주거건물의 냉방 부하 패턴에 따른 구체축열시스템 운전 방안

Operating Mode of Thermally Activated Building System (TABS) for Residential Buildings According to their Cooling Load Profile

박상훈* 여명석** 유미혜*** 이유지*** 정웅준*** 김광우****
Park, Sang-Hoon Yeo, Myoung-Souk Yoo, Mi-Hye Lee, Yu-Ji Chung, Woong-June Kim, Kwang-Woo

Abstract

Compared to Packaged Terminal Air Conditioning Systems, Radiant Cooling Systems have the advantage of energy saving and thermal comfort. Thermally Activated Building System (TABS) is one of the radiant heating and cooling systems. The main difference between TABS and other radiant systems lies in the usage of the time-lag effect of storing heat energy in the concrete. Current energy usage in summer time is concentrated within a specific time by using Packaged Terminal Air-Conditioner (PTAC). Due to the time-lag effect of TABS, energy usage can be distributed to other time zones. To maximize this effect, it is important to determine the appropriate operating mode, which for TABS is dependent upon the cooling load generated by the occupancy schedule. In this study, occupancy schedules are determined for various residential types. The operating modes of TABS for these residential types are estimated by using a dynamic computational simulation method. The results indicate that the operating modes of TABS can be determined by residential type and occupancy schedule. The load handled ratio by TABS is set up differently according to the cooling load profile obtained from residential type and occupancy schedule. By using TABS, energy consumption could be reduced by 20% compared to PTAC.

Keywords : Residential Buildings, Occupancy Schedule, Cooling Load Profile, Thermally Activated Building System (TABS), Operating Mode

주요어 : 주거건물, 재실 스케줄, 냉방 부하 패턴, 구체축열시스템, 운전 방안

I. 서론

1. 연구의 배경 및 목적

구체축열시스템(Thermally Activated Building System)은 축열을 이용하는 복사냉난방 시스템의 한 종류로서, 빙축열 시스템 등의 타 축열 시스템과는 달리 별도의 축열체 없이 건물의 구조체에 축열 및 방열하는 특징이 있다.

구체축열시스템은 주로 복사열전달을 이용하므로 대류 열전달을 이용하는 대류 공조 시스템에 비해 열전달이 우수하고, 에너지 소비에서 큰 부분을 차지하는 공조 시스템의 팬 동력을 절감할 수 있다. 또한 축열에 의한 시간 지연 효과(Time-lag effect)를 이용하므로 냉방 시 주간 피

크 부하가 동시간대에 발생하는 상황을 방지할 수 있다(Chung et al., 2011).

이러한 구체축열시스템은 유럽 지역을 중심으로 기존의 대류 냉방을 대체 또는 병용 할 수 있는 시스템으로서 점차 연구 및 적용이 늘어나고 있다. 국내의 대표적인 주거 유형인 공동 주택은 에너지 소비에서 큰 부분을 차지하고 있을 뿐 아니라, 냉방 시스템의 대부분을 에어컨에 의존하고 있어서 최대 전력 소비 발생에도 많은 영향을 미친다(Park et al., 2011). 국내에서는 주거건물에 겨울철 온도를 이용한 복사 난방을 보편적으로 사용하고 있음에도 불구하고 아직 복사 냉방은 다소 개념이 생소하며 현재 기초적인 연구가 이루어지고 있는 상태이다. 최근 E대학의 비주거용 건물에 구체축열시스템이 적용된 사례가 있지만 국내 주거 문화 특성 상 아직 주거용 건물을 대상으로 한 적용은 활발하지 않다(Park et al., 2011).

이러한 문제를 해결하기 위하여 주거용 건물에 구체축열시스템을 적용할 수 있으며 이에 관한 선행 기초 연구가 이루어진 바 있다(Chung et al., 2011). 하지만 구체축열시스템은 축열 효과를 이용하므로 시간 지연이 발생하며, 기존의 공조 시스템과는 적용 방법을 달리 할

*정회원(주저자), 서울대학교 대학원 박사과정

**정회원(교신저자), 서울대학교 건축학과 교수, 공학박사

***정회원, 서울대학교 대학원 석사과정

****정회원, 서울대학교 건축학과 교수, 건축학박사

Corresponding Author: Myoung-Souk Yeo, Dept. of Architecture, Seoul Natl. Univ., Sillim9-dong, Gwanak-gu, Seoul, Korea, E-mail: msyeo@snu.ac.kr

이 논문은 2011년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2011-0005295).

