Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering
Vol. 28, No. 4 (2016), pp.137-144
ISSN 1229-6422(Print), 2465-7611(Online)
http://dx.doi.org/10.6110/KJACR.2016.28.4.137

사무소 건물에서 냉동기의 대수제어를 통한 냉동기 거동 특성 및 에너지 절감 효과 분석

Detailed Analysis on Operation Characteristics and Cooling Energy Saving Effect of Chiller Staging in an Office Building

서병모(Byeong-Mo Seo)[1], **손정은**(Jeong-Eun Son)[1], **이광호**(Kwang Ho Lee)[2†]
[1]국립한밭대학교 대학원 건축공학과, [2]국립한밭대학교 건축공학과
[1]Graduate School, Hanbat National University, Daejeon, 34158, Korea
[2]Department of Architectural Engineering, Hanbat National University, Daejeon, 34158, Korea

(Received September 16, 2015; revision received November 24, 2015; Accepted: March 14, 2016)

Abstract Commercial buildings account for a significant proportion of the total building energy use in Korea, and cooling energy, in turn, accounts for the largest proportion of total energy consumption in commercial buildings. Under this circumstance, chiller staging is considered to be a reasonable and practical solution for cooling energy saving. In this study, the part-load ratio and the operating characteristics of a vapor compression chiller were analysed within an office building. In addition, energy consumption among different chiller staging schemes was comparatively analysed. As a result, significant proportions of total operating hours, cooling load and energy consumption turned out to be in the part load ratio range from 0% through 50%, and thus energy consumption was significantly affected by the chiller COP at low part-load conditions, indicating that the chiller operation at the part-load is an important factor in commercial buildings. In addition, utilizing a sequential chiller staging scheme can reduce the annual cooling energy usage by more than 10.3% compared to operating a single chiller.

Key words Commercial building(상업용 건물), Part load ratio(부분부하율), Chiller staging(냉동기 대수제어), Coefficient of performance(성능계수), EnergyPlus(에너지 플러스)

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

기호설명

PLR(Part Load Ratio) : 부분부하율 [%]

1. 서 론

1.1 연구배경 및 목적

현재 우리나라에서 사용되고 있는 화석연료 소비의 대부분은 도시에서 이루어지고 있으며, 화석연료의 연소로 인하여 발생되는 이산화탄소의 대부분은 도시공간의 에너지 사용으로부터 발생 된다. 따라서 그 동안은 정부의 주된 온실가스 저감대책 대상이 에너지를 대량으로 소비하는 산업부분이었다면, 최근에는 도시단위의 대책마련에 대한 필요성이 강조되고 있다.(2)

또한 국내에서 사용되는 에너지의 소비 분포는 산업 약 55%, 건물 약 24%, 수송 약 21% 정도 이며, 도시의 에너지 사용량의 대부분을 차지하는 건물로 인한 이산화탄소의 발생량은 건물의 유지관리에 필요한 에너지 소비로부터의 발생량만을 고려하여 국가 전체 발생량의 약 23% 내외로 발표하고 있으나, 이를 건물의 생애주기에 사용되는 총 에너지까지를 감안하면 약 38% 내외가 될 것으로 추산되고 있다.(2)

2000년대 이전 국내 연구의 대부분은 건축적인 방법에 편중되는 연구경향을 보였지만, 최근의 연구동향은 이전의 연구와는 다른 다각적인 절약 방안에 대한 연구가 요구되면서 다방면의 연구들도 활발히 진행되고 있는 실정이다.(3) 최근 이와 관련된 연구동향을 살펴보면, Park and Jung(4)은 사무소 건물의 공조시스템을 기반으로 한 총 6가지 대안 열원시스템에 대해 대수제어 하지 않은 경우와 대비하여 대수제어에 따른 경제성을 비교 분석하였고, Lee et al.(3) 등은 문헌 및 사례조사를 바탕으로 열원기기용량 과대산정 정도를 파악 및 사무

소 건물의 부분부하 특성에 따른 연간 운전성능을 시뮬레이션을 통해 분석하여 열원장치의 용량을 대수 분할을 할 경우 냉동기는 등분할, 보일러는 7 : 3으로 차등 분할하는 것이 대수 분할하지 않는 것과 비교하여 에너지 절감율이 보다 높은 것으로 분석하였다. 또한 Yoon et al.[5]등은 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 사무소건물에서의 온수 보일러에 대하여 대수 분할시 보일러 용량을 7 : 3으로 분할하는 것이 분할하지 않는 것과 비교하여 약 33% 정도의 난방 에너지 절감효과를 보인다는 것으로 분석하였다. 이처럼 냉, 난방 열원기기의 대수제어에 따른 에너지 절감에 관련된 많은 연구가 있으나, 대부분의 연구들은 열원기기의 용량에 대한 대수제어, 분할에 초점을 맞추고 있어, 정작 근본적인 대수 분할 시 각각 열원기기에 열원을 공급하는 가장 효율적인 부하분배 제어 알고리즘 분석에 대한 연구는 이루어지지 않았다.

