

OOUS : 유틸리티 플랜트의 교육용 최적운전시스템

오상훈 · 여영구[†]

한양대학교 화학공학과
133-791 서울시 성동구 행당동 17
(2007년 9월 4일 접수, 2007년 9월 28일 채택)

OOUS : An Educational System for the Optimal Operation of Utility Plants

Sang Hun Oh and Yeong Koo Yeo[†]

Department of Chemical Engineering, Hanyang University, 17 Haengdang-dong, Seongdong-gu, Seoul 133-791, Korea
(Received 4 September 2007; accepted 28 September 2007)

요 약

대부분의 화학공장에서는 유틸리티의 운용에 따라 경제성이 크게 좌우된다. 공장에서 이용되는 유틸리티는 중앙 집중화된 유틸리티 시스템에 의해 제공되는데 유틸리티 가운데 가장 큰 비중을 차지하는 것은 수증기로서 이의 효율적인 관리는 공장의 전력 및 용수의 수급에도 직접적인 영향을 미치게 된다. 이에 따라 대학교 4학년 학생 및 회사의 신입사원들이 유틸리티의 효율적 분배에 대한 개념을 바르고 신속하게 정립하고 실제 운전에서 활용할 수 있도록 하는 것이 중요하다. OOUS(optimal operation of utility system)는 빠른 시간 내에 유틸리티, 특히 수증기의 효율적 생산과 최적 배분방법들을 학생들이나 신입사원들에게 교육시킬 수 있도록 구성된 시스템이다. OOUS에서는 다양한 유틸리티 관련장치 및 공정들을 다루고 있으며 유틸리티 관련 장치 모델과 운전지식 베이스를 기반으로 최적 운전조건이 제시 되도록 함으로써 전체 유틸리티 플랜트의 조업 경비가 절감될 수 있도록 하였다.

Abstract – The economics of most chemical plants are heavily dependent upon the management of the utilities used in the plants. The utilities are supplied by the centralized utility system of the plant. Among the various utilities the steam is by far the most important energy source and the management of the electricity and the process water are greatly affected by the steam. Therefore it is necessary to educate students and new employees the basic concepts about the effective distribution of the utilities and the fundamental strategies to apply the concepts in actual plant operations. The OOUS (Optimal Operation of Utility System) is an GUI educational system designed to educate the effective generation of the steam and the optimal steam distribution schemes within short period. The OOUS deals with various utility equipments and processes and shows how to save operation costs by displaying the optimal operation conditions based on the process models and the operational knowledgebase.

Key words: Optimal Operation of Utility System, Utility Plant, Motor/Turbine Process, Optimization, Steam Header, Knowledgebase

1. 서 론

유틸리티는 공장 운전에서 필요한 전기, 수증기, 공업 용수 및 각종 가스들로서 대부분의 화학플랜트에서 가열 및 냉각에 사용되는 유틸리티는 중앙 집중화된 유틸리티 시스템에 의해 제공된다. 공장의 운전효율은 공정 자체의 효율뿐만 아니라 유틸리티 시스템의 운전효율에 따라 좌우된다. 따라서 유틸리티 운용에 대한 중요성을 간파하는 것은 상당한 규모의 경제적 손실로 이어질 수 있다. 유틸리티 가운데 대부분의 공장에서 가장 큰 비중을 차지하는 것은 수증기이다. 수증기의 효율적인 관리는 공장의 전력 및 용수의 수급에

도 직접적인 영향을 미치게 된다. 그러나 수증기 분배를 위해서는 복잡한 조업 지식과 터빈 발전기, 수증기 발생 장치의 분석을 필요로 하기 때문에 정확하고 신속한 수증기 분배에 한계가 있다.

Nishio 등[1]은 화학공장 설계초기 단계에서의 증기 및 전기 사용의 최적화에 관한 연구를 수행하였다. Petroulas와 Reklaitis[2]는 LP(linear program) 방법을 이용한 유틸리티 시스템의 합성 및 설계 기법을 제안하기 위해 PPROPS 시스템을 이용하여 최적 수증기 헤더 압력을 정할 수 있도록 하였으나 운전비용은 고려하지 않았다. MILP(mixed-integer linear program)나 MINLP(mixed-integer nonlinear program)를 이용하여 조업 비용을 최소화하는 연구[3-7]가 수행되었지만 유틸리티 공장의 운전에서는 경제성보다는 안정적 운전이 우선되므로 실제 적용에는 무리가 있다. Maria 등[8]은 유틸리티

[†]To whom correspondence should be addressed.
E-mail: ykyeo@hanyang.ac.kr

플랜트의 최적 합성에 관하여 simulated annealing 기법을 도입한 연구 결과를 제시하였다. Oh와 Yeo[9]는 운전지식 베이스와 LP 방법을 이용하여 모터/터빈 공정의 최적운전을 통한 유틸리티 플랜트의 최적화 방법을 제시하였다.

유틸리티, 특히 수증기의 효율적인 관리는 공장의 전력 및 용수의 공급에도 직접적인 영향을 미친다. 따라서 학부학생 및 회사의 신입사원들이 수증기의 효율적 생산 및 분배에 대한 개념을 바르고 신속하게 정립하고 실제 운전에 활용할 수 있도록 하는 것이 매우 중요하다. 본 연구의 목적은 학부학생 및 신입사원들의 유틸리티 운전관련 교육에 효과적으로 사용될 수 있는 시스템의 개발에 있다. 이를 위하여 구성된 OOUS(optimal operation of utility system)는 빠른 시간 내에 유틸리티, 특히 수증기의 효율적 생산과 최적 배분 방법들을 학생들이나 신입사원들에게 교육시킬 수 있도록 구성된 시스템이다. OOUS는 연료 소모 비용, 수증기 생산 비용, 전력 생산 비용의 변화와 함께 저압, 중압, 고압, 초고압의 다양한 등급의 수증기 헤더에서 수증기 요구량이 변할 때 각 유틸리티 설비에 대한 최적 운전조건을 제시하여 준다. 또한 유틸리티 플랜트의 운전 지식 베이스를 구축함으로써 최적의 유틸리티 펌프의 구동원을 선택할 수 있도록 하였다. 유틸리티 펌프는 수증기 발생 장치에서 사용되는 공급수, 공기, 연료 등을 이송하는 한편 수증기 분배에도 사용되는 중요한 장치로서 전기 모터와 수증기 터빈으로 구분할 수 있으며 펌프의 구동원을 변경하여 각 등급의 수증기의 공급과 수요를 변화시킬 수 있으므로 수증기의 효율적 분배에서 중요하게 이용되는 장치이다. 따라서 OOUS에 의하여 다양한 등급의 수증기 헤

더에서 수증기 수급이 변할 때 각 유틸리티 설비의 최적 운전조건과 유틸리티 펌프의 최적 구동원을 선택하여 전체 유틸리티 플랜트의 조업 경비를 절감할 수 있다. 또한 사용에 편리한 GUI를 구성하여 손쉽게 유틸리티 플랜트의 전체적 조업 상황, 혹은 각 장치의 작동 상황을 확인할 수 있도록 함으로써 대학 및 관련 산업체에서 교육용 시스템으로 활용될 수 있도록 하였다.

