



IT 장비 발열에 따른 냉방 에너지 사용량 평가를 위한 데이터센터 모델 개발

Development of Data Center Model for Evaluation on Cooling Energy Consumption by IT Equipment Heat Load

장아민* · 정동은** · 진산*** · 도성록****

Ahmin Jang* · Dong Eun Jung** · San Jin*** · Sung Lok Do****

* Master's Student, Dept. of Building and Plant Engineering, Hanbat National Univ., South Korea (jam2990@naver.com)

** Coauthor, PhD Student, Dept. of Architecture, Korea Univ. & Energy ICT Research Department, Korea Institute of Energy Research, South Korea (jde0610@kier.re.kr)

*** Coauthor, Master's Student, Dept. of Building and Plant Engineering, Hanbat National Univ., South Korea (jinsan9708@naver.com)

**** Corresponding author, Associate Professor, Dept. of Building and Plant Engineering, Hanbat National Univ., South Korea (sunglokdo@hanbat.ac.kr)

ABSTRACT

Purpose: Internet data usage has increased due to the growth of the OTT (Over The Top) service market and the 5G Network. Interests and needs on a data center (a facility storing, processing, and managing the data) have rapidly increased in the past few years. That means the increased demand is driving the boom in data center construction and it leads to increased energy consumed by the data center. The data center consumes energy mainly for IT equipment and cooling systems to remove the heat generated by the IT equipment. The cooling energy consumption accounts for approximately 40% of the total energy consumption in the data center. To achieve cooling energy savings in a data center, understanding heat generated from the data center operation is essential. However, there is a lack of energy model to evaluate causes and effects between IT heat loads and cooling system thermal performance. Therefore, this study aims to develop an energy simulation model that evaluates thermal characteristics of the data center and analyzes the cooling energy. **Method:** This study developed and verified the IT equipment operation schedule for simulation using the measurement data of the 'A' research facility located in Daejeon, South Korea. In addition, the air flow was analyzed by varying the heat load values for each IT space separately. **Result:** This study validated the IT equipment and cooling energy consumption of the developed data center model using ASHRAE Guideline 14, and the model met the specified criteria.

KEYWORD

데이터센터
냉방 에너지 사용량
시뮬레이션 모델
운영 스케줄
측정 데이터

Data Center
Cooling Energy Consumption
Simulation Model
Operation Schedule
Measurement Data

ACCEPTANCE INFO

Received Aug. 8, 2023

Final revision received Aug. 14, 2023

Accepted Aug. 18, 2023

© 2023. KIEAE all rights reserved.

1. 서론

OTT (Over The Top) 시장의 성장, 5g 개발 등으로 인하여 인터넷 데이터 사용량이 증가하였다. 이에 따라 인터넷 데이터를 저장하고 관리하는 시설인 데이터센터(Data center)에 대한 관심이 증대되고 있다. 데이터센터는 통신장비와 컴퓨터 시스템 그리고 스토리지 등의 IT 장비가 설치된 시설로 데이터의 저장, 처리, 전송 등의 관리를 한다. 국내 데이터센터 설치 개소는 2000년 53개에서 2020년 156개로 확대되었다[1]. 데이터센터 에너지 사용량은 2022년 12월 기준 1,762 MW에서, 2029년까지 49,397 MW로 확대될 것으로 전망되어 데이터센터의 에너지 사용량 절감이 요구되고 있다[2]. 데이터센터는 크게 IT 장비, 냉방 시스템에서 에너지가 사용되며, 냉방 시스템은 IT 장비에서 발생하는 열 부하를 제거하기 위해 사용한다. 냉방 시스템의 에너지 사용량은 전체 에너지 사용량 중 약 40%를 차지하고 있다[3]. 데이터센터 에너지 절감을 위해 냉방 시스템 에너지 절감은 필수적이며, 이를 위한 연구가 수행되고 있다.

