

계층적 방법에 의한 유틸리티 플랜트 조업 최적화

이성제 · 이무호 · 장근수 · 한중훈[†]

포항공과대학교 화학공학과, 지능자동화연구센터
(1997년 12월 16일 접수, 1998년 4월 20일 채택)

Optimization of a Utility Plant Operation Based on a Hierarchical Method

Sung Je Lee, Moo Ho Lee, Kun Soo Chang and Chonghun Han[†]

Automation Research Center and Department of Chemical Engineering,
Pohang University of Science and Technology

(Received 16 December 1997; accepted 20 April 1998)

요 약

유틸리티 플랜트는 대부분의 정유 및 석유화학 공장에 설치되어 공장에서 필요로 하는 스팀과 전력을 공급하는 역할을 하는 핵심 공정이다. 최근 에너지 비용 증가와 환경 오염에 대한 우려로 인해 유틸리티 플랜트의 에너지 소비 절감 및 운전 비용 절감이 학계와 산업계로부터 많은 관심을 받아 왔으며 이 결과 유틸리티 플랜트 운영을 최적화하기 위한 다양한 접근 방법들이 제시되었다. 본 논문에서는 유틸리티 플랜트 조업의 특성을 고려하여 전체시스템을 상부와 하부로 나누어 최적화하는 계층적 최적화 방법을 제시하고 이를 이용한 유틸리티 플랜트의 최적화를 수행하였다. 상부 단계에서는 전력 수배급을 포함한 유틸리티 분배 최적화를 통해 최적의 스팀 수배급을 결정한 후 이를 달성하기 위한 최적 스팀 생산 방법을 하부 단계의 보일러 부하 재분배를 통해 결정하였다. 물리, 화학적 현상과 실제 조업 데이터를 이용하여 단위 공정 모델들을 개발하였고, 전체 유틸리티 플랜트의 경비를 결정하는 주요 변수들을 최적화 변수로 선정하여, 계층적 최적화를 통해 운전 비용을 절감할 수 있는 최적 조업 조건을 결정하였다. 최적화 결과 스팀 분배 부분에서는 기존 공정 조업 대비 약 6.2%의 운전 비용을 절감할 수 있고 스팀 생산 부분에서 보일러 부하 재분배를 통하여 평균 보일러 효율을 0.3%에서 1.7%까지 향상시킬 수 있었다.

Abstract—A utility plant is one of key unit plants in large scale refinery and petrochemical plants that supplies the steam and the electricity using fuel oil and gases. As the energy cost and the concern on the environmental pollution have been increasing, the energy saving and the operation optimization of the utility plant have received attention from both academia and industry. This paper proposes a hierarchical optimization method for the utility plant optimization that consists of top and bottom level optimization. At the upper level, the total utility plant including electricity supply and demand is optimized. At the lower level, the solution for the steam generation obtained from the top level is refined to achieve the optimal load allocation for the boilers. Various unit process models have been developed from the operation data and the material and energy balances. The key variables that mainly determine the operation cost for the utility plant have been selected and optimized. The optimization result has shown that the operation cost was reduced by 6.2% and the average efficiency of the boilers was improved by 0.3 to 1.7% through optimal boiler load allocation.

Key words : Utility Plant, Operation Optimization, Boiler, Turbine, Steam

1. 서 론

화학 공업의 공정에서는 에너지원으로 전력(electric power)과 스팀을 이용한다. 전력은 외부로부터 도입되어 사용되기도 하지만 대체로 자체 발전소를 이용해 생산을 한다. 이렇게 생산된 전력은 유틸리티 플랜트내에서 소비하거나 주 공정에 제공되기도 한다. 스팀은 보일러에서 만들어지며, 역시 공정내에서 반응에 의해 자연적으

로 생성되거나 열교환에 의해 회수되어 오기도 한다. 스팀은 주 공정에 안정적으로 열 에너지를 공급하기 위한 열 전달 매개체로 쓰이며, 터빈(turbine)을 가동시켜 전력을 자체 생산하는데 사용되기도 한다. 이러한 에너지 원이 차지하는 경비는 전체적인 공장 조업 경비 가운데 가장 큰 비율을 차지한다. 에너지의 수요는 날로 늘어나기 때문에 새로운 시설을 확충하거나 기존시설을 철거하는데 적절한 시기와 적절한 형태의 단위 공정을 선택함으로써 경제적으로 수요를 충족시킬 수 있다[1]. 그러나 스팀 및 전력 수급의 최적화와 주 공정에 에너지를 공급하는 총괄 비용을 최소화하는 것으로써 수요

[†]E-mail : chan@postech.ac.kr

를 충족시키면서도 경제적인 문제 해결 방법을 모색할 수 있다. 즉 공정 조업을 위해 요구되는 스팀과 전력을 최소한의 에너지 비용으로 공급할 수 있도록 최적화를 통해 최적조업 조건을 결정해 운전 비용을 낮추는 것이다.

유틸리티 플랜트를 확장된 열역학적 사이클로 파악하고 하나의 시스템으로 잡은 후 여러 경우에 대한 에너지 사이클을 가정하고 각 사례에 대해 운전 비용을 계산하여 경제적인 사례를 찾는 방법이 제시되었다[2]. 또한 여러 단위 공정으로 구성되어 있는 유틸리티 플랜트의 물질 수지와 에너지 수지를 세워 스팀 수지를 계산하는 방법을 통해 에너지 흐름을 파악하는 연구도 발표되었다[3]. 특히 단위 공정 중 보일러 시스템에서는 용량이 다르거나 혹은 같은 보일러들의 최적량 할당 방법으로 연료 소비량을 줄일 수 있다[4]. 즉, 기존의 모든 보일러에 동일한 할당량을 주었던 방식에서 스팀 부하에 따라 각기 다른 2차 곡선의 효율을 보이는 특성을 고려해 각기 효율이 좋은 방향으로 최적치를 설정한다는 것이다.

