

## 유틸리티 플랜트 모터/터빈 공정의 최적운전

오상훈 · 여영구<sup>†</sup>

한양대학교 화학공학과  
133-791 서울시 성동구 행당동 17  
(2007년 1월 17일 접수, 2007년 2월 13일 채택)

## Optimal Operation of Motor/Turbine Processes in Utility Plant

Sanghun Oh and Yeong Koo Yeo<sup>†</sup>

Department of Chemical Engineering, Hanyang University, 17, Haengdang-dong, Seongdong-gu, Seoul 133-791, Korea  
(Received 17 January 2007; accepted 13 February 2007)

### 요 약

공장의 안정적인 운전과 경제성을 위해서는 유틸리티의 수급을 정확히 파악하고 공급하는 것이 중요하다. 모터/터빈 공정은 유틸리티 플랜트에서 수증기와 전력의 균형을 조절하여 주며 이의 최적 운전은 유틸리티 플랜트의 경제성에 지대한 영향을 미친다. 모터/터빈 공정의 분석을 위해서는 먼저 수증기 발생장치와 수증기 분배장치 전반에 대한 모델의 규명이 요구되는 물론 제반 상황에 대한 운전지식이 필요하다. 유틸리티 관련 장치의 모델과 운전지식 베이스를 기반으로 구성되는 모터/터빈 운전 최적화 시스템에서는 다양한 등급의 수증기 헤더에서 요구되는 수증기 양이 변할 때 각 유틸리티 설비의 최적 운전조건을 제시하여 주며 수증기 요구량의 변화에 따라 유틸리티 펌프의 구동원이 적절하게 선택되고 이에 따라 전체 유틸리티 플랜트의 조업 경비도 절감할 수 있다.

**Abstract** – To achieve safe operation and to improve economics it is imperative to monitor and analyse demand and supply of utilities and to meet utility needs in time. The main objective of motor/turbine processes is to manipulate steam and electricity balances in utility plants. The optimal operation of motor/turbine processes is by far the most important to improve economics in the utility plant. In order to analyse motor/turbine processes, we need steady state models for steam generation equipments and steam distribution devices as well as turbine generators. In addition heuristics concerning various operational situations are required. The motor/turbine optimal operation system is based on utility models and operational knowledgebase and provides optimal operating conditions when the amount of steam demand from various steam headers is changed frequently. The optimal operation system also produces optimal selection of driving devices for utility pumps to reduce operating cost.

Key words: Utility Plant, Motor/Turbine Process, Optimization, Steam Header, Knowledgebase

### 1. 서 론

유틸리티는 공장의 운전에 필요한 에너지원을 말하며 유틸리티 시스템은 유틸리티의 공급에 관련되는 각종 설비를 말한다. 공장의 운전에는 필요한 전기, 수증기, 공업용수, 공기 및 각종 가스들은 유틸리티 시스템을 통하여 공급된다. 그러므로 공장의 운전에서 유틸리티 시스템의 효율적인 관리와 운영은 공장의 안전운전과 경제성에 가장 큰 영향을 미친다. 대부분의 공장에서는 운전에서 필요한 에너지원으로 사용되는 유틸리티 중에서 가장 큰 비중을 차지하는 것은 수증기이다. 보일러에서 만들어지는 수증기는 중요한 열전달 매체이고, 안정적으로 열에너지를 공급하는데 사용된다. 수증기의 효율

적인 관리는 공장의 전력 및 용수의 수급에 영향을 준다. 그리고 공정에서 요구하는 수증기량은 공정의 조업 상황, 계절, 기후조건에 따라 자주 변하기 때문에, 공장의 안정적인 운전과 경제성을 위해서는 필요로 하는 수증기의 변화량을 정확히 파악하고, 공급하는 것이 중요하다. 그러나 수증기 분배를 위해서는 복잡한 조업 지식과 터빈 발전기, 수증기 발생 장치의 분석을 필요로 하기 때문에 정확하고 신속한 수증기 분배에 어려움이 많다. 따라서 수증기 수급을 중심으로 유틸리티 공정의 운용을 살펴보는 것은 중요하고, 유틸리티 설비 각각에 대하여 최적 운용 방안을 규명할 필요가 있다.

그동안 화학공장의 수증기 분배 공정에 대한 많은 연구가 이루어져 왔다. 초기에는 단순한 수증기 분배 공정의 정상 상태 물질 수지와 선형 계획법을 이용하였지만 대상 공정이 너무 단순하고 터빈 발전기의 모사가 부족하여 실제 공정에 이용할 수 없었다[1-3].

<sup>†</sup>To whom correspondence should be addressed.  
E-mail: ykyeo@hanyang.ac.kr

MILP나 MINLP를 이용하여 조업 비용을 최소화하는 연구[4-8]가 이루어져 있지만 실제 공장에서의 운전은 경제적인 조업보다 안정적인 조업을 우선하기 때문에 실제 운전에 적용하기에는 무리가 있었다. Nishio 등[9]은 two-level approach를 이용하여 수증기가 지배하는 경우와 전력이 지배하는 경우에 대하여 최적의 수증기와 전력 공급량을 계산하였다. Petroulas 등[10]은 유틸리티 시스템의 합성 및 설계 기법을 제안하기 위하여 LP 방법을 이용하였고, 수증기 물성의 계산에 PPROPS 시스템을 이용하여 최적의 수증기 헤더 압력을 정할 수 있도록 하였지만 비용을 고려하지 않았다. Maria 등[11]은 simulated annealing 알고리즘을 이용하여 최적의 유틸리티 공정 합성 연구를 하였다.

본 연구에서 다른 모터/터빈 공정은 유틸리티 플랜트에서 수증기와 전력의 균형을 조절하여 주며 유틸리티 플랜트의 경제성에 지대한 영향을 미치는 중요한 공정이다. 모터/터빈 공정의 분석을 위해서는 먼저 수증기 발생장치와 수증기 분배장치 전반에 대한 모델의 규명이 요구되는 물론 제반 상황에 대한 운전지식이 필요하다. 모터/터빈 운전 최적화 시스템은 이러한 유틸리티 관련 장치의 모델과 운전지식 베이스를 기반으로 구성되며 다양한 등급의 수증기 헤더에서 요구되는 수증기 양이 변할 때 각 유틸리티 설비의 최적 운전조건을 제시하여 준다. 아울러 수증기 요구량의 변화에 따라 유틸리티 펌프의 구동원이 적절하게 선택되어야 하는데 이에 따라 전체 유틸리티 플랜트의 조업 경비도 절감할 수 있다.

