

## Multi-period 조업을 고려한 유틸리티 플랜트의 최적화

이성제 · 이무호 · 장근수 · 한중훈<sup>†</sup>

포항공과대학교 화학공학과, 지능자동화연구센터  
(1997년 12월 19일 접수, 1998년 4월 17일 채택)

## Optimization of A Utility Plant for Multi-period Operations

Sung Je Lee, Moo Ho Lee, Kun Soo Chang and Chonghun Han<sup>†</sup>

Automation Research Center and Department of Chemical Engineering,  
Pohang University of Science and Technology  
(Received 19 December 1997; accepted 17 April 1998)

### 요 약

유틸리티 플랜트는 대규모 정유 및 석유화학 공장에 설치되어 있는 핵심 단위 공장으로 주 공장에서 필요로 하는 스팀과 전력을 생산하여 공급하는 기능을 수행하고 있다. 수시로 변하는 시장 상황과 주 공장의 유틸리티 수요에 능동적으로 대처하며 동시에 에너지 비용을 최소화하기 위해서는 조업 조건을 시간에 따라 최적으로 결정해 주는 실시간 최적화가 필요하다. 본 연구에서는 최적화 변수 선정이 자유로운 열린형식(open form)으로 각 단위 공정모델과 전력 가격의 변화를 반영할 수 있는 최적화 모델을 개발하였다. 열린형식모델과 비선형 최적화 기법을 이용한 유틸리티 플랜트 실시간 최적화 방법을 제시하였으며 사례연구를 통하여 본 논문에서 제시한 방법이 다양한 수요 패턴과 multi-period를 갖는 유틸리티 플랜트의 최적화에 적용될 수 있음을 확인하였다. 사례연구의 최적화 결과로부터 연료와 수전 전력 사용에 따른 운전 비용을 기존 조업 조건 대비 4%에서 8.9%까지 절감할 수 있음을 보였다.

**Abstract**—A utility plant is one of key unit plants in large refinery and petrochemical plants that generates steam and electricity and supplies them to the main plants according to their utility demands. The dynamic market situation has led to the frequent changes of the demands for the steam and electricity. Consequently, the frequent demand changes have led to the frequent changes of the operation conditions of utility plant. This paper proposes a real-time optimization methodology that determines the optimal operation conditions that reduce the energy cost of the utility plant and satisfy the utility demands at the same time. We have developed a utility plant model in open form for its flexibility in selection of decision variables. The case studies have shown that the proposed methodology can be applied to the optimization of a utility plant that has a variety of demand patterns for multi-period operations and energy cost saving can be achieved by 4-8.9% compared with usual operation.

Key words: Utility Plant, Real Time Optimization, Optimal Operation, Multi-period, Cost Saving, Boiler, Steam

### 1. 서 론

정유 및 석유화학 공장과 같은 대부분의 화학 공장은 각 단위 공정에서 필요로 하는 다양한 종류의 에너지를 생산, 공급하는 Fig. 1과 같은 유틸리티 플랜트를 가지고 있다. 새로운 플랜트의 설계나 기존 설비의 조업과정에서 가장 경제적인 스팀과 전력 공급 방법의 결정은 에너지 절감과 장치효율의 극대화 측면에서 매우 중요한 문제라고 할 수 있다. 유틸리티 플랜트는 기본적으로 스팀을 생산하는 보일러와 전기를 생산하는 터빈, 스팀의 중간 공유 장치인 각 헤더(header) 및 letdown 밸브 등으로 이루어져 있으며 각 장치들과 에너지 흐름은 복잡한 네트워크를 구성하므로 유틸리티 플랜트의 최적 조업을 위해서는 단순히 경험에 의존하는 조업으로는 한계가 있으며 보다 체계적인 접근 방법을 필요로 한다. 특히 최근 시장의 상황이 수시로 변화하고 이에 따라 주 공장의 유틸리티에 대한 수요 역시 변화함에 따라 유틸리티 공정의 조업 조건을 그때마다 최적으로 결정해 주는 실시간 최적화가 필요하게 되었다.

유틸리티 플랜트에서 주된 에너지 흐름은 주 공정으로 공급되는 스팀과 전력이다. 유틸리티 플랜트의 최적조업을 위해 가장 중요하고 기본적인 것은 과도한 양의 스팀 생산을 원천적으로 피하는 것이다. 주로 헤더나 탈기에서 공기 중으로 배출하는 스팀의 양을 최소화하는 방법으로 스팀의 열역학적 수지식을 계산하여 필요 이상의 스팀을 생산하지 않도록 최적으로 배분하는 것이다[1]. 이러한 열역학적 수지식의 계산을 통해 현재 조업 중인 공정에 대해서 구체적인 대안 조업을 제시한 사례도 발표되었다[2]. 또한 공장에서 요구하는 전력량이 시간과 조업 형태에 따라 변화하므로 이런 수요를 충족시키기 위한 최적 운전 조건 역시 변화하게 되며, 전력의 경우 외부 전력

<sup>†</sup>E-mail: chan@vision.postech.ac.kr

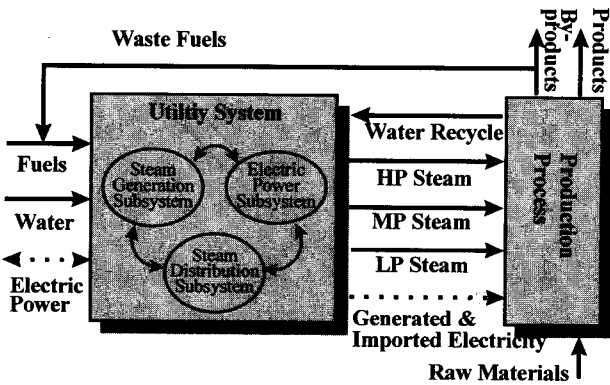


Fig. 1. General representation of a utility system.

