

## 바닥복사 난방시스템의 제어방식에 관한 실험적 연구

김 오 봉, 이 진 영\*, 여 명 석\*\*\*, 석 호 태\*\*, 김 광 우\*\*\*\*†

서울대학교 대학원 건축학과, \*(주)한일엠이씨 설계본부, \*\*영남대학교 건축공학과, \*\*\*서울대학교 건축학과

### An Experimental Study on the Control Methods of Radiant Floor Heating Systems

Wu-feng Jin, Jin-Young Lee\*, Myoung-Souk Yeo\*\*\*, Ho-Tae Seok\*\*, Kwang-Woo Kim\*\*\*\*†

Department of Architecture, Graduate School, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

\*Han-Il Mechanical & Electrical Consultants, Seoul 110-012, Korea

\*\*Department of Architectural Engineering, Yeung-Nam University, Gyongsan 712-749, Korea

\*\*\*Department of Architecture, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

(Received October 9, 2001; revision received November 15, 2001)

**ABSTRACT:** In this study, existing control methods that are suggested or applied until now are classified by control parameters, and stability of in the room and floor surface temperatures of each control method is compared through experiments. Then, the control performance of these control methods are analyzed to evaluate the applicability to Korean apartment housing. From the result of the applicability analysis, the outdoor reset with on/off PWM control is found to be desirable for district heating systems and flux modulation is found to be applicable for decentralized heating systems. In the case of independent control systems for each room, on/off PWM control is desirable.

**Key words:** Radiant floor heating system(바닥복사 난방시스템), Control method(제어방식), Experiment(실험), Control performance(제어성능)

#### 기 호 설 명

$Q_{output}$  : 바닥 표면에서의 방열량 [W]

$M_{flow}$  : 유량 [kg/sec]

$\Delta T$  : 공급수와 환수의 온도차 [°C]

$C_p$  : 물의 비열 [J/kg°C]

$T_{water}$  : 공급온수 온도 [°C]

$T_{out}$  : 외기온 [°C]

$T_{do}$  : 설계 최저 외기온 [°C]

$T_{dw}$  : 설계 최고 공급온수 온도 [°C]

$T_{shift}$  : 외기보상률의 변동률 [°C]

$K_p$  : 비례계수

$K_i$  : 적분계수

$K_d$  : 미분계수

$e$  : 설정 실온과의 오차 [°C]

$X$  : 밸브 개도 위치(0~1 사이의 값)

$On_{time}$  : 밸브의 개폐시간비율(on-time ratio)

$RR$  : 외기보상률 계수

† Corresponding author

Tel.: +82-2-880-7065; fax: +82-2-871-5518

E-mail address: snukkw@snu.ac.kr

#### 1. 서 론

국내 공동주택에 적용되고 있는 바닥복사 난방

방식은 사용자 생활수준의 향상과 실내 열환경의 쾌적성에 대한 요구증가, 에너지 절약의 필요성 측면에서 제어성능의 향상이 요구되고 있다. 그러나 국내에서는 시스템의 제어방식에 대한 체계적인 연구가 미흡하여, 간헐난방공급 혹은 단순한 개폐식 밸브제어 등이 적용될 뿐이지만, 외국의 경우, 바닥복사 난방시스템의 제어와 관련하여 많은 연구가 진행되어 다양한 제어방식들이 제안되었으며, 실제 적용되고 있다. 향후 바닥복사 난방을 효율적으로 제어하기 위해서는 다양한 제어방식에 대한 이론적 정립과 체계적인 실험연구를 통한 비교 분석이 필요하다고 판단된다.

따라서 본 연구에서는 지금까지 국내외에서 제안 및 적용되고 있는 기존 제어방식들을 제어인자에 따라 분류하고, 실온과 바닥온도의 안정성을 비교하는 제어성능실험을 실시하여 각 제어방식별 제어성능을 통합적으로 분석함으로써 국내 공동주택에 대한 적용성을 평가하였다.

## 2. 바닥복사 난방시스템의 제어방식

### 2.1 기존 연구의 고찰

MacCluer<sup>(1)</sup>는 제어방식을 단위열량 제어(flux-modulation)와 공급온수온도 제어로 분류하고 시뮬레이션을 통해 공급온수온도 제어에 비해 단위열량 제어가 경제적이고 효과적임을 제시하였으며, Leigh<sup>(2)</sup>는 실험을 통해 공급온수온도 제어방식인 외기보상 실온피드백 제어와 단위열량 제어방식인 플럭스 제어를 비교 분석하였다. 국내의 경우 여명석 등<sup>(3)</sup>은 국내 공동주택을 모델로 시뮬레이션을 통해 기존에 제안된 다양한 제어방법들을 종합적으로 비교 분석하였다.

본 연구에서는 기존의 국내 시뮬레이션 연구<sup>(3)</sup>

를 기반으로 다양한 제어방식들에 대한 비교 실험을 실시하여, 실제 적용시 제어의 안정성, 고려 사항 등을 분석하였다.

