

## 유압사보체계의 비선형모형의 동정

윤 창 진

경애하는 김정은동지께서는 다음과 같이 말씀하시였다.

《과학기술을 빨리 발전시키고 전민과학기술인재화를 실현하여 지식경제시대의 요구에 맞게 인민경제의 현대화, CNC화수준을 높이고 나라의 경제구조를 완비하여야 합니다.》

유압체계는 한다리로봇를 비롯한 여러 로봇과 기계장치들의 중요구성요소이다.

유압체계에 대한 연구의 중요한 측면은 유압체계동정이며 이것에 대한 연구들이 일부 진행되었으나[2, 3] 그것들은 검은통모형화나 선형회색모형에 대한것이다.

현재까지 유압사보체계의 비선형모형의 파라미터의 직접적동정에 대한 연구는 없다.

논문에서는 비선형모형파라미터의 직접적동정방법을 제안하며 실험을 통하여 그 타당성을 검증한다.

### 1. 실험체계구성과 그것의 수학적모형

유압실험체계의 구성도는 선행연구[1]에서와 같고 모형화는 매개 부분에 대하여 선행연구[1]에서와 같이하며 여기서는 중요한 몇가지 관계식에 대해서만 다시 보여준다.

사보변의 조종흐름  $Q_1$ 과  $Q_2$ 를 결정하는 방정식은 다음의 형태로 쓸수 있다.

$$Q_1 = \text{sign}(p_s - p_1)K_{qi}G_{sv}i\sqrt{|p_s - p_1|}, \quad Q_2 = -\text{sign}(p_2)K_{qi}G_{sv}i\sqrt{|p_2|}, \quad x_v \geq 0 \quad (1)$$

$$Q_1 = -\text{sign}(p_1)K_{qi}G_{sv}i\sqrt{|p_1|}, \quad Q_2 = \text{sign}(p_s - p_2)K_{qi}G_{sv}i\sqrt{|p_s - p_2|}, \quad x_v < 0 \quad (2)$$

여기서  $K_{qi} = Q_s / (I_s \sqrt{p_s})$ ,  $Q_s = Q_n \sqrt{p_s / p_n}$ 이다.

논문에서는 흐름량결수  $K_{qi}$ 가 선행연구[1]에 의하여 결정된 조건에서 사보변의 동특성을 반영하는 동적증폭결수  $G_{sv}$ 의 전달함수모형의 형식과 그 내부의 구체적인 파라미터들을 연구대상으로 한다.

전달함수모형은 아래에서 가정에 기초하여 설정된다.

유압실린더의 실들에서 압력은 다음의 방정식으로 결정된다.

$$Q_1 = C_{ep}p_1 + C_{ip}(p_1 - p_2) + \frac{V_1}{\beta_e} \frac{dp_1}{dt} + \frac{dV_1}{dt}, \quad Q_2 = C_{ip}(p_1 - p_2) - C_{ep}p_2 - \frac{dV_2}{dt} - \frac{V_2}{\beta_e} \frac{dp_2}{dt} \quad (3)$$

$$V_1 = V_{10} + A_1 y, \quad V_2 = V_{20} + A_2 y \quad (4)$$

식 (3), (4)에 들어있는 기호들은 선행연구[1]에서와 같으며  $C_{ip}$ 는 논문에서 동정할 파라미터들중의 하나인 내부루설결수이며 외부루설은 무시한다.

짐과 련결되지 않았을 때 피스톤의 운동방정식은  $m\ddot{y} = F_p$ ,  $F_p = p_1 A_1 - p_2 A_2 - K_{fri}\dot{y}$ 와 같다. 여기서  $K_{fri}$ 는 피스톤과 실린더본체사이의 마찰결수,  $m$ 은 피스톤의 등가질량이다.

## 2. 사보변전달함수모형

우리는 동정자료를 얻기 위하여 유압실린더조종실험을 하였다.

실험에서는 유압실린더의 피스톤에 짐을 연결하지 않았으며 조종법칙은 비례조종법칙을, 조종파라미터는 0.08~0.25의 범위에서 주었다.

각이한 조종파라미터 밑에서 유압실린더 피스톤의 변위곡선들은 그림 1과 같다.

곡선들은 유압실린더의 중간점을 첫 위치로 하며 설정입구로 80mm의 위치를 준다.

동정의 편리를 위하여 그림 2에서와 같이 출발위치를 0으로 설정한다.

