

# 연료 레일에서의 맥동저감을 위한 유체-구조 상호작용 해석 Fluid-Structure Interaction Analysis for Pulsation Damping in Fuel Rail

심정연† · 김동현\* · 조윤택\*\*

Jeong Yeon Shim, Dong-Hyun Kim and Yun Tae Cho

**Key Words** : Fuel Rail (연료레일), Fluid-Structure Interaction (유체-구조 상호작용), Pulsation Damping (맥동 저감), CFD (전산유체역학), FEM (유한요소법)

## ABSTRACT

Complex pressure pulsation phenomenon in fuel rails is generated by rapid opening and closing of injectors and it commonly causes undesirable noise. In this study, fluid-structure interaction analyses based on CFD and FEM have been conducted to examine the pulsation damping characteristics for different shapes of fuel rails. It is shown from the present results that the fuel rail with a high aspect ratio rectangular cross section seems to be best in order to reduce the pressure pulsations. It also agrees well with the previous experimental test by Mizuno, K. et al.

## 1. 서론

감쇠장치(damper)를 장착하지 않은 내연기관 연료레일의 경우에 injector가 열렸다 닫히는 순간 발생하는 유체의 급격한 압력 맥동에 의해 주변 탄성 구조와의 상호작용으로 상당한 소음을 유발할 수 있다. 이러한 맥동은 수격현상(water hammer effect) 즉 파이프 내의 유체 속도의 급격한 변화에 의해 발생하게 된다. 이러한 중요성을 인식하여 2002년 Mizuno[1] 등은 실험을 통하여 연료레일의 형태에 따른 맥동 저감효과를 연구하였다. 실험에 따르면 부피의 증가에 따른 맥동저감 효과는 그리 크지 않으며 가로세로비(aspect ratio)가 큰 직사각형의 경우 즉 직사각형이 납작할수록 맥동저감 효과가 크다는 유용한 결과를 얻었다. 기존에 연료 레일에 대한 맥동현상의 해석 연구는 기존의 참고문헌에서 찾아보기 힘든 편이다. 또한 유체해석만 수행한 경우 맥동에 의한 구조체의 진동(구조체의 진동에 의한 연료레일 내의 유체 압력의 변화)이 고려되지 않으므로 유체-구조 상호작용이 고려되는 경우에 좀 더 정확한 해석 결과가 예상되는 특성이 있다.

따라서, 본 연구에서는 상용 유한요소 해석프로그램인 ADINA(Ver.8.3)를 활용하여 이러한 연료레일의 복잡한 맥동 현상을 유체-구조 상호작용

(Fluid-Structure Interaction, FSI) 효과를 고려하여 수행하였다. 또한 강체 연료레일 모델에 대한 맥동 해석과 유체-구조 상호작용을 고려한 해석결과를 비교하였으며, 연료레일의 단면형상과 가로세로비 변화에 따른 맥동저감 효과를 고찰하였다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 유체 지배방정식

유동해석을 위한 지배 방정식은 다음과 같이 Navier-Stocks 방정식을 ALE (Arbitrary Lagrangian-Eulerian) 좌표계에서  $\partial V$ 로 둘러싸인 임의의 부피  $V$ 의 적분 형태로 나타낼 수 있다[2].

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \bar{U} dV + \int_{\partial V} [(\bar{v} - \bar{w})\bar{U} - \bar{G}] \cdot d\bar{S} = \int_V \bar{R} dV \quad (1)$$

위 식의 변수는 다음과 같이 정의된다.

$$\bar{U} = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho \bar{v} \\ \rho E \\ \rho \phi \\ 0 \end{bmatrix} \quad G = \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{\tau} \\ \bar{\tau} \cdot \bar{v} + k \bar{\nabla} \theta \\ d_\phi \bar{\nabla} \phi \\ d_\psi \bar{\nabla} \psi \end{bmatrix} \quad R = \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{f}^B \\ \bar{f}^B \cdot \bar{v} + q^B \\ S_\phi \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서  $\bar{\tau}$ 는 stress tensor로 다음과 같이 정의된다.

$$\bar{\tau} = -p\bar{I} + 2\mu\bar{e} + \lambda\bar{\nabla} \cdot \bar{v}\bar{I} \quad (3)$$

위 식에서  $\bar{e}$ 는 strain tensor로 다음과 같다.