필요성이 있다. 또한 공동 주택은 주거용 건물로써 사무용 건물과는 달리 주거 유형에 따라 냉방 부하 패턴이 일정하지 다를 수 있으므로 이에 대한 고려가 반드시 필요하다. 따라서 본 연구에서는 공동 주택을 대상으로 국내의 다양한 거주 유형을 도출하고 그에 따라 부하를 패턴화 하였다. 그 후 거주 유형에 따른 부하 패턴에 대하여 구체축열시스템의 열성능을 분석하여 적절한 운전 방안을 제시하는 것을 목적으로 하였다. 이를 통해 주거용 건물의 부하 패턴에 적합한 구체축열시스템의 적용이 가능할 것이다.

2. 연구의 방법 및 절차

본 연구에서는 주거용 건물의 부하 패턴에 적합한 구체축열시스템 적용 방안을 도출하기 위해 주거용 건물의 부하에 영향을 미치는 요소를 분류하였다. 주거용 건물은 사무용 건물과는 달리 가족 구성원의 재실 스케줄이 불규칙한 부하 패턴에 미치는 영향이 크다. 따라서 Yoo et al.(2010)의 연구를 참고하여 거주 유형을 분류한 뒤 시물레이션을 이용하여 가족 구성원의 재실 스케줄에 따른 부하를 패턴화 하였다. 각각의 부하 패턴에 대하여 구체축열시스템을 적용했을 경우의 열성능을 비교하였으며, 연구의 절차는 다음과 같다.

- (1) 냉방 부하의 구성 요소를 도출 한 후 주거용 건물의 냉방 부하에 큰 영향을 미치는 요소를 결정한다.
- (2) 냉방 부하 구성 요소 중 재실 스케줄에 따른 영향을 판단하기 위해 기존 연구 및 통계 자료를 이용하여 다양한 거주 유형을 도출하고 각 거주 유형의 내부 발열 스케줄을 산정한다.
- (3) 에너지 시물레이션을 이용하여 앞서 산정한 내부 발열 스케줄에 따른 냉방 부하를 산정하고, 통계 자료를 이용하여 현재 주거용 건물에서 냉방 부하를 처리하고 있는 방법을 고찰한다.
- (4) 각 거주 유형의 부하 패턴에 따라 기존 시스템 대비 구체축열시스템의 실온 유지 성능과 에너지 소비량을 비교한다. 이를 바탕으로 주거용 건물에 적합한 구체축열시스템의 운전 방안을 제시한다.

II. 구체축열시스템의 개요 및 적용

1. 구체축열시스템의 concept

국내에서는 주거용 건물에 전통적으로 온돌(On-dol)이라는 복사난방 시스템을 적용하고 있다. 현재 대부분의 국내 공동주택에서 온돌을 이용하여 난방을 하고 있으며, 최근 들어 냉방 시의 쓰임새에 대한 연구가 이루어지고 있는 추세이다.

구체축열시스템은 복사열전달을 이용하는 측면에서 온돌과 유사한 복사난방 시스템이다. 국외의 주거용 건물에 적용된 구체축열시스템은 연중 일정 온도의 물을 순환시켜 상하부 세대의 냉난방 부하를 연중 일정량 절감

Table 1. Configuration of TABS

Classification	Contents
Ondol	- Typical heating system in domestic apartment buildings
Insulation	- Responsible in construction for noise control and heat insulation in domestic apartment buildings - With improved restructuring regulation in future, utilization of TABS may increase
TABS	- Ceiling radiant heating and cooling system by embedding pipes in the concrete slab

Figure 1. Conceptual Section Design of TABS

시키고 있다. 그러나 국내에서는 층간 단열 및 소음 방지로 인한 규제 때문에 구조체 상부에 단열재가 시공되므로 국외 사례와 같은 적용은 제약이 있다. 따라서 국내 상황을 고려하여 선행 연구에서 주거용 구체축열시스템을 제안한 바 있다(Park et al., 2010).

주거용 구체축열시스템은 <Table 1> 및 <Figure 1>과 같이 단열재를 경계로 상부의 온돌층과 하부의 구체축열층(구조체에 배관을 시공)으로 분리된다. 상부 세대의 바닥 난방을 위하여 온돌 시스템을 사용할 수 있으며, 하부 세대의 천장 냉방을 위하여 구체축열시스템을 사용할 수 있다. 이 경우 기존 시스템(에어컨 및 온돌)의 에너지 사용량을 크게 절감시킬 수 있을 뿐 아니라 구조체의 축열 효과로 인하여 여름철 에어컨의 사용으로 인한 최대 전력 소비 발생 시간대를 분산시킬 수 있을 것으로 기대된다.

