

공동주택용 온수난방 시스템의 에너지해석 및 제어특성

The Energy Analysis and Control Characteristics of a Hot Water Heating System for Apartment Houses

장 효 환*, 안 병 천**

H. W. Chang, B. C. Ahn

Key words : Hot Water Heating Control System(온수난방 제어시스템), Continuous Heating Control (연속난방제어), On-off Heating Control(단속난방제어), Intermittent Heating Control (간헐난방제어), Circulating Pump Speed Control(순환펌프 회전수제어)

Abstract

Energy analysis for the hot water heating control system of apartment house complex is accomplished by computer simulation. Mathematical model of a boiler, pipe network and a unit-house is developed. The effects of heating control methods on the heating performance and energy consumption of the system are investigated.

The heating control methods considered in this study are a continuous heating control, an on-off heating control and an intermittent heating control methods. For each control method, the effects of an outdoor temperature, indoor temperature sensing position and the capacities of the boilers and circulating pumps on the heating performance and energy consumption are obtained and "the best" control method is recommended.

기 호 설 명

A_k : 세대내 각 표면적 (m^2)
 C_i : 열 용량 ($J/^\circ C$)
 C_{pwb} : 온수의 비열 ($J/kg \ ^\circ C$)
 D : 관의 직경 (m)
 F_{j-k} : 형상계수(shape factor)

K_d : 미분제어 계수
 K_i : 적분제어 계수
 K_{in} : 관의 상수
 K_p : 비례제어 계수
 L : 관의 길이 (m)
 Q, m_{wb} : 유량 (kg/sec)
 T : 샘플링 (sampling) 시간
 T_e : 보일러실의 온도 ($^\circ C$)
 T_{go} : 배기가스의 온도 ($^\circ C$)
 T_k : 세대내 각 표면온도 ($^\circ C$)

* 고려대학교 공과대학 기계공학과
 ** 경원대학교 공과대학 건축설비학과

- T_{wbi} : 보일러 입구 온수온도(°C)
- T_{wbo} : 보일러 출구 온수온도(°C)
- UA_{ge} : 가스와 외기간의 등가 열전달계수 (J/hr m² °C)
- UA_{gw} : 가스와 온수간의 등가 열전달계수 (J/hr m² °C)
- UA_{we} : 온수와 외기간의 등가 열전달계수 (J/hr m² °C)

그리스 문자

- ϵ_k : 방사율(emissivity)
- σ : 볼츠만(Boltzmann)상수
- ρ_n : 반사율(reflectivity)

1. 서 론

대단위 공동주택 온수난방 시스템의 공급온수 제어 방법은 수동식 간헐난방제어 방법과 연속난방제어 방법으로 분류된다. 수동식 간헐난방제어 방법은 국내 기존의 대단위 공동주택에서 대부분 채택되고 있는 방법으로서 하루 2~3차례 예정된 시간에 맞추어 온수를 공급하는 방식이며, 이에 비해 연속난방제어 방법은 24시간 연속적으로 온수를 공급하는 방식으로 수동식 간헐난방제어 방법에 비해 실내 열환경 수준을 개선시켜 주고, 최대 난방 부하가 적으므로 보일러 및 순환펌프등의 설비용량이 줄어들며, 초기 투자비를 줄일 수 있게 한다^{(1),(2)}. 열병합 발전이나 산업 폐열등을 이용하여 24시간 연속적으로 에너지를 공급하는 지역난방(district heating) 방식은 선진국에서는 이미 널리 보급되어 있으며, 국내의 경우 목동지구, 여의도, 동부 이촌동, 반포지역 아파트 및 신도시 아파트등에 이 지역난방 방식이 적용되었다. 그러나 이러한 연속제어 방법에서는 순환펌프를 정격회전수로 가동시킨 상태에서 각 세대에 설치되어 있는 자동온도조절밸브(또는 유량조절밸브)에 의해 세대내로 유입되는 열량을 제어하는 방법이 주로 사용되어 왔기 때문에 순환펌프의 가동시간이 길어져서 전력소모량이 증가하게 된다. 또한 지역난방 방식이 아닌 대단위 공동주택에서 독립된 열원의 보일러를 설치

운영할 경우에는 보일러 가동시간이 길어짐에 따라 에너지 소모량이 증가될 수도 있다.

온수난방 시스템은 온수의 공급이 순환펌프에 의해 이루어지는 폐회로 순환펌프 시스템이며, 기존의 밸브나 댐퍼(damper)에 의한 유량조절방식 대신에 펌프의 회전수 제어에 의해 공급유량을 제어하는 방식이 좀 더 에너지 절약적임이 연구 발표되었고⁽³⁾, 팬코일 유닛을 사용하는 냉난방시스템에서 냉온수 순환펌프에 회전수제어를 적용하여 공급유량을 제어하는 연구들이 수행되어 에너지를 절약할 수 있음을 보여 주었다^{(4),(5)}.

이에 반해 국내의 온수난방 시스템에 대한 연구로는 제어 방식이 난방성능 및 에너지 소모량에 미치는 영향에 관한 것으로 오⁽²⁾의 실험 및 이론적 연구가 있는데, 여기서 적용된 연속난방 방식은 순환펌프를 설정온도에 따라 단속제어한 것이며, 순환펌프의 회전수 제어와 배관망의 열유동 해석은 다루지 않았다. 또한 연속난방제어 방법에서 유량 조절밸브의 제어와 순환펌프의 회전수 제어를 위한 제어기 설계에 관한 연구등은 이루어지지 않았으며, 연속난방제어 방법의 장점과 순환펌프의 회전수제어에 의한 장점들을 고려해 볼 때 이에 대한 연구가 필요하다.

본 논문의 목적은 공동주택용 온수난방 시스템에서 사용되는 에너지를 효율적으로 이용하고 난방성능을 개선하기 위하여 전체 시스템의 수학적 모델을 수립한 후 시뮬레이션을 통하여 에너지 해석을 수행하고, 이를 토대로 난방제어 방법으로 순환펌프의 회전수제어에 의한 연속난방제어, 단속난방제어 및 간헐난방제어를 각각 적용하였을 때의 난방성능과 에너지 소모량에 관한 시스템 제어 특성을 비교 연구하는데 있다.

