

AHU 토출온도에 따른 일반 공조시스템의 에너지 소비량 및 실내 온열환경 분석

Energy Consumption and Thermal Comfort Assessment of Conventional Forced-air System According to AHU Discharge Air Temperature

김민지(Min Ji Kim)¹, 연상훈(Sang Hun Yeon)¹, 이광호(Kwang Ho Lee)^{2†}

¹국립한밭대학교 대학원 건축공학과, ²국립한밭대학교 건축공학과

¹Graduate School, Hanbat National University, Daejeon, 34158, Korea

²Department of Architectural Engineering, Hanbat National University, Daejeon 34158, Korea

(Received September 22, 2017; revision received November 21, 2017; Accepted: November 28, 2017)

Abstract Recently, global warming has been a serious issue on the worldwide, and the importance of energy conservation is increasing. In most buildings, energy consumption increases due to cooling, heating, and ventilation. Because of these issues, researches have been carried out to reduce building energy. However, in most conventional forced-air system, the guidelines for the Air Handling Unit (AHU) discharge air temperature are not fully established. The purpose of this study is to assess the impact of AHU discharge air temperature, which is one of the important control variables, on the overall energy consumption and thermal comfort characteristics by modeling conventional forced-air system using EnergyPlus. In addition, recommendations for energy reduction in conventional AHU is provided.

Key words Conventional forced-air system(일반공조방식), AHU discharge air temperature(AHU 토출온도), Energy consumption(에너지 소비량), EnergyPlus(에너지플러스)

† Corresponding author, E-mail: kwhlee@hanbat.ac.kr

1. 서 론

1.1 연구배경 및 목적

최근 지구온난화로 인해 여름철과 겨울철의 평균 외기온도가 예년 보다 꾸준히 상승하고 있으며, 전 세계적으로 큰 화두가 되고 있다. 우리나라 또한 이상고온현상으로 인하여 에너지 저감 및 에너지 효율에 대한 중요성이 증가하고 있다.⁽¹⁾ 에너지경제연구원의 에너지 총 조사보고서에 의하면, 사무소 건물의 경우 냉난방, 환기를 위한 공조시스템의 에너지 소비량은 전체 에너지 소비량 중에 약 50%로 많은 비중을 차지하고 있는 것으로 나타났다.⁽²⁾ 이러한 문제점을 해결하기 위해 건물 내 공조시스템의 에너지 저감에 대한 많은 연구가 진행되고 있다. 이와 관련된 선행연구로서 Yu et al.⁽³⁾은 사무소건물의 에너지 효율 향상을 위한 VAV 터미널 박스의 최소 풍량 재설정에 관한 연구를 진행하였다. 이 연구에서는 기존건물의 VAV 터미널 박스의 에너지 효율을 높일 수 있는 송풍량을 선정 후 에너지플러스를 적용하여 실내 열 환경, 에너지 소비량 및 실내 공기환경을 분석하였다. 그 결과 최소 풍량 재설정 후 실별로 설정온도를 유지하는 것을 확인 할 수 있으며 이에 따라 27% 에너지 절감의 결과를 도출하였다. Cho et al.⁽⁴⁾은 건물 커미셔닝을 통한 에너지 효율 향상에 관한 연구를 진행하였다. 커미셔닝을 통해 공급온도제어, 이코노마이저, 배기 팬 및 빌딩 압력 제어가 개선 되었으며, 냉, 온수 공급 시스템의 펌프 제어를 통해 부분부하시 전력 소비량을 절감 효과를 확인하였다.

이와 같이 에너지 저감에 대한 연구가 다방면에서 진행되고 있지만 현재 Air Handling Unit(AHU) 토출온도에 대한 가이드라인이 설정되어있지 않다. 특히 AHU 토출온도는 건물 에너지 및 공조시스템 용량을 결정하는 주요한 변수 중 하나로서 이에 대한 가이드라인 제시 및 상세연구가 필요한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 현재 사무실 건물에서 사용되고 있는 VAV 기반의 천장취출형 공조시스템의 바탕으로 AHU 토출온도를 11℃에서 16℃로 총 6개의 Case로 선정하여 에너지 성능 및 실내 온열환경 비교분석을 통해 AHU 토출온도 설정에 관한 가이드라인을 제시하고자 한다.

