

## 열병합발전시스템에서 유전알고리즘을 적용한 단기운전계획 수립

박성훈 · 정창호\* · 이종범

원광대학교, \*전력연구원

### Short-term Operation Scheduling of Cogeneration Systems Using Genetic Algorithm

Seong Hun Park, Chang Ho Jung\* and Jong Beom Lee

Wonkwang University, \*KEPRI

#### 요 약

본 논문은 에너지 효율이 높은 열병합발전시스템을 대상으로 유전알고리즘을 적용하여 단기운전계획을 수립하였다. 특히 열병합발전시스템의 효율은 약 70% 이지만 효율이 일정하지 않을 뿐만 아니라 비선형적인 특징을 가지므로 실제 산업체의 열병합발전소의 데이터를 기초로 하여 적합한 가변효율방정식을 구하였다. 또한 본 논문에서 적용된 유전알고리즘은 계산시간의 감소와 높은 정밀도를 가진 실변수 유전알고리즘으로 시뮬레이션 하였다. 그 결과로 가변효율을 가진 열병합발전시스템의 단기운전계획이 유전알고리즘을 적용하여 적절하게 운전계획이 수립되고 있음을 나타내었으며 각종 보조설비가 유연성 있게 협력하며 필요시마다 효율적으로 운전되고 있음을 확인하였다.

**Abstract**— This paper describes a daily operation scheduling of cogeneration systems using Genetic Algorithm. The simulation was performed in the case of bottoming cycle. The efficiency of cogeneration system which has nonlinear characteristic is obtained by the least square method based on the real data of industrial cogeneration system. In this paper, Genetic Algorithm is coded as a vector of floating point representation which can reduce computation time and obtain high precision. The simulated results show that the genetic algorithm can be efficiently applied to establish the operation scheduling.

#### 1. 서 론

열병합발전시스템은 기존의 화력발전시스템과는 달리 입력된 연료로부터 전기에너지와 열에너지를 동시에 발생하여 각각의 부하에 공급할 수 있는 종합 에너지시스템이다. 따라서 약 40%에 머무르고 있는 기존 발전소의 효율에 비해 열병합발전시스템은 약 70% 이상의 높은 에너지 이용률을 보이고 있다. 따라서 일찍이 해외의 선진국들은 물론 국내에서도 열병합발전시스템의 건설이 많이 이루어졌으며 특히 최근 전국적으로 대형 산업공단이 고루 조성됨에 따라 이곳에서 사용될 산업체 열병합발전시스템의 건설 및 계획이 급증하고 있

는 추세이다. 또한 분당, 일산 등 한국전력공사의 열병합발전시스템과 한국지역난방공사의 보조설비들이 상호 연계되어 전기 및 열에너지를 일반 수용가에 공급하는 민간용 열병합발전시스템도 계속 건설되고 있다<sup>1,2)</sup>. 그러나 열병합발전시스템은 증대되는 건설추세에 비해 운전모형의 개발은 상대적으로 연구가 뒤져있는데 그 이유는 아마도 용도별로 여러 형태의 열병합발전시스템이 있고 각각의 운전형식도 다르기 때문이라고 사료된다. 이러한 열병합발전시스템을 운전방식으로 크게 구분하면 먼저 토핑사이클방식과 버터밍사이클 방식으로 나눌 수 있고, 용도별로 보면 산업체와 민간용 및 전력회사용 등 다양하게 구분할 수 있다<sup>3)</sup>.

본 논문에서는 이러한 다양한 종류 가운데에서 버터밍사이클 방식으로 운전되는 산업체용 열병합발전시스

이 논문은 1996년도 원광대학교 교비지원에 의해 연구됨.

템을 대상으로 하였다. 즉, 열 에너지를 보조설비들과 연계하여 열부하에 우선적으로 공급하며 전기부하에는 열에너지 생산에 따라 생산된 전기에너지와 전력회사로부터 구입된 전기에너지를 적절히 조합하여 전기부하에 공급하는 시스템이다.

열병합발전시스템에 관련된 최근의 연구를 보면 열병합발전시스템 모델링<sup>34)</sup>을 비롯하여 경제급전 및 계획<sup>35)</sup>, 그리고 보조설비들이 연계하여 운전될 때의 운전계획수립에 관한 것들이 있다. 또한 이 가운데에서도 운전계획수립과정을 보면 선형계획법과 동적계획법을 이용하거나 퍼지선형계획법을 포함한 퍼지이론 등을 도입하여 최적해를 얻고 있다<sup>36-40)</sup>.

그러나 열병합발전시스템의 효율은 열에너지와 전기에너지의 출력에 따라 비선형으로 변화하는 특성을 갖고 있으므로 기존의 대부분의 방법같이 효율을 불변정수로 처리한다는 것은 매우 비합리적이라고 할 수 있다. 따라서 운전계획을 수립하기 위해서는 이러한 특성을 가진 효율을 고려하여야만 하며 또한 이러한 비선형 모델링을 해결할 수 있는 기법이 적용되어야 한다.

