

# 산업용 열병합발전시스템에서 진화 알고리즘을 이용한 합리적 운전계획 수립에 관한 연구

論 文

49A-10-4

## A Rational Operation Scheduling Using Evolutionary Algorithm on Industrial Cogeneration System

崔光範\* · 鄭知勳\*\* · 李鍾範\*\*\*

(Kwang-Beom Choi · Ji-Hoon Jeong · Jong-Beom Lee)

**Abstract** - This paper describes a strategy of a daily optimal operational scheduling in cogeneration system for paper mill. The cogeneration system selected to establish the scheduling consists of three units and several auxiliary devices. One unit generates electrical and thermal energy using the back pressure turbine. The rest two units generate the energy using the extraction condensing turbine. Three auxiliary boilers, two waste boilers and three sludge incinerators operate to supply energy to the loads with three units. The cogeneration system is able to supply enough the thermal energy to the thermal load, however it can not sufficiently supply the electrical power to the electrical load. Therefore the insufficient electric energy is compensated by buying electrical energy from utility. When the operational scheduling is performed considering the environmental problem. This paper shows the simulation results for daily operational scheduling obtained using the evolutionary algorithm. This results reveal that the proposed modeling and strategy can be effectively applied to cogeneration system for paper mill.

**Key Words** : Cogeneration system, Paper mill, Optimal operational scheduling, Auxiliary devices, Back pressure turbine, Extraction condensing turbine, Evolutionary algorithm

### 1. 서 론

지금까지의 열병합발전시스템 연구를 보면 주로 열병합발전시스템의 건설을 고려한 경제적인 타당성 연구나 특정설비의 초기 설치시 용량선정 등이 주를 이룬다[1][2]. 그리고 일반적인 열병합발전시스템의 운전계획 최적화에 관한 연구[3][4]와 운영최적화기법에 관한 연구[5], 특이한 설비를 도입했을 때 열병합발전시스템의 운용기법에 관한 연구도 이와 함께 수행되었다[6]. 또한 부하의 종류가 다를 때의 경제급전에 관한 연구도 수행되었다[7]. 그러나 산업체에서 열병합발전시스템 도입시에 공정의 구성, 전기수요와 열수요의 수준, 필요한 열의 온도와 압력, 공장의 규모 등 많은 조건을 고려하여 도입하고 설계되기 때문에 산업체는 용도에 따라 독특한 시스템을 가지게 된다. 또한 산업체의 규모가 크고 공정이 복잡해질수록 다양한 보조설비를 가지게 되며, 공장의 규모 확장으로 새로운 설비가 추가되어 시스템이 변경되기도 한다. 그러므로 산업용 열병합발전시스템의 합리적인 운용 알고리즘을 확립하고 이에 근거하여 운전된다면 상당한 에너지 절약을 이룩할 것으로 판단되며, 추가설비가 있더라도 수립된 운용알고리즘에 약간의 수정만을 가한다면

지속적인 적용이 가능하리라 사료된다.

따라서 본 논문에서는 이러한 산업용 열병합발전시스템 가운데 국내에서 현재 운전되고 있는 A 제지공장용 열병합발전시스템을 대상으로 이에 대한 최적운전계획을 수립하였다. 이 열병합발전시스템은 대기열병합발전시스템을 보유하고 있고, 보조설비인 보조보일러, 폐열보일러 및 슬러지 소각로 등과 함께 전기부하와 열부하에 각각의 에너지를 공급해 주고 있으며 자체 전기출력이 부족할 경우에는 전력회사와 연계되어 전력을 구매하기도 한다. 또한 본 논문에서는 1997년 12월에 결의한 환경선언이 곧 우리 나라에도 영향을 미칠 것으로 예상되어 환경항목을 목적함수에 추가하여 운전계획을 수립하였다. 또한 제시된 알고리즘이 설비의 출력 특성상 비선형 특성을 가지고 있으므로 이를 해결하는데 최적화 알고리즘으로 사용되고 있는 진화 알고리즘을 이용하였으며[8], 수립된 운전계획 수립결과와 타당성을 항목별로 검토하였다.

### 2. 제지공장용 열병합발전시스템

#### 2.1 모델링

본 논문에서 다룬 A 제지공장용 열병합발전시스템은 여러 unit와 보조보일러, 폐열보일러, 슬러지 소각로 등으로 이루어진 다양한 보조설비들과 함께 운전되고 있다. 이 가운데 특히 폐열보일러와 슬러지 소각로는 열부하량이나 제품의 생산량에 의해서 출력량이 제한을 받을 수 있는 설비들이다.

\* 準 會 員 : 圓光大 電氣工學科 碩士

\*\* 準 會 員 : 圓光大 電氣工學科 碩士課程

\*\*\* 正 會 員 : 圓光大 電氣電子 및 情報工學部 教授 · 工博

接受日子 : 2000年 3月 22日

最終日子 : 2000年 10月 18日

열병합발전시스템의 방식은 열 생산을 주목적으로 하는 버터링 사이클방식이며, 1번 열병합발전시스템은 배압터빈으로 이루어져 있고, 2번 열병합발전시스템과 3번 열병합발전시스템은 추기복수터빈으로 이루어져 있다.

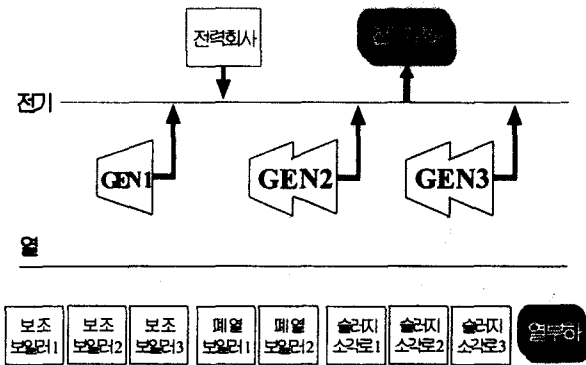


그림 1. 제지공장용 열병합발전시스템의 에너지 흐름도  
Fig. 1. Energy flow of cogeneration system for paper mill

그림 1은 제지공장용 열병합발전시스템과 각종 보조설비들이 연계된 상태에서의 에너지 흐름도를 나타낸 것이다. 여기에서 전기와 열의 유출입은 모두 각각 연결되어 있으므로 일괄처리 하였다. 또한 에너지의 흐름은 화살표로 나타내었고 가리키는 방향으로만 에너지가 흐를 뿐 에너지의 역류는 없으며 전력회사로부터는 전기를 구매할 수 있지만 판매하지는 않도록 전기적으로 연계되어 있다.

