

# 고체추진기관의 유동-구조 상호작용 해석에서 Serial Staggered 기법의 수치 안정성

조 현 주<sup>1</sup> · 이 지 호<sup>1\*</sup> · 이 창 수<sup>2</sup> · 김 종 암<sup>2</sup> · 김 신 회<sup>3</sup> · 이 정 섭<sup>3</sup>

<sup>1</sup>동국대학교 건설환경공학과, <sup>2</sup>서울대학교 기계항공공학과, <sup>3</sup>국방과학연구소

## Numerical Stability of Serial Staggered Methods in Fluid-Structure Interaction Analysis of Solid Rocket Motors

Hyun-Joo Cho<sup>1</sup>, Jee-Ho Lee<sup>1\*</sup>, Chang-Soo Lee<sup>2</sup>, Chong-Am Kim<sup>2</sup>, Shin-Hoe Kim<sup>3</sup> and Jeong-Sub Lee<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Department of Civil & Environmental Engineering, Dongguk Univ, Seoul, 04620, Korea

<sup>2</sup>Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul National Univ, Seoul, 08826, Korea

<sup>3</sup>The 4th R&D Institute, 1st Directorate, Agency for Defense Development, Daejeon, 34186, Korea

### Abstract

In this paper numerical stability of CSS and ISS schemes in axisymmetric fluid-structure-burning simulation for solid rocket motors are studied. The implemented CSS and ISS algorithms for two-dimensional axisymmetric FSI problems are used to analyze ACM and BCM solid rocket motors. Numerical results from CSS and ISS schemes are compared to investigate the efficacy of ISS scheme over CSS scheme in stabilizing the numerical solution. The ACM and BCM simulation results show that ISS scheme gives stable and converged numerical solutions with appropriately small system time step size, while CSS scheme fails to converge after generating rapidly amplified oscillatory solutions. It is concluded that ISS scheme can be useful in improving the numerical stability of FSI analysis for ACM and BCM solid rocket motor simulations, which is not successfully obtained with CSS scheme.

**Keywords** : solid rocket motor, fluid-structure interaction, conventional serial staggered method, improved serial staggered method, numerical stability

### 1. 서 론

다양하고 복잡한 재료와 형상으로 구성된 고체추진기관의 추진제 연소에서 유동-구조 상호작용(FSI) 거동을 예측하여 실제 발생할 수 있는 파손 위험을 최소화하는 것은 매우 중요하다. 점화 즉시 고압 상태로 변하는 연소실 내부의 추진제 거동을 실험으로 정확하게 파악하기에는 안전과 경제적 비용 문제가 수반되며, 이의 보완적 방법으로 수치해석을 통한 고체추진기관의 연구가 많이 진행되고 있다(Fiedler *et al.*, 2001; Dick *et al.*, 2006; Han *et al.*, 2014).

고체추진기관 수치해석에는 구조, 유동, 연소의 현상이 복합적으로 고려되어야 하며, 각 물리현상의 상관관계가 매우

중요하다. 일반적으로 추진제 및 구조물의 대변형 점탄성 재료의 구조영역 비선형 해석에는 유한요소법이, 연소실 내부의 고압, 고온의 비정상 유동영역의 해석에는 유한체적법이 사용되며 이를 완전히 결합하고 동기화한 비선형 해석을 수행하기 보다는 유동, 구조 해석을 번갈아 수행하는 Serial Staggered 기법이 선호되고 있다. 이러한 FSI 해석에는 Serial Staggered 기법 중에 알고리즘이 간단하여 적용하기 용이한 CSS(conventional serial staggered) 기법이 여전히 많이 사용되고 있다. 이 방법에서는 각 영역에서 계산된 해석결과의 상호교환이 순차적으로 이루어지며, 상호교환이 이루어지는 한 사이클의 시간간격을 구조와 유동 영역이 해석하는 횟수에 대한 비율로 고정한다. 결과적으로 유동해석의 시간간격

\* Corresponding author:

Tel: +82-2-2260-3352; E-mail: jeeholee@dgu.edu  
Received January 28 2016; Revised February 18 2016;  
Accepted February 19 2016

©2016 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

변화에 따라 구조해석의 시간간격도 변하게 되며 이러한 구조해석의 시간간격변화는 FSI 해석의 안정성과 정확성을 저해하고 유동의 시간간격이 줄어드는 경우에는 불필요한 구조해석과 정보의 상호교환이 발생하여 시간적인 측면에서 비효율성을 가져올 수 있다(Fiedler *et al.*, 2002). 이러한 문제점은 고정된 구조영역의 시간간격을 시스템 시간간격으로 설정하고 이를 고정한 후, 각 시스템 시간간격마다 구조와 유동영역 해석결과 상호교환의 한 사이클이 이루어지도록 하여 개선되기도 한다(Cho *et al.*, 2014).