따라서 본 논문에서는 최소사승법을 이용하여 실제의 열병합발전시스템으로부터 입수된 자료를 바탕으로 효율방정식을 구하였으며 이러한 비선형 요소가 포함된 목적함수의 해를 구하기 위해 비선형요소를 다룰 수 있는 유전알고리즘을 적용하여 일간운전계획을 수립할 수 있는 기법을 제안하였다.

유전알고리즘이란 자연 선택과 자연 유전학을 근거로 한 최적화 알고리즘으로 2진 스트링으로 코딩한다. 그러나 목적함수가 다변수를 가질 경우 2진 스트링으로 코딩하는 과정에서 많은 계산시간을 필요로 하고 보다 높은 정확성을 얻기 어려우므로 본 논문에서는 실변수로 사용하여 코딩시간의 감소와 높은 정확성을 갖는 유전알고리즘을 적용하였다<sup>11-12)</sup>.

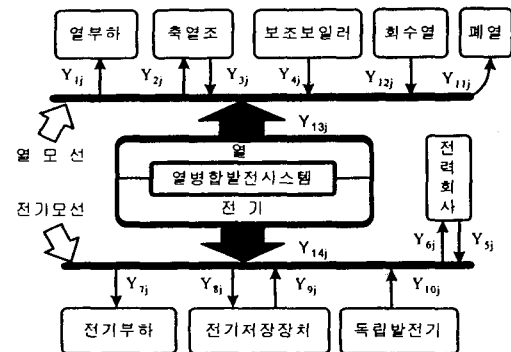


Fig. 1. The Energy flow of cogeneration system linked with devices.

2. 열병합발전시스템의 모델링

2-1. 모델링

열병합발전시스템의 운전계획은 열생산을 주목적으로 하는 버터밍사이클 방식으로 하였으며 열병합발전시스템의 각종 보조설비들은 축열조, 보조보일러, 전기저장장치, 독립발전기를 모두 연결해서 모델링하였다. Fig. 1은 각종 보조설비가 연계된 열병합발전시스템의 에너지 흐름도를 나타낸 것이다. 그림에서 표시된 선로의 번호는 에너지의 흐름을 나타낸 것이며 열병합발전시스템의 열의 유출입은 열모선으로 전기의 유출입은 전기모선으로 나타내었다.

2-2. 가변효율을 가진 목적함수와 제약조건

목적함수는 각각의 시간대에서 전기의 판매 및 구매 비용과 가변효율을 가진 열병합발전시스템의 연료비용

Table 1. Notations use for numerical modeling.

$\gamma$	: 전력회사와 산업체 사이의 송전효율[P.U.]
$N$	: 계산구간의 총수
$Y_{ij}$	: K선로에서의 j계산구간 동안의 에너지흐름 [MW]
$\mu_E$	: 전기저장장치 단위시간당 전기저장 손실률 [P.U.]
$\mu_T$	: 축열조의 단위 시간당 열저장 손실률[P.U.]
$\eta_{th}$	: 열병합발전시스템의 간변효율[P.U.]
$F_c$	: 열병합발전시스템의 연료단가[원/MWh]
$SE_L$	: 열병합발전시스템의 최소 열전비[P.U.]
$SE_H$	: 열병합발전시스템의 최대 열전비[P.U.]
$ES_L$	: 전기저장장치 최소 에너지 저장량[MWh]
$ES_H$	: 전기저장장치 최대 에너지 저장량[MWh]
$ES_j$	: 전기저장장치 j구간말기 에너지 저장량 [MWh]
$TS_j$	: 축열조의 j구간 말기 에너지 저장량[MWh]
$JG_H$	: 독립발전기 최대출력[MW]
$AB_H$	: 보조보일러 최대출력[MW]
$F_g, F_a$	: 독립발전기, 보조보일러 연료단가[원/MWh]
TIME	: 계산구간의 시간대수
BUY <sub>i</sub>	: 전력회사로부터 구매하는 전기의 단가 [원/MWh]
SELL <sub>i</sub>	: 전력회사에 판매하는 전기의 단가[원/MWh]
$COE_L$	: 열병합발전시스템의 최소 전기출력[MW]
$COE_H$	: 열병합발전시스템의 최대 전기출력[MW]
$COT_L$	: 열병합발전시스템의 최소 열출력[MW]
$COT_H$	: 열병합발전시스템의 최대 열출력[MW]
$ES_{CHG}$	: 전기저장장치 내부전지 최대 충전율[MW]
$ES_{DSC}$	: 전기저장장치 내부전지 최대 방전율[MW]
$ES_{E-CHG}$	: 전기저장장치 충전효율[P.U.]
$ES_{E-DSC}$	: 전기저장장치 방전효율[P.U.]
$\delta_1 \sim \delta_4$	: 송열관(1,2,3,4선로) 열전송 효율[P.U.]
$TS_L, TS_H$	: 축열조의 최소, 최대 에너지저장량[MWh]
$\eta_{th}, \eta_a$	: 독립발전기, 보조보일러 효율[P.U.]
$\eta_{we}, \eta_{fn}$	: 폐열상수, 회수열상수

