

확장칼만필터를 사용한 사판식 피스톤펌프의 파라메타 추정

허준영[†] · Richard Burton^{*} · Greg Schoenau^{*}

(2001년 5월 18일 접수, 2002년 8월 14일 심사완료)

Estimation of Parameters in a Swash Plate type Piston Pump Using the Extended Kalman Filter

Jun-Young Huh, Richard Burton and Greg Schoenau

Key Words : Extended Kalman Filter(확장칼만필터), Parameter Estimation(파라메타 추정), Swash Plate Type Piston Pump(사판식 피스톤펌프)

Abstract

Extended Kalman Filter(EKF) is used to estimate friction and spring characteristics on the swash plate of a variable displacement pump. In earlier studies, the feasibility of the approach was established using simulation studies to establish limits of accuracy for the EKF approach when it was applied to an ideal situation. In this study, the EKF is applied to an experimental system and the issue of reliability in estimation of certain pump parameters is addressed. In addition, an approach to assign values to accommodate convergence of the EKF is considered. A special experimental system was set up to facilitate the measurement of certain states to enhance the EKF approach. Estimated parameters showed some scatter about a specified operating point but in general, were reasonably repeatable. The study also showed that changes in the system parameters could be accurately tracked.

1. 서론

유압펌프는 회로 전체의 성능에 크게 영향을 미치기 때문에 유압회로의 중요한 요소 중 하나이다. 유압장치의 가동상태에서 점성마찰계수와 쿨롱마찰계수, 누유량 등 시스템의 건강정도를 나타내는 중요한 파라메타는 대부분의 경우에서 직접적으로 측정할 수 없고 다만 간접적으로 추정될 수 있을 뿐이다. 지금까지 다양한 기법을 적용하여 펌프의 고장발견에 대한 연구가 수행되어져 왔다. Ramden⁽¹⁾은 주된 상태량이나 특성값을 측정하여 뉴럴네트워크를 사용하여 추정하였고, Rosa⁽²⁾는 주된 파라메타들을 측정하여 시간응답이나 주파수 응답을 통해 펌프에서 고장의 진전을 간접적으로 예측하였다. 이들 기법들은 펌프의 수학적 모델을

요구하지 않는다. 그러나 관측된 고장과 그것을 발견하는 데에 사용된 파라메타 사이의 상관 설정이 필요하다.

Khoshzaban⁽³⁾과 Park⁽⁴⁾은 확장칼만필터(Extended Kalman Filter : EKF) 기법을 사용하여 각각 전기유압서보시스템과 유압펌프에서 시스템의 상태량 또는 파라메타들을 추정하였다. 확장칼만필터 기법을 적용하기 위해서는 대상의 부품이나 시스템의 모델이 필요하다. 이것은 이 기법이 갖는 한가지 단점이라고 생각할 수 있으나 시스템의 모델링이 가능하다면, 추정된 파라메타의 변화에 대한 명확한 이해가 가능하고 잘못된 고장 예측의 사고를 줄일 수 있다는 장점도 있다.

복잡도에 따라 여러가지 펌프모델이 있다.^(5~7) 본 연구에서는 Kavanagh⁽⁵⁾에 의해 개발된 사판과 사판제어피스톤의 모델을 채택하여 사용하였다.

본 연구의 목적은 가변용량형 피스톤펌프의 사판과 관련된 점성마찰과 스프링특성을 추정하는데 있어서 확장칼만필터 기법의 응용에 관한 연구결

[†] 책임저자, 회원, 한국기술교육대학교 제어시스템공학과
E-mail : huh@kut.ac.kr
TEL : (041)560-1142 FAX : (041)560-1253
^{*} Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Saskatchewan, Canada

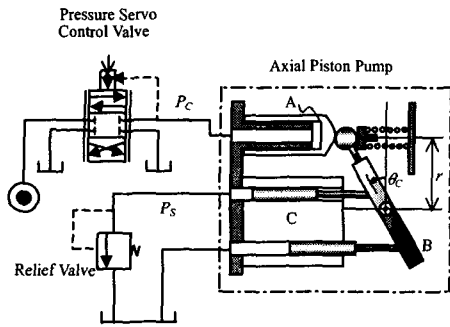


Fig. 1 Schematic diagram of the object system

과를 제시하는 것이다. 추정의 타당성을 증명하기 위하여 점성마찰력과 오일의 온도를 변화시키고, 사판스프링을 교체하여 초기압축력과 스프링상수를 변화시켜 가며 실험하여 추정하므로 이 기법의 실제성을 고찰하였다.

