

# 객체지향 기법을 이용한 다관절 크레인의 유압 시스템 시뮬레이션

## Simulation of Knuckle Crane Hydraulic System Using Object Oriented Method

\*김문기, 심영보, 박철규 ( 서울대학교 대학원 기계설계학과 )

장명수( 수산중공업 기술연구소 )

이교일( 서울대학교 기계·기계설계·항공우주공학부 )

\*Moon Ki Kim, Young Bo Shim, Cheol Gyu Park

Dept. of Mechanical Design and Production Engineering, Graduate School, Seoul National University  
Myong Soo Jang

Soosan Heavy Industries Corp.

Kyo Il Lee

School of Mechanical and Aerospace Engineering Area, Seoul National University

### Abstract

It becomes more difficult to anticipate the performance of fluid power systems as the number of components increases because of nonlinearities inherent in hydraulic components. In this situation, the computer simulation technique can be an effective tool in the analysis and design of fluid power systems. In this paper, simulation results are presented for dynamic characteristics of a knuckle crane. Simple models for hydraulic components and relatively detailed motion equations for attachments are used. The simulation results are very close to those of experiments. The simulation is performed using a simulation package developed with object-oriented method. This package provides the environment that users can construct desired circuits from the component library, checks the continuity and compatibility conditions automatically and executes simulation.

Key words : fluid power systems, simulation, knuckle crane, object-oriented method

### 1. 서론

유압 시스템은 굴삭기를 비롯한 각종 건설기계의 구동장치, 자동차의 변속기나 현가 장치, 공작기계 등의 구동 및 제어장치로 사용되고 있으며 시스템의 성능에 중요한 영향을 미치는 요소이다. 또한 유압 시스템이 요구되는 기능을 수행하기 위해서는 유압 부품만이 아닌 기계, 전자 등 다양한 부품간의 상호 작용이 필수적이며, 따라서 유압시스템의 설계 및 해석을 위해서는 폭넓은 공학적 지식이 필요하게 된다.

이러한 유압시스템의 효율적 설계를 위해서 컴퓨터를 통한 시뮬레이션이 효과적인 수단으로써 활용되고 있다. 단 컴퓨터 시뮬레이션 역시 대상 유압시스템을 구성하는 모든 부품들을 모델링하고 그에 대한 시뮬레이션 시스템을 구축하는 데 많은 전문적 지식 및 시간을 요하는 작업이다. 이러한 이유로 사용자로부터 입력된 회로 구성 부품의 종류, 파라미터 및 부품간 연결상태 정보를 토대로 하여 시뮬레이션 모델을 자동으로 생성하고 이에 대한 결과를 체계적으

로 제시하여 줄 수 있는 범용 시뮬레이션 시스템의 개발이 중요한 과제로 인식되고 있다. 또한 이러한 시스템은 회로 정보의 변화에 따른 시뮬레이션 모델 변경 작업이 용이하도록 유연성을 제공함으로써 회로 설계 및 해석 과정의 효율성을 극대화할 수 있는 장점을 갖는다.

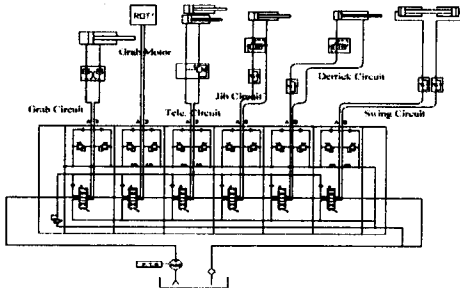
본 논문에서는 건설현장에서 많이 활용되고 있는 다관절 굴절식 크레인(Knuckle Crane)의 작업장치 및 제어 회로를 구성하는 부품들의 모델링을 수행한 후, 이 정보를 본 연구에서 개발된 범용 시뮬레이션 패키지인 IDEA.FP(Integrated Design & Engineering Assistant for Fluid Power)에 입력하여, 크레인 동작시의 동특성을 시뮬레이션하고 그 결과를 고찰한다.