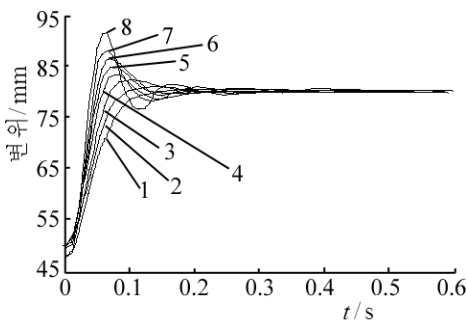


그림 1. 조종응답실험곡선

1-8은 비례결수가 각각 0.08, 0.10, 0.12, 0.14, 0.16, 0.18, 0.20, 0.25일 때

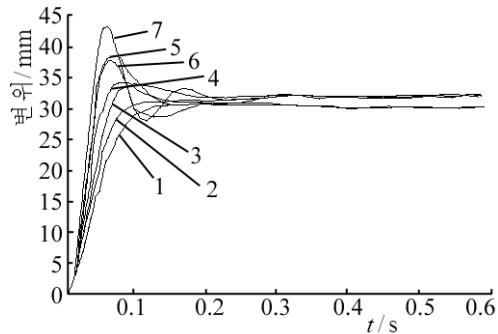


그림 2. 정규화된 조종응답실험곡선

1-7은 비례결수가 각각 0.08, 0.10, 0.12, 0.14, 0.18, 0.20, 0.25일 때

우리는 사보변동특성에 대한 가정과 응답최량화에 기초하여 비선형모형의 파라미터를 동정하였다.

사보변의 동적모형에 대한 가정을 식 (5)-(7)로 표시한다.(각각  $d2n0$ ,  $d2n1$ ,  $d3n1$ 로 표시하는데 여기서 수들은 분자와 분모의 차수를 나타낸다.)

일반적으로 사보변의 동적모형으로서 1, 2차모형이 리용되나 이것은 교차의 가능성을 배제하지 않는다.

유압체계응답에서 파조절의 존재는 1차의 가능성을 배제한다.

동적모형의 파라미터들은 MATLAB의 응답최량화를 통하여 찾는다.

$$G_{sv1}(s) = \frac{K_{sv}}{s^2 / (2\pi f_{sv})^2 + 2\zeta_{sv}s / (2\pi f_{sv}) + 1} \quad (5)$$

$$G_{sv2}(s) = \frac{K_{sv}(T_{sv1} + 1)}{s^2 / (2\pi f_{sv})^2 + 2\zeta_{sv}s / (2\pi f_{sv}) + 1} \quad (6)$$

$$G_{sv2}(s) = \frac{K_{sv}(T_{sv1} + 1)}{s^2 / (2\pi f_{sv})^2 + 2\zeta_{sv}s / (2\pi f_{sv}) + 1} \cdot \frac{1}{T_{sv2} + 1} \quad (7)$$

여기서  $K_{sv}$ 는 주로 전류-변심변위의 증폭결수이다. 그러나 동정을 통하여 얻어진 값들은 사보변의 동적증폭결수를 반영할뿐아니라 실제흐름량결수와 정격흐름량결수사이의 차이 등을 반영한다.  $\zeta_{sv}$ 는 사보변의 감쇠비이고  $f_{sv}$ 는 사보변의 고유주파수이다.  $T_{sv1}$ 과  $T_{sv2}$ 는 사보변의 동특성을 반영하는 보충적인 파라미터이다.

### 3. 응답의 최량화에 기초한 사보변동특성의 동정

최량화를 위하여 파라미터의 초기값들이 요구된다.

$f_{sv}$ 의 초기값들은 계단응답자료의 웨블레트분해에서 동특성을 반영한다고 볼수 있는 세부성분을 처리하여 얻을수 있다. 여러 방법들에 의한 처리결과는 특성주파수가 19~37Hz의 범위에 있으며 관로의 집중파라미터모형에 기초한 계산은 특성주파수가 35~45Hz범위내에 있고 감쇠비는 0.13~0.24범위내에 있다는것을 보여준다.

파라미터를 얻기 위하여  $G_{sv1}(s)$ 에 대한 최량화를 수행한다.

$f_{sv}$ ,  $\zeta_{sv}$ ,  $K_{sv}$ 의 초기값들은 10, 0.6, 1.7로 설정한다. 수값범위는 5~20, 0.4~1, 1.2~3으로 설정한다. 첫 최량화는 조종파라미터 0.20의 응답자료에 대한것이다. 최량화는 그라디언트하강법과 유전알고리즘을 리용하여 진행한다.

$G_{sv2}(s)$ 와  $G_{sv3}(s)$ 에 대하여서도 최량화를 진행하는데 이때  $T_{sv1}$ 과  $T_{sv2}$ 의 초기값들은 령이다. 범위는 각각 0~0.05, 0~0.1이다.

최량화를 통하여 얻어진 값들은 표 1과 같다.