2. 시스템모델링

본 연구에서 사용된 시스템을 Fig. 1 에 나타낸 다. 액시얼피스톤 펌프는 실린더블럭 C 와 사판 B, 사판제어피스톤 A 로 구성되어 있다. 전기유압 압력서보제어밸브를 사용하여 만들어진 제어압력 P_c 는 사판제어피스톤 A 의 내면에 작용하여 배면의 사판스프링의 힘과 균형을 이루어 사판 B 의 각변위 θ_c 를 직접적으로 제어하는 시스템입력으로 사용된다. 사판 각변위 θ_c 는 사판이 펌핑피스톤에 대하여 수직인 토출유량이 없는 지점을 기준으로 반시계방향의 변위를 양의 방향으로 하였다. 실린더블럭 C 의 펌핑피스톤을 통해 유량이 토출되고, 토출된 유량은 연결된 릴리프밸브에 의해 토출압력 P_s 를 갖는다. 한편 토출압력 P_s 는 펌프의 펌핑피스톤에 가해져서 사판각도를 작게 하는 피드백토크로 작용한다.

대부분의 펌프는 사판에 작용하는 스프링토크에 비하여 이 피드백토크가 최소가 되도록 설계된다. 그러나 Kavanagh⁽⁵⁾와 Manring,⁽⁶⁾ Akers⁽⁷⁾는 좋은 설계임에도 불구하고 이 피드백토크가 실제의 유압 펌프에 잔존하고 피드백토크가 갖는 비선형 특성으로 인해 펌프의 수학적 모델이 복잡하게 됨을 보인다. 이 피드백토크의 파라메타들을 추정하기 위해 펌프출구 포트를 릴리프밸브에 바로 연결하여 펌프의 토출압력을 일정하게 한다.

Fig. 1 에 나타낸 시스템에 대하여 사판의 운동방정식은 식 (1)과 같이 기술된다.⁽⁵⁾

$$I_e \ddot{\theta}_c = -\theta_{cdmp} \dot{\theta}_c - r A_c K_{pr4} \theta_c + r A_c K_{pr5} + r A_c K_{pr2} P_s - r A_c K_{pr3} P_s \theta_c - r A_c P_c \quad (1)$$

여기서

- I_e : 사판과 피스톤들의 전체 질량관성모멘트
- θ_{cdmp} : 전체 점성댐핑계수
- K_{pr2} : 피드백토크의 스프링초기압축효과계수
- K_{pr3} : 피드백토크의 스프링상수효과계수
- K_{pr4} : 사판스프링상수
- K_{pr5} : 사판스프링 초기압축에 관한 계수
- A_c : 사판제어피스톤의 수압면적
- r : 사판중심에서 사판스프링까지의 수직길이

식 (1)에서 우변 4 번째항의 $r A_c K_{pr2} P_s$ 과 우변 5 번째항의 $r A_c K_{pr3} P_s \theta_c$ 항은 토출압력에 의해 사판에 만들어진 피드백토크이다. 만약 P_s 가 일정하다면 $r A_c K_{pr2} P_s$ 항은 상수항으로 스프링 초기압축력과 같은 효과로 작용하게 되고, $r A_c K_{pr3} P_s \theta_c$ 항은 각변위 θ_c 에 따라 힘이 발생되므로 계수 $r A_c K_{pr3} P_s$ 는 스프링상수의 효과로 작용하게 된다. 따라서 K_{pr2} 는 피드백토크의 스프링 초기압축효과계수, K_{pr3} 는 피드백토크의 스프링상수효과계수라고 호칭한다. θ_{cdmp} 과 K_{pr2} , K_{pr3} , K_{pr4} , K_{pr5} 를 추정하기 위해 이들을 식 (2)와 같이 상태변수로 둔다.

$$X = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7)^T = (\theta_c, \dot{\theta}_c, \theta_{cdmp}, K_{pr4}, K_{pr5}, K_{pr2}, K_{pr3})^T \quad (2)$$

단, T 는 전치행렬을 표시한다.

상태공간모델은 추가된 상태변수로 인하여 대부분 비선형모델이 된다. 따라서 표준칼만필터가 아닌 확장칼만필터가 파라메타 추정에 사용되어야 한다.⁽⁸⁾ 식 (1)에서 시스템잡음 W 와 측정잡음 V 은 실험장치에 실제로 존재하기 때문에 이들을 모델에 포함시켜 나타내면 재구성된 연속시스템 상태공간모델은 아래와 같다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 + w_1 \\ \dot{x}_2 &= -\frac{x_3}{I_e} x_2 - \frac{A_c r}{I_e} x_4 x_1 + \frac{A_c r}{I_e} x_5 + \frac{A_c r}{I_e} P_s x_6 - \frac{A_c r}{I_e} P_s x_7 x_1 - \frac{A_c r}{I_e} P_c + w_2 \\ \dot{x}_3 &= w_3 \\ \dot{x}_4 &= w_4 \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \dot{x}_5 &= w_5 \\ \dot{x}_6 &= w_6 \\ \dot{x}_7 &= w_7 \end{aligned}$$