### 2. 유압부품의 기능 및 모델링

다관절 크레인은 중량물의 이동에 사용되는 기계장치로 스윙, 데릭, 지브의 회전운동과 텔레스코프의 직선운동이 가능하다. 이러한 운동을 제어하기 위한

유압회로는 크게 유압펌프, 주제어밸브 및 유압실린더로 구성되며 여기에 동작의 특성에 따라 다양한 밸브가 더해진다. 스윙운동 유압회로에는 미터-인(meter-in) 방식으로 속도를 제어하는 유량제어밸브가 있고, 데릭과 지브운동 유압회로에는 유량제어밸브와 함께 자중에 의한 낙하를 방지하기 위한 Line rupture protection 밸브가 있다.

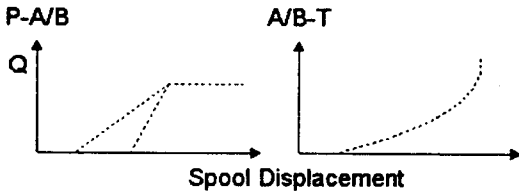
그림 2.1은 다관절 크레인의 유압회로도이다.



<그림 2.1> 다관절 크레인 유압회로도

### 2.1 주제어밸브(Main Control Valve)

Swing, derrick, jib, telescope, grab motion을 제어하는 주제어밸브는 6포트 3위치 방향제어밸브를 사용한다. 주제어밸브의 주 기능은 밸브 스펴의 위치에 따라 실린더의 운동방향을 제어하는 것이다. 그림 2.2은 주제어밸브인 6포트 3위치 방향제어밸브의 스펴변위-유량 선도를 나타낸 것이다.



<그림 2.2> 주제어밸브 특성곡선

주제어 밸브는 다음과 같은 유량방정식으로 모델링할 수 있다.

$$Q_a = Q_1 - Q_3, \quad Q_b = Q_2 - Q_4 \quad (2.1)$$

여기서

$$Q_1 = K_{P/A} \sqrt{|P_{supply} - P_{a1}|} \text{sign}(P_{supply} - P_{a1})$$

$$Q_2 = K_{P/B} \sqrt{|P_{supply} - P_{b1}|} \text{sign}(P_{supply} - P_{b1})$$

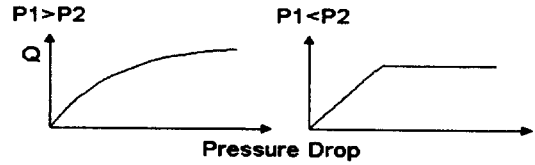
$$Q_3 = K_{A/T} \sqrt{|P_{a1} - P_{return}|} \text{sign}(P_{a1} - P_{return})$$

$$Q_4 = K_{B/T} \sqrt{|P_{b1} - P_{return}|} \text{sign}(P_{b1} - P_{return})$$

$K_{P/A}$ ,  $K_{P/B}$ ,  $K_{A/T}$ ,  $K_{B/T}$ 는 제어특성을 향상시키기 위하여 스펴변위에 따른 함수로써 표현된다.

### 2.2 유량제어밸브(Flow Control Valve)

유량제어밸브는 실린더에서 유출되는 유량을 제어함으로 해서 실린더의 속도를 조절하는 역할을 한다. 그림 2.3는 유량제어밸브의 유량-압력 선도이다.



