

데이터센터에 적용된 외기도입 냉방시스템에서 필터유형별 에너지 소비량 변화

Energy Consumption Analysis based on Filter Differential Pressure when Adopting an Air-side Economizer System for a Data Center

박성현(Seonghyun Park)¹, 서장후(Janghoo Seo)^{2*}, 정용호(Yong-Ho Jung)³,
장현재(Hyun-Jae Chang)⁴, 황석호(Seok-Ho Hwang)⁵

¹조선대학교 대학원 건축공학과, ²국민대학교 건축학부, ³청운대학교 건축환경설비학과,

⁴홍익대학교 건축공학과, ⁵경남대학교 건축학부

¹Department of Architectural Engineering, Graduate School, Chosun University, Gwangju 501-759, Republic of Korea

²School of Architecture, Kookmin University, Seoul 136-702, Republic of Korea

³Department of Architectural Environment, Chungwoon University, Hongseong 350-701, Republic of Korea

⁴Department of Architectural Engineering, Hongik University, Sejong 339-701, Republic of Korea

⁵Division of Architecture, Kyungnam University, Changwon 631-701, Republic of Korea

(Received January 29, 2013; revision received April 15, 2013)

Abstract Recently, many studies related to reducing the energy consumption in data centers have been conducted. These studies have mainly focused on the air intake and exhaust system of a computer room air handling unit (CRAH) in the server room, diffuser type, suppression and discharge of the heat generated from the server, and the air-side economizer system. In this study, the energy consumption of the conventional central chilled water cooling system is compared with the energy consumption of the air-side economizer system. We also examined how changes of differential pressure by each filter have influenced energy consumption, using the power usage effectiveness (PUE). Results show that the PUE was improved, and energy consumption decreased, by applying the air-side economizer system.

Key words Data center(데이터센터), Air-side economizer system(외기도입 냉방시스템), Filter differential pressure (필터 차압), TRNSYS(TRNSYS)

† Corresponding author, E-mail: seojh@kookmin.ac.kr

기호설명

Q : 열전달량 [kW]
 COP : 냉동기 성능계수 [-]
 m : 질량 유량 [kg/h]
 v : 체적 유량 [m^3/h]
 p : 비열 [kJ/(kg $^{\circ}C$)]
 d : 지름 [mm]

하첨자

R : 정격(rated)
 CHW : 냉수(chilled water)
 COW : 냉각수(cooling water)

1. 서론

최근 데이터센터의 에너지 사용량 절감을 위한 많은 연구들이 진행되고 있으며, 이러한 연구들은 주로 서버 룸 내 CRAH(Computer Room Air Handling Unit)의 급배기 시스템 방식, 취출구 방식, 서버 발생 열의 저감 및 배출 방법, 외기도입 냉방시스템 도입 등에 포커스가 맞추어져 CFD(Computational fluid dynamics) 해석방법에 의해 서버 룸 내의 효과적인 공기 흐름 제어를 통한 에너지 절약 방법을 강구하고 있다.⁽¹⁻³⁾ 이 중 외기도입 냉방시스템은 중간기 및 동절기에 외기를 직접적으로 서버 룸 내에 도입함으로써 기존 중앙냉수 냉방시스템

대비 에너지 소비량을 큰 폭으로 감소시킬 수 있는 장점이 있으나 오염된 외기가 직접적으로 서버에 유입될 경우 치명적인 오류를 발생시켜 서버기기 오작동에 의한 혼란을 초래할 수 있다. ASHRAE⁽⁴⁾에서는 데이터센터의 외기도입 냉방시스템 적용 시 필터사용에 대한 가이드라인을 제안하고 있다. 따라서 외기도입 냉방시스템을 적용한 데이터센터의 동적에너지 시뮬레이션을 수행 할 경우, 적용 필터별 필터차압에 의한 외기도입용 팬동력 변화를 고려하여야 하며, 이러한 결과값을 시뮬레이션에 반영해야 될 것으로 판단된다. 이에 본 연구에서는 Kwak et al.⁽⁵⁾에서 사용된 동일조건외의 공조기 팬을 동적에너지 시뮬레이션에 적용하여 기존 중앙냉수 냉방시스템과 필터차압을 고려하지 않은 외기도입 냉방시스템의 에너지 소비량을 분석하였다. 또한, 에너지 소비량 감소율 및 PUE(Power Usage Effectiveness)를 이용하여 적용 필터별 차압변화에 따른 에너지 소비량 분석 결과값을 검토하였다. 여기서 PUE는 데이터센터의 효율성과 생산성을 나타내는 대표적인 기준으로 데이터센터에서 사용되는 전력의 총합을 IT 장비에 사용되는 전력량으로 나눈 무차원 계수이다. 따라서 PUE가 높다는 것은 데이터센터의 IT장비를 냉각하기 위해 서버 룸에 소비되는 냉방에너지가 비효율적으로 높다는 것을 의미한다.

