

## 가변용량형 피스톤펌프의 파라미터 추정

## Estimation of Parameters in a Variable Displacement Piston Pump

허준영 · 리차드 버튼  
J. Y. Huh and R. Burton

**Key Words** : Extended Kalman Filter (확장칼만필터), Parameter Estimation (파라미터 추정), Variable Displacement Pump (가변용량형펌프)

**Abstract**: An estimation technique called the Extended Kalman Filter is used to estimate viscous friction, spring initial contraction, and the spring constant on the swash plate of a variable displacement pump. The feasibility of the approach was established using a simulation study. It showed that these parameters could be estimated very accurately in a reliable and independent fashion. A special experimental system was set up to facilitate the measurement of certain states to enhance the Kalman Filtering approach. The aforementioned parameters were estimated and found to be reasonably repeatable for a common operating point. It was very evident that as the operating conditions changed (i.e. temperature) so did the estimated values of certain parameters such as viscous friction. This was believed to be a good verification test for the approach.

## 1. 서 론

유압동력장치는 다른 동력장치가 따라올 수 없는 대출력과 속도, 방향의 제어를 제공하기 때문에 산업 장치로서 널리 사용되고 있다. 이에 따라 유압동력장치의 신뢰성과 안전에 대한 요구가 증가하고 있고 이들 동작상태의 감시에 대한 관심이 날로 커지고 있다. 만약 시스템의 어떤 파라미터가 열화된다면 가능한 일찍 그 변화를 발견하는 것은 대단히 바람직하다. 고장발견의 가장 일반적인 방법은 파라미터들이 정상값에서 주어진 오차범위를 벗어나는가를 검사하는 것이다. 고장발견의 이 과정은 주로 컨디션 모니터링이라고 불리워진다. 컨디션 모니터링은 고장 예상과 발견에 중요한 역할을 한다. 컨디션모니터링을 위해서는 어떤 상태량이나 파라미터를 측정해서 정상값을 설정해두어야 한다. 유압장치에 있어서 가장 중요한 요소중의 하나는 펌프이다. 이 요소의 고장진단은 유압장치의 나머지 요소의 작동에 크게 영향을 미치므로 대단히 중요하다. 본 연구에 있어서,

사판식 피스톤펌프가 사용되었는데 그 이유로는, 이런 타입의 펌프가 가장 성능이 좋고, 널리 사용되고 있으며, 복잡한 펌프중의 하나이기 때문이다. 펌프에 있어서 고장발견에 관한 많은 연구가 시도되었다<sup>1-4)</sup>. 본 연구에서는 유압장치의 파라미터 추정에 확장칼만필터(Extended Kalman Filter : EKF)를 사용한다. 유압시스템의 파라미터 추정에 있어서 확장칼만필터(EKF)를 사용한 연구로는 Khoshzahan- Zauarehi<sup>2)</sup>가 전기유압 비례제어밸브의 파라미터들과 상태량을 구하는데 사용하였다. 그리고 Park<sup>5)</sup>은 펌프에서 모의된 누유를 발견하는데 사용하였다. 본 연구의 목적은 사판식 피스톤펌프의 사판스프링상수와 스프링 초기압축량, 점성마찰계수를 추정하는 데 있어서 확장칼만필터의 적용에 관한 연구의 결과를 보이는 것이다. 이를 위해 펌프의 비선형모델에 대한 확장칼만필터 적용의 민감도를 구하기 위해 시뮬레이션을 수행하였고, 그 후 실험장치에 적용하였다. 그리고 컨디션 모니터링을 위한 이 접근방법의 실제적인 문제에 대해 고찰하였다.

