HWAHAK KONGHAK Vol. 37, No. 2, April, 1999, pp. 171-177
(Journal of the Korean Institute of Chemical Engineers)

발전소 씨스템의 에너지와 엑서지 수지식의 분석 및 yEXERGY 프로그램 개발

황덕재 · 문 일† · 권용재* · 송형근*

연세대학교 화학공학과
*한국과학기술연구원
(1998년 7월 8일 접수, 1998년 12월 19일 채택)

Analysis of Energy and Exergy Balances of Power Plant Systems and the Development of yEXERGY Program

Deogjae Hwang, Il Moon†, Yongchai Kwon* and Hyung Keun Song*

Dept. of Chem. Eng., Yonsei University, Seoul, Korea
**Korea Institute of Science and Technology, Seoul, Korea*
(Received 8 July 1998; accepted 19 December 1998)

요 약

일반적인 발전소 씨스템의 공정으로 이용되는 증기-압축 싸이클의 효율을 열역학 제1법칙을 이용한 에너지 수지와 열역학 제2법칙을 이용한 엑서지 수지로 구한 후 그 결과를 서로 비교 · 분석하였다. 엑서지를 이용하면 각 단위공정 내부의 비가역성에 의한 손실량을 알 수 있으며 손실량이 가장 많은 공정의 조작변수를 수정하여 전체 효율을 향상시킬 수 있다. 분석결과 에너지 수지로 분석하였을 경우 씨스템과 외계간의 에너지 변화량이 가장 많은, 즉 에너지 손실이 가장 많은 단위공정은 응축기였고, 엑서지 수지식으로 분석하였을 경우 고압 급수 가열기와 초급수 가열기의 합인 가열기의 엑서지 손실량이 가장 많았다. 이로부터 실제적인 공정 중의 에너지 손실을 줄이기 위해서는 가열기 공정을 변화시켜야 함을 알 수 있었고, 위의 결과를 바탕으로 엑서지를 이용하여 발전소 씨스템을 분석할 수 있는 사용자 편리 프로그램인 yEXERGY를 개발하였다.

Abstract—This study focuses on the exergy and energy analysis of the general power plant system containing vapor-compressor cycles. As the result of the exergy analysis, the amount of irreversibility of the interior of each subsystem is computed and the efficiency of the total system is improved by optimizing manipulated variables of subsystems which include the most dominant exergy loss. The energy analysis based on the first law of thermodynamics shows that the condenser is the most dominant part of the energy loss. On the other hand, the exergy analysis based on the second law of thermodynamics shows that the boiler is optimized for reducing the energy loss in practice and improving the efficiency of the total power plant system. yEXERGY, a user friendly program, is also developed for the analysis of the general power plant system.

Key words: Exergy, Exergy Loss, Power Plant System, Exergy Balance

1. 서 론

전력은 모든 산업의 에너지원을 공급하는 중요한 자원이므로 이를 효율적으로 생산하기 위한 씨스템을 개발하는 것은 매우 중요하다. 우수한 공정 설계를 위해서 조업 중의 에너지 손실량이 최소가 되도록 해야 하는데, 많은 노력에도 불구하고 일반적으로 이 문제에 대한 진전은 그렇게 높지 않다. 기존에는 에너지 수지식에 의한 에너지량이 보존된다는 전제하에서 효율을 분석하였지만, 이것에는 문제가 있다. 에너지 수지식은 단순히 계와 외계간의 일과 열과 같은 에너지 변화량만 나타낼 뿐, 계 내부의 변화는 알 수 없다. 하지만 흐름 공정에서 계 내부는 비가역성에 의해 변화가 발생하며 그 변화는 도입된 물질들의 에너지 포텐셜을 감소시킨다. 즉, 모든 물질은 계로 유입되기 전의 상태에서 최대의 포텐셜을 가지고 있으며 공정이 진행될수록 점점 포텐셜을 소모하게 된다. 공정이 진행될수록 일을 할 수 있는 포텐셜이 소모된다는 개념은 매우 중요하고 일반적으로 사용하는 에너지 정의와는 의미가 달라지는데, 이렇게 달라진 새로운 에너지의 개념을 엑서지, availability, 포텐셜 에너지 혹은 유용한 에너지라고 지칭한다[1-3, 11].

이러한 엑서지는 계의 내부 변화와 계와 외계사이의 변화를 모두 알 수 있으므로 계에 해당하는 각 단위공정에서 유용하며 계 내부의 비가역성에 의한 손실량을 알 수 있다. 이러한 작업을 통해 각 단위공정의 포텐셜 감소 정도를 알 수 있으며, 따라서 포텐셜 감소가 가장 높은 공정을 찾아낼 수 있다.

본 연구는 이러한 엑서지 수지와 기존의 에너지 수지를 이용하여

†E-mail : ilmoon@bubble.yonsei.ac.kr

발전소 씨스템의 효율을 구하고 서로 비교하였고, 이러한 비교 분석을 효율적으로 할 수 있는 사용자 편리 프로그램인 yEXERGY를 개발하였다.

