

비선형 슬라이딩 면을 이용한 온수난방 순환펌프 시스템의 온도 제어

Temperature Control for a Hot Water Heating Circulating Pump System Using a Nonlinear Sliding Surface

안 병 천, 장 효 환

(Byung-Cheon Ahn and Hyo-Whan Chang)

Abstract : Digital variable structure controller(DVSC) is implemented to control the temperature for the hot water heating circulating pump control system. For the DVSC, a control algorithm is suggested, which using a nonlinear sliding surface and a PID sliding surface outside and inside of steady state error boundary layer, respectively. Smith predictor algorithm is used for the compensation of long dead time. The DVSC of the suggested algorithm yields improved control performance compared with the one of existing algorithm. The system responses with the suggested DVSC shows good responses without overshoot and steady state error in spite of heating load change. By decreasing sampling time, dead time and rise time are increasing, and system output noise by flow dynamics is amplified.

Keywords : digital variable structure control (DVSC), quasi-sliding mode, steady state error boundary layer, nonlinear sliding mode surface, PID sliding mode surface, circulating pump speed control, smith predictor

I. 서론

온수난방 순환펌프시스템은 외기의 온도변화 및 온수에 의한 열량공급으로 인하여 시간이 경과함에 따라 난방부하가 변화하게 되며, 실내조명의 유무, 재실자수의 변동 그리고 출입문의 열고 닫음에 따른 실내 공기온도의 변화등의 외란이 발생하게 된다. 그리고 순환펌프가 가동되어 열원설비인 보일러로부터 공급된 온수가 각 세대에 도달되어 방바닥 구조체를 덥힌 후 실내 공기온도를 상승시키는 시점까지는 긴 지연시간(dead time)이 존재한다. 따라서 이러한 계통의 효율적인 제어를 위해서는 지연시간의 보상이 이루어지고 외기 온도변화와 난방부하의 변화로 인한 시스템 파라미터의 변동이나 외란등에 대해 둔감한, 즉 강인하고 안정도를 보장받을 수 있으며, 실제 구현이 용이한 견실한 제어기의 도입이 요구된다.

공정제어 시스템과 같이 비교적 긴 샘플링 시간을 갖는 이산치(discrete time) 가변구조 제어시스템에서는 시스템의 상태들이 스위칭 평면을 지나도 새로운 제어입력이 시스템에 출력되기 전까지, 즉 샘플링 시간 동안 현재의 제어입력에 의해 상태계적은 계속 이동하게 되어 제어입력상의 시간 지연이 없어도 상태계적이 떨림(chattering) 현상을 나타내는 준 슬라이딩 모드(quasi-sliding mode)[1]가 발생하지만 연속치(continuous time) 가변구조 제어시스템과 같이 시스템의 파라미터의 변화 및 외란에 둔감한 응답특성이 나타난다.

따라서 본 논문에서는 대단위 공동주택 온수난방 순환펌프시스템을 간략화한 모형 실험장치(pilot-plant)를 대상으로 가변속도 순환펌프를 이용하고, 제어기로서 디지털 가변구조제어기를 구현하였는데, 여기서 종래의 선형 스위칭 함수로 표시된 슬라이딩 면을 이용한 경우 원점으로서의 수렴이 늦어[2], 수렴속도를 개선시키고 궁극적으로는 정상상태오차를 제거하기 위해 정상상태오차에 대한 경계치를 설정하여 경계치밖에서는 비선형 스위칭 함수로, 경계치내에서는 PID

스위칭 함수로 각각 표시된 슬라이딩 면을 사용하는 방법이 제안되었다. 또한 지연시간의 보상은 디지털 Smith 예측기 [3]를 사용하였다. 이렇게 구성된 제어기를 이용하여 제어기 계수의 영향, 지연시간 보상기의 영향, 샘플링 시간의 변화 등이 시스템 응답특성에 미치는 영향등을 고찰하였다.

II. 디지털 제어기

가변구조제어는 오차 $e_1(k)$ 와 오차의 시간변화율 $e_2(k)$ 로 구성된 위상 평면상에서 오차가 스위칭 면을 따라 원점으로 수렴하도록 제어기의 구조를 가변적으로 변화시켜 주는 방법으로서, 이러한 스위칭 면을 슬라이딩 면이라 부른다. 재래식 가변구조제어 방법에서는 선형 스위칭 함수로 표시된 슬라이딩 면[4]을 사용하였는데, 본 논문에서는 정상상태오차에 대한 경계치 ε 를 설정하여 $|e_1(k)| > \varepsilon$ 구간에서는 비선형 스위칭 함수로, $|e_1(k)| \leq \varepsilon$ 구간에서는 PID 스위칭 함수로 각각 표시된 슬라이딩 면을 사용하는 수정된 방법을 제안하였다(그림 1).

여기서 제안된 비선형 스위칭 함수의 경우 도달기간을 줄여주기 위하여 시변(time varying) 스위칭 함수의 개념을 도입하였으며, 슬라이딩 모드에서 원점으로 접근되면서 기울기는 증가되어 오차의 감속 크기를 증가시켜 주게 된다. 또한 온수난방 순환펌프시스템의 특성으로 나타나는 난방부하의 변동은 정상상태오차를 유발시킬 수가 있는데, 이를 제거시켜 주기 위해 정상상태오차의 경계치를 선정하여 경계치내에서 PID 스위칭 함수를 사용하도록 하였다.

