

빌딩 에너지 관리 최적화 알고리즘 설계 및 구현

진 중 화[†], 정 선 태^{*}
한국하니웰(주), ^{*}숭실대학교 전자공학과

Design and Implementation of Optimal Control Algorithms for Building Energy Management

Jung-Hwa Jin[†], Sun-Tae Chung^{*}
Honeywell Building Solutions, Honeywell Co., Ltd., Seoul 140-702, Korea
^{*}Department of Electronic Engineering, Soongsil University, Seoul 156-743, Korea
(Received August 4, 2004; revision received September 8, 2004)

ABSTRACT: Building energy saving is one of the most important issues in these days. Energy saving control strategies should be developed properly to achieve the saving. One of such area we could apply is the HVAC (Heating, Ventilation and Air-Conditioning) system. Through the optimal control algorithm for building energy management system (EMS), you can not only save the cost of building energy, but also protect HVAC system components against the unexpected condition. In order to verify the effectiveness of building energy saving, field test was accomplished for several months at 'A' building. And to get the measured data, remote control was used. If the remote control is used in BAS (Building Automation System), control and monitoring can be done for all of the building systems, such as HVAC, power, lighting, security and fire-alarm etc. anywhere any time. Using the remote control, Control and monitoring is possible for the testing system without going there. As the results of field test, we could reduce 5~10% of the building energy cost.

Key words: Energy saving(에너지 절약), Field test(현장시험), Remote control(원격제어), Power(전력), Lighting(조명), Security(방범), Fire-alarm(방재)

기 호 설 명

CCZT : 쾌적온도 범위 중심 [°C]
RCZT : 쾌적온도 구간 [°C]
IAT : 실내온도 [°C]
OAT : 외기온도 [°C]
DC : 외기온도 극한설계조건 [°C]
M : 보정계수

T_{max} : 최대 정지시간 [min]
 T_{min} : 최소 정지시간 [min]

1. 서 론

최근 경제성장과 생활수준의 향상으로 빌딩내 쾌적한 주거 및 사무환경을 위한 공조기술의 중요성은 갈수록 커지고 있으며, 다양한 제어기술을 적용한 공조시스템의 보급도 확대되고 있는 실정이다. 특히 이러한 공조시스템에서의 에너지 절약요구는 점점 증가하는 추세이며 다양한 제어 알고리즘 개발과 제어기술을 통해 빌딩 자동제어

[†] Corresponding author
Tel.: +82-2-799-6213; fax: +82-2-792-9014
E-mail address: junghwa.jin@honeywell.com

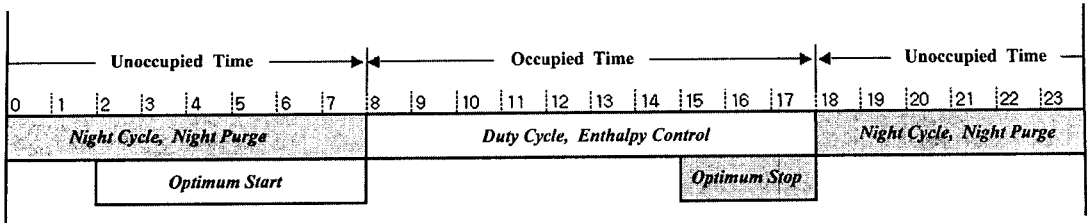


Fig. 1 EMS algorithms time schedule.

시스템에서의 에너지 절감이 필요하게 되었다.

에너지 프로그램이 에너지 절약에 미치는 효과에 대한 인식에 대해서는 67%가 약간의 효과가 있다고 생각하고 있으며, 33%는 크게 효과가 있다고 생각하는 등, 대부분 빌딩 시설관리자는 빌딩 제어시스템의 에너지 절약기능에 대해서는 인식의 정도가 높은 편이다. 그러나 이러한 높은 인식에 반하여 응답자의 83%가 에너지 절약 프로그램이 잘 활용되지 않고 있다고 응답하고 있으며, 그 이유의 38%가 자동화 시스템 및 에너지 절약 프로그램의 기능미비에 있다고 응답하고 있다.⁽⁵⁾

제어 알고리즘을 활용한 빌딩 에너지 절감은 에너지 관리 최적화 알고리즘(EMS)⁽¹⁾을 통해 효과적으로 이루어질 수 있으며 종합적인 에너지 제어방법과 다양한 제어 알고리즘의 적용을 통하여 에너지 절약을 극대화할 수 있다.

