신경회로망을 이용한 에어컨의 가변주기제어 방법론 개발

論 文
55A-10-1

Development of Variable Duty Cycle Control Method for Air Conditioner using Artificial Neural Networks

金 亨 中* · 杜 錫 培** · 朴 宗 培† · 愼 重 麟***
(Hyeong-Jung Kim · Seog-Bae Doo · Jong-Bae Park · Joong-Rin Shin)

Abstract - This paper presents a novel method for satisfying the thermal comfort of indoor environment and reducing the summer peak demand power by minimizing the power consumption for an Air-conditioner within a space. Korea Electric Power Corporation (KEPCO) use the fixed duty cycle control method regardless of the indoor thermal environment. However, this method has disadvantages that energy saving depends on the set-point value of the Air-Conditioner and direct load control (DLC) has no net effects on Air-conditioners if the appliance has a lower operating cycle than the fixed duty cycle. In this paper, the variable duty cycle control method is proposed in order to compensate the weakness of conventional fixed duty cycle control method and improve the satisfaction of residents and the reduction of peak demand. The proposed method estimates the predict mean vote (PMV) at the next step with predicted temperature and humidity using the back propagation neural network model. It is possible to reduce the energy consumption by maintaining the Air-conditioner's OFF state when the PMV lies in the thermal comfort range. To verify the effectiveness of the proposed variable duty cycle control method, the case study is performed using the historical data on Sep. 7th, 2001 acquired at a classroom in Seoul and the obtained results are compared with the fixed duty cycle control method.

Key Words : Air-Conditioner, Direct Load Control, Variable Duty Cycle, Artificial Neural Networks

1. 서 론

우리나라의 냉방부하는 매년 급속도로 성장하고 있으며 하절기 전력수요의 증가는 대부분 냉방부하로부터 기인하므로, 냉방부하의 조절 및 제어는 국가의 에너지사용 효율극대화 측면에서 매우 중요한 사안이 되었다. 국내 하계 냉방부하 특성을 분석해보면 냉방부하 중에 에어컨이 상당부분 차지하고 있고, 향후 '삶의 질' 향상이라는 측면에서 볼 때, 냉방부하의 수요는 지속적으로 증가할 것으로 예측되며, 2002년도 기준 9,956천대의 에어컨이 공급되어 냉방부하 8,910MW, 피크대비 19.5%의 점유율을 보이고 있다[1].

냉방부하의 수요를 억제하기 위한 부하관리프로그램으로는 한국전력공사에서 패키지 에어컨을 대상으로 원격제어에어컨 보급지원제도를 1999년 7월부터 실시하고 있으며, 이 프로그램에 참여하는 소비자들에게 일정금액을 리베이트로 지원하는 형태로 냉방소비전력이 2kW 이상인 패키지형 에어컨을 대상으로 냉방소비전력 1kW당 14만원을 설치후 지급한다[2]. 제어방식은 단방향성 무선 수신기를 패키지 에어컨에 부착하여 OFF 제어 기능, 일괄 온도 제어 기능, +N℃ 온도제어 기능, 주기제어 기능, 정상복귀 기능 등을 수행할 수 있다. 이들 중 대표적인 제어방식이 주기제어이며, 이는 에어컨을 크게 두 개의 그룹으로 분류하고 그룹별로 정상동작(10분)과 정지동작(10분)을 주기적으로 반복하는 것으로서, 운전시간을 정상운전시보다 작게 함으로써 에너지 절감을 달성하기 위한 방식이다[3].

에어컨을 이용한 직접부하제어(DLC : Direct Load Control)에 관한 연구는 대부분 퍼지 로직을 이용한 연구가 주류를 이루고, 개별적인 제어관점이 아닌 전력계통과 연계한 시스템 관점에서 접근하고 있다[4,5].

본 논문에서는 신경회로망을 이용하여 실내온도와 실내습도를 추정하고 이를 이용하여 실내 거주자의 쾌적도를 고려한 에어컨의 가변 주기제어 방법론을 제안한다. 이 방법론은 기존의 에어컨 직접부하제어가 실내 환경을 고려하지 않고 고정주기에 의한 제어를 실행함으로써 발생되는 제어효과의 비효율성을 개선하고 직접부하제어 실행 시간대에 실내 거주자의 쾌적도를 고려하면서 에어컨의 소비전력을 최소화하여 하절기 최대수요전력을 경감하기 위한 제어방법론이다. 본 논문에서 제안한 제어방법론은 상가, 학교 그리고 가정에 설치된 에어컨과 같이 단일 공간 내에 단일의 에어컨이 설치되어 있는 환경에 적용하기 위한 것으로서, 압축기나 실외기 팬이 가동/정지를 반복하는 방식으로 제어되는 에어컨을 대상으로 한다. 에어컨 제어장치는 외기온도, 외기

† 교신저자, 正會員 : 建國大學 電氣工學科 助敎授 · 工博
E-mail : jbaepark@konkuk.ac.kr
* 正 會 員 : 建國大學 電氣工學科 博士課程
** 正 會 員 : 建國大學 電氣工學科 碩士卒業
*** 正 會 員 : 建國大學 電氣工學科 敎授 · 工博
接受日字 : 2006年 6月 13日
最終完了 : 2006年 9月 11日

습도, 실내온도, 실내습도를 측정하여, 이를 제어 알고리즘에 이용하게 된다. 사례연구에서는 기존의 에어컨 직접부하제어에서 시행하고 있는 고정주기 제어방식과의 비교를 통해 제안된 에어컨의 가변 주기제어 방법론의 효율성을 입증하였다.

2. 개념적 고찰

2.1 에어컨 주기 제어

직접부하제어 관점에서 볼 때 에어컨의 주기제어는 제어기간 내 에어컨의 운전을 직접적으로 차단하거나 한계값 설정을 통한 에어컨 운전시간의 감소로서 전력수요를 줄이기 위해 사용한다. 또한 간접적으로 제어지원금 또는 요금체계 변경을 통하여 제어시간대 전후의 에어컨 사용시간의 감소를 유도함으로써 전력절감이 가능하다. 주어진 냉방 부하 조건하에서 에어컨에 의한 주기제어가 이루어지는 경우 평균 운전주기를 구하기 위한 관계식은 다음과 같다[6].

$$Average\ Duty\ Cycle(t) = \frac{Average\ Load(t)}{Connected\ Load} \quad (1)$$

여기서 평균부하(Average Load)는 정해진 시간간격 t(예를 들면 30분)에 걸쳐 사용된 에어컨 부하의 전력량이며, 평균 운전주기(Average Duty Cycle)는 측정주기 대비 에어컨 가동시간을 백분율로 표시한 것이다.

직접부하제어 프로그램은 전력 첨두부하 기간이나 기타 필요한 시간대에 선택된 수용가들의 전력수요를 제한하는 것으로서 수용가 구내에 설치된 직접부하제어용 제어장치를 통하여 사전 계약된 부하를 차단한다. 에어컨 주기제어는 에어컨의 운전주기를 변경함으로써 에너지 감소를 달성할 수 있기 때문에 에어컨 주기제어는 직접부하제어 프로그램에 잘 적용될 수 있다. 에어컨 주기제어를 위하여 주어진 주기제어 전략이 에어컨이 평상시 정상적으로 가동되는 운전주기보다 큰 경우에는 에어컨 주기제어를 통한 에너지 절감에 영향을 주지 못하기 때문에 직접부하제어 프로그램에 있어 주기제어 효과분석을 위해서는 각 개별 에어컨 장비에 대한 운전주기보다는 전체 수용가에 설치된 에어컨의 운전주기 분포가 중요하다. 즉, 에어컨의 에너지 절감 효과는 정상적인 운전주기가 직접부하제어에 의한 운전주기를 초과하는 경우이며, 그 효과는 정상 운전주기와 직접부하제어에 의한 주기제어에서 결정되는 운전주기와의 차이에 따라 비례적으로 나타난다. 이러한 비대칭형태의 주기제어 효과 때문에 수용가 전체에 걸친 운전주기 분포도를 아는 것이 중요하며, 운전주기 분포도는 얼마나 많은 수용가가 해당 운전주기로 운전되는지를 나타내는 빈도수 분포이다. 그림 1과 그림 2는 주기제어가 갖는 효과를 살펴보기 위하여 에어컨 주기제어가 이루어지는 날과 주기제어가 이루어지지 않은 날에 대한 에어컨의 운전주기 분포이다. 각 운전주기 분포는 바 그래프 형태로 표시되었으며, 그 크기는 해당 주기로 에어컨이 운전되는 수용가수의 점유율이다. 그림 1의 데이터는 주기제어가 적용되지 않고 정상적인 에어컨 동작이 이루어진 날이고, 그림 2는 12:00부터 22:00까지 40%의 주기제어 전략이 이루어진 날이다[6].

