물의 대 변형을 고려하기 위해 Mooney-Rivlin hyper-elastic 모델이 사용되었다. 구조 해석에서는 유동 해석과는 달리 사각형의 비정렬 격자가 사용되었다.

유동 해석과는 반대로 추진체가 연소하면 구조 해석 영역이 줄어들게 된다. 이때 격자의 이동에 따른 해석 결과의 오차를 줄이기 위해 추진체 표면에 가까이 위치한 격자만 부분적으로 움직이며 해석하였다. 격자의 질이 일정 수준 아래로 떨어질 경우 paving 기법을 사용하여 격자를 재생성하고 SPR(Super-convergent Patch Recovery) 기법을 사용하여 새로운 격자에 구조 해석 정보를 전달하였다.

4. 연소 해석 기법

고체 추진체의 연소 현상을 해석하기 위해 압력 종속 모델인 APN 모델을 사용하였다. 고체 추진체는 모든 부분이

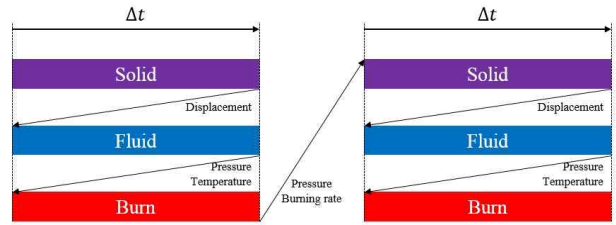


그림 1. 유동-구조-연소 통합 해석 흐름도

동시에 점화된다고 가정하였으며 유동 해석을 통해 계산된 추진체 표면의 압력을 바탕으로 연소율을 계산하였다.

5. 통합 해석 기법

가. 불일치 경계면에서의 정보 전달 기법

유동-구조-연소 통합 해석을 수행하려면 유동 영역과 구조 영역의 경계면에서 압력, 변위 등의 정보가 반복적으로 전달 되어야한다. 하지만 수치 해석에서 유동 해석 영역은 구조 해석 영역에 비해 상대적으로 조밀한 격자를 필요로 한다. 따라서 유동 격자와 구조 격자의 경계면은 서로 일치하지 않으며 이러한 불일치 경계면에서 정보를 정확하고 보존성 있게 전달할 수 있는 정보 전달 기법이 필요하다. 이를 위해 본 연구에서는 common-refinement 기법을 사용하여 불일치 경계면에서 정보 전달을 수행하였다.[5]

나. 통합 해석을 위한 시간 전진 기법

Conventional serial-staggered 기법은 공탄성 해석 분야에서 가장 일반적으로 사용되고 있는 통합 해석을 위한 시간 전진 기법 중 하나이다. 이 기법을 유동-구조-연소 통합 해석에 적용하기 위해 구조, 유동 해석이후 연소 해석을 추가하였다. 그림 1은 이 기법이 적용된 통합 해석 흐름도로 구조, 유동, 연소 순서로 해석이 진행되고 있는 것을 보여준다. 여기서 Δt 는 정보를 주고받는 시간 간격으로 각 해석 요소는 순차적으로 정해진 시간 간격까지 해석하고 다음 해석 요소가 요구하는 정보를 전달한다.

III. 수치 해석 및 결과

1. 해석 모델

본 연구에서 사용된 ACM(Attitude Control Motor)은 2차원 축대칭 형상의 고체추진기관이다. 그림 2는 해석에 사

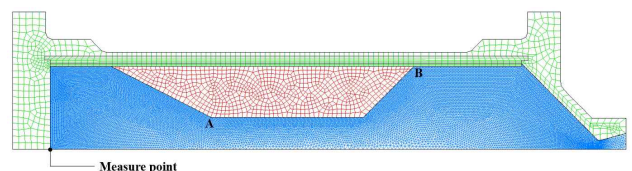


그림 2. ACM 형상 및 격자

표 1. ACM의 고체 추진제 물성치

Propellant properties	
rb@1000psi in APN model	8.0325 mm/s
n in APN model	0.3345
Propellant density	1.8 g/cm ³
Molecular weight	29.56 g/mol
Adiabatic flame temperature	3533 K

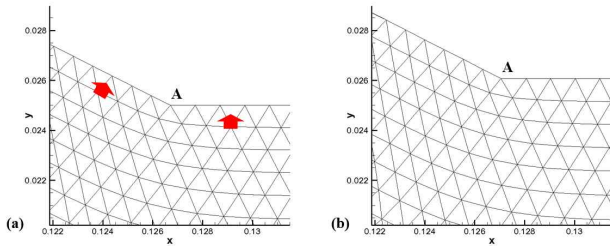


그림 3. 유동 격자 이동 전(좌-a), 후(우-b)

