



RESEARCH ARTICLE

# 공동주택 복사난방 시스템의 차압제어를 통한 온수유량 제어 성능 평가

이규남<sup>1</sup> · 정근주<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>부경대학교 건축공학과 부교수, <sup>2</sup>부경대학교 건축공학과 교수

## Performance Evaluation of Hot Water Flow Rate Control through Differential Pressure Control for Radiant Heating System in Apartment Buildings

Rhee, Kyu-Nam<sup>1</sup> · Jung, Gun-Joo<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Associate Professor, Department of Architectural Engineering, Pukyong National University, Busan, Korea

<sup>2</sup>Professor, Department of Architectural Engineering, Pukyong National University, Busan, Korea

\*Corresponding author: Jung, Gun-Joo, Tel: +82-51-629-6097, E-mail: envjung@pknu.ac.kr

### ABSTRACT

In hydronic networks of apartment buildings with radiant heating systems, an excessive flow rate can be supplied to the household due to increased pressure difference, usually under part load conditions. To deal with this problem, test-rig experiments and hydronic network simulations were conducted to investigate the control performance of pressure difference controllers such as flow limit valve (FLV) and pressure difference control valve (PDCV). To do this, a test-rig and Flowmaster simulation models were developed to analyze the flow rate and pressure difference under part load conditions in hydronic networks. The results showed that the FLV could reduce the maximum flow rate, however, excessive flow rate was still caused because the large pressure difference was not mitigated under low-part load conditions. It was found that the PDCV was effective in preventing excessive flow rate, because it could maintain a stable pressure difference even under low-part load conditions. Pressure difference and flow quotient charts were also suggested to evaluate the control performance depending on part load conditions in apartment buildings.

**주요어 :** 복사난방, 배관망, 차압, 유량, 차압제어, 부분부하율

**Keywords:** Radiant heating, Hydronic network, Pressure difference, Flow rate, Pressure difference control, Part load ratio

### 서론

복사난방 시스템은 온수를 생산하는 열원, 온수를 각각의 열적 존에 공급하는 분배시스템, 실내에 열을 공급하는 구조체 또는 패널로 구성된다. 이중 분배시스템은 복수의 열적 존에서 필요로 하는 온수유량을 공급함으로써 존별 열적 불균형이 일어나지 않게 하는 중요한 역할을 담당한다. 분배시스템은 여러 개의 지관(Subcircuit)이 하나의 노드에 병렬로 묶여있는 형

### OPEN ACCESS

Journal of KIAEBS 2021 June, 15(3): 302-312  
<https://doi.org/10.22696/jkiaeb.20210026>

pISSN : 1976-6483  
eISSN : 2586-0666

**Received:** June 8, 2021  
**Revised:** June 15, 2021  
**Accepted:** June 17, 2021

© 2021 Korean Institute of Architectural Sustainable Environment and Building Systems.



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

태가 일반적이므로, 각각의 열적 존에 공급되는 온수유량은 다른 열적 존에 공급되는 온수유량에 밀접한 영향을 받게 된다. 그 결과 모든 존이 난방되는 전부하 상태에서는 각 존에 설계 유량이 공급될 수 있으나, 몇 개의 존만 난방되는 부분부하 상태에서는 설계유량 이상의 과도한 유량이 공급되는 경우가 흔히 발생한다.

최근 공동주택에서 실별제어 시스템의 보급이 확대됨에 따라, 하나의 실만 난방이 가동되는 경우도 있어 과유량 공급에 의한 과열 또는 소음 문제가 유발될 가능성이 높아지고 있다. Hong et al. (2006)과 Jeong et al. (2007)은 부분부하 시 캐비테이션에 의해 소음이 유발됨을 검증하였고, 이를 해결하기 위해 바이패스밸브 적용 또는 메인배관 밸브 개도 조절을 통한 차압 제어의 필요성을 제안하였다. Ryu et al. (2008)과 Rhee et al. (2010)은 부하상태에 따라 해당 존의 밸브 개도를 조절하는 다이내믹 밸런싱 개념을 제안하고 그 효과를 검증한 바 있다.

한편 지역난방이나 중앙난방이 적용된 공동주택의 경우에는, 입상관에서 각 세대의 메인 배관이 분기되는 것이므로 이 또한 각 세대의 배관망이 병렬로 연결된 형태로 볼 수 있다. 그러므로 어떤 세대에 공급되는 온수유량은 다른 세대의 난방운전 상태에 영향을 받게 되며, 하나의 세대에서 몇 개의 실만 난방될 때 과도 유량이 공급되는 것처럼, 여러 세대 중 몇 개의 세대만 난방될 때 해당 세대에 필요 이상의 온수유량이 공급되는 결과가 나타나게 된다. 이러한 문제의 원인은 세대 메인 공급-환수관 사이 차압의 과도한 증가 때문이므로, 차압 제어를 하면 부분부하 상태에서 나타나는 과유량 문제를 완화하여 세대별 설계유량을 공급할 수 있다 (Jo et al., 2015; Park and Yee, 2016).

