

# 데이터센터용 멀티 외기이용 냉방시스템의 지역별 에너지 절감효과에 대한 연구

박문기\* · 장현재\*\*\*

\*ECODA 기업부설연구소

\*\*홍익대학교 건축공학과

## A Study on the Regional Energy Conservation Effects of a Multi-stage Outdoor Air Enabled Cooling System in a Data Center

Park Moon-Ki\* · Chang Hyun-Jae\*\*\*

\*Research center, ECODA

\*\*School of Architectural Engineering, Hongik University

†Corresponding author: changhj@hongik.ac.kr

### Abstract

A Data center houses a large number of server computers, storage and etc in racks. With the rapid increase of heat generation rates per rack in a data center, energy consumption rates for cooling have been increased year by year. In this study, energy conservation effects of a MOA (multi-stage outdoor air enabled) cooling system in a data center has been investigated when it is applied to 5 different locations, Korea. As results, Energy conservation effects of the MOA cooling system was achieved at about 20% to 30%. Humidifier operation time was 40 to 55 days when supply air temperature was maintained at 13, and humidity condition was kept within the allowed range even though humidifier was off. Furthermore, humidification was not needed when supply air temperature was maintained at 25°C. In selected 5 locations in Korea, the difference of regional climatic conditions affected no more than 5% in cooling energy consumption rates.

**Keywords:** 데이터센터(Data center), 이코노마이저 사이클(Economizer cycles), 에너지 시뮬레이션(Energy simulation), 에너지절약(Energy conservation)

### 기호설명

MOA : Multi-stage outdoor air

SAT : Supply air temperature (°C)

LWT : Leaving water temperature (°C)

SH : Sensible heat (W)

LH : Latent heat (W)

 OPEN ACCESS



Journal of the Korean Solar Energy Society  
Vol.37, No.1, pp.71-80, February 2017  
<https://doi.org/10.7836/kjes.2017.37.1.071>

pISSN: 1598-6411

eISSN: 2508-3562

Received: 31 December 2016

Revised: 13 January 2017

Accepted: 16 January 2017

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.

- CRAC : Computer room air conditioner
- WBT : Wet-bulb temperature (°C)
- DP : Dew-point temperature (°C)
- DBT : Dry-bulb temperature (°C)
- RH : Relative humidity (%)
- Alt. : Altitude (m)
- SD : Standard deviation

## 1. 서론

최근의 IT 산업의 발전과 함께 데이터센터의 수요도 급증하고 있다. 데이터센터는 대량의 서버 컴퓨터와 저장장치 등을 수용하고 운영하는 곳으로서, 서버 컴퓨터 등으로부터의 발열량이 매우 커서 냉방부하가 일반 오피스 빌딩의 10~20배에 이른다. 데이터 센터는 내부 발열량이 부하의 대부분을 차지하기 때문에 겨울철에도 냉방을 해야 하며, 에너지 다소비 건물로서 냉방에너지 절약의 필요성이 크게 대두되고 있다. 서버 컴퓨터 등의 안정적 운영을 위한 실내 환경기준<sup>1)</sup>을 Table 1에 나타낸다.

데이터센터의 에너지 절약을 위한 연구로서, 조진균<sup>2)</sup> 등은 국내 기후조건에서 외기냉방시스템과 외기냉수냉방시스템의 에너지 절감효과에 대해 검토하였으며, 에너지 절감효과의 관점에서는 외기냉방이 외기냉수냉방에 비해 훨씬 유리하지만, 공기청정, 가습/제습 에너지, 설치비용 등의 종합적 고려가 필요함을 강조하였다. 함상우<sup>3)</sup> 등은 모듈러 데이터센터를 대상으로, 국내 5개 지역에서 다양한 외기냉방 시스템과 급기 조건 변화시의 에너지 성능을 분석하였으며, 외기를 직접도입하는 방식보다 간접도입하는 방식의 에너지 절감효과가 더 크다고 하였다. 김제영<sup>4)</sup> 등은 멀티 외기이용 냉방시스템(MOA cooling system, multi-stage outdoor air enabled cooling system)을 소개하고, 이 시스템의 에너지 절감효과, 외기도입량 및 가습기 운전시간 등에 대해 외기냉방 및 외기냉수냉방 시스템과 비교하여 분석하였다.

