

모세유관 바닥복사 냉·난방 시스템의 성능평가

Performance Evaluation of the Capillary Tube Radiant Floor Cooling & Heating System

서 유 진*
Seo, Yu-jin

김 태 연**
Kim, Taeyeon

이 승 복***
Leigh, Seung-bok

Abstract

At present, many countries are trying to reduce green gas emissions to mitigate the effects of these gases on climate change. Year after year, there have been efforts to cut energy use for heating and cooling. Heating and cooling systems, common in all forms of housing, are increasing due to the constant supply of new housing resulting from improvements in economic growth and the quality of life. Thus, studies related to the design of cooling and heating systems to improve energy efficiency are expanding. Among the new designs, radiant floor cooling and heating systems which use capillary tubes are becoming viable means of reducing energy use. Radiant floor cooling and heating systems which use capillary tubes are creative and sustainable systems in which cool and hot water is circulated into capillary tube which has small diameter. In this study, the cooling and heating performance of this type of capillary tube system is investigated in an experimental study and a simulation using TRNSYS. The results of the experimental study show that under a peak load, a capillary tube radiant floor cooling system using geothermal energy can achieve desired indoor temperature without an additional heat source. The set room air temperature is maintained while the floor surface temperature, PMV and PPD remain within the comfort range. Also, this system is more economic than a packaged air conditioner system due to its higher COP. The results of the simulation show that the capillary tube radiant floor heating system maintains set temperature more stable than a PB pipe radiant floor heating system due to its lower supply temperature of hot water. In terms of energy consumption, the capillary tube radiant floor heating system is more efficient than the PB pipe radiant floor heating system.

키워드 : 모세유관, PB배관, 바닥복사 냉·난방시스템

Keywords : Capillary Tube, Polybutylene Pipe, Radiant Floor Cooling & Heating System

1. 서 론

최근 전 세계적으로 기후변화 문제가 심각하게 받아들여지고 있다. 유럽을 포함한 선진국들은 기후변화 협약을 통한 온실 가스 감축이라는 새로운 에너지 절약의 동기를 부여하고 있다. 그중에서도 건물에 사용되는 냉·난방 에너지의 절감이 주요 전략으로 떠오르고 있다.

향후 지속적인 주택 공급과 경제 성장, 삶의 질 향상으로 인해 건축물의 기본적인 대표적 설비 시스템인 냉·난방 시스템에 대한 수요 증가와 쾌적의 질적 수준 향상에 대한 요구가 증가함으로 인해 향후 냉·난방 시스템에 대한 투자비용과 냉·난방 에너지 소비는 더욱 증대될 것으로 예측되고 있다.

현재 국내 공동주택에서 사용되고 있는 개별 냉·난방방식은 일반적으로 패키지 에어컨과 바닥복사난방(온돌)을 이용한다. 그러나 대류식 냉방시스템의 경우 온도의 불균일에 따른 콜드 드래프트를 유발하고 여름철 냉방 전력 사용량을 증가시키는 주요 원인이 되고 있다. 최근 거주자들의 쾌적한 실내 환경에 대한 관심의 증가와 건물에서 발생하는 에너지를 절감하기 위한 국제적인 노력에 부합하기 위해 기존 온돌난방배관을 이용한 복사냉방에 관한 연구가 많이 이루어지고 있다. 또한 온돌난방시스템의 경우에도 에너지의 효율적 활용을 위한 최적제어 및 쾌적감을 극대화 할 수 있는 설계 방안들에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 특히 신재생 에너지를 활용한 냉·난방 시스템 개발에 대한 투자도 많아지고 있다.

국외의 경우, 에너지 절감과 쾌적한 실내환경을 조성하기 위한 대안으로 별도의 시스템을 마련하기 보다는 기존의 바닥 구조체에 매설된 파이프에 냉수와 온수를 순환시켜 냉·난방에 이용하는 모세유관 복사 냉·난방시스템

* 주저자, 연세대학교 대학원 석사과정
(withsm0311@nate.com)

** 연세대학교 건축공학과 교수 (tkim@yonsei.ac.kr)

*** 교신저자, 연세대학교 건축공학과 교수
(sbleigh@yonsei.ac.kr)

에 대한 연구가 활성화되어 다양한 방식으로 적용되고 있다. 그러나 국내에 모세유관을 이용한 복사 냉·난방시스템의 적용사례가 매우 드물다.

따라서 본 논문에서는 현장실험을 통해 모세유관 바닥 복사 냉방시스템의 적용 가능성과 동시에 지중열의 이용 가능성을 검토하였고, 건물 에너지성능 해석 시뮬레이션 프로그램인 TRNSYS를 이용하여 기존 온돌배관 시스템의 PB배관과 모세유관 바닥복사 난방시스템의 성능을 비교분석하였다.

