

건물 중앙냉방시스템의 에너지절감을 위한 최적운전 방안에 관한 실험적 연구

황진원¹, 안병천^{2*}

¹가천대학교 건축설비공학과 대학원, ²가천대학교 건축설비공학과

Experimental Study on Optimal Operation Strategies for Energy Saving in Building Central Cooling System

Jin-Won Hwang¹ and Byung-Cheon Ahn^{2*}

¹Department of Building Equipment & System Engineering, Graduate School of Gachon University

²Department of Building Equipment & System Engineering, Gachon University

요약 본 연구에서는 중앙냉방시스템용 모형실험장치를 구성하여 에너지 소비량 및 전력사용요금의 절감을 위한 최적제어방법을 구현하여 실험적 연구를 수행하였다. 최적제어방법으로는 새벽시간의 에너지를 이용한 전력디맨드 응답 제어와 외기온도변화를 고려한 외기보상제어방법 등을 고려하였으며, 제어알고리즘은 LabVIEW 프로그램을 이용하여 작성하였으며, 제어 및 모니터링을 통해 최적제어방법과 기존제어방법과의 제어성능을 비교 고찰하였다. 연구결과로서 본 연구에서 제시한 최적제어방법이 기존제어방법에 비해 양호한 응답특성을 나타냈으며, 에너지소비량은 약 9.5%, 전력요금은 약 15.7%를 각각 절감한 것으로 나타났다.

Abstract In this study, optimal operation strategies to save the electric energy and power price in the building central cooling system is researched by experiments. The optimal strategies of demand response control and outdoor temperature reset control algorithms are applied by consideration the electric energy and power price according to the energy consumption characteristics. The suggested optimal control method shows better responses in the power price and energy consumption in comparison with the conventional one and saves energy consumption by 9.5% and electronic price by 15.7%, respectively.

Key Words : Central Cooling System, Electric Demand Response Control, Electric Power Energy, Outdoor Reset Control, Pre-cooling

1. 서론

건물의 에너지 절약방법으로는 건물의 형상, 방위, 개구율(창, 문), 단열 등을 고려한 건축계획적 접근방법과 설비의 기기 및 시스템 효율 개선, 제어방법 및 신재생에너지 이용 등의 설비적 접근방법이 있다. 특히 설비적 접근방법에서 단기간의 연구 개발로 에너지의 커다란 절감을 실현시킬 수 있는 방법은 시스템의 효율을 극대화할 수 있도록 하는 건물 에너지 운영 관리 및 최적화된 제어

기술의 도입이라고 할 수 있다.

건물의 열원 및 공조시스템에서의 에너지 절약은 주로 시스템의 최적제어를 통해서 얻을 수 있다고 하였는데[1] 이는 건물 내에서 생활하는 사람들이 쾌적한 열 환경을 느낌과 동시에 에너지 소모량과 운전비용을 낮추기 위해서는 시스템의 성능을 최적의 상태로 운전해 줌으로써 불필요한 에너지 소모를 줄여야 한다는 것을 의미한다.

이에 관련된 연구로서 Kim[2]은 사무소용 빌딩의 냉방부하의 전력소비특성과 수용률을 분석하였고 이를 바

본 논문은 2013 가천대학교 교내연구비지원에 의한 결과임.(GCU-2013-R274)

*Corresponding Author : Byung-Cheon Ahn(Gachon Univ.)

Tel: +82-31-750-5309 email: bcahn@gachon.ac.kr

Received August 20, 2013 Revised September 5, 2013

Accepted September 6, 2013

탕으로 사무용 빌딩의 규모별 설계시 부하용량 추정표와 비교분석한 결과 냉방부하에 사용되는 전력량이 전체의 50~66%까지 차지함을 보여주었다.

Hong[3] 등은 외기보상제어를 중앙냉방시스템에 적용을 하여 기존의 제어방식보다 최대 21.8%의 에너지 절감 효과가 있음을 나타내었다.

Ahn[4,5] 등은 중앙냉방시스템에 대해 외기온도와 급기온도, 냉수온도, 냉각수온도 등의 상관관계를 고려하여 최적제어기법을 적용함으로써 에너지 절감이 가능함을 보였다.