## 2. 이론적 배경

## 2.1 확장칼만필터

1960년에 R. E. Kalman이 이산적 데이터 선형 필터링 기법에 대한 논문을 발간한 후 디지털 컴퓨터

접수일 : 2004년 10월 30일

허준영(책임저자) : 한국기술교육대학교 메카공학부

E-mail : huh@kut.ac.kr, Tel : 041-560-1142

R. Burton : Department of Mechanical Engineering,  
University of Saskatchewan, Saskatoon Saskatchewan,  
Canada

의 발전에 힘입어 칼만필터는 광범위한 연구와 응용의 주제가 되었다. 선형시스템의 이산적 모델은 식 (1)과 같이 기술된다.

$$X(k+1) = \Phi(k)X(k) + G(k)U(k) + W(k) \quad (1)$$

$$Z(k) = H(k)X(k) + V(k)$$

$X(k)$ 와  $Z(k)$ 는 상태변수와 측정값을 의미하고 시스템잡음  $W(k)$ 와 측정잡음  $V(k)$ 에 연관된 공분산행렬들은 알려져 있다고 가정하고 이들을 각각  $Q(k)$ 와  $R(k)$ 로 나타낸다. 각 이산시간에서, 칼만필터 알고리즘은 추정과 예상의 두 단계로 나눌 수 있고, 칼만필터 알고리즘의 유도는 오차공분산행렬  $P(k)$ 를 최소로 하는 칼만게인  $K(k)$ 의 값을 구하기 위해  $K(k)$ 에 관하여  $P(k)$ 의 미분을 취함에 기초한다.  $\hat{X}^-(k)$ 가 이산시간  $k$ 에서 상태의 예상 추정값이라면, 칼만필터는 칼만게인  $K(k)$ 를 사용하여  $\hat{X}^-(k)$ 의 추정을 더 갱신된 최적추정  $\hat{X}(k)$ 로 개선할 것이다. 칼만필터의 목적은 상태벡터의 최적 추정값인  $\hat{X}(k)$ 을 주는  $K(k)$ 의 최적값을 구하는 것이다. 관련식들의 유도는 참고문헌<sup>6)</sup>에 상세히 기술되어 있다. 반복적 칼만필터 식들은 다음과 같다.

$$K(k) = P^-(k)H^T(k)[H(k)P^-(k)H^T(k) + R(k)]^{-1} \quad (2)$$

$$\hat{X}(k) = \hat{X}^-(k) + K(k)[Z(k) - H(k)\hat{X}^-(k)] \quad (3)$$

$$P(k) = [I - K(k)H(k)]P^-(k) \quad (4)$$

$$\hat{X}^-(k+1) = \Phi(k)\hat{X}(k) + G(k)U(k) \quad (5)$$

$$P^-(k+1) = \Phi(k)P(k)\Phi^T(k) + Q(k) \quad (6)$$

위에서  $R(k)$ 과  $Q(k)$ 는 측정잡음 공분산행렬과 시스템잡음 공분산행렬로 필터의 작동 전에 측정되거나 추정되어야 한다. 칼만필터의 알고리즘을 선도로 나타내면 Fig. 1과 같다. 선도에서 보면 칼만필터의 작동을 위해서는 처음에 상태변수의 초기예상값  $\hat{X}^-(0)$ 과 초기 오차 공분산행렬의 예상값  $P^-(0)$ 을 주어야 한다.

만약 모델이 비선형이라면 확장칼만필터(Extended Kalman Filter :EKF)가 사용되어야 한다. 이 확장칼만필터 접근은 선형시스템을 위한 표준 칼만필터를 비선형시스템에 응용한 것인데, 초기추정값에서 출발