FSI 해석에서 시스템 시간간격을 길게 설정하면 수치해의 정확성이 떨어지는 경향이 있으며, 반면 시스템 시간간격을 짧게 설정하면 유동-구조 해석결과의 상호교환 빈도가 늘어나게 되어 CSS 기반 해석의 불안정성을 증가시킬 수 있다(Causin *et al.*, 2005). 이러한 FSI 해의 불안정성 개선을 위하여 ISS (improved serial staggered) 기법의 사용이 제안되었으나 (Farhat *et al.*, 2000), 고체추진기관의 복합거동과 같은 매우 복잡한 상호작용 문제에서의 유효성은 아직 검증되지 못한 상태이다.

본 연구에서는 고체추진기관의 2차원 축대칭 FSI 해석에서 CSS 및 ISS 기법의 수치 안정성을 고찰하였다. 이를 위하여 CSS 및 ISS 기법을 2차원 축대칭 FSI 수치해석 알고리즘에 구현한 프로그램을 작성하고, 이를 2종의 축대칭 형상 고체추진기관의 복합거동 해석에 사용하였다. 해석 결과들을 비교 분석하여 ISS 기법이 고체추진기관의 FSI 해석의 수치 안정성 개선에 효과적인지 검토하였다.

## 2. Serial Staggered 기법

### 2.1 시스템 시간간격

FSI 해석 진행 시, 구조와 유동 영역간의 정보를 상호 교환하는 물리적 시간을 조절하기 위하여 시스템 시간간격을 설정한다. 유동의 시간간격에 맞추어 시스템 시간간격을 설정하면 상대적으로 긴 시간간격을 사용하는 구조영역에서 불필요한 해석이 수행되고, 유동-구조 경계면에서 각 영역의 정보교환이 늘어남에 따라 해석 시간적인 측면에서 비효율성을 가지게 된다. 이는 시스템 시간간격이 일정 시간 이하로 줄어들게 되면 FSI 해석 결과값이 수렴하게 되어 그 시간 이하로 시스템 시간간격을 설정하게 되면 유동-구조 상호간에 불필요한 정보교환이 이루어지기 때문이다. 또한 유동 내부의 흐름에 의해 경계면에서 전달하는 압력이 진동하는 현상이 나타나는데, 빈번한 정보교환은 압력과 변위의 진폭을 증폭시켜 수치해석의 불안정성이 증가하는 경우가 발생한다.

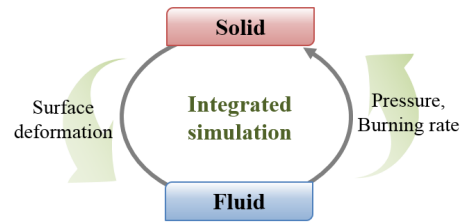


Fig. 1 System timestep

반면 시스템 시간간격을 길게 설정하면 수치해의 정확도가 감소할 수 있다. 한 사이클의 FSI 해석이 수행되는 동안 각 영역에서 독립적으로 해석이 진행되는 물리적인 시간이 길어져 상호 교환되는 정보의 정확도가 감소하게 된다. 따라서 수치 해석의 안정성과 정확성을 가질 수 있는 최적화된 시스템 시간간격의 설정이 필요하다.

### 2.2 유동-구조 상호작용

고체추진기관의 유동-구조 상호작용은 구조와 유동 영역을 분할하고, 각 영역에서 해석을 독립적으로 수행한 후, 유동-구조 경계면에서 해석 결과의 상호교환이 이루어지도록 한다. 구조-유동의 경계면에서 경계조건은 Neumann 경계조건과 Dirichlet 경계조건을 사용한다(Han *et al.*, 2010). Neumann 경계조건의 경계면에서 유동영역에서 계산된 압력을 구조영역으로 전달한다:

$$P_s = P_f \quad \text{on } \Gamma \quad (1)$$

$$t_s = -P_s n_s \quad \text{on } \Gamma_s \quad (2)$$

여기서,  $P_s, P_f$ 는 유동-구조 경계면에서 구조와 유동의 압력,  $\Gamma$ 는 유동-구조의 경계면,  $\Gamma_s$ 는 구조의 경계면,  $t_s$ 는 구조 경계면에서의 traction 벡터,  $n_s$ 는 구조 경계면의 연직 벡터를 의미한다. 또한 Dirichlet 경계조건을 통하여 구조영역의 연소와 변형이 반영된 경계면의 형상 정보를 유동영역으로 전달한다:

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

여기서,  $x_s$ 과  $x_f$ 은 각각 공간 형상에서 구조와 유동 영역의 현재 위치 벡터를 의미한다. 식 (1)과 식 (3)을 통하여 구조와 유동 영역은 필요한 정보를 교환하게 된다.

