

열병합 복합발전시스템용 폐열회수 보일러 열설계 소프트웨어 개발 연구

김태국*, 오시덕**, 권용호**, 서석호**, 김백영***

Development of a Thermal Design Software for the Heat Recovery Steam Generator of Combined Cogeneration Systems

T.K. Kim*, S.D. Oh**, Y.H. Kwon**, S.H. Seo**, B.Y. Kim***

Key Words: Combined Cogeneration System(열병합 복합발전 시스템), Heat Recovery Steam Generator(폐열회수보일러), Thermal Design Software(열설계 소프트웨어), Element Method(요소분할법), Water Circulation Analysis(수순환 해석)

Abstract

A thermal design software is developed for the heat recovery steam generator(HRSG) of combined cogeneration systems. The heat transfer is calculated by using the element method to account for the varying thermal properties across the heat transfer elements. The circulation balance is computed for the evaporator to accurately estimate the steam generation rate and to check the proper circulation of the boiler water through the tubes. The software developed can be used to simulate HRSG systems with various combinations of auxiliary burner, wall superheater, superheater, reheater, evaporator, and economizer. Systems with several different combinations of the system components are successfully tested. And it is concluded that the developed software can be used for the design of heat recovery steam generators with various combinations of heat transfer components.

I. 서론

열 시스템의 고 효율화 및 효율적인 에너지 관리 등을 통하여 에너지를 절약함으로써 환경문제를 최소화하기 위하여 신진국을 중심으로 열 및 전력을 동시에 발생시키는 열 병합 시스템에 대한 관심이 고조되고, 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 열에너지로부터 기계적 일을 추출하기 위한 동력발전장치는 열역학적 사이클을 겪는 작동유체를 이용하는데, 작동유체는 고온열원으로부터 열을 흡수하고 저온열원으로 열을 배출하게 된다. 이 때 높은 온도를 갖는 연소가스는 Brayton 사이클을 따라 작동하는 가스터빈을 구동시키고, 가스터빈 출구로부터 배출되는 온도가 낮은 연소가스는 폐열회수 증기보일러(Heat Recovery Steam Generator, HRSG)를 지나면서 과열증기를 생산하여 Rankine 사이클을 따라 작동하는 증기터빈을 구동시키게 할 수가 있다. 이와 같이 2가지의 열역학적 사이클을 따르면서 동력을 생산하는 시스템을 복합 발전 열병합 시스템(Combined Cycle Cogeneration System)이라 하며, 이러한 시스템은 전력 생산 및 에너지 절약 면에서 매우 효과적이므로 주목의 대상이 되고 있다[1].

가스 터빈 출구의 폐 가스로부터 열을 회수하

여 과열증기를 생산하는 폐열회수 증기보일러는 복합 발전 열병합 시스템에서 중요한 시스템 요소이며, 이는 시스템의 규모 및 목적에 따라 다양한 형태의 설계가 가능하다. 본 연구에서는 Fig. 1에 나타낸 바와 같은 가스터빈/증기터빈 복합 열병합 발전 시스템용 폐열회수 시스템의 열-수력학적 설계 프로그램을 개발하는 것을 목표로 하고 있다. 연구 대상으로 고려하고 있는 폐열회수 증기보일러는 수관식 2 드럼형으로서 연도 벽의 과열을 방지할 수 있도록 설치되는 벽면 과열기(Wall Superheater, WS/H), 과열증기를 생산하는 과열기(Superheater, S/H), 증기 터빈의 중간 단으로부터 추출된 증기를 가열하여 증기의 과열도를 높여주는 재열기(Reheater, R/H), 증기를 발생시키는 증발기(Evaporator, EVA) 및 급수를 예열하는 절단기(Economizer, ECO) 등이 설치된 자연 순환식 구조를 갖는 것으로 하였다. 또한 가스터빈 배기가스의 열량이 필요한 량의 증기를 발생시키는 데 충분하지 않은 경우 보조 연료를 연소시켜서 열량을 보충할 수 있도록 연도내부에 보조 연소기(Auxiliary Duct Burner, DB)를 설치하여 운전할 수 있도록 고려하였다.

II. 폐열회수 보일러의 열설계

기존의 LMTD 법이나 ϵ -NTU 법은 열교환기에 유입되는 유체가 균일한 상태로 들어온다고 가정하고 계산된다[2]. 즉, 열교환기 단면을 통과하는 유체의 물성치 변화를 고려하지 않고 있으며 또한 열교환기 전체에 걸쳐서 열전달계수가 일정하다고 가정하고 있다. 이에 비해 열교환기를 요

* 중앙대학교

** (주)효성

*** 재능대학

소로 분할하고 각 요소에 대하여 에너지 균형식을 적용하여 열교환기를 해석하는 요소 해석방법은 국소적인 물성치의 변화나 열전달 계수의 변화까지도 고려할 수 있어 보다 정확한 계산결과가 기대된다[3]. 특히 열교환 시스템의 크기가 매우 큰 발전용 보일러의 배열회수 열교환 시스템의 설계에 있어서는 이러한 요소해석 방법이 보다 효과적인 해석방법이라고 할 수 있다. Fig. 2, 3, 4 및 5에는 배열회수 증기보일러의 각 부분 별로 열교환 요소들을 나누고 있는 세부 단면도를 나타내고 있다.

