'91 韓國自動制御學術會議論文集 1991. 10.22~24

긴 지연시간을 갖는 온수난방 제어시스템의 디지틀 가변구조제어

○ 안 병 천　　장 효 환
고려대 기계공학과 대학원　고려대 기계공학과

Digital Variable Structure Control of a Hot-Water Heating Control System with Long Dead Time

○Byeung-Cheon Ahn　　Hyo-Whan Chang
Dept. of Mechanical Eng. of Korea Univ.

ABSTRACT

Digital Variable Structure Controller(DVSC) is proposed to control variable speed recirculating pump for hot-water heating control system. In this study, nonlinear sliding line is used beyond output error boundary layer and PID sliding line is used within the layer. For long dead time compensation, constraint is added to Smith predictor algorithm.

Steady state error is eliminated by using the proposed sliding line in spite of heating load change. By decreasing sampling time, good sliding motion is yielded but system output noise by flow dynamics is amplified.

1. 서 론

국내의 대단위 공동주택 난방방식은 온수파이프에 의해 방바닥을 가열하는 방식으로 온수는 보일러와 열교환기를 거쳐 순환펌프에 의해 배관망을 통하여 각 세대로 공급되는데 이들 각 요소들을 총합하여 '온수난방 제어시스템' 이라 칭한다. 여기서 순환펌프는 팬(fan), 송풍기등과 같이 2승저감 토오크 부하특성을 갖는 회전기기이므로 기존의 밸브나 댐퍼에 의한 유량조절방식 대신에 펌프의 가변속을 이용하여 공급유량을 제어하는 방식이 좀 더 에너지 절약적임이 연구 발표되었다[1,2]. 이러한 특성을 고려하여 디지틀 PI 제어기를 구성하여 온수난방 제어시스템의 순환펌프의 속도를 제어 공급온수의 양을 조절하는 방법이 고정속도 순환펌프를 사용한 상태에서 단속적(on/off)으로 제어하는 방법과 3-way 밸브를 이용한 제어방법등에 비해 난방성능이 보다 양호함을 실험적으로 비교 고찰한 연구가 있다[3].

온수난방 제어시스템은 외기 및 난방부하의 변화로 인하여 시스템 파라미터의 변동 및 외란등이 발생하게 되는데, 시스템이 이러한 특성에 대해 둔감한 성질을 갖게하는 디지틀 가변구조 제어기를 구성 적용하여 실험한 결과 디지틀 PI 제어기에 비해 기준입력을 변화시켰을 때에 있어서도 제어기계수를 새로 조율하지 않고도 오버슈트가 없는 양호한 응답특성을 얻었다[4].

본 연구에서는 대단위 공동주택 온수난방제어시스템을 간략화한 모형 실험장치를 이용하고, 제어기로서 디지틀 가변구조 제어기를 적용함에 있어서 제어기의 각 계수값이 시스템 응답특성에 미치는 영향이 비교 고찰되었으며, 샘플링(sampling) 시간이 제어기의 성능 및 시스템 응답특성에 미치는 영향이 고찰되었다. 여기서 제어기의 구성을 위하여 사용된 스위칭(switching) 함수는 정상상태 오차의 경계치를 설정하여 경계치 밖에서는 비선형 스위칭함수를 사용하고 경계치 내에서는 PID 스위칭함수를 사용하였다. 또한 긴 지연시간의 보상을 위하여 Smith 예측기를 적용하였는데 시스템 응답특성을 개선시키기 위해 제약조건을 추가하였다.

2. 시스템 모델링

본 연구에서는 온수난방 제어시스템에서 순환펌프의 3상 유도전동기의 가변전압과 가변주파수(VVVF)의 교류전원장치인 인버터의 구동 직류(DC) 전압과 보일러 출구에서 바닥 패널 및 냉각탱크를 지나 냉각탱크출구에 도달되는 온수의 온도와의 관계식인 플랜트 전달함수를 근사화된 지연시간이 존재하는 2차 함수로 가정하였다. 다음식은 근사화된 온수난방 제어시스템의 플랜트 전달함수이다.

$$G(s) = \frac{K \cdot \exp(-t_d \cdot s)}{(\tau_1 \cdot s+1)(\tau_2 \cdot s+1)} \qquad (1)$$

여기서, K : 이득
t_d : 지연 시간
τ_1, τ_2 : 시간 상수

본 연구에서는 이러한 시스템 상수값들의 선정을 위해서 계단입력에 대한 개회로의 과도응답특성곡선을 측정하여 곡선의 최대 기울기가 발생하는 점에서의 기울기의 연장선을 이용하는 방법[5]을 적용하였다.