본 논문에서는 온수난방 순환펌프시스템에서 순환펌프의 3상 유도전동기에 대한 가변전압과 가변주파수(VVVF)의 교류 전원장치인 인버터의 구동 직류전압과 보일러 출구에서 바다패널 및 냉각탱크(이후 열교환기라 칭함)를 지나 열교환기출구에 도달되는 온수의 온도와의 관계식인 플랜트 전달함수를 근사화된 지연시간이 존재하는 2차 함수로 가정 [5]하였다. 따라서, 단일 입력을 갖는 시스템에서 입력의 지연시간(d)이 존재하는 이산치 상태방정식을 기준입력인 설정온도 r 과 오차 $E(k)=[e_1(k), e_2(k)]^T$ 에 대한 차분방정식으로 나타내면 다음과 같이 표현된다.

$$E(k+1) = A \cdot E(k) + B \cdot u(k-d) + D \cdot r \quad (1)$$

여기서 A, B, D는 시스템 행렬을 나타낸다.

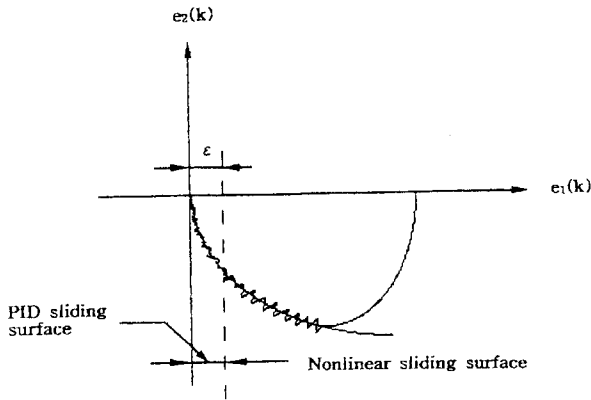


그림 1. 가변구조 제어기를 위한 슬라이딩 면.
Fig. 1. Sliding surface for a variable structure controller.

공정제어 시스템과 같은 긴 지연시간을 갖는 시스템에서는 제어기의 출력에 비해 지연된 시스템의 출력이 귀환됨으로써 예기치 못한 정상상태오차, 진동 및 발산등의 현상이 발생할 가능성이 크며, 시스템의 특성방정식에 지연요소가 존재하여 시스템의 안정성에 좋지 못한 영향을 주게 된다. 따라서 이러한 지연시간의 보상을 위하여 본 논문에서는 Smith 예측기(predictor)를 적용하였다(그림 2).

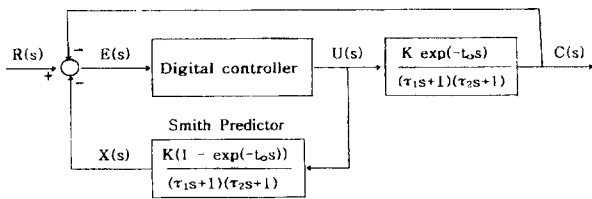


그림 2. 모형 온수난방 순환펌프 제어시스템의 블록선도.
Fig. 2. Block diagram of a hot water heating circulating pump system.

여기서, 예측기의 연속치 전달함수는 다음식과 같이 차분방정식으로 유도한 후 디지털 제어기에 추가하여 사용하였다.

$$\begin{aligned} x(k) = & P_1 \cdot x(k-1) - P_2 \cdot x(k-2) + P_3 \cdot u(k) \\ & + P_4 \cdot u(k-1) + P_5 \cdot u(k-2) - Q_1 \cdot u(k-d-1) \\ & - Q_2 \cdot u(k-d-2) - Q_3 \cdot u(k-d-3) \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, P₁, P₂, P₃, P₄, P₅, Q₁, Q₂, Q₃는 연속치 전달함수에서의 K, τ₁, τ₂, t₀(그림 2)의 함수이다. 따라서, 그림 2로 부터 알 수 있듯이 Smith 예측기가 추가되었을 경우의 상태방정식은 다음과 같은 식으로 표현될 수 있다.

$$E(k+1) = A \cdot E(k) + B \cdot u(k) + D \cdot r \quad (3)$$

본 논문에서 적용된 디지털 가변구조 제어기에 대한 내용은 다음과 같다. 먼저, 이산치 가변구조 제어이론에서 준 슬라이딩 모드의 존재 조건에 대해 Sarpturk[1]는 스위칭 평면에서 슬라이딩 모드의 발생 및 상태체적의 수렴을 위해 다음과 같은 필요·충분조건을 제시하였다.

$$\begin{aligned} [S(k+1) - S(k)] \cdot \text{sign}(S(k)) &< 0 \\ [S(k+1) + S(k)] \cdot \text{sign}(S(k)) &> 0 \end{aligned} \quad (4)$$

본 논문에서는 정상상태오차에 대한 경계치 ε에 대해 |e₁(k)| > ε 구간에서의 비선형 스위칭 함수는 다음과 같이 제안 사용하였다.

$$S(k) = e_2(k) + \frac{C|e_1(k-2)|}{|e_1(k-1)| + \delta} e_1(k) \quad (5)$$

여기서, C와 δ는 양의 실수를 나타낸다. 따라서, 시스템이 슬라이딩 모드내에 유지되도록 하는 등가 제어입력 u_{eq}(k)은 다음과 같이 구해진다.

$$u_{eq}(k) = - (G_1 B)^{-1} ((G_1 A - G_2) E(k) + D \cdot r) \quad (6)$$

여기서, G₁ = [C₁ 1], G₂ = [C₂ 1], det(G₁B) ≠ 0 이며, C₁과 C₂는 다음과 같이 표현된다.

$$C_1 = \frac{C |e_1(k-1)|}{|e_1(k)| + \delta}, \quad C_2 = \frac{C |e_1(k-2)|}{|e_1(k-1)| + \delta} \quad (7)$$

그리고, 정상상태오차에 대한 경계치 ε에 대해 |e₁(k)| ≤ ε 구간에서의 PID 스위칭 함수는 적분 방법으로 사다리꼴 근사화 방법을 이용하면 다음과 같은 이산치 전달함수를 얻게 된다[6].