일반적으로 냉방부하에 사용되는 전력에너지는 사무용 빌딩에서 사용되는 조명부하, 일반 동력부하와는 달리 시스템의 제어방식을 통해 전력소비를 효과적으로 절감할 수 있고, 냉방시스템은 전부 전력에너지를 사용한다는 점에서 외기보상제어를 냉방시스템에 적용하였을 경우 상당한 전력에너지 절감효과를 가져올 것으로 기대된다. 또한 한국전력공사에서는 전력에너지의 사용 요금을 부하의 집중도에 따라 시간대별로 달리하고 있으며, 적절한 시스템 제어방식으로 전력사용요금의 절감도 동시에 얻을 수 있으리라 판단된다.

Hwang[6] 등은 중앙냉방 시스템에 대해 디맨드 응답 제어 및 외기보상제어 등을 동시에 적용함으로써 에너지 및 전력사용요금 절감이 가능함을 보여주었는데, 이것은 TRNSYS 프로그램 패키지를 이용한 시뮬레이션 연구이며, 실험적 검증이 요구된다.

따라서 본 연구에서는 중앙냉방시스템에 대한 Hwang[6] 등의 연구를 실험적으로 검증하기 위하여, 중앙냉방시스템용 모형실험장치를 구축하고, 시스템 제어 및 데이터 모니터링을 위해 LabVIEW 프로그램[7]을 이용하여 프로그램을 작성한 후 실험을 통해 중앙냉방시스템의 제어특성 및 에너지 소비특성, 그리고 전력요금 절감특성 등을 고찰하였으며, 기존방법과 제안된 제어방법에 대한 비교 고찰이 이루어졌다.

2. 최적제어방법

2.1 전력 디맨드 응답제어

Table 1은 여름의 시간에 따른 전기요금을 나타낸 표 [6]로써 경부하, 중간부하, 최대부하로 나뉘어져 있다. 요금의 차이는 중간부하가 경부하에 비해 2배 이상, 최대부하는 경부하에 비해 3배 이상 차이가 난다. 따라서 요금이 저렴한 경부하시에 낮은 온도로 예냉을 한다면 요금 절감이 가능할 것으로 판단된다.

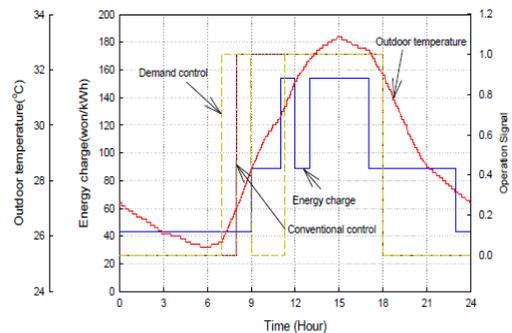
[Table 1] The electric power energy charge with time variation on summer

Time	Energy charge (won/kWh)
23:00 ~ 09:00	43.4
09:00 ~ 11:00	88.75
12:00 ~ 13:00	
17:00 ~ 23:00	
11:00 ~ 12:00	153.95
13:00 ~ 17:00	

전력 디맨드 응답제어란 전력량 요금이 저렴한 경부하 시나 중간부하 시에 기기의 운전을 효율적으로 함으로써 건물의 축열효과를 이용하여 최대부하시의 운전을 부분 부하운전으로 전환시켜줌으로써 전체적인 전력요금의 절감 및 에너지 절약을 가능하게 해주기 위한 제어방법[6]이다.

기존 제어방법에서는 일반적으로 재실시간(Occupied time)이전에 최적기동(Optimal start)운전을 하여 재실시간이 되면 적절한 실내온도를 유지하도록 하고 이후 지속적으로 기계적인 냉방이 이루어지게 되나, 전력디맨드 응답제어의 경우는 새벽시간에 미리 기계적인 냉방을 수행하여 미리 예냉한 후 냉방가동을 중지한 상태에서 설정된 온도에 도달되면 이후 기계적인 냉방을 가동하도록 한다.