2. 연구방법

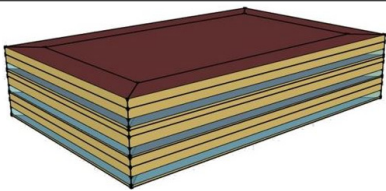
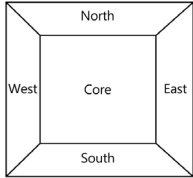
2.1 시뮬레이션 선정

미국에너지성에서 개발된 EnergyPlus는 DOE-2와 BLAST의 장점만을 통합시킨 프로그램으로 미국 냉동공조학회(ASHRAE)에서 권장하는 Heat Balance를 사용하여 비정상 상태의 열전도와 복사 및 대류 열전달에 대한 동적해석이 가능하다. 또한 건물 외피와 실내외의 환경 조건에 의한 건물의 냉난방 부하에 대한 수학적 검증이 가능하며, 특히 각 시간 단계별로 구성요소들에 대한 통합적 해석을 통해 건물 에너지 시뮬레이션의 주요 구성 요소들인 Zone Surface, Air Heat Balance 및 System과 Plant 간의 유기적인 연결 관계를 묘사가 가능하기 때문에 본 연구에 적합하다 판단되어 선정하였다.⁽⁵⁾

2.2 건물 모델 및 시뮬레이션 입력 조건

본 연구의 해석모델은 직사각형(53 m×35 m) 형태의 3층 규모 프로토타입 사무실 건물을 선정하였다. Table 1과 같이 각 층은 4개의 외주부와 1개의 내주부로 구성되어있으며 창면적비는 40%, 내외주부 동일한 층고 2.7 m로 설정하였다. 또한 해석대상 시스템으로는 이코노마이저와 냉동기를 포함한 중앙공조시스템으로 AHU 안의 냉난방 코일 및 공급 팬은 정적압력으로 제어된다. 중앙 열원장치로는 2단 냉각탑과 보일러, 냉동기가 설치되어 있으며, 각 실에서는 VAV(Variable Air Volume) Unit으로 실내 설정온도를 조절한다. 또한 시스템의

Table 1 Building model, zone plan & Simulation Input condition

Building model & zone plan	
	
HVAC	
AHU Discharge Air Temperature [℃]	11, 12, 13, 14, 15, 16
AHU Fan Design Static Pressure [Pa]	750
AHU Fan Efficiency [%]	75
AHU Fan Part Load Shut Off [Pa]	125
Minimum Outside Air Rate [L/s/m ²]	0.762
Plant	
Chiller Design COP	5.5
Boiler Design Efficiency [%]	78
Internal Gain	
People [m ² /person]	22.3
Lighting [W/m ²]	10.3
Equipment [W/m ²]	8.6