유틸리티 플랜트에 이상이 생겨서 자체적으로 전력을 생산하지 못하거나 생산량이 공정으로 공급해 주어야 하는 전력량에 못미칠 때 외부로부터 전력을 수입해 오는 상황이 발생한다. 이때 사용 계약된 외부 전력을 어떤 한계 이상 사용하거나 이하로 사용할 경우 페널티(penalty)를 지불해야 한다. Robnett[5]은 연료 외에도 전력을 시스템의 영역으로 포함시켜 스팀을 생산하는데 드는 비용과 외부 전력 비용을 동시에 고려해 최적 스팀 생산량을 할당해야 한다고 주장하였으나 구체적인 방법을 제시하지는 않았다. 외부로부터 수입해 오는 전력에 대해서는 그 계약 내용이 다양하고 시간과 시기에 따라 다르기 때문에 일반적인 접근 방법은 어렵고 시스템에 따라 그에 적합한 문제 해결 방법이 필요하다.

Nishio 등[6]은 최적의 스팀과 전력 사용에 대하여 스팀 지배적 상황과 전력 지배적 상황으로 구분하여 사용 가능한 에너지를 줄이는 연구를 하였다. 최적화의 목적 함수에 대해서도 공급 에너지의 양을 최소화하던 그전의 연구에 비해, 시스템 범위를 에너지 소비 시스템과 에너지 공급 시스템의 두 부분으로 나누어 주 공정까지를 에너지 절감의 영역으로 확대, 포함시켰다. 또한 열과 전력의 최적 합성을 위해서는 장치 각각의 효율을 고려할 뿐만 아니라 총괄적인 에너지 수지의 관점에서 열, 전력 그리고 공정 스팀 수요의 밸런스까지 고려해 주어야 한다[7].

본 논문에서는 유틸리티 플랜트의 조업 특성상 상부와 하부의 두 단계로 나누어질 수 있는 계층적 특징을 고려한 새로운 최적화 방법을 제시하였다. 상부 단계에서는 자체 전력 생산 및 수배급을 포함한 유틸리티 분배 부분에 대한 최적화를 통해 필요한 최적 스팀량을 결정하고 이를 생산하도록 하부 단계에서 최적 보일러 부하 재분배를 하였다. 제시된 계층적 방법에 의한 유틸리티 플랜트의 조업 최적화는 운전 비용을 절감할 수 있는 최적 조업 조건을 결정하는데 매우 효과적임을 사례연구를 통해 검증하였다.

2. 유틸리티 플랜트의 최적화

스팀 수지를 선형 관계식으로 쓸 수 있고, 또한 미 확정 변수의 수가 관계식보다 훨씬 많은 실제 경우를 감안하여 선형 계획법(linear programming)을 이용하여 스팀 수지를 계산함과 동시에 보일러의 최소 용량을 결정할 수 있다[8]. 그러나 다양한 열역학적 상태에 대해서 엔탈피 값이 변하면 에너지 수지의 비선형 특성 때문에 기존의 선형 계획법만으로는 한계가 있다. 따라서 반복적인 선형 계획법(iterative linear programming algorithm)을 도입하여 비선형 스팀 수지식에 대해 연속적인 선형 추정(linear approximation)으로 문제를 해결하는 방법도 도입되었다[9]. 그런데 보일러 시스템이 구조적으로

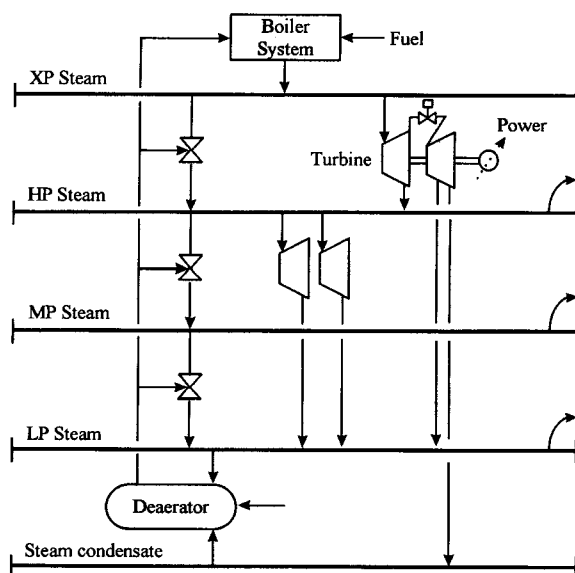


Fig. 1. Upper level : a steam distribution system.

가지는 연소 효율의 비선형성이라든지 다단계 추기(multi-stage extraction) 및 복수(condensation) 터빈 시스템에서 나타나는 열역학적, 기계적 효율의 비선형성은 에너지 및 물질 수지식에 단순히 포함시킬 수 없는 문제라서, 설령 반복적인 계산 절차를 갖는다거나 선형 해를 얻기 전에 계산을 미리 한다 하더라도 그 한계 때문에 선형 계획법의 장점을 살릴 수 없게 된다.

그러므로 본 연구에서는 각 단위 공정의 비선형적인 특성을 모델에 반영하고 열역학적인 관계식의 비선형성을 고려하여 비선형(non-linear programming) 최적화 방법을 사용하여 최적화 문제를 풀었다. 비선형 최적화 문제를 풀기 위해 대표적인 비선형 최적화 소프트웨어인 GAMS/MINOS[10]를 이용하였다.

2-1. 최적화를 위한 계층적 구조

유틸리티 플랜트의 운전 최적화를 위해서는 각 단위 공정에서 필요한 스팀과 전력량을 만족시켜주며 에너지 비용을 최소화할 수 있는 최적 조업 조건을 결정해 주어야 한다. 유틸리티 플랜트를 계층적으로 분석해 보면 전체 공정을 스팀 분배 부분과 스팀 생산 부분으로 나눌 수 있다. 상위 단계인 스팀 분배 부분은 Fig. 1과 같으며 하위 부분인 스팀 생산 부분은 Fig. 2와 같이 보일러로 이루어져 있다.