<그림 2.3> 유량제어밸브 특성곡선

유량제어밸브의 모델은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$Q_{flow} = K_{1/2} \sqrt{|P_1 - P_2|} \text{sign}(P_1 - P_2)$$

$$\text{for } P_1 \geq P_2$$

$$= K_{2/1} \sqrt{|P_2 - P_1|} \text{sign}(P_1 - P_2)$$

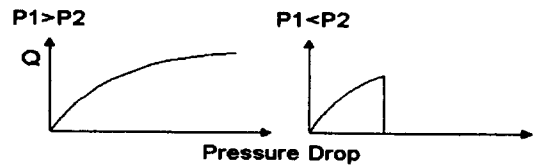
$$\text{for } P_{SET} \geq P_2 - P_1$$

$$= Q_{SET} \quad \text{for } P_{SET} < P_2 - P_1 \quad (2.2)$$

$K_{1/2}$ ,  $K_{2/1}$ 는 특성곡선에서 얻은 계수이다.

### 2.3 Line Rupture Protection 밸브

Line Rupture Protection 밸브는 실린더의 자중에 의한 하강을 막아주며, 실린더 하강시 과속을 방지한다. 그림 2.4은 Line Rupture Protection 밸브의 유량-압력 선도이다.



<그림 2.4> Line Rupture Protection 밸브

Line Rupture Protection 밸브는 다음과 같이 모델링할 수 있다.

$$Q_{rupture} = K_{1/2} \sqrt{|P_1 - P_2|} \text{sign}(P_1 - P_2)$$

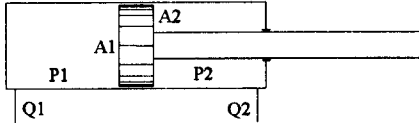
$$\text{for } P_1 \geq P_2$$

$$Q_{rupture} = K_{2/1} \sqrt{|P_1 - P_2|} \text{sign}(P_1 - P_2) \quad \text{for } P_2 - P_1 \leq P_{SET}$$

$$Q_{rupture} = 0 \quad \text{for } P_2 - P_1 > P_{SET} \quad (2.3)$$

$K_{1/2}$ ,  $K_{2/1}$  는 특성곡선에서 얻은 계수이다.

## 2.4 유압 실린더



<그림 2.5> 유압실린더

회로에 사용되는 유압실린더는 다음 식으로 모델링할 수 있다.

$$\frac{dP_1}{dt} = \frac{\beta_e}{V_1} (Q_1 - A_1 \dot{x}_p)$$

$$\frac{dP_2}{dt} = \frac{\beta_e}{V_2} (Q_2 + A_2 \dot{x}_p) \quad (2.4)$$

$$\text{여기서 } V_1 = V_{10} + A_1 x_p$$

$$V_2 = V_{20} - A_2 x_p$$

실린더의 변위  $x_p$  및 속도  $\dot{x}_p$  는 외부부하인 작업장치의 동력학에 의하여 결정되며, 유압실린더는 작업장치에 의하여 다음과 같은 구동력을 준다.

$$F_{hyd} = A_1 P_1 - A_2 P_2 - F_{fr} \quad (2.5)$$

여기서  $F_{fr}$  은 실린더에 작용하는 마찰력으로 점성 마찰, 쿨롱마찰, 및 스틱션을 고려하는 경우 다음과 같다.

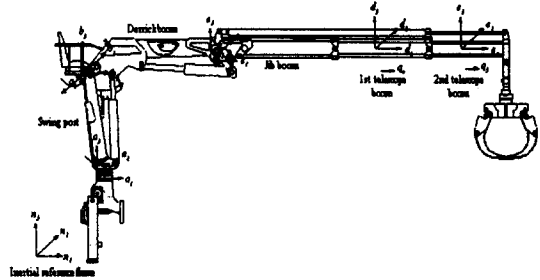
$$F_{fr} = B \dot{x}_p + F_{cl} \text{sign}(\dot{x}_p) + F_{ste}^{-\text{Cof}|\dot{x}_p|} \quad (2.6)$$

## 3. 다관절 크레인의 작업장치 동력학

### 3.1. 작업장치의 개요

다관절 크레인의 작업장치는 그림 3.1과 같이 스윙 포스트, 데릭 붐, 지브 붐, 2개의 텔레스코우프 붐으로 구성되며, 스윙(swing), 데릭(derrick), 지브(jib)의 회전운동과 텔레스코우프(telescope) 1·2단의 직선운동이 가능하다. 작업장치를 구성하는 각 붐들은 유압실린더에 의하여 구동된다.