본 연구에서는 에너지 관리 최적 제어 알고리즘을 설계하고, 빌딩 공조시스템 에너지 절감을 확인하기 위해 2003년 1월부터 12월까지 'A' 건물에서 현장 테스트를 진행하였으며, 인터넷을 통한 원격 모니터링 제어를 사용하여 실시간으로 데이터를 수집 분석하였다.⁽²⁾ 또한, 분석한 데이터를 바탕으로 현장상황에 맞게 알고리즘을 최적화하였으며, 에너지 제어 알고리즘 성능과 에너지 절감 결과를 분석하였다.

2. 에너지 관리 제어 알고리즘

EMS 알고리즘은 Fig. 1에서와 같이 존(zone)의 공실시간과 재실시간의 두 부분으로 구분되며 시간영역에 따라 독립적인 알고리즘이 적용되어 공조시스템을 운영한다. 공실시간의 제어 알고리즘은 야간 운전(night cycle), 야간 외기냉방(night purge), 최적 기동(optimum start)으로 구성되며 재실시간의 제어 알고리즘은 절전운전(duty cycle), 엔탈피 제어(enthalpy control), 최적 정지(optimum

stop)로 구성된다.

본 연구에서는 위 알고리즘 중, 최적 기동/정지 알고리즘과 절전운전 알고리즘, 엔탈피 제어 알고리즘에 대한 최적 설계와 평가에 대해 논의하기로 한다.

2.1 최적 기동 알고리즘

최적 기동 알고리즘은 빌딩 재실시간 전에 쾌적한 공간온도를 맞추기 위해 공조시스템을 기동하는 기술로 초기운전시 과부하로 인한 에너지

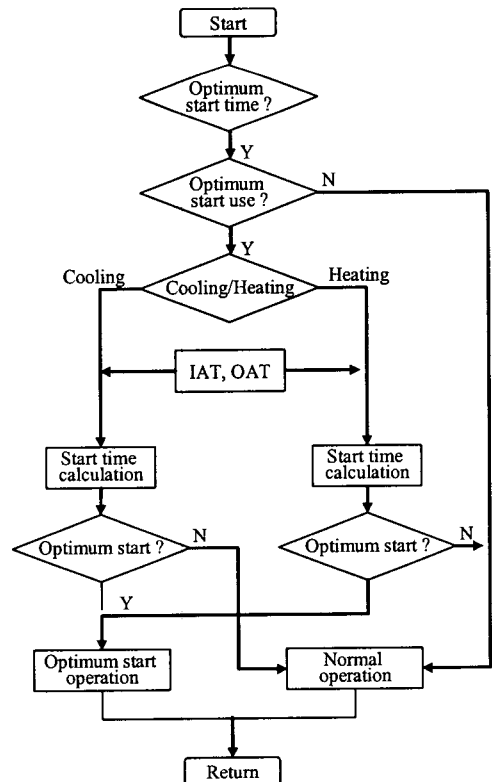


Fig. 2 Optimum start algorithm.

소비를 최소화할 수 있다. 이 알고리즘은 실내온도와 외기온도를 측정하여 공조시스템 시작시간을 연산하며 그에 따른 댐퍼 제어와 열원기기 및 팬 제어를 수행한다.

공조시스템의 최적 기동시간은 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있으며, 여기서 C는 시간

$$\text{시스템 기동시간} = \text{주거 시작시간} - [C \times (IAT - CCZT) + 2 \times (OAT - IAT)] \times M \quad (1)$$

계수이며, 단위는 분(min)이다. M은 보정계수로 현장에 따라 다르게 설정된다.

