



지능형 빌딩 에너지 관리 시스템 연구 동향

서시오* 손종수* 김태섭* 류승완** 조충호***

최근 지구의 자원 고갈 및 기후변화, 지구 온난화 등의 문제로 인해 에너지 사용량의 절감이 중요한 문제로 대두되었다. 제조업, 운송업 등 다양한 분야에서 에너지 절감을 위한 노력이 이루어지고 있는 가운데 주거 및 상업용 빌딩의 에너지 소비는 전체 에너지 소비량의 20%에서 40%를 차지하고 있으며, 그 수치는 점차 증가하고 있다. 이에 따라, 빌딩에서의 에너지 소비를 관리하고 절약하기 위한 빌딩 에너지 관리 시스템은 국가와 국제적으로 중요한 연구주제로 부각되고 있으며 다양한 관련 연구가 이루어지고 있다. 본 고에서는 빌딩 에너지 관리 시스템의 개요 및 구성요소를 고찰하며, 데이터마이닝 및 인공지능 기법들을 활용한 다양한 지능형 빌딩 에너지 관리 시스템의 연구 사례를 소개한다. ☐

목	차
---	---

- I. 서 론
- II. 빌딩 에너지 관리 시스템
- III. 지능형 빌딩 에너지 관리 시스템 기술 및 연구 동향
- IV. 결 론

I. 서 론

세계 에너지 기구(International Energy Agent)에서는 최근 20년간 에너지 소비량이 약 49%, 탄소 배출량이 43% 증가했다고 발표하였다. 에너지와 자원의 소비 증가는 곧 지구의 환경 문제를 야기하는데 직간접적인 영향을 미친다. 따라서 빌딩 에너지 관리 분야를 포함한 여러 분야에서 에너지 소비를 감소시키기 위해 다양한 노력을 기울이고 있다. 그 중 특히 빌딩 에너지 분야는 전체 에너지 소비량의 20%에서 40%를 차지할 정도로 많은 비중을 차지하고 있어 에너지 사용량의 예측 및 절감을 위한 연구가 크게 요구되고 있다.

한편, 생활 수준의 발전과 기술 수준의 발전에 따라 점차 시각적 편안함, 객실에서의 공기질, 적절한 온도 등에 대한 요구를 적절히 충족시키는 것 또

* 고려대학교 컴퓨터정보학과 박사과정
 ** 중앙대학교 정보시스템학과 교수
 *** 고려대학교 컴퓨터정보학과 교수

한 중요한 문제가 되어가고 있다. 따라서 빌딩 서비스 수요자들이 최대한 편안함을 느낄 수 있도록 빌딩의 환경을 최적으로 유지하면서 빌딩의 에너지 사용량을 최소한으로 유지하기 위해서는 온도, 습도, 환기와 같은 환경적인 요인 분석과 시간, 요일, 계절 등과 같은 시간관련 정보, 그리고 환풍기, 온수기, 에어컨 등과 같은 기계 정보가 복합적으로 분석되어야 한다. 이와 같은 빌딩 에너지 관리에 필요한 요소 데이터들은 그 데이터의 종류가 다양하며 축적되는 양도 방대하여 단순한 프로그래밍 기법으로 분석하기에는 한계가 존재한다. 이에 따라 빌딩 에너지 소비와 관리에 사용되는 방대한 데이터를 처리하고 가공하기 위해 데이터마이닝 기법에 기초를 둔 전처리 기법이 필수적으로 요구된다. 그리고 전처리된 빌딩 센서 데이터를 기반으로 빌딩 에너지 관리 시스템을 구축하기 위한 지능적 관리 도구가 필요하다. 본 고에서는 BEMS(Building Energy Management System)로 약칭되는 빌딩 에너지 관리 시스템의 개요에 대해 소개하며, 데이터마이닝 및 인공지능 기법에 기초를 둔 지능형 빌딩 에너지 관리 시스템의 대표적인 연구사례를 소개한다.

11. 빌딩 에너지 관리 시스템(BEMS)

국가 및 기업의 경제 규모가 점차 성장함에 따라 빌딩이 대형화되고 대형 복합 건물이 다양한 형태로 건축되면서 빌딩 운영에 필요한 에너지가 많이 요구되고 있다. 이에 따라 빌딩의 효율적인 에너지 관리를 위해 빌딩 에너지 관리 시스템의 개발이 요구되고 있다.