### 2.2 제어인자

바닥복사 난방시스템의 제어인자는 Table 1과 같이 입력변수(input variable), 제어변수(controlled variable), 조절변수(manipulated variable)로 나눌 수 있다. 바닥복사 난방의 제어인자와 이에 따른 제어방식들을 종합적으로 조사하고 분류한 결과,<sup>(4)</sup> 조절변수의 측면에서 분류하는 것이 다양한 제어방식들을 간결하고 체계적으로 구분할 수 있는 것으로 판단된다. 그리고 바닥표면의 방열량은 식(1)과 같이 온수온도, 유량으로 결정되므로 제어방식 역시 이러한 방열량의 조절변수에 따라 분류하는 것이 합리적이며, 특히 MacCluer에 의해 제안된 단위열량 제어는 바닥 표면에서 방열량을 직접 제어하는 방법으로 분류될 수 있다.

$$Q_{output} = M_{flow} \cdot \Delta T \cdot C_p \quad (1)$$

### 2.3 제어방식의 분류 및 특징

다양한 제어방식들을 조절변수에 따라 분류하면 Table 2와 같이 공급온수온도제어, 공급유량제어, 단위열량제어로 나눌 수 있으며, 복합존의 제어방법으로서 공급온수온도-유량 동시제어방식으로 나눌 수 있다.

#### 2.3.1 공급온수온도제어

공급온수온도제어(supply water temp. control)는 방열량을 제어하기 위해 유량은 일정하게 유지하면서 온수온도를 변화시키며 공급하는 외기

Table 1 Classification of control parameters

Control parameters	Available parameters		Control devices
Input variables	Outdoor temp., Room temp., Supply water temp., Return water temp.		Temperature sensor
Controlled variables	Room temp., Operative temp.		Thermostat
Manipulated variables	Supply water temp.		Heat exchanger, 3 or 4-way mixing valve
	Supply water flow rate	Continuous	2-way modulating valve
		Intermittent	On/off valve
	Heat flux		Boiler controller

Table 2 Control methods for radiant floor heating systems

Control parameters			Supply water temperature		Heat flux
			Constant temperature	Variable temperature	
Flow rate	Continuous flow	Constant flow	-	Outdoor reset control	Flux modulation
		Variable flow		Variable flow control	
	Intermittent flow	Bang-Bang control	On/off Bang-Bang control	Outdoor reset + Bang-Bang control	-
		Pulse-width modulation (PWM)	On/off pulse-width modulation	Outdoor reset + On/off pulse-width modulation	-

보상제어(outdoor reset control) 방법으로, 1차적으로 식(2)와 같이 외기보상률(reset ratio)에 따라 온수온도를 정하고 2차적으로 식(3), (4)와 같이 실온을 피드백하여 온수온도를 재조정하는 외기보상 실온피드백 제어(outdoor reset with indoor temperature feedback)<sup>(5)</sup>가 적용되고 있다.

$$T_{water} = RR(T_{out} - T_{do}) + T_{dw} \quad (2)$$

$$T_{water} - T_{shift} = RR(T_{out} - T_{shift}) \quad (3)$$

$$T_{shift} = K_p e + K_i \int e dt + K_d \frac{de}{dt} \quad (4)$$

### 2.3.2 공급유량제어

공급유량제어(supply water flow rate control)에는 실에 공급되는 온수의 유량을 제어하는 방식으로 일정한 온수온도조건에서 공급유량을 연속적으로 제어하는 변유량 제어(variable flow rate control)<sup>(6)</sup>와 단속적으로 제어하는 개폐식 제어(on/off control)가 있다. 변유량 제어는 등비율 특성의 2방 밸브의 개폐율을 식(5)와 같이 실온과 설정 실온과의 편차에 따라 PID 제어한다. 단속적인 제어에는 개폐식 뱅뱅 제어(on/off Bang-Bang control)와 개폐식 펄스 제어(on/off pulse-width modulation control)<sup>(7)</sup>가 있다.

개폐식 펄스 제어는 개폐식 뱅뱅제어를 보완하여 과열현상을 줄이기 위해 밸브의 개폐시간을 조절하는 방법이다. 밸브의 개폐시간은 일반적으로 식(6)과 같이 실온을 피드백 하여 PID 방식으로 제어한다.

$$X = K_p e + K_i \int e dt + K_d \frac{de}{dt} \quad (5)$$

$$On_{time} = K_p e + K_i \int e dt + K_d \frac{de}{dt} \quad (6)$$

### 2.3.3 공급온수온도-유량 동시제어

공급온수온도-유량 동시제어(supply water temp. + flow rate control)는 복합존에 적용되는 방식으로서 식(2)에 의한 외기보상률(reset ratio)에 따라 온수온도를 결정하여 공급하고 개폐식 밸브를 사용하여 유량을 단속적으로 제어하는 방식으로, 현재 국내 지역난방공동주택에 적용되고 있는 외기보상 개폐식 뱅뱅 제어(outdoor reset + Bang-Bang control)<sup>(8)</sup>와 외기보상 개폐식 펄스 제어(outdoor reset + PWM control)가 있다. 외기보상 개폐식 펄스 제어는 국내에서는 아직 실제 적용되고 있지 않고 있다.