본 연구에서는 먼저 유틸리티 플랜트에서 수증기 발생장치를 중심으로 하여 각 단위공정의 모델을 규명하고 모터/터빈 공정에 대한 운전지식 베이스를 구축하였다. 본 연구에서 대상으로 한 플랜트는 여천 NCC(주)의 유틸리티 공정이다. 모터/터빈 운전 최적화 시스템은 저압, 중압, 고압, 초고압과 같은 다양한 등급의 수증기 헤더에서 수증기 수급이 변할 때 각 유틸리티 설비의 최적 운전조건을 제시하여 주며 수증기 요구량의 변화에 따라 유틸리티 펌프의 구동원을 적절하게 선택하여 주고 이에 따라 전체 유틸리티 플랜트의 조업 경비를 절감시켜 줄 수 있다.

## 2. 유틸리티 공장의 모델링

### 2-1. 수증기 발생 장치의 모델링

보일러는 연료를 연소하여 얻은 열이나 다른 열원으로부터의 열을 이용하여 밀폐용기 내의 물로부터 수증기를 발생하는 장치로서 주로 탈기기(deaerator), 고압급수 가열기(HPH, high-pressure heater), 증기식 공기예열기(SAH, steam-air heater), 1차 및 2차 과열기(superheater), 보일러 드럼(boiler drum), 연료유 가열기(oil heater), 플래쉬 탱크(flash tank)로 구성되어 있다(Fig. 1). 보일러 내부가 부식하거나 노폐물이 축적되는 것을 막기 위해 보일러의 급수는 먼밀한 사전처리를 해주어야 한다. 탈기기에서는 수증기를 유입시켜 보일러 급수와 접촉하도록 하여 급수 내부에 용해되어 있는 기체를 제거하는데 이는 보일러 급수에 용해되어 있는 기체가 보일러 내부에서 팽창하게 되어 보일러가 폭발할 가능성이 있기 때문이다.

#### 2-1-1. 연료유 가열기(oil heater)와 증기식 공기 예열기(SAH)

보일러의 연료로는 흔히 벙커-C유를 사용한다. 벙커-C유는 점도가 매우 높기 때문에 연료유 가열기를 이용하여 오일의 온도를 높여줌으로써 오일의 유동성과 연소율을 높일 수 있다.

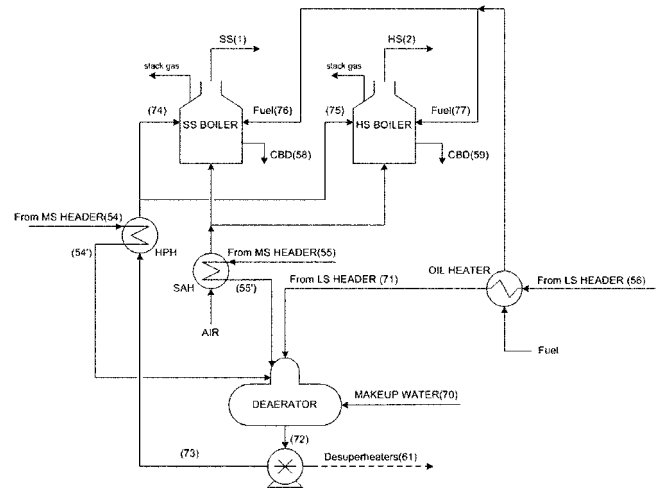


Fig. 1. The Schematic diagram of steam generation units.

연료유 가열기(oil heater):

$$(H_{76} - H_{fuel})m_{76} - (H_{56} - H_{71})m_{56} = 0 \quad (1)$$

$$(H_{77} - H_{fuel})m_{77} - (H_{56} - H_{71})m_{56} = 0 \quad (2)$$

증기식 공기 예열기(SAH):

$$(H_{air} - H_{air'})m_{air} - (H_{55} - H_{55'})m_{55} = 0 \quad (3)$$

#### 2-1-2. 보일러(boiler)

보일러 공급수는 초고압 수증기와 CBD(continuous blow down)의 합으로 나타낼 수 있다. CBD는 보일러 드럼에서 포화수를 연속적으로 뽑아내는 것으로 보통 수증기 생산량의 1% 정도이다. 초고압 수증기 생산 보일러(SS boiler)의 수지식은 다음과 같다.

$$m_{58} = 0.01m_1 \quad (4)$$

$$m_{74} = m_1 + m_{58} \quad (5)$$

$$\Delta H = m_1 H_1 + m_{58} H_{58} - m_{74} H_{74} \quad (6)$$

식 (4)와 식 (5)로부터 식 (7)을 얻을 수 있다.

$$m_{74} = 1.01m_1 \quad (7)$$

식 (7)을 식 (6)에 대입하면 식 (8)을 얻을 수 있다.

$$\Delta H = (H_1 + 0.01H_{58} - 1.01H_{74})m_1 \quad (8)$$

마찬가지로 고압 수증기 생산 보일러(HS boiler)의 수지식은 다음과 같다.

$$m_{75} = 1.01m_1 \quad (9)$$

$$\Delta H = (H_2 + 0.01H_{59} - 1.01H_{75})m_2 \quad (10)$$

#### 2-1-3. 탈기기(deaerator)와 고압 급수 가열기(HPH)

공급용수는 탈기기로 유입되고 증기식 공기 예열기와 고압 급수 가열기, 연료유 가열기로부터 나오는 응축수가 더해진다. 탈기기에

서 나오는 공급수는 보일러 상부 드럼과 감압용 급수로 이용한다. 또한 탈기기는 급수를 저장함으로써 급수량의 급변에 대응할 수 있도록 한다. 고압 급수 가열기(HPH)는 중압 수증기를 이용하여 고압의 급수를 예열하고, 사용된 중압 수증기는 응축수로 탈기기로 유입된다.