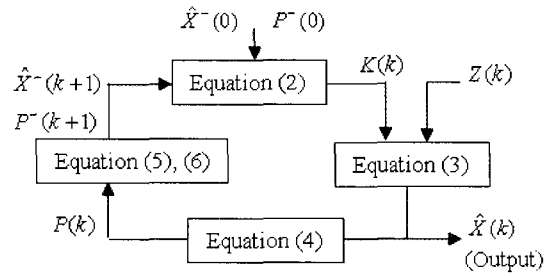


Fig. 1 Kalman filter algorithm

하여 계속적으로 가장 최신 상태추정값에서 선형화를 새롭게 한다. 선형화 과정은 보통 필터방정식을 유도하는데 포함된다. 다음과 같이 기술되는 비선형 모델에 대하여

$$X(k+1) = f[X(k)] + U(k) + W(k) \quad (7)$$

$$Z(k) = h[X(k)] + V(k)$$

여기서  $f$ 와  $h$ 는 시스템의 비선형 동역학 모델 및 비선형측정식이다. 작동점  $\hat{X}(k)$ 에서  $f$ 의 선형 테일러 근사와 작동점  $\hat{X}^-(k)$ 에서  $h$ 의 선형 테일러 근사를 하여 첫번째 미분항 이후의 고차항들은 무시하면 선형화된 모델은 다음과 같이 기술된다.

$$X(k+1) = \Phi(k)X(k) + U_n(k) + W(k) \quad (8)$$

$$Z(k) = D(k)X(k) + S(k) + V(k)$$

여기서

$$\Phi(k) = \left. \frac{\partial f[X(k)]}{\partial X(k)} \right|_{\hat{X}(k)},$$

$$D(k) = \left. \frac{\partial h[X(k)]}{\partial X(k)} \right|_{\hat{X}^-(k)},$$

$$U_n(k) = f[\hat{X}(k)] - \Phi(k)\hat{X}(k) + U(k),$$

$$S(k) = h[\hat{X}^-(k)] - D(k)\hat{X}^-(k)$$

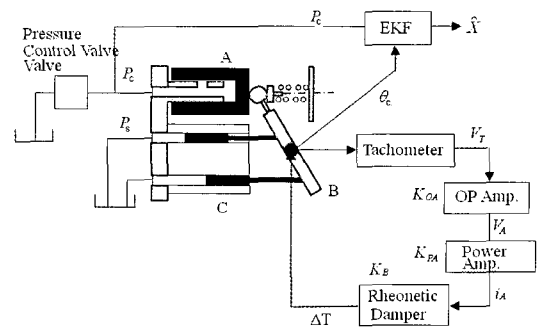


Fig. 2 Variable displacement piston pump

## 2.2 시스템 모델링

본 연구에 사용된 시스템을 Fig. 2에 나타내었다.  $P_c$ 는 사판제어피스톤 A에 작용하는 제어압력으로 사판 B의 각변위  $\theta_c$ 를 직접적으로 제어하는 시스템 입력이다. 이에 대해 사판은 펌프의 토출량을 증가시키거나 감소시키는 방법으로 응답한다.  $\theta_c$ 가 증가하면 피스톤의 스트로크가 증가하여 토출유량이 증가된다.  $\theta_c$ 가 감소하면 토출유량은 감소된다. 피스톤 C를 통한 펌프출력은 일반적으로 펌프에 의해 발생된 토출유량에 저항으로 작용하는 부하에 연결되어 있으나 여기서는 기초적인 연구로 토출압력을 일정하게 0으로 유지하기 위하여 시스템 출력 포트를 탱크에 직접 연결하였다. 이와같은 시스템에 대하여 사판의 운동방정식은 아래와 같이 유도된다<sup>7)</sup>.

$$I_e \ddot{\theta}_c = -rA_c P_c - \theta_{c dmp} \dot{\theta}_c - rA_c K_{pr4} \theta_c + rA_c K_{pr5} \quad (9)$$

여기서  $I_e$ 는 사판과 피스톤들의 전체 질량관성모멘트이고,  $\theta_{c dmp}$ 는 전체 점성댐핑계수,  $K_{pr4}$ 는 사판스프링상수,  $K_{pr5}$ 는 사판스프링 초기압축에 관한 계수,  $A_c$ 는 사판제어피스톤의 수압면적,  $r$ 은 사판중심에서 사판스프링까지의 수직길이 이다.