### 2.3.4 단위열량(flux)제어<sup>(1)</sup>

일정한 유량의 온수를 순환시키며 동시에 일정 출력의 보일러를 가동/정지(on/off)시키는 방식으로 보일러의 가동시간비율(on-time ratio)을 개폐식 펄스 제어와 같이 펄스 조절하는 방식이다. 플럭스 제어에 사용되는 보일러는 정출력 이어야 하며, 축열 특성이 작아야 한다.

## 3. 제어방식별 성능평가 실험

앞에서 분류된 제어방식들에 대해 이들간의 비교 실험을 실시하여 각 방식별 제어성능을 검토하였다.

### 3.1 실험모델의 구성 및 바닥난방시스템

국내 중간 규모(32평형)의 공동주택 기준층 중

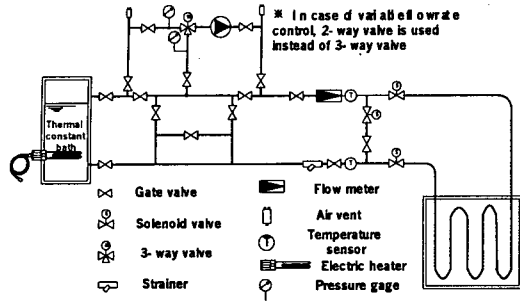


Fig. 1 The experiment model and radiant floor heating systems.

간세대 안방을 기준으로 열 손실량이 단위면적당 동일한 값을 가지도록 외피의 열관류율, 창문의 크기, 침기, 일사 유입량 등을 산정 하여 4개의 동일한 모델 공간을 제작하였고, 바닥구조체도 기존의 공동주택에 적용된 것과 동일하게 구성하였다. Fig. 1과 같이 항온수조에서 공급되는 온수는 3방 밸브, 펌프와 개폐식 밸브를 거쳐 바닥구조체에서 방열 한 다음, 항온수조에 리턴(return)되거나 다시 3방 밸브에 의해 공급온수와 혼합되어 공급되도록 온수순환시스템을 구성하였다.

3.2 측정 및 제어장치

열 전대를 이용하여 실온, 바닥 표면온도, 외기 온도, 공급온수온도와 환수온도를 측정하고, 측정

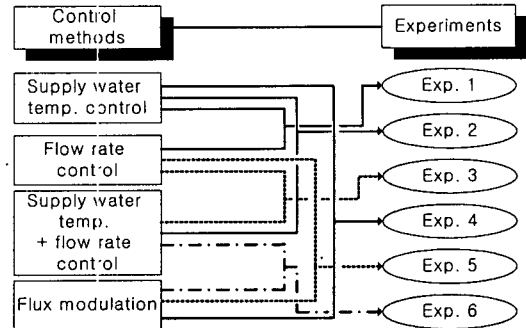


Fig. 2 Classification of experiment items.

된 데이터는 아날로그 입력장치를 통해 컴퓨터에 저장하였다. 그리고 각 제어방식에 따라 펌프와 밸브의 작동을 제어하기 위해 아날로그 출력장치를 제어 알고리즘이 포함된 컴퓨터 프로그램과 연동하여 제어시스템을 구성하였다.

3.3 실험내용 및 방법

모델실험을 통해 제어방식별 성능을 상호 비교 분석하기 위해 제어인자에 따라 분류된 제어방식들을 조합하여 Fig. 2, Table 3과 같이 6회에 걸쳐 실험을 실시하였다. 동일한 온도조건에서 실험을 진행하기 위하여 4개의 실험공간을 충분히 냉각시킨 후 실험을 시작하였으며 일사의 유입은 차단하였다. 최대공급유량은 국내 공동주택에 공

Table 3 Control methods of each experiment

	Experiment objectives	Control methods
Exp. 1	Comparison of supply water temp. control and supply water flow rate control	① Outdoor reset with indoor temp. feedback control ② On/off Bang-Bang control ③ On/off PWM control ④ Variable flow rate control
Exp. 2	Comparison of supply water temp. control and supply water temp. + flow rate control	① Outdoor reset with indoor temp. feedback control ② Outdoor reset + on/off Bang-Bang control ③ Outdoor reset + on/off PWM control
Exp. 3	Comparison of on/off PWM control and supply water temp. + flow rate control	① On/off PWM control ② Outdoor reset + on/off Bang-Bang control ③ Outdoor reset + on/off PWM control
Exp. 4	Comparison of supply water temp. control and flux modulation	① Outdoor reset + indoor temp. feedback control ② Flux modulation
Exp. 5	Comparison of on/off Bang-Bang control and flux modulation	① On/off Bang-Bang control ② Flux modulation
Exp. 6	Comparison of supply water temp. + flow rate control and flux modulation	① Outdoor reset + on/off Bang-Bang control ② Outdoor reset + on/off PWM control ③ Flux modulation