### 2.3 CSS 기법 알고리즘

CSS 기법은 FSI의 serial staggered 기법 중 간단하고

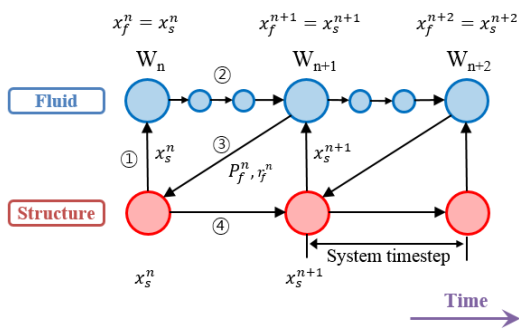


Fig. 2 Flow chart for CSS scheme

일반적으로 사용되고 있는 기법(Felippa *et al.*, 2001)으로 해석 알고리즘은 Fig. 2와 같다.

CSS 기법은 각 영역에서 독립적으로 수행된 해석 결과를 시스템 시간간격마다 상호교환하며 진행되고,  $[t^n, t^{n+1}]$ 의 시간간격 동안 수행되는 해석 과정은 Table 1과 같다.

Table 1 CSS algorithm

Algorithm Conventional Serial Staggered scheme	
1. Transfer deformed data to fluid domain on the interface	
$x_f^n = x_s^n$	on $\Gamma$
2. Solve ALE fluid domain and compute burning rate along the fluid interface after updating fluid dynamic mesh	
$\frac{d}{dt}(V_f^n w_f^n) = Q_f(w_f^n, x_f^n, \dot{x}_f^n)$	in $\Omega_f$
$\frac{d}{dt}(r_f^{n+1}) = f(A, P_f^{n+1})$	on $\Gamma_f$
3. Transfer pressure and burning rate to solid domain on the interface	
$P_s^{n+1} = P_f^{n+1}$	on $\Gamma$
$r_s^{n+1} = r_f^{n+1}$	on $\Gamma$
4. Solve solid domain by using the transferred interface data	
$x_s^{n+1} = r_s^{n+1} n_s^n$	on $\Gamma_s$
$t_s^{n+1} = -P_s^{n+1} n_s^n$	on $\Gamma_s$
$F_s^{n+1} = t_s^{n+1}$	in $\Omega_s$
$K_s^{n+1} u_s^{n+1} = F_s^{n+1}$	in $\Omega_s$

여기서,  $(\cdot)^n$ 은 시간  $t^n$ 에서 물리량이며,  $V_f$ 는 유동영역의 control volume,  $w_f$ 는 유동영역의 보존값,  $\dot{x}_f$ 는 유동격자의 속도,  $r_f$ 는 유동-구조 경계면의 연소율,  $A$ 는 상수이다.  $F_s$ ,  $K_s$ ,  $u_s$ 는 각각 구조영역의 하중 벡터, 강성행렬, 변위 벡터를 나타낸다.

CSS 기법은 구조와 유동 영역에서 해석이 수행되는 시점과 해석 결과의 상호교환이 이루어지는 시점이 동일하여 유동-구조 경계면에서 구조변위의 변동 주기는 유동영역에서 전달하는 압력크기의 변동 주기와 유사하게 된다. FSI 해석 진행 시, 시스템 시간간격이 유동영역에서 유동흐름에 의하여 나타나는 압력크기의 변동 주기보다 짧아진다면 유동영역의

압력크기와 구조영역으로 전달하는 압력크기의 변동 주기가 동일해지며, 이에 따라 유동-구조 경계면에서 유동압력의 진동수와 구조의 진동수가 유사하게 된다. 이러한 현상은 4.3절의 예제에서 볼 수 있듯이 공명현상을 유발하고, 각 영역의 수치해가 불안정해지는 결과를 가져올 수 있다.

### 3. ISS 기법

#### 3.1 ISS 기법 알고리즘

CSS 기법을 적용한 FSI 해석은 각 영역의 해석이 수행되는 시점과 정보를 교환하는 시점이 동일하여 공명현상을 유발시킬 수 있다. 이러한 문제점을 개선하기 위하여 ISS 기법에서는 구조 및 유동 영역에서 해석된 결과의 상호교환 시점을 수정한다(Jaiman *et al.*, 2007). 교환시점은  $t^n$ 에서  $t^{n+1}$  사이의 시간인  $t^{n+\alpha}$ 로 설정하면 다음의 식과 같다.

$$x_s^{n+\alpha} = x_f^{n+\alpha} \quad \text{on } \Gamma \quad (4)$$

구조영역에서 전달하는 경계면의 좌표는  $x_s^n$ ,  $x_s^{n+1}$ 을 사다리꼴 보간법을 적용한 후 유동으로 전달하게 된다:

$$x_s^{n+\alpha} = \alpha x_s^n + (1-\alpha)x_s^{n+1} \quad \text{on } \Gamma_s \quad (5)$$