작업장치에 비하여 유압실린더의 관성은 무시할 수 있으므로 모든 질량 및 관성 요소는 작업장치를 구성하는 각 붐에 집중된 것으로 가정하였다. 각 붐들은 관성 주축이 그림 3.1에 표시된 각 좌표계와 일치하는 사각 빔이라 가정하였다.



<그림 3.1> 크레인 작업장치 좌표계

각 유압실린더는 작업장치에 유압력을 작용하며, 작업장치의 각 붐은 유압력을 포함한 외력과 관성력의 평형으로 운동이 결정되고, 작업장치의 운동에 의하여 유압실린더의 변위 및 속도가 결정된다.

다물체 시스템(multibody system)의 동력학을 유도하는 방법으로는 Newton-Euler 및 Euler-Lagrange 방법이 있으나, Newton-Euler 방법은 시스템 내부에서 작용하는 구속력(constraint force)을 각 자유물체도에 대하여 구하여야 하는 단점이 있으며, Euler-Lagrange 방법은 다물체 시스템의 경우 각 물체의 운동에너지를 구하기가 쉽지 않다.

본 연구에서는 내부 구속력에 대한 고려 없이 일반화된 힘(generalized active forces)과 일반화된 관성력(generalized inertia forces)의 평형으로 동력학을 기술하는 Kane동력학을 이용하여 다관절 크레인의 운동방정식을 구하였다.

### 3.2 다관절 크레인의 동력학

다관절 크레인의 운동을 기술하기 위한 일반화된 좌표는 스윙, 데릭, 지브의 3개의 각운동과 텔레스코우프 1·2단의 운동을 기술하는 2개의 선형운동이 필요하며, 이를  $q_i$  ( $i = 1, \dots, 5$ )라 한다. 일반화된 좌표  $q_i$ 의 미분을 일반화된 속도(generalized speed),  $u_i$ 라 한다. 즉,

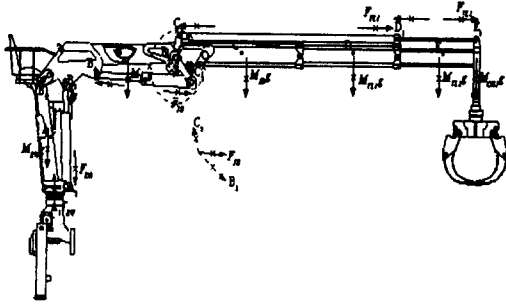
$$u_i = \dot{q}_i \quad (i = 1, \dots, 5) \quad (3.1)$$

물체의 각속도  $\omega$ 와 물체 상의 임의의 점 P의 속도  $v^F$ 는 일반화된 속도  $u_i$ 의 합으로 다음과 같이

표현할 수 있으며,  $\omega_r, v^r$  을 각각 편각속도 (partial angular velocity), 편속도 (partial velocity) 라 한다.

$$\omega = \sum_{r=1}^5 \omega_r u_r \quad (3.2)$$

$$v^r = \sum_{r=1}^5 v_r^r u_r \quad (3.3)$$



<그림 3.2> 작업장치에 작용하는 외력

그림 3.2와 같이 스윙 포스트, 데릭 붐, 지브 붐, 및 텔레스코우프 1·2단 붐을 각각 A, B, C, D, E로 표기하고 각 붐의 각속도를  $\omega_A, \omega_B, \omega_C, \omega_D, \omega_E$  라 표현한다. 또한 붐의 질량중심의 속도를

$v_{AO}, v_{BO}, \dots$  등으로 표현한다. 그리고, 그림 3.2에 표현된 유압 실린더가 고정되어 유압력이 작용하는 점들 A2, B2, B3, B4, C2, C5, D1, E1의 속도를  $v_{A2}, v_{B2}, \dots$  등이라 한다. 작업장치에 작용하는 외력은 각 붐에 작용하는 유압력과 각 붐의 자중이며, 크레인이 잡고 있는 작업대상 물체도 집중 질량으로서 E1에 작용하는 힘으로 고려하였다.