탈기기(deaerator) :

$$m_{54'} + m_{55'} + m_{70} + m_{71} = m_{72} \quad (11)$$

$$H_{54}m_{54'} + H_{55}m_{55'} + H_{70}m_{70} + H_{71}m_{71} = H_{72}m_{72} \quad (12)$$

고압 급수 가열기(HPH) :

$$(H_{74} + H_{75} - H_{73})m_{73} - (H_{54} - H_{54'})m_{54} = 0 \quad (13)$$

## 2-2. 수증기 분배 장치의 모델링

### 2-2-1. 수증기 헤더(steam header)

수증기 헤더는 수증기 발생 장치에서 생산한 수증기를 각각의 단위 공정이나 수요처로 공급해 주는 역할을 하며 헤더의 압력에 따라 초고압, 고압, 중압, 저압 수증기 헤더로 구분할 수 있다. 네 개의 헤더는 일반적으로 터빈 발전기와 유틸리티 터빈, 그리고 감압 설비로 연결되어 있으며 비상사태를 위해 대기 방출 운전을 하도록 되어있다.

보일러에서 생산된 초고압 수증기는 먼저 초고압 수증기 헤더로

이송되는데 그 중 일부는 각각의 공정으로 이송되고 나머지는 터빈 발전기에 공급되어 중압 수증기 헤더와 저압 수증기 헤더로 추기되기도 하며 감압 설비를 거쳐 고압 수증기 헤더로 공급되기도 한다. 감압 설비를 거쳐 고압 수증기는 유틸리티 펌프를 구동하는 터빈으로 공급되어 중압 수증기 헤더나 저압 수증기 헤더로 추기되기도 하며 나머지는 감압 설비를 거쳐 중압 수증기 헤더로 공급된다. 유틸리티 터빈과 터빈 발전기의 고압단, 그리고 감압 설비로부터 공급된 중압 수증기는 연료 펌프를 구동하기 위한 터빈, 고압 급수 가열기, 증기식 공기 예열기, 수증기 분무 장치에서 사용되고, 나머지는 감압 설비를 거쳐 저압 수증기 헤더로 공급된다. 터빈 발전기의 저압단, 감압 설비, 플래쉬 탱크, 유틸리티 터빈으로부터 공급된 저압 수증기는 탈기기와 증기식 연료 예열기 및 각각의 공정으로 공급된다(Fig. 2).

초고압 수증기 헤더(superheated steam header) :

$$m_3 + m_9 + m_{15} + m_{17} + m_{19} + m_{21} + m_{24} - m_1 = -b_1 \quad (14)$$

고압 수증기 헤더(high-pressure steam header) :

$$m_{11} + m_{27} + m_{29} + m_{31} + m_{33} + m_{35} + m_{37} + m_{39} + m_{43} + m_{45} + m_{47} + m_{49} - m_2 - m_{10} - m_{16} - m_{22} - m_{25} = -b_2 \quad (15)$$

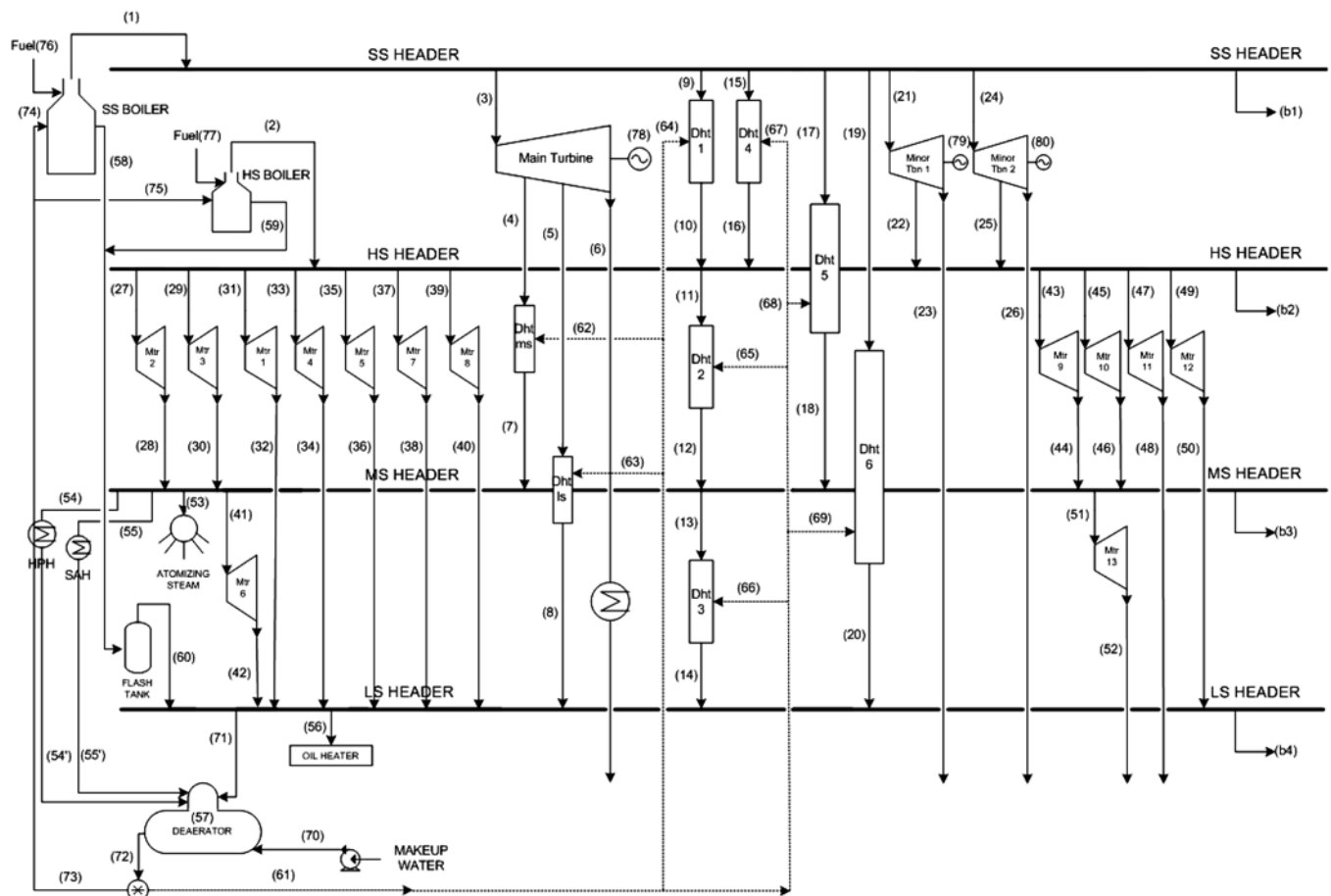


Fig. 2. The flow diagram of steam in steam distribution plant.