Fig. 1은 건물의 축열성능 및 전력량 요금을 고려한 전력디맨드 응답제어에 대하여 설명한 그래프이다. 그림에서 볼 수 있듯이 기존제어방법은 건물의 냉방운전은 보통 8~9시에 가동을 시작한 후 지속적으로 운전을 실시한다.



[Fig. 1] Demand response control characteristics.

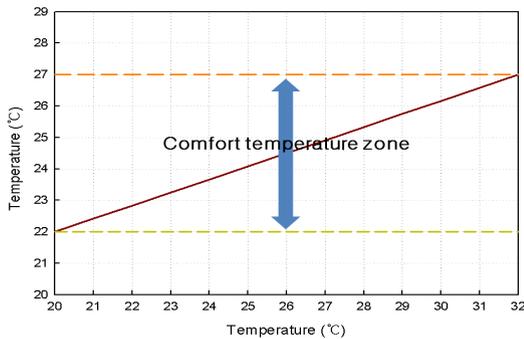
그러나 이때 9시부터는 전력량 요금이 중간부하 요금이 부과됨에 따라 전력요금이 상대적으로 많이 들어가게 되며, 또한 이 전력요금은 11시를 기준으로 하여 조명을 소등하는 점심시간대까지 최대부하 요금이 부과된다. 따

라서 본 연구에서의 전력디맨드 응답제어의 경우는 9시 이전에 냉방운전을 하여 건물을 충분히 예냉시킨 후 중간부하 요금이 부과되는 9시에 가동을 멈추고, 건물의 축열성능이 떨어지는 시점에 다시 냉방시스템을 가동하여 운전 을 계속적으로 지속하게 된다.

2.1 외기보상제어

외기보상제어의 목적은 외기온도의 변화에 맞게 실내 온도의 설정치를 바꾸고 보건상 혹은 쾌감상의 개선을 꾀함과 동시에 외기온도의 변화에 의해 발생하는 실내온도의 읍셋을 제거하는데 있다.

Fig. 2는 외기온도의 변화에 따른 실내공기 설정온도의 변화특성을 나타낸 그림으로써 외기온도가 20~32℃로 변화할 때 실내공기 설정온도를 22~27℃로 변화시키는 외기보상제어의 특성을 나타낸 것이다.



[Fig. 2] Indoor air temperature comfortable range by outdoor air temperature variation.

본 연구에서 적용된 최적제어방법은 전력디맨드 응답 제어에 의해 예냉운전을 실시한 후 건물의 축냉성능으로 인한 효과가 끝나는 시점부터 외기보상제어가 이루어지도록 한 것이며, 이를 통하여 실내온도조건을 유지할 수 있을 뿐만 아니라 전력 에너지 및 전력요금 절감을 달성할 수 있도록 하였다.

3. 실험 장치 및 방법

본 연구에서는 중앙냉방시스템의 에너지 및 전력요금 절감을 위한 최적인전방법의 실험적 연구를 위해 중앙냉방시스템용 모형실험장치를 구성하였다.

실험실은 학교내 연구실에 설치하였는데, 크기는 세로 6,300mm, 가로 7,700mm의 총면적 43.732m²이며, 외벽은 북측이 전면 유리(단창)로 되어 있으며, 동서측은 샌드위치판넬(SOT), 그리고 남측은 유리와 콘크리트 구

조로 되어있다. 설비로는 급기 디퓨저 4개, 배기 디퓨저 4개, 공조기, 냉동기, 제어 및 모니터링용 PC로 구성되어 있다.