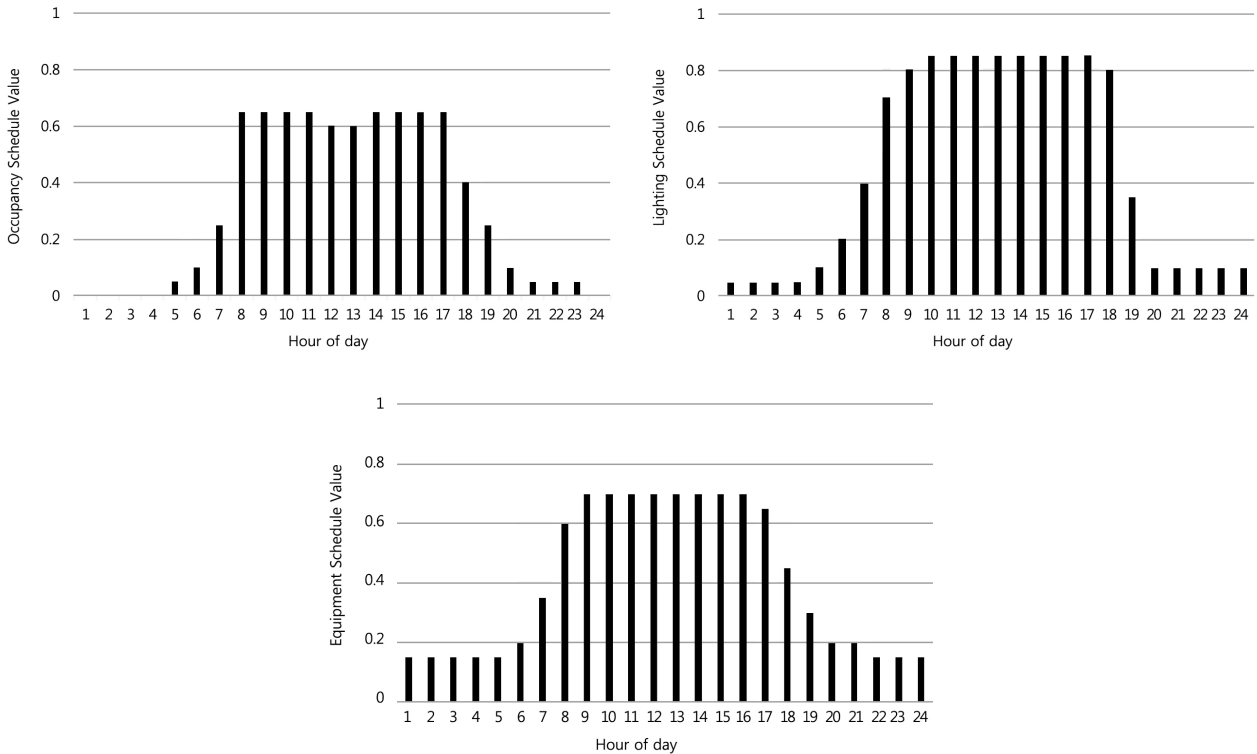


Fig. 1 Occupancy, lighting and equipment schedules.

작동시간으로는 오전 05시부터 오후 20시까지 설정하였으며, 냉방 시 실내 설정온도 26℃, 난방 시 20℃로 설정하였다. 기상데이터는 EnergyPlus에서 자체적으로 제공하는 인천기상데이터를 사용하였으며, 다른 조건들을 모두 동일하게 설정한 상태에서 AHU 토출온도를 Table 1과 같이 6개의 토출온도로 설정한 후에 AHU 토출온도 변화에 따른 에너지 성능과 실내 온열환경 변화를 비교 분석 하였다. Fig. 1은 해석모델에 적용한 내부 발열 스케줄을 나타낸다.

3. 결과 분석

3.1 보일러 가스 소비량

Fig. 2는 토출온도에 따른 춘계(3월~5월), 하계(6월~8월), 추계(9월~11월), 동계(12월~2월)의 보일러 가스 에너지 소비량을 나타낸다. 춘계와 추계는 토출온도가 증가함에 따라 보일러에너지 소비량은 감소하는 패턴을 나타냈으며, 두 계절 모두 16℃일 때 각각 3.9 kWh/m², 2.8 kWh/m²로 가장 낮게 나타났다. 춘계와 추계의 경우 서늘한 외기온도로 인해 혼합온도가 낮아 토출온도가 높을수록 AHU 난방 코일의 부하는 증가하지만 외주부 재열코일의 작동 시간이 감소하게 되어 전체 보일러 에너지 소비량이 낮게 나타난 것으로 판단된다. 즉, 내주부의 경우 높은 내부발열로 인해 난방부하가 낮아 재열 코일이 작동하지 않는 반면, 외주부의 경우 외부로의 열손실로 인하여 실내 난방 부하가 내주부 보다 높게 나타난다. 따라서 토출온도가 낮을 경우 실내 설정온도 보다 실내온도가 낮아지는 현상을 방지하기 위해 외주부의 재열 코일이 작동하게 되어 전체적인 보일러 에너지 소비량이 토출온도가 낮을수록 증가한 것으로 판단된다. 하계의 경우에도 토출온도가 낮을수록 보일러 에너지 소비량이 증가한 것으로 나타났지만 연간 보일러 에너지 소비량 중에서 차지하는 비중 자체가 매우 미미하였다. 마지막으로 동계의 경우 토출온도가 증가할수록 에너지 소비량이 증가하였는데 16℃일 때 19.6 kWh/m²로 가장 높은 에너지 소비량을 나타냈다. 이는 동계의 낮은 외기 온도로 인하여 AHU 토출온도가 높을수록 AHU 난방코일 전후 온도차의 증가로 인해 보일러의 전체 에너지 소비량이 증가하는 것으로 판단된다.