따라서 선형화를 행한 이산모델은:

$$\begin{aligned} X(k+1) &= F(k)X(k) + U_n(k) + W(k) \\ Z(k) &= H(k)X(k) + V(k) \end{aligned} \quad (4)$$

각변위 θ_c 만을 측정하였기 때문에 측정데이터 $Z(k)$ 을 나타내는데 선형방정식이 사용되었다. 가변용량형 피스톤펌프 시스템에 대하여 각 항들은 다음과 같다.

$$F(k) = \begin{bmatrix} 1 & t_s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -C_e(x_4 + P_s x_7) & 1 - \frac{t_s}{I_e} x_3 & -\frac{t_s}{I_e} x_2 & -C_e x_1 & C_e & C_e P_s & -C_e P_s x_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$U_n(k) = \begin{bmatrix} 0 \\ -C_e P_c \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad W(k) = \begin{bmatrix} t_s w_1(k) \\ t_s w_2(k) \\ t_s w_3(k) \\ t_s w_4(k) \\ t_s w_5(k) \\ t_s w_6(k) \\ t_s w_7(k) \end{bmatrix}, \quad H^T(k) = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

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

여기서

t_s : 샘플링시간

$$C_e = \frac{A_c r}{I_e}$$

3. 시뮬레이션 및 민감도 분석

3.1 확장칼만필터를 위한 시작값들

확장칼만필터를 적용하기 위해서는 공분산행렬 Q 와 R 의 시작값들을 결정해야 한다. 시스템잡음 공분산행렬 Q 를 구하는데 있어서 이산화 되는 연속시스템이 일정한 파라메타들을 가지고 있고 백색잡음 입력들이 서로 상관되어 있지 않다면 단순

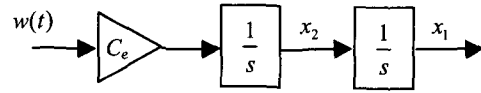


Fig. 2 Simplified variable displacement pump system

화가 가능하고 전달함수방법이 사용되어질 수 있다고 하는 Brown⁽⁹⁾ 이 제안한 단순화 방법을 따른다. 이것을 가변용량형 피스톤펌프의 모델에 적용하면 Fig. 2 와 같이 제어압력 P_c 에 중첩된 백색 입력잡음 $w(t)$ 를 갖는 가변용량형 피스톤펌프의 간략화된 모델을 얻을 수 있다.

Fig. 2 의 블록선도로부터 다음의 전달함수가 얻어졌다.

$$\begin{aligned} \frac{x_1(s)}{w(s)} &= G_1 = \frac{C_e}{s^2} \\ \frac{x_2(s)}{w(s)} &= G_2 = \frac{C_e}{s} \end{aligned} \quad (5)$$

해당하는 역변환함수들은

$$g_1(t) = C_e t$$

$$g_2(t) = C_e$$

공분산행렬 Q 는 $E[x_i x_i]$ 와 같은 랜덤프로세스 x_i 곱의 기대값 계산을 요구한다. 백색잡음 $w(t)$ 입력에 대하여 이 항들을 계산하면

$$\begin{aligned} E[x_1 x_1] &= \int_0^{\Delta t} \int_0^{\Delta t} g_1(\xi) g_1(\eta) E[w(\xi)w(\eta)] d\xi d\eta \\ &= \int_0^{\Delta t} \int_0^{\Delta t} C_e^2 \xi \eta \delta(\xi - \eta) d\xi d\eta \\ &= \frac{1}{3} C_e^2 \Delta t^3 \end{aligned} \quad (6)$$

이와 같이하여

$$\begin{aligned} E[x_1 x_2] &= \frac{1}{2} C_e^2 \Delta t^2 \\ E[x_2 x_2] &= C_e^2 \Delta t \end{aligned} \quad (7)$$

본 연구에서 사용된 사판식 피스톤펌프에 대해 $A_c r / I_e$ 로부터 계산된 C_e 와 확장칼만필터의 시간스텝크기인 Δt 는 각각 $10^{-3} m^2 rad / (Ns^2)$ 과 $10^{-3} s$ 을 갖는다. 이리하여 공분산행렬 Q 는 다음과 같이

주어진다.