$$S(z) = K_p e_1(z) + K_i \frac{T(z+1)}{2(z-1)} e_1(z) + K_d \frac{z-1}{T \cdot z} \quad (8)$$

또한, 이식을 역 Z변환하면 다음과 같은 차분 방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} S(k) = & S(k-1) + K_1 \cdot e_1(k) + K_2 \cdot e_1(k-1) \\ & + K_3 \cdot (e_2(k) - e_2(k-1)) \end{aligned} \quad (9)$$

여기서, K₁, K₂ 및 K₃은 K_p, K_i, K_d 및 샘플링 시간 T의 함수이다. 따라서, 등가제어입력은 다음과 같이 표현된다.

$$u_{eq}(k) = - (R_1 B)^{-1} ((R_1 A - R_2) E(k) + D \cdot r) \quad (10)$$

여기서, R₁=[K₁ K₃] 이고, R₂=[K₂ -K₃]이다. 따라서, 앞의 두 슬라이딩 평면에 대한 등가제어입력의 형태는 동일함을 알 수 있으며((6), (10)), 이에 대한 슬라이딩 모드에서의 동특성을 고려하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} E(k+1) = & [A - B(R_1 B)^{-1} (R_1 A - R_2)] \cdot E(k) \\ & + [I - B(R_1 B)^{-1}] \cdot D \cdot r \\ = & A_{eq1} \cdot E(k) + [I - B(R_1 B)^{-1}] \cdot D \cdot r \end{aligned} \quad (11)$$

여기서, R₁과 R₂대신에 G₁과 G₂를 사용할 경우 비선형 슬라이딩 평면에 대한 동특성의 관계식이 얻어진다.

그리고, 본 논문에서는 제어입력 u(k)을 시스템이 슬라이딩 모드내에 유지되도록 하는 등가제어입력 u_{eq}(k), 가변제어입력인 선형 연속귀환제어(u_{n1}(k) = S₁ · S(k))와 비선형 연속귀환제어[7](u_{n2}(k) = S_{n1} · S(k) / (|S(k)| + v)), v는 양의 실수)로 구성하였다.

$$u(k) = u_{eq}(k) + u_{n1}(k) + u_{n2}(k) \quad (12)$$

이때 (4)를 만족하기 위한 제어기의 이득(S₁, S_{n1})을 구하면 다음과 같은 부등식이 된다.

$$\begin{aligned} 1) \quad H \cdot B &< 0 \\ 0 &< S_1 < -2 / (H \cdot B) \end{aligned}$$

$$0 < S_{nl} < \frac{(2H \cdot BS_1) \cdot (|S(k)| + \delta)}{H \cdot B} \quad (13)$$

2) $H \cdot B > 0$

$$\begin{aligned} -2 / (H \cdot B) < S_1 < 0 \\ \frac{(2 + H \cdot BS_1)(|S(k)| + \delta)}{H \cdot B} < S_{nl} < 0 \end{aligned} \quad (14)$$

여기서, H는 비선형 스위칭함수의 경우는 G_1 을 의미하고, PID 스위칭 함수일 경우는 R_1 을 의미한다.

III. 실험 결과 및 검토

그림 3은 마이크로 컴퓨터를 이용한 모형 온수난방 순환 펌프시스템의 제어계통을 간략하게 나타낸 것이다. 본 논문에서는 온수난방 순환펌프시스템을 지연시간이 존재하는 2차 시스템으로서 가정하고, 순환펌프의 회전수를 3000rpm의 계단입력을 주었을 때에 대한 시스템의 개회로 과도응답 특성곡선을 실험적으로 구하였는데, 이를 이용하여 시스템의 전달함수를 구하면 (15)와 같이 된다.

$$G(s) = \frac{0.01442 \exp(-90s)}{(7.16s+1)(12.39s+1)} \quad (15)$$

또한, 샘플링 시간을 1 sec로 하여 오차에 대한 이산치 상태방정식을 구하면 다음식과 같이 되며, 이식은 (1)의 형태로 표현되어진다.

$$\begin{aligned} E(k+1) = & \begin{bmatrix} 0.09478 & 0.1882 \\ -0.0631 & -0.0059 \end{bmatrix} E(k) \\ & + \begin{bmatrix} 0.00285 \\ -0.00548 \end{bmatrix} u(k-90) + \begin{bmatrix} -0.00285 \\ -0.00548 \end{bmatrix} r \end{aligned} \quad (16)$$

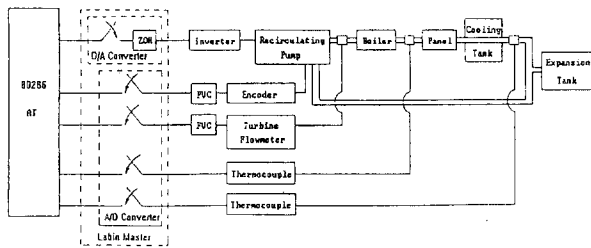


그림 3. 마이크로 컴퓨터를 이용한 모형 온수난방 순환펌프시스템의 제어계통의 개략도.
Fig. 3. Schematic of a microcomputer-based hot water heating circulating pump system.

