

가압식 바닥공조 시스템과 야간 외기냉방의 병용에 따른 에너지저감 성능에 관한 연구

윤성훈[†]

남서울대학교 건축공학과, 부교수

A Study on Energy Saving Performance by Night Purge Cooling with Pressurized Under Floor Air Distribution System

Yoon Seong-Hoon[†]

Associate professor, Department of Architectural Engineering, Namseoul University

[†]Corresponding author: aquila@nsu.ac.kr

Abstract

It has been reported about the energy saving performance of UFAD(under floor air distribution) system and NPC(night purge cooling) system respectively which are applied for commercial buildings. However, when two systems are used at the same time, the effect of heat transfer from floor plenum to slab may vary depending on the operating conditions of NPC. In this study, cooling energy demands were analyzed for building models with UFAD and NPC by using TRNSYS 17 program. UFAD was applied as a cooling system of the base building model, and the cooling energy demands were compared for 64 cases in which the operating time, supply airflow rate, and outdoor air temperature(T_o) of NPC. As a result, it was confirmed that the cooling energy demands were reduced to 30 ~ 80% level compared to UFAD alone, and in particular, the energy demand was reduced in proportion to the supply airflow rate or the operating time while T_o was 16 ~ 20°C. However, when T_o was 22°C, the increase in the supply airflow rate or the operating time results in a disadvantage in terms of cooling energy demands. In addition, the cooling energy demands for UFAD+NPC model were analyzed by applying weather data from three regions with different average outdoor air temperatures. As a result, the cooling energy demand of operating NPC only when T_o was below 20°C was reduced by 27% compared to that of operating NPC continuously for 8 hours.

Keywords: 바닥공조시스템(UFAD ; Under floor air distribution system), 야간외기냉방(NPC ; Night purge cooling), 천장공조시스템(CBAD ; Ceiling based air distribution system), 에너지 요구량(Energy demand)

1. 서론

상업용 건축물의 대표적인 냉난방 에너지저감 기술 가운데 하나인 바닥공조(Under Floor Air Distribution, 이하 UFAD) 시스템은 재실자가 점유하는 거주역 공간을 중심으



Journal of the Korean Solar Energy Society
Vol.40, No.1, pp.25-33, February 2020
<https://doi.org/10.7836/kjes.2020.40.1.025>

pISSN: 1598-6411

eISSN: 2508-3562

Received: 23 October 2019

Revised: 14 January 2020

Accepted: 14 February 2020

Copyright © Korean Solar Energy Society

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution NonCommercial License which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

로 냉난방을 실시함으로써, 모든 실내공간을 냉난방하는 천장공조(Ceiling Based Air Distribution, 이하 CBAD) 시스템에 비해 에너지성능 및 쾌적성 측면에서 유리한 기술로 평가되고 있다. UFAD의 에너지성능과 관련하여, Ali Alajmi 등¹⁾은 천장고가 높고 급기온도가 낮은 조건에서 UFAD가 CBAD에 비해 에너지성능이 전반적으로 유리하다는 결과를 제시하였으며, 필자 등의 선행연구²⁾에서는 동일한 실내발열 조건에서 UFAD를 적용할 경우 CBAD 대비 급기풍량이 감소하여 약 10 ~ 15%의 냉방에너지를 저감할 수 있음을 확인한 바 있다. UFAD는 급기 경로로 이중바닥 구조의 플레넘을 이용하게 되는데, 급기 덕트나 FTU (fan terminal unit)를 사용하지 않는 가압식 UFAD의 경우 공사비가 저렴한 반면 급기구의 위치에 따른 토출온도의 편차가 커질 수 있어 ASHRAE3)에서는 급기 경로에서의 열손실을 최소화할 수 있도록 슬래브 상부의 단열조치를 권장하고 있다.