$$Q = \begin{bmatrix} 10^{-15} & 10^{-12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 10^{-12} & 10^{-9} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 10^{-15} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 10^{-15} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 10^{-15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 10^{-15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 10^{-15} \end{bmatrix} \quad (8)$$

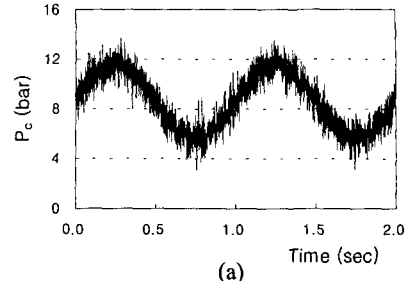
여기서 $i=3\sim7$ 에 대하여 $q_{ii}=10^{-15}$ 인 것은 추정 할 미지의 파라메타에 대한 잡음 공분산으로 $i=1, 2$ 의 q_{ii} 중에서 최저차의 차수로 정하였다.

출력 변환기의 불확실성 또는 잡음의 분산은 변환기의 정도에 따라 전체 측정범위의 0.01~0.75%로 근사될 수 있다.⁽¹⁰⁾ 이 불확실성을 가우시안 잡음원으로 하여 측정잡음 공분산행렬 R 을 결정하였다. 본 연구에 있어서 출력 변환기는 총 각변위 π 라디안 크기의 회전 포텐시오메타가 사용되었다. 변환기의 정도를 가장 열악한 경우인 0.75%를 취하면, 공분산행렬 R 은 5×10^{-4} 이다.

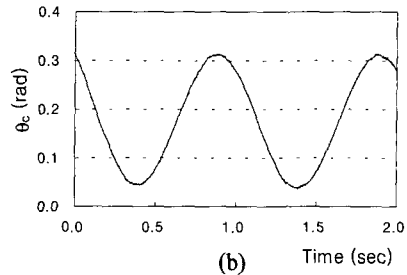
3.2 시뮬레이션 및 민감도 분석

본 연구에서는 피드백토크의 파라메타들을 추정하기 위해 펌프출구 포트를 릴리프밸브에 바로 연결하여 펌프의 토출압력을 일정하게 한다. 이 경우 식 (1)에서 P_s 가 상수이기 때문에 2 번째항과 5 번째항의 θ_c 의 계수 $rA_c K_{pr4}$ 와 $rA_c K_{pr3} P_s$ 를 확장만필터는 구별하지 못하여 값을 추정할 수 없다. 같이하여 3 번째 항과 4 번째 항도 서로간에 구별되지 않는다. 따라서 첫 단계로 P_s 을 0(탱크 압력)으로 하여 4 번째와 5 번째 항을 삭제한 상태에서 θ_{cdmp} 와 K_{pr4} , K_{pr5} 을 먼저 추정하고, 이 값들을 주지의 값으로 하여 P_s 가 0 이 아닐 때 K_{pr2} 와 K_{pr3} 를 추정하였다. Matlab 의 Simulink 를 사용하여 시뮬레이션한 결과를 Fig. 3 에 나타낸다.

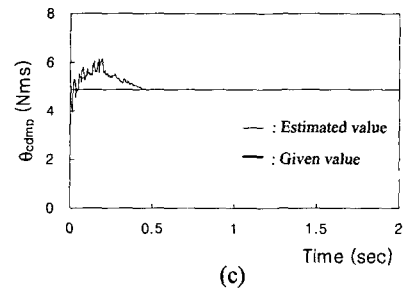
Fig. 3 의 (a)는 사판피스톤에 가해지는 제어압력 P_c 로 진폭 3.5 bar 의 1 Hz 진동에 100 Hz 로 락이 제한된 백색잡음을 첨가하였다. 이것을 사판식 피스톤펌프의 Simulink 모델에 가했을 때 사판의 각변위 θ_c 는 (b)와 같이 나온다. (b)에서는 모델 출력으로서의 각변위 θ_c 와 확장칼만필터를 통하여 최적 추정된 $\hat{\theta}_c$ 가 중첩되어 하나의 곡선처럼 보인다.



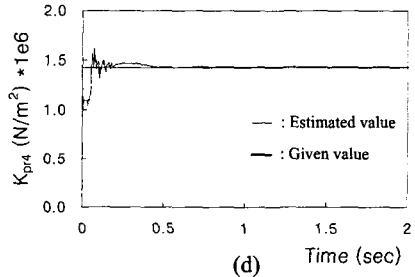
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 3 Simulation results

θ_{cdmp} 와 K_{pr4} , K_{pr5} 의 추정에 있어서 거의 0.5 초만에 모델에서 상수로 준 파라메타 값에 도달하는 것을 볼 수 있다.