식(9)의  $\theta_{c dmp}$ 와  $K_{pr4}$ ,  $K_{pr5}$ 를 추정하기 위해 이 파라미터들을 시스템의 상태변수로 하는 새로운 상태공간모델의 설정이 필요하다. 새로운 상태공간식에서는 상태변수들이 추가되어 새롭게 설정되기 때문에 새로운 설정후의 상태공간 모델은 대부분 비선형모델이 된다. 따라서 선형칼만필터가 아닌 확장칼만필터를 파라미터 추정에 사용하였다. 사판식 피스톤펌프 시스템에서, 상태변수들이 각변위  $\theta_c$ 와 각속도  $\dot{\theta}_c$ 에 대하여 각각  $x_1$ 과  $x_2$ 로 정의되었고, 추정코자 하는 파라미터  $\theta_{c dmp}$ 와  $K_{pr4}$ ,  $K_{pr5}$ 에 대하여 상태변수  $x_3$ 와  $x_4$ ,  $x_5$ 가 각각 새롭게 추가되었다. 사판각변위  $\theta_c$ 는 측정가능한 파라미터이며 상태공간식에서 측정변수에 사용되었다. 그리고 시스템잡음과 측정잡음은 실험장치에 있어서 실제로 존재하기 때문에 식(9)의 모델에 이들 잡음들을 추가하여 나타낸다. 새롭게 설정된 상태공간식에 대해 식(8)과 같은 선형화된 이산시스템 모델의 각 항은 다음과 같다. 측정데이터 벡터  $z$ 에 대하여는 단지 각변위  $\theta_c$ 만이 측정되어 사용되었으므로 선형화가 필요하지 않았다.

$$\phi(k) = \begin{bmatrix} 1 & t_s & 0 & 0 & 0 \\ t_s r A_c x_4(k) & 1 - \frac{t_s}{I_e} x_3(k) & -\frac{t_s x_2(k)}{I_e} & -\frac{t_s r A_c x_1(k)}{I_e} & \frac{t_s r A_c}{I_e} \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$U_n(k) = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{t_s r A_c P_c}{I_e} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad W(k) = \begin{bmatrix} t_s w_1(k) \\ t_s w_2(k) \\ t_s w_3(k) \\ t_s w_4(k) \\ t_s w_5(k) \end{bmatrix}, \quad D(k)^T = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$V(k) = v(k)$$

## 3. 시뮬레이션 및 실험

### 3.1 민감도 해석

Matlab의 Simulink를 사용하여 시뮬레이션한 결과를 Fig. 3에 나타내었다.

Fig. 3의 (f)는 사판피스톤에 가해지는 제어압력  $P_c$ 로 진폭 3.5 bar의 1 Hz진동에 100 Hz로 락이 제한된 백색잡음을 첨가하였다. 이것을 사판식 피스톤펌프의 Simulink모델에 가했을 때 사판의 각변위  $\theta_c$ 는 (a)와 같이 나온다. 사실상 (a)는 모델출력으로서의 각변위  $\theta_c$ 와 확장칼만필터를 통하여 최적추정된  $\hat{\theta}_c$ 이 중첩되어 하나의 곡선처럼 나타났다.  $\theta_{c dmp}$ 와  $K_{pr4}$ ,  $K_{pr5}$ 의 추정에 있어서 거의 0.5초 만에 모델에서 상수로 준 파라미터 값에 도달해 있는 것을 볼 수 있다.  $K_{pr4}$ 의 추정에 대해서는 약 0.3%의 정상상태오차가 발생하였다.

