

중앙식 냉방 플랜트의 유량제어를 통한 에너지 절감에 관한 연구

이정남[†] · 김영일* · 정광섭*

지멘스(주), *서울과학기술대학교 건축학부

(2015년 5월 12일 접수, 2015년 8월 24일 수정, 2015년 8월 28일 채택)

Flow Control of a Centralized Cooling Plant for Energy Saving

Jeong Nam Lee[†], Young Il Kim*, Kwang Seop Chung*

SIEMENS, *Seoul National University of Science and Technology

(Received 12 May 2015, Revised 24 August 2015, Accepted 28 August 2015)

요 약

중앙집중식 냉방 시스템을 적용하고 있는 대형 빌딩이나 플랜트 설비들의 경우 부하 증설 및 피크부하에 대응하기 위한 여유율을 반영한 설비 설계 및 시공이 이루어지고 있다. 이는 부분부하가 걸리는 기간 동안에는 설비의 저부하 운전으로 인한 장비의 효율 저하와 에너지 과소비의 원인이 된다. 본 연구는 부분부하에 효율적으로 대응할 수 있도록 냉방플랜트 최적 유량제어를 통한 에너지 절감 방안에 대한 연구로서 냉방플랜트 에너지 성능 분석 프로그램을 이용하여 냉방 부하를 분석하고, 최적 유량제어 시스템을 제안하여 그 에너지 성능을 비교 평가하는 것을 목적으로 한다. 성능 분석 결과 냉방플랜트 최적 유량제어 시스템 적용 시 기존 에너지 사용량 대비 약 17%의 전기에너지 절감이 가능하였다.

주요어 : 중앙식 냉방 플랜트, 유량제어, 에너지 성능, 부분 부하

Abstract - In a centralized cooling plant, precise mechanical design and control strategy are required for peak and partial cooling load management. Otherwise, it will lead to low efficiency of cooling system and energy loss due to low partial load efficiency. The purpose of this paper is to enhance energy performance of the centralized cooling plant by controlling flow system in an industrial building using measured data and energy performance simulation program. The simulation results show that the proposed flow control can cut down annual electric power consumption by about 17% compared with the conventional cooling system.

Key words : Centralized cooling plant, Flow control, Energy performance, Partial load

1. 서 론

국내 중대형 공장의 냉방 시설의 대부분은 전기를 주 에너지원으로 하는 중앙집중식의 냉방 시스템을 적용하고 있다. 우리나라는 계절별 부하 패턴이 매우

상이하기 때문에 일반적으로 열원설비의 설계 단계에서 약 20~30 %의 안전율을 적용한 설비 용량을 선정하여 시스템을 구성하고 있다. 따라서 피크부하가 걸리지 않는 동절기나 중간기 동안에는 과설계 된 용량의 설비들이 운영됨으로써 저부하 운전이 이루어지고 있고, 이는 장비의 효율 저하와 에너지 낭비의 주원인이 되고 있다.⁽¹⁾

최근 국내외에서 이러한 냉방 플랜트의 부분부하 운전 효율 개선 및 에너지 절감을 위한 다양한 연구들

[†]To whom corresponding should be addressed.
School of Architecture, Seoul National University of Science and Technology, Seoul 139-743, Korea
Tel : +82-2-970-6557, E-mail : yikim@seoultech.ac.kr

이 진행되고 있다. 인버터 타입의 냉동기 도입, 냉수 및 냉각수 계통 변유량 제어를 통한 유량 밸런싱의 에너지 절감효과가 약 48 %에 이른다는 연구 보고도 있다.⁽²⁾

