

Conventional Serial Staggered 기법을 이용한 고체추진기관의 구조-유동 상호작용 해석에 대한 안정성 검토

A Stability Analysis for Fluid-Structure Interaction of Solid Rocket Motor with Conventional Serial Staggered Method

조현주*, 이창수**, 이지호*, 김종암***, 박재범****, 진정근****

*동국대학교(asonehyunjoo@naver.com, jeeholee@dgu.edu),

서울대학교(chongsoo89@naver.com), *서울대학교,

항공우주기술연구소(chongam@snu.ac.kr), ****국방과학연구소(dounjiun@add.re.kr,
jungkunjin@add.re.kr)

요 약 문 : 고체로켓의 구조-유동 상호작용 해석을 수행하기 위해 각 영역의 해석을 독립적으로 수행하고, 구조-연소 경계면에서 정보를 교환하는 Conventional Serial Staggered 기법을 이용한다. 구조와 유동의 해석은 독립적인 해석기법과 시간전진기법이 사용되며 각 영역의 해석 시간간격은 다르게 적용한다. 동일한 해석시간마다 구조-연소 경계면에서 정보전달을 이루기 위하여 시스템 시간간격이 적용된다. 고체로켓의 해석을 수행하여 시스템 시간간격에 따른 구조-유동 상호작용 해석의 안정성 및 정확성을 검토한다.

Key Words : 고체추진기관(Solid Rocket Motor), 구조-유동 상호작용(Fluid-Structure Interaction), Conventional Serial Staggered Method, 시스템 시간간격(System Timestep Size)

I. 서 론

고체추진기관은 추진제, 접착제, 단열재, 케이스, 연소실, 노즐, 점화기 등의 구성으로 이루어져 있으며 추진제의 점화를 통하여 추력을 얻는 시스템으로 되어 있다. 고체추진기관의 시스템은 액체추진기관에 비해 간단하며 장기적인 보관이 가능하고, 안전성이 뛰어난 장점이 있으나 점화가 시작되면 추력을 제어할 수 없다는 단점이 있다[1]. 이에 따라 추진제의 연소 특성과 연소실 내부의 물리현상을 파악하여 고체추진기관의 성능을 미리 예측하는 것이 매우 중요하다.

고체추진기관의 설계요소로는 추진제의 연소속도, 요구 추력, 연소관 압력, 그레인 형상 등이 있으며 이러한 설계 요소에 따른 연구는 주로 실험을 통해 이루어져 왔다. 실험을 통한 연구는 경제적인 문제와 연소실 내부의 고온과 고압, 추진제의 결함에 의해 발생하는 안정성 문제 등을 내포하고 있다. 또한 다양하고 복잡한 형태의 고체추진기관에 대한 실험에서 연소가 진행됨에 따라 추진제의 움직임과 연소실 내부의 물리현상을 정확하게 예측하고 파악하기에는 어려움이 따른다. 이러한 문제점을 수치해석을 통해 연소실 내부의 물리현상과 추진제의 움직임을 파악하고, 고체추진기관의 결함요소를 찾아내는 시도가 진행되고 있다[2].

고체추진기관의 수치해석은 단일 영역(유동, 구조, 연소 등)의 해석만으로는 각 물리현상의 상관관계 및 복합 거동의 특성을 파악할 수 없다. 또한 연소실 내부의 고온, 고압

의 비정상 유동과 추진제 및 구조물의 비선형 점탄성 특성을 갖는 구조의 변형을 하나의 해석기법을 사용하여 동시에 해석을 수행하게 되면 각 영역의 특성을 정확히 반영하기에 어려움이 따른다. 이러한 특징을 고려하여 본 연구에서는 FSI(Fluid - Structure Interaction) 시간전진기법 중 CSS(Conventional Serial Staggered) 기법을 사용하여 독립적인 해석을 통해 각 영역의 특성을 고려한 해석을 수행하고, 해석이 진행되는 동안 해석 결과의 상호교환이 이루어지도록 하였다.