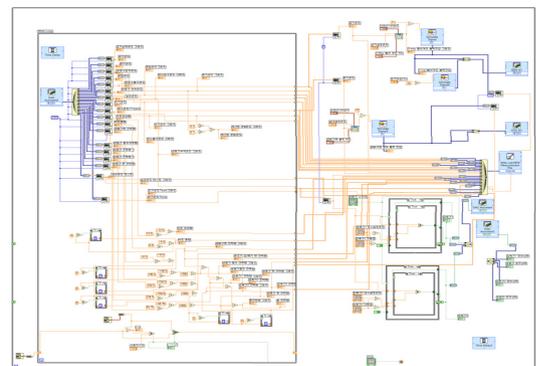
Fig. 3과 Fig. 4는 본 실험을 위해 구성한 중앙냉방시스템용 모형실험장치로서 Fig. 3은 공기조화기를 포함한 냉방시스템 장치를 나타낸 사진이며, Fig. 3은 제어 및 모니터링용 실험장치 사진이다. 실험장치의 구성요소로서 AHU는 냉방능력 1,000kcal/h의 공기조화기이며, 급배기 팬의 표준 풍량은 20CMM이고 최대정압은 15mmAq이다.



[Fig. 3] Experimental apparatus of central cooling system.



[Fig. 4] Monitoring and control system for experiment.



[Fig. 5] Block diagram of real-time control program with LabVIEW.

본 연구에서는 제어 및 모니터링을 위한 실험장치 구성을 위하여 LabVIEW 프로그램을 이용하여 제어알고리즘을 작성하였으며, Fig. 5는 LabVIEW 프로그램을 활용하여 작성된 제어용 프로그램의 블록 다이어그램을 나타낸 그림이다.

시스템 구성요소들의 제어를 위한 제어변수로는 급기 온도 및 냉수온도 등이 있으며 각각의 설정값들은 실제 사무용 건물에서 가장 많이 사용되는 값들을 활용하여 실내 급기온도 16℃, 냉수온도 8℃로 각각 설정하였다.

또한 본 연구에서는 최적운전방법의 전력에너지 사용량 및 사용요금을 등에 대한 기준방법과의 비교 분석을 위하여, 기존제어방식을 사용한 경우와 외기보상제어만을 사용한 경우, 그리고 전력디맨드 응답제어와 외기보상제어를 함께 사용한 최적제어의 경우 등 각각의 경우에 대한 실험이 이루어졌다.

[Table 2] Operation conditions for control methods

Control methods	Start time	Indoor air set temp
Conventional control (Case1)	9:00	23.8℃
Outdoor reset control (Case2)	9:00	Depending on the outdoor air temperature changes
Optimal control (Case3)	8:00	8:00~9:00 : 21℃ After 9:00 : Depending on the outdoor air temperature changes
Optimal control (Case4)	7:00	7:00~9:00 : 21℃ After 9:00 : Depending on the outdoor air temperature changes

Table 2는 각 제어방법에 대한 운전조건을 나타낸 것이다. 표에서 볼 수 있듯이 기존제어방법(Case 1)의 경우는 실내온도 설정값을 23.8℃로 하였으며, 외기보상제어(Case 2)는 외기온도변화에 따라 Fig. 2에 의해 실내온도 설정값이 자동으로 설정되도록 하며, 최적제어방법(Case 2와 3)은 21℃ 1시간 예냉 + 외기보상제어, 21℃ 2시간 예냉 + 외기보상제어로 각각 운전하였다. 기존제어방법에서 실내온도 설정값을 23.8℃의 설정한 이유는 실시간으로 변하는 외기보상제어의 경우와 비교하기 위하여 외기보상제어에서의 24시간 실내온도의 평균값이 23.8℃로 측정되었기 때문이다. 외기보상제어의 설정온도는 외기에 따라 수식에 의해 실시간으로 변화되며, 예냉시 실내 공기 설정온도값은 최적운전의 에너지 및 전력요금절감

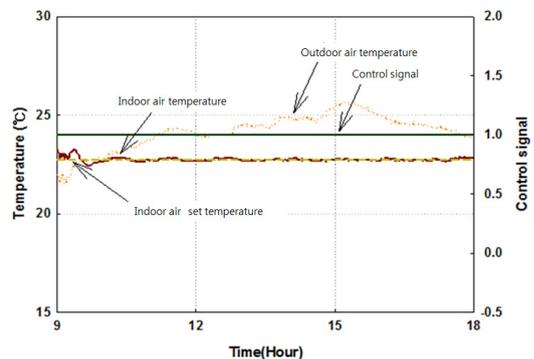
성능에 매우 중요한 제어변수이며, 본 연구에서는 예비 실험을 통해 21℃로 선정하였으며, 이 값은 실내 및 외기 온도조건, 그리고 건물 축열성능 등을 고려하여 선정해 주어야 하나 본 연구에서는 고정하여 사용하였다. 또한 본 연구에서는 실험연구 수행기간 중에는 외기온도가 높지 않아서 예냉운전을 위한 온도설정값을 낮게 잡게 되었다.

