한국CAD/CAM학회 논문집
Transactions of the Society of CAD/CAM Engineers

Vol. 18, No. 2, pp. 120-128. April 2013
DOI http://dx.doi.org/10.7315/CADCAM.2013.120

〈응용논문〉

ISSN 1226-0606

EnergyPlus와 PSO알고리즘을 이용한 제조플랜트 냉난방/공조시스템의 최적 운영에 관한 연구

이언[1] · 정진우[1] · 조문빈[1] · 노상도[2†]

[1]성균관대학교 산업공학과, [2]성균관대학교 시스템경영공학과

A Study on the Effective Operation of HVAC Systems on Manufacturing Plants by EnergyPlus and PSO Algorithm

Eon Lee[1], Jin Woo Jeong[1], Wen Bin Zhao[1], and Sang Do Noh[2†]

[1]Department of Industrial Engineering, Sungkyunkwan University
[2]Department of Systems Management Engineering, Sungkyunkwan University

Received 14 September 2012; received in revised form 17 February 2013; accepted 5 March 2013

ABSTRACT

Recently, the importance of the HVAC system (Heating, Ventilating and Air Conditioning System) is growing because comfortable working environment has emerged as important element for enhancing work efficiency. HVAC system is a general term of a system that collectively creates desired temperature and state through heating and air conditioning. HVAC system consists of many objects, so it requires a lot of constraints for its effective operation. Thus, specific strategy is needed for an optimal operation of HVAC System for plant. In this paper, manufacturing plants which have HVAC systems has been modeled and the objective function and constraints for an effective operation have been defined. And new strategy for an effective operation of HVAC system with energy simulations has been proposed.

Key Words: Energy Simulation, HVAC (Heating, Ventilating and Air Conditioning)

1. 서 론

냉난방/공조시스템(HVAC System)은 냉난방 및 공기 조화를 통해 사용자가 원하는 온도 및 상태를 만들어 주는 시스템의 총칭이다[1]. 최근 냉난방/공조시스템은 편안하고 안락한 작업 환경을 제공하고자 하는 건물들 내에서 중요성이 커지고 있는 실정이다. 하지만 냉난방/공조시스템은 냉방설비, 난방설비, 공조설비와 같은 많은 객체들로 구성되어 있기 때문에 많은 제약 식들로 구성되어 있고 이러한 조건들을 동시에 만족시키기란 쉽지 않다[2]. 따라서 생산 플랜트의 에너지 시뮬레이션을 통한 냉난방/공조시스템의 최적 운영전략이 필요하다[3].

본 논문에서는 생산 플랜트 냉난방/공조시스템의 최적 운영에 관한 전략을 제시하기 위해서 문제, 가정, 목적함수 및 제약식을 정의한다. 그리고 냉난방/공조시스템을 사용하는 플랜트를 모델링하고, 공개된 분석엔진인 EnergyPlus를 활용해 에너지 사용량을 시뮬레이션 한다. 마지막으로 진화연산 알고리즘의 하나인 PSO알고리즘을 이용해

†Corresponding Author, sdnoh@skku.edu
©2013 Society of CAD/CAM Engineers

정의된 문제를 풀어봄으로써 생산 플랜트 냉난방/공조시스템의 최적 운영전략을 제시한다[4].

2. 이론적 배경

2.1 PSO알고리즘

Particle Swarm Optimization (PSO)[5]는 진화연산 기법의 일종으로 1995년에 J. Kennedy와 R. Eberhart에 의해 제안되었다. PSO의 특징은 알고리즘이 간단하고, 구현하기도 쉬우며, 계산시간이 짧다. 또한 대용량의 메모리가 필요없고, 다른 휴리스틱 알고리즘과는 달리 PSO 탐색공간에서 전역 해와 국부 해 사이를 균형있게 탐색함으로써 조기 수렴하는 것을 극복할 수 있다는 장점이 있다.

2.1.1 PSO알고리즘의 특징

본 논문에서 적용한 PSO 알고리즘의 일반적인 특징은 다음과 같다.

- PSO는 GA(Genetic Algorithm) 등과 같이 복수의 탐색 점을 가지며 각 탐색 점 위 Pbest (personal best) 와 집단의 Gbest(group of global best)를 이용하여 각 탐색 점을 확률적으로 변경시켜 가는 것에 의해 전역적인 최적 해를 탐색하는 최적화 방법이다[5].
- PSO는 기존의 다른 휴리스틱 방법과는 다르게, 초기 해 집단에 의해서 좌우되지는 않는다. 그래서 탐색공간 어디에서 출발하여도 각 개체들간의 공유된 정보에 의해서 조기 수렴을 극복할 수 있고 전역 최적 해에 수렴할 수 있다[6].
- PSO의 개념은 원래 2차원 공간에서 고안되었으나 n차원 공간으로 확장 가능하다[6].