FSI 시간전진기법을 사용하여 해석을 진행 시, 각 영역에서 계산된 해석 결과의 상호교환이 순차적으로 이루어진다. 상호교환이 이루어지는 한 사이클의 시간간격을 구조와 유동이 해석하는 횟수에 대한 비율로 설정하면 유동영역의 시간간격 변화에 맞추어 구조의 시간간격도 변하여만 한다. 구조영역의 시간간격이 이런 방식으로 변하게 되면 구조 해석의 불안정성이 증대될 수 있으며 수치해가 발산하는 경우가 발생한다. 이러한 점을 고려하여 본 연구에서는 FSI 해석을 진행 시, 구조영역의 시간간격을 고정하였다. 고정된 구조영역의 시간간격을 시스템 시간간격으로 정의하였고, 시스템 시간간격마다 구조와 유동의 상호교환의 한 사이클이 이루어지도록 하였다. 시스템 시간간격을 짧게 설정하면 구조에서 불필요한 계산이 늘어나게 되고, 정보의 상호교환이 빈번히 발생하여 전체적인 해석 시간이 증가하게 된다. 또한 구조-유동의 상호작용이 늘어날수록 수치해석의 불안정성이 증가할 수 있다[3]. 반면 시스템 시간간격을 크게 설정하면 수치해의 정확성이 떨어질 수 있다.

본 연구에서는 시스템 시간간격이 구조-유동 상호작용을

통한 2차원 축대칭 형상에 대한 고체추진기관의 해석에 미치는 영향을 고찰하는 것을 목표로 한다. 이를 위하여 2차원 축대칭 형상의 ACM(Attitude Control Motor)에 대해 시스템 시간간격에 따른 구조-유동 통합해석을 수행하고, 해석 결과를 실험 결과와 비교 분석하여 수치해석의 안정성과 정확도를 검토하였다.

II. 수치해석 기법

1. FSI 시간 전진 기법

고체 로켓의 구조-유동 상호작용은 각 영역의 해석은 독립적으로 수행하고, 구조-유동 경계면에 해석 결과의 상호교환이 이루어지는 CSS 기법을 사용하였다. 구조-유동의 경계면에서 경계조건은 Neumann 경계조건과 Dirichlet 경계조건을 사용하였다[4]. Neumann 경계조건을 통해 경계면에서 유동에서 계산된 하중을 구조에게 전달하였다.

$$t_s = t_f \quad \text{on } \Gamma \quad (1)$$

$$t_f = -p_f n_f \quad \text{on } \Gamma_f \quad (2)$$

여기서 Γ 는 구조-유동의 경계면, t 는 traction 벡터, p 는 압력, n 는 연직 벡터를 의미한다. 또한 Dirichlet 경계조건을 통해 구조의 연소와 변형이 고려된 경계면의 형상 정보를 유동에 전달하였다.

$$x_f = x_s \quad \text{on } \Gamma \quad (3)$$

여기서 x 는 공간 형상(Spatial Configuration)에서의 현재 위치 벡터를 의미한다. 이를 통해 구조와 유동은 서로에게 필요한 정보를 교환하게 되며 그 과정은 그림1과 같다.

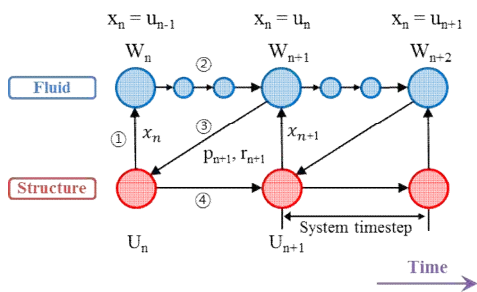


그림 1. Conventional Serial Staggered 흐름도

각 영역의 해석 시간간격이 다르기 때문에 해석 결과의 상호교환이 이루어지는 시간을 맞추기 위해 시스템 시간간

격을 설정하여 독립적으로 해석을 진행한 후 정보를 교환하였다. 시스템 시간간격을 적용하여 한 단계의 시간 전진은 다음의 과정을 통해 이루어진다.