또한 향후 주거용 건물의 단열 성능이 향상될 경우 별도의 보조 시스템 없이 구체축열시스템을 이용해서 냉난방을 모두 해결할 수 있을 것으로 기대되며, <Figure 2>와 같이 열원을 지열에너지와 같은 신재생 에너지로 대체할 수 있는 가능성이 더욱 커질 것이다.

2. 구체축열시스템의 부하 담당을 산정

주거용 건물에 구체축열시스템을 적용할 경우 구체축열시스템이 처리해야 할 부하 비율인 부하 담당율을 산정해야 한다. Chung et al.(2011)의 연구에서는 부하 담당율 결정 시 다음 <Table 2>와 같이 설계요소, 제어 요소로 구분한 바 있다. 설계요소에 포함되는 설계인자는 2008 ASHRAE Handbook와 EN 1264에서 제시하고 있는 복사 냉난방시스템의 방냉량 산정 방법에서 공통적으로 포함되어 있는 인자를 도출하였다.

도출한 인자는 Park et al.(2010)의 연구를 바탕으로 값을 결정하여, 최종적으로 본 연구에서 주거용 구체축열시스템의 단면을 <Figure 3>과 같이 제안하였다.

Table 2. Considerations in Calculating Load Handled Ratio

Classification	Parameters	Contents
Design	Design parameters	Deriving the common consideration of radiant system design in ASHRAE Handbook and EN 1264
	Supply water temperature	Calculation of correct supply water temperature and water flow rate to achieve the appropriate heat output
	Supply water flow rate	
Control	Starting time of operation	Setting operation period considering the heat output and occupancy schedule
	Operating duration

Figure 2. Schematic Diagram of TABS and PTAC of Residential Buildings

Figure 3. Section Design of TABS

제어요소인 공급수온도와 유량은 냉방부하 출현 빈도수와 밀접한 연관이 있다. 특히 운전시간은 내부 발열 및 재실 스케줄에 따른 부하 패턴과 밀접한 연관이 있으므로, 주거용 건물에 대하여 주거 유형에 따른 부하 패턴을 파악해야 각 부하 패턴에 적합한 구체축열시스템의 부하 담당율을 설정할 수 있을 것이다.

III. 주거건물의 냉방 부하 패턴

1. 주거건물의 냉방 부하 구성 요소

냉방 부하 요소는 외부부하 및 내부부하와 환기부하 및 시스템 부하로 <Table 3>과 같이 구분된다. 부하 구성 요소 중 블라인드의 유무 및 위치에 따라 일사 부하에 따른 냉방 부하가 크게 변할 것이다. 또한 내부 부하에 영향을 큰 영향을 미치는 재실 스케줄은 재실 인원과 숫자에 지배적인 영향을 받는다.

Table 3. Cooling Load Components of Residential Buildings

Load classification	Load types	Contents
External load	Solar	• Heat transfer through the building envelope
		• Window area
Internal load	Occupancy Lighting Equipment	• Blind position (Internal or External)/ shading coefficient
		• Number of occupants and schedule
		• Lighting and equipment capacity and schedule
Ventilation	Intake outdoor air	• Ventilation with and without heat exchanger
System load	Other system	• Fan and pump capacity

2. 세대 구성 비율에 따른 대표 세대 유형

주거용 건물의 불규칙한 냉방 부하에 큰 영향을 미치는 재실 스케줄에 대한 영향을 파악하기 위하여 세대 구성원이 어떻게 이루어졌는지 파악하였다.

National Statistical Office(2010)에서 실시한 서울시 세대 구성별 가구 비율 통계에서는 세대 구성원 별 가구 비율을 나타내고 있다. 통계 자료 분석 결과 1세대로 이루어진 가구부터 4세대 이상으로 이루어진 가구가 차지하는 각각의 비율은 <Table 4>와 같다. 1세대로 이루어진 가구는 부부로 구성된 2인 가구의 비율이 높으며, 세대가 많아질수록 가족 수도 증가한다.