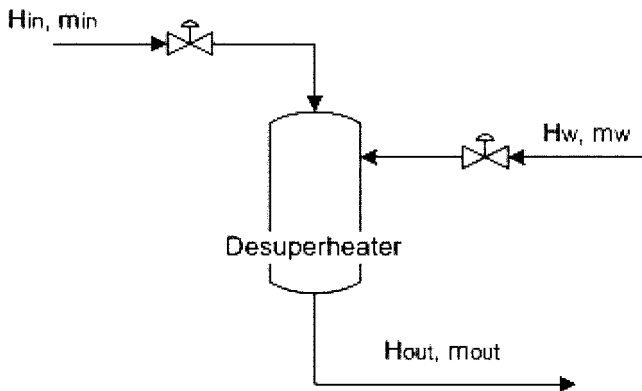


Fig. 3. The schematic diagram of desuperheater.

중압 수증기 헤더(medium-pressure steam header) :

$$m_{13} + m_{41} + m_{51} + m_{53} + m_{54} + m_{55} - m_7 - m_{12} - m_{18} - m_{28} - m_{30} - m_{44} - m_{46} = -b_3 \quad (16)$$

저압 수증기 헤더(low-pressure steam header) :

$$m_{56} + m_{71} - m_8 - m_{14} - m_{20} - m_{32} - m_{34} - m_{36} - m_{38} - m_{40} - m_{42} - m_{50} - m_{60} = -b_4 \quad (17)$$

### 2-2-2. 감압 설비(desuperheater)

감압 설비는 수증기 헤더의 압력을 조절하는데 가장 많이 사용되는 공정 장치로서 높은 온도와 압력의 수증기를 낮은 온도와 압력의 수증기로 만드는 역할을 한다. 이 장치는 다른 공정 장치에 비해 운전이 간단하고 복잡한 조업 지식이 필요하지 않다. Fig. 3은 감압 장치를 개략적으로 나타낸 것이다.

$$m_{in} + m_w = m_{out} \quad (18)$$

$$H_{in}m_{in} + H_w m_w = H_{out}m_{out} \quad (19)$$

식 (18)과 식 (19)로부터 유입수와 유출수, 분무수의 관계를 구할 수 있다.

$$m_w = \frac{(H_{out} - H_{in})}{(H_w - H_{out})} m_{in} \quad (20)$$

분무수의 총괄 물지 수지식은 다음과 같다.

$$m_{62} + m_{63} + m_{64} + m_{65} + m_{66} + m_{67} + m_{68} + m_{69} = m_{61} \quad (21)$$

### 2-2-3. 터빈 발전기(turbine generator)

수증기 터빈의 모델링에 있어서 먼저 과열 수증기는 이상기체이며 각 압력단계로 유입되는 수증기의 운동에너지는 무시할 수 있는 것으로 간주한다. 터빈 발전기의 발전량은 다음 식으로 얻을 수 있으며 추기량의 변화에 의해 발전량을 변화시킬 수 있다.

$$W = \sum_i \eta_i (m_i \Delta H_i) \quad (22)$$

각 터빈 발전기의 물질 수지식은 다음과 같다.

$$m_3 = m_4 + m_5 + m_6 \quad (23)$$

$$m_{21} = m_{22} + m_{23} \quad (24)$$

$$m_{24} = m_{25} + m_{26} \quad (25)$$

터빈 발전기의 조업 자료에서 유입되는 초고압 수증기 유량, 각 추기량, 발전량의 회귀 분석을 통하여 다음과 같은 효율식을 얻을 수 있었다.

$$\eta_1 = c_1 + c_2 e^{-6} m_3 H_3 + c_3 e^{-6} m_4 H_4 + c_4 e^{-6} m_5 H_5 \quad (26)$$

$$\eta_2 = c_5 + c_6 e^{-6} m_{21} H_{21} + c_7 e^{-6} m_{22} H_{22} \quad (27)$$

$$\eta_3 = c_8 + c_9 e^{-6} m_{24} H_{24} + c_{10} e^{-6} m_{25} H_{25} \quad (28)$$

이 식에서  $c_1 \sim c_{10}$ 은 상수이다.

### 2-3. 유틸리티 펌프 공정

수증기 시스템을 분석할 때 빈번하게 일어나는 문제는 저압 수증기 수요를 충당하기 위해서 고압 수증기를 감압 밸브를 통과시킬 것인가, 아니면 수증기 터빈을 통과시킬 것인가를 결정하는 문제이다. 어느 방법이 유리한지를 알기 위해서는 전력비용, 연료비용, 수증기 터빈 효율, 수증기 물성치, 보일러 효율에 대한 데이터가 필요하다. 모터/터빈 공정으로서 Fig. 4에 보인 바와 같이 전기 모터와 수증기 터빈 모두에 의해서 구동될 수 있는 펌프에 대하여 다음과 같이 두 가지 운전방법을 설정하여 보았다.

방법 1: 수증기 터빈을 사용하여 펌프를 구동하고 저압 수증기를 공급한다.

방법 2: 전기 모터를 사용하여 펌프를 구동하고 저압 수증기는 감압밸브를 이용하여 공급한다.

#### 2-3-1. 수증기 터빈을 사용하는 경우

이 경우 수증기 생산 장치에서 생산된 수증기로 터빈을 구동하므로 모터 구동을 위한 전력이 요구되지 않는다. 각 수증기 터빈에서 요구하는 수증기량이 부족하거나 다른 공정장치에서 요구하는 수증기량이 증가하게 되면 수증기 생산 장치에서 수증기를 추가로 생산하기 전에 먼저 유틸리티 펌프의 구동원을 전기 모터로 교체하여 수급을 조절하도록 한다.