2. 유틸리티 플랜트의 정상상태 모델링

유틸리티 플랜트에서 보일러와 터빈 발전기, 수증기 분배를 위한 감압설비와 유틸리티 펌프와 같은 장치들은 수증기 헤더 네트워크를 구성한다. 본 연구에서 다루고 있는 대상 유틸리티 플랜트에서의 수증기 흐름은 Fig. 1에 보인 바와 같다. Table 1은 유틸리티 플랜트의 운전에 이용되는 각 핵심 공정변수들의 대표적인 운전 범위를 나타낸다. Fig. 1에 보인 유틸리티 플랜트에서 수증기 발생장치는 2대의 초고압 수증기 보일러(SS boiler, superheated steam boiler), 고압 수증기 보일러(HS boiler, high-pressure steam boiler), 탈기기(deaerator), 연료유 가열기(oil heater), 고압 급수 가열기(HPH, high-pressure heater), 그리고 증기식 공기 예열기(SAH, steam-air heater)로 구성된다. 초고압 수증기 헤더, 고압 수증기 헤더, 중압 수증기 헤더, 그리고 저압 수증기 헤더들에는 6개의 감압 설비, 3개의 터빈 발전기, 그리고 13개의 유틸리티 펌프들이 연결되어 있는 것으로 간주하였다.

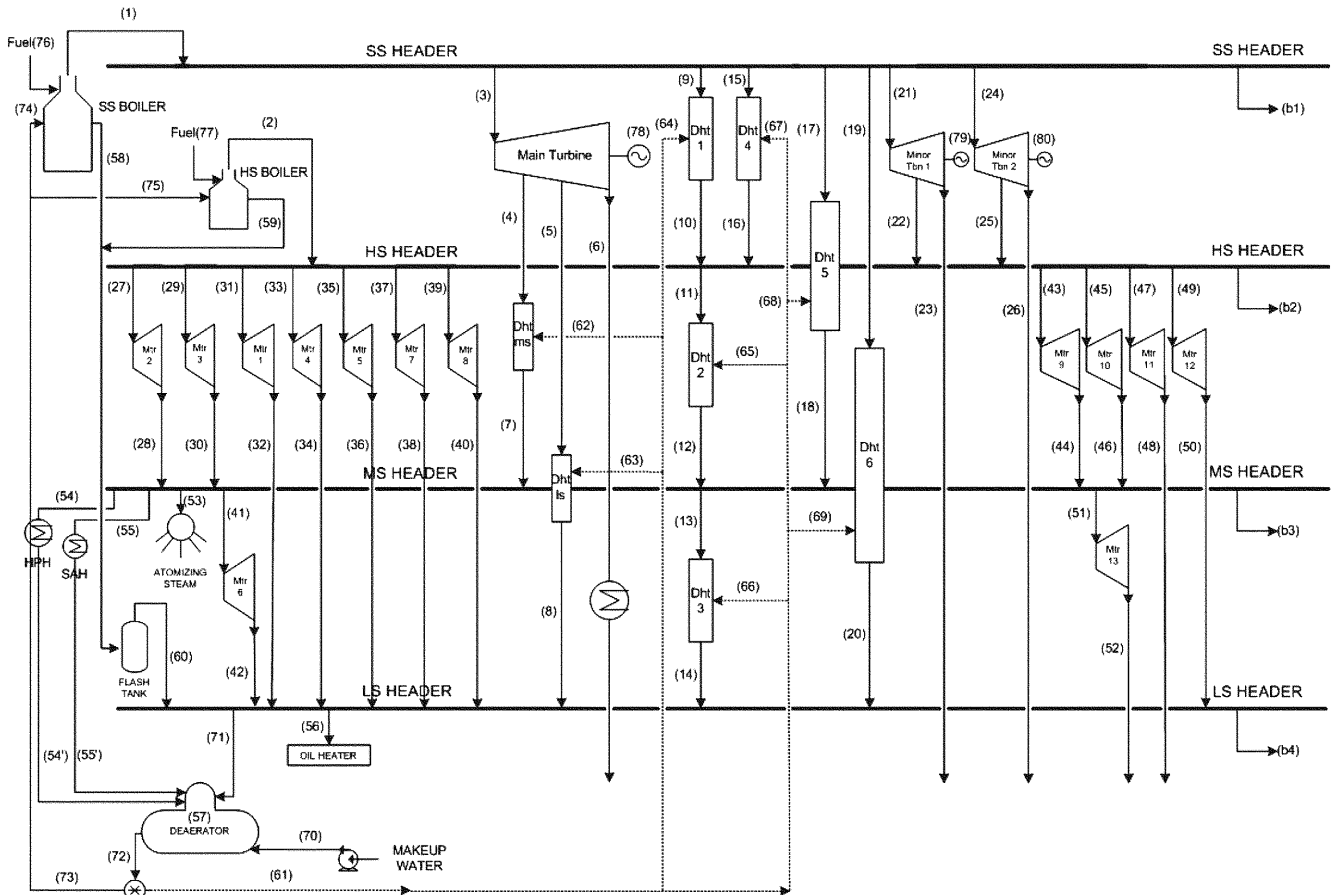


Fig. 1. The flow diagram of steam in steam distribution plant.