본 연구에서는 공장 건물을 대상으로 전기를 에너지원으로 사용하는 중앙식 냉방 플랜트의 연간 에너지 사용 현황 및 부하를 분석하고, 부분부하에 효과적으로 대응 가능한 유량제어 시스템을 설계하였다. 에너지 절감효과 검토를 위한 시뮬레이션은 S사의 플랜트 냉방 에너지 성능 분석 프로그램인 ‘ChalkTalk’ 프로그램을 이용하였다. 설계 당시의 조건 값(design data)을 기준으로 현재 운영되고 있는 냉수 및 냉각수 유량, 입·출구 온도차, 냉동기 및 펌프류의 소비 전력값, 외기 습구온도 등의 실측 데이터를 입력하여 냉동기 및 시스템의 에너지 소비율을 분석할 수 있다. 이 결과를 바탕으로 냉방 플랜트 최적 유량제어를 통한 에너지 절감 효과를 비교·분석하였다.⁽³⁾

2. 냉방 플랜트 개요

2-1. 일반 현황

연구 대상 건물은 경기도 안산에 소재하고 있으며, 인쇄회로기판(PCB)을 주요 생산 품목으로 하고 있다. 365일, 24시간 연중 꾸준하게 냉동기를 가동하여 클린룸 공조 및 공정용 냉수를 생산 공급하고 있는 현장으로서, 냉방에서 사용하는 전기 사용량은 연간 5,958 MWh, 전기 요금은 연간 5.8 억원을 사용하고 있다. 대상 건물의 구체적인 개요는 Table 1과 같다.

Table 1. Summary of subject building.

Area(m ²)	Land area	31,996.9
	Building area	14,671.7
	Total floor area	44,976.0
Location	Ansan, Korea (N37.3, E126.7)	
Construction	2010.	
Structure	Steel-frame structure	
Floor height(mm)	3,500	
Ceiling height(mm)	2,400	
Total floor	4 F	
Base floor area(m ²)	1,4671.7	
Usage	Manufacturing plant	

냉방 플랜트의 주요 냉열원 설비로는 사무실 및 클린룸 냉방과 공정용 냉수 공급을 위한 터보냉동기, 냉수 및 냉각수 계통 순환펌프, 냉각탑 등으로 구성되어 있다.

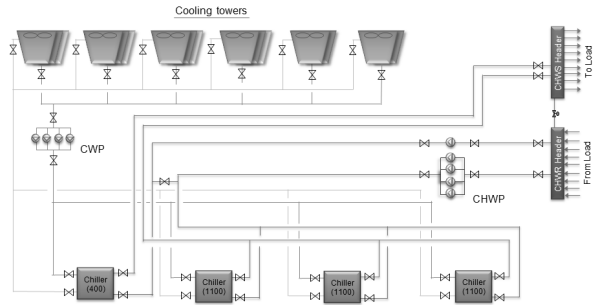


Fig. 1. Schematic diagram of the cooling plant.

Table 2. Equipment specifications.

Equipment	Parameter	Unit	Quantity	Num
Chiller (Turbo type)	Cooling capacity	USRT	1,100	3
	Power consumption	kW	762	
	Evaporator(Min.flow)	m ³ /h	570	
	Evaporator(Out-In)	°C	5-10°C	
	Condenser(Min. flow)	m ³ /h	368	
	Condenser(In-Out)	°C	32-37°C	
	Refrigerant		R-134A	1
	Cooling capacity	USRT	400	
	Power consumption	kW	210	
	Evaporator(Min.flow)	m ³ /h	193	
	Evaporator(Out-In)	°C	5-10°C	
	Condenser(Min.flow)	m ³ /h	154	
Condenser(In-Out)	°C	32-37°C	4	
Refrigerant		R-134A		
Power consumption	kW	110		
Cooling water pump	Flow rate	m ³ /h	798	4
	Head	m	24	
	Power consumption	kW	110	
Chilled water pump	Flow rate	m ³ /h	665	4
	Head	m	35	
	Power consumption	kW	110	
Cooling tower	Cooling capacity	CRT	675	6
	Flow rate	m ³ /h	527	
	Fan	kW	5.5 x 3ea	
	Cooling capacity	CRT	500	2
	Flow rate	m ³ /h	390	
	Fan	kW	7.5 x 2ea	

냉방 플랜트 시스템 구성도는 Fig. 1과 같다.