여기서, 파라미터  $\alpha \in [0, 1]$ 이다. 유동영역에서 전달받은 압력도  $P_s^{n-(1-\alpha)}$ ,  $P_s^{n+\alpha}$ 도 사다리꼴 보간법을 적용한 후 구조해석에 적용한다.

$$P_s^{n+1} = \beta P_s^{n-(1-\alpha)} + (1-\beta)P_s^{n+\alpha} \quad \text{on } \Gamma_s \quad (6)$$

여기서, 파라미터  $\beta \in [0, 1]$ 이다. 본 연구에서는  $\alpha$ 와  $\beta$ 를 1/2로 고정하여 진행하였고, 해석 진행 과정은 Table 2와 Fig. 3과 같다.

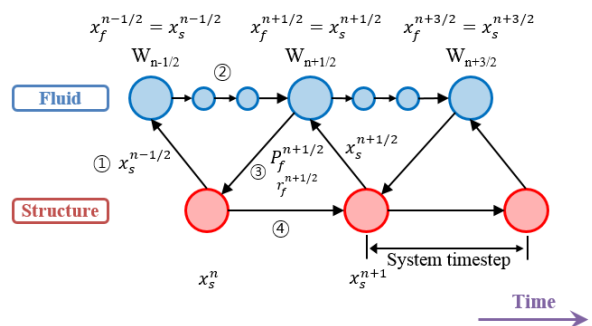


Fig. 3 Flow chart for ISS scheme

Table 2 ISS algorithm

Algorithm Improved Serial Staggered scheme	
1. Transfer deformed data to fluid domain on the interface	
$x_f^{n-1/2} = \frac{1}{2} x_s^{n-1} + \frac{1}{2} x_s^n$	on $\Gamma$
2. Solve ALE fluid domain and compute burning rate along the fluid interface after updating fluid dynamic mesh	
$\frac{d}{dt}(V_f^{n-1/2} w_f^{n-1/2}) = Q_f(w_f^{n-1/2}, x_f^{n-1/2}, \dot{x}_f^{n-1/2})$	in $\Omega_f$
$\frac{d}{dt}(r_f^{n+1/2}) = f(a, P_f^{n+1/2})$	on $\Gamma_f$
3. Transfer pressure and burning rate to solid domain on the interface	
$P_s^{n+1/2} = P_f^{n+1/2}$	on $\Gamma$
$r_s^{n+1} = r_f^{n+1/2}$	on $\Gamma$
4. Solve solid domain by using the transferred interface data	
$x_s^{n+1} = r_s^{n+1} n_s^n$	on $\Gamma_s$
$P_s^{n+1} = \frac{1}{2} P_s^{n-1/2} + \frac{1}{2} P_s^{n+1/2}$	on $\Gamma_s$
$t_s^{n+1} = -P_s^{n+1} n_s^n$	on $\Gamma_s$
$F_s^{n+1} = t_s^{n+1}$	in $\Omega_s$
$Ku_s^{n+1} = F_s^{n+1}$	in $\Omega_s$

4 수치해석 및 결과

4.1 수치해석 모델

본 연구에서는 2차원 축대칭 형상의 고체추진기관인 ACM (attitude control motor)과 BCM(bore choke motor)을 사용하였으며, Fig. 4, 5는 각각의 수치해석 모형이다. 유동 영역은 연소실로 구성되었고, 구조영역은 연소영역(추진제)과 비연소 영역(접착제, 단열재, 케이스)으로 구성되었으며, 이들 중 추진제, 접착제, 단열재는 비선형 물성을 고려한 Mooney-Rivlin 모델을 사용하여 해석을 진행하였다. 해석이 진행됨에 따라 연소에 의해 추진제는 점차 사라지게 되고, 추진제의 연소에는 APN 모델(Beckstead *et al.*, 1970)을 사용하여 압력과 온도에 의해 경계면의 직각방향으로 연소되는 양이 결정되는 것으로 하였다.

구조영역에서는 implicit 전진 기법의 준정적해석을 진행하였으며, 유동영역은 explicit 전진 기법의 Euler 해석을 수행하였다. 구조의 유한요소 해석에는 2×2 적분점의 Isoparametric 사변형 축대칭 요소를 사용하고, 유동해석은 삼각형 비정렬 격자를 사용하여 수행하였다. 또한 추진제의 연소에 따른 유동-구조 경계면의 움직임을 반영하기 위하여 구조 및 유동 영역에서 ALE(arbitrary lagrangian-eulerian) 기법을 각각 적용하였다. 시스템 시간간격은 10<sup>-3</sup>, 10<sup>-4</sup>, 10<sup>-5</sup>sec를 사용하여 수치해석을 진행하였다.