Table 1. Operation range of typical variables

Variable	Typical operation range
X ₁ (t/h)	10≤X ₁ ≤660
X ₂ (t/h)	5≤X ₂ ≤121
X ₃ (t/h)	35≤X ₃ ≤233
X ₄ (t/h)	10≤X ₄ ≤186
X ₅ (t/h)	12≤X ₅ ≤99
X ₆ (t/h)	13≤X ₆ ≤50
X ₇ (t/h)	10≤X ₇ ≤192
X ₈ (t/h)	0≤X ₈ ≤102
X ₉ (t/h)	0≤X ₉ ≤397
X ₁₀ (t/h)	0≤X ₁₀ ≤397
X ₁₁ (t/h)	0≤X ₁₁ ≤93
X ₁₂ (t/h)	0≤X ₁₂ ≤93
X ₁₃ (t/h)	0≤X ₁₃ ≤55
X ₁₄ (t/h)	0≤X ₁₄ ≤55
X ₁₅ (t/h)	0≤X ₁₅ ≤397
X ₁₆ (t/h)	0≤X ₁₆ ≤397
X ₁₇ (t/h)	0≤X ₁₇ ≤190
X ₁₈ (t/h)	0≤X ₁₈ ≤190
X ₁₉ (t/h)	0≤X ₁₉ ≤100
X ₂₀ (t/h)	0≤X ₂₀ ≤100
X ₂₁ (t/h)	10≤X ₂₁ ≤245
X ₂₂ (t/h)	10≤X ₂₂ ≤205
X ₂₃ (t/h)	10≤X ₂₃ ≤40
X ₂₄ (t/h)	9≤X ₂₄ ≤235
X ₂₅ (t/h)	10≤X ₂₅ ≤190
X ₂₆ (t/h)	9≤X ₂₆ ≤45
X ₂₇ (t/h)	50≤X ₂₇ ≤151
X ₂₈ (t/h)	50≤X ₂₈ ≤151
X ₂₉ (t/h)	50≤X ₂₉ ≤55
X ₃₀ (t/h)	50≤X ₃₀ ≤55
X ₃₁ (t/h)	7≤X ₃₁ ≤8
X ₃₂ (t/h)	7≤X ₃₂ ≤8
X ₃₃ (t/h)	34≤X ₃₃ ≤70
X ₃₄ (t/h)	34≤X ₃₄ ≤70
X ₃₅ (t/h)	16≤X ₃₅ ≤33
X ₃₆ (t/h)	16≤X ₃₆ ≤33
X ₃₇ (t/h)	13≤X ₃₇ ≤20
X ₃₈ (t/h)	13≤X ₃₈ ≤20
X ₃₉ (t/h)	9≤X ₃₉ ≤20
X ₄₀ (t/h)	9≤X ₄₀ ≤20
X ₄₁ (t/h)	2≤X ₄₁ ≤5
X ₄₂ (t/h)	2≤X ₄₂ ≤5
X ₄₃ (t/h)	38≤X ₄₃ ≤115
X ₄₄ (t/h)	38≤X ₄₄ ≤115
X ₄₅ (t/h)	20≤X ₄₅ ≤42
X ₄₆ (t/h)	20≤X ₄₆ ≤42
X ₄₇ (t/h)	9≤X ₄₇ ≤19
X ₄₈ (t/h)	9≤X ₄₈ ≤19
X ₄₉ (t/h)	14≤X ₄₉ ≤15
X ₅₀ (t/h)	14≤X ₅₀ ≤15
X ₅₁ (t/h)	8≤X ₅₁ ≤8
X ₅₂ (t/h)	8≤X ₅₂ ≤8
X ₅₃ (t/h)	1≤X ₅₃ ≤7
X ₅₄ (t/h)	19≤X ₅₄ ≤86
X ₅₅ (t/h)	5≤X ₅₅ ≤26
X ₅₆ (t/h)	0≤X ₅₆ ≤4
X ₅₇ (t/h)	13≤X ₅₇ ≤62
X ₅₈ (t/h)	1≤X ₅₈ ≤7
X ₅₉ (t/h)	0≤X ₅₉ ≤2
X ₆₀ (t/h)	1≤X ₆₀ ≤8
X ₆₁ (t/h)	0≤X ₆₁ ≤107
X ₆₂ (t/h)	0≤X ₆₂ ≤5
X ₆₃ (t/h)	0≤X ₆₃ ≤6
X ₆₄ (t/h)	0≤X ₆₄ ≤35
X ₆₅ (t/h)	0≤X ₆₅ ≤6

Table 1. Continued

Variable	Typical operation range
X ₆₆ (t/h)	0≤X ₆₆ ≤5
X ₆₇ (t/h)	0≤X ₆₇ ≤35
X ₆₈ (t/h)	0≤X ₆₈ ≤35
X ₆₉ (t/h)	0≤X ₆₉ ≤20
X ₇₀ (t/h)	170≤X ₇₀ ≤781
X ₇₁ (t/h)	170≤X ₇₁ ≤781
X ₇₂ (t/h)	170≤X ₇₂ ≤781
X ₇₃ (t/h)	151≤X ₇₃ ≤888
X ₇₄ (t/h)	151≤X ₇₄ ≤667
X ₇₅ (t/h)	20≤X ₇₅ ≤123
X ₇₆ (t/h)	10≤X ₇₆ ≤47
X ₇₇ (t/h)	1≤X ₇₇ ≤9
X ₇₈ (t/h)	10≤X ₇₈ ≤45
X ₇₉ (t/h)	8≤X ₇₉ ≤30
X ₈₀ (t/h)	10≤X ₈₀ ≤37

2-1. 수증기 헤더(steam header)

수증기 헤더는 수증기 발생 장치에서 생산한 수증기를 각각의 단위 공정이나 수요처로 공급해 주는 역할을 수행하며 일반적으로 터빈 발전기와 유틸리티 펌프, 그리고 감압 설비와 연결되어 있다. 수증기 헤더는 수증기의 압력에 따라 초고압, 고압, 중압, 그리고 저압 수증기 헤더로 구분된다. 수증기 헤더로의 수증기 공급은 각 헤더 별로 수증기의 요구량이나 전력 생산을 위한 터빈 발전기로의 수증기 공급에 따라 달라진다. 각 헤더의 수증기 수지식은 다음과 같다.

초고압 수증기 헤더(superheated steam header):

$$m_3 + m_9 + m_{15} + m_{17} + m_{19} + m_{21} + m_{24} - m_1 = -b_1 \quad (1)$$

고압 수증기 헤더(high-pressure steam header):

$$m_{11} + m_{27} + m_{29} + m_{31} + m_{33} + m_{35} + m_{37} + m_{39} + m_{43} + m_{45} + m_{47} + m_{49} - m_2 - m_{10} - m_{16} - m_{22} - m_{25} = -b_2 \quad (2)$$

중압 수증기 헤더(medium-pressure steam header):

$$m_{13} + m_{41} + m_{51} + m_{53} + m_{54} + m_{55} - m_7 - m_{12} - m_{18} - m_{28} - m_{30} - m_{44} - m_{46} = -b_3 \quad (3)$$

저압 수증기 헤더(low-pressure steam header):

$$m_{56} + m_{71} - m_8 - m_{14} - m_{20} - m_{32} - m_{34} - m_{36} - m_{38} - m_{40} - m_{42} - m_{50} - m_{60} = -b_4 \quad (4)$$

2-2. 터빈 발전기(turbine generator)

터빈 발전기의 발전량은 다음과 같은 에너지 수지식 (5)에 따라 구할 수 있으며 추기량의 변화에 따라 발전량을 변화시킬 수 있다.

$$W = \sum_i \eta_i (m_i \Delta H_i) \quad (5)$$

터빈 발전기의 물질 수지식은 다음과 같다.

$$m_3 = m_4 + m_5 + m_6 \quad (6)$$

$$m_{21} = m_{22} + m_{23} \quad (7)$$

$$m_{24} = m_{25} + m_{26} \quad (8)$$

터빈 발전기의 효율식은 다음과 같다.

$$\eta_1 = c_1 + 10^{-6}c_2m_3H_3 + 10^{-6}c_3m_4H_4 + 10^{-6}c_4m_5H_5 \quad (9)$$

$$\eta_2 = c_5 + 10^{-6}c_6m_{21}H_{21} + 10^{-6}c_7m_{22}H_{22} \quad (10)$$

$$\eta_3 = c_8 + 10^{-6}c_9m_{24}H_{24} + 10^{-6}c_{10}m_{25}H_{25} \quad (11)$$

이 식들에서 c_1 - c_{10} 은 상수이다.