그림 1과 그림2를 비교해 보면 운전주기(40%)보다 낮은 분포값은 두개의 그림에서 동일한 모양을 하고 있다. 즉, 에어컨 주기제어 모델은 주기제어 전략보다 낮은 운전주기로 가동되는 에어컨에 대해서는 주기제어에 의한 영향이 없기 때문에 제어가 이루어진 날과 제어가 이루어지지 않은 날에 있어 분포도 좌측 하단부분의 그래프는 동일하게 나타난다. 그림 1과 그림 2의 히스토그램 우측 상단부분은 제어로 인한 효과가 확실히 나타나고 있다. 제어가 없었던 날의 운전주기 분포는 0.9와 1.0사이에 큰 점유율을 보였으나, 제어가 시행된 날에는 점유율이 분포도의 중앙 부분으로 이동한 것을 볼 수 있다. 이러한 특성은 다른 주기제어 모델에도 일관되게 적용되며, 개별적으로 운전되는 에어컨은 직접부하제어에 의한 주기제어 전략에 의해 수용 가능한 최대 운전주기에 근접한 제어주기로 에어컨 가동이 제한되어 운전됨을 알 수 있다.

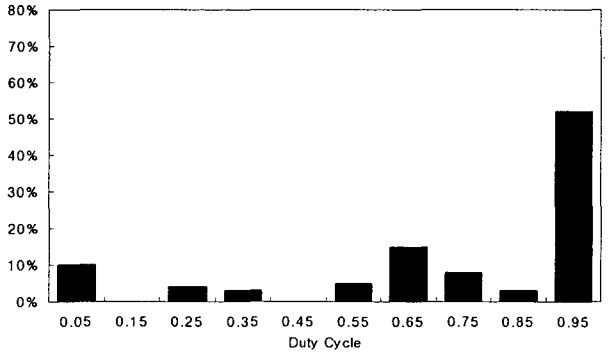

그림 1 30분 운전 주기 분포도 (정상 운전시)
Fig. 1 Half hour duty cycle distribution (normal operation)

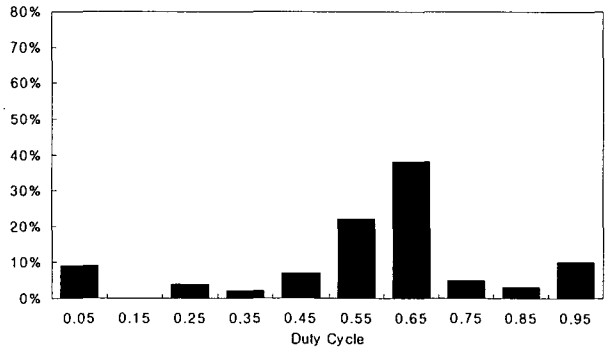

그림 2 30분 운전 주기 분포도 (40%주기 제어시)
Fig. 2 Half hour duty cycle distribution (40% cycling control)

2.2 온열 쾌적 지표

인간은 열적으로 쾌적한 환경을 만들기 위해 노력해 왔으며, 이와 같은 노력은 건축 환경 및 설비제어방법에 반영되어 열적으로 쾌적한 환경을 유지하기 위해 건물이나 가정에는 각종 냉난방 기기 및 제어장치가 설치되어 있다. 인간이 느끼는 온열쾌적감은 심리적 쾌적상태로 물리적인 변수로 변환하기는 어려운 점이 있다. 쾌적도를 나타내는 온열 쾌적 지표로 많이 사용되는 것이 예상 온열감(PMV : Predict

Mean Vote)이다. 예상 온열감은 1970년 덴마크 공과대학의 Fanger교수에 의해 개발된 지표로 인간의 온열환경에 대한 반응을 정량화시킨 것이며, 인체의 대사율, 의복의 열저항치 등과 건구온도, 평균복사온도, 기류, 습도 등을 종합적으로 고려하여 인체가 느끼는 온열 쾌적도를 이론적으로 나타낸 것이다[7].

예상 온열감 이론은 온열환경의 6요소를 대입하면 그 조건에서 따뜻하거나 혹은 춥다고 느끼는 것을 수치로 정량화한 것으로 인체의 열 부하에 근거하여 산출한다. 인체의 열부하란 열적 중립상태로부터 벗어난 가상의 편차를 열량으로 나타낸 것이다. 실제 인체는 생리학적으로 피부온도와 증발열에 의한 손실량을 조정하여 열평형을 유지하므로 인체의 열평형식으로부터 인체의 열부하가 산출된다. 인체의 열부하(L)의 변화와 온냉감 신고치(Y)의 변화관계를 미분방정식으로 작성하여, 온냉감 신고치가 중립(Y=0)일 때 열부하(L)는 0이라는 초기조건을 대입하여 구해진 Y가 예상 온열감이며, 아래의 식과 같다.

$$\begin{aligned} PMV = & \left(0.303\, e^{-36M} + 0.028\right) \\ & \times [(M - W) - 3.05\times 10^{-3}\{5733 - 6.99(M - W) - P_a\} \\ & - 0.42\,\{(M - W) - 58.15\} - 1.7\times 10^{-5} M(5867 - P_a) \\ & - 0.0014\, M(34 - t_a) - f_{cl} h_c (t_{cl} - t_a) \\ & - 3.96\times 10^{-8} f_{cl}\left\{(t_{cl}+273)^4 - (\overline{t_r}+273)^4\right\}] \end{aligned} \quad (2)$$

여기서,

M : 인간의 대사율 [met]

W : 외부 작용 [met]

I_{cl} : 의복의 열저항치 [clo=0.155m^2 ℃ / W]

f_{cl} : 의복 미착용시 대비 의복착용시 인간의 피부비율

$$f_{cl} = \begin{cases} 1.00 + 1.29\, I_{cl} & \text{if } I_{cl} \le 0.078\,[m^2\,℃/W] \\ 1.05 + 0.645\, I_{cl} & \text{if } I_{cl} \ge 0.078\,[m^2\,℃/W] \end{cases}$$

t_a : 건구온도 [℃]

$\overline{t_r}$: 평균 복사온도 [℃]

V_{ar} : 기류 [m/s]

P_a : 부분 수증기압 [Pa]

h_c : 대류 열전달계수 [W/m^2 ℃]

$$h_c = \begin{cases} 2.38(t_{cl} - t_a)^{0.25} & \text{if } 2.38(t_{cl} - t_a)^{0.25} \ge 12.1\sqrt{V_{ar}} \\ 12.1\sqrt{V_{ar}} & \text{if } 2.38(t_{cl} - t_a)^{0.25} \le 12.1\sqrt{V_{ar}} \end{cases}$$

t_{cl} : 의복의 표면온도 [℃]

$$\begin{aligned} t_{cl} = & 35.7 - 0.028(M - W) \\ & - I_{cl}[3.96\times 10^{-8} f_{cl}\{(t_{cl}+273)^4 - (\overline{t_r}+273)^4\} \\ & + f_{cl} h_c (t_{cl} - t_a)] \end{aligned}$$

예상 온열감은 재실자 다수의 평균적인 쾌적감을 표시한 것이며, 예상 온열감이 0이 되는 환경조건에서도 온열적으로 만족하지 않는 사람이 있을 수 있는데 이러한 것을 정량화하기 위해 예상 온열감을 고려한 재실자의 예상 불만족도(PPD : Predicted Percentage of Dissatisfied)를 사용하고 있으며, 그 식은 다음과 같다.

$$PPD = 100 - 95\times\exp\{-(0.03353\, PMV^3 + 0.2179\, PMV^2)\} \quad (3)$$

예상 온열감은 다른 온열지표와 달리 직접 감각량을 표시하기 쉬우며, 또한 예상불만족도에 의해 불만족율도 간단하게 예측할 수 있기 때문에 광범위하게 사용되는 온열환경지표이다. 인간은 쾌적조건으로부터 다소 이탈되거나 작은 열스트레스에 대해서도 그것을 대처할 수 있는 능력을 가지고 있으며, 의복의 착탈에 의해서도 열평형을 유지하는 것이 가능하다. 그러므로 쾌적 조건은 하나의 점으로서가 아니라 어떤 폭을 가지는 범위(쾌적범위)로서 취급하는 것이 타당하다고 할 수 있으며, ISO에서는 -0.5 < PMV < +0.5, PPD = 10%가 되는 범위를 쾌적범위로 하고 있다[7].