한편, 야간 외기냉방(Night Purge Cooling, 이하 NPC) 시스템은 야간에 외기를 도입하여 실내공기와 치환하거나 구조체의 축냉효과를 이용하는 냉방 에너지저감 기술이다. Katsuhiko Miura 등⁴⁾은 NPC를 포함하여 자연환기를 실시한 초고층 건물의 공조부하 및 실내환경에 관한 연구에서 자연환기의 효과로 슬래브의 평균 온도가 0.5°C 낮아졌으며, 연간 약 21%의 냉방부하 저감효과를 얻을 수 있음을 확인하였다. 정재훈 등⁵⁾은 천장 취출식 슬래브 축열 공조시스템에서 슬래브의 축열량에 대한 급기온도, 급기풍량, 축열시간 등의 영향도 분석을 통하여 적정 축열시간의 판단기준을 제시하였으며, 김수연 등⁶⁾은 전열교환형 환기장치를 이용한 NPC 운용 시의 적정 가동시간과 제어조건을 제시한 바 있다.

이상과 같이 UFAD 또는 NPC를 단독으로 운용하는 경우의 에너지저감 성능에 대해서는 다양한 연구가 이루어져 왔으나, UFAD와 NPC를 동시에 적용하는 공조방식에 대해서는 추가적인 검토가 필요하다고 사료된다. 특히, NPC의 운용조건에 따라 UFAD의 슬래브에 작용하는 축냉효과가 달라질 수 있기 때문에, NPC의 가동시간 및 급기풍량, 지역의 기후조건 등을 고려한 종합적인 검토가 이루어져야 한다. 이에 본 연구에서는 UFAD와 NPC를 병용함에 있어 NPC의 운용조건에 따른 냉방 에너지저감 성능을 분석함으로써 보다 효과적인 설계 및 운용을 위한 기초 자료를 제시하고자 한다.

2. 연구의 범위 및 방법

본 연구에서는 사무용 건물에 UFAD와 NPC를 동시에 도입할 경우 냉방 에너지요구량을 최소화하기 위한 통합 설계조건으로서 NPC의 운용조건이 에너지요구량에 미치는 영향을 중심으로 분석을 실시하였다. 슬래브의 축열성능을 고려하기 위해 비정상 전열해석이 가능한 TRNSYS 17을 이용하였으며, 사무실 및 플레넘의 환기량 산출을 위해 TRNFlow를 이용한 환기경로 모델을 반영하였다.

2.1 대상 건물의 모델링

Fig. 1, Tables 1, 2는 대상 공간 및 공조방식의 개요를 나타내는 것으로, 부하 패턴이 일정한 사무실 내주부의

일부를 분석대상으로 설정하고, 외주부의 부하는 별도의 설비에 의해 처리된 것으로 가정하였다. 건물의 공조 방식은 바닥 플레넘으로 공급된 급기가 사무실 바닥에 설치된 급기 디퓨저를 거쳐 실내로 공급된 후에 천장의 배기 디퓨저를 통해 공조기로 리턴되는 가압식 UFAD로 구성하였다. 단, NPC를 가동하는 경우에는 열원설비를 가동하지 않고 급기팬만 가동하여 바닥 플레넘에 외기를 직접 공급하였다. 한편, 바닥 플레넘은 입구측부터 출구측까지 기류의 이동에 따른 온도변화를 모사하기 위해 기류의 흐름 방향을 따라 6개의 서브존으로 분할하였으며, 사무실 공간도 수직 및 수평 방향을 각각 6개로 분할하여 총 36개의 서브존으로 구성하였다. 또한 바닥 플레넘의 서브존 중앙에는 각각 1개씩 총 6개의 급기 디퓨저를 적용하였고, 사무실 공간의 최상단 서브존 2곳에는 배기 디퓨저를 적용하여 배기 덕트와 연결하였다. 모든 서브존 간의 경계면은 열저항이 없고 기류 이동이 자유롭게 설정하였으며, 분석대상 공간의 외곽 경계면은 단열조건으로 설정하였다. 사무실의 인체 및 기기의 발열량과 사용시간, 냉방 설정온도 및 가동시간은 「건축물의 에너지효율등급인증제도 운영규정」에 제시된 대규모 사무실의 표준 용도프로필을 참고하였으며, 조명 밀도는 20 W/m^2 로 적용하였다. UFAD 모델링 방법론의 적절성과 관련해서는 선행연구⁷⁾에서 실측데이터와의 비교를 통해 검증한 바가 있어 본고에서는 생략하였다.