또한 터빈 발전기의 고압단은 증압 수증기 헤더로 추기되는데, 이때 증압 수증기 헤더의 온도와 압력 조건을 충족시키기 위하여 감압 설비가 사용된다. 터빈 발전기의 증압단은 저압 수증기 헤더로 추기되는데 이 경우에도 감압 설비가 사용된다.

2-3. 감압 설비(desuperheater)

감압 설비는 수증기 헤더의 압력을 조절하는데 가장 많이 사용되는 공정장치로서 높은 온도와 압력의 수증기를 낮은 온도와 압력의 수증기로 만드는 역할을 수행한다. 감압 설비로부터의 배출 수증기량 m_{out} 은 다음과 같이 간단하게 얻을 수 있다.

$$m_{out} = \frac{(H_{in} - H_w)}{(H_{out} - H_w)} m_{in} \quad (12)$$

이 식에서 m_{in} 은 감압 설비로 들어오는 수증기량이다.

2-4. 유틸리티 펌프(utility pump)

유틸리티 펌프는 수증기 발생 장치에서 사용되는 공급수, 공기, 연료 등을 이송하는 한편 수증기 분배에도 사용되는 중요한 장치이다. 유틸리티 펌프의 구동원은 전기 모터와 수증기 터빈으로 구분할 수 있는데, 펌프의 구동원을 변경하여 각 등급의 수증기의 공급과 수요를 변화시킬 수 있으므로 수증기의 최적 분배에 있어서 중요한 역할을 수행한다. 고압 수증기를 감압 설비를 이용하여 저압 수증기의 수요처로 보내는 것과 수증기 터빈을 통과시켜서 보내는 두 가지 방법 가운데 어느 방법이 유리한지를 알기 위해서는 전력 비용, 연료 비용, 수증기 터빈 효율, 수증기 물성치, 그리고 보일러 효율에 대한 자료가 필요하다. 본 연구에서 이용한 방법은 두 가지로서 수증기 터빈을 사용하여 유틸리티 펌프를 구동하고 저압 수증기를 공급하는 방법과, 전기 모터를 사용하여 유틸리티 펌프를 구동하고 저압 수증기는 감압 설비를 이용하여 공급하는 방법을 이용하였다. 아울러 유틸리티 펌프 구동원의 최적 선택을 위하여 운전지식 베이스가 이용되었다.

3. 운전지식 베이스를 이용한 수증기 분배 공정

유틸리티 플랜트에서 사용하는 수증기는 수증기 헤더를 통해 감압설비와 터빈 발전기, 그리고 유틸리티 펌프를 통하여 각각의 공정으로 공급된다. 일반적으로는 많은 양의 초고압 수증기와 약간의 고압 수증기만 생산하여 감압 설비, 터빈 발전기, 그리고 유틸리티 펌프를 통과시켜 낮은 등급의 증압, 저압 수증기를 만들어 낸다. 따

라서 저압 수증기 요구량의 변동을 충족시키기 위해서 공정 장치를 조절해야 하는 경우 다른 등급의 수증기 헤더에 영향을 주기 때문에 수증기 분배는 항상 저압 수증기 헤더에서 차례로 높은 압력의 수증기로 단계별로 수행되어야 한다. 이를 위해서는 수증기 발생장치와 수증기 분배장치 전반에 대한 모델을 규명하여 운전지식 베이스가 구축되어야 한다. 수증기 분배장치의 조작성은 Oh와 Yeo[9]의 운전지식 베이스 모델을 근거로 하여 정하였다.

Table 2는 수증기 헤더의 3가지 수증기 수요 변화를 나타내며 Table 3은 이들 각각의 운전상황에 따라 운전지식 베이스 모델을 이용한 수증기 분배 결과에 따른 유틸리티 펌프 구동상황의 변화를 보여준다. 각각의 수증기 헤더의 변화에 따라 유틸리티 펌프의 구동상황이 달라지는 것을 확인할 수 있다. ①의 경우 저압 수증기 헤더에서 요구하는 수증기량이 증가했다. 이를 충족하기 위해 Mtr 5의 유틸리티 펌프의 동작이 2개의 전기 모터와 2개의 수증기 터빈에서 0개의 전기 모터와 4개의 수증기 터빈으로 바뀌었다. Mtr 5는 고압 수증기 헤더와 저압 수증기 헤더에 연결된 유틸리티 펌프이다. ②의 경우 저압 수증기 헤더에서 요구하는 수증기량이 증가했고, 초고압과 고압 수증기 헤더의 수증기 요구량은 감소했다. 따라서 고압 수증기 헤더와 저압 수증기 헤더에 연결된 유틸리티 펌프 Mtr 5, Mtr 7, Mtr 8의 전기 모터의 작동을 멈추고 수증기 터빈을 이용해 고압 수증기를 저압 수증기 헤더로 보냈다. ③의 경우 저압 수증기 헤더에서 요구하는 수증기량이 증가해 Mtr 5의 전기 모터의 작동을 멈추고 수증기 터빈을 이용해 저압 수증기 헤더로 수증기를 분배했다. 그리고 증압 수증기 헤더에서의 요구하는 수증기량이 줄어들었기 때문에, 고압 수증기 헤더와 증압 수증기 헤더에 연결되어 있는 Mtr 10의 수증기 터빈 대신 전기 모터를 작동했고, 증압 수증기 헤더와 저압 수증기 헤더에 연결되어 있는 Mtr 6은 전기 모터 대신 수증기 터빈을 작동했다. 같은 등급의 수증기 헤더에 연결되어 있

Table 3. The simulation results of distribution operation

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

M: motor / T: turbine

Table 2. Changes of steam demands at each header

	Superheated steam header	High-pressure steam header	Medium-pressure steam header	Low-pressure steam header
①	Decrease of 50t/h	Increase of 40t/h	Increase of 30/h	Increase of 20t/h
②	Decrease of 25t/h	Decrease of 40t/h	Increase of 35t/h	Increase of 25t/h
③	Increase of 32t/h	Increase of 35t/h	Decrease of 55t/h	Increase of 25t/h

는 유틸리티 펌프라도 각각의 유틸리티 펌프의 전기 모터와 수증기 터빈이 사용하는 전력량과 수증기량이 다르기 때문에 운전지식 베이스 모델에 의해 전기 모터와 수증기 터빈이 적절하게 선택되었다.