2. 발전소 씨스템의 에너지 효율과 엑서지 이론

발전소 씨스템에 대한 효율을 열역학 제1법칙, 즉 엔탈피의 변화로만 에너지 효율을 분석할 경우 고온인 고압 급수 가열기와 초급수 가열기에서 열을 흡수하여 그 일부로 발전기에서 일을 생산하고 저온인 응축기에서 나머지 열을 방출하게 된다.

$$W_{Gen.}=|Q_{HPH}|+|Q_{SH}|+|Q_{CD}| \tag{1}$$

여기서 W_{Gen}는 발전기에서 생성된 일이고 Q_{HPH}, Q_{SH}는 각각 고압 급수 가열기와 초급수 가열기에서 흡수한 열량, Q_{CD}는 응축기로 방출되는 열량을 의미한다. 그러면 공정, 즉 발전소 씨스템과 외계사이의 에너지 변화에 따른 효율은 다음과 같이 정의된다.

$$\eta = \frac{\text{발전기에서 생성된 일}}{\text{가열기에서 흡수된 열량}} = 1 - \frac{|Q_{CD}|}{|Q_{HPH}|+|Q_{SH}|} \tag{2}$$

열량 Q는 엔탈피의 변화와 같으므로 열역학 제1법칙에 따른 열효율은 공정의 엔탈피 변화에만 관계된다는 것을 알 수 있고 실제 발전소 씨스템내에서의 변화에 대해서는 알 수 없다.

엑서지에 근거하여 열역학적 효율을 정의하면 실제 발전소 씨스템내의 변화에 대해서 설명이 가능해지므로 위의 열역학 제1법칙에 따른 효율 분석의 단점을 보완할 수 있다.

공정에서 목적하는 부분, 즉 발전기의 최대로 유용한 엑서지와 도입부분, 즉 고압 급수 가열기와 초급수 가열기의 최대로 유용한 엑서지의 비를 열효율로 정의한다면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\eta_{ex} = \frac{\text{발전기에서 전기에너지로 나오는 exergy}}{\text{가열기로 열의 형태로 유입되는 exergy}} \tag{3}$$

위 식의 분모, 분자를 엑서지 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\eta_{ex} = \frac{Ex_{W_{s_2}}}{Ex_{HPH}+Ex_{SH}} \tag{4}$$

여기서 η_{ex}는 엑서지 효율을 나타내며, $Ex_{W_{s_2}}$는 발전기의 엑서지, Ex_{HPH}, Ex_{SH}는 고압 급수 가열기와 초급수 가열기의 엑서지이며 b는 엑서지량이다. 또한 급수 가열기와 초급수 가열기의 엑서지와 발전기의 엑서지는 다음의 관계를 가진다.

$$Ex_{HPH}+Ex_{SH}-Ex_{W_{s_2}}=Ex_{loss} \tag{5}$$

위 식에서 Ex_{loss}는 발전소 씨스템 각 단위공정의 비가역성에 의해 손실되는 엑서지이다. (5) 식을 (4) 식에 대입하면 다음과 같이 엑서지 효율을 정의할 수 있다[4, 5].

$$\eta_{ex} = 1 - \frac{Ex_{loss}}{Ex_{HPH}+Ex_{SH}-Ex_{loss}} \tag{6}$$

위의 식으로 정의된 엑서지 효율은 결국 각 기관의 비가역성에 의한 엑서지 소모량을 최소화할 수 있다. 바로 이러한 점때문에 엑서지 효율로 공정을 평가하는 것이 에너지 수지식에 의한 평가보다 우수함을 알 수 있다.

발전소 씨스템을 해석하기 위한 엑서지는 계와 표준외계 상태 사이의 최대 포텐셜 값을 구하는 것이며 구하려는 물질이 액상일 경우 이상기체 상태에서의 엔탈피와 엔트로피 값을 구하고 상태방정식(Soave식)으로 구한 압축인자 값을 이용하여 과잉 성질의 엔탈피와 엔트로피를 구해 두 값을 합한 것이 되며, 기상일 경우 이상기체 상태에서 엔탈피와 엔트로피 값, 상변화시의 엔탈피와 엔트로피 값, 과잉성질의 엔탈피와 엔트로피 값을 구해 이 값들을 합한 것이 된다. 이러한 관계들은 만일 어떤 물질이 발전소 씨스템의 임의의 초기 상태 1에서 외계상태가 아닌 다른 상태 2까지 흐르면 그 때는 두 상태 사이의 변화량을 알 수 있고 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta b_{1\to 2} = b_2 - b_1 = [T_0(S_0-S_2)-(H_0-H_2)]-[T_0(S_0-S_1)-(H_0-H_1)]$$
$$\Delta b_{1\to 2} = (H_2-H_1)-T_0(S_2-S_1)$$
$$\Delta b = \Delta H - T_0\Delta S \tag{7}$$

Δ는 상태 1과 상태 2 사이의 변화량이고 Δb는 두 상태사이의 최대 가용한 일이며, 상태 함수인 엔탈피와 엔트로피 변화량으로 표현되므로 역시 상태함수이다[6, 7].