회사로부터 구입하기도 하는데 수전되는 전기 가격은 시간에 따라, 사용량에 따라 변한다[3]. 그러므로 유틸리티 수요와 조업에 따라 하루에도 여러 차례 최적화를 수행하여야 한다.

유틸리티 플랜트의 조업 최적화나 디자인 문제에 대해 크게 두 가지 접근 방법이 연구되었다. 첫 번째 방법은 유틸리티 플랜트 자체가 보일러, 터빈 등 열역학적 효율을 갖는 장치들로 구성되어있으므로 이들의 열역학적 효율을 분석하여 최대 효율을 낼 수 있도록 조업 조건이나 장치를 선택해 주는 방법이다[4-6]. 그러나 이 방법은 사용하기 편리하고, 직관적으로 이해가 쉬운 반면, 일반화가 힘들고 시스템을 체계적으로 분석하기가 어려운 단점을 지니고 있어 실시간 최적화에 적용하기에는 부적합한 면이 있다. 두 번째 접근 방법은 물질, 에너지 수지식 및 공정 특성식들로 구성된 수식 모델과 최적화 방법을 이용하는 것으로 공정 전체를 체계적으로 분석, 최적화 할 수 있는 장점이 있어 대부분의 실시간 유틸리티 플랜트 최적화에 사용되고 있는 방법이다. 구성 모델식의 형태와 최적화 방법에 따라 선형[7], 비선형[8], 혼합정수선형[9], 혼합정수비선형[10] 최적화방법을 사용하고 있다.

본 연구에서는 유틸리티 플랜트에 대한 스팀과 전력 수요의 변화와 전력 가격 변동을 고려한 공정 최적화를 통해 운전 비용을 최소화하는 유틸리티 플랜트 실시간 최적화 방법을 제시하고자 한다.

## 2. 유틸리티 플랜트의 최적화

유틸리티 플랜트를 구성하고 있는 여러 장치들은 서로 상호작용을 하고 있기 때문에 단지 경험과 조업 규칙에만 의존해 최적으로 운전을 하는 것은 매우 어려운 문제이며 가장 효율적인 해결책은 온라인 컴퓨터 시스템에 의한 최적화 방법이다. 1980년대 이후 최적화 기술과 컴퓨터 시스템의 발달로 유틸리티 플랜트에도 실시간 최적화 기술이 적용되기 시작했다. 열시스템과 전력 시스템이 통합된 유틸리티 공장에서 최적의 효율을 얻기 위해서는 필요한 전력량을 공급하면서 공장의 에너지 비용을 최소화하여야 한다. 그러므로 공정에 대한 물질 수지, 에너지 수지를 묘사함으로써 정상상태에서의 효율을 정확히 계산하여 에너지 효율을 높이는 연구사례가 제시되었다[8]. 또한 실시간 최적화 기술을 스팀 수지 최적화에 적용해 보일러에 들어가는 연료의 양을 최소화하여 에너지 비용을 절감할 수 있는 최적의 보일러와 터빈 조합을 찾는 방법도 발표되었다[11].

결국 유틸리티 플랜트는 주 공정에 스팀과 전력을 공급해 주어야 하는 만큼 두 시스템을 동시에 고려해서 최적화를 하는 것이 우수한 결과를 가져오며[12] 시간에 따라 변화하는 수요와 에너지 비용 변화를 고려하여 에너지 수급 스케줄을 결정하는 방법도 고려되어야 한다[13].

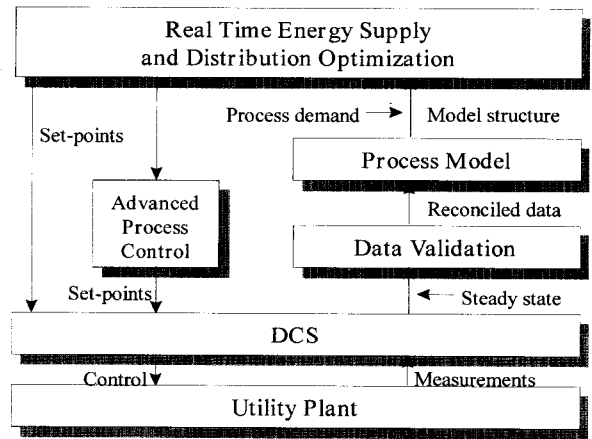


Fig. 2. Real time optimization system for a utility plant.

실시간 최적화를 유틸리티 플랜트로 적용하기 위해서는 Fig. 2에서 보는 바와 같이 측정된 데이터들을 분산제어시스템(Distributed Control System, DCS)에서 받아들여 연료의 공급 상태와 각 단위 공정에서의 스팀 수배급 상태가 정상상태(steady state)임을 판별하여 총괄 오차 제거(gross error detection)나 데이터 보정(data reconciliation) 등과 같은 데이터 검증 단계를 거치게 된다. 그리고 보일러 및 터빈의 특성을 나타내는 파라미터와 모델의 개선을 통해 공정을 정확히 나타낼 수 있는 모델을 구성한 다음 최적화 계산을 수행한다. 최적화에 의한 결과는 공정이 정상상태에 있는지를 확인한 다음 DCS에 새로운 설정값(setpoint)으로 내려가게 된다[14]. 이러한 과정을 수요의 변화나 전력의 비용 변화가 있을 때마다 자동적으로 수행하게 됨으로써 항상 운전 비용이 최소의 상태가 되도록 조업을 유지하게 된다.