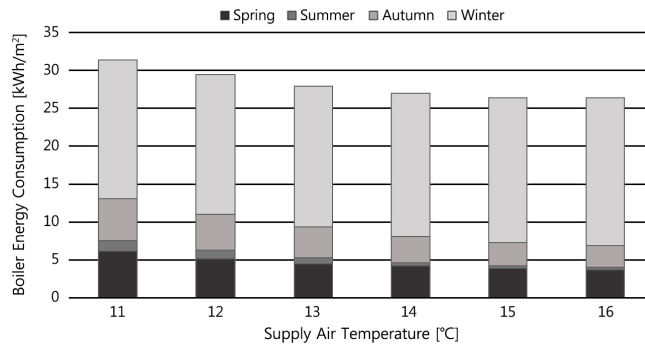


Fig. 2 Annual boiler gas energy consumption.

3.2 냉동기 전기 소비량

Fig. 3은 하계(6월, 7월, 8월)의 AHU 토출온도에 따른 냉동기 전기 소비량을 나타내며, Fig. 4는 하계의 냉방 코일 부하(현열+잠열)를 나타낸다. 하계의 경우 고온다습한 외기로 인해 토출온도가 높을수록 에너지 소비량은 감소하는 패턴을 보였는데, 16°C일 때 6.4 kWh/m²로 가장 낮은 냉동기 전기소비량을 나타냈으며 냉방 코일 부하 또한 55.0 kWh/m²로 가장 낮았다. 현열과 잠열 부하로 나누어 분석한 결과 현열 부하의 경우 토출온도가 증가함에 따라 혼합온도와 토출온도의 온도차가 감소하였지만 공급풍량의 증가로 인해 그 감소율은 크지 않았다. 반면, 잠열 부하의 경우 토출온도가 높을수록 잠열 제거량이 감소하여 현열 부하 보다 높은 감소율을 나타내 전체 냉방 코일의 부하가 감소한 것으로 사료된다.

또한, 서늘한 외기로 인해 혼합온도가 낮은 6월에는 높은 에코노마이저 작동시간으로 인하여 냉방 코일 부하와 냉동기 에너지 소비량의 감소가 가장 크게 나타났다. 11°C와 16°C의 부하를 각 월에 따라 비교한 결과 6월은 39.9% 감소한 반면, 7월과 8월의 경우에는 각각 15.9%와 11.2%로 상대적으로 낮은 부하 감소를 나타냈다. 따라서 6월의 부하 감소는 하절기의 에너지 소비량 감소에 큰 영향을 미친 것으로 판단된다.

3.3 팬 에너지 소비량

Fig. 5는 AHU 토출온도에 따른 연간 AHU 팬의 에너지 소비량을 나타내며 토출온도가 높을수록 팬 에너지 소비량은 증가하는 패턴을 나타냈다. 토출온도와 팬 풍량은 밀접한 관계를 갖는데, 토출온도가 낮을 경우 실내 설정온도와 AHU 토출온도 차이가 증가하여 동일한 부하를 만족시키기 위한 공급풍량 및 팬 에너지 소비가 감소하게 된다. 이는 냉방모드일 때만 해당되며 냉방부하가 높은 사무실 건물의 특성상 낮은 토출온도에 따라 연간 팬 공급 풍량과 에너지 소비량이 감소하는 것으로 사료된다. 반면, AHU 토출온도가 높을 경우 동일한 실내 부하를 제거하기 위해서 많은 양의 풍량을 필요로 하므로 팬 에너지 소비량이 증가하게 된다. 따라서 토출온도가 가장 낮은 11°C일 때, 3.9 kWh/m²로 가장 낮은 팬 에너지 소비량을 나타낸 반면, 16°C일 때 4.9 kWh/m²로 가장 높은 소비량을 나타냈다.