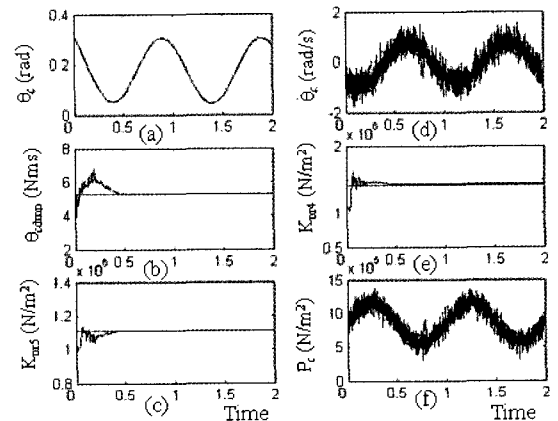


Fig. 3 Simulation results

확장칼만필터가 어떤 파라미터의 값을 얼마나 정확하게 추정하는지를 조사하기 위해 모델의  $\theta_{cdmp}$  와  $K_{pr4}$ ,  $K_{pr5}$ 를 상수로 하고 확장칼만필터를 통한 추정값과 비교하였다. 그 차이는 모두 0.05~0.3%로 아주 작게 나타났다. 두번째 조사는 변화하는 어떤 파라미터의 값을 추정하는데 있어서 칼만필터가 상수로 유지된 다른 파라미터의 변화를 부당하게 추정하는지를 알아보았다.  $\theta_{cdmp}$ 의 값을 15, 30, 50%로 증가시켰을 때 상수로 유지된  $K_{pr4}$ 에 있어서 -0.13, -0.5, -1.2%의 변화를 추정하였고,  $K_{pr5}$ 에 있어서 0, -0.06, -0.02%의 변화를 추정하여  $K_{pr4}$ 에 있어서는 약간의 벗어남이 주목되나 우려할 정도는 아니라고 사료된다.  $K_{pr4}$ ,  $K_{pr5}$ 가 독립적으로 바뀔 때 유사한 결과가 얻어졌다. 따라서 확장칼만필터는 큰 신뢰성을 갖고 실험장치에 적용할 수 있다는 결론을 얻었다

3.2 실험장치 및 방법

Fig. 2와 같이 전자기 점탄성댐퍼를 사판축에 연결하여 외부에 설치하였다. 전자기 점탄성댐퍼는 자기적 점탄성유체(magneto-rheological fluid)를 사용하는 것으로 가해지는 전류의 크기에 비례하여 점성마찰토크가 선형적으로 증가하는 특성을 갖는다<sup>8)</sup>. 사판축에 회전속도계를 부착하여 사판의 각속도를 계측하여 각속도에 비례하는 출력전압값  $V_T$ 를 얻고 이것에 연산증폭기의 이득을 0, 1, 2, 5.1, 7.5, 10배로 하여 증폭된 전압신호를 전자기 점탄성댐퍼의 증폭기를 통하여 전류신호로 증폭하여 전자기 점탄성댐퍼에 가해 주었다. 전자기 점탄성댐퍼는 이에 비례하여 점성마찰력을 발생시키므로 결국 사판의 전체 점성마찰력은 변화하게 되고 확장칼만필터는 이 변화를 정확하게 추정해 내는지를 조사하였다. 그리고 점성마찰력의 변화를 주는 다른 방법으로 작동유의 온도를 30~50°C범위내에서 변화시켰다. Fig. 2에 나타난 압력제어밸브는 전자비례방식으로 여러가지 진폭과 주파수로 사판을 구동시키기 위해 사용되었다. 예비실험에서 조화함수적인 제어압력  $P_c$ 에 따른 사판의 각변위  $\theta_c$ 의 동작범위는 점성마찰계수에 크게 영향을 끼치는 것으로 나타났다. 실제로 실린더블럭 속의 플랜지는 사판 각변위에 따라 실린더 내면과의 접촉면적이 크게 달라져서 점성마찰계수를 크게 변화시킨다. 따라서 반복적이고 일관성있는 추정값을 얻기 위해서는 사판 각변위의 동작범위를 일정하게 하여야 한다. 실험장치에 사용된 기기의 제원을 Table 1에 나타낸다.