Fig. 2는 최적 기동운전의 제어 알고리즘을 나타내고 있으며, 실내온도 및 외기온도를 연산입력으로 냉/난방 운전을 시작해야 할 최적 시점을 찾아낸다.

2.2 최적 정지 알고리즘

최적 정지 알고리즘은 빌딩 재실시간 이후에 안락한계를 초과함이 없이 적절한 시기에 공조시

스템을 정지하여 에너지 소비를 최소화하는 것이 그 목적이다. 이 알고리즘은 실내온도와 외기온도를 측정하여 공조시스템 정지시간을 연산하며 그에 따른 댐퍼 제어와 열원기기 및 팬 제어를 수행한다.

시스템의 최적 정지시간은 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있으며, 여기서 C는 시간계수이며, 단위는 분(min)이다.

$$\begin{aligned} \text{시스템 정지시간} = & \text{주거 끝시간} - \\ & C \times \left[\left\{ 1 - \left(\frac{2}{RCZT} \times |CCZT - IAT| \right) \right\} \times \right. \\ & \left. \left(\frac{|OAT - DC|}{|CCZT - DC|} \times M \right) \right] \end{aligned} \quad (2)$$

M은 보정계수로서 현장에 따라 다르게 설정된다.

Fig. 3은 최적 정지운전의 제어 알고리즘을 나타내고 있으며, 실내온도 및 외기온도를 연산입력으로 냉/난방 운전을 정지해야 할 최적 시점을 찾아낸다.

2.3 절전 운전 알고리즘

절전 운전 알고리즘은 공조기의 급기팬과 환기팬을 주기적으로 중지시킴으로써 주간 운전시 팬 운전시간을 줄여 기존의 전가동 팬 운전방식에 비해 전력소모를 감소시키는 기술이다. 이 알고리즘은 실내온도와 이산화탄소(CO₂) 농도를 측정하여 가동시간대, 알고리즘 사용 유무, 냉/난방 설정을 제어입력으로 하여 팬 기동/정지 제어를 수행한다. 절전 운전시간은 실내온도 상태에 따라 연산되며 절전 운전시 이산화탄소 농도가 설정값보다 증가할 경우 급기팬과 환기팬을 가동하고 댐퍼의 개도치를 조정한다.

절전 운전을 위한 절전시간은 냉방 및 난방에 따라 다음 식으로 연산될 수 있으며,

$$\text{냉/난방시 Off Time (단위: 분(min))} = (T_{\max} - T_{\min}) \times C_t + T_{\min} \quad (3)$$

T_{max}는 최대 정지시간, T_{min}는 시스템 장비보호를 위한 최소 정지시간이며, C_t는 온도계수로서 쾌적온도를 중심으로 실내온도와 설정온도의 편차에 의해 정의된다.

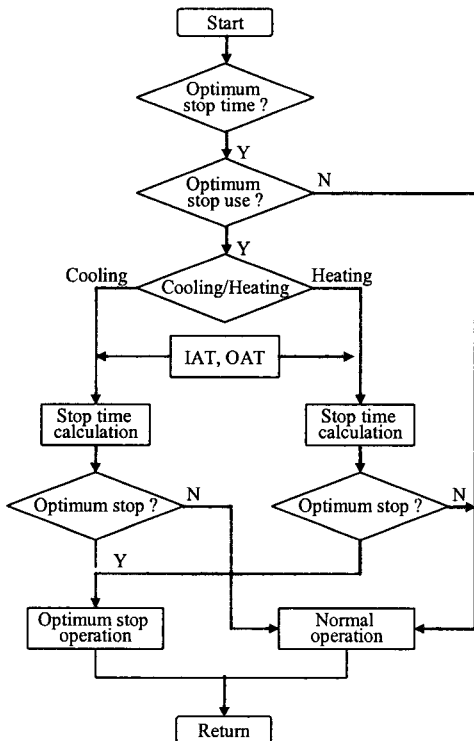


Fig. 3 Optimum stop algorithm.