이렇게 구한 엑서지 식으로부터 씨스템과 외계의, 또는 계의 입 · 출구 사이의 모든 에너지의 흐름과 계 내부의 비가역성에 의한 포텐셜 감소에 따른 에너지 감소량을 알 수 있다.

3. 모델링

3-1. 발전소 씨스템의 구조

본 연구의 모델인 화력발전소 씨스템은 개략적으로 Fig. 1과 같은 구조를 가지고 있다. 우선 물과 연료가 고압 급수 가열기로 주입되어지고 거기서 고압의 증기를 생산하며 초급수 가열기를 거치면서 온도도 증가시켜 고온, 고압의 상태에서 고압 터빈을 돌린다. 고압 터빈에서 얻을 수 있는 일량은 펌프의 동력으로 이용되며 유출되는 기상 흐름은 저압 터빈으로 유입되며 저압 터빈을 거쳐 생성된 일에너지는 발전기(generator)로 유입된다. 발전기는 일에너지를 전기에너지로 바꿔주며 전기를 발생시키고 효율은 35 %이다. 터빈을 거쳐 나오는 저온, 저압의 증기는 응축기에서 응축되어 응축수가 되고 이것은 응축 펌프를 거쳐서 온도와 압력이 증가된다. 이렇게 펌프를 거친 응축수는 다시 고압 급수 가열기로 보내져서 위의 과정을 계속적으로 반복한다. 그렇기 때문에 위의 공정은 폐쇄 공급수 공정(closed feed water system)이라고도 한다[8].

3-2. 열역학적 물성값

본 화력 발전소 씨스템의 에너지 수지식과 엑서지 수지식을 얻기 위해서는 각 단위공정의 온도, 압력, 유량 등의 시강변수들의 값을 알아야 하는데 이는 공정모사기를 이용하여 얻을 수 있었고, 이에 대한 결과는 Table 1에 나타내었다. 이러한 시강변수들로부터 상태함수 값인 엔탈피와 엔트로피, 그리고 이 두 값을 이용한 엑서지 값을 구할 수 있고 이 값들 역시 Table 1에 나타내었다.

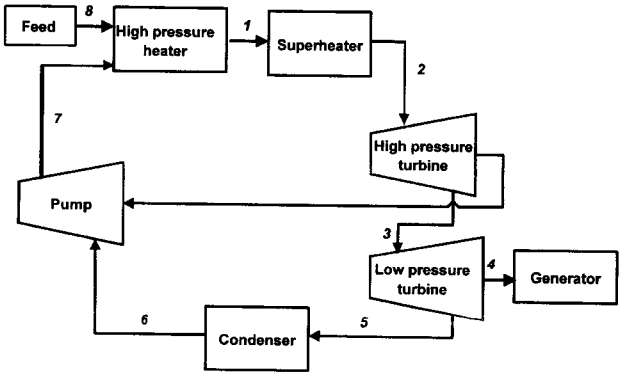

Fig. 1. Schematic diagram of the plant system.

Table 1. Thermodynamic properties of subsystems

Path	Unit	Pressure(kPa)	Temperature(K)	Enthalpy(kJ/kg)	Entropy(kJ/kgK)	Exergy(kJ/kg)
2	High pressure heater+Superheater	17314.64	812.94	3389.31	6.26	2337.54
3	High pressure turbine	3688.72	604.93	3051.73	6.55	1135.92
5	Low pressure turbine	16682.54	810.42	3372.53	6.29	1530.15
6	Condenser	5.03	351.15	2313.23	5.59	384.49
7	Pump	19441.24	517.15	1056.87	2.74	257.05
8	Feed	101.30	298.15	3074.40	8.21	626.44

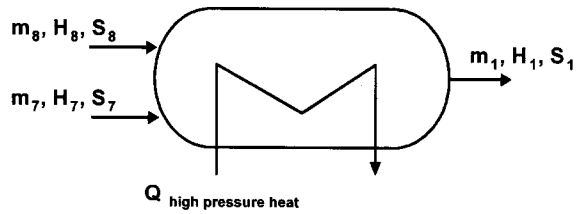

Fig. 2. Balance diagram of high pressure heater.

3-3. 고압 급수 가열기(high pressure heater : HPH)

본 씨스템에서 고압 급수 가열기는 도입되는 물을 고압으로 압축시키는 장치이다. 도입 흐름을 압축시키기 위해 공급되는 열량은 등엔트로피 과정으로 가정하였다. Fig. 2는 흡열 반응기의 입출력 변수들을 나타내고 이로부터 에너지 수지식은 다음과 같다.

$$Q_{HPH} = m_1H_1 - m_8H_8 - m_7H_7 \tag{8}$$

도입 흐름의 엑서지 수지식은 다음과 같다.

$$Ex_{HPH.loss} = Ex_Q + Ex_{m_1} - Ex_{m_7} - Ex_{m_8} = T_0(m_7S_7 + m_8S_8 - m_1S_1) \tag{9}$$

3-4. 초급수 가열기(superheater : SH)

고압 급수 가열기를 거친 고압 상태의 흐름은 초급수 가열기를 거쳐 고온, 고압의 흐름이 된다. Fig. 3은 발열반응기 주위의 변수들을 나타내고 이로부터 에너지 수지식은 다음과 같다.