본 연구의 최종적인 목표는 업무용 건물에서 소비되는 에너지의 가장 큰 부분을 차지하는 냉방부분의 열원기기 중 냉동기의 부분부하 특성에 따른 연간 운전성능을 건물 에너지 동적 시뮬레이션을 통해 분석하고, 앞선 선행연구를 토대로 냉동기의 대수분할시 에너지 절감율이 가장 높은 5 : 5비율로 대수분할 하여[3] 기존의 연구에서 고려되지 않은 부하 분배 제어 알고리즘을 통한 업무용 건물의 냉동기 대수분할 시 최적의 냉방부하 분배 제어알고리즘을 제시하고자하는 것이다. 이를 위해 본 논문은 본 연구에서 산출된 2편의 논문 중 두 번째 논문으로서, 기존의 연구에서 고려되지 않은 부하 분배 제어 알고리즘 중[6] 부하를 순차적으로 분배하는 Sequential 제어와 부하를 동등하게 분배하는 Uniform 제어, 이러한 두 가지 부하분배 제어알고리즘의 연간 운전성능을 비교 분석하여 에너지 사용량을 비교하고, 업무용 건물의 냉동기 대수분할 시 최적의 냉방부하 분배 제어알고리즘을 제시하고자 한다.

1.2 연구방법 및 범위

본 연구는 사무소 건물의 냉방 에너지 소비를 저감하기 위한 것으로, 내용적 범위는 크게 두 가지 측면으로 구분된다. 하나는 대수분할 하지 않은 냉동기의 에너지 소비를 측정하여 냉동기의 성능 및 부분부하의 특성, 구간별 소요 에너지에 따른 연간 에너지 소비를 분석하는 것이며, 다른 하나는 대수분할 시 부하분배 제어 알고리즘에 따른 냉동기의 성능 및 부분부하의 특성, 구간별 소요 에너지에 따른 연간 에너지 소비를 분석하여 이를 바탕으로 냉동기 대수분할 시 최적의 부하분배 제어알고리즘을 제시하는 것이다.

2. 시뮬레이션 개요

2.1 해석 도구 선정

본 연구에서 사용한 시뮬레이션 프로그램은 건물 냉난방 부하 해석 및 열 환경에 대해 수학적으로 검증이 가능한 EnergyPlus의 v6.0을 선정하였다.[7] EnergyPlus의 경우 가장 대표적인 동적 시뮬레이션 규약인 ASHRAE 140 가이드라인을 통해 검증 받았다.[8] 또한 EnergyPlus는 건물의 부하를 계산하는데 있어 미국의 냉동공조학회(ASHRAE)에서 권장하는 열밸런스(Heat Balance) 방법을 사용하며,[9] 건물 에너지 시뮬레이션의 주요 구성요소들인 Zone, Surface, Air Heat Balance 및 System과 Plant 모델링을 구성요소간의 유기적인 연결 관계를 모사하기 위한 목적으로 각 시간 단계별로 통합적으로 실시한다는 큰 장점이 있다. 프로그램의 개발 및 검증에 대한 자세한 내용은 선행연구에서 여러 차례 서술하였다.[10]

2.2 시뮬레이션 해석 조건

본 연구에서는 선행연구에서 이미 검증한 EnergyPlus에서 제공하는 ASHRAE 90.1 기반의 대규모 사무소 건물 프로토타입 모델을 통해 분석을 진행하였다. 시뮬레이션의 입력조건은 Table 1에 나타내었다. 공조방식

Table 1 Input condition of simulation

Division		Content
Program		EnergyPlus v.6.0
Model System	Floor plate area	73(m)×48(m)
	Site/Weather location	Incheon(South Korea)
	Chiller Schedule	From 05 : 00 Until 18 : 00
	Chiller Capacity	850 kW
	Terminal Unit	Conventional VAV Box
	Cooling/Heating Set point(℃)	Cooling : 24℃ Heating : 21℃
HVAC Value	AHU supply temperature	13℃
	AHU fan design static pressure	750 Pa
	AHU fan efficiency	75%
	Minimum outside air rate	7.62 E-04 ㎥/s/㎡
Plant Value	Chiller design COP	5.0
	Boiler design efficiency	80%

ⓒ SAREK

은 1개의AHU 설비를 통해 각 실에 변풍량 방식으로 공조된다. 최소외기도입량은 ASHRAE 62.1 지침에 따라 7.62 E-04 $m^3/s/m^2$로 설정하였다.[11] 기상 데이터의 경우 EnergyPlus에서 자체적으로 제공하는 인천기상데이터를 사용하였으며, 인체, 조명, 전자기기의 실내발열요소는 ASHRAE 90.1 기준에 따라 각각 9.3 $m^2/person$, 9.1 W/m^2, 14.4 W/m^2로 설정하였다. 또한 분석을 위해 선정한 대표기간은 선행 연구와 동일하게 냉방위주의 업무용 건물 특성에 맞추어 냉방과 난방기기를 복합적으로 사용하는 중간기(3, 4, 5, 9, 10월)와, 냉방기기만을 사용하는 하절기(6, 7, 8월)로 선정하였다. 시스템 가동시간은 업무용 건물의 스케줄에 따라 예열시간을 포함한 5시부터 18시까지를 가동시간으로 선정하였고, 냉동기 용량은 850 kW 냉동기 1대를 적용하였다. EnergyPlus에서 적용하는 Optimal, Sequential, Uniform의[6] 세 가지 부하 분배 제어 알고리즘 중 본 연구에서는 Sequential, Uniform 제어 알고리즘을 적용하여 분석하였다.

