

# 복잡한 전력요금 구조하에서의 열병합시스템 운전전략

(본 자료는 오사카도립대학 교수가 집필한 자료를 구입하여 번역개제하였음)

## 개 요

열병합 시스템에 있어 운전계획 문제점은 시간에 따른 유틸리티 소비에 의한 기본요금과 사용요금뿐만 아니라 정해진 기간동안 전체 유틸리티 소비에 의한 기본요금을 부과하는 복합적인 유틸리티 요금 구조하에 논의되었다. 전체 유틸리티 소비에 대한 구성설비의 운전 전략과 수요계약은 에너지수요 요구에 따라 정해진 기간동안 운전비용을 최소화하기 위하여 조사 및 분석 하였다. 이러한 문제점은 대규모 혼합정수선형프로그래밍(MILP)으로서 공식화되어지며 BLOCK ANGULAR STRUCTURE와 같은 MILP의 문제점들에 대해 교정되어진 분해법(DECOMPOSITION METHOD)에 의해 효과적으로 해결되어진다. 호텔이나 오피스빌딩에 설치된 가스엔진 구동 열병합시스템에서의 수열(數列)연구를 통하여 운전전략 요금구조의 효과는 분명해진다.

## 1. 머리말

최근 일본에서는 상업 및 공공건물에 열병합발전 시스템(이하 “열병합시스템”이라함)이 점차적으로 증가되어 왔다. 이는 전력생산후에 생산된 배기열의 효율적이용 때문이다. 열병합시스템은 과거의 에너지공급시스템과 비교해서 운전비용과 에너지소비를 줄일 수 있는 잠재력을 가지고 있다. 그렇지만 우리가 부적절한 운전전략을 채택 한다면 앞에서 언급한 잠재력을 이용할 수 없을 것이다. 최악의 경우, 부적절한 전략은 열병합시스템을 설치한 목적과 반대로 운전비용과 에너지 소비를 증가하는 결과를 가져올수도 있다. 그러므로 시간과 계절에 따라 변동하는 전력과 열에너지 수요를 조화시키는 적절한 운전전략을 도입하는 것이 열병합시스템을 계획하는데 있어서 중요한 논점중의 하나이다.

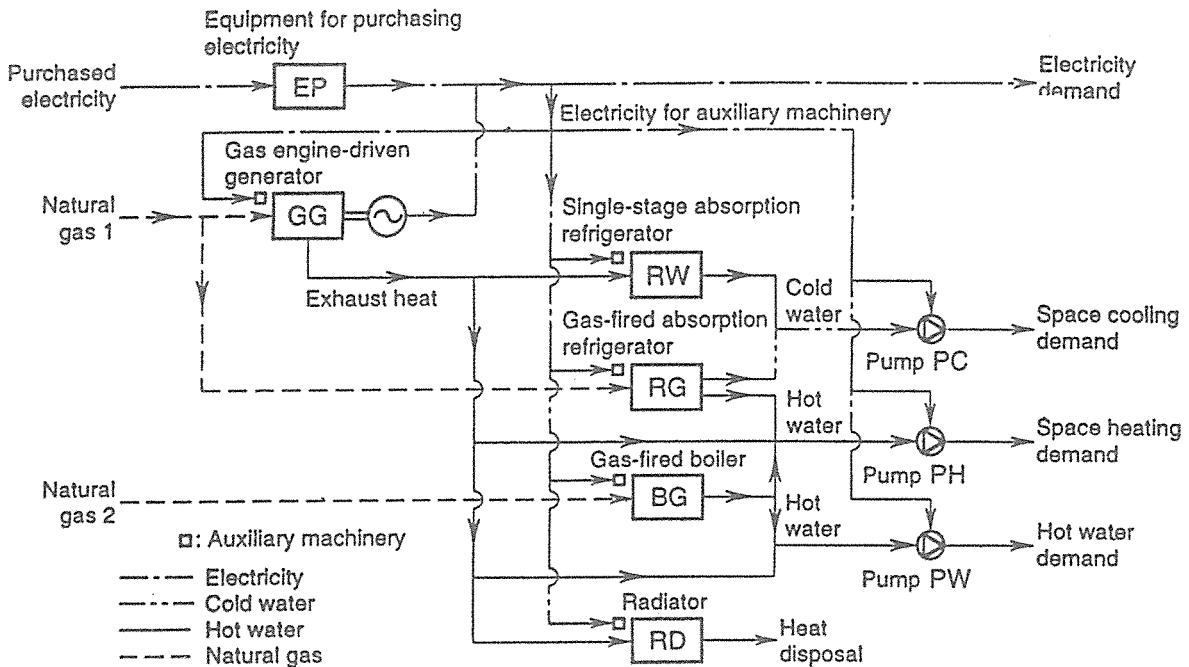
경제적인 관점에서 합리적으로 열병합시스템의 운전전략을 평가, 분석하기 위한 최적의 운전계획방

법은 시간에 따라 계약된 수요와 소비, 각각의 이용에 비례하여 수요와 에너지요금을 부과하는 방법이 표준유틸리티(전력, 도시가스) 요금 구조하에서 제안되어져 왔다. 만약 우리가 설비의 용량과 시간에 따른 유틸리티 계약수요들을 결정하고 설비의 동적 특성을 무시한다면 시간에 따른 운전비용을 최소화하기 위하여 매 시간마다 독립적으로 운전전략을 평가할 수 있기 때문에 운전계획의 문제점은 다소 간단하고 소규모(Small-scale)이다. 그렇지만 에너지공급사는 다양한 요금구조를 준비해야 하고 이런 요금구조의 일부는 매우 복잡하다. 예를 들면, 지정된 기간동안에 총에너지소비에 대해 계약수요가 정하여진다. 그러한 경우 포괄적으로 이 기간을 통해 운전계획의 문제점을 고려해야 한다. 결과적으로, 앞서 제시되어진 최상의 운전계획 방법은 이러한 문제점에 대해 정확하게 적용할 수 없다.