차압제어를 위한 방안으로는 정유량밸브(Flow limiting valve: FLV), 차압유량조절밸브(Pressure difference control valve: PDCV), 변속펌프 등이 있고, 일반적으로 변속펌프의 부하 대응성능이 가장 우수한 것으로 알려져 있으나 제어장치 및 인버터 설치에 의한 초기투자비 증가의 부담, 차압 센싱 오류 시 제어 성능이 저하되는 문제가 있다(Kim and Kwak, 2012; Jin et al., 2013). 이에 본 연구에서는 펌프 교체없이 배관을 일부 수정하여 FLV, PDCV와 같은 차압제어 장치를 추가하는 대안의 효과를 검토하였다. 이를 위해 복수의 세대로 구성된 공동주택 수배관을 재현하는 Test-rig을 제작하여 차압제어 장치의 적용 효과를 실험적으로 평가하고, 수배관 시뮬레이션을 병행하여 건물 단위에서의 차압제어 효과를 분석하였다.

## 차압 및 유량 제어 성능 평가 방법

### Test-rig 제작

공동주택의 분배시스템을 실제 스케일 그대로 재현하는 것은 현실적인 어려움이 수반되므로, 공동주택 분배시스템에서의 유량과 압력을 재현할 수 있도록 Test-rig (Rhee et al., 2018)을 제작하였다. Figure 1은 공동주택의 온수 분배시스템을 수력학적으로 재현한 Test-rig의 개념으로서, 4개의 subcircuit으로 구성된 기준 세대(Reference house)를 상정하고, 각 subcircuit에 압력손실을 부과할 수 있는 밸런싱 밸브를 설치하여 일반적인 공동주택의 유량과 압력 범위를 재현할 수 있도록 구성하였다. 기준 세대의 난방 설계유량은 6.5 L/min으로 가정하였으며, 차압제어를 위한 FLV와 PDCV를 메인 환수관에 설치하고, PDCV의 차압 측정을 위한 capillary

tube를 메인공급관과 환수관 사이에 설치하였다. 온수는 10 kW의 전기히터가 결합된 200 L 용량의 수조를 이용하여 공급하였고, 각 존에서 난방에 따른 온수온도 강하를 재현하기 위해 각 subcircuit에 판형 열교환기를 설치하여, 냉동기에서 공급된 냉수와 열교환을 하도록 하였다.

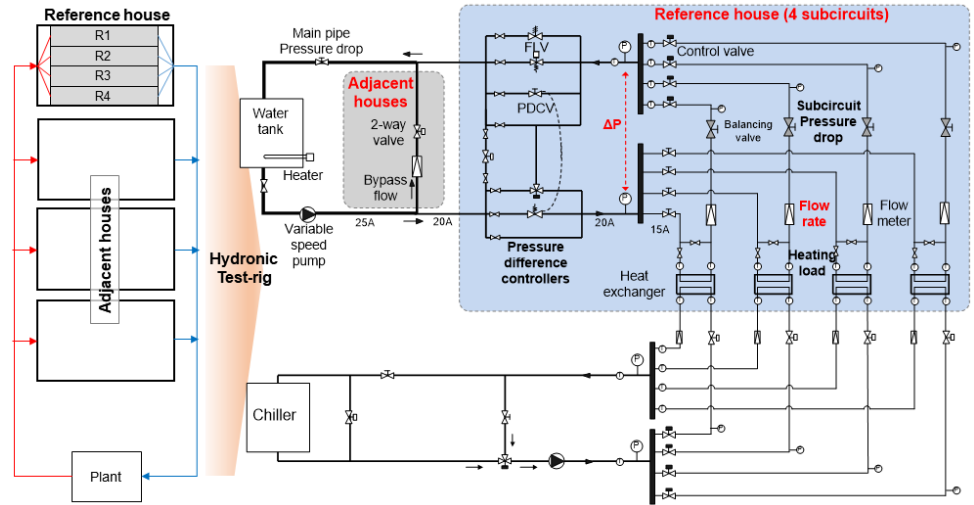
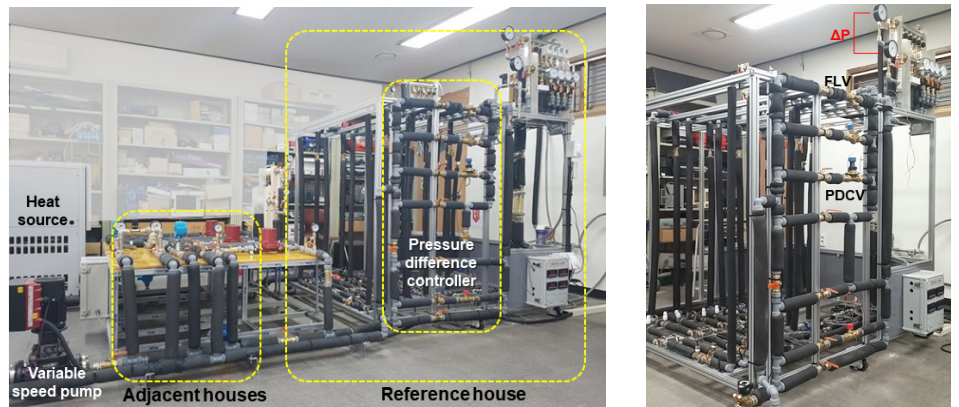


Figure 1. Conceptual diagram of the test-rig of hydronic networks for radiant heating system

또한 기존 세대의 공급유량은 인접 세대의 난방 여부에 영향을 받는 것을 감안하여, 인접 세대를 바이패스 배관으로 재현하고 바이패스 배관에 공급되는 유량을 조절하여 부분부하 조건을 재현할 수 있도록 하였다. Test-rig에 적용된 순환펌프 용량 및 배관 관경의 제한으로 인해, 재현된 세대의 수는 기준 세대를 포함하여 4개 세대로 설정하였다. 바이패스 유량 비율 (Bypass ratio)이 0일 경우에는 기준 세대만 난방되는 것으로, Bypass ratio가 점점 증가할수록 난방되는 인접 세대의 수가 증가하는 것으로 설정하였다. Figure 2는 이러한 개념으로 제작된 차압 및 유량제어 성능 평가 Test-rig을 나타낸 것이며, Table 1은 Test-rig에 적용된 주요 구성요소의 사양을 나타낸 것이다.