### 2-1. 대상 유틸리티 플랜트의 개요

먼저 실시간 최적화를 구현하기 위한 대상 공정을 살펴보면 다음의 Fig. 3에서 제시한 유틸리티 플랜트와 같다. 그 구성으로는 오일 전소 방식의 고압 보일러와 추가 복수식의 스팀 터빈 발전기 36MW급으로 되어 있다. 그리고 급유, 집진, 복수, 급수 설비 등으로 구성되어 있다. 공정으로 공급해 주어야 하는 유틸리티는 크게 전력과 스팀이다. 이 시스템에서는 4.2(high pressure steam), 1.05(medium pressure steam), 그리고 0.35(low pressure steam) MPa의 압력이 다른 세 종류의 스팀을 공정으로 공급하고 있다. XP(high-high pressure steam) 스팀 헤더의 경우 10.2 MPa의 압력에서 490-510 °C의 온도가 조업 영역이며 각 헤더의 온도도 일정한 범위내에서 변한다. 이때 최적의 온도는 수리 계획법에 의한 최적화 과정에서 구해진다. 정상 조업에

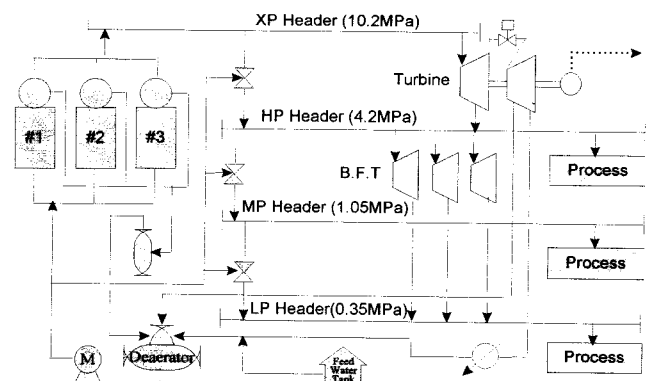


Fig. 3. A typical utility plant.

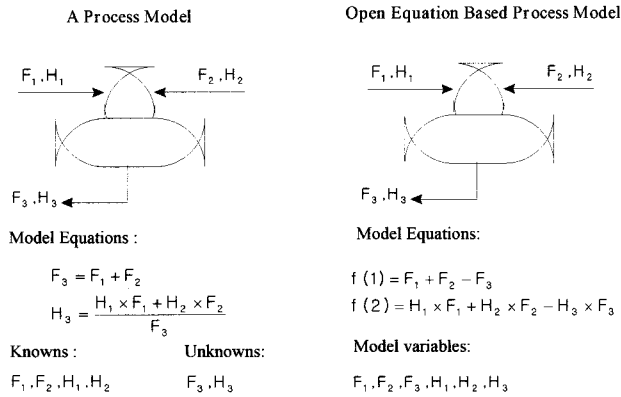


Fig. 4. Closed form model vs. open form model.

서의 압력의 변화는 크지 않은데 비해 온도는 헤더에서 스팀의 유입량에 따라 비교적 많은 차이를 보이기 때문에 스팀량을 결정 변수로 고려할 때 온도도 최적화 변수로 함께 고려해 주어야 한다.

전력의 수요량이 정해지면 모델내에서 필요한 전력량을 생산할 수 있도록 터빈 모델식에서 필요한 스팀량과 터빈의 효율을 함께 결정한다. 유틸리티 플랜트의 주요 구성 요소인 각 단위 공정의 모델링은 물리적 화학적 현상과 실제 조업 데이터를 이용하여 개발하였다. 전력 수요량에 대해서는 자체 생산량이 부족할 경우 한국전력과 같은 외부 공급체로부터 구입할 수 있다.

## 2-2. 최적화를 위한 모델링 방식

실시간 최적화 문제의 구성은 모델링 방식에 따라 닫힌형식(closed form)과 열린형식(open form)의 두 가지로 구분될 수 있다. 닫힌형식의 경우 비교적 쉽게 모델을 구성할 수 있는 장점이 있지만 재순환 흐름이 많고 모델이 커질 경우 체계적으로 다루기 힘들어 지는 단점이 있다. 무엇보다도 열린형식으로 모델을 구성하면 최적화 변수의 선정이 자유롭기 때문에 전력과 함께 어떤 종류의 스팀 수요가 발생하든지 또 어느 부분에서 공정내의 변화가 일어나든지 상관없이 능동적으로 최적화를 달성할 수 있는 큰 장점이 있다. Fig. 4에서와 같이 열린형식에 의한 모델로 구성할 경우 최적화 변수들이 없어지기 때문에 실시간 최적화에서 요구하는 다양한 변화에 보다 유연하게 대처할 수 있게 된다. 반면, 닫힌형식의 모델은 결정 변수와 식의 수에 따라 자유도에 의해 계산되는 변수 등이 정해져 다양한 수요에 따라 결정 변수를 자유롭게 선택하기 어렵기 때문에 자유로운 변수 선정을 요구하는 실시간 최적화 경우에는 적용에 어려움이 있다. 또한 데이터 보정을 위해서는 열린형식의 모델이 필요하므로 최적화를 위한 모델을 그대로 데이터 보정에 사용할 수 있어 경제적이다. 따라서 실시간 최적화를 적용하기 위해서는 열린형식에 의한 모델의 구성이 필요하다. Table 1에 닫힌형식과 열린형식 모델의 차이점을 나타내었다.

## 2-3. 최적화 문제의 구성

Table 1. Characteristics of open form model

Advantages	1. Simultaneous simulation, data reconciliation and optimization 2. No recycle streams to converge 3. More flexible in the selection of decision variable
Disadvantages	1. Problem size is bigger than closed model 2. Difficult to guess initial value

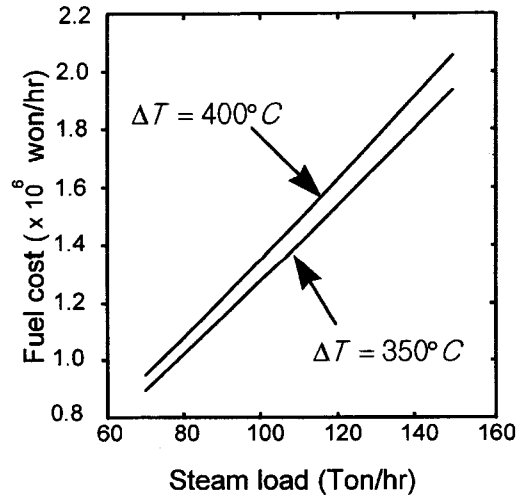


Fig. 5. Cost variation according to steam load change.