- ① 구조에서 계산된 경계면에서의 형상 정보를 유동에게 전달
- ② 전달된 이동 정보와 유동의 해석 시간간격을 이용하여 시스템 시간간격만큼 유동 해석을 수행
- ③ 유동에서 계산된 경계면에서의 압력 및 연소율을 구조에게 전달
- ④ 전달된 정보와 구조의 해석 시간간격을 이용하여 시스템 시간간격만큼 구조 해석을 수행
- ⑤ 위의 과정을 반복 진행하여 전체 FSI 해석을 진행

2. 전달 기법

FSI 해석 진행 시, 시스템 시간간격마다 구조-유동 경계면에서 상호간의 정보 교환이 이루어진다. 각 영역에서 적용되는 해석 기법이 다르며 이에 따라 사용되는 요소망의 크기도 다른 경우가 많다. 이러한 경우 구조-유동 경계면에서 구조와 유동의 절점이 불일치하게 되며 정보전달 과정에서 보간법을 진행해야 한다. 본 연구에서는 보간법을 진행 할 때 정보의 정확성과 보존성을 만족시키기 위해 Common Refinement 기법을 사용하였다[5].

III. 수치해석 및 결과

1. 해석 모델

본 연구에서는 2차원 축대칭 형상의 고체추진기관인 ACM(Attitude Control Motor)을 사용하였다. 그림 2는 수치해석 모형이며 구조는 연소 영역(추진제)과 비연소 영역(접착제, 단열제, 케이스)로 구성되었고, 유동은 연소실로 구성되었다. 구조-유동 경계면에서 시스템 시간간격마다 각 영역에서 계산된 해석 결과를 교환하여 해석을 진행하였다. 해석이 진행됨에 따라 추진제는 연소에 의해 점차 사라지게 되고, 이에 따라 구조의 연소와 비연소 영역간에 절점들이 불일치하게 된다. 이러한 영역에서 연속성을 유지하기 위해 Mesh Non-matching Contact 영역으로 설정하여 해석을 진행하였다. 구조, 유동, 연소의 해석 프로그램에서 사용된 해석 기법 및 특징은 표1과 같다.

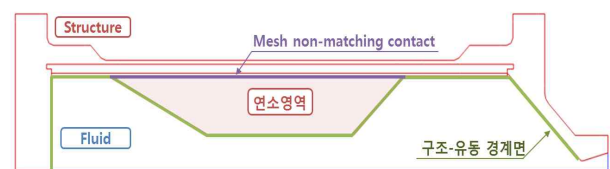


그림 2. ACM 수치모형

표 1. 해석프로그램의 특징

구조해석 프로그램		
해석 유형	Quasi-static analysis	
시간전진기법	Implicit 전진 기법 (Newton-Raphson)	
요소망	사각형 비정렬 격자	
재료 모델	케이스	Linearelastic
	추진제/접착제/단열제	Viscoelastic/Hyperelastic
유동해석 프로그램		
공간차분기법	RoeM 기법	
시간전진기법	Explicit 전진 기법 (TVD Runge-Kutta 3 rd)	
요소망	삼각형 비정렬 격자	
연소해석 프로그램		
연소해석기법	APN 모델	

FSI 해석을 진행 시, 경계면에서 정보교환을 수행하기 위해 시스템 시간간격을 설정한다. 구조에 비해 상대적으로 짧은 시간간격을 사용하는 유동의 시간간격에 맞추어 시스템 시간간격을 설정하면 불필요한 구조의 해석이 수행되며, 경계면에서 정보교환의 횟수가 늘어남에 따라 해석 시간적인 측면에서 비효율성을 가지게 된다. 또한 연소에 의해 경계면에서 계산되는 압력이 진동하는 현상이 나타나는데, 정보교환이 빈번해질수록 압력이 증가하는 경우 진폭이 증폭되어 수치해석이 불안정해지는 경우가 나타난다. 반면 시스템 시간간격을 길게 설정하면 경계면에서 한 번 정보교환이 이루어지는 동안 각 영역에서 독립적인 해석이 많이 진행되어 정확도가 감소하게 된다. 본 연구에서는 시스템 시간간격을 10^{-3} , 10^{-4} , 10^{-5} sec로 설정하여 ACM 모델의 해석을 수행하였고, 그림 3에서 표시한 측정 위치에서 해석 결과를 분석하여 각 시스템 시간간격에 따라 수치해석의 안정성을 검토하고, 수치해석 결과와 실험 결과를 비교하여 정확성을 검토하였다.