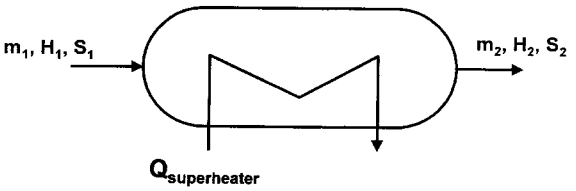

Fig. 3. Balance diagram of superheater.

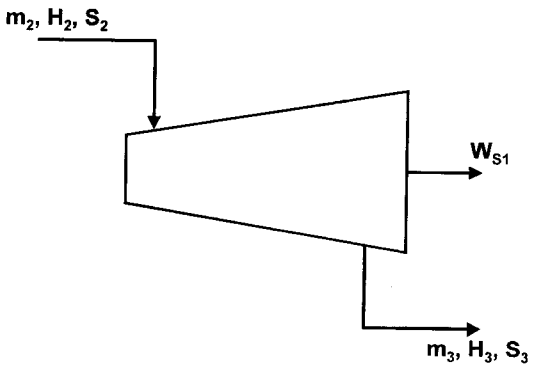

Fig. 4. Balance diagram of high pressure turbine.

$$Q_{SH} = m_2H_2 - m_1H_1 \tag{10}$$

고압 상태의 흐름이 초급수 가열기를 거쳐 고온, 고압화되는 흐름에서의 엑서지 수지식은 다음과 같다.

$$Ex_{SH.loss} = Ex_Q + Ex_2 - Ex_1 = T_0(m_2S_2 - m_1S_1) \tag{11}$$

3-5. 고압 터빈(high pressure turbine : HPTB)

초급수 가열기를 거친 고온 고압의 증기는 고압 터빈을 거쳐 외부로 일을 발생시키며 여기서 발생된 일은 펌프의 동력원으로 작용한다. Fig. 4는 이러한 고압 터빈이고 에너지 수지식은 다음과 같다.

$$W_{s_1} = m_2H_2 - m_3H_3 \tag{12}$$

외계로 빠져나가는 일량, 유입되는 성분들, 유출되는 성분들의 엑서지로부터 고압터빈의 에너지 손실량을 알 수 있고 그것은 다음과 같다.

$$Ex_{LPTB.loss} = Ex_{m_2} - Ex_{m_3} - Ex_{W_{s_1}} = T_0(m_3S_3 - V_2S_2) \tag{13}$$

3-6. 저압 터빈(low pressure turbine : LPTB)

저압터빈은 고압터빈으로부터 유입된 기상흐름을 이용하여 일을 발생시키며 이렇게 발생된 일은 발전기에서 전기를 발생시키는 동력으로 사용된다. Fig. 5는 저압 터빈이고 이로부터 다음의 에너지 수지식이 성립된다.

$$W_{s_2} = m_3H_3 - m_5H_5 \tag{14}$$

발전기로 빠져나가는 일량, 유입되는 성분들, 유출되는 성분들의 엑서지로부터 고압터빈의 에너지 손실량을 알 수 있고 그것은 다음과 같다.

$$Ex_{HPTB.loss} = Ex_3 - Ex_5 - Ex_{W_{s_2}} = T_0(m_5S_5 - m_3S_3) \tag{15}$$

3-7. 응축기(condenser : CD)

응축기는 고압터빈에서 나온 가상 흐름을 응축시켜 액상 흐름으로 만든다. Fig. 6은 이러한 응축기이고 에너지 수지식은 다음과 같다.

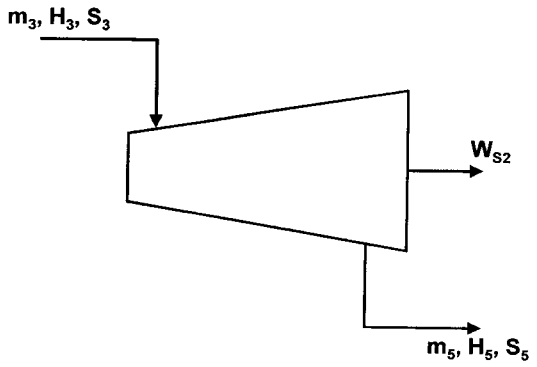

Fig. 5. Balance diagram of low pressure turbine.

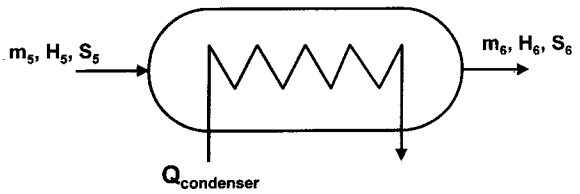

Fig. 6. Balance diagram of condenser.