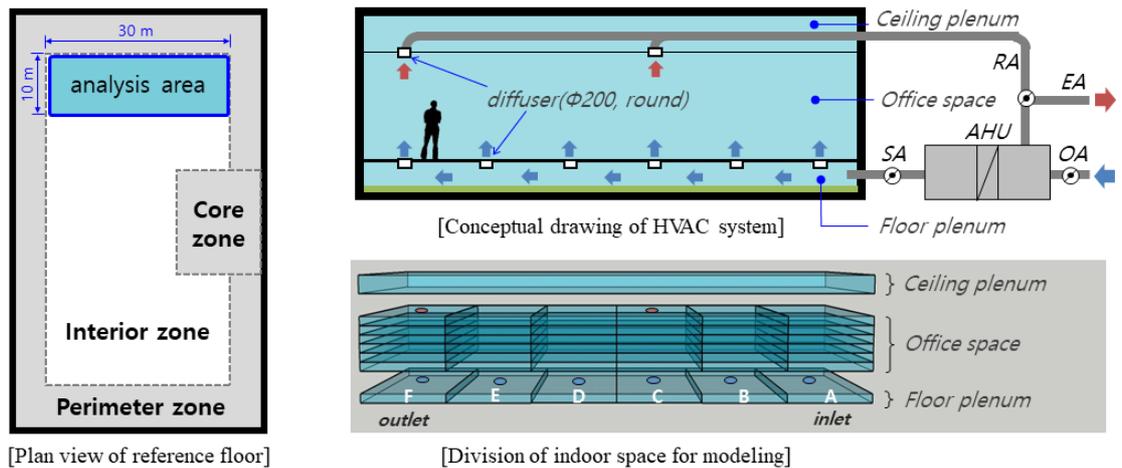


Fig. 1 Conceptual drawings of analysis area and HVAC system of building

Table 1. Sizes of analysis area, heat gain and cooling condition

Size of analysis area		Heat gain		Cooling condition	
Floor area :	300 m ²	People :	10 W/m ²	Set temperature :	26°C
Height	Ceiling plenum :	Equipment :	25 W/m ²	Operating time :	07:00 ~ 18:00
	Office space :			2.4 m	Airflow rate :
	Floor plenum :	0.4 m	Lighting :	20 W/m ²	SA Temperature :
				Abs. humidity :	0.008 kg/kg

Table 2. Thermal specification

	Thickness [mm]	Thermal resistance [m ² K/W]	Thermal capacitance [kW/K]	Convective heat transfer coefficient [W/m ² K]	
ceiling	24	0.353	1.3	office side (ceiling & floor surface)	5.6
floor	46	0.545	2.8		
slab	150	4.726	21.9		
virtual wall	-	0.0001	0.0	floor plenum side (floor & slab surface)	27.8

2.2 시뮬레이션 조건

Table 3은 NPC의 운용조건에 변화를 준 시뮬레이션 조건을 나타내는 것으로, 가동시간(축열시간), 급기풍량, 외기온도의 3가지 항목별로 각각 4가지의 다른 조건을 조합하여 64 Case를 설정하였고, 에너지성능의 비교를 위해 NPC를 실시하지 않고 UFAD만 적용한 추가 모델까지 총 65 Case에 대한 시뮬레이션을 실시하였다. 여기서 외기온도와 관련해서는, 가동시간 및 급기풍량과의 상관관계를 명확하게 확인하기 위해 실제 기상데이터 대신 일정한 온도(16, 18, 20, 22°C) 조건으로 설정하였다. 전체 계산기간은 1개월, time step은 30분 간격으로 설정하였다.

Table 3. Operation conditions of Night Purge Cooling

Operating time		Airflow rate of Supply Fan	OA temperature
2 hours	(05:00 ~ 07:00)	1 ACH (720 m ³ /h)	22°C (T22)
4 hours	(03:00 ~ 07:00)	2 ACH (1,440 m ³ /h)	20°C (T20)
6 hours	(01:00 ~ 07:00)	3 ACH (2,160 m ³ /h)	18°C (T18)
8 hours	(23:00 ~ 07:00)	4 ACH (2,880 m ³ /h)	16°C (T16)