Chang은 데이터센터 냉방 에너지 절감을 위해 급기 온도 변화가

서버 냉각 성능에 미치는 영향에 대해 분석하였다[4]. 해당 연구는 CFD 시뮬레이션 툴을 이용해 데이터센터 내의 기류 특성을 반영하였고, RCI (Rack Cooling Index)를 이용해 최적 급기 온도를 도출하였다. 냉각 효율 지표는 100%일 때 급기 온도가 권장 급기 온도의 최댓값보다 높지 않고, 최솟값보다 낮지 않음을 의미한다. CRAC (Computer Room Air Conditioner)의 급기 온도는 19°C로 설정하였을 때 RCI가 100%의 값을 보였다. 따라서 해당 논문은 급기 온도를 19°C로 설정하는 것을 권장하였다. Kim et al.은 데이터센터 외기 도입 냉방 시스템의 운영 방법에 따른 냉방시스템 에너지 성능 분석을 하기 위해 시뮬레이션을 진행하였다[5]. 해당 연구는 외기 냉방 시스템 제어, 급기 온도, 설계 풍량 변화에 따른 냉방 시스템 성능 지표인 ASHRAE MLC (Mechanical Load Component)를 평가하였다. 그 결과, 급기 온도가 상승함에 따라 외기 도입 기간이 증가하여 냉방 에너지 사용량이 약 10~25% 감소하였고, 동일 급기 온도일 때 설계 풍량이 감소함에 따라 팬 에너지 사용량이 약 15~25% 감소하였다. Li and Li.는 데이터센터 냉방 시스템 에너지 절감을 위해 Water-side 이코노마이저 시스템 제어에 관한 연구를 수행하였다[6]. 해당 연구에서는 냉방 부하율과 외부 습구 온도를 통해 T_{app} (Cooling water approach temperature)와 T_{sw} (Switchover

temperature)를 계산하였고, 계산된 값을 실제 측정된 사례 연구 데이터를 통해 검증하였다. 계산된 T_{sw} 와 T_{app} 가 적용된 냉방 시스템의 에너지 사용량은 냉방 부하율 0.6 기준 약 10%가 감소하였다.

기존 연구는 데이터센터의 급기 온도와 풍량 증감, 외기도입 냉방 시스템 적용 등을 통해 데이터센터 냉방 에너지 사용량을 분석하였다. 그러나 선행 연구는 실측 데이터의 부재로 실시간으로 변하는 IT 장비의 발열량을 고려하지 않았고, IT 장비의 에너지 밀도로 발열량을 고정하거나 임의로 설정하였다. 데이터센터 냉방 시스템은 발열량 제거를 위해 사용하고 있기에 냉방 에너지 사용량의 분석을 위해서는 실측 데이터를 기반으로 한 발열량 정보가 필요하다. 따라서 본 연구는 대전 A 연구소 데이터센터의 실측 데이터를 활용하여 IT 장비의 가동 스케줄을 제작하였고, IT 장비 발열량 변화를 반영한 모델을 개발하였다. 또한 개발한 모델을 통해 위치별 온도 및 냉방 에너지 사용량을 분석하였고 모델의 열 유동을 평가하였다.

2. 연구 방법

2.1. 연구 진행 과정

본 연구는 데이터센터 자료 준비, 가동 스케줄 제작, 시뮬레이션 모델 개발, 모델 검증, 모델 분석의 5단계로 진행되었다(Fig. 1. 참조). 1단계는 데이터센터 시뮬레이션 모델을 제작하기 위한 단계로 냉방 시스템 사양과 에너지 사용량 데이터를 수집하였다. 2단계는 데이터센터 가동 스케줄 제작으로 대전 지역 A 연구소 내 데이터센터에서 측정된 IT 장비의 에너지 사용량을 기반으로 데이터센터의 IT 장비 가동 스케줄을 제작하였다. 3단계는 시뮬레이션 모델 개발로 건물 에너지 시뮬레이션 툴인 EnergyPlus를 이용하여 데이터센터의 에너지 사용량의 동적 변화를 모사하기 위해 실제 건물과 IT 장비, 냉방 시스템의 시뮬레이션 모델을 개발하였다[7]. 이때 데이터센터 IT 가동 스케줄은 실측된 IT 장비 에너지 사용량 데이터를 가공하여 제작하였다(Fig. 2. 참조). 4단계는 시뮬레이션 모델 검증 단계이며, 시뮬레이션으로 도출된 IT 장비와 냉방 시스템의 에너지 사용량 데이터 값을 실측 데이터와 비교하여 시뮬레이션 모델을 검증하였다. 모델 검증을 위한 평가 지표는 ASHRAE Guideline 14에서 제시하는 cv(RMSE), NMBE (Normalized Mean Bias Error)를 사용하였다[8]. 마지막 5단계에서는 검증된 모델의 IT 장비 가동률 변화에 따른 냉방 부하와 위치별 온도를 분석하기 위해 가동률을 4개의 Cases로 구분하였다.