**Table 1** Thermal guidelines for data processing environments

Class	Product operation				Maximum rate of change (°C/h)	Product power off		
	Dry-bulb temperature (°C)	Humidity range, noncondensing	Maximum dew point (°C)	Maximum elevation (m)		Dry-bulb temperature (°C)	RH (%)	Maximum dew point (°C)
Recommended (Suitable for all 4 classes; explore data center metrics in this paper for conditions outside this range.)								
A1 to A4	18 to 27	0.029	43	1,220				
Allowable								
A1	15 to 32	20% to 80%RH	17	3050	5/20	5 to 45	8 to 80	27
A2	10 to 32	20% to 80%RH	21	3050	5/20	5 to 45	8 to 80	27
A3	5 to 40	-12°C DP and 8%RH to 85%RH	24	3050	5/20	5 to 45	8 to 80	27
A4	5 to 45	-12°C DP and 8% RH to 90RH	24	3050	5/20	5 to 45	8 to 80	27
B	5 to 35	8% to 80%RH	28	3050	N/A	5 to 45	8 to 80	29
C	5 to 40	8% to 80%RH	28	3050	N/A	5 to 45	8 to 80	29

본 연구에서는, 멀티 외기이용 냉방시스템을 국내 5개 도시에 적용한 경우의 에너지 절감효과에 대해 검토하여, 지역에 따른 에너지 절감효과의 차이를 비교·분석하고자 한다.

## 2. 외기이용 냉방시스템

### 2.1 이코노마이저 사이클

이코노마이저 사이클(Economizer cycles)은 데이터센터의 냉방에너지 절약을 위한 대표적인 외기이용 시스템으로서, 외기냉수냉방 시스템(Water-side economizer cycles)와 외기냉방 시스템(Air-side economizer cycles)이 있다.

외기냉수냉방 시스템은 중앙 수냉식 냉방시스템의 냉각탑을 매개로 하여 외기의 온·습도 조건이 냉각탑의 냉각수만으로 필요한 냉수온도를 만들 수 있을 때 사용하는 방식이며, 외기의 직접도입이 없기 때문에 기습 또는 제습부하가 발생하지 않고, 외기 도입에 의한 오염물질 유입의 우려가 없다. 그러나 외기온도가 충분히 낮은 경우에만 사용할 수 있어 이용가능 시간이 외기냉방 시스템에 비해 짧은 편이다<sup>5)</sup>.

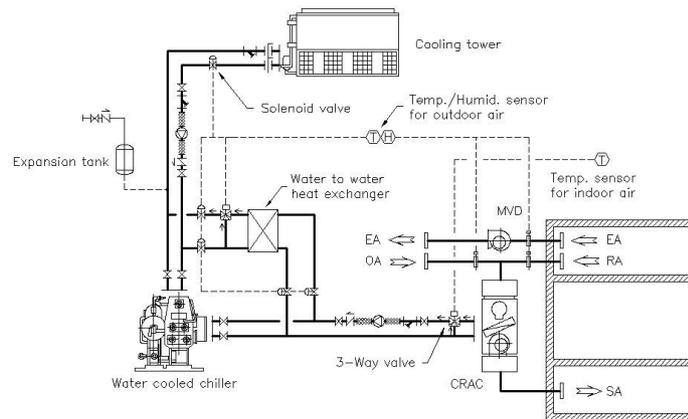
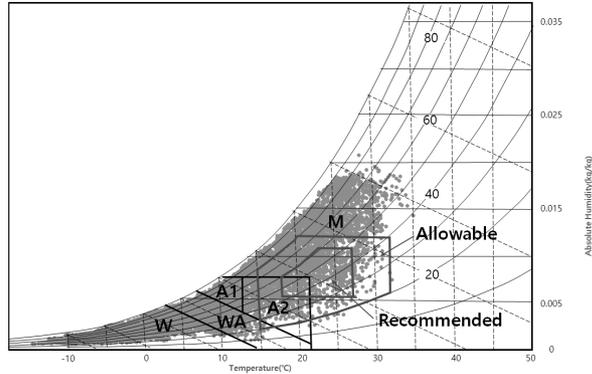