빌딩 에너지 관리 시스템은 “빌딩 거주자의 쾌적도를 저하시키지 않으면서 기존 건물을 대상으로 에너지 및 비용을 극소화하기 위한 에너지 절약 조치 및 전략을 강구함으로써 건물의 생애 기간 동안 최상의 경제성을 고려한 건물 에너지 관리 시스템”이라고 정의된다[1]. 일반적으로 빌딩 에너지 관리 시스템에서 다루는 빌딩 서비스의 범위는 <표 1>과 같다.

<표 1>과 같이 빌딩 에너지 관리 시스템은 크게 5개 분야로 나눌 수 있으며, 이 5개의 분야 각각에서 수집하는 데이터를 기반으로 에너지 사용량을 분석, 예측하여 최적의 에너지 사용을 결

<표 1> 빌딩 서비스의 범위

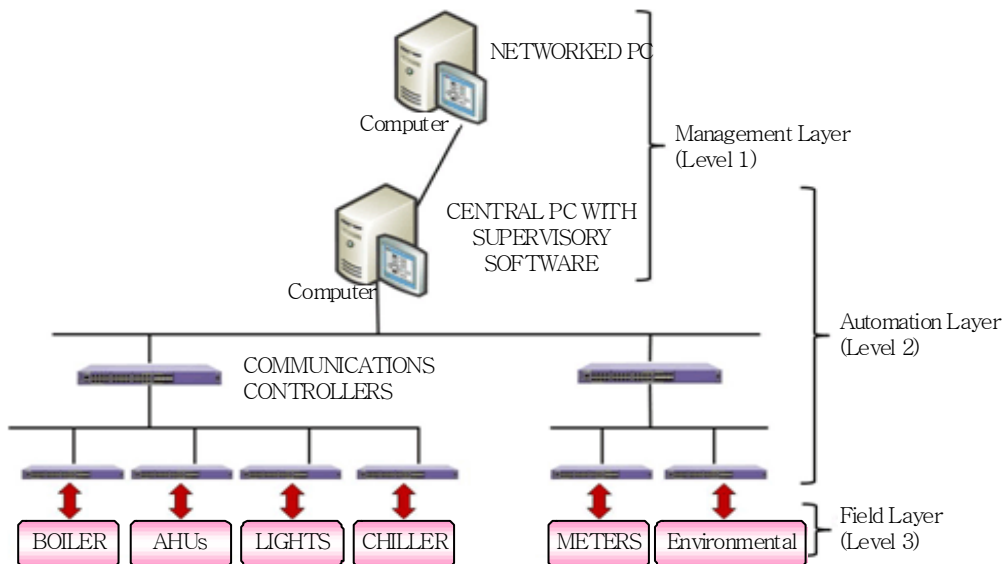
분야	내용
Air-Conditioning	냉방을 포함한 빌딩의 온도 관리
Boilers	전열기구 등의 설비 사용 관리
Ventilation	통풍 시스템 관리
Lighting	조명 시스템 관리
Heating	난방 관리

정할 수 있도록 관리 시스템을 제공한다. 그리고 시스템에 따라 위 5개 분야 외에도 보안, 유지 보수, 화재 경보, 에너지 모니터링을 포함하기도 한다.

BEMS는 빌딩의 에너지 소비량 자체를 줄이기 보다는 에너지 낭비를 최소화하는데 그 목적을 가지고 있다. 따라서 BEMS는 다음 리스트와 같이 빌딩의 에너지 소비를 최소화하는 시스템을 구축하기 위한 두 가지 요구사항이 전제된다[2].

- 설비별, 종류별, 용도별 에너지 사용 분포를 파악, 분석: 복합 건물은 대부분 시설이 복잡하고 운영시간과 부하량이 매우 상이하므로 설비별, 종류별, 용도별로 에너지 사용 분포를 파악하고 분석함으로써 에너지 절약 및 경제성을 고려한 계획 수립으로 에너지 소비를 최소화 할 수 있음
- 에너지 사용량의 예측: 냉열원 생산 설비별 열원 생산 단가를 에너지 수급 단가의 변화에 따라 산출하고, 생산 설비의 생산 용량을 파악하여 외기 온도의 변화 및 시설의 사용 현황을 적용한 일일 냉난방 부하량을 예측함으로써 운영 경비가 적게 되는 설비를 선택, 운영하여 에너지 절감을 도모함