4. 수증기 분배공정의 최적화

유틸리티 플랜트의 최적화는 유틸리티 플랜트의 정상상태 모델링을 기반으로 한다. OOUS에서는 운전지식 베이스로부터 얻은 유틸리티 플랜트의 조업 상황을 바탕으로 하여 Oh와 Yeo[9]에서 보인 제약 조건을 사용하였다.

목적함수는 다음 식에 보인 바와 같은 연료 소모의 최소화, 수증기 생산의 최소화, 그리고 전력 생산의 최대화와 같은 3가지 항목을 운전목적에 따라 적절히 조합하여 이용할 수 있도록 하였다.

$$\min f = C_{water} (m_1 + m_2) \tag{13}$$

$$\min f = C_{fuel} (m_{76} + m_{77}) \tag{14}$$

$$\min f = C_{electricity} (m_{78} + m_{79} + m_{80}) \tag{15}$$

C_{water} 는 공업용수 가격, C_{fuel} 은 벙커-C유 가격, 그리고 $C_{electricity}$ 는 생산된 전력가격이다. 식 (13)은 수증기 생산의 최소화를 나타내며 식 (14)는 연료 소모의 최소화, 그리고 식 (15)는 전력 생산의 최대화를 나타낸다. 본 연구에서는 위의 3가지 경우를 모두 조합한 다음 식 (16)을 목적함수로 사용했다.

$$f = C_{water}(m_1 + m_2) + C_{fuel}(m_{76} + m_{77}) - C_{electricity}(m_{78} + m_{79} + m_{80}) \tag{16}$$

최적화에 사용된 모델은 80개의 변수와 54개의 식으로 구성되어 있으며 MATLAB 7을 이용하여 구현하였다. 예로서 5가지의 서로

Table 4. Results of simulations of steam generation units

Equipment	Item	Unit	Before optimization	After optimization		
Boiler	SS	SS generate (1)	t/h	516.1672	417.5448	
		Fuel (76)	t/h	35.9953	29.1031	
		CBD (58)	t/h	5.1617	0.9904	
		HPH (54)	t/h	67.1017	54.2808	
		SAH (55)	t/h	19.6144	15.8667	
		Deaerator (57)	t/h	47.8487	38.7064	
		Fuel heater (56)	t/h	2.0603	1.6262	
	Attenuator (53)	t/h	5.4597	4.4143		
	HS	HS generate (2)	t/h	5.0000	5.0000	
		Fuel (77)	t/h	0.2724	0.2724	
		CBD (59)	t/h	0.0500	0.6888	
	Turbine Generator	Main	SS (3)	t/h	137.2103	116.6397
			MS before (4)	t/h	12.3600	12.3600
			MS water (62)	t/h	0.3708	0.3708
MS after (7)			t/h	12.7308	12.7308	
LS before (5)			t/h	93.7934	54.2797	
LS water (63)			t/h	2.8138	1.3083	
LS after (8)			t/h	96.6072	55.5880	
Condensed water (6)			t/h	31.0568	50.0000	
Minor 1		Electricity (78)	MWh	23.0000	30.7386	
		SS (21)	t/h	164.5779	215.0000	
		HS (22)	t/h	154.5779	205.0000	
		Condensed water (23)	t/h	10.0000	10.0000	
		Electricity (79)	MWh	8.02123	12.1827	
		Minor 2	SS (24)	t/h	74.0899	135.9051
HS (25)	t/h		29.0899	107.1440		
Condensed water (26)	t/h		45.0000	28.7611		
Electricity (80)	MWh		10.0750	10.0000		
Desuperheater	1	In (9)	t/h	78.2892	0.0000	
		Water (64)	t/h	7.1141	0.0000	
		Out (10)	t/h	85.4033	0.0000	
	2	In (11)	t/h	57.8107	0.0000	
		Water (65)	t/h	3.9595	0.0000	
		Out (12)	t/h	61.7702	0.0000	
	3	In (13)	t/h	51.6890	55.0000	
		Water (66)	t/h	3.3110	3.5231	
		Out (14)	t/h	55.0000	58.5231	
	4	In (15)	t/h	0.0000	0.0000	
		Water (67)	t/h	0.0000	0.0000	
		Out (16)	t/h	0.0000	0.0000	
	5	In (17)	t/h	0.0000	0.0000	
		Water (68)	t/h	0.0000	0.0000	
		Out (18)	t/h	0.0000	0.0000	
	6	In (19)	t/h	0.0000	0.0000	
		Water (69)	t/h	0.0000	0.0000	
		Out (20)	t/h	0.0000	0.0000	

Table 5. The results of optimization

No.	Demand of steam header (t/h)				Before optimization (W/h)	After optimization (W/h)	Difference (W/h)
	LS	MS	HS	SS			
1	25-	30+	0	40-	11,483,294	10,337,168	-1,146,126
2	20-	50-	10+	20+	14,374,133	10,057,643	-4,316,490
3	25+	35+	40-	20-	11,848,976	9,627,927	-2,221,049
4	15-	22+	35-	12+	12,183,367	11,426,465	-756,902
5	10-	25+	30+	25-	13,569,777	11,058,737	-2,511,040

+: increase, - : decrease

다른 경우에 대하여 최적화를 수행하였다. Table 4는 Table 2에서의 ①에 따른 운전상황에 대한 최적화 수행 이전과 이후의 장치 작동 상태를 나타낸 것이며 Table 5는 최적화 계산 결과를 요약한 것이다. 5가지 운전 조건에서 최대 4,316,490 W/h(No. 2), 최소 756,902 W/h(No.4)의 비용절감이 이루어진 것을 확인할 수 있다.

5. OOUS의 사용

OOUS 시스템을 시작하면 Fig. 2에 보인 바와 같은 input menu 창이 나타난다. Input menu에는 크게 4가지 그룹의 버튼이 있다. check 버튼은 유틸리티 플랜트의 현재 조업 상황을 확인할 수 있게 하여준다. Distribute 버튼은 운전지식 베이스를 이용하여 각각의 수증기 헤더마다 필요한 수증기의 양만큼 분배를 수행한다. Optimize 버튼은 distribute 버튼을 통한 수증기 분배를 실행한 다음에 사용할 수 있는 버튼으로서 연료 소모를 최소화하는 선택조건(minimum of fuel), 수증기 생산을 최소화하는 선택조건(minimum of steam), 그리고 전력 생산을 최대화하는 선택조건(maximum of ele. power)과 같은 3가지 선택조건을 사용할 수 있다. 기본적으로는 3가지 조건들이 모두 선택되어 있다. 마지막으로 results 버튼은 운전지식 베이스를 이용한 수증기 분배와 최적화 결과를 서로 비교하여 보여준다.