Table 1 Instrumentation for experiment

Instrument	Model No.	Manufacture
Axial Piston Pump	PVB10	Vickers
Pressure Transducer	DP15TL	Validyne Co.
Angular Disp. Trans.	R30D	Lucas Schae.
DC Tachometer	So-7125D-1	ServoTek Co.
Modular Op. Amp.	RPF	Philbrick
Rheonetic Rotary Brake	MRB-2107	Lord Corp.
Pressure Servo Valve	15-010	Moog
Temperature Transducer	T-type	
Temperature Transducer	692-8000	Barnant
Dead Weight Tester	5525	Man.&Green

4. 결과 및 고찰

실제 구동중인 사판식 피스톤펌프에 가해지는 제어압력  $P_c$ 를 입력으로 사판변위각  $\theta_c$ 를 측정값으로 하여 확장칼만필터를 사용한 실험결과를 Fig. 4에 나타낸다. Fig. 4의 (f)에 나타난  $P_c$ 의 실제값에 수반된 잡음은 별도의 장치를 사용하여 첨가하지 않은 펌프 자체의 잡음으로 시뮬레이션 결과(Fig. 3, f)와 유사하나 값이 증가될 때에는 감소될 때보다 잡음의 크기가 크게 가해지는 경향을 보인다. 그리고 (a)에 나타난 사판각변위 추정에서 최적추정값과 측정값 사이에 약간의 오차를 보인다. 이것의 원인은 사용된 시스템의 모델에 충분히 고려되지 않은 여러가지 비선형특성 때문인 것으로 사료된다. 여러 작동온도에서의 펌프로부터 취해진 실험데이터에 확장칼만필터를 적용하여  $\theta_{cdmp}$ 와  $K_{pr4}$ ,  $K_{pr5}$  파라미터를 추정하였고 반복적인 시도에 대한 결과를 Fig. 5와 6, 7(실선은 평균값)에 나타내었다. 온도가 증가함에 따라  $\theta_{cdmp}$ 가 감소하는 것은 예상했던 대로이며 분명하다. 그러나  $K_{pr4}$ 는 예상과는 다르게 온도증가에 대해 값의 감소를 보였고,  $K_{pr5}$ 은 일정한 추정값을 보였다.