BEMS는 구축되는 시스템마다 약간의 차이는 있지만 통상적으로 (그림 1)과 같이 구성된다. BEMS는 ① 현장 기기 층, ② 네트워크 및 자동화 층, ③ 관리 층으로 나눌 수 있다. ① 현장 기기 층은 조명, 보일러, 환풍기 등 건물에서 물리적인 작동하는 기기들로 구성이 되며 모두 중



(그림 1) BEMS의 구성

양에서 원격으로 작동시킬 수 있어야 한다. ② 네트워크 및 자동화 층은 각 기기들이 통신설비로 연결되고 중앙 통제장치에 의해 운영될 수 있도록 자료를 전송하고 수신하는 역할을 수행한다. 마지막으로 ③ 관리 층은 네트워크 및 자동화 층에서 모아진 데이터를 기반으로 상황을 인식하고 현장 기기 층으로 명령을 내리는 두뇌역할을 한다. BEMS의 성능은 물리적인 기기의 성능과 네트워크 성능에 따라서도 차이가 있지만 가장 크게는 관리 층의 소프트웨어 성능에 따라 BEMS의 성능이 크게 달라진다. 이에 따라 지능형 BEMS를 구축하기 위한 많은 연구가 진행 중이며 개발 사례 또한 다수 보이고 있다.

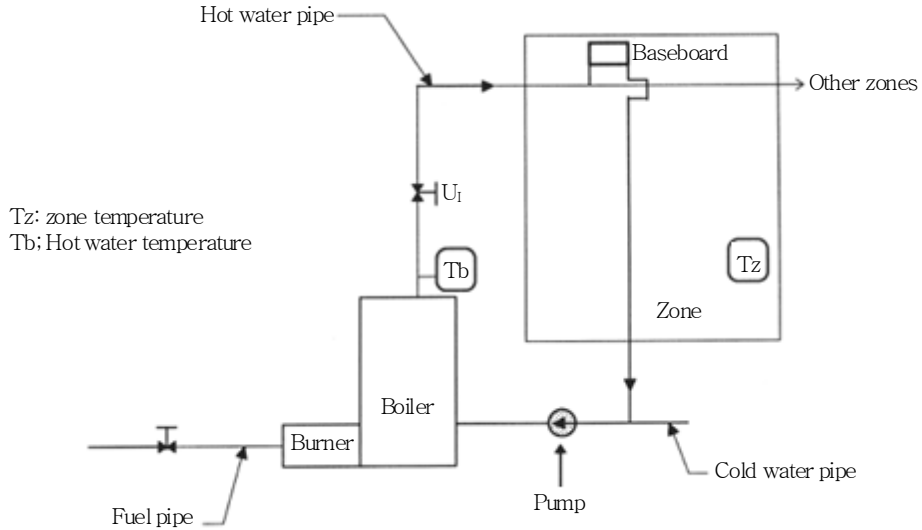
BEMS를 사용하면 다음과 같은 장점을 얻을 수 있다.

- 플랜트의 자동 제어(on/off): 플랜트는 시간, 요일의 특성 및 주변 환경에 따라 자동 제어가 가능하다. 조명 제어의 예를 들면, 외부의 조도에 따라 불필요한 조명을 끌 수 있고 주말과 주중의 조명제어가 가능하여 불필요한 에너지 사용을 줄일 수 있다.
- 플랜트 동작 및 서비스의 최적화: 대표적인 BEMS의 기능으로는 건물 난방의 최적화된 운용 방법이다. 건물 난방에 있어 BEMS의 적용은 외부 온도의 변화 및 건물 내부의 온도 변화에 따라 적응적으로 난방기기를 운용할 수 있다.
- 플랜트의 상태 및 환경 요소 모니터링: 건물 관리자는 건물상태의 변경 및 변경을 요하는 시점에 BEMS를 통해 정보를 얻을 수 있다. 따라서 BEMS는 건물 관리 및 유지 능력을 향상시킬 수 있다.
- 에너지 분석 및 관리 정보 제공: BEMS는 건물의 에너지 흐름, 사용량, 변화 추이 및 빌딩의 모든 상황 정보를 제공하고 분석할 수 있게 한다.