2. 시스템 모델링

본 논문에서 전체 온수난방 시스템의 에너지 해석을 위해 선정한 대단위 공동주택 온수난방 시스템(상계동 주공 아파트 : Fig.1 참조)은 중앙기계실에 설치되어 있는 보일러에서 가열된 중온수가 중온수 순환펌프에 의해 순환되는 1차측 회로와, 1차측에서 공급된 중온수와 1904동에서 환수된 저온수가 블리드-인(bleed-in) 방식에 의해 혼합되

어 제어된 온도의 온수가 난방 순환펌프에 의해 1904동의 각 세대로 다시 공급되는 2차측 회로로 구성되어 있다. 이러한 블리드-인 방식에 의한 온수순환은 중간기계실에서 이루어지며 Fig.1에서 중간기계실은 1903동과 1904동에 대해서만 구체적으로 나타나 있지만 기타 동들도 동일한 구조로 되어 있다.

본 논문에서는 배관망의 모델링을 위해 1904동을 대상으로 선정하였는데, 1904동은 11층과 15층으로 되어 있으며, 11층 아파트 건물은 총 33세대(18평형)로 이루어져 있고 1층, 2층~5층, 6층~11층등 3개의 난방구역으로 분할되어 있다. 또한 15층 아파트 건물은 총 60세대(20평형)로 이루어져 있고 1층, 2층~7층, 8층~15층등 3개의 난방구역으로 분할되어 있다.

본 논문에서는 전체 시스템을 3개의 요소 즉, 보일러 모델, 배관망내 온수의 열유동해석 모델과 단위세대 모델로 나누어 해석하였다.

2.1 보일러 모델

본 논문에서는 보일러의 열평형에 대한 지배방정식을 구하기 위해 Fig.2와 같은 간략화된 모델을 사용하였다⁶⁾. 공급되는 에너지 총량 q_{bi} , 온수의 입구측 열량 q_{b1} , 온수의 출구측 열량 q_{b2} , 연돌(chimney)로 나가는 배기가스 손실량 q_{ch} , 외기로의 방열 손실량 q_s , 보일러 몸체의 축열량 q_{st} 등을 고려한 열평형 방정식은 다음과 같다.

$$q_{bi} = (q_{b2} - q_{b1}) + q_{ch} + q_s + q_{st} \quad (1)$$

보일러가 가스와 외기, 가스와 온수, 온수와 외기간에 각각 열교환하는 3개의 열교환기로 구성되어 있다고 보고, 질량집중 모델(lumped model)로 취급하여 보일러를 등가 R-C 회로로 나타내면 Fig.3과 같다. Fig.3의 정점 1, 2에서의 에너지 평형 방정식은 다음과 같다.

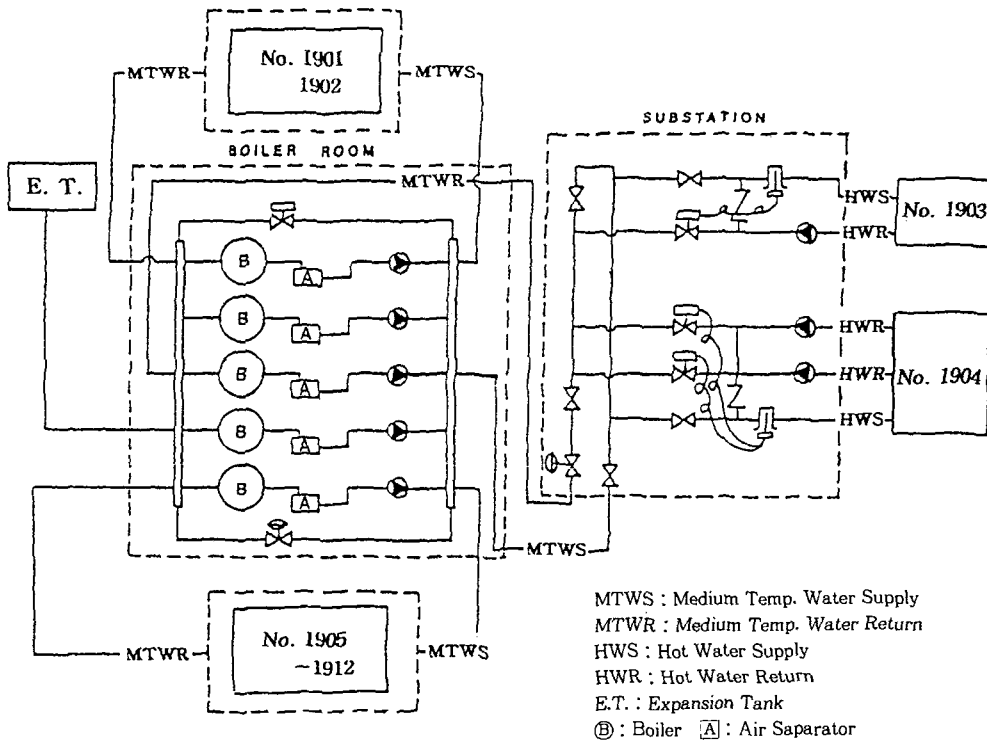


Fig.1 Schematic of a hot water heating control system in the apartment house complex

정점 1

$$C_g \cdot \frac{dT_{go}}{dt} = UA_{ge}(T_e - T_{go}) + UA_{gw}(T_{wbo} - T_{go}) + \dot{q}_{bi} \quad (2)$$

정점 2

$$C_w \cdot \frac{dT_{wbo}}{dt} = UA_{we}(T_e - T_{wbo}) + UA_{gw}(T_{go} - T_{wbo}) + m_{wb} C_{pwb}(T_{wbi} - T_{wbo}) \quad (3)$$

여기서 C_g , C_w 는 보일러의 열용량으로부터 계산할 수 있다⁽⁶⁾.

등가 열전달계수는 보일러가 가동되고 있는 시간 동안과 가동이 중지된 시간동안에 각각 다른 값을 갖는다. 보일러가 가동되고 있는 시간동안은 정지하기 직전의 상태를 정상 상태 ($dT_{go}/dt=0$, $dT_{wbo}/dt=0$)로 가정하여 보일러 정지직전의 배기가스 온도 $T_{go,ss}$ 와 온수의 출구온도 $T_{wbo,ss}$ 로부터 각 등가 열전달계수를 구한다. 또한 보일러의 연소가 정지된 동안은 다시 가동이 시작되기 직전의 온수의 출구온도 $T_{wbo,off}$ 와 연돌 입구의 공기온도 $T_{go,off}$ 로부터 각 등가 열전달계수를 구한다⁽⁷⁾.