2.1.2 PSO알고리즘의 최적해 탐색과정

PSO알고리즘은 해 찾기 탐색과정 동안 각 탐색점은 목적함수를 사용하여 그 값이 최적해인지를 평가하고, 각 개체는 경로를 따라 현재까지 최적의 목적함수 값을 가지는 탐색 점, Pbest를 기억하고 있다. 또한, 모든 개체의 Pbest중 최적의 목적함수 값을 가지는 탐색 점을 Gbest라고 하고 이 정보를 공유하고 이를 통해 최적의 해를 도출해 낸다. 각 개체는 현재의 위치 벡터와 속도 벡터, 그리고 Pbest, Gbest를 이용해서 식 (1)에 의해 이동을 하게 된다. 여기서 속도는 각 탐색 점의 이동 방향을 변화시킬 수 있고, 식 (1)의 전역(Gbest) 및 지역해(Pbest) 탐색 결과의 결합을 가능하게 한다.

$$V_i^{k+1} = \omega \cdot V_{ik} + C_1 \cdot rand_1(P_{best} - S_i^k) + C_2 \cdot rand_2(G_{best} - S_i^k) \quad (1)$$

각 개체의 위치벡터 수정은 현재의 위치와 수정된 속도를 이용해서 식 (2)과 같이 갱신된다. PSO 알고리즘은 이와 같은 일련의 과정을 거쳐 최적해를 도출하게 된다. 여기서, V_i^k는 i 번째 개체의 k 번째 세대의 속도 벡터, S_i^k는 i 번째 개체의 k 번째 세대의 위치 벡터, V_i^{k+1}는 i 번째 개체의 k+1 번째 세대의 속도 벡터, S_i^{k+1}는 i 번째 개체의 k+1 번째 세대의 위치 벡터, N은 개체의 총 수, ω는 관성 가중치(inertia weight), c_1, c_2는 가속 상수(acceleration constant), Pbest는 i 번째 개체가 지금까지 탐색 중 발견한 최적 위치벡터, Gbest는 전체 개체가 지금까지 탐색 중 발견한 최적 위치벡터를 의미한다.

$$S_i^{k+1} = S_i^k + V_i^{k+1} \quad (2)$$

2.2 EnergyPlus

세계 도처에는 BLAST, DOE-2 등과 같은 다양한 빌딩에너지 시뮬레이션프로그램이 사용되고 있다. 이러한 발달과정 속에서 미국 에너지 성인 DOE(The U.S Department of Energy)에서는 시뮬레이션 도구의 새로운 개발을 위해 1995년에 3단계 프로세스의 계획을 착수했다. 개발은 DOE-2프로그램을 개발한 BNL, CERL 그리고 DOS의 BLAST 프로그램을 개발한 University of Illinois 등에 의해 주로 진행되었다.

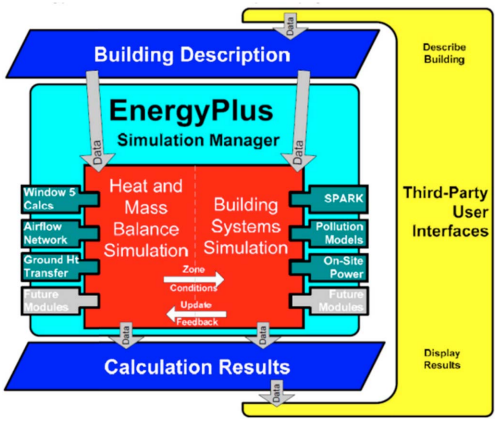

Fig. 1 EnergyPlus[7]

에너지 해석 소프트웨어인 EnergyPlus는 새로운 기능들과 BLAST와 DOE-2에서의 장점만을 조합하여 개발되었으며, FORTRAN 90을 기반으로 구성되어 있다[8]. Fig. 1은 본 논문에서 사용한 EnergyPlus의 구조를 보여준다.

EnergyPlus의 열유체 해석 알고리즘은 열 평형법(Heat balance method)를 기반으로 하며, 열 평형 법은 각 실의 표면간의 전도, 대류, 복사 열 평형과 실내공기의 열 평형을 포함하여 계산하는 방법이다[11]. EnergyPlus는 Fig. 1과 같이 유저가 설계한 건물시스템 및 기타 시뮬레이션 정보(Building Description)를 받아 건물외피의 표면과 공기 열 균형상태(Heat and Mass Balance)를 관리하고, 열 평형과 건축시스템 시뮬레이션간의 인터페이스 역할을 함으로써 에너지 해석 시뮬레이션을 수행하게 된다[8].

2.2.1 Energyplus의 기능 및 장점

이러한 에너지플러스의 일반적인 기능 및 장점들은 다음과 같다[8].

