

## 온수난방 시스템의 디지털 가변구조제어

### Digital Variable Structure Control for a Hot Water Heating System

안 병 천\*, 장 효 환\*\*

B. C. Ahn, H. W. Chang

**Key words :** Digital Variable Structure Control(DVSC : 디지털 가변구조제어), Quasi-sliding Mode (준 슬라이딩 모드), Circulating Pump Speed Control(순환펌프 회전수제어), Dead Time Compensation(지연시간 보상)

#### Abstract

A pilot plant, which is simplified the hot water heating control system of a large scale residential building, is used to investigate the effects of control methods and operating conditions on the system performance and to compare control characteristics. Digital variable structure controller(DVSC) and digital PI controller are implemented to control the speed of the circulating pump for the pilot plant using PC.

For the DVSC, a control algorithm is suggested, which using a nonlinear sliding surface and a PID sliding surface outside and inside of output error boundary layer, respectively. Smith predictor algorithm is used for the compensation of long dead time.

The suggested DVSC yields improved control performance compared with existing DVSC using linear sliding surface only. the system responses with the suggested DVSC shows good responses without overshoot for various operating conditions and robust under external disturbances compared with digital PI controller.

#### 기 호 설 명

$E(k), e(k)$  : 오차

$G(s)$  : 플랜트 전달함수

$K_p$  : 비례제어계수

$K_i$  : 적분제어계수

$K_d$  : 미분제어계수

$K$  : 플랜트 이득

$r$  : 기준 입력

$S(k)$  : 스위칭 함수

$S_1$  : 선형 연속귀환제어기 이득

$S_{nl}$  : 비선형 연속귀환제어기 이득

$T$  : 샘플링 시간(sec)

$t_0, d$  : 지연시간

$U(s)$  : 제어기 출력 전달함수

\* 경원대학교 건축설비과

\*\* 고려대학교 기계공학과

$u_{op}(k)$  : 등가 제어 입력  
 $u_n(k)$  : 가변 제어 입력  
 $X(s)$  : 시스템 상태 전달함수

#### 그리스 문자

$\epsilon$  : 정상상태오차 경계치  
 $\tau_1, \tau_2$  : 시스템 시상수

## 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 시스템'이라 칭한다.

온수난방 시스템은 온수의 공급이 순환펌프에 의해 이루어지는 폐회로 순환펌프 시스템이며, 일반적으로 시스템에서의 난방설비의 부하는 0~100%의 커다란 변화를 나타내게 된다. 따라서 최대부하를 기준으로 하여 선정된 순환펌프를 항상 최대 출력으로 운전시키지 않고, 난방부하의 변화에 따라 출력을 조절하여 운전할 필요가 있으며, 이러한 펌프는 소요동력이 팬(fan), 송풍기등과 같이 회전속도의 3승에 비례하는 특성을 갖고 있기 때문에 기존의 밸브나 댐퍼(damper)에 의한 유량조절방식 대신에 펌프의 가변속을 이용하여 공급유량을 제어하는 방식이 좀 더 에너지 절약적임이 연구 발표<sup>(1,2)</sup> 되었다.

또한 온수난방 시스템은 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 뚫힌 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 보장 받을 수 있으며, 실제 구현(implementation)이 용이한 견실한 제어기의 도입이 요구된다.

적용제어방법의 한 종류인 가변구조 제어시스템은 시스템의 상태공간의 표시점의 위치를 불연속적으로 구성된 스위칭 논리에 따라 미리 정의된 스위칭 평면을 따라 교차하면서 진행하도록 함으로써 시스템이 슬라이딩 모드(sliding mode)<sup>(3)</sup>라고 하는 특이한 성질을 갖게 된다. 시스템이 이러한 슬라이딩 모드내에 있을 때에는 시스템 파라미터의 변동 및 외란에 둔감한, 즉 강인한 성질이 있어 시스템의 파라미터 변화가 크거나 외란이 존재하고 불확실한 모델을 갖는 시스템에 대해 가변구조 제어기는 효과적이며 안정한 제어기라 할 수 있다.<sup>(4,5)</sup>

따라서 본 논문에서는 대단위 공동주택 온수난방 시스템을 간략화한 모형 실험장치(pilot-plant)를 대상으로 공급온수의 제어방법으로 가변속도 순환펌프를 이용하고, 제어기로서 제안된 복합 스위칭 평면의 구조를 갖는 디지털 가변구조제어기를 구현하였으며, 지연시간의 보상은 디지털 Smith 예측<sup>(6)</sup>를 사용하였다. 그리고 시스템 운전조건의 변화에 따른 응답특성을 디지털 PI제어기를 적용하였을 경우와 비교 고찰하였고, 순환펌프의 용량변화에 따른 응답특성도 고찰하였다.

상기의 실험적 연구내용을 토대로 가변속도 순환펌프를 이용하여 연속난방을 행하는 공동주택 온수난방 제어시스템의 제어기의 구현을 위한 기초 연구로서 시스템 변수에 대한 제어기의 성능 및 강인성을 위한 효율적인 제어방법을 제시하고자 한다.

## 2. 시스템 모델링

본 논문에서는 온수난방 제어시스템에서 순환펌프의 3상 유도전동기에 대한 가변전압과 가변주파수(VVVF)의 교류 전원장치인 인버터의 구동 직류전압과 보일러 출구에서 바닥패널 및 냉각탱크를 지나 냉각탱크출구에 도달되는 온수의 온도와의 관계식인 플랜트 전달함수를 근사화된 지연시간이 존재하는 2차 함수로 가정하였다. 다음식은 근사화된 온수난방 제어시스템의 플랜트 전달함수이다.

$$G(s) = \frac{K_{exp}(-t_0 s)}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)} \quad (1)$$

여기서 시스템 상수값들의 선정은 계단입력에 대한 개회로의 과도응답 특성곡선을 측정하여 곡선의 최대 기울기가 발생하는 점에서의 기울기의 연장선을 이용하는 방법<sup>(7)</sup>을 적용하였다. Fig.1은 지연시간이 존재하는 2차함수 모델링을 위한 과도응답 특성곡선에 대한 그림을 도시한 것이다.