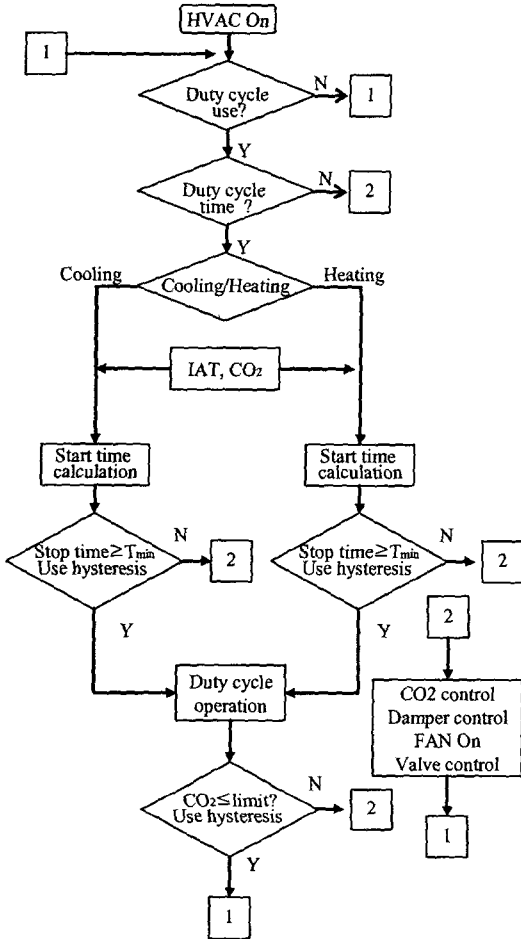


Fig. 4 Duty cycle algorithm.

Fig. 4는 절전 운전 제어 알고리즘을 나타내고 있다. 그림에서 절전 운전은 공조기가 가동되고 있는 시간대에 적용되며, 냉/난방 모드에 따라 각각 다른 절전 운전시간이 연산된다. 또한 최대 절전시간을 설정하여 실내 쾌적도를 벗어나 절전 운전이 진행되는 것을 차단하였다.

2.4 엔탈피 제어 알고리즘

엔탈피 제어 알고리즘은 주간 냉방운전시 상대적으로 엔탈피 에너지가 적은 외기를 도입하는 기술로 실내의 엔탈피 에너지를 감소시키는 것이 그 목적이다. 이 알고리즘은 실내와 외부공기의 엔탈피를 비교하여 엔탈피 제어 운전의 여부를 판단한다. 실내온도와 외기온도, 실내습도와 외기습도를 측정하여 가동시간대, 알고리즘 사용 유

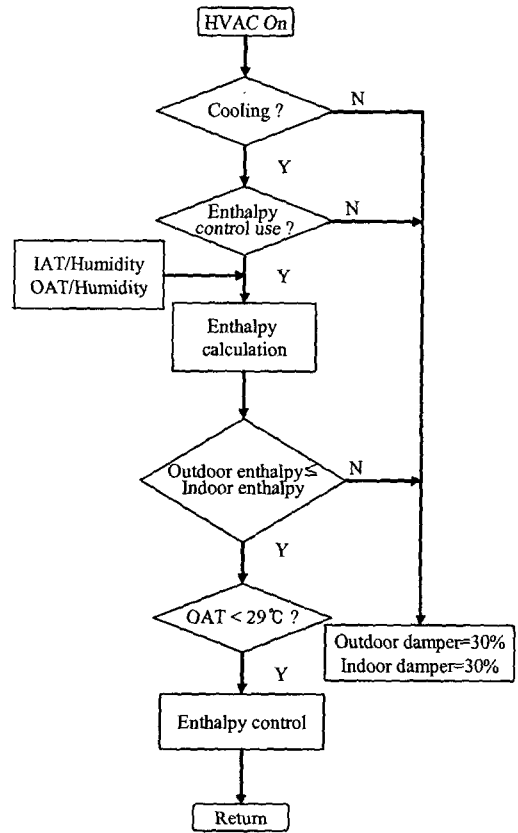


Fig. 5 Enthalpy control algorithm.