한편, 사용연료의 종류는 두 가지인데 슬러지 소각로에 투입되는 슬러지 형태의 연료와 열병합발전시스템, 보조보일러, 폐열보일러 등에서 사용되는 B-C유이다.

2.2 수리모델 수립

최적운전계획을 수립하기 위하여 목적함수와 제약조건을 수립하였다. 먼저 목적함수는 열병합발전시스템에서 사용되는 연료비용과 전기의 구매비용의 합을 최소화시키는 것으로 하였으며, 또한 환경적인 규제에 대응하여 SOx의 환경요소를 고려하였다. 목적함수의 구성요소는 다음과 같다.

2.2.1 구매전력비용

구매전력비용은 전력회사로부터 구매한 전력량에 수전지점부터의 송전효율을 고려하고 유형별로 경부하, 중부하, 최대부하로 나누어 시간대별로 다른 요금을 적용하였다. 식 (1)은 구매전력비용을 나타낸 것이다.

$$C_{BUY}(k) = BUY(k) \cdot \frac{1}{\epsilon} \cdot E_{bu}(k) \tag{1}$$

2.2.2 열병합발전시스템의 운전비용

열병합발전시스템 운전비용은 운전전에 필요한 연료의 비용을 운전비용으로 두고 계산하였다. 연료비용은 각각의 열병

합발전시스템의 주 보일러에 투입되는 연료의 비용이며, 주 보일러에서 발생된 스팀이 고압용 터빈을 돌리다가 추기되어 열에너지가 생성되고, 남은 증기는 다시 저압용 터빈을 돌려 발전하게 된다. 열병합발전시스템의 연료비를 나타내는 근사적인 다항식은 실제 운전데이터를 바탕으로 하여 최소자승법을 이용한 다중 회귀곡선식으로 구한 결과 식 (2)와 같이 전기출력과 열출력의 2차식으로 표현하였을 때 가장 적은 최소자승오차를 가졌다. 따라서 연료비용은 다음과 같은 전기출력과 열출력의 2차함수로 나타낼 수 있다.

$$F_{ci}(k) = f_{cai} \cdot H_{coi}^2(k) + f_{cbi} \cdot H_{coi}(k) + f_{cci} \cdot E_{coi}^2(k) + f_{cdi} \cdot E_{coi}(k) + f_{cei} \tag{2}$$

2.2.3 각종 보조설비들의 운전비용

보조보일러, 폐열보일러, 슬러지 소각로 등의 보조운전설비에서 사용되는 연료비용을 운전비용으로 두고 계산하였다. 보조운전설비의 연료비용을 나타내는 근사적인 다항식은 위에서 설명한바와 같이 실제 운전데이터를 바탕으로 최소자승법을 이용한 다중 회귀곡선으로 구한 결과 보조보일러와 폐열보일러는 2차식으로 표현하였을 때 최소자승오차가 가장 적게 나타났으며, 슬러지 소각로는 1차식일때가 가장 적은 최소자승오차를 갖는 것으로 나타났다. 따라서 보조보일러, 폐열보일러 및 슬러지 소각로의 운전비용에 관한 식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_{ai}(k) = f_{aai} \cdot H_{abi}^2(k) + f_{abi} \cdot H_{abi}(k) + f_{aci} \tag{3}$$

$$F_{wi}(k) = f_{wai} \cdot H_{whbi}^2(k) + f_{wbi} \cdot H_{whbi}(k) + f_{wci} \tag{4}$$

$$F_{sti}(k) = f_{stai} \cdot H_{sti}(k) + f_{stbi} \tag{5}$$

2.2.4 환경처리비용

탈황설비를 통하여 각종 열병합발전시스템의 주보일러를 비롯한 보조보일러, 폐열보일러, 슬러지 소각로를 운전할 때 배출되는 아황산 가스가 처리된다. 설비의 출력량이 높을수록 투입되는 연료량이 많아지며, 또한 연료와 설비에 의하여 아황산가스의 방출량이 달라지게 된다. 따라서 출력량에 따른 연료량과 사용연료별 환경처리비용은 위에서 설명한바와 같이 실제 환경처리비용을 바탕으로 최소자승법을 이용한 다중회귀곡선으로 구한 결과 열병합발전시스템의 환경처리비용은 열출력과 전기출력의 2차식으로 하였을 때, 보조보일러와 폐열보일러는 열출력의 2차식으로 하였을 때, 슬러지 소각로는 열출력의 1차식으로 하였을때가 각각 최소자승오차가 가장 적게 나타났다. 따라서 열병합발전시스템을 비롯한 보조설비들의 환경처리비용은 각각 식 (6)~(9)와 같이 표현할 수 있다

$$E_{ci}(k) = \beta_{cai} \cdot H_{coi}^2(k) + \beta_{cbi} \cdot H_{coi}(k) + \beta_{cci} \cdot E_{coi}^2(k) + \beta_{cdi} \cdot E_{coi}(k) + \beta_{cei} \tag{6}$$

$$E_{ai}(k) = \beta_{aai} \cdot H_{abi}^2(k) + \beta_{abi} \cdot H_{abi}(k) + \beta_{aci} \tag{7}$$

$$E_{wi}(k) = \beta_{wai} \cdot H_{whbi}^2(k) + \beta_{wbi} \cdot H_{whbi}(k) + \beta_{wci} \quad (8)$$

$$E_{Si}(k) = \beta_{Sai} \cdot H_{Si}(k) + \beta_{Sbi} \quad (9)$$

2.2.5 목적함수 수립

제지공장용 열병합발전시스템의 합리적 운영을 위해서 열병합발전시스템을 비롯한 각종 보조설비에 사용되는 연료비를 최소화하는 것으로서 목적함수를 수립하였다. 이미 언급한대로 제지공장용 열병합발전시스템의 연료비를 최소화하기 위해서는 열병합발전시스템의 운전비용, 보조설비들의 운전비용, 환경처리비용 그리고 전력회사로부터의 구매전력비용을 합한 값이 최소가 되는 것을 목적으로 하였다.