그림 4는 회전수를 3000rpm의 계단입력을 주었을 때에 대해 실험적으로 구한 시스템의 개회로 과도응답 특성에서의 각 상태값을 나타낸 그림이다. 먼저 그림에서 실선의 오차변화 $e_2(k)$ 는 $e_1(k)$ 의 시간에 따른 변화를 나타내며, 점선의 $e_2(k)$ 는 $S(k)=0$ 인 경우의 오차변화 $e_2(k)$ 를 나타낸다. 또한 슬라이딩 면의 기울기에 해당되는 $C|e_1(k-2)|/(|e_1(k-1)|+\delta)$ 에서 $C=1$ 인 $|e_1(k-2)|/(|e_1(k-1)|+\delta)$ 값의 변화도 같이 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 정상상태오차가 줄어들면서 슬라이딩 면의 기울기 값은 서서히 증가하게 되나, 정상상태부근에 접근되면서 부터는 기울기가 갑자기 줄어들고 있으며, 기울기가 증가하는 구간에서는 오차의 변화 즉, 오차속도를 감속시켜 빠른 원점으로의 접근을 유도하게 된다. 따라서 본 논문에서는 정상상태오차의 크기를 고려한 스위칭 변환의 경계치 ϵ 를 선정하여 $|e_1(k)| > \epsilon$ 구간에서는

슬라이딩 면의 기울기가 증가되도록 하는 비선형 스위칭 함수를 사용하고, $|e_1(k)| \leq \epsilon$ 구간에서는 PID 스위칭 함수를 각각 사용하였는데, 그 경계치는 실험적으로 양호한 응답특성을 나타내는 값을 선정하였다.

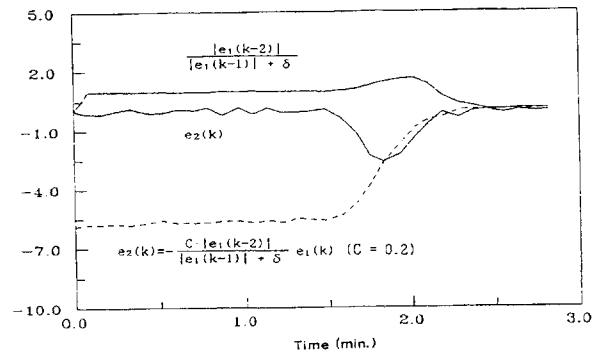


그림 4. 과도응답특성 곡선에서의 파라미터들의 변화.
Fig. 4. Various parameter transients for process reaction curve.

비선형 슬라이딩 면의 기울기인 $C|e_1(k-2)|/(|e_1(k-1)|+\delta)$ 에서 C 값의 선정은 $S(k)=0$ 를 이용하여 $e_2(k) = -C|e_1(k-2)|/(|e_1(k-1)|+\delta) \cdot e_1(k)$ 의 값을 과도응답특성곡선으로부터 실제 측정 계산되는 $e_2(k)$ 값 보다 적은 값을 갖도록 선정하였는데 선정된 값은 $C=0.2$ 이다(그림 4). 또한, (13)과 (14)에서 (16)의 B를 고려하면 $G_1B < 0$ 및 $R_1B < 0$ 이 되며, 제어기의 이득(S_1, S_{nl})의 최소구간을 구하기 위하여 $|G_1B|_{\max}$ 일 때의 값을 적용하면 비선형 슬라이딩 면의 기울기의 값의 최대치를 고려하면 G_1 은 $[0.2 \times 1.5 \ 1]$ 이 된다. 따라서 (13)으로부터 선형 연속귀환제어기 이득은 $0 < S_1 < 315$, 비선형 연속 귀환제어기 이득은 $S_1=100, \delta=1$ 로 하였을 때를 기준조건으로 하면 $0 < S_{nl} < 215$ 이 된다.

또한 (6)으로 나타내어지는 시스템의 안정도에 관해서는 본 논문에서 사용된 시스템의 변수들이 서서히 변화하는 것을 고려하여 시스템이 안정하다고 가정[8]하였으며, PID 스위칭 함수의 계수 K_p, K_i, K_d 값의 선정은 (11)로 나타내어지는 시스템이 안정하기 위한 조건으로서 A_{eq} 의 고유치가 단위원내의 값을 갖도록 시행오차법에 의해 구하여 $K_p=0.2, K_i=0.2, K_d=1.0$ 로 선정하였다. 이 때의 고유치 값은 -0.7와 0.85 이다. 그리고 귀환제어이득은 각각 $0 < S_1 < 278$ 와 $0 < S_{nl} < 183$ 으로 구해진다. 그리고 스위칭 함수의 전환을 위한 오차에 대한 경계치 ϵ 는 비선형 스위칭 함수만을 사용하였을 때의 응답 특성에서 발생하는 정상상태오차의 크기를 고려하여 실험적으로 선정하였다.

실험에서 사용한 디지털 제어기의 제어 프로그램은 파스칼(Pascal)언어를 사용하였으며, 기준 샘플링 시간은 온수의 유동에 따라 발생하는 온도 측정값의 진동과 연산 시간을 고려하여 1sec로 하였다.

먼저 그림 5는 제안된 디지털 가변구조제어의 기준조건 ($C: 0.2, S_1: 100, S_{nl}: 50, \epsilon: 3$)에 의한 모형 온수난방 순환 펌프시스템의 과도응답을 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 보일러출구 온수온도는 순환펌프가 가동되기 시작한 직후에 보일러내의 온수가 출구로 유출되면서 약간 상승하다가 전체 배관내에 잠겨있던 저온수가 보일러로 유입되면서 급강하하며, 다시 서서히 상승하면서 단속제어특유의 진동현상을 보였다. 열교환기내의 냉각수 온도는 초기 15°C에서 서서히 온도가 상승됨을 볼 수 있으며, 이로 인해 난방 부하는 차츰 감소하게 됨을 알 수 있다. 또한 열교환기 출구 온수온도는 온수순환에 의한 지연시간후 기준온도인

40°C에 오버슈트없이 도달하였으나 정상상태에 도달한 후 출구 온수온도가 잠깐 떨어진 것은 보일러에서 공급된 온수의 온도가 초기에 급강하한 외란에 의한 현상으로 생각된다.