(a) Overall configuration of test-rig

(b) Pressure difference controller

Figure 2. Developed test-rig of hydronic networks for radiant heating system

**Table 1.** Specification of the test-rig components

Components		Model	Capacity	Range	Accuracy
Heat source	Hot water	-	10 kW	40~70°C	±1°C
	Chilled water	RKWC-A	5 RT	7~30°C	±1°C
Circulation pump		CRE 3-2	58.3 L/min 13.5 mAq	Variable speed	-
Plate heat exchanger		BC02-016	3,010 W	-	-
Pressure difference controllers	FLV	YFC-2N	20A	3~8 mAq	-
	PDCV	ASV-PV w/ ASV-M	DN20	1~15 mAq	-
Measurement devices	Water temperature	T-type T/C	-	0~350°C	±0.5°C
	Water flow rate	B110-375	1/2"	0.5~5 L/min	±2%
	Water pressure	131P40A	3/8"	10 mAq	±1.5%

### Test-rig 검증 Pilot test

Test-rig으로 일반적인 공동주택 단위 세대의 유량-압력 조건이 재현되는 것을 확인하기 위해, 기존 세대의 실별 on/off에 따른 차압 및 각 subcircuit의 유량을 측정하는 파일럿 테스트를 수행하였다. Table 2와 Figure 3에서 보는 바와 같이, 기존 세대 공급 유량은 1.8~8 L/min, 차압은 6~7 mAq 범위에서 형성되어, 일반적인 공동주택 단위 세대에서 나타나는 유량-압력 조건(Hong et al., 2006)이 재현되는 것을 확인하였다.

또한 인접 세대의 난방운전 영향으로 기존 세대의 유량-압력이 변화하는 것을 Test-rig이 재현할 수 있는지 검증하기 위한 파일럿 테스트를 수행하였다. 바이패스 배관에 설치된 2-way valve의 개도를 조절하여, 전체유량에 대한 인접 세대 공급유량, 즉 바이패스 유량의 비율을 0%~75% 사이에서 조절할 경우 기존 세대의 유량 및 차압을 측정한 결과는 Figure 4

**Table 2.** Result of pilot tests to verify the developed test-rig: single house

No.	Subcircuit on/off				$\Delta P$ [mAq]	Flow rate [L/min]				
	R1	R2	R3	R4		R1	R2	R3	R4	Total
1	On	On	On	On	5.80	1.20	2.80	1.90	2.10	8.00
2	Off	On	On	On	6.20	0.00	3.00	1.80	2.25	7.05
3	On	On	Off	On	6.20	1.30	3.05	0.00	2.35	6.70
4	On	On	On	Off	6.25	1.40	3.10	2.05	0.00	6.55
5	On	Off	On	On	6.40	1.40	0.00	1.90	2.40	5.70
6	On	Off	On	Off	6.40	0.00	3.20	0.00	2.40	5.60
7	On	Off	Off	On	6.50	0.00	3.20	2.20	0.00	5.40
8	Off	Off	On	On	6.55	1.50	3.25	0.00	0.00	4.75
9	On	On	Off	Off	6.60	0.00	0.00	2.25	2.50	4.75
10	Off	On	On	Off	6.60	1.50	0.00	0.00	2.50	4.00
11	Off	On	Off	On	6.60	1.55	0.00	2.30	0.00	3.85
12	Off	On	Off	Off	6.70	0.00	3.30	0.00	0.00	3.30
13	Off	Off	Off	On	6.80	0.00	0.00	0.00	2.60	2.60
14	Off	Off	On	Off	6.80	0.00	0.00	2.40	0.00	2.40
15	On	Off	Off	Off	6.80	1.60	0.00	0.00	0.00	1.60

와 같다. Bypass ratio가 감소할수록, 즉 난방되는 세대의 수가 줄어들수록 전체유량은 감소하고 기준 세대의 차압은 증가하는 경향을 확인할 수 있다(Figure 4(a)). 그에 따라 기준 세대에 공급되는 유량은 점차 증가하여 기준 세대 단독으로 운전될 경우 설계유량의 3배에 근접하는 과유량이 공급되는 것을 볼 수 있다(Figure 4(b)). 부분부하 시 특정 세대에 설계유량의 2~3배 정도까지 유량이 공급되는 경향은 기존 연구(Jin et al., 2013)에서도 보고된 바로, 본 연구에서 제작한 Test-rig을 활용하여 인접 세대의 난방여부에 따른 기준 세대의 차압 및 유량 제어 성능을 충분히 분석할 수 있을 것으로 판단된다.