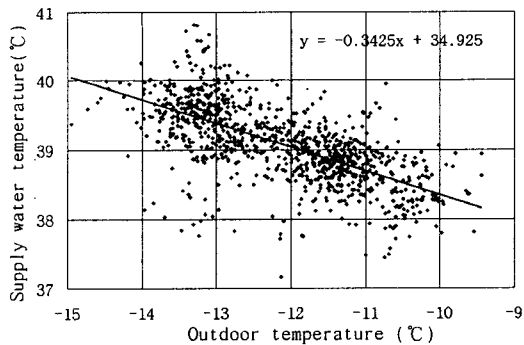


Fig. 3 Outdoor temperature and supply water temperature profile: the water was supplied by the outdoor reset ratio of the test cell.

급되는 유량을 근거로 1.2 lpm, 실험기간은 72시간, 실내 설정온도는 21°C로 정하였다. 개폐식 뱁뱁 제어의 실온 허용편차(differential)는 ±0.5°C로 설정하였으며 실온은 바닥으로부터 1.1 m 높에서 측정하였다. 식(2)의 외기보상률은 미세조정 반복실험을 통하여 실험공간의 고유한 외기보상률을 구하였으며 그 결과는 Fig. 3과 같다.

4. 실험결과 및 분석

본 연구에서 제어성능은 난방개시 후의 초기가

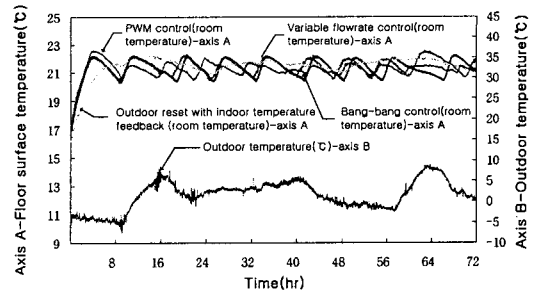


Fig. 4 Experiment 1: supply water temperature control and water flow rate controls.

열과정과 안정화된 후의 실온제어과정으로 나누어 분석하였으며, 실온과 바닥온도는 변동폭과 평균값을 비교하여 분석하였다.

4.1 온수온도제어와 유량제어(실험 1)

초기가열 시 Fig. 4와 같이 공급온수온도제어가 공급유량제어에 비하여 실온상승시간이 길게 나타났다. 그러므로 공급온수온도제어를 적용할 경우 장시간 비 난방시 셋백(setback) 조치를 제어시스템에 구성하도록 할 필요가 있다.

실온제어성능은 Table 4와 같이 설정실온에 대한 변동폭은 개폐식 펄스 제어가 가장 작게 나타났다 그 다음으로 개폐식 뱁뱁 제어, 변유량 제

Table 4 Comparison of the stability of room temperature and floor surface temperature

	Control methods	Set temperature (°C)		Room temperature (°C)		Floor surface temperature (°C)	
		Set temp.	Average deviation	Average temp.	Average deviation	Average temp.	Average deviation
Exp. 1	Outdoor reset with indoor temp. feedback control	21.0	0.57	21.6	0.22	26.5	0.73
	On/off Bang-Bang control	21.0	0.52	21.3	0.46	25.7	1.34
	On/off PWM control	21.0	0.30	21.3	0.23	25.1	0.80
	Variable flow rate control	21.0	0.56	21.5	0.43	25.9	1.33
Exp. 2	Outdoor reset with indoor temp. feedback control	21.0	0.39	21.4	0.19	27.8	0.64
	Outdoor reset + on/off Bang-Bang control	21.0	0.34	20.9	0.35	26.6	0.89
	Outdoor reset + on/off PWM control	21.0	0.19	20.9	0.18	26.3	0.53
Exp. 3	On/off PWM control	21.0	0.23	21.1	0.23	26.5	0.97
	Outdoor reset + on/off Bang-Bang control	21.0	0.36	21.1	0.35	26.7	1.17
	Outdoor reset + on/off PWM control	21.0	0.17	20.9	0.16	26.7	0.68
Exp. 4	Outdoor reset + indoor temp. feedback	21.0	0.39	21.4	0.19	27.7	0.62
	Flux modulation	21.0	0.29	21.2	0.25	27.5	1.13
Exp. 5	On/off Bang-Bang control	21.0	0.53	21.3	0.48	25.2	1.57
	Flux modulation	21.0	0.40	21.3	0.26	26.3	0.96
Exp. 6	Outdoor reset + on/off Bang-Bang control	21.0	0.35	20.9	0.34	26.7	0.83
	Outdoor reset + on/off PWM control	21.0	0.19	20.9	0.18	26.3	0.57
	Flux modulation	21.0	0.29	21.2	0.25	27.3	1.09