과 전기의 판매 및 구매비용의 합을 최소화시키는 것으로 하였으며 이것은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다. 가변효율은 다중회귀곡선식을 유도하여 각 방정식의 최소자승오차가 최소가 되는 식을 선택하였으며 이것은 식 (2)와 같다. 식 (3)~(16)은 운전계획을 수립하기 위한 제약조건들이며 각각의 보조설비의 상하한 제약 및 운전에 필요한 제약조건들을 나타낸 것이다.

• 목적함수

$$\begin{aligned} \text{MIN} \sum_{j=1}^N \{ & (\text{BUY}_j \cdot \frac{1}{\gamma} \cdot Y_{5j} - \text{SELL}_j \cdot \gamma \cdot Y_{6j}) \\ & + (F_c \cdot \frac{1}{\eta_{c_j}} \cdot (Y_{1j} + Y_{2j} - Y_{3j} - Y_{4j} + Y_{11j} - Y_{12j})) \\ & + (F_g \cdot \frac{1}{\eta_g} \cdot Y_{10j} + F_a \cdot \frac{1}{\eta_a} \cdot Y_{4j}) \} \cdot \text{TIME} \end{aligned} \quad (1)$$

• 가변효율

$$\eta_{c_j} = (50 + 0.0083Y_{14j} - 0.00000029Y_{14j}^2 + 0.9Y_{13j} - 0.0038Y_{13j}^2) / 100 \quad (2)$$

• 제약조건

(에너지 방향제약)

$$Y_{k_j} \geq 0 \quad (3)$$

(열병합발전시스템의 열출력 상해한 제약)

$$\text{COT}_L \leq (Y_{1j} + Y_{2j} - Y_{3j} - Y_{4j} + Y_{11j} - Y_{12j}) \leq \text{COT}_H \quad (4)$$

(열병합발전시스템의 전기출력의 상해한 제약)

$$\begin{aligned} & (-Y_{5j} + Y_{6j} + Y_{7j} + Y_{8j} - Y_{9j} - Y_{10j}) \\ & \leq \text{SE}_H \cdot (Y_{1j} + Y_{2j} - Y_{3j} - Y_{4j} + Y_{11j} - Y_{12j}) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} & \text{SE}_L \cdot (Y_{1j} + Y_{2j} - Y_{3j} - Y_{4j} + Y_{11j} - Y_{12j}) \\ & \leq (-Y_{5j} + Y_{6j} + Y_{7j} + Y_{8j} - Y_{9j} - Y_{10j}) \end{aligned} \quad (6)$$

(독립발전기의 전기출력과 보조보일러의 열출력 상한 제약)

$$Y_{10j} \leq \text{IG}_H \quad (7)$$

$$(Y_{4j} / \delta_j) \leq \text{AB}_H \quad (8)$$

(전기저장장치 내부전지의 최대 충·방전 제약)

$$Y_{8j} \leq (\text{ES}_{\text{CHG}} / \text{ES}_{\text{E-CHG}}) \quad (9)$$

$$Y_{9j} \leq (\text{ES}_{\text{DSC}} \cdot \text{ES}_{\text{E-DSC}}) \quad (10)$$

(전기저장장치 에너지저장량 상하한 제약)

$$\begin{aligned} & \text{ES}_L \leq (Y_{8j} \cdot \text{ES}_{\text{E-CHG}} - Y_{9j} / \text{ES}_{\text{E-DSC}}) \\ & \cdot \text{TIME} + \text{ES}_{j-1} \cdot (1 - \mu_e)^{\text{TIME}} \leq \text{ES}_H \end{aligned} \quad (11)$$

(축열조 에너지의 저장량 상하한 제약)

$$\begin{aligned} & \text{TS}_L \leq (Y_{2j} \cdot \delta_2 - Y_{3j} / \delta_3) \cdot \text{TIME} \\ & + \text{TS}_{j-1} \cdot (1 - \mu_t)^{\text{TIME}} \leq \text{TS}_H \end{aligned} \quad (12)$$

(전기부하 제약과 열부하 제약)

$$Y_{7j} = \text{전기부하}_j \quad (13)$$

$$Y_{1j} \cdot \delta_1 = \text{열부하}_j \quad (14)$$

(폐열 제약과 회수열 제약)

$$(Y_{1j} + Y_{2j} - Y_{3j} - Y_{4j} - Y_{12j}) \cdot \eta_{wc} - Y_{11j} \leq 0 \quad (15)$$

$$(Y_{1j} + Y_{2j} - Y_{3j} - Y_{4j} + Y_{11j}) \cdot \eta_n - Y_{12j} \leq 0 \quad (16)$$

### 2-3. 가변효율방정식 유도

열병합발전시스템의 효율은 전기출력과 열출력에 따라 변화하게 된다. 본 논문에서는 효율을 나타낼 수 있는 수식을 얻어내기 위해 실제의 열병합발전소로부터 얻은 운전실적을 분석하였으며, 다중회귀곡선식을 이용하여 전기출력과 열출력의 변화에 따른 적합한 효율방정식을 유도하였다.