† 책임저자; 에이블맥스㈜

E-mail : tech@ablemax.co.kr

Tel : (02) 539-5212, Fax : (02) 539-5213

\* 국립경상대학교, 기계항공공학부 및 항공기부품기술 연구소

\*\* 에이블맥스㈜

$$\bar{e} = [\bar{\nabla}\bar{v} + (\bar{\nabla}\bar{v})^T] / 2 \quad (4)$$

여기서,  $\bar{v}$ 는 속도벡터,  $\bar{w}$ 는 이동격자(moving mesh)의 속도벡터,  $p$ 는 압력,  $\rho$ 는 밀도,  $E(=\bar{v}\cdot\bar{v}/2+e)$ 는 비에너지(specific energy),  $e$ 는 내부 에너지,  $\theta$ 는 온도,  $\mu$ 는 동역학적 점성계수,  $\lambda$ 는 2차 점성계수,  $\bar{f}^B$ 는 유체 체적력(body force),  $k$ 는 열전도율,  $q^B$ 는 비열,  $\varphi$ 는 대류-확산 방정식( $d_\varphi$ 와  $S_\varphi$ 는 각각 확산 계수와 Source term)의 변수, 그리고  $\psi$ 는 Laplace 방정식( $d_\psi$ 는 확산 계수)의 변수를 나타낸다.

유체의 특성은 밀도, 압력, 그리고 온도에 따라 변하기 때문에 비압축성유체와 압축성유체로 분류되는데, 압축성유체의 경우 slightly compressible flows와 fully compressible flow로 나뉜다. 비압축성유체(incompressible flows)는 밀도가 일정하다고 가정하고 Slightly compressible flows의 경우에는  $\rho = \rho_0(1+p/\kappa)$ 로 정의된다. 여기서  $\kappa$ 는 유체의 체적탄성계수,  $\rho_0$ 는  $p=0$ 에서의 밀도이다. Fully compressible flows의 경우에는 기체방정식이 적용되며, 압력은  $p = (C_p - C_v)\rho\theta$ 로 정의된다. 여기서  $C_p$ 와  $C_v$ 는 각각 정압비열(specific heat at constant pressure)과 정적비열(specific heat at constant volume)이다.

## 2.2 유체-구조 연성(Fluid-Structure Interaction)

ADINA에서 유체와 구조는 interface를 통해 동시에 해석될 수 있으며 모든 물리량이 한 격자에서 다른 형태의 격자로 사상(mapping)될 수 있기 때문에 유체와 구조 모델에서 요소(element) 크기나 형태를 다양하게 사용할 수 있다.

### 2.2.1 Mapping operators

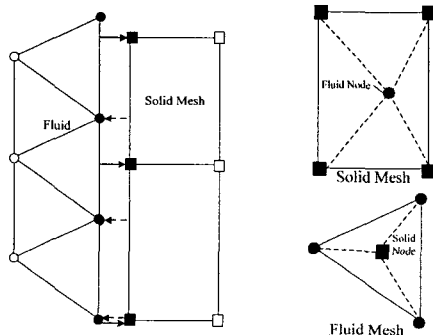


Fig. 1 Mapping concept between fluid and structure meshes.