3. 냉동기 모델링

3.1 Performance Curves

EnergyPlus를 이용하여 냉동기의 성능 및 부분부하의 특성, 부분부하율 구간별 소요 에너지에 따른 연간 에너지 소비에 대한 분석을 진행하기 위해서는 선행적으로 3가지 성능곡선에 대한 계수 값을 입력해야 한다. 3가지 성능곡선의 입력조건에 대해서는 선행연구에 자세히 서술되어있어서 본 논문에서는 생략하기로 한다.[12]

3.2 Load Distribution Algorithm

부하 분배 제어 알고리즘의 경우 냉동기를 최소 두 대 이상 적용을 하여 각각의 냉동기에 부하의 분배가 이루어 져야 할 경우에 필요하며, 이를 위해선 기본적으로 Table 2의 설정 값과 열원기기의 우선순위를 정해주어야 한다. Fig. 1은 EnergyPlus의 세 가지 부하 분배 제어 알고리즘의 거동 방식을 나타낸다.[13] 첫째로 Optimal 제어 방식은 냉방부하가 발생 시 냉동기의 우선순위가 높은 냉동기가 우선적으로 부하를 처리하게 되며, 냉동기의 부하 상한치는 입력해둔 Optimum Part Load Ratio 값으로 제한이 된다. 그 이상의 부하가 발생하게 될 경우 우선순위에 따라 다음 냉동기가 부하를 처리하게 되는 방식이다. 둘째로 Sequential 제어 방식은 냉방부하가 발생 시 냉동기의 우선순위가 높은 냉동기가 우선적으로 부하를 처리하게 되며, 냉동기의 부하 상한치는 입력해둔 Maximum Part Load Ratio 값으로 제한이 된다. 그 이상의 부하가 발생하게 될 경우 우선순위에 따라 다음 냉동기가 부하를 처리하게 되는 방식이다. 마지막으로 Uniform 제어 방식은 냉동기의 우선 순위와 상관없이 발생하는 부하를 각각의 냉동기가 동일하게 부하를 처리하게 된다. Table 2의 시뮬레이션 입력조건상 Optimal과 Sequential 제어방식은 동일한 거동을 보이기 때문에 Optimal 제어방식은 Case 분석에서 제외시켰다. Table 3과 같이 Case는 총 3가지로 분류하여 Base Case가 되는 Case_1은 850 kW의 용량의 분할하지 않은 냉동기 1대, Case_2는 냉동기를 5 : 5비율로 용량을 분할하여 부하의 분배는 Chiller1과 Chiller 2가 우선순위에 따라 순차적으로 부하를 처리하는 Sequential 제어방식 Case_3는 마찬가지로 냉동기 2대를 분할하여 부하의 분배는 Chiller 1과, Chiller 2가 동일한 부하를 처리하는 Uniform 제어방식을 채택하였으며 Case_3는 부하의 제어 알고리즘 특성상 장비의 우선순위와 상관없이 동시에 가동이 된다.

Table 2 Simulation input related to part load ratio

Field	Input
Minimum Part Load Ratio	0.1
Maximum Part Load Ratio	1
Optimum Part Load Ratio	1
Minimum Unloading Ratio	0.1

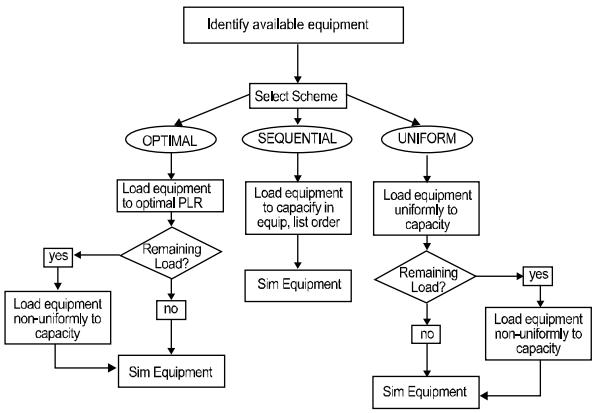

Fig. 1 Load distribution algorithm.