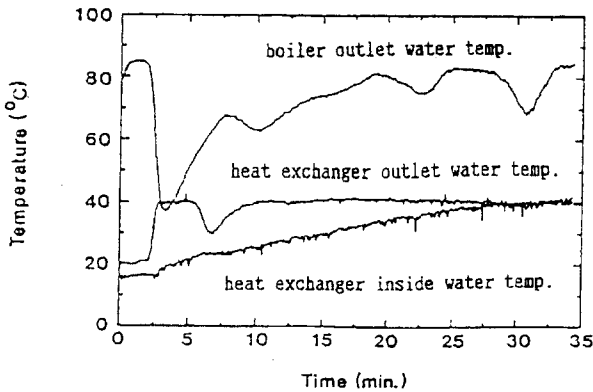


그림 5. 제안된 디지털 가변구조제어기에 의한 모형 시스템의 계단입력 응답특성. (C=0.2, S_I=100, S_{nl}=50, ε=3, T=1sec)
 Fig. 5. Step responses of the pilot plant system with suggested digital VSC. (C=0.2, S_I=100, S_{nl}=50, ε=3, T=1sec)

그림 6은 제안된 디지털 가변구조제어의 기준조건에 있어서 스위칭 함수의 기울기 상수 C 값을 0.4와 0.1로 각각 하였을 때의 응답특성을 나타낸 것이다. C 값이 0.4인 경우는 상승시간은 감소하나 정상상태에서 과도한 진동현상이 발생하게 되며, 0.1인 경우는 진동현상은 발생하지 않으나 긴 상승시간을 나타내는 바람직하지 못한 응답특성을 나타내고 있음을 볼 수 있다.

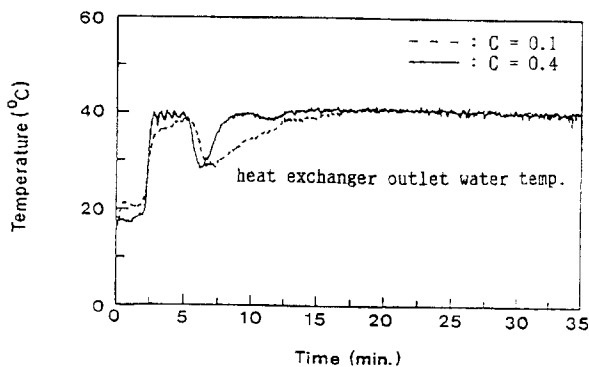


그림 6. 스위칭 함수 기울기 값 C에 대한 제안된 디지털 가변구조제어기의 모형시스템의 계단입력 응답 특성(S_I=100, S_{nl}=50, ε=3, T=1sec).
 Fig. 6. Step responses of the pilot plant system with suggested digital VSC for different switching surface slope gain C (S_I=100, S_{nl}=50, ε=3, T=1sec).

그림 7은 비선형 스위칭 함수에서 PID 스위칭 함수로 변경을 위한 정상상태오차의 경계치 값 ε을 변화시켰을 때의 응답특성을 나타낸 것이다. 경계치 값 ε이 1인 경우는 초기 정상상태 도달시 정상상태오차가 1보다 큰 값을 갖게 되어 PID 스위칭 함수로의 변환이 이루어지지 못해 정상상태오차가 발생하고 있으며, 시간 변화에 따라 난방부하가 줄어들어 대해서도 기준온도를 유지하지 못하고 계속 상승하는 특성을 나타내고 있다. 반면에 ε이 5인 경우는 PID 스

위칭 함수로의 변환이 이루어져 정상상태오차는 제거되나, 적분기에 의한 제어기의 출력의 증가로 초기의 정상상태에서 진동 현상이 발생하고 있음을 볼 수 있다.

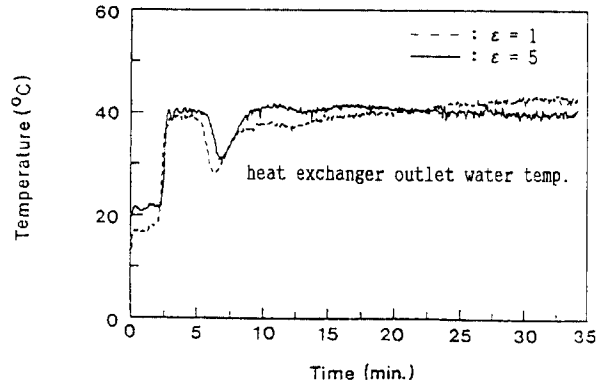


그림 7. 경계치 값 ε에 대한 제안된 디지털 가변구조 제어기의 모형 시스템의 계단입력 응답특성 (C=0.2, S_I=100, S_{nl}=50, T=1sec).
 Fig. 7. Step responses of the pilot plant system with suggested digital VSC for different boundary layer thickness ε (C=0.2, S_I=100, S_{nl}=50, T=1sec).

그림 8은 디지털 가변구조 제어기의 선형 연속귀환 제어기의 이득 S_I을 변화시켰을 때의 응답특성으로서 S_I이 200인 경우는 정상상태도달 후 진동현상이 발생하며, S_I이 50인 경우는 초기에 정상상태에 도달되지 못하고여 상승시간이 길어지는 특성이 나타남을 볼 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 선형 연속귀환 제어기의 이득을 100으로 선정하였다.

그림 9는 디지털 가변구조 제어기의 비선형 연속귀환 제어기의 이득 S_{nl}을 변화시켰을 때의 응답특성으로서 S_{nl}이 200인 경우는 큰 제어입력의 발생으로 지연시간은 감소되고 있으나 17분 경과후에 갑작스런 언더슈트가 발생하여 정상상태오차를 유발시키는 바람직하지 못한 현상이 나타났으며, S_{nl}이 20인 경우는 이러한 현상은 나타나지 않고는 있으나 지연시간이 길어지는 특성을 나타냄을 볼 수 있다. 따라서 본 논문에서는 S_{nl}을 50으로 선정하였다.