5-1. 유틸리티 플랜트의 현재 조업상황 확인

Check 버튼을 누르면 유틸리티 플랜트 전체의 현재 조업 상황을 나타내는 overall flow diagram 창이 나타난다(Fig. 3). 이 창의 하단

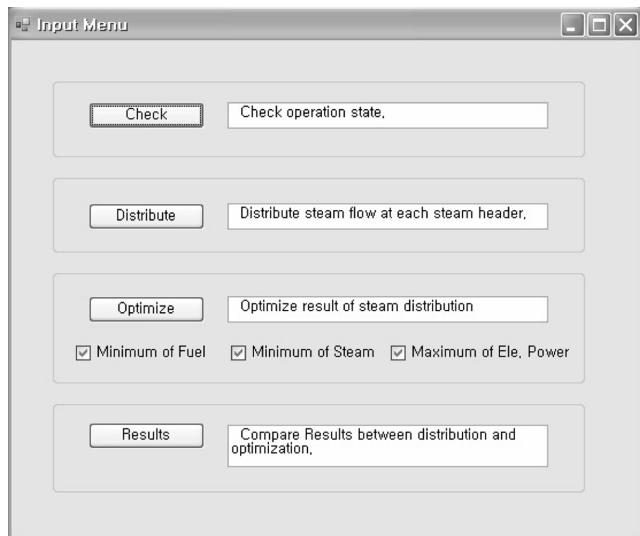


Fig. 2. Display of input menu.

에는 boiler, turbine, motor/turbine, desuperheater, cost 버튼이 있다. Boiler 버튼은 유틸리티 플랜트의 조업 상황 중에서 수증기 생산 장치에 해당하는 2대의 초고압 수증기 보일러(SS boiler), 고압 수증기 보일러(HS boiler), 탈기기(deaerator)를 포함하여 연료유 가열기(oil heater), 고압 급수 가열기(HPH), 증기식 공기 예열기(SAH) 부분만 따로 보여준다(Fig. 4). Turbine 버튼은 전력 생산에 사용되는 3대의 터빈 발전기를 보여주며(Fig. 5), motor/turbine 버튼은 13대의 유틸리티 펌프의 동작을 보여준다(Fig. 6). 동작상황은 유틸리티 펌프의 수증기 터빈이 사용하는 수증기량과 전기 모터가 사용하는 전력량을 각각 나타낸다. Desuperheater 버튼은 초고압, 고압, 중압, 저압 4등급의 수증기 헤더에 연결된 6개의 감압 설비 부분을 보여준다. Cost 버튼은 현재 조업 비용을 보여주는 것으로, 소모된 연료의 비용, 생산된 수증기의 비용, 생산된 전력의 비용을 나타낸다.

5-2. 운전지식 베이스를 이용한 수증기 분배

Distribute 버튼을 누르면 input balance 창이 나타난다. 이 창은 수증기 분배를 위하여 각 헤더별의 값을 입력하는 사용자 접속기 화면이다. Cost 그룹에서는 연료, 수증기, 전력의 가격을 입력하고, balance 그룹에서는 저압, 중압, 고압, 그리고 초고압의 수증기 헤더 변화를 입력한다. 수증기 분배가 성공적으로 실행되면 수증기 분배가 성공적으로 실행되었다는 메시지가 나타나고 수증기 분배 상황을 보여주는 overall flow diagram 창이 나타난다(Fig. 3).

5-2. 수증기 분배의 최적화

Optimize 버튼을 누르면 distribute 버튼을 눌러 실행한 수증기 분배 결과를 이용하여 최적화가 수행된다. 최적화를 실행할 때에는 연료 소모를 최소화 하는 선택조건(minimum of fuel), 수증기 생산을 최소화하는 선택조건(minimum of steam), 그리고 전력 생산을 최대화하는 선택조건(maximum of ele. power)이라는 3가지 선택조건을 사용할 수 있다. 기본적으로는 3가지 조건이 모두 선택되어 있다. 최적화가 성공적으로 실행되었을 경우 성공했다는 메시지가 나타나고 수증기 분배 상황을 보여주는 overall flow diagram 창이 나타난다(Fig. 3).

5-3. 결과의 비교

Results 버튼을 누르면 compare results 창이 나타난다(Fig. 7). Change of steam flow 그룹에서는 각 헤더의 수증기량 변화가 나타난다. Results of steam distribution 그룹에서는 운전지식 베이스를 이용한 수증기 분배 전(before distribution), 운전지식 베이스를 이용한 수증기 분배 후(after distribution), 그리고 수증기 분배 결과를