Fig. 1 Schematic of the Multi-stage outdoor air enabled (MOA) cooling system<sup>4)</sup>

외기냉방 시스템은 외기를 직접 또는 간접 도입하여 실내를 냉방하는 시스템으로서, 이용가능 시간이 외기냉수냉방 시스템에 비해 길고 에너지 절약 효율이 상대적으로 높은 편이다. 그러나 외기를 직접 도입하는 경우는, 기후특성에 따라 기습부하가 현열부하 저감률보다 오히려 커질 수가 있으며<sup>6)</sup>, 오염물질의 유입에 대한 우려도 있다<sup>5)</sup>. 분진오염에 대해서는 MERV 11등급 이상의 필터를 사용하면 문제시 되지 않는다는 보고<sup>7)</sup>도 있다.

멀티 외기이용 냉방시스템은 외기냉수냉방 시스템과 외기냉방시스템의 특성이 서로 상반된다는 점에 착안하여, 두 시스템을 조합한 시스템이다(Fig. 1 참조<sup>4)</sup>). 즉, 외기이용 시간이 짧지만 외기의 직접도입에 따르는 우려가 없는 외기냉수냉방 시스템을 우선적으로 사용하고, 외기냉수냉방 시스템만으로는 냉방부하 제거가 불충분한 경우에 대해 외기냉방 시스템을 부분적 또는 전면적으로 활용하는 시스템이다. 이를 통해 외기를 이용한 이코노마이저 사이클을 보다 효율적으로 사용할 수 있을 것으로 기대된다. 외기 조건에 따른 멀티 외기이용 냉방시스템의 운전 모드를 Fig. 2<sup>4)</sup>에 나타낸다.



- Zone “W”: Water-side economizer operates.
- Zone “WA”: Water-side economizer operates first, and is compensated by air-side economizer.
- Zone “A1”: Air-side economizer operates when the enthalpy and the temperature of outside air are lower than those of the supply air.
- Zone “A2”: Air-side economizer operates with the aid of mechanical cooling system when the enthalpy and the temperature of outdoor air are lower than those of the return air.
- Zone “M”: Mechanical cooling system operates.

Fig. 2 Operation modes of multi-stage outdoor air enabled (MOA) cooling system<sup>4)</sup>

## 2.2 냉수 출수온도와 냉동기 효율

데이터센터의 효율적인 기류제어를 위해 물리적인 차단장치를 설치하여 CRAC (Computer room air conditioner)에 서 취출되는 냉기류와 서버 컴퓨터에서 취출되는 더운 공기가 서로 섞이지 않도록 하는 방법들이 개발되고 있다. 대표적인 경우로서, 콜드 아일(cold aisle) 또는 핫아일(hot aisle)에 판넬을 이용한 벽면과 천장을 설치하여 기류혼합을 차단한 컨테인먼트(Containment) 시스템이 있고, 서버 랙(server rack) 자체를 밀폐형으로 한 밀폐형 랙(Rack enclosure)<sup>8)</sup> 시스템이 있다. 이와 같은 물리적 차단 시스템을 사용하면 핫아일의 더운 공기와의 혼합을 고려하여 필요 이상의 낮은 온도로 공급하던 CRAC으로부터의 급기온도를 보다 높게 할 수 있게 되고, 이는 냉동기의 출수온도 상승을 가능하게 함으로써, 결과적으로 냉동기의 효율 증대로 이어질 수 있다. Fig. 3에 냉동기 출수온도와 냉동기 효율과의 관계<sup>9)</sup>를 나타낸다.