먼저 전력과 스팀에 대한 수요가 정해지면 상위 단계인 스팀 분배 부분에서 유틸리티 플랜트 전체를 고려한 최적화를 수행한다. 가장 적은 양의 에너지를 사용하면서 유틸리티 플랜트 수요를 만족시킬 수 있도록 각 장치에 가장 적당한 유량과 온도를 계산하게 된다. 이때 결정 변수인 XP 헤더로 공급되는 스팀의 양과 XP 스팀의 온도와 보일러 급수의 온도 차이를 최소화하는 최적화 문제의 해를 찾음으로써 필요한 열 에너지의 최소량이 결정된다.

Fig. 2에서와 같은 하위 단계인 스팀 생산 부분에서는 같은 양의 열 에너지로 스팀을 만들더라도 각 보일러의 효율이 다른 만큼 연료를 적게 들이는 방안을 고려해 주게 된다. 보일러 부하 할당 방법으로 최고의 효율이 되는 부하를 찾아 두번째 단계에서의 최적화를 수행하게 되는 것이며 구체적인 연료의 양이 결정되므로 비용이 산출된다. 결국 헤더를 통해 각 단위 공정들이 필요로 하는 스팀량과 터빈에서 전력 생산에 소요되는 스팀량을 보일러에서 생산하여야 원활한 스팀 및 전력 에너지 분배가 가능하다[11]. 따라서 분배 부분에서 수요를 충족시키는 스팀량을 최적화를 통해 결정하고 결정된 총

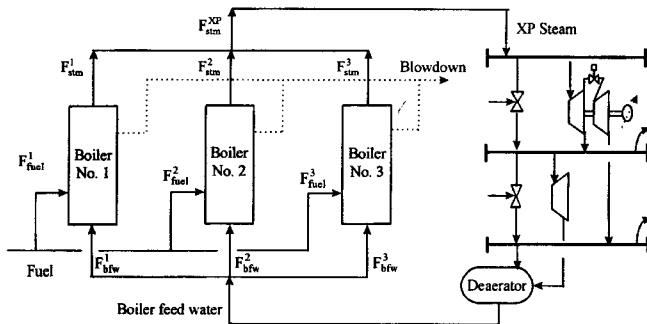


Fig. 2. Lower level : a boiler system.

스팀량을 보일러 부분의 최적화를 통해 최소의 연료를 사용하여 생산하면 전체 유틸리티 공장의 최적 에너지 수배급이 달성된다.

보일러의 효율은 생산하는 스팀량에 따라 2차식의 형태로 표현된다[4]. 보일러의 효율은 제작시 설정된 최적의 운전 부하에서 가장 높은 효율을 나타내고 그 부하에서 멀어질수록 효율은 떨어지게 되며 각 보일러 마다 각기 다르게 된다. 그리고 보일러의 연령과 운전 방식에 따라 보일러의 효율은 기존 설계값과 현저한 차이를 보이게 된다. 따라서 기본적인 모델식은 보일러마다 동일하더라도 효율은 다르다. 따라서 보일러의 정확한 모델링을 위해서는 개별 보일러마다 스팀 부하에 따른 효율을 고려해 주어야 한다.

이와 같은 최적화 방법을 나타내면 두 부분을 Fig. 3에서와 같이 순차적으로 할 수 있다. 그리고 계층적으로 나누어진 두 단계를 순차적으로 최적화를 할 경우 문제의 크기가 작아지므로 복잡한 구조로 이루어진 유틸리티 플랜트의 최적화 문제를 풀기가 쉬워지고 계산 시간이 감소된다. 상위 단계와 하위 단계의 단위 공정들을 모두 함께 고려할 때 생기는 비선형성을 따로 계산하게 되어 최적화 해가 지역 최적화 값으로 빠지는 것을 피할 수 있고, 변수와 식의 개수를 줄임으로써 두 단계를 동시에 최적화 모델로 구성할 때 중복되는 식을 피할 수 있기 때문에 보다 간결하며 빠른 결과를 얻어낼 수 있다. 또한 두 단계로 나누어 공정을 해석할 수 있으므로 각 부분에 대한 에너지 절감 효과 분석이 가능하며 이를 바탕으로 스팀과 연료 및 전력으로 이루어지는 에너지 네트워크 흐름을 파악하는데 도움이 된다.

2-2. 상위 단계 최적화: 스팀 분배 부분

스팀 분배 시스템의 특성상 스팀의 압력은 변화 폭이 넓지 못하기

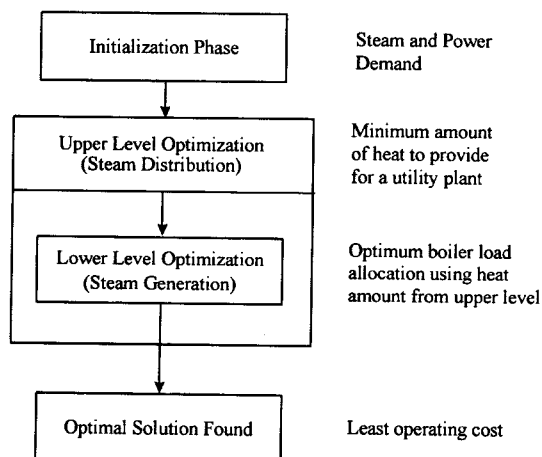


Fig. 3. Optimization using hierarchical method.