2.2. 데이터센터 시뮬레이션 모델링

시뮬레이션 모델은 대전 A 연구소의 데이터센터를 기반으로 제작하였다. 모델 검증을 위한 기상데이터는 냉방 시스템이 외기의 영향을 받기 때문에 데이터센터와 거리가 1.3 km인 지점에서 측정된 기상청 데이터를 이용하였다[9]. Fig. 3.은 시뮬레이션 모델의 개념도이고 Table 1.은 건물 기본 설정 값이다. 건물 모델은 1개의 가상 공간 (Virtual space)과 4개의 IT 장비 설치 공간 (IT space)으로 구성하였다. IT space는 건물 내에 위치하고 있고, 외기의 영향을 받지 않기 때문에 IT space 외부에 가상 공간을 구성하였다. 가상 공간의 온도는 실제 데이터센터에서 IT space를 둘러싸고 있는 실의 온도인

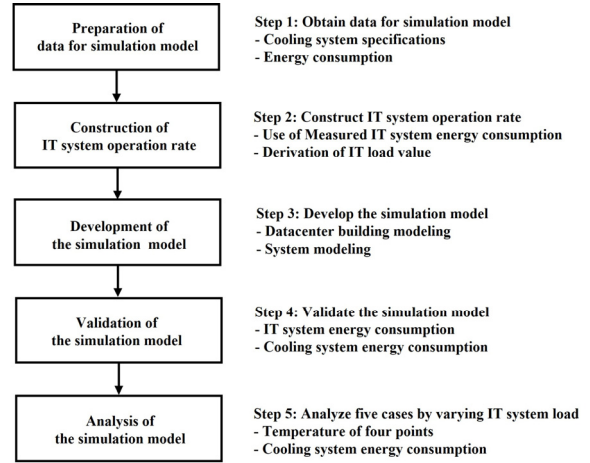


Fig. 1. Overall research diagram

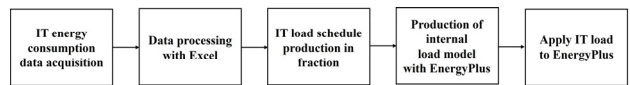


Fig. 2. IT system load implementation process using EnergyPlus with Excel

20°C를 만족하도록 설정하였다. IT space는 IT 장비가 설치되어 있는 Indoor space와 바닥 및 천장 플레넘으로 구성하였다. IT space의 냉방 시스템은 공랭식 CRAC (Computer room air conditioner)로 응축기, 압축기, 코일, 그리고 급기 팬으로 구성되어 있다. 이때 CRAC는 외부에 설치된 실외기로 인해 외기의 영향을 받는다. CRAC의 사양은 실제 시스템과 동일하게 적용하였으며 팬 효율은 0.641, 용량은 30 RT이다. CRAC는 각 IT space에 한 개씩 설치하였고, CRAC에서 냉각된 공기는 바닥 플레넘에서 혼합되어 IT 장비의 서버 랙 공간으로 유입되고 천장 플레넘을 통해 순환된다. CRAC의 급기 온도는 14°C이며, IT 장비의 최대 발열량은 75.5 kWh/space이다. IT spaces의 천장, 바닥, 내벽 그리고 외벽 등의 구조체는 A 연구소의 단열 계획과 동일한 물성치를 적용하였다. IT spaces의 실내 설정 온도는 대전 A 연구소 데이터센터와 동일하게 24°C로 설정하였다. 시뮬레이션 기간은 실측 데이터를 보유하고 있는 기간인 4월 16일부터 7월 30일로 선정하였다. 본 연구는 시뮬레이션 모델의 공기 흐름과 구간별 온도를 확인하기 위해 4개의 지점을 선정하였다. 4개의 지점은 냉방 시스템에서 공급되는 부분 (Supply air point), IT Space로 유입되는 부분(Inlet air point), IT 장비에서 배출되는 부분(Outlet air point), 냉방 시스템으로 환기되