이 논문에서의 목적은 복합적인 유틸리티 요금구조하에 열병합시스템의 운전 전략을 도입하기 위한 최상의 운전계획 방법을 제시하는 것이며 운전전략에 있어 요금구조의 영향을 조사하는 것이다. 먼저 보기와 같이 가스엔진열병합시스템을 다룰 것이며 혼합정수선형프로그래밍(Mixed-integer Linear Programming)으로서 최선의 운전 계획상 문제점을 공식화 할 것이다. 두번째, 이러한 커다란 최적문제를 효과적으로 해결하기 위하여 채택한 교정된 분해법을 설명할 것이다. 마지막으로 호텔이나 사무실 등에 설치된 가스엔진열병합시스템에 대해 통계학을 이용하여 운전전략상 유틸리티 요금구조의 영향을 표준 유틸리티 요금구조와 복합적인 유틸리티 요금구조 사이의 결과를 비교하는 방법으로 조사되어 질 것이다.

## 2. 시스템 구성

<그림 1>은 이 논문에서 조사되어진 가스엔진열병합시스템의 구성을 개략적으로 보여준다. 비록



〈그림1〉 가스엔진열병합시스템 구성도

하나의 유닛은 설비별로 도시되어 있지만 다양한 유닛 들이 고려되어진다. “전력”은 운전중인 가스 엔진발전기와 외부의 전력회사로 부터 구매되어 수용가에게 공급되어지고 또한 이 시스템의 다른 보조기계들과 펌프들을 구동시키는데 사용된다. 엔진 냉각수와 가스엔진의 배기가스로부터 온수로 회수된 배기열은 냉방과 난방, 그리고 온수와 같이 열에너지 수요에 사용된다. 남은 배기열은 라디에이터를 통해 버려진다. 냉방을 위한 냉수는 배열을 이용한 Single-stage 흡수식냉동기와 가스직화 흡수식냉온수기에 의해 공급되어 진다. 난방과 다른목적에 사용되는 온수는 배기열과 가스직화 흡수식냉온수기, 그리고 가스보일러에 의해 공급되어 진다. 냉방용 특별할인요금을 적용받는 “도시가스-1”은 가스엔진과 흡수식 냉동기에 사용되며 일반요금을 적용받는 “도시가스-2”는 보일러에 사용된다.

### 3. 최적운전계획 문제의 서술

에너지수요 요구에 따른 연간 운전비용을 최소화 하기 위해서 구성 설비들의 운전전략을 고려해 보자. 이러한 최적의 운전 계획상 문제점을 공식화하기 위하여 우리는 1년을 12개월로, i번째 달의  $J_i$ 를 대표일로, 그리고 각 대표날은  $\Delta T=24/K$ 의 동일한

기간인 K라는 샘플링주기(Sampling time interval)로 분리한다. 아래 공식에서, 운전전략과 관련된 량(量) X는 i번째 달, j번째 대표일의 k번째 샘플링주기에서  $X(i, j, k)$ 에 의해 선정되어진다.

### 4. 설비의 성능특성

각 설비들의 성능특성을 위해 아래 방정식들은 입력에너지량 x와 출력에너지량 y사이의 관계를 표현하는데 기본적으로 사용된다.

$$\begin{aligned}
 y(i, j, k) &= px(i, j, k) + q\delta(i, j, k) \\
 \underline{x}\delta(i, j, k) &\leq x(i, j, k) \leq \bar{x}\delta(i, j, k) \\
 \delta(i, j, k) &\in \{0, 1\} \\
 (k &= 1, \dots, K; j = 1, \dots, J; i = 1, \dots, 12) \dots \dots \dots (1)
 \end{aligned}$$

여기서  $\delta$ 는 운전의 ON/OFF 상태를 표현하는 두개의 변수이고,  $\bar{x}$ 와  $\underline{x}$ 는 각각 x에 대한 상한값과 하한값이며 P와 Q는 성능 특성 값들이다. 예를 들면, 아래 방정식들은 가스엔진발전기의 성능 특성으로서 채택되어 진다.

$$\begin{aligned}
 E_{GGn}(i, j, k) &= p_{GGn}F_{GGn}(i, j, k) + q^c_{GGn}\delta_{GGn}(i, j, k) \\
 Q^c_{GGn}(i, j, k) &= p^c_{GGn}F_{GGn}(i, j, k) + q^c_{GGn}\delta_{GGn}(i, j, k) \\
 E^h_{GGn}(i, j, k) &= p^h_{GGn}F_{GGn}(i, j, k) \pm q^h_{GGn}\delta_{GGn}(i, j, k) \\
 F_{GGn}\delta_{GGn}(i, j, k) &\leq F_{GGn}(i, j, k) \leq F_{GGn}\delta_{GGn}(i, j, k) \\
 \delta_{GGn}(i, j, k) &\in \{0, 1\} \\
 (n=1, \dots, N_{GG}; k=1, \dots, K; j=1, \dots, J; i=1, \dots, 12) \dots \dots \dots (2)
 \end{aligned}$$

범례 E : 전력[kWh/h], F : 도시가스 소비[m<sup>3</sup>/h],  
 f : 월간 도시가스 소비[m<sup>3</sup>/mo], I : 월 지수 세트,  
 i : 월 지수, KD : 주간 샘플링주기 지수  
 j : 대표일 지표, K : 일일 샘플링주기 수, Ji : i번째 달의 대표일의 수  
 k : 샘플링주기 지수, N : 설치된 설비의 수,  
 p,q : 성능특성값,  
 Q : 열흐름비율[kWh/h], Tij : i번째 월의 j번째 대표일의 연간일수  
 Δt : 샘플링시간간격[h], x : 입력에너지 합계, y : 출력에너지 합계  
 z : 목표함수(운전비용)[₩/년], δ : on/off 운전상태 변수, (x) : 하한치  
 φ : 에너지요금 단위비용[₩/kWh, ₩/㎡], (x) : 계약수요 또는 상한치,  
 ϕ : 월간 도시가스소비의 기본요금 단위비용 [₩/(m<sup>3</sup>/mo)/mo]

아래 기호 buy : 구매전력, D : 주간시간, gas 1 : 도시가스-1, gas 2 : 도시가스-2, M : 월간 합계, N : 야간시간, n : 설비 각각의 지수, S : 하절기, W : 동절기,

설비 심벌 BG : 가스보일러, EP : 수전(受電)설비, RD : 라디에이터, PC, PH, PW : 펌프, RW : 흡수식 냉동기, RG : 가스직화 흡수식 냉온수기, GG : 가스엔진발전기,

위첨자 a : 보조기기, d : 수요, e : 배기열

FGGn는 도시가스의 소비를 나타내며, E<sub>GGn</sub>은 생산된 전력이고, Q<sub>GGn</sub>은 엔진냉각수와 배기가스로부터 얻은 배기열의 유량이고 E<sub>GGn</sub>은 보조기기들에 의해 소비된 전력이다. 여기에서 가스엔진발전기의 N<sub>CG</sub> 유니트들은 설치된 것으로 가정하고 n은 각 유니트에 대한 지표(Index)이다.