Fig.1에서  $\tau_b$ ,  $\tau_i$ ,  $\tau_c$  그리고  $a$ 는 계단입력에 대한 개회로 과도응답 특성곡선을 실험 측정하여 구할 수 있으며,  $\tau_2$ 와  $\tau_1$ 는 다음과 같이 구하게 된다.<sup>(7)</sup>

$$R_1 = [1 = (0.086 + 0.0015 / (0.032 - a))^{-1} - 1] \quad (2)$$

$$\tau_2 = (\tau_b + \tau_i) [1 - 200(0.032 - a)R_1] \quad (3)$$

따라서  $\tau_1 (= \tau_c - \tau_2)$ 을 구할 수 있으며, 지연시간  $t_0$ 은  $\tau_d$ 가 된다.

또한 공정제어 시스템과 같이 긴 지연시간을 갖는 시스템에서는 제어기의 출력에 비해 지연된 시스템의 출력이 귀환됨으로써 예기치 못한 정상상태 오차, 진동 및 발산등의 현상이 발생하게 되며, 시스템의 특성방정식에 지연요소가 존재하여 시스템의 안정성에 좋지 못한 영향을 주게 된다. 따라서 이러한 지연시간의 보상을 위해 시스템 특성방정식에 존재하는 지연시간요소를 제거시켜 시스템의 안정도를 보장해 주며, 보다 큰 제어이득의 사용을 가능케하는 Smith 예측기의 적용이 필요하게 된다.<sup>(6)</sup> 이러한 예측기의 전달함수는 다음과 같다.

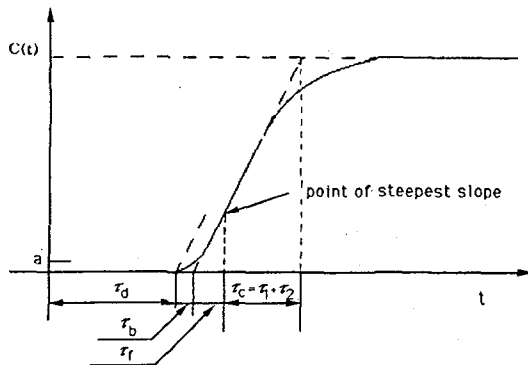


Fig.1 Process reaction curve for second plant modelling

$$\frac{X(s)}{U(s)} = \frac{K(1 - \exp(-t_0 s))}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)} \quad (4)$$

Fig.2는 예측기를 포함한 전체 시스템의 제어계통을 블록선도로 나타낸 그림이다.

### 3. 디지털 가변구조 제어기

일반적으로 공정제어 시스템과 같이 비교적 긴 샘플링 시간을 갖는 시스템에 대해서는 이산치(discrete time) 가변구조 제어이론의 적용이 필요하게 되는데, 이러한 이산치 가변구조 제어시스템에서는 시스템의 상태들이 스위칭 평면을 지나도 새로운 제어입력이 시스템에 출력되기 전까지, 즉 샘플링시간 동안 현재의 제어입력에 의해 상태궤적은 계속 이동하게 되어 제어입력상의 시간지연이 없어도 상태궤적이 떨림(chattering) 현상을 나타내는 준 슬라이딩 모드(quasi-sliding mode)가 발생하지만 연속치(continuous time) 가변구조 제어 시스템과 같이 시스템의 파라미터의 변화 및 외란에 둔감한 응답특성이 나타난다.<sup>(4)</sup>

Fig.3은 오차  $e_1(k)$ 와 오차의 시간변화율  $e_2(k)$ 로 구성된 위상 평면상에서 오차가 스위칭 면(직선)을 따라 원점으로 수렴하여 가는 가변제어기의 기본원리를 보여주고 있다. 이러한 스위칭 면을 슬라이딩 면이라 부르며, 재래식 가변구조제어 방법에서는 선형 스위칭 함수로 표시된 슬라이딩 면을 사용하였는데(Fig.3(a) 참조), 이런 경우 오차가 원점으로 수렴하는데 시간이 오래 걸리는 문제가 생긴다<sup>(3)</sup>. 따라서 본 논문에서는 수렴속도를 개선시키고 궁극적으로는 정상상태오차를 제거하기 위해 오차에 대한 경계치  $\epsilon$ 를 설정하여  $|e_1(k)| > \epsilon$  구간에서는 비선형 스위칭 함수로,  $|e_1(k)| \leq \epsilon$

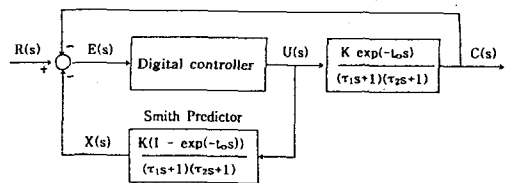


Fig.2 Block diagram of a hot water heating control system

구간에서는 PID 스위칭 함수로 각각 표시된 슬라이딩 면을 사용하는 수정된 방법을 제안하였다 (Fig.3(b) 참조).

본 논문에서 적용한 가변구조제어의 기본이론은 다음과 같다.