표 1. 사보변동특성의 동정결과들(조종파라미터 0.20의 자료)

파라미터모형	$f_{sv}$	$\zeta$	$K_{sv}$	$T_{sv1}$	$T_{sv2}$	$f(x)$ 의 최종값
d2n0(Grad.)	14.448 9	0.862 8	2.462 6	—	—	0.081 4
d2n0(GA)	14.323 9	0.850 1	2.447 0	—	—	0.080 4
d2n1(Grad.)	7.028 1	0.712 2	2.491 7	0.018 9	—	0.295 0
d2n1(GA)	14.386 4	0.858 9	2.462 6	0	—	0.081 1
d3n1(Grad.)	11.547 6	0.765 6	2.515 3	0.002 3	0	0.190 1

표 1에서 보는바와 같이 수값들은 d2n0이 사보변의 동특성을 묘사하는데 가장 적합하다는것을 보여준다. 최량화에 의하여 얻어진 그래프들가운데서도 d2n0에 대한 응답곡선이 실험결과에 가장 가깝다. 앞으로 논문에서는 d2n0을 적용한다.

### 4. 실린더모형파라미터의 동정과 동정결과들

d2n0모형에 기초하여 단계별최량화로 다른 체제파라미터를 얻는다.

유압체계의 다른 중요파라미터는 실린더의 내부루설결수, 마찰결수와 운동질량 등의 실린더모형파라미터이다. 내부루설결수의 최량화파라미터는  $C_i$ (실제내부루설결수에 1e12를 곱한 값), 유압실린더의 마찰결수는  $K_{fri}$ (식 (6)), 유압실린더피스톤의 질량  $m$ 이다.

일반적으로 유압실린더의 운동질량은 유압실린더에서 피스톤과 유압유의 질량, 사보변과 유압실린더입구사이의 관로에 있는 유압유의 질량을 포함한다.

가능한 최대질량은 0.6kg정도이며 최량화에서  $C_i$ ,  $K_{fri}$ ,  $m$ 의 초기값은 2.083 3, 20, 0.4이고 수값범위는 0.2~20, 0~600, 0.2~0.6이다.

우선 사보체계동적응답의 최량화에 의하여  $C_i$ ,  $K_{fri}$ 가 얻어지고  $C_i$ ,  $K_{fri}$ ,  $m$ 의 동정값들이 얻어진다. 목적함수의 최종값들은 0.080 4로부터 각각 0.045 7, 0.035 6으로 감소한다.

최량화로부터 얻어진 동정파라미터들은 표 2, 3과 같다.

표 2. 사보변동특성동정결과

파라미터	파라미터			
	$f_{sv}$	$\zeta$	$K_{sv}$	$f(x)$ 의 최종값
0.20	14.323 9	0.850 1	2.447 0	0.080 4
0.18	14.050 3	0.866 3	2.346 7	0.026 1
0.16	16.107 5	1.000 0	2.580 5	0.028 9
0.14	16.906 4	1.000 0	2.573 4	0.142 5
평균	15.347 0	0.929 1	2.486 9	0.069 5
분산/%	-8.5~10.2	-8.5~7.6	-5.6~3.8	—

표 3. 유압실린더파라미터동정결과

파라메터	실 험							
	두파라메터 동정				세파라메터 동정			
	$C_i$	$K_{fri}$	$f(x)$ 의 최종값	$C_i$	$K_{fri}$	$m$	$f(x)$ 의 최종값	
0.20	0.320 3	21.750 6	0.045 7	0.200 0	19.584 6	0.6	0.035 6	
0.18	0.753 2	54.111 3	0.022 1	0.418 3	44.108 3	0.6	0.017 1	
0.16	0.920 4	57.618 6	0.020 9	0.527 4	52.063 8	0.6	0.015 3	
0.14	0.200 0	4.923 2	0.023 9	0.200 0	0	0.6	0.019 0	
평균	0.548 5	34.600 9	0.028 2	0.336 4	28.939 2	0.6	0.021 7	
분산/%	-64~68	-85~66	-	-41~56	-100~80	0	-	

표 2, 3에서 보는바와 같이 여러가지 자료에 대한 파라미터들은 아주 류사하다. 특히 사보변동특성동정값의 변동범위는 10%이하이다.  $C_i$ ,  $K_{fri}$ 의 분산은 비교적 크나 연구는 그 파라미터들이 계의 응답에 주는 영향이 적다는것을 보여준다.

## 참 고 문 헌

- [1] 김일성종합대학학보(자연과학), 62, 5, 18, 주체105(2016).
- [2] L. Marton et al.; Mechatronics, 21, 6, 350, 2011.
- [3] E. Kilic et al.; Mechatronics, 22, 7, 997, 2012.

주체105(2016)년 2월 5일 원고접수

## Identification of Nonlinear Model of Hydraulic Servo System

Yun Chang Jin

This paper proposes the method of direct identification of nonlinear model parameters on the basis of assumption on dynamic model of servo valve and response optimization in nonlinear model. Fairly satisfactory values of dynamic parameters of servo valve, internal leakage coefficient and frictional coefficient of hydraulic cylinder is determined by the method, under which system response is very close to experimental data. Satisfactory coincidence of simulation and experiment indicates that proposed simulation model and identification method are reliable.

Key words: one-legged robot, electro-hydraulic servo system