열병합발전시스템의 일간 총 운전비용은 열병합발전시스템과 보조설비들의 운전비용에 구매전력요금의 합으로 나타낼 수 있으며, 일간 운전계획 수립을 위해서 하루를 N개의 시간대로 나눌 경우 운전비용은 다음과 같이 표현된다.

$$F_{eco} = \sum_{k=1}^N t \cdot \left( C_{BUY}(k) + \sum_{i=1}^3 F_{ci}(k) + \sum_{i=1}^3 F_{ai}(k) + \sum_{i=1}^3 F_{wi}(k) + \sum_{i=1}^3 F_{Si}(k) \right) \quad (10)$$

또한, 열병합발전시스템의 일간 총 환경처리비용은 열병합발전시스템과 보조설비들의 설비별, 시간대별 환경처리비용을 모두 합한 비용으로서 다음과 같이 표현된다.

$$F_{env} = \sum_{k=1}^N t \cdot \left( \sum_{i=1}^3 E_{ci}(k) + \sum_{i=1}^3 E_{ai}(k) + \sum_{i=1}^3 E_{wi}(k) + \sum_{i=1}^3 E_{Si}(k) \right) \quad (11)$$

따라서 열병합발전시스템의 운전비용과 환경처리비용을 합한 비용, 즉 제지공장용 열병합발전시스템의 총 운용비용을 최소화 시키는 것을 목적함수로 하면 식 (12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$Min F_{tot} = F_{eco} + F_{env} \quad (12)$$

2.2.6 제약조건 수립

전술한 목적함수에는 여러 가지 제약이 따르게 된다. 제약조건으로는 에너지흐름에 따른 제약조건과 출력의 상하한 제약, 폐열제약 등이 있다. 각 선로에서 에너지 흐름에 관한 제약조건은 다음과 같다.

열부하에 관한 제약은 열병합발전시스템을 비롯한 각종 보조설비들의 열출력값에 효율을 나눈 값이 열부하로 공급되는 양과 같아야 하는 조건이다. 이때 열병합발전시스템의 효율은 전술한 것처럼 열진비에 따른 효율을 이용하였고 보조보일러, 폐열보일러, 슬러지 소각로 등의 효율은 열출력에 관계없이 일정하다고 하였다. 따라서 이것은 다음 식과 같이 표현된다.

$$H_{load}(k) = \sum_{i=1}^3 H_{coi}(k) + \sum_{i=1}^3 H_{abi}(k) + \sum_{i=1}^3 H_{Si}(k) + \sum_{i=1}^3 H_{whbi}(k) \quad (13)$$

열부하량은 열부하로의 공급량에 열 전송효율을 곱하여 나타낼 수 있다.

$$H_L(k) = H_{load}(k) \cdot \delta_{Hload} \quad (14)$$

전기부하로 공급되는 에너지의 제약은 전력회사로부터의 전기 구매량과 열병합발전시스템의 전기출력의 합이 전기부하로 공급되는 양과 같아야 된다는 조건이다. 따라서 이것은 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_{load}(k) = E_{bu}(k) + \sum_{i=1}^3 E_{coi}(k) \quad (15)$$

또한 전기부하는 전기부하에 공급되는 에너지에 전송효율을 곱한 것이다.

$$E_L(k) = E_{load}(k) \cdot \delta_{Eload} \quad (16)$$

열병합발전시스템의 열출력과 전기출력은 시스템이 낼 수 있는 최대출력과 가동이 중지되지 않도록 해야하는 가장 최소 출력값이 있다. 이는 열병합발전시스템이 열출력과 전기출력을 낼 수 있는 범위를 말한다. 이를 식으로 나타내면 식 (17), (18)과 같다.

$$H_{coi}^{min} \leq H_{coi}(k) \leq H_{coi}^{max} \quad (17)$$

$$E_{coi}^{min} \leq E_{coi}(k) \leq E_{coi}^{max} \quad (18)$$

열병합발전시스템과 마찬가지로 보조보일러, 폐열보일러 및 슬러지 소각로의 설비도 각각 정격용량으로 말할 수 있는 최대 출력제약과 설비가 정지하지 않기 위한 최소의 제약을 가지고 있다. 이것을 식으로 표현하면 식 (19)~(21)와 같이 된다.

$$H_{abi}^{min} \leq H_{abi}(k) \leq H_{abi}^{max} \quad (19)$$

$$H_{whbi}^{min} \leq H_{whbi}(k) \leq H_{whbi}^{max} \quad (20)$$

$$H_{Si}^{min} \leq H_{Si}(k) \leq H_{Si}^{max} \quad (21)$$

폐열보일러의 열출력량은 열부하량에 따라서, 즉 회수되는 폐열량에 따라 제약이 발생된다. 열부하량이 아주 적을 경우에는 회수열도 적어져서 폐열보일러를 충분히 가동시키지 못하는 결과를 낳을 수도 있다. 이와 유사한 경우로서 슬러지 소각로도 제지공정에서 충분한 양의 종이 생산되지 않을 경우 슬러지 재고량 확보의 어려움 때문에 슬러지 소각로를 정격출력만큼 가동 할 수 없는 결과를 낳을 수 있다. 따라서 폐열량에 따른 제약을 식 (22), (23)와 같이 정식화하였으며, 정상적인 제지공정 운용시에 슬러지 부족으로 인

한 슬러지 소각로의 운전장애가 없다는 가정 하에 슬러지량에 따른 운전제약은 고려하지 않았다.

$$H_{whb}(k) \leq \alpha_i \cdot WH(k) \tag{22}$$

$$WH(k) = \eta_{wh} \cdot H_{load}(k) \tag{23}$$

이와 같은 제약조건하에서 목적함수를 풀기 위해서는 두 가지의 가정이 필요한데, 첫째 대상기간의 열부하와 전기부하는 미리 주어지며, 열병합발전시스템을 비롯한 각종 보조설비들은 계속 운전 중이어야 한다. 이때 각 열병합발전시스템을 비롯한 다양한 설비들은 모두 상시 운전이므로 기동 및 정지에 따른 비용을 배제하였다.