### 5. 에너지밸런스와 공급 - 수요 관계

〈그림 1〉에서 보여준 시스템 개략도에 의하면, 에너지평형과 공급-수요관계 들은 전기, 도시가스, 냉각수 그리고 온수 각각의 에너지흐름에 대해 공식화 되어진다. 예를들면 전기에 대한 에너지밸런스와

공급-수요관계들은 다음과 같이 표현된다.

$$\sum_{n=1}^{N_{CG}} E_{GGn}(i, j, k) + E_{buy}(i, j, k) = E^d(i, j, k) + E^a(i, j, k)$$

$$E^a(i, j, k) = \sum_{n=1}^{N_{CG}} E_{GGn}^a(i, j, k) + \sum_{n=1}^{N_{RW}} E_{RWn}^a(i, j, k) + \sum_{n=1}^{N_{PC}} E_{PCn}^a(i, j, k) + \sum_{n=1}^{N_{RG}} E_{RGn}^a(i, j, k) + \sum_{n=1}^{N_{RD}} E_{RDn}^a(i, j, k) + \sum_{n=1}^{N_{FC}} E_{FCn}^a(i, j, k) + \sum_{n=1}^{N_{PH}} E_{PHn}^a(i, j, k) + \sum_{n=1}^{N_{PW}} E_{PWn}^a(i, j, k)$$

(k=1, ..., K; j=1, ..., Ji; i=1, ..., 12).....(3)

여기서 E<sub>buy</sub>는 구입된 전력이며 E<sup>d</sup>는 필요로 하는 전력이고, E<sup>a</sup>는 보조 기기들에 의해 소모되는 전체 전력이며 E<sub>RWn</sub><sup>a</sup>, E<sub>RGn</sub><sup>a</sup>과 E<sub>BGn</sub><sup>a</sup>들은 각각 흡수식 냉동기인 N<sub>RW</sub>와 가스직화 흡수식냉온수기인 N<sub>RG</sub> 그리고 가스보일러인 N<sub>BG</sub>의 n번째에 대한 보조기기들에 의해 소비된 전력이고, E<sub>RDn</sub><sup>a</sup>, E<sub>PCn</sub><sup>a</sup>, E<sub>PHn</sub><sup>a</sup>과 E<sub>PWn</sub><sup>a</sup>들은 각각 n번째 라디에이터인 N<sub>RD</sub>, 냉방펌프인 N<sub>PC</sub>, 난방펌프인 N<sub>PH</sub> 그리고 온수펌프인 N<sub>PW</sub>의해 소모된 전력들이다.

### 6. 유틸리티계약의 수요와 소비관계

첫 번째 형태의 이용계약수요와 소비의 관계들에 따라 그들의 계약수요와 범위 안에서 시간에 따라 소비하도록 하는 조건들은 고려해야 한다. 이러한 조건들은 각각 “도시가스-1”과 “전력”에 있어서 다음에 의해 표현된다.

$$E_{buy}(i, j, k) \leq E_{buy}$$

(k=1, ..., K; j=1, ..., Ji; i=1, ..., 12).....(4)

$$E_{gas1}(i, j, k) \leq F_{gas1}$$

(k=1, ..., K; j=1, ..., Ji; i=1, ..., 12).....(5)

여기에서 F<sub>gas1</sub>은 “도시가스-1”의 시간에 따른 소비이고, E<sub>buy</sub>와 F<sub>gas1</sub>은 각각 “전력”과 “도시가스-1”의 시간에 따른 소비에 대한 계약된 수요들이다. 이것들은 유틸리티 회사들에 있어 일반적인 계약들에 의한 기본적인 규정이다. 우리는 “도시가스-2”의 시간에 따른 소비 즉 계약된 수요나 수요 요금을 적용하지 않는 일반 요금에 대해 어떠한 속박도 없다는 것을 주의해야 할 것이다. 두번째 형태의 이용계약수요와 소비 관계들에 따라 우리는 12월부터 3월까지 겨울 동안의 “도시가스-1”의 한달간의 전체 소비들과 낮동안의 소비를 하게 하는 조건들을 고려해야 한다. 이러한 조건들은 아래 두 개의 방정식

에 의해 표현된다.

$$f_{M1} \leq \bar{f}_M(i \in I_w) \dots \dots \dots (6)$$

$$f_{D1} \leq \bar{f}_D(i \in I_w) \dots \dots \dots (7)$$

$I_w$ 은 겨울 동안의 각 달에 대한 지수 값이다.  $I_w = \{i \mid 1 \leq i \leq 3 \text{ or } i=12\}$ ,  $f_{M1}$ 와  $f_{D1}$ 는 각각 “도시가스-1”의 매달 전체 소비와 낮동안의 소비이며  $f_{M1}$ 과  $f_{D1}$ 는 각각의 계약 수요들이다.  $f_{M1}$ 과  $f_{D1}$ 의 값들은 각각 다음에 의해 계산되어진다.

$$f_{M1} = \sum_{j=1}^J T_{ij} \sum_{k \in K_0} F_{gas1}(i, j, k) \Delta t (i \in I_w) \dots \dots \dots (8)$$

$$f_{D1} = \sum_{j=1}^J T_{ij} \sum_{k \in K_0} F_{gas1}(i, j, k) \Delta t (i \in I_w) \dots \dots \dots (9)$$

여기서  $T_{ij}$ 는  $i$ 번째 달  $j$ 번째 대표일에 대한 날들의 수이며 KD는 7:00~22:00까지의 주간시간과 일치하는 표본시간에 대한 지수 값이다. 방정식 (6)과 (7)은 이 연구에서 채택한 “도시가스-1”에 대한 복합요금구조로부터 발생하는 특별한 규정이다.

### 7. 목표 기능(OBJECTIVE FUNCTION)

“전력”과 “도시가스”의 소비에 의한 연간 운전비용은 최소화된 목표기능으로 채택되어진다. 여기서 우리는 연간 운전비용을 아래 네 가지 항목들로 분리하여 평가한다.