$N_f$ 와  $N_s$ 를 유체 node와 구조 node로 정의하고  $f$ 와  $s$ 를 각각 node에서 정의된 물리적 양이라고 할 때 mapping operator는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$M_{sf} : \{f_i | i \in N_f\} \rightarrow \{\hat{f}_j | j \in N_s\} \quad (5)$$

$$M_{fs} : \{s_j | j \in N_s\} \rightarrow \{\hat{s}_i | i \in N_f\} \quad (6)$$

여기서  $\hat{f}$ 와  $\hat{s}$ 는 보정된 값을 의미한다. Mapping operator는 original mesh에서 fast alternating digital tree algorithm을 사용하여 형성되며 유체와 구조의 격자가 다르기 때문에  $M_{fs}$ 와  $M_{sf}^{-1}$ 는 같지 않다.

### 2.2.2 Mechanical Coupling on Interface

유체-구조 상호작용을 고려한 연계해석에 있어 가장 중요한 요소는 경계면(interface) 조건의 정의 방법으로 유체-구조 경계면(fluid-structure interface)에서 traction equilibrium과 displacement compatibility의 조건이 만족되도록 설정되어야 한다.

Traction equilibrium은 유체와 구조의 stress가 interface의 수직방향을 따라 동일함을 의미하며 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\bar{t}_f \cdot \bar{n} = \bar{t}_s \cdot \bar{n} \quad (t, \bar{x}) \in (0, T] \times S \quad (7)$$

여기서,  $\bar{n}$ 은 유체-구조 경계면에 대한 수직방향 단위벡터를 의미한다.

Displacement compatibility는 경계면(interface)을 따라 유체와 구조의 변위가 동일함을 의미하며 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$d_f = d_s \quad (t, \bar{x}) \in (0, T] \times S \quad (8)$$

### 2.2.3 Solution Procedure

본 연구에서의 유체-구조 연계(coupling) 전산해석은 전산유체역학 기법과 유한요소법을 동시에 활용하여 Fig. 2와 같은 과정으로 수행되게 된다. 그림을 보면 유동해석을 통해 구조에 가해지는 하중을 구한 후 이를 바탕으로 구조해석을 수행한다. 구조해석을 통해 변형된 형상이 구해지면 이에 대한 유동해석을 다시 수행하기 위해 변형된 형상을 반영하여 변형된 격자를 재생성하고 유동해석을 다시 수행하는 과정을 반복적으로 거치게 된다.

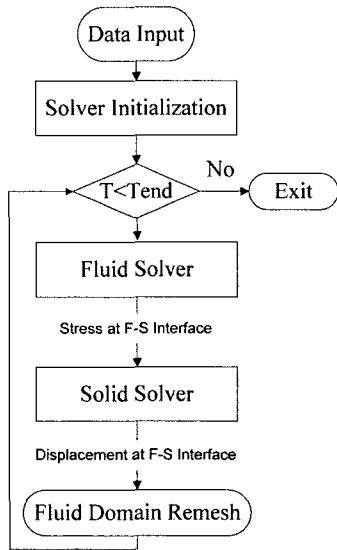


Fig 2. Computational road map for FSI analysis.

### 3. 해석결과 및 검토

#### 3.1 연료레일(fuel rail) 모델설명

본 연구에서는 Fig 3과 같이 4개의 injector를 가지는 연료레일 모델에 대한 해석을 수행하였으며, 유체압력 초기조건은 입구부분에서 실험으로 측정된 값을 적용하였다.

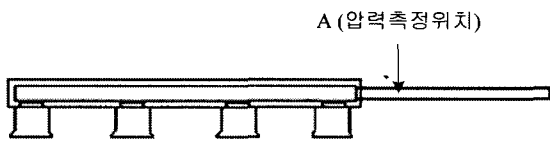


Fig. 3 Fuel rail model with 4 injector valves.

유동해석을 위해 연료는 slightly compressible fluid로 가정하였으며, 350kPa의 압력이 입구에서 경계조건으로 적용되었다. 연료레일 구조는 low-carbon steel로 구성되었으며, Fig 4와 같이 정사각형과 직사각형 단면형상을 가지는 연료레일 모델들이 고려되었다.