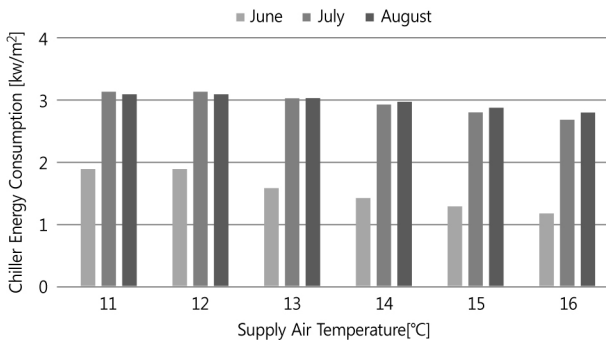


Fig. 3 Chiller energy consumption.

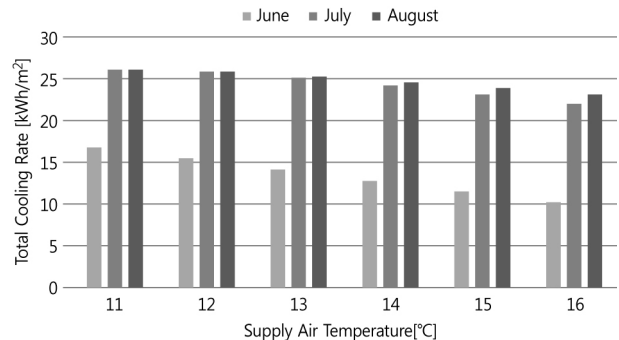


Fig. 4 Total cooling coil rate .

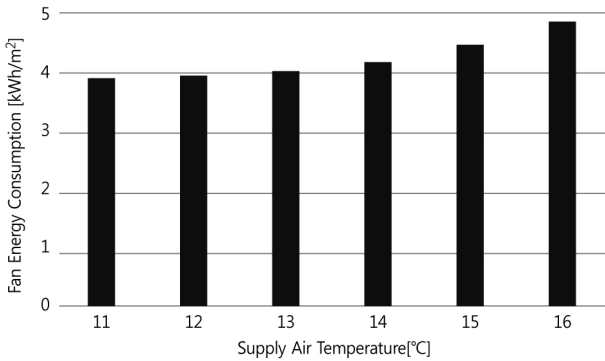


Fig. 5 Annual fan energy consumption.

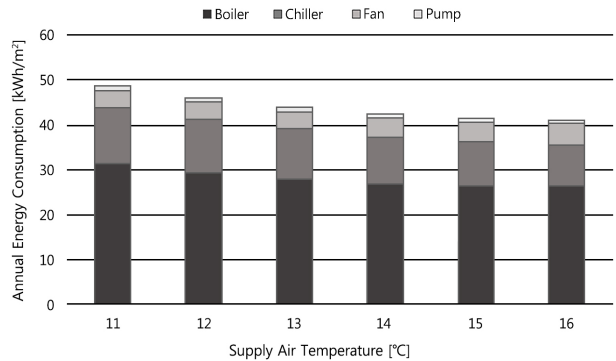


Fig. 6 Annual total HVAC energy consumption.

3.4 연간 전체 에너지 소비량

Fig. 6은 AHU 토출온도에 따른 전체 연간 냉난방 에너지 소비량을 나타내며 전체 연간 에너지 소비량에서 차지하는 비율은 보일러, 냉동기, 팬, 펌프 순으로 나타났다. 전체 연간 에너지 소비량은 토출온도가 높아질수록 점차 감소하는 것으로 나타났으며 AHU 토출온도가 11°C일 때 48.7 kWh/m²로 가장 높은 에너지 소비량을 보였으며 16°C일 때 41.1 kWh/m²로 가장 낮은 에너지 소비량을 나타냈다. AHU 토출온도 11°C에 비해서 16°C일 때 약 15%로 상당한 절감 효과를 나타냈는데, 이는 팬 에너지를 제외한 모든 기기의 에너지 소비량이 감소하였기 때문이다. 펌프의 경우 가장 많이 에너지 절감을 나타냈지만 에너지 사용량이 크지 않아 전체 연간 에너지 소비량에 미치는 영향은 적었다. 전체 에너지 소비량에서 차지하는 비중이 가장 큰 보일러와 냉동기의 에너지 소비량의 경우, 11°C와 16°C를 비교하였을 때 각각 15%와 27% 에너지 절감을 나타냄으로써 전체 연간 에너지 소비량 차이에 큰 영향을 미친 것으로 판단된다. 반면 팬 에너지의 경우 토출온도가 증가함에 따라 에너지 소비량은 증가하였지만, 앞서 설명한 보일러와 냉동기에 비해 차지하는 비중이 낮다. 따라서 AHU 토출온도가 높을수록 연간 냉난방 에너지 절감효과는 우수한 것으로 나타났다.