본 연구에서는 Vickers 사의 가변용량형 피스톤 펌프(Model : PVB10)를 사용하였고, 시뮬레이션 해

Table 1 Simulation results to the known values

Parameter	Known Value	Estimated Value	Error
$I_e (N \cdot m \cdot s^2 / rad)$	5.38E-3		
$A_c (m^2)$	3.36E-4		
$r (m)$	5.55E-2		
$\theta_{cdmp} (N \cdot m \cdot s / rad)$	4.9	4.901	0.02%
$K_{pr4} (N / (m^2 \cdot rad))$	1424000	1433000	0.62%
$K_{pr5} (N / m^2)$	1108000	1109600	0.14%

Table 2 Estimation results for various θ_{cdmp}

	Test 1	Test 2	Test 3
$\theta_{cdmp} (N \cdot m \cdot s / rad)$	6 (22%)	7 (43%)	8 (63%)
$\hat{\theta}_{cdmp} \%$	0.0%	-0.04%	-0.09%
$\hat{K}_{pr4} \%$	0.78%	0.96%	1.18%
$\hat{K}_{pr5} \%$	0.18%	0.22%	0.27%

식을 위하여 펌프를 분해하여 제원을 측정하였다. 측정된 파라메타 값들을 확장칼만필터를 사용하여 추정한 값과 함께 Table 1에 나타낸다. 그리고 $x_i(0)$ 의 초기값은 측정된 파라메타 값을 근거로 하여 아래와 같이 하였다.

$$X(0) = (0.1, 0.5, 1e6, 1e6, 0.3, 0.4)^T \quad (9)$$

Table 1의 시뮬레이션 결과에 따르면 확장칼만 필터는 Simulink 모델에서 상수값을 갖는 θ_{cdmp} 와 K_{pr4} , K_{pr5} 의 값들을 0.62%내의 오차로 추정하였다. 그리고 민감도를 분석하고자 파라메타의 각각이 독립적으로 변화하도록 하였을 때 시뮬레이션 중에 상수로 유지된 다른 파라메타의 변화를 부당하게 추정하는지 조사하였다. 그 중 가장 큰 변화를 추정해낸 경우를 Table 2에 나타낸다.

원래는 4.9인 θ_{cdmp} 값을 6(122%)과 7(143%), 8(163%)로 증가시켰을 때 상수값을 유지해야 할 다른 파라메타의 추정값이 최고는 1.18% (\hat{K}_{pr4} 의 경우)의 오차로 추정되었으나 우려할 정도는 아니라고 사료된다. 따라서 이 기법은 상당한 신뢰도를 가지고 있으며 실험장치에 적용해 볼만하다는 결론을 얻었다.

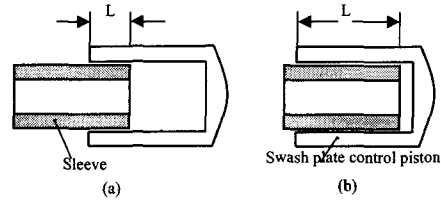


Fig. 4 Schematic diagram of contact region

4. 실험장치 및 방법

실험장치로부터 측정데이터를 수집하여 오프라인으로 확장칼만필터를 적용하였고 시뮬레이션 연구에 사용된 프로그램코드와 공분산행렬값, 시간스텝 등을 실험적 연구에 그대로 사용하였다. 실험장치는 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 함수발생기를 사용하여 1 Hz의 사인함수적 전기신호를 압력서보제어밸브에 가하여 사판제어피스톤에 제어압력 P_c 를 생성해 내고, 이 제어압력에 따라 식 (1)과 같이 사판각변위 θ_c 가 만들어진다. 확장칼만필터를 적용하기 위해 P_c 와 θ_c 를 컴퓨터의 데이터 수집시스템(100Hz 12bit A/D-D/A Board, CIO DAS 16F I/O Card)으로 수집하였다. 사용된 소프트웨어는 Matlab 환경에서 지원되는 Real-Time Windows Target을 사용하였다. 샘플링 시간간격은 0.001sec로 하였다. 기름탱크 내의 온도와 펌프표면에서의 온도를 평균하여 작동유의 실험온도로 하였고, 온도측정에는 Barnant사에서 제작한 정밀온도계(Model: 692-8000)를 사용하여 계측하였다. 실험은 작동유의 온도가 30°C~50°C인 범위 내에서 행하였고, 실험온도를 제어하기 위하여 오일쿨러를 사용하였다.