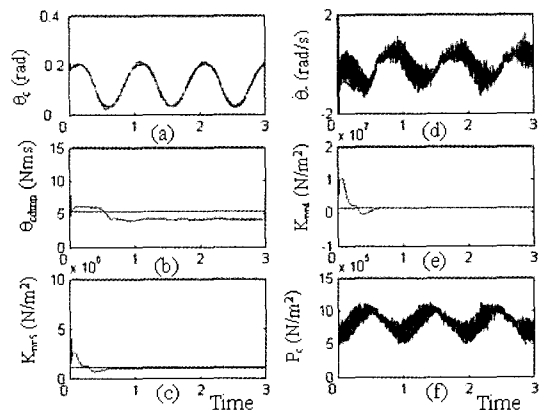


Fig. 4 Experimental results

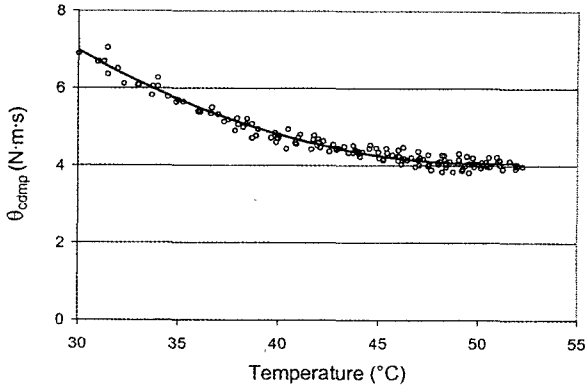


Fig. 5 Estimation of the viscous damping coefficient

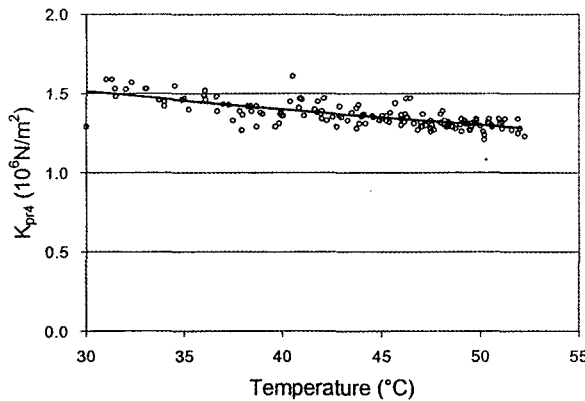


Fig. 6 Estimation of the spring constant coefficient

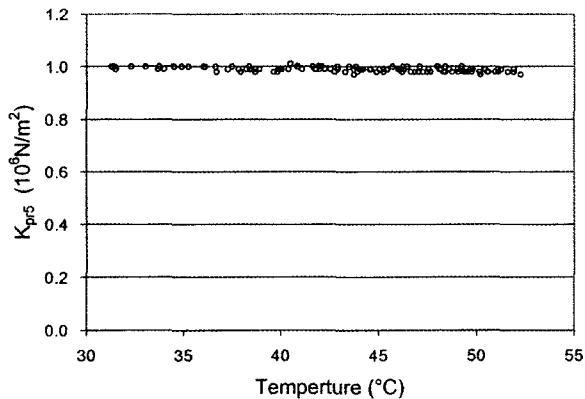


Fig. 7 Estimation of spring pretension coefficient

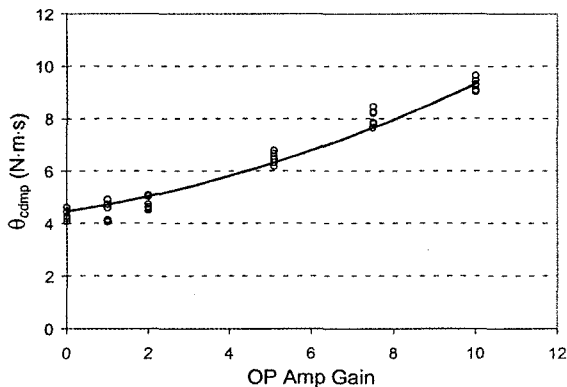


Fig. 8 Estimation of the viscous damping coefficient

두번째 실험은 OP앰프를 사용하여 점탄성댐퍼의 증폭기 입력을 조정함으로써 사판에 가해지는 외부 점성마찰을 변화시켰다. 확장칼만필터를 이 실험에서 취해진 데이터에 적용하여 각 파라미터를 추정된 결과를 Fig. 8에 OP앰프 게인의 함수로서 나타내었다.

Fig. 8에서 실선은 실험에 사용된 타코미터와 OP 앰프, 파워앰프, 점탄성댐퍼의 게인과 특성곡선을 사용하여 구한 특성곡선이고, 그림에서 작은 동그라미는 실험에서 구한 데이터를 확장칼만필터로 추정된 값이다. 여기서  $\theta_{damp}$ 의 추정값은 OP앰프의 게인을 증가시켜 외부에서 점성마찰력을 증가시켰을 때 제작자의 사양서에 주어진 값대로 증가함을 알 수 있다.