( $\Delta T$ : The temperature difference between the boiler feed water and the generated steam)

유틸리티 플랜트의 최적화를 위해서는 주 공정에서 필요로 하는 스팀과 전력량을 만족시켜 주어야 하며 에너지 비용을 최소화할 수 있는 최적 조업 조건을 결정해 주어야 한다. 스팀 배분 시스템의 특성상 스팀의 압력은 변화 폭이 넓지 못하기 때문에 최적화 문제를 단순화하기 위해 각각의 평균값으로 압력을 고정시키고 온도와 유량만을 최적화 변수로 정하였다. 목적 함수로는 식 (1)에서와 같이 총 스팀 생산비용과 수전 전력 비용을 최소화하도록 구성하였다. 이때 스팀 생산비용 산정에 있어서 XP header와 boiler feed water(BFW)의 온도가 운전 비용에 중요한 비중을 차지함을 Fig. 5를 통해 알 수 있다. 전력을 자체 생산하거나 외부로부터 구매할 수 있는 본 공정의 경우 시간과 계절에 따라 변화하는 전력 가격을 정확히 최적화에 고려해 주어야 한다. 그러나 기존의 논문[12, 20]에서는 대부분 전력 가격 변화를 고려해 주어야 한다고 주장은 하고 있지만 체계적으로 고려해 준 경우는 없었다. 본 논문에서는 이러한 전력 가격 변화를 효과적으로 반영한 multi-period 유틸리티 플랜트 최적화 방법을 제시하고자 한다.

수전 전력의 요금은 식 (3)의 기본 요금(base cost)에 식 (4)의 사용 요금(usage cost)을 합한 금액으로 계산된다. 기본 요금은 수전 전력의 최고치가 계약 전력의 하한치 이하일 경우와 그 이상일 경우로 나누어서 정하고, 사용 요금은 계절별, 또는 시간별로 차등을 두어 적용하게 된다. 기본 요금에서 계약 전력은 대체적으로 수전 가능량의 30% 정도를 기본 요금의 하한치로 설정한다. 따라서 이때 30% 미만으로 사용한 전력은 기본 요금의 하한치를 사용한 것으로 적용하고, 그 수치를 넘어서 사용할 경우 실제 최고치를 적용하여 요금을 계산하게 된다. 월별 및 시간별 사용 요금은 Table 2에서와 같이 다소 차이를 보인다.

$$\text{Minimize } \text{TSC} + \text{BPC} + \text{UPC} \quad (1)$$

$$\text{TSC} = C_{\text{steam}} \times (H_{\text{XP}} - H_{\text{bfw}}) \times F_{\text{total}} \quad (2)$$

$$\text{BPC} = Y_1 \times 27.0 \times C_{\text{base}} + Y_2 \times P_2 \times C_{\text{base}} \quad (3)$$

Table 2. Purchased electricity cost with time and season

	Summer	Spring, fall	Winter
Midnight	25 Won/KW	25 Won/KW	25 Won/KW
Daytime	55 Won/KW	40 Won/KW	45 Won/KW
Night	80 Won/KW	55 Won/KW	60 Won/KW

$$UPC = Y_1 \times P_1 \times C_{usage} + Y_2 \times P_2 \times C_{usage} \quad (4)$$

$P_1, P_2$ 는 식 (5)와 (6)에서 나타난 바와 같이 각각 수전되는 전력이 27 MW이하일 경우와 27 MW이상 90 MW이하일 경우의 전력량으로 구분해 주는 변수이다.

$$P_1 \leq 27.0 (\text{계약 수전 전력} \times 30\%) \quad (5)$$

$$27.0 \leq P_2 \leq 90.0 (\text{계약 수전 전력}) \quad (6)$$

$P_1, P_2$ 는 동시에 선택될 수 없으므로 0과 1의 값만 가지는 이산 변수  $Y_1, Y_2, Y_3$ 를 도입하여 각각 외부로부터 수입하는 전력의 양이 27 MW 이하일 때, 27 MW이상 90 MW이하일 때, 그리고 수전되는 전력이 없을 경우를 표현할 수 있도록 구성하였다. 그런데, 정수 변수를 도입할 경우 혼합정수비선형 최적화 문제를 풀어야 하므로 계산 시간을 줄이고 문제를 간단히 하기 위하여 본 연구에서는 다음의 식 (7)부터 (11)까지의 조건식을 추가하여 일반적인 비선형 계획법(Non-linear Programming, NLP) 문제로 전환, 구성하였다.

$$Y_3 \times (P_1 + P_2) = 0 \quad (7)$$

$$Y_1 \times Y_2 = 0 \quad (8)$$

$$Y_1 \times Y_3 = 0 \quad (9)$$

$$Y_1 + Y_2 + Y_3 = 1 \quad (10)$$

$$Y_1, Y_2, Y_3 \geq 0 \quad (11)$$

주 공정으로 공급해 주어야 하는 총 전력량  $P_{demand}$ 은 유틸리티 플랜트의 터빈에 의해 생성되는  $P_{generated}$ 와 외부로부터 공급받는 양의 합보다는 같거나 작아야 한다.

$$P_{generated} + Y_1 \times P_1 + Y_2 \times P_2 \geq P_{demand} \quad (12)$$

위의 조건으로 수전 전력이 필요 없이 자체 생산 전력만으로 충분할 경우  $Y_1=Y_2=0$ 이 되어 수전 전력에 의한 비용은 없게 되며, 계약 전력의 30%내의 사용량일 경우  $Y_2=Y_3=0$ 이 되어  $Y_1=1$ 이 되는 목적 함수가 계산되고, 또한 30%이상 사용할 경우에는  $Y_1=Y_3=0$ 이 되어  $Y_2=1$ 이 되는 경우에 대해 수전 전력에 대한 비용을 계산하게 된다.