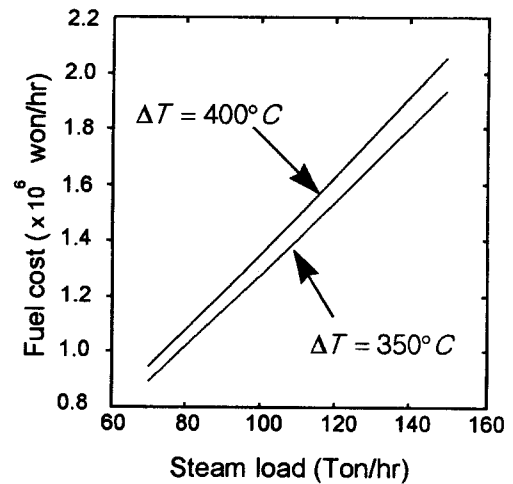


Fig. 4. Cost variation according to steam load change.

(ΔT : The temperature difference between the boiler feed water and the generated steam)

때문에 최적화 문제를 단순화하기 위해 평균값으로 압력을 고정시키고 온도와 유량을 최적화 변수로 정하였다. 목적 함수로는 식 (1)에서와 같이 총 스팀 생산비용을 최소화하는 방향으로 구성하였다.

$$\text{Minimize } C_{\text{steam cost}} \times \Delta H_{\text{steam gen}} \times F_{\text{total}} \quad (1)$$

일반적으로 보일러 입출구의 온도 조건이 변화하기 때문에 단순히 보일러의 효율을 생산된 스팀량으로 나타내는 것보다 그 스팀을 생산하는데 들어간 열량에 대한 식으로 표현하는 것이 더 정확한 모델링이 된다. Fig. 4에서는 보일러 한 대의 경우에 대해 스팀 생산량에 따른 연료의 사용비용과 보일러 급수와 생산해야 하는 스팀의 온도 차이에서 생기는 생산 비용을 나타내고 있다. 따라서 스팀 분배 부분에서 허용이 되는 한도내에서 최대한 보일러 공급수와 XP 헤더 스팀의 온도 차이가 적게 나도록 하면 같은 양의 스팀을 생산하더라도 연료는 적게 소비하게 된다. 따라서 식 (1)에서 $\Delta H_{\text{steam gen}}$ 은 Fig. 4에서의 ΔT 에 따른 엔탈피 변화값이다.

비선형 최적화 모델을 만들기 위해서 각 단위 공정에 대한 상호관계를 정의해야 한다. 총 개수 N 인 각 단위 공정 n 에서의 입출력에 대한 인덱스는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} I_n &= \{m | \text{unit } n \text{ has input flowrate from unit } m\} \\ O_n &= \{m | \text{unit } n \text{ has output flowrate from unit } m\} \end{aligned} \quad (2)$$

모든 스팀 흐름에 대해서는 선형 조건이 되는 물질 수지식을 세워 주어야 한다. 그리고 에너지 수지식은 비선형 조건이 되어 헤더와 Letdown valve 및 탈기 등에서 제약 조건이 된다. 항상 음이 아닌 수치를 갖는 각 스트림의 변수인 F_n^m 에 대해서는 인덱스를 n 의 단위 공정으로부터 m 의 단위 공정으로의 흐름으로 정한다. 따라서 각 단위 공정에 대한 물질 및 에너지 수지식은 다음의 식과 같다.

$$\left. \begin{aligned} \sum_{m \in I_n} F_n^m - \sum_{m \in O_n} F_n^m &= 0 \\ \sum_{m \in I_n} H_n^m F_n^m - \sum_{m \in O_n} H_n^m F_n^m &= 0 \\ H_n^m &= \alpha_n T_n + \beta_n \end{aligned} \right\} n \in N \quad (3)$$

주 공정 수요에 대해서는 각 헤더에서 공급해 주어야 하는 양이 최소한의 수요량보다 같거나 커야 한다. 전력과 스팀에 대한 수요를 충족시키는 조건식은 다음과 같다.

$$\left. \begin{array}{l} \sum P_m \geq \sum P_n \\ F_n \geq D_n \end{array} \right\} n \in S \quad (4)$$

여기서 각 수요가 생기는 총 부분에 대한 수는 S 로 정의한다. 그리고 터빈에 의해 전력이 생산되는 부분들 P_m 에 대해서는 주 공정에서 수요를 필요로 하는 각 부분 P_n 에 대한 값보다 크거나 같아야 한다. 장치들의 용량에 대한 조건식은 다음 식과 같다

$$F_{lower\ bound} \leq F_n \leq F_{upper\ bound} \quad (5)$$

$$T_{lower\ bound} \leq T_n \leq T_{upper\ bound} \quad (6)$$

2-3. 하위 단계 최적화: 보일러 시스템 부분

스팀 분배 부분의 최적화에 의해 F_{total} 이 결정되면 유량을 보일러의 입구 및 출구 조건의 온도와 압력에 의한 엔트로피를 계산하여 공급 받아야 하는 열량으로 환산하여 계산한다. 최적 스팀 생산량 결정 방법으로는 식 (7)과 같이 평균 효율을 최대화하는 것[12]이 제시되었으나 열량에 따른 효율을 고려한 것이 아니라 효율을 유량의 함수로 나타내었기 때문에, 같은 유량을 보일러에서 생산하더라도 보일러 급수와 XP헤더로 공급할 스팀의 온도에 따라 효율은 달라질 수 있으므로 본 연구에서 제시한 시스템에 적용할 수 없다.

$$\eta_{ave} = \frac{\sum_{j=1}^M F_j \left[\sum_{i=1}^N (F_{stm})_i (\eta_i) \right]}{\sum_{j=1}^M F_j \sum_{i=1}^N [(F_{stm})_i]_j} \quad (7)$$

여기서 F_j 는 j 시간 만큼의 인터벌이 있는 경우이며 M 은 총 인터벌의 개수이다.