3.5 실내 온열환경 분석

실내 온열환경은 대표일을 선정하여 동절기(12월 14일)와 하절기(7월 13일) 기간동의 토출온도 11°C, 13°C, 16°C일 때 중간층 내주부의 PMV 분석을 진행하였다. Fig. 7의 왼쪽 그래프는 동절기를 나타내며 오른쪽 그래프는 하절기를 나타낸다. PMV는 대표적인 열쾌적 지표로 온도, 습도, 기류속도, 평균 복사온도, 착의량, 활동량을 통해 계산되어 -0.5~0.5의 범위를 가지며 “+” 값은 따뜻한 정도를 의미하며 “-”는 추운 정도를 나타낸다.⁽⁶⁾ 동계의 경우 AHU 토출온도 16°C가 3가지 Case 중 높은 토출온도와 VAV 유닛의 가장 높은 최소공급풍량 (Minimum airflow setting) 조건으로 인하여 11°C와 비교하였을 때 실내온도가 약 2°C 정도 높게 나타났고, 그로 인해 오전을 제외한 모든 시간대에서 가장 높은 PMV 값을 나타냈다. 반면, 11°C의 경우 다른 Case에 비해 낮은 실내온도와 풍량을 나타냈으며 16°C에 비해 상대습도가 14%정도 높게 나타났다. 그로 인해 모든 시간대에서 0보다 작은 PMV 값을 나타냈다. AHU 토출온도 13°C의 경우 다른 Case들과 비교하였을 때 실내온도, 풍량, 상대습도가 중간 값을 나타내 상대적으로 가장 우수한 쾌적성을 나타냈다. 하지만 다른 Case들과 마찬가지로, 05:00부터 08:00에 -0.4~-0.5의 PMV 값을 나타냄으로써 개선의 여지가 필요한 실정이다. 이는 05:00부터 08:00의 경우 모든 Case가 낮은 실내온도와 내부발열로 PMV가 상당히 낮게 나타난 것으로 사료된다.

하계의 경우에는 AHU 토출온도 11°C와 13°C일 때 거의 유사한 PMV 값을 나타냈으며 토출온도 16°C의 경우 2가지 Case 보다 다소 높게 나타났다. 하지만 그 차이는 동계에 비해 미미하였는데 이는 PMV에 미치는 영향 중 상대습도를 제외한 모든 변수가 대부분 유사하였기 때문이다. 상대습도의 경우 AHU 토출온도가 증가함에 따라 잠열 제거량은 감소하게 된다. 따라서 16°C일 때 가장 낮은 잠열 제거량을 나타냄으로써 다른 Case들 보다 높은 상대습도를 나타냈으며 그로 인해 PMV 값이 다소 높게 유지되는 것으로 판단된다. 그러나