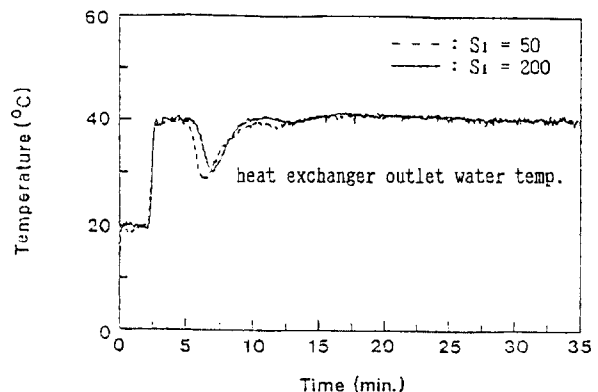


그림 8. 선형 연속귀환 제어기 이득에 대한 제안된 디지털 가변구조제어기의 모형 시스템의 계단입력 응답특성 (C=0.2, S_{nl}=50, ε=3, T=1sec).
 Fig. 8. Step responses of the pilot plant system with suggested digital VSC for different linear continuous feedback controller gain S_I (C=0.2, S_{nl}=50, ε=3, T=1sec).

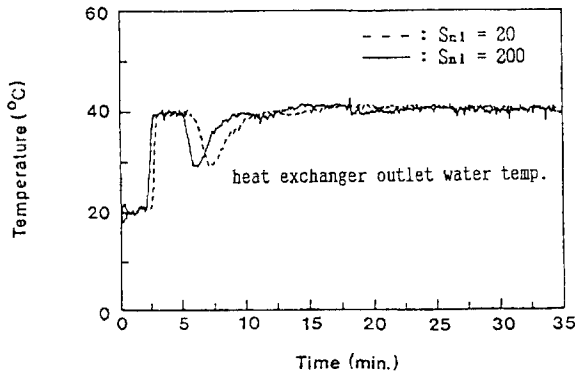
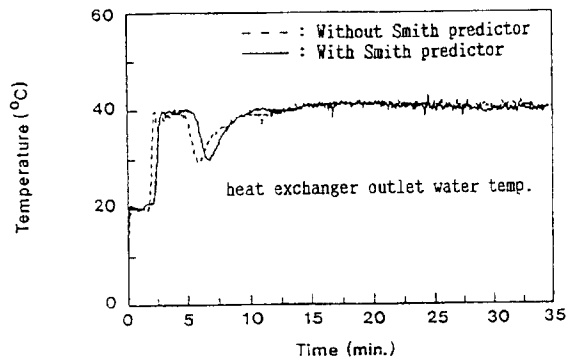
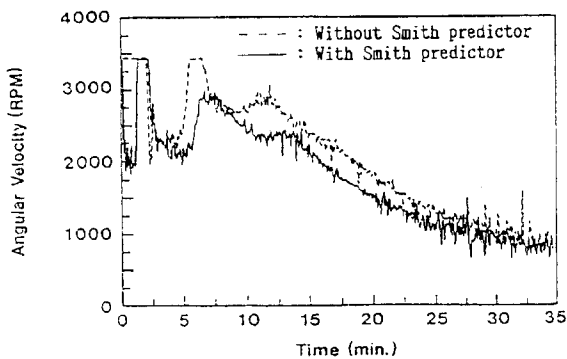


그림 9. 비선형 연속귀환 제어기 이득에 대한 제안된 디지털 가변구조제어기의 모형 시스템의 계단 입력 응답 특성 ($C=0.2, S_I=100, \epsilon=3, T=1\text{sec}$).
 Fig. 9. Step responses of the pilot plant system with suggested digital VSC for different nonlinear continuous feedback controller gain S_{nl} ($C=0.2, S_I=100, \epsilon=3, T=1\text{sec}$).



(a)



(b)

그림 10. Smith 예측기에 대한 제안된 디지털 가변구조 제어기의 모형 시스템의 계단입력 응답 특성 ($C=0.2, S_I=100, S_{nl}=50, \epsilon=3, T=1\text{sec}$).
 Fig. 10. Step responses of the pilot plant system with suggested digital VSC with and without Smith predictor ($C=0.2, S_I=100, S_{nl}=50, \epsilon=3, T=1\text{sec}$).

그림 10은 지연시간의 보상을 위하여 Smith 예측기를 추가한 경우와 추가하지 않은 경우에 대한 응답특성을 비교한 그림이다. 예측기를 추가하지 않은 경우는 순환펌프의 회전 속도(그림 8(b))가 초기에 최고치를 유지함을 볼 수 있는데 이것은 제어기 출력이 포화상태(saturation)를 나타내는 것으로서, 이로 인해 열교환기 출구온수 온도에 있어서는 예

측기를 추가한 경우에 비해 지연시간은 감소시켜 주고 있으나, 정상상태에서 커다란 진동(언더슈트) 현상이 발생하는 바람직하지 못한 응답특성을 나타내고 있음을 알 수 있다.

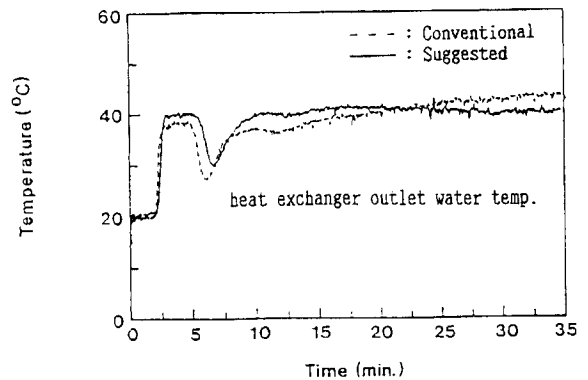


그림 11. 기존의 디지털 가변구조제어기($C=0.4, \epsilon=0$)와 제안된 것($C=0.2, \epsilon=3$)과의 모형 시스템의 계단 입력 응답특성 ($S_I=100, S_{nl}=50, T=1\text{sec}$).
 Fig. 11. Step responses of the pilot plant system with conventional($C=0.4, \epsilon=0$) and suggested ($C=0.2, \epsilon=3$) digital VSC ($S_I=100, S_{nl}=50, T=1\text{sec}$).