따라서 각 보일러들은 열량에 대한 효율의 함수로 표현될 수 있으므로 전체적인 효율이 높은 방향으로 최적화를 통해 부하를 재분배한다. 이때 목적 함수는 식 (8)에서와 같이 모든 보일러 효율의 최대화로 정하고, 제약 조건은 공급 받아야 하는 총 열량을 만족시키는 것으로 한다. 효율의 합을 최대화해 최적화를 수행한 뒤 평균 효율을 산술적으로 구하는 것은 식 (7)에 의한 계산보다 더욱 간결하다.

$$\text{Maximize } \sum_{i=1}^N \eta_i \quad (8)$$

상위 단계에서의 최적화 결과인 총 열량 Q_{total} 은 보일러 N 개에서 공급해 주어야 하는 모든 열량을 합한 것과 같아야 한다. 따라서 다음 식 (9)와 같다.

$$Q_{total} = \sum_{i=1}^N Q_i \quad (9)$$

그리고 각 보일러의 특성인 효율에 관한 식은 다음 식 (10)과 같다 [4].

$$\eta_i + a_i Q_i^2 + b_i Q_i + c_i \quad i \in N \quad (10)$$

3. 유틸리티 플랜트 시스템의 모델링

공정으로 공급해 주어야 하는 수요는 크게 전력과 스팀이다. 4.2 (High Pressure Steam), 1.05 (Medium Pressure Steam), 그리고 0.35 (Low Pressure Steam) MPa의 세 가지 수준의 압력의 스팀을 공정으로 공급하고 각 헤더의 온도는 일정한 범위 내에서 변한다. 각 헤더의 물리적인 허용치 안에서 수리 계획법에 의한 최적화 과정에서 최적의 온도가 구해진다. 정상 조업에서의 압력의 변화는 크지 않은데 비해 온도는 헤더에서 스팀의 유입량에 따라 비교적 많은 차이를 보

이기 때문에 스팀량을 결정 변수로 고려할 때 온도도 최적화 변수로 함께 고려해 주어야 한다. 전력의 수요량이 정해지면 모델 내에서 필요한 전력량을 생산할 수 있도록 터빈 모델식에서 스팀의 양과 터빈의 효율을 함께 결정한다. 유틸리티 플랜트의 중요 구성 요소인 각 단위 공정의 모델링은 열역학 수지식에 근거하였다.

3-1. 보일러 모델

산업용 보일러는 상부 및 하부 드럼, 급수장치, 과열기와 절탄기 등으로 구성된 보일러 본체와 연소 장치 부속 설비로 분류할 수 있다. 정확한 보일러의 모델을 구성하기 위해서는 다양한 부속 장치들이 스팀을 생산하는데 어떻게 작용하는지를 면밀히 살펴보아야 하지만 모든 장치를 고려해 표현하는 것은 매우 어려운 일이다[13]. 따라서 보일러 플랜트에 관한 상세한 동적 모사 모델[14]로부터 정상 상태인 경우와 스팀 생산에 일차적인 영향을 미치며 최적화 구성에 적합한 부분을 선택하였다. 본 논문에서는 보일러 시스템이 정상 상태 가동을 할 때에 보일러 본체 중, 연료 소비 그리고 보일러 급수와 생산된 스팀의 열역학적인 상태를 실험식에 근거하여 모델링하였다.

연료의 연소로부터 스팀을 생산하는데 공급된 열 공급량은 다음과 같다.

$$Q_{transfer} = H_{stm} \times F_{stm} + H_{bld} \times F_{bld} - H_{bfw} \times F_{bfw} \quad (11)$$

그런데 대상 보일러의 경우 blowdown은 정기적으로 불규칙한 양을 일정 시간 동안 실시하기 때문에 정상상태에서는 고려하지 않는다. 따라서 $F_{bld}=0$ 이다.

보일러의 효율은 스팀의 유량, 온도 및 압력 그리고 사용되는 연료의 유량값이 실시간으로 정확하게 측정될 경우 필요한 연료량 계산이 용이한 입출열법으로 나타내는 것이 편리하다.

$$\eta = \frac{(H_{stm} \times F_{stm} - H_{bfw} \times F_{bfw})}{(H_{fuel} \times F_{fuel})} \quad (12)$$

입출열법에 의한 열효율의 정의로부터 결국 공급해야 하는 에너지의 총량, Q_{fuel} 은 다음과 같다.

$$Q_{fuel} = \frac{Q_{transfer}}{\eta} \quad (13)$$

보일러에 대한 특성을 포함한 실험식으로 모델을 만들면 Fig. 5에서 보는 바와 같이 각각의 보일러에 따른 효율이 3-15 % 정도의 차이

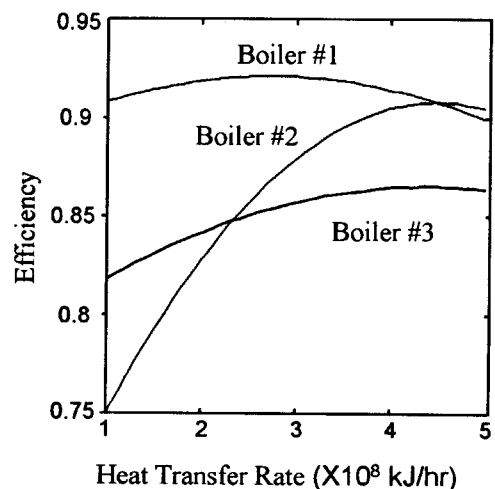


Fig. 5. Boiler efficiency curve according to heat transfer rate.

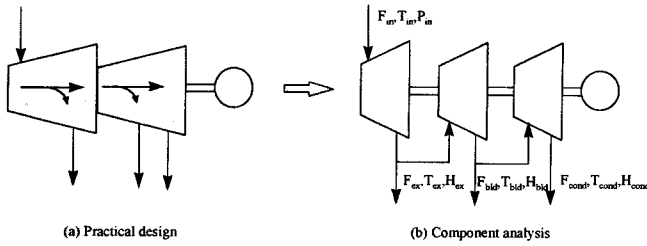


Fig. 6. Systematic decomposition analysis for turbine modeling.