표 1 예상 온열감 척도

Table 1 PMV value definition

PMV	쾌적도
+3	덥 다 (hot)
+2	따뜻하다 (warm)
+1	약간 따뜻하다 (slightly warm)
0	중 립 (neutral)
-1	약간 서늘하다 (slightly cool)
-2	서늘하다 (cool)
-3	춥 다 (cold)

3. 가변 주기제어 알고리즘

3.1 문제의 정식화

가변 주기제어 알고리즘은 단일 공간에 위치한 단일 에어컨에 대하여 실내 환경 조건을 고려하면서 에어컨의 소비전력을 최소화하기 위한 제어방법론을 제시하는데 있으며, 이를 위한 목적함수는 아래와 같이 정의한다[4]. 목적함수는 실제 운전되는 일정시간동안의 부하곡선에서 제어에 의한 부하량을 제외한 에너지의 값을 최소화함에 따라 얻을 수 있다. 다시 말하면, 부하제어에 의한 차단부하전력의 값을 최대화함에 따라 그 해를 얻을 수 있다.

$$Minimize\ E = \sum_{n=1}^{N}\{L_{actual}(n) - L_{control}(n)\} \quad (4)$$

$$L_{control}(n) = \begin{cases} L_{rated}(n), & \text{if } control\ is\ stoped\ (t(n) = T_{ON}) \\ 0, & \text{if } control\ is\ activated\ (t(n) = T_{OFF}) \end{cases}$$

$$n = (1, 2, 3, \cdots, N)$$

여기서,

E : N 제어 사이클 동안 소비된 총 전력 에너지

n : 현재의 제어 사이클 단계
L_{actual} : 정상적인 상태에서의 실내 냉방 부하전력
$L_{control}$: 부하제어에 의한 차단 부하전력
L_{rated} : 에어컨의 정격소비전력
T_{ON} : N 제어 사이클 동안 제어가 중지되는 주기 (에어컨 전력 투입)
T_{OFF} : N 제어 사이클 동안 제어가 시행되는 주기 (에어컨 전력 차단)

현재 한국전력공사에서 시행하고 있는 1/2 고정주기에 있어서 $n=1$에서 제어가 되었다면 $n+1=2$에서 제어가 중지되며, 이러한 주기가 교번하여 제어하게 된다. 이에 반하여 가변주기제어의 경우 전체 N 제어 사이클 동안 $T_{OFF}(n)$ 구간이 많아지면 제어효과가 크게 된다.

여기서 $T_{OFF}(n)/(T_{ON}(n)+T_{OFF}(n))=k(n)$으로 나타날 수 있으며, 이는 제약조건이 없는 경우 $k(n)$의 값을 최대화함으로써 목적함수를 만족할 수 있다. 하지만 $k(n)$의 값을 최대화하는 경우는 에어컨의 동작을 항상 정지상태로 유지하는 것으로 이는 수용가의 불만을 야기될 수 있다. 따라서 다음과 같이 실내 환경의 쾌적도가 만족되는 경우 에어컨 부하 전력이 차단되는 제약조건을 정의해야 한다.

$$t(n)=\begin{cases} T_{OFF}(n), & \text{if } -0.5 < PMV(n) < 0.5 \\ T_{ON}(n), & \text{otherwise} \end{cases} \tag{5}$$

또한 에어컨에 대한 제어를 결정하기 위해서는 현재 단계에서 수집된 데이터를 통해 다음 단계에서의 온도와 습도를 예측한 이후 제어를 실시하게 된다. 이에 계산된 예상 온열감은 쾌적범위를 만족해야 하므로 예측값 $temp(n+1)$과 $humid(n+1)$을 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} t(n+1) &= f(PMV(n+1)) \\ &= f(Temp(n+1), Humid(n+1)) \end{aligned} \tag{6}$$

그림 3은 예측 계산된 예상 온열감에 의해 에어컨의 가동/정지를 결정하여 에어컨 제어주기를 가변적으로 설정하는 방법에 대한 개념을 보여주고 있다. 에어컨 가동 및 정지시간은 현재 한국전력공사에서 수행하고 있는 원격제어 에어컨 보급사업과의 연계를 위하여 10분 단위로 한다. 그림 3에서와 같이 예측된 예상 온열감이 0.5를 초과하는 경우 해당 에어컨은 기동되어 실내온도 및 실내습도가 쾌적범위 내에서 유지 될 수 있도록 하며, 예측된 예상 온열감이 0.5를 이하인 경우에는 에어컨 정지 상태를 계속적으로 유지하게 된다.

즉, 에어컨 정지 후 10분 시점에서 이후 10분 동안의 예상 온열감을 예측하고 이를 이용하여 다음 단계의 에어컨 동작을 결정한다. 그림 3의 경우 제어 시작 후 1시간에 대한 에어컨 가동률을 계산해 보면 50%로서 10분 가동, 10분 정지의 50% 운전주기로 운전한 경우와 동일한 50%의 에어컨 가동률이나, 1시간 20분 동안의 가동률을 살펴보면 37.5%로서 약 12.5%가 감소된 가동률이 된다.

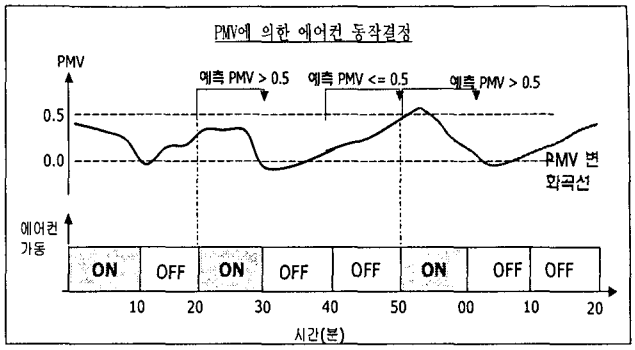

그림 3 예상 온열감에 의한 에어컨 운전주기 결정
Fig. 3 Air-conditioner operation decision from PMV value

본 논문에서 제안한 가변 주기제어 방법론을 위한 제어 흐름도는 그림 4와 같다.