3. 결과 분석

3.1 실내 온도 분포

Fig. 2는 6시간 동안 3 ACH로 NPC를 가동하고, 외기온도를 18°C로 적용한 모델에 대한 오후 2시 및 오전 6시의 바닥 플레넘 및 사무실 공간의 온도분포를 나타낸다. 냉방 가동 중인 오후 2시의 바닥 플레넘과 사무실 공간의 평균 온도는 각각 19.3°C, 26°C로, 플레넘의 온도가 사무실 공간에 비해 평균 6.7°C 낮게 형성되었다. 바닥 플레넘의 입구측(A열)에서 출구측(F열)까지의 평균 온도 상승률은 0.2 [°C/m]로, 이는 ASHRAE의 UFAD 설계가이드에 제시된 플레넘 길이에 따른 온도 상승률 0.1 ~ 0.3 [°C/m]에 부합한다. 사무실 공간에서는 바닥 플레넘의 입구측에 가까운 지점에서 약간의 온도 성층화가 나타났으나, 거주역에서의 수직 온도 편차는 최대 1.5°C 정도로 크지 않았다. 한편, 냉방 가동을 중단하고 NPC가 가동 중인 오전 6시의 바닥 플레넘과 사무실 공간

의 평균 온도는 각각 19.7°C, 20°C로, 바닥 플레넘의 온도는 주간과 큰 차이가 없었으나 사무실 공간의 경우 야간에는 내부발열이 없어 주간에 비해 약 6°C 낮아졌다.

Fig. 3은 UFAD 및 UFAD+NPC를 적용한 건물 모델에 대해 사무실의 중심부(C열, 바닥에서 1.4 m 높이)에서의 48시간 동안의 온도 변화를 비교한 것으로, 여기에 제시한 UFAD+NPC의 NPC 가동조건은 앞서 Fig. 2에서 검토한 모델과 동일하다. 사무실 공간의 경우 두 가지 공조방식 모두 전체적으로 냉방 설정온도를 유지하였으나, 실내 발열이 적용되기 시작하는 09시부터 2시간 정도는 NPC를 가동하는 모델에서 0.5 ~ 0.9°C 정도 온도가 낮게 형성되었다. 또한, 바닥 플레넘의 경우 NPC를 가동하는 모델이 UFAD 단독 모델에 비해 NPC 가동 중에는 0.8 ~ 1.5°C, 냉방 가동 중에는 0.3 ~ 1.1°C 낮은 온도를 형성하였다. 즉, NPC 가동에 따른 슬래브의 축냉으로 인해 바닥 플레넘의 온도가 상대적으로 낮게 유지되었고, 이는 사무실의 냉방 에너지요구량을 저감하는데 기여하였을 것으로 추정할 수 있다.

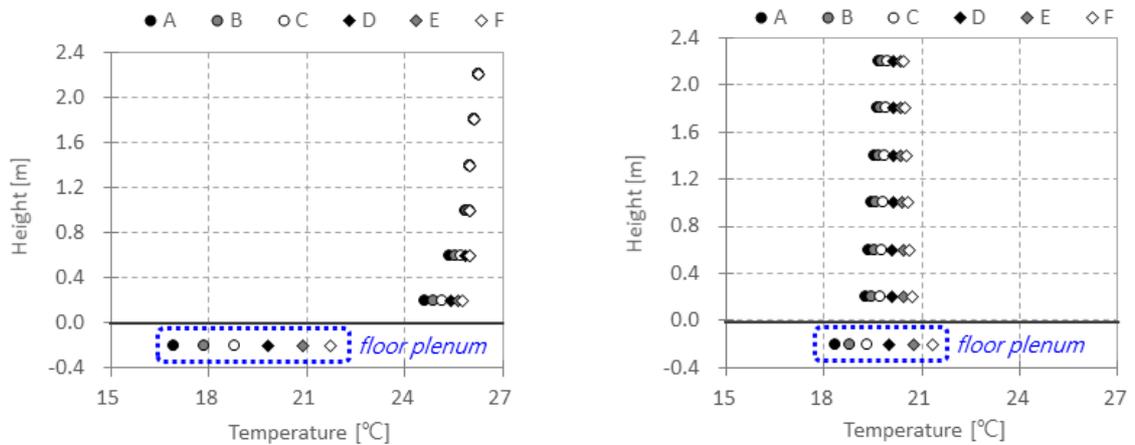


Fig. 2 Vertical temperature distribution (left : 2PM, right : 6AM)