가 나는 것을 알 수 있다.

3-2. 터빈 모델

대상 설비인 터빈은 Fig. 6(a)에서와 같고 이를 decomposition analysis[15]로부터 Fig. 6(b)와 같이 재구성하고 난 뒤에 열역학적 모델식을 각 단(stage) 별로 적용한다. 터빈 모델링에서 중요한 것은 터빈의 입출력되는 스팀의 유량과 전력량과의 상관관계이다. 일반적으로는 터빈에 공급되는 스팀의 입구 조건과 열역학적 효율 그리고 출구의 온도와 압력이 결정되면 전력의 양이 계산된다.

입구의 온도와 압력을 각각 T_{in} , P_{in} 이라 하면 이때의 엔탈피 H_{in} 을 계산을 통해 알 수 있다. 스팀이 방출되는 부분의 엔탈피를 H_{ex} 라 하면 다음의 관계식이 성립함을 알 수 있다.

$$H_{ex} = H_{in} - \Delta h = H_{in} - \eta_t \Delta h_s \quad (14)$$

Δh 는 엔탈피 변화값이며 Δh_s 는 등 엔트로피 과정에서의 엔탈피 변화값이고 $\eta_t = \Delta h / \Delta h_s$ 으로부터의 열역학적 효율의 정의이다. 그리고 Δh_s 는 다음과 같고 등엔트로피 과정 후의 엔탈피 변화값과 같다.

$$\Delta h_s = H_{in} - H'_{ex} \quad (15)$$

그런데 모든 부분에서의 압력은 알려져 있는 것으로 가정하였으므로 입구와 추기되는 부분에서의 압력의 값을 알 수 있기 때문에 등 엔트로피 과정 후의 엔탈피값은 입구에서의 온도와만 관계가 있게 된다. 이때의 등엔트로피 과정 후의 온도와 엔탈피값을 구하기 위한 방법으로 이상기체에 관한 엔트로피 관계식[16]을 쓰면 평균 열용량 값은 주어진 온도의 변화 범위내에서 크게 변하지 않으므로 상수로 보고, 압력은 알려진 것으로 가정하였기 때문에 등엔트로피 과정 후의 온도에 대해서는 다음의 식을 만족한다.

$$T'_{ex} = \lambda T_{in} \quad (16)$$

이때의 엔탈피값 H'_{ex} 를 다음의 온도와 엔탈피값의 관계식에서 구하면 나머지 터빈의 열역학적 효율에 따라 출구에서의 엔탈피 값, H_{ex} 을 구할 수 있게 된다.

$$H_{ex} = H_{in} - \eta_t (H_{in} - H'_{ex}) = (1 - \eta_t) H_{in} + \eta_t H'_{ex} \quad (17)$$

그런데 출구의 조건과 열역학적 효율은 밀접한 관계가 있는 상황에서 단순히 열역학적 수치식만으로 전력량을 예측하기는 어렵다. 따라서 입력되는 유량과 추기되는 스팀의 유량을 가지고 생산되는 전력량을 예측할 수 있는 실험식을 구성하였다. 이는 생산되는 전력량은 입력되는 스팀의 유량과 추기되는 스팀 유량에 강한 상관관계를 갖고 있기 때문이다.

$$\text{Power(Generation)} = f(F_{inlet}, F_{extraction})$$

추기 부분이 하나이고 복수기를 가지고 있는 대상 터빈의 경우 데이터를 분석해 보면 스팀의 입력량이 증가할수록 그리고 추기량이 감소해서 마지막 단으로 복수되는 양이 증가할수록 생산되는 전력량

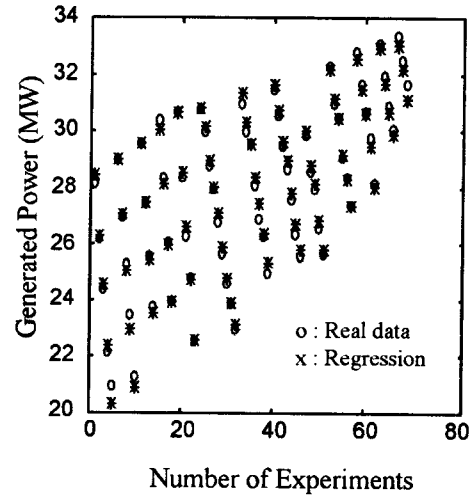


Fig. 7. Comparisons of power generation between operation and prediction by a model.

은 증가하는 관계가 있음을 알 수 있다.

여기서 얻게 되는 터빈에서의 전력량 관계식은 다음과 같다.

$$\text{Power(Generation)} = 0.2601 F_{inlet} - 0.2056 F_{extraction} - 5.0337 \quad (18)$$

터빈의 전력 생산량 모델링 결과인 Fig. 7을 보면 조업 데이터와 모델로부터 예측된 전력량이 거의 일치함을 볼 수 있다. 이때의 오차는 실제 데이터와 식 (18)에 의한 예상 수치와의 차이로 식 (19)에 나타내었다.

$$\text{error} = \frac{\sum_{i=1}^n |P_{real,i} - P_{emp,i}|}{n_{data}} \times 100 = 0.733 \% \quad (19)$$

3-3. 단위 공정 모델

각 헤더에서는 수집되는 스팀을 모아서 동일한 공급 스팀의 열역학적 상태를 만들어 준다. 출구 부분의 온도와 압력은 모두 같다고 하고 헤더 안에서의 스팀이 잘 혼합되며 열 손실이 없다고 하면 물질 수지와 에너지 수치식에 의해 모델링할 수 있다.