확장칼만필터를 사용하여 유압장치의 파라메타를 추정함에 있어서 타당성을 검증하기 위한 하나의 방법으로 작동유의 온도를 변화시켜 점성마찰계수의 변화를 조사하였다. 또 사판제어피스톤과 슬리브사이의 접촉길이를 변화시켜 점성마찰계수의 변화를 조사하였다. Fig. 4에 사판제어피스톤과 슬리브의 개략도와 함께 접촉길이 L 을 나타내었다. 압력서보제어밸브에서 생성된 제어압력은 슬리브를 통하여 사판제어피스톤의 내면에 작용하여 사판제어피스톤의 우측에서 작용하는 사판스프링력과 힘의 균형을 이루는 지점으로 사판제어피스톤을 변위시킨다. 한편 사판제어피스톤에 작용한 작동유는 압력제어를 위하여 슬리브와 사판제어피스톤사이의 틈새를 통하여 드레인된다. 이 때 틈

새가 미세하므로 작동유의 점도와 접촉면적에 따라 점성마찰력이 변화한다. 그림 중 (a)는 (b)에 비해서 접촉길이가 짧아서 점성마찰력이 작게 작용하는 경우이다. 평균 접촉구간의 증가에 비례하여 점성마찰계수는 증가하므로 추정의 타당성을 검증하기 위하여 3 개 구간 a, b, c로 나누어 실험하였다. 각각의 구간은 제어압력 P_c 가 $0.5 \sin 2\pi$ (bar)로 변동할 때 슬리브와 사판제어피스톤사이 접촉구간을 나타내는 것으로 구간 a는 Fig. 4의 (a)와 같이 접촉길이 L이 가장 짧은 상태를 중심으로 사판피스톤이 변위되는 구간을 나타내고, 구간 c는 Fig. 4의 (b)와 같이 접촉길이 L이 가장 긴 상태를 중심으로 한 구간을 나타낸다. 구간 a, b, c를 사판각 운동범위로 나타내면 다음과 같다.

- a 구간 : 0.03 ~ 0.2 radian
 - b 구간 : 0.1 ~ 0.25 radian
 - c 구간 : 0.17 ~ 0.3 radian
- (10)

검증을 위한 두번째 방법으로는 사판스프링을 교체하였을 때 변화된 사판스프링상수 K_{pr4} 와 초기압축에 관한 계수 K_{pr5} 을 제대로 추정해 내는지 조사하였다.

5. 결과 및 고찰

작동유의 온도가 증가할 때 점도는 지수함수적으로 작아져서⁽¹¹⁾ 점성마찰력은 감소되고 이는 점성마찰계수가 작아지는 것으로 나타난다. 확장칼만필터를 사용하여 점성마찰계수를 추정한 결과를 Fig. 5에 나타낸다. 작동유의 온도를 30°C에서 50°C까지 서서히 증가시키면서 P_c 와 θ_c 를 측정하여 추정하였다. 그림에서 \square, Δ, \circ 로 나타낸 것은 Fig. 4에서 설명한 3가지 구간 a, b, c에서 추정한 점성마찰계수의 집합이다. 실선은 추정값의 평균을 다항식 곡선보간에 의해 나타낸 것이다. 추정된 θ_{cdmp} 은 온도 증가에 따라 지수함수적으로 감소하므로 추정의 타당성을 검증할 수 있다. 또 구간 a, b, c의 순서로 평균 접촉구간이 증가할 때 점성마찰계수는 각각 증가하므로 추정의 타당성을 검증할 수 있다.

추정의 타당성을 검증하기 위해 기존의 사판스프링을 보다 큰 스프링 상수와 초기압축을 갖는 것으로 교체하여 실험하였다. 사판스프링상수 K_{pr4} 를 추정하여 Fig. 6에 나타낸다. 그림에서 Δ 는 기존의 스프링에 대한 추정값이고, \square 는 새로운

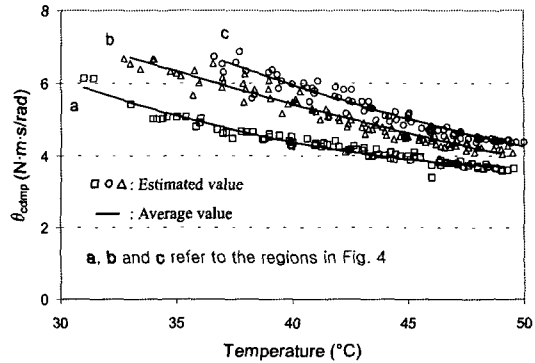


Fig. 5 Estimation of the viscous damping coefficient

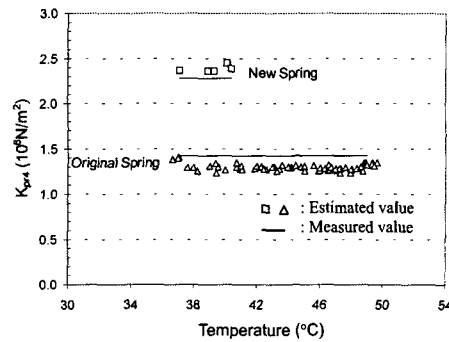


Fig. 6 Estimation results for the swash plate spring constant coefficient K_{pr4}