먼저 단일 입력을 갖는 시스템에서 입력의 지연 시간(d)이 존재하는 이산치 상태방정식을 기준 입력인 설정온도 r과 실제 온도와의 오차  $E(k) = [e_1(k), e_2(k)]^T$ 에 대한 차분방정식으로 나타내면 다음과 같다.

$$E(k+1) = A E(k) + B u(k-d) + D \cdot r \quad (5)$$

여기서 A, B, D는 시스템 행렬을 나타낸다. 위 상평면에서 원점으로의 수렴속도를 증가시키기 위해 오차가 감소함에 따라 기울기가 증가되는 성질을 갖는 시변 비선형 스위칭 함수를 다음과 같이 제안하였다.

$$S(k) = e_2(k) + \frac{C |e_1(k-2)|}{|e_1(k-1)| + \delta} e_1(k) \quad (6)$$

여기서, C와  $\delta$ 는 양의 실수를 나타낸다. 이산치 가변구조 제어이론에서 준 슬라이딩 모드가 존재할 조건에 대해 Sarpturk<sup>(4)</sup>는 스위칭 평면에서 슬라이딩 모드의 발생 및 상태체적의 수렴을 위해 다음과 같은 필요 충분조건을 제시하였다.

$$|S(k+1)| < |S(k)| \quad (7)$$

본 논문에서 제어입력 u(k)는 등가제어입력  $u_{eq}(k)$ 와 가변제어입력인 선형 연속귀환제어( $u_{n1}(k) = S_1 S(k)$ )와 비선형 연속귀환제어( $U_{n2}(k) = S_{n1} S(k) / (|S(k)| + r)$ , r는 양의 실수)로 구성하였다.

$$u(k) = u_{eq}(k) + u_{n1}(k) + u_{n2}(k) \quad (8)$$

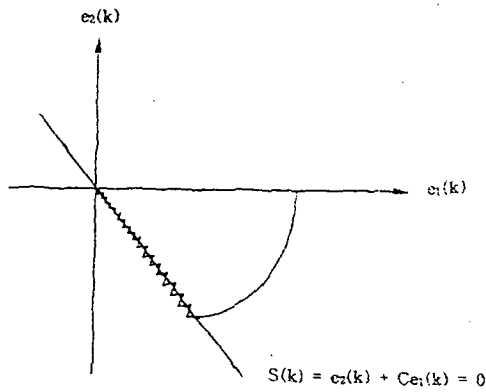
시스템이 슬라이딩 모드내에 유지되도록 해주는 등가제어입력  $u_{eq}(k)$ 는 제어입력 u(k)의 평균치를 의미하며, 다음과 같다.

$$u_{eq}(k) = -(G_1 B)^{-1} (G_1 A - G_2) E(k) + D \cdot r \quad (9)$$

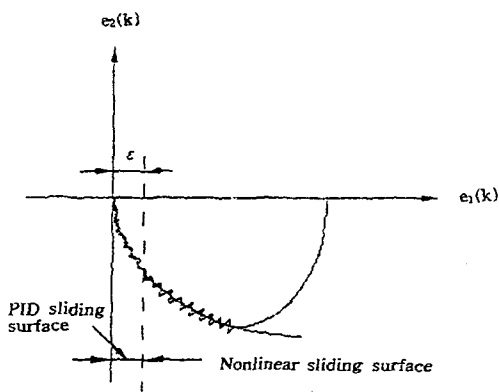
여기서,  $G_1 = [C_1 \ 1]$ ,  $G_2 = [C_2 \ 1]$ ,  $\det(G_1 \ B) \neq 0$ 이며,  $C_1$ 과  $C_2$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$C_1 = \frac{C |e_1(k-1)|}{|e_1(k) + \delta|} \quad C_2 = \frac{C |e_1(k-2)|}{|e_1(k-1)| + \delta} \quad (10)$$

또한 본 논문에서는 외부의 난방부하의 변화에 따라 발생하는 정상상태오차를 제거하기 위해 정상상태오차에 대한 경계치  $\epsilon$ 를 설정하여 이 경계치 내에서는 적분기가 있는 PID 스위칭 함수를 사용하였는데, 적분 방법으로 사다리꼴(trapezoidal) 근사화 방법을 이용하면 다음과 같은 차분 방정식을 얻게 된다.



(a) Conventional linear sliding surface



(b) Suggested nonlinear and PID sliding surfaces

Fig.3 Sliding surfaces for a variable structure controller

$$S(k) = S(k-1) + K_1 e_1(k) + K_2 e_1(k-1) + K_3 (e_2(k) - e_2(k-1)) \quad (11)$$

여기서,  $K_1$ ,  $K_2$  및  $K_3$ 는  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$  및 샘플링 시간  $T$ 로부터 구할 수 있다.<sup>(9)</sup>

시스템이 슬라이딩 모드내에 유지되도록 하는 등가제어입력  $u_{eq}(k)$ 을 이용하여 슬라이딩 모드에서의 동특성을 고려하면 다음과 같다.

$$E(k+1) = A_{eq} E(k) + [I - B(R_1 B)^{-1}] D \cdot r \quad (12)$$

슬라이딩 모드에서 시스템의 안정성을 고려하여  $A_{eq}$ 의 고유치가  $Z$ -평면의 단위원내에 위치하도록  $K_p$ ,  $K_i$ 와  $K_d$  이득을 설정하면 된다.

그리고 식(7)를 만족하기 위한 제어기의 이득( $S_1$ ,  $S_{n1}$ )을 비선형 함수와 PID스위칭 함수를 각각 사용하였을 때에 대해 디지털 제어입력인  $u(k)$ 를 구성한다.<sup>(9)</sup>

#### 4. 실험 장치 및 방법

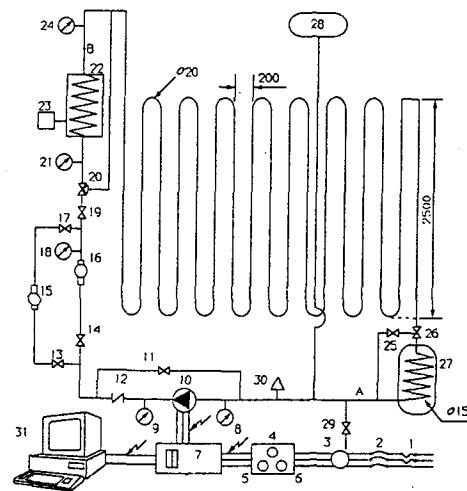
##### 4.1 실험 장치

Fig.4는 본 논문에서 사용한 모형실험장치의 개략도를 보여주고 있다. 모형 온수난방시스템의 실험 장치에서 사용한 보일러는 일반 가정용에서 많이 사용하는 열용량이 14.58 kW(12,500 kcal/h)인 경유 보일러이다. 온수 순환펌프의 경우는 이 펌프에 원래 달려있는 단상 유도전동기를 3상 유도전동기(극수 : 2P, 최대 회전수 : 3,450rpm)로 대체하여 사용하였다. 3상 유도전동기의 회전속도 제어를 위하여 인버터(출력 : 0.4kW, 용량 : 2kVA)를 사용하였는데, 인버터는 정현파 PWM 제어에 의한 VVVF 방식으로 전동기의 회전속도를 제어하며 제어입력 범위는 DC 0~10V이다. 순환펌프의 회전수는 엔코더를 사용하여 측정하였다.