우선 3개의 변수를 x, y, z라하고 이 사이에 1차 함수적인 상관관계가 인정되면 변수의 개수가 n일 때 지정된 변수 x, y의 값에 대응하는 변수 z값은 추정하는 식은 식 (17)과 같은 회귀평면식으로 나타낼 수 있다.

$$z = a + bx + cy \quad (17)$$

위 식에서 변수 x, y에 따른 회귀평면에서의 값을 z라 하면 3개의 변수를 갖는 n개의 차수가 있을때

$$(x_i, y_i, z_i) \quad (i=1, \dots, n) \quad (18)$$

여기서, (x<sub>i</sub>, y<sub>i</sub>)에 대응하는 평면상의 점  $\hat{z}_i (i=1, \dots, n)$ 를

$$\hat{z}_i = a + bx_i + cy_i \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (19)$$

라고 하면,

$$S = \sum_{i=0}^N (z_i - \hat{z}_i)^2 = \sum_{i=0}^N [z_i - (a + bx_i + cy_i)]^2 \quad (20)$$

(i=1, 2, ..., n)

이 최소가 되도록 최소자승법을 이용하여 각각의 상수 a, b, c의 값을 정하면 식 (17)의 형태를 구할 수 있다. 따라서 S를 최소로 하는 a, b, c는  $\partial S / \partial a = 0$ ,  $\partial S / \partial b = 0$ ,  $\partial S / \partial c = 0$ 의 근이므로 이러한 최소화 과정을 통하여 식 (21)과 같은 정규방정식을 유도할 수 있다.

$$na + b \sum_{i=1}^n x_i + c \sum_{i=1}^n y_i = \sum_{i=1}^n z_i$$

$$\begin{aligned} a \sum_{i=1}^n x_i + b \sum_{i=1}^n x_i^2 + c \sum_{i=1}^n x_i y_i &= \sum_{i=1}^n x_i z_i \\ a \sum_{i=1}^n y_i + b \sum_{i=1}^n x_i y_i + c \sum_{i=1}^n y_i^2 &= \sum_{i=1}^n y_i z_i \end{aligned} \quad (21)$$

이 정규방정식을 풀어서 상수 a, b, c를 x, y의 변수가 임의의 값을 가질 때에 z의 값을 지금까지의 변수 값들로 결정되는 추세와 거의 접근하도록 하는 수식이 될 것이다. 아울러 x, y의 값들에 따른 z의 방정식이 꼭 회귀평면으로만 생각할 수는 없고 여러형태로 표현될 수도 있다.

따라서, 본 논문에서는 가능할 수 있는 표현중 6개의 방정식을 선정하고 최소자승오차가 가장 작은 z의 방정식을 위와 같은 과정에 근거하여 유도하였다. 이 때 선정된 6개의 방정식의 형태는 식 (22)와 같다.

- (a)  $z = a + bx + cy$
- (b)  $z = a + bx^{-1} + cy^{-1}$
- (c)  $z = a + bx + cx^2 + dy + ey^2$
- (d)  $z = a + bx^{-1} + cx^{-2} + dy^{-1} + ey^{-2}$
- (e)  $z = a + bx + cx^2 + dx^3 + ey + fy^2 + gy^3$
- (f)  $z = a + bx^{-1} + cx^{-2} + dx^{-3} + ey^{-1} + fy^{-2} + gy^{-3}$

여기서 최소자승오차가 가장 작은 경우는 사례연구에서 언급하겠지만, 식 (c)에 해당되는 방정식이었다. 따라서 이 식을 본 논문에서 가변효율을 표현하는 방정식으로 사용하였으며, 여기서 변수 z는 효율, x는 전기출력, y는 열출력을 나타내고 있다.