무, 냉/난방설정을 제어입력으로 하여 댐퍼 제어 및 팬 제어를 수행한다.

Fig. 5는 엔탈피 제어 알고리즘을 나타내고 있다. 알고리즘에서 실내 엔탈피 수치가 외기 엔탈피 수치보다 높을 때, 히스테리시스를 적용한 엔탈피 제어를 수행하게 된다. 외기 엔탈피 수치가 실내보다 낮을 경우라도 외기온도가 29°C 이상일 때는, 엔탈피 제어를 중지하고 기존의 냉방운전으로 전환한다.

3. 빌딩 공조 자동제어 현장 테스트

3.1 테스트 현장

빌딩 에너지 관리 최적 제어 알고리즘을 테스트하기 위한 현장은 “A” 건물로서 지하 2층 지상 7층의 규모이다. 이 현장의 냉방운전은 6월 초부터 시작하여 9월 말까지 운영되고 있으며, 난방운전은 11월 초부터 4월 말까지 운영되고 있다.

이 건물은 겨울에는 재실 시작시간을 오전 9시로 예상하여 오전 8시에 난방운전을 시작하며, 여름철 냉방운전은 8시 30분에 시작한다. 재실 마감시간은 겨울철, 여름철 모두 오후 7시 30분으로 예상하여 7시에 냉/난방 운전을 마감한다. 냉/난방 부하는 공조기로 60%를 담당하며 FCU (fan coil unit)로 40%를 담당한다. FCU는 주간 시간에는 항상 운전을 하며 공조기는 부하량에 따라 수동으로 On/Off 제어를 수행한다.

3.2 텍스트 방법

에너지 관리 제어 알고리즘의 테스트를 위해서 각 제어 알고리즘에 대한 설정값과 운전상황은 현장에 맞게 수정되었다. 테스트는 같은 사양과 같은 제어로직을 갖고 있는 두 개의 공조기에 하나에는 기존 로직을, 다른 하나에는 에너지 관리 제어 알고리즘을 적용하여 테스트를 진행하였다.

현장 테스트는 최적 기동/정지 제어 알고리즘과 절전 운전 제어 알고리즘, 엔탈피 제어 알고리즘을 적용하였다.

Fig. 6은 Web-Server와 Web-Client를 사용하여 인터넷을 통해 현장을 원격 제어하는 구성도를 나타내고 있다.^(3,4) 그림에서 현장에서 수집되는 데이터 및 제어상황을 인터넷을 통해 원격지의 사무실 또는 노트북과 같은 휴대용 컴퓨터를 이용하여 제어할 수 있다.

Fig. 7은 현장 제어상황을 모니터링하고, 제어 알고리즘을 수정하기 위해 인터넷 통한 원격 제어로 에너지 관리 알고리즘이 수행되는 결과를

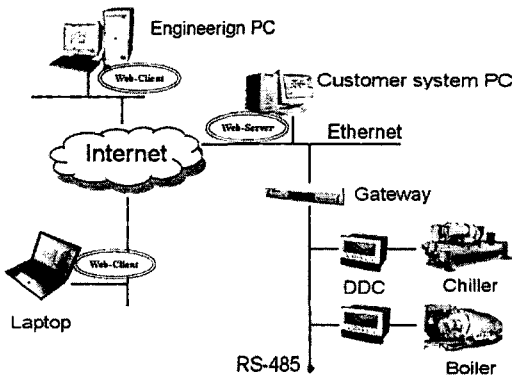


Fig. 6 Configuration of remote control & monitoring with web-server.

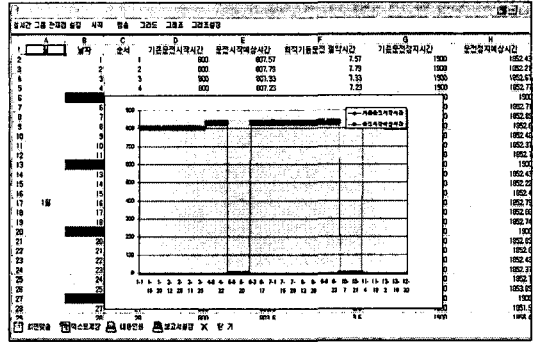


Fig. 7 Online monitoring of measured data.