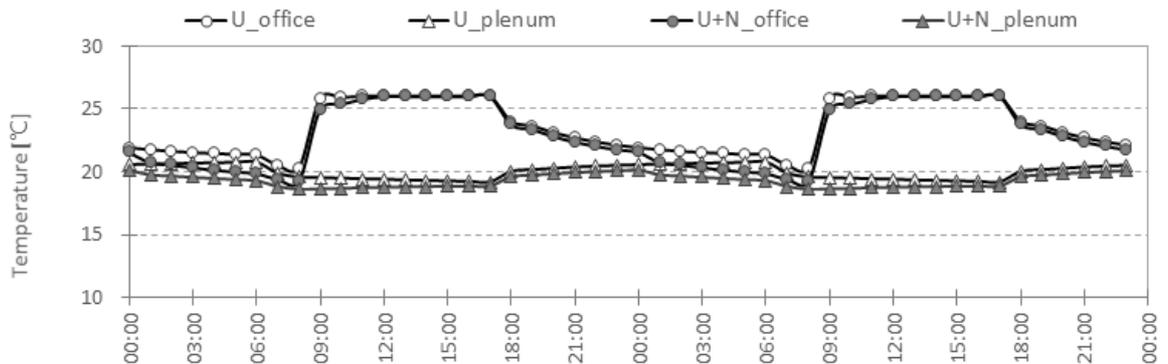


Fig. 3 Temperature variation during 48 hours

3.2 냉방 에너지요구량

Fig. 4는 NPC 가동시간별로 급기풍량의 변화에 따른 계산기간 동안의 냉방 에너지요구량 합계를 나타낸다. 외기온도를 22°C로 적용한 조건(T22)을 제외하면 급기풍량이 증가할수록 에너지요구량이 감소하였으며, NPC 가동시간이 늘어날수록 급기풍량 및 외기온도의 변화에 따른 냉방 에너지요구량의 편차가 커지는 경향을 보였다. 한편, NPC를 가동하지 않은 UFAD 모델의 에너지요구량 합계는 1,196 kWh로, NPC 가동을 통해 UFAD 대비 약 30 ~ 80%의 수준으로 에너지요구량이 감소하였다.

Fig. 5는 외기온도 조건별로 NPC 가동시간에 따른 냉방 에너지요구량의 변화를 나타낸다. 외기온도 16 ~ 20°C 조건에서는 가동시간이 늘어날수록 에너지요구량이 감소하였으나, 외기온도 22°C 조건(그림 d)에서는 가동시간이 늘어남에 따라 오히려 에너지요구량이 증가하는 결과가 나타났다.

이상의 결과를 통해 야간의 평균 외기온도가 20°C 이하로 유지되는 조건에서는 NPC의 가동시간이나 급기풍량을 증가시킴으로써 냉방 에너지요구량을 감소시킬 수 있으나, 외기온도가 일정 수준 이상으로 높아질 경우 NPC를 가동하지 않는 것이 에너지성능 측면에서 오히려 유리함을 알 수 있다. 따라서 UFAD와 NPC를 병용할 경우 NPC의 가동조건은 외기온도를 기반으로 결정하는 것이 바람직하다고 사료된다.