### 3. 유전알고리즘

유전알고리즘(Genetic Algorithms)은 다윈의 생물학적 진화원리에 의한 자연선택과 유전학의 원리를 근거로한 최적탐색 알고리즘으로 주어진 탐색공간을 확률적인 방법을 사용하여 그 정보를 바탕으로 병렬적으로 최적해를 탐색하는 알고리즘이다. 그 특징으로 첫째는 주어진 영역에서 랜덤하게 파라미터 집합을 부호화 하여 단일점이 아닌 해집단에서 전역적으로 탐색을 하며 확률적 규칙을 사용하므로 전역적 최적점으로 수렴할 확률이 높다. 둘째는 제약조건을 가진 목적함수를 변형시켜 비제약조건을 가진 목적함수로 만든 다음 그 정보만을 사용하므로 미분계수나 다른 보조적정보를 사용하지 않는다<sup>12)</sup>. 따라서 유전알고리즘은 전 영역에서 병렬적으로 해집단을 형성하여 목적함수 값만을 필요로 하므로 선형, 비선형에 관계없이 적용이 간편하며, 국부적 최적해에 수렴할 확률이 적은 장점을 가지고 있다. 한편 유전알고리즘은 변수들을 2진수로 구성하여 코딩하므로 더욱 높은 정확도를 가진해를 구할경우 더욱 긴 문자열을 필요로 한다. 또

한 긴 문자열을 가질 경우 적합도계산과 같은 코딩절차에서 많은 계산을 필요로 하므로 그만큼 수렴을 위해 필요한 시간도 증가하게 된다. 그러나 실변수 벡터문자열(real variable vector string)을 이용한 유전알고리즘은 탐색할 변수 자체를 벡터문자열로 구성하기 때문에 높은 정밀도를 요구할 경우 문자열을 증가시킬 필요가 없으며 적합도를 계산하는 과정에서 디코딩과정이 없으므로 계산시간의 감소를 가져오게 되므로 비교적 빠른시간내에 높은 정밀도를 가진 해를 구할 수 있는 장점이 있다. 따라서 본논문에서는 실변수 벡터문자열을 사용한 유전알고리즘을 적용하였다<sup>13)</sup>.

#### 3-1. 실변수 연산자

실변수를 이용한 유전알고리즘은 탐색할 변수를 실수로 구성한다. 즉 문자열은 모든 변수를 포함하는 벡터로 표현된다. 예를들어 함수  $F(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 의 최적해를 구하는 문제를 고려하면 문자열은  $S=(x_1, x_2, \dots, x_n) \in R^n$ 의 형태로 표현할 수 있으며 여기서 실변수 영역  $R^n$ 은 n차원 탐색영역이다. 또한 다음과 같은 3개의 기본 연산자를 갖는다.

##### 3-1-1. 복제(Reproduction)

초기 세대 및 전 세대에 구해진 적합도를 바탕으로 룰렛휠에 의해 복제할 개체를 선택하며 적합도가 클수록 다음 세대에 복제될 확률이 크다.

##### 3-1-2. 교차(Crossover)

두 벡터의 선형조합으로 정의될 수 있으며 새롭게 복제된 개체들 가운데 교차 확률에 따라 교차를 한다. 예를들어 임의의 복제된 개체를  $S'_i=(x_1, \dots, x_n)$ ,  $S'_j=(y_1, \dots, y_n)$ 라 하면 다음 세대는 식 (23)과 같이 나타낼 수 있다. 또한 식 (23)은 whole arithmetical crossover이며 a는 0과 1사이의 난수이다<sup>13)</sup>.

$$\begin{aligned} S_k^{t+1} &= a \cdot S_x^t + (1-a) \cdot S_y^t \\ S_l^{t+1} &= a \cdot S_y^t + (1-a) \cdot S_x^t \end{aligned} \quad (23)$$

##### 3-1-3. 돌연변이(Mutation)

국부적 최적점으로 수렴을 방지하는 역할을 하며, 복제 및 교차를 한 후 선택된 개체의 변수범위내에서 임의의 변수를 적합도에 관계없이 돌연변이 확률만큼 개체 안에서 임의로 삽입한다. 식 (24)는 uniform 돌연변이이며, 범위는  $l_k^s < x_k < u_k^s$ 이다<sup>13)</sup>.

$$S_v^t = (x_1, \dots, x_k, \dots, x_n) \Rightarrow S_v^{t+1} = (x_1, \dots, k_k, \dots, x_n) \quad (24)$$

### 4. 유전알고리즘의 적용

먼저 유전알고리즘의 적용을 위하여 목적함수와 제약

조건을 일반적인 목적함수로 나타내면 식 (25)와 같이 표현될 수 있다.

$$\text{Min} \sum_{j=1}^N F_j(\mathbf{X}) \quad (25)$$

제약조건  $\text{const}(\mathbf{X}) \leq 0$

여기서  $F_j$ 는 목적함수,  $\mathbf{X}$ 는 실변수 행벡터이고  $\alpha(\mathbf{X})$ 는 제약조건이다. 그리고 식 (25)와 같은 제약조건을 가진 목적함수를 페널티함수를 이용하여 식 (26)과 같은 비제약 최적화문제로 변형한다.

$$\text{Min } P = \sum_{j=1}^N F_j(\mathbf{X}) + \mu \sum_{j=1}^N \max \{0.0, \text{const}(\mathbf{X})\}^2 \quad (26)$$