실시간으로 확인하는 화면을 나타내고 있다. 여기서 수집되는 데이터를 실시간으로 수정/저장하여 추후 분석이 가능하도록 설정할 수 있다. 또한 수집된 데이터를 통해 현재 모니터링되는 현상이 제대로 운영되고 있는지, 적용된 알고리즘이 효과적으로 동작하는지 쉽게 확인이 가능하다.

Fig. 8은 에너지 관리 알고리즘이 적용되지 않은 기존 공조기의 전력사용량과 에너지 관리 알고리즘이 적용된 공조기의 전력사용량을 측정하는 파워메터를 나타내고 있다. 이 파워메터를 통해 동일한 운전시간 동안에 두 공조기 사이에 얼마만큼의 에너지 차이가 생겼는지 분석하여 에너지 관리 알고리즘을 통해 절감된 에너지량을 얻을 수 있었다.

3.3 현장 테스트 및 결과

최적 기동 및 최적 정지 알고리즘을 적용한 테

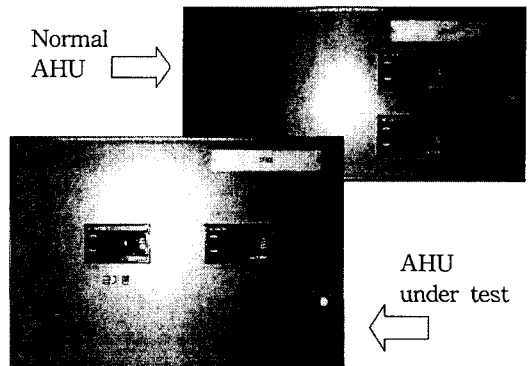


Fig. 8 Power meter.

스트 결과는 2003년 1월 1일부터 12월 31일까지 1년간의 현장 테스트 데이터를 수집 분석하였으며, 절전 운전 및 엔탈피 제어 테스트 결과는 위 기간 동안 운전된 데이터만을 분석하였다.

3.3.1 최적 기동 및 최적 정지 운전 테스트

우선, 테스트 현장의 운영방식은 11월에서 4월까지는 8시에 난방기기를 기동하고, 6월에서 9월까지는 8시 30분에 난방기기를 기동한다. 또한 5월과 10월에는 냉/난방기기를 운전하지 않고, 공조기만을 운전한다. 냉/난방기기 정지시간은 운전되는 모든 기간 동안 오후 7시에 정지한다.

Fig. 9와 Fig. 10은 각각 1년간 최적 기동 운전 제어 알고리즘과 최적 정지 운전 제어 알고리즘을 적용하여 시스템을 운영한 결과를 나타내고 있다.

Fig. 9에서 1년간 측정된 운전시작 예상시간은 기존 운전시간에 비해 하루 평균 7분 정도의 시

간을 더 늦게 시작하는 것으로 나타나 최적 기동 제어 알고리즘을 적용하여 시스템을 가동하는 것이 보다 효율적인 방법임을 확인하였다.

Fig. 10은 오후 7시에 일괄적으로 냉/난방운전을 정지하는 시간과 최적 정지 제어 알고리즘을 적용하였을 때의 시스템 정지시간을 비교한 것으로, 최적 정지 알고리즘을 적용하여 운전을 정하는 것이 하루 평균 7분 정도의 시간을 덜 운전하는 것으로 나타나 최적 정지 제어 알고리즘을 적용하여 시스템을 정지하는 것이 보다 효율적인 방법임을 확인하였다.