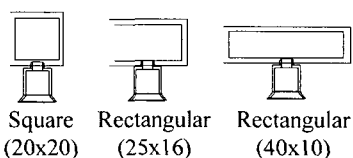
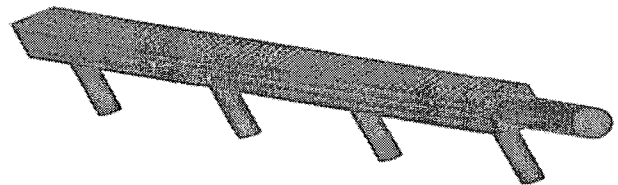
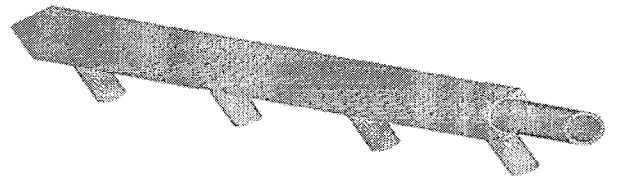


Fig. 4 Various cross sections of fuel rail models (unit: mm)

전산유체 모델과 유한요소 구조모델은 모두 4-절점 tetrahedral element가 적용되었으며 정사각형 단면 모델의 경우 131,479개의 유체 element와 82,063개의 구조 element가 사용되었다. 유동해석을 위한 injector의 opening/closing 경계조건은 ADINA의 time function을 통해 효과적으로 부가하였다. 연료레일의 연소 사이클(combustion cycle)은 43 milliseconds, 각 injector의 opening time length는 5.4 milliseconds로 가정하였다.



(a) CFD grid

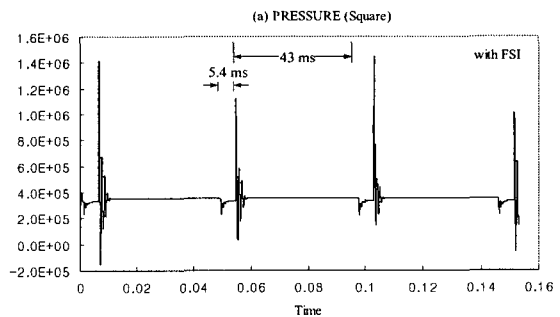


(b) FEM mesh

Fig. 5 Computational CFD grid and FEM mesh

#### 3.2 전산해석 결과

Figs. 6~7은 각각 정사각형 단면 형태의 모델을 가지고 유체-구조 상호작용 해석과 유체해석만을 수행한 결과이다. 유체해석의 경우 맥동이 유체-구조 상호작용해석의 경우보다 크게 측정될 것이라 예상되었는데, 예상과는 반대로 유체해석의 경우 맥동이 약 50% 정도 작게 측정되었다. 그 이유는 연료레일의 진동이 유체압력의 맥동에 영향을 주어 증폭된 것으로 생각된다.



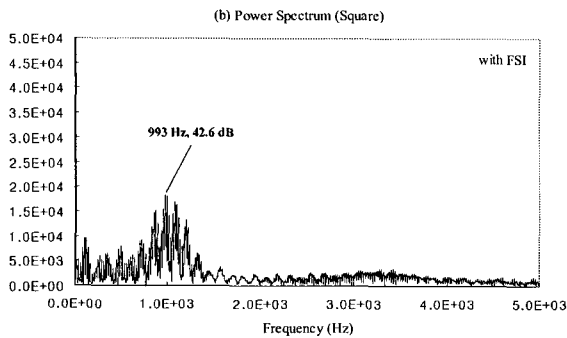


Fig. 6 Computational results for the model with perfect square cross section (with FSI)

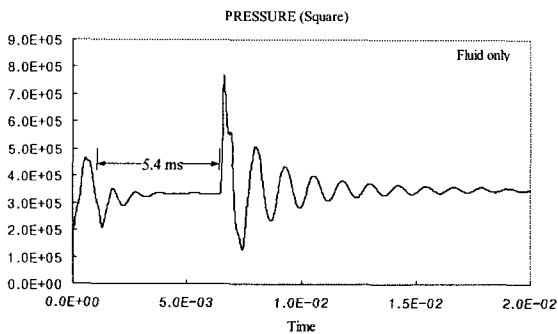


Fig. 7 Computational result for the model with perfect square cross section (Fluid only)

Fig. 8 (a)과 (b)는 직사각형의 Cross section(40x10)을 가진 연료레일의 변위와 연료의 압력을 측정한 것으로 유체압력 변화에 의해 연료레일이 진동함을 알 수 있으며 정사각형의 모델에 비해 맥동이 약 62%까지 감소함을 보였다.