Lebrun⁽⁶⁾은 보일러의 가동이 정지된 경우 순환 펌프도 동시에 정지된다고 가정하여 보일러내에서 온수유동에 의한 열손실이 없다고 해석하였으나, 본 논문에서는 보일러의 가동이 정지된 경우에도 순환펌프가 계속 가동되는 때에는 온수의 유동에 의한 열손실을 고려하여 주었으며⁽⁷⁾ 이 경우 온수와 외기간의 열전달계수는 다음과 같다.

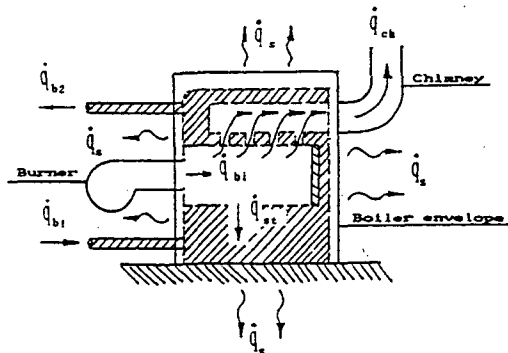


Fig.2 Simplified representation of a boiler heat flow

$$UA_{we,off} = \frac{\dot{q}_{bi,off} - \dot{q}_{ch,off} - (\dot{q}_{bz} - \dot{q}_{bi})_{off}}{T_{wbo,off} - T_e} \quad (4)$$

2.2 배관망내 온수의 열유동 해석

(1) 배관망내 온수의 유체유동 해석

전체 배관망의 유체유동의 해석은 정상상태 및 과도상태로 나누어서 하여야 한다. 그러나 과도상태가 대부분 10초이내에 소멸되기 때문에⁽⁷⁾ 과도상태가 전체 시스템의 난방 성능에 미치는 영향이 작다고 가정하여 본 논문에서는 정상상태 해석만 다룬다. 이를 위하여 수렴속도가 빠르고, 최초의 유량을 추정할 필요가 없는 선형해석방법(linear analysis method)⁽⁸⁾을 사용하였다.

임의의 n개의 관, j개의 정점과 f개의 폐회로를 갖는 배관망에서 n은(j+f-1)와 같고, (j-1)개의 정점마다 유입 유량 Q_{in} 의 합과 유출 유량 Q_{out} 의 합은 같다.

또한 임의의 폐회로에서 모든 손실수두의 합은 0이며 각각의 폐회로마다 다음과 같은 식이 성립한다.

$$\sum_{i=1}^{n'} h_{ii} = 0 \quad (5)$$

여기서, h_{ii} 는 회로에 속한 i번째 관의 손실수두이며, n' 은 회로에 속한 관의 수를 나타낸다. i번째 관의 마찰 손실수두에 대해 Wood등⁽⁸⁾은 다음과 같은 선형화된 근사식을 사용하였다.

$$h_{ii} = K_{in} Q_i^a = K_{in} Q_{i0}^{a-1} Q_i = K_{in}' Q_i \quad (6)$$

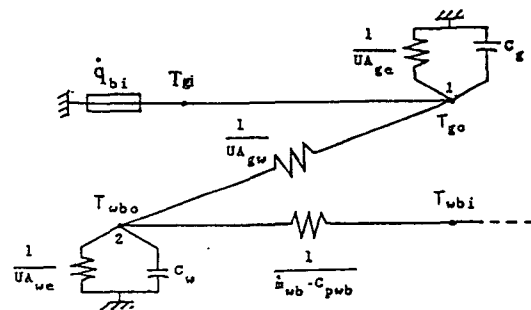


Fig.3 Equivalent R-C network representation of the boiler

여기서, Q_{i0} 는 i 번째 관에 흐르는 유량의 추정값이며, K_{in} '는 수정된 관의 상수를 나타낸다.

배관이 꼭관, 분류, 합류, 급격 확대 및 축소등의 요소를 포함하는 경우에는 관의 마찰 손실수두 외에 부차 손실계수를 고려하였으며, 배관에서의 열전달에 의해 온수의 온도가 변할 때, 온수의 밀도 변화가 유동에 미치는 영향을 고려하였다⁽⁷⁾.

(2) 배관망내 온수의 열전달 해석

단열재로 보온된 배관에서 온수의 유동에 따른 전열량의 평형 방정식은 외기온도가 일정하다고 가정할 때, 온수의 관입구온도 T_i 와 출구온도 T_o 에 대한 대수평균 온도차(LMTD: Log Mean Temperature Difference)를 이용하면 온수의 평균온도는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_L = T_i + (T_o - T_i) [1 + \{\exp(-E_1) - 1\} / E_1] \quad (7)$$

여기서 E_1 은 $UA / \rho QC_{pwb}$ 이며, U 는 온수의 유동과 외기사이의 등가 열전달계수이다.

단위세대내 방바닥속에 묻힌 배관에서 온수의 유동에 따른 전열손실은 방바닥으로 방출되는 열량과 아래층 천정으로 방출되는 열량의 합이 된다. 세대내 방바닥 표면온도 T_1 과 아래층의 천정표면온도 T_2 가 일정하다고 가정할 때, 온수의 평균온도 T_w 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_w = \frac{U_1 T_1 + U_2 T_2}{U_1 + U_2} + (T_i - \frac{U_1 T_1 + U_2 T_2}{U_1 + U_2}) \left(\frac{1 - \exp(-E_2)}{E_2} \right) \quad (8)$$

여기서 E_2 는 $(U_1 + U_2)A / \rho QC_{pwb}$ 이며, U_1 과 U_2 는 배관내 온수와 방바닥, 온수와 아래층 천정 사이의 각각의 등가 열전달계수를 나타낸다.