2. 데이터센터 동적에너지 시뮬레이션 개요

본 연구에서는 외기도입 냉방시스템 적용 시 필터 유형별 에너지 소비량을 분석하기 위하여 기존 중앙냉수 냉방시스템과 필터적용을 고려하지 않은 외기도입 냉방시스템의 전력 소비량을 산출하고, 이 후 등급별 필터적용에 따른 외기도입 팬 동력 증가를 고려한 외기도입 냉방시스템의 전력 소비량을 분석하였다. 또한 연간(8760시간) 데이터센터의 냉방에너지 소비량을 정량적으로 분석하기 위하여 TRNSYS 17.0⁽⁶⁾ 시뮬레이션을 사용하였으며, 외기조건은 자체 제공하는 서울기상 데이터를 사용하였다.

연구 대상 건물은 목동에 위치한 ○○데이터센터로 지하 4층, 지상 12층 규모로 2층부터 10층까지 총 9개 층에 IT서버 룸이 있으며, 바닥면적은 층별 22,500 m²이다. 서버 룸의 냉방방식은 중앙냉수 냉방시스템이 적용되었다. Table 1은 데이터센터 서버 룸의 부하계산을 위한 경계조건을 나타낸다. IT 서버의 발열량은 4 kW 급으로 층당 720대, 총 6,480대가 설치되어 있으며, 발열량 환산치는 층당 2,880 kW이다. 또한 조명 및 상주하고 있는 인원에 의해 발생하는 부하를 고려하였으며, 서버운전에 따른 부하패턴 변화는 시간별로 0.7~1.0을 적용하였다. Table 2는 대상 데이터센터의 설계도면을 참조하여 적용된 냉방시스템의 구성기기 경계조건을

Table 1 Boundary conditions of simulation

IT equipment heat load	Converted value of server heat 2,880 kW×9(floor)
Server operation schedule	Applied for each hour
	Load of each hour is 0.7~1.0
Lighting load	16 W/m ² ×2,250 m ² (floor area)
People load	Personnel/daily schedule of 20 residing personnel
Weather data	Seoul, Korea(obtained from TRNSYS)

Table 2 Outline of HVAC system

Equipment system	Specification	Unit	Power consumption
Chiller	$Q_R = 4,567$, COP = 6	8	765 kW
Cooling tower	Forced draft cooling tower, $Q_R = 6,345$	8	120 kW
Pump	$m_{CHW} = 56,400$, $p_{CHW} = 4.19$	8	110 kW
	$m_{COW} = 93,600$, $p_{COW} = 4.19$	8	160 kW
CRAH	Number of rows : 5 Number of tubes : 60 Tube outside d : 12 mm Tube inside d : 11 mm	324	7.5 kW
	Capacity		
Outdoor air supply fan	$v = 26,450$	748	11 kW

나타낸다. 중앙냉수 냉방시스템의 경우 CRAH를 제외한 구성기기의 대수가 8대로 동일하며, 외기도입 냉방시스템의 경우 추가적으로 외기도입용 급/배기팬 748대가 설치되었다.

터보 수냉식 냉동기는 표준상태(냉각수 입구수는 30℃, 냉수 출구수는 7℃)운전 조건에서 COP가 6으로 입·출구 온도변화에 따라 감소하거나 증가하게 되며, 냉수 설정 온도는 5℃이다.