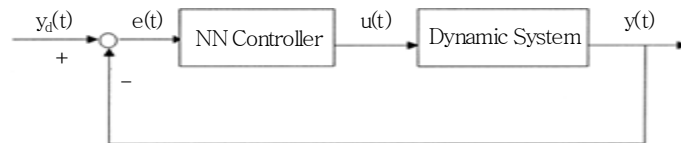
III. 지능형 빌딩 에너지 관리 시스템 기술 및 연구 동향

1. 인공지능망을 활용한 난방시스템 관리[3]

순환수식 난방(heating)시스템에 있어 각 구역의 정확한 온도를 유지하는 것이 중요하다. (그림 2)는 인공지능망을 활용한 난방시스템으로서 온수 흐름 관리 시스템과 연료 흐름 관리 시스템으로 구성되어 있다. 좀 더 구체적으로는 난방시스템, 분배시스템, 구역 환경으로 구분할 수 있으며, 이 중에서 구역 환경은 인공지능망으로 설계된 비선형 시뮬레이션이 가능하다. 대부분의 빌딩 에너지 관리에 있어서 사용되는 센서 및 환경 데이터는 비선형적 데이터들이므로 비선형 데이터에 대한 적응력이 좋은 인공지능망은 이들의 관리 및 최적화에 적합할 것이다. 본 고



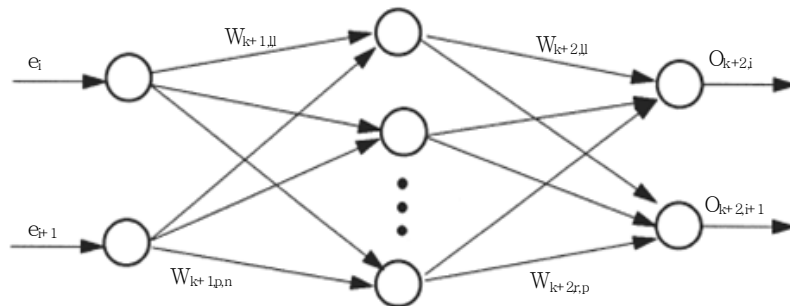
(그림 2) 단일 구역 순환수식의 난방 시스템 구성도



(그림 3) NN 컨트롤러 구성도

에서 제시하는 인공지능 기반 난방시스템 컨트롤러는 (그림 3)과 같다.

‘NN Controller’로 명명된 인공지능 기반 컨트롤러는 오류 역전파 알고리즘(EBPA)에 의해 학습된 컨트롤러이며, $Y_d(t)$ 라는 환경 입력값이 입력되면 인공지능망은 패턴 인식 및 분류 동작을 수행하게 되고 ‘Dynamic System’에 실행해야 할 명령을 보내게 된다. 그리고 ‘Dynamic System’이 명령을 받게 되면 그 명령에 따라 난방시스템을 동작시킨다.



(그림 4) 1 개의 hidden layer 로 구성된 Feed-Forward NN

본 연구에 적용된 인공신경망의 모든 노드의 입력 값(식 1-1)과 출력 값(식 1-2)은 다음과 같은 식으로 계산된다.

$$I_{k,i} = \sum_{j=1}^m w_{k,i,j} \cdot O_{k-1,j} + \theta_i \quad (\text{식 1-1})$$

$$O_{k,j} = f(I_{kj}) \quad (\text{식 1-2})$$

식 1에서 $w_{k,i,j}$ 는 k 레이어의 i와 j 노드의 웨이트 값이고, $O_{k-1,j}$ 는 k-1 레이어의 j 노드에 대한 output, θ 는 k 레이어의 i노드에 대한 바이어스이다. 식 2에서 f는 input 레이어의 노드에 대한 선형 함수이고 hidden 및 output 레이어 노드에 대한 비선형 함수(hyperbolic tangent, sigmoid)로 정의된다.

본 연구에서는 인공신경망을 활용한 NN 컨트롤러를 통해 다양한 상태를 갖는 주변 환경에 대해 시뮬레이션 하였다. 결과적으로 구역 온도를 $-0.015 \sim +0.015$ 의 범위 내로 유지하였고, 최적의 에너지 사용 결과를 도출하였다.

2. empirical model 기반의 냉방 시스템 설계[4]

본 연구의 목표는 대형 냉방시스템에 있어 다른 연구에서 다루지 못한 cooling load 와 ambient wet-bulb temperature 변수를 활용하여 최적의 동작을 하는 시스템을 보이는 것이다. 본 연구의 목적은 빌딩 이용자의 안락(comfort)를 최대한 보장하면서 냉각기의 동작 제어와 에너지 소비를 최소화하는 것이다. 이를 위해 empirical model 을 사용하여 센서에서 수집한 다양한 환경 변수들의 변화 및 패턴에 대해 계산하며 이를 통해 최적의 냉방시스템 동작 방법을 설계하였다. 그리고 그 성능을 평가하기 위해 SCOP(System Coefficient of Performance)를 제안하였으며 이를 통해 최적화 이전의 성능과 이후의 성능을 비교 평가하였다.