(3) 단위세대 모델

단위세대의 모델은 세대의 열적 구성요소들을 질량집중 모델인 등가 R-C회로로 나타내어 구하였는데 이러한 모델링 방법은 비정상 열전달의 수치해석에 많이 사용하는 유한 차분해석법이나 응답계수법에 비해 전산 시간을 줄일 수 있어 전체 온수 난방시스템의 시뮬레이션을 용이하게 만드는 장점이 있다. Fig.4는 세대내의 공기온도를 구하기 위

한 등가 R-C회로도의 한 예를 보여주고 있으며 그림에서는 q_i 는 대류 및 전도에 의한 열전달량을 표시한다. 또한 실내 각 표면($k=1, \dots, n$)사이의 복사 열전달량 q_{rk} 은 밀폐공간 해석방법(enclosure analysis method)⁽⁹⁾을 사용하였으며, 다음과 같이 구해진다.

$$q_{rk} = A_k \epsilon_k \sigma_k T_k - \sum_{j=1}^n A_k \epsilon_k \sigma_k T_k G_{jk} \quad (9)$$

여기서 $G_{jk} = F_{j-k} \epsilon_k + F_{j-k} \rho_1 G_{1k} + F_{j-k} \rho_n G_{nk}$ 이며, 복사 열전달량을 고려한 에너지 평형방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$C_i \frac{dT_i}{dt} = \sum q_{in} - \sum q_{out} \quad (10)$$

3. 제어 방법

3.1 연속난방제어 방법

본 논문에서는 연속난방제어 방식에서 난방순환 펌프의 회전수를 제어하거나 유량조절밸브의 개도를 제어하는 방법으로 디지털 PID제어 방법을 적용하였다.

디지털 PID제어 방법은 많은 공정제어 시스템에

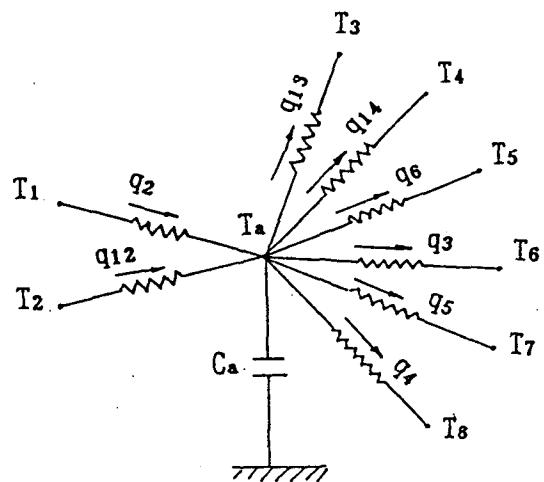


Fig.4 Equivalent R-C circuit for the heat flow in the house

서 사용되고 있는 제어 방법으로 제어기 구성이 비교적 간단한 장점이 있으며, 적분기로 사다리꼴 근사화 방법을 적용하여 차분 방정식을 구하면 다음과 같다.⁽¹⁰⁾.

$$u(k) = u(k-1) + K_1 e(k) + K_2 e(k-1) + K_3 e(k-2) \quad (11)$$

여기서, $K_1 = K_p + K_i T/2 + K_d/T$
 $K_2 = -K_p + K_i T/2 - 2K_d/T$
 $K_3 = K_d/T$

난방순환펌프의 제어에서는 전체 세대로부터 환수되는 온수의 온도와 기준 온도와의 오차로 부터 출력신호 $u(k)$ 를 계산하고 이 신호에 의해 순환펌프의 회전수가 제어된다. 세대입구에 설치된 유량 조절밸브의 제어에 있어서는 세대 방바닥 혹은 실내 공기의 기준온도를 설정하고 실제 온도와의 오차에 따라 계산된 출력신호 $u(k)$ 에 의해 밸브의 개도가 제어되어 세대로 공급되는 온수의 유량이 제어된다.

3.2 단속난방제어 및 간헐난방제어 방법

단속난방제어 방법에서는 단위세대내의 기준온도(방바닥 표면온도 또는 실내 공기온도)의 상한치와 하한치를 각각 설정하여, 온수의 유입으로 세대내의 온도(방바닥 표면온도 또는 실내 공기온도)가 기준온도의 상한치에 도달하면 유량조절밸브를 차단시키고 세대로 유입되는 온수는 세대의 출구로 직접 바이패스되도록 하여, 하한치에 도달하면 밸브를 완전히 개방시켜 세대내의 온도가 상한치에 도달할 때까지 계속하여 세대내로 온수를 공급하여 준다. 또한 보일러는 설정된 기준온도에 따라 단속제어되고, 중온수 및 난방 순환펌프는 정격회전속도를 유지한다.

간헐난방제어 방법에서는 하루에 두번(가동시기 : 0시와 12시) 보일러와 순환펌프를 정격으로 가동시키고 단위세대내 밸브는 완전 개방시켜 세대로 온수를 공급하여 준다. 또한 보일러와 순환펌프의 가동시간은 외기온도의 크기를 고려하여 선정한다.

4. 컴퓨터 시뮬레이션

본 논문에서 사용된 상계동 주공아파트 중앙기계실의 보일러는 하나의 열용량이 5,833kW(5Gcal/h)이고, 연료로서 벙커 C유를 사용하는 노통연관식 중온수 보일러로서 총 5대중 4대는 병렬로 운전되며 1대는 예비로 설치되어 있다(Fig.1 참조). 이러한 중온수 난방보일러의 제어와 운전조건을 Table 1에 나타내었다. 보일러에는 두개의 바이패스(bypass)라인이 설치되어 있는데 그 중 하나는 보일러 환수헤더의 온수의 온도를 80°C로 유지시키기 위하여 보일러 출구에 위치한 공급헤더(header)의 중온수 일부를 환수헤더쪽으로 바이패스시키는 것이며, 환수헤더에 있는 온도센서와 바이패스 라인에 설치되어 있는 유량조절밸브에 의해 바이패스 유량이 조절된다. 또 하나의 바이패스 라인은 공급헤더와 환수헤더사이의 압력차를 일정하게 유지시켜 주기위한 것이며 차압밸브가 라인에 설치되어 있다. 보일러의 중온수를 각 동으로 공급해 주기위하여 중앙기계실에 설치된 중온수 순환펌프는 1대의 출력이 25HP로서 각 보일러 출구에 한대씩 연결되어 있다. 보일러로부터 열량을 공급받은 온수가 120°C에 도달하면 중온수 순환펌프가 가동되어 공기분리기를 거쳐 공급헤더에서 합쳐지며 이 곳에서 3군데의 중간기계실로 분리 공급되

Table 1 Operating conditions and specifications of the boilers

Parameters			Values
Burner 'ON'	Steady	$T_{wbi,ss}$	80°C
	State	$T_{wbo,ss}$	120°C
		$T_{go,ss}$	260°C
Burner 'OFF'	Steady	$T_{wbi,off}$	80°C
	State	$T_{wbo,off}$	105°C
		$T_{go,off}$	50°C
Heat Input			5,833Kw
Thermal Capacitance		C_g	26.5MJ/°C
		C_w	498.75MJ/°C
Boiler Room Temp.		T_e	15°C
Pump Max. Flow Rate			36.32kg/sec

어진다.