스프링에 대한 추정값이다. 실선은 사용된 펌프를 분해하여 측정한 값이다. 추정값이 온도의 변화에 거의 무관함을 보이므로 추정의 타당성을 검증할 수 있다. 기존 사판스프링의 측정값은 1424000 N/m^2 이고, 이것에 비하면 추정값은 -8.7%의 오차를 보인다. 그리고 새로운 스프링에 대한 측정값은 2278400 N/m^2 이고, 이것에 비하면 추정값은 4.9%의 오차를 보인다. 이 각각의 오차는 θ_c 가 바뀔 때 사판스프링의 히스테리시스 때문인 것으로 사료되나 원인은 규명되지 않았다.

사판스프링의 초기압축에 관한 계수 K_{pr5} 를 추정하여 Fig. 7에 나타낸다. 그림에서 Δ 는 기존의 스프링에 대한 추정값이고, \square 는 새로운 스프링에 대한 추정값이다. 실선은 사용된 펌프를 분해하여 측정한 값이다. 추정값이 온도의 변화에 거의 무관함을 보이므로 추정의 타당성을 검증할 수 있다. 기존 사판스프링의 측정값은 1108000 N/m^2 이고, 이것에 비하면 추정값은 -9.7%의 오차를 보인다. 그리고 새로운 스프링에 대한 측정값은 1403800 N/m^2 이고, 이것에 비하면 추정값은 -2.4%의 오차를 보인다.

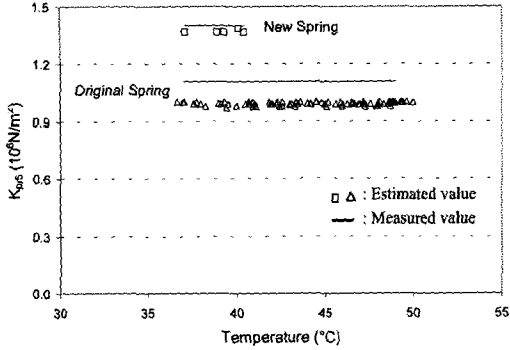


Fig. 7 Estimation results for the swash plate spring pretension K_{pr5}

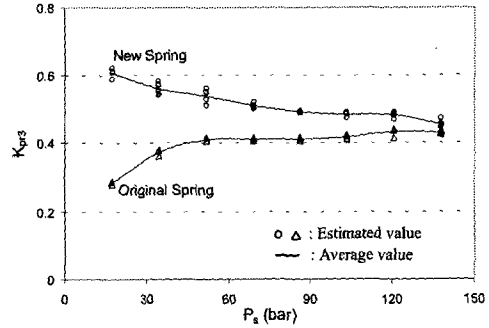


Fig. 9 Estimation results for the swash plate spring constant K_{pr3}

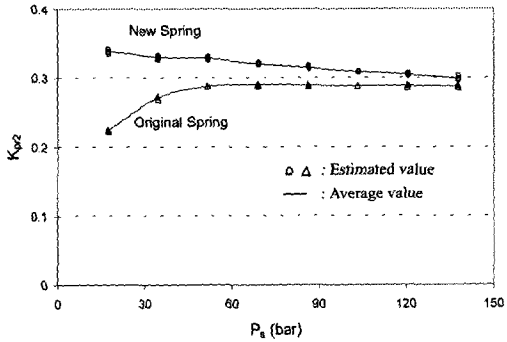


Fig. 8 Estimation results for the swash plate spring pretension K_{pr2}

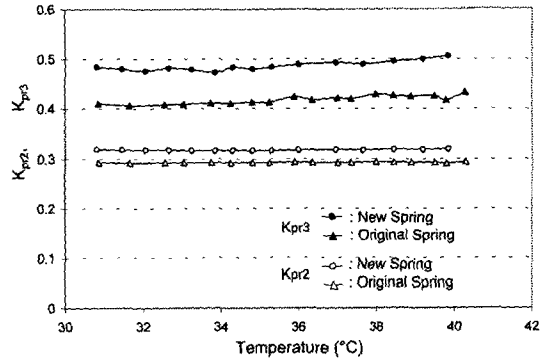


Fig. 10 Estimation results for the swash plate spring coefficients to temperature (at $P_s=86\text{bar}$)

이 각각의 오차는 θ_c 가 바뀔 때 사판스프링의 히스테리시스 때문인 것으로 사료되나 원인은 규명되지 않았다.

