

## 발전소 배관지지용 유압완충기의 동특성 모델링 해석

이재천\*(계명대학교 기계자동차공학부), 황태영\*(한국기계연구원 산업기술연구부)

### Modeling and Analysis of the Dynamic Characteristics of Pipe Supporting Hydraulic Snubber in Electric Power Plant

Jae-Cheon Lee(Faculty Mech./Auto. Eng., KMU), Tae-Young Hwang(Indust. Tech. Dept., KIMM)

#### ABSTRACT

This paper presents the modeling and analysis of dynamic characteristics of hydraulic snubber in electric power plant. The nonlinear state equations of 9th order to describe the dynamics of the snubber was established by Simulink. The simulation results show that the hydraulic snubber reacts as like the conventional shock absorbers to the high pulse shock load. The snubber also shows the peculiar characteristics to the small step load, which are temporary locking displacements of control valves and same steady-state pressures of all internal chambers in the snubber.

**Key Words** : Hydraulic Snubber (유압완충기), Carbon fiber (탄소섬유), Cutting force (절삭력), Carbon fiber (탄소섬유), Cutting force (절삭력)

#### Nomenclature

$A_p, A_r, A_c, A_e$  각각 실린더피스톤 면적, 피스톤로드 면적, 제어밸브 압력면적, 외부 피스톤 압력면적

$C_d$  : 오리피스 유량계수

$K_e, K_c, K_c^*$  : 각각 외부피스톤 스프링 상수, 피스톤 제어밸브 스프링 상수, 실린더 하단 피스톤 스프링 상수

$L$  : 우회유로 길이

$L_r, L_r^*$  : 각각 피스톤제어밸브 오리피스 원주길이 및 실린더하단 오리피스 원주길이

$V_o, V_o^*, V_c, V_b$  : 각각 실린더 피스톤 상단 체적, 하단 체적, 피스톤 제어밸브 내부 체적, 외부 저유기 체적

$P_i, i=1, \dots, 4$  : Shock-Absorber 각 내부 압력

$b, b_i$  : 제어밸브 및 실린더 피스톤( $i=1$ ), 외부 피스톤( $i=2$ )의 점성계수

$d$  : 우회유로 동가 직경

$f$  : 외력

$m_i$  : 실린더 피스톤( $i=1$ ), 제어밸브( $i=2$ ), 외부 피스톤( $i=3$ )의 질량

$x_i$  : 실린더 피스톤( $i=1$ ), 제어밸브들( $i=2,3,4$ ), 외부 피스톤( $i=5$ )의 이동거리

$x_o$  : 제어밸브 오프셋 간극

$\beta$  : 체적 탄성계수

$\mu$  : 절대점도

#### 1. 서론

발전소 배관지지용 완충기는 일반 산업용 충격흡수기(Shock Absorber)와 달리 다음과 같은 조건을 만족해야 한다. 첫째, 발전소의 가동 및 정지에 따른 배관의 열 변형과 같이 점진적인 작은 변위는 완전히 완충기에 흡수되어 배관이 구속되지 않아야 한다. 즉, 배관 위치의 변동에도 불구하고 완충기는 무부하 상태로 복귀하여야 한다. 둘째, 지진과 같은 급격한 동하중이 작용할 경우에는 일반 산업용 충격흡

수기와 같이 하중을 지지부에 전달하고 배관계의 진동을 감쇄할 수 있어야 한다.

발전소 배관지지용 완충기는 기계식과 유압식으로 나뉘며, 유압식의 초기 문제점이었던 밀봉재의 부실과 유압유의 누설문제<sup>1,2)</sup> 등이 고품질 밀봉재의 개발로 해결됨에 따라 최근에는 유압식 완충기가 보편화되고 있다.

그러나 국내 발전소에 설치되는 유압완충기는 대부분 수입품으로서 국산화가 시급한 실정이다. 그동안 유압완충기의 핵심부품인 제어밸브의 기본설계를 위한 정적 해석은 수행된 바 있으나<sup>4)</sup>, 전체 시스템 설계를 위해 필수적인 유압완충기의 동특성 해석에 대한 연구는 진행된 바 없다. 이에, 본 연구에서는 발전소 배관지지용 유압완충기의 동특성을 모델링하고 해석하고자 한다.

## 2. 유압완충기의 구조

Fig. 1과 Fig. 2는 발전소 배관지지용 유압완충기의 개략적인 구조를 보여준다.