이 식에서  $\mu$ 는 페널티계수이다. 여기서  $\mu$ 는 세대가 증가함에 따라 무한대로 증가하며 목적함수도 무한대로 증가한다. 또한 목적함수의 최소화 문제를 적합도 최대화 문제로 변형시키면 식 (27)과 같다. 만약 우측식의 제약조건을 만족시키지 못한다면 적합도는 최소화가 되며 다음 세대에 선택될 확률이 줄어들며 반면에 제약조건을 만족시킨다면 적합도는 최대화가 되어 다음세대에 선택될 확률이 높아진다.

$$\text{Fitness} = \frac{1}{P} \quad (27)$$

한편 유전알고리즘의 적용 흐름도는 Fig. 2에 나타내었다. 초기화는 각 시간대별로 10개의 변수를 가지며 하루를 8시간대로 나누었으므로 총 80개의 변수를 랜덤하게 선택하였고, 각각의 변수 즉 각종보조설비 및 전력회사의 전력구매 등은 상하한치 범위내에서 선택하였

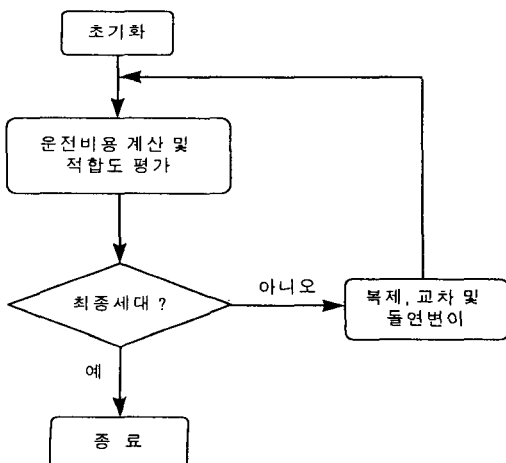


Fig. 2. The flow chart for genetic algorithm application.

다. 또한, 각 세대별로 운전비용 및 적합도를 계산한 다음 최종세대이면 종료하고, 최종세대가 아니면 복제, 교차 및 돌연변이 루프를 반복한다.

## 5. 사례연구

본 사례연구를 위해 국내에서 운전되고 있는 B 열병합발전소에서 6개월간(약 1400시간)의 운전데이터를 검토해 본 결과 전기에너지와 열에너지의 출력은 Fig. 3과 같이 나타났다. 그리고 본 연구를 위해 사용된 입력자료는 Table 2와 같으며 여기서 1시간대는 3시간을 의미하고 3시간 동안은 운전조건이 변하지 않는다고 가정하였으며, 전력의 구매 및 판매비용은 하절기를 기준으로 시간대별 제약전력요금 단가형태를 근거로 구해진다.

### 5-1. 가변효율

식 (24)에서 보여진 효율방정식의 후보들을 대상으로 최소자승오차를 구해본 결과 Table 3과 같이 나타났다.

따라서, Table 3에서 최소자승오차가 가장 작은 식은 (c)이므로 이것을 효율방정식으로 선택하였으며 계산된 방정식의 계수 a~c는 식 (2)에서 이미 보였다.

### 5-2. 유전알고리즘

유전알고리즘의 적용을 위해 개체의 크기는 500개로 설정하였고, 교차확률  $P_c$ 는 0.6, 돌연변이 확률  $P_m$ 은 0.03으로 설정하였으며 세대수는 1,000세대로 설정하였다. 본 연구에서 계산시간은 9분 45초가 소요되었다. 시뮬레이션 후 최종세대에서 각 시간대별로 구한 효율의 변화를 Fig. 4에서 보이고 있으며 효율이 좋은 시간대는 열부하가 가장 많은 5,6,7번 시간대이며 가장 높은 효율은 6번 시간대의 70%를 나타내고있다. Fig. 5는 세대가

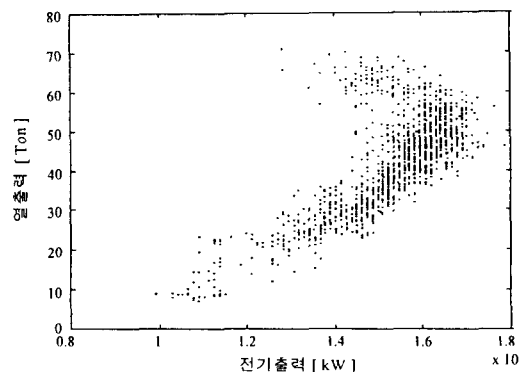


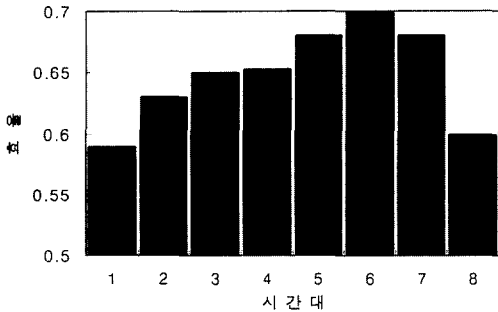
Fig. 3. Heat and electrical output of cogeneration system.