크레인에 작용하는 일반화된 힘 (generalized active force)  $F_r (r = 1, \dots, 5)$ 은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$F_r = \sum_i F_i \cdot v_r^i + \sum_j T_j \cdot \omega^j \quad (3.4)$$

여기서

$F_i$ : i점에 작용하는 힘

$v_r^i$ : i점 속도의 r번째 편속도

$T_j$ : 물체 j에 작용하는 토크

$\omega^j$ : 물체 j의 각속도의 r번째 편각속도

작업장치의 일반화된 관성력 (generalized inertia force),  $F_r^*$ 는 다음과 같다.

$$F_r^* = - \sum_j M_j a^j \cdot v_r^j - \sum_j (I_j a^j + \omega^j \times I_j \omega^j) \cdot \omega^j \quad (3.5)$$

여기서

$M_j$ : 물체 j의 질량

$I_j$ : 물체 j의 질량관성 모멘트

$a^j$ : 물체 j의 질량중심의 가속도

$\omega^j$ : 물체 j의 각속도

$v_r^j$ : 물체 j 질량중심 속도의 r번째 편속도

식(3.4)와 (3.5)로부터 작업장치의 운동방정식은 다음식 (3.6)과 같다.

$$F_r + F_r^* = 0 \quad (r = 1, \dots, 5) \quad (3.6)$$

식(3.6)으로 표현되는 크레인 작업장치의 동역학식을 시뮬레이션에 사용하였으며, 이는 크레인 유압시스템에 부하로서 작용하는 실제 작업장치의 동력학의 영향을 반영한다.

## 4. 시뮬레이션 시스템

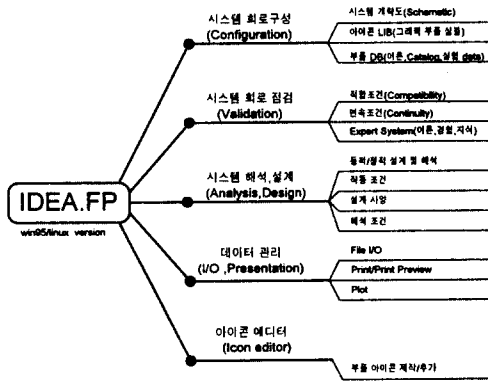
### 4.1. 시뮬레이션 시스템의 개요

본 연구에서 개발된 범용 시뮬레이션 패키지인 IDEA.FP는 임의의 부품들로 구성된 시스템에 대한 해석이 가능하도록 하기 위해 객체지향 프로그래밍 개념 (Object Oriented Programming Concept)을 도입하였다. 즉, 필요한 모든 회로 구성 부품들의 특징을 분석하여 자료구조 및 동작에 따라 유압류, 기계류, 전기류 및 시뮬레이션 입력신호를 위한 신호류, 제어기 구성을 위한 제어류 등으로 분류하여 이를 클래스로서 형상화하고 이를 세분화하여 부품간의 계층구조를 구축한 후 사용자에게 일종의 부품 템플릿인 아이콘 파일 (Icon File)을 제공한다. 따라서 사용자는 이로부터 필요한 객체 (Object)를 유도하여 회로를 구성한 후 시뮬레이션을 수행하게 된다.

또한 IDEA.FP는 부품 클래스의 추가, 삭제 및 클래스 관련 정보를 체계적으로 관리하기 위한 아이콘 편집기를 독립 모듈로 제공함으로써 부품 계층구조의 확장이 용이하도록 구성되어 있으며, 아이콘 파일 구성에서부터 시뮬레이션 수행, 결과 분석까지의 작업이 효과적으로 이루어지기 위한 각종 기능 및 그래픽 사용자 인터페이스 환경 (GUI)을 제공한다.