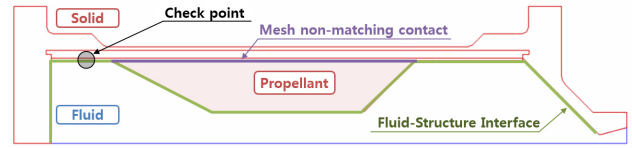


Fig. 4 ACM numerical model and check point

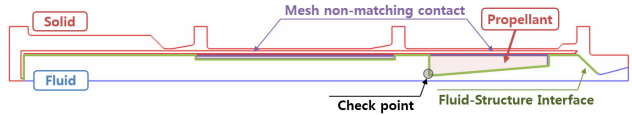
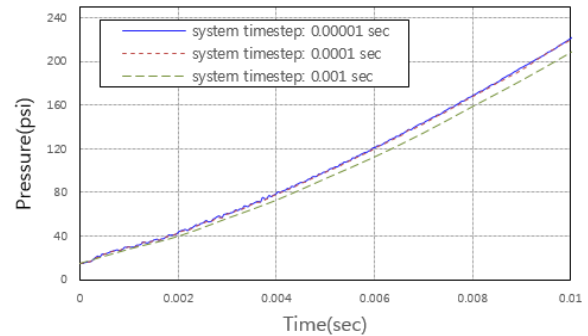


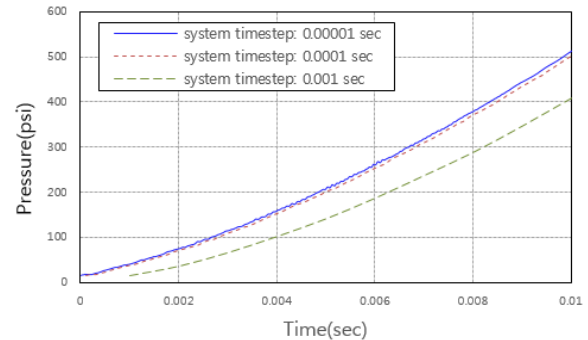
Fig. 5 BCM numerical model and check point

4.2 시스템 시간간격에 따른 해석 결과

Fig. 6은 CSS 기법을 사용하였을 때 ACM과 BCM 수치해석 결과 중 측정 지점에서 해석 초기의 압력 결과이다. 시스템 시간간격이 작아질수록 측정지점에서 수치해석의 결과값이 수렴해 나가는 것을 확인할 수 있다. 상대적으로 긴 시스템 시간간격인 10<sup>-3</sup>sec를 적용한 해석은 10<sup>-4</sup>, 10<sup>-5</sup>sec를 적용한 압력보다 작게 나타났으며, 초기구간인 0~0.001초 구간에서 시스템 시간간격 10<sup>-3</sup>와 10<sup>-5</sup>sec 해석 간의 RMS 상대오차는 ACM은 3.04%, BCM은 17.33%로 발생하였다. 추진제의 변형이 ACM보다 상대적으로 크게 발생하는 BCM에서 시스템 시간간격에 따른 상대오차가 증가하는 경향을 보여주었다.



(a) ACM model



(b) BCM model

Fig. 6 Pressure time history for system timestep

### 4.3 CSS 기법을 적용한 해석 결과

Fig. 7은 CSS 기법을 ACM 및 BCM에 적용한 수치해석 결과 중 측정지점(Fig. 4 및 5)의 압력을 나타낸 것이다. ACM과 BCM의 노즐 출구는 노즐막으로 막혀있어 점화가 시작되는 해석 초기에는 추진제의 연소가스에 연소실에 채워지며, 연소실 내부의 압력이 증가하게 되었다. 압력이 일정 압력에 도달하면 노즐막은 사라지게 되는데 ACM은 연소실 내부가 유동의 압력이 크게 변하지 않는 정상상태가 되는 것으로 나타난다. 반면 BCM에서는 추진제의 변형이 유동을 방해, 압력을 증가시켜 다시 추진제의 변형이 증가하는 초킹(chocking)이 발생하고, 이의 진전에 따라 유동-구조 경계 변화가 커져 유동 압력이 진동하는 현상이 초래된다 (Isaac *et al.*, 2003).