- (a) 1년동안 시간에 따른 계약 수요들에 대한 전력요금
- (b) 여름기간동안 시간에 따른 소비에 대한 에너지요금
- (c) 겨울기간동안 한달간의 낮시간과 밤시간의 계약 수요들에 대한 수요요금
- (d) 겨울기간동안 시간에 따른 소비들에 대한 에너지요금

항목(a)를 최적 계산의 프로세스에서 상수로서 고려해야 한다. 이것은 우리가 최적 계산에 의한 운전 전략을 도입하기 때문이며 “전력”과 “도시가스-1”,  $E_{buy}$ 와  $F_{gas1}$ 의 시간에 따른 소비들에 대한 계약 수요들은 설비의 용량에 따라 점차적으로 결정하여야 하기 때문이다. 항목(b)는 식(10)에 의해 정의된다.

$$Z_s = \sum_{i \in I_s} \sum_{j=1}^J T_{ij} \sum_{k=1}^K \left\{ \varphi_{buy} E_{buy}(i, j, k) + \varphi_{gas1} E_{gas1}(i, j, k) + \varphi_{gas2} E_{gas2}(i, j, k) \right\} \Delta t \dots \dots \dots (10)$$

여기서  $F_{gas2}$ 는 “도시가스-2”의 시간에 따른 소비이며  $\varphi_{buy}$ ,  $\varphi_{gas1}$ 과  $\varphi_{gas2}$ 는 각각 “전기”, “도시가스-1”그

리고 “도시가스-2”에 대한 에너지 요금의 비율이다. 또한  $I_s$ 는 여름기간동안  $I_s = \{i \mid 4 \leq i \leq 11\}$ 과 일치하는 달에 대한 지수 값이다. 여름기간 동안의 최적인전계획 문제점은 다음과 같이 설명되어진다. 방정식(2)에서 (5)까지 규정을 조건으로 방정식 (10)의  $Z_s$ 를 줄이는 각 샘플링주기에 대한 구성설비들의 운전전략 정하라. 여기서 문제점은 방정식 (6)과 (7)의 규정을 제외시키기 때문에 각각의 샘플링주기에 대해 많은 독립적인 문제점들로 나누어 질 수 있다. 항목 (c)와 (d)의 합은 (11)식에 의해 정의되어진다.

$$Z_w = \sum_{i \in I_w} \sum_{j=1}^J T_{ij} \sum_{k=1}^K \left\{ \varphi_{buy} E_{buy}(i, j, k) + \varphi_{gas1} F_{gas1}(i, j, k) + \varphi_{gas2} F_{gas2}(i, j, k) \Delta t + 12 \Psi_D \bar{f}_D + 12 \Psi_N (\bar{f}_M - \bar{f}_D) \right\} \dots \dots \dots (11)$$

여기서  $\Psi_D$ 와  $\Psi_N$ 은 각각 도시가스-1의 한달동안 낮과 밤의 소비에 대한 수요요금의 비율이다. 겨울 동안의 최적인전계획 문제점은 다음과 같이 설명되어진다. 방정식 (2)에서 (7)까지의 모든 규정을 조건으로 방정식 (11)의  $Z_w$ 를 최소화하는 각 샘플링주기와 도시가스-1,  $\bar{f}_M$ 과  $\bar{f}_D$ 의 전체와 낮동안의 매월 소비들에 대한 계약 수요들에 대해 구성 설비들의 운전 전략을 정하여야 한다. 이 문제점은 방정식 (6)과 (7)의 규정을 포함하기 때문에 이는 전체의 문제점으로서 풀어질 수 있다.

### 8. 해법(解法)

겨울동안 최적의 운전계획 문제점은 대규모 혼합정수선형프로그래밍으로 귀결된다. 예를 들면, 만약 우리가 운전의 ON/OFF상태를 표현하기 위해 설비들에 대해 5개의 변수를 할당한다면 각 월에 대해 하나의 대표일을 고려한다.  $J_i = 1 (i \in I_w)$ , 그리고 각각 대표일을 24개의 샘플링주기, 즉  $K=24$ 로 분할한다. 우리는 문제점에 대해  $480(5 \times 4 \times 1 \times 24)$ 의 변수를 가진다. 그러므로 혼합정수선형프로그래밍문제 점들에 대한 BRANCH AND BOUND ALGORITHM의 직접적인 응용에 의한 실제 산술 시간에 있어 이 문제점을 해결하기는 어렵다. 그것의 구조를 고려하여 이 문제를 해결할 수 있는 효과적인 방법 중의 하나를 아래에 나타내었다.

분해법(DECOMPOSITION METHOD)은 문제점

들을 계층적으로 관련된 보조문제들과 주 문제로 분리하여 대규모 문제들을 해결하기 위해 제안되어져 왔다. 분해법은 숫자감각에 있어 BLOCK ANGULAR 구조를 가진 선형프로그래밍 문제점들을 해결 하기 위해 발전되어 왔다. BLOCK ANGULAR 구조는 COUPLING CONSTRAINTS의 한 셋트와 BLOCK CONSTRAINTS의 다양한 셋트들로 구성되어 진다. 그리고 후자는 각각 독립적으로 변수의 집합에 대응되는 반면 전자는 모든 변수와 관련되어진다. 또한 분해법은 혼합정수선형 경우에 대해 그러한 것과 같이 선형 경우에 대해서도 전술한 METHOD를 확대해석하여 BLOCK ANGULAR 구조를 가진 혼합정수선형프로그래밍 문제점들을 해결하기 위해 제안되어져 왔다.

후자의 방법은 축열을 가진 열병합시스템의 최적 운전계획 문제점을 해결하기 위해 사용되어 왔다. 그후 이런 분해법은 계산효율을 증가시키기 위해 A TWO-PHASE APPROACH의 소개에 의해 교정되어져 왔다. 그리고 계산시간이 특히 많은 수를 가진 보조문제들에 있어 이렇게 교정된 분해법에 의해 계산시간이 현저히 단축 되었음이 판명되었다. 이 논문에서는 이렇게 교정되어진 분해법에서 고려 중인 문제점을 효율적으로 풀기 위해 사용되었다. 전술한 최적문제에 있어 동절기의 모든 샘플링주기의 변수들은 직접적으로 방정식 (6)과 (7)에서의 두 번째 형태인 유틸리티 계약수요-소비와 관계된다. 다른 CONSTRAINTS들은 다른 샘플링 주기에서 변수들과 직접적인 관련은 없다.