3. 디지틀 제어기

이산치 가변구조제어시스템에서는 시스템의 상태들이 스위칭 초평면을 지나도 새로운 제어입력이 시스템에 출력되기 전까지인 샘플링 시간 동안 현재의 제어입력에 의해 상태궤적(trajectory)은 계속 이동하게 되어 제어입력상의 시간지연이 없어도 상태궤적이 채터링하는 준 슬라이딩모드(quasi-sliding mode)가 발생하지만 연속치 가변구조 제어시스템과 같이 시스템 파라미터의 변동및 외란에 둔감한 특성을 갖는다[6].

본 연구에서 사용된 온수난방 제어시스템은 시변 시스템 파라미터를 갖고 있으며, 시스템의 구성요소인 냉각탱크의 냉각수에 의한 난방 부하가 계속 변하게 되어 시스템의 파라미터의 변동을 가중시키게 되어 시스템의 정상상태 오차를 유발시킬 수 있게 된다. 또한 오차와 오차의 변화(오차의 속도)로 구성되는 2차 슬라이딩 면은 오차가 점근적으로 감소하므로 종래의 선형 스위칭 함수를 사용할 경우 요구되는 성능을 만족시키는 데는 시간 지연이 커지게 된다.

따라서 본 연구에서는 시간지연의 영향을 줄여주고 궁극적으로는 정상상태 오차를 제거하기 위해 정상상태 오차에 대한 경계치를 설정하여 경계치 밖에서는 비선형 스위칭함수를 사용하고, 경계치 내에서는 적분기가 존재하는 PID 스위칭함수를 사용하도록 하였다. Fig. 1 는 이러한 스위칭 함수를 나타낸 그림이다.

본 연구에서 제안된 비선형 스위칭 함수($|e(k)| \geq \varepsilon$) 및 PID 스위칭함수($|e(k)| < \varepsilon$)는 다음과 같다.

$$S(k) = e_2(k) + C_1 \cdot e_1(k) \qquad \text{if } |e(k)| \geq \varepsilon \qquad (2)$$

$$S(k) = S(k+1) + K_1 \cdot e_1(k) + K_2 \cdot e_1(k-1) + K_3 \cdot (e_2(k) - e_2(k-1)) \qquad \text{if } |e(k)| < \varepsilon \qquad (3)$$

여기서

$$C_1 = \frac{C \cdot |e_1(k-2)|}{|e_1(k-1)| + \delta}$$

$$K_1 = K_P + K_I \cdot T/2$$

$$K_2 = -K_P + K_I \cdot T/2$$

$$K_3 = K_d$$

이산치 가변구조 제어이론에서 준 슬라이딩모드가 존재할 조건에 대해 Sarpturk[7]은 스위칭 평면에서 슬라이딩 모드의 발생 및 상태궤적의 수렴을 위해 다음과 같은 필요·충분 조건을 제시하였다.

$$|S(k+1)| < |S(k)| \tag{4}$$

이 식은 다음과 같이 분리 표현될 수 있다.

$$[S(k+1) - S(k)]\cdot sign(S(k)) < 0 \tag{5}$$
$$[S(k+1) + S(k)]\cdot sign(S(k)) > 0 \tag{6}$$

여기서 식(5)은 슬라이딩 모드의 필요조건의 개념이며, 식(6)은 슬라이딩모드에서의 상태궤적의 수렴조건이 된다.

본 연구에서는 제어입력을 시스템이 슬라이딩 모드 내에 유지되도록 해주는 등가(equivalent) 제어입력 $u_{eq}(k)$과 상태가 스위칭 평면에서 벗어나 있을 경우 스위칭 평면에 접근시켜주는 가변 제어입력 $u_n(k)$으로 구성하였는데, 가변 제어입력 $u_n(k)$은 선형 연속귀환제어기 $u_{n1}(k)$와 비선형 연속귀환제어기 $u_{n2}(k)$를 각각 이용하여 제어기를 구성하였다.

$$\begin{aligned} u(k) &= u_{eq}(k) + u_n(k) \\ &= u_{eq}(k) + u_{n1}(k) + u_{n2}(k) \end{aligned} \tag{7}$$

여기서 $u_{n1}(k) = S_1\cdot S(k)$

$$u_{n2}(k) = S_{n1}\cdot \frac{S(k)}{|S(k)|+\delta}$$

슬라이딩 모드 존재조건을 만족하기 위한 제어입력의 이득은 다음과 같은 범위내의 값을 갖게된다.