2. 수치해석 결과

그림 4는 ACM 해석 결과 중 측정 지점에서 해석 초기의 압력과 변위의 그래프이다. 시스템 시간간격이 길어질수록 압력과 변위의 진동 현상이 유연화가 되어 감소하는 그래프를 보여준다. 하지만 압력의 증가가 상대적으로 감소하여 0.005초에서는 시스템 시간간격에 따른 압력의 최대값과 최소값의 오차가 6.25%까지 발생한다. 해석 초기에 나타나는 압력 및 변위의 진동과 시스템 시간간격에 따라 발생하는 압력오차가 해석이 진행됨에 따라 해석 결과에 미치는 영향은 그림 5에서 나타난다.

그림 5는 측정지점에서 시스템 시간간격에 따른 해석 결과와 실험 결과를 비교한 그래프이다. 노즐 출구에는 멤브레인으로 막혀있어서 점화가 시작되는 해석 초기에는 추진

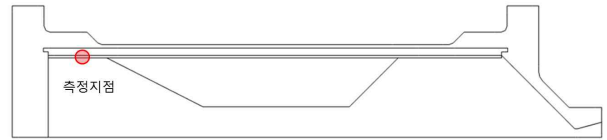


그림 3. 수치해석 및 실험결과의 측정지점

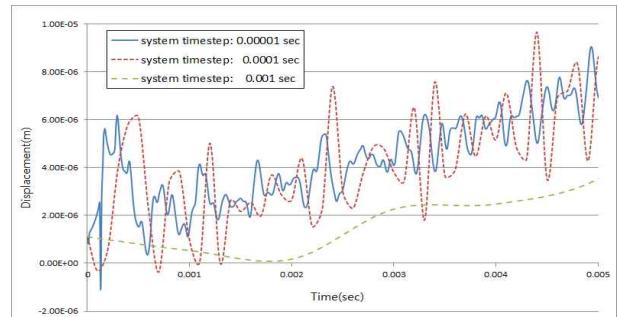
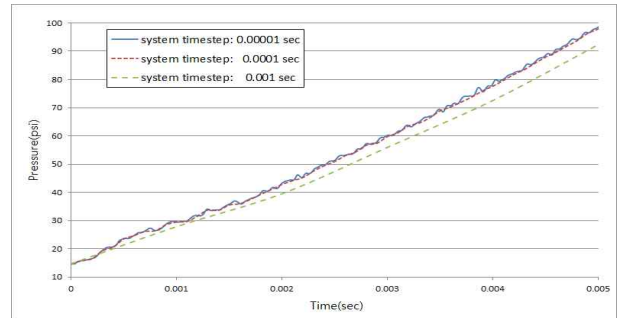


그림 4. 초기 해석시간에서 압력과 변위 그래프

제의 연소가스가 연소실에 채워지며 연소실 내부의 압력이 급격하게 증가하게 된다. 이후 압력이 1000 psi에 도달하면 멤브레인이 사라지게 되고, 연소실 내부는 유동의 압력이 크게 변하지 않는 정상상태가 된다. 실험 결과 및 수치해석 결과의 압력 그래프를 통해 노즐 출구에서 압력이 1000 psi에 도달하기 전에는 연소실 내부 압력의 증가가 나타나고, 압력이 1000 psi에 도달하면 압력의 증가가 감소하는 것을 확인할 수 있다.

시스템 시간간격이 10^{-4} , 10^{-5} sec인 경우, 초기에 발생하는 압력의 진폭이 시간의 흐름에 따라 점차 커져나가 0.02초 이후 압력이 급격하게 진동하는 그래프를 보여준다. 그림 3에서 나타나는 초기의 압력과 변위의 진폭이 시간이 지나면서 압력이 증가함에 따라 점차 커지게 되고, 이러한 구조의 변위는 유동 해석에 영향을 미치게 되어 경계면에서 압력의 진폭을 더욱더 증폭시키게 된다. 압력의 진폭이 증가함으로써 해석 결과는 발산하는 형태로 나타나며 결국 프로그램이 정지하는 결과를 가져왔다. 시스템 시간간격이 10^{-3} sec인 수치해석의 경우는 압력의 진폭이 증가하는 현상이 나타나지 않고, 안정적으로 해석이 진행되는 것을 볼 수 있다.