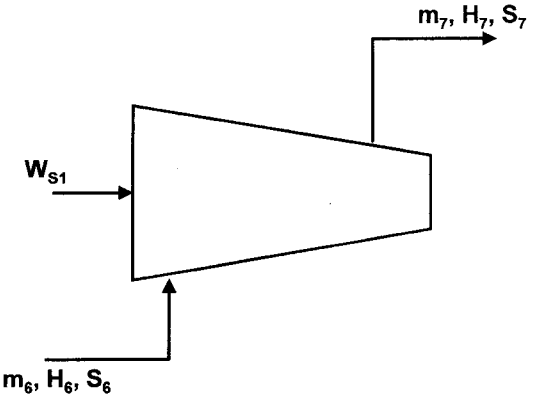

Fig. 7. Balance diagram of pump.

$$Q_{CD} = m_5H_5 - m_6H_6 \quad (16)$$

외부로 빠져나가는 열량과 입 · 출되는 흐름의 엑서지를 고려했을 때의 에너지 손실량은 다음과 같다.

$$Ex_{CD.loss} = Ex_5 - Ex_6 - Ex_Q = T_0(m_6S_6 - m_5S_5) \quad (17)$$

3-8. 펌프(pump : PP)

펌프는 터빈에서 나온 일량을 동력원으로 응축기에서 나온 흐름을 압축시켜 고압 급수 가열기로 보내는 역할을 한다. Fig. 7은 펌프이며 이에 대한 에너지 수지식은 다음과 같다.

$$W_{s_1} = m_7H_7 - m_6H_6 \quad (18)$$

입 · 출되는 흐름의 엑서지를 고려했을 때의 에너지 손실량은 다음과 같다.

$$Ex_{PP.loss} = Ex_6 - Ex_7 + Ex_{W_{s_1}} = T_0(m_7S_7 - m_6S_6) \quad (19)$$

4. 효율분석 및 고찰

발전소 씨스템에 적용된 에너지 수지로는 각 단위공정의 외계와의 에너지 변화를 통해 외계로 버려지는 에너지 손실량을 구할 수 있고 반면에 엑서지 수지로는 외계로 버려지는 엑서지 손실량 뿐 아니라 각 단위공정 내부의 손실량을 구할 수 있다. 이를 기초로 화력발전소 씨스템 각 단위공정의 에너지 손실량과 백분율을 비교하여 보았으며 이것을 Table 2에 나타내었다. 특히 엑서지를 이용해서 구하는 경우에는 yEXERGY 프로그램을 이용하였다. 각 단위공정의 수지와 Table 2, 식 (3), (7)을 이용하여 씨스템 전체 효율을 구할 수 있다. 이렇게 구해진 발전소 씨스템 효율은 에너지 수지를 이용했을 때 35.7 %, 엑서지 수지를 이용했을 때도 35.7 %가 나왔다. 즉, 에너지 효율과 엑서지 효율은 값이 같았고 이는 발전소 씨스템이 일정한 효율을 가진다는 것을 두 분석법으로 서로 검증한 결과가 된다.

비교 결과 에너지 수지식을 이용할 경우 응축기의 에너지 손실이 가장 많이 발생하였고 엑서지 수지식을 이용할 경우 고압 급수 가열기와 초급수 가열기, 즉 가열기의 엑서지 손실이 가장 많았다.

Table 2. Exergy loss and energy loss of subsystem

Exergy loss (BTU/lb fuel)	Ratio (%)	Unit	Energy loss (BTU/lb fuel)	Ratio (%)
6970	89.56	High pressure heater+Superheater	1500	10.76
80	4.42	Turbines	48	19.50
810	1.48	Condenser	230	47.33
186	4.08	Pump	7260	19.80
770	0.46	Others	210	2.25
3800	100.00	Total loss	9248	100.00

앞에서 언급하였듯이 에너지 수지식은 단순히 계와 외계와의 에너지 변화량만을 나타낸다. 응축기는 터빈에서 유출되는 기상의 흐름을 액상 흐름으로 냉각시키는 역할을 하는데 분석 결과 엔탈피 변화량은 많았지만 온도 변화는 크지 않으므로 실제로 우리가 다시 그 냉각수를 이용하기가 힘들며, 따라서 전체 효율을 향상시키기 위해 응축기의 조작변수를 변화시킬 필요가 없다.

반면에 고압 급수 가열기와 초급수 가열기는 다른 경향을 나타내는데 이 두 기관은 외계와의 엔탈피 변화량이 많지 않다. 하지만 기관 내부의 엔트로피 생성량은 많이 증가하였고 이로부터 손실량이 많이 발생함을 알 수 있다. 이것은 가열기의 경우 온도 뿐 아니라 압력변화가 심하기 때문에 온도의 함수인 엔탈피에 비해 온도와 압력의 함수인 엔트로피가 더 많이 생성되기 때문이다.