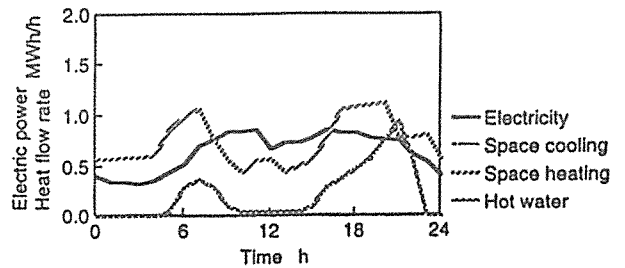
이것들은 방정식 (2)와 같은 설비들의 성능 특성, 방정식 (3)과 같은 에너지 밸런스와 공급-수요의 관계들 그리고 방정식 (4), (5)와 같은 첫 번째 형태의 유틸리티계약 수요-소비로 구성된다. 전자는 주문제에 대해 COUPLING CONSTRAINTS로 후자는 보조문제에 대해 BLOCK CONSTRAINTS로 간주하여 초창기의 최적문제는 계층적으로 분해될 수 있다. 이러한 분해법은 <그림 2>에서 보여준다. 따라서 주문제는 대규모선형프로그래밍으로써 공식화 되어지며, DANTZIG-WOLFE 방법에 의해 풀 수 있다. 각 보조문제는 소규모혼합정수선형프로그래밍으로써 공식화 되어지며, 통상의 BRANCH AND BOUND 방법에 의해 해결되어 질 수 있다.

주 문제점(Master problem) (선형프로그래밍 문제)	
○최소화(Minimize)	-식(11)에 의한 동절기의 기본요금 및 사용요금의 합계
○필요요건	-식(6)과 식(7)에 관련한 월간 유틸리티 계약수요소비

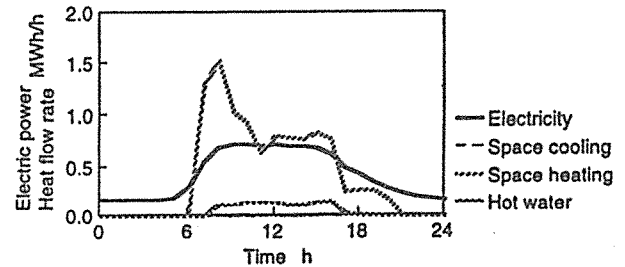


샘플링시간 간격에 의한 보조문제 (혼합정수(Mixed-integer) 직선프로그래밍 문제)	
○최소화	-매시 에너지 사용요금
○필요요건	-설비의 성능특성 관계 식(2) 등 -에너지 밸런스와 공급수요 관계 식(3) 등 -매시 유틸리티 계약수요-소비 관계 식(4)와 (5)

<그림 2> 가스엔진열병합시스템 구성도



<그림 3> 에너지 수요의 주간패턴(호텔, 1월)



<그림 4> 에너지 수요의 주간패턴(오피스빌딩, 1월)

<표1> 설비용량과 성능특성 및 유틸리티 계약수요

구 분	시간당 계약수요		성능특성값 (정격부하상태 효율)	
	호 텔	오피스빌딩		
설 비	가스엔진발전기	500kW	500kW	0.31(발전전력) 0.51(배기열 회수)
	1중흡수식냉동기	582kW	582kW	0.66
	가스직화 흡수식냉온수기	1512kW	1512kW	1.17(냉방) 0.94(난방)
	가스보일러	523kW	291kW	0.90
	방열기(Radiator)	810kW	810kW	0.0095
유틸리티	전력	628kW	713kW	-
	도시가스-1	239m³/h	244m³/h	-
비 고	*용량은 냉방과 구분되어 진다.			

이러한 문제점들은 초기문제의 최적 또는 2차적 최적해를 밝혀내어 반복적으로 풀어진 다. 앞에서 설명한 바와 같이 여름 동안 최적운전계획 문제점은 각 샘플링 주기들에 대해 많은 독립적인 문제점들로 나누어지며 각 문제점은 통상의 BRANCH AND BOUND 알고리즘에 의해 풀 수 있다.

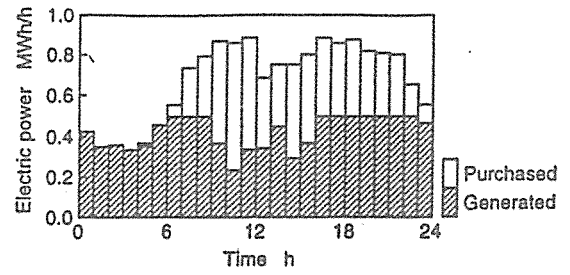
### 9. 수(數)의 연구(NUMERICAL STUDY)

여기에서 보여주는 복합이용요금 구조하의 최적운전계획 방법의 타당성과 효과성을 보여주기 위해 수(數)의 연구는 호텔이나 오피스빌딩에 설치된 가스엔진시스템에서 시행되어진다.

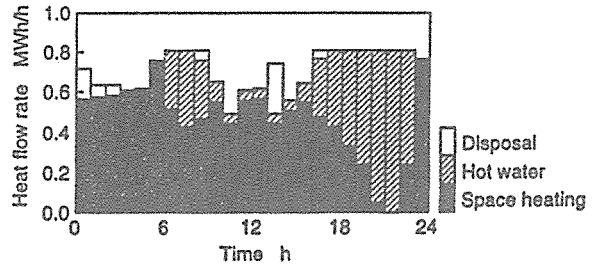
**입력데이터 :** 이 연구에서 하나의 대표일은 각 월을 지정되어지며  $J_i = 1(i=1, \dots, 12)$  각 대표일은 24개의 샘플링 주기들( $K=24$ )로 나누어진다. 07:00부터 22:00까지의 주간시간 범위를 조건으로  $KD = \{k | 8 \leq k \leq 22\}$ 로서 정의되어진다. 에너지 수요들은 각 대표일에 대해 매시간마다 판정되어진다. 예로써 <그림 3>과 <그림 4>는 각각 호텔과 오피스빌딩에 대한 1월의 에너지 수요에 대해 하루의 패턴을 보여준다. <그림 1>에서 보여준 시스템에서 각종류의 설비에 대해 하나의 유니트가 설치되었다고 가정하자. 예를들면  $NGG=1$  등, <표 1>에서는 시간에 따른 유틸리티의 계약 수요들 뿐만 아니라 설비의 용량과 성능특성값을 보여준다. <표 1>의 성능특성값들은 방정식 (1)에서  $p$ 와  $q$ 의 값들 대신에 정격 부하 상태에서의 효율 들을 의미하며 부분부하 상태에서의 효율들은 여기에서 생략되었음을 주목하여야 한다. 이 논문에서 채택된 유틸리티 요금들은 <표 2>에서 보여진다. 비용들의 모든 값들은  $\yen$ 으로 나타냈다. 유틸리티 요금구조의 효과를 조사하기 위해 다음과 같은 두 가지 경우를 조사했다.