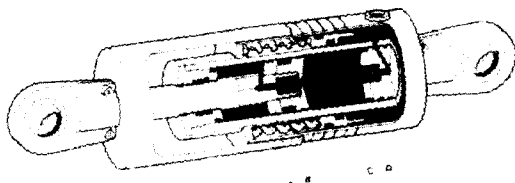


Fig. 1 Internal view of the snubber

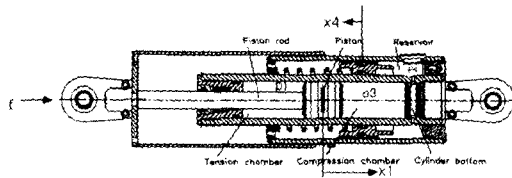
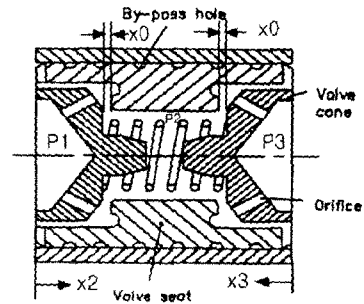


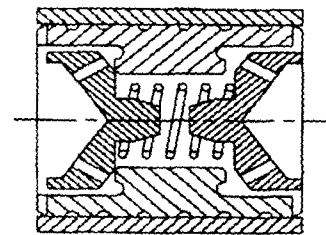
Fig. 2 Section view of the snubber

Fig. 1과 Fig. 2에서 보듯이 유압완충기는 압축실(compression chamber), 인장실(tension chamber), 저유기(oil reservoir)의 3개의 오일 저장조와 실린더 내측 피스톤, 저유기 상단 스프링과 접촉하는 외부 피스톤 및 제어 밸브들로 구성된다<sup>5)</sup>. Fig. 3과 Fig. 4에서 보듯이, 오리피스를 지닌 밸브콘(valve cone) 형상의 제어밸브는 스프링에 지지되어, 실린더 내부와 실린더 하단에 설치되어 있다. 발전소의 가동 및 정지에 따른 배관의 열 변형과 같이 점진적으

로 변형이 일어 날 경우에는 밸브콘 전후에서의 압력 차이가 작기 때문에 Fig. 2(a), Fig. 3의 언록업(Un Lock-Up) 상황과 같이 제어밸브가 유지되며, 유압유는 밸브콘의 오리피스와 밸브콘과 밸브시트(valve seat) 사이의 간극을 통해 저유기로 유동하므로 완충기는 배관의 변형 속도와 동일하게 운동한다. 또한 지진과 같은 급작스런 충격에는 급속한 배관 변형속도로 인해 각 실간에 큰 차압이 발생하고 제어밸브는 록업된다. 제어밸브가 록업되면 오리피스와 간극으로의 유로는 차단되며 완충기는 산업용 충격흡수기와 유사한 기능을 발휘한다. 또한, 충격 정지 후, 유압유 저장고 간에는 제어밸브시트 외벽에 설치한 우회회로(by-pass)를 통해 차압유가 흘러, 시간이 지남에 따라 동일한 압력을 유지하게 된다.



(a) Unlock-up condition



(b) Lock-up condition

Fig. 3 Control valve in a piston

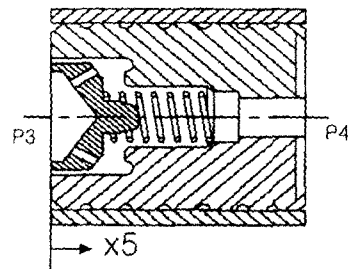


Fig. 4 Control valve at cylinder bottom in unlock-up condition

### 3. 동역학 모델링

Fig. 1 ~ Fig. 4의 유압완충기의 동역학을 모델링하면 아래 식과 같다.

$$m_1 \ddot{x}_1 + b_1 \dot{x}_1 - P_1 (A_p - A_r) - P_c A_p = f(t) \quad (1)$$

$$m_2 \ddot{x}_2 = (P_1 - P_2) A_c - b \dot{x}_2 - K_c (x_2 + x_3) \quad (2)$$

$$m_2 \ddot{x}_3 = (P_3 - P_2) A_c - b \dot{x}_3 - K_c (x_2 + x_3) \quad (3)$$

$$m_3 \ddot{x}_4 + b_2 \dot{x}_4 - P_4 A_e + K_e x_4 = 0 \quad (4)$$

$$m_2 \ddot{x}_5 = A_c (P_3 - P_4) - b \dot{x}_5 - K_c x_5 \quad (5)$$

$$\frac{V_o}{\beta} \frac{dP_1}{dt} + (A_p - A_r) \dot{x}_1 = \quad (6)$$

$$\frac{\pi d^4}{128 \mu L} (P_3 - P_1) - \text{sgn}(P_2 - P_1) C_d x_2 L_r \sqrt{\frac{2}{\rho} |P_2 - P_1|}$$