Table 4. Percentage of Households by Household Members

Generation in a household	Family members	Number of family members	Ratio (%)
One generation household	Husband and wife	2	78.0
	Husband and wife+their siblings	3	0.7
	Husband and wife+other relatives	3	1.2
	Owner+siblings	2	13.5
	Owner+other relatives	2	3.7
	Other	-	2.8
	Sub total	-	100
Two generation household	Husband and wife+children	2~5	71.5
	Father+his children	2~4	3.9
	Mother+her children	2~4	15.1
	Husband and wife+their parents	4	0.2
	Husband and wife+their parent	3	0.9
	Husband and wife+their siblings+children	4~6	0.7
	Grandparents+grand children	3~5	0.4
	Grandparent+grand children	2~4	0.6
	Other	-	6.7
	Sub total	-	100.0
Three generation household	Husband and wife+their children+their parents	5~7	12.6
	Husband and wife+their children+their father	4~6	6.3
	Husband and wife+their children+their mother	4~6	40.5
	Other	-	40.6
	Sub total	-	100.0
Four generation household		7	100.0
Other (Single person household)		1	100.0

Table 5. Composition of Residential Type by Number of Household Members

Composition	Number of family members	Age
Individual	One person	20's
Husband and wife	Two people	50's
Parent+children	Three people	10's-50's
Husband and wife+ their children	Four people	10's-50's
Husband and wife+their mother+their children	Five people	10's-60's

위 세대 구성별 가구 비율 통계를 바탕으로 세대 구성원 인원 수 별로 다양한 거주 유형을 도출하였다. 거주 유형은 현대 사회의 다양한 거주 유형이 포함될 수 있도록 하였고, 각 거주 유형의 가족 수를 <Table 5>와 같이 1인에서 5인까지로 가정하였다. 각 거주 유형에서 자녀는 자녀의 숫자와 구성에 따라 다양하게 구성될 수 있지만 본 연구에서는 거주 유형의 다양성을 위해 이들을 아들 1인과 딸 1인으로 가정하였다.

3. 주거용 건물의 거주 유형에 따른 내부 발열 스케줄

한편 Yoo et al.(2010)의 연구 및 National Statistical Office(2009)의 연령별 행위자 평균 시간 통계를 이용하

여 연령별 재실 스케줄을 예측하였다. 통계 자료 분석 결과 주중과 주말 모두 20대의 재실 시간이 가장 짧으며, 60대의 재실 시간이 가장 길다. 1인 세대는 개인 활동 시간의 비율이 높아 재실 시간이 가장 짧다. 주중에는 1인 세대부터 4인 세대까지 모두 오전 10시부터 오후 5시까지 재실이 없으며, 주말에는 오전 12시부터 오후 5시까지 재실이 일어나지 않았다.

그에 비해 5인 이상으로 구성된 세대에서는 60대 구성원의 재실 스케줄로 인해 주중과 주말에 무관하게 일중 대부분 시간에 일정하게 재실이 발생한다. 이를 바탕으로 산정한 가족 구성원 수에 따른 거주 유형 별 재실 스케줄은 <Figure 4>와 같다.

IV. 거주 유형 별 냉방 부하 패턴

1. 시뮬레이션 프로그램 및 경계 조건

구체축열시스템의 축열 효과를 극대화하기 위하여 부하 패턴에 따라 운전 방안을 설정하는 것이 중요하다. Park et al.(2011)의 연구에서 운전 시작 및 지속 시간에 대한 기초 연구가 이루어 졌으며, 이를 바탕으로 부하 패턴에 적합한 운전 방안을 산정하기 위하여 주거 건물의 부하를 앞서 구한 재실 스케줄에 따라 패턴화 하였다. 해석을

Figure 4. Occupancy Schedule by Residential Type (Weekdays and Weekends)

Table 6. Boundary Conditions

Conditions	Contents	Conditions	Contents
Building orientation	South	System	PTAC or PTAC+TABS
Region	Seoul, Korea		TABS
Area	29 m ² (6.6 m×4.4 m)		2 hours before occupancy~end of occupancy
Window	South, Window to wall ratio 75%	System operation	PTAC
Blind	External blind		Start of occupancy~end of occupancy
Set-point temperature	26		
Occupancy schedule	<Figure 4>

Figure 5. Plan of Simulated Main Room

위한 시뮬레이션 툴은 상용 에너지 해석 프로그램인 EnergyPlus를 이용하였으며 입력한 경계 조건은 <Table 6> 및 <Figure 5>와 같다.