물질 수지식과 에너지 수지식으로 표현되는 나머지 스팀 수배급에 대한 제약 조건은 다음과 같다.

$$\sum k_i F_i^n = 0 \quad (13)$$

$$\sum k_i H_i^n F_i^n = 0 \quad (14)$$

$$F_i^n \geq D_n \quad (15)$$

$n$ 은 단위공정을  $i$ 는 각 스트림을 나타낸다.  $k_i$ 는 각 스트림의 특성을 나타내며 입력인 경우 1, 출력인 경우 -1을 나타낸다. 식 (13)은 단위 공정들의 물질 수지식을 식 (14)는 에너지 수지식을 나타낸다. 압력 조건이 고정되어 있으므로 엔탈피값은 온도에 대한 선형식으로 근사하였다. 식 (15)는 공정에서 필요로 하는 스팀의 양을 수요량 이상 만족시켜야 하는 조건이다.

$$F_L \leq F_n \leq F_U \quad (16)$$

$$T_L \leq T_n \leq T_U \quad (17)$$

식 (16)과 (17)은 단위 공정이 가지는 물리적인 한계를 의미하며, letdown valve의 용량이라든지 터빈 입구와 출구의 용량 등을 나타내며 각 헤더에서 허용할 수 있는 온도의 범위를 나타내기도 한다. 각 단위 공정의 보다 자세한 수리 모델은 논문[15, 16]에 소개되었다. 단위 공정의 특성이 지속적으로 변화하는 부분인 보일러와 터빈의 효율 등에 대해서는 실험식에 근거한 파라미터를 갖는 모델을 추가하여 주기적인 파라미터 개선을 통해 공정 모델이 가능한 정확히 실제 공정을 나타낼 수 있도록 하였다.

Table 3. Summary of constructed optimization problem

Number of equations	72
Number of variables	85
Number of parameters	8
Number of constraints	29

Table 3에서는 본 연구에서의 대상 공정이 된 실제 화학 공장에 설치된 유틸리티 플랜트를 최적화 문제로 구성하는데 필요한 최적화 변수와 관계식, 그리고 파라미터의 개수 등을 나타내었다.

## 2-4. 최적화를 위한 데이터 검증

본 연구에서는 대상 공정이 정상상태에 있을 경우에 대한 모델링과 최적화를 하였다. 정상상태에 도달했는지를 확인한 후 데이터를 검증하기 위해서는 총계 오차 제거와 데이터 보정을 하게 된다. 총계 오차는 계측 장치들의 부정확한 영점 조정이나 라인의 누수, 기기의 오동작 등의 원인에 의해 일어나게 된다. 특히 데이터를 읽어들이는데 있어서 잡음에 비하면 상당히 큰 오차의 원인이므로 제거해 주어야 한다. 불확실한 공정 데이터를 제거하고 장치에서 스팀 수배급에 대한 물질 수지를 만족시켜 주도록 데이터 보정을 최적화 단계 이전에 수행한다. 유틸리티 플랜트의 경우 주로 유량과 온도를 측정하므로 데이터 보정은 다음과 같은 목적 함수를 갖게 된다.

$$\text{Minimize } (F - \hat{F})^T Q_F^{-1} (F - \hat{F}) + (T - \hat{T})^T Q_T^{-1} (T - \hat{T}) \quad (18)$$

$\hat{F}, \hat{T}$ 는 유량과 온도의 측정값의 벡터이며  $Q_F, Q_T$ 는 유량과 온도의 측정값의 공분산 행렬(covariance matrix)로 최적화의 가중치 역할을 한다[17]. 대상 공정이 선형인 경우에는 반복 계산이 없이 비교적 간단하게 풀 수 있지만[18] 비선형인 경우에는 선형 근사를 하여 풀거나 복잡한 수치 계산 방법에 의존해야 한다. 따라서 유틸리티 플랜트와 같이 시스템이 크고 복잡한 경우에 전체 시스템을 몇 개의 작은 부시스템으로 나누어 데이터 보정하는 계층적 분해 방법이 좋은 결과를 보여 주었다[19].

## 3. 사례연구

### 3-1. 시간에 따른 수요 패턴의 변화

본 사례연구에서는 앞서 제시한 수리모델의 타당성을 시간과 수요의 변화에 따라 단계별로 검증하고 최소의 비용으로 유틸리티 플랜트를 운전하는 방안을 제시한다. 이를 위해 실시간 조업에서 유틸리티 수요가 변할 경우 최적 조업 조건을 찾아 에너지 비용을 절감할 수 있는 사례연구를 하였다. 실시간 최적화는 시시각각 변화하는 모든 상황들을 고려해 주어야 하지만, 모든 경우를 고려하는 것은 매우 어려운 일이므로 본 사례연구에서는 스팀의 수요가 크게 바뀌는 세 가지 경우를 선정하여 제시한 최적화 방법을 적용하였다. 세 가지 수요변화 패턴을 살펴보면 다음과 같다. 패턴 1에서는 HP스팀에 대한 수요가 터빈의 추기 부분의 최대 용량보다 매우 적은 경우이며 대체적으로 스팀 수요가 적을 때이며, 패턴 2에서는 HP스팀에 대한 수요가 터빈의 추기 부분의 최대 용량과 거의 비슷하면서 MP스팀의 수요가 LP스팀의 수요보다 많은 경우이고 패턴 3에서는 HP스팀 수요는 패턴 2와 같으나 LP스팀의 수요가 MP스팀의 수요보다 많은 경우이다. Table 4에서는 이에 대해 좀더 자세한 수요량을 나타내었다.