### 3. 진화 알고리즘

진화 알고리즘은 자연세계의 진화과정을 컴퓨터상에서 시뮬레이션 함으로써 복잡한 실세계의 문제를 해결하고자 하는 계산기법이다. 진화 알고리즘은 염색체를 표현하는 방법과 연산자의 종류 및 특성에 따라 나눌 수 있다. 고정된 길이의 이진 스트링을 염색체로 사용하는 유전자 알고리즘(Genetic Algorithm, GA), 실수값을 염색체로 사용하는 진화전략(Evolution Strategies, ES), 그래프와 트리를 염색체 표현에 사용하는 진화 프로그램(Evolutionary Programming, EP)과 유전자 프로그래밍(Genetic Programming, GP)으로 나눌 수 있다. EP와 ES는 매우 유사한 알고리즘이지만 EP는 교차 연산자를 사용하지 않으며 확률적인 선택을 하는 반면, ES는 결정적인 선택을 한다.

#### 3.1 최적운전계획수립을 위한 진화연산

위에서 제시한 수리모델이 설비 특성상 2차식으로 된 비선형 특성을 갖기 때문에 비선형 최적화기법중 하나인 진화 알고리즘을 이용하여 열병합발전시스템의 최적운전계획을 수립하였다. 위에서 정식화한 목적함수와 제약조건을 일반화시키면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{Min } & f(x, u) \\ \text{s.t } & g(x, u) \leq 0 \end{aligned} \tag{24}$$

진화전략의 적용을 위해 처리한 데이터의 진화적 처리순서와 방법은 다음과 같다.

##### 3.1.1 초기화

각 개체는 전술한 최적운전계획수립을 위한 목적함수의 변수가 된다. 따라서 초기 개체군의 생성을 위하여 개체를 무작위로 생성하였다. 그러나 목적함수에는 제약조건이 있으므로 개체는 본문의 식 (13)~(23)에 만족되도록 하여 처음부터 개체군이 유효영역(feasible area)내에서 발생되도록 하였다.

##### 3.1.2 적합도 평가

각 개체를 이용하여 적합도를 평가하게 된다. 적합도 평

가시에 가장 적합도가 높은 개체는 다음 세대를 생성하기 위한 선택 연산시에 무조건 포함되도록 하여 우성개체를 보존시키도록 하였다.

$$Fitness(A) = \frac{1}{f(x, u)} \tag{25}$$

#### 3.1.3 선택

선택작용은 전술한 적합도 비례전략을 이용하였으며 다음과 같은 절차를 따른다.

- (1) 스케일링 작업을 거친 각 개체의 적합도의 크기를 구한다.
- (2) 적합도의 크기가 가장 큰 개체를 다음 자손으로 선택한다.
- (3) 구해진 적합도의 크기에 따라 누적 가능성을 구한다.
- (4) 0~1사이의 무작위수를 구하여 자손개체를 선택한다.
- (5) 원하는 수의 개체군이 생성될 때까지 4의 과정을 반복한다.

#### 3.1.4 교차

교차작용은 전술한 단순교차를 사용하였다. One cut point 법이라고도 불리는 단순교차는 선택된 개체군중 지정한 교차가능성에 따라 교차를 위해 개체들을 무작위하게 선택한 뒤 두 개체의 교차지점을 다시 무작위하게 선택하여 교차시켰다. 본 논문에서는 20%의 교차가능성을 사용하였다.

#### 3.1.5 돌연변이

돌연변이작용은 무작위하게 돌연변이 지점을 선택한 뒤 지정된 돌연변이 가능성에 따라 그 회수만큼 돌연변이를 시켰다. 또한 선정된 유전자에 대하여서는 non-uniform 돌연변이를 실행시켰으며 돌연변이 실행시 자손이 infeasible area로 나가지 못하도록 제약을 두었다.

### 4. 사례연구

본 논문에서는 실제 운전중인 A 제지공장용 열병합발전시스템의 운전실적을 기초로 표 1과 같은 제반 운전자료를 구성하였으며, 각종 효율은 소수점 둘째자리까지 반올림하여 나타내었다.

표 2는 춘·추계시의 자료를 기준으로 부하 입력자료 및 전기구매단가를 나타내었으며, 시간대는 2시간을 하나의 시간계산구간으로 하고 하루24시간을 시간 계산구간으로 나누어 12개의 시간대로 나타내었다. 여기서 전기구매단가의 형태는 산업용전력(을)로써 경부하, 중부하, 최대부하 시간대의 요금이 각각 다르게 적용되었다. 전기구매단가는 경부하, 중부하, 최대부하 시간대의 요금이 각각 다르게 적용되었다.