중간계실에서는 보일러실로부터 공급된 증온수를 세대로부터 환수된 저온수와 혼합시켜 아파트로 온수를 공급하며, 공급되는 온수의 온도를 70°C로 일정하게 유지하기 위하여 공급관에 심어져 있는 온도센서와 환수관에 설치되어 있는 유량조절밸브에 의해 혼합비율이 자동조절된다. 출력이 7.5HP인 난방 순환펌프를 환수관에 설치하여 각 세대로의 온수의 공급이 균일하도록 하였으며 세대로부터 환수된 저온수의 일부는 보일러로 환수되어 재순환이 된다.

연속난방제어 시스템에서는 2차측의 전체 세대로부터 환수되는 온수온도의 기준온도를 60°C로 설정하고 실제 환수온도와의 오차를 감지한 후 난방순환펌프의 회전수를 PI제어($K_p=9 \times 10^{-4}$, $K_i=5 \times 10^{-5}$)하고, 단위세대의 입구에 설치된 유량조절밸브는 1차의 동특성을 갖는 모델(시상수: 0.05sec)로 가정하여 세대내에 공급되는 유량을 PI제어하였는데 제어계수는 $K_p=2 \times 10^{-4}$, $K_i=1 \times 10^{-6}$ 로 선정하였다.

보일러의 바이패스 밸브와 동입구의 증온수와 전체 세대로부터의 환수온수의 혼합조절밸브도 1차의 동특성을 갖는 모델(시상수: 0.05sec)로 가정하여, PID제어($K_p=3.3 \times 10^{-2}$, $K_i=9.5 \times 10^{-5}$, $K_d=1 \times 10^{-5}$)하여 시뮬레이션하였다.

단속난방제어 시스템에서는 실내 방바닥 표면온도의 상한 기준온도(27°C)와 하한 기준온도(25°C)의 폭을 설정하여 세대입구에 설치되어 있는 유량조절밸브를 단속적으로 제어하였다.

수동식 간헐난방제어를 적용한 시스템에서는 11층 아파트의 2층의 중간에 있는 한세대를 대표적 세대로 선정하여 실내 공기온도의 24시간 평균 온도가 약 25°C가 되도록 가동시간을 바꾸어 가면서 시뮬레이션을 반복 수행하여 시행오차법에 의해 구하였는데 외기온도가 -1°C, -10°C일 때 각각 190분, 220분이다. 가동시간동안에는 보일러와 순환펌프는 정격으로 운전되며, 단위세대내 밸브는 완전 개방시켜 주었다.

시뮬레이션에서 사용한 적분방법은 Runge Kutta 4차 방법이며 $\Delta t=0.01$ sec로 선정하였고 디지털 제어기에서의 샘플링 시간은 1min.으로 하

였다. 사용한 언어는 FORTRAN 77이며 사용한 컴퓨터는 IBM 80386DX/33MHz 호환기종인 Adtec 3750(4MB RAM, 150MB HDD, 32KB Cache RAM)이다.

5. 결과 및 고찰

5.1 시스템 제어특성

순환펌프의 회전수제어를 이용한 연속난방제어 방법과 단속난방 및 수동식 간헐난방제어 방법등을 각각 적용할 때의 공통 표준조건은 다음과 같다. 즉, 외기온도는 -1°C, 보일러 출구의 온수온도 제어를 위한 기준온도는 120°C, 아파트 동입구로 공급되는 혼합온수의 기준온도는 70°C로 설정하였고 방바닥 표면온도(세대의 열적 구성요소들을 질량집중 모델로 하여 방바닥 표면이 균일한 온도를 갖는다고 가정함)와 실내 공기온도의 초기치를 22°C로 가정하였다. 또한, 보일러 출구의 온수온도가 120°C에 도달한 상태에서 시스템을 작동시켰으며, 단위세대의 난방특성은 11층 아파트의 2층의 중간에 있는 한세대를 대표적 세대로 선정하여 그 세대의 것으로 나타내었다.

(1) 연속난방제어

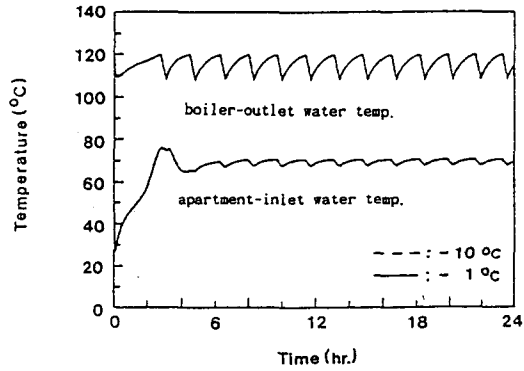
Fig.5는 연속난방제어 방법을 적용할 때의 과도응답을 나타낸 것으로, 표준조건은 단위세대 유량조절밸브의 제어를 위한 기준온도로 방바닥 표면온도를 26°C로 설정한 것이다. Fig.5(a)에서의 보일러 출구 온수온도는 전형적인 단속제어 특유의 진동(oscillation)현상을 나타냈고, 아파트 동입구로 공급되는 혼합온수의 온도는 정상상태오차가 존재하지 않는 양호한 과도응답을 나타내었다. 이 두 온수온도의 과도응답에서 외기온도의 영향은 나타나지 않았다. Fig.5(b)는 단위세대의 실내 공기온도와 방바닥 표면온도의 과도응답을 보여주고 있다. 방바닥의 열용량이 크기 때문에 방바닥 표면온도가 기준온도 26°C에 도달한 후 공급온수의 유량을 차단하더라도 방바닥의 온도가 계속 상승하는 오버슈트현상이 나타난다. 하지만 오버슈트이후의 응답은 정상상태 오차가 없는 양호한 특성을 보여 주었다. 실내 공기온도는 방바닥 표면온도보다 오

비슈트가 작게 나타났지만 시간이 지나면서 세대내의 난방부하가 감소함에 따라 조금씩 증가하여 방바닥 표면온도에 접근하여 나가는 경향을 보였고 이 경향은 외기온도가 높을 때 컸다.