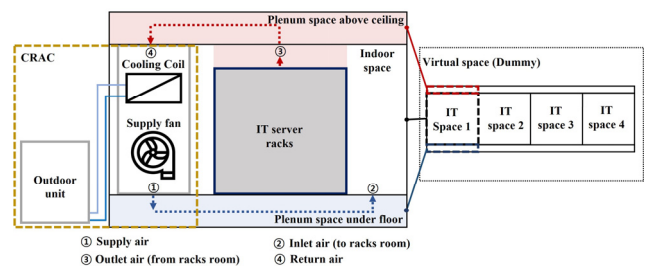


Fig. 3. Schematic diagram for simulation model

Table 1. Simulation modeling parameters

| Input parameters | | | Values | |
|-----------------------|-----------------------|---------------------------|---|--------------------------|
| Building | Type | | Data center | |
| | IT space | U-value | Wall | 0.34 W/m ² ·K |
| | | | Ceiling | 0.21 W/m ² ·K |
| | | Floor | 0.29 W/m ² ·K | |
| | Space set temperature | | 24 ± 1 °C | |
| | Virtual space | Space set temperature | 20 °C | |
| | Location | | Daejeon, South Korea | |
| | Weather data | | KMA (Korea Meteorological Administration) | |
| Simulation run period | | 4.16~7.30 | | |
| System | Cooling | Type | Air cooled type CRAC | |
| | | Fan efficiency | 0.641 | |
| | | Cooling coil capacity | 30 RT | |
| | | Supply set temperature | 14 °C | |
| | IT | Maximum IT load per space | 75.5 kWh | |

는 부분(Return air point)으로 지정하였다. 이때 IT 장비에서 배출되는 부분은 IT space의 실내 온도를 측정하는 위치와 동일하다.

3. 데이터센터 모델 검증

본 연구는 데이터센터 시뮬레이션 모델을 제작하고, 측정된 IT 장비와 냉방 시스템의 에너지 사용량을 통해 모델의 타당성을 검증하였다. 시뮬레이션 모델의 정당성은 ASHRAE Guideline 14에서 제시하고 있는 지표를 이용하여 검증하였다. ASHRAE Guideline 14에서는 Cv(RMSE), NMBE로 검증하는 것을 제안하고 있다. ASHRAE에서 제시하고 있는 검증 기준은 시간당 데이터는 Cv(RMSE) 30%, NMBE 10% 미만이고, 월간 데이터는 10%, 5% 미만이다. 검증 결과, IT 장비 모델은 시간당 데이터 Cv(RMSE)는 1.89×10^{-12} , NMBE는 3.5×10^{-9} 였고, 월간 데이터는 각각 4.0×10^{-11} , 3.9×10^{-9} 로 확인되었다. 또한 냉방 시스템 모델의 시간당 데이터 Cv(RMSE)는 13.1%, NMBE는 0.2%였고, 월간 데이터는 각각 9.8, 1.5%로 ASHRAE 기준을 만족하였다(Table 2. 참조). 따라서 본 연구에서 개발한 시뮬레이션 모델은 실제 에너지 사용량 변화가 고려된 검증된 모델임을 확인하였다.

4. 시뮬레이션 결과 분석

4.1. 시뮬레이션 Cases 설정

A 연구소에 위치하고 있는 데이터센터는 플래넘 공간을 통해 공기와 열이 이동한다. 본 연구는 제작된 데이터센터 시뮬레이션 모델에서의 공기 및 열 흐름을 파악하기 위해 IT 장비의 가동률을 변화시켜 4개의 지점의 온도와 냉방 에너지 사용량을 분석하였다. IT 장비

Table 2. Verification results of IT equipment and cooling system

| System | Verification method | Hourly | Monthly |
|---------|---------------------|-------------------------|-------------------------|
| | | Verification result | Verification result |
| IT | Cv(RMSE) | 1.9×10^{-12} % | 4.0×10^{-11} % |
| | NMBE | 3.5×10^{-9} % | 3.9×10^{-9} % |
| Cooling | Cv(RMSE) | 13.13 % | 9.80 % |
| | NMBE | 0.17 % | 1.53 % |

Table 3. Data center operating rate according to simulation cases

| Simulation cases | IT space 1 | IT space 2 | IT space 3 | IT space 4 |
|------------------|------------|------------|------------|------------|
| Case 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Case 2 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| Case 3 | 0 | 100 | 0 | 0 |
| Case 4 | 0 | 100 | 50 | 0 |