2. 모세유관 복사 냉·난방시스템

2.1 모세유관 특성

기존 온돌배관으로 많이 사용되고 있는 X-L, PB배관과 달리 폴리프로필렌(Polypropylene) 재질로 만든 모세유관은 90년대 중반 독일에서 처음 개발되었으며 우리 인체의 동맥과 정맥을 연결하는 그물모양의 가장 가는 모세혈관과 같이 외경 3.4~4.3mm되는 매우 얇은 관의 형태를 하고 있다.(그림1) 인체 내의 병렬로 이어진 모세혈관은 동맥을 통해 공급받은 적혈구가 산소와 영양소를 빠르고 고르게 공급하고 정맥관을 통해 심장으로 되돌려 보내는 기능을 담당하고 있다. 유속도 동맥의 혈류속도와 모세유관의 유속이 유사한 0.05~0.2m/s정도이다. 이처럼 모세유관은 열원으로부터 공급받은 냉·온수를 대상공간에 빠르고 균일하게 공급하는 장점을 가지고 있다.

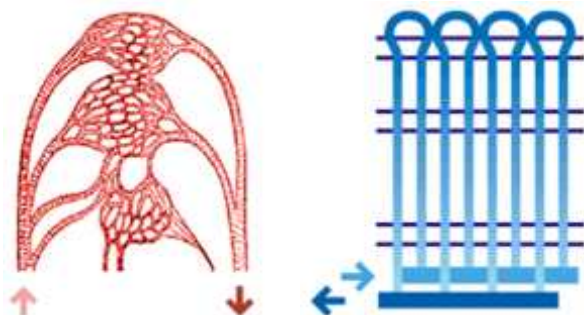


그림 1. Human blood circulation(좌) 과 Capillary tube mat(우)

그림2와 표1과 같이 모세유관은 기존 PB배관에 비하여 배관피치가 조밀하고 병렬로 연결되어 있어 단위 면적당 열교환 표면적이 많으며(그림3) 구조체의 축냉·열에 비교적 짧은 시간이 소요된다.



그림 2. PB배관(좌) 및 모세유관(우) 바닥면 설치

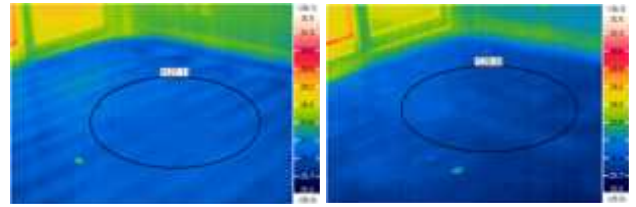


그림 3. PB배관(좌) 및 모세유관(우)을 이용한 냉방시의 바닥온도 (열화상 카메라 사진)

표 1. 시스템 배관 특성

종류	기존온돌시스템	모세유관시스템
배관재질	PB pipe	Polypropylene
배관피치(mm)	200~250	10~30
배관관경(mm)	15~35	3.4~4.3
배관두께(mm)	2	0.55~0.8
열전도율(W/m·℃)	0.38	0.21
연결방식	직렬	병렬

2.2 모세유관 복사 냉·난방시스템 특성

모세유관 시스템은 자연에서 모세관을 통하여 물이 이동하는 원리를 이용하여 개발된 시스템으로 직경이 작은 모세유관에 냉·온수를 순환시키며, 천정이나 바닥 또는 벽에 설치되어 복사 에너지를 통해 열을 전달하는 냉·난방 시스템이다. 이 시스템은 아래와 같은 특징을 가지고 있다.

- 에너지 절약 : 기존의 냉·난방 시스템에 비해 저온수 난방 및 고온수 냉방으로 에너지 절약에 크게 기여한다. 또한 냉매로서 물을 사용하는 모세유관 시스템은 공기식 시스템에 비해 전기 에너지 소비가 약 50% 감소한다.
- 공간확보의 증가 : 모세유관이 바닥이나 천장 등에 설치되므로 거주 공간 내에서 추가적으로 설치되는 기기의 면적이 줄어들어 거주공간을 효과적으로 이용할 수 있다.
- 시스템 응용성 : 건식 바닥난방 시스템으로 활용이 가능하며 습식 난방시에는 기존 PB파이프 시공보다 약 15mm의 몰탈층 두께가 절약될 수 있다.
- 빠른 반응 속도 : 관경이 작아 매설두께가 줄어들 수 있으므로 적정 실내온도에 이르는 시간이 매우 짧으며 기존 시스템과 같은 두께의 바닥 면에서도 훨씬 짧은 시간내에 적정 온도에 이른다.