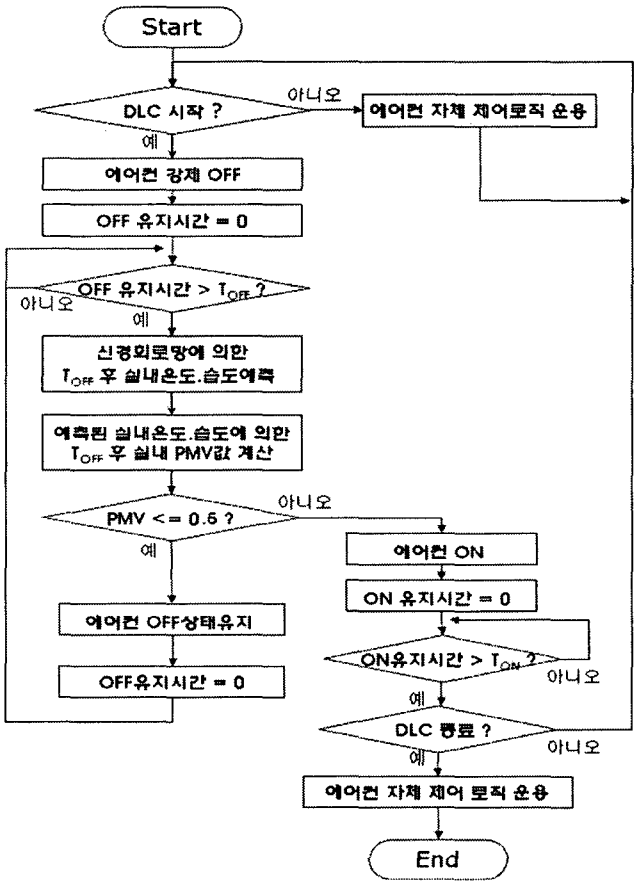

그림 4 가변 주기제어 흐름도
Fig. 4 Flow chart for a variable duty cycle

3.2 신경회로망의 구현

신경회로망을 이용한 자료의 예측은 입력 자료의 종류와 범위, 그리고 이러한 입력 자료를 신경회로망에 대한 신호로 변환하는 활성함수(Activation Function)의 종류 및 은닉층의 수와 각 은닉층의 유닛 수 등에 따라 성능이 결정된다. 또한 동일한 입력 자료와 활성함수를 사용하는 경우라도 자료들의 입력방법, 즉 조합방법에 따라 상이한 결과가 도출될

수 있다[8,9]. 따라서 적당한 입력 자료의 조합방법을 찾아내는 것 또한 알고리즘의 성능을 향상시키는데 있어서 매우 중요하다.

3.2.1 패턴의 선정

본 논문에서는 신경회로망의 학습을 위해서 현장에서 수집된 데이터를 사용하였으며, 최종적으로 에어컨 정지 이후의 시간 변화에 따른 실내온도 및 실내습도를 예측하였다. 수집된 데이터의 경우 실내 온도데이터와 실내 습도데이터가 상호 연관성이 작기 때문에 실내온도 예측시에는 예측전 10분에 걸친 실내온도와 외기온도 데이터 패턴을 선정하였고, 실내습도 예측시에는 예측전 10분에 걸친 실내습도와 외기습도 데이터 패턴을 선정하였다.

3.2.2 입력 자료의 선정

한국전력공사의 원격제어 에어컨 보급지원 사업은 원격제어 에어컨 보급을 통해 냉방부하의 직접제어로 하계피크부하를 감소시켜 효율적 수요관리와 전력설비 건설에 따른 투자비 감소를 목적으로 한다. 그 효과를 극대화하기 위해 사업의 시행 시점은 7월과 8월 오후 2시부터 4시 사이에 10분 가동, 10분 정지의 주기제어로 운영하고 있다[2]. 따라서 본 논문에서는 하절기간인 7월, 8월 오후 시간대에 수집한 데이터를 신경회로망의 입력 자료로 사용한다. 실내온도 예측시 사용되는 20개의 입력 자료는 예측시 이전 10분간 실내온도(분당 1개의 입력자료), 10분간 실외온도(분당 1개의 입력자료)이며, 실내습도 예측시 사용되는 20개의 입력 자료는 예측시 이전 10분간 실내습도 (분당 1개의 입력자료), 10분간 실외습도(분당 1개의 입력자료)이다.

3.2.3 역전파 신경회로망 요소결정

신경회로망에는 홉필드 네트워크, 코호넨 네트워크, ART 네트워크 등 다양한 형태의 방법들이 존재한다[10]. 본 논문에서는 그림 5와 같이 입력층은 20개의 유닛, 은닉층은 20개 그리고 출력층은 5개의 유닛으로 구성되는 역전파 다층신경회로망(Back-Propagation Multi Layered Neural Network)을 사용하였다.

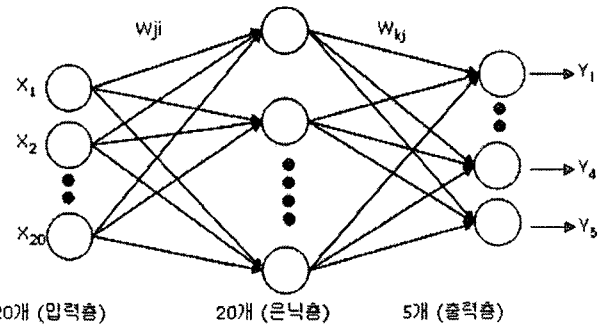

그림 5 역전파 다층 신경 회로망 구성
Fig. 5 Back-Propagation multi-layered neural network

입력요소로 결정된 20개 요소는 실내온도 예측의 경우 에어컨 정지 후 10분간의 분당 실내온도 데이터 10개, 같은 시점에서의 외기온도 데이터 10개이다. 출력요소는 에어컨 정지 후 10분부터 20분 사이의 실내온도 데이터 5개로서 이들 데이터는 2분의 시간 간격을 갖고 있다. 즉, 에어컨 정지 후 12분, 14분, 16분, 18분, 20분의 실내온도 데이터이다. 실내습도 예측의 경우에도 실내온도 예측과 동일하게 실내습도 및 실외습도 20개의 입력 요소를 사용하여 에어컨 정지 후 10분부터 20분 사이의 실내습도 데이터 5개를 예측하였다.

3.2.4 알고리즘 학습요소 결정

본 논문에서 실내온도와 실내습도를 예측하기 위해 사용한 활성함수는 단극활성함수이며 아래의 식과 같이 표현된다.

$$f(x) = \frac{1}{1+e^{-\lambda x}} \tag{7}$$

활성함수는 신경회로망에서 입출력 값의 신호 발생자 역할을 수행한다. 식 (7)은 λ값에 따라 함수의 형태가 달라지며, 본 논문에서는 λ값을 1로 두었다. 아울러 학습률은 예측치가 최소지점을 지나쳐버리는 오버슈트가 일어나지 않도록 하기위하여 작은 학습률을 선택하였고 그 값은 0.01을 선택하여 적용하였다. 모멘텀항의 경우 학습률과 동일한 이유로 0.1을 선택하였다.

4. 사례 연구

본 논문에서 제안한 에어컨의 가변 주기제어 방법론을 검증하기 위해, 서울시 성북구 안암동에 위치한 고려대학교 어학관의 신축 후 2001년 7월, 8월, 9월의 시운전 기간동안 동일한 강의실에서 취득된 실내온도 및 실내습도 데이터를 이용하였다. 본 논문에서는 이 데이터를 이용하여 신경회로망을 학습하고, 예상 온열감을 예측하여 이를 통해 에어컨의 가변 주기제어 알고리즘을 검증하였다. 연구에 적용된 데이터는 비 또는 바람 등의 외기 영향에 따른 외부 환경요소가 반영되지 않은 하절기 맑은 날의 데이터를 사용하였다. 이는 직접부하제어가 필요한 시점이 하절기 냉방부하의 급증으로 전력수급에 차질이 발생한 경우로 한정하였기 때문이며, 송전선로 이상이나 발전기 이상으로 인한 부하의 긴급 제어시의 동작은 예외로 하였다.

4.1 실내온도 및 실내습도 예측

신경회로망의 학습용 데이터로 이용하기 위하여 각 데이터는 에어컨 정지 후 20분간의 데이터를 수집하였으며, 그림 6은 실내온도 예측용 입력 자료로 선정된 에어컨 정지 후 20분간의 실내온도 변화 추이 데이터를 나타낸 것이다. 신경회로망의 학습을 위해 초기 10분간의 데이터(1분 단위)는 입력자료로, 다음 10분간의 데이터(2분 단위)는 출력자료로 사용하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 에어컨이 정지한 이후의 실내온도는 시간에 따라 서서히 증가하며, 이는 실내 냉

방부하의 크기, 실외 온도 등 여러 가지 환경요소들이 복합적으로 영향을 미치고 있으며, 수집된 데이터는 실내 환경특성상 대부분 실내온도 27℃를 넘지 않고 있다.