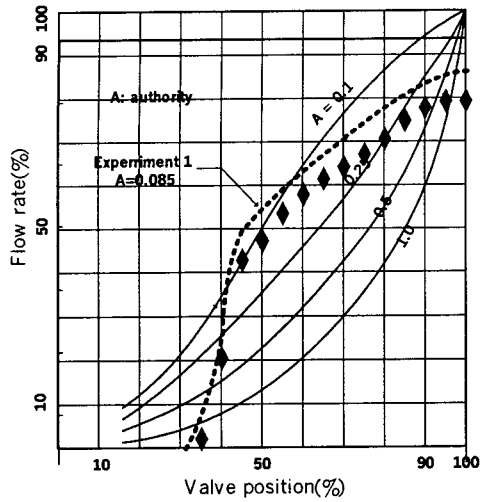


Fig. 5 Relations of valve stem position and flow rate.

어, 외기보상 실온 피드백 제어의 순서로 나타났다. 그러나 평균 실온에 대한 변동폭은 외기보상 실온 피드백 제어가 가장 작게 나타났고 다음으로 개폐식 펄스 제어, 변유량 제어, 개폐식 뱅뱅 제어 순서로 나타났다. 외기보상 실온 피드백 제어는 평균 실온 측면에서 큰 변동폭 없이 실온을 안정적으로 유지하였으나, 설정실온과의 편차는 일정하게 나타나는 오프셋(offset) 현상이 발생하였다. 그 원인은 실온 피드백 제어를 위한 PID 계수 선정이 정확하게 이루어지지 못했기 때문인 것으로 판단되며, 계수 선정만 정확히 이루어진다면 설정 실온과의 변동폭이 가장 작은 안정적인 제어 방식으로 판단된다.

개폐식 제어에서는 기존의 개폐식 밸브에 의한 뱅뱅 제어를 밸브 개폐시간에 대한 펄스 제어로

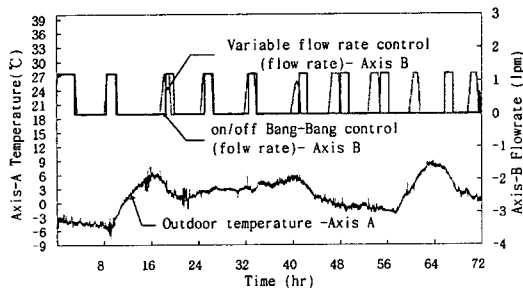


Fig. 6 Flow rate profile comparison: on/off Bang-Bang control and variable flow rate control.

적용하였을 때 Fig. 4와 같이 실온 변동폭이 줄어드는 것을 알 수 있다.

변유량제어의 경우 2방 밸브는 유량에 따른 밸브의 압력손실인 유량계수 ( $C_v$ : flow coefficient)와 시스템에서의 압력손실비(authority)에 따라 유량 특성이 달라지며, Fig. 5와 같이 압력손실비 값이 0.5 이상을 유지해야만 밸브 스템(stem)의 위치와 방열량 사이에 선형관계가 나타난다. 그러나 본 실험에서는 현재 상용되는 밸브 중 유량계수가 가장 작은 밸브를 사용하였음에도 불구하고 압력손실비 값이 0.085 정도로 작기 때문에 밸브 스템과 유량곡선의 왜곡(distortion)이 심하였으며, 이에 따라 밸브 스템의 위치와 방열량 사이에 선형관계가 이루어지지 않았다. 그러므로 변유량 제어는 공급유량의 변화 특성이 Fig. 6과 같이 개폐식 뱅뱅 제어와 비슷하게 나타났다.

추가적으로 온수온도를 60°C, 40°C로 달리하며 변유량제어 비교실험을 실시한 결과, Fig. 7과 같이 공급온수온도가 높을수록 저유량의 공급빈도가 증가하는 것으로 나타났다. 일반적으로 변유량제어는 저유량 범위에서 제어성능이 떨어지기 때문에 공급온수온도가 과도하게 높으면 제어성능에 영향을 미칠 것으로 판단된다. 이를 위해 레인지어빌리티(rangeability)가 큰 밸브를 사용하면 저유량 범위에서도 제어성능이 좋아지지만 가격이 상승하기 때문에 이에 따른 고려가 필요할 것이다.

그러므로 변유량제어에서는 공급온수온도를 정확하게 선정해야 하며, 밸브의 레인지어빌리티, 압력손실비와 유량계수를 시스템의 특성에 맞게 선정하는 것이 올바른 제어성능을 발휘하도록 하기 위해 중요할 것으로 판단된다.