4. 결과 및 고찰

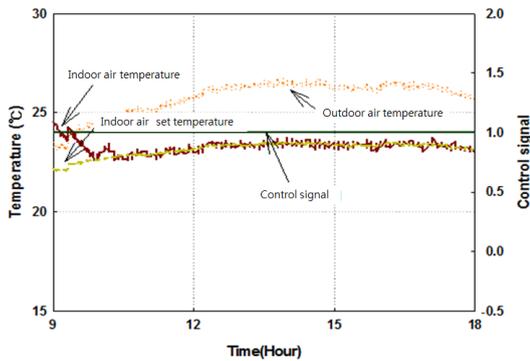
Fig. 6은 기존제어방법(Case 1)로 일반적인 사무실 근무시간인 오전 9시부터 18시까지 냉방운전을 한 경우의 온도 제어특성을 나타낸 그래프이다. 그림에서도 볼 수 있듯이 실내 설정온도인 23.8℃를 잘 추종하며 실내의 공기를 제어하고 있다.

Fig. 7은 외기보상제어(Case 2)를 적용한 경우의 온도 제어특성을 나타낸 그래프이다. 오전 9시가 되면 냉방 시스템이 가동되며 외기온도가 변화함에 따라 실시간으로 실내설정온도 변화됨을 볼 수 있으며, 실내 공기온도가 변화되는 실내설정온도에 잘 추종하고 있음을 볼 수 있다.

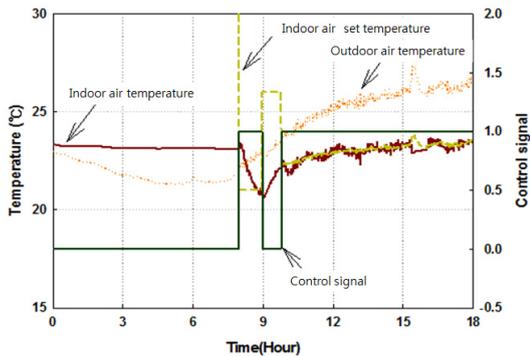
Fig. 8은 최적제어의 경우 중 Case 3의 경우로서 1시간 예냉 + 외기보상제어를 한 경우의 온도 제어특성을 나타낸 그림이다. 그림에서 보면 8시부터 실내공기 설정온도 21℃로 1시간의 예냉운전을 하는 것을 볼 수 있다. 1시간정도 가까이 되어 실내온도는 설정값에 도달하고 있다.이 후 9시부터 냉방시스템이 정지되며 실내온도가 외기보상제어 설정온도에 도달하면 그때부터 다시 실시간으로 실내공기 설정온도가 외기온도변화에 따라 변화하며 운전하게 된다. 여기서 냉방시스템이 정지한 시간은 약 47분으로 측정되었다.



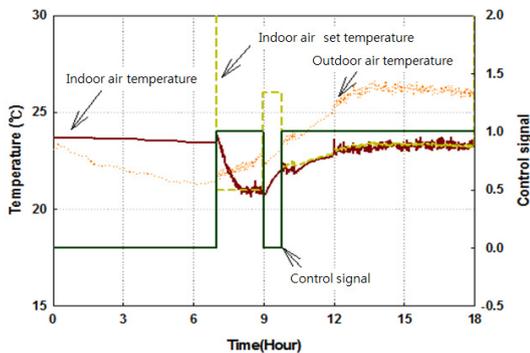
[Fig. 6] Temperature responses with control method (Case 1).



[Fig. 7] Temperature responses with control method (Case 2).



[Fig. 8] Temperature responses with control method (Case3).