Fig. 7(a)은 ACM의 해석 결과를 나타낸 것으로 시스템 시간간격  $10^{-3}$ sec를 사용한 경우는 해석시간 전체에 걸쳐 수치해석이 안정적으로 수행되는 반면에,  $10^{-4}$ 과  $10^{-5}$ sec를 사용한 결과에서는 0.02초 이후 압력의 진동이 급격하게 증가하여 수치해가 발산하는 결과를 확인할 수 있다. Fig. 7(b)는 시스템 시간간격에 따른 BCM의 해석 결과로  $10^{-5}$ sec이 사용된 경우는 압력이 증가하는 구간에서 수치해가 발산하였다.  $10^{-3}$ 과  $10^{-4}$ sec를 적용한 경우는 추진제의

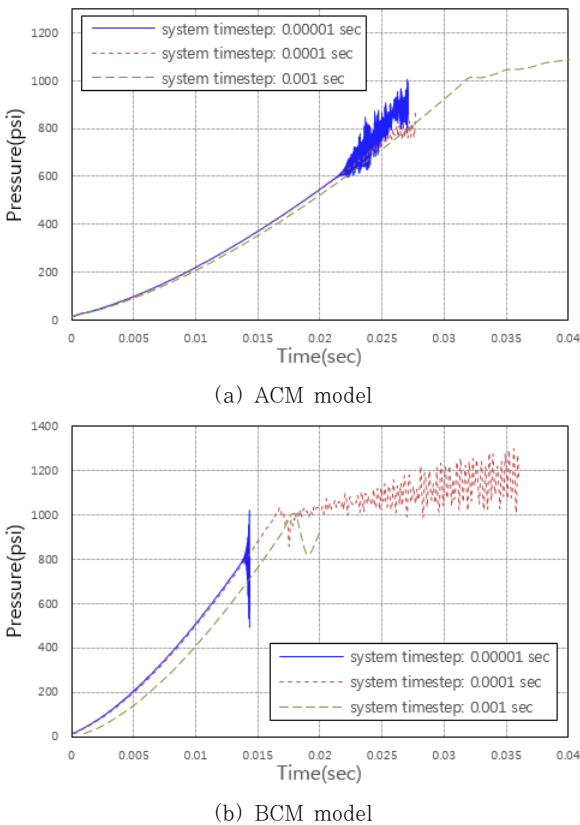


Fig. 7 Pressure time history using CSS scheme

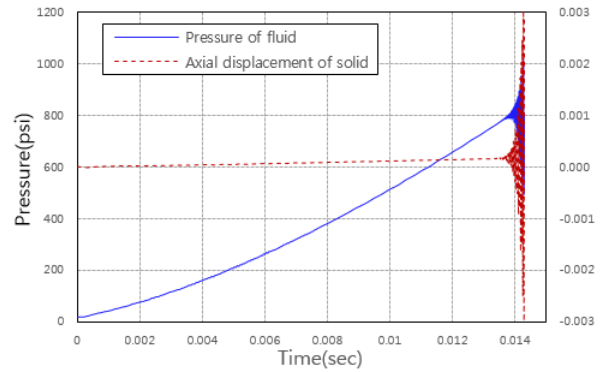


Fig. 8 Result using CSS scheme with system timestep  $10^{-5}$ sec for BCM model

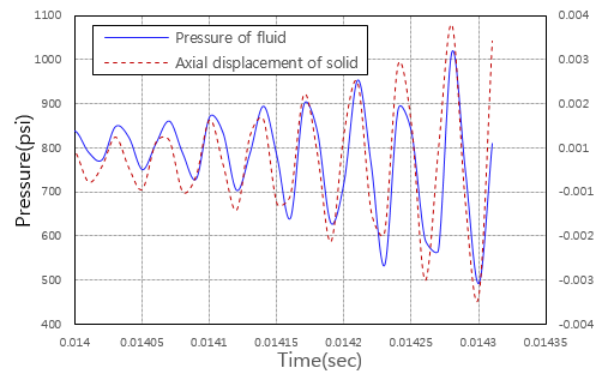


Fig. 9 Resonance between pressure and axial displacement at check point in Fig. 5

초킹에 의하여 발생된 압력의 진동이 시간이 진행됨에 따라 증가하여 수치해석이 불안정해지는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 8은 BCM에서 시스템 시간간격을  $10^{-5}$ sec를 적용하였을 때 나타낸 측정지점(Fig. 5)의 유동압력과 구조변위이며, Fig. 9는 Fig. 8에서 수치해석이 불안정해지는 구간의 결과를 확대하여 도시한 것이다. Fig. 9에서 볼 수 있듯이 CSS 기법을 적용하는 경우, 유동흐름에 의하여 나타나는 유동압력 크기의 변동 주기보다 짧은 시스템 시간간격이 사용되면 구조의 진동수와 유동압력의 진동수가 유사해지면서 공명현상이 발생하게 되고, 이에 따라 진폭이 증가하는 현상을 확인할 수 있다.

