

# 원자로 해체 작업용 고하중 매니플레이터의 유압서보시스템 위치 제어

김명호\*, 김창희, 신호철, 박종원, 최병선, 문제권  
 한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 989번길 111  
 \*mhkim1021@kaeri.re.kr

## 1. 서론

원자로 해체 시에 고하중의 복잡한 구조와 고방사화로 인하여 로봇 매니플레이터 사용이 필수적인 요소이다. 또한 고하중을 취급하는데 유리한 유압서보시스템을 매니플레이터에 도입하는 것이 유리하다. 하지만 유압서보시스템은 복잡한 구조로 구성되어 있고 불확실한 특성이 많이 존재하여 전기 시스템에 비하여 모델링 및 제어가 용이하지 않다. 본 논문에서는 유압시스템을 이용하는 원자로 해체용 고하중 매니플레이터의 원활한 조작을 위하여 유압서보시스템을 모델링하고 위치제어기법에 대한 연구를 수행하였다.

## 2. 본론

### 2.1 고하중 매니플레이터

원자로 해체과정에 적용될 유압시스템 기반의 매니플레이터는 Fig. 1과 같다. 5개의 회전조인트와 1개의 직선이동조인트로 구성되어 있고 6축 모두 유압모터를 사용하도록 설계되었다.

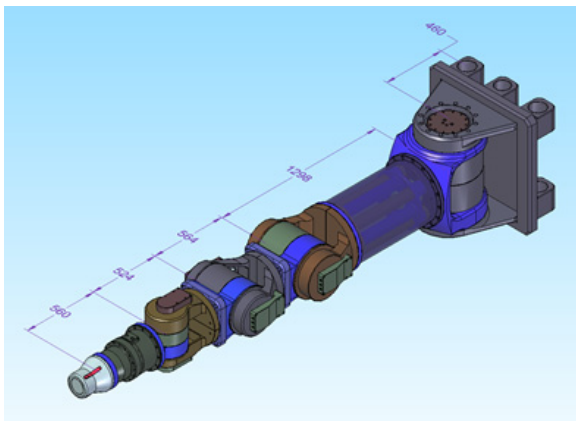


Fig. 1. Hydraulic manipulator.

### 2.2 유압서보시스템 모델링

본 연구에서 사용된 유압서보시스템은 Fig. 2와 같이 노즐-플래퍼 방식 서보 밸브, 기어 방식 유압모터 및 부하, 센서 및 제어기 등으로 구성되어 있다.

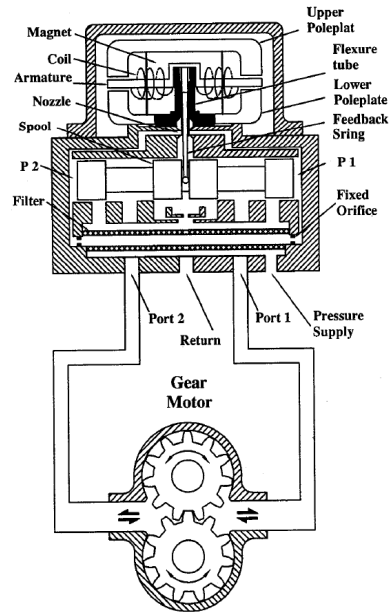


Fig. 2. Configuration of hydraulic servo system.

모델링에 필요한 파라미터들을 정리하면 Table 1과 같다.

Table 1. Hydraulic servo system parameter

기호	파라미터	값
$C_d$	밸브포트 유량계수	0.65
$w$	밸브포트 단면적 구배	0.0038[m]
$P_s$	유압펌프 공급압력	$21 \times 10^6$ [Pa]
$K_v$	밸브 변위-전류 계수	8.33[m/A]
$D_m$	모터 배제 용적	$3.3 \times 10^{-4}$ [m <sup>3</sup> /rad]
$V$	관로의 체적	$5.06707 \times 10^{-4}$ [m <sup>3</sup> ]
$J_t$	모터 및 부하의 관성	$2 \times 10^{-1}$ [kg·m <sup>2</sup> ]
$B_m$	모터 점성 감쇄 계수	0.035
$G_m$	모터 비틀림 상수	0
$\beta_e$	작동유의 체적탄성계수	$10342 \times 10^5$ [Pa]
$\rho$	작동유의 밀도	$0.871 \times 10^{-3}$ [kg/m <sup>3</sup> ]
$T_f$	마찰 토크	1.96[N·m]

밸브의 스펴변위  $x_v$ 에 따른 부하유량  $Q_L$ 을 베르누이 방정식을 이용하여 선형화 하면 식(1)과 같이 유도된다[1]. 여기서  $K_q$ 는 유량이득,  $K_c$ 는 유량-압력계수,  $P_L$ 은 부하에 걸리는 압력이다.