2. 주거용 건물의 거주 유형 별 냉방 부하 패턴

주거용 건물의 거주 유형에 따라 냉방 부하 패턴을 구하기 위해 시뮬레이션을 수행하였다. 거주 유형에 따라 가장 큰 차이를 보이는 변수는 재실 스케줄이다. 거주 유

형에 따라 가족 구성원 수와 재실 시간이 달라지며, 이에 따라 내부 발열에 따른 냉방부하가 다르게 일어난다. 각 세대에서 최대 부하가 나타나는 기간을 모두 포함하는 7월 21일부터 7월 27일 까지 시뮬레이션 결과 <Figure 6>과 같이 각 세대의 최대 냉방 부하는 5인 세대에서 약 23 W/m²으로써 최대 냉방 부하가 가장 컸다. 1인 세대와 2인 세대의 경우 재실 시간이 짧고 내부 발열량이 작아서 재실 스케줄에 의한 영향 이외에도 일사의 영향이 냉방 부하를 결정짓는 데 크게 작용했음을 확인할 수 있다.

3. 주거용 건물의 냉방 에너지 소비 형태

앞서 구한 냉방 부하 처리를 위해 <Table 7>과 같이 국내 주거용 건물에서는 패키지형 에어컨을 사용하고 있다. 최근 천장 매립형 에어컨 또는 환기 장치가 보급되고 있지만 아직 설계 단계에서 냉방에 대한 설비적 고려가 이루어지지 않고 있다. 한편 에어컨의 보급 확대와 대형화 추세로 인해 여름철 전력 소비량이 증가하며 특히 주거용 건물의 경우 최대 전력 수요 증가의 주요 원인이 되고 있다.

실제로 에어컨의 사용 기간 및 사용 시간이 매우 단기적임에도 불구하고 연간 전력 사용량은 440 kWh로써, 단 시간에 높은 전력 수요가 발생하고 있다.

Table 7. Method of Cooling and Energy Consumption of Residential Buildings

System	Ratio (%)	Annual operating hours (hr)	Annual energy consumption (kWh)
PTAC	52	255	440
District cooling or central cooling ¹⁾	-	-	-
Other ²⁾	48	-	-

1) District cooling and central cooling system is very uncommon system and it can be ignored because it is minor in statistics

2) Other indicates the individual cooling system without PTAC or no cooling system

Figure 6. Cooling Load Pattern (Family of 1~5)

Figure 7. Cooling Load Pattern (Family of 4)

Table 8. Calculation of Total Energy Handled Ratio by TABS (Family of 4)

Maximum load handled ratio by TABS (%)	Heat output (W/m²)	Supply water temperature (°C)	Condensation	Total energy handled ratio by TABS (%)
30	6.0	24.3	-	-
40	8.0	23.7	-	7.5
50	10.1	23.1	Occurs	-

V. 구체축열시스템 적용을 통한 냉방 부하 처리 방안

1. 냉방 부하 패턴에 따른 부하 담당율 설정

<Figure 7>은 4인 세대의 냉방 부하 패턴이다. 외부 블라인드를 사용하여 일사의 실내 유입을 최소화한 결과 최대 냉방 부하는 약 20 W/m²으로써 일반 공동 주택의 1/2 수준이다. Chung et al.(2011)의 연구와 같이 최대 냉방 부하를 기준으로 결로가 생기지 않는 범위 내에서 구체축열시스템의 최대 부하 대비 부하 담당율(식 (1))을 결정할 수 있다. 최대 부하 대비 부하 담당율이란 구체축열시스템이 담당하는 냉방 부하의 비율을 의미한다. 결로가 발생하지 않는 범위 내에서 구체축열시스템의 부하 담당율을 최대한 높이기 위하여, 부하 담당율을 결로가 발생하지 않는 시점까지 1% 단위로 낮추며 시뮬레이션을 수행하였다. 4인 세대의 경우 <Table 8>과 같이 구체축열시스템이 담당할 수 있는 최대 부하 담당율은 전체 부하의 40%로써 이 경우 총 에너지 소비의 약 7.5%를 처리할 수 있다.