### 4.4 ISS 기법을 적용한 해석 결과

ISS 기법을 적용한 FSI 해석의 초기 구간 0~0.001초에서 시스템 시간간격  $10^{-4}$ 과  $10^{-5}$ sec를 사용한 수치해의 RMS 상대오차는 ACM은 1.35%, BCM은 1.79%로 나타났으며,  $10^{-3}$ 과  $10^{-5}$ sec를 사용한 경우는 각각 14.01%, 17.40%로 나타났다. 수치해의 상대오차가 크게 발생하는 시스템 시간간격  $10^{-3}$ sec를 제외한  $10^{-4}$ ,  $10^{-5}$ sec를 사용하여 CSS와 ISS

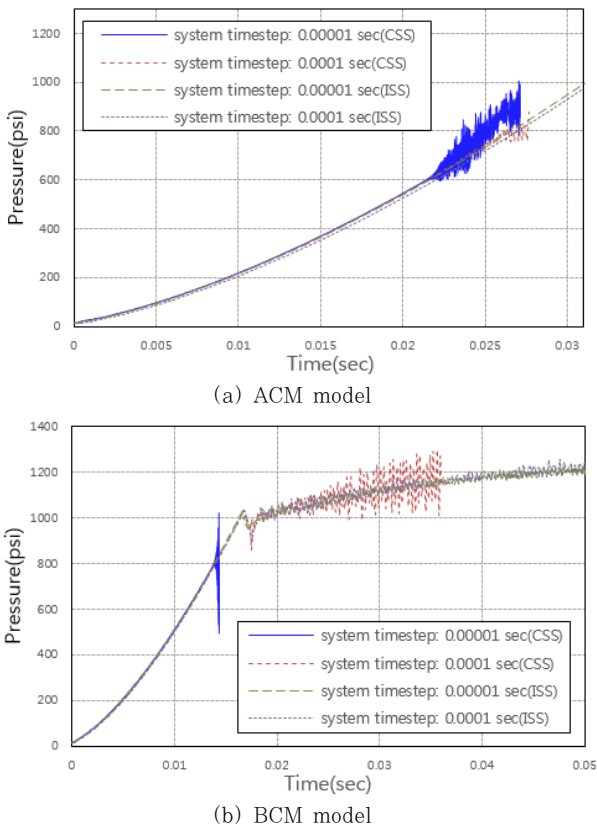


Fig. 10 Pressure time history using CSS and ISS scheme

기법에 따른 수치 안정성을 비교하고, 그 결과를 Fig. 10에 나타내었다.

Fig. 10(a)에서 볼 수 있듯이 ACM 해석에서 CSS 기법을 사용한 경우, 시스템 시간간격  $10^{-4}$ 과  $10^{-5}$ sec의 해석 결과에서 모두, 압력이 증가함에 따라 압력의 진폭이 크게 증가하면서 수치해가 불안정하게 된다. 반면 ISS 기법을 적용한 결과에서는 압력이 증가하면서 수치해석이 안정적으로 진행되는 것을 확인할 수 있다.

BCM 해석에서 CSS 기법을 적용한 경우는 초킹에 의하여 발생한 유동 압력의 진동이 불안정하게 해석되어 진폭이 비정상적으로 증가하고 결국 수치해가 발산하게 되는 것을 Fig. 10(b)에서 확인할 수 있다. 반면, Fig. 10(b)에서 비교하여 볼 수 있듯이 ISS 기법을 적용한 해석 결과에서는 시스템 시간간격  $10^{-4}$ 과  $10^{-5}$ sec의 경우에서 모두 수치해석이 안정적으로 진행되는 것을 확인할 수 있다. 특히 0.017sec부터 발생하는 물리적 초킹 진동현상도 안정적으로 재현되는 것을 볼 수 있다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 Serial Staggered 기법 중 고체추진기관

FSI 수치해석에 가장 보편적으로 사용되는 CSS 기법과 이를 개선한 ISS 기법을 2차원 축대칭 형상인 ACM 및 BCM에 적용하여 수치해석의 안정성을 검토하였다.

ACM 및 BCM 고체추진기관 복합거동해석에서 CSS 기법을 사용한 경우, 시스템 시간간격  $10^{-3}$ sec를 사용한 수치해석은 안정적으로 진행되었으나 초기압력의 상대오차가 크게 나타났다.  $10^{-4}$ 과  $10^{-5}$ sec를 적용한 경우는 초기압력의 상대오차가 감소하는 경향을 보이는 반면에, 시간이 진행될수록 유동 압력과 구조변위의 진동이 점차 증가하여 수치해가 불안정해지는 결과를 보여주었다.