1) $G_1\cdot B < 0$:

$$0 < S_1 < -2/(G_1\ B) \tag{8}$$

$$0 < S_{n1} < -\frac{(2 + G_1\cdot B\cdot S_1)(|S(k)|+\delta)}{G_1\cdot B} \tag{9}$$

2) $G_1\cdot B > 0$:

$$-2/(G_1\cdot B) < S_1 < 0 \tag{10}$$

$$-\frac{(2 + G_1\cdot B\cdot S_1)(|S(k)|+\delta)}{G_1\cdot B} < S_{n1} < 0 \tag{11}$$

스위칭평면 행렬 G_1은 비선형 스위칭함수의 경우 $G_1 = [C_1\ 1]$ 이고 PID 스위칭함수의 경우는 $G_1 = [K_1\ K_3]$ 이 된다. 단 여기서 S_{n1} 은 $2 + G_1BS_1>0$ 인 조건을 만족하는 S_1이 존재할 경우에 S_{n1} 의 값을 선정할 수 있는 구간이 존재하게 되고, 이러한 선형연속 귀환제어이득(S_1)과 비선형연속 귀환제어이득(S_{n1})의 위 경계치(upper bound)와 아래 경계치(lower bound)내의 적절한 선정으로 슬라이딩 모드를 보상할 수 있게 되며 상태궤적이 수렴하게 된다.

실제 시스템의 상수값들을 이용하고 위의 이론을 적용하여 다음과 같이 스위칭함수의 기울기를 결정시켜주는 C 값, 선형연속 귀환제어이득 S_1, 비선형연속 귀환제어이득 S_{n1} 그리고 비선형 스위칭함수와 PID 스위칭함수를 선택적으로 사용하기위한 정상상태오차의 경계치 ϵ 등의 값을 선정하였다.

먼저 과도응답특성곡선으로부터 선정된 온수난방 제어시스템의 플랜트 전달함수는 다음과 같다.

$$G(s) = \frac{0.01442\cdot exp(-90\cdot s)}{(7.16\cdot s+1)(12.39\cdot s+1)} \tag{12}$$

또한 오차 $e(t)= r - x(t)$를 이용하고, 샘플링 시간을 1 sec로 하면 식(18)은 식(19)와 같은 이산치 상태방정식으로 나타내진다.

$$E(k+1)=\begin{bmatrix} 0.9478 & 0.1882 \\ -0.0631 & -0.0059 \end{bmatrix}E(k) + \begin{bmatrix} -0.00285 \\ -0.00548 \end{bmatrix}u(k-90) + \begin{bmatrix} 0.00512 \\ 0.01005 \end{bmatrix}r \tag{13}$$

본 연구에서 제안된 비선형 스위칭 함수를 다시 쓰면 다음과 같다.

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

Fig. 2는 순환펌프의 회전속도를 3000rpm의 계단입력을 주었을 때의 개회로 과도응답특성에서의 각 상태 값들을 나타낸 그림이다. 여기서 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 변화를 살펴보면 긴지연시간후에 서서히 증가하다가 빠른 감소를 나타낸다. 본 연구에서는 시스템이 갖고있는 과도응답에서의 최대온도변화의 크기를 벗어나지 않는 상태에서의 비선형 스위칭함수를 선정하기위해 위의 시변 기울기특성을 갖는 상태에서 C 값을 0.2로 선정하였다. 이때의 슬라이딩 모드에서의 오차의 동특성인 $e_2(k) = -C|e_1(k-2)|/(e_1(k-1)|+\delta)\cdot e(k)$의 값은 0(zero)에 접근하면서 과도응답특성으로부터 실제 측정 계산된 $e_2(k)$ 값 보다 적은 값을 갖게 됨을 볼 수 있다. 또한 C가 1 인 경우의 C_1 의 최대값(C_1=1.5)를 고려하면 G_1 값은 다음과 같이 구해진다.

$$G_1 = [0.03\ \ 1] \tag{14}$$

이 식과 식(13)을 이용하면 $G_1\cdot B<0$ 이므로 식(8)에 적용하면 다음과 같이 S_1 이 구해진다.

$$0 < S_1 < 315 \tag{15}$$

비선형 연속귀환제어기 이득은 S_1=100, δ=1로 하였을 때를 기준조건으로 하여 식(9)에 적용하면 다음과 같이 구해진다.