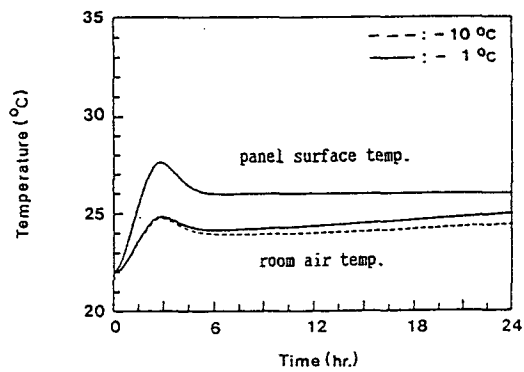
Fig.6은 난방시작 후 24시간이 지났을 때 응답 특성을 나타낸 것으로 Fig.6(a)에서의 단위세대별 실내 공기온도는 전반적으로 거의 균일하게 나타났고 단지, 아파트 건물의 양쪽 끝에 위치한 세대들(1-11호와 79-93호)의 실내 공기온도가 다른세대들의 온도보다 조금 낮고 특히, 맨 윗층 세대들(11,22,33,48,63,78,93호)의 온도가 낮았는데 그 정도는 외기온도가 낮을수록 컸다. Fig.6(b)에서

볼 수 있듯이 이들 세대들에 공급된 열량이 다른세대들 보다도 큼에도 불구하고 실내 공기온도가 낮은 이유는 외부로 열손실이 중간세대들에 비해 크기 때문이며, 기준온도를 중간세대들 보다 상대적으로 높게 설정하는 것이 요구되며 이렇게 하는 경우 구역에 관계없이 균일한 온도 분포를 얻을 수 있으리라 생각된다.

단위세대에 공급되는 온수의 유량을 제어하기 위한 기준온도로 방바닥 표면온도(Type 1)와 같은 실내 공기온도(Type 2)를 26°C와 25°C로 각각 설정하였을 때의 난방성능을 비교한 결과가 Fig.7과 Fig.8에 나타나있다. Fig.7은 대표세대의 방바

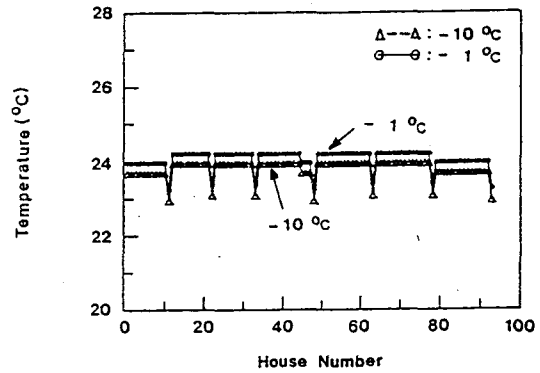


(a) Temperatures of hot water supplied from the boiler and mixed water supplied to the apartment

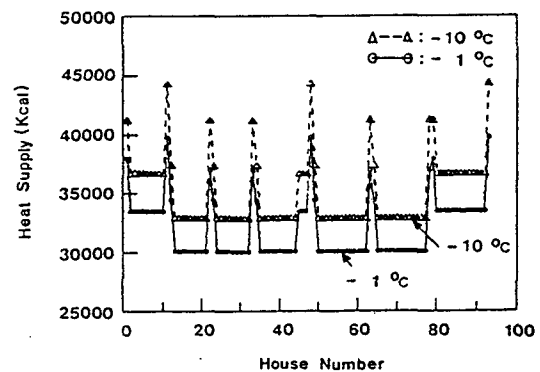


(b) Temperatures of the panel surface and room air

Fig.5 Step responses of the apartment system with the continuous heating control method



(a) Room air temperatures



(b) Heat supplies

Fig.6 The distribution of room air temperatures and heat supplies at the apartment houses with the continuous heating control method

다 표면온도와 실내 공기온도의 과도응답을 보여주며 Fig.8은 난방시작 후 24시간이 지났을때의 단위세대별 온도분포를 보여주고 있다. 그림에서 볼 수 있는 것처럼 Type 2 시스템의 경우 단위세대별 실내 공기온도의 분포는 거의 완벽하리만큼 균일하게 나타났지만, 단위세대 실내 공기온도의 과도응답은 방바닥의 큰 열용량으로 인하여 상당히 큰 오버슈트가 긴 시간동안 계속되는 특성을 보여 주었다. 특히 Type 2 시스템을 채택하는 경우 창문을 열거나 하여 일시적으로 실내 공기온도가 내려가면 실내 공기온도가 다시 기준온도에 도달할 때까지 계속하여 방바닥을 난방하게 되고 또 다시 실내 공기 온도의 오버슈트 현상이 발생하게 되어 쾌적도가 떨어짐은 물론 난방에너지의 소요량이 증가하게 된다.

(2) 단속난방제어

Fig.9는 단속난방제어 방법에 대한 과도응답을 나타낸 것으로 Fig.9(a)에서 볼 수 있는 것처럼 보일러 출구 온수온도와 아파트 동입구에 공급되는 혼합 온수온도의 과도응답이 매우 불규칙하게 변하는데, 이것은 각 단위세대에 온수가 공급되어 세대 방바닥 표면온도가 상한 기준온도 이상이 되면 온수가 세대로 유입되지 못하고 출구 쪽으로 바이패스되어 중간기계실로 높은 온도의 온수가 환수되고

결과적으로 아파트 동입구의 혼합 온수온도는 급상승하게 되었다가 혼합 유량조절밸브에 의해 다시 감소하게 되기 때문이다. 또한 각 세대의 밸브작동이 불규칙하게 작동됨으로 인해 온도변화의 형태 및 주기가 불규칙한 변화를 나타내고 있음을 볼 수 있다. 방바닥 표면온도와 실내 공기온도의 과도응답은 Fig.9(b)에서 볼 수 있는 것처럼 단속제어의 전형적인 특성인 톱니형태의 응답특성을 보여주었고(최대 편차 약 1°C) 외기온도가 낮아지면 단속제어의 주기가 짧아졌다.

(3) 간헐난방제어

Fig.10은 간헐난방제어 방법에 대한 과도응답을 나타낸 것으로 그림에서 볼 수 있는 것처럼 보일러 출구 온수온도와 아파트 동입구에 공급되는 혼합 온수온도의 과도응답은 매 사이클마다 지수함수적으로 증가하였다가 감소하는 경향을 보였고, 방바닥 표면온도와 실내공기의 과도응답은 좀 더 직선적으로 증가하였다가 감소하는 경향을 보였다. 실내공기의 온도편차가 약 4.5°C로 큰편이었고 온도 편차는 외기온도가 낮을수록 커졌다.