냉각탑은 압입송풍식 개방형 방식으로 냉각탑 입·출구 냉각수 온도차(Range) 및 냉각수 출구온도와 입구공기 습구온도와의 차(Approach)는 5℃이다. 또한 냉각수 및 냉수는 물이며, 비열은 4.19 kJ/(kg℃)로 동일하다. 중앙냉수 냉방시스템의 경우 서버 룸의 발열에 따라 CRAH 유입 냉수유량을 By-pass 제어하여 냉동기의 소비 전력을 감소시켰으며, 냉각탑의 팬동력은 외기습구온도가 설계조건외의 외기습구온도 보다 낮을 경우, 온도에 따라 비례 가동되도록 설정되었다. 외기냉방시스템은 실내·외 엔탈피 차에 따라 외기도입량을

변풍량으로 제어하도록 설정하였으며, 시뮬레이션 수행 시간은 8760시간이다.

3. 시스템별 에너지 소비량 분석

3.1 중앙냉수 냉방시스템

Fig. 1은 중앙냉수 냉방시스템의 월별 각 구성기기의 전력 소비량을 나타낸다. 냉각탑 및 냉동기를 제외한 구성기기의 월별 전력 소비량은 일정한 것으로 나타났다. 이는 By-pass 제어를 통한 냉동기의 냉수 유입 온도만 변화하고, 펌프유량이나 CRAH의 풍량이 서버룸의 발열과 외기조건에 관계없이 고정유량으로 운전하기 때문이다. 또한 동절기에서 중간기 그리고 하절기로 접어들수록 냉동기의 소비 전력이 증가함을 확인하였다. 이는 외기 습구온도가 상승함에 따라 냉동기의 냉각수 유입온도가 올라가 COP가 감소하게 되고, 이에 따라 5℃의 냉수를 생산하기 위한 전력 소비가 증가하였기 때문이다. 냉각탑의 전력 소비도 외기 습구온도가 상대적으로 높은 하절기에 소폭 상승함을 확인하였다.

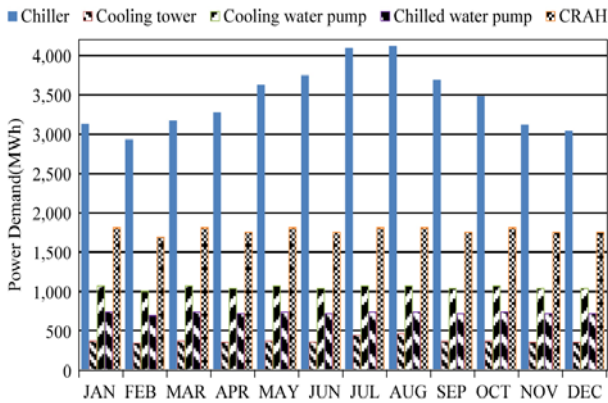


Fig. 1 Monthly energy consumption of HVAC system.

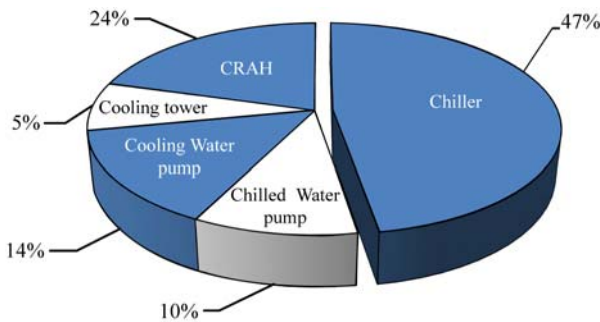


Fig. 2 Proportion of annual electric consumption of HVAC system.

Fig. 2는 중앙냉수 냉방시스템의 연간 전력 소비량에 대한 각 구성기기의 전력 소비량을 백분율로 나타낸 그래프이다. 냉동기의 전력 소비량이 전체 전력 소비량의 47%를 차지함을 확인하였다. 따라서 서버룸의 공조효율을 개선시키면 CRAH에서의 취출온도를 높일 수 있고, 이에 따라 냉동기에서 CRAH로 공급하는 냉수온도를 증가시켜 냉동기의 전력 소비량을 낮출 수 있을 것으로 판단된다.