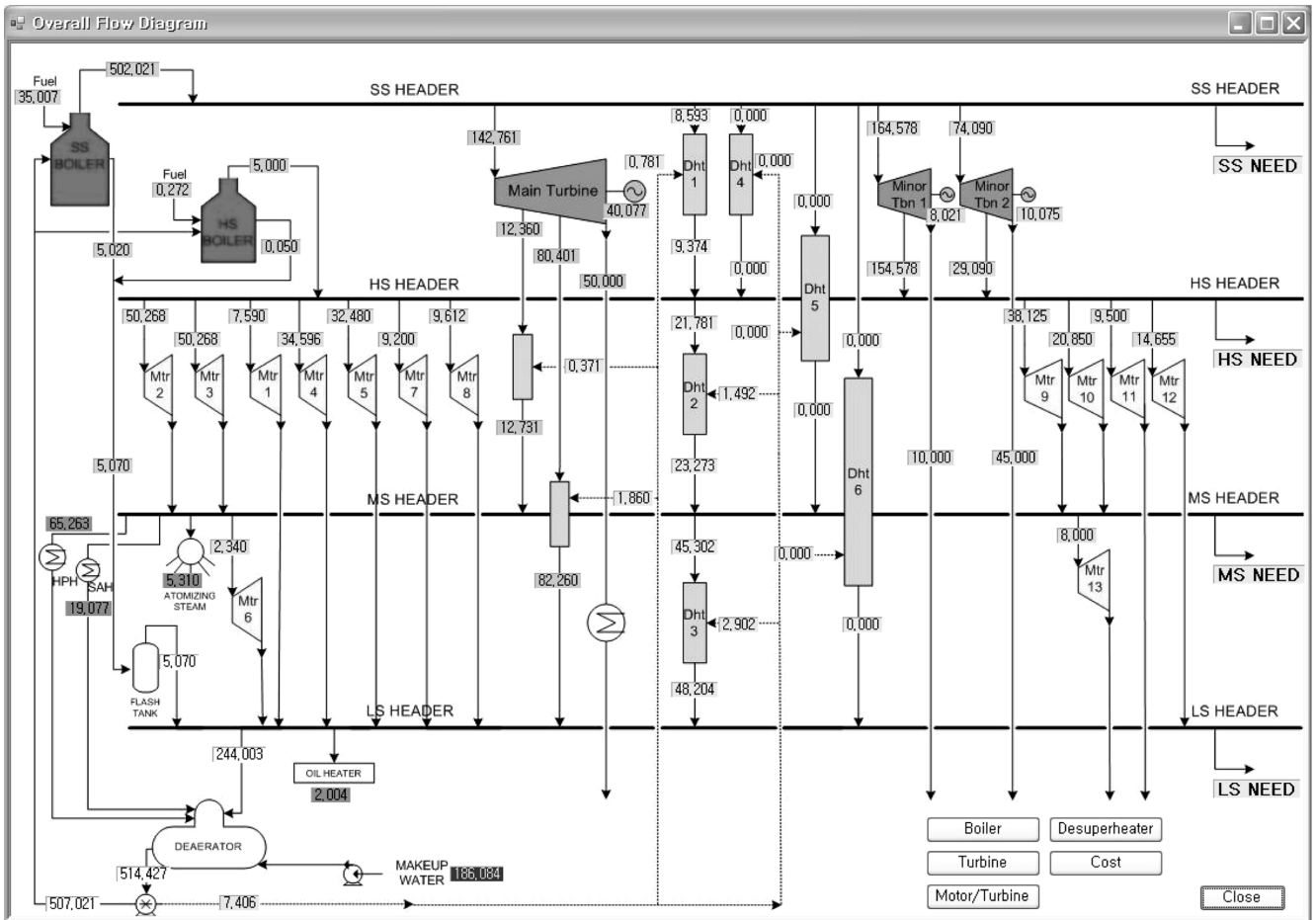


Fig. 3. Display of overall flow diagram.

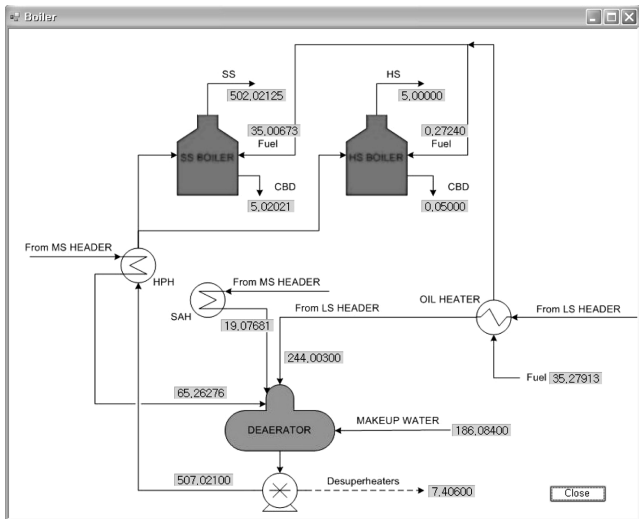


Fig. 4. Display of boiler diagram.

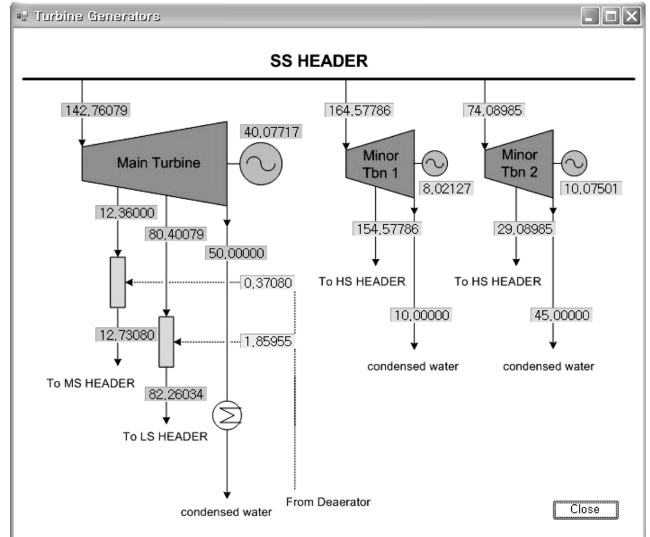


Fig. 5. Display of turbine generator diagram.

최적화(optimization) 항목을 서로 비교할 수 있게 한다. 이 그룹에는 motor/turbine, desuperheater, turbine generator, boiler 탭이 있어 유틸리티 플랜트의 각 장치의 동작 상황을 비교할 수 있다. Fig. 7 은 보일러의 동작상황을 비교하는 boiler 탭을 보여준다. Cost 그룹에서는 운전지식 베이스를 이용한 수증기 분배 후(after distribution)와 수증기 분배 결과를 최적화(optimization)한 비용 변화를 보여준다.

또한 소모된 연료비용, 생산된 수증기 비용, 그리고 생산된 전력비용을 서로 비교하고 총 비용의 증감을 알 수 있게 하여준다. 오른쪽 하단에는 result of distribution initial operation values 버튼과 result of optimization initial operation values 버튼이 있다. Result of distribution initial operation values 버튼은 운전지식 베이스를 이용

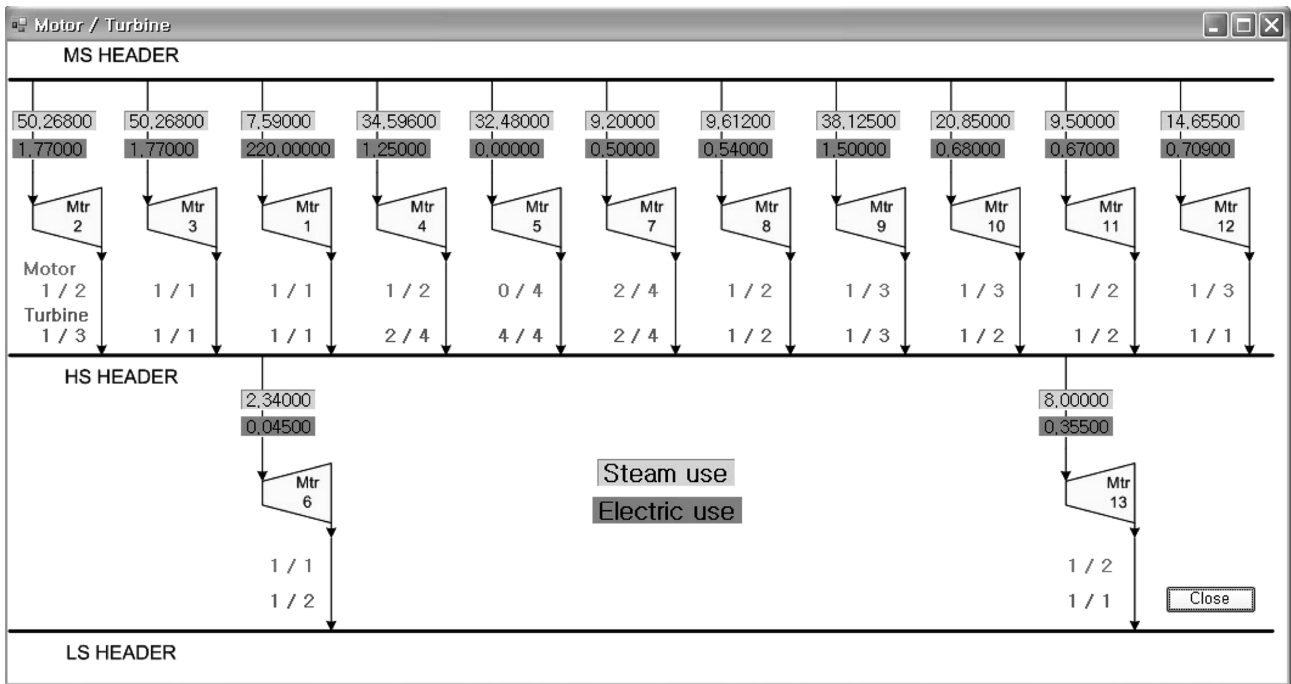


Fig. 6. Display of motor/turbine diagram.