- 여러 에너지 해석 모듈들과의 상호작용을 토대로 통합된 시뮬레이션 해석
- 기상조건, 건물외피, 내부 부하, 냉난방 설비등과의 상호작용 해석
- 건물외피의 표면과 공기의 열 균형 해석
- 공기통풍, 배기공기, 흡기공기 등과 같은 다양한 질량의 흐름 분석
- 공기 층과 냉난방 공조시스템과의 상호반응에 대한 다양한 시간대 접근 가능
- User friendly 인터페이스 제공
- FORTRAN90 기반으로 프로그램이 설계되어 사용자 추가 기능에 대한 확장성(Third party) 제공

3. 생산 플랜트 냉난방/공조시스템의 운영 전략

3.1 문제 정의 및 가정

냉난방/공조시스템은 건물의 용도에 따라 다른 조건하에서 운영전략이 적용되어야 한다. 예를 들어 도서관, 전시실의 용도일 때와 병원의 용도일 때 온도 혹은 습도의 최적 조건이 모두 다르다. 따라서 본 논문에서는 플랜트의 냉난방/공조시스템의 최적 운영전략을 제시하기 위해서 플랜트라는 건물 용도에 필요한 상대 습도, 온도 등의 요소들을 전제조건에 넣음으로써 플랜트의 특성을 반영하였다. 생산 플랜트 냉난방/공조시스템의 운영전략을 위한 일반적인 문제정의와 가정은 다음과 같다.

- 생산 플랜트 에너지 사용량 최소화 문제로 정의
- 멀티 입력, 출력 값을 가지는 문제로 정의[9]
- 생산 플랜트는 냉난방 공조 시스템 설비를 각각 하나 이상은 포함
- 생산 플랜트는 내부온도, 내부 습도가 정해진 범위 내에서 유지
- 사용된 모든 설비는 허용한계 내에서 작동
- 운영스케줄은 이산 형 변수
- 운영스케줄은 1시간 단위로 변경
- 설비한계는 모두 연속 형 변수

3.2 생산 플랜트 냉난방/공조시스템의 운영전략

3.2.1 PSO알고리즘의 특징

생산 플랜트 냉난방/공조시스템의 운영전략 문제를 위해서는 먼저 플랜트의 구성요소를 일반화 시킬 필요가 있다. 본 논문에서는 에너지 시뮬레이션을 위한 생산 플랜트의 일반적인 구성요소를 정의하였다. 정의된 생산 플랜트의 구성요소는 건축구조, 설비 그리고 냉난방/공조시스템으로 구성된다.

Fig. 2를 보면 건축구조는 벽, 바닥, 지붕, 배관, 창문, 기타로 구성되며 생산 플랜트의 특성상 배관은 연료배관, 공기배관, 물 배관으로 구성된다. 생산 플랜트 에너지 시뮬레이션이라는 연구범위 내에서는 어떠한 종류의 연료가 사용되었는지가 중요하기 때문에 다른 요소들에 비해 배관이 조금

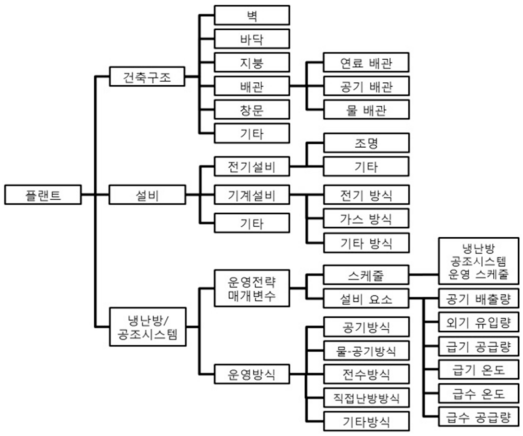

Fig. 2 General Components of the Plant

더 상세히 기술되었다. 설비는 크게 전기설비, 기계설비, 기타로 구성된다. 전기설비는 조명, 기타로 구성되며 기계설비는 전기방식, 가스방식, 기타방식으로 구성된다. 설비 역시 용도보다는 어떠한 동력을 사용하는지를 고려해 요소들을 구분하였는데, 이 역시 생산 플랜트 에너지 시뮬레이션이라는 특성을 반영해 정의하였다. 냉난방/공조시스템은 운영방식과 운영전략 매개변수를 가지고, 이는 생산 플랜트 냉난방/공조시스템 운영전략을 위해 가장 중요한 요소들이다.

3.2.2 목적 함수와 제약식 및 적합도 함수

진화연산알고리즘으로 생산 플랜트 냉난방/공조시스템을 위한 운영전략을 제안하기 위해서는 생산 플랜트 냉난방/공조시스템의 운영전략을 수식화 할 필요가 있다. 이를 위해 본 논문에서 정의한 문제정의, 가정 및 플랜트의 구성요소를 활용해 생산 플랜트 냉난방/공조시스템을 위한 운영전략을 수식화 하면 크게 목적함수, 제약 식, 적합도함수로 구성된다. 생산 플랜트 냉난방/공조시스템의 효율적 운영전략을 위한 목적함수는 다음의 식 (3)과 같다.

$$Z=\sum_{S=1}^{4}\sum_{n=1}^{k}\sum_{t=1}^{2190}\{E_{Cooling}(t,n)+E_{Heating}(t,n)+E_{Equipment}(t,n)\} \quad (3)$$

본 논문에서 생산 플랜트 냉난방/공조시스템의 운영전략을 위한 목적함수 Z는 생산 플랜트의 연간 에너지 사용량을 최소화 하는 것으로 정의된다. 따라서 목적함수는 냉난방 공조시스템의 에너지 사용량과 생산 플랜트 내부 설비들의 에너지사용량의 합으로 구성된다. 또한 이 에너지 사용량은 알고리즘 매개변수들을 통해 도출되는 값이므로 급기 공급량, 급기 온도, 공기 배출량 등의 변수들을 통해 공조에 관한 부분을 목적함수에 반영하게 된다. 여기서 $E(t, n)$의 의미는 n번째 설비에서 t 시간의 에너지량(J)을 나타내며 냉방, 난방, 설비 에너지량에 따라 $E_{Cooling}(t, n)$, $E_{Heating}(t, n)$, $E_{Equipment}(t, n)$로 정하였다. S는 계절을 의미하며, k는 총 설비 수이다.

생산 플랜트 냉난방/공조시스템의 효율적 운영전략을 위한 제약식은 플랜트 상태 제약식, 설비한계 제약식, 운영 제약식으로 나뉜다. 생산 플랜트 상태 제약식은 식 (4)와 같으며, 생산 플랜트의 내부상태에 대한 제약을 할 수 있도록 내부온도와 내부상대습도를 제약하는 수식으로 정의된다. 이는 진화연산 알고리즘이 모든 설비들을 최소로 사용하는 값으로 수렴하는 것을 막아주는 기능을 한다. T_{Low}는 내부 온도 하한, T_{High}는 내부온도 상한, T_{in}는 내부온도를 나타낸다. H_{High}는 내부 상대습도 상한, H_{in}은 내부 상태습도를 나타낸다.

$$T_{Low}<T_{in}<T_{High}$$
$$H_{in}<H_{High} \quad (4)$$

설비한계 제약식은 생산 플랜트의 내부설비의 허용한계로 정의된다. *EnergyPlus*에서는 설비에 대한 한계 능력치가 존재한다. 하지만, 본 연구를 위한 시뮬레이션 모델상에는 이러한 한계가 없기 때문에 시뮬레이션 횟수를 증가시키더라도 최적해에 도달하기 어려울 수 있다. 따라서 시뮬레이션 모델링 상에 각각의 설비들의 현실적인 한계 능력치를 부여하였다. 식 (5)에서 M_{Low}는 설비 허용 하한을, M_C는 설비 상태를, M_{High}는 설비 상한을 나타낸다.

$$M_{Low}<M_c<M_{High} \quad (5)$$

운영 제약식은 생산 플랜트 냉난방/공조시스템 운영전략 매개변수들 중 스케줄 요소로 구성된다. 에너지 시뮬레이션 관점에서 생산 플랜트가 일반 주거건물과 가장 다른 점은 바로 생산스케줄이 있는 것이다. 따라서 생산스케줄을 고려해 생산 플랜트 냉난방/공조시스템의 운영전략을 세운다면 분명히 생산 플랜트 에너지 사용량을 줄일 수 있을 것이다. 운영 제약식은 생산스케줄에 따라 냉난방/공조시스템이 가질 수 있는 스케줄 범위를 나타내는 수식이다. 식 (6)에서 Ts_{HVAC}, Te_{HVAC}는 냉난방/공조시스템의 시작시간, 종료시간을 의미한다. Ts_{pr}, Te_{pr}은 생산스케줄의 시작시간, 종료시간을 의미하며 Ts_{Df}와 Te_{Df}는 가능한 시작시간, 종료시간의 범위를 뜻한다.

$$T_{S_{Hvac}}=T_{S_{Pr}}-T_{S_{Df}}$$
$$0<T_{S_{Df}}<T_{S_{Pr}}$$
$$T_{e_{Hvac}}=T_{e_{Df}}-T_{e_{Pr}}$$
$$T_{e_{Pr}}<T_{e_{Df}}<24 \quad (6)$$

본 논문에서는 시뮬레이션 결과 값에 대한 검증

을 위해서 적합도 함수를 정의하였다. 제약조건이 없는 경우 모든 기계를 사용하지 않는 것이 최적의 에너지 효율로 나올 수 있다. 적합도 함수는 이러한 값들이 최적해로 선택되지 않게 하기 위하여 목적함수에 임의의 페널티를 부과해 최적 해 에서 벗어나게 하는 역할을 한다. 식 (7)에서 T_{in}은 내부 온도를, H_{in}은 내부 상대습도를 의미하며 Z는 목적함수를, p는 적합도 함수 가중치를 의미한다.

$$FF(t)=\begin{cases}0,\ (20<T_{in}<26, H_{in}<70)\\ Z\times(T_{in}+H_{in})^{p},\ (others)\end{cases} \quad (7)$$

3.2.3 PSO알고리즘을 적용한 모델링

본 논문에서는 플랜트의 에너지 사용량 최적화를 위해 PSO 알고리즘을 적용시켰다. 플랜트의 에너지 사용량 문제는 다양한 매개변수들이 연관되어 나오는 휴리스틱 문제로 판단할 수 있다. 휴리스틱 문제는 최적해 도출에 많은 시간이 들고, 알고리즘 수행 결과가 최적해에 수렴하지 않을 수도 있다는 문제점을 가지고 있다. 이러한 문제점을 해결하는 다양한 방법론들이 있으나 본 논문에서는 방대한 에너지 시뮬레이션 결과 값에 대한 최적해를 도출하여야 하기 때문에, 적용이 용이하고, 효율적인 연산이 가능하며, 최적해를 조기 수렴하지 않고 도출해 낼 수 있는 PSO 알고리즘을 적용해 연구를 수행하였다.

PSO 알고리즘을 적용한 시뮬레이션 모델의 모델링 과정은 Fig. 3과 같다.

우선 정의된 플랜트 운영전략 매개변수를 통해 모델링 된 에너지 시뮬레이션 모델의 시뮬레이션 결과값을 도출한다. 그리고 이를 PSO 알고리즘에 적용해 기존의 지역 최적해와 전역 최적해의 목적함수 값과의 비교를 통해 새로운 지역 최적해 전역 최적해를 선정한다. 그리고 적합도 함수를 통해 최적 해의 적합도 정도를 측정하여 최적 해인지 판단하고, 만약 최적해가 아니라면 위치와 속도를 수정해 새로운 해 집단을 생성한 후 시뮬레이션을 수행한다. 이러한 과정을 반복하여 시뮬레이션 모델 상의 목적함수를 최소화 시키면서 적절한 파라매터를 추정하는 구조로 시뮬레이션 모델을 설계하였다.

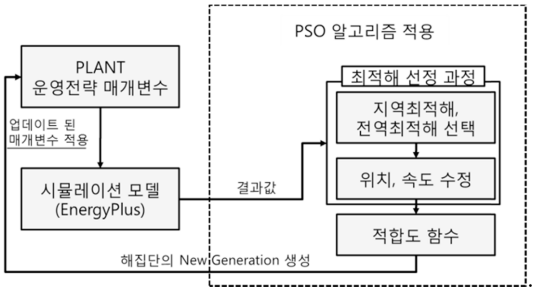

Fig. 3 Modeling process

이러한 일련의 PSO 알고리즘을 적용한 시뮬레이션 모델의 흐름은 다음 Fig. 4와 같이 나타낼 수 있다.

3.2.4 운영 전략 프레임워크

생산 플랜트의 냉난방/공조시스템의 운영전략은 Fig. 5와 같이 시뮬레이션 레이어, 최적화 레이어로 이루어진 프레임워크를 가진다.

먼저 시뮬레이션 레이어에서 플랜트구조, 플랜트설비, 냉난방/공조시스템 등 에너지 시뮬레이션에 관련된 입력정보를 바탕으로 시뮬레이션 모델

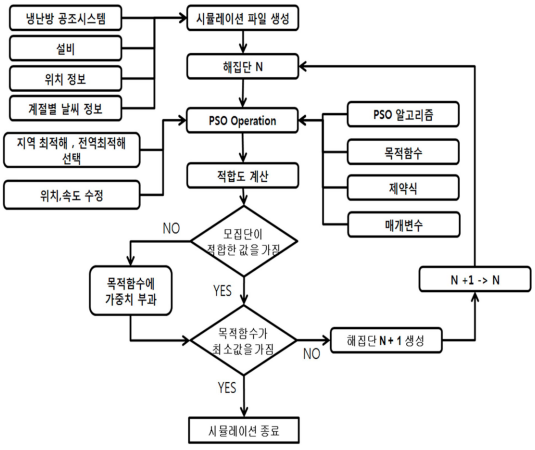

Fig. 4 Flowchart of Energy Simulation applying PSO algorithm

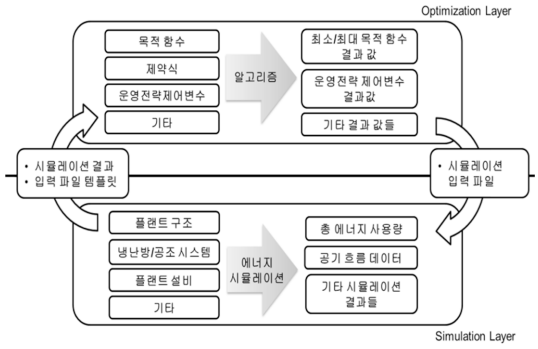

Fig. 5 Operating Strategy Framework

을 생성하여 에너지 시뮬레이션을 수행 후 그 결과 값을 최적화 레이어로 보내게 된다. 최적화 레이어에서는 PSO알고리즘을 통해 그 결과 값이 목적함수를 최소로 만드는지 평가한다. 만약 목적함수가 최소이면 연산을 종료하고 아니라면 다시 시뮬레이션 레이어로 내려가 새롭게 생성된 입력정보들을 바탕으로 에너지 시뮬레이션을 수행하게 된다. 이러한 일련의 과정을 거쳐 생산 플랜트 냉난방/공조시스템의 효율적 운영전략을 도출해 낼 수 있다.

4. 사례 연구

4.1 자동차 도장 플랜트의 에너지 시뮬레이션 모델

Fig. 6은 본 연구의 적용 대상 생산 플랜트인 자동차 도장 플랜트의 전체 구성을 보여준다.

대상 생산 플랜트는 가스 직화식 냉난방/공조시스템에 환기시스템을 갖추고 있고, 도장 공정에 필요한 설비들을 갖추고 있으며, 내부공기를 순환하고 외부공기를 유입해 온도를 조절한다.

본 논문에서 에너지 시뮬레이션 모델을 구현하기 위해 사용한 시뮬레이션 툴은 EnergyPlus이다. 따라서 플랜트의 구성요소에 맞게 정리된 대상 플랜트의 시뮬레이션 정보를 기반으로 하여 EnergyPlus를 활용해 에너지 시뮬레이션을 수행할 수 있는 시뮬레이션 모델을 구현하였다.

Fig. 8은 EnergyPlus로 실제 시뮬레이션 모델을

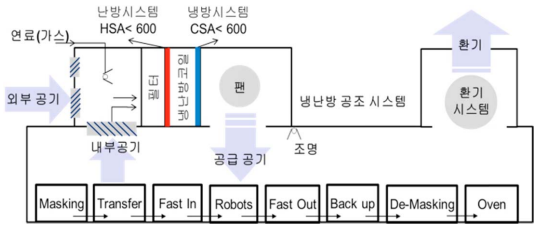

Fig. 6 Configuration of the Target Plant

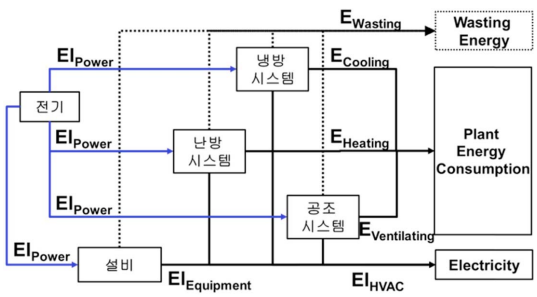

Fig. 7 Concept of Simulation Model

Table 1 Configuration of the Target Plant

플랜트 구성요소	타입			수
건축 구조	벽		철근 콘크리트	4
	바닥		철근 콘크리트	1
	지붕		철근 콘크리트	1
	배관		가스 배관	5
			공기 배관	4
			물 배관	2
설비	전기설비		조명	200
			기타	1
	기계 설비	가스방식	오븐	2
		전기방식	기타	66
냉난방/ 공조 시스템	물/공기 방식	난방	가스 직화식 시스템	1
		냉방	쿨러, 냉각 시스템	1
	환기 시스템		팬	7
	기타		스케줄	6

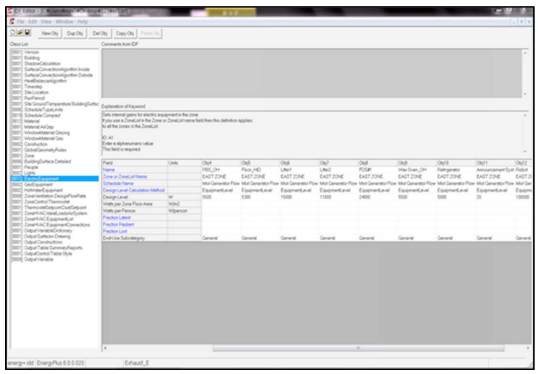

Fig. 8 Implementation of Simulation Model

구현한 화면이다. EnergyPlus는 텍스트기반의 시뮬레이션 입력정보를 바탕으로 에너지 시뮬레이션을 수행하기 때문에 시뮬레이션 정보의 수정이 어려운 측면이 있다. 따라서 본 논문에서는 EnergyPlus에서 제공하는 입력파일 에디터(IDF EDITOR)를 활용해 시뮬레이션 모델을 구현하였다.

4.2 PSO 알고리즘을 이용한 운영 전략 적용

생산 플랜트의 냉난방/공조시스템의 운영전략 적용을 위해 본 논문에서는 플랜트의 구성요소를 정의하였고, 그것을 바탕으로 운영전략의 효율성을 평가하기 위한 목적함수 및 제약 식을 정의하였다. 이러한 것들을 바탕으로 실제 적용대상인 자

동차 도장 플랜트의 냉난방/공조시스템 운영전략 문제에 PSO 알고리즘을 적용하여 보았다.

4.2.1 운영 전략을 위한 PSO알고리즘 설계

먼저 PSO알고리즘을 운영전략 문제에 적용할 시, PSO알고리즘에서 사용한 시뮬레이션 계수들을 정의해야 한다. 다음 Table 2는 PSO알고리즘을 수행하기 위한 내부의 매개변수들을 나타내고 있다. 이 값들은 일반적으로 연구를 통해 알려진 값을 사용하였다[10].

또한 알고리즘 수행횟수는 최대 24000번이고 알고리즘 정지조건은 목적함수의 값이 더 이상 개선되지 않은 채 100번 알고리즘이 수행된 경우로 하였다. 그리고 플랜트 냉난방/공조시스템 운영전략 문제 중 PSO알고리즘에 적용 가능한 운영전략 제어변수를 다음 Table 3에 정의하였다.

Table 2 Algorithm Parameters

알고리즘 매개변수	설정치
세대(Generation) 수	1000
개체(Particle) 수	100
관성 가중치(ω)	2.0
가속 상수(C_1,C_2)	0.9~0.4

위의 Table에서 알 수 있듯이, PSO알고리즘의 제어변수로 난방설비의 급기 공급량, 냉방설비의 급기 공급량, 환기설비의 내기배출량, 공조설비의 외기 흡입량 그리고 냉난방/공조시스템의 시작시간 및 종료시간들을 정의하였다.

4.2.2 운영 전략을 위한 PSO알고리즘 적용

생산 플랜트 냉난방/공조시스템의 운영전략 문제에서 PSO알고리즘 적용 시 효과를 분석하기 위해 3가지 시나리오를 구성하였다. 3가지 시나리오를 통해 플랜트 냉난방/공조시스템의 효율적 운영전략을 도출해 낼 수 있다.

- 시나리오 1 : 기존 대상 플랜트의 운영전략을 적용해 에너지 사용량을 도출
- 시나리오 2 : PSO알고리즘(연간)을 적용해 에너지 사용량을 도출
- 시나리오 3 : PSO알고리즘(계절별)을 적용해 에너지 사용량을 도출

생산 플랜트 냉난방/공조시스템에 대한 각 시나리오 별 PSO 알고리즘 적용결과는 다음 Table 4와 같으며, 시나리오 별 플랜트의 에너지 사용량은 다음 Table 5와 같다.

시나리오 별 적용결과를 비교해 보면 시나리오

Table 3 Algorithm Control Variables

대상	매개변수	최소범위	최대범위	증감
난방 설비	급기 공급량(m^3/s)	4	22	1
냉방 설비	급기 공급량(m^3/s)	4	22	1
환기 설비	내기 배출량(m^3/s)	1	6	1
공조 설비	외기 흡입량(m^3/s)	10	20	1
냉난방/공조 시스템	시작 시간	0:00	생산시작시간	1
	종료 시간	생산종료시간	24:00	1

Table 4 The Result of Applying

대상	제어변수	시나리오1	시나리오2	시나리오3			
				봄	여름	가을	겨울
난방설비	급기공급량	6	5	5	5	5	10
냉방설비	급기공급량	12	5	5	11.250	7.375	6
환기설비	내기배출량	2.830	1.000	3.063	2.688	4.000	5.000
공조설비	외기흡입량	8	11	19	10	11	17
냉난방/공조시스템	시작시간	7:00	6:00	6:00	6:00	4:00	6:00
	종료시간	22:00	22:00	22:00	22:00	22:00	23:00

Table 5 Scenario- Specific Energy Usage

에너지 사용량	시나리오1	시나리오2	시나리오3
난방 에너지 사용량(GJ)	2,670	3,230	1,940
냉방 에너지 사용량(GJ)	3,860	1,170	1,180
전기 에너지 사용량(GJ)	720	1,120	1,900
총 에너지 사용량(GJ)	7,250	5,520	5,020
총 에너지 사용량(시나리오1 기준)	1	0.76	0.70
증감 비율(시나리오1기준)	0%	-24%	-30%

(GJ = Giga Joule)

1이 7250 GJ, 시나리오2가 5,520 GJ, 시나리오3이 5,020 GJ을 사용했음을 알 수 있다. 시나리오2가 시나리오1에 비해 약 24%, 시나리오3이 시나리오1에 비해 약 30% 에너지 사용을 적게 했음을 의미한다. 이는 기존 대상 플랜트의 운영전략에 비해 PSO알고리즘을 적용한 운영전략이 더욱 적합함을 의미한다. 또한 같은 PSO알고리즘을 적용했음에도 시나리오3의 결과가 시나리오2의 결과보다 좋게 나왔음을 알 수 있다. 이는 1년을 기준으로 PSO알고리즘을 적용하였을 때보다 3개월을 기준으로 적용하였을 때 더 좋은 적용효과를 보임을 의미한다. 따라서 PSO알고리즘을 적용해 플랜트의 냉난방/공조시스템의 효율적인 운영전략을 계산할 시, 보다 짧은 주기로 PSO알고리즘을 적용한다면 더욱 좋은 효과가 나타날 것으로 생각된다.

5. 결 론

본 논문에서는 생산 플랜트 냉난방/공조 시스템의 효율적인 운영을 위해 진화연산 알고리즘의 하나인 PSO알고리즘과 에너지시뮬레이션 툴인 Energyplus를 활용해 생산 플랜트 냉난방/공조 시스템의 효율적 운영전략을 제안하였다. 이를 위해 먼저 생산 플랜트 냉난방/공조 시스템의 운영을 위한 문제를 정의하였다. 그리고 PSO 알고리즘을 적용한 효율적인 냉난방/공조시스템의 운영전략을 세우기 위해 생산 플랜트의 에너지 사용량과 관련된 여러 개체들을 활용해 목적함수 및 제약 식을 정의하였다. 또한 Energyplus를 활용해 본 논문의 사례연구대상인 자동차 도장 공장의 시뮬레이션 모델을 설계하고, PSO알고리즘을 활용해 페인팅 공장 냉난방/공조시스템의 효율적 운영전략을 도출하였다.

본 논문에서 제시한 운영전략을 통해 여러 객체들이 혼합적으로 작용하는 생산 플랜트 냉난방/공조 시스템의 효율적 운영이 가능하고 이를 통해 생산 플랜트의 전체 에너지 사용량에 대한 분석이 가능하며 이를 절감할 수 있는 대안을 제시할 수 있을 것이다.

냉난방의 효율은 General Component 중 건축구조(지붕, 바닥)를 어떻게 모델링 하느냐가 시뮬레이션 결과에 큰 영향을 미친다. 예를 들어 본 연구의 연구범위인 플랜트의 건축구조에서는 철근 콘크리트라는 하나의 요소만 고려하였지만, 일반 건물의 시뮬레이션을 위해서는 유기질 단열제, 폴리스틸렌 단열제등의 추가적인 요소에 대한 물성치를 고려해야 한다. 따라서 추후에 시뮬레이션 적용 범위를 확대하기 위해서는 이러한 General Component에 대한 정의 확장이 필요할 것으로 생각된다.

참고문헌

1. Jung, S.-H., Choi, J.-N. and Oh, S.-K., 2006, Design of Multi-Fuzzy Controller Using Genetic Algorithms for Multi-HVAC System, *The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers*, pp. 303-305.
2. Lee, S. J., 2012, An Efficient Heuristic Algorithm of Surrogate-Based Optimization for Global Optimal Design Problems, *Transactions of Society of CAD/CAM Engineers*, 17(5), pp. 375-386.
3. Jeong, S.-W., Lee, K.-H., Kim, I.-H. and Choo, S.-Y., 2013, Analysis on Green BIM Based Atrium Sizes in the Early Design Stage, *Transactions of Society of CAD/CAM Engineers*, 18(1), pp.58-70.
4. Velimir Congradac and Filip Kulic, 2009, HVAC System Optimization with CO_2 Concentration

Control Using Genetic Algorithms, *Energy and Buildings*, 41(5), pp. 571-577.
5. Zhengyi Li, Zhaoyi Huo Hongchao Yin, 2011, Optimization and Analysis of Operation Strategies for Combined Cooling, Heating and Power System, *Power and Energy Engineering Conference*, pp. 1-4.
6. Zhang Jun and Zhang Kanyu, 2011, A Particle Swarm Optimization Approach for Optimal Design of PID Controller for Temperature Control in HVAC, *Third International Conference Measuring Technology and Mechatronics Automation,* pp. 230-233.
7. U.S Department of Energy, Energyplus Energy Simulation, http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/
8. Kong, S.-H., 2000, Energy Plus Load Analysis Program, The Society of Air-Conditioning and Refrigerating Engineers of Korea, *International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration*, 29(7), pp. 56-59.
9. Brian Coffey, 2010, Fariborz Haghighat, Edward Morofsky, Edward Kutrowski, A Software Framework for Model Predictive Control with GenOpt, *Energy and Buildings*, 42(7), pp. 1084-1092.
10. Carlisle, A. and Dozier, G., 2001, An Off-the-shelf PSO. *Proceedings of the Workshop on Particle Swarm Optimization*, pp. 1-6.
11. Joo, S.-H., Kim, J.-Y. and Shin, H.-J., 2010, A Comparative Study on Educational Structure Thermal Load Simulation with Heat Balance method, *Summer seminar of The Society of Air-Conditioning and Refrigrating Engineers of Korea,* pp. 1531-1535.

이 언

성균관대학교 시스템경영공학과 학사
성균관대학교 산업공학과 석사
현재: 한국산업개발연구원 연구원
관심분야: CAD/CAPP/CAM, 디지털 가상생산, PLM, 동시협업, 엔지니어링 상호운용성, 지속가능생산

정 진 우

성균관대학교 시스템경영공학과 학사
성균관대학교 산업공학과 석사과정
관심분야: CAD/CAPP/CAM, 디지털 가상생산, PLM, 동시협업, 엔지니어링 상호운용성, 지속가능생산

ZHAO, Wen-Bin

강원대학교 산업공학과 학사
성균관대학교 산업공학과 석사
현재: 성균관대학교 산업공학과 박사과정
관심분야: CAD/CAPP/CAM, 디지털 가상생산, PLM, 동시협업, 엔지니어링 상호운용성, 지속가능생산

노 상 도

한국과학기술원 기계공학과 학사
서울대학교 기계설계학과 석사, 박사
고등기술연구원 생산기술센터 선임연구원
GM Global R&D Center, Visiting Researcher
현재: 성균관대학교 공과대학 시스템경영공학과 교수
관심분야: CAD/CAPP/CAM, 디지털 가상생산, PLM, 동시협업, 엔지니어링 상호운용성, 지속가능생산