위의 결과를 토대로 에너지로 분석하였을 때와 엑서지로 분석하였을 때의 각 단위공정 내부의 손실량을 그 정도가 큰 것으로부터

Table 3. Comparison of exergy loss and energy loss in subsystem

Loss ranking	Exergy analysis	Energy analysis
1	High pressure heater +Superheater	Condenser
2	Turbines	Pump
3	Pump	Turbines
4	Condenser	High pressure heater +Superheater
5	Others	Others

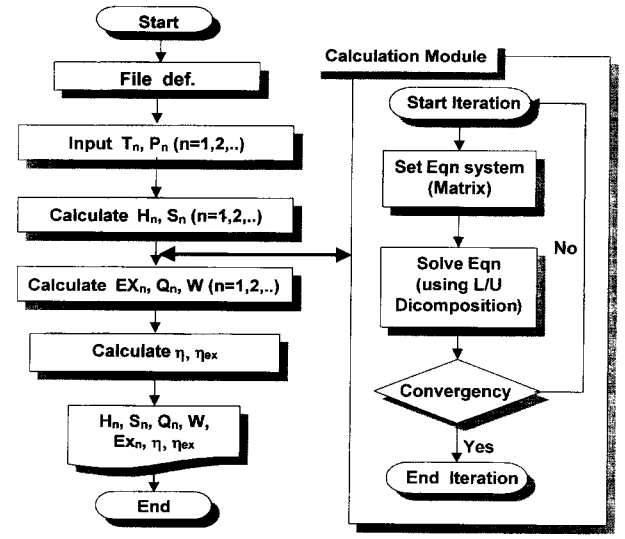

Fig. 8. Flowchart of yEXERGY program.

정렬하였으며, 이를 Table 3에 나타내었다.

5. 발전소의 엑서지 분석 프로그램 개발

발전소 씨스템을 엑서지로 분석하기 위해 작성된 프로그램인 yEXERGY는 Visual Basic을 이용하여 만들어졌다. 발전소 씨스템의 각 단위공정으로 유입되는 흐름과 단위공정을 지나 유출되는 흐름의 열역학적 물성값들인 온도, 압력을 도입 변수(input variables)로써 입력하고 프로그램을 작동시키면 결과 변수(output variables)로써 엔탈피, 엔트로피, 엑서지 값과 각 단위공정의 엑서지 손실과 전체 발전소 씨스템의 엑서지 효율이 계산된다. 여기서 각 에너지 수지식들과 엑서지 수지식들은 모두 선형방정식 형태로써 나타나며, 이러한 선형방

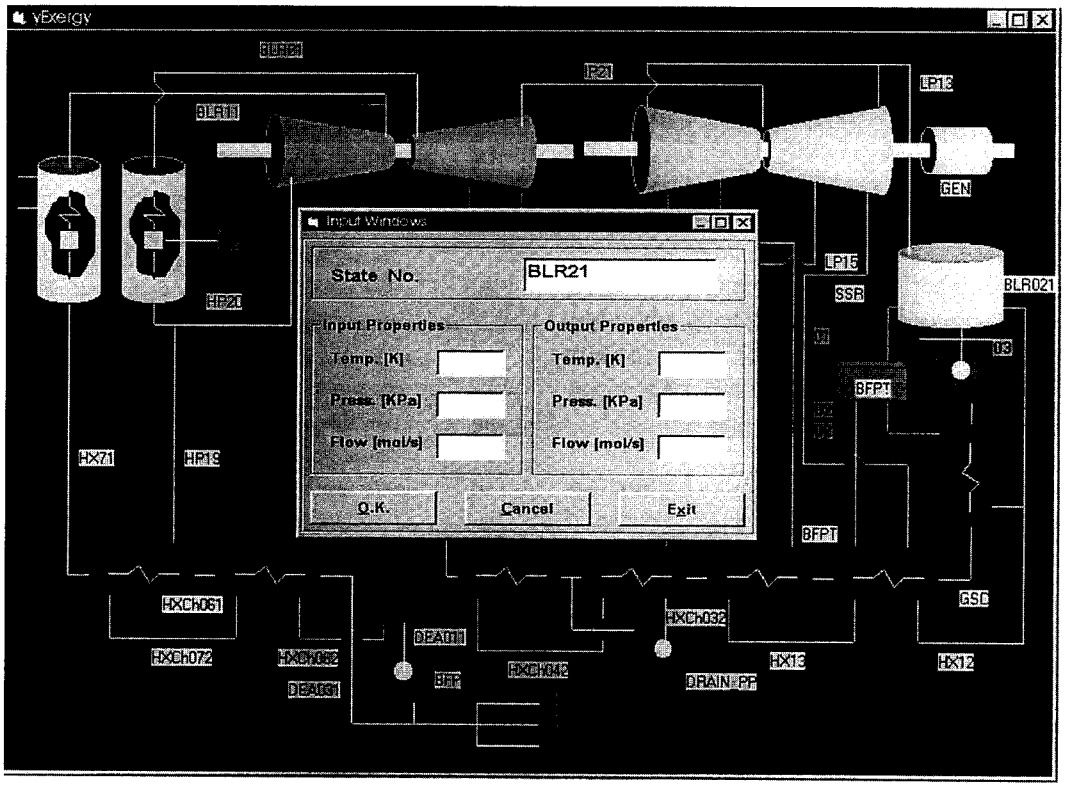

Fig. 9. Inserting part of input variables.