최대 부하 대비 부하 담당율

$$= \frac{\text{구체축열시스템 방냉량}}{\text{구체축열시스템 방냉량} + \text{에어컨 방냉량}} \times 100(\%) \quad (1)$$

거주 유형 별 구체축열시스템의 부하 담당율은 1인 세대의 경우 100%로써 구체축열시스템의 부하 담당율이 가장 높다. 부하 담당율은 가족 구성원 수가 늘어남에 따라 줄어들어 5인 세대의 경우 30%로 줄어든다. 이는 가족 구성원 수 증가에 따라 재실 시간이 증가하여 구체축열시스템의 운전 시간이 길어지므로 부하 담당율이 높을 경우 결로가 발생할 수 있기 때문이다. 이처럼 구체축열시스템의 운전 시간을 길게 설정할 경우 공급수 온도를 높여 부하 담당율을 낮출 필요가 있다. <Table 9>는 거주

Table 9. Occupancy Type and Average Room Temperature during Occupancy Hours by Residential Type

Occupancy type	Maximum cooling load in occupied time (W/m²)	Maximum load handled ratio by TABS (%)	Supply water temperature (°C)	System operating hours (hr)	Average room temperature in occupied space (°C)
Family of 1	16.4	100	21.3	692	25.5
Family of 2	19.4	70	22.1	1,214	25.8
Family of 3	18.7	50	23.3	950	26.0
Family of 4	20.1	40	23.7	1,214	26.0
Family of 5	22.8	30	24.1	1,444	26.0

유형 별 최대 부하 대비 부하 담당율과 경계 조건을 나타낸다.

2. 구체축열시스템 적용 시 시스템 간 열성능 분석

<Figure 8>은 기존 시스템만 사용한 경우와 기존 시스템과 구체축열시스템을 함께 사용한 경우, 최대부하가 발생한 7월 26일을 기준으로 전후 1일 간 총 3일의 실온을 나타낸 그래프이다. 해당 기간의 재실 시간 실온은 에어컨과 구체축열시스템을 함께 사용한 경우, 기존 시스템인 에어컨만 사용한 경우에 비해 다소 낮게 나타났으나 최대 온도 차이는 0.8°C로써 그 차이가 크지 않았다. <Table 10>은 4인 세대의 시뮬레이션 결과인 평균 천장 표면온도, 평균 실온 및 에너지 소비량이다. 에어컨과 구

Figure 8. Room Temperature during Peak Load Days (Family of 4)

Table 10. Thermal Performance of TABS (Family of 4)

Factors	Current system (PTAC)	Current system + TABS (PTAC+TABS)
Average ceiling surface temperature in occupied space (°C)	27.4	26.1
Average room temperature in occupied space (°C)	26.0	26.3
Percentage of room temperature in occupied space (%)	<24°C	0
	24~27°C	99
	27°C<	1
Electricity consumption (Wh)	PTAC	220,857
	TABS	0
	Total	220,857
		178,789

체축열시스템을 동시에 사용한 경우 에어컨만 사용한 경우에 비해 재실 시간 평균 실온이 0.3°C 낮다. 또한 두 경우 모두 쾌적 실온 범위에 해당하는 $24\sim 27^{\circ}\text{C}$ 를 재실 시간 중 99% 만족한다.

에어컨과 구체축열시스템을 동시에 사용한 경우 에어컨 전력소비량은 약 165 kWh로써, 에어컨만 사용했을 경우의 전력소비량인 약 221 kWh 보다 약 25% 작다. 구체축열시스템의 열원을 지열 에너지로 가정하면, 에어컨과 구체축열시스템이 사용한 총 전력 소비량은 약 179 kWh이다. 이 경우 에어컨만 사용한 경우에 비해 약 20%의 에너지 절감 효과를 얻을 수 있다. 한편 천장 복사를 이용하는 구체축열시스템은 에어컨에 비해 천장 표면 온도가 약 1.3°C 이상 낮다. 따라서 향후 평균 복사 온도(Mean Radiant Temperature)를 고려한다면 동일 쾌적 범위를 유지하면서 설정 실온을 높이는 효과를 추가적으로 얻을 수 있다.

3. 구체축열시스템 적용 시 세대 간 열성능 분석

1인 세대부터 5인 세대까지 세대 구성원의 재실 스케줄에 따라 에어컨과 구체축열시스템을 운전하였다. 구체축열시스템은 Park et al.(2011)의 연구를 참고하여 재실이 일어나기 2시간 전에 구체축열시스템의 운전을 시작하였으며, 에어컨은 재실 시간에만 운전하였다. 1인 세대의 경우 최대 냉방 부하가 작아 구체축열시스템의 부하 담당율을 높일 수 있다. 재실 시간 또한 짧으므로 구체축열시스템의 운전 시간도 692시간으로 가장 짧다. 5인 세대의 경우 조모(60대)의 재실 시간이 길어서 구체축열시스템의 운전 시간도 1,444시간으로 설정되었다. 이는 총 시뮬레이션 시간인 7월 1일부터 8월 31일 까지 1,490시간의 약 97%로써 냉방 기간의 대부분의 시간 동안 시스템을 운전한 것이다. 거주 유형 별 시뮬레이션 결과는 <Table 11>과 같다.