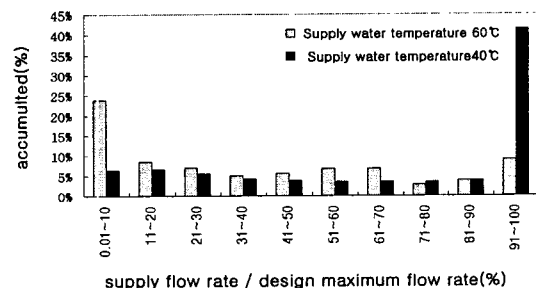


Fig. 7 Flow rate variations according to the water temperature variation under the variable flow rate control.

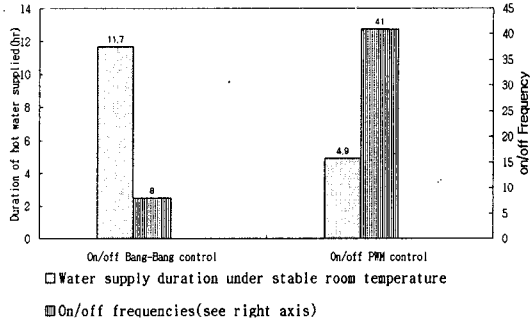


Fig. 8 On/off frequencies and hot water supply time of each control method.

실온이 안정된 후의 온수공급시간은 Fig. 8과 같이 개폐식 뱅뱅 제어가 개폐식 펄스 제어에 비해 길게 나타나 개폐식 펄스 제어가 실온 변동폭도 작고 열량공급도 작은 것으로 나타났다. 단지, 밸브의 사용빈도는 개폐식 뱅뱅 제어가 개폐식 펄스 제어에 비해 낮게 낮으므로 개폐식 펄스 제어를 적용할 경우 밸브의 시간당 작동회수, 작동시간 등을 고려해야 할 것이다. 바닥온도의 변동폭은 평균 실온에 대한 실온 변동폭과 같은 순서로 나타났으며, 개폐식 뱅뱅 제어는 제어 특성상 바닥온도 변동폭이 크며, 따라서 과열현상이 발생하기 쉬운 것으로 판단된다.

#### 4.2 공급온수온도제어와 공급온수온도-유량 동시제어(실험 2)

초기가열 시 Fig. 9와 같이 공급온수온도-유량 동시제어가 공급온수온도제어에 비해 실온상승시간이 길게 나타났다. 그러므로 실험 1에서와 마찬가지로 공급온수온도-유량 동시제어도 셋백 조

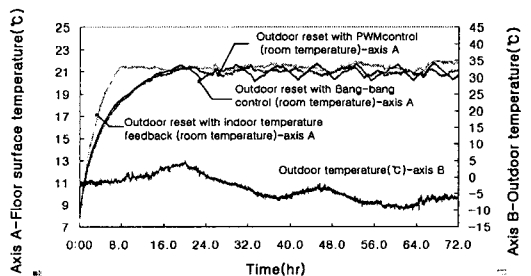


Fig. 9 Experiment 2: supply water temperature control and supply water temperature+ flow rate control.

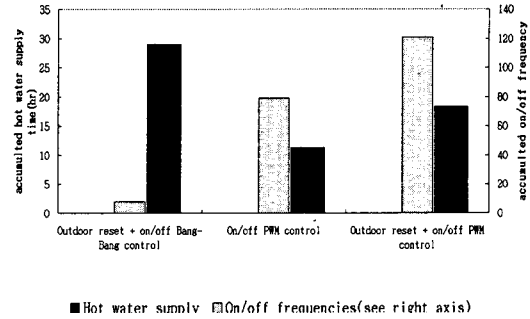


Fig. 10 On/off frequencies and hot water supply time of each control method.

치가 가능하도록 제어시스템을 구성해야 할 것으로 판단된다.

설정실온에 대한 실온 변동폭은 Table 4와 같이 외기보상 개폐식 펄스 제어가 가장 작게 나타났으며, 다음으로 외기보상 개폐식 뱅뱅 제어와 외기보상 실온피드백 제어 순서로 변동폭이 크게 나타났다. 평균 실온에 대한 변동폭은 외기보상 개폐식 펄스 제어가 가장 작게 나타났으며, 다음으로 외기보상 실온피드백 제어와 외기보상 개폐식 펄스 제어 순서로 나타났다. 외기보상 실온피드백 제어가 설정 실온과 평균 실온에 대한 변동폭이 다르게 나타나는 것은 실험 1에서 설명한 바와 같이 PID 계수 선정이 정확하지 못했기 때문으로 판단된다. 바닥온도 변동폭도 외기보상 개폐식 뱅뱅 제어가 가장 크게 나타나 과열현상이 쉽게 발생할 수 있음을 알 수 있다.

그러므로 현재 지역난방 공동주택에서 적용되고 있는 외기보상 개폐식 뱅뱅 제어를 외기보상 개폐식 펄스 제어로 대체하면 실온제어 및 에너지 절감 측면에서 유리할 것으로 판단된다.