3. 바닥복사 냉방시스템의 현장실험

3.1 실험대상 공간

연세대학교 송도 국제캠퍼스에 위치한 저에너지 친환경 공동주택 5세대 중 모세유관 바닥복사 냉·난방 시스템이 적용된 세대를 대상으로 실험을 수행하였다.(그림4)



그림 4. 실험대상 건물외관 및 단위세대 평면도

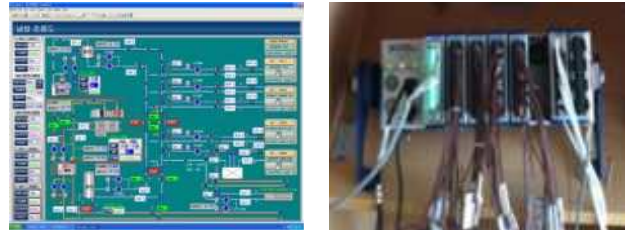


그림 6. 모니터링 시스템 및 cDAQ

3.2 냉방시스템 구성

그림5와 표2와 같이 지열을 열원으로 이용하여 바닥복사 냉방에 필요한 냉수를 20℃의 온도로 일정하게 공급할 수 있도록 설계하였다. 바닥패널에 일정한 유량(5LPM)을 공급하기 위해 2-Way 밸브를 설치하여 순환펌프에 의해 순환되도록 하였다. 제습 시스템은 별도의 제습기를 환기유닛과 통합하여 결로 발생 위험시 제습기가동이 가능하도록 하였다.

표 2. 냉방시스템 특성

분류	장치	비고
열원시스템	지중열교환기	열원(냉수)공급
분배시스템	판형 열교환기	열교환을 통한 세대내 냉수공급
	2-way 밸브	일정유량 공급
터미널유닛	바닥패널	현열부하 제거
	전열교환환기장치 (제습기 통합)	잠열부하제거 (0.4ACH)

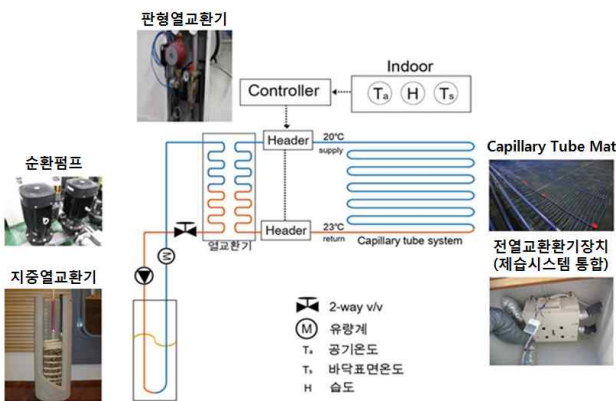


그림 5. 냉방시스템 계통도

3.3 제어 및 계측장치

본 시스템은 LabVIEW 프로그램을 이용하여 설정온도에 제어편차(dead band)를 설정하여 분배기를 on/off 제어하였고, 결로 발생 위험시 제습기가 가동(노점온도+2℃)하여 실내습도를 제어할 수 있도록 구성하였다. 냉수의 공급·환수온도, 외기온 및 습도 등의 기상 데이터는 중앙 감시실의 모니터링 시스템을 통해 확보하였다. 실내온도 및 바닥 표면의 각 부위 온도는 T-type 열전대를 설치하여 측정, cDAQ를 통해 컴퓨터에 저장하였다.(그림 6)

3.4 현장실험 개요

실내 설정온도는 26℃(제어 편차 ± 0.5℃)로 실험기간(8월25일~9월3일)동안 0.4ACH로 환기장치를 가동시켰으며 실험 전 하루동안 자연환기를 실시하여 실험 세대의 안정화를 시켰다.

또한 냉방 지속시간을 측정하기 위하여 냉방 종료 후 2일동안 추가적인 모니터링을 실시하였다.

3.5 현장실험 결과

1) 냉방성능 평가

실험기간동안 설정온도 26℃를 유지하기 위한 바닥 표면온도는 최고 25.4℃, 최저 21.9℃, 평균 23.3℃로 ASHRAE에서 제시한 쾌적 범위를 만족하는 것으로 나타났다.(그림7) 또한 냉방기간동안 총 제습량은 11.2kg으로 바닥온도와 노점온도차를 안전범위로 유지함으로써 실내 잠열부하를 제거함과 동시에 설정실온을 쾌적하게 유지할 수 있는 것으로 나타났다.

실내온도의 범위는 25.2~26.9℃로써 비교적 안정적으로 제어되었고 실험기간동안 평균 25.9℃의 실내온도를 기록하였다. 이는 실험기간동안 모세유관을 이용한 바닥복사냉방이 설정실온을 모두 유지한 것으로 피크부하에 대한 냉방능력이 충분한 것으로 나타났다.

또한 냉방 종료 후에도 축냉된 구조체에 의해 약 36시간(실내온도<26.5℃) 냉방이 지속됨을 확인할 수 있었다.