“A”경우 : 운전전략은 모든 CONSTRAINTS의 고찰에 의해 여기서 제안된 최적의 운전계획 방법을 사용하는 것으로 결정되었다.

“B”경우 : 운전 전략 방정식 (6)과 (7)의 CONSTRAINTS에 대해 고찰없이 과거 부터 제안되어진 증전의 최적운전계획 방



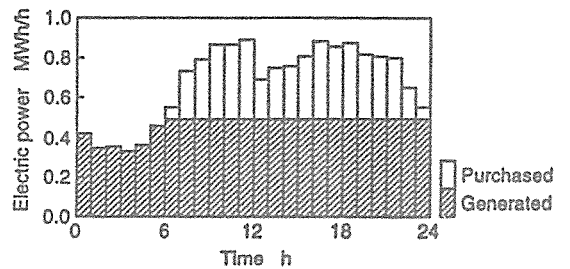
(a)



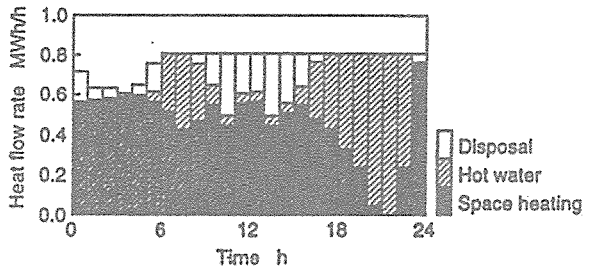
(b)

<그림 5> 운전전략(호텔, “A”경우, 1월)

(a)전기공급 패턴, (b)배기열 이용 패턴



(a)



(b)

<그림 6> 운전전략(호텔, “B”경우, 1월)

(a)전기공급 패턴, (b)배기열 이용 패턴

<표 2> 유틸리티 요금

유틸리티	계약내용	요금
전 력	기본요금	1,660 $\yen$ /kWh//월
	사용요금 ( $\phi_{buy}$ )	15.33 $\yen$ /kWh(7월~9월) 13.93 $\yen$ /kWh(기타 월)
도시가스-1	기본요금	정액제 226,000 $\yen$ /월
	시간제	1,070 $\yen$ /( $m^3$ /h)/월
	주간 ( $\phi_D$ )	11.76 $\yen$ /( $m^3$ /월)
	야간 ( $\phi_N$ )	4.85 $\yen$ /( $m^3$ /월)
	사용요금 ( $\phi_{gas1}$ )	26.40 $\yen$ / $m^3$
도시가스-2	기본요금	6,410 $\yen$ /월
	사용요금 ( $\phi_{gas2}$ )	108.93 $\yen$ / $m^3$

법을 사용하는 것으로 결정 되었으며, 계약수요들, 즉  $f_M$ 과  $f_D$ 는 다음과 같은 최적결과로부터 계산되어 진다.

$$\bar{f}_M = \max_{i \in I_M} f_{Mi} \dots \dots \dots (12)$$

$$\bar{f}_D = \max_{i \in I_D} f_{Di} \dots \dots \dots (13)$$

### 10. 결과 및 토의

#### 가. 호텔인 경우

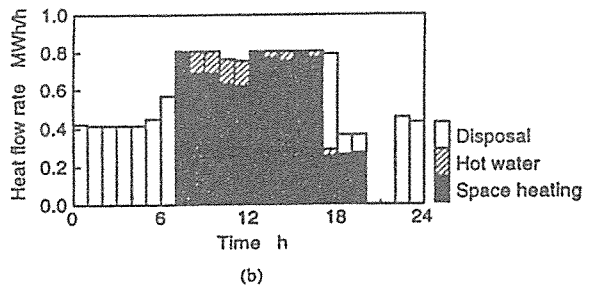
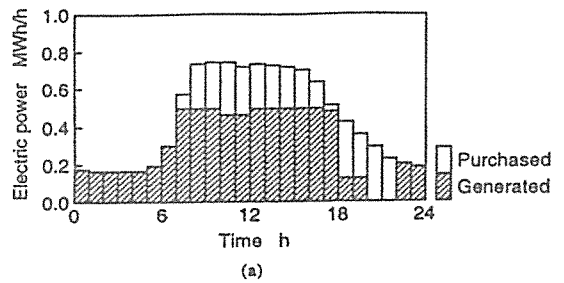
<그림 5>와 <그림 6>은 각각 “A”와 “B”의 경우로부터 얻어진 1월달의 대표일에 대한 운전전략 보여 준다. <그림 6> (a)에서 보여주는 것과 같이 “B”의 경우 가스엔진발전기는 전기수요를 추종하였으며 00:00부터 06:00동안을 제외하고 정격 부하상태에서 운전되었다. 이러한 운전은 전기값과 비교하여 낮은 가격의 도시가스-1에 의한 것이다. 그렇지만 <그림 5> (a)에서 보여주는 것과 같이 이 시간동안 가스엔진은 열에너지 수요에 대해 최대의 배기열을 생산하고 나머지는 버린다. 그렇지만 <그림 5> (b)에서 보여주는 바와 같이 이 시간동안 버려지는 배열의 양은 가스엔진발전기의 부분부하운전으로 줄어든다. 방정식 (6)과 (7)의 규정은 겨울기간동안, 특히 배기열의 폐기에 의한 낮은 열효율과 관련된 기간동안 도시가스-1의 월간 소비를 줄이는 경향이 있으며 가스엔진발전기는 배기열의 폐기를 적게하여 부분부하 운전을 하게 한다.