Table 3 Simulation cases

Field	Equipment List	Capacity [kW]	Operating priority 1st	Operating priority 2nd	Algorithm
Case_1	Chiller 1	850	Chiller 1		X
Case_2	Chiller 1, Chiller 2	425 425	Chiller 1	Chiller 2	Sequential
Case_3	Chiller 1, Chiller 2	425 425	Chiller 1	Chiller 2	Uniform

4. 결과분석

4.1 Cooling Load of Chiller on the Representative Days

본 연구에서는 선행연구와 동일하게 중간기, 냉방기를 대표 할 수 있는 5월 3일과 8월 11일을 각각의 대표일로 선정하고 분석을 진행하였다. 중간기 대표 일은 15~23℃의 외기 온도 분포를 보이고 있으며, 냉방기 대표 일은 25~32℃의 온도 분포를 보인다. 대표일의 부하 패턴은 중간기는 30~300 kW의 분포를, 냉방기엔 360~550 kW의 분포를 보이며, 사무실의 스케줄과 거의 유사한 패턴을 나타내는 것을 확인 할 수 있다. 건물의 주 사용시간이 아닌 19 : 00~4 : 00시는 냉동기가 가동하지 않기 때문에 냉방 부하발생량이 없고 예열시간을 포함한 주 사용시간인 5 : 00~18 : 00시는 냉방부하가 발생하는 것을 확인 할 수 있다. 또한 냉방기 대표 일의 5 : 00~7 : 00시에는 사무실 스케줄과는 관계없이 부하량이 급증하는 것을 확인할 수 있다. 이는 야간 시간에 시스템을 꺼놓은 상태에서 건물내에 축적되어있던 열을 제거하면서 설정온도인 24℃까지 실내 온도를 낮추기 위함으로 판단된다.

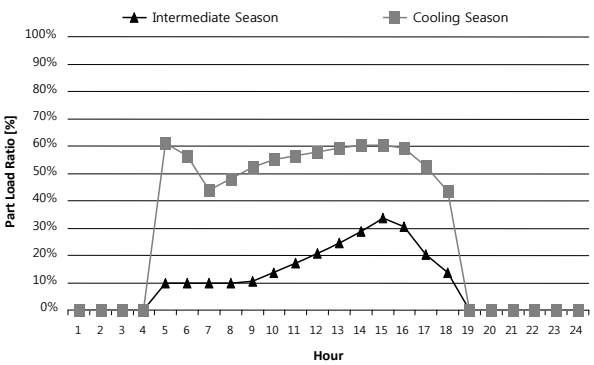

Fig. 2 Part load ratio variations(Case_1, 3).

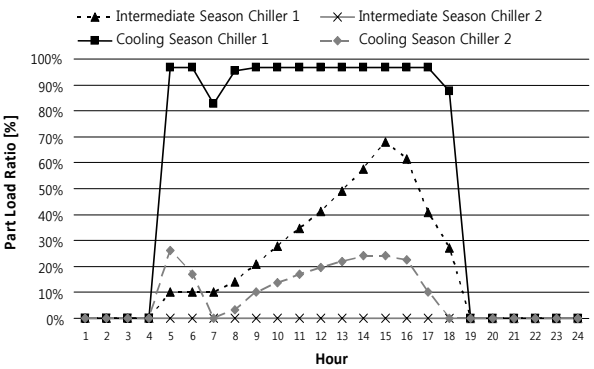

Fig. 3 Part load ratio variations(Case_2).

4.2 Part Load Ratio Variations

다음 Fig. 2, Fig. 3은 각 Case의 대표일 PLR(Part Load Ratio)을 나타낸다. Fig. 2는 Case_1, 3에 대한 그래프이며, Fig. 3은 Case_2에 대한 그래프이다. Case_1과 3의 데이터가 동일한 패턴과 동일한 값을 보이기 때문에 하나의 그래프에 값을 나타내었다. 냉동기 가동시간인 05 : 00~18 : 00시의 분포를 보면 중간기의 경우 Case_1, 3은 10~34%, Case_2의 Chiller 1은 10~68%, Chiller 2는 0%의 분포를 보였다. 여름철의 경우 Case_1은 44~61%, Case_2의 Chiller 1은 83~97%, Chiller 2는 0~26%의 분포를, Case_3의 Chiller 1, 2는 41~61%으로 Case_1과 동일한 분포를 보였다. Case_1, 3의 Part Load Ratio는 중간기 5 : 00~9 : 00시까지 10%를 일정하게 유지하는데 이는 Table 2에서 언급한 것과 같이 Minimum Part Load Ratio가 10%이기 때문이다. 실제로 냉동기에 걸리는 부하가 10% 이하이더라도 냉동기가 작동하는 부분부하율이 Minimum Part Load Ratio인 10%에 고정되어서 나타남을 확인할 수 있다.

여름철의 경우 냉동기를 처음 가동하는 05 : 00시에 실의 설정온도를 맞추기 위하여 PLR이 61%로 가장 높고 그 이후로는 점차 낮아져 7 : 00시에 44%로 최저값을 보인뒤 일사의 영향과 실내 발열 요소 등으로 인하여 14 : 00~15 : 00시에 다시 60% 근처의 PLR을 보인다. Fig. 3에 나타낸 Case_2의 Part Load Ratio는 중간기 Chiller 1의 경우 5 : 00~7 : 00시까지 10%를 일정하게 유지하는데 이는 앞서 언급한 것과 같이 Minimum Part Load Ratio인 10%를 일정하게 유지하는 것으로 사료된다. 일사의 영향과 실내 발열 요소 등으로 인하여 냉방부하가 급증하는 14 : 00~15 : 00시경에는 수치가 최대값을 기록하고 그 이후에는 점차 줄어든다. Chiller 2의 경우 중간기엔 가동하지 않기 때문에 0%를 유지한다. 여름철 Chiller 1의 경우 07 : 00시, 18 : 00시를 제외하고 97%의 PLR을 유지하며, Chiller 2의 경우 07 : 00시와 18 : 00시를 제외한 나머지 가동시간에 PLR이 발생하는 것을 확인 할 수 있다.