#### 2-3-2. 전기 모터를 사용하는 경우

전기 모터를 구동하기 위해서는 전기 모터에서 소모하는 전력량 만큼을 터빈 발전기에서 추가로 생산하여야 한다. 전력을 생산하기 위해 터빈 발전기로 유입되는 수증기량은, 중압 및 저압 응축수의 추기량으로부터 결정할 수 있다. 공정장치에서 사용되는 수증기가

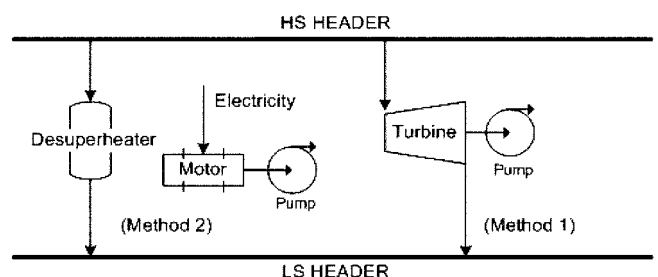


Fig. 4. The schematic diagram of Motor/Turbine.

남게 될 경우 전력 소모를 줄이기 위해 유틸리티 펌프의 구동원을 수증기 터빈으로 교체하여 잉여 수증기를 사용한다.

### 3. 운전지식 베이스를 이용한 수증기 분배 공정

수증기는 온도와 압력에 따라 초고압, 고압, 중압, 저압 수증기로 나뉜다. 이러한 네 가지 등급의 수증기는 감압 설비와 터빈 발전기, 유틸리티 펌프를 구동하는 수증기 터빈으로 연결된 수증기 헤더를 통해 각각의 공정으로 공급된다. 그러나 일반적으로 네 등급의 수증기를 동시에 생산하지 않고, 많은 양의 초고압 수증기와 약간의 고압 수증기만 생산하고 낮은 등급의 수증기는 감압 설비, 터빈 발전기 및 유틸리티 터빈을 통해 만든다. 따라서 공장에서 저압 수증기 요구량의 변동을 충족시키기 위해서 공정 장치를 조절하는 경우 다른 등급의 수증기 헤더에 영향을 주기 때문에, 수증기 분배는 항상 저압 수증기 헤더에서 시작하여 중압, 고압, 초고압 순서로 수행하고, 보일러에서의 자기 소모 수증기량, 발전량, 모터와의 관계, 터빈 발전기의 성능을 고려해야 한다.

#### 3-1. 수증기 분배장치의 조작 순서

(1) 저압수증기의 수요변화에 따라서 다음과 같은 순서로 진행한다.

- ① 감압설비3(Dht3)의 유출량을 변동시킨다.
- ② 터빈 발전기의 저압단 추가변동을 한다.
- ③ 고압수증기 헤더(HS header)에서 저압수증기 헤더(LS header)로의 유틸리티 터빈의 구동원을 선택한다.
- ④ 중압수증기 헤더(MS header)에서 저압수증기 헤더(LS header)로의 유틸리티 터빈의 구동원을 선택한다.
- ⑤ 감압설비6(Dht6)의 유출량을 변동시킨다.

각 단계별로 작업을 수행한 후에 헤더의 조건을 충족시켰는지 검사하여 조건이 충족되면 중압수증기 수요변화를 검사하고 조건을 충족시키지 못하면 다음 단계로 넘어간다.

(2) 중압수증기의 수요변화에 따라서 다음과 같은 순서로 진행한다.

- ① 감압설비2(Dht2)의 유출량을 변동시킨다.
- ② 터빈 발전기의 고압단 추가변동을 한다.
- ③ 고압수증기 헤더(HS header)에서 중압수증기 헤더(MS header)로의 유틸리티 터빈의 구동원을 선택한다.
- ④ 중압수증기 헤더(MS header)에서 저압수증기 헤더(LS header)로의 유틸리티 터빈의 구동원을 선택한다.
- ⑤ 감압설비5(Dht5)의 유출량을 변동시킨다.

각 단계별로 작업을 수행한 후에 헤더의 조건을 충족시켰는지 검사하여 조건이 충족되면 고압수증기 수요변화를 검사하고, 조건을 충족시키지 못하면 다음 단계로 넘어간다.

(3) 고압수증기의 수요변화에 따라서 다음과 같은 순서로 진행한다.

- ① 감압설비1(Dht1)과 감압설비4(Dht4)의 유출량을 변동시킨다.
- ② 터빈 발전기(MinorTbn2)의 추가변동을 한다.
- ③ 터빈 발전기(MinorTbn1)의 추가변동을 한다.
- ④ 고압수증기 헤더(HS header)에서 중압수증기 헤더(MS header)로의 유틸리티 터빈의 구동원을 선택한다.
- ⑤ 고압수증기 헤더(HS header)에서 저압수증기 헤더(LS header)로의 유틸리티 터빈의 구동원을 선택한다.

⑥ 고압수증기 헤더(HS header)에서 응축수로의 유틸리티 터빈의 구동원을 선택한다.

⑦ 고압보일러(HS boiler)의 부하량을 변동시킨다.

각 단계별로 작업을 수행한 후에 헤더의 조건을 충족시켰는지 검사하여 조건이 충족되면 초고압수증기 수요변화를 검사하고, 조건을 충족시키지 못하면 다음 단계로 넘어간다.

(4) 초고압수증기의 수요변화에 따라서 다음과 같은 순서로 진행한다.

① 초고압 보일러(SS boiler)의 부하량을 변동시킨다.

② 각 헤더의 균형과 보일러의 부하량이 수렴하면 결과를 출력하고 종료하고 수렴하지 못하면 저압수증기의 수요변화로 돌아간다.

위의 과정들은 Fig. 5에 순서도로 나타내었다.