표 1 제반운전자료

Table 1 General input data

$f_{ca1}$	82.2	$f_{cb1}$	8,683	$f_{cc1}$	169.6	$f_{cd1}$	18,656
$f_{ce1}$	114,779	$f_{ca2}$	79.4	$f_{cb2}$	8,942	$f_{cc2}$	182.4
$f_{cd2}$	20,112	$f_{ce2}$	122,111	$f_{ca3}$	79.6	$f_{cb3}$	8,949
$f_{cc3}$	176.3	$f_{cd3}$	20,475	$f_{ce3}$	119,760	$f_{aa1}$	84.7
$f_{ab1}$	13,324	$f_{ac1}$	42,678	$f_{aa2}$	85.1	$f_{ab2}$	13,752
$f_{ac2}$	43,211	$f_{aa3}$	97.4	$f_{ab3}$	7,085	$f_{ac3}$	51,563
$f_{wa1}$	23.7	$f_{wb1}$	980	$f_{wc1}$	11,775	$f_{wd2}$	25.3
$f_{wb2}$	887	$f_{wc2}$	12,793	$f_{Sta1}$	7,993	$f_{Sb1}$	10,233
$f_{Sta2}$	7,876	$f_{Sb2}$	10,076	$f_{Sta3}$	8,011	$f_{Sb3}$	9,093
$\beta_{ca1}$	1.64	$\beta_{cb1}$	173.66	$\beta_{cc1}$	3.39	$\beta_{cd1}$	373.12
$\beta_{ce1}$	2,295.5	$\beta_{ca2}$	1.59	$\beta_{cb2}$	178.84	$\beta_{cc2}$	3.65
$\beta_{cd2}$	402.24	$\beta_{ce2}$	2,442.2	$\beta_{ca3}$	1.59	$\beta_{cb3}$	178.98
$\beta_{cc3}$	3.53	$\beta_{cd3}$	409.5	$\beta_{ce3}$	2,395.2	$\beta_{aa1}$	1.69
$\beta_{ab1}$	266.48	$\beta_{ac1}$	853.56	$\beta_{aa2}$	1.7	$\beta_{ab2}$	275.04
$\beta_{ac2}$	864.22	$\beta_{aa3}$	1.95	$\beta_{ab3}$	141.7	$\beta_{ac3}$	1,031.26
$\beta_{wa1}$	0.47	$\beta_{wb1}$	19.6	$\beta_{wc1}$	235.5	$\beta_{wd2}$	0.51
$\beta_{wb2}$	17.74	$\beta_{wc2}$	255.86	$\beta_{Sta1}$	159.86	$\beta_{Sb1}$	204.66
$\beta_{Sta2}$	157.52	$\beta_{Sb2}$	201.52	$\beta_{Sta3}$	160.22	$\beta_{Sb3}$	181.86
$H_{col}^{min}$	24.6	$H_{col}^{max}$	82	$H_{co2}^{min}$	45.5	$H_{co2}^{max}$	130
$H_{cc3}^{min}$	45.5	$H_{cc3}^{max}$	130	$E_{col}^{min}$	0	$E_{col}^{max}$	11.5
$E_{co2}^{min}$	0	$E_{co2}^{max}$	23.2	$E_{cc3}^{min}$	0	$E_{cc3}^{max}$	32.4
$H_{abl}^{min}$	0	$H_{abl}^{max}$	30	$H_{ab2}^{min}$	0	$H_{ab2}^{max}$	50
$H_{ab3}^{min}$	0	$H_{ab3}^{max}$	120	$H_{whb1}^{min}$	0	$H_{whb1}^{max}$	18
$H_{whb2}^{min}$	0	$H_{whb2}^{max}$	25	$H_{Sb1}^{min}$	0	$H_{Sb1}^{max}$	15
$H_{Sb2}^{min}$	0	$H_{Sb2}^{max}$	25	$H_{Sb3}^{min}$	0	$H_{Sb3}^{max}$	30
$\delta_{Hloi}$	0.98	$\delta_{Eloi}$	0.98	$\epsilon$	0.98	$\eta_{wh}$	0.15
$t$	2	$N$	12	$\alpha_i$	0.70		

표 2 전기 및 열부하 입력자료

Table 2 Electrical and thermal load input data

시간대 (k)	시간구간	열부하 [ton]	전기부하 [MW]	전기구매단가 [₩/MWh]
1	0시~2시	518	56	24,400
2	2시~4시	534	58	24,400
3	4시~6시	511	55	24,400
4	6시~8시	540	59	24,400
5	8시~10시	573	68	40,000
6	10시~12시	557	70	55,500
7	12시~14시	545	71	55,500
8	14시~16시	594	75	55,500
9	16시~18시	583	73	55,500
10	18시~20시	527	61	40,000
11	20시~22시	531	62	40,000
12	22시~24시	509	60	40,000

5. 결과 고찰 및 분석

본 논문에서 연구된 제지공장용 열병합발전시스템은 여러 가지 보조설비들과 함께 운전되고 있다. 이 가운데 특히 폐열보일러와 슬러지 소각로는 열병합발전시스템의 운영비용을 절감하기 위해 큰 역할을 하는 설비이다. 그러므로 설비 운용에 지장이 없는 한도 내에서는 가능한 한 최대의 설비 용량을 가진다면 운영비용 절감에 더욱 유리하게 작용될 것으로 사료된다. 이러한 열병합발전시스템의 운전계획은 수립된 목적함수와 제약조건하에서 전술한 기본 입력자료를 바탕으로 진화 알고리즘을 적용하여 시뮬레이션하였다.

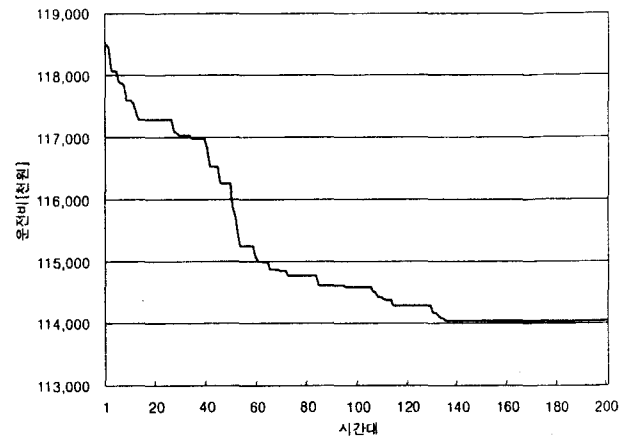


그림 2 수렴과정

Fig. 2 Convergence process

진화 알고리즘으로 해를 구하였을 때 세대를 거치면서 목적함수인 제지공장용 열병합발전시스템의 총 운전비용의 수렴상황을 그림 2에 나타내었다. 대략 150여세대가 지나기 이전에 최적값에 수렴하는 것을 알 수 있었다.