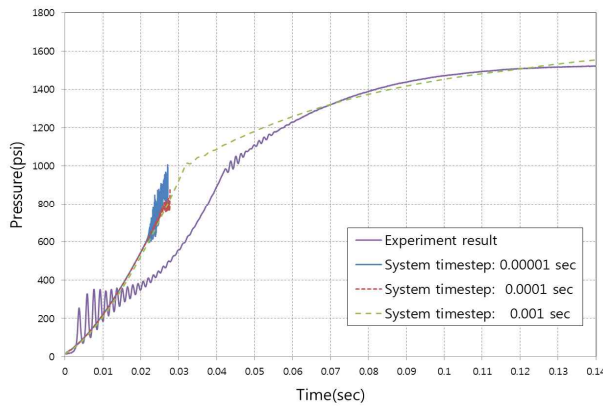


그림 5. 시간에 따른 압력 비교

수치해석은 추진체의 모든 면이 동시에 점화되며 시작되는 반면에 실험은 추진체의 점화가 점화기로부터 시작되어 짧은 시간에 모든 면으로 확장되는 과정을 거치게 된다. 이러한 현상으로 인해 그림 5에서 해석 초기에 실험 결과의 압력은 수치해석의 압력에 비해 크게 진동하는 그래프로 나타난다. 또한 연소 면적에 따른 차이로 인해 1000 psi까지 압력이 증가하는 구간에서는 실험결과와 수치 해석 결과의 차이를 가져오게 된다. 하지만 멤브레인이 사라지고 연소실 내부가 정상상태에 도달하면 실험결과와 수치해석 결과의 차이가 감소하는 것을 확인할 수 있다.

IV. 결 론

구조-유동 상호작용을 고려한 2차원 축대칭 형상 고체추진기관의 수치해석을 수행하였다. 본 연구에서는 각 영역에서 독립적으로 해석을 수행하고 정해진 시간간격으로 해석 결과의 상호교환이 이루어지는 CSS 기법을 사용하였다. FSI 해석 시, 유동과 구조영역 해석 결과의 상호교환이 이루어지는 한 사이클의 시간간격 즉, 시스템 시간간격을 설정하였으며, 이에 따른 수치해석 결과를 실험 결과와 비교하여 안정성과 정확도를 검토하였다. 수치해석 결과를 통하여 시스템 시간간격이 상대적으로 짧은 10^{-4} , 10^{-5} sec에서는 구조와 유동영역간의 상호작용의 영향이 커짐에 따라 유동의 진동현상이 구조영역의 해석에 영향을 미치게 되며 결국 통합해석 해의 발산을 일으키는 것을 관찰할 수 있었다. 시스템 시간간격이 10^{-3} sec을 사용한 수치해석에서는 해석 결과와 실험 결과의 비교를 통하여 안정성과 정확성이 보이는 것을 확인하였다. 이를 통하여 고체추진기관의 구조-유동 상호작용 해석에서 유동과의 빈번한 정보교환을 위하여 작은 시스템 시간간격을 취하는 것은 수치해석의 불안정성을 증대시키며 수치해의 발산을 일으킬 수 있음을 알 수 있다. 그러나 수치해석의 안정성을 위하여 시스템 시간간격을 크게 증가시킬 경우 정확성의 감소를 초래할 수

있으므로 정확하고 안정된 값을 가질 수 있는 최적화된 시스템 시간간격의 설정이 필요한 것을 알 수 있다.

후기

본 논문은 국방과학연구소로부터 지원을 받아 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] 김종근, 박종호, "핀틀 형상이 노즐 성능에 미치는 영향에 관한 연구," 한국항공우주학회지, 제36권, 제8호, pp.790-796 (2008)
- [2] 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)
- [3] Causin, Paola, Jean-Frédéric Gerbeau, and Fabio Nobile., "Added-mass effect in the design of partitioned algorithms for fluid - structure problems," Computer methods in applied mechanics and engineering Vol.194, No.42, pp.4506-4527 (2005)
- [4] Han, Sangho, et al., "ALE-Based FSI simulation of solid propellant rocket interior," 48th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition (2010)
- [5] Jaiman, Rajeev K., et al., "Conservative load transfer along curved fluid - solid interface with non-matching meshes," Journal of Computational Physics Vol.218, No.1, pp.372-397 (2006)