그림 11은 제안된 디지털 가변구조제어($C=0.2, \epsilon=3$)와 종래의 선형 스위칭 함수만을 이용한 디지털 가변구조제어($C=0.4, \epsilon=0$)를 각각 적용하였을 때의 과도응답특성을 나타낸 것이다. 종래의 선형 스위칭 함수만을 이용한 경우에서, $C=0.4$ 는 예비실험을 통하여 양호한 응답특성을 보였을 때의 값이다. 제안된 디지털 가변구조제어를 적용한 경우, 종래의 디지털 가변구조제어를 적용한 경우에 비해 열교환기 출구온수온도의 응답특성이 더 우수 하였고 정상상태오차도 없음을 볼 수 있다.

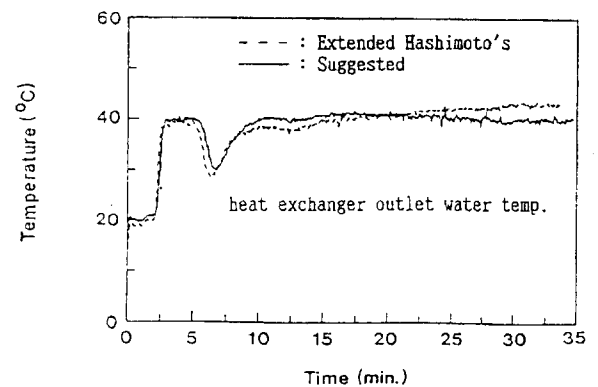


그림 12. Hashimoto의 이론을 확장 적용한 디지털 가변 구조제어기($\epsilon=2$)와 제안된 것($\epsilon=3$)과의 모형 시스템의 계단입력 응답특성 ($S_I=100, S_{nl}=50, T=1\text{sec}$).
 Fig. 12. Step responses of the pilot plant system with extended Hashimoto's ($\epsilon=2$) and suggested ($\epsilon=3$) digital VSC($C=0.2, S_I=100, S_{nl}=50, T=1\text{sec}$).

그림 12는 스위칭 함수의 변환을 위한 경계치의 선정방법으로서 본 논문에서 제안된 방법과 스위칭 함수의 크기를 고려하는 Hashimoto[9]가 제안한 방법을 디지털 이론으로 확장 적용한 ($|S(k)| > \epsilon, |S(k)| \leq \epsilon$) 경우에 대해 각각의 응답특성을 비교 도기한 것이다. Hashimoto는 부하의 크기를

고려하여 경계치 값을 선정하였으나, 온수난방 순환펌프시스템의 경우 난방부하가 0-100%의 커다란 변화로 인해 Hashimoto의 방법을 적용할 경우 경계치 선정이 어렵기 때문에 예비실험을 통해 구하였는데, 초기 정상상태가 양호한 경우의 경계치 ϵ 값은 2이다. 그림에서 볼 수 있듯이 초기의 정상상태에서는 유사한 바람직한 응답특성을 보이고 있으나, 스위칭 함수의 크기를 고려한 방법에 있어서는 시간이 지남에 따른 난방부하의 변화로 인해 정상상태오차가 발생하였다. 이것은 온수의 유동특성으로 인해 온도의 응답에서 잡음이 크게 발생하여 오차와 오차의 변화로 구성된 스위칭 함수값이 경계치보다 큰 진폭으로 변화하기 때문에 PID 스위칭 함수의 계속적인 사용이 이루어지지 못해서 나타나는 현상이라고 생각된다(그림 13).

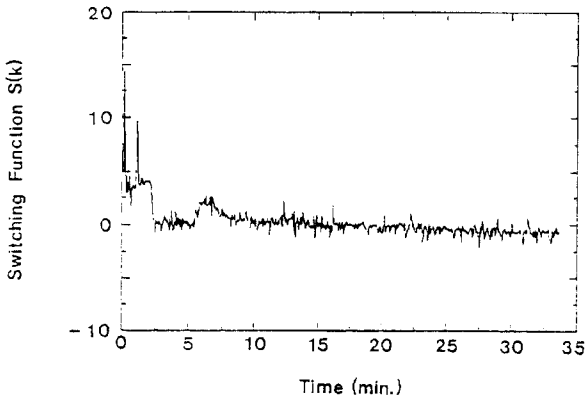
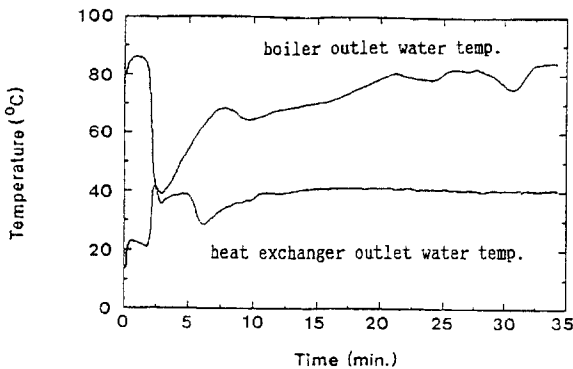


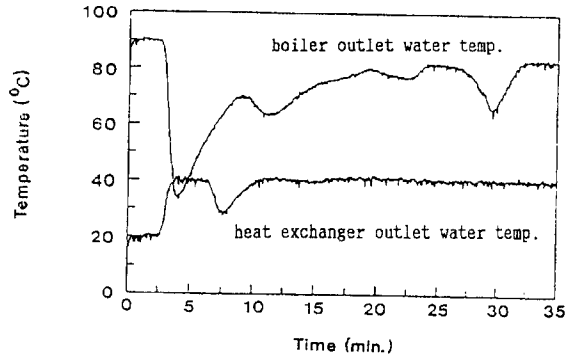
그림 13. Hashimoto의 이론을 확장 적용한 디지털 가변 구조제어기의 슬라이딩 모드의 거동 (T=1sec).