의 가동률은 0%, 50%, 100%로 변경되었으며, 5개의 Cases로 분류하였다(Table 3. 참조). IT 장비의 가동률 0%는 IT 장비 발열이 없음(0 kWh/space)을 의미하며, 50%는 중간을(37.75 kWh/space), 100%는 IT 장비 발열이 최대임(75.5 kWh/space)을 나타낸다. Case 1은 4개의 IT space 가동률이 0%이고, Case 2는 100%이다. Case 1과 Case 2는 IT space 가동률이 최소일 때와 최대일 때 냉방 에너지 사용량에 영향을 주는 요소를 평가하기 위해 설정하였다. Case 3과 Case 4에서 IT 장비 가동률은 IT space 1과 IT space 4는 0%, IT space 2는 100%로 설정하였고, IT space 3은 0%, 50%로 하였다. Case 3과 Case 4에서는 위치별 온도와 냉방 에너지 사용량을 평가하여 공기와 열 흐름을 확인하였고, IT 장비 발열과 냉방 시스템이 인접한 다른 IT space에 주는 영향을 평가하였다.

4.2. Case 1

4.2.절은 Case 1에서의 IT space별 온도 및 냉방 에너지 사용량을 분석하였다. Case 1은 모든 IT space에서 IT 장비 가동률이 0%이기 때문에 실내 부하가 발생하지 않았다. 이에 따라 냉방 에너지 사용량은 0 kWh였으며, IT space 내 4개 지점의 온도는 약 20°C였다(Fig. 4., 5. 참조). 이는 IT space를 둘러싸고 있는 공간인 가상 공간의 실온도가 20°C로 상시 유지되고 있기 때문이다.

4.3. Case 2

4.3.절은 Case 2에서의 IT space별 온도 및 냉방 에너지 사용량을 분석하였다. Case 2에서는 4개 IT space의 IT 장비 가동률을 100%로 설정하였다. 그 결과, 전체 냉방 에너지 사용량은 IT space 1과 4는 117,494 kWh, IT space 2와 3은 117,551 kWh였고, Supply air point 온도는 14°C, Outlet air point 온도는 24°C를 유지하였다(Fig. 6., 7. 참조). IT space 1과 4의 전체 냉방 에너지 사용량은 IT space 2와 3 대비 57 kWh 감소하였다. IT space 1과 4의 세 면과 IT space 2와 3의 두 면은 실내온도가 20°C인 가상 공간과 접해 있었다. 이에 따라 IT space 1과 4에서 벽을 통한 열손실이 IT space 2와 3 대비 증가하였기 때문에 냉방 에너지 사용량이 감소하였다.