유틸리티 플랜트의 운전 비용은 스팀을 생산하는데 필요한 비용과 외부로부터 구매하는 전력 비용을 합한 비용이다. 그러므로 자체 터빈을 운전할 경우의 에너지 비용과 외부로부터 구입할 경우의 비용

Table 4. Steam and electricity demand patterns

	HP Steam	MP Steam	LP Steam	Power
Pattern 1	67,550 kg/hr	8,495 kg/hr	10,300 kg/hr	40/50 MW
Pattern 2	172,420 kg/hr	13,290 kg/hr	5,908 kg/hr	40/50 MW
Pattern 3	172,420 kg/hr	24,041 kg/hr	46,411 kg/hr	40/50 MW

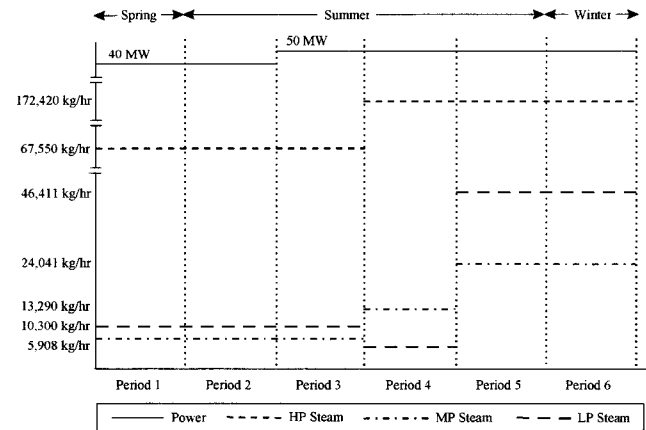


Fig. 6. Process demand changes for multi-period.

을 비교 판단하여 최소의 전력 비용을 계산할 수 있으며 최적화 과정을 통해 생산해야 할 전력량과 구입해야 하는 전력량이 결정된다. Fig. 6은 스팀과 전력 수요의 계절 변화와 수요 변화에 따른 추이를 나타낸 것이다. Period 1의 경우 봄철로 스팀수요는 패턴 1을 따르며, 전력 수요는 40 MW가 된다. 또한 period 4의 경우 여름으로 스팀 수요는 패턴 2를 따르며, 필요한 전력 수요량은 50 MW가 된다.

### 3-2. 실시간 최적화 결과

계절과 같은 긴 시간대의 수요 변화만 있는 것이 아니라 심야, 오후, 저녁 시간대에 따라서 수입해 오는 전력의 비용이 다르기 때문에 짧은 시간대의 최적화도 필요하다. 이렇게 다양하게 변하는 상황에 능동적으로 대처하면서 경제성을 고려하기 위해서는 실시간 최적화 기술의 적용이 필수적이며 유틸리티 플랜트에 실시간 최적화가 적용되었을 경우 운전 비용절감 효과를 어느 정도 가져올지를 Fig. 6의 상황을 토대로 분석해 보고자 한다.

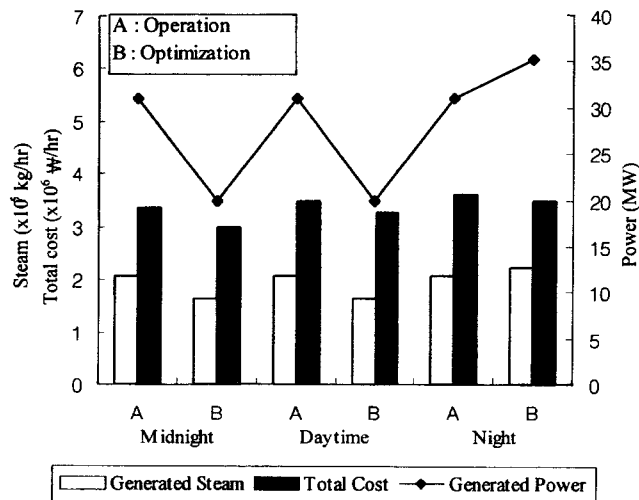


Fig. 7. Optimal operation results for period 1.

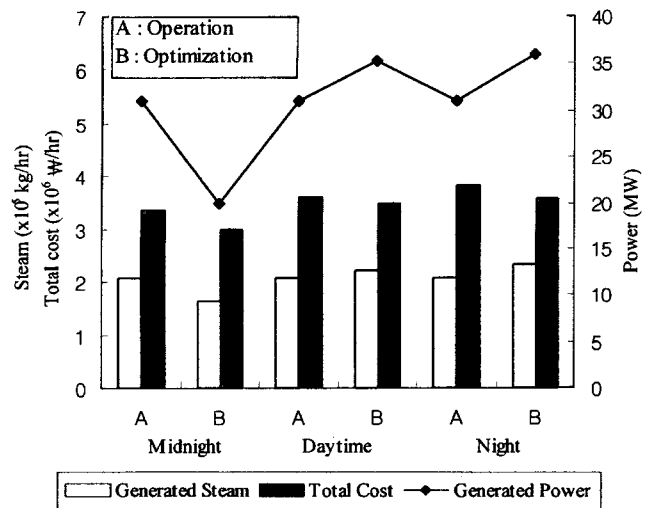


Fig. 8. Optimal operation result for period 2.

Fig. 7부터 12의 결과는 Fig. 6의 긴 시간대의 변화를 기준으로 일 시간으로 조업을 개선하여 최적화할 경우 얻게 되는 이익을 나타낸 것이다. 일반적으로 심야 시간대와 봄, 가을 그리고 겨울의 주간대에는 수입해 오는 전력의 단가가 저렴하기 때문에 주 공정에서 필요로 하는 스팀을 생산, 공급하고 터빈의 가동률을 최적으로 함으로써 총 비용을 절감할 수 있다. 여름 주간시간대와 봄, 가을 그리고 겨울의 저녁시간대에서는 스팀을 좀더 생산하여 터빈에서 생산하는 전력의 양을 좀더 늘려주고 외부로부터 수입해 오는 양을 조금 늘리는 방법으로 운전 비용을 절감할 수 있다.