$$\frac{V_o^*}{\beta} \frac{dP_3}{dt} + A_p \dot{x}_1 = \quad (7)$$

$$\frac{\pi d^4}{128 \mu L} (P_1 - P_3)$$

$$- \text{sgn}(P_3 - P_4) C_d x_5 L_r \sqrt{\frac{2}{\rho} |P_3 - P_4|}$$

$$- \text{sgn}(P_3 - P_2) C_d x_3 L_r \sqrt{\frac{2}{\rho} |P_3 - P_2|}$$

$$\frac{V_c}{\beta} \frac{dP_2}{dt} = \quad (8)$$

$$\text{sgn}(P_1 - P_2) C_d x_2 L_r \sqrt{\frac{2}{\rho} |P_1 - P_2|}$$

$$+ \text{sgn}(P_3 - P_2) C_d x_3 L_r \sqrt{\frac{2}{\rho} |P_3 - P_2|}$$

$$+ A_c (\dot{x}_2 + \dot{x}_3)$$

$$\frac{V_e}{\beta} \frac{dP_4}{dt} + A_e \dot{x}_4 = \quad (9)$$

$$\text{sgn}(P_3 - P_4) C_d x_5 L_r \sqrt{\frac{2}{\rho} |P_3 - P_4|}$$

식(2),(3),(5)에서  $x_o \geq x_2, x_5 \geq 0$  이다.

유압완충기의 동특성 모델링을 위해 Newton의

제 2법칙, 유량보존의 법칙, 등은 체적탄성계수 관련 식, 오리피스 유량 모델 및 관로 유량 모델 등이 이용되었다. 특히 Fig. 3, 4에 표시된 밸브시트 외벽에 설치한 나선형의 우회유로 통과유량은 Hagen-Poiseuille의 식으로 나타내었다. 각종 매개변수들의 대표적인 값들은 아래와 같다.

$$m_1 = 0.5 \text{ kg}_m \quad b_1 = 20 \text{ N} \cdot \text{sec}/\text{m}$$

$$A_p = 0.0024 \text{ m}^2 \quad A_r = 0.0007 \text{ m}^2$$

$$d = 1.26 \times 10^{-3} \text{ m} \quad \mu = 0.00484 \text{ N} \cdot \text{sec}/\text{m}^2$$

$$L = 0.223 \text{ m} \quad \beta = 3.4 \times 10^4 \text{ bar}, \quad C_d = 0.61$$

$$V_o = 1.7 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \quad V_e = 0.0001 \text{ m}^3$$

$$L_r = 0.1 \text{ m}, \quad \rho = 970 \text{ kg}_m/\text{m}^3$$

$$m_2 = 0.005 \text{ kg}_m \quad A_c = 0.0002 \text{ m}^2$$

$$K_c = 16800 \text{ N}/\text{m} \quad V_c = 1.2 \times 10^{-5} \text{ m}^3$$

$$V_o^* = 2.4 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \quad A_b = 0.00015 \text{ m}^2$$

$$x_o = 5.4 \times 10^{-3} \text{ mm} \quad m_3 = 1 \text{ kg}_m$$

$$b_2 = 40 \text{ N} \cdot \text{sec}/\text{m} \quad K_e = 2.1 \times 10^5 \text{ N}/\text{m}$$

$$A_e = 0.004 \text{ m}^2$$

상기 식(1)-(9)를 블록선도와 Simulink로 모델링하면 각각 Fig. 5와 Fig. 6과 같다.