$$0 < S_{n1} < 215 \tag{16}$$

PID 슬라이딩 면의 설계를 위한 K_P,K_I,K_d 값의 선정은 슬라이딩 모드에서의 시스템이 안정하도록 하기위해 A_{eq}의 고유치가 단위원 내의 값을 갖도록 설계하였는데, 고유치를 미리 선정할 경우 식은 한개이나 구해야하는 미지수는 K_1와 K_2. 즉 K_P, K_I, K_d이므로 각 계수값의 선정이 곤란하다. 따라서 본 연구에서는 각 계수값을 미리 선정하고 이에 대한 고유치값을 계산하였다. 이러한 시행 착오적(trial and error)방법에 의해 선정된 각 계수값은 K_P=0.2, K_I=0.2, K_d=1.0 이며 이 때의 고유치 값은 -0.7 와 0.85 값을 갖는다. 따라서 각값을 식(8),(9)에 적용하면 선형 연속 귀환제어기 이득과 비선형 연속 귀환제어기 이득은 다음과 같이 구해진다.

$$0 < S_1 < 278 \tag{17}$$

$$0 < S_{n1} < 183 \tag{18}$$

또한 정상상태오차의 경계치 ϵ 값은 스위칭함수의 변환이 없이 비선형 스위칭함수만을 사용한 경우에 대한 응답특성에 있어서 발생된 정상상태 오차의 크기를 고려하여 선정한다. Fig. 3은 전체시스템의 제어계통을 블럭선도로 나타낸 그림이다.

4. 실험 장치 및 방법

Fig. 4는 본 연구에서 사용한 모형 실험장치의 개략도로서 대단위 공동주택용 온수난방 제어시스템을 간략화한 모델이다. 실험 장치로서 보일러는 로케트 보일러 KSQA-10(난방출력 12500 Kcal/h), 온수 순환펌프의 구동 유도전동기는 신명전기의 3상 유도전동기로서 극수는 2 p 최대 회전수는 3450 rpm이고 3상 유도전동기의 속도제어를 위해 설치한 인버터는 금성계전의 FVR-G2 type으로 출력 0.4 Kw, 용량 2 Kva이며 전동기의 속도검출을 위해서는 Koyo사의 TRD-J60-s 엔코더를 설치하였다. 유량계로는 유량의 과도상태 및 정상상태를 측정하기위해 Hydrotechnic 사의 터어빈 유량계(측정범위:3-20 lpm)를 설치하였다. 또한 보일러의 단속운전을 위해서 릴레이(relay)를 제작 설치하였으며, 속도 검출장치인 엔코더와 터어빈유량계의 출력인 주파수를 컴퓨터의 입력인 전압으로 변환시켜주기위한 FVC(감도:1 volt/Khz)는 나노텍(Nanotech)제품을 설치하였다. 온수의 온도측정을 위해서는 고려측기사의 T형(Copper Constantan) 열전대를 설치하였고 컴퓨터(IBM PC-AT 12 Mhz)와의 신호처리및 전달을 위해 12 비트 해상도를 갖는 A/D 및 D/A 변환기로서 나노텍사의 Labin Master를 설치 사용하였다. 디지탈 제어기의 제어 프로그램은 터보 파스칼 언어를 이용 제어가 진행되고 있는 동안 측

정된 각 위치의 온도들이 메모리에 저장됨과 동시에 화면에 나타내어지도록 하였고, 유동의 동특성에 의해 A/D변환기를 통해 읽혀진 각 위치의 측정값이 진동이 심하기 때문에 80번씩 읽은 후 그의 평균값을 취해 온도로 환산하도록함에 따라 샘플링시간은 1sec로하였다.

보일러의 단속적제어를 위한 출구온수온도의 기준치를 80℃로, 순환펌프의 속도를 제어하기위한 기준입력인 냉각탱크출구 온수온도의 기준치를 40℃로 각각 정하여 제어를 수행하였다. 또한 지연시간 보상기인 Smith 예측기에 있어서는 종래의 알고리즘에 대해 제약조건(X(k)<0 이면 X(k)=0 으로 함)을 추가하여 사용하였다. 종래의 선형스위칭함수를 이용한 경우와 본 연구에서 사용된 비선형 및 PID 스위칭함수를 이용한 경우에 대해 각각의 응답특성이 비교되었으며, 제어기의 각 계수들의 변화가 응답특성에 미치는 영향을 비교 고찰하였다. 또한 샘플링시간을 0.5, 1, 10 sec등으로 변화시켜가며 실험하여 제어기의 성능 및 시스템 응답특성이 비교 고찰되었다.

5. 결과 및 고찰

Fig. 5, 6, 7, 8은 디지틀 가변구조제어기의 각 계수값을 변화시켰을 경우의 냉각탱크출구의 온수온도에 대한 응답특성을 비교 도시한 그림이다. 여기서 디지틀 가변구조제어기는 제약조건을 갖는 Smith 예측기를 추가하여 사용하였으며, 선정된 기준조건은 스위칭 평면의 기울기를 결정하는 상수 C 는 0.2, 선형 연속귀환제어기인 이득 S_1은 100, 비선형 연속귀환제어기의 이득 S_{n1}은 50, 비선형 스위칭함수에서 PID 스위칭 함수로 변형 사용하기위한 정상상태오차에 대한 경계치 ε 는 3으로 각각 선정하였으며, 샘플링시간은 1sec로 하였다.