Period 1과 2에 대한 최적화 결과를 Fig. 7과 8에 각각 나타내었다. Fig. 7과 8을 비교해 보면 봄 가을철(Fig. 7) 주간시간대에 비해 여름(Fig. 8) 주간시간대의 경우는 스팀 생산량을 늘려 터빈을 통해 자체 전력 생산을 최대로 해 주는 것이 비용 측면에서 보면 오히려 저렴한 것을 볼 수 있다. 또, 같은 여름 주간 시간대라고 하더라도 HP스팀을 비롯한 전체 스팀 수요량이 늘어나는 패턴 2의 경우(period 4)에는 Fig. 10에서와 같이 터빈으로부터 생산하는 전력의 양이 줄어들어 period 3(Fig. 9)의 경우 보다 자체 생산하는 전력은 줄어드는 것을 볼 수 있다. Fig. 11은 여름철의 LP스팀의 수요량이 MP스팀의 수요량보다 많은 경우(period 5)로 겨울철(period 6)인 Fig. 12와 비교하

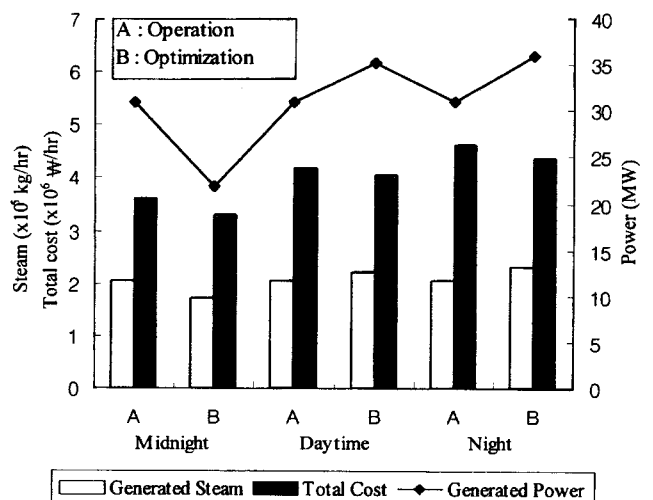


Fig. 9. Optimal operation result for period 3.

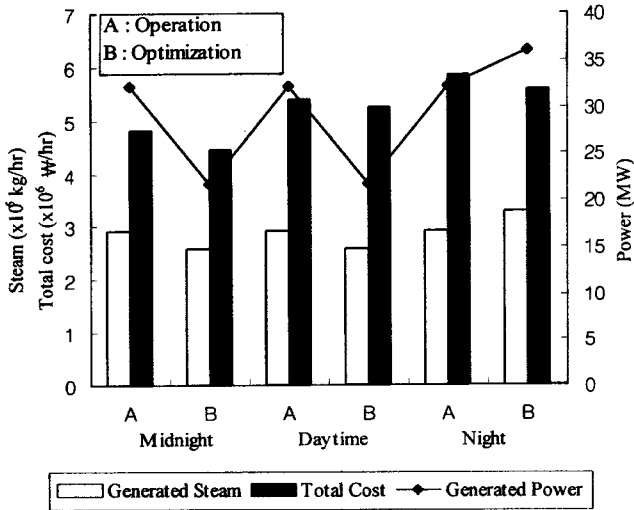


Fig. 10. Optimal operation result for period 4.

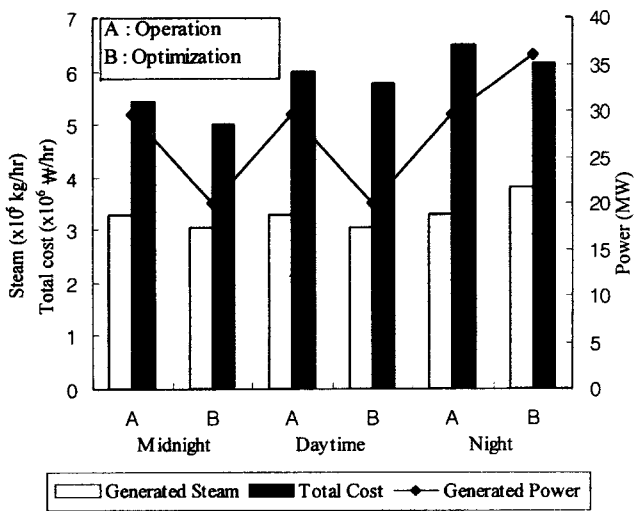


Fig. 11. Optimal operation result for period 5.

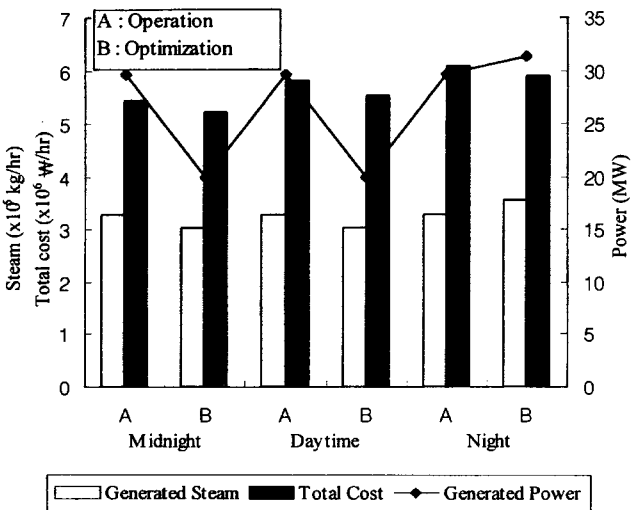


Fig. 12. Optimal operation result for period 6.

여 보면, 수전 전력 단가가 가장 높은 여름의 저녁시간대는 터빈의 최대 용량에 맞춰 운전하는데 비해 겨울 저녁 시간대는 구매 전력 비

Table 5. Comparisons of operating costs between operating and optimized unit (unit : Million Won/day)

	Period 1	Period 2	Period 3	Period 4	Period 5	Period 6
Operating cost	113.4	115.4	128.8	96.7	188.9	185.6
Optimized cost	103.6	106.0	120.0	88.1	177.4	178.2
Cost saving(%)	8.7	8.1	6.6	8.9	6.1	4.0

용과 자체 생산에 의한 비용에 따라 적절한 양이 선택되는 것을 볼 수 있다.