#### 3-2. 운전지식 베이스에 의한 수증기 분배

Fig. 2에 보인 유틸리티 플랜트의 모터/터빈 부분에 대하여 운전지식 베이스를 이용한 수증기 분배를 실행하였다. 수증기 분배를 위해서 각 헤더별 수증기 변화량만 입력하면 원하는 수증기량을 헤더별로 만족시킬 수 있게 하였다. 유틸리티 플랜트의 현재 조업 상황에 대한 유틸리티 펌프의 구동원과 구동 상황은 Table 1과 같다.

가상적 상황으로서 다음과 같이 수증기 요구량이 변화했을 때 수증기 분배를 실행하였다.

초고압 수증기 : 변화없음

고압 수증기 : 20 t/h 증가

중압 수증기 : 20 t/h 감소

저압 수증기 : 15 t/h 감소

유틸리티 펌프의 구동원 변화에 따른 결과는 Table 2와 같다.

### 4. 수증기 분배 공정의 최적화

운전지식 베이스로부터 얻은 유틸리티 공장의 조업 상황을 기반으로 하여, 목적 함수와 제약 조건을 구성하여 9가지 서로 다른 경우에 대해 최적화를 수행하였다. 최적화에 사용된 프로그램은 MATLAB 7.0로 구현되었으며 80개의 변수와 54개의 식으로 구성되어 있다.

목적함수는 다음과 같이 설정하였다:

$$\min f = C_{water}(m_1 + m_2) + C_{fuel}(m_{77} + m_{78}) \quad (29)$$

위에서  $C_{water}$ 는 공업용수 가격, 그리고  $C_{fuel}$ 은 벙커-C유 가격이다.

제약 조건은 위에서 구한 각 장치의 모델식을 이용한다. 물질수지식은 등식 제약 조건, 에너지 수지식은 부등식 제약 조건으로 한다. 에너지 수지식을 부등식으로 하는 것은 모든 장치의 효율이 100%가 될 수 없기 때문이다.

#### 등식제약조건

$$m_3 + m_9 + m_{15} + m_{17} + m_{19} + m_{21} + m_{24} - m_1 = -b_1$$

$$m_{11} + m_{27} + m_{29} + m_{31} + m_{33} + m_{35} + m_{37} + m_{39} + m_{43} + m_{45} + m_{47} + m_{49} - m_2 - m_{10} - m_{16} - m_{22} - m_{25} = -b_2$$

$$m_{13} + m_{41} + m_{51} + m_{53} + m_{54} + m_{55} - m_7 - m_{12} - m_{18} - m_{28} - m_{30} - m_{44} - m_{46} = -b_3$$

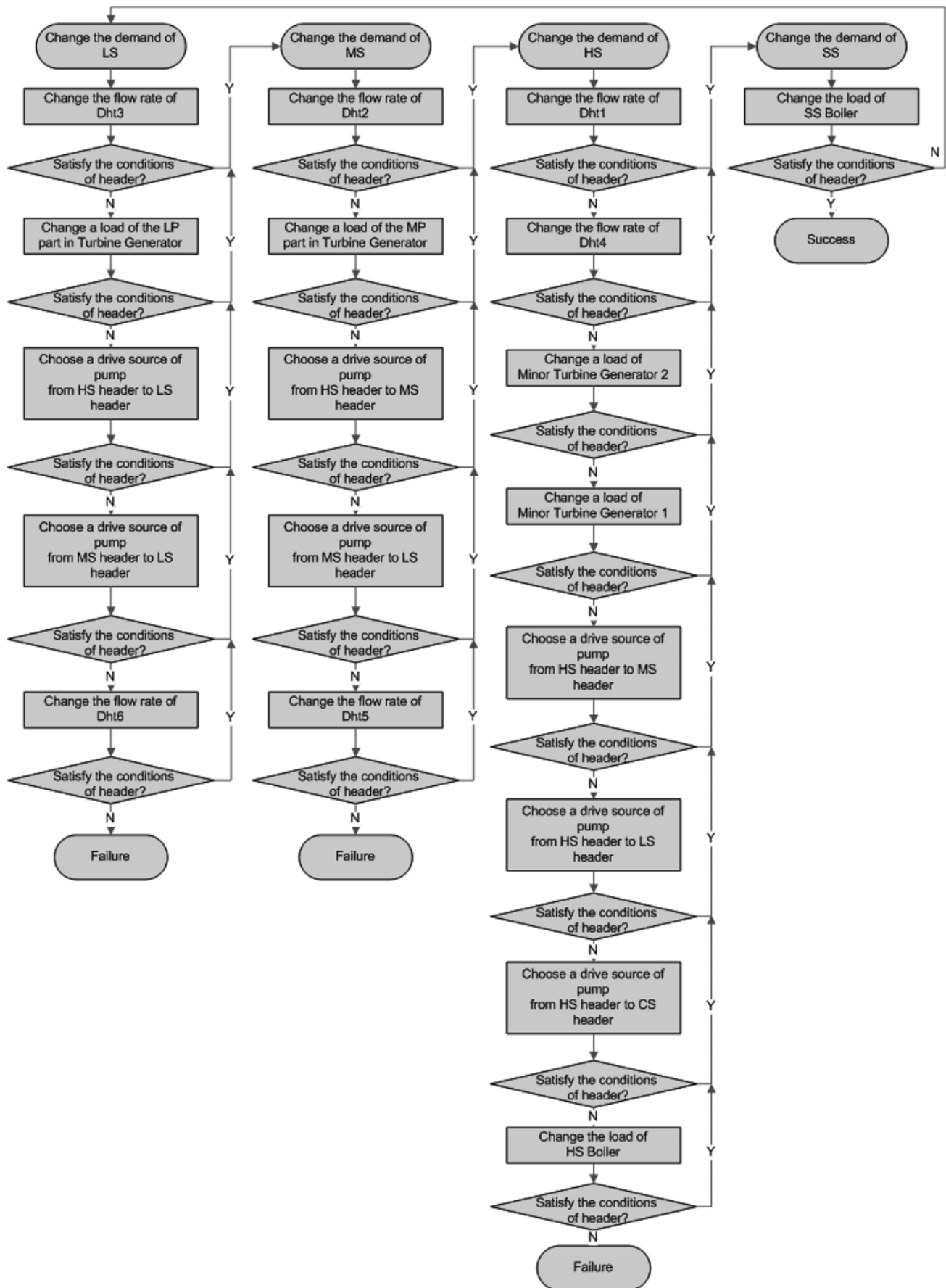


Fig. 5. Operation sequences according to various situations.