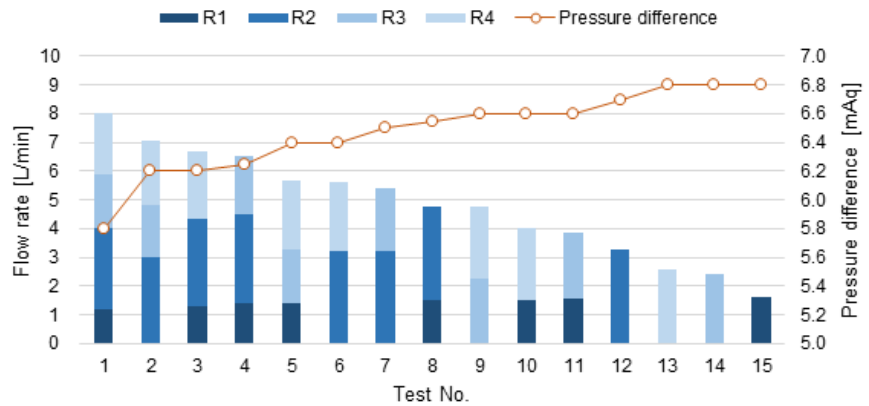
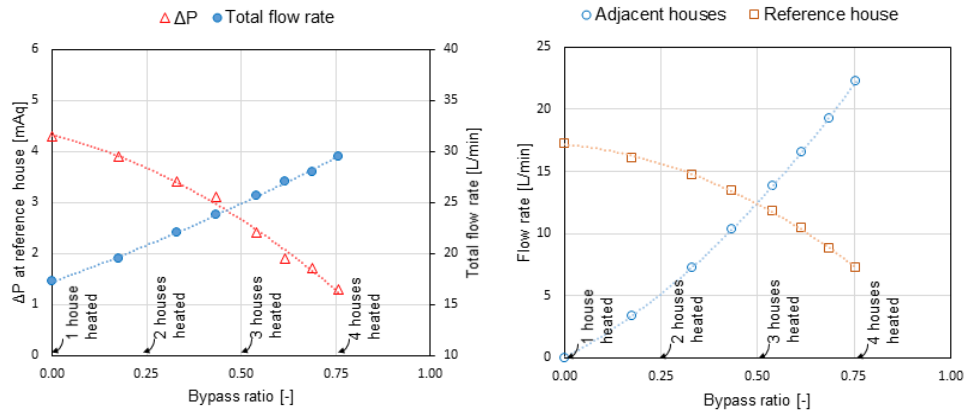


Figure 3. Measured pressure difference and flow rate to the reference house



(a) Pressure difference with bypass ratio

(b) Flow rate with bypass ratio

Figure 4. Result of pilot tests to verify the developed test-rig: multiple houses

### 관망해석 시뮬레이션

앞에서 언급한 Test-rig은 분배시스템의 물리적인 특성을 그대로 재현할 수 있는 장점이 있으나, 재현할 수 있는 건물의 규모나 부분부하 범위가 제한적이므로, 보다 많은 세대로 구성된 공동주택에 대한 성능 평가가 어려운 측면이 있다. 그러므로 규모가 큰 배관망 해석에 활용될 수 있는 Flowmaster (Jo et al., 2015; Park and Yee, 2016) v7을 이용하여 10세대에 해당하는 공동주택의 온수 분배시스템을 재현하고, 차압제어 장치 적용에 따른 차압 및 유량 제어

성능을 평가하였다. 기준 세대는 수력학적으로 가장 불리한 조건에 위치한 것으로 가정하여, 순환 펌프로부터 가장 먼 곳에 위치하는 것으로 모델링하였다. 모든 세대의 설계유량은 6.5 L/min으로 가정하였다.

분석 대상은 Figure 5와 같이 차압제어 장치가 적용되지 않은 기준 case (Baseline), 정유량 밸브를 적용한 case (FLV), 차압유량조절밸브를 적용한 case (PDCV)로 설정하였다. 배관은 곡관과 피팅류의 입력손실을 반영한 상당길이로 모델링하였으며, FLV는 유량의 목표치가 설정된 오리피스(orifice)로, PDCV는 차압에 따라 2-way 밸브의 개도를 조절하는 방식으로

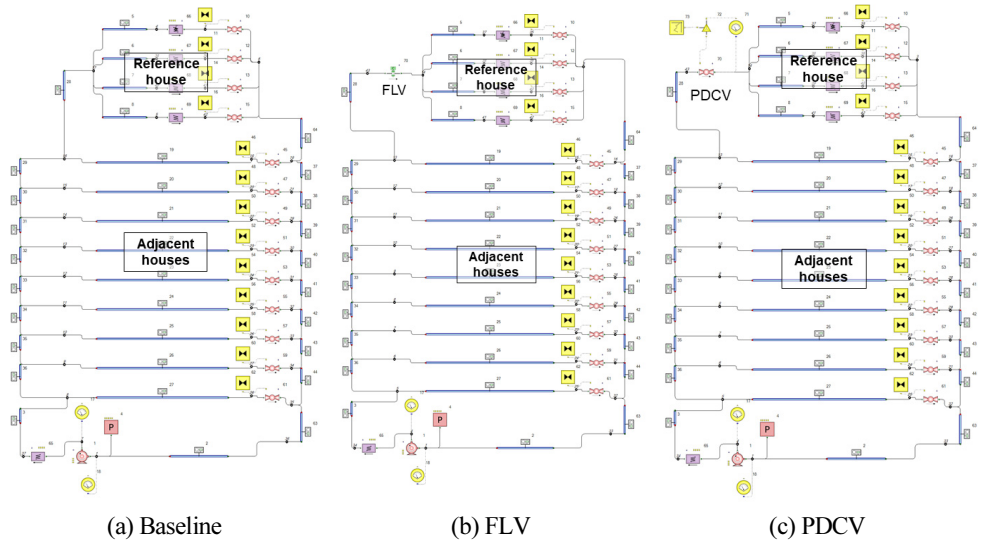


Figure 5. Flowmaster simulation models

Table 3. Simulation cases according to part load ratio (PLR) scenario

Part Load Ratio		Reference house status				Adjacent houses status								
PLR <sub>WB</sub>	PLR <sub>RH</sub>	R1	R2	R3	R4	H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7	H8	H9
100%	100%	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
100%	75%	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
100%	50%	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
100%	25%	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
80%	100%	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1
80%	75%	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1
80%	50%	0	0	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1
80%	25%	0	0	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1
50%	100%	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1
50%	75%	0	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1
50%	50%	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1
50%	25%	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1
20%	100%	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
20%	75%	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
20%	50%	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
20%	25%	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1

※ WB: Whole Building, RH: Reference House, R: Room, H: House, 1: on status, 0: off status

재현하였다. 각 Case에서 부분부하율(Part load ratio, 이하 PLR)을 변화시킬 때 기준 세대 메인 공급-환수간 차압과 공급 유량을 분석하여 차압 및 유량 제어성을 분석하였다.

건물 전체 부분부하율( $PLR_{WB}$ )변화는 모든 세대 가동( $PLR_{WB}$  100%), 8세대 가동( $PLR_{WB}$  80%), 5세대 가동( $PLR_{WB}$  50%), 2세대 가동( $PLR_{WB}$  20%)으로 재현하였으며, 기준 세대의 부분부하율( $PLR_{RH}$ )는 4개실 난방( $PLR_{RH}$  100%), 3개실 난방( $PLR_{RH}$  75%), 2개실 난방( $PLR_{RH}$  50%), 1개실 난방( $PLR_{RH}$  25%)으로 재현하였다. 기준 세대는 실별로 제어밸브를 on/off하고, 인접 세대는 세대 메인 제어밸브를 on/off하는 것으로 모델을 구성하였고, 폐쇄되는 제어밸브의 수를 늘려감으로써 부분부하율이 낮아지도록 하였다(Table 3).

## 성능평가 결과

### Test-rig 성능 평가 결과

Figure 6은 Test-rig에서 바이패스되는 유량, 즉 부분부하율에 따른 차압 및 유량측정 결과로, Bypass ratio가 감소함에 따라 기준 세대에서의 차압과 유량이 모두 증가하는 경향을 확인할 수 있다. FLV를 적용한 경우, Bypass ratio가 작아지는 낮은 부분부하 조건에서 Baseline case에 비해 차압이 일정부분 감소함으로써 결과적으로 유량도 다소 감소하는 것으로 나타났다. 그러나 낮은 부분부하 조건에서 과유량이 완화되는 폭은 그렇게 크지 않은데, 이는 FLV가 정해진 유량 이상으로 공급되지 못하게 제한(Flow limiting)하는 역할을 할 수 있으나, 차압을 효과적으로 감소시키는 데에는 한계가 있기 때문으로 판단된다.

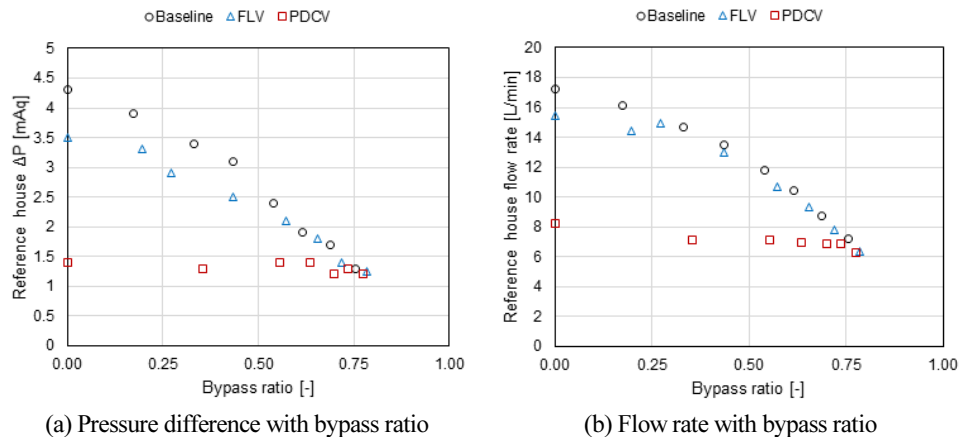


Figure 6. Test results on  $\Delta P$  and flow rate with pressure difference control method

반면 PDCV를 적용한 경우, Bypass ratio의 변동에도 차압이 거의 일정하게 유지되어, 낮은 부분부하율에서도 공급유량이 과도하게 증가하지 않는 것으로 분석되었다. 이는 PDCV가 공급-환수관 사이의 차압을 capillary tube로 직접 측정하고, 차압에 따라 밸브의 개도를 자동으로 조절하는 원리 때문으로 판단된다. Figure 7은 차압제어 방법에 따른 기준 세대의 유량(x축)-차압(y축) 관계를 나타낸 것으로, Baseline 대비 최대 유량이 제한되는 FLV의 특성과, 차압과 유량이 동시에 제한되는 PDCV의 특성이 잘 나타나고 있다. 그러므로 인접 세대

의 난방 여부에 관계없이 해당 세대에 일정한 유량을 공급하는 목적으로는 PDCV의 적용이 더 적합하다고 판단된다.

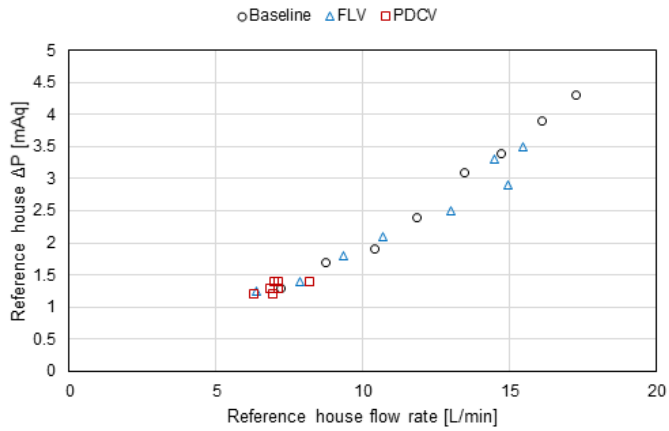


Figure 7. Relation between  $\Delta P$  and flow rate method

### 관망해석 시뮬레이션 결과

Figure 8은 관망해석 시뮬레이션으로 부분부하율 변화에 따른 기준 세대 차압 및 유량을 해석한 결과를 나타낸 것이다. Baseline case의 경우,  $PLR_{WB}$ 가 작아질수록, 즉 난방되는 인접 세대의 수가 줄어들수록 기준 세대의 차압 및 유량이 증가하는 경향이 나타나는데, Test-rig 실험보다 인접 세대의 수가 더 많으므로 낮은 부분부하율에서 차압과 유량의 증가폭이 더 큰 것을 볼 수 있다(Figure 8(a)). 또한 같은  $PLR_{WB}$ 에서는  $PLR_{RH}$ 가 작아질수록 차압이 증가하는데, 기준 세대 내에서 난방되는 실의 개수가 줄어드는 것이므로 기준 세대 공급 유량은 늘어나지 않고 감소하는 경향이 나타난다(Figure 8(b)).

FLV를 적용한 경우, 낮은 부분부하율에서 Baseline case에 비해 차압의 증가폭이 완화되어, 과유량 문제가 상당 부분 해소되는 것으로 나타났다. 그러나 난방되는 인접 세대의 수가

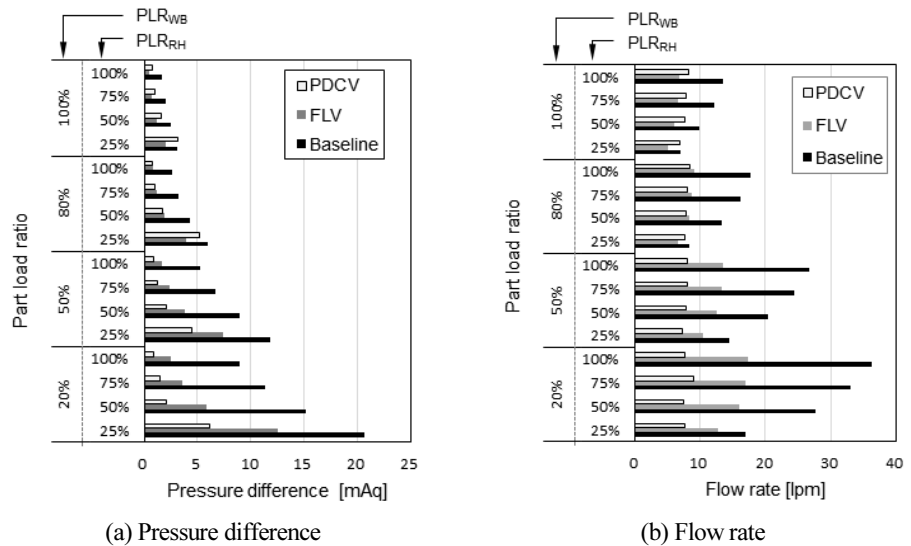


Figure 8. Simulation results on pressure difference control with PLRs



줄어들어  $PLR_{WB}$ 가 50% 미만으로 될 경우에는 기존 세대에 공급되는 유량이 10 L/min을 초과하여, 과유량 문제는 여전히 존재하는 것으로 분석되었다. PDCV를 적용한 경우에는  $PLR_{WB}$ 가 20%까지 떨어진 경우에도 차압이 낮게 유지되고, 그에 따라 공급유량도 10 L/min을 초과하지 않게 되어 낮은 부분부하율에서의 과유량 문제가 상당 부분 해소될 수 있을 것으로 판단된다. 다만, 같은  $PLR_{WB}$ 조건에서  $PLR_{RH}$ 가 감소하는 경우, 난방되는 실의 개수가 감소하는 것에 비례하여 유량이 감소하지는 않아 난방되는 실에서는 과유량 문제가 발생할 수 있으므로 이에 대한 제어 방안이 필요할 것으로 사료된다.

전체 건물과 기존 세대 내에서의 PLR 변화에 따른 차압 및 유량 제어성능 변화를 분석하기 위해, Surfer 프로그램(Golden Software, 2021)을 활용하여 Figure 9 및 10과 같이 시뮬레이션 결과 데이터를 2차원 평면으로 나타내었다. Figure 9는 각 제어방식 별 PLR에 따른 차압을 나타낸 것으로, x축은 전체건물의 부분부하율, y축은 기존 세대 내에서의 부분부하율을 의미한다. 2차원 평면에서 음영의 변화폭이 크다는 것은 부분부하율에 따른 차압제어가 원활하게 되지 않는 것으로 해석할 수 있다.

Baseline의 경우  $PLR_{WB}$ 과  $PLR_{RH}$  이 모두 75% 이상인 경우 차압은 약 3 mAq이나, 각각이 25%까지 떨어질 경우에는 거의 20 mAq까지 증가하므로 차압제어 성능이 떨어진다고 볼 수 있다. FLV를 적용한 경우 전체적으로 차압의 변화폭이 완화되며, 인접 세대 난방여부( $PLR_{WB}$ 의 변화)에 따라 차압 변화 폭이 Baseline에 비해 둔화되므로 어느 정도의 차압제어 성능은 확보되는 것을 확인할 수 있다. PDCV를 적용한 경우  $PLR_{WB}$  변화에 따른 차압의 변화폭이 더욱 감소하여, 차압제어가 매우 효율적으로 이루어진다고 판단된다.

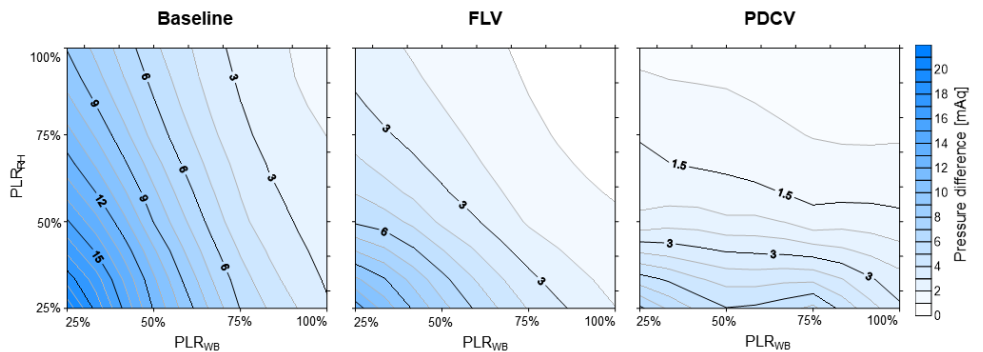


Figure 9. Pressure difference distribution with PLRs

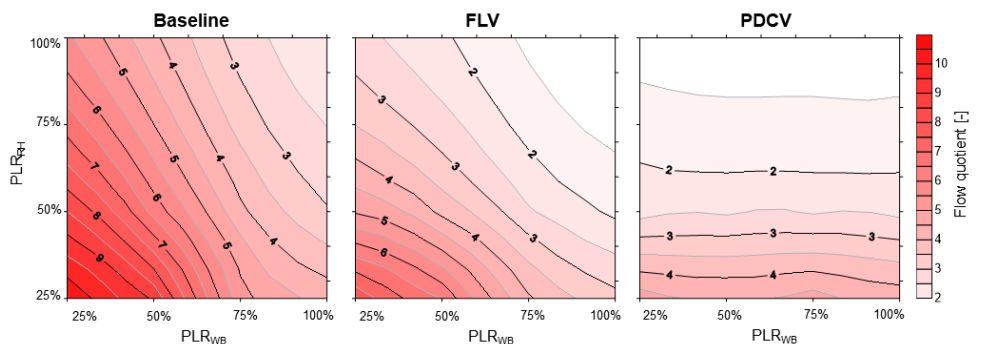


Figure 10. Flow quotient distribution with PLRs

한편 유량제어 성능은 설계유량 대비 실제 공급유량의 비, 즉 유량지수(Flow quotient)를 활용하여 평가할 수 있으므로(Rhee et al., 2010), Figure 10에 각 제어방식 별 PLR에 따른 유량지수 분포를 나타내었다. Baseline의 경우  $PLR_{WB}$ 과  $PLR_{RH}$ 이 감소함에 따라 유량지수가 매우 큰 폭으로 증가하여 부분부하시 과유량 문제가 심각한 것을 알 수 있다. FLV 적용 시 Baseline에 비해 유량지수가 전체적으로 감소되고, 인접 세대 난방여부에 따른 유량지수 변화 폭도 감소하여 Baseline에 비해 유량제어 성능이 개선된 것으로 볼 수 있다. PDCV의 경우 동일한  $PLR_{RH}$ 조건에서는  $PLR_{WB}$  변화에 따라 유량지수의 변화가 거의 없는 것으로 나타났는데, 이는 PDCV 적용으로 인접 세대의 난방여부에 관계없이 기존 세대에 일정 수준의 유량이 공급될 수 있음을 의미한다. 그럼에도 기존 세대 내에서 부분부하율이 감소할 경우 유량지수가 증가하는 경향은 여전히 존재하므로, 1~2개의 실만 난방될 경우 과유량을 방지하기 위한 차압 및 유량 제어 방안이 요구된다. 이를 위해 부하 조건에 따라 실별 제어밸브의 개도를 동적으로 조절할 수 있는 다이내믹 밸런싱(Ryu et al., 2016)을 적용하는 등 차압제어의 성능 보안을 위한 추가 연구가 필요하다고 사료된다.