실시간 최적화에 따른 운전 비용 절감 효과를 Table 5에 나타내었다. 이로부터 하루에 최소한 3번 이상의 최적화를 수행해야 함을 알 수 있으며, 기간별로 4%에서 8.9%까지 에너지 절감이 가능함을 확인하였다.

## 4. 결 론

본 논문에서는 유틸리티 플랜트의 운전 비용 감소를 위해 운전 비용 중 가장 큰 비중을 차지하는 에너지 사용 비용을 실시간으로 최소화하는 방법을 제시하였다. 시간에 따라 변화하는 스팀 및 전기 수요를 만족시키며 동시에 에너지 비용을 최소화하는 최적 운전 조건을 비선형 계획법에 기반한 실시간 최적화 방법을 통해 구해 주었다. 변수 선정이 자유롭고 데이터 보정에 유리한 열린형식으로 모델을 구성하였으며 특정 단일 공정에 대해서는 실험식에 근거한 모델을 통해 보다 실제 공정의 특성을 잘 나타내도록 하였다. 외부 전력 가격의 변동 사항을 유틸리티 플랜트 실시간 최적화에 성공적으로 반영시키기 위하여 비선형 전력 비용 모델을 구성하였다. 사례연구를 통해 제시한 방법이 다양한 유틸리티 수요의 변화와 전력 가격 변동을 수반하는 multi-period 조업에 대해 에너지 비용 절감 효과가 있음을 확인할 수 있었다. 현장 상황을 근거로 조업 최적화를 하였지만 본 연구 결과가 현장에 적용되기 위해서는 데이터 검증, 최적화의 강건성, 데이터 입출력 및 조업자를 위한 그래픽 환경 등에 대한 연구가 필요하다.

## 감 사

본 연구를 위해 재정적 지원을 해 주신 통상산업부 에너지자원기술개발지원센터와 포항공과대학교 공정산업의 지능자동화 연구센터, 한국과학재단(과제번호 : 961-1110-062-2)에 감사를 드립니다.

## 사용기호

- BPC : purchased electric power base cost [won/hr]
- $C_{base}$  : base electricity cost [won/MW]
- $C_{steam}$  : steam cost [won/kJ]
- $C_{usage}$  : used electricity cost [won/MW]
- D : steam demand [kg/hr]
- F : steam flowrate [kg/hr]
- $F_{total}$  : generated steam amount [kg/hr]
- H : steam enthalpy [kJ/kg]
- $H_{bfe}$  : boiler feed water enthalpy [kJ/kg]
- $H_{xp}$  : generated steam enthalpy [kJ/kg]
- i : stream number
- $k_i$  : index for input and output stream
- n : unit process number

$P_1$  : purchased electricity amount from 0 to 27 [MW]  
 $P_2$  : purchased electricity amount from 27 to 90 [MW]  
 $P_{demand}$  : power demand [MW]  
 $P_{generated}$  : power generation by turbine [MW]  
 $Q$  : covariance matrix  
 $T$  : steam temperature [ $^{\circ}\text{C}$ ]  
 $TSC$  : total steam generation cost [won/hr]  
 $UPC$  : purchased electric power usage cost [won/hr]  
 $Y_1, Y_2, Y_3$  : binary interger variable

### 참고문헌

- Pilavakis, P. A. and Perrin, M. A.: *Hydrocarbon Processing*, **July**, 89(1983).
- Nath, R. and Holliday, J. F.: *Mechanical Engineering*, **February**, 44(1985).
- Poje, J. B. and Smart, A. M.: *Chemical Engineering Progress*, **May**, 39(1986).
- Chou, C. and Shih, Y.: *Ind. Eng. Chem. Res.*, **26**, 1100(1987).
- Nishio, M., Itoh, J., Shiroko, K. and Umeda, T.: *Ind. Eng. Chem. Proc. Dev.*, **19**, 306(1980).
- Nishio, M., Koshijima, I., Shiroko, K. and Umeda, T.: *Ind. Eng. Chem. Proc. Dev.*, **24**, 19(1985).
- Boulilloud, P.: *Hydrocarbon Processing*, **Aug.**, 127(1969).
- Foster, D.: *Proc. Instn. Mech. Engrs.*, **201**, A3, 201(1987).
- Marechal, F. M. and Kaitventzeff, B.: *Comp. Oriented Proc. Engng.*, 185(1991).
- Petracci, N. C., Brignole, E. A. and Eliceche, A. M.: *Comp. Oriented Proc. Engng.*, 387(1991).
- Takeshita, T., Fujita, K. and Natori, Y.: IFAC Advanced Control of Chemical Processes, Kyoto, Japan, 143(1994).
- Nath, R., Libby, D. J. and Duhon, H. J.: *Chemical Engineering Progress*, **82**, May, 31(1986).
- Papalexandri, K. P., Pistikopoulos, E. M., Kalitventzeff, B., Dumont, M. N., Urmann, K. and Gorschluter, J.: *Computers chem. Engng.*, **20**, Suppl., S763(1996).
- Lee, S. J. and Han, C.: *ICASE Magazine*, **3**, 13(1997).
- Lee, S. J., Lee, M. H., Chang, K. S. and Han, C.: *HWAHAK KONG-HAK*, **36**, 415(1998).
- Lee, S. J.: MS Thesis, Pohang University of Science and Technology, Pohang(1998).
- Lee, M. H., Han, C. and Chang, K. S.: *Theories and Applications of Chem. Eng.*, **3**, 257(1997).
- Tamhane, A. C. and Mah, R. S. H.: *Technometrics*, **27**, 409(1985).
- Lee, M. H., Lee, S. J., Han, C., Chang, K. S., Kim, S. H. and You, S. H.: *Computers chem. Engng.*, **22**, S247(1998).
- Yoo, Y. H., Yi, H. S., Yeo, Y., Kim, M. K., Yang, H. S. and Chung, K. P.: *Korean J. Chem. Eng.*, **13**, 384(1996).