먼저, Fig. 5는 디지틀 가변구조제어기의 기준조건에 있어서 스위칭 기울기를 결정하는 상수 C 를 변화시켰을 때의 냉각탱크출구의 온수온도에 대한 응답특성을 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 C 값이 0.4에서는, 즉 스위칭함수의 기울기를 증가시켜 줄 경우 과도응답상태에서의 상승시간은 감소하나 정상상태에서 심한 진동 현상이 발생하게 된다. 이는 큰 기울기를 갖는 슬라이딩 면에 도달하기 위해 보다 큰 제어기출력이 발생되어 유체 흐름의 관성을 크게 증가시켜주는 결과를 초래하게 됨에 따라 나타나는 현상으로 C값을 0.1로 감소시켜줄 경우는 이러한 현상은 줄어줄 수는 있으나 긴 상승시간을 가지며 바람직하지 못한 응답특성을 나타내게 된다.

Fig. 6은 기준조건에 있어서 선형 연속귀환제어기의 이득 S_1를 변화시켰을 때의 응답특성을 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 S_1 값이 200에서는 정상상태에서 진동 현상이 발생되고 S_1 값이 50일 경우는 정상상태 부근에서 서서히 기준입력에 도달되어 정착시간(settling time)이 증가됨을 볼 수 있다. 이는 이득이 증가함에 따라 제어기의 출력은 증가하여 상승시간이 줄어들게 되지만 샘플링 시간에 의한 준 슬라이딩 모드의 영향과 유체 흐름의 관성 영향으로 정상상태 부근에서 진동현상을 유발시키게된다.

Fig. 7은 기준조건에 대하여 비선형 연속귀환제어기의 이득 S_{n1}를 변화시켰을 때의 응답특성을 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 S_{n1} 값이 200인 경우에 대해서는 큰 제어입력의 발생으로 지연시간이 감소되고 있으나 15분에서 20분사이에서 갑작스런 언더슈트(undershoot)가 발생하여 정상상태오차가 발생하는등 바람직하지 못한 응답특성이 나타나고 있음을 볼 수 있다. 이것은 시스템이 정상상태에 도달된 이후에는 온수의 계속된 공급으로 냉각탱크내의 냉각수 온도가 상승하여 난방부하가 적어지는 상태에서 큰 이득을 갖는 비선형 귀환제어기의 스위칭에 의한 유체 관성의 증가로 인해 나타나는 현상으로 S_{n1}이 0(zero)인 경우에 대해서는 이러한 현상이 나타나지 않는 바람직한 응답특성을 나타내고는 있으나 지연시간이 길어지게 된다.

Fig. 8은 디지틀 가변구조제어기의 기준조건에 대해서 비선형 스위칭함수에서 PID 스위칭 함수로 변형 사용하기위한 정상상태오차에 대한 경계치 ε를 변화시켰을 때의 응답특성을 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 ε 값이 1 인 경우에 있어서는 비선형 스위칭함수에 의한 제어의 수행과정에서 정상상태의 오차가 1보다 큰 값을 갖게되어 PID 스위칭 함수로의 변환이 이루어지지못해 정상상태 오차가 발생하고 있으며 시간이 지남에 따라 난방부하의 감소로 인해 정상상태에는 도달되나, 경계치 값의 크기가 작고 측정된 온도의 진동으로 인해 PID 스위칭함수를 사용하기위한 경계치내의 유지가 어렵게 된다. 따라서 냉각탱크 출구온수온도가 계속 증가하게 되며 정상상태오차가 발생하는 바람직하지 못한 응답특성을 나타내고 있음을 볼 수 있다. 그러나 ε 가 5인 경우에 있어서는 ε가 1인 경우에 비해 갑작스런 PID 스위칭함수로의 전환이 이루어져서 정상상태오차를 누적시키는 적분기의 영향으로 인해 ε 가 1인 경우와 같은 정상상태오차는 발생하지 않고 있으나, 적분기에 의한 제어기의 출력의 증가로 인해 초기의 정상상태에서 진동현상이 발생하고 있음을 볼 수 있다.