Case_1과 Case_3이 냉동기의 대수와 각각의 용량이 차이가 나지만 동일한 패턴을 보이고 Case_2가 이와는 다른 패턴을 보이는 이유는 다음과 같다. 세 가지 Case 모두 냉동기의 총 용량이 850 kW이고 냉방기 대표일의 최대 부하가 05 : 00시에 550 kW로 동일하게 발생한다. Case_1은 850 kW의 용량으로 550 kW를 담당하기 때문에 PLR이 61%를 기록하고, Case_3 는 425 kW 2대가 부하를 동일하게 분배해서 동시에 부하를 처리하기 때문에 각각 275 kW를 처리하게 되며 PLR이 Case_1과 마찬가지로 61%를 기록한다. Case_2는 425 kW의 냉동기 2대로 Case_3와 동일하지만 부하를 Chiller 1, 2순으로 순차적으로 분배해서 처리하기 때문에

ⓒ SAREK

중간기엔 Chiller 2가 가동하지 않는다. 여름철에는 Fig. 3과 같이 Chiller 1이 처리하지 못하는 부하가 발생할 경우에 Chiller 2가 가동하여 부하를 처리해주게 된다.

4.3 COP variations

다음 Fig. 4, Fig. 5는 각 Case의 대표일 COP를 나타낸다. Fig. 4는 Case_1, 3에 대한 그래프이며, Fig. 5는 Case_2에 대한 그래프이다. Case_1과 3의 데이터가 동일한 패턴과 동일한 값을 보이기 때문에 하나의 그래프에 표현하였다. 냉동기 가동시간인 05 : 00~18 : 00시의 분포를 보면, 중간기의 경우 Case_1, 3은 1.7~5.5, Case_2의 Chiller 1은 1.7~6.6, Chiller 2는 0의 분포를 보였다. 여름철의 경우 Case_1, 3은 5.6~6.1, Case_2의 Chiller 1은 5.3~5.7, Chiller 2는 0.5~3.8의 분포를 보인다. Fig. 4에 나타난 Case_1, 3의 COP는 중간기 05 : 00~09 : 00시 까지 약 1.7로 일정하게 유지하는데 이는 앞선 설명과 마찬가지로 Minimum Part Load Ratio에 따라 가동량이 정해지기 때문으로 사료된다. 여름철의 경우 Chiller 1은 07 : 00시 5.7, 18 : 00시 5.6을 제외한 나머지 시간대는 평균 6.0의 값을 일정하게 보인다. Fig. 5에서 Case_2의 COP는, Chiller 1은 중간기 05 : 00~07 : 00시 까지 약 1.7로 일정하게 유지하고, 13 : 00시 까지 급증하여 6.4를 기록하고 16 : 00시에 6.6을 기점으로 점차 낮아지며, Chiller 2는 가동하지 않는다. 여름철의 경우 Chiller 1의 COP는 07 : 00시 5.6, 18 : 00시 5.7을 제외한 나머지 시간대는 평균 5.4의 값을 일정하게 보인다. Chiller 2의 COP는 냉동기가 가동을 시작하는 05 : 00시에 3.1을 보이고 그 이후에는 점차 감소하여 07 : 00시에는 0이 된다.

Case_1, Case_3의 중간기와 여름철의 15 : 00시경 COP값의 차이가 크게 나타나지 않는 이유는 Case_3의 경우 모든 부하조건하에서 2대의 냉동기를 동일하게 가동시키고 그에 따라 각 냉동기가 작동하는 부분부하율이 Case_1과 동일하기 때문이다. 이에 대한 근거로는 두 가지 Case의 여름철 대표일 07 : 00시의 부하는 381 kW이며, Fig. 2, Fig. 4의 PLR은 44%, COP는 5.6이고 중간기 대표일 15 : 00시경의 부하는 301 kW이며, PLR은 34%, COP는 5.5로 모두 동일하다. 반면에, Case_2의 대표일 COP 곡선이 다른 Case들과 상이한 패턴을 보이는 이유는 각 냉동기가 작동하는 부분부하율의 차이에 있다. 중간기의 경우 Case_1, Case_3에 비하여 절반의 용량인 425 kW의 Chiller 1만 가동을 하게 된다. 따라서 중간기 대표일 냉동기 가동시간 중 Case_1, Case_3은 3.06의 평균값을 갖는 반면 Case_2는 4.61의 월등히 높은 수치를 보인다.

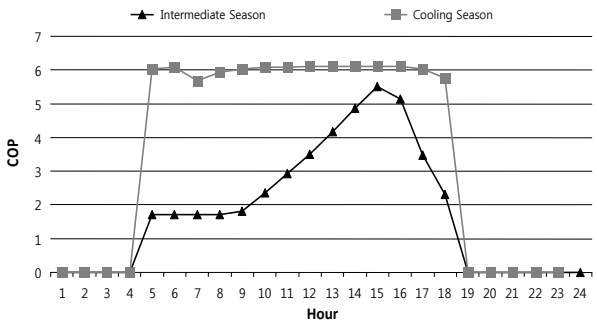

Fig. 4 COP variations(Case_1, Case_3).