과도 및 정상상태유량은 터빈 유량계(측정범위 : 3~20lpm, 정확도 : 0.2~0.3%)를 사용하여 측정하였다. 보일러의 단속운전을 위해서 릴레이를 제작 설치하였으며, 속도 검출장치인 엔코더와 터빈 유량계의 출력인 펄스주파수를 컴퓨터의 입력 전압으로 변환시켜 주기위한 FVC(Frequency

Voltage Converter)는 감도가 1 Volt/kHz이며, 터빈 유량계의 출력 주파수가 mvolt 단위이어서 증폭기를 별도로 제작하여 출력신호를 증폭시켰다. 온수의 온도는 T형(copper constantan) 열전대를 사용하여 측정하였으며, 난방부하의 변화를 주기위해 코일형태의 동파이프(내경 : 15mm, 길이 : 15m)를 냉각 탱크내에 구성시켰는데 온수는 코일형태의 동파이프를 통과하면서 열교환이 이루어지게 된다. 따라서 본 논문에서는 이 냉각탱크를 '열교환기'라 칭한다.

Fig.5는 모형 온수난방시스템의 제어계통을 나타낸 것이다. 본 논문에서 디지털 제어기로 사용한 컴퓨터는 클럭 주파수가 12MHz인 IBM PC 286 AT 호환 기종이며 A/D 및 D/A 변환기는 나노텍사의 Labin Master로서 12비트 해상도를 갖고 있다.



- |                            |                         |                             |
|----------------------------|-------------------------|-----------------------------|
| 1. Fuze                    | 10. Circulating Pump    | 22. Boiler                  |
| 2. Three Phase Switch      | 11,13,14,17. Gate Valve | 23. Relay                   |
| 3. Power Meter             | 12. Check Valve         | 25,26,29 Gate Valve         |
| 4. Power Factor Meter      | 15. Flow Meter          | 27. Heat Exchanger          |
| 5. Current Meter           | 16. Turbine Flow Meter  | 28. Expansion Tank          |
| 6. Voltage Meter           | 19. Glove Valve         | 30. Air Vent                |
| 7. Inverter                | 20. Three Way Valve     | 31. Digital Computer        |
| 8,9,18. Pressure Transduce | 21,24. Pressure Gauge   | A,B. Temp. Measuring Points |

Fig.4 Schematic of the experimental apparatus for the pilot plant

#### 4.2 실험 방법

순환펌프의 회전속도를 제어하여 공급온수의 유량을 조절하는 디지털 제어기의 구성에서 '최적'의 시스템 응답특성을 얻을 수 있는 제어계수들을 선정하기 위해 예비실험을 통해 선정된 운전조건(보일러의 단속제어를 위한 보일러 출구 온수온도의 표준온도 : 80°C, 난방부하용 열교환기 출구온수온도의 기준온도 : 40°C)을 기준조건으로 하여 실험을 하였다. 이 때 선정된 기준온도는 설치된 보일러의 열용량과 난방부하용 열교환기등에 의한 난방부하를 고려하여 선정된 값이며, 동일한 운전조건에서 실험을 하기 위해 전체 배관내의 수온이 20°C로, 냉각수의 온도는 15°C가 되도록 조절한 후에 실험을 수행하였다.

온수난방 시스템을 지연시간이 존재하는 2차 시스템으로서 가정하고, 순환펌프의 회전수를 3,000rpm의 계단입력을 주었을 때에 대한 시스템의 개회로 과도응답 특성곡선으로부터 시스템의 상수값들을 구하였는데, 그 결과는 식(13)과 같다. 식(13)을 Z-변환하면 식(5)와 같은 차분방정식을 얻게 된다.

$$G(s) = \frac{0.01442 \exp(-90s)}{(7.16s+1)(12.39s+1)} \quad (13)$$

디지털 가변구조제어에서 변수인 스위칭 함수의 C 값은 과도응답 특성을 고려하여 C=0.2로 선정하였으며, 슬라이딩 모드 존재조건인 식(7)를 만족시키는 선형 연속 귀환제어기의 이득( $S_1$ )과 비선형 연속 귀환제어기 이득( $S_{n1}$ )의 값은 각각  $0 < S_1 < 315$ 와  $0 < S_{n1} < 215$ 이며, 예비실험을 통하여 '최적'의 시스템 응답 특성을 얻을 수 있는 값들로 기준값을 삼았다.

또한 PID 스위칭 함수의 계수  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$  값은 식(12)로 나타내어지는 시스템이 안정하기 위하여  $A_{eq}$ 의 고유치가 단위원내의 값을 가져야 한다는 조건아래서, 시행오차법에 의해 구하여  $K_p=0.2$ ,  $K_i=0.2$ ,  $K_d=1.0$ 로 선정하였고 이 때의 고유치 값은 -0.7와 0.85이다. 그리고 귀환제어이득은 각각  $0 < S_1 < 278$ 와  $0 < S_{n1} < 183$ 으로 구해진다.

스위칭 함수의 전환을 위한 오차에 대한 경계치  $\epsilon$ 는 비선형 스위칭 함수만을 사용하였을 때의 응답 특성에서 발생되는 정상상태오차의 크기를 고려하여야 선정하였다.