Fig. 9(a),(b)는 종래의 선형 스위칭함수를 이용한 경우와 본 연구에서 사용된 비선형 스위칭함수에서 PID 스위칭 함수로의 변환을 갖는 디지틀 가변구조제어기의 기준조건의 경우에 대해서 냉각탱크출구의 온수온도 및 순환펌프의 회전속도에 대한 응답특성을 비교 도시한 그림이다. 그림에서 볼 수 있듯이 종래의 선형 스위칭함수를 이용한 경우는 난방부하의 변화에 따른 정상상태오차를 제거하지 못하고 있으나, 비선형 및 PID 스위칭함수를 갖는 디지틀 가변구조제어기는 정상상태오차가 없는 보다 양호한 응답특성이 나타남을 볼 수 있다. 또한 순환펌프의 회전속도를 비교해 볼 때 제안된 디지틀 가변구조제어기를 사용한 경우가 훨 더 적은 회전수를 나타냄에 따라 전력소모량을 줄일 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 10과 11은 기준조건을 갖는 디지틀 가변구조제어기에 대해 샘플링 시간을 10, 0.5 sec등으로 변화 시켰을 경우에 대한 응답특성을 나타낸 그림으로서 Fig. 10(a)과 11(a)는 보일러 출구온수온도와 냉각탱크 출구온수온도의 응답특성이며 Fig. 10(b)과 11(b)는 제어기의 출력에 의한 순환펌프의 회전속도를 나타낸 그림이다. 먼저 Fig. 10은 샘플링 시간이 10sec 인 경우로서 그림에서 볼 수 있듯이 순환펌프의 회전속도는 초기에 최고 회전속도에서 가동되고 있음을 알 수 있는데, 이것은 디지틀 Smith 예측기의 출력이 샘플링시간이 10sec일 경우는 매우 미소한 값을 갖게 되어(Fig. 12 참조) 제어기의 출력에 대한 예측기의 영향이 거의 나타나지 않고 있기 때문이다. 샘플링시간이 10 sec 인 경우는 0.5 sec(Fig. 11)인 경우에 비하여 지연시간이 줄어들고 있음을 볼 수 있으나 샘플링시간이 증가함에 따라 제어기의 출력의 변환이 신속히 이루어 지지 못하기 때문에 정상상태의 초기에 오버슈트 및 언더슈트등이 발생하는등 시스템 과도응답특성이 바람직하지 못함을 알 수 있다. 그러나 유체의 유동에 의한 진동의 응답특성은 거의 없고 시간이 지남에 따라 정상상태오차 없는 양호한 응답특성을 나타나게 됨을 볼 수 있다.

본 연구에서는 측정되어진 온도에 대한 실전대의 기전력의 값을 샘플링 시간이 10 sec 인 경우에는 790번, 1 sec 는 80번, 그리고 0.5 sec의 경우는 42번 읽은 후에 평균한 값을 취한 뒤 이를 온도로 환산하고 있는데 샘플링 시간을 줄이기 위해서 기전력의 읽는 회수를 줄여야 하기 때문에 Fig. 11에서 볼 수 있듯이 샘플링 시간이 0.5sec인 경우는 온도의 응답특성에서 진동이 매우 심하게 나타나고 있음을 볼 수 있다. 이는 유체의 유동특성에 의해 나타나는 현상으로 측정된 온수온도의 진동으로 인하여 제어기의 출력인 순환펌프의 회전속도에서도 진동이 심하게 나타나고 있음을 볼 수 있다. 또한 샘플링 시간이 줄어듦에 따라 예측기의 출력이 증가하여 제어기의 출력이 감소하게 되는데 이로인해 지연시간 및 상승시간이 길어짐을 볼 수 있다.

Fig. 12는 위의 Fig. 10와 Fig. 11의 각 경우에 대한 예측기의 출력을 나타낸 그림으로서 앞에서 언급한 바와 같이 샘플링 시간이 줄어듦에 따라 예측기의 출력이 큰 값을 나타내게 되며 이결과로 제어기의 출력에 관계된 순환펌프의 회전속도에 있어서는 Fig. 10(b)와 Fig. 11(b)를 비교해 볼 때 샘플링시간이 줄어듦에 따라 회전속도는 오히려 적은 값을 갖게 됨을 알 수 있다.

Fig. 13(a),(b)는 위의 Fig. 10과 11의 각 경우에 대한 슬라이딩 모드의 거동을 각각 비교 도시한 것이다. 먼저 샘플링시간이 증가함에 따라 예측기의 영향으로 슬라이딩면에의 도달시간은 줄어들게 되나 시스템상태가 슬라이딩면을 벗어난 경우 신속한 스위칭 평면으로의 재 접근이 이루어지지 못하고 있음을 볼 수 있다. 반면에 샘플링시간이 0.5 sec인 경우에 있어서는 유동특성에 의해 응답특성에서의 진동현상은 심해지나 시스템 상태의 슬라이딩면에의 유지가 가능하며 슬라이딩 모드의 거동이 개선됨을 볼 수 있다.