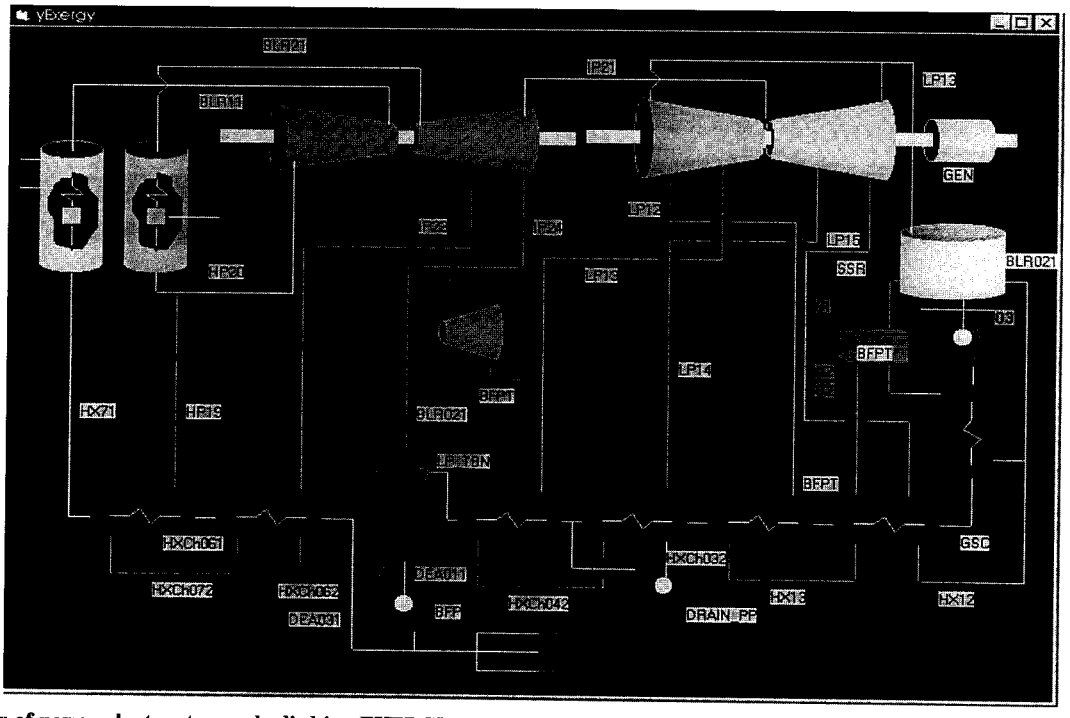

Fig. 10. Window of power plant system embodied in yEXERGY.

정식들을 행렬을 이용하여 계산함으로써[equation-oriented method] 동시에 변수들의 값이 계산될 수 있다[10]. 본 프로그램에서는 L/U분해법을 이용한 계산 부분을 C 프로그램으로 작성하여 주 프로그램 부분과 자료를 받아 계산을 수행하여 결과를 보내주는 역할을 하게 된다. Fig. 8은 프로그램 실행에 대한 개략적인 흐름도를 나타낸 것이다.

이 yEXERGY는 사용자가 도입 변수를 입력하기 쉽고, 각 단위공정의 엑서지 손실 정도에 따라 결과가 순서대로 정렬되어 비교 분석이 용이하다는 장점이 있다.

Fig. 9는 자료를 입력하기 위하여 흐름의 번호를 클릭하였을 때 나타나는 입력창 화면이고, Fig. 10은 도입 변수들이 다 기입되어졌을 때 공정이 실행되는 것을 나타낸 그림이며, 그러한 실행화면을 통해 결과 값들이 출력된다.

6. 결 론

엑서지 수지와 기존의 에너지 수지를 이용하여 화력 발전소 씨스템의 효율을 구하여 서로 비교 분석하였고, 엑서지 수지를 화력 발전소 씨스템에서 쉽게 이용할 수 있는 사용자 편리 프로그램인 yEXERGY를 개발하였다. 이러한 비교 분석과 yEXERGY 프로그램의 사용을 통해서 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 화력 발전소 씨스템을 에너지 수지를 이용하여 분석하면, 응축기에서 최대 손실이 발생하며 엑서지 수지를 이용하여 분석하면 가열기에서 최대 손실이 발생하는데 비교 결과 가열기에서 손실된 엑서지량이 응축기에서 손실된 에너지량보다 열역학적으로 더 개선이 가능함을 알 수 있었고, 이 단위 공정의 개선을 통해서 화력 발전소 씨스템의 효율을 높일 수 있음을 예측할 수 있었다.

(2) 엑서지 수지와 Visual Basic을 이용하여 화력 발전소 씨스템의 손실량과 효율을 계산할 수 있는 사용자 편리 프로그램인 yEXERGY를 개발하였다.

(3) 화력발전소 씨스템의 효율은 에너지 수지를 이용할 때나 엑서지 수지를 이용할 때 같은 값을 가졌는데 엑서지 수지를 이용한 효율 분석의 타당함이 검증되었다.