<Figure 9>는 최대 냉방 부하가 발생하는 기간의 실내 온도 그래프이다. 시스템을 운전하지 않는 비 재실 시간에는 실내 온도가 30°C 에 근접할 정도로 올라가지만, 재실 시간에는 쾌적 범위를 만족시킬 수 있다. 3인 세대는 최대 부하가 발생하는 시간에 재실 인원이 없으므로

Table 11. Thermal Performance of TABS (Family of 1 to 5)

Parameters	Occupancy type				
	Family of 1	Family of 2	Family of 3	Family of 4	Family of 5
Maximum load handled ratio by TABS (%)	100	70	50	40	30
Operation hour of TABS (hr)	692	1,214	950	1,214	1,444
Average room temperature in occupied space ($^{\circ}\text{C}$)	25.5	25.8	26.0	26.0	26.0
Percentage of room temperature in occupied space (%)	< 24°C	2.6	0.1	0.0	0.0
	$24\sim 27^{\circ}\text{C}$	97.2	99.8	99.8	100.0
	$27^{\circ}\text{C}<$	0.2	0.1	0.2	0.1
Energy consumption (kWh)	PTAC	23.5	78.5	115.1	165.2
	TABS	15.7	22.6	12.2	13.5
	Total	39.3	101.1	127.3	178.8

로 시스템을 운전하지 않았다. 따라서 비 재실 시간의 실내 온도가 다소 높지만 시스템을 운전하는 시간에는 쾌적 온도 범위를 만족한다.

1인 세대부터 5인 세대까지 모든 세대에서 구체축열시스템 적용 시 최대 냉방 부하 발생하는 기간에 최고 실내 온도가 30°C 를 넘지 않음을 알 수 있다. 또한 재실 시간 중 평균 실내 온도는 약 $25.5\sim 26^{\circ}\text{C}$ 로써 쾌적 범위를 만족시킬 수 있다.

전체 냉방 기간 중 재실 시간의 쾌적 실내 온도 만족 비율은 약 97% 이상이다. 특히 쾌적 범위를 초과하여 벗어나더라도 온도 상승폭이 크지 않고 시간이 짧아 재실자가 실제로 불편을 느끼는 시간은 매우 짧을 것으로 예상된다.

1인 세대는 짧은 재실 시간으로 인해 구체축열시스템의 부하 담당율이 높고 운전 시간은 짧다. 이 경우 총 에너지 소비량은 39.3 kWh이고, 구체축열시스템의 에너지 소비량은 15.7 kWh이다. 5인 세대는 긴 재실 시간으로 인해 구체축열시스템의 부하 담당율이 낮다. 따라서 에어컨의 사용량이 많아지고 에어컨의 에너지 소비량 역시 큰 폭으로 늘어나게 된다(<Figure 10>). 이 경우 구체축열시스템의 에너지 소비량이 13.7 kWh로써 1인 세대에 비해 줄어들었지만 에어컨의 에너지 소비량은 255.6 kWh로, 긴

Figure 9. Room Temperature during Peak Load Days (Family of 1~5)

Figure 10. Energy Consumption of PTAC and TABS (Family of 1~5)

재실 시간 동안 실온 유지를 위해 많은 양의 에너지가 소비되었음을 알 수 있다.

VI. 결 론

본 연구에서는 거주 유형을 분류한 뒤 에너지 시뮬레이션에 이용하여 가족 구성원의 재실 스케줄에 따른 부하를 패턴화 하였다. 각 부하 패턴에 대하여 구체축열시스템을 적용했을 경우의 열성능을 비교하였다. 본 연구의 결론은 다음과 같다.

1) 거주 유형에 따른 가족 구성원의 재실 스케줄에 따라 부하 패턴이 달라진다. 구체축열시스템을 설계할 경우 각 거주 유형에 따른 최대 부하를 기준으로 설계한다. 이 경우 각 거주 유형의 최대 부하와 재실 스케줄을 고려하여 재실 시간 중 불쾌적이 일어나지 않도록 시스템의 운전 스케줄을 설정해야 한다.