대상 건물은 전기를 에너지원으로 사용하는 터보형 냉동기가 설치되어 있으며, 용량은 1,100 USRT(3대), 400 USRT(1대)로 구성되어 있다. 냉수 및 냉각수 순환펌프는 110 kW, 각 4대씩 구성되어 있고, 6대의 냉각탑은 병렬식으로 연결되어 있다. 설비의 세부 사양은 Table 2와 같다.

2-2. 냉방 부하 및 에너지 사용량 분석

중앙식 냉방 시스템의 연간 부하 패턴 및 에너지 소비현황을 분석하기 위해서 2012년 1월 1일부터 12월 31일까지의 365일 동안의 장비 운영일지와 현장 근무자들의 인터뷰를 기초 자료로 활용하였다. 또한 최적 유량제어 기법의 적용성 검토를 위해서 냉수 및 냉각수 계통의 유량값, 냉수의 공급 및 환수 배관 간 바이패스 유량값, 응축기 및 증발기의 최소 유량값, 냉수 및 냉각수 입·출구 온도차를 각각 실측하였다. 에너지 단가는 2012년 평균 단가인 98.09 원/kWh을 적용하였다.

Table 3은 플랜트 중앙식 냉방 시스템의 연간 에너지 사용량 및 부하량을 나타내고 있으며, 연간 장비

가동시간은 8,760시간으로 일일 24시간, 365일 연중 무정지 운영을 하고 있다. 대상 건물의 냉방설비는 반도체 생산 공정용 냉수 및 클린룸 냉방용 냉수를 연중 생산 공급하고 있으며, 연간 냉방 부하는 6,154,788 RTh, 냉방에서 사용하는 연간 소비전력은 5,994 MWh이다. 냉방 플랜트의 단위 냉방톤 당 에너지 소비율은 평균 약 1.0 kW/Ton으로 나타나고 있다.

Fig. 2는 대상 건물의 연간 냉방부하율을 나타내고 있으며, 하절기인 7월에 854,050 RTh로 가장 많은 냉방부하가 발생하고 있으며, 중간기인 3월에 306,136 RTh로 최소 냉방부하가 발생하고 있다.

Fig. 3은 대상 건물의 연간 냉수 및 냉각수의 입·출구 온도차를 나타내고 있으며, 냉수는 약 2.8 °C, 냉각수는 약 3.3 °C로 설계값(5 °C) 대비 다소 낮게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이는 상기의 Fig. 2에서와 같이 냉수의 메인 공급 배관과 환수 배관 간의 바이패스 배관에 의해서 공급되는 냉수와 환수되는 냉수가 혼합되어 나타나는 현상이다. 냉수의 낮은 입·출구 온도차에 따른 저온의 냉수가 냉동기의 증발기로 공급되어 결국 냉동기의 효율 저하의 한 원인이 되기도 한다.(4)

Table 3. Annual profile of the cooling plant.

Mon.	Hour (hr)	Power consumption (MWh)	Capacity sum (RTh)	Average capacity (USRT)	Average power (kW)	kW/Ton
Jan	744	413	387,540	521	555	1.07
Feb	672	376	324,371	483	560	1.16
Mar	744	350	306,136	411	470	1.14
Apr	720	375	366,586	509	521	1.02
May	744	525	532,219	715	706	0.99
Jun	720	654	696,042	967	908	0.94
Jul	744	752	854,050	1,148	1,011	0.88
Aug	744	718	850,892	1,144	965	0.84
Sep	720	579	570,960	793	804	1.01
Oct	744	470	466,159	627	632	1.01
Nov	720	391	409,748	569	543	0.95
Dec	744	391	390,087	524	526	1.00
Total	8,760	5,994	6,154,788			1.00