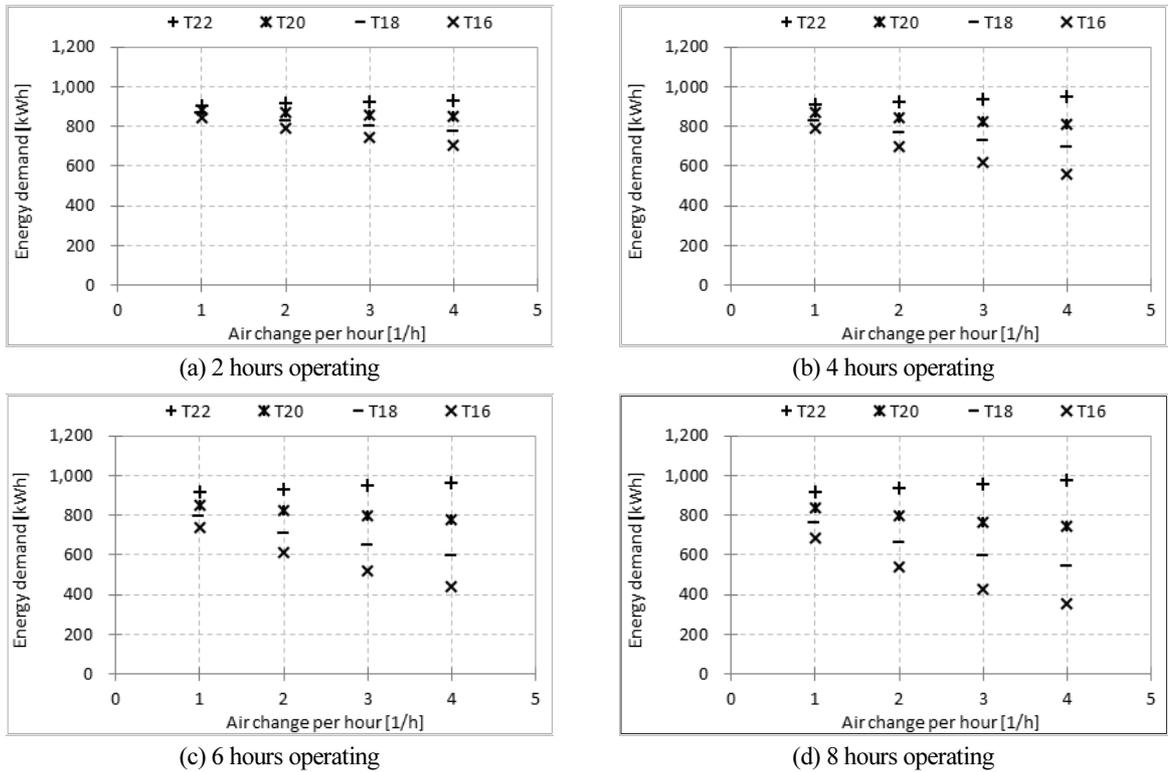


Fig. 4 Relationship between the airflow rate of supply fan and cooling energy demand