2) 거주 유형에 따라 1인 세대에서 5인 세대까지 시스템의 운전 스케줄을 다르게 설정할 수 있으며, 그에 따른 구체축열시스템의 부하 담당율이 달라진다. 1인 세대의 경우 재실 시간이 짧으며, 그에 따른 시스템 운전 시간도 짧다. 따라서 구체축열시스템의 부하 담당율을 높게 설정할 수 있다.

3) 5인 세대의 경우 60대(조모)의 긴 재실 시간에 대한 고려가 필요하며, 긴 운전 시간에 따른 과냉과 결로를 방지할 수 있도록 낮은 부하 담당율로 긴 시간 동안 운전이 가능한 구체축열시스템을 설계해야 한다. 이 경우 구체축열시스템은 전체 냉방 부하의 약 10% 정도만 담당한다. 구체축열시스템의 부하 담당율이 낮으므로 에어컨의 전력 소비량이 크게 늘어난다.

4) 4인 세대에 구체축열시스템을 적용할 경우 최대 냉방 부하의 약 40%의 부하 담당율로 설계하는 것이 가능하며, 이 경우 전력 소비량은 약 179 kWh이다. 기존 시스템인 에어컨만 사용한 경우에 비해 약 20%의 에너지 절감 효과를 얻을 수 있다. 이는 에어컨의 팬 동력을 복사시스템을 함께 사용함으로써 절감할 수 있기 때문이다.

5) 본 연구에서 설정한 거주 유형인 1인 세대부터 5인 세대까지 모든 세대에서 구체축열시스템 적용 시 최대 냉방 부하 발생일을 전후로 최고 실내 온도가 30°C를 넘지

않았다. 또한 재실 시간 중 평균 실내 온도는 약 25.5~26°C로써 재실 시간 중 약 97% 이상의 비율로 쾌적 범위를 만족시킨다. 27°C 이상 온도가 상승하는 시간은 재실 시간의 약 0.2%에 불과하다.

6) 구체축열시스템과 에어컨을 함께 사용할 경우 재실 스케줄에 따른 냉방 부하 패턴을 고려해야 한다. 가족 구성원 수가 적을 경우 구체축열시스템을 높은 부하담당율로 단시간 운전할 수 있다. 반대로 가족 구성원 수가 많고 재실 시간이 긴 가족 구성원이 있는 경우, 구체축열시스템을 낮은 부하담당율로 장시간 운전해야 한다.

향후 보다 정밀한 구체축열시스템의 제어 방법에 대한 연구를 통해 에어컨의 사용 시간을 더욱 줄일 수 있다. 또한 제습 시스템과 연동하여 구체축열시스템의 부하 담당율을 더욱 높일 수 있는 방안에 대한 연구가 진행 중이다.

REFERENCES

- ASHRAE (2008). ASHRAE Handbook HVAC Systems and Equipment, 2008.
- Babiak, J., Olesen, B. W., & Petráš, D. (2007). *Low temperature heating and high temperature cooling*. Rehva.
- CEN (2009). EN 1264 Heating system in buildings, CEN.
- Chung, W. et al. (2011). Feasibility of a thermally activated building system in residential buildings. *ISES Solar World Congress 2011*, Kassel.
- ISO 7730: *Ergonomics of the thermal environment - Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria*. (2005).
- National Statistical Office (2010). *Ordinary households and household members by generations in household*.
- National Statistical Office (2009). *Participation average time spent on activities by age group*.
- Park, S. et al. (2011). Operation mode of a thermally activated building system according to the starting time and the operating hours in residential building. *ISES Solar World Congress 2011*, Kassel.
- Park, S., Kim, I., Koo, S., Yeo, M., & Kim, K. (2010). The effect on the heat output by combination of design factors of thermally activated building system (TABS). *Journal of the Korean Institute of Architectural Sustainable Environment and Building System*, 4(3), 180-186.
- Yoo, M. et al. (2011). Evaluation on energy performance of thermally activated building system (TABS) in residential building. *Proceeding of Autumn Annual Conference of the Architectural Institute of Korea, Planning & Design*, 31(2), 399-400.
- Yoo, J. et al. (2010). Method for estimating electricity consumption of residential sectors by national time use survey. *Proceeding of Autumn Annual Conference of the Architectural Institute of Korea, Planning & Design*, 30(1), 501-502.

접수일(2012. 2. 1)

수정일(1차: 2012. 3. 9, 2차: 2012. 3. 29)

게재확정일자(2012. 4. 3)