Fig. 13. Sliding mode behaviors for extended Hashimoto's digital VSC (T=1sec).

그림 14는 샘플링 시간을 10와 0.5sec로 각각 변화시켜 주었을 경우에 대한 응답특성을 나타낸 것이다. 먼저 샘플링 시간이 10sec인 경우는 그림 5의 기준조건(1 sec)에 비해 지연시간 및 상승시간이 다소 짧아지고 있음을 볼 수 있으나, 정상상태 초기에 오버슈트 및 커다란 언더슈트등이 발생하는 바람직하지 못한 현상이 나타나고 있다. 그리고 샘플링 시간이 0.5sec인 경우에 있어서는 오히려 지연시간 및 상승시간이 길어지고 있음을 볼 수 있다. 본 논문에서는 유체의 유동특성으로 인한 온수온도의 진동현상을 최소화하기 위해 측정된 온도값을 여러번(샘플링 시간이 10sec인 경우: 790번, 0.5sec 경우: 42번) 읽은 후에 평균값을 취하도록 하였는데, 이의 영향으로 샘플링 시간이 짧은 경우는 온도응답에서 잡음이 나타나고 있음을 알 수 있다.



(a)



(b)

그림 14. 샘플링 시간에 대한 제안된 디지털 가변구조 제어기의 모형 시스템의 계단입력 응답특성

Fig. 14. Step responses of the pilot plant system with suggested digital VSC for sampling time.

IV. 결론

본 논문에서는 모형 온수난방 순환펌프제어 시스템을 대상으로 제어기로서 제안된 복합 스위칭 함수를 갖는 디지털 가변구조제어기를 구현하여 시스템의 제어특성을 연구하였으며, 얻어진 결과의 요약은 다음과 같다.

1) 제안된 디지털 가변구조제어 방법이 종래의 선형 스위칭 함수만을 이용한 방법에 비해 과도응답특성이 더 우수하였고, 난방부하의 변화에도 정상상태오차가 존재하지 않는 양호한 응답특성을 보였으며, 스위칭 함수의 변환을 위한 경계치의 선정방법으로서 스위칭 함수의 크기를 고려한 경우, PID 스위칭 함수로의 변환이 적절히 이루어지지 못하여 정상상태오차가 발생하였다.

2) 지연시간 보상기인 Smith 예측기를 디지털 제어기에 추가시켜 사용함으로써 개선된 과도응답특성을 얻을 수가 있었다. 그리고 샘플링 시간이 감소함에 따라 지연시간 및 상승시간이 길어지고, 유체의 유동특성으로 인한 잡음이 증폭되어졌다.

참고문헌

- [1] Z. Sarpturk, Yorgo and Okyay, "On the stability of discrete time sliding mode control systems," *IEEE Trans Auto. Con.*, vol. AC-32, no. 10, pp. 930-932, 1987.
- [2] A. S. I. Zinober, E. EI-Ghezawi and S. A. Billings, "Multi variable variable structure adaptive model following control systems," *IEE Proc.* vol. 129, no. 1, pp. 7-12, 1982.
- [3] D. H. Owens and A. Raya, "Robust stability of smith predictor controllers for time delays systems," *IEE Proc.*, vol. 129, no. 6, pp. 298-304, Nov., 1982.
- [4] V. I. Utkin, "Variable structure systems with sliding modes," *IEEE Trans. on Auto. Control*, vol. AC-22, no. 2, pp. 212-222, Apr., 1977.
- [5] O. J. M. Smith, "Closer control of loops with dead time," *Chemical Engineering Process*, vol. 53, no. 5, pp. 72-75, 1957.
- [6] 장효환, 안병천, 김영준, "마이크로컴퓨터에 의한 전기 유압 서보시스템의 속도제어," 대한기계학회 논문집,

- 제 12권, 제 2호, pp. 221-230, 1988.
- [7] G. Ambrosino, G. Celentano and F. Garofalo, "Variable structure model reference adaptive control systems," *Int. J. Cont.*, vol. 39, no. 6, pp. 1339-1349, 1984.
- [8] M. Vidyasagar, "Nonlinear system analysis," *Prentice-Hall*, pp. 218-223, 1978.

- [9] H. Hashimoto, K. Maruyama, Y. Arai and F. Harashima, "Practical realization of VSS controller for robotic arm," *IEEE, CH2334-1*, pp. 34-40, 1986.
- [10] C. A. Smith and A. B. Corripio, "Principles and practice of automatic process control," *John Wiley & Sons, Inc.* pp. 176-254, 1985.



안 병 천

1981년 고려대학교 기계공학과 졸업.
1986년 동대학원 석사. 1992년 동대학원 박사. 1991년 ~ 1995년 현대중공업(주) 중앙연구소 책임연구원. 1995년 ~ 현재 경원대학교 건축설비학과 조교수. 관심분야는 열실비 및 공조시스템 제어, 유압 시스템 제어, 적응제어, 퍼지제어 등.

시스템 제어, 유압 시스템 제어, 적응제어, 퍼지제어 등.



장 효 환

1968년 서울대학교 기계공학과 졸업.
1972년 State Univ. of New York at Buffalo 기계공학 석사. 1977년 Oklahoma State Univ. 기계공학 박사. 1978년 ~ 1982 한국중공업(주) 이사. 1982년 ~ 현재 고려대학교 기계공학과 교수. 관심분야는 유압제어, 차량제어, 적응제어, 공정제어 등.

야는 유압제어, 차량제어, 적응제어, 공정제어 등.