감 사

본 연구는 1997년도 기초전력공학공동연구소 지원 전력기술 기초연구 지원사업에 의해 연구되었으며, 이에 감사드립니다.

사용기호

b : maximum available work from state 1 to environmental state [J/s]
Δb : maximum available work from state 1 to state 2 [J/s]
$Ex_{CD.loss}$: exergy loss of condenser [J/s]
$Ex_{HPH.loss}$: exergy loss of high pressure heater [J/s]
Ex_{HPH} : exergy of high pressure heater [J/s]
$Ex_{SH.loss}$: exergy loss of superheater [J/s]
Ex_{SH} : exergy of superheater [J/s]
Ex_{loss} : exergy loss of total system [J/s]
$Ex_{LPTB.loss}$: exergy loss from low pressure turbine [J/s]
$Ex_{HPTB.loss}$: exergy loss from high pressure turbine [J/s]
$Ex_{PP.loss}$: exergy loss from pump [J/s]
$Ex_{W_{S_1}}$: exergy work of from low pressure turbine to pump [J/s]
$Ex_{W_{S_2}}$: exergy work of from high pressure turbine to generator [J/s]
H_1 : enthalpy of liquid stream from high pressure heater to superheater [mol/s]
H_2 : enthalpy of vapor stream from superheater to high pressure turbine [mol/s]
H_3 : enthalpy of vapor stream from high pressure turbine to low pressure turbine [mol/s]
H_5 : enthalpy of vapor stream from low pressure turbine to condenser [mol/s]
H_6 : enthalpy of liquid stream from condenser to pump [mol/s]
H_7 : enthalpy of liquid stream from pump to high pressure heater [mol/s]
H_8 : enthalpy of liquid stream from feed to high pressure heater [mol/s]
m_1 : flow rate of liquid stream from high pressure heater to superheater [mol/s]
m_2 : flow rate of vapor stream from superheater to high pressure turbine [mol/s]
m_3 : flow rate of vapor stream from high pressure turbine to low pressure turbine [mol/s]
m_5 : flow rate of vapor stream from low pressure turbine to condenser [mol/s]
m_6 : flow rate of liquid stream from condenser to pump [mol/s]
m_7 : flow rate of liquid steam from pump to high pressure heater [mol/s]
m_8 : flow rate of liqiud stream from feed to high pressure heater [mol/s]
Q_{CD} : heat load of condenser [J/s]
Q_{HPH} : heat load of high pressure heater [J/s]
Q_{SH} : heat load of superheater [J/s]
ΔS : entropy change of system [J/s · K]
S_1 : entropy of liquid stream from high pressure heater to superheater [J/mol · K]
S_2 : entropy of vapor stream from super heater to high pressure turbine [J/mol · K]
S_3 : entropy of vapor stream from high pressure turbine to low pressure turbine [J/mol · K]
S_5 : entropy of vapor stream from low pressure turbine to condenser [J/mol · K]
S_6 : entropy of liquid stream from condenser to pump [J/mol · K]
S_7 : entropy of liquid stream from pump to high pressure heater [J/mol · K]
S_8 : entropy of liquid stream from feed to high pressure heater [J/mol · K]
T_0 : environmental temperature [K]
W_{S_1} : work from high pressure turbine to pump [J/s]
W_{S_2} : work from low pressure turbine to generator [J/s]

그리이스 문자

η : efficiency based on the first law of thermodynamics
η_{ex} : efficiency based on exergy

참고문헌

1. Gaggioli, R. A. and Petit, P. J.: *Chemtech*, 7, 496(1977).
2. Morgan, M. J.: "Availability Analysis", Prentice-Hall, New Jersey,

46(1982).
3. Sussman, M. V.: "Availability(Exergy) Analysis", Mulliken House, MA, 13(1980).
4. Noel de Nervers: *Chemtech.*, **12**, 303(1982).
5. Morgan, M. J. and Sciubba, E.: *J. of Eng. for Gas Turbines and Power,* **116**, 285(1994).
6. Joo, H. S., Choi, C. K. and Kim, H.: *HWAHAK KONGHAK,* **30**, 537(1992).
7. Smith, J. M. and Van Ness, H. C.: "Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics", 4th ed., McGraw-Hill, Singapore, 135 (1987).
8. Bidini, G. and Stecco, S. S.: *J. of Eng. for Gas Turbines and Power,* **113**, January, 145(1991).
9. Reid, R. C., Prausnitz, J. M. and Poling, B. E.: "The Properties of Gases and Liquids", 4th ed., McGraw-Hill, New York, 46(1988).
10. Perz, E.: *J. of Eng. for Gas Turbines and Power,* **113**, April, 185 (1991).
11. Wi, J. H., Choi, C. K., Joo, H. S., Cho, Y. and Kim, H.: *HWAHAK KONGHAK,* **30**, 406(1992).
12. Ko, D. and Moon, I.: *HWAHAK KONGHAK,* **35**, 338(1997).
13. Hwang, D., Oh, M. and Moon, I.: *HWAHAK KONGHAK,* **36**, 151 (1998).