$$Q_L = K_q x_v - K_c P_L \quad (1)$$

서보 증폭기로부터 공급되는 입력전류  $i$ 와 스플 변위  $x_v$ 사이의 방정식은 식(2)와 같다.

$$x_v = K_v i \quad (2)$$

또한 유압모터에 유량의 연속방정식을 적용하여 부하유량  $Q_L$ 에 대해 정리하면 식(3)과 같다. 여기서  $\theta_m$ 은 모터의 회전각도,  $C_{tm}$ 은 모터의 총 누설 계수를 의미한다.

$$Q_L = D_m \dot{\theta}_m + C_{tm} P_L + (1/2)(V/\beta_e) \dot{P}_L \quad (3)$$

또한 부하의 운동방정식을 유도하면 식(4)와 같다.

$$D_m \ddot{P}_L = J_t \ddot{\theta}_m + B_m \dot{\theta}_m + G_m \theta_m + T_f \quad (4)$$

부하의 회전 각도와 제어밸브의 관계식을 구하기 위하여 식(1)~(4)를 연립하여 정리하면 식(5)와 같은 이계 상미분 방정식으로 표현된다.

$$M \ddot{\theta}_m + C \dot{\theta}_m + K \theta_m + d = u \quad (5)$$

식(5)에서  $M, C, K, d, u$ 는 다음과 같이 정의된다. 여기서  $K_{ce} = K_c + C_{tm}$ 이다. 하지만  $C_{tm}$ 이  $K_c$ 에 비해서 매우 작으므로  $K_{ce} \approx K_c$ 가 된다.

$$\begin{aligned} M &= J_t K_{ce} / (D_m K_q K_v) \\ C &= (B_m K_{ce} / D_m + D_m) / (K_q K_v) \\ K &= G_m K_{ce} / (D_m K_q K_v) \\ d &= (T_f K_{ce} / D_m + (1/2) V \dot{P}_L / \beta_e) / (K_q K_v) \\ u &= i \end{aligned}$$

식(5)를 상태 방정식으로 표현하면 식(6)과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}_m \\ \ddot{\theta}_m \\ \dot{P}_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -K/M & -C/M & 0 \\ 0 & -2D_m \beta_e / V - 2K_{ce} \beta_e / V \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_m \\ \dot{\theta}_m \\ P_L \end{bmatrix} \quad (6) \\ + \begin{bmatrix} 0 \\ 1/M \\ 2\beta_e K_q K_v / V \end{bmatrix} i + \begin{bmatrix} 0 \\ -d/M \\ 0 \end{bmatrix}$$

## 2.3 위치제어 시뮬레이션

식(6)의 상태 방정식을 이용하여 유압서보시스템의 위치제어 시뮬레이션을 수행 하였다. 제어는 PID제어 기법을 이용하였고 Fig.3에 시뮬레이션결과를 나타내었다. 시뮬레이션 결과 목표 위치(20도)를 잘 추종하는 것을 알 수 있다.

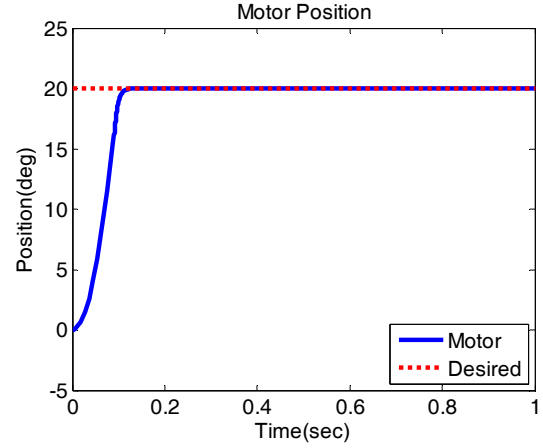


Fig. 3. Simulation of position control.

## 3. 결론

본 논문에서는 원자로 해체용 고하중 매니플레이터에 사용된 유압서보시스템의 위치제어에 대하여 연구하였다. 이를 위하여 유압서보시스템을 2계 상미분 방정식으로 수학적 모델링을 하였다. 또한 컴퓨터 시뮬레이션 결과 PID제어를 통하여 목표 위치를 잘 추종하여 위치제어가 잘 수행되는 것을 확인하였다.

추후 유압시스템의 불확실성을 처리할 수 있는 강건제어기법을 연구하여 고하중 6축 매니플레이터에 적용할 예정이다.

## 4. 감사의 글

본 연구는 미래창조과학부의 재원으로 시행하는 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

## 5. 참고문헌

- [1] 최형식, 김명훈, "전역슬라이딩모드 제어를 이용한 전기유압 시스템의 제어", 한국박용기관학회지, 제 27권 2호, 218~229, 2003.
- [2] 박용호, 박성환, "EHA 위치제어 시스템의 모델링 및 제어", 한국동력기계공학회지, 제 15권 2호, 69~77, 2011.