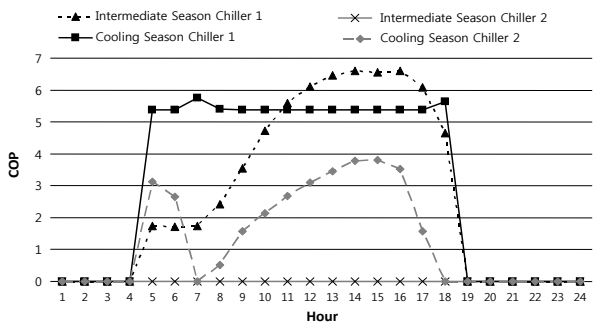

Fig. 5 COP variations(Case_2).

4.4 Detailed Analysis on Annual Data

다음 Fig. 6~Fig. 8과 Table 4~Table 6은 10개의 Part Load Ratio 구간별 연간 누적 가동시간, 연간 누적 Cooling coil rate 및 연간 총 냉동기 전기 소비량을 나타낸 그래프와 표이다. 연간 누적 Cooling coil rate의 경우에는 모든 Case가 동일하기 때문에 Table 4에만 나타내었다. 1대의 냉동기만을 가동시키는 Case_1의 경우, 구간별 가동시간은 PLR 0% 이상 10% 미만의 구간이 951시간으로 가장 많았고, 90% 이상 100% 이하 구간이 7시간으로 가장 낮았다. Cooling coil rate는 40% 이상 50% 미만 구간이 116886.2 kW, 50% 이상 60% 미만 구간이 79347.8 kW순으로 높게 나타났으며, 0% 이상 10% 미만 구간이 83.3 kW로 가장 낮은 값을 보였다. 냉동기의 전기 사용량은 PLR 10% 이상 20% 미만 구간이 27479.9 kWh, 40% 이상 50% 미만 구간이 19773.3 kWh순으로 높게 나타났으며, 0% 이상 10% 미만 구간이 83.3 kWh로 가장 낮았다. 즉, 0% 이상 10% 미만 구간이 가장 많은 냉동기 가동시간을 나타낸 반면 부하량과 냉동기 전기 에너지 소비량은 가장 낮은 값을 나타내었다. 이는 가동시간이 많고 부분부하율이 낮아서 COP가 낮기는 하지만, 냉동기가 처리해야하는 부하가 워낙 낮고 그로 인해 전기 에너지 소비량 또한 낮기 때문이다. 10% 이상 20% 미만 구간이 누적 가동시간과 냉방 부하량에 비해 전기 에너지 소비량이 높은 이

유는, 냉동기는 Minimum Part Load Ratio의 설정 값에 따라 냉동기를 On/Off 제어를 하기 때문에 설정 값인 10% 구간의 전기 사용량이 부하에 대비하여 높게 발생하는 것으로 판단된다. 또한 냉동기의 PLR 구간이 50% 이상 60% 미만을 기점으로 가동 시간, 전기 사용량, 부하량이 현저하게 감소하는 것을 확인 할 수 있으며, PLR 0% 이상 50% 미만 구간의 전기 사용량이 냉동기의 연간 전기 사용량의 74%를 차지한다. 냉동기가 작동하는 부분부하율이 낮으면 COP가 낮아지고 그로 인해 전기소비량이 늘어나는 결과를 초래하는데, 그로 인해 Case_1처럼 1대의 냉동기만을 작동시키기보다는 2대 이상의 냉동기를 작동시키는 대수제어의 필요성을 입증하는 결과이다.

Case_2의 연간 총 전기 소비량은 50% 이상 60% 미만 구간이 24028.9 kWh, 80% 이상 90% 미만 구간이 10756.2 kWh순으로 높게 나타났으며, 0% 이상 10% 미만 구간이 60.4 kWh로 가장 낮았다. Case_3의 경우 10% 이상 20% 미만 구간이 27480.7 kWh, 40% 이상 50% 미만 구간이 19898.1 kWh 순으로 높게 나타났으며, 0% 이상 10% 미만 구간이 60.4 kWh로 가장 낮았다.