5.2 보일러 및 순환펌프의 용량 변화의 영향

Fig.11은 외기온도를 -1°C 로 하고, 중온수 순환펌프와 난방 순환펌프는 공급유량 기준으로 기준

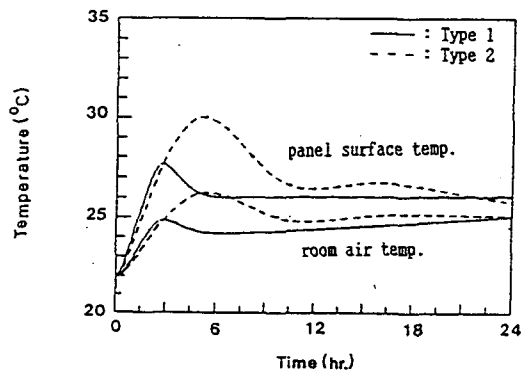


Fig.7 Step responses of the apartment system with the continuous heating control method for different reference temperatures (Type 1 : panel surface temp., Type 2 : room air temp.)

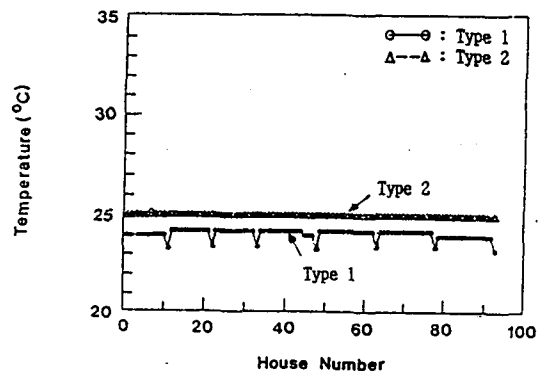
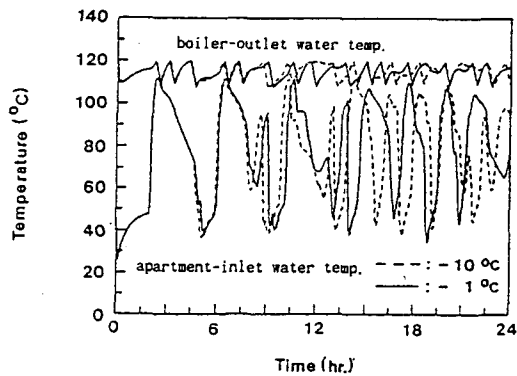


Fig.8 The distribution of room air temperatures at the apartment houses with the continuous heating control method for different reference temperatures (Type 1 : panel surface temp., Type 2 : room air temp.)

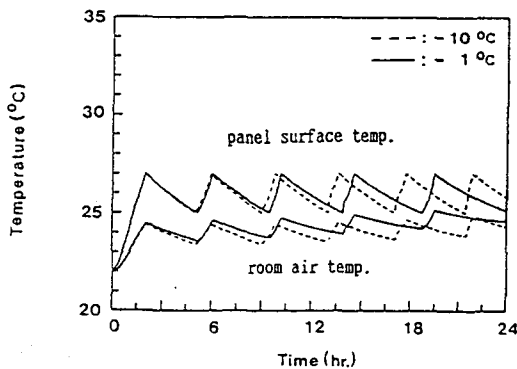
설계용량의 1/2배, 1/4배로 각각 축소시켰을 때 연속난방 제어방법에 대한 과도 응답을 나타낸 것이다. 용량이 축소됨에 따라 보일러 출구 온수온도는 온도의 진동폭이 줄어들면서 거의 일정한 온도를 유지할 수 있었고, 아파트의 동입구로 공급되는 혼합온수의 온도, 방바닥 표면온도와 실내 공기온도는 상승시간이 상당히 길어지면서 오버슈트는 감소하였다.

Fig.12는 세가지 제어방법 즉, 연속난방제어(Control 1), 단속난방제어(Control 2)와 간헐난방제어(Control 3) 방법을 각각 적용하였을 때 전체세대에 24시간 동안 공급된 총 에너지 소모량

(총 공급열량과 전력소모량을 합산)을 비교한 것이다. 여기서 공급열량은 아파트 동입구로 공급되는 혼합온수의 온도와 환수되는 온수의 온도차에 공급유량을 곱하여 계산하였다. 총 에너지 소모량이 연속제어를 적용하였을 경우가 가장 적고, 단속제어, 간헐제어순으로 나타남을 알 수 있다. 연속난방에 있어서 설비용량을 1/4배로 축소시킨 경우에는 기존 설계용량을 적용한 경우에 비해 에너지 소모량이 줄어들음을 볼 수 있다. 그리고 외기 온도가 낮을수록 에너지 소모량이 증가됨을 알 수 있다. 본 논문에서는 연속난방의 장점으로 최대 난방부하의 감소로 인해 설비용량을 줄일 수 있음을 고

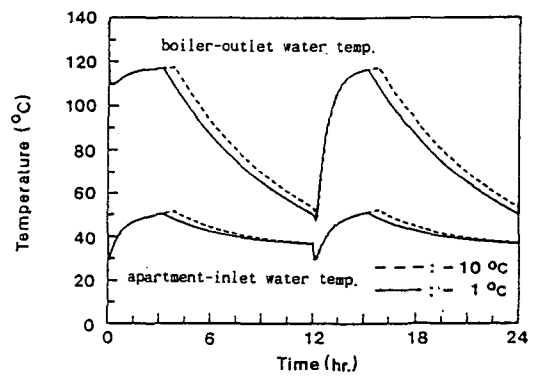


(a) Temperatures of hot water supplied from the boiler and mixed water supplied to the apartment

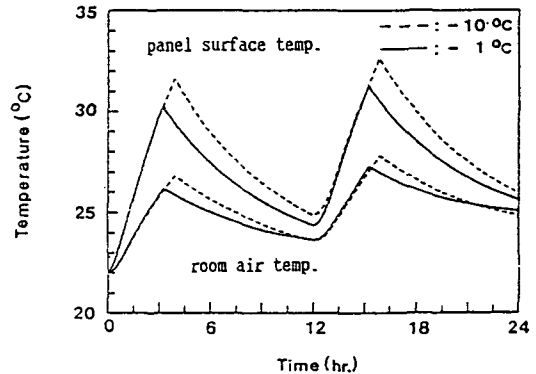


(b) Temperatures of the panel surface and room air

Fig.9 Step responses of the apartment system with the on-off heating control method