Table 1. Specifications of Motor/turbine and driving state

Equipment	Motor/Turbine	Driving state
Mtr 1	1M / 1T	1M / 1T
Mtr 2	2M / 3T	1M / 1T
Mtr 3	1M / 1T	1M / 1T
Mtr 4	2M / 4T	1M / 2T
Mtr 5	4M / 4T	2M / 2T
Mtr 6	1M / 2T	1M / 1T
Mtr 7	4M / 4T	2M / 2T
Mtr 8	2M / 2T	1M / 1T
Mtr 9	3M / 3T	1M / 1T
Mtr 10	3M / 2T	1M / 1T
Mtr 11	2M / 2T	1M / 1T
Mtr 12	3M / 1T	1M / 1T
Mtr 13	2M / 1T	1M / 1T

M : motor / T : turbine

Table 2. The results of knowledgebase

Equipment	Driving state	knowledgebase
Mtr 1	1M / 1T	1M / 1T
Mtr 2	1M / 1T	1M / 1T
Mtr 3	1M / 1T	2M / 0T
Mtr 4	1M / 2T	1M / 2T
Mtr 5	2M / 2T	0M / 4T
Mtr 6	1M / 1T	0M / 2T
Mtr 7	2M / 2T	3M / 1T
Mtr 8	1M / 1T	1M / 1T
Mtr 9	1M / 1T	1M / 1T
Mtr 10	1M / 1T	2M / 0T
Mtr 11	1M / 1T	1M / 1T
Mtr 12	1M / 1T	1M / 1T
Mtr 13	1M / 1T	1M / 1T

M : motor / T : turbine

$$m_{56} + m_{71} - m_8 - m_{14} - m_{20} - m_{32} - m_{34} - m_{36} - m_{38} - m_{40} - m_{42} - m_{50} - m_{60} = -b_4$$

$$m_1 + m_2 + m_{57} - m_{54} - m_{55} - m_{70} - m_{71} = 0$$

$$m_{54} + m_{55} + m_{70} + m_{71} - m_{57} - m_{72} = 0$$

$$m_{62} + m_{63} + m_{64} + m_{65} + m_{66} + m_{67} + m_{68} + m_{69} - m_{61} = 0$$

$$m_{61} + m_{72} - m_{73} = 0$$

$$m_{64} + m_{75} - m_{73} = 0$$

$$m_{58} + m_{59} - m_{60} = 0$$

$$m_1 + m_{58} - m_{74} = 0$$

$$m_2 + m_{59} - m_{75} = 0$$

$$m_3 - m_4 - m_5 - m_6 = 0$$

$$m_7 - m_4 - m_{62} = 0$$

$$m_8 - m_5 - m_{63} = 0$$

$$m_{21} - m_{22} - m_{23} = 0$$

$$m_{24} - m_{25} - m_{26} = 0$$

$$m_{10} - m_{64} - m_9 = 0$$

$$m_{12} - m_{65} - m_{11} = 0$$

$$m_{14} - m_{66} - m_{13} = 0$$

$$m_{16} - m_{67} - m_{15} = 0$$

$$m_{18} - m_{68} - m_{17} = 0$$

$$m_{20} - m_{69} - m_{19} = 0$$

$$m_{27} - m_{28} = 0$$

$$m_{29} - m_{30} = 0$$

$$m_{31} - m_{32} = 0$$

$$m_{33} - m_{34} = 0$$

$$m_{35} - m_{36} = 0$$

$$m_{37} - m_{38} = 0$$

$$m_{39} - m_{40} = 0$$

$$m_{41} - m_{42} = 0$$

$$m_{43} - m_{44} = 0$$

$$m_{45} - m_{46} = 0$$

$$m_{47} - m_{48} = 0$$

$$m_{49} - m_{50} = 0$$

$$m_{51} - m_{52} = 0$$

$$0.069885m_1 - m_{76} = 0.077024$$

$$0.069885m_2 - m_{77} = 0.077024$$

$$0.0106m_1 - m_{53} = 0.0117$$

$$0.13m_1 - m_{54} = 0$$

$$0.038m_1 - m_{55} = 0$$

$$0.004m_1 - m_{56} = 0.044$$

$$0.0927m_1 - m_{57} = 0$$

#### 부등식 제약조건

$$W_{79} - 0.3750m_3 + 0.2470m_4 + 0.1749m_5 + 8.9999 \leq 0$$

$$W_{80} - 0.3420m_{21} + 0.2595m_{22} + 8.1498 \leq 0$$

$$W_{81} - 0.3301m_{24} + 0.2519m_{25} + 7.0584 \leq 0$$

$$m_{62} - 0.03m_4 \leq 0$$

$$m_{63} - 0.03m_5 \leq 0$$

$$m_{64} - 0.0833m_{10} \leq 0$$

$$m_{65} - 0.0641m_{12} \leq 0$$

$$m_{66} - 0.0602m_{14} \leq 0$$

$$m_{67} - 0.0833m_{16} \leq 0$$

$$m_{68} - 0.0162m_{18} \leq 0$$

$$m_{69} - 0.1935m_{20} \leq 0$$

Table 3은 최적화 계산결과를 요약한 것이다. 표에서 알 수 있듯이 9가지 경우 모두에서 최대 10,036 W/h(No.5), 최소 1,969 W/h(No.6)의 비용 절감을 달성할 수 있음을 확인할 수 있다.