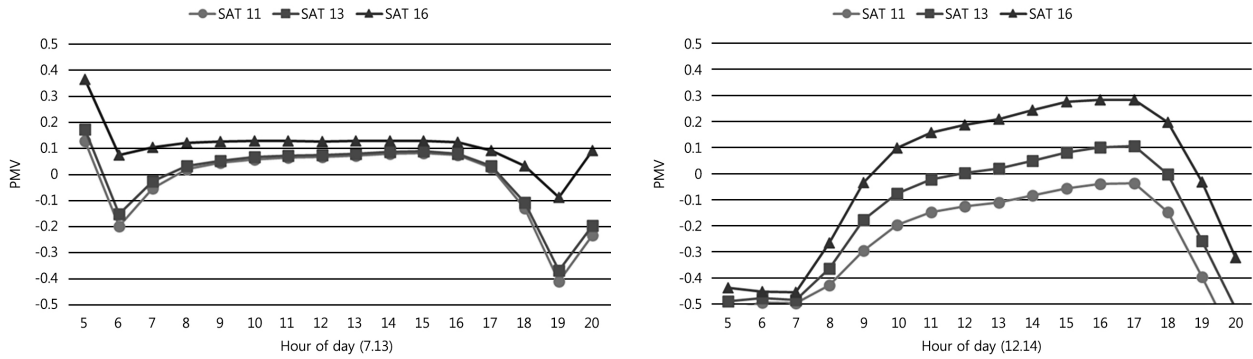


Fig. 7 MF interior zone PMV.

동계와 달리 AHU 토출온도 변화에 따른 PMV 변화는 적게 나타났고, 모든 Case가 대부분의 시간대에서 대략 0~0.1 값을 나타냈음을 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 EnergyPlus를 이용하여 VAV 기반의 천장취출형 공조시스템이 탑재된 사무소건물을 모델링한 후, AHU 토출온도를 11℃부터 16℃ 까지 6가지 Case로 선정하여 AHU 토출온도에 따른 에너지 성능 및 실내 온열환경을 분석하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

- (1) AHU 토출온도별 각 기기의 에너지 소비량을 살펴보면, 팬을 제외한 보일러, 냉동기, 펌프는 토출온도가 증가함에 따라 에너지 소비량이 감소하였으며, AHU 토출온도를 16℃로 유지했을 때 토출온도 11℃의 경우에 비해서 각각 15%, 27%, 28% 감소하였으나 팬 에너지 소비량은 20% 증가하였다.
- (2) 전체 연간 에너지 소비량을 살펴보면 AHU 토출온도가 높아질수록 에너지 소비량은 점차 감소하는 것으로 나타났으며, 11℃와 16℃의 차이는 약 15%로서 상당히 큰 냉난방 에너지 소비량 차이를 나타냈다.
- (3) 실내 온열환경 분석에서는 동계 토출온도를 13℃로 설정하는 하는 것이 PMV 기반의 실내 쾌적성 측면에서 가장 우수하게 나타난 반면, 하계의 경우에는 AHU 토출온도가 높게 유지될수록 낮은 잠열 제거량 및 높은 실내 상대습도로 인하여 PMV 값이 다소 높게 유지되는 것으로 나타났다.

본 연구에서는 AHU 토출온도가 실내의 온열환경과 에너지 소비량에 미치는 영향을 분석하였는데, 본 연구를 바탕으로 AHU 토출온도를 연중 일정하게 유지시키지 않고 동적 부하조건에 따라서 토출온도를 시간별 제어함으로써 온열환경과 에너지 절감효과를 극대화시킬 수 있는 방안에 대한 연구가 필요하다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다 (No. 20163030111350).

References

1. Im, H. J., Jung, S. K., and Won, D. H., 2013, An Analysis of the Impact of Global Warming on Residential Energy Consumption : Focused on the Case of Electricity Consumption, Korean Energy Economic Review, Vol. 12, No. 2, pp. 33-58
2. Korea Energy Economics Institute, 2014, Energy Consumption Survey.
3. Yu, S. W. and Cho, Y. H., 2011, A Study on Reset of Minimum Airflow of VAV Terminal Boxes for Improving

- Energy Efficiency in the Office Building, Journal of Korea Institute of Architectural Sustainable Environment and Building System, Vol. 5, No. 4, pp. 273-279.
4. Cho, Y. H. and Ahn, D. J., 2011, A Study in the Improving Energy Efficiency through Retro-Commissioning, Journal of The Architectural Institute of Korea Planning & Design, Vol. 27, No. 9, pp. 301-308.
 5. The U. S. Department of Energy, 2016, EnergyPlus Input Output Reference, The Encyclopedic Reference to EnergyPlus Input and Output.
 6. Jang, H. I., Kwak, H. J., and Suh, S. J., 2012, Comparison on the Indoor Thermal Environment and Energy Consumption of VAV System by PMV Control, Proceeding of The Society of Air-conditioning and Refrigerating Engineers of Korea 2012 Winter Conference, pp. 101-104.