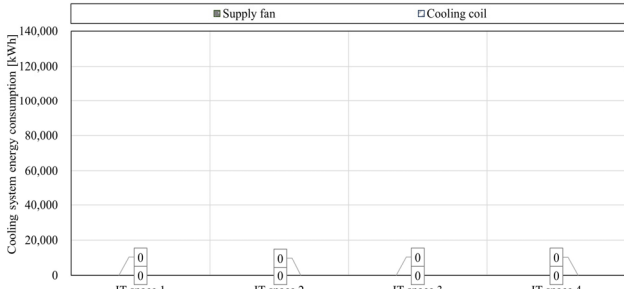


Fig. 4. Cooling system energy consumption for Case 1

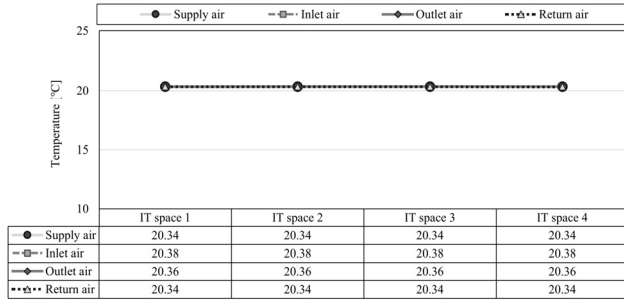


Fig. 5. Temperature by point for Case 1

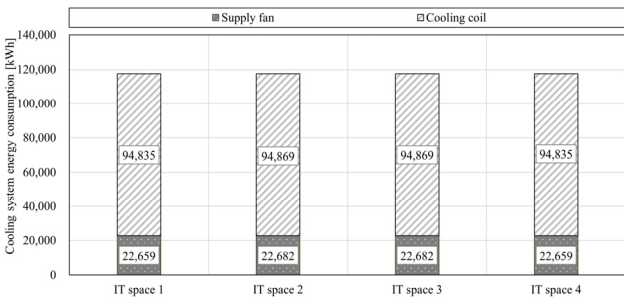


Fig. 6. Cooling system energy consumption for Case 2

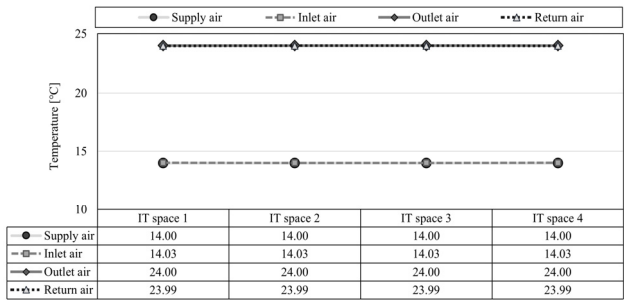


Fig. 7. Temperature by point for Case 2

4.4. Case 3

4.4.절은 Case 3에서의 IT space별 온도 및 냉방 에너지 사용량을 분석하였다. Case 3의 IT 장비 가동률은 IT space 2는 100%이고, IT space 1, 3, 4는 0%로 설정하였다. 그 결과, IT space 1, 3, 4의 냉방 에너지 사용량은 0 kWh였고, IT space 2의 냉방 에너지 사용량은 118,025 kWh였다(Fig. 8. 참조). IT space 1, 3, 4에서의 Supply air point 온도는 약 22.74°C, Inlet air point 온도는 약 16.27°C, Outlet air point 온도는 20.01°C~20.57°C, Return air point 온도는 약 22.74°C의 분포를 보였다(Fig. 9. 참조). IT space 1, 3, 4의 Inlet air

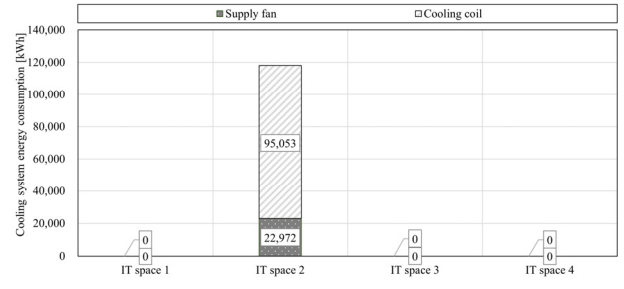


Fig. 8. Cooling system energy consumption for Case 3

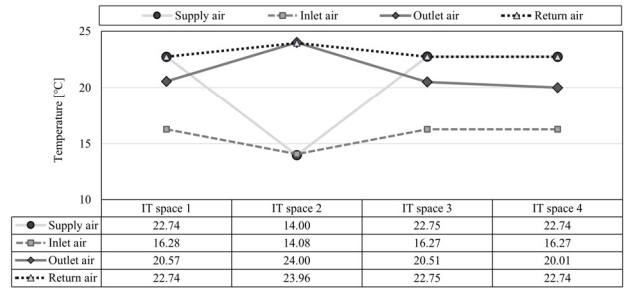


Fig. 9. Temperature by point for Case 3

point 온도는 Supply air point 온도보다 약 6.46°C 감소하였는데 이는 IT space 2의 냉방 시스템에서 추출된 냉각된 공기가 바닥 플레넘 공간에서 혼합되어 IT space 1, 3, 4로 유입되었기 때문이다. 또한 IT space 1, 3, 4의 Return air point 온도는 Outlet air point 온도보다 2.17°C~2.73°C 증가하였는데 이는 IT space 2에서 발생한 내부 부하가 천장 플레넘에서 혼합되었기 때문이다. 또한 IT space 1, 3의 Outlet air point 온도는 IT space 4 대비 0.5°C 증가하였다. 이는 부하가 발생한 IT space 2가 인접한 IT space 1, 3의 실내 온도에 영향을 미쳤기 때문이다.