Fig. 8 과 Fig. 9 는 피드백토크의 스프링 초기압축효과계수 K_{pr2} 와 스프링상수효과계수 K_{pr3} 를 나타낸 것으로 전단계의 추정과정을 통하여 얻어진 θ_{camp} 과 K_{pr4} , K_{pr5} 의 값들을 사용하여 추정되었다. 각각의 실험에서 P_s 는 일정값을 갖는다. 스프링상수와 초기압축력이 서로 다른 2 개의 스프링을 사용하여 비교하였다. P_s 가 50bar 이상 증가할 때 초기의 스프링압축력에 비해 P_s 에 따른 피드백토크의 스프링 압축효과가 증대되어 피드백토크의 스프링 초기압축효과계수 K_{pr2} 와 스프링상수효과계수 K_{pr3} 는 일정한 값으로 수렴하므로 추정의 타당성을 검증할 수 있다.

Fig. 10 은 공급압력 86 bar 의 조건에서 온도의 변화에 따른 추정값 K_{pr2} 와 K_{pr3} 의 변화를 보인다. 두 파라메타가 온도의 변화에 거의 무관하므로 추정의 타당성을 검증할 수 있다.

6. 결론

피스톤펌프의 성능과 관계되는 파라메타 값들을 추정하기 위하여 시뮬레이션 및 실험값에 확장칼만필터 기법을 사용하였다. 실험방법으로는 주어진 진폭과 주기를 갖고 사인함수적으로 변동하는 제어압력을 사판제어 피스톤에 가하고 이에 따른 사판각변위를 계속하여 확장칼만필터 기법을 적용하는 방법을 사용하였고 그 결과 아래의 결론을 얻었다.

(1) Simulink 모델을 사용한 시뮬레이션에서는 각 파라메타들을 매우 높은 정도(오차: 0.62%)로 추정하였다

(2) 실험값을 사용한 추정에서 유온의 변화와 작동구간의 변화에 따른 점성마찰계수의 변화를 추정할 수 있었다.

(3) 실험값을 사용한 스프링에 관련된 파라메타

들의 추정은 최고 9.7%의 오차를 보이므로 본 연구에서 사용한 실험방법으로는 이들 파라메타를 정확히 추정하기는 어렵다.

(4) 공급압력 P_s 가 50bar 이상 증가할 때 스프링 초기압축과 스프링상수의 효과로 작용하는 K_{pr2} 과 K_{pr3} 의 값은 시스템에 사용된 스프링에 관계없이 일정한 값으로 수렴한다.

참고문헌

- (1) Ramden, T., 1995, "On Condition Monitoring of Fluid Power Pumps and Systems," Ph.D Thesis, Fluid Power Center, Department of Mechanical Engineering, Linkoping University, Sweden.
- (2) Rosa, A., Mourre, D. and Burton, R., Bitner, D., 2000, "Estimating Parameters in a Proportional Solenoid Valve," *Bath Workshop on Power Transmission and Motion Control*, Bath, UK., 15-18, Sept.
- (3) Khoshzaban-Zauarehi, M., 1997, "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.
- (4) Park, H. H., 1999, "Parameter Estimation of Hydraulic System Using Kalman Filter," *Transactions of the KSME, A*, Vol. 23, No. 12, pp. 2167~2175.
- (5) Kavanagh, G., 1987, "The Dynamic Modelling of An Axial Piston Hydraulic Pump," M.Sc. Thesis, University of Saskatchewan.
- (6) Manring, N. and Johnson, R., 1994, "Swivel Torque within a Variable-Displacement Pump," *46th National Conference on Fluid Power*, p. 13.
- (7) Akers, A. and Zeiger, G., 1985, "Torque on the Swash plate of an Axial Piston Pump," *Transactions of the ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, Vol. 107, p. 220.
- (8) Kim, H. D., Cho, K. R., Kim, H. J. and Park, S. H., 1996, "Early Orbit Determination Using Iterated Extended Kalman Filter," *Journal of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 24, pp. 1114~1127.
- (9) Brown, R. and Hwang, P., 1997, *Introduction to Random Signals and Applied Kalman Filtering*, John Wiley & Sons, Inc.
- (10) Candy, J. and Rozsa, R., 1980, "Safeguards Design for a Plutonium Concentrator - An Applied Estimation Approach," *Automatica*, Vol. 16, pp. 615~627.
- (11) Song, C. S., 1994, *Hydraulics and Pneumatics*, Gi-Sul.