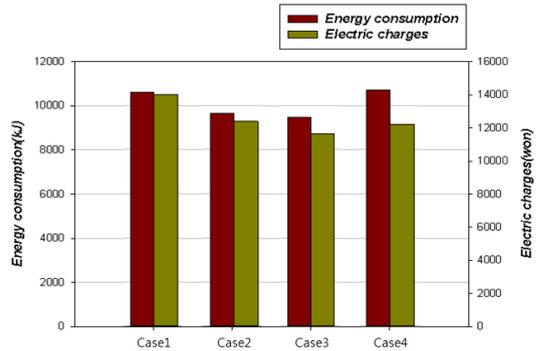


[Fig. 9] Temperature responses with control method (Case4).

Fig. 9는 최적제어의 경우 중 Case 4의 경우로서 2시간 예냉 + 외기보상제어를 한 경우의 온도 제어특성을 나타낸 그림이다. 그림에서 볼 수 있듯이 7시에 예냉운전이 시작되어 1시간 정도 지나서 목표 설정온도인 21°C에 도달되며 실내온도는 9시까지 21°C를 유지하는 것을 볼 수 있다. Case 3과 마찬가지로 9시가 되면 냉방시스템이

운전이 정지되고 실내공기온도는 외기보상제어가 이루어진다. 여기서 냉방시스템이 정지한 시간은 약 48분으로 측정되었다.

Case 3과 Case 4에서 적용된 전력디맨드 응답제어를 위한 예냉운전 시간을 1시간 혹은 2시간동안 각각 운전하였음에도 축냉효과에 의한 냉방시스템의 운전정지 시간이 거의 차이가 없이 나타났고, 또한 냉방정지시간이 1시간 이내로 나타났는데 이것은 본 연구를 위한 실험장치용 실험실의 벽체 및 천정이 샌드위치 판넬구조로 되어 있어서 축냉효과가 매우 미미하게 나타난 것으로 판단된다. 따라서 콘크리트 및 철골구조물로 된 건물의 경우 보다 큰 축냉효과로 인해 전력디맨드 응답제어에 의한 제어성능이 더욱 크게 나타날리라 판단된다.



[Fig. 10] The comparison for control methods in system.

Fig. 10은 각 제어방법에 따른 에너지 소비량과 전기요금을 나타낸 그림이다. 그림에서 볼 수 있듯이 최적제어인 Case 3의 경우는 기존제어방법(Case 1)에 비해 약 9.5%의 전력 에너지 소비량을 절감하였고 전력요금은 약 15.7%를 절감한 것으로 나타났다. 또한 외기보상제어(Case 2)와 비교해 볼 때 에너지소비량에 있어서는 거의 차이가 없으나, 전력요금에 있어서는 약 3.9% 정도의 절감이 가능하였다.

또한 최적제어인 Case 4의 경우는 기존제어방법 및 외기보상제어방법에 비해 전력요금에 있어서는 절감이 가능함을 볼 수 있으나, 2시간의 예냉운전으로 인해 에너지 소비량이 상대적으로 증가하는 것을 볼 수 있다. 따라서 불필요하게 예냉운전 시간을 길게 할 경우 오히려 에너지소비량을 크게 증가시켜 줄을 알 수 있다.

각 제어방법을 적용함에 있어서 외기온도 변화특성이 약간의 차이는 있기 때문에 운전가동시간동안의 평균 외기온도 크기가 유사한 날을 선택하여 실험을 수행하고자 하였다. 각 경우에 대한 평균 외기온도는 Case 1의 경우는 24.2°C, Case 2의 경우는 24.8°C, Case 3의 경우는 24.

6°C, Case 4의 경우는 24.7°C 등이며, 각 평균외기온도 값들의 차이가 크지 않으며 이로 인해 에너지 소비량 및 전력사용요금의 특성에 큰 영향은 미치지 않으리라 판단된다.