6. 결 론

(1) 제안된 정상상태오차의 경계치를 설정하여 비선형 스위칭함수 및 PID 스위칭함수를 선택적으로 사용하여 제어기를 구성한 경우는 난방부하의 변화에 대해서도 정상상태오차가 없는 양호한 응답특성이 나타났으며, 좀 더 적은 회전수에서 순환펌프를 가동시켜줌에 따라 전력소모량을 줄일 수 있음을 알 수 있다.

(2) 제어기의 계수인 ζ 값 및 S_{n1} 값의 증가는 과도응답특성에서의 상승시간은 감소시켜 주지만 정상상태에 도달시 진동현상을 발생시키며, S_{n1} 값의 증가는 지연시간은 감소되나 정상상태오차를 야기시킨다. 또한 ε 값의 증가는 정상상태오차를 제거시켜주나 적분기의 영향으로 오버슈트 및 진동현상이 발생하게 된다.

(3) 샘플링 시간이 줄어듦에 따라 예측기의 출력이 증가하여 제어기의 출력이 감소하게 되며 지연시간 및 상승시간이 길어지게 된다. 또한 유체의 유동특성으로 인한 온도의 진동현상이 심해지나 시스템 상태의 슬라이딩면에의 유지가 가능하며 슬라이딩 모드의 거동이 개선됨을 볼 수 있다.

7. 참고문헌

[1] William, M.R.,"Economics of AC Adjustable Speed Drives on Pumps",IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. IA-11, No.3, pp.282-286, 1975.

[2] 정승택, 안병천, 장효환, "회전수제어에 의한 온수순환펌프 시스템의 효율적인 운전", 대한기계학회 '90년도 추계학술대회 논문집, pp.442-445, 1990.

[3] 안병천, 장효환, "온수난방 제어시스템의 제어특성에 관한 연구", 대한기계학회 '90년도 추계 학술대회 논문집, pp. 287-290, 1990.

[4] 안병천, 장효환, "긴 지연시간을 갖는 온수난방 제어시스템의 디지틀 가변구조특성에 관한 연구", 대한기계학회 '90년도 춘계 학술대회 논문집, pp.254-258, 1991.

[5] Smith, O.J.M., "Closer Control of Loops with Dead Time",Chemical Engineering Process,Vol.53, No. 5, pp. 217-219, 1957.

[6] Milosavljevic, C., " General Condition for the Existence of a Quasisliding Mode on the Switching Hyperplane in Discretre Variable Structure Systems", Plenum Publishing Corporation, pp.307-314, 1985.

[7] Sarpturk,Sami Z.,Yorgo Istefanopulos,Okyay Kaynak "On the Stability of Discrete-Time Sliding Mode Control Systems",IEEE TRANS. Auto. Con., Vol.AC-32, NO.10, 1987.

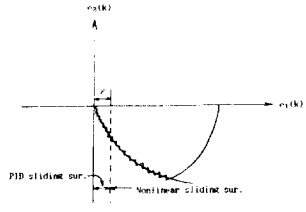


Fig.1 Suggested nonlinear sliding surface($|e(k)|\geq\varepsilon$) and PID($|e(k)|<\varepsilon$) sliding surface

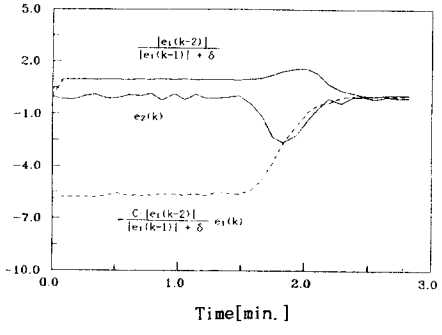


Fig.2 Various parameter transients for process reaction curve

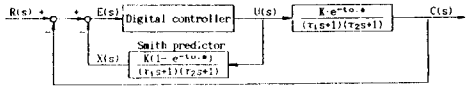


Fig.3 Block diagram of a hot water heating control syste

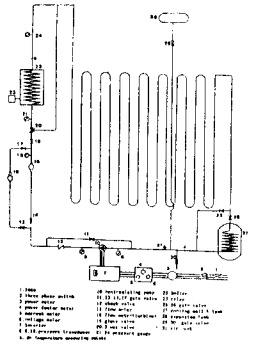


Fig.4 Schematic of a proto-type system

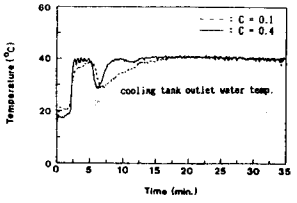


Fig.5 Step responses of the system with suggested digital VSC for different switching surface slope gain C(S_1=100, S_{n1}=50, ε=3, T=1sec)