3.2 외기 도입 냉방시스템

본 연구에 적용된 외기 도입 냉방시스템은 외기조건에 따라 가동되며, 중앙냉수 냉방시스템과 On/Off 제어된다. 따라서 외기 엔탈피가 설정엔탈피 보다 높은 경우에는 기존 방식과 동일하게 중앙냉수 냉방시스템이 가동된다. Fig. 3은 외기 도입 냉방시스템 가동 시 도입 외기의 엔탈피가 CRAH의 장치노점온도

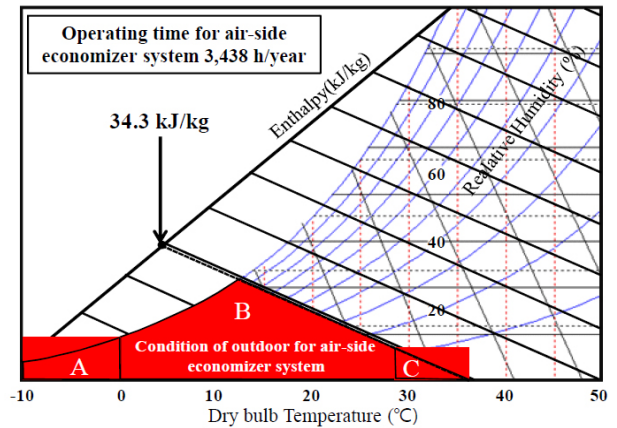


Fig. 3 Outdoor air conditions for operation of the air-side economizer system.

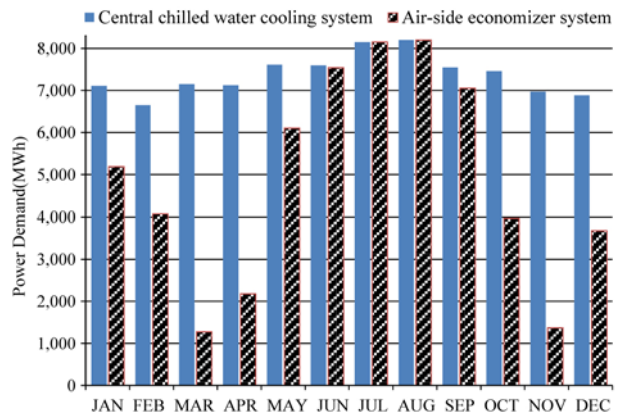


Fig. 4 Comparison of monthly energy consumption.

(13℃, 90%) 상태의 엔탈피 (34.3 kJ/kg)보다 낮을 경우 별도의 제습부하 없이 외기를 이용할 수 있다. 그러나 Fig. 3의 A와 C영역의 너무 낮거나 높은 외기가 서버 기기의 작동오류를 유발시킬 수 있다. 따라서 본 연구에서는 이를 고려하여 엔탈피제어에 외기 건구온도 0℃ 이상 28℃ 이하 조건을 추가하였으며, 이에 따라 B영역의 외기조건에서 시스템이 가동하도록 설정하였다. 외기도입 가능 시간은 서울기상데이터를 기준으로 연간 3,438시간이다.

Fig. 4에 기존 중앙냉수 냉방시스템 및 외기도입 냉방시스템의 월별 전력 소비량을 나타낸다. 너무 낮거나 높은 외기조건을 형성하는 동절기와 하절기에는 전력 소비량 감소율이 다소 낮았으나, 외기도입 냉방시스템 적용에 따른 연간 전력 소비량 감소율은 약 38%로 기존 시스템 대비 에너지 절감효과가 큰 것으로 나타났다.

4. 외기도입 냉방시스템의 필터차압에 따른 전력 소비량 분석

4.1 외기도입 냉방시스템 필터 개요

ASHRAE에서는 데이터센터에서 외기도입 냉방시스템 도입 시 사용되는 필터의 등급을 MERV(Minimum Efficiency Reporting Value) 지표를 사용하여 제한하고 있으며, 11에서 13급을 서버 룸 유입 공기개선을 위한 필터등급으로 제한하고, 최소 8급 이상의 필터를 사용하도록 권장한다. 따라서 본 연구에서는 외기도입 냉방시스템에 MERV 8급, 13급, 16급에 해당하는 필터를 적용하여 필터적용에 따른 전력 소비량 산출을 위한 동적에너지 시뮬레이션을 수행하였다. Table 3은 적용 필터별 개요를 나타낸다.