표 3은 시뮬레이션 과정 중 마지막 세대에서 얻어진 시간대별 운전비용을 나타낸 것이다. 결과를 세부적으로 살펴보면 다음과 같다.

표 3 시간대별 총 운전비용

Table 3 Total operational cost per specifying term

시간대	운전비용[천원]	시간대	운전비용[천원]
1	8,628	7	9,380
2	8,833	8	11,456
3	8,361	9	10,703
4	9,315	10	9,045
5	10,033	11	9,134
6	10,189	12	8,962
총 운전 비용[₩]	114,037		

한편, 그림 3과 그림 4에서 알 수 있듯이 열병합발전설비는 전체 시간대에 걸쳐 열부하중 폐열보일러와 슬러지 소각로가 담당하는 부하량의 나머지 부하량을 충족시키기 위해

최대 출력을 내려고 하고 있다.

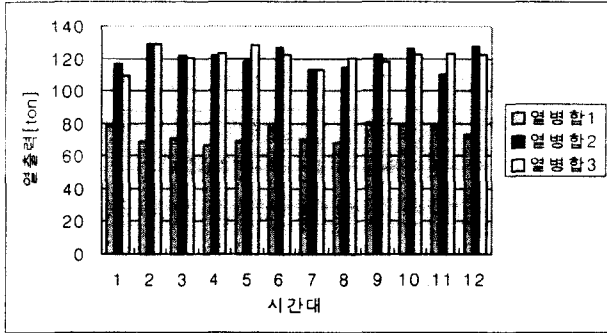


그림 3 열병합발전시스템의 열출력계획  
Fig. 3 Thermal output scheduling of each cogeneration system

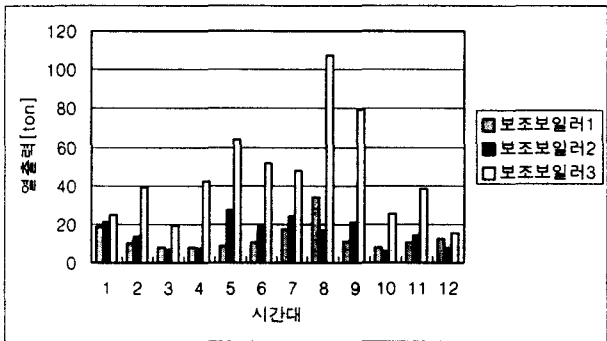


그림 4 각 보조보일러의 열출력 계획  
Fig. 4 Thermal output scheduling of each auxiliary boiler

그리고 보조보일러는 운전비용이 많이 들기 때문에 전체 열부하중 열병합발전시스템, 폐열보일러, 슬러지 소각로에서 공급되고 난 나머지 열부하 만큼만 가동하는 것을 알 수 있다. 따라서 제지공장용 열병합발전시스템의 보조보일러는 첨두부하를 위한 설비로 사용되어야 합리적인 운용이 되어 전체적인 운전효율을 높일 수 있음을 알 수 있다.

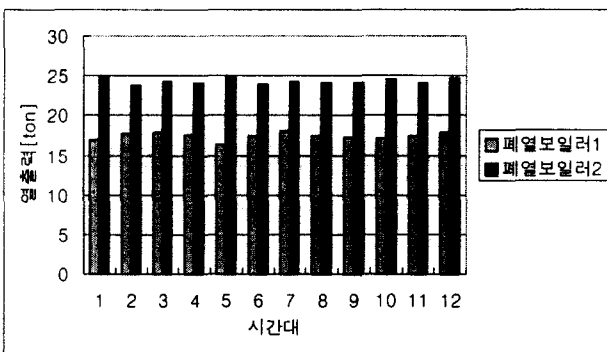


그림 5 각 폐열보일러의 열출력 계획  
Fig. 5 Thermal output scheduling of each waste heat boiler

그림 5와 그림 6에 나타난 바와 같이 폐열보일러와 슬러지

소각로는 항상 최대 출력에 가깝게 운전하는 것을 알 수 있다. 그 이유는 폐열보일러에 사용되는 단위 출력당 연료비가 다른 설비에 비하여 월등히 적게 들기 때문이다. 또한 슬러지 소각로에 사용되는 슬러지는 제지공정에서 발생하는 찌꺼기를 원료로 사용하기 때문에 연료비가 거의 들지 않고, 단지 슬러지를 고형화 시키고 연료화 시키기 위한 약간의 비용만이 들기 때문에 출력당 연료비가 다른 설비에서 사용되는 연료비에 비해 매우 적게 들기 때문이다.

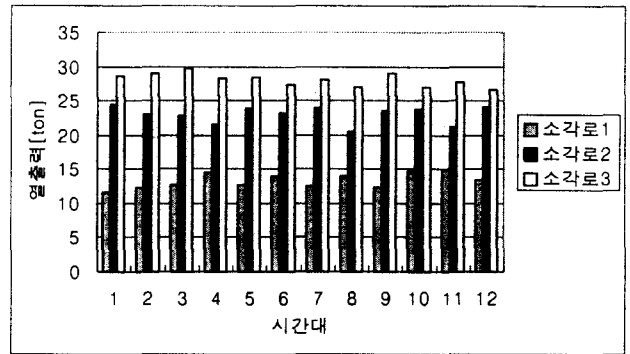


그림 6 각 슬러지 소각로의 열출력 계획  
Fig. 6 Thermal output scheduling of each sludge incinerator

따라서 슬러지 소각로는 연료로 사용되는 슬러지 생산량에 구애를 받지 않는 한 최대출력으로 상시 운전하는 것이 운용비용 절감에 유리하다. 본 논문에서 다른 제지공장은 슬러지 생산량이 슬러지 수요에 차질이 없을 정도의 가공능력을 갖추고 있고 상시 운전시에 슬러지 부족으로 인한 슬러지 소각로의 감축 운전 같은 현상은 없다고 전술한 바 있다. 따라서 연료비가 다른 설비에 비하여 적게 들고 환경처리비용 또한 저렴한 슬러지 소각로는 항상 최대출력을 내도록 하는 운전계획이 수립 되어야함을 알 수 있다.