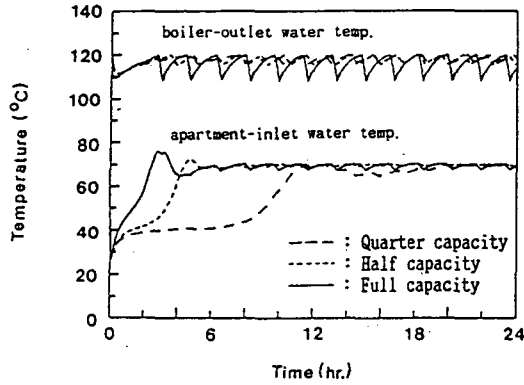


(a) Temperatures of hot water supplied from the boiler and mixed water supplied to the apartment

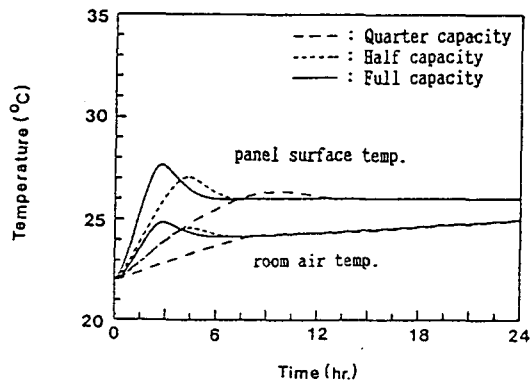


(b) Temperatures of the panel surface and room air

Fig.10 Step responses of the apartment system with the intermittent heating control method



(a) Temperatures of hot water supplied from the boiler and mixed water supplied to the apartment



(b) Temperatures of the panel surface and room air

Fig.11 Step responses of the apartment system with the continuous heating control method for different capacity boilers and pumps

찰하기 위해 연속난방에 있어서만 설비용량을 1/4 배로 축소시킨 경우를 고찰하였다.

6. 결 론

대단위 공동주택 온수난방 시스템의 수학적 모델을 수립한 후 시뮬레이션을 통하여 에너지 해석을 수행하고, 이를 토대로 순환펌프의 회전수제어를

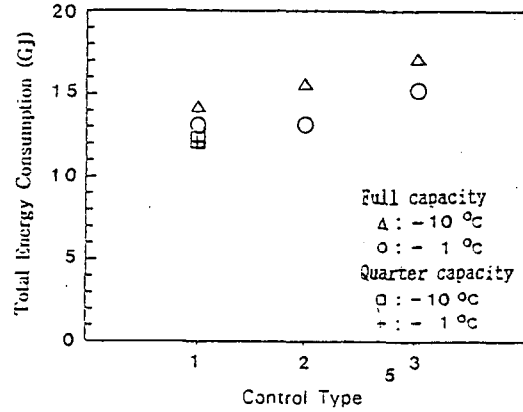


Fig.12 Apartment-inlet total energy consumption for different heating control methods (Control 1 : continuous heating, Control 2 : on-off heating, Control 3 : intermittent heating)

이용한 연속난방제어 방법과 기존의 공급온수제어 방법인 단속난방 및 수동식 간헐난방제어 방법 등을 각각 적용하였을 때의 난방성능과 에너지 소모량에 관한 시스템 제어 특성을 비교 연구하였으며, 얻어진 결과의 요약은 다음과 같다.

1) 연속난방의 경우, 기존의 공급온수 제어 방법인 단속난방 및 수동식 간헐난방에 비해 세대내 실내공기온도가 거의 일정하게 유지되고 보일러 출구 온수온도 및 아파트 동입구로 공급되는 혼합온수온도가 훨씬 안정된 양호한 응답특성을 나타내어 난방성능이 크게 개선되었다.

2) 연속난방의 경우, 단위세대내에 공급되는 온수의 유량을 제어하기 위한 기준온도로 방바닥 표면온도를 선택하면 실내공기온도를 선택할 때보다 방바닥의 큰 열용량으로 인하여 단위세대내 실내공기온도의 과도응답이 훨씬 양호하여지고, 외란에 의해 일시적으로 실내 공기온도가 내려가더라도 오버슈트 현상이 억제되어 난방에너지 소모량도 줄일 수 있었다.

3) 연속난방의 경우, 단위세대별 실내 공기온도는 외부로의 열손실이 큰 세대(예컨대, 맨 윗층 세대)들을 제외하면 균일하게 나타났다. 이들 외부로의 열손실이 큰 세대들의 방바닥 표면온도 기준치

를 타세대들 보다 상대적으로 높게 조정하여 설정하면 구역에 관계없이 전반적으로 균일한 온도 분포를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

4) 연속난방의 경우, 총 에너지 소모량이 단속난방 및 간헐난방에 비해 적게 나타났다. 또한 연속난방을 적용한 상태에서 보일러 및 순환펌프의 용량을 설계용량의 1/4정도로 작게 선정하였을 경우에는 방바닥 표면온도 및 실내공기온도의 오버슈트는 감소하였으나 상승시간이 길어졌으며, 기준온도에 도달 후에는 일정한 온도유지가 가능하였다.

후 기

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

참 고 문 헌

1. Hedgepath, L. M. and Sepsy, C. F., 1975, "A Thermodynamic Simulation of a Building Environmental Control System", ASHRAE Trans., pp. 35~43.
2. 오정무, 1986-1988, "연속난방효과 제고에 관한 연구(I, II, III)", 동력자원연구소 연구보고서.
3. Pottebaum, J. R., 1984, "Optimal Characteristics of Variable Frequency Centrifugal Pump Motor Drive", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. IA-20, No. 1, pp. 23~31.
4. Pattern, N. R., 1974, "Fan Selection and Control in High Velocity VAV System", ASHRAE Journal, pp. 17~24.
5. Treichler, 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.
6. Lebrun, J. J. et al, 1985, "Research of a Good Boiler Model for HVAC Energy Simulation", ASHRAE Trans., Vol.91, Pt. 1B, CH-85-02 No. 2, pp. 60~86.
7. 민만기, 김호영, 장효환, 1991, "건축물의 열 설비 및 공조시스템", 한국 과학재단 목적기초 최종보고서
8. Wood, D. J. and Charles, C. O. A., 1972, "Hydraulic Network Analysis Using Linear Theory", J. of the Hydraulic Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, pp. 1157~1170.
9. Siegel R. and Howell J. R., 1981, "Thermal Radiation Heat Transfer", McGraw-Hill.
10. 안병천, 1991, "온수난방 시스템의 제어특성 및 디지털 제어구현에 관한 연구", 고려대학교 기계공학과 박사학위 논문