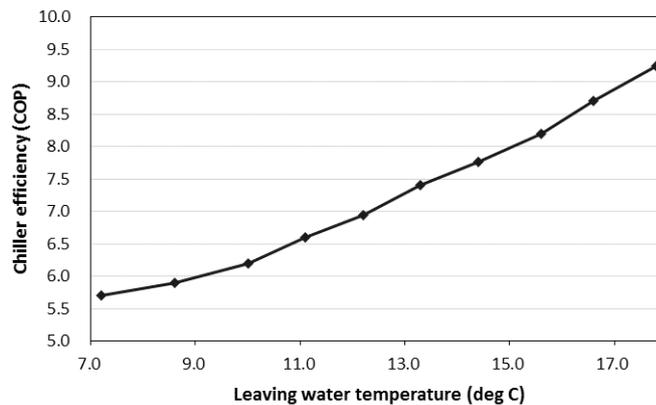


Fig. 3 Chiller efficiency as a function of leaving chilled water temperature

또한, 급기온도의 상승은 이코노마이저 사이클의 외기이용 범위를 증가시켜 외기를 이용한 에너지 절약 효과를 높이는 데 기여할 수 있다.

### 3. 대상지역의 선정 및 시뮬레이션 개요

멀티 외기이용 냉방시스템은 기본적으로 외기를 이용한 시스템이기 때문에 데이터센터를 건립하는 대상 지역의 외기 조건에 크게 영향을 받을 수밖에 없다. 따라서 연평균 기온을 기준으로, 지역적 배치를 고려하여 서울을 포함한 5개 지역을 선정하였다. 이들 5개 지역의 기상조건을 Table 2에 나타낸다.

데이터센터의 에너지 소비량은 TRNSYS 17을 이용한 에너지 시뮬레이션을 통해 검토하였다. 기상데이터는 선정된 5개 지역에 대한 기상청의 최근 10년간 기상 관측치의 평균을 구하여 이용하였다. 데이터센터의 구성<sup>4)</sup>을 Table 3에 나타낸다. 또한, 서버 컴퓨터의 발열 스케줄<sup>4)</sup> 및 냉방시스템의 사양<sup>4)</sup>을 각각 Table 4와 Table 5에 나타낸다.

**Table 2** Climate conditions of 5 cities

Cities	Alt. (m)	Temperature (°C)				Enthalpy (kJ/kg)			
		Avg	Max	Min	SD	Avg	Max	Min	SD
Seoul	85	12.7	30.8	-8.2	10.4	30.5	76.2	-5.5	22.7
Jansu	406	10.8	29.7	-10.3	10.2	28.5	69.8	-6.9	21.5
Jecheon	263	10.5	30.6	-12.1	10.7	27.2	72.2	-9.3	21.6
Bongwha	319	9.9	30.4	-14.3	10.6	26.5	72	-11.9	21.9
Taebaek	712	8.9	28.4	-12.1	9.9	23.4	64	-9.6	19.8

**Table 3** Configurations of the target data center

Items	Specifications	
Floor area	2,250 m <sup>2</sup> ×9story	
No. of server computer racks	720 EA/floor × 9 story	
Server computers	2,880 kW/floor × 9 story	
Heat gains from	Lighting	49.5 kW/floor × 9 story
	People	SH : 60 W/p × 20 p/floor × 9 story
		LH : 40 W/p × 20 p/floor × 9 story

**Table 4** Heat generation schedule of server computers

Time	Weekday (%)	Weekend (%)
00:00 – 09:00	90	80
09:00 – 21:00	100	90
21:00 – 24:00	90	80

**Table 5** Specifications of mechanical cooling system

Equipment	Quantity	Capacity	Power	Control mode
Chillers	8	1,300 USRT	765 kW	Multiple units control
Cooling towers	8	1,400 USRT	37×3 kW	Multiple units control
Chilled water pumps	8	9,400 LPM	110 kW	Full operation/ OFF in air-side mode
Condenser water pumps	8	15,600 LPM	160 kW	Multiple units control
CRAH unit	324	105 kW	7.5 kW	CAV
Exhaust fan	81	912 CMH	30 kW	VAV
Humidifier (mist spray type)	324	113 kg/h	1 kW	ON/OFF control