#### 4.3 개폐식 펄스 제어와 공급온수온도-유량 동시제어(실험 3)

초기가열 시 Fig. 11과 같이 개폐식 펄스 제어가 공급온수온도-유량 동시제어에 비하여 가열시간이 짧게 나타났다. 이는 공급온수온도-유량 동시제어가 외기 보상으로 인해 공급온수온도가 낮아졌기 때문이다.

설정실온과 평균 실온에 대한 실온 변동폭은 외기보상 개폐식 펄스 제어가 가장 작게 나타났으며, 다음으로 펄스 제어와 외기보상 개폐식 뱅

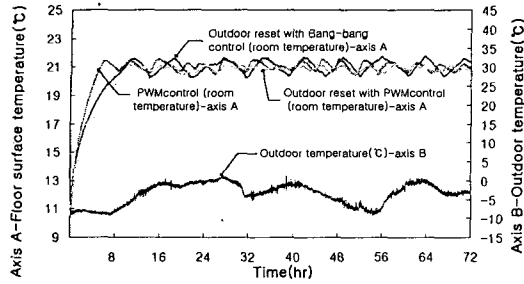


Fig. 11 Experiment 3: on/off PWM control and supply water temperature+flow rate control.

뱅 제어 순서로 작게 나타났다(Table 4 참조). 바닥온도의 변동폭은 외기보상 개폐식 뱅뱅 제어가 가장 크게 나타나 과열현상이 쉽게 발생할 수 있음을 알 수 있다. 그러므로 개폐식 제어는 외기보상을 적용할 경우 초기가열 시 실온상승시간은 길어지나 실온 안정화 단계에서 실온 변동폭은 줄어드는 것을 알 수 있다.

개폐식 밸브를 사용할 경우 Fig. 10과 같이 실온 안정화 단계에서 온수공급시간이 외기보상 개폐식 뱅뱅 제어가 가장 길게 나타났으며, 다음으로 외기보상 개폐식 펄스 제어와 개폐식 펄스 제어 순서로 나타났다. 밸브 사용빈도는 외기보상 개폐식 펄스 제어가 가장 높게 나타났으며, 다음으로 개폐식 펄스 제어와 외기보상 개폐식 뱅뱅 제어 순서로 사용빈도(사용회수)가 높게 나타났다. 그러므로 외기보상 개폐식 펄스 제어를 적용할 경우, 개폐식 펄스 제어와 마찬가지로 밸브의 시간당 작동회수와 작동시간 등을 세심히 고려해야 할 것이다.

4.4 공급온수온도제어와 단위열량제어(실험 4)

초기가열 시 Fig. 12와 같이 공급온수온도제어가 단위열량제어에 비해 실온상승시간이 길게 나타났다. 이는 공급온수온도 제어는 외기온의 변화에 따라 공급온수온도가 외기보상률에 의해 낮아지나 단위열량제어는 온수온도가 설정공급온수온도보다 높은 보일러 허용온도를 유지하여 공급할 수 있기 때문이다. 설정 실온에 대한 실온 변동폭은 공급온수온도제어가 단위열량제어보다 크게 나타났으나(Table 4 참조), 평균 실온에 대한 변동폭은 단위열량제어보다 작게 나타났다. 그러

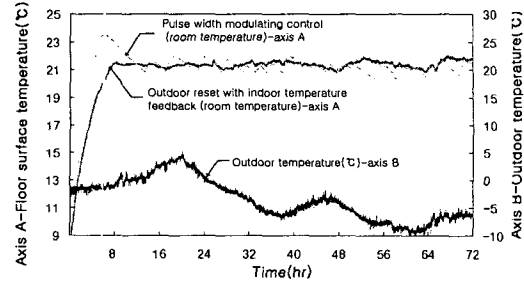


Fig. 12 Experiment 4: supply water temperature control and flux modulation.

므로 공급온수온도 제어는 단위열량제어보다 평균 실온에 대한 유지성능은 우수하나 PID 계수 선정이 정확하게 이루어지지 못할 경우 설정 실온을 정확하게 유지할 수 없음을 알 수 있다. 바닥온도 변동폭도 공급온수온도제어가 단위열량제어에 비해 작게 나타났다.

4.5 개폐식 뱅뱅 제어와 단위열량제어(실험 5)

초기가열 시 실온상승시간은 Fig. 13과 같이 플럭스 제어가 개폐식 뱅뱅 제어에 비해 실온상승시간이 짧아서 반응이 빠른 것으로 나타났다.

실온제어성능은 단위열량제어가 개폐식 뱅뱅 제어에 비해 설정실온과 평균 실온에 대한 실온 변동폭이 모두 작게 나타나(Table 4 참조), 개별 난방에서 기존에 일반적으로 적용되어왔던 개폐식 뱅뱅 제어를 단위열량제어로 적용할 경우 실온 변동폭을 줄일 수 있음을 알 수 있다. 바닥온도의 변동폭도 플럭스 제어가 개폐식 뱅뱅 제어에 비해 작게 나타났다.