4.5. Case 4

4.5.절은 Case 4에서의 IT space별 온도 및 냉방 에너지 사용량을 분석하였다. Case 4의 IT space별 IT 장비 가동률은 IT space 2는 100%, IT space 3은 50%, IT space 1과 2는 0%이다. 그 결과, IT space 1, 4의 냉방 에너지 사용량은 0 kWh였고, IT space 2은 118,025 kWh, IT space 3은 62,549 kWh였다(Fig. 10. 참조). IT space 1, 4에서의 Supply air point 온도는 23.22°C, Inlet air point 온도는 15.58°C, Outlet air point 온도는 20.54°C, Return air point 온도는 23.22°C의 분포를 보였다(Fig. 11. 참조). IT space 1, 4의 Inlet air point 온도는 Supply air point 온도보다 7.64°C 감소하였는데 이는 IT space 2, 3의 냉방 시스템에서 추출된 냉각된 공기가 바닥 플레넘 공간에서 혼합되어 IT space 1, 4로 유입되었기 때문이다. 또한 IT space 1, 4의 Return air point 온도는 Outlet air point 온도보다 2.68°C 증가하였는데 이는 IT space 2, 3에서 발생한 내부 부하가 천장 플레넘에서 혼합되었기 때문이다.

4.6. IT space 2 냉방 에너지 사용량

4.6.절은 제작된 데이터센터 모델의 공기 및 열 유동을 분석하기 위해 IT space 2의 냉방 에너지 사용량과 IT space 1의 위치별 온도

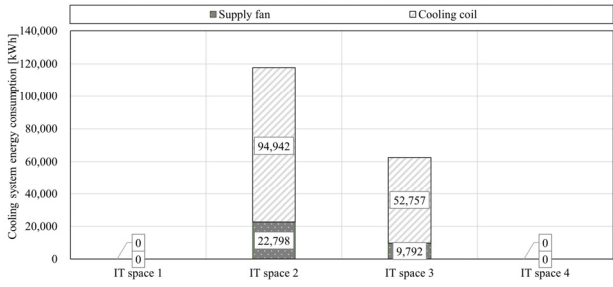


Fig. 10. Cooling system energy consumption for Case 4

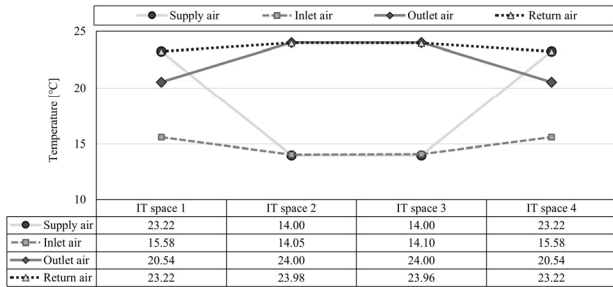


Fig. 11. Temperature by point for Case 4

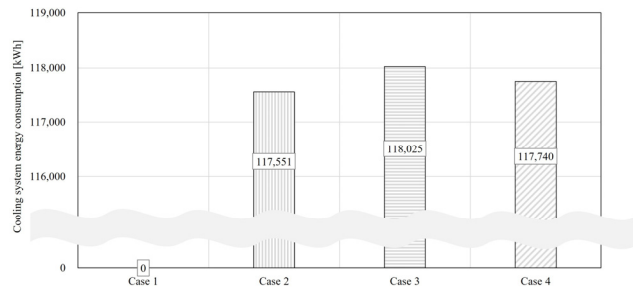


Fig. 12. Cooling system energy consumption for IT space 2

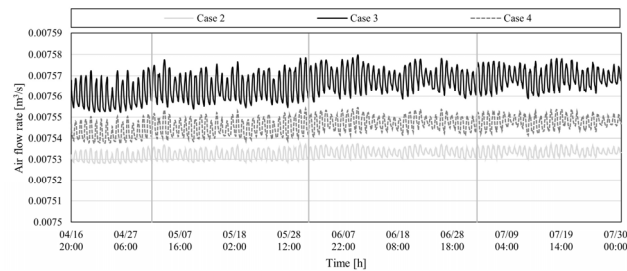


Fig. 13. Cooling system air flow rate for IT space 2

를 분석하였다. IT space 2의 IT 장비 가동률은 Case 2, 3, 4에서 100%로 설정하였다. IT 장비 가동률이 0%인 Case 1을 제외한 Case 2, 3, 4에서의 IT space 2 냉방 에너지 사용량은 Case 2에서 117,551 kWh로 최솟값을 보였고, Case 3에서 118,025 kWh로 최댓값이었다(Fig. 12. 참조). Case 3은 IT space 2를 제외한 모든 IT space가 냉방 시스템을 가동하고 있지 않아 IT space 2에서 냉각된 공기가 다른 IT space로 이동하였다. 이에 따라 Case 3에서의 IT space 2의 냉방 에너지는 Case 2, 4 대비 약 0.4%, 0.2% 증가하였다. IT space 2의 냉방 풍량은 Case 2에서 0.00753 m³/s, Case 3에서 0.00757 m³/s, Case 4에서 0.00755 m³/s 값을 보였다(Fig. 13. 참조). 따라서 플레넘 공간을 공유한 IT space에서 가동 중인 냉방 시스템 개수가 증가하면 냉방 에너지 사용량은 감소하였다.