본 연구의 최적제어방법은 건물의 축냉성능을 이용한 전력디맨드 응답제어와 외기온도변화특성을 고려한 외기 보상제어 등을 통해 에너지소비량 및 전력사용요금의 절감을 동시에 이룰 수 있도록 하기 위한 것으로써 콘크리트 구조물과 같이 열용량(Thermal capacitance)이 커서 축냉 성능을 상대적으로 크게 나타낼 수 있는 건물에 적용할 경우 보다 양호한 제어성능을 얻을 수 있으리라 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 중앙냉방시스템용 모형실험장치를 구성하여 에너지 소비량 및 전력사용요금의 절감을 위한 최적제어방법을 구현하여 실험적 연구를 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 최적제어(Case 3)를 적용한 경우 기존제어방법(Case 1)에 비해 에너지소비량은 약 9.5%, 전력요금은 약 15.7%를 각각 절감한 것으로 나타났다. 또한 외기보상제어(Case 2)와 비교해 볼 때 에너지소비량에 있어서는 거의 차이가 없으나, 전력요금에 있어서는 약 3.9% 정도의 절감이 가능하였다.
2. 최적제어를 적용함에 있어 전력디맨드 응답제어를 위한 예냉 운전시간의 선정은 에너지소비량 및 전력사용요금에 크게 영향을 미치며, 불필요하게 예냉시간을 증가시킬 경우 오히려 에너지 소비량을 증가시켜 줌을 알 수 있었다.
3. 예냉운전을 위한 시간 및 온도조건 등은 실제 건물에 적용할 경우 외기온도 크기 및 건물의 축열성능 등을 고려하여 선정할 필요가 있으며, 축열성능이 큰 건물에 적용할 경우 에너지 소비량 및 전력요금의 절감에 보다 큰 효과를 얻을 수 있으리라 판단된다.

References

- [1] J. Hyvarinen and S. Karki, "Building Optimization and Fault Diagnosis Source Book" *IEA ANNEX 25*, pp. 12-20, 1996.
- [2] S. D. Kim, J. Lee, "Recommended Practice for a Reasonable Design Demand Factor and Analysis of Power Consumption Characteristics by Loads in Office Building", *Journal of the Korean Institute and Electrical Installation Engineers*, Vol. 19, No.3, pp. 111-118, 2005.

DOI: <http://dx.doi.org/10.5207/JIEIE.2005.19.3.111>

- [3] S. S. Hong, J. Y. Song, B. C. Ahn, "Energy Saving Control Strategy For Central Heating System Using Outdoor Air Temperature Compensation", *Proceedings of the SAREK 2010 Winter Annual Conference*, pp. 505-510, 2010.
- [4] B. C. Ahn, J. Y. Song, Y. D. Joo, J. Kim, "Real Time Near Optimal Control Application Strategy of Central Cooling System", *SAREK* pp.470-477, 2008.
- [5] B. C. Ahn, J. W. Mitchell, "Optimal control development for chilled water plants using a quadratic representation", *Energy and Buildings* 33, No. 4, pp.371-378, 2001.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7788\(00\)00119-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7788(00)00119-5)
- [6] J. W. Hwang, J. Y. Song, B. C. Ahn, "Demand Control Application Strategies for Saving Electric Power price of Central Cooling System", *Journal of Korea Society of Geothermal Energy Engineers*, Vol. 8, No. 4, PP. 1-7, 2012.
- [7] National Instruments, *LabVIEW7 Express User Manual*, 2003.

황진원(Jin-Won Hwang)

[준회원]



- 2012년 3월 ~ 현재 : 가천대학교 건축설비공학과 대학원 석사과정

<관심분야>

건물에너지관리 및 제어(BEMS), 빌딩자동제어시스템(BAS), 설비시스템 에너지해석

안병천(Byung-Cheon Ahn)

[정회원]



- 1986년 8월 : 고려대학교 기계공학과 (공학석사)
- 1992년 2월 : 고려대학교 기계공학과 (공학박사)
- 1991년 12월 ~ 1995년 2월 : 현대중공업(주) 중앙연구소
- 1995년 3월 ~ 현재 : 가천대학교 건축설비공학과 교수

<관심분야>

건물에너지관리 및 제어(BEMS), 빌딩자동제어시스템(BAS), 열원 및 공조시스템 해석 및 제어