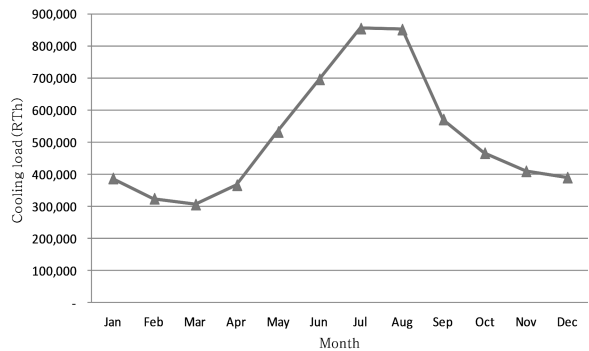


Fig. 2. Annual cooling load of the cooling plant.

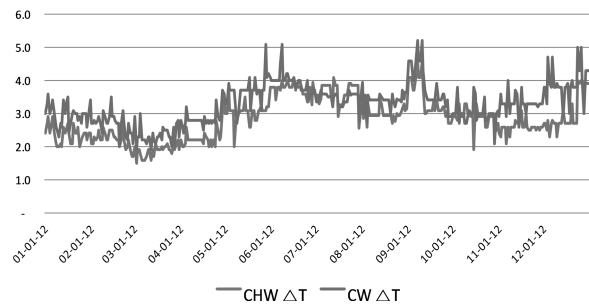


Fig. 3. Temperature variation of CHW & CW.

3. 냉방 플랜트 시스템 최적화 설계

3-1. 최적 유량제어 시스템 구성

중앙식 냉방 플랜트 시스템의 효율 개선을 위해서는 냉수 및 냉각수의 낮은 입·출구 온도차로 인한 냉동기 효율저하 현상을 개선할 필요가 있다. 이를 위해서는 말단 부하의 필요 부하 분석, 냉수 및 냉각수의 입·출구 온도값, 공급 및 환수 압력차를 실시간으로 모니터링하고 분석하여 공급 부하에 맞는 최적 유량제어 시스템 구성이 반드시 필요하다. 이를 위한 전제 조건은 첫째, 안정적인 냉방부하 공급, 둘째, 냉방 장비의 안정성 확보, 셋째, 최대의 에너지 절감 효과 달성이라 할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 중앙식 냉방 플랜트의 최적 유량제어 시스템 구성을 위해서 각 냉동기에서 생산·공급되는 냉수 및 냉각수의 입·출구 온도, 차압, 유량값의 감시를 위한 온도센서, 차압센서, 유량계를 각각 설치하였다. 냉수 공급처의 안정적인 냉열원 공급 여부를 확인하기 위해서 각 공조기(HVAC)의 냉수 밸브 상태 감시, 공급 및 회수 공기의 온도값에 대한

경향 분석을 할 수 있도록 자동제어 시스템을 구성하였다. 또한 냉수 및 냉각수 순환 펌프와 냉각탑 팬에 인버터(VFD)를 설치함으로써 가변 유량제어가 가능하도록 시스템을 구성하였다. 아울러 전체 시스템의 정확한 효율 분석을 위해서 각 동력 설비에 디지털 전력량계를 설치하여 전력 사용량을 모니터링 할 수 있도록 구성하였다.

Table 4는 유량제어 및 모니터링을 위한 각종 계측 장비 및 제어설비의 현황을 나타내고 있다.

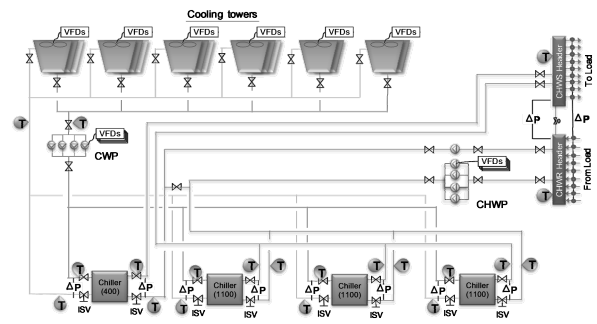


Fig. 4. Improved flow control system.