The 'Compare Results' window displays the change of steam flow and the results of steam distribution and cost optimization. It includes a table for steam distribution results and a cost comparison table.

Change of steam flow:

- LS Balance : 20 increase
- MS Balance : 30 increase
- HS Balance : 2 decrease
- SS Balance : 12 increase

Results of steam distribution:

	Before distribution	After distribution	Optimization
SS Boiler			
SS generate	502,02125 t/h	545,66584 t/h	417,54479 t/h
Fuel	35,00673 t/h	38,05683 t/h	29,10309 t/h
CBD	5,02021 t/h	5,45666 t/h	0,52902 t/h
HPH	65,26276 t/h	70,93656 t/h	54,28082 t/h
SAH	19,07681 t/h	20,73530 t/h	15,86670 t/h
Deaerator	46,53737 t/h	50,58322 t/h	38,70640 t/h
Fuel heater	2,00369 t/h	2,17826 t/h	1,62618 t/h
ATM	5,30973 t/h	5,77236 t/h	4,41427 t/h
HS Boiler			
HS generate	5,00000 t/h	5,00000 t/h	5,00000 t/h
Fuel	0,27240 t/h	0,27240 t/h	0,27240 t/h
CBD	0,05000 t/h	0,05000 t/h	0,48879 t/h

Cost:

	After distribution	Optimization
Cost of fuel (₩)	13,913,251	10,639,841
Cost of Steam (₩)	212,815	162,847
Cost of Ele. Power (₩)	313,073	327,707
Total Cost (₩)	13,812,993	10,474,982

Fig. 7. Display of comparing results.

한 수증기 분배 결과를 다음 조업을 위한 조업 초기값으로 설정하는 버튼이며 result of optimization initial operation values 버튼은 최적화 결과를 다음 조업을 위한 조업 초기값으로 설정하여주는 버튼이다.

6. 결 론

공장의 운전효율은 공정 자체의 효율뿐만 아니라 유틸리티 시스템의 운전 효율에 따라서 좌우된다. 따라서 유틸리티 운용에 대한

중요성을 간과하는 것은 상당한 규모의 경제적 손실로 이어질 수 있다. 유틸리티, 특히 수증기의 효율적인 관리는 공장의 전력 및 용수의 수급에도 직접적인 영향을 미친다. 따라서 학부학생 및 회사의 신입사원들이 수증기의 효율적 생산 및 분배에 대한 개념을 바로고 신속하게 정립하고 실제 운전에서 활용할 수 있도록 하는 것이 매우 중요하다. 이를 위하여 구성된 OOUS(optimal operation of utility system)는 빠른 시간 내에 유틸리티, 특히 수증기의 효율적 생산과 최적 배분방법들을 학생들이나 신입사원들에게 교육시킬 수 있도록 구성된 시스템이다. OOUS는 연료 소모 비용, 수증기 생산 비용, 전력 생산 비용의 변화와 함께 저압, 중압, 고압, 초고압의 다양한 등급의 수증기 헤더에서 수증기 요구량이 변할 때 각 유틸리티 설비에 대한 최적 운전조건을 제시하여 준다. 또한 유틸리티 플랜트의 운전지식 베이스를 구축함으로써 최적의 유틸리티 펌프의 구동원을 선택할 수 있도록 하였다. 아울러 OOUS에 의하여 다양한 등급의 수증기 헤더에서 수증기 수급이 변할 때 각 유틸리티 설비의 최적 운전조건과 유틸리티 펌프의 최적 구동원을 선택하여 전체 유틸리티 플랜트의 조업 경비를 절감할 수 있다. 또한 사용에 편리한 GUI를 구성하여 손쉽게 유틸리티 플랜트의 전체적 조업 상황, 혹은 각 장치의 작동 상황을 확인할 수 있도록 함으로써 대학 및 관련 산업체에서 교육용 시스템으로 활용될 수 있도록 하였다.

감 사

본 연구는 한국 학술진흥재단의 이공계 교육과정 개발연구사업(2006-000-0000-3967-D00011(100008)) 및 학술진흥재단 에너지관리공단 에너지기술 학술진흥사업(2006-000-0000-3314) 과제에 의하여 이루어진 결과의 일부이며 지원에 감사드립니다.

사용기호

b_1	: balance of superheated steam header [t/h]
b_2	: balance of high-pressure steam header [t/h]
b_3	: balance of medium-pressure steam header [t/h]
b_4	: balance of low-pressure steam header [t/h]
$C_{electricity}$: cost of electricity [₩/MWh]
C_{fuel}	: cost of bunker fuel oil C [₩/l]
c_i	: constant of efficiency equation [-]

C_{water}	: cost of water [₩/t]
f	: objective function [₩/h]
H_i	: specific enthalpy at position label [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_i	: mass flow rate at position label [t/h]
m_{in}	: mass flow rate of steam to desuperheater [t/h]
m_{out}	: mass flow rate of steam from desuperheater [t/h]
W	: electric power amount [MWh]
X_i	: variable at position label [t/h]

그리스 문자

η_i	: efficiency of turbine generator [-]
----------	---------------------------------------

참고문헌

1. 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).
2. Petroulas, T. and Reklaitis, G. V., "Computer-Aided Synthesis and Design of Plant Utility Systems," *AIChE*, **30**(1), 69-78(1984).
3. Clark, J. K. Jr. and Helmick, N. E., "How to Optimize the Design of Steam Systems," *Chem. Eng. Prog.*, **76**(11), 116-128(1980).
4. Stacy, G. D., Gaines, L. D. and Collis, F., "Optimize Steam System by Computer," *Hydrocarbon Process.*, **60**(10), 75-81(1981).
5. 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).
6. Poje, J. B. and Smart, A. M., "On-line Energy Optimization in a Chemical Complex," *Chem. Eng. Prog.*, **82**(5), 39-41(1986).
7. Díiaz, 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).
8. 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).
9. Oh, S. H. and Yeo, Y. K., "Optimal Operation of Motor/Turbine Processes in Utility Plant," *KIChE*, **45**(3), 234-241(2007).