Fig. 9는 연료레일의 단면형태를 가지고 압력 맥동을 비교한 것으로 가로세로비가 큰 직사각형의 경우에 맥동이 가장 크게 감소되었다.

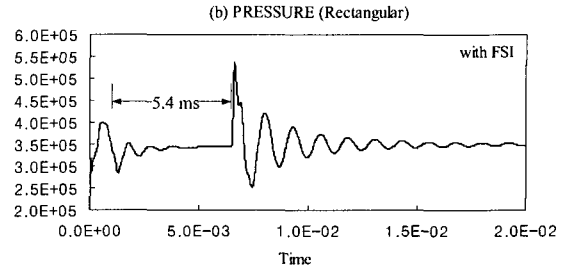
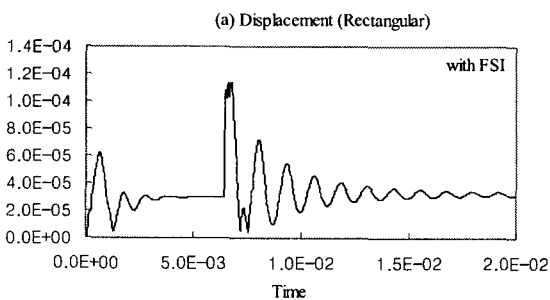


Fig. 8 Computational results for the model with rectangular cross section (40x10)

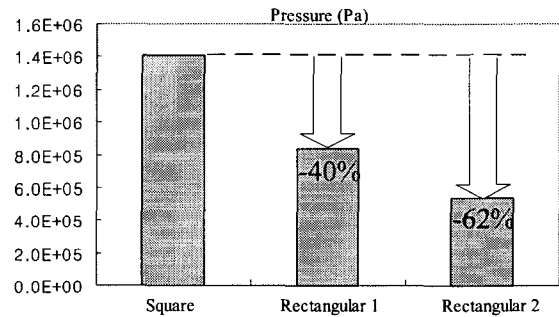


Fig. 9 Pulsation damping for different cross section

#### 4. 결론

연료레일 내에서 수격현상에 의해 발생하는 압력의 맥동을 측정하기 위해 유체-구조 상호작용 해석이 수행되었다. 또한 유체-구조 상호작용 해석의 효과를 보이기 위해 유체해석만을 수행한 경우와 결과를 비교하였다. 유체해석만 이루어진 경우 유체의 압력 변화에 따른 구조체의 진동효과가 반영되지 않아 맥동압력이 상대적으로 낮게 계산됨을 알 수 있었다. 다른 형태의 연료레일에 대한 해석을 수행한 결과 직사각형 단면의 연료레일이 정사각형 단면의 연료레일에 비해 맥동이 현저히 감소하였으며, 기존 Mizuno 등의 실험과 유사하게 가로세로비가 클수록 맥동 현상이 크게 감소됨을 정밀한 전산해석을 통해 확인하였다.

#### 참고문헌

- (1) Kazuteru Mizuno, Shoichiro Usui, Izumi Imura, Tetsuo Ogata, Hikari Tsuchiya and Yoshiyuki Serizawa, 2002, "Fuel Rail with Integrated Damping Effect", SAE 2002 World Congress 2002-01-0853.
- (2) Hou Zhang et al., 2003, "Recent Development of Fluid-Structure Interaction Capabilities in the ADINA System, Computers and Structures, 81: