

# 강판 마감형 조립식 벽패널 복사냉난방시스템의 냉난방 방열 특성 평가

임재한\*, 구보경\*\*, 김성임\*\*\*, 송승영\*\*\*\*

\*이화여자대학교 건축공학과(limit0@ewha.ac.kr), \*\*한국건설기술연구원(koo.bok@kict.re.kr),  
\*\*\*이화여자대학교 대학원(hope0626@naver.com), \*\*\*\*이화여자대학교 건축공학과(archssy@ewha.ac.kr)

## Evaluation of Heating and Cooling Thermal Output Characteristics of Prefabricated Steel Wall Panel System for Radiant Heating and Cooling

Lim, Jae-Han\*, Koo, Bo-Kyoung\*\*, Kim, Sung-Im\*\*\*, Song, Seung-Yeong\*\*\*\*

\*Dept. of Architectural Engineering, Ewha woman's University(limit0@ewha.ac.kr)

\*\*Korea Institute of Construction Technology(koo.bok@kict.re.kr)

\*\*\*Graduate School, Ewha woman's University(hope0626@naver.com),

\*\*\*\*Dept. of Architectural Engineering, Ewha woman's University(archssy@ewha.ac.kr),

### Abstract

Recently the radiant panel heating and cooling system has been regarded as an alternative of low temperature heating and high temperature cooling by applying the renewable energy sources to the heating and cooling of buildings. Especially this system can be used as HVAC system alternatives in super high-rise buildings for energy saving and thermal comfort. Also it can be possible to reduce the plenum space because the minimum ventilation air will be supplied into the space. This study focused on the evaluation the basic characteristics of thermal output in prefabricated steel wall panel system for radiant heating and cooling. In order to evaluate the thermal output according to both various supply water temperatures and supply water flow rates, three-dimensional dynamic heat transfer analysis was performed. As results, for the heating mode, thermal output increased by 26% with the supply temperature increasing by 5°C. The surface temperature of panels range within 1~3°C. For the cooling mode, thermal output decreased by 18.2% with the supply temperature increasing by 2°C. The surface temperature of panels range within 0.5~1°C and it was shown the even temperature distribution.

Keywords : 강판 마감형 조립식 복사냉난방시스템(Prefabricated Steel Wall Panel for Radiant heating and cooling), 전열해석 시뮬레이션(Heat transfer simulation), 저온 난방(Low temperature heating), 고온 냉방(High temperature cooling), 방열량(Thermal output), 전열해석(Heat transfer analysis)

## 1. 서 론

세계적으로 건물 에너지 절약에 대한 관심이 고조되면서 기존 화석에너지를 대신하여 신재생에너지나 미활용에너지를 건물에 적용하고자 하는 다양한 노력이 시도되고 있다. 일반적으로 신재생에너지나 미활용에너지의 경우, 대부분 40~60°C 범위의 저위에 에너지원이기 때문에 산업분야에서는 그 활용이 제한적이다. 이에 최근 국제 에너지기구(IEA)를 비롯한 주요 선진국에서는 기존의 고위 열원을 저위 열원으로 대체하고자 하는 연구가 적극 검토되고 있으며, 이러한 연구의 일환으로 건물 냉난방에 저온 난방 및 고온 냉방(low temperature heating, high temperature cooling)을 통한 저엑서지(Low exergy) 시스템 기술 개발과 다양한 보급 활성화 방안이 제시되고 있다. 특히 건축물 바닥이나 천장 마감, 벽체 마감을 이용한 다양한 형태의 복사냉난방시스템 기술이 그 대안으로 검토되고 있다.

초고층 복합빌딩의 공조설비의 경우, 공조기의 난방코일에 85~90°C의 온수가 공급되며, 부적절한 실내 공기 순환으로 인해 내부 온열환경에 불쾌적이 야기되기도 한다. 그러나 사무공간의 천장이나 바닥, 벽체에 조립식 복사냉난방 패널시스템을 설치하여 냉난방으로 활용함으로써 초고층 건물에서 덕트의 크기를 줄이고 층고를 낮출 수 있으며, 열매체의 반송 동력을 감소시킬 수 있을 것으로 판단된다. 나아가 신재생에너지나 미활용온도차에너지를 건물의 냉난방에 적용함으로써 저온난방 및 고온 냉방이 가능하여 건물에서 효율적인 에너지 사용이 가능할 것이다. 조립식 패널 복사냉난방시스템을 사무공간에 적용하기 위해서는 건축 설계 단계에서 다양한 복사면을 활용하기 위한 복사패널 기술과 설계 및 운전조건에 따른 난방 및 냉방시 특성에 대한 연구가 선행되어야 한다.

본 연구에서는 초고층 복합빌딩에서 기존

활용해 오던 공조시스템의 대안으로서 조립식 벽패널 복사냉난방시스템을 통합 적용하기 위해 강판 마감형 조립식 벽패널 복사냉난방시스템을 시제품으로 제작 및 시공하여 냉난방 운전 조건별로 성능평가를 진행하고자 한다. 이를 위해 본 연구에서는 실제 성능평가에 앞서 냉난방 운전시 방열 특성을 평가하기 위해 3차원 비정상상태 전열해석 시뮬레이션을 수행하였으며, 추후 실험 데이터와 비교할 수 있는 사전 성능 평가 데이터를 도출하고자 하였다.

## 2. 강판 마감형 조립식 벽패널 복사냉난방시스템 개요

강판 마감 벽패널 복사냉난방시스템의 설치를 위한 테스트 셀은 가로 4m × 세로 2m × 높이 2.3m (내부치수 기준 3.8m × 1.9m × 2.25m, Fig. 1 참조) 규모의 철골 구조물을 이용하였고, 냉난방 히트펌프 열원 및 축열조, 온수분배기, 펌프 등의 분배시스템을 통합적으로 구축하였다. 강판마감 벽패널 복사냉난방시스템의 모듈 크기는 너비 0.9m × 높이 1.93m이고, 테스트 셀의 가로 3.8m × 높이 2.25m 벽면과 가로 1.9m × 높이 2.25m 벽면에 각각 4개 및 2개의 모듈을 직렬 배관 연결하여 설치하였다.

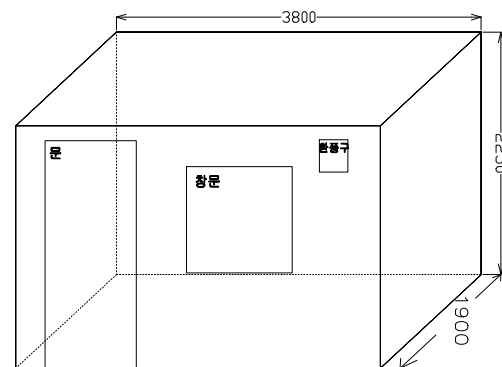


Fig. 1 Description of test cell

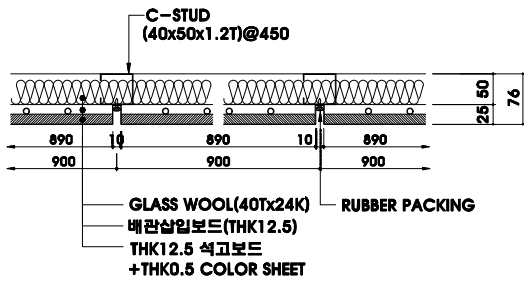


Fig. 2 Horizontal section of radiant heating and cooling wall panel

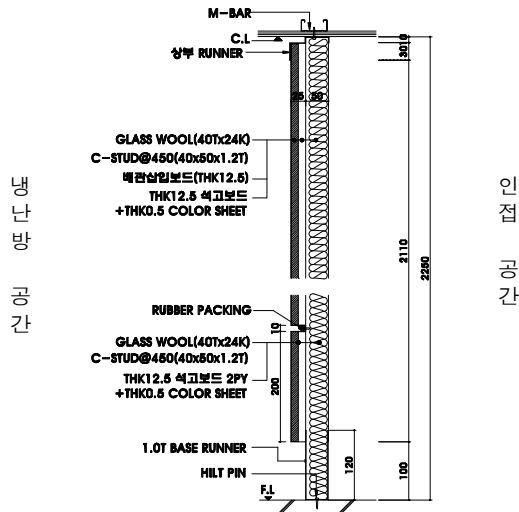


Fig. 3 Vertical section of radiant heating and cooling wall panel

Fig. 2, Fig. 3과 같이 강판마감형 조립식 벽패널 복사냉난방시스템은 냉난방공간을 기준으로 강판마감 0.5T → 석고보드 12.5T → 배관 삽입 매트<sup>1)</sup> 12.5T → 스테드+단열재(글라스울)의 레이어로 구성되어 있다. Fig. 4와 같이 제작 및 운송, 시공의 편의성을 위해 강판마감형 조립식 벽패널은 0.9m의 폭으로 각 모듈이 설계되어 있으며, 각 모듈의 배관을 연결함으로써 냉난방 배관 조닝을 구성하게 된다. 본 연구에서는 테스트 셀에 시범 시공

1) 배관삽입용 매트로는 EPP(Expanded Polypropylene)를 사용하였으며, 배관은 8mm PB관(배관 pitch: 80mm)을 사용함.

하기 위해 배관을 매트에 삽입한 일체형 패널로 공장에서 제작하여 현장에 반입하는 형태로 강판 마감형 조립식 벽패널 복사냉난방 시스템을 설계하였으며, 실제 시공과정은 Fig. 5와 같다.

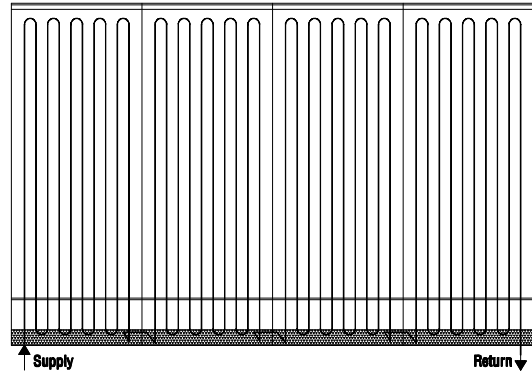


Fig. 4 Panel connection and pipe layout



Fig. 5 Installation processes of prefabricated steel wall panel for radiant heating and cooling

공장에서 벽패널 모듈이 제작되므로 현장에서 공기 단축이 가능하고, 배관 삽입 매트와 마감재 사이가 확실하게 밀착될 수 있어 시공품질 저하에 대한 우려가 적을 것으로 판단된다. 그러나 패널과 패널 사이 배관을 서로 연결해 주어야 하므로(Fig. 5(a) ④번 참조) 배관 연결부위에서의 누수 방지를 위해서는 적절한 설계 및 시공 관리, 사전 누수 검사가 필요할 것이다. 본 연구에서 시범 운전기간동안 열원에서 50℃ 온수를 공급한 후 패널 표면 온도를 열화상 카메라로 측정된 결과, Fig. 6과 같이 온수 배관이 설치되지 않은 패널과 패널 사이의 접합부위를 제외하고 전체적으로 고른 온도 분포를 나타냈다. 본 연구에서는 시뮬레이션을 통해 냉온수 설계 조건에 따른 벽패널의 중심부 표면온도를 비교하였으며, 추후 실험 연구를 통해 벽패널의 표면온도 및 방열 특성을 측정 분석하고자 한다.

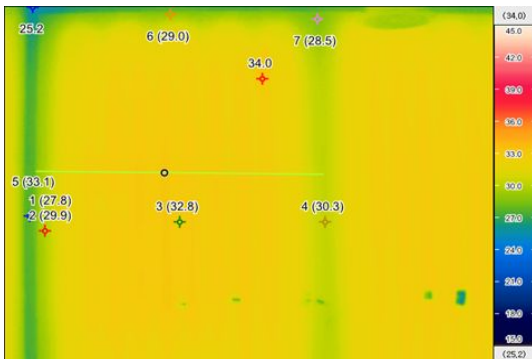


Fig. 6 Surface temperature distribution of panel during heating operation (Supply water temperature = 50℃)

### 3. 강판마감형 조립식 벽패널 복사냉난방시스템의 냉난방 성능 평가 개요

본 연구에서는 강판마감형 조립식 벽패널 복사냉난방시스템의 냉난방 성능평가를 위하여 3차원 전열해석을 실시하였다. 전열해석에 이용된 틀은 Physibel사에서 만든 상용, 범용의 3차원 비정상상태 전열해석 시뮬레이션 틀

인 Voltra 6.0w이다. 본 프로그램은 열평형방정식을 유한차분법에 의해 이산화하여 풀어줌으로써 복잡한 건물 부위에서의 정밀 전열해석이 가능한 신뢰도가 매우 높은 프로그램이다. 해석 대상 부위는 벽패널 모듈 4개를 나란히 테스트 셀의 가로 3.8m × 높이 2.25m 벽면에 시공한 것으로 가정하였으며, 이를 위해 테스트 셀에서의 설계안과 동일하게 테스트 셀의 벽체와 실제 시공된 벽패널 복사냉난방시스템의 구성을 모두 포함하는 것으로 모델링하였다. 이 때 시뮬레이션 모델의 면적은 7.70m<sup>2</sup>, 배관의 총 길이는 108m가 된다. 벽체 구성 재료의 두께 및 물성<sup>2)</sup>은 Table 1, Table 2와 같다.

Table. 1 Description of wall layers for simulation

Category	Materials (Outside→Inside)	Thickness (mm)
Existing wall structure of test cell	Steel	1.2
	EPS board	30
	Plywood board	3
Prefabricated steel wall panel for radiant heating and cooling	Glass wood+Stud	50
	Pipe embedded mat (EPP mat insulation)	12.5
	Gypsum board	12.5
	Metal panel	0.5

Table. 2 Properties of materials

Category	Materials	Thermal conductivity (W/m℃)	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Specific heat (J/kg℃)
Existing wall structure of test cell	Wood	0.12	700	1,880
	EPS board	0.031	40	1,470
	Glass wool	0.029	43	1,220
	Steel stud	50	7,800	450
Prefabricated steel wall panel for radiant heating and cooling	Gypsum board	0.18	600	1,000
	EPP mat insulation	0.041	60	1,800
	Sealant	0.35	20	840
	Steel	50	7,800	450
Pipe	PB	0.387	930	2,093
	Water	-	1,000	4,200

2) EPP 매트와 PB관은 각 업체 제공 자료 및 원자재의 물성치를 참조하여 설정하였으며, 이외 재료의 물성치는 prEN 12524의 값을 활용함.

Table. 3 Simulation results - heating operation

Supply water temperature (°C)	Water flow rate (LPM)	Supplied heat		Return water temperature (°C)	Difference between supply and return water temperature(°C)	Surface temperature(°C) Measurement point no.			
		(W)	(W/m <sup>2</sup> )			1	2	3	4
40	1	367.0	47.7	3364	6.37	28.2	27.5	26.8	26.1
	1.5	390.8	50.8	3550	4.50	28.4	27.8	27.3	26.9
	2	403.5	52.4	3652	3.48	28.4	28.0	27.6	27.3
45	1	463.4	60.2	3714	7.86	30.3	29.4	28.5	27.7
	1.5	492.8	64.0	3944	5.56	30.5	29.8	29.2	28.6
	2	508.4	66.0	4071	4.30	30.5	30.0	29.6	29.1
50	1	559.8	72.7	4064	9.36	32.4	31.3	30.3	29.3
	1.5	594.8	77.2	4338	6.62	32.6	31.8	31.1	30.4
	2	613.4	79.7	4489	5.11	32.7	32.1	31.5	31.0

(1) 난방 특성 평가 개요

난방조건 시 실내온도는 20°C, 인접공간의 실온은 테스트 셀이 설치된 조건을 비난방 공간으로 가정하여 5°C로 설정하였고, 표면 열전달율의 경우 외기에 의한 영향이 거의 없는 것으로 판단되어 벽패널의 내외측 모두 8.29W/m<sup>2</sup>K<sup>3</sup>)로 설정하였다.

온수 공급온도는 40, 45, 50°C로 가정하였으며, 공급 유량은 1, 1.5, 2 LPM으로 가정하여 각 온도대별 유량별 방열량, 표면온도분포와 환수온도 데이터를 비교하는 것으로 하였다. Voltra 프로그램에서 온수의 흐름을 모델링하기 위해 BC\_FRE\_S 조건을 설정하였다. 이는 유체의 온도가 정해져있지 않으며, 유체의 흐름을 구현해야하는 경우에 사용할 수 있는 조건으로, 유체의 온도는 Heat Balance Equation으로 계산되어, 배관 내 유체 온도 변화의 계산이 가능하다.

(2) 냉방 특성 평가 개요

냉방조건 시 실내온도는 26°C, 인접공간의 실온은 테스트 셀이 설치된 조건에서 냉방이 이뤄진다고 가정하여<sup>4)</sup> 26°C로 동일하게 설정

하였으며, 표면 열전달율은 벽패널 내외측 모두 8.29W/m<sup>2</sup>K로 하였다. 이는 벽패널 복사냉난방시스템이 실내-복도 사이에 위치하는 간막이벽으로 가정한 경우에 동일하게 적용될 수 있을 것으로 생각된다.

냉수 공급온도는 15, 17, 19°C로 가정하였으며, 공급 유량은 1, 1.5, 2 LPM으로 난방조건과 동일하게 적용하였다. 시뮬레이션 결과로는 난방시 실내로 공급되는 열량, 냉방시 실내에서 제거되는 열량, 각 조건에서 온수 및 냉수의 공급-환수온도차, 패널 표면 온도(측정 포인트: Fig. 7 참조)를 산출하여 비교 평가하는 것으로 하였다.

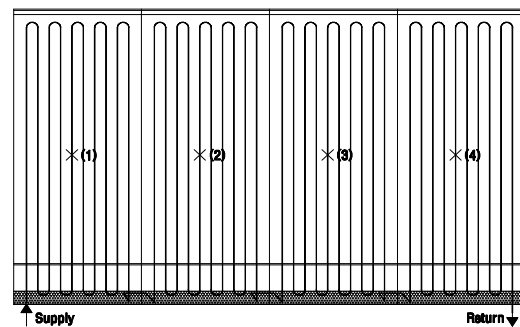


Fig. 7 Points of surface temperature analysis

3) ASHRAE, ASHRAE Handbook 2001 Fundamentals, ASHRAE, 2001.

4) 테스트 셀은 공조가 되지 않지만, 열용량이 큰 두꺼운 콘크리트 벽체로 이루어진 실내에 위치하고 있어, 여름철 외기의 영향을 거의 받지

않을 것으로 가정하였음.

Table. 4 Simulation results - cooling operation

Supply water temperature (°C)	Water flow rate (LPM)	Supplied heat		Return water temperature (°C)	Difference between supply and return water temperature(°C)	Surface temperature(°C) Measurement point no.			
		(W)	(W/m <sup>2</sup> )			1	2	3	4
15	1	212.0	27.5	18.30	3.30	21.4	21.8	22.2	22.5
	1.5	224.4	29.1	17.33	2.33	21.4	21.6	21.9	22.1
	2	230.9	30.0	16.80	1.80	21.3	21.5	21.7	21.9
17	1	173.4	22.5	19.70	2.70	22.3	22.6	22.9	23.1
	1.5	183.6	23.8	18.91	1.91	22.2	22.4	22.6	22.8
	2	189.0	24.5	18.47	1.47	22.2	22.3	22.5	22.7
19	1	134.9	17.5	21.10	2.10	23.1	23.3	23.6	23.8
	1.5	142.8	18.5	20.48	1.48	23.0	23.2	23.4	23.5
	2	147.0	19.1	20.15	1.15	23.0	23.2	23.3	23.4

#### 4. 강판 마감 벽패널 복사냉난방시스템의 난방 및 냉방 특성 평가 결과

##### (1) 난방 특성 평가 결과

난방 특성 평가 결과는 Table 3 및 Fig. 8 과 같다. 난방시 강판마감형 조립식 벽패널 복사냉난방시스템으로부터 실내로 전달되는 열량은 유량별로 온수온도가 5°C 증가할 때마다, 약 26% 씩 공급열량이 증가(1 LPM인 경우, 40°C 대비 45°C와 50°C인 경우 각각 26.3%, 52.5%, 1.5 LPM인 경우, 각각 26.1%, 52.2%, 2 LPM인 경우, 각각 26.0 %, 52.0% 증가)하는 것으로 나타났다. 또한 각 온수 공급온도 별로 유량이 증가함에 따라 1 LPM 대비 1.5 LPM인 경우, 약 6.3~6.5%, 2 LPM인 경우 약 9.6~10.0 % 공급열량이 증가하는 것으로 나타났다.

공급-환수온도차의 경우, 온수 공급온도 40°C, 유량 2 LPM인 경우 가장 작은 3.48°C, 온수 공급온도 50°C, 유량 1 LPM인 경우 9.36°C로, 온수 공급온도가 증가할수록 증가하며, 유량이 증가할수록 감소하는 것으로 나타났다. 공급-환수온도차를 10°C의 조건으로 설계 하고자 하는 경우, 40°C 온수를 2 LPM으로 공급하는 경우, 약 9개의 조립식 패널을

직렬로 연결하여 사용가능하며, 50°C 온수를 1 LPM으로 공급하는 경우는 시뮬레이션 조건과 동일한 약 4개의 조립식 패널을 연결하는 것이 가능할 것으로 판단된다.

패널 표면온도의 경우, 비교적 모든 패널 표면온도에서 고른 온도분포(온도차 1~3°C 내외)를 보이는 것으로 나타났다.

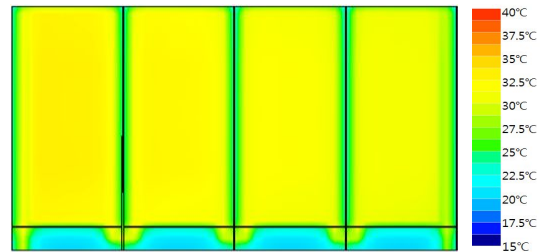


Fig. 8 Surface temperature distribution for heating at the conditions of 50°C, 1.5 LPM water supply

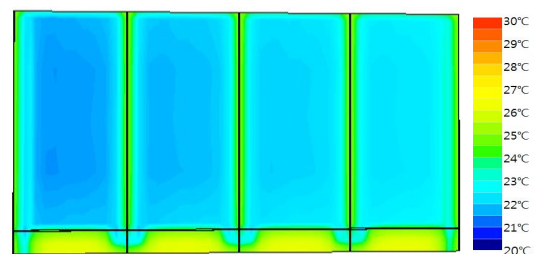


Fig. 9 Surface temperature distribution for cooling at the conditions of 15°C, 1.5 LPM water supply

## (2) 냉방 특성 평가

냉방 특성 평가 결과는 Table 4 및 Fig. 9와 같다. 냉방시 강판마감형 조립식 벽패널 복사냉난방시스템으로부터 실내로부터 제거하는 열량은 유량별로 냉수 공급온도가 2°C 증가할 때마다, 약 18.2% 씩 감소(모든 유량에 대해서 15°C 대비 17°C와 19°C인 경우 각각 18.2%, 36.4% 감소)하는 것으로 나타났다. 또한 각 냉수 공급온도 별로 유량이 증가함에 따라 1 LPM 대비 1.5 LPM인 경우, 약 5.8%, 2 LPM인 경우 약 8.9% 실내로부터 제거되는 열량이 증가하는 것으로 나타났다.

공급-환수온도차의 경우, 냉수 공급온도 19°C, 유량 2 LPM인 경우 가장 작은 1.15°C, 냉수 공급온도 15°C, 유량 1 LPM인 경우 3.3°C로, 냉수 공급온도가 증가할수록 감소하며, 유량이 증가할수록 감소하는 것으로 나타났다. 패널 표면온도의 경우, 비교적 모든 패널 표면온도에서 고른 온도분포(온도차 0.5~1°C 내외)를 보이는 것으로 나타났다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 초고층 복합빌딩에서 이용 가능한 조립식 벽패널 복사냉난방시스템 적용을 위하여 강판 마감 벽패널 복사냉난방시스템 시제품을 대상으로, 3차원 비정상상태 전열해석 프로그램을 이용, 난방 및 냉방 조건시 특성을 평가하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 난방의 경우, 온수 공급온도가 5°C 증가할 때 실내로 공급되는 열량은 약 26% 가량 증가하였고, 공급-환수온도차의 경우, 3.48~9.36°C로 온수 공급온도가 증가할수록 그 차가 커지며, 유량이 증가할수록 감소하는 것으로 나타났다. 또한 패널 표면온도는 1~3°C 내에서 비교적 고른 온도 분포를 보이는 것으로 나타났다.
- (2) 냉방의 경우, 실내로부터 제거되는 열량은

냉수 공급온도가 2°C 증가할 때마다 약 18.2% 씩 감소하는 것으로 나타났으며, 공급-환수온도차는 1.15~3.3°C로 냉수 공급온도가 증가할수록 감소하며, 유량이 증가할수록 감소하는 것으로 나타났다. 또한 패널의 표면온도는 0.5~1°C 내로 상당히 고른 온도분포를 보이는 것으로 나타났다.

추후 테스트 셀에서 실제 난방 및 냉방 운전시 표면온도 및 방열 특성, 온열환경을 측정할 계획에 있으며, 시뮬레이션 결과를 활용하여 비교 평가할 계획이다. 또한 이를 통하여 벽패널 복사난방시스템의 에너지성능 평가와 공급 온수 온도 및 유량, 제어와 관련한 최적 운전 방식 도출을 위한 연구를 지속적으로 진행해 나갈 예정이다.

## 후 기

“본 연구는 국토해양부 첨단도시개발사업의 연구비지원 (과제번호# 09 첨단도시A01)에 의해 수행되었습니다.“

본 연구는 이화여자대학교의 Ewha Global Top 5 사업(2011) 지원으로 이루어짐

## References

1. 김광우, 초고층 오피스용 냉난방 및 다기능 조립식 패널시스템 개발, 건축환경설비 제 5권 제2호, 2011.
2. 강재식, 최경석, 이승언(2004), 저온난방에 의한 IHCS 온돌시스템의 열특성, 대한건축학회 학술발표대회 논문집 계획계 24(2), 2004.
3. 조정식, 손병후, 임성균, 백성권, 지열원 저온 복사난방의 적용을 위한 해석적 고찰, 지열에너지저널 7(2), 2011.
4. 홍희기, 김영균, 저온 온돌 난방에 의한 제어특성과 온열쾌적성, 대한설비공학회 학

- 술발표대회 논문집, 2011.
5. 이영주, 김오봉, 김광우, 여명석, 폴리프로필렌 모세유관 냉방시스템의 적용에 관한 실험적 연구, 대한설비공학회 논문집 17(9), 2005.
  6. Jan Babiak, Bjarne W.Olesen, Dušan Petráš, Low temperature heating and high temperature cooling, REHVA Guidebook no.7, REHVA, 2007.
  7. Physibel, Physibel Voltra Manual, 2009.
  8. Shigeru Okamoto et al., A simplified calculation method for estimating heat flux from ceiling radiant panels, Energy and Buildings Vol.42 Issue 1, 2010.