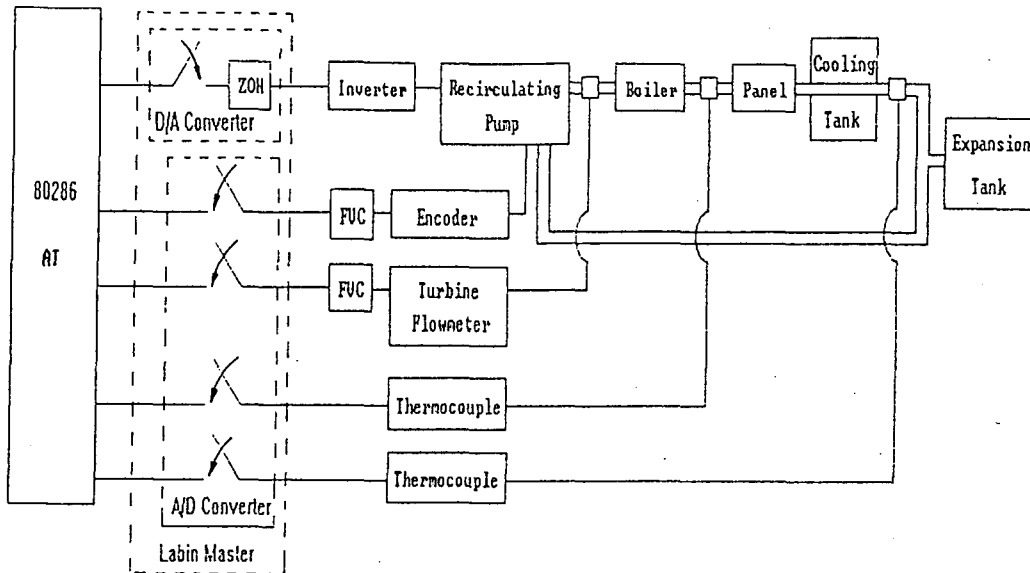


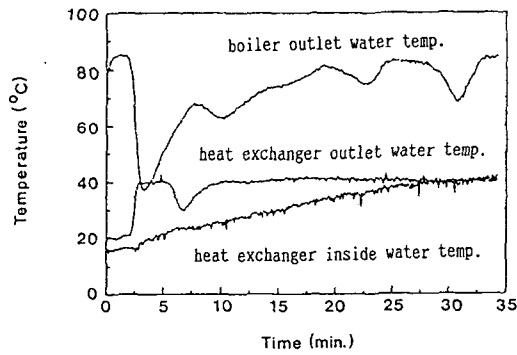
Fig.5 Schematic of a microcomputer-based hot water heating control system

디지털 PI 제어에서 제어계수는 1차적으로 Ziegler-Nichols 방법<sup>(10)</sup>을 적용하여 선정하였고, 보다 양호한 응답특성을 얻기 위하여 예비실험을 통한 시행오차법에 의해  $K_p=80$ ,  $K_i=1.1$ 로 결정하였다.

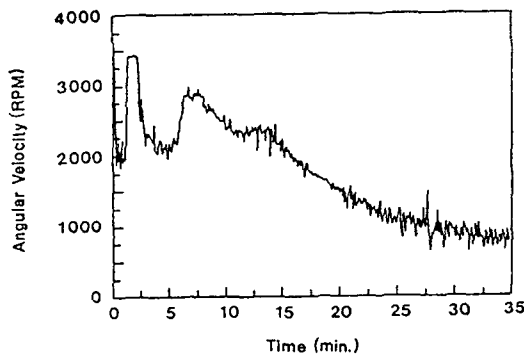
실험에서 사용한 디지털 제어기의 제어 프로그램은 실시간 제어기와 제어기 구성이 편리한 파스칼(Pascal)언어를 사용하였다. 샘플링 시간은 온수의 유동에 따라 발생하는 온도 측정값의 진동과 연산시간을 고려하여 1sec로 하였다.

5. 결과 및 고찰

모형 실험장치를 사용하여 수행한 실험의 표준조



(a) Temperature

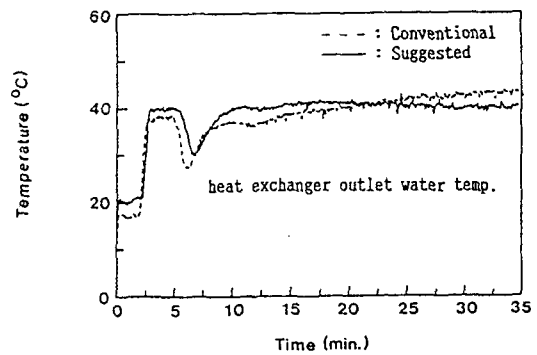


(b) Angular velocity of the pump

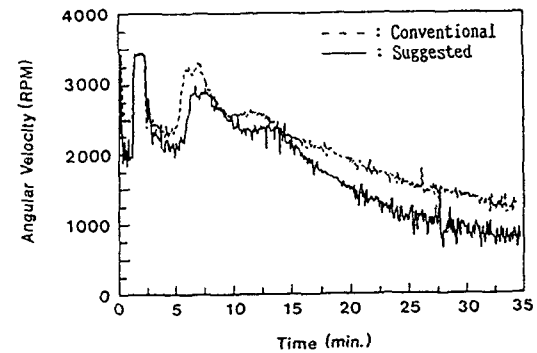
Fig.6 Step responses of the pilot plant system with suggested digital VSC( $C=0.2$ ,  $S_1=100$ ,  $S_{n1}=50$ ,  $\epsilon=3$ ,  $T=1sec$ )

건은 보일러 출구온수온도가 80°C에 도달한 상태에서 정하여진 제어방법에 따라 순환펌프를 가동시키며 난방부하용 열교환기 출구 온수온도의 기준온도는 40°C이다. 또한 열교환기내의 냉각수는 저장된 상태(초기 15°C)이다.