본 연구에서는 에너지 분석을 위한 두 종류의 기기 성능 분석 모델을 제안하였다. 첫 번째로 펌프 에너지 모델이다. 펌프 에너지 모델은 항상 일정한 동작을 하는 정적인 워터 펌프(식 2-1)와 사용자의 사용량에 따라 그 동작 여부가 달라지는 동적인 워터 펌프(식 2-2)로 구분되며 그 계산 방법은 다음과 같다.

$$W_{p,con} = \frac{\gamma_w HG}{\eta_{mp} \eta_{mp}} \quad (\text{식 2-1})$$

$$W_{p,var} = \frac{\gamma_w HG}{\eta_{mp} \eta_{mp}(n) \eta_f(n)} \quad (\text{식 2-2})$$

그리고 냉온기 모델은 공기의 온도를 조절하는 기기의 동작 모델을 의미하며 다음과 같다.
(COP: Chiller performance)

$$\frac{1}{COP} = -1 + \left(\frac{t_c + 273.15}{t_c + 273.15} \right) + \left(\frac{1}{Q_{eva}} \right) \left(\frac{Q_{loss,eva}(t_c + 273.15)}{t_c + 273.15} \right) - Q_{loss,con} \quad (식 2-3)$$

펌프 및 냉온기 모델을 통해 본 고에서는 전체 에너지 소비와 에너지 소비 효율을 구할 수 있게 되는데, 이를 기반으로 에너지 소비를 평가할 수 있는 평가 모델을 제안하였다.

$$SCOP = \frac{\text{The total cooling capacity of the system (kW)}}{\text{The total energy consumption of chillers and pumps (kW)}} \quad (식 2-4)$$

본 연구에서 제안하는 펌프와 냉온기 동작의 최적 모델은 다음과 같다.

$$J = \min \left\{ \sum_{i=1}^{k1} E_{r,i} \cdot Z_i + \sum_{j=1}^{k2} E_{cp,j} \cdot Z_j + \sum_{k=1}^{k3} E_{rp,k} \cdot Z_k \right\} \quad (식 2-5)$$

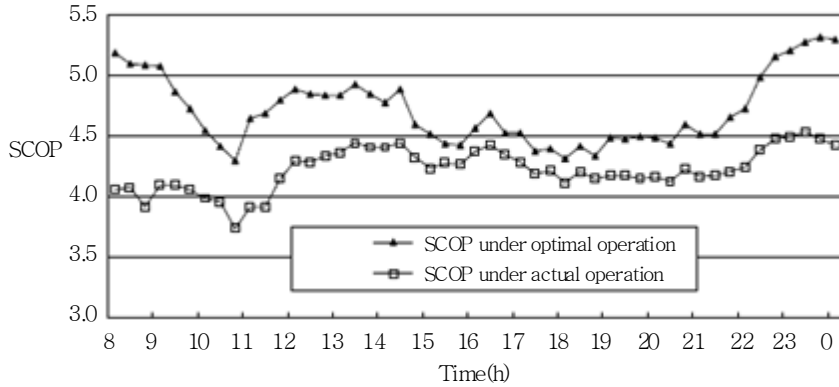
where

$$\begin{aligned} E_{r,i} &= E_{r,i}(t_c(t_{wi,con}, M_{cw}), t_c(t_{wo,eva}, M_{rw}), m) \\ E_{cp,j} &= E_{cp,j}(M_{cw}) \\ E_{rp,k} &= E_{rp,k}(M_{rw}) \\ t_{wi,con} &= t_{wi,con}(t_{as}) \end{aligned}$$

Eq. 2-5 is subjected to

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{k1} Q_{eva,i}(M_{rw}, t_{wi,eva}, t_{wo,eva}) \cdot Z_i \\ (t_{wo,eva})_{\min} \leq t_{wo,eva} \leq (t_{wo,eva})_{\max} \\ (M_{rw})_{\min} \leq M_{rw} \leq (M_{rw})_{\max} \\ (M_{cw})_{\min} \leq M_{cw} \leq (M_{cw})_{\max} \end{cases}$$

본 연구에서 제안한 펌프와 냉온기 최적 모델을 적용한 냉방 시스템의 동작과 적용하지 않은 냉방 시스템의 동작을 에너지 소비 평가모델인 SCOP 으로 평가한 결과 약 9.2% 더 효율적인 에너지 소비를 보였다.