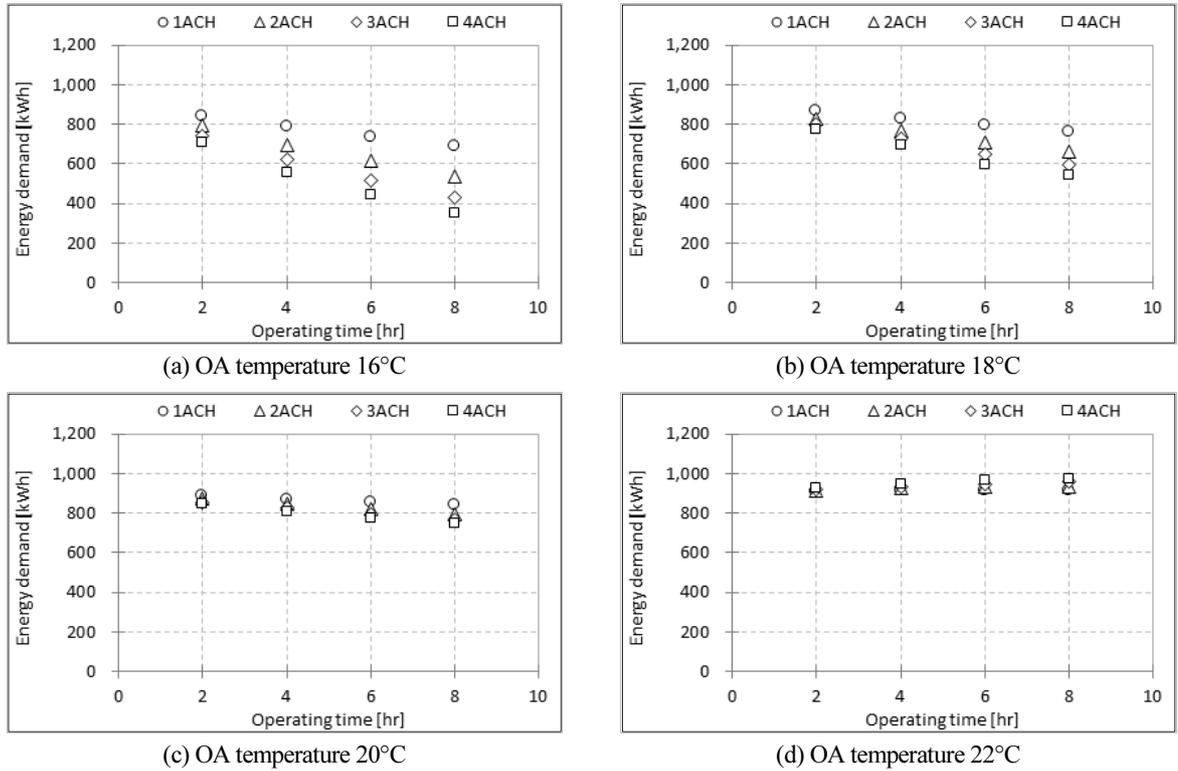


Fig. 5 Relationship between the operating time of NPC and cooling energy demand

전술한 Figs. 4, 5의 결과는 야간의 외기온도가 일정하다는 가정 하에서 산출된 것으로, 실제 기상데이터를 적용한 조건에서의 NPC 적용효과에 대한 추가 검토를 실시하였다. 비교를 위해 UFAD를 단독으로 적용한 조건 (Case A), 스케줄 제어에 의해 8시간 동안 일정하게 NPC를 가동하는 조건(Case B), 야간에 외기온도가 20°C 이하일 때 NPC를 가동하는 조건(Case C)을 설정하였다(Table 4). 계산기간은 5 ~ 10월의 6개월간으로, NPC 적용 시의 외기온도는 건축물의 에너지절약설계기준에 따른 중부1(춘천), 중부2(대전), 남부(광주)지역에서 각각 1개 도시의 기온¹⁾을 적용하였다.

Fig. 6은 계산기간 전체의 냉방 에너지요구량 합계를 비교한 것으로, 평균 외기온도가 낮은 지역일수록 에너지요구량도 적게 산출되어 지역간에 최대 20% 정도의 차이를 보였다. 또한 NPC를 가동하지 않은 Case A의 냉방에너지 요구량(7,470 kWh) 대비, 스케줄 제어방식인 Case B에서는 약 40 ~ 53%, 온도 제어 방식인 Case C에서는 약 59 ~ 66% 감소한 에너지요구량이 산출되었다. 즉, UFAD 단독으로 운영하는 것 보다 NPC를 가동함으로써 에너지요구량을 절반 수준으로 줄일 수 있으며, 외기온도를 고려한 제어방식을 채택함으로써 보다 효율적으로 운용할 수 있음을 알 수 있다.

1) 한국태양에너지학회에서 제공하는 표준 기상데이터('86 ~ '05년)를 적용하였으며, 분석기간의 평균 외기온도는 춘천 18.3°C, 대전 19.6°C, 광주 20.4°C임

Table 4. Simulation conditions with local weather data

Case ID	NPC operating condition	Airflow rate	
		Cooling (day time)	NPC
Case A	N/A (without NPC)	2,880 CMH (4 ACH)	-
Case B	by schedule (23:00 ~ 07:00)	2,880 CMH (4 ACH)	2,160 CMH (3 ACH)
Case C	by outdoor temperature (under 20°C during 18:00 ~ 07:00)	2,880 CMH (4 ACH)	2,160 CMH (3 ACH)