Fig. 7과 Table 5에 해당하는 Case_2의 연간 데이터를 보면, Base model인 Case_1과는 확연한 차이를 보이는 것을 확인 할 수 있다. 가장 큰 차이점은 PLR 10% 이상 20% 미만의 구간에선 전기 사용량이 절반 이하로 줄어든 것을 확인할 수 있다. 특히, Case_1과 비교하여 50% 미만의 낮은 PLR의 전기 사용은 28% 수준으로 감소하고, 그 이상의 높은 PLR 조건에서의 전기 사용량은 대폭 증가한 것을 확인 할 수 있다. 이는 냉동기의 용량을 동일하게 2대로 분할 하였고 부하를 Chiller 1과 Chiller 2 순서대로 차등 분배하는 Sequential 알고리즘을 적용하였기 때문이다. 50% 이하의 낮은 부분부하율 조건하에서 동일한 부하가 발생했을 때, Case_2에서 첫 번째 작동하는 냉동기는 용량이 Case_1의 절반이다. 따라서 냉동기가 작동하는 부분부하율이 Case_1에 비해서 2배로 높아지고 그로 인해 COP가 상승하기 때

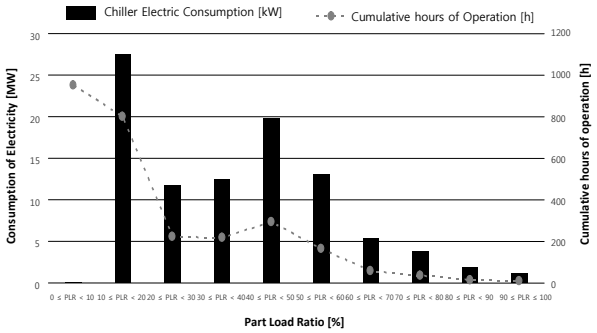

Fig. 6 Case_1 cumulative operation hours, electricity in each PLR.

Table 4 Case_1 annual PLR data

Part load ratio [%]	Cumulative hours of operation [h]	Chiller electric consumption [kWh]	Total cooling coil rate [kW]
0 ≤ PLR < 10	951	60.4	83.3
10 ≤ PLR < 20	800	27489.9	59130.2
20 ≤ PLR < 30	222	11773.1	49375.9
30 ≤ PLR < 40	217	12409.0	67833.2
40 ≤ PLR < 50	295	19773.3	116886.2
50 ≤ PLR < 60	166	13087.0	79347.8
60 ≤ PLR < 70	57	5288.4	32009.9
70 ≤ PLR < 80	34	3806.5	22422.5
80 ≤ PLR < 90	14	1869.4	10556.8
90 ≤ PLR ≤ 100	7	1060.8	5764.6

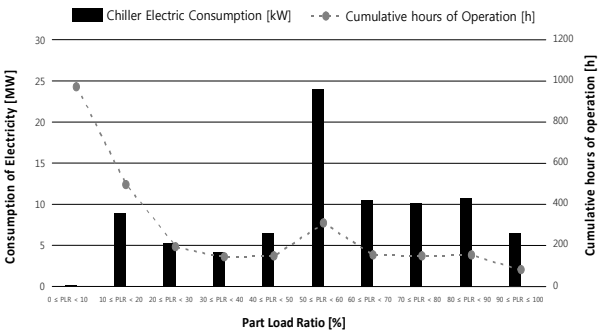

Fig. 7 Case_2 cumulative operation hours, electricity in each PLR.

Table 5 Case_2 annual PLR data

Part load ratio [%]	Cumulative hours of operation [h]	Chiller electric consumption [kWh]
0 ≤ PLR < 10	970	60.4
10 ≤ PLR < 20	495	8834.5
20 ≤ PLR < 30	193	5289.9
30 ≤ PLR < 40	142	4169.9
40 ≤ PLR < 50	145	6481.5
50 ≤ PLR < 60	305	24028.9
60 ≤ PLR < 70	152	10527.4
70 ≤ PLR < 80	147	10106.8
80 ≤ PLR < 90	152	10756.2
90 ≤ PLR ≤ 100	80	6397.1

ⓒ SAREK

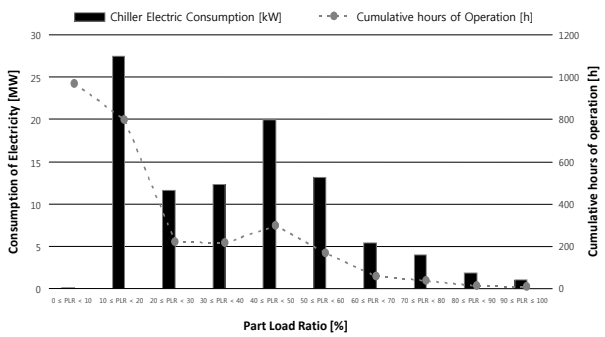

Fig. 8 Case_3 cumulative operation hours, electricity in each PLR.

Table 6 Case_3 annual PLR data

Part load ratio [%]	Cumulative hours of operation [h]	Chiller electric consumption [kWh]
0 ≤ PLR < 10	970	60.4
10 ≤ PLR < 20	798	27480.7
20 ≤ PLR < 30	219	11609.3
30 ≤ PLR < 40	216	12340.1
40 ≤ PLR < 50	297	19898.1
50 ≤ PLR < 60	167	13160.5
60 ≤ PLR < 70	58	5372.1
70 ≤ PLR < 80	35	3920.1
80 ≤ PLR < 90	14	1877.0
90 ≤ PLR ≤ 100	7	1065.3

문인 것으로 판단된다. 반면에, 50% 이상의 높은 부분부하율 조건하에서는 부분부하율이 상승함에 따라 COP가 오히려 낮아지기 때문에 작은 용량의 냉동기를 작동시키는 Case_2가 Case_1에 비해서 높은 전기 소비량을 나타내었다.