그림6은 실험기간동안의 열원측과 부하측의 입·출구온도를 나타낸 것이다. 시간이 지날수록 열원측의 온도가 조금씩 상승하였으나 3일 후부터는 열원측의 온도 범위가 공급온도 17.5~19.8℃, 환수온도 19~20.4℃로 나타났다. 평균 온도차는 0.5℃를 보였고, 부하측은 공급온도 19.2~20.6℃, 환수온도 20.3~25.3℃로 평균 20.1℃의 냉수가 세대 내로 일정하게 공급되었다.(그림8)

2) 열적 쾌적성 평가

온열 쾌적성의 평가는 ISO Standard 7330에서 규정하고 있는 PMV 계산식을 사용하였다.

본 연구에서 인체의 신진대사량은 1.0Met, 여름철 의복의 착의량은 0.35clo, 상대습도와 평균 복사온도 등은 실험기간동안의 측정결과를 그대로 사용하였다. 또한 재실자의 열적감각을 보다 쉽게 정량화 할 수 있도록 PPD지표를 통하여 특정지점의 열환경에 대한 사람들의 예상 불만족도를 알아보았다.

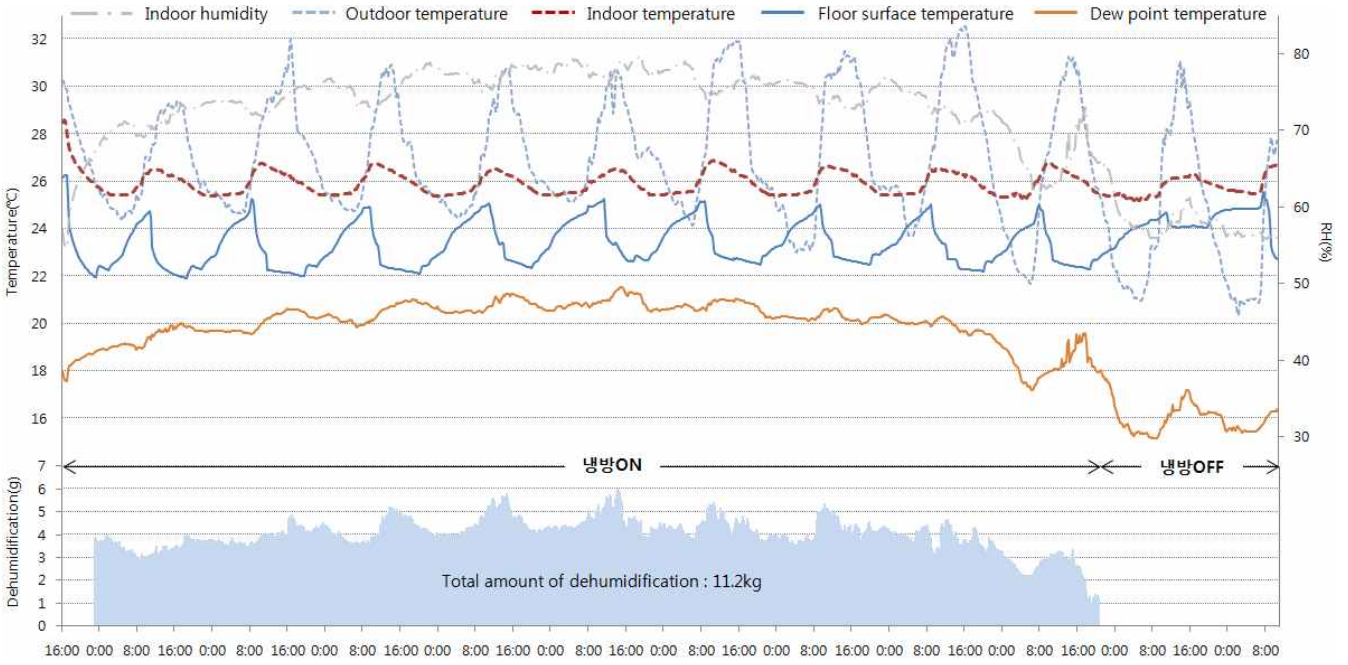


그림 7. 실측데이터

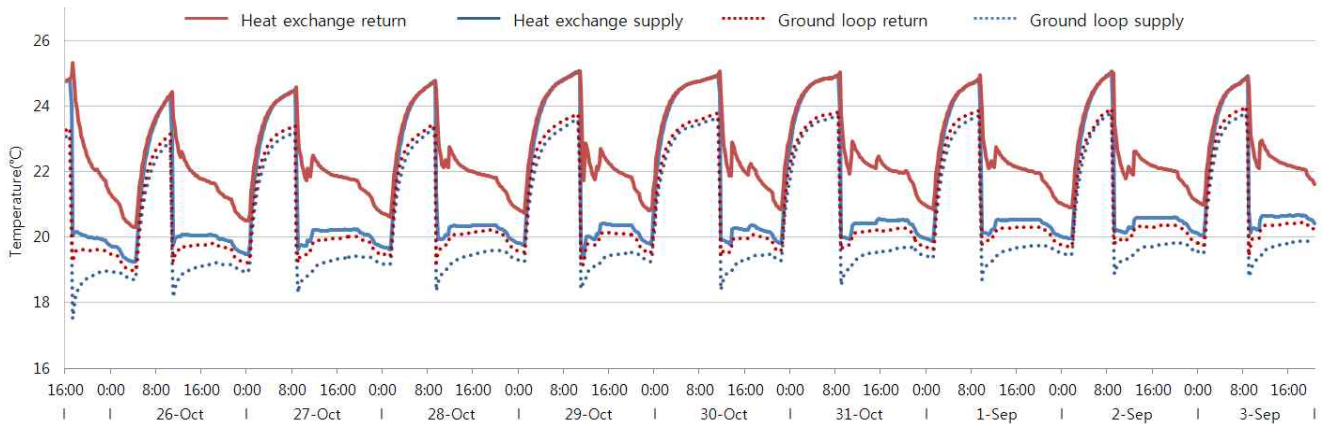


그림 8. 공급온도와 환수온도

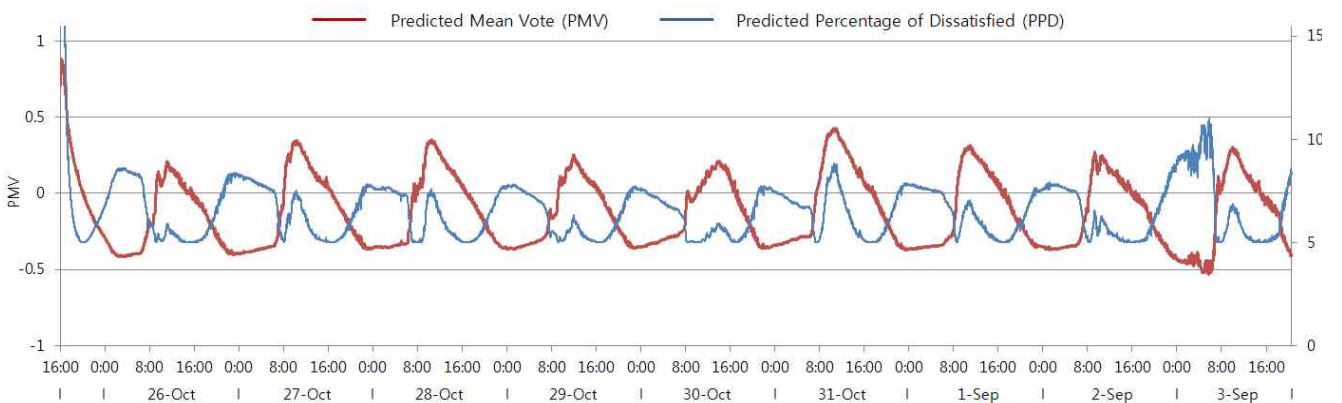


그림 9. PMV와 PPD