Fig.6은 제안된 디지털 가변구조제어에 의해 순환펌프를 가동시켰을 때의 모형 온수난방시스템의 과도응답을 나타낸 것이다. Fig.6(a)에서 볼 수 있듯이 보일러출구 온수온도는 순환펌프가 가동되기 시작한 직후에 보일러내의 온수가 출구로 유출되면서 약간 상승하다가 전체 배관내에 잠겨있던 저온수가 보일러로 유입되면서 급강하하였다가 다시 서서히 상승하면서 단속제어특유의 진동현상을 보였다. 열교환기내의 냉각수 온도는 초기 15°C에서



(a) Temperature



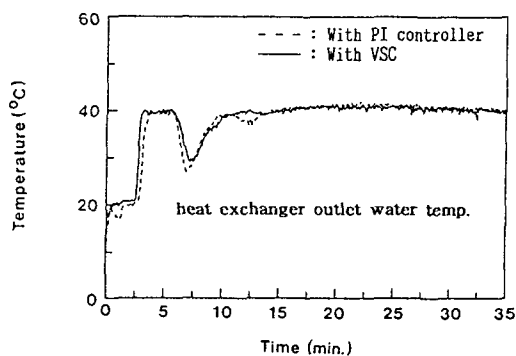
(b) Angular velocity of the pump

Fig.7 Step responses of the pilot plant system with conventional( $C=0.4$ ,  $\epsilon=0$ ) and suggested( $C=0.2$ ,  $\epsilon=3$ ) digital VSC( $S_1=100$ ,  $S_{n1}=50$ ,  $T=1sec$ )

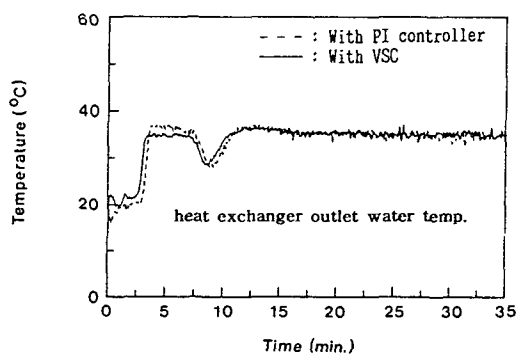
서서히 온도가 상승됨을 볼 수 있으며, 이로 인해 난방부하가 차츰 감소하게 됨을 알 수 있다. 또한 열교환기 출구 온수온도는 온수순환에 의한 지연시간후 기준온도인 40°C에 오버슈트없이 도달하였으나 정상상태에 도달한 후 출구 온수온도가 잠깐 떨어진 것은 보일러에서 공급된 온수의 온도가 초기에 급강하한 외란에 의한 현상을 생각된다. Fig.6 (b)는 순환펌프의 회전속도를 나타내는데 초기에 난방부하가 클 때에는 회전속도가 최대치(3,450rpm)에 이르고 열교환내 냉각수 온도가 상승하여 난방부하가 줄어들면서 회전속도도 서서히 감소하는 것을 볼 수 있다. 초기에 회전속도가 잠깐동안 크게 감소한 것은 Smith 예측기의 출력이 증가한 때문

인 것으로 생각된다.<sup>(9)</sup>

Fig.7은 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. Fig.7(a)에서 볼 수 있듯이 제안된 디지털 가변구조제어를 적용한 경우, 종래의 디지털 가변구조제어를 적용한 경우에 비해 열교환기 출구 온수온도의 응답특성이 더 우수 하였고 정상상태오차도 없음을 볼 수 있다. 또한 Fig.7(b)에서 볼 수 있는 바와 같이 제안된 디지털 가변구조제어를 적

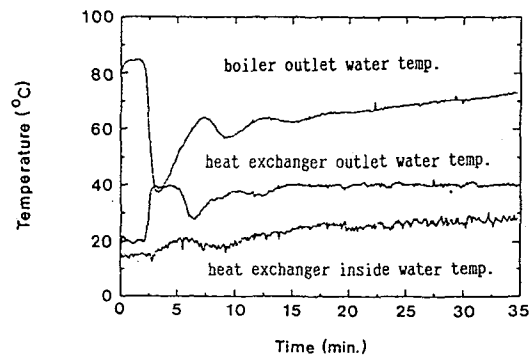


(a) Reference input : 40°C

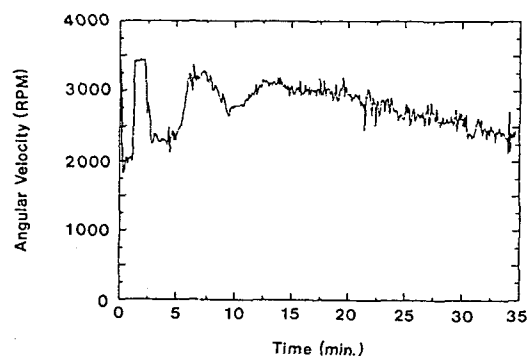


(b) Reference input : 35°C

Fig.8 Comparison between step responses of the pilot plant system with digital VSC and PI controllers for reference input 40°C and 35°C



(a) Temperature



(b) Angular velocity of the pump

Fig.9 Step responses of the pilot plant system with suggested digital VSC for increased heating load



용한 경우에 순환펌프의 회전속도가 좀 더 작게 나타났기 때문에 전력소모도 줄일 수 있음을 알 수 있다.

Fig.8은 열교환기 출구 온수온도의 기준 설정온도를 다르게 설정하였을 때에 대해 디지털 가변구조제어와 디지털 PI 제어방법의 응답특성을 보여주고 있다. Fig.8(a)에서 볼 수 있듯이 40°C인 경우 PI 제어 방법을 적용하였을 때가 조금 더 긴 시간지연이 발생하였으나 전체적으로 유사한 응답특성을 보였다. Fig.8(b)는 기준 설정온도가 35°C인 경우로서 PI 제어 방법을 적용하였을 때 40°C인 경우와 마찬가지로 조금 더 긴 시간지연이 발생하였고, 오버슈트현상까지 발생하였다. 이 경우 PI제어의 제어계수는 40°C일 때와 동일한 것을 사용하였는데, PI 제어에서는 시스템의 기준온도나 운전조건이 변화하였을 때 그 때마다 제어계수를 재조율하지 않으면 '최적'의 응답특성을 얻을 수 없다는 것을 확인할 수 있었다.