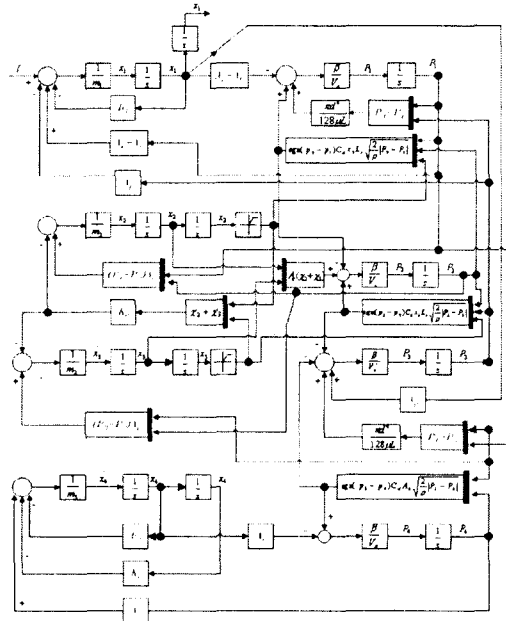


Fig. 5 Block diagram of the snubber's dynamics

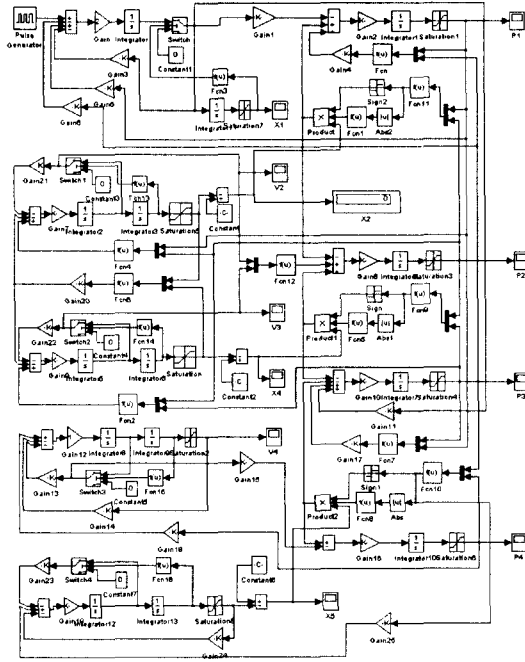


Fig. 6 Simlink modeling of the snubber's dynamics

#### 4. 시뮬레이션 및 검토

아래 Fig. 7은 0.5초부터 시작하여 주기 1초, 50% 펄스 폭의 2kN 충격력을 유압완충기에 가했을 때 완충기의 각종 변수들의 시간계 응답특성을 보여준다.

Fig. 7(a),(b),(c)에서 보듯이 첫 사이클 충격에서 피스톤 내부의 아랫방향 제어밸브는 록업되어 전 사이클간 록업상태를 유지한다. 그리고 실린더 하단의 제어밸브는 첫 사이클 충격에 의해 일시 록업되나 스프링력에 의해 언록업 상태로 복귀하며, 록업 기간 중 형성된 압축실의 압유는 저유기로 빠져나가 지

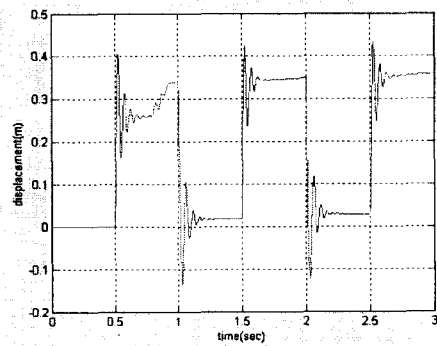


Fig. 7(a) Piston displacement (  $x_1$  )

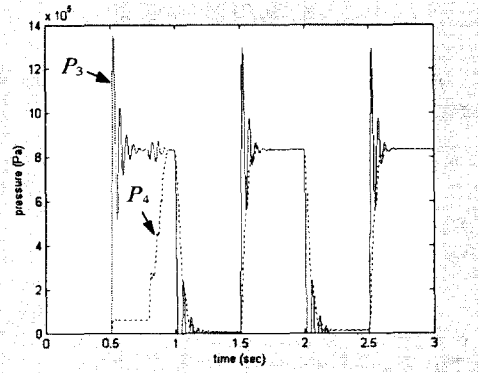


Fig. 7(b) Pressures in chambers

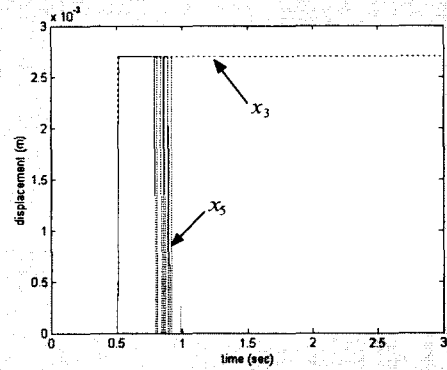


Fig. 7(c) Displacements of control valves

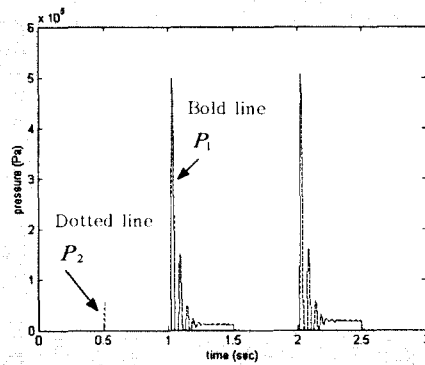


Fig. 7(d) Pressures in chambers

Fig. 7 Dynamic responses on shock pulses

유기 상단의 스프링 압축력에 의해 압축실 압력과 평형을 이룬다. 또한 Fig. 7(d)에서 보듯이 충격 펄스 릴리스 주기에는 압축실 압유의 반발력에 의해 인장실과 제어밸브실에 압력이 형성됨을 보여준다.