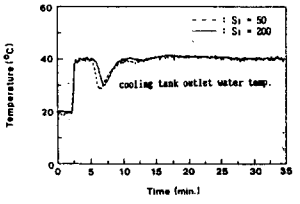


Fig.6 Step responses of the system with suggested digital VSC for different linear continuous feedback controller gain S_1(C=0.2, S_{n1}=50, ε=3, T=1sec)

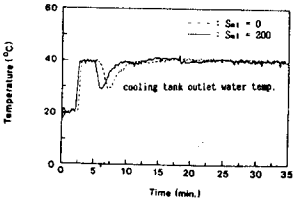


Fig.7 Step responses of the system with suggested digital VSC for different nonlinear continuous feedback controller gain S_{n1}(C=0.2, S_1=100, ε=3, T=1sec)

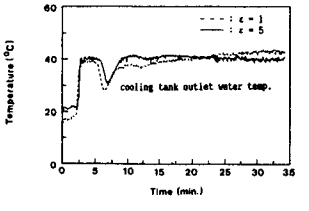
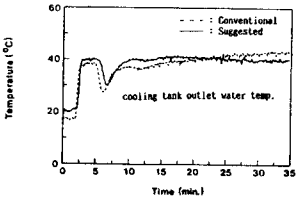
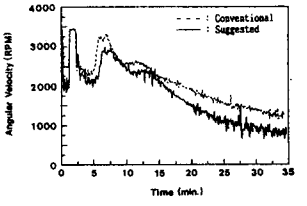


Fig.8 Step responses of the system with suggested digital VSC for different boundary layer thickness ε(C=0.2, S_1=100, S_{n1}=50, T=1sec)

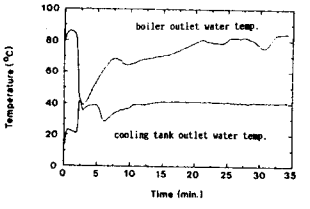


(a) Temperature

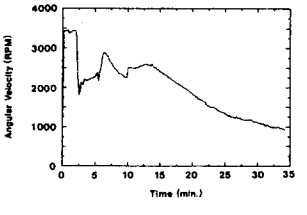


(b) Angular velocity of the pump

Fig.9 Step responses of the system with conventional (C=0.4) and suggested(C=0.2) digital VSC (S_1=100, S_{n1}=50, ε=3, T=1sec)

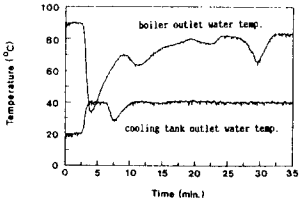


(a) Temperature

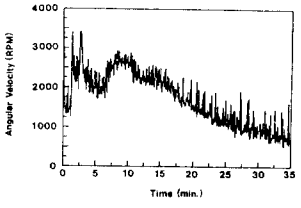


(b) Angular velocity of the pump

Fig.10 Step responses of the system with suggested digital VSC for sampling time(C=0.2, S_1=100, S_{n1}=50, ε=3, T=10sec)



(a) Temperature



(b) Angular velocity of the pump

Fig.11 Step responses of the system with suggested digital VSC for sampling time(C=0.2, S_1=100, S_{n1}=50, ε=3, T=0.5sec)

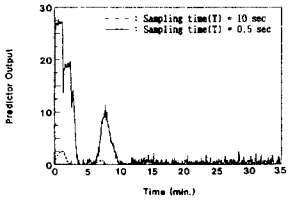
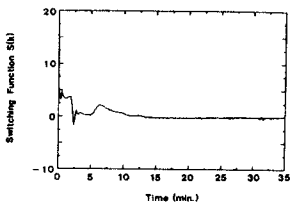
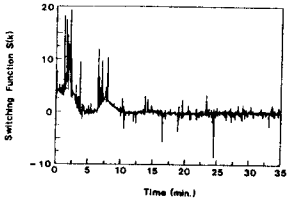


Fig.12 Smith predictor outputs of the system with suggested digital VSC for sampling time (C=0.2, S_1=100, S_{n1}=50, ε=3)



(a) Sampling time : 10 sec



(b) Sampling time : 0.5 sec

Fig.13 Sliding mode behaviors of the system with suggested digital VSC for sampling time (C=0.2, S_1=100, S_{n1}=50, ε=3)