**Table 2. Basic input data.**

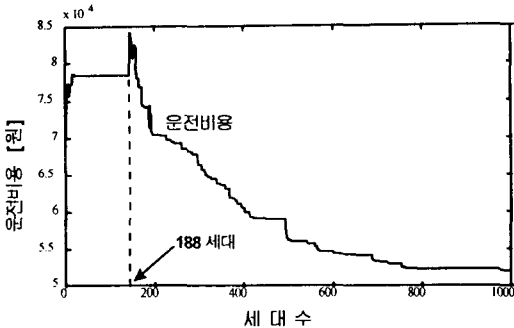
시간대 →		1	2	3	4	5	6	7	8
전력요금 [원/MWh]	BUY	100	100	100	200	200	200	150	100
	SELL	100	100	100	200	200	200	150	100
COE <sub>H</sub>	25	ES <sub>H</sub>	5	TS <sub>L</sub>	1	F <sub>s</sub>	80	F <sub>c</sub>	80
COE <sub>L</sub>	5	AB <sub>H</sub>	5	ES <sub>L</sub>	1	F <sub>g</sub>	80	γ	0.99
TS <sub>H</sub>	6	SE <sub>H</sub>	1.3	ES <sub>0</sub>	1	μ <sub>E</sub>	0.05	δ <sub>1</sub>	0.98
η <sub>a</sub>	0.7	SE <sub>L</sub>	0.8	ES <sub>0</sub>	1	μ <sub>T</sub>	0.05	δ <sub>2</sub>	1
η <sub>g</sub>	0.4	IG <sub>H</sub>	5	η <sub>H</sub>	0.1	η <sub>we</sub>	0.3	δ <sub>3</sub>	1
ES <sub>CHG</sub>	3.0	ES <sub>DSC</sub>	3.0	ES <sub>E-DSC</sub>		0.9		ES <sub>E-CHG</sub>	0.9

**Table 3. Comparison of least square error.**

방정식	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)
최소자승오차	33,545	5,092	3,424	5,006	36,261	3,524

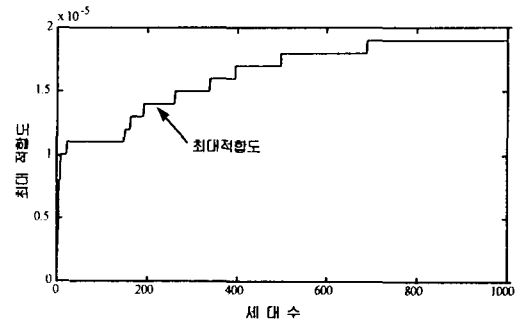


**Fig. 4. Convergence of operating cost.**

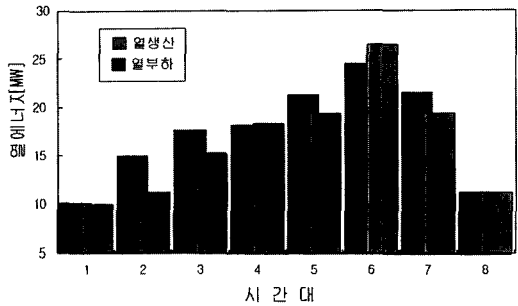


**Fig. 5. Convergence of operating cost.**

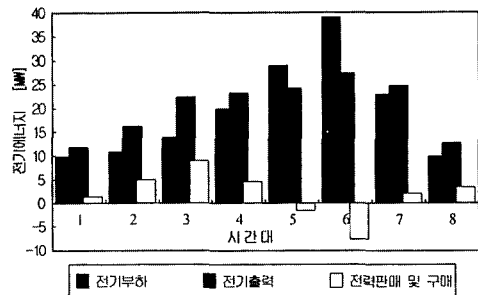
증가함에 따라 운전비용이 점차적으로 감소하고 있음을 알 수 있고 188세대에서 적합도를 만족함을 알 수 있었다. Fig. 6은 각 세대의 최대 적합도를 나타낸 것으로 세대가 증가함에 따라 최대 적합도가 증가함을 알 수 있으며 최대 적합도가 클수록 Fig. 5처럼 운전비용은 감소한다.