3.3.2. 절전 운전 테스트

Fig. 11은 2003년 6월 20일의 절전 운전 제어 알고리즘을 적용하여 공조시스템을 운영한 결과를 나타내고 있다. 여기에서 절전 운전 제어 알고리즘을 적용한 밸브와 댐퍼 개도치, 급/배기팬의 상태를 나타낸 것으로 시스템 가동시간 중, 총

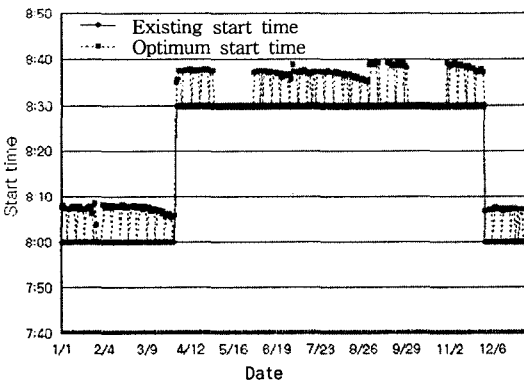


Fig. 9 Field test for optimum start.

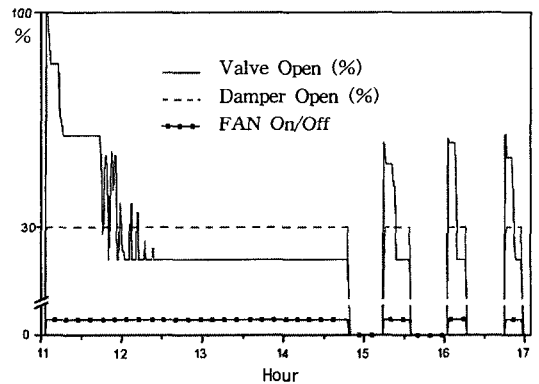


Fig. 11 Field test for duty cycle.

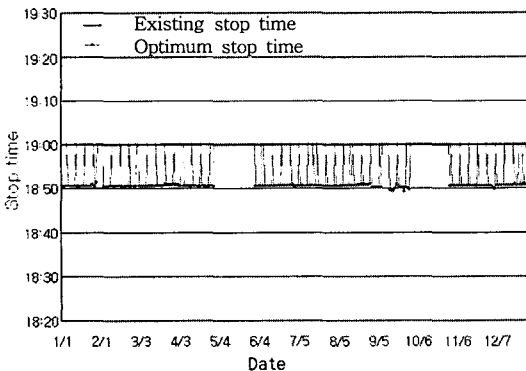


Fig. 10 Field test for optimum stop.

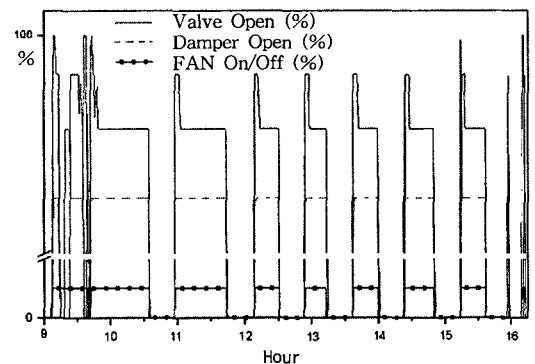


Fig. 12 Field test for enthalpy control.

Table 1 Energy conservation summary (Unit: Won)

Description	Chiller/boiler	FAN	Water pump	Cooling pump	Total
1 year energy cost under current operation	306,432,000	28,728,000	12,312,000	6,156,000	353,628,000
1 year energy cost with optimum start/stop	297,494,400	27,890,100	11,952,900	5,976,450	343,313,850
Savings	8,937,600	837,900	359,100	179,550	10,314,150
1 year energy cost under current operation	306,432,000	28,728,000	12,312,000	6,156,000	353,628,000
1 year energy cost with duty cycle	300,048,000	26,932,500	12,055,500	6,027,750	345,063,750
Savings	6,384,000	1,795,500	256,500	128,250	8,564,250
1 year energy cost under current operation	306,432,000	NA	12,312,000	6,156,000	324,900,000
1 year energy cost with enthalpy control	303,240,000	NA	12,183,750	6,091,875	321,515,625
Savings	3,192,000	NA	128,250	64,125	3,384,375
Grand total of savings	18,513,600	2,633,400	743,850	371,925	22,262,775

80분의 급기팬, 환기팬의 운전시간을 절감했으며, 전력량으로는 약 62 kW를 절감하였다.