사판식 피스톤펌프 모델을 사용한 시뮬레이션 검토에서는 확장칼만필터를 사용하였을 때 파라미터의 변화를  $\pm 1.5\%$ 내의 정도로 추정함을 보였다. 그리고 하나의 파라미터의 변화는 다른 파라미터의 추정에 거의 영향을 미치지 않음(최대 1%오차)을 주목하는 것은 중요하다. 이 오차폭은 확장칼만필터의 실제계에 적용에 있어서 예상할 수 있는 최저값임을 나타낸다. 확장칼만필터를 실험장치로부터 취해진 데이터에 적용하였을 때 추정된 파라미터들은 정상상태 값에 수렴하였다. 더욱이 온도증가에 따른 댐핑값에 대한 확장칼만필터의 추정값은 물리적으로 예상했던 것과 잘 일치하였고, 외부적으로 부가되어 조정가능한 댐핑계수에 대한 변화를 확장칼만필터는 잘 추종할 수 있었다. 이것은 컨디션모니터링을 위하여 중요하다. 그러나 문제로 남아 있는 것은 온도의 함수로서의  $K_{pr4}$ 의 변화가 이론적으로나 물리적 해석으로 설명되지 않는 것이다. 또 다른 문제점은 작동조건 반복성이다. 실험결과와 관찰은 같은 작동조건에서 파라미터의 추정된 값들이 약간 분산되어 있는 것으로 나타났다. 이 분산은 확장칼만필터 기법의 한계 때문일 수도 있으나 작동점에 있어서 작은 변동에 기인할 수 있다.

### 5. 결 론

본 연구는 사판식 피스톤 펌프의 사판에서 스프링 상수와 스프링 초기압축, 점성마찰계수를 추정하기 위해 확장칼만필터 기법의 사용을 조사하여 다음의 결론을 얻었다.

- 1) 사판모델을 사용한 시뮬레이션 검토에서는 확장칼만필터가 파라미터의 변화를  $\pm 1.5\%$  이내의

정도로 추정할 수 있음을 보였다.

- 2) 하나의 파라미터의 변화는 다른 파라미터의 추정에 거의 영향을 미치지 않았다(최대 1%오차).
- 3) 확장칼만필터는 댐핑계수에 대한 변화를 잘 추정할 수 있었다. 따라서 유압시스템의 컨디션모니터링을 위하여 확장칼만필터는 중요한 도구가 될 수 있다.

본 연구는 가변용량형 피스톤 펌프의 고장진단을 위한 기초적인 연구로 수행되었는데 펌프 고장의 구체적인 현상이라고 할 수 있는 마모과다, 누설과다, 효율저하에 대한 고장진단은 향후 좀더 복잡한 펌프 모델을 사용하여 수행코자 한다.

### 참 고 문 헌

- 1) T. Ramden, "On Condition Monitoring of Fluid Power Pumps and Systems", Ph.D Thesis, Fluid Power Center, Department of Mechanical Engineering, Linkoping University, Sweden, 1995.
- 2) M. Khoshzaban-Zauarehi, "On-Line Condition Monitoring and Fault Diagnosis in Hydraulic System Components Using Parameter Estimation and Pattern Classification", Ph.D Thesis, Department of Mechanical Engineering, The University of British Columbia, 1997.
- 3) T. Uchiyama and S. Kallweit, H. Siekmann, "Knowledge-Based Fault Diagnosis for Pump Stations by Process Modeling", American Society of Mechanical Engineers, Fluids Engineering Division, Vol. 222, Aug 13~18, 1995.
- 4) H. Cao, "Parameter Estimation Using Extended Kalman Filter for the Swash Plate Assembly and the Control Piston in a Load Sensing Pump", M.Sc. Thesis, University of Saskatchewan. 2000.
- 5) H. Park, "Parameter Estimation and Failure Detection of Hydraulic System", Transactions of The Japan Hydraulics & Pneumatics Society, Vol.30, No.7, pp.19~25, 1999.
- 6) R. Brown and P. Hwang, "Introduction to Random Signals and Applied Kalman Filtering", Second Edition, John Wiley & Sons, Inc, 3rd edition. 1997.
- 7) G. P. Kavanagh, "The Dynamic Modelling of An Axial Piston Hydraulic Pump", M.Sc. Thesis, University of Saskatchewan, 1987.
- 8) Product Information, Rheonetic Rotary Brake MRB-2107, Load Materials Division.