## 4. 결과 분석

### 4.1 냉방에너지 소비량과 가습기 운전 시간(1)

급기온도 13°C로 냉방할 때(Table 6, Table 7 참조)의 지역별 및 운전방식별 에너지 소비량에 대한 시뮬레이션 결과를 Fig. 4에 나타낸다. 냉방 시스템의 구성 요소별 에너지 소비량에 대한 자세한 분석은 참고문헌<sup>4)</sup> 참조 바란다. 구체적인 운전 방식에 대해서는 Table 8에 나타낸다. 서울에서의 기계식 냉방시스템(Operatig mode “M”) 운전에 의한 에너지 소비량을 100%으로 하여, 각 운전방식별로 서울을 기준으로 한 에너지 소비량을 백분율로 나타내었다. 출수온도 13°C의 경우, 외기냉수냉방 시스템의 경우(Operating mode “W\_M”)는 87.7%의 에너지 소비량을 나타내었으며, A1 타입의 외기냉방의 경우(Operating mode “A1\_M”)는 73.4%를 나타내었다. A2 타입의 외기냉방 시스템(Operating mode “A2\_M”)은 69.2%로서 에너지 절감효과(31.2%)가 가장 크게 나타났다. MOA1 타입의 멀티 외기이용 냉방시스템은 83.1%, MOA2 타입의 경우는 78.9%를 나타내어, 외기냉수냉방보다는 작고 외기냉방보다는 큰 에너지 소비량을 나타내었다. 지역별 냉방에너지 소비량의 차이는 그리 크지 않은 것으로 나타났다.

**Table 6** Conditions of the cooling system (1)

Items	Temperature
Supply air temperature	13°C
Leaving water temperature of chiller	5°C
Cooling water temperature in mechanical cooling mode	32°C

**Table 7** Operating conditions of the MOA cooling system (when LWT is 5°C and SAT is 13°C)

Operating mode	Outdoor air conditions
W	WBT ≤ 3°C
WA	3°C < WBT ≤ 7°C
A1	Enthalpy ≤ 34.3 kJ/kg, and DBT ≤ 13°C, and DP ≤ 10.5°C
A2	34.3 kJ/kg < Enthalpy ≤ 43.8 kJ/kg, and DBT ≤ 21.5°C, and DP ≤ 10.5°C
M	43.8 kJ/kg < Enthalpy, or 21.5°C < DBT, or 10.5°C < DP

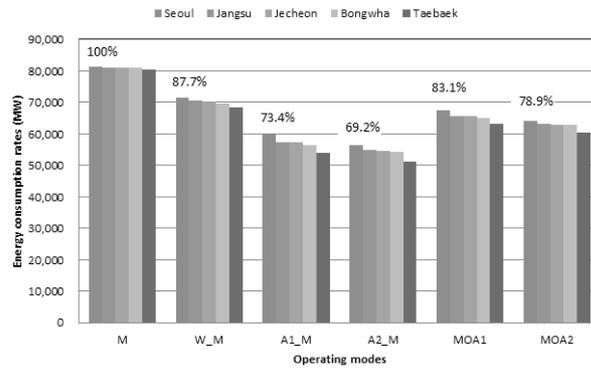


Fig. 4 Energy consumption rates in each cities and in operating modes (Supply air temp. 13°C)

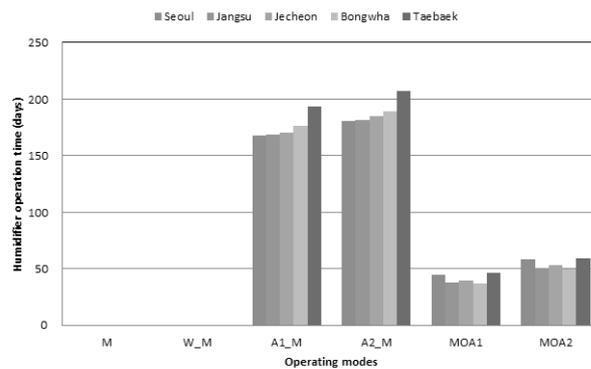


Fig. 5 Humidifier operation time (Supply air temp. 13°C)