헤더 안에서 잘 혼합되어 배출되는 스팀의 질(quality)이 모두 같다고 하면 다음과 같다.

$$H_{out,1} = H_{out,2} = \dots = H_{out,j} = H_{hd} \text{ (constant)}$$

각 헤더에서의 열역학적 관계식은 다음과 같다.

$$\sum F_{in,i} - \sum F_{out,i} = 0 \quad (20)$$

$$\sum (H_{in,i} \times F_{in,i}) - \sum (H_{hd} \times F_{out,j}) = 0 \quad (21)$$

압력이 알려져 있다고 가정하므로 엔탈피와 온도와의 관계식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$H_{hd,i} = \alpha_i T_{hd,i} + \beta_i \quad (22)$$

각 헤더에서의 온도의 범위는 XP, HP, MP, LP가 각각 475-525 °C, 375-425 °C, 240-285 °C, 175-200 °C이므로 그 범위내에서의 엔탈피값의 추세선을 통하여 관계식을 얻을 수 있다.

Letdown valve의 목적은 높은 압력의 스팀을 낮은 압력과 낮은 온도를 갖는 스팀으로 만들어 주기 위해 desuperheating시킬 때 필요한 장치이며 보일러 급수로부터 추가 물을 공급받는다. 비교적 작은 영향을 미치는 엔트로피 변화를 고려하지 않고 높은 온도 압력의 스팀

Table 1. Optimization result of steam distribution(Upper level)

Operation	Flowrate optimization	Temp. flow optimization
HP demand, kg/hr	172420	172420
MP demand, kg/hr	24041	24041
LP demand, kg/hr	46411	46411
Total flow, kg/hr	327200	329250
Temp., stm °C	510	490
Temp., bfw °C	111.5	150
Steam saving	***	4.50 %
Temp., var. °C	398.5	340
Fuel cost, ₩/hr	4.58×10^6	4.29×10^6
Cost saving	***	5.00 %

과 목적이 되는 낮은 온도 압력의 스팀의 조건이 주어지면 열역학적 관제식에 의해 공급해야 하는 물의 양을 결정할 수 있다.

$$F_{in} + F_{add} - F_{out} = 0 \quad (23)$$

$$H \times F_{in} + H_{add} \times F_{add} - H_{out} \times F_{out} = 0 \quad (24)$$

4. 사례 연구

상위 단계인 스팀 분배의 최적화 단계에서는 조업 중인 경우에 대해서 온도를 제외한 총 유량의 생산량만을 최소화하는 경우와 온도와 유량을 동시에 최적화 변수로 보아 최적화한 경우에 대해서 비교하였다. 그리고 조업 경험에만 의존하여 운전할 경우에 좀처럼 정확히 기대하기 힘든 열역학적 수치식 결과를 아울러 자동으로 유도해 내었다. 유량만을 고려한 최적화에서는 조업 때 보다 총 유량을 감소시켜 운전 비용을 절감할 수 있으나 온도와 유량을 동시에 고려한 최적화에서는 오히려 유량은 조업 때 보다 증가하나 보일러 급수와 XP 헤더 사이의 엔탈피 변화가 적어 비용 측면에서는 더 효과적이다. 사례 연구를 위해서 중요 스트림(stream)이 표시된 Fig. 1과 같은 대상 공정을 바탕으로 상위 단계에서의 최적화 결과를 Table 1에 나타내었다.

최적의 온도와 유량이 결정된 주된 요인으로는 각 단위 공정에 대한 열역학적 수치식을 제약 조건내에서 목적 함수를 만족시키는 유량과 엔탈피값들이 계산되었기 때문이다. 특히 유량에 대한 최적화 결과는 에너지 소비를 유발하는 letdown 밸브로의 흐름은 되도록 지양하고 있으며 특히 터빈으로의 흐름이 이용되어 전력을 생산하는데

쓰이고 있으며 이는 Yoo[17] 등이 발표한 연구와도 부합하는 결과이다. Letdown 밸브로의 흐름이 불가피한 경우는 탈기기에서의 에너지 수지를 만족시키기 위해 높은 열원을 제공해야 하는 경우이다.

상위 단계인 스팀 분배 부분에서 필요한 스팀 총 유량이 결정되면 하위 단계에서 최적화를 통해 Table 2에서 제시한 바와 같이 보일러의 평균 효율을 향상시킬 수 있는 최적 조업 조건을 찾게 된다. Table 2에서는 세 대의 보일러가 병렬로 운전될 경우 시간당 총 부하가 210 Ton에서 360 Ton까지 변할 때에 각 보일러에서의 부하 재 분배와 효율을 나타내었다.

결국 계층적 방법에 의한 두 단계로 나누어 최적화를 하면, 본 사례 연구를 위한 대상 시스템의 경우 운전 비용을 상위 단계에서 6.2 %를 낮출 수 있었고, 하위 단계에서 보일러의 평균 효율을 0.3 %에서 1.7 %까지 향상시킬 수 있었다. 본 논문에서 제시된 방법은 전체 공정을 상위 단계인 스팀 분배 부분과 하위 단계인 스팀 생산 부분으로 나누어 순차적으로 최적화함으로써 문제를 줄여 주어 복잡한 구조의 유틸리티 플랜트의 조업 최적화 문제를 쉽게 풀 수 있게 하였다. 또한 상위 단계와 하위 단계의 단위 공정 모델들을 따로 구성하였기 때문에 함께 고려할 때 보다 중복되는 변수와 식의 개수를 줄일 수 있어 계산 시간도 IBM Workstation에서 CPU시간으로 3-5초로 줄일 수 있었다. 구성된 최적화 문제의 경우 변수가 136개이며 제약 조건으로 작용하는 수식이 94개가 된다.