ISS 기법을 적용한 FSI 해석에서는 시스템 시간간격이 작아짐에 따라 수치적 수렴성을 보이며, CSS 기법과 다르게, 시간이 진행되어도 수치해가 발산하지 않아 해석시간 전체에 걸쳐 해석이 안정적으로 유지되는 것을 확인할 수 있었다. 특히, 초킹이 발생하여 물리적 진동현상을 보이는 BCM의 해석에서도 진폭이 비정상적으로 확대되지 않음을 확인할 수 있었다. 이를 통하여 ISS 기법을 이용하면 ACM 및 BCM의 FSI 복합거동해석에 CSS 기법을 사용할 시 나타나는 수치 불안정성을 개선할 수 있음을 확인하였다.

## 감사의 글

본 논문은 국방과학연구소의 지원으로 수행한 “고체추진기관 유동-구조 3차원 통합해석 S/W개발(UE135095GD)” 연구 과제의 성과이며, 이에 감사드립니다.

## References

- Beckstead, M.W., Derr, R.L., Price, C.F. (1970) A Model of Composite Solid-propellant Combustion based on Multiple Flames, *AIAA J.*, 8(12), pp.2200~2207.
- Causin, P., Gerbeau, J.F., Nobile, F. (2005) Added-mass Effect in the Design of Partitioned Algorithms for Fluid - structure Problems, *Comput. Methods appl. Mech. & Eng.*, 194(42), pp.4506~4527.
- Cho, H.J., Lee, C.S., Lee, J.H., Kim, C.A., Park, J.B., Jin, J.G. (2014) A Stability Analysis for Fluid-Structure Interaction of Solid Rocket Motor with Conventional Serial Staggered Method, *Energ. & Def. Mater. Conf.*, pp.11~14.
- Dick, W., Heath, M. (2006) Building Rocstar: Simulation Science for Solid Propellant Rocket

- Motors, *37th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit*, AIAA 2006-4590.
- Farhat, C., Lesoinne, M.** (2000) Two Efficient Staggered Algorithms for the Serial and Parallel Solution of Three-dimensional Nonlinear Transient Aeroelastic Problems, *Comput. Methods appl. Mech. & Eng.*, 182, pp.499~515.
- Felippa, C.A., Park, K.C., Farhat, C.** (2001) Partitioned Analysis of Coupled Mechanical Systems, *Comput. Methods appl. Mech. & Eng.*, 190(24), pp.3247~3270.
- Fiedler, R.A., Breitenfeld, M.S., Jiao, X., Haselbacher, A, Geubelle, P., Guoy, D., Brandyberry, M.** (2002) Simulations of Slumping Propellant and Flexing Inhibitors in Solid Rocket Motors, *38th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit*, AIAA 2002-4341.
- Fiedler, R., Jiao, X., Namazifard, A., Haselbacher, A., Najjar, F., Parsons, I.** (2001) Coupled Fluidstructure 3-D Solid Rocket Motor Simulations, *37th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit*, AIAA 2001-3954.
- Han, S.H., Kim, C.A.** (2014) Integrated Fluid-Structure Simulation for Full Burning of a Solid-Propellant Rocket Interior, *J. Propuls. & Power*, 30(4), pp.883~900.
- Han, S.H., Choi, H.S., Kim, C.A.,** (2010) ALE-Based FSI Simulation of Solid Propellant Rocket Interior, *48th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition*.
- Isaac, D., Iverson, M.** (2003). Automated Fluid-Structure Interaction Analysis. *ATK THIOKOL PROPULSION CORP BRIGHAM CITY UT*.
- Jaiman, R.K., Geubelle, P.H., Loth, E., Jiao, X.** (2007) Stable and Accurate Loosely-coupled Scheme for Unsteady Fluid-structure Interaction, *AIAA Paper*, p.334.

## 요 지

본 연구에서는 고체추진기관의 2차원 축대칭 FSI 해석에서 CSS 및 ISS 기법의 수치 안정성을 고찰하였다. 이를 위하여 CSS 및 ISS 기법을 2차원 축대칭 FSI 수치해석 알고리즘에 구현한 프로그램을 작성하고, 이를 ACM 및 BCM 고체추진기관의 복합거동 해석에 사용하였다. 해석 결과들을 비교 분석하여 ISS 기법이 고체추진기관 FSI 해석의 수치 안정성 개선에 효과적인지 검토하였다. 연구결과, ISS 기법을 적용한 FSI 해석은 시스템 시간간격이 작아질수록 수치적 수렴성을 보이며, CSS 기법과 다르게 시간이 진행되어도 수치해의 진동이 발산하지 않는 것을 확인할 수 있었다. 이를 통하여 ISS 기법을 사용하면 ACM 및 BCM의 FSI 해석에 CSS 기법을 이용할 시 나타나는 수치 불안정성을 개선할 수 있음을 확인하였다.

**핵심용어** : 고체추진기관, 유동-구조 상호작용, Conventional Serial Staggered 기법, Improved Serial Staggered 기법, 수치적 안정성