그림9는 실험기간동안의 PMV와 PPD를 각각 나타낸 것이다. 평균 PMV는 -0.12, 평균 PPD는 6.46%로 ISO 7730에서 권장하는 쾌적범위 $-0.5 < PMV < 0.5$, $PPD < 10\%$ 에 만족함을 알 수 있었다. 그러나 9월3일 오전 PMV가

-0.52의 값을 나타내면서 PPD 또한 쾌적범위를 조금 벗어난 것을 볼 수 있는데, 이는 구조체의 축냉에 의한 실내온도 저감이 영향을 미친것으로 판단된다.

3) 에너지 성능평가

지열을 이용하여 바닥복사난방을 하는 경우의 에너지 소비량과 시스템 효율을 분석하였다. 실험기간동안 세대 내 난방부하를 제거하기 위해 필요한 열량은 0.7kWh이고 난방을 위해 가동된 순환펌프의 전력사용량은 열원측 550W, 부하측 110W, 제습기 220W로 9일간의 실험기간 동안 소비된 에너지량은 0.1kWh으로 나타났다. 전체 난방 시스템 효율을 분석한 결과 난방COP는 6.2로 국내 주거용 건물에 대부분 설치되어 있는 일반적인 패키지 에어컨의 COP인 3.4~4.4에 비해 상대적으로 높은 시스템 효율을 보였다. 이는 지열만을 열원으로 이용하여 세대내의 열부하를 처리하고 단지 순환펌프에 들어가는 전력만이 소비되었으므로 많은 에너지 절감이 가능한 것으로 판단된다.