Table 8 Operating conditions of each operating mode<sup>4)</sup>

Operating mode	Operating conditions
M	Mechanical cooling operates alone throughout the whole outdoor air conditions zones.
W_M	Water-side economizer operates when wet-bulb temperature of outside air is low enough in zone “W”, and mechanical cooling operates under the other outside air conditions.
A1_M	Air-side economizer operates in zone “W”, “WA” and “A1”. In the other outside air conditions zones, mechanical cooling operates alone.
A2_M	Air-side economizer operates in zone “W”, “WA” and “A1”, and air-side economizer operates with the aid of mechanical cooling in zone “A2”. In the other outside air condition zone, mechanical cooling operates alone.
MOA1	Water-side economizer operates in zone “W”, water-side economizer operates with the aid of air-side economizer in xone “WA”. and air-side economizer operates in zone “A1”. In the other outside air conditions zones, mechanical cooling operates alone.
MOA2	Water-side economizer operates in zone “W”, water-side economizer operates with the aid of air-side economizer in xone “WA”. air-side economizer operates in zone “A1”, air-side economizer operates with the aid of mechanical cooling in A2. In the other outside air conditions zones, mechanical cooling operates alone.

Fig. 5는 각 지역별 및 운전방식별 가습기 운전시간을 일(days) 단위로 나타낸다. 기계식과 외기냉수냉방 시스템의 경우는 가습기 운전시간이 “0”이며, 외기냉방 시스템의 경우는 A1 타입과 A2 타입 모두 170일을 상회하는 값을 나타낸다. MOA1 타입의 경우는 40일 전후를 나타내며, 가습기를 가동하지 않는 경우라도 ASHRAE의 실내 환경기준의 허용범위

를 벗어나지는 않았다. MOA2 타입의 경우는 55일 전후를 나타내었으며, 가슴기를 가동하지 않은 경우라도 ASHRAE 기준의 허용범위를 벗어나지는 않았다. 지역별로는 태백의 경우가 가장 크게 나타났으나, 지역별 차이는 그리 크지 않았으며, A1, A2 타입의 경우에 최대 26일, MOA1, MOA2 타입의 경우에는 최대 9일의 차이를 나타냈다.

#### 4.2 냉방에너지 소비량과 가슴기 운전 시간 (2)

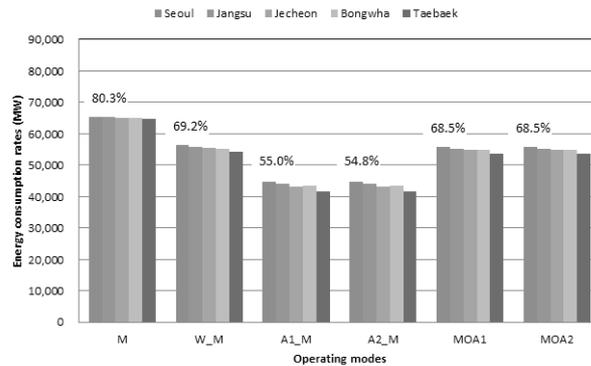
급기온도 25°C로 냉방할 때(Table 9, Table 10 참조)의 지역별 및 운전방식별 에너지 소비량에 대한 시뮬레이션 결과를 Fig. 6에 나타낸다. 그래프 상부에 백분율로 나타낸 숫자는 출수온도 13°C의 기계식 냉방시스템(서울 기준)의 에너지 소비량을 100%으로 하여, 각 운전방식별(서울 기준) 에너지 소비량을 백분율로 나타낸 것이다. 출수온도 25°C의 경우, 출수온도 상승에 따른 냉동기의 효율 향상에 의해 기계식 냉방시스템(Operating mode “M”)의 경우도 약 20%의 에너지 절감효과가 발생하여 에너지 소비량은 80.3%를 나타낸다. 외기냉수냉방 시스템의 경우(Operating mode “W\_M”)는 69.2%, A1 타입의 외기냉방의 경우(Operating mode “A1\_M”)는 55.4%를 나타낸다. A2 타입의 외기냉방(Operating mode “A2\_M”)은 54.8%로서, 가장 작은 에너지 소비량을 나타낸다. MOA1 타입과 MOA2 타입의 경우는 모두 68.5%의 에너지 소비량을 나타내었다.