4.2 필터압력손실에 의한 팬 전력소비량 증가

외기도입 냉방시스템 적용 시 필터 적용 등급별 압력손실차 뿐만 아니라 필터 막힘에 따른 교체주기를 고려하여야 한다. 이에 따라 사용일수를 기준으로 필터 막힘점을 예측하였다. 또한 본 연구의 시뮬레이션은 시간단위로 해석되었기 때문에 이를 Table 4의 외기도입 냉방시스템 가동 시간별 일수로 환산하여 일별 압력손실 증가치를 계산하였고, 그 결과인 연중 필터별 압력손실을 Fig. 5에 나타냈다. 외기조건에 따라 가동되는 외기도입 냉방시스템에 필터가 적용 될 경우, 교체주기가 250일인 Prefilter는 필터교체점인 최종압력 128 Pa에 도달 일수가 500일로 예측되었으며, 교체주기 200일인 Medium Filter는 451일, 교체주기 140일인 HEPA filter는 332일로 예측되었다.

Fig. 6은 Fig. 5의 임의의 점에서 동일한 풍량을 서버

Table 3 Overview for each filter

Filter type	Merv	Size	Air Volume (CMM)	Pressure Drop(Pa)		Repair (Day)
				Initial	Final	
Pre filter	8	610×610×292	59	69	128	250
Medium filter	13	610×610×292	56	137	343	200
HEPA filter	16	610×610×292	56.6	249	498	140

Table 4 Conversion factor for each operating hour

Operating time of air-side economizer system(Hour)	Conversion factor of day about operating hour(-)
0	0
1~6	0.25
7~12	0.5
13~18	0.75
19~24	1

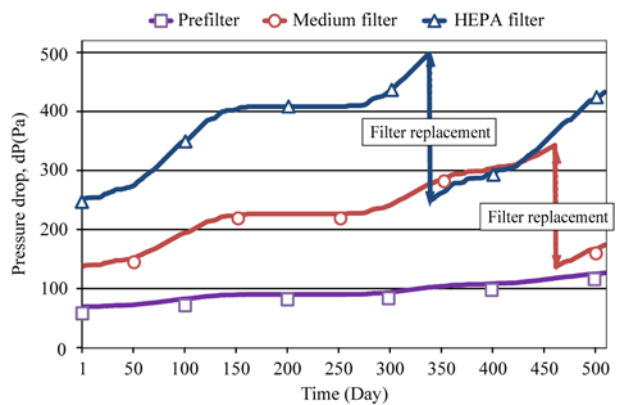


Fig. 5 Pressure drop of each filter with elapsed time.

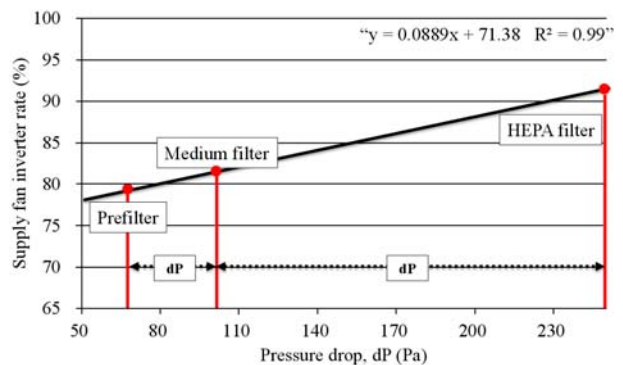


Fig. 6 Inverter rotating of supply fan.

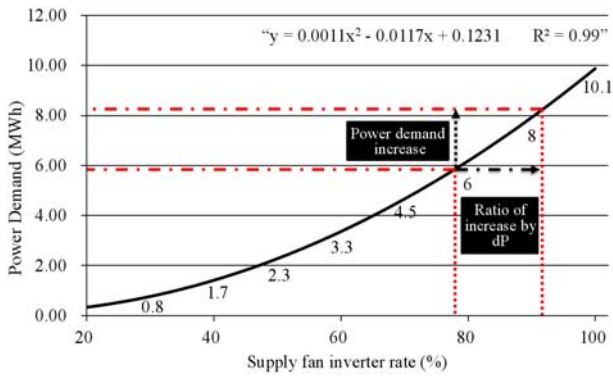


Fig. 7 Change of electric consumption by inverter rotating rate.