4. 바닥복사 난방시스템의 시뮬레이션

실험대상인 저에너지 친환경 공동주택에서 바닥복사 난방 시스템이 적용된 세대는 총2세대로 PB배관과 모세유관이 각각 다른 세대에 설치되어 있다. 그러나 각 세대의 외기·단열 조건을 포함한 설계조건이 다르기 때문에 현장실험을 통한 시스템 배관 종류에 따른 성능비교가 불가능하다. 그러므로 시뮬레이션을 통하여 온돌배관으로 많이 사용하는 PB배관과 모세유관 바닥복사 난방시스템의 성능을 비교분석하였다.

4.1 시뮬레이션 조건

시뮬레이션 대상은 현장실험을 실시한 세대로 재료의 물성치 및 벽체는 실험조건과 동일하게 구성하였다. 난방 열원은 국내 공동주택에서 많이 사용되고 있는 보일러이며, 구체적인 시뮬레이션 입력 데이터 조건은 표3, 4와 같다.

표 3. 시뮬레이션 입력조건

항목	조건		비고	
모델	대상 공간	공조	116㎡	바닥복사 난방시스템 적용 화장실, 입·출구 공간
		비공조	18.9㎡	
	향	동남향		-
Weather data	인천 TMY2		-	
환기횟수	0.7회/h		-	
운전조건	운전방식	연속난방		-
	제어방식	ON/OFF		제어편차±1.0
	유량 (정유량)	5lpm		모세유관
		18lpm		PB배관
실내설정온도	20℃		-	

표 4. 시뮬레이션에 사용된 배관 물성치

배관	배관외경 (mm)	배관관경 (mm)	배관두께 (mm)	열전도율 (kJ/hmK)
PB배관	200	15	2	1.23
모세유관	20	4.3	0.8	0.76

4.2 시뮬레이션 CASE

그림10에 기존 PB배관(모르타르두께 45mm)과 모세유관(모르타르두께 30mm)을 이용한 바닥복사 난방구조체의 단면을 나타내었다. 각각 시스템의 성능을 비교분석하기 위하여 공급온수온도 변화에 따라 총 12개의 CASE (표5)에 대해 시뮬레이션을 진행하였다. 시뮬레이션은 가장 외기조건이 낮은 1월의 조건을 대상으로 수행되었다.

표 5. 시뮬레이션 CASE 분류

CASE	배관	모르타르두께 (mm)	공급온수온도 (℃)
1~6	PB배관	45	25~50
7~12	모세유관	30	

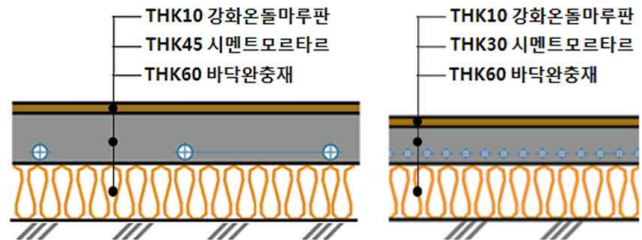


그림 10. PB배관(좌) 및 모세유관(우) 바닥난방 구조체 단면

4.3 시뮬레이션 결과

1) 최적설계 CASE 선정

배관의 특성과 공급온수온도에 따른 시스템의 난방 성능 분석 결과는 다음 표6과 같다.

표 6. 시뮬레이션 결과

CASE	공급온수 온도(℃)	실내온도			바닥온도			
		평균	최대	편차	평균	최대	편차	
P B 배관	1	25	14.5	17.0	1.2	15.7	17.6	1.0
	2	30	16.4	18.3	1.1	17.9	19.4	1.0
	3	35	18.3	20.3	1.2	20.2	21.7	1.1
	4	40	19.7	21.6	0.8	21.8	23.3	0.8
	5	45	20.2	22.1	0.8	22.4	24.1	1.1
	6	50	20.0	21.1	0.8	22.2	24.5	1.3
	7	25	18.1	19.6	0.9	21.7	22.4	0.49
모세유관	8	30	20.1	21.0	0.5	24.4	25.7	1.8
	9	35	20.1	21.0	0.6	24.9	28.3	2.9
	10	40	19.9	21.0	0.6	25.5	30.8	3.4
	11	45	19.9	21.1	0.6	26.1	33.1	3.8
	12	50	19.8	21.1	0.5	26.8	35.1	3.9