Fig.9는 제안된 디지털 가변구조제어를 적용한 상태에서 열교환기내에 냉각수를 초기의 저장상태에서 일정량의 냉각수를 공급하고 배수시켜 줌으로써 15°C의 차가운 냉각수가 계속 유입됨에 따른 난방부하의 증가시에 대한 과도응답 특성을 나타낸 그림이다. 열교환기내에의 냉각수가 저장된 상태의 경우인 Fig.6에 비해 열교환기내의 냉각수 온도가

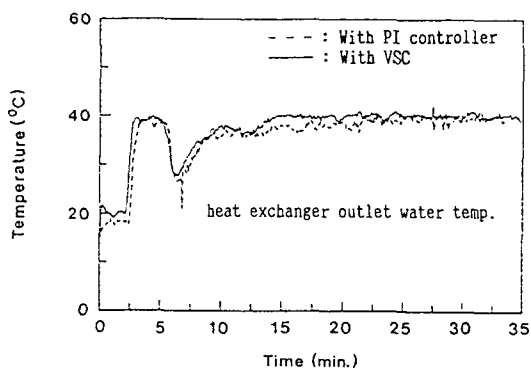
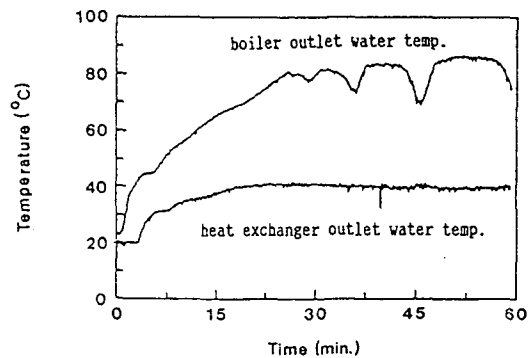


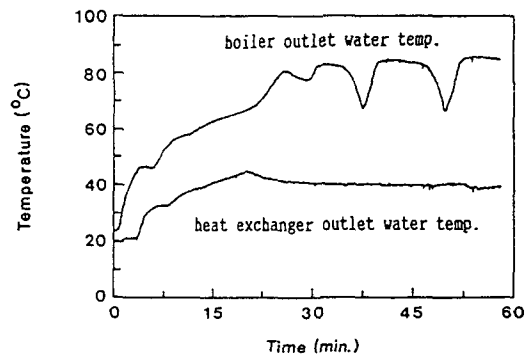
Fig.10 Comparison between step responses of the pilot plant system with digital VSC and PI controllers for increased heating load

초기 15°C에서 35분 이후 약 29°C까지 상승하는 것을 볼 수 있는데 Fig.6에서의 28분정도에서 40°C까지 상승하는 것과 비교해 볼때 난방부하의 크기가 증가됨을 알 수 있다. 이와 같이 난방부하가 증가함에 따라 순환펌프의 회전속도(Fig.9(b) 참조)는 Fig.6(b)의 경우에 비해 높은 회전수의 값을 나타내고 있으며, 열교환기 출구 온수온도는 미소한 진동현상은 나타나고 있으나 기준온도(40°C)에 잘 추종하고 있음을 볼 수 있다.

Fig.10은 Fig.9와 동일 조건에서 디지털 가변구조제어와 디지털 PI 제어방법의 제어 방법에 따른 열교환기 출구 온수온도의 응답특성을 보여주고 있



(a) Digital VSC

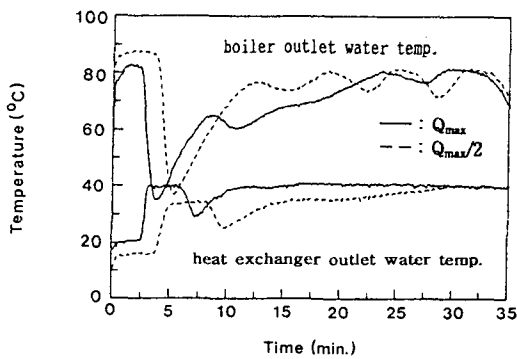


(b) Digital PI controller

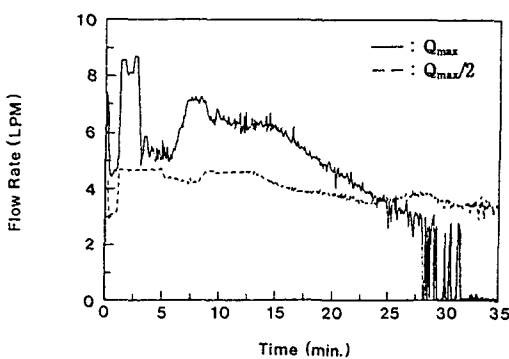
Fig.11 Comparison between step responses of the pilot plant system with digital VSC and PI controllers(initial : 20°C, operating : 80°C)

다. PI 제어를 적용한 경우보다 가변구조제어를 적용한 경우에 출구 온수온도의 변화가 적게 나타나 가변구조제어가 외란으로서 작용되는 난방부하의 변화에 덜 민감한 강인한 제어방법임을 보여주었다.

Fig.11은 운전조건의 변화를 순환펌프를 보일러와 동시에 가동시켜 제어하였을 때 디지털 가변구조제어(Fig.11(a))와 디지털 PI제어방법(Fig.11(b))의 응답특성을 보여주고 있다. 전반적으로 보일러 출구의 온수온도가 서서히 상승하면서 열교환기 출구의 온수온도도 상승시간이 길어지고 초반의 온도 급강하 현상이 없어진 응답특성을 보였다. PI 제어방법을 적용한 경우에는 4°C 오버슈트가 발



(a) Temperature



(b) Flow rate

Fig.12 Comparison between step responses of the pilot plant system with digital VSC for maximum flow rates(—:  $Q_{max}$ , - - :  $Q_{max}/2$ )

생하였다.