Table 4. CCMS and equipment specification.

Equipment	Description	Specification	Num
CCMS	Hard ware	CPU INTEL® QUAD CORE	1
	Soft ware	Apogee Insigh 3.10, EMC	1
DDC	Digital direct controller	PXC100	2
Flow controller	Optimal flow controller	DDC-DF01	1
Sensors	Temperature	-50 ~ 400 °C Accuracy : Class AA(IEC 60751)	26
	Differential pressor	50~5000 mbar Accuracy : Class A(IEC 60751)	18
Flow meter	Ultrasonic Flowmeter	Accuracy : Standard ±0.5% at > 0.3m/s	2
	Ultrasonic Flowmeter	Accuracy : Standard ±0.5% at > 0.3m/s	2
VFDs	Chilled water pump	110kW, 3 Ø-440V, 60HZ	4
	Cooling water pump	110kW, 3 Ø-440V, 60HZ	4
	Cooling tower fan	5.5kW, 7.5kW, 3 Ø-380/440V, 60HZ	16
Digital power meter	for Chiller, pump, fan	Accuracy : Per IEC62053-22. Class 0.5S	4
Isolation valve	200 mm	20 kgf/cm ²	2
	350 mm	20 kgf/cm ²	3
	400 mm	20 kgf/cm ²	3

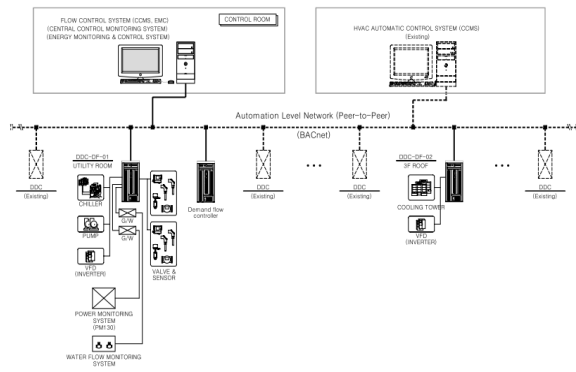


Fig. 5. Flow control system configuration.

Fig. 4는 본 연구 대상의 냉방 플랜트 최적 유량제어를 위한 시스템 구성도를 나타낸 것이다.

3-2. 자동제어 및 감시 시스템 구성

냉방 플랜트의 최적 유량제어를 위한 중앙 감시 및 제어반(CCMS)에서는 가변 압력곡선에 의한 유량제어 로직에 의하여 모든 계통 기능을 자동으로 통제하고 제어 한다.

Fig. 5는 냉방 설비의 중앙 감시 및 제어를 위한 중앙감시반(CCMS) 시스템 구성도이며, 냉방 플랜트에서 사용하는 에너지 사용량 및 장비 효율 분석을 위한 에너지 모니터링 시스템(EMC)을 구성 하였다. 에너지 모니터링 시스템에서는 부하처의 각 공조기(HVAC)의 급기 및 환기 온도, 밸브 개도율을 상시 감시하고, 유량 제어에 따른 부하 변동 현황을 감시 제어하게 된다.

4. 에너지 성능 분석 및 고찰

4-1. 에너지 소비량 분석

플랜트의 냉방 에너지 소비량 및 절감효과를 분석하기 위해서 2012년 1월 1일부터 12월 31일까지 일일 냉동기 운전데이터(소비전력, 입·출구 온도, 외기 온도 및 습도)를 활용하였으며, 냉수 및 냉각수의 유량은 초음파 유량계를 설치하여 측정된 실측값을 활용하였다. 유량제어를 통한 에너지 절감효과를 예측하기 위해서 냉수 및 냉각수 입·출구 온도차를 설계 조건인 5℃로 유지하기 위해서 순환펌프의 회전수를 제어하여 변유량 제어를 하게 되며, 펌프의 상사법칙에 의한 에너지 절감효과를 예측할 수 있다.