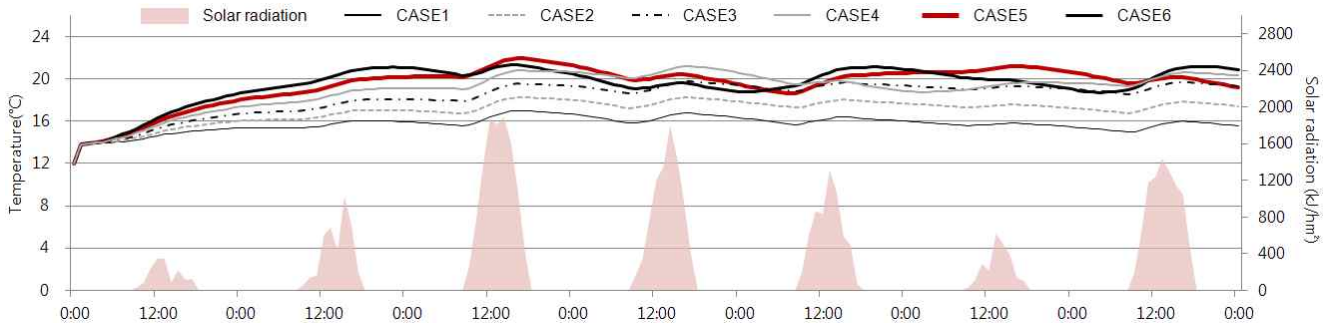


그림 11. PB배관 바닥복사 난방 시뮬레이션 결과 (실내온도)

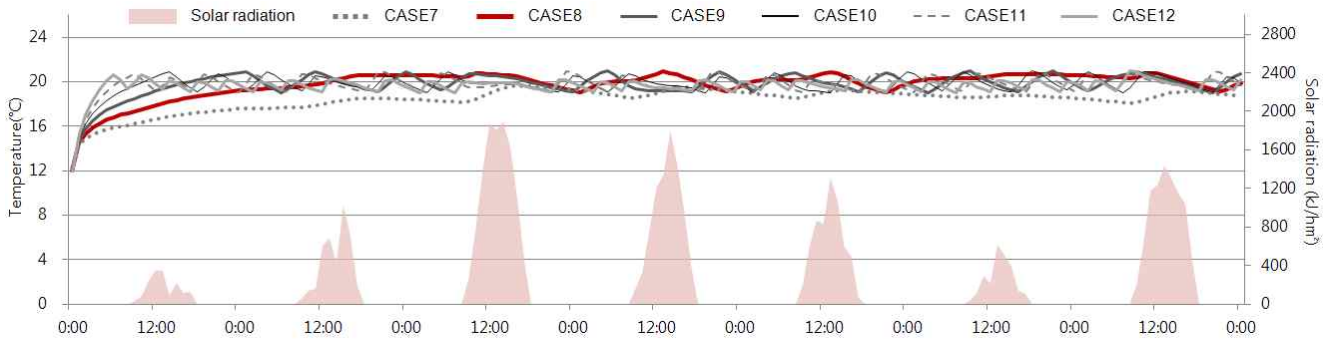


그림 12. 모세유관 바닥복사 난방 시뮬레이션 결과 (실내온도)

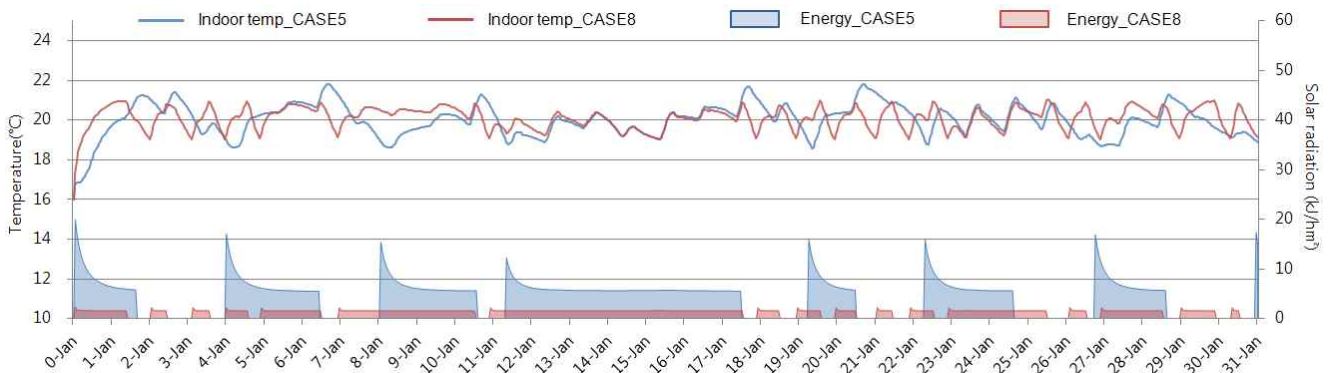


그림 13. PB배관(CASE5) 및 모세유관(CASE8) 시뮬레이션 결과

총12개의 시뮬레이션 CASE 결과(그림11,12) 중에서 공급 온수온도와 온도편차를 고려하여 최적의 설계 CASE를 선정하였다. 에너지 사용량이 상대적으로 적으면서 실온 및 바닥온도를 가장 안정적으로 제어하고 있는 PB배관의 CASE5와 모세유관의 CASE8을 선정하였으며 두 가지 CASE의 난방특성 및 에너지 소비량을 비교분석 하였다.