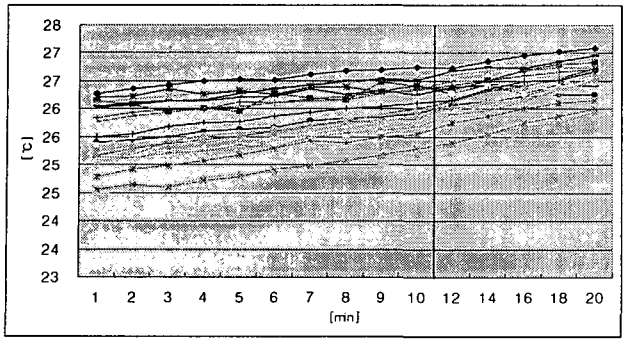

그림 6 실내온도 변화 데이터
Fig. 6 The indoor temperature data

그림 7은 실내습도 예측용 입력자료로 선정된 에어컨 정지 후 20분간의 실내습도 변화 추이 데이터를 나타낸 것이다. 실내습도는 에어컨 정지후에 값이 전체적으로 하강하는 형태를 보이고 있다. 위의 실내온도 데이터와 같이, 실내습도를 예측하기 위한 신경회로망의 학습을 위해 초기 10분간의 데이터(1분 단위)는 입력자료로, 다음 10분간의 데이터(2분 단위)는 출력자료로 사용하였다. 에어컨 기동시에는 실내습도의 상승이 있으며, 실내 환경 및 외기 습도의 영향으로 수집데이터의 경우 에어컨 정지 후 20분 후에는 대부분 상대습도 44%에 근접하는 것으로 나타났다.

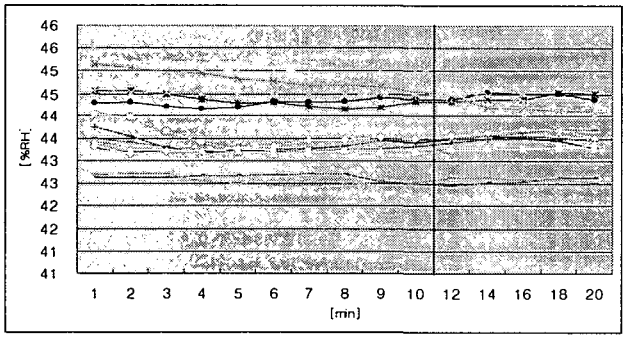

그림 7 실내습도 변화 데이터
Fig. 7 The indoor humidity data

신경회로망의 학습단계를 거친 후, 수집된 에어컨 정지 후 20분간의 실내온도 및 실내습도 데이터 중 임의로 4개를 선택하여 본 논문에서 사용한 신경회로망의 성능을 확인하였다. 임의로 선택된 20분간의 데이터를 초기 10분간의 데이터는 신경회로망의 입력자료로 이용하여 다음 10분간을 2분 간격으로 예측하고 그 결과를 실제 데이터와 비교하였다. 표 2에서 볼 수 있듯이 4개의 실내온도 예측데이터는 상대오차 최대 1.27%범위내의 좋은 예측결과가 도출되었다. 이는 온도데이터가 특별한 경우를 제외하면 대부분 큰 변화가 발생되지 않으며, 학습데이터와 유사한 패턴을 유지하기 때문으로 분석된다.

표 2 실내온도 예측 오차
Table 2 Relative error of the predicted indoor temperature

구 분		2분 후	4분 후	6분 후	8분 후	10분 후
Case #1	실제 값	26.01	26.11	26.16	26.36	26.49
	예측 값	26.05	26.18	26.31	26.43	26.53
	오차(%)	0.16	0.27	0.55	0.26	0.14
Case #2	실제 값	25.75	25.87	26.01	26.11	26.16
	예측 값	25.81	25.95	26.12	26.27	26.38
	오차(%)	0.25	0.32	0.42	0.61	0.84
Case #3	실제 값	25.40	25.55	25.75	25.87	26.01
	예측 값	25.56	25.70	25.91	26.08	26.20
	오차(%)	0.61	0,60	0.62	0.82	0.74
Case #4	실제 값	25.38	25.55	25.69	25.75	25.95
	예측 값	25.55	25.70	25.91	26.08	26.20
	오차(%)	0.67	0.57	0.85	1.27	0.96

그림 8에서 11까지는 실제 실내온도와 예측된 실내온도를 보여준다.

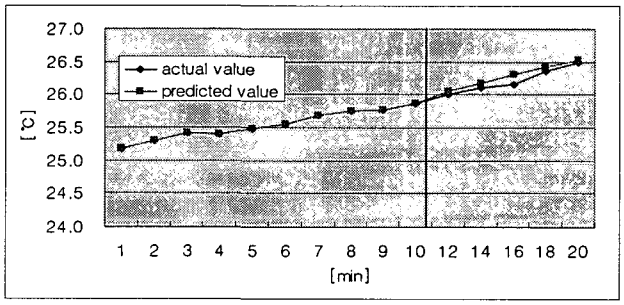

그림 8 실내온도 예측 데이터 - 1
Fig. 8 Predicted data for indoor temperature - 1

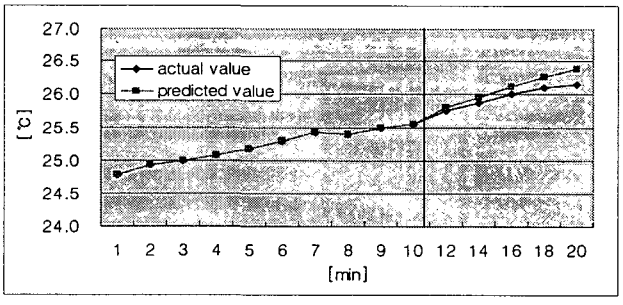

그림 9 실내온도 예측 데이터 - 2
Fig. 9 Predicted data for indoor temperature - 2

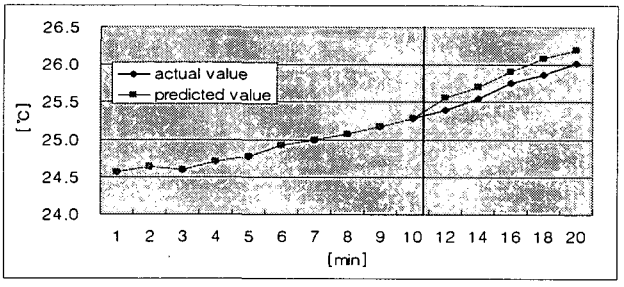

그림 10 실내온도 예측 데이터 - 3
Fig. 10 Predicted data for indoor temperature - 3

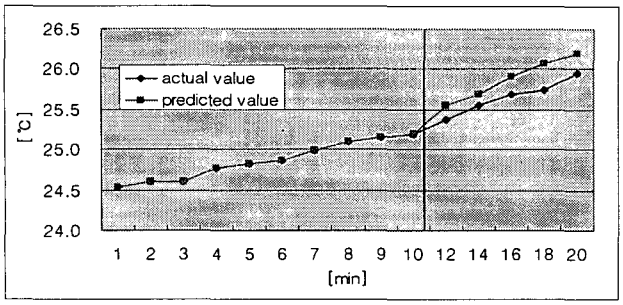

그림 11 실내온도 예측 데이터 - 4
Fig. 11 Predicted data for indoor temperature - 4

실내습도 예측 또한 실내온도의 경우와 동일하게 수행하였으며, 그 결과를 표 3에 보였다. 예측에 사용되어진 습도 데이터의 경우 그 변화폭이 상당히 작아 상대습도 42%에서 44%대에서 값이 분포하고 있어 예측 상대 오차는 1.30%로서 실내온도 오차 1.27%와 비슷하나, 학습데이터로 사용되어진 데이터 패턴의 유사성이 실내온도 데이터에 비하여 떨어지는 관계로 실내습도 실제 패턴과 예측패턴과의 차이가 있다.