Fig. 6은 냉방 플랜트 최적 유량제어 시스템 적용 전(baseline) 에너지 사용량 대비 적용 후 에너지 사용

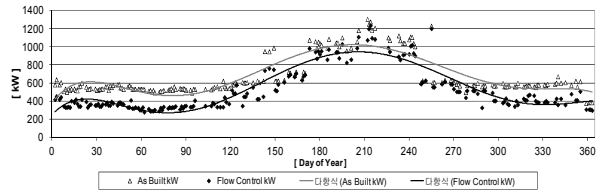


Fig. 6. Annual power profile of cooling plant.

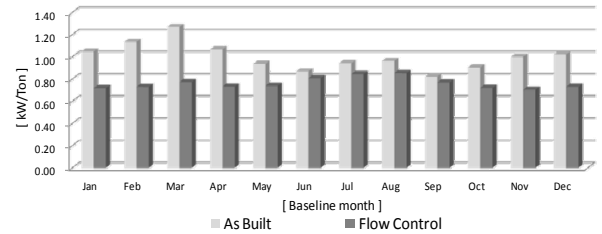


Fig. 7. System kW/Ton of cooling plant.

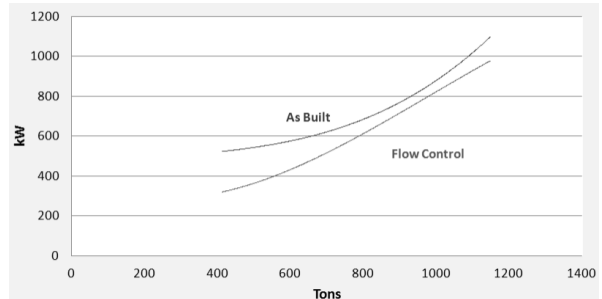


Fig. 8. Cooling plant efficiency comparison

량을 비교 분석한 것으로서 부분부하 기간인 동절기와 중간기 기간(10월-4월)에서 절감효과가 우수한 것으로 나타나고 있다.

Fig. 7은 월별 시스템의 단위 냉동톤 당 에너지 소비율(kW/Ton)을 나타낸 것으로 냉방 플랜트 에너지 소비율은 개선 전 1.00 kW/Ton, 개선 후 0.76 kW/Ton 으로 약 20%의 개선효과가 나타나며, 부분부하 시에도 연중 일정한 성능을 유지할 수 있는 것으로 분석되었다.

Fig. 8은 냉방 톤 수의 함수로 본 냉방 플랜트 소비 전력(kW)을 나타내고 있다. 최적 유량제어 시스템 적용에 따른 시뮬레이션 결과 본 설비의 모든 냉방 톤수 범위에서 베이스라인보다 더 낮은 전력(kW)으로 시스템이 운영되는 것을 알 수 있다. 설비 냉방 톤수는 "x" 값으로 처리하며 "y" 값은 시스템 소비 전력값이다. 두 등식은 향후 에너지 절감량을 계산하기 위해 사용되는 모델이며 베이스라인의 실제 소비 전력값의 산술식은 3차 다항식을 적용하였으며 식 (1)과 같다.

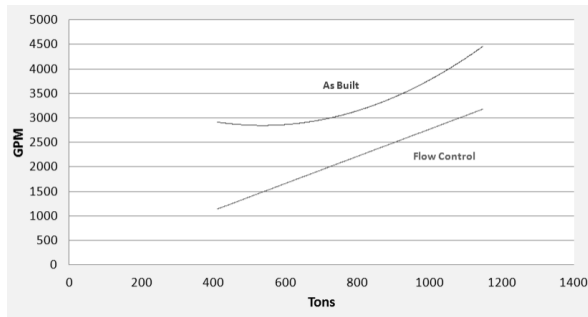


Fig. 9. Cooling plant chilled water supply.

Table 5. Monthly energy saving results.