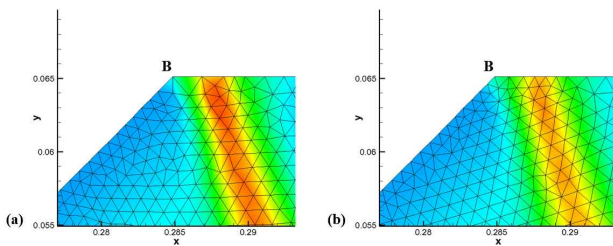


그림 4. 유동 격자 재생성 및 정보(온도) 전달 전(좌-a), 후(우-b)

용된 ACM 격자로 초록색과 붉은색 부분은 각각 케이스와 추진제이며 파란색 부분은 연소실을 나타낸다. 해석이 진행되면 붉은색의 고체 추진제는 연소에 의해 점차 사라지며 파란색의 연소실 영역이 증가하게 된다.

2. 수치 해석 결과

그림 3은 그림 2의 A위치에서 추진제 연소에 따른 표면 격자 이동 전후의 유동 격자를 보여준다. 표면 격자는 그림 3-a의 화살표 방향으로 움직인다. 이러한 표면 격자 이동은 추진제가 연소되는 해석 전반에 걸쳐 이루어지며 유동, 구조 내부 격자도 표면 격자 이동에 맞추어 지속적으로 움직인다. 하지만 표면 격자의 이동이 지속되면서 각 해석 영역의 격자, 또는 표면 격자의 질이 점차 떨어지게 되고 결국 더 이상 해석이 불가능하게 된다. 그림 4는 그림 2의 B 위치를 확대한 결과로 그림 4-a를 보면 표면 격자의 간격이 벌어져 내부 격자의 질이 낮아진 것을 확인할 수 있다. 이 경우 격자를 자동으로 재생성하고 새롭게 생성된 격자에 정보를 전달해야 한다. 그림 4-b는 격자가 자동으로 재생성고 새롭게 만들어진 격자에 온도 정보가 전달된 결과

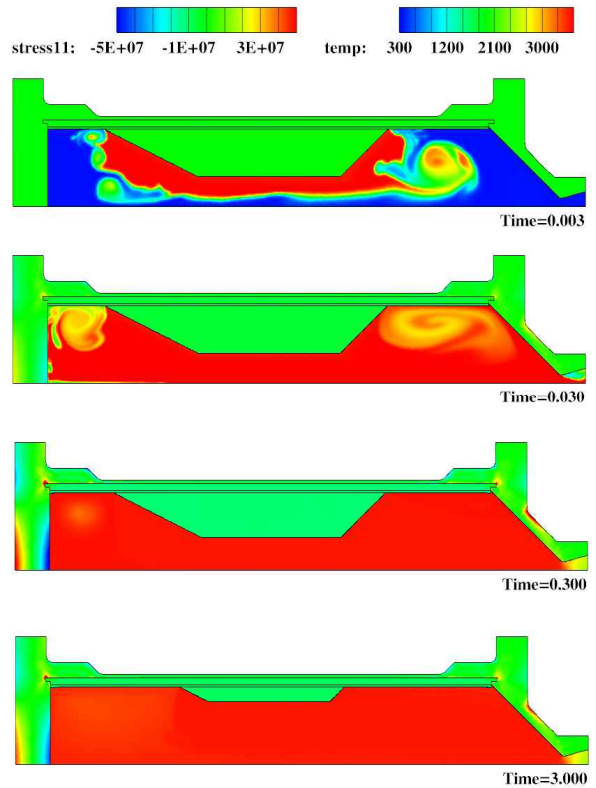


그림 5. 반경 방향 응력과 온도 분포

이다. 본 연구에서 사용된 consistent interpolation 기법의 특징으로 인해 정보 전달 후 기존 정보가 소산된 것을 확인할 수 있다.

그림 5는 해석결과를 시간에 따라 나타낸 것으로 구조 해석 영역은 반경 방향의 응력, 유동 해석 영역은 온도 분포를 보여주고 있다. 해석은 추진제의 모든 면이 동시에 점화되며 시작된다. 점화 이후 추진제의 연소 가스가 연소실 내부에 채워지며 연소실 내부 압력이 급격히 증가한다. 이때 노즐 출구는 멤브레인(membrane)으로 막혀있어 연소실 내부의 압력 증가를 더욱 가속시킨다. 멤브레인은 연소실 내부의 압력이 1000psi에 도달하는 순간 사라지고 내부의 연소 가스가 빠져나가며 초음속 유동이 발달한다. 연소실 내부가 정상상태에 도달하면 유동 영역의 물성치 변화는 작아지게 되고 추진제의 연소에 따라 연소 면적이 감소하며 연소실 내부의 압력도 점차 감소하게 된다. 해석은 추진제가 대부분 연소되어 추진제의 격자 생성이 어려운 시점까지 수행되었다.