5. 결 론

본 연구에서는 복잡한 에너지 네트워크 시스템인 유틸리티 플랜트의 최적 생산, 분배에 대해 계층적 최적화를 통해 에너지 비용을 최소화하는 방법을 제시하였다. 이를 위해 유틸리티 플랜트를 상위 단계인 스팀 분배 부분과 하위 단계인 스팀 생산 부분으로 나누어 최적화 문제를 구성하였다. 상위 단계에서는 압력의 많은 변화는 현실적인 조업 상황에서 받아들이지 않기 때문에, 압력을 제외한 유량과 온도를 유틸리티 플랜트의 수리적 모형을 구축하는데 중요한 변수로 고려하여 최적화를 하였다. 하위 단계에서는 보일러 시스템의 부하 재분배의 최적화를 통하여 전체적인 최적화를 달성하도록 하였다. 또한 최적화 문제를 계층별로 구분함으로써 비선형성이 심한 단위 공정 모델을 따로 분리해 내고 크기를 줄이는 효과를 얻을 수 있었다. 사례 연구를 통해 제시된 계층적 최적화 방법이 복잡한 유틸리티 플랜트 조업 최적화에 적합하며 시스템 해석에도 유용한 정보를 제공할 수 있었다.

Table 2. Boiler load allocation result(Lower level)

	Total	No. 1 Boiler		No. 2 Boiler		No. 3 Boiler		Average eff. %
	Steam T/hr	Steam T/hr	Eff. %	Steam T/hr	Eff. %	Steam T/hr	Eff. %	
Operation	210	70	91.7	70	82.1	70	84.0	85.9
Optimization		50	91.2	110	87.9	50	82.8	87.5
Operation	240	80	91.9	80	83.9	80	84.5	86.8
Optimization		50	91.2	132	89.8	58	83.3	88.5
Operation	270	90	92.0	90	85.4	90	85.0	87.5
Optimization		50	91.2	140	90.2	80	84.5	88.7
Operation	300	100	92.0	100	86.7	100	85.4	88.1
Optimization		50	91.2	147	90.5	103	85.5	89.0
Operation	330	110	92.0	110	87.9	110	85.7	88.5
Optimization		60	91.5	150	90.6	120	86.0	89.1
Operation	360	120	91.9	120	88.9	120	86.0	88.9
Optimization		75	91.8	150	90.6	135	86.3	89.2

감 사

본 연구는 통상산업부 지원 에너지절약기술개발사업의 일환으로 에너지자원기술개발지원센터의 지원아래 수행되었습니다. 포항공과대학교 공정산업의 지능자동화연구센터를 통한 한국과학재단의 지원(과제번호: 961-1110-062-2)에 감사를 드립니다. 아울러 본 연구에 많은 조언을 해 주신 현대석유화학(주) 유상현 과장님께도 감사드립니다.

사용기호

a,b,c	: boiler efficiency regression coefficient
$C_{\text{steam cost}}$: steam cost [WON/kJ]
D	: process demand [kg/hr]
F	: steam and water flowrate [kg/hr]
H	: enthalpy [kJ/kg]
m	: designated unit process
n	: unit process
N	: total unit process
P_m	: electric power generation [MW]
P_n	: electric power demand [MW]
Q_{transfer}	: heat transfer amount from water to steam in boiler [kJ/hr]
Q_{fuel}	: heat energy from fuel [kJ/hr]
S	: unit number for demand
T	: temperature [°C]

그리스 문자

α, β	: enthalpy regression coefficient
η	: boiler efficiency
η_t	: turbine thermodynamic efficiency
Δh	: enthalpy change [kJ/kg]

하첨자

add	: letdown valve desuperheating water
ave	: average
bfw	: boiler feed water
bld	: blowdown
ex	: turbine outlet

fuel	: fuel inlet
hd	: header
i	: stream number, boiler number
in	: inlet
j	: stream number
out	: outlet
stm	: boiler outlet
total	: total steam generation in boiler system

참고문헌

1. Nishio, M. and Johnson, A.I.: *Chemical Engineering Progress*, **January**, 73(1977).
2. Arnstein, A. and O'Connell, L.: *Hydrocarbon Processing*, **June**, 47, 88(1968).
3. Slack, John B.: *Hydrocarbon Processing*, **March**, 154(1969).
4. Cho, C.H.: *Instrumentation Technology*, **October**, 55(1978).
5. Robnett, J.D.: *Chemical Engineering Progress*, **March**, 75, 59 (1979).
6. Nishio, M., Shiroko, K. and Umeda, T.: *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.*, **21**, 640(1982).
7. Nishio, M., Koshijima, I., Shiroko, K. and Umeda, T.: *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.*, **24**, 19(1985).
8. Boulilloud, P.: *Hydrocarbon Processing*, **August**, 127(1969).
9. Clark, J.K. and Helmick, N.E.: *Chemical Engineering*, **March**, 116 (1980).
10. Brooke, A., Kendrick, D. and Meeraus, A.: "GAMS: A User's Guide, Release 2.25", The Scientific Press(1992).
11. Ravi, N. and Holliday, J.F.: *Mechanical Engineering*, **February**, 44(1985).
12. Marlin, T.: "Process Control", McGraw Hill(1996).
13. Assad, G.D.: Ph. D. Thesis, The University of Texas at Austin (1993).
14. Lee, G.B.: Ph. D. Thesis, Seoul National University, Seoul(1997).
15. Chou, C.-C. and Shih, Y.-S.: *Ind. Eng. Chem. Res.*, **26**, 1100(1987).
16. Smith, J.M. and Van Ness, H.C.: "Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics", McGraw Hill, Fourth Edition(1987).
17. Yoo, Y.H., Yi, H.S., Yeo, Y.-K., Kim, M.K., Yang, H.S. and Chung, K.P.: *Korean J. Chem. Eng.*, **13**, 384(1996).