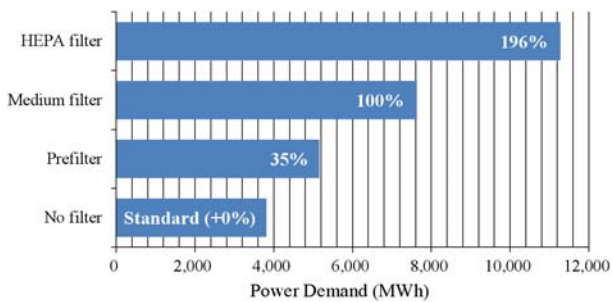


Fig. 8 Annual electric consumption for supply fan.

룸으로 공급하기 위한 적용 필터별 급기팬의 인버터 회전율을 나타낸다. 필터의 등급이 높아질수록 동일 풍량을 서버 룸으로 공급하기 위한 급기팬의 인버터 회전율이 높아짐을 확인하였다. 결국 서버 룸으로 공급하는 외기의 풍량을 동일하게 하기 위해서는 외기도입용 급기팬의 인버터 회전이 증가하여야 하고, 이에 따라 팬의 소비전력도 증가하게 된다는 것이다. Fig. 7은 본 연구에서 적용된 외기도입용 급기팬의 인버터 회전을 증가에 따른 전력 소비량 변화를 나타낸다. 이를 시간별로 산출하여 외기도입 급기팬의 연간 총 전력 소비량을 분석하였으며, Fig. 8과 같다.

ASHRAE의 권장 필터등급인 Medium filter의 경우 필터 종류 및 막힘에 의한 급기팬 소비 전력 증가율이 필터를 고려하지 않은 외기도입 냉방시스템의 급기팬 소비전력 대비 100%로 나타났다. 이는 외기도입 냉방시스템을 적용한 냉방시스템의 에너지 소비량 예측 시물레이션에서 필터에 의한 압력손실을 고려하는 것이 중요한 요소임을 나타낸다.

4.3 적용필터별 냉방시스템 전력소비량 분석

Fig. 9는 중앙냉수 냉방시스템 및 적용 필터별 외기도입 냉방시스템의 연간 총 전력 소비량을 나타낸다.

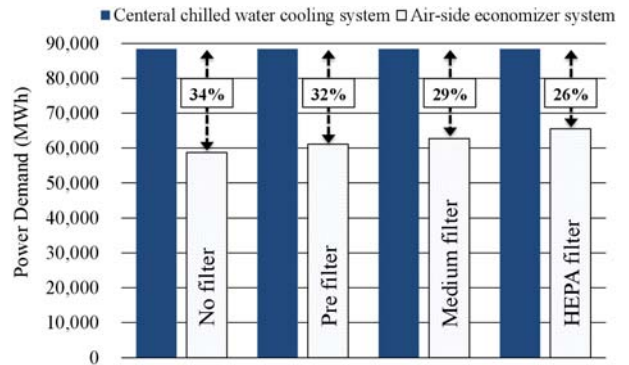


Fig. 9 Total yearly power consumption of each cooling system.

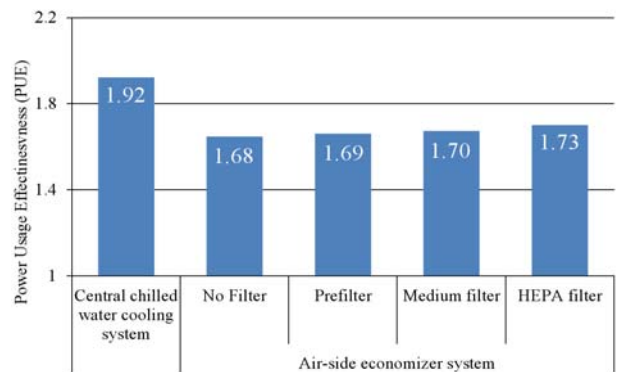


Fig. 10 PUE values of each cooling system.