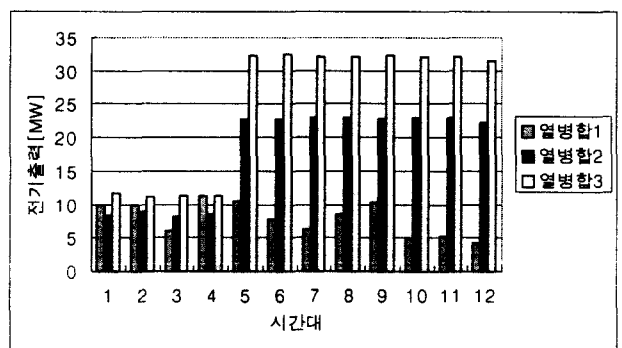


그림 7 열병합발전시스템의 전기출력계획  
Fig. 7 Electricity output scheduling of each cogeneration system

그림 7과 8은 열병합발전설비의 전기출력과 전력회사로부터의 전기구매계획을 나타내고 있다. 전기 구매단가가싼 1번~4번 구간의 경우 열병합발전설비는 최소한의 전기출력을 낼 정도로만 운전하고 나머지 전기는 구매하는 것이 더

경제적이다.

반면, 전기단가가 비싼 최대부하와 중부하 시간대인 5번~12번 구간의 경우 가능한 많은 전기를 발생시켜 전기 구매를 최소화 하는것이 더 경제적이란 것을 알 수 있다.

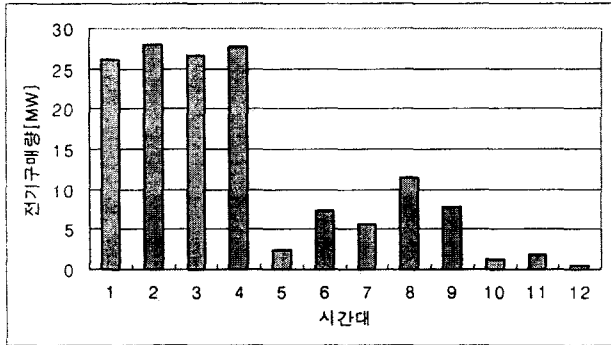


그림 8 전기구매계획

Fig. 8 Electricity buying scheduling

### 6. 결론

본 논문에서는 제지공장용이라는 특수한 환경을 가진 열병합발전시스템에서의 최적운전계획 수립을 위한 수리적 모델을 수립하였으며 시간대별로 주 시스템과 각종 보조설비 및 전기에너지의 구매에 이르기까지 운전비를 최소화시키는 입장에서의 운전계획을 수립하였다. 또한 환경요소를 고려하기 위해 아황산가스의 처리비용을 목적함수에 첨부하였다.

최적운전계획은 진화 알고리즘을 이용하였으며, 각종 설비의 특징 및 기능에 비추어 수립된 운전계획은 합리적인 결과라고 사료된다.

다른 산업체용 열병합발전시스템도 필요에 맞도록 많은 보조설비들이 연계되어 있다. 따라서 본 논문에서 수립한 제지공장용 열병합발전시스템의 운전계획수립기법은 설비의 위치변화와 에너지의 흐름경로를 수정하고, 알고리즘을 재구성하는 방법을 통하여 타 제지공장이나 유사한 산업체용 열병합발전시스템에 적용될 수 있을 것으로 사료된다.

### 수식기호

- $BUY(k)$ :  $k$ 번째 시간대의 전기 구매단가 [₩/MW]
- $E_{bu}(k)$ :  $k$ 번째 시간대에서 전력회사로부터의 구매전력 [MW]
- $H_{coi}(k)$ :  $k$ 번째 시간대에서  $i$ 번째 열병합발전시스템의 열출력 [ton]
- $E_{coi}(k)$ :  $k$ 번째 시간대에서  $i$ 번째 열병합발전시스템의 전기출력 [MW]
- $H_{abi}(k)$ :  $k$ 번째 시간대에서  $i$ 번째 보조보일러의 열출력 [ton]
- $H_{whi}(k)$ :  $k$ 번째 시간대에서  $i$ 번째 폐열보일러의 열출력 [ton]
- $H_{sti}(k)$ :  $k$ 번째 시간대에서  $i$ 번째 슬러지 소각로의 열출력 [ton]
- $H_{load}(k)$ :  $k$ 번째 시간대에서 열부하로 보내지는 열 공급량 [ton]
- $E_{load}(k)$ :  $k$ 번째 시간대에서 전기부하로 보내지는 전기 공급량[MW]