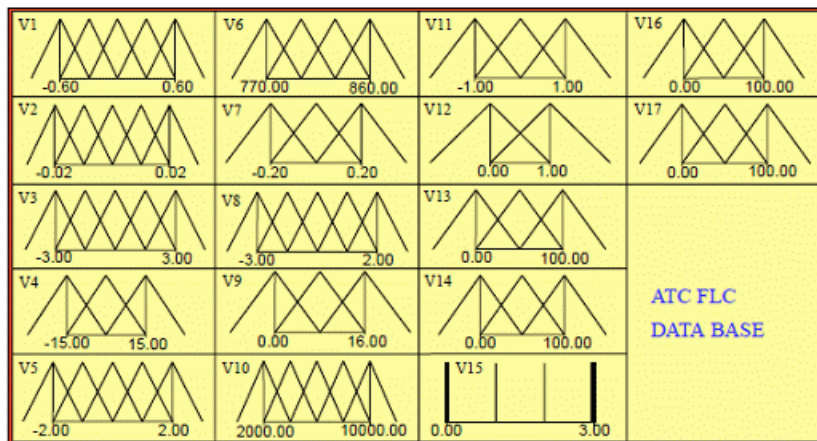


(그림 5) 실제 운용값과 최적 운용값의 SCOP 비교

3. Fuzzy rule 및 유전자 알고리즘 기반의 빌딩 에너지 관리시스템[5]

빌딩 관리 분야에 있어서 전통적인 HVAC 시스템의 문제점은 다양한 기준들이 독립적으로 고려되고, 대부분의 제어 계획은 온도 규정을 맞추거나 정해놓은 온도 혹은 범위 내에서 유지하는 것이 전부이기 때문에 단지 표면적인 에너지의 절감만을 할 수 있다는 것이다. 즉, HVAC의 동작을 환경 데이터가 특정 설정 수치 사이일 때 동작하도록 만들어 에너지 소비 최적화가 고려되지 않은 문제가 있다. 그리고 룰 셀의 경계가 분명하여 유연한 관리가 어렵다는 문제가 있다. 이에 따라 다양한 인공지능 기법을 활용한 빌딩 관리시스템이 제기되었는데, 그 중 한가지가 퍼지 룰 셀을 이용한 방법이다.

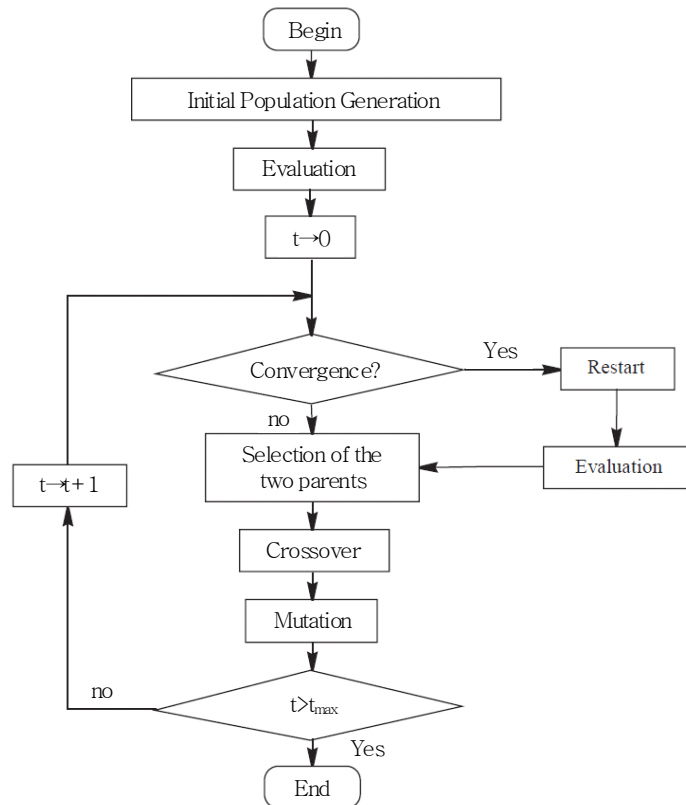
본 연구에서는 빌딩의 에너지 관리에 있어서 HVAC 시스템을 관리하고 에너지 사용을 최적