**Table 9** Conditions of the cooling system (2)

Items	Temperature
Supply air temperature	25°C
Leaving water temperature of chiller	17°C
Cooling water temperature in mechanical cooling mode	32°C

**Table 10** Operating conditions of the MOA cooling system (when LWT is 17°C and SAT is 25°C)

Operating mode	Outdoor air conditions
W	WBT ≤ 15°C
WA	15°C < WBT ≤ 19°C, and DP ≤ 15°C
A1	Enthalpy ≤ 52.1 kJ/kg, and DBT ≤ 25°C, and DP ≤ 15°C
A2	52.1 kJ/kg < Enthalpy ≤ 61.8 kJ/kg, and 25°C < DBT ≤ 33.5°C, and DP ≤ 15°C
M	61.8 kJ/kg < Enthalpy, or 33.5°C < DBT, or 15°C < DP



**Fig. 6** Energy consumption rates in each cities and in operating modes (Supply air temp. 25°C)

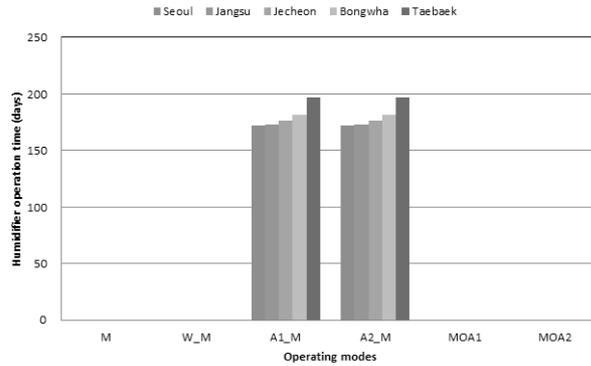


Fig. 7 Humidifier operation time (Supply air temp. 25°C)

지역별 냉방에너지 소비량의 차이는 크지 않은 것으로 나타났다.

Fig. 7는 각 지역별 및 운전방식별 가습기 운전시간을 나타낸다. 기계식과 외기냉수냉방 시스템의 경우는 가습기 운전 시간이 “0”이며, 외기냉방 시스템의 경우는 A1 타입과 A2 타입 모두 170일을 상회하는 값을 나타내었다. MOA1 타입과 MOA2 타입 모두 급기온도를 25°C로 하는 경우는 가습기 운전시간이 “0”으로써, 가습기를 전혀 필요로 하지 않는 것으로 나타났다. A1, A2 타입의 외기냉방에서 지역별로는 태백의 경우가 197일로써 가장 크게 나타났으며, 지역별 차이는 최대 25일을 나타냈다.

#### 4.3 지역별 냉방에너지 소비량의 차

앞의 검토에서, 5개 지역에서의 지역별 냉방에너지 소비량은 큰 차이를 나타내지 않았다. 서울과 태백에서의 차이가 가장 큰 것으로 나타났으며, 이 차이 값(서울에서의 냉방에너지 소비량 - 태백에서의 냉방에너지 소비량)을 Table 11에 나타낸다. 서울과 태백에서의 냉방에너지 소비량의 차이는 모든 운전방식과 급기온도 13°C 및 25°C, 모두의 경우에서 5% 미만의 차이를 나타냈으며, 이는 주로 서울과 태백의 연평균 온도차(3.8°C)가 크지 않은데 기인한 것으로 판단된다.