- $H_{coi}^{max}, H_{coi}^{min}$ :  $i$ 번째 열병합발전시스템의 열출력 상하한 값[ton]
- $E_{coi}^{max}, E_{coi}^{min}$ :  $i$ 번째 열병합발전시스템의 전기출력 상하한 값 [MW]
- $H_{abi}^{max}, H_{abi}^{min}$ :  $i$ 번째 보조보일러의 열출력 상하한 값 [ton]
- $H_{whi}^{max}, H_{whi}^{min}$ :  $i$ 번째 폐열보일러의 열출력 상하한 값 [ton]
- $H_{sti}^{max}, H_{sti}^{min}$ :  $i$ 번째 슬러지 소각로의 열출력 상하한 값[ton]
- $C_{BUY}(k)$ :  $k$ 번째 시간대에서 구매전력비용[₩/MW]
- $F_{coi}(k)$ :  $k$ 번째 시간대에서  $i$ 번째 열병합발전시스템의 운전비용[₩]
- $F_{abi}(k)$ :  $k$ 번째 시간대에서  $i$ 번째 보조보일러의 운전비용[₩]
- $F_{whi}(k)$ :  $k$ 번째 시간대에서  $i$ 번째 폐열보일러의 운전비용[₩]
- $F_{sti}(k)$ :  $k$ 번째 시간대에서  $i$ 번째 슬러지 소각로의 운전비용[₩]
- $E_{coi}(k)$ :  $k$ 번째 시간대에서  $i$ 번째 열병합발전시스템의 환경처리 비용 [₩]
- $E_{abi}(k)$ :  $k$ 번째 시간대에서  $i$ 번째 보조보일러의 환경처리비용[₩]
- $E_{whi}(k)$ :  $k$ 번째 시간대에서  $i$ 번째 폐열보일러의 환경 처리비용[₩]
- $E_{sti}(k)$ :  $k$ 번째 시간대에서  $i$ 번째 슬러지소각로의 환경처리비용[₩]
- $F_{eco}$ : 열병합발전시스템의 일간 총 운전비용[₩]
- $F_{emv}$ : 열병합발전시스템의 일간 총 환경 처리비용[₩]
- $F_{tot}$ : 전체 열병합발전시스템의 일간 총 운용비용[₩]
- $H_L(k)$ :  $k$ 번째 시간대에서 열부하량[ton]
- $E_L(k)$ :  $k$ 번째 시간대에서 전기부하량[MW]
- $WH(k)$ :  $k$ 번째 시간대에서 열병합발전시스템의 폐열
- $f_{cai}, f_{cbi}, f_{cci}, f_{cdi}, f_{cei}$ :  $i$ 번째 열병합발전시스템의 연료비 계수
- $f_{uai}, f_{ubi}, f_{uci}$ :  $i$ 번째 보조보일러의 연료비 계수
- $f_{wai}, f_{wbi}, f_{wci}$ :  $i$ 번째 폐열보일러의 연료비 계수
- $f_{stai}, f_{stbi}, f_{stci}$ :  $i$ 번째 슬러지 소각로의 연료비 계수
- $a_i$ :  $i$ 번째 열병합발전시스템의 폐열당 열출력 생산효율
- $\beta_{cai}, \beta_{cbi}, \beta_{cci}, \beta_{cdi}, \beta_{cei}$ :  $i$ 번째 열병합발전시스템의 환경처리비용 계수
- $\beta_{uai}, \beta_{ubi}, \beta_{uci}$ :  $i$ 번째 보조보일러의 환경처리비용 계수
- $\beta_{wai}, \beta_{wbi}, \beta_{wci}$ :  $i$ 번째 폐열보일러의 환경처리비용 계수
- $\beta_{stai}, \beta_{stbi}, \beta_{stci}$ :  $i$ 번째 슬러지 소각로의 환경처리비용 계수
- $\epsilon$ : 전력회사로부터 전기부하로의 송전효율
- $\delta_{Hload}$ : 열 전송효율
- $\delta_{Eload}$ : 송전효율
- $\eta_{wh}$ : 폐열 상수
- $N$ : 총 시간대 수
- $k$ : 각 시간대
- $t$ : 각 시간대의 시간 계산구간[hour]

### 감사의 글

본 논문은 에너지관리공단의 '99 에너지절약 학술진흥 사업 연구비에 의하여 이루어진 연구로서 관계부처에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] P. S. Pak and Suzuki : "Derivation of an Index for Evaluating Economics of Cogeneration Sytems and Its Applications", International Journal of Energy Research, Vol. 13, pp. 149-156, 1989.
- [2] B. Seyedan, et al. : "Optimization of Waste Heat Recovery Boiler of a Combined Cycle Power Plant", Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol. 118, pp. 561-564, 1996.
- [3] Herman M. Pretorius, G. J. Delpont : "Scheduling of Cogeneration facilities operating under the Real-Time Pricing agreement", the IEEE International Symposium on Industrial Electronics Vol. 2 , pp. 390-395, 1998.
- [4] 류승현, 이종범, 김준현, "가변 열전비율 가진 열병합발전시스템의 효과적인 단기운전계획 수립", 대한전기학회 논문지, 제 43권 9호, pp.1401-1411, 1994. 9.
- [5] Dimitri A. Manolas, et al. : "Operation Optimization of an Industrial Cogeneration System by a Genetic Algorithm", Energy Conversation Management, Vol. 38, No. 15-17. pp. 1625-1636, 1997.
- [6] K. Ito, et al. : "Optimal Operation of a Cogeneration Plant in Combination with Electric Heat Pumps", ASME, IGTI Vol. 6, pp. 371-378, 1991.
- [7] Frans J. Rooijers, Rovert A.M. van Amerongen : "Static Economic Dispatch for Co-Generation Hi Systems", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 9, No. 3, pp. 1392-1398, 1993.
- [8] Mitsuo Gen, Runwei Cheng : "Genetic Algorithms and Engineering Design", A Wiley-Interscience Publication, 1997.

저 자 소 개



최 광 범 (崔 光 範)

1973년 10월 14일생. 1998년 원광대 공대 전기공학과 졸업. 2000년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 태광 이엔시 재직중

Tel : 063-850-6735

E-mail : anliang@shinbiro.com



이 종 범 (李 鍾 範)

1955년 7월 12일생. 1981년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1986년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1987~1990년 한국전기연구소 지중송전연구실 실장. 1997~

1998년 미국 Texas A&M University 객원교수, 현재 원광대 공대 전기전자 및 정보공학부 교수

Tel : 0653-850-6735

E-mail : ipower@wonnmns.wonkwang.ac.kr



정 지 훈 (鄭 知 勳)

1972년 8월 9일생. 1999년 원광대 공대 전기공학과 졸업. 1999년~현재 동 대학원 석사과정

Tel : 063-850-6735

E-mail : jeehun@hanmail.net