(그림 6) GENESYS 여름 기간의 퍼지로지 컨트롤러 데이터 베이스

화하기 위해 언어 가중치 퍼지 룰(Weighted linguistic fuzzy rule)을 활용하였다. 본 연구에서 사용한 퍼지 룰은 빌딩의 HVAC 시스템에서 에너지 효율을 최적화하기 위한 제어기의 핵심 기능을 담당한다. 퍼지 룰 셀은 센서에서 전송받은 환경 데이터를 이용하여 HVAC 시스템의 요구되는 동작 명령을 만들어 낸다. 동작 명령이 만들어지면 유전자 최적화 실행기(genetic optimization process)는 최적화 함수와 유전자 학습을 통해 빠르게 빌딩의 각 기기에 제어 명령을 보내게 된다. (그림 6)은 본 고에서 제안하는 퍼지 논리 기반의 HVAC 제어기의 데이터베이스이다. V1 부터 V17 까지의 기기가 있으며 V1 에서 V17 까지 각각에 대해 동작할 퍼지 룰을 정의하여 시스템이 동작하도록 설계하였다.

그리고 퍼지 룰 셀에 의해 동작이 결정되면 각 기기 전체의 측면에서 최적화 동작을 수행하는데, 이 때 유전자 최적화가 실행된다. 유전자 최적화는 생물학에 근거를 둔 진화 연산 최적화 기법으로써 빠르게 근사 최적 값에 접근할 수 있는 특징이 있다. (그림 7)은 유전자 최적화의 알고리즘을 플로 차트로 보여준다.



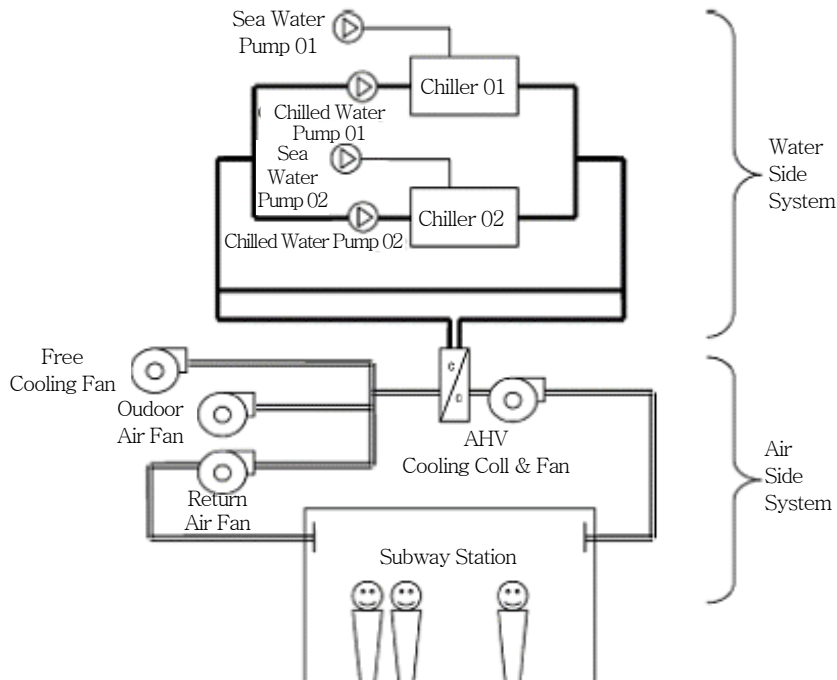
(그림 7) GA 프로세스의 플로 차트

본 연구에서는 전통적인 방법과 퍼지 가중치를 적용했을 때(W), 그리고 퍼지 가중치 및 선택적 룰 적용했을 때(WS), 이렇게 세 가지 방법으로 시스템을 동작시켜 그 결과를 평가하였다. 결과적으로 W와 WS를 사용했을 때 각각 13% 및 14%의 에너지를 절약할 수 있었다.

4. 진화 프로그래밍 기반의 HVAC 시스템 최적화[6]

대부분의 빌딩 에너지 관리에 있어서 HVAC 시스템은 복잡한 제어가 불필요하며 특별한 설계가 불필요하다. 그러나 몇몇 특별한 경우(매일 설정이 바뀌고 건물의 스케줄이 복잡한 경우) 전통적인 제어기법으로 빌딩 에너지 관리가 어렵다. 다시 말해, 지속적으로 복잡다단하게 변화하는 상황에서 사용자들에게 최적의 안락함을 유지하면서 에너지 소비를 최적화하기 위해서는 미리 설정된 값만을 이용하는데 한계가 있다.