5. 결론

본 연구는 데이터센터의 냉방 에너지 사용량 평가를 위해 냉방 시스템의 발열을 고려한 시뮬레이션 모델을 개발하였다. 시뮬레이션 모델의 타당성은 대전에 위치한 A 연구소의 측정 데이터를 이용하여 검증하였으며, 시뮬레이션을 통해 냉방 에너지 사용량을 확인하였다. 본 연구의 결과는 다음과 같다.

- (1) 개발된 시뮬레이션 모델은 ASHRAE에서 제시하고 있는 기준을 만족하여 실제 에너지 사용량 변화가 고려되었음을 확인하였다.
- (2) 냉방 시스템으로 인해 냉각된 공기와 IT 발열로 가열된 공기가 플레넘 공간에서 혼합되어 Case 3, 4에서 Inlet air point 온도는 Supply air point 온도 대비 6.47~7.64°C 감소하였고, Return air point 온도는 2.17~2.68°C 증가하였다.
- (3) 한 개의 IT space의 냉방 에너지 사용량은 한 개의 IT space의 냉방 시스템이 가동 중일 때 대비 모든 IT space의 냉방 시스템이 가동 중일 때 약 0.4% 감소하였다.

본 연구는 데이터센터 모델을 개발하였고, 추후 개발된 데이터센터 모델을 이용하여 냉방 시스템 효율적 운용 방안에 대한 연구를 진행할 예정이다.

Acknowledgement

이 논문은 2023년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2021R1C1C1010231).

References

- [1] 한국데이터센터연합회, Korea data center market 2021-2024, 2021. // (KDCC, Korea data center market 2021-2024, Korea Data Center Council, 2021.)
- [2] 산업통상자원부, 데이터센터 수도권 집중 완화 방안, 2023. // (Ministry of Trade, Industry and Energy, Measures to mitigate the concentration of data centers in the metropolitan area, 2023.)
- [3] 오세진, 데이터센터 폐열의 지역냉난방 활용 사례와 정책적 시사점, 에너지경제연구원, 2019. // (S.S. Oh, District cooling and heating utilization cases of data center waste heat and policy implications, Korea Energy Economics Institute, 2019.)
- [4] 장현재, 데이터센터의 급기온도 변화가 서버 냉각 성능에 미치는 영향에 대한 연구, 설비공학회논문집, 제30권 제2호, 2018.02, pp.83-91. // (H.J. Chang, A study on the effects of supply air temperature on the server cooling performance in a data center, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, 30(2), 2018.02, pp.83-91.)
- [5] 김지혜, 엄태운, 정차수, 외기냉방시스템이 적용된 데이터센터 CRAH의 급기온도와 설계 풍량에 따른 에너지성능 분석, 대한건축학회논문집 구조계, 제35권 제11호, 2019.11, pp.181-188. // (J.H. Kim, T.Y. Aum, C.S. Jeong, Energy performance of air-side economizer system for data center considering supply temperature and design airflow rate of CRAH(Computer Room Air Handler), Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction, 35(11), 2019.11, pp.181-188.)
- [6] J. Li, Z. Li, Model-based optimization of free cooling switchover temperature and cooling tower approach temperature for data center cooling system with water-side economizer, Energy and Buildings, 227, 2020.11, 110407.

- [7] U.S. Department of Energy, EnergyPlus version 9.3, 2020.
- [8] ASHRAE, ASHRAE Guideline 14-2014: Measurement of energy and demand savings, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2014.
- [9] 기상청 기상자료개방포털, 종관기상관측(ASOS), <https://data.kma.go.kr/data/grnd/selectAsosRltnList.do?pgmNo=36>, 2020. // (Korea Meteorological Administration, Automated Synoptic Observing System(ASOS), <https://data.kma.go.kr/data/grnd/selectAsosRltnList.do?pgmNo=36>, 2020.)