Fig. 8과 Table 6에 해당하는 Case_3의 경우 Case_2와 마찬가지로 총 용량 850 kW의 냉동기를 2대로 나누어 각각 425 kW로 냉동기의 대수 분할을 하였지만, 부하를 동일하게 분배하는 Uniform 알고리즘을 적용하였기 때문에 Case_1과 동일한 패턴과 사용량을 보인다.

5. 결 론

본 연구는 대규모 사무소 건물을 EnergyPlus로 모델링하였으며, 냉동기의 부분부하 특성에 따른 연간 운전성능을 정밀 분석하였다. 또한 서로 다른 냉동기 대수제어 알고리즘의 운전성능을 비교 분석하여 에너지 사용량을 비교하고, 사무소 건물의 냉동기 대수분할 시 최적의 냉방부하 분배 제어 알고리즘 제시에 관한 연구를 진행하였다. 본 연구의 결론은 다음과 같다.

(1) 각 Case의 냉동기의 부분부하 특성에 따른 연간 운전성능을 분석한 결과, 대수분할을 하지 않은 Case_1과 냉동기 2대가 동일한 부하를 균등하게 담당하는 Case_3는 0 이상 50 미만의 낮은 PLR 구간에서 연간 전기 에너지 사용량의 70%를 사용하였으며, 냉동기 2대를 각 부하에 따라 순차적으로 가동시키는 Case_2는 동일한 구간에서 60%를 사용하여 세 가지 Case 중 가장 좋은 효율을 보였다.

(2) 각 Case의 연간 전기 에너지 소비량을 분석한 결과 Case_1은 96607.8 kWh, Case_2는 86652.5 kWh, Case_3는 96783.5 kWh이며, Case_1 대비하여 Case_ 2의 전기 에너지 소비량은 약 10.30% 감소하였다. Case_1 대비하여 Case_3의 전기 에너지 소비량 차이는 약 0.18%로 이는 계산상의 오차범위 이내이기 때문에 동일하다고 판단할 수 있다.

(3) Sequential 제어 알고리즘이 연간 전기 에너지 소비량 측면에서 제일 적은 전기 사용량을 보였기에 가장 효율적인 알고리즘으로 판단되며, Uniform 제어 알고리즘은 대수분할 하지 않은것과 동일한 사용량을 보였다.

(4) 결과적으로 냉동기를 대수분할하여 중간기에는 Sequential 제어 알고리즘을 적용하고, 냉방기에는 Uniform 제어 알고리즘을 적용하는 것이 냉동기의 최대 효율을 위한 최적의 제어 알고리즘일 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 중소기업청에서 지원하는 2015년도 산학연협력 기술개발사업(“바닥 공조 적용 에너지 절약형 성층화 기술 및 디퓨저 개발” No. S2223127)의 연구수행으로 인한 결과물임을 밝힙니다.

References

1. Lee, G. J., 2012, Analysis of the Interrelationship between Energy Consumption and Urban Spatial Structure, PhD’s Dissertation, Dong-A University, Busan.
2. Um, G. H., 2006, A study on the energy consumption and the capacity of the HVAC system in office buildings, PhD’s Dissertation, Chungwoon University, Hong Seong.
3. Lee, W. J., Kang, E. C., Lee, E. J., Oh, B. C., and Shin, U. C., 2013, A Study on the operation performance of central plant quipment according to part

load characteristics, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 25, pp. 392-397.
4. Park, Y. and Jung, S. S., 2002, Life cycle costing through operating number control of air conditioning systems in office buildings, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 14, pp. 981-988.
5. Yoon, K. C., Part, D. Y., Yun, G., Kim, Y. M., Kim, Y. S., and Kim, K. S., 2013, The heating energy saving effect by operating number control of boilers in office building, Korean Institute of Architectural Sustainable Environment and Building Systems (KIA EBS), Vol. 7, pp. 120-125.
6. EnergyPlus Input Output Reference, The Encyclopedic to EnergyPlus Input and Output, 2011.
7. Crawley D. B., Lawrie L. K., Winkelmann F. C., Buhl, W. F., Huang H. J., Pedersen C. O., Strand R.K., Liesen R. J., Fisher D. E., Witte M. J., and Glazer J., 2001, EnergyPlus : creating a new-generation building energy simulation program, Energy and Buildings, Vol. 33, No. 4, pp. 319-331.
8. Kim, S. U., 2014, Technology of energy simulation, International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration, Vol. 43, pp. 23-38.
9. ASHRAE Fundamentals Handbook, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., 2009.
10. EnergyPlus, Testing and Validation, http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/testing.cfm.
11. ASHRAE, 2013, ANSI/ASHRAE Standard 62.1-2013-Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality.
12. Seo, B. M., Yu, B. H., and Lee, K. H., 2015, Detailed analysis on part load ratio and cooling energy characteristics of chiller operation in an office building, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 27, No. 11, pp. 567-573.
13. EnergyPlus Engineering Reference, Simulation Models and Encyclopedic Reference, 2011.

ⓒ SAREK