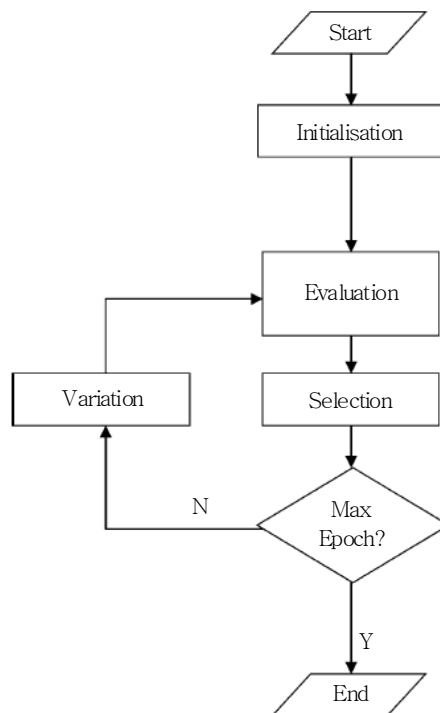
본 연구[6]에서는 효율적인 에너지 관리를 위해 시뮬레이션 및 최적화 방법을 사용한다. 제안하는 진화 프로그래밍 기반의 건물 에너지 관리 최적화는 1년간 축적한 데이터를 기초로 진화프로그래밍 시뮬레이션을 실행한다. 실행한 시뮬레이션 결과를 통해 매월의 온도 및 온도 조절을 위한 최적값을 찾아낸다.



(그림 8) HVAC 시스템의 구조도 및 시뮬레이션 모델

(그림 8)은 본 고에서 실험 및 결과 고찰을 하기 위해 제안된 시스템 및 기기 구조도이다.

(그림 8)과 같이 chiller는 2 개와 펌프 4 개가 위치하며 냉온수를 담당한다. 그리고 공기 온도 조절을 위한 부분에서 냉방 코일 1 개와 팬 4 개가 위치해 있다. 본 고에서는 이 기기들의 동작을 최적화하기 위해 (그림 9)와 같은 알고리즘으로 수행되는 진화 프로그래밍을 사용한다.



(그림 9) 진화 프로그래밍 알고리즘

본 연구에서 제안한 방법을 이용하여 시뮬레이션 한 결과 연간 7%의 에너지 비용을 절감할 수 있었다.

IV. 결론

본 고에서는 빌딩 에너지 관리 시스템의 개요 및 구성요소를 고찰하며, 데이터마이닝 및 인공지능 기법들을 활용한 다양한 지능형 빌딩 에너지 관리 시스템의 연구 사례를 소개하였다. 최근 다양한 분야에서 에너지 절감에 대한 연구가 진행 중이다. 특히 전체 에너지 소비에 가장 많은 부분을 차지하는 빌딩이라는 도메인에 대해 많은 솔루션들이 나와 있다. 하지만, 대부분의 솔

루션들에 에너지 절감이라는 개념이 표면적으로 나타나 있지만, 실상은 건물의 안정적인 운용과 건물에 거주하는 사람들의 편의성에만 초점을 두고 있다.

앞으로의 건물 관리 시스템은 효율적인 에너지 관리를 기반으로 안정적이고, 편리한 생활이 가능하도록 운용할 수 있도록 보다 지능적으로 발전해야 할 것이다.

<참 고 문 헌>

- [1] Building Control Systems CIBSE Guide H, Butterworth Heinemann, Oxford, 2000.
- [2] 에너지 관리공단, 건물 부문 에너지 절약-해의 선진기술 조사 결과 보고서, 2007. 12.
- [3] Kanarachos A, Geramanis K. Multivariable control of single zone hydronic heating systems with neural networks. Energy Conversion and Management 1998;39(13):1317-36.
- [4] Yao Y, Lian Z, Hou Z, Zhou X. Optimal operation of a large cooling system based on an empirical model. Applied Thermal Energy 2004;24:2303-21.
- [5] Alcalá R, Casillas J, Cordon O, Gonzalez A, Herrera F. A genetic rule weighting and selection process for fuzzy control of heating, ventilating and air conditioning systems. Artificial Intelligence 2005;18:279-96.
- [6] Fong KF, Hanby VI, Chow TT. HVAC system optimization for energy management by evolutionary programming. Energy and Buildings 2006;38:220-31.

* 본 내용은 필자의 주관적인 의견이며 NIPA의 공식적인 입장이 아님을 밝힙니다.