그림 6은 시간에 따른 연소실 내부의 압력 변화 그래프로 그림 2에 표시된 위치에서 측정되었다. 수치 해석 결과와 실험 결과 모두 초기의 급격한 압력 증가 이후 정상상태에 도달하고 압력이 점차 감소하고 있다. 물론 실험 결과 초기에 나타나는 pressure spike와 정상상태의 압력에서 약

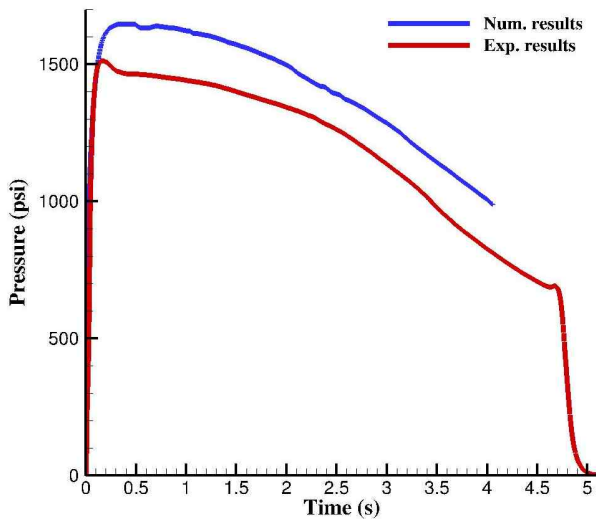


그림 6 시간에 따른 압력 변화 비교

간의 차이는 있지만 거의 동일한 경향을 보이고 있다. 이를 통해 본 연구에서 적용한 수치 기법들이 고체추진기관 내부의 압력 변화 경향을 예측하기에 적절하다는 것을 확인할 수 있다.

IV. 결 론

유동-구조-연소 통합 해석을 통한 2차원 축대칭 형상의 고체추진기관 내부 현상 분석을 위해 다음과 같은 연구가 수행되었다. 추진체의 연소에 따른 해석 영역 변화를 고려하기 위해 ALE 기법, 격자 재생성 기법, 정보 전달 기법을 적용한 유동, 구조, 연소의 개별 해석 요소를 개발하였다. 이 해석 요소들을 통합하기 위해 불일치 경계면에서의 정보 전달 기법과 통합 해석을 위한 시간 전진 기법이 사용되었다. 통합 해석은 ACM에 대해 추진체가 대부분 연소되어 격자 재생성이 불가능한 시점까지 수행되었고 시간에 따른 연소실 내부 압력 변화를 실험 결과와 비교하였다. 실험 결과에서 나타나는 pressure spike와 정상상태에서의 압력에서 차이가 발생했지만 두 결과 모두 시간에 따른 압력 변화는 유사한 경향을 보였다. 이 결과를 통해 본 연구에서 구현한 유동-구조-연소 통합해석이 고체추진기관 내부의 압력 경향을 보기에는 충분하다는 결과를 얻을 수 있었다. 수치 해석을 통한 고체추진기관 내부 분석 연구는 연구자가 필요로 하는 물리변수를 직접 관찰할 수 있어 실험에 비해 더 다양한 정보를 얻을 수 있다는 장점을 가지고 있다. 그러므로 이러한 수치 해석 연구는 향후 로켓 개발 및 성능 향상 작업에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

후기

본 논문은 국방과학연구소와 항공우주신기술 연구소로부터

터 지원을 받아 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] Han, S. and Kim, C., "Integrated Fluid - Structure Simulation for Full Burning of a Solid-Propellant Rocket Interior," J. Propuls. Power, Vol.30, No.4, pp.883 - 900 (2014)
- [2] Donea, J., Huerta, A., Ponthot, J. and Rodríguez-Ferran, A., "Arbitrary Lagrangian-Eulerian methods," Encycl. Comput. Mech., (2004)
- [3] Kim, S., Kim, C., Rho, O. H. and Hong, S. K., "Cures for the shock instability: Development of a shock-stable Roe scheme," J. Comput. Phys., Vol.185, No.2, pp.342-374 (2003)
- [4] Luke, E., Collins, E. and Blades, E., "A fast mesh deformation method using explicit interpolation," J. Comput. Phys., Vol.231, No.2, pp.586 - 601 (2012)
- [5] Jiao, X. and Heath, M. T., "Common-refinement based data transfer between non-matching meshes in multiphysics simulations," Int. J. Numer. Methods Eng., Vol.61, No.14, pp.2402 - 2427 (2004)