3.3.3. 엔탈피 제어 테스트

Fig. 12는 2003년 9월 8일 엔탈피 제어 알고리즘을 적용하여 공조시스템을 운영한 결과를 나타내고 있다. 여기에서 시스템 가동시간 중, 총 174분의 급기팬, 환기팬의 운전시간을 절감했으며, 전력량으로는 약 130 kW를 절감하였다.

그림에서 나타나 있듯이 엔탈피 제어 운전은 단독으로 운전되기보다는 보통 절전 운전과 복합적으로 운전되어 절감효과를 극대화시킨다.

4. 에너지 절감 평가

Table 1은 테스트를 진행한 빌딩의 에너지 관리 제어 알고리즘을 적용하지 않은 2003년 1년간 사용한 전력요금과 최적 기동/정지 운전, 절전 운전, 엔탈피 제어 운전으로 절감 가능한 전력요금을 나타내고 있다. 최적 기동/정지 운전은 실제 1년간 측정된 데이터에서 산정되었으며, 절전 운전 및 엔탈피 제어는, 일부기간 측정된 데이터를 근거로 연감 절감액을 추정하였다. 여기에서 기존의 운전방식으로 소요된 전력요금은 353,628,000 원이고, 에너지 관리 제어 알고리즘으로 절감 가능한 금액은 22,262,775원이며, 총 에너지 절감 효율은 6.3%로 나타났다.

5. 결 론

본 연구를 통해 개발한 에너지 관리 제어 알고

리즘과 인터넷을 통한 원격제어 기술을 응용한 현장 테스트를 진행하였다.

이 기술을 통해 빌딩 자동제어 현장에 직접 가지 않아도 에너지 절감효과를 모니터링할 수 있었으며, 그 결과와 분석을 실시간으로 확인할 수 있었다.

다수의 빌딩 자동제어 현장을 인터넷을 통한 원격제어 기술로 통합할 경우, 현장 상황에 맞는 에너지 관리 제어 알고리즘을 쉽게 적용할 수 있으며, 실시간 모니터링을 통해 제어 알고리즘의 수정/적용이 용이하다.

현장 테스트 결과, 에너지 관리 제어 알고리즘을 적용했을 경우 연 6%의 에너지 절감효과를 얻을 수 있음을 확인하였으며, Fig. 1의 알고리즘 구성과 같이 아직 적용하지 못한 에너지 관리 제어 알고리즘까지 사용했을 경우 연 10% 이상의 에너지 절감효과를 얻을 것으로 기대 되었다.

효율적인 제어 알고리즘이 적용된 에너지 관리 기법과 인터넷 원격제어 기술은 빌딩 자동제어 시스템의 장비보호 및 빌딩 에너지 절감에 크게 기여할 것으로 예상되며, 빌딩 통합관리에 효과적인 솔루션을 제공할 것으로 기대된다.

후 기

본 연구 중 정선태의 참여부분은 숭실대학교 교내연구비 지원으로 이루어졌습니다.

참고문헌

1. Jin, J. H., 2001, A control for HVAC system

- with energy management system (EMS), Proceedings of the SAREK, pp. 832-837.
2. Jin, J. H., 2004, Energy conservation and evaluation on building automation system using the internet remote control, Proceedings of the SAREK, pp. 832-837.
 3. Jin, J. H., 2002, Remote control for building automation system using the BACnet/IP, Proceedings of the IBS Korea, pp. 252-259.
 4. 2002, Control Builder reference manual, User guide of XEM, Honeywell Co., Ltd.
 5. Lee, W. H., 2000, Study on Operation Status of Building Automation Systems in Office Buildings, thesis, Yonsei University, pp. 44-48.