표 3 실내습도 예측 오차
Table 3 Relative error of the predicted indoor humidity

구 분		2분 후	4분 후	6분 후	8분 후	10분 후
Case #1	실제 값	42.72	42.50	42.47	42.53	42.54
	예측 값	42.40	42.34	42.30	42.21	42.18
	오차(%)	0.76	0.37	0.40	0.75	0.84
Case #2	실제 값	42.67	42.69	42.72	42.50	42.47
	예측 값	42.52	42.46	42.42	42.33	42.30
	오차(%)	0.35	0.53	0.71	0.41	0.41
Case #3	실제 값	43.36	43.38	43.34	43.22	43.13
	예측 값	43.65	42.67	43.58	43.52	43.46
	오차(%)	0.67	0.68	0.56	0.68	0.76
Case #4	실제 값	43.46	43.19	43.23	43.19	43.22
	예측 값	43.81	43.75	43.70	43.63	43.52
	오차(%)	0.81	1.30	1.09	1.02	0.69

아래의 그림은 실제 실내습도와 예측된 실내습도의 추세를 나타낸다.

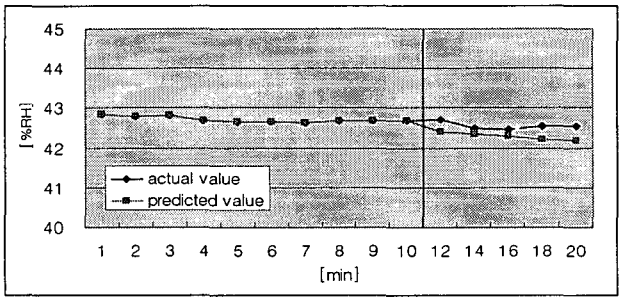

그림 12 실내습도 예측 데이터 - 1
Fig. 12 Predicted data for indoor humidity - 1

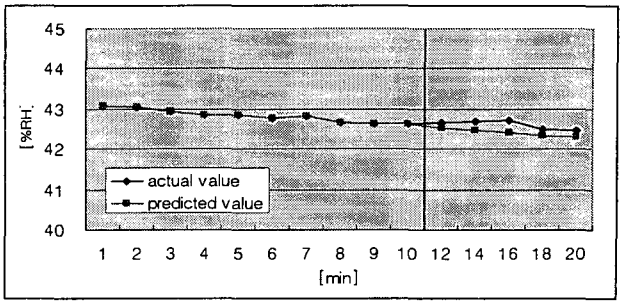

그림 13 실내습도 예측 데이터 - 2
Fig. 13 Predicted data for indoor humidity - 2

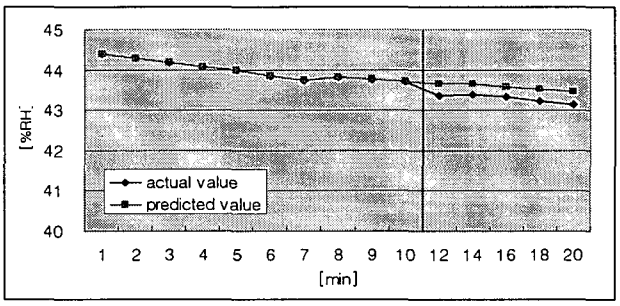

그림 14 실내습도 예측 데이터 - 3
Fig. 14 Predicted data for indoor humidity - 3

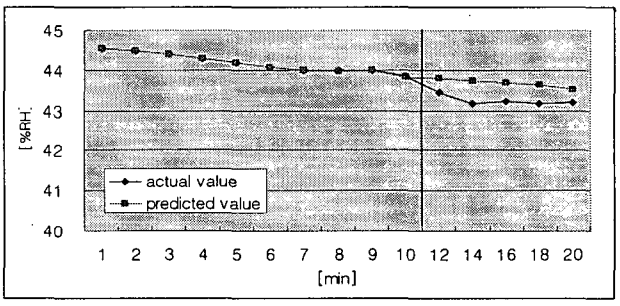

그림 15 실내습도 예측 데이터 - 4
Fig. 15 Predicted data for indoor humidity - 4

4.2 예상 온열감

예측된 실내온도와 실내습도를 이용하여 예상 온열감을 계산하고 예측 시점에서의 실내 환경에 대한 쾌적도 계산을 수행하였다. 예상 온열감 계산은 위에서 언급한 바와 같이, 측정요소로서 건구온도, 복사온도, 기류, 상대습도의 네 가지 요소와 인간의 대사율, 의복의 열 저항치 두 가지 산정요소를 이용하여 계산하여야 한다. 본 논문의 사례연구에서는 하절기, 맑은 날, 일반사무실이라는 가정을 두어 인간의 대사율은 70met, 의복의 열저항치는 0.5clo, 복사온도는 건구온도보다 2.5℃ 높고, 실내 기류는 0.25m/s라 두고 계산을 하였다.

표 4와 그림 16에서 보는 바와 같이, 각 예측데이터에 대한 예상 온열감 값은 대부분 ISO에서 정한 쾌적범위 내에 있으나, "예측데이터 1"의 10분 후 예측 온도와 예측 습도에 대한 예상 온열감 계산값이 0.521로서 쾌적범위를 벗어났다.

이는 "예측데이터 1"의 경우 현재시점부터 10분 후까지 에어컨이 정지 상태를 유지하는 경우 실내 환경 조건이 쾌적 환경을 유지하지 못할 가능성이 높음을 나타낸다. 따라서 "예측데이터 1"의 경우 에어컨은 현재 시점에서 에어컨이 기동되어야 재실자의 쾌적도를 유지할 수 있게 되고, 다른 예측 데이터의 경우에는 현재 시점에서 에어컨을 기동시키지 않고도 예측시간 후 실내 조건이 쾌적하게 유지될 가능성이 높다.

표 4 예측 온도, 습도에 따른 예상 온열감 계산값
Table 4 Calculated PMV from predicted temperature & humidity

구 분		2분 후	4분 후	6분 후	8분 후	10분 후
Case #1	예측온도	26.051	26.180	26.305	26.429	26.528
	예측습도	42.396	42.343	42.299	42.209	42.181
	PMV	0.359	0.402	0.445	0.487	0.521
Case #2	예측온도	25.814	25.953	26.118	26.269	26.381
	예측습도	42.521	42.463	42.416	42.326	42.294
	PMV)	0.278	0.326	0.382	0.433	0.471
Case #3	예측온도	25.555	25.704	25.909	26.081	26.203
	예측습도	43.749	42.674	43.584	43.515	43.458
	PMV	0.200	0.243	0.319	0.377	0.419
Case #4	예측온도	25.550	25.696	25.908	26.078	26.198
	예측습도	43.968	43.894	43.797	43.731	43.667
	PMV	0.200	0.249	0.320	0.378	0.416

아래의 그림은 예측된 PMV의 추세를 보여준다.

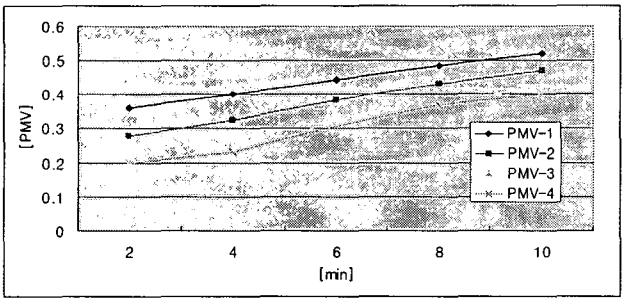

그림 16 계산된 예상 온열감 추이 곡선
Fig. 16 Transitional curve for calculated PMV

4.3 고정 주기제어와 가변 주기제어 비교

기존의 고정 주기제어 방식과 제시된 가변 주기제어 방식과의 비교를 위하여 2001년 9월 7일 오후 2시 이후의 데이터를 이용하여 그 성능을 분석하였다. 사무실 설치된 냉방기의 소비전력은 3.8kW이며, 사무공간은 약 33평이다. 수집된 데이터는 상한 온도 26.5도, 하한 온도 25도로 온도제어 시 데이터이며, 실내온도와 습도의 변화곡선은 그림 17, 18과 같다. 수집데이터는 평균 45분의 제어 사이클을 갖고 동작하고 있으며, 실내 냉방부하가 동일하게 유지되는 관계로 25분간 에어컨 가동, 20분간 에어컨 정지하는 패턴을 갖고 있다.