Month	As built	Flow control	Saving		
	MWh	MWh	MWh	kKRW	%
Jan	413	303	110	10,727	26
Feb	376	262	114	11,176	30
Mar	350	229	121	11,855	35
Apr	375	271	104	10,177	28
May	525	435	90	8,803	17
Jun	654	585	69	6,698	10
Jul	753	699	54	5,247	7
Aug	718	673	45	4,423	6
Sep	579	528	51	4,990	9
Oct	470	393	77	7,552	16
Nov	391	291	100	9,903	26
Dec	391	299	92	9,057	24
total	5,995	4,968	1,027	100,608	17

$$P[kW] = 7 \times 10^{-7} \times \text{Ton}^3 - 5 \times 10^{-4} \times \text{Ton}^2 + 0.2973 \times \text{Ton} + 442.89 \quad (1)$$

Fig. 9는 각 냉방 부하(냉동톤)에 대한 냉수(chilled water) 공급 유량을 나타내고 있다. 그림과 같이 최적 유량제어 시스템 적용 시 전체 냉방 부하 구간에 걸쳐 냉수 설비 작동에 필요한 냉수 공급 유량이 줄어들고 있다.

냉수 및 냉각수 순환펌프에 인버터를 적용하면 냉수 및 냉각수 공급 유량을 더 정밀하게 제어할 수 있

으며, 식 (2)에서와 같이 냉수 및 냉각수 공급 유량 감소는 펌프의 상사법칙에 의하여 전력 사용량을 감소시킨다.

$$\begin{aligned} Q_2 &= Q_1 \times (N_2/N_1)^4 \\ H_2 &= H_1 \times (N_2/N_1)^2 \\ P_2 &= P_1 \times (N_2/N_1)^3 \end{aligned} \quad (2)$$

Table 5는 중앙식 냉방 플랜트 최적 유량제어 시스템 적용에 따른 에너지 절감효과를 나타내는 것으로서 에너지 사용량이 개선 전 5,995 MWh/year 에서 개선 후 4,968 MWh/year로 연간 1,027 MWh/year(17 %)의 절감효과가 나타나는 것으로 분석되었다.

5. 결론

냉방 플랜트 에너지 성능 분석 프로그램인 ‘Chalk-Talk’ 를 이용하여 냉방 플랜트의 최적 유량제어 시스템 적용에 따른 에너지 절감 효과를 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 2012년 연간 총 플랜트 가동 시간은 8,760 시간, 냉방부하는 약 6,154,788 RTh 이다.
- (2) 2012년 1월 1일 부터 12월 31일까지 365일 운영 데이터를 기준으로 기대효과를 분석한 결과 냉방 플랜트의 단위 냉동톤 당 에너지 소비율은 1.00 에서 0.76 kW/Ton 으로 개선되었다.
- (3) 냉방 플랜트의 총 에너지 사용량은 개선 전 5,995 MWh/year 에서 개선 후 4,968 MWh/year로 연간 1,027 MWh/year의 절감효과가 나타났으며, 약 17 %의 에너지 소비량이 감소하였다.

현재 대상 건물은 유량제어 시스템을 적용하여 냉방 플랜트를 운전 중에 있으며, 향후 실제 운영 데이터와 시뮬레이션에 의한 결과 값의 비교 분석을 통한 에너지 절감 효과를 검증할 것이다.

References

1. Sang-ho Lee, Necessity of flow balancing with each chillers, KARSE, 2013, Vol. 30, No. 11, pp. 103-108.

2. Young-hak Song, Energy performance of a cooling plant system using the inverter chiller for industrial building, *Energy and Buildings*, 2007, 39, pp. 289 - 297.
3. Siemens, How to use ChalkTalk, *Building Technologies*, 2011, Vol. 2011.
4. K. F. Fong , C. K. Lee & T. T. Chow, Investigation on variable flow control in existing water cooled chiller plant of high-rise commercial building in subtropical climate, *HVAC&R Research*, 2014, Vol. 20, No. 1, pp. 51-60.