또한 아래 Fig. 8은 작은 외력에 대한 유압완충기의 점진적인 변화를 보기 위해 500N의 계단형 입력이 1초에 가해졌을 때의 각종 변수들의 시간계 응답 특성을 보여준다. 그림에서 보듯이 작은 부하에는 제어밸브가 일시적으로 록업될 뿐이며, 저유실과 제어밸브 내부의 압력이 동일한 정상상태 압력을 유지함을 알 수 있다.

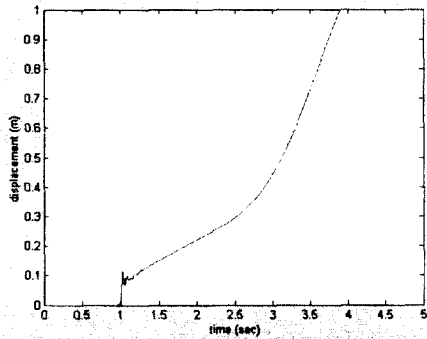


Fig. 8(a) Piston displacement ( $x_1$ )

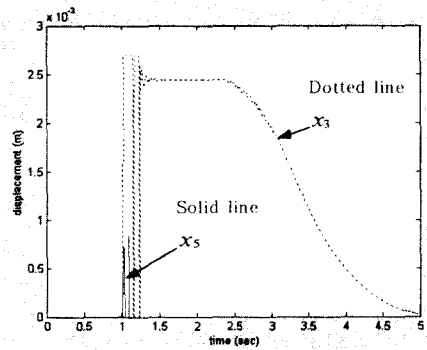


Fig. 8(b) Control valve displacements

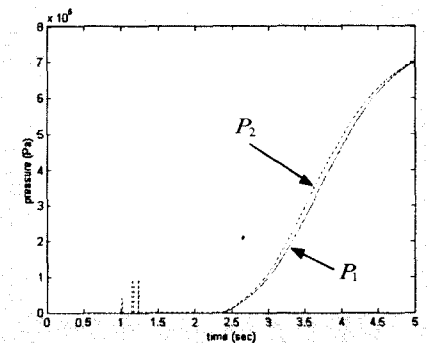


Fig. 8(c) Pressures in the chambers

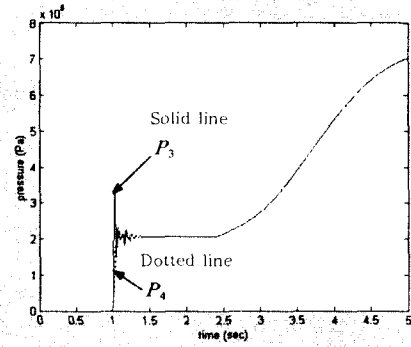


Fig. 8(d) Pressures in the chambers

Fig. 7 Dynamic responses on small load

## 5. 결론

본 연구에서는 발전소 배관지지용 유압완충기의 동특성을 Simulink로 모델링하여 주요 성능을 확인하였다. 본 모델은 향후 실제 유압완충기의 제원 및 실험을 통한 미확인 매개변수 값의 적용으로 유압완충기의 설계에 응용이 기대된다.

## 후기

본 연구는 과학기술부, 한국과학재단 지정 계명대학교 지공해자동차부품기술개발센터의 지원에 의한 것입니다.

## 참고문헌

1. ASME, Operation and Maintenance of Nuclear Power Plant, ASME/ANSI OM-1987 Part 4, Examination and Performance Testing of Nuclear Power Plant Dynamic Restraints (Snubber), 1987.
2. Brown, D. P. et al., Results of LWR Snubber Aging Research, NRC Final Report. RP3182-1, 1992.
3. Nitzel, M. E. et al., Dynamic Qualification and Testing of Large Bore Hydraulic Snubber, NRC Final Report No. A6837, 1992.
4. 박태조 외, "발전소 배관지지용 유압완충기 개발", 연구보고서, 경상대학교, pp. 232-238, 2000.
5. Snubber Maker's Catalogue.