**Fig. 6. Best fitness by generations.**



**Fig. 7. Production scheduling of heat energy.**



**Fig. 8. Production scheduling of electricity.**

**Table 4. Results of a daily operation scheduling.**

COST [원]	시간 대	열부하 [MW]	축열조 [MW]		보조 보일러 [MW]	전력회사 [MW]		전기저장장치 [MW]		독립 발전기 [MW]	열출력 [MW]	전기 출력 [MW]	시간대 별효율 [P. U.]	
			to	from		to	from	to	from					
	1	10.2	0.72	0	0.91	0	1.46	10	0.63	0	1.14	10.13	11.86	0.59
	2	11.22	0.30	0	0.25	0	5.11	11	0.54	0	2.04	15.09	16.25	0.63
	3	15.31	0.49	0	0.78	0	9.08	14	0.32	0	2.22	17.95	22.40	0.65
52,602	4	18.37	0.09	0	2.43	0	4.68	20	0.46	0	1.98	18.18	23.32	0.653
	5	19.39	0	0.21	0.44	1.75	0	29	0	0.14	2.78	21.37	24.33	0.68
	6	26.5	0.02	0	4.79	7.75	0	39	0.34	0	1.16	24.55	27.44	0.70
	7	19.39	0.07	0	0.83	0	2.16	23	0.49	0	2.69	21.58	24.80	0.68
	8	11.22	0.23	0	2.74	0	3.46	10	0.21	0	4.50	11.41	12.82	0.6

1,000세대를 반복한 후 열에너지 생산계획은 Fig. 7과 같으며 이는 열생산과 열부하의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 열부하가 적고 전력요금이싼 2, 3번 시간대에서는 열부하량에 비해 상대적으로 열생산량을 충분히 증가시켜 발생한 여분의 열을 축열조에 저장하고 그리고 열부하가 많은 4, 6번 시간대에 축열하여 효과적으로 열을 이용하고 있음을 알 수 있다.

또한, 전력의 판매 및 구매 계획은 전체 운전비 결정에 가장 큰 영향을 주는데 Fig. 8을 보면 1~4번 시간대에 전력을 판매하고 소비가 많은 5, 6번 시간대에서는 부족한 전기를 독립발전기로부터 충당하며, 그래도 부족한 전력은 전력회사에서 구매하도록 수립되고 있다.

Table 4는 주어진 운전 조건에서 최종적으로 수립된 열병합발전시스템에서의 일간운전계획을 나타낸 것으로서, 그림에서 시간대별 열부하와 열생산계획, 전기부하와 전기생산계획, 축열조의 축열 및 방열 계획, 그리고 전기저장장치의 충전 및 방전계획, 마지막으로 시간대별효율이 보여지고 있다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 열병합발전시스템의 최적운전계획 수립에 전역적 탐색기법인 유전알고리즘을 이용하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 열출력과 전기출력의 크기에 따라 변화하는 특성을 가진 열병합발전시스템의 효율 방정식을 실제 자료를 근거로 유도하였다.
- 2) 열병합발전시스템의 운전계획수립을 위해 각 시간대별로 효율을 구하였고 이를 근거로 일간운전계획을 효율적으로 수립하였다.

3) 비선형 특성을 가지는 모델링의 해를 구하기 위해 서 유전알고리즘을 적용하였으며 적절한 운전계획이 수립될 수 있음을 확인하였다.

4) 각종 보조설비가 유연성 있게 협력하며 필요시마다 효율적으로 운전되고 있음을 알 수 있다.

## 참고문헌

1. 이종범, 류승헌: "열병합발전시스템의 국내외 현황과 과제 및 전망", 대한전기학회지, (1994).
2. 이종범, 류승헌: "국내 열병합발전시스템의 보급확대를 위한 과제 및 대안", 대한전기학회지, (1995).
3. H.B. Puttgen and *et al.*: "Optimum scheduling procedure for cogenerating small power producing facilities", IEEE Trans. on Power System, Vol. 4, No. 3, Aug. (1989).
4. H. Ghoudjehbaklou and *et al.*: "Optimisation topics related to small power producing facilities operating under energy spotpricing policies", IEEE Trans. on Power System, Vol. PWRS-2, No. 2, May (1987).
5. F.J. Rooijers, *et al.*: "Static economic dispatch for cogeneration system", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 9, No. 3, (1994).
6. S.M. Wang, C.C. Liu and S. Luu: "A negotiation methodology and its application to cogeneration planning", IEEE Trans. Power Systems, Vol. 9, No. 2, May (1994).
7. S. Horii, *et al.*: "Optimal planning of gas turbine cogeneration plants based on mixed-integer Linear Programming", Int'l Journal of Energy Research, Vol. 11, (1987).
8. M.L. Baughman and *et al.*: "Optimizing combined

- cogeneration and thermal storage systems: An Engineering Economics Approach", IEEE Trans. on Power System, Vol. 4, No. 3, Aug. (1989).
9. 이종범, 류승현, 김준현: "A daily operation scheduling on cogeneration system with thermal storage tank", 일본전기학회 논문지, Vol. 114-B, (1994).
  10. 이종범, 정창호: "각종 보조설비가 연계된 열병합발전시스템에서 퍼지이론을 적용한 단기운전계획수립", 대한전기학회 논문지, 제44권, 제9호, (1995).
  11. D.E. Goldberg: "Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning", Addison Wesley, (1989).
  12. Z. Michalewicz: "Genetic Algorithm+Data Structures= Evolution Programs", Second Edition, Springer Verlag, (1992).