필터의 등급이 높아짐에 급기팬의 전력 소비량이 큰 폭으로 증가하였고, 이에 따라 중앙냉수 냉방시스템 대비 연간 총 전력 소비량이 34% 감축에서 32%, 29%, 26%로 감소폭이 낮아지는 것으로 나타났다. 이 중 Medium filter 적용에 따른 5%의 전력 소비량 증가를 2012년도 산업전기로 기본요금인 7,040원/kW으로 간이적으로 계산하여 전력 사용요금으로 환산하면 약 2억 2천만 원이다.

Fig. 10은 중앙냉수 냉방시스템의 전력 소비량에서의 PUE(Power Usage Effectiveness) 값인 1.92를 기준 PUE 값으로 설정하고, 필터유형별 외기도입 냉방시스템의 전력 소비량을 PUE로 환산하여 나타낸 그래프이다. 외기도입 냉방시스템에 Medium filter를 적용할 경우 PUE가 기존 1.92에서 1.70로 개선됨을 확인하였다. Green Grid에서는 PUE가 1.70인 경우 총 6개의 등급 중 3번째인 Silver 등급을 부여한다.⁽⁷⁾

5. 결 론

본 연구에서는 TRNSYS 17.0 동적에너지 시물레이션을 수행하여 각 냉방시스템별 전력 소비량을 검토하고,

필터차압 변화가 외기도입 냉방시스템의 전력 소비량에 미치는 영향을 분석하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

- (1) 중앙냉수 냉방시스템의 경우 냉동기의 전력 소비량이 전체 냉방시스템 전력 소비량의 47% 차지하는 것으로 나타났으며, 하절기에는 다소 높은 외기 습구온도에 의한 냉각수 온도상승으로 전력 소비량이 연중 가장 높은 것을 확인하였다.
- (2) 제습 및 서버기기 오류발생을 고려한 외기도입 냉방시스템을 적용할 경우 중앙냉수 냉방시스템 대비 38%의 전력 소비량을 감소시킬 수 있는 것으로 나타났다.
- (3) 외기도입 냉방시스템 적용 시 **MERV** 등급별 필터 적용에 따라 최소 35%, 최대 196% 외기도입 급기팬의 전력 소비량이 증가하는 것으로 나타나 외기도입 냉방시스템 전력 소비량 예측 시뮬레이션 수행 시 필터차압에 대한 고려가 필요할 것으로 판단된다.
- (4) 냉방시스템 및 적용 필터별 **PUE**를 산정한 결과, 외기도입 냉방시스템을 적용할 경우 **MERV** 등급에 따라 값의 차이는 발생 하였으나, **PUE**가 다소 개선되어 외기도입 냉방시스템에 의한 에너지 소비량 감축효과가 있음을 확인하였다.

후 기

본 연구는 2012년도 국토해양부 첨단도시개발사업 및 한국연구재단의 연구비지원(과제번호 : 14CHUD-C062 125-01-000000), (No.2012-0008837)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. Ibrahim, M., Bhopte, S., Sammakia, B., Murray, B., Iyenger, M., and Schmidt, R., 2012, Effect of Transient Boundary Conditions and Detailed Thermal Modeling of Data Center Rooms, Packaging and Manufacturing Technology, Vol. 2, No. 2, pp. 300-310.
2. Fakhim, B., Behnia, M., Armfield, S. W., and Srinarayana, N., 2011, Cooling solutions in an operational data centre : A case study, Vol. 31, No. 14/15, pp. 2279-2291.
3. Cho, J. K. and Kim, B. S., 2011, Evaluation of air management system's thermal performance for superior cooling efficiency in high-density data centers, Energy and Building, Vol. 43, No. 9, pp. 2145-2155.
4. ASHRAE, 2009, Particulate and Gaseous Contamination in Datacom Environments, Vol. 8.
5. Kwak, R. Y., Won, G. H., Jung, K. W., and Hug, J. H., 2004, Evaluation of energy saving and development of energy management system of AHU's fan by air filter differential pressure in building, Journal of the Architectural Institute of Korea, Vol. 20, No. 5, pp. 209-216.
6. TRNSYS 17(Transient System Simulation Program), 2011, Solar Energy Lab, Rep., University of Wisconsin-Madison.
7. The Green Grid, 2009, Usage and Public Reporting Guidelines for the Green Grid's Infrastructure Metrics (PUE/DCiE).