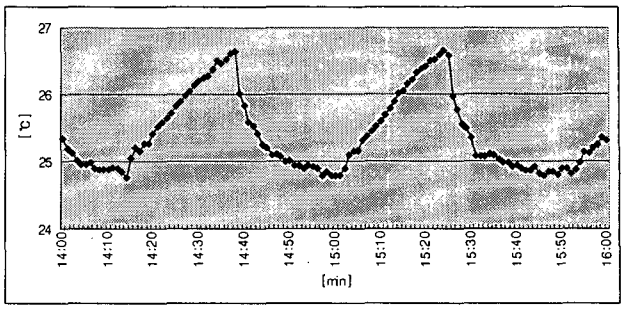

그림 17 실내 온도데이터
Fig. 17 Temperature data for control method comparison

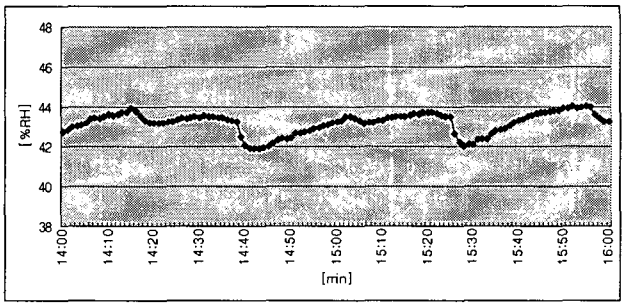

그림 18 실내 습도데이터
Fig. 18 Humidity data for control method comparison

4.3.1 고정 주기제어 적용시 피크억제 및 에너지절감량

직접부하제어에 따른 피크부하 감소량은 아래의 식과 같으며, 여기에서 피크수용률과 실외기 가동률은 고려대상에서 제외하고 계산하였다.

- 피크 억제
  = 에어컨 소비전력 × (정상가동률 - DLC적용 가동률) (8)

- 에너지 절감량
  = 에어컨 소비전력 × (정상가동률 - DLC적용 가동률) (9)
  × DLC 가동시간

에어컨 시스템은 자체적인 로직에 의하여 운전 및 정지를 하는 특성을 가지고 있다. 이에 따른 정상가동률은 전체 운전 사이클 시간 대비 가동시간의 비율을 의미하며, 앞서 언급한 그림 17 및 그림 18의 경우의 정상가동률은 55.6%로 나타났다. 이에 실내온도 변화와 상관없이 10분 에어컨 가동, 10분 에어컨 정지의 50% 운전주기를 갖는 고정 주기제어로 직접부하제어가 수행되는 경우, DLC시간은 2시간(오후 2시~오후4시), DLC적용 가동률은 50%(2시간동안 60분 기동, 60분 정지), 에어컨 소비전력은 3.8kW이므로 피크 억제는 0.213kW이고, DLC가 가동된 시간의 에너지 절감량은 0.426kWh가 된다.

4.3.2 가변 주기제어 적용시 피크 억제

그림 4에 보인 알고리즘과 같이 가변 주기제어를 적용하기 위해서는 신경회로망에 의한 실내온도와 실내습도에 대

한 예측이 이루어지고, 예측된 두 개의 값을 이용하여 예상 온열감을 계산해야 한다. 계산된 예상 온열감을 이용하여 쾌적도에 따라 운전주기를 가변함으로써 에어컨 소비전력량을 최소화할 수 있다.

그림 17과 그림 18에 보여진 데이터를 기반으로 오후 2시부터 오후 4시까지의 운전 사이클에서 에어컨 정지 후 10분 시점에서 이후 10분간의 실내 온도와 실내 습도를 예측하고, 이를 통해 예상 온열감을 계산하여 다음의 표 5~8의 4개의 사이클 데이터를 얻었다. 온도 및 습도 예측은 매 2분 단위로 실시하였으며, 쾌적도의 범위는 ISO 기준에 의거 -0.5 < PMV < 0.5를 기준으로 하였다.

첫 번째, 두 번째 그리고 네 번째 사이클의 경우, 예측 시점에서 10분 후 실내온도 및 실내습도 예측 데이터에 의한 예상 온열감 값은 각각 0.466, 0.490, 그리고 0.476으로서 모두 0.5보다 작기 때문에, 이 세 개의 사이클에 대해서는 다음단계에 정지상태를 유지할 수 있어 운전주기를 10분 더 확장할 수 있다. 하지만 세 번째 사이클의 경우, 예상 온열감 값이 0.507으로서 쾌적범위를 초과하여 예측 시점으로부터 10분후 실내 환경이 쾌적하지 않을 가능성이 높기 때문에 다음단계에 정지상태를 계속해서 유지할 수 없으며 운전주기의 확장은 불가능하다.

표 5 첫 번째 사이클 예상 온열감 예측데이터
Table 5 Predicted PMV for 1st control cycle

시간	14:22	14:24	14:26	14:28	14:30
예측온도	25.826	25.963	26.120	26.242	26.354
예측습도	43.117	43.056	43.003	42.916	42.871
PMV	0.287	0.333	0.387	0.428	0.466

표 6 두 번째 사이클 예상 온열감 예측데이터
Table 6 Predicted PMV for 2nd control cycle

시간	14:52	14:54	14:56	14:58	15:00
예측온도	25.922	26.065	26.193	26.310	26.428
예측습도	42.815	42.791	42.673	42.664	42.615
PMV	0.318	0.366	0.409	0.449	0.490

표 7 세 번째 사이클 예상 온열감 예측데이터
Table 7 Predicted PMV for 3rd control cycle

시간	15:22	15:24	15:26	15:28	15:30
예측온도	25.984	26.124	26.241	26.362	26.476
예측습도	42.905	42.875	42.772	42.747	42.710
PMV	0.340	0.387	0.427	0.468	0.507

표 8 네 번째 사이클 예상 온열감 예측데이터
Table 8 Predicted PMV for 4rd control cycle

시간	15:42	15:44	15:46	15:48	15:50
예측온도	25.862	26.008	26.145	26.261	26.388
예측습도	42.875	42.844	42.735	42.715	42.676
PMV	0.298	0.347	0.393	0.433	0.476

그림 19는 가변 주기제어와 고정 주기제어로 동작시 실내온도의 변화 추정 곡선을 보여주고 있으며, 그림 20은 같은 시간대에서의 실내습도 변화 추정곡선을 보여주고 있다. 이는 실제 데이터가 변화하는 추이를 반영하여 고정 주기제어와 가변 주기제어에 따라 실제데이터를 시간축에 따라 이동시켜 추정한 온도와 습도의 변화 그래프이다.

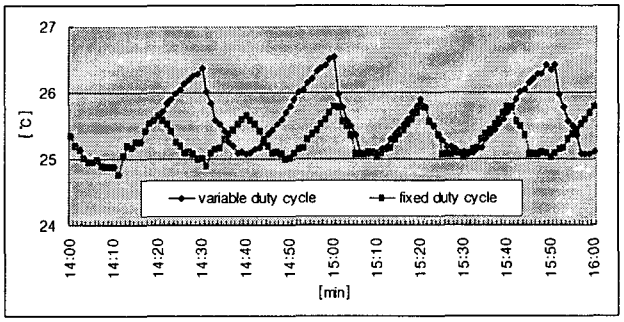

그림 19 주기제어에 따른 실내온도 변화 추정 곡선
Fig. 19 Estimation of indoor temperature as duty cycle control

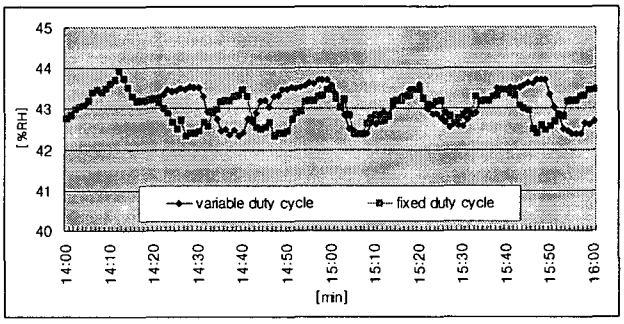

그림 20 주기제어에 따른 실내습도 변화 추정 곡선
Fig. 20 Estimation of indoor humidity as duty cycle control

그림 19와 그림 20에 보인 실내온도와 실내습도 데이터를 이용하여 계산된 예상 온열감을 그림 21에 보였다. 그림에서 볼 수 있듯이 첫 번째, 두 번째, 네 번째 사이클의 경우 10분 동안 에어컨을 기동하고 20분 동안 에어컨을 정지하는 경우에도 실내 환경은 쾌적도를 유지하고 있는 것을 알 수 있으며, 세 번째 사이클의 경우 예측 예상 온열감이 쾌적범위를 벗어나기 때문에 고정 주기제어와 동일하게 10분 동안 에어컨을 기동하고 이후 10분 동안 에어컨을 정지하였다.