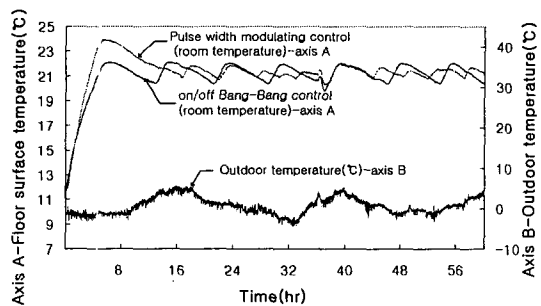


Fig. 13 Experiment 5: On/off Bang-Bang control and flux modulation.



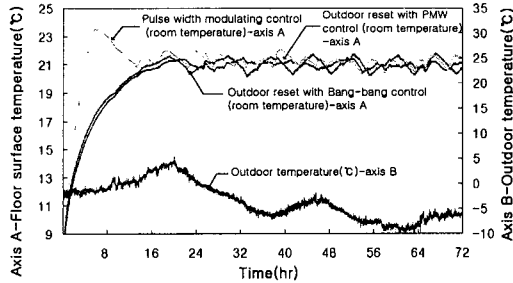


Fig. 14 Experiment 6: flux modulation and supply water temperature+flow rate control.

그러므로 향후 개별 난방에서는 세대별 제어의 경우 플럭스 제어의 적용이 유리할 것으로 판단된다.

**4.6 공급온수온도-유량 동시제어와 단위열량 제어(실험 6)**

초기가열 시 Fig. 14와 같이 단위열량제어가 공급온수온도-유량 동시제어에 비해 실온상승시간이 짧게 나타났다. 이는 공급온수온도-유량 동시제어는 외기보상으로 인해 공급온수온도가 낮아졌으나 단위열량제어는 보일러 허용온도를 유지하여 공급할 수 있기 때문이다.

실온제어성능은 외기보상 개폐식 펄스 제어가 변동폭이 가장 작게 나타났으며, 다음으로 플럭스 제어와 외기보상 개폐식 뱅뱅 제어 순서로 나타났다( Table 4 참조), 바닥온도 변동폭도 실온 변동폭과 같은 순서로 나타났다.

그러므로 개별 난방에서 실별 제어의 경우 외기보상 개폐식 펄스 제어를 적용하는 것이 제어 성능을 향상시키는 측면에서 유리할 것으로 판단된다.

**5. 결 론**

본 연구는 제어인자에 따라 분류된 제어방식들에 대한 비교 실험을 통하여 각 제어방식별 제어성능을 비교 분석하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

(1) 변유량 제어에서는 공급온수온도를 정확하게 선정해야 하며, 밸브의 유량계수( $C_v$  값)와 압력손실비(authority), 레인지어빌리티(rangeability)

를 시스템의 특성에 맞게 선정하는 것이 올바른 제어성능을 발휘하기 위해 중요할 것으로 판단된다.

(2) 개폐식 제어는 외기보상 제어를 적용하였을 때 실온 변동폭이 줄어드는 것으로 나타났으며, 기존의 개폐식 밸브에 대한 뱅뱅 제어를 펄스 제어로 적용하였을 때 실온유지 성능이 더 좋아지는 것으로 나타났다.

(3) 평균 실온에 대한 변동폭은 외기보상실온 피드백 제어와 외기보상 개폐식 펄스 제어가 우수하게 나타났으며, 다음으로 개폐식 펄스 제어, 플럭스 제어, 외기보상 개폐식 제어, 변유량제어와 개폐식 뱅뱅 제어 순서로 나타났다. 초기가열 시 실온상승시간은 플럭스 제어가 가장 짧게 나타났으며, 다음으로 개폐식 펄스 제어, 개폐식 뱅뱅 제어, 변유량제어, 외기보상 실온피드백 제어, 외기보상 폐식 펄스 제어와 외기보상 개폐식 뱅뱅 제어 순서로 길게 나타났다.

(4) 지역난방의 경우 외기보상 개폐식 펄스 제어를 적용하는 것이 가능하며, 개별 난방의 경우 세대별 제어 시에는 플럭스 제어를, 실별 제어 시에는 외기보상 개폐식 펄스 제어를 적용하는 것이 가능할 것으로 판단된다.

**후 기**

본 연구는 서울대학교 공학연구소 2001년도 두뇌한국 21사업과 에너지관리공단의 연구지원으로 진행되었다.

**참고문헌**

1. MacCluer, C. R., 1989, The Temperature Stability of a Radiant Slab-on-grade, ASHRAE Transactions, 1989a CH-89-17-1, pp. 1001-1009.
2. Leigh, S. B., 1991, An Experimental Approach for Evaluating Control Strategies of Hydronic Radiant Floor Heating Systems, Doctoral dissertation, The University of Michigan, Ann Arbor.
3. Myoung-Souk Yeo, et al., 1998, A Study on the Water Temperature Control Method of Hydronic Radiant Floor Heating System In Apartment Buildings, Journal of Architec-