## 5. 결 론

수증기 분배를 위해서는 복잡한 조업 지식과 터빈 발전기, 수증기 발생 장치의 분석을 필요로 하기 때문에 정확하고 신속한 수증기 분배에 한계가 있다. 따라서 지금까지 수증기 분배는 현장 조업자의 경험적 지식에 의해 대략적인 수증기 분배가 이루어져 왔다. 본 연구에서는 유틸리티 공장에 대한 최적의 조업 조건 제시하여 신속하고 정확하게 안정적이고 경제적인 수증기 분배를 할 수 있도록 했다. 이를 위해 유틸리티 공장을 수증기 발생 장치와 수증기 분배 장치로 구분하여 각 장치에 대하여 모델링을 하였고 유틸리티 섀프트를 구동시키는 수증기 터빈과 전기 모터의 구동원을 적절히 선

Table 3. The results of optimization

No.	Demand of steam header(t/h)				Before optimization (W/h)	After optimization (W/h)	Difference
	LS	MS	HS	SS			
1	10-	14-	30+	0	247,837	243,771	-4,067
2	10-	12-	13-	40+	248,934	243,625	-5,309
3	5-	8+	6-	22+	253,878	244,021	-9,858
4	0	0	5+	2.5+	247,606	243,603	-4,003
5	0	30+	5-	2-	254,037	244,000	-10,036
6	10+	20+	30-	5+	245,124	243,155	-1,969
7	20+	3.5-	12-	5+	247,626	243,599	-4,027
8	30+	20-	5+	2-	248,895	243,361	-5,534
9	50+	20-	15-	0	248,789	243,381	-5,408

+: increase, -: decrease

택할 수 있도록 하였으며 이를 위해 수증기 유량, 연료 유량, 급수량, 전력 생산량 등을 대상 변수로 선정하고, 유틸리티 모델과 운전 지식 베이스를 바탕으로 하는 최적화 시스템을 구성하였다. 구성된 모터/터빈 최적화 시스템으로부터 각 수증기 사용처에서 요구되는 수증기의 수급변동에 대하여 헤더별로 요구량을 만족시키고 각 장치별로 최적화된 조업 변수들을 얻을 수 있었다. 또한 수증기 요구량의 변화를 통하여 연료 및 급수량의 변화를 파악하고 전산모사 결과 조업 경비가 절감되었음을 확인할 수 있었다.

## 감 사

본 연구는 에너지관리공단 에너지기술 학술진흥사업(2006-000-0000-3314) 과제에 의하여 이루어진 결과의 일부이며 지원에 감사드립니다.

## 사용기호

$b_1$	: balance of SS steam header
$b_2$	: balance of HS steam header
$b_3$	: balance of MS steam header
$b_4$	: balance of LS steam header
$c_i$	: constant of efficiency equation
$C_{water}$	: cost of water [W/t]
$C_{fuel}$	: cost of bunker fuel oil C [W/l]
$f$	: objective function
$H_{air}$	: specific enthalpy of air [kJ/kg]
$H_{fuel}$	: specific enthalpy of fuel [kJ/kg]
$H_i$	: specific enthalpy at position label $i$ [kJ/kg]
$H_{in}$	: specific enthalpy of steam to desuperheater [kJ/kg]
$H_{out}$	: specific enthalpy of steam from desuperheater [kJ/kg]
$H_w$	: specific enthalpy of water to desuperheater [kJ/kg]
$m_{air}$	: mass flow rate of air [t/h]
$m_i$	: mass flow rate at position label $i$ [t/h]
$m_{in}$	: mass flow rate of steam to desuperheater [t/h]
$m_{out}$	: mass flow rate of steam from desuperheater [t/h]
$m_w$	: mass flow rate of water to desuperheater [t/h]
$W$	: electric power amount [MWh]
$\eta_i$	: efficiency of turbine generator

## 참고문헌

1. Maria, T. V. R., "Automate Steam Balance," *Hydrocarbon Process.*, **56**(7), 111-114(1977).
2. Pilavakis, P. A. and Perrin, M. A., "Energy and Capital Savings in a Steam Distribution System," *Hydrocarbon Process.*, **6**(7), 89-93(1983).
3. Bouilloud, Ph., "Compute Steam Balance by LP," *Hydrocarbon Process.*, **48**(7), 127-128(1969).
4. Nath, R., Libby, D. J. and Duhon, H. J., "Joint Optimization of Process Units and Utility System," *Chem. Eng. Prog.*, **82**(5), 31-38 (1986).
5. Poje, J. B. and Smart, A. M., "On-line Energy Optimization in a Chemical Complex," *Chem. Eng. Prog.*, **82**(5), 39-41(1986).
6. Stacy, G. D., Gaines, L. D. and Collis, F., "Optimize Steam System by Computer," *Hydrocarbon Process.*, **60**(10), 75-81(1981).
7. Clark, J. K. Jr. and Helmick, N. E., "How to Optimize the Design of Steam Systems," *Chem. Eng. Prog.*, **76**(11), 116-128(1980).
8. Diaz, M. S. and Bandomi, J. A., "A Mixed Integer Optimization Strategy for a Large Scale Chemical Plant in Operation," *Computers Chem. Engng.*, **20**(5), 531-545(1996).
9. Nishio, M., Shiroko, K. and Umeda, T., "Optimal Use of Steam and Power in Chemical Plants," *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.*, **21**(4), 640-646(1982).
10. Petroulas, T. and Reklaitis, G. V., "Computer-Aided Synthesis and Design of Plant Utility Systems," *AIChE*, **30**(1), 69-78(1984).
11. Maia, L. O. A., Vidal de Carvalho, L. A. and Qassim, R. Y., "Synthesis of Utility Systems by Simulated Annealing," *Computers Chem. Engng.*, **19**(4), 481-488(1995).
12. Nishio, M., Itoh, J., Shiroko, K. and Umeda, T., "A Thermodynamic Approach to Steam-Power System Design," *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.*, **19**(2), 306-312(1980).
13. Soterios A., Papoulias, I. E. G., "A Structural Optimization Approach in Process Synthesis-I," *Computers Chem. Engng.*, **7**(6), 695-706(1983).
14. Lindsley, D., *Boiler Control Systems*, McGraw-Hill(1991).
15. Harrell, G., *Steam System Survey Guide*, DOE(U.S.)(2002).
16. Lee, W. O., "A Study on the Optimal Operation and Modelin of Utility Process," Hanyang Univ.(2002).
17. Yi, H. S., "The Development of Expert System for Steam Distribution in Utility Plant," Hanyang Univ.(2002).
19. Yoo, Y. H., Yi, H. S., Yeo, Y. Y., Kim, M. K., Yang, H. S. and Chung, K. P., "Modeling and Simulation of Distribution Systems in a Petrochemical Plant," *KJChE*, **13**(4), 348-392(1996).