2) 난방특성 및 에너지 소비량 비교

그림13은 시간경과에 따른 실내온도 및 에너지 소비량을 나타낸 것이다. 실내온도 설정치(20°C) 도달시간은 모세유관(CASE8)의 경우 12시간으로 PB배관(CASE5)의 21시간에 비하여 빠른 것으로 나타났으며 저온의 공급온수 온도에도 불구하고 적은 온도 편차의 안정적인 난방 특성을 나타내었다. 이러한 시뮬레이션 결과에서 알 수 있듯이 모세유관은 기존 PB배관에 비해 저온의 공급온수 로도 충분한 난방성능을 확보할 수 있어 지열시스템 등

의 대체 에너지를 효율적으로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

한 달 동안의 에너지 소비량을 측정된 결과, 모세유관 (CASE8)의 경우 7.7kW/m²월, PB배관(CASE5)의 경우 25.8kW/m²월로 나타났다. 그 이유는 모세유관이 PB배관에 비해 시스템 가동횟수는 빈번하였지만 저온의 온수공급에 따라 시스템의 가동시간이 짧았기 때문에 에너지 소비량에서 큰 차이를 보이는 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 모세유관 바닥복사 냉·난방 시스템을 제안하고, 현장실험과 시뮬레이션을 통해 시스템의 성능을 분석하여 다음과 같은 결과를 도출하였다.

(1) 하절기 실험기간동안 실내평균온도 25.91°C, 바닥평균표면온도 23.29°C로 안정적으로 제어되고 있었으며 결

로 발생 위험구간에서 제습장치가 작동함에 따라 설정 실온 유지 및 결로 제어가 가능한 것으로 나타났다. 실험기간 동안 평균 PMV는 -0.12, 평균 PPD는 6.46%로 쾌적 측면에서도 우수한 것으로 나타났다. 또한 지열을 이용한 바닥복사 냉방시스템의 에너지 소비량은 0.1kWh로 나타나 일반적인 패키지 에어컨에 비해 상대적으로 많은 에너지 절감이 가능한 것으로 판단되었다.

(2) 동절기 시뮬레이션을 통하여 기존 온돌배관 시스템의 PB배관과 모세유관 바닥복사 난방시스템의 성능을 비교 분석한 결과 난방 개시 후 실내온도 설정치(20℃) 도달시간은 모세유관의 경우 12시간으로 PB배관에 비해 빠른 것으로 나타났으며 난방기간 동안 적은 온도 편차의 안정적인 난방 특성을 나타내었다. 또한 배관특성에 따른 바닥복사 난방시스템의 에너지 소비량을 비교 분석한 결과 모세유관 7.7kW/m²월, PB배관 25.8kW/m²월로 모세유관이 PB배관에 비하여 많은 에너지 절감이 가능한 것으로 나타났다.

본 연구를 통하여 모세유관 시스템을 현장에 적용하고 실험을 통해 냉방성능을 검증하였으며, 시뮬레이션을 통해 기존 바닥복사 난방시스템 배관과의 비교분석을 진행하였다. 이를 통해 시스템의 성능뿐 아니라 지열 활용 가능성에 대한 신뢰성을 확보하여 향후 해당 요소기술의 공동주택 적용 활성화를 위한 기술적 기반을 확립했다고 판단된다.

Acknowledgement

본 연구는 국토해양부 첨단도시개발 연구개발사업의 연구비지원(11첨단도시G03)에 의해 수행되었습니다.

본 연구는 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임.

(No. 20120000734)

참고문헌

1. Wilson, A., Radiant floor heating warms up, Architecture Journal, July 124-126, 1989
2. 조동우, 강제식, 공동주택 바닥난방시스템의 성능개선 연구, 한국건설기술연구원 연구보고서, 1995
3. 이주연, The Effect of Water Cooled Floor on Thermal Comfort of the Human Body, 한국생태환경학회지 제7권 제2호, p.21, 2000
4. 조영흠, 공동주택 현장실험을 통한 바닥복사냉방의 성능평가, 2004
5. B. W. Olesen, International standares of the indoor environment, 2004
6. S.B. Leigh, A Study for Evaluating Performance of Radiant Floor Cooling Integrated with Controlled Ventilation, 2005
7. 이영주, 폴리프로필렌 모세유관 냉방시스템의 적용에 관한 실험적 연구, 2005

8. 원종서, 초에너지 절약주택에서 바닥복사냉방시스템의 적용성 평가, 2008
9. 홍희기, 김시환, 온돌 난방에 대한 동적 시뮬레이션, 대한설비공학회, 2009
10. 김진욱, 저에너지 친환경 공동주택에서 모세유관 바닥복사냉방 시스템의 성능평가, 2010

투고(접수)일자: 2012년 6월 14일

수정일자: 2012년 8월 12일

게재확정일자: 2012년 8월 14일