### 4.2. 시뮬레이션 시스템의 구성

개발된 시뮬레이션 시스템은 크게 시스템 회로 구성 모듈, 시스템 회로 점검 모듈, 시스템 해석·설계 모듈, 데이터 관리 모듈, 아이콘 편집 모듈로 구성되어 있다. 각 모듈의 구성 및 기능은 다음과 같다.

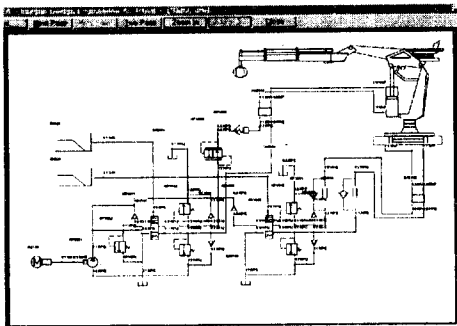


< 그림 4.1 > 시뮬레이션 시스템의 전체 구조

## 5. 시뮬레이션 결과

개발된 시스템을 사용하여 크레인 유압회로를 구현하고 시뮬레이션을 수행하였다.

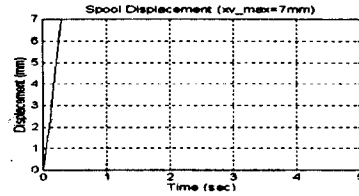
그림 5.1은 스윙과 데릭 유압회로의 예이다.



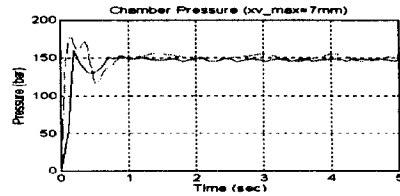
<그림 5.1> 크레인 유압회로

그림 5.2와 같은 제어밸브의 스폴변위를 입력으로 하여 스윙과 데릭운동을 수행하였다.

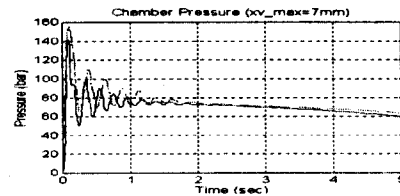
그림 5.3과 그림 5.4에 스윙운동과 데릭운동의 실린더 격실압력을 나타내었다. 실선은 시뮬레이션 값이고 점선은 실험측정값이다. 시뮬레이션값과 실제 측정값이 비슷한 것을 볼 수 있다.



<그림 5.2> 스폴변위



<그림 5.3> 스윙 압력선도



<그림 5.4> 데릭 압력선도

## 6. 결론

본 논문에서는 굴절식 크레인의 실제상황과 같은 조건의 유압부품을 모델링하고 유압회로 외부부하를 결정하기 위하여 크레인 작업장치의 동력학 해석을 수행하였다. 주요 유압 부품의 동특성 파라미터는 알기 어려우므로 비교적 간단한 모델을 사용하고, 다자유도를 가지는 크레인 작업장치의 동특성을 반영할 수 있는 동력학 모델을 사용하여 실험결과에 근접한 결과를 얻을 수 있었다.

## 7. 참고문헌

- [1] T.R. Kane and D.A. Levison, Dynamics, 1985
- [2] J.J. Craig, Introduction to Robotics: Mechanics and Control, 2nd Ed., Addison-Wesley, 1989
- [3] Herbert E. Merritt, Hydraulic Control Systems, John Wiley Inc., 1967
- [4] 첨단기계설계 및 엔지니어링 시스템 개발에 관한 연구, 서울대학교 정밀기계설계공동연구소, 1996
- [5] S.H. Cho, K.H. Shin, K.I. Lee, The Development of Software Techniques for Digital Simulation of Fluid Power Systems, Third JHPS International Symposium, 1996