## 결론

본 연구에서는 공동주택 복사난방 시스템에서 부분부하시 나타나는 과유량 문제를 해결하기 위해, 정유량밸브(FLV)나 차압유량조절밸브(PDCV)와 같은 차압제어 장치의 차압 제어 효과를 Test-rig 실험과 관망해석 시뮬레이션으로 평가하였으며, 도출된 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 공동주택의 난방 배관망을 물리적으로 재현한 Test-rig을 구축하였으며, 단일 세대가 난방되는 조건을 재현한 결과 일반적인 공동주택에서의 유량-압력 조건이 재현가능함을 확인하였다. 또한 Test-rig의 바이패스 유량 비율을 조절하는 것으로서 인접 세대의 난방 여부, 즉 건물 단위의 부분부하율 변화에 따른 기존 세대 공급유량의 변화를 재현할 수 있었다.
- (2) Test-rig을 이용한 실험 결과, FLV는 낮은 부분부하 조건에서 최대 유량을 제한하는 효과는 있으나, 부분부하율의 변화에 따라 기존 세대의 차압을 일정하게 제어하는 성능은 다소 부족한 것으로 나타났다. PDCV는 공급-환수관 사이의 차압에 따라 밸브의 개도를 조절하는 특성으로 인해 부분부하율의 변화에도 차압이 일정 수준으로 유지되어, 낮은 부분부하율에서도 공급 유량이 과도하게 증가하지 않는 것으로 분석되었다.
- (3) 관망해석 시뮬레이션으로 부분부하율의 변화 범위를 더 크게 하여 차압제어 성능을 평가한 경우에도 PDCV가 FLV에 비해 낮은 부분부하율에서 차압의 안정적인 유지 및 과유량 방지에 효과적인 것으로 분석되었다.
- (4) 관망해석 시뮬레이션 결과에 기반하여 전체 건물의 부분부하율 및 기존 세대 내에서의 부분부하율 변화에 따른 차압 및 유량지수(Flow quotient) 분포를 도출하였으며, 이를 통해 차압제어 방법의 효과 분석 및 개선 방향의 도출이 가능하도록 하였다.

본 연구에서는 차압 제어 방법의 수력학적인 특성, 즉 차압 및 유량제어 성능까지만 평가된 한계가 있으므로, 전체적인 건물 에너지 성능을 평가를 위해서는 차압제어에 따른 반송 동력

변화, 온수온도 강하, 열원 에너지를 분석할 필요가 있다. 이를 위해 Test-rig에서 온수온도 강하와 펌프 및 열원 에너지를 분석하는 방안, 더 나아가 관망해석과 건물 에너지 시뮬레이션의 연계성을 통해 난방 및 반송계통 에너지 성능을 분석하기 위한 추가 연구가 필요하다.

## 후기

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2019년)에 의하여 연구되었음.

## References

1. Hong, S.J., Ryu, S.R., Seok, H.T., Yeo, M.S., Kim, K.W. (2006). A Study on the Strategy to Maintain Optimal Flow-rate and Pressure of the Piping System for Individual Heating. *Journal of the Korean Housing Association*, 17(2), 11-18.
2. Jin, H.G., Yoo, M.H., Jeong, C.H., Yeo, M.S. Kim, K.W. (2013). Analysis of Water Supply Characteristics of The Heating System in an Apartment House Complex using District Heating Source. *Journal Architectural Institute of Korea Planning & Design*, 29(4), 267-274.
3. Jeong, H., Rhee, K.N., Ryu, S.R., Yeo, M.S., Kim, K.W. (2007). A Study on the Strategy of Noise Prevention by Cavitation for Radiant Floor Heating(Ondol) System. *Journal of Korean Institute of Architectural Sustainable Environment and Building Systems*, 1(1), 14-22.
4. Jo, Y.N., Park, H.J., Choi, D.Y., Yee, J.J. (2015). The Evaluation of the differential pressure control on the Valve Open Rate of the Secondary Pumps in the Heating and Cooling System of Apartments. *Journal of Korean Institute of Architectural Sustainable Environment and Building Systems*, 9(4), 304-311.
5. Kim, S.H., Kwak, R.Y. (2012). Evaluation of Energy Savings Applying Energy Efficient Control of Variable Speed Pump in HVAC Hydronic Systems. *Journal Architectural Institute of Korea Planning & Design*, 28(2), 207-214.
6. Park, H.J., Yee, J.J. (2016). A Study on the Applicability of Flowmaster V7 for Performance Prediction in Heating and Cooling Circulation System. *Journal of the Regional Association of Architectural Institute of Korea*, 18(3), 129-134.
7. Rhee, K.N., Ryu, S.R., Yeo, M.S., Kim, K.W. (2010). Simulation study on hydronic balancing to improve individual room control for radiant floor heating system. *Building Services Engineering Research and Technology*, 31(1), 57-73.
8. Ryu, S.R., Cheong, C.H., Cho, H. (2016). Evaluation of Energy Consumption through Field Measurement at the Apartment Housing Unit Using Dynamic Flow Rate Balancing. *Journal of Korea Society of Geothermal Energy Engineers*, 12(4), 15-20.
9. Ryu, S.R., Rhee, K.N., Yeo, M.S., Kim, K.W. (2008). Strategies for flow rate balancing in radiant floor heating systems. *Building Research & Information*, 36(6), 625-637.
10. Rhee, K.N., Kim, M.S., Jung, G.J. (2018). Performance Evaluation of Flow Rate and Pressure Controls under Partial-load Conditions in Housing Unit with Radiant Heating System. *Proceedings of KIAEBS 2018 Annual Conference*, 125-126.
11. Golden Software. (2021). Available at: <https://www.goldensoftware.com/products/surfer> (accessed: 13<sup>th</sup> May 2021).