<표 3>은 겨울 동안 도시가스-1의 월간 전체소비 값과 주간시간의 소비 값인  $f_M$ 와  $f_D$ 와 함께 그들의 계약수요들인  $\bar{f}_M$ 과  $\bar{f}_D$ 함께 보여준다. “B”의 경우와 “A”의 경우 모두  $f_M$ 와  $f_D$ 의 대부분의 가격들은 일정하거나 각각  $\bar{f}_M$ 과  $\bar{f}_D$ 의 가격들과 같을 때, 월별로 변하는  $f_{Mi}$ 와  $f_{Di}$ 의 가격들과  $\bar{f}_M$ 과  $\bar{f}_D$ 의 가격들은 각각  $f_{Mi}$ 와  $f_{Di}$ 의 최고 값으로 계산되어진다. 이것은 방정식 (6)과 (7)의 규정이 겨울 동안 대부분의 월에 대해 도시가스-1의 소비를 줄이는 것을 의미한다.

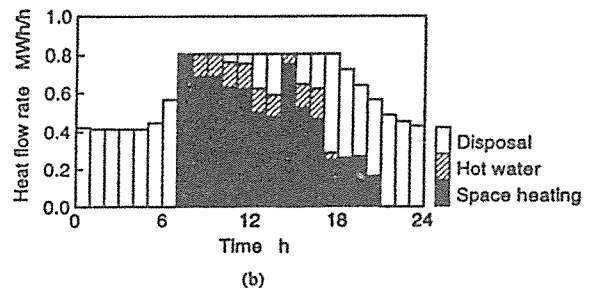
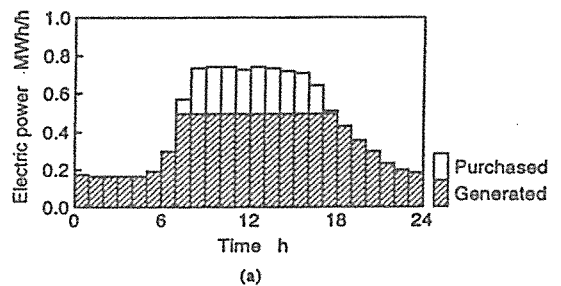
<표 4>는 연간 운전비용과 앞서 언급했던 네 가지 항목을 요약한 것이다. a) 연간 기본요금, b) 하절기 에너지 사용요금, c) 동절기 기본 요금, d) 동절기 에너지 사용요금. 항목 (a)와 (b)의 가격들은 “A”와 “B”의 경우 둘다 일정하다. “A”의 경우에 대한 항목 (c)의 가격은 방정식 (6)과 (7)의 규

<표 3> 월간 수용계약과 동절기 도시가스-1 소비(호텔)  
(단위:  $\times 10^3 \text{m}^3/\text{월}$ )

구 분		“A”의 경우	“B”의 경우
중 합	계약수요 $\bar{f}_M$	107.27	116.16
	$f_{M1}$	107.27	116.16
	$f_{M2}$	105.00	105.00
	$f_{M3}$	107.27	108.10
	$f_{M12}$	107.00	112.30
주 간	계약수요 $\bar{f}_D$	71.35	78.97
	$f_{D1}$	70.96	78.97
	$f_{D2}$	71.35	71.35
	$f_{D3}$	71.35	72.23
	$f_{D12}$	71.35	75.74



<그림 7> 운전전략(오피스빌딩, “A” 경우, 1월)  
(a)전기공급 패턴, (b)배기열 이용 패턴



<그림 8> 운전전략(오피스빌딩, “A” 경우, 1월)  
(a)전기공급 패턴, (b)배기열 이용 패턴

전에 대한 고려에 의해 "B"의 경우보다 8.6퍼센트가 더 낮다. 이것은 앞서 설명한 것과 같이 가스엔진발전기 운전전략의 변화로부터 기인한 도시가스-1의 월간 주간시간 소비에 있어 기본요금의 감소에 의한 것이다.

그와 반면에 가스엔진발전기의 이러한 운전전략은 구입되어지는 전력과 도시가스-2의 소비가 증가하기 때문에 "A"의 경우에 대한 항목 (b)의 가격은 "B"의 경우보다 2.4퍼센트가 더 높다. "A"의 경우에 대한 항목 (c)와 (d)의 합은 "B"의 경우의 (c)와 (d)의 합보다 1.9퍼센트가 더 낮다. 비용에 있어 이러한 차이는 매우 적다. 그렇지만 이러한 운전 전략은 앞에서 설명한 바와 같이 신중하게 변경해야 하며 또한 유틸리티 소비들의 양이나 패턴들의 변경은 신중하게 해야함을 주의해야 한다.

#### 나. 오피스빌딩인 경우

<그림 7>과 <그림 8>은 1월에 "A"와 "B"의 경우들에 대해 얻어진 대표일에 대한 운전 전략 보여준다. 보기와 같이 그림 (a)와 (b)는 각각 전기공급과 배기열 이용의 패턴들을 보여준다. 오피스빌딩의 경우에서 얻어진 결과는 호텔의 경우와 질적으로 비슷하다. <그림 8> (a)에서 보여주는 바와 같이 "B"의 경우 가스엔진발전기는 전력수요를 추종한다. 그렇지만 <그림 7> (a)에 보여주는 바와 같이 "A"의 경우 가스엔진발전기는 낮은부하에서 운전되어 지거나 18:00에서 22:00까지 정지되어지는 것을 지향한다. <그림 8> (b)에서 보이는 것과 같이 이 기간 동안 가스엔진은 열에너지 수요와 열의 폐기에 대해 최대한의 배기 열을 생산한다. 그렇지만 <그림 7> (b)에서 보이는 바와 같이 이 기간동안 버려지는 배기 열의 양은 감소되어 진다.