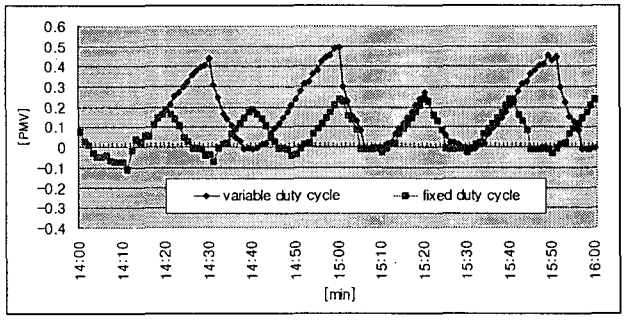

그림 21 주기제어에 따른 예상 온열감 변화 추정 곡선
Fig. 21 Estimation of PMV as duty cycle control

그림 22에서는 고정 주기제어와 가변 주기제어에 대한 운전패턴을 도시하고 있으며, 가변 주기제어에서 에어컨의 압축기 운전이 고정 주기제어보다 줄어든 것으로 보이고 있다. 에어컨의 정상가동률이 55.6%이고, 고정 주기제어의 DLC 적용 가동률은 고정 주기제어에서 50%인 반면, 가변 주기제어 방법론을 적용하여 직접부하제어를 수행하는 경우 DLC 적용 가동률은 41.7%이다. 피크 억제는 고정 주기제어인 경우 0.213kW이지만, 제안한 가변 주기제어 방법론을 적용하는 경우 고정 주기제어의 약 2.48배인 0.528kW를 감소시킬 수 있다. 또한 설치된 에어컨 용량대비 부하제어율도 5.6%에서 13.9%로 증가시킬 수 있다.

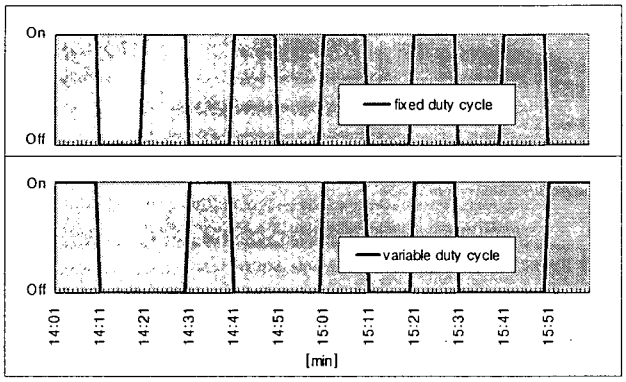

그림 22 주기제어에 따른 에어컨 운전곡선
Fig. 22 Operation curve of Air-conditioner as duty cycle control

5. 결 론

본 논문에서는 직접부하제어 관점에서 에어컨 부하를 효율적으로 제어하기 위한 가변 주기제어 방법론을 제안하였다. 기존의 고정 주기제어 방법과 달리, 본 논문에서 제안한 가변 주기제어는 신경회로망을 이용하여 실내온도와 실내습도를 예측하여 예상 온열감을 계산하고 이를 통해 실내 거주자의 쾌적도를 고려하여 에어컨을 제어하는 효과적인 방법론이다. 본 논문에서 제안된 제어방법론과 고정 주기제어 방법과의 비교를 위하여 하절기 건물 내 온도 및 습도 변화 데이터를 이용하여 분석을 수행하였다. 수집된 데이터는 정상상태에서 55.6%의 가동률을 갖는 환경조건이었으며, 기존의 고정 주기제어에 의한 방법을 적용할 경우 에어컨 부하 감소율 5.6%, 피크 억제 0.213kW의 특성을 보였으며, 가변 주기제어 방법을 적용한 경우 에어컨 부하 감소율 13.9%, 피크 억제 0.528kW의 성능 개선을 보였다. 피크억제 측면에서 볼 때 이는 기존의 고정 주기제어 방식보다 약 2.48배 증가된 것으로, 제시된 가변 주기제어 방안을 에어컨 원격제어에 활용할 경우 하절기 전력수급 문제해소에 도움이 될 수 있다.

따라서 언급한 바와 같이 수용가입장에서는 에어컨제어에 따른 온도 및 습도 상승에 대한 한계값을 설정하여 운영함으로써 불편을 최소화할 수 있어 에어컨 이용에 따른 효용을 담보할 수 있으며, 전력회사입장에서는 수용가 불편 감소는 물론 설치보조금 지원에 따라 직접적으로 제어할 수 있는 에어컨 부하자원을 다량 확보할 수 있는 개연성이 충분함으로 양측에 모두 이익이 발생할 수 있을 것으로 판단된다.

또한 본 논문에서 제시된 제어 방법론은 한국전력공사에서 2003년도부터 시행하고 있는 1구내 다수제어 에어컨 원격제어 시스템에 적용하여 재실자의 쾌적도를 고려하면서 부하제어 효과를 최대화할 수 있는 제어방안으로 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

이 논문은 산업자원부에서 시행한 전력산업 인프라 구축지원 사업으로 수행된 논문입니다.

참 고 문 헌

[1] 한국전력, 2003 가전기기 보급율 조사 분석 보고서
[2] 한국전력, 2003 원격제어에어컨 보급사업 시행계획
[3] 한국전력, 에어컨 직접부하제어 시행방안 연구, 2000. 11.
[4] H.T.Yang and K.Y.Hung, "Direct Load Control using Fuzzy Dynamic Programming", IEE Proc. Gener. Transm. Distrib., Vol 146, No3, May 1999.
[5] K.Bhattacharyya and M.L.Crow, "A Fuzzy Logic Based Approach to Direct Load Control", IEEE Transaction on Power System, Vol. 11, No.2, May 1996.
[6] Nact E. Ryan and John T. Powers, "Generalizing Direct Load Control Program Analysis: Implementation of The Duty Cycle Approach", IEEE Transaction on Power System, Vol 4, No1, Feb. 1989.
[7] 과학기술부, 온열쾌적감 측정기술 및 DB개발에 관한 연구, 1999.
[8] Simon Haykin, "Neural Networks: A Comprehensive Foundation", Prentice Hall, 1999.
[9] Jacek M. Zurada, Introduction to Artificial Neural Systems, West Publishing Company, 1992.
[10] Dillon T.S. and Niebur D., Neural Networks Applications in Power Systems, CRL Pubulishing Ltd. London, 1996.

저 자 소 개

김 형 중 (金 亨 中)

1969년 7월 7일생. 1996년 인천대 공대 전기공학과 졸업. 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2006년 현재 건국대 대학원 전기공학과 재학중(박사). 1996년 에너지관리공단 입사. 현재 에너지관리공단 효율관리실 과장으로 근무
Tel : 031-260-4254
Fax : 031-260-4259
E-mail : jakekim@kemco.or.kr

두 석 배 (杜 錫 培)

1969년 9월 9일생. 1991년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업. 2005년 건국대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 (주)코웰테크 연구소장으로 재직 중.

Tel : 031-346-9353

Fax : 031-346-6624

E-mail : doome@paran.com

박 종 배 (朴 宗 培)

1963년 11월 24일생. 1987년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1989년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 건국대학교 공과대학 전기공학과 조교수.

Tel : 02-450-3483

Fax : 02-444-1418

E-mail : jbaepark@konkuk.ac.kr

신 중 린 (愼 重 麟)

1949년 9월 22일생. 1977년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1984년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1989년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 건국대학교 공과대학 전기공학과 교수.

Tel : 02-450-3487

Fax : 02-444-1418

E-mail : jrshin@konkuk.ac.kr