Fig.12는 글로브밸브를 이용하여 최대유량을 반으로 줄인 경우( $Q_{max}/2$ )와 최대유량( $Q_{max}$ )을 사용한 경우에 대해 디지털 가변구조제어방법을 적용한 때의 응답특성을 보여주고 있다. 여기서 글로브밸브를 이용하여 최대유량을 반으로 줄인 경우는 순환펌프의 용량을 반(1/2)으로 줄인 효과를 주기 위함이다. 그림에서 볼 수 있듯이 최대유량을 반으로 줄인 경우는 보일러 출구온수온도가 전체적으로 보다 높게 나타났고, 열교환기 출구 온수온도는 상승시간이 상당히 긴 응답특성을 보였다. 이처럼 순환펌프의 용량을 줄였을 경우 전력소모량은 줄일 수 있겠으나 양호한 제어응답특성을 얻기는 곤란하였다. 따라서 '최적'의 응답특성을 얻기 위해서는 보일러 열용량, 난방부하용 열교환기의 난방부하의 크기 및 열교환기 출구 온수온도의 기준치등이 고려된 적절한 펌프용량 선정이 요구됨을 알 수 있었다. Fig.12(b)에서 25분 이후에 유량의 측정치가 진동현상을 나타내고 있는데 이것은 터빈 유량계의 측정범위(3~20lpm)를 벗어나서 나타나는 현상으로 판단된다.

## 6. 결 론

대단위 공동주택 온수난방 제어시스템을 간략화한 모형 실험장치를 대상으로 공급온수의 제어방법으로 가변속도 순환펌프를 이용하고, 제어기로서 디지털 가변구조제어를 구현하여 시스템의 제어특성을 연구하였으며, 얻어진 결과의 요약은 다음과 같다.

1) 제어방법으로 디지털 가변구조제어 방법이 디지털 PI제어 방법에 비해 운전조건의 변화와 외란에 강인한 제어방법임을 확인할 수 있었다.

2) 본 논문에서 제안한 스위칭함수를 사용한 디지털 가변구조제어 방법이 종래의 선형 스위칭 함수만을 이용한 방법에 비해 정상상태 오차가 존재하지 않았을 뿐더러 시스템 응답특성이 더 우수하였고, 난방순환펌프의 회전속도가 작게 요구되어 전력소모량도 감소하였다.

3) 난방시스템의 초기 가동시 순환펌프를 보일러와 동시에 가동시키는 운전방법은 보일러 출구의

온수온도가 일정 수준에 도달한 후에 순환펌프를 가동시키는 기존의 운전방법에 비해 보일러 출구 온수온도와 난방 부하로 사용한 열교환기 출구 온수온도가 초기에 급강하하는 현상을 방지할 수 있어 갑자기 고온수가 순환함에 따른 배관의 열피로 현상을 방지할 수는 있겠으나, 시스템 과도응답에서 상승시간이 매우 길어지는 양호하지 못한 응답 특성을 나타내었다.

4) 순환펌프의 용량은 반(1/2)으로 줄인 효과를 주기 위해 최대유량을 반으로 줄였을 경우 전력 소모량은 줄일 수 있겠으나 시스템 과도응답의 상승시간이 상당히 길어지는 응답특성을 보였으며 '최적'의 응답특성을 얻기 위해서는 보일러 열용량, 난방부하용 열교환기의 부하크기 및 열교환기 출구 온수온도의 기준치등이 고려된 펌프용량 선정이 요구됨을 알 수 있었다.

### 후 기

본 연구는 한국과학재단 목적기초 연구비에 의해 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 심심한 감사의 뜻을 표합니다.

### 참 고 문 헌

1. Theichler, W. W., 1985, "Variable Speed Pumps for Water Chillers Water Coils, and Other Heat Transfer Equipment", ASHRAE Technical Data Bulletin, Hydronic Systems, Vol. 1, No. 7, pp. 1~12.
2. Coad, W. J., 1985, "Variable Flow in Hydronic Systems for Improved Stability,

Simplicity, and Energy Economics", ASHRAE Technical Data Bulletin, Hydronic Systems, Vol. 1, No. 7, pp. 13~26.

3. Zinober, A. S. I., El-Ghezawi, E., Billings, S. A., 1982, "Multivariable Variable Structure Adaptive Model Following Control Systems", IEE Proc. Vol. 129, No. 1, pp. 7~12.
4. Sarpturk, Z., Yorgo and Okyay, 1987, "On the Stability of Discrete Time Sliding Mode Control Systems", IEEE Trans. Auto. con., Vol. AC-32, No. 10, pp. 930~932.
5. Furuda, K., Morisada, M., 1988, "Implementation of Sliding Mode control by a Digital computer", IECON, pp. 453~458.
6. Owens, D. H. and Raya, A., 1982, "Robust Stability of Smith Predictor Controllers for Time Delay Systems", IEE Proc., Vol. 129, No. 6, Nov., pp. 298~304.
7. Smith, O. J. M., 1957, "Closer Control of Loops with Dead Time", Chemical Engineering Process, Vol. 53, No. 5, pp. 72~75.
8. Ambrosino, G., Celentano, G. and Garofalo, F., 1984, "Variable Structure Model Reference Adaptive Control Systems", INT. J. Control, Vol. 39, No. 6, pp. 1339~1349.
9. 안병천, 1991, "온수난방 시스템의 제어특성 및 디지털 제어 구현에 관한 연구", 고려대학교 기계공학과 박사학위 논문.
10. Smith, C. A., Corripio, A. B., 1985, "Principles and Practice of Automatic Process Control", John Wiley & Sons, Inc., pp. 176~254.