여기에는 다음과 같이 오피스빌딩 경우에 대해 더해지는 약간의 포인트들이 있다. 먼저 22:00부터 07:00까지 많은 양의 버려지는 열이 존재한다 할지라도 이 기간동안의 운전전략은 방정식 (6)과 (7)의 규정에 의해 영향을 받지 않는다. 이것은 도시가스-1의 월간 야간소비  $\bar{F}_N$ 에 대한 기본요금이 월간 주간소비  $\bar{F}_D$ 의 1/2보다 더 적으며 운전비용을 줄이기 위하여 야간시간 동안보다 오히려 주간시간 동안에 도시가스-1의 소비를 감소시키는 것이 더 효과적이

<표 4> 케이스별 연간 운전비용(호텔)

(단위:  $\times 10^6$ 엔/년)

구 분			"A"의 경우	"B"의 경우
(a)기본요금 (년,월 수용계약)	전 기	시간제	12.50	
	도시가스-1	정액제	2.71	
		시간제	3.06	
	도시가스-2	정액제	0.08	
소 계			18.35	
(b)기본요금 (여름, 시간소비)	전 기	-	25.15	
	도시가스-1	-	22.36	
	도시가스-2	-	0.87	
	소 계			48.38
(c)기본요금 (겨울, 월간수용계약)	도시가스-1	주간	10.07	11.14
		야간	2.09	2.16
	소 계		-	12.16
(d)기본요금 (겨울, 시간소비)	전 기	-	9.26	8.53
	도시가스-1	-	11.26	11.66
	도시가스-2	-	0.41	0.24
	소 계		-	20.93
합 계			99.82	100.46

<표 5> 동절기 도시가스의 월간수용계약과 소비(오피스빌딩)

(단위:  $\times 10^6$ m<sup>3</sup>/월)

구 분			"A"의 경우	"B"의 경우
총 합	계약수요	$\bar{F}_M$	74.71	87.71
	소 비	$f_{M1}$	74.71	87.71
		$f_{M2}$	72.82	76.67
		$f_{M3}$	74.71	80.94
		$f_{M12}$	74.71	82.32
주 간	계약수요	$\bar{F}_D$	55.17	68.16
	소 비	$f_{D1}$	55.17	68.16
		$f_{D2}$	55.17	59.02
		$f_{D3}$	55.06	61.28
		$f_{D12}$	55.17	62.77

기 때문이다. 두 번째로 "A"의 경우 12:00부터 17:00까지 난방으로 이용되어진 배기열의 양은 "B" 경우보다 더 크다. 이는 방정식 (6)과 (7)의 규정이 이 기간동안 가스엔진발전기 뿐만 아니라 가스직화 흡수식냉온수기에 대해 도시가스-1의 소비를 줄이기 때문이다.

<표 5>는 그들의 계약수요 과 와 함께 겨울 동안 도시가스-1의 월간 전체소비와 주간시간 기간의 소비가격 와 를 보여준다. <표 6>은 네가지 항목들의 연간 운전비용을 요약한 것이다. 이러한 결과들은



호텔의 경우와 질적으로 비슷하다. <표 6>에서 보는 바와 같이 “A”의 경우에 대한 항목 (c)의 가격은 “B”의 경우보다 17%가 더 낮다. 이것은 바로 도시가스-1의 월간 주간 소비에 대한 기본요금의 감소에 의한 것이다. 이는 도시가스-1,  $\Psi_N$ 의 월간 야간 소비에 대한 기본요금의 비율이 월간 주간시간,  $\Psi_N$  때의 1/2보다 적고 야간 동안 가스엔진발전기의 운전 전략을 바꾸지 않았기 때문이다. 그와는 달리 주간시간 동안 가스엔진발전기의 운전전략 변화는 구입되어지는 전력과 도시가스-2의 소모를 증가시키기 때문에 “A”의 경우에 대한 항목 (d)의 가격은 “B”의 경우보다 6.1%가 더 높다. “A”의 경우에 대한 항목 (c)와 (d)의 합은 “B”의 경우에 대한 (c)와 (d)의 합보다 4.7%가 더 낮으며 이러한 것은 다소 중요하게 생각되어 진다.

### 11. 결론

열병합시스템에서 운전계획 문제점은 시간에 따른 유틸리티 소비에 대한 기본요금과 사용요금 뿐만 아니라 정해진 기간동안 전체 유틸리티 소비에 대한 기본요금을 부과하는 복합 유틸리티 요금구조 하에 논의되어 왔다. 구성설비의 운전전략과 전체 유틸리티 소비에 대한 기본요금은 에너지수요 요구에 따라 연간 운전비용을 최소화하기 위하여 평가해 왔다. 이러한 문제점은 많은 수의 다양함과 함께 하나의 혼합 정수선형프로그래밍으로서 공식화되어져 왔다. 그리고 이것은 BLOCK ANGULAR 구조를 가진 혼합정수선형프로그래밍의 문제점들에 대해서 교정되어진 분해법에 의해 해결되어 왔다. 결국 호텔이나 오피스빌딩 등에 설치된 가스엔진구동

<표 6> 케이스별 연간 운전비용(오피스빌딩)

(단위:  $\times 10^6$ 엔/년)

구 분			“A”의 경우	“B”의 경우
(a)기본요금 (년,월 수용계약)	전기	시간제	14.19	
	도시가스-1	정액제	2.71	
		시간제	3.12	
	도시가스-2	정액제	0.08	
	소 계	-	20.10	
(b)기본요금 (여름, 시간소비)	전기	-	15.41	
	도시가스-1	-	18.85	
	도시가스-2	-	0.01	
	소 계	-	34.27	
(c)기본요금 (겨울, 월간수용계약)	도시가스-1	주간	7.79	9.62
		야간	1.14	1.14
	소 계	-	8.93	10.76
(d)기본요금 (겨울, 시간소비)	전기	-	4.58	8.65
	도시가스-1	-	7.84	8.65
	도시가스-2	-	0.51	0.11
	소 계	-	12.93	12.19
합 계			76.23	77.32

의 열병합시스템에서 수의 연구를 통해 운전전략 요금구조의 영향이 조사되어 왔으며, 아래사항은 여기에서 획득한 중요한 결과들이다.

1. BLOCK ANGULAR 구조를 가진 혼합정수선형프로그래밍 문제점들에 대해 교정되어진 분해법의 채택은 복합 유틸리티 요금구조하에서 열병합시스템의 최적운전계획에 대한 문제점을 효율적으로 해결할 수 있다.
2. 전체 도시가스의 소비에 대한 계약수요들은 부분 부하로서 가스엔진발전기를 운전하게 하거나 주간시간동안 배기열의 폐기로 열효율이 낮아 운전을 중지하도록 한다.

## 디젤 엔진을 사용한 열병합발전 시스템에서의 열회수 장치

(본자료는 일본열병합 발전 기초세미나 자료에서 번역한 내용임)

디젤 엔진을 원동기로한 열병합발전의 경우 자켓 냉각수 계통의 열회수 장치에서는 설계상 문제가

되는 점은 적지만 배기가스 계통의 열회수 장치에서는 배기가스중에 포함되어 있는 미연분 및 유황