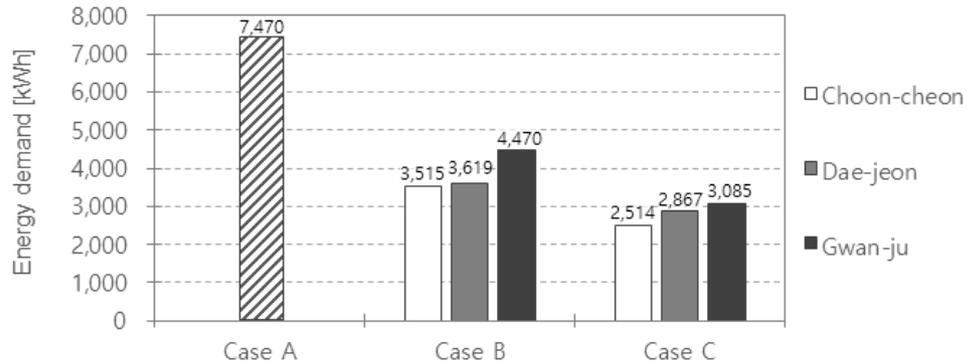


Fig. 6 Cooling energy demands

4. 결론

UFAD와 NPC를 동시에 적용하는 조건에서 NPC의 운용조건에 따른 분석 결과는 다음과 같다.

- (1) UFAD 모델에서 바닥 플레넘을 통과하는 급기와 슬래브의 열전달에 의한 온도상승률은 약 0.2 [°C /m]로 나타났다. 또한 UFAD에 의해 냉방이 가동되는 07 ~ 18시의 바닥 플레넘의 온도는 야간에 NPC를 가동함으로써 0.3 ~ 1.1°C 낮아졌으며, 이는 NPC에 의한 슬래브 축냉 효과가 반영된 결과로 사료된다.
- (2) NPC를 가동할 경우의 냉방 에너지요구량은 외기온도, 급기풍량, 가동시간 조건에 따라 UFAD만 가동하는 경우의 30 ~ 80% 수준으로 감소하였다. 한편, 평균 외기온도 16 ~ 20°C 조건에서는 급기풍량 또는 NPC 가동시간에 비례하여 에너지요구량이 감소하였으나, 외기온도 22°C 조건에서는 급기풍량이나 가동시간이 늘어날수록 오히려 에너지요구량이 증가하였다.
- (3) 평균 외기온도가 다른 3개 지역의 기상데이터를 적용하여 UFAD+NPC에 대한 냉방 에너지요구량을 검토한 결과, 기온이 가장 낮은 춘천의 에너지요구량이 광주에 비해 20% 정도 적게 산출되었다. 또한, 외기온도 20°C 이하 조건에서만 NPC를 가동하는 온도 제어 방식에서 8시간 동안 연속으로 NPC를 가동한 스케줄 제어 방식에 비해 약 27% 정도 냉방 에너지요구량이 저감되었다.

향후에는 열원 및 반송 설비의 성능과 가동률 등을 고려한 에너지소요량 분석까지 연구의 범위를 확대할 예정이다.

후기

이 논문은 2018년도 남서울대학교 학술연구비 지원에 의해 연구되었음.

REFERENCES

1. Ali Alajmi, Wid El-Amer, Saving energy by using underfloor-air-distribution (UFAD) system in commercial buildings, *Energy Conversion and Management* Vol. 51, pp. 1637-1642, 2010.
2. Yu, K. H., Yoon, S. H., Jung, H. K., Kim, K. H., and Song, K. D., Influence of lighting loads upon thermal comfort under CBAD and UFAD systems, *Energies*, Vol. 8, pp. 6079-6097, 2015.
3. Underfloor Air Distribution (UFAD) Design Guide, Bauman, ASHRAE, 2003.
4. Miura, K., Takemasa, Y., and Yoshida, H., Evaluation of thermal load reduction and effect to indoor environment by hybrid ventilation system, *Journal of environmental engineering(Transactions of AIJ)*, Vol. 76 No. 660, pp. 159-168, 2011.
5. Jung, J. H., Consideration of Appropriate Thermal Storage Time of Air-Conditioning System with Slab Thermal Storage in an Office Building by Use of Measurement Value, *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol. 22, No. 10, pp. 719-726, 2010.
6. Kim, S. Y., Won, J. K., Kim, J. H., and Song, D. S., Energy saving effect of the night purge control using ERV in a school building, *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol. 28, No. 11, pp. 421-427, 2016.
7. Yoon, S. H., Jang, H. I., Kim, K. A., Yu, K. H., and Suh, S. J., An energy performance evaluation of UFAD system under the various conditions of thermal load, *Korean journal of air-conditioning and refrigeration engineering*, Vol. 25, No. 1, pp. 14-19, 2013.