이상의 결과로부터, 국내의 지역적 기후특성을 이용한 데이터센터 외기이용 냉방시스템의 에너지 절약 효과는 그리 크지 않은 것으로 나타났으며, 따라서, 국내에서 데이터 센터의 부지 선정 시에는 기후조건에 대해 크게 고려할 필요가 없을 것으로 사료 된다.

Table 11 The difference of energy conservation effects between in Taebaek and in Seoul

Supply air temp.	Mode “M”	Mode “W_M”	Mode “A1_M”	Mode “A2_M”	Mode “MOA1”	Mode “MOA2”
13°C	0.7 %	2.6 %	3.8 %	3.6 %	2.4 %	2.4 %
25°C	0.9 %	3.2 %	4.7 %	4.4 %	2.9 %	2.9 %

## 5. 결론

멀티 외기이용 냉방시스템의 에너지 절약효과에 대해 국내 5개 지역을 대상으로 에너지 시뮬레이션을 수행하여 검토하였다. 검토 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 멀티 외기이용 냉방시스템의 에너지 절약효과는 급기온도 13°C 조건에서 약 21%, 급기온도 25°C 조건에서는 약 32%를 나타내었다.
- (2) 멀티 외기이용 냉방시스템의 가습기 이용시간은 급기온도 13°C 조건의 경우에 40~55일 전후를 나타내었으며, 가습기를 정지하더라도 ASHRAE 권장기준을 벗어나지는 않았다. 또한 급기온도 25°C의 경우는 가습운전을 전혀 필요로 하지 않았다. 즉, 멀티 외기이용 냉방시스템의 경우는 가습기를 제외하는 것도 고려될 수 있다.
- (3) 검토 대상인 5개 지역(서울, 장수, 제천, 봉화, 태백)에서는 지역적 기후 특성이 데이터센터의 에너지 소비량에 미치는 영향이 5% 미만으로서 크지 않았으며, 따라서, 국내에서 데이터 센터의 부지 선정 시에는 기후조건에 대해 크게 고려할 필요가 없을 것으로 사료된다.

## 후기

본 연구는 2012년도 국토해양부 첨단도시개발사업의 연구비지원(과제번호: 14CHUD-C062125- 01-000000)에 의해 수행되었습니다.

## REFERENCE

1. ASHRAE, ASHRAE datacom series: Thermal guidelines for data processing environments, 2011.
2. Cho, J. K., Jeong, C. S., and Kim, B. S., Viability of HVAC system for energy conservation in high density internal-load dominated buildings, Korean journal of air-conditioning and refrigeration engineering, Vol. 22, No. 8, pp. 530-537, 2010.
3. Ham, S. W., Kim, M. H., Jeong, J. W., Energy saving potentials of various air-side economizers in a modular center for supply air conditions and geographical locations, Journal of the architectural institute of Korea ; planning and design, Vol. 30, No. 6, pp. 263-270, 2014.
4. Kim, J. Y, Chang. H. J, Jung. Y. H, Cho. K. M, Augenbroe G. Energy Conservation Effects of a Multi-Stage Outdoor Air Enabled Cooling system in a Data Center, Energy and buildings, Vol. 138, pp. 257-270, 2017.
5. ASHRAE, ASHRAE datacom series: Best practices for Datacom facility energy efficiency, Second edition, pp.53-66, 2009.
6. Lee. K. P, Chen. H. L, Analysis of energy saving potential of air-side free cooling for datacenters in worldwide climate zones, Energy and Buildings, 64, pp. 103-112, 2013.
7. LBNL, Data center economizer contamination and humidity study. Lawrence Berkeley National Lab, 2007.
8. Kishor Khankari, Rack enclosures, ASHRAE Journal, August, pp. 48-51, 2009.
9. ASHRAE, ASHRAE datacom series: Best practices for Datacom facility energy efficiency, Second edition, pp. 39-41, 2009.