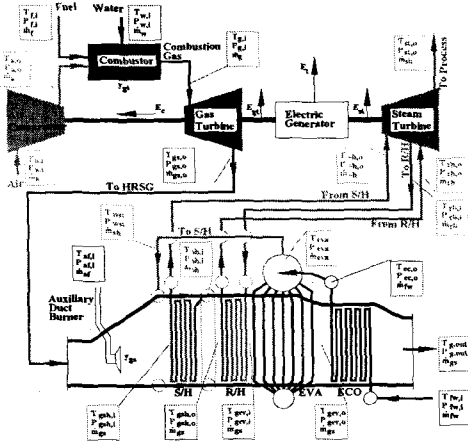


Fig. 1 Combined Cycle System.

2.1 과열기, 재열기 및 증발기의 설계

과열기, 재열기 및 증발기의 열/수력학적 설계를 위하여 Fig. 2, 3 및 4에 나타낸 바와 같이 연소가스의 유동 단면에 대하여 미소 크기의 열교환 요소들로 분할하여 각 요소에 대한 질량 및 에너지 밸런스를 적용하고자 한다. 이러한 요소분할법의 적용에 있어서 사용된 가정 사항들은 다음과 같다.

▶ 연소가스의 주 유동 방향에 대한 열확산 및 주유동 방향에 직각인 방향으로의 질량확산은 각각 무시한다.

▶ 연소가스의 주 유동 방향에 직각인 방향으로의 유동은 무시한다.

과열기, 재열기 및 증발기에서의 에너지 밸런스는 전절에서 설명된 각 열교환 요소들을 살펴 볼 때 연소가스가 갖는 열은 다음과 같이 열교환을 고려하여 가스가 빼앗기는 열량과 증기 및 보일러수가 얻는 열량이 같아야 한다는 에너지 밸런스에 의하여 다음과 같은 일반적인 에너지 밸런스 식이 유도될 수 있다.

$$\begin{aligned} \delta Q &= -\dot{m}_g(j,k) C_{p,g(i,j,k)} A_{g(i,k)} (T_{g(i+1,j,k)} - T_{g(i,j,k)}) \\ &= (-1)^{i+1} \dot{m}_s C_{p,s(i,j,k)} A_s (T_{s(i,j,k+1)} - T_{s(i,j,k)}) \\ &\quad + f_{us} \dot{m}_{us} C_{p,us(i,j,k)} A_{us} (T_{us(i+1,j,k)} - T_{us(i,j,k)}) \\ &\quad + k_g A_y \left\{ \left(\frac{\partial T_g}{\partial y} \right)_n - \left(\frac{\partial T_g}{\partial y} \right)_s \right\} \\ &\quad + k_g A_z \left\{ \left(\frac{\partial T_g}{\partial z} \right)_t - \left(\frac{\partial T_g}{\partial z} \right)_b \right\} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, A_g, A_s, A_{us} 는 각각 연소가스 통로, 전열관

및 벽면 증기관의 단면적을 나타내고, A_y, A_z 는 제어체적 요소의 y 및 z방향에 수직인 단면의 연소가스 단면적을 나타내며, $\dot{m}_g, \dot{m}_s, \dot{m}_{us}, C_{p,g}, C_{p,s}, C_{p,us}, T_g, T_s, T_{us}$ 는 연소가스, 전열관내부 유체 및 관벽 증기관의 질량유속, 비열 및 온도를 각각 나타낸다. k_g 는 열교환 요소내부 연소가스의 평균 열전도율을 나타낸다. $f_{us}=0$ 는 전열관벽이 없는 제어체적요소를 나타내고, $f_{us}=1$ 은 전열관벽이 있는 제어체적요소를 나타낸다.

또한 LMTD값 및 총괄열전달계수를 도입하여 위에 나타낸 열전달량을 다음과 같은 형태의 수식으로 나타낼 수도 있다.

$$\delta Q = U_{gs(i,j,k)} A_{gs} F \Delta T_{lm,gs} + f_{us} U_{gus(i,j,k)} A_{gus} \Delta T_{lm,gus} \quad (2)$$

여기서, U_{gs} 및 U_{gus} 는 각각 연소가스와 접촉되는 전열관 및 관벽을 통한 총괄열전달계수들을 나타내며, A_{gs} 및 A_{gus} 는 각각 전열관, 벽면관의 연소가스와 접촉되는 전열면적을 나타낸다. 그리고, 계수 F 는 LMTD 수정계수를 나타낸다[2]. 식(2)의 LMTD값들은 각각 다음과 같이 결정될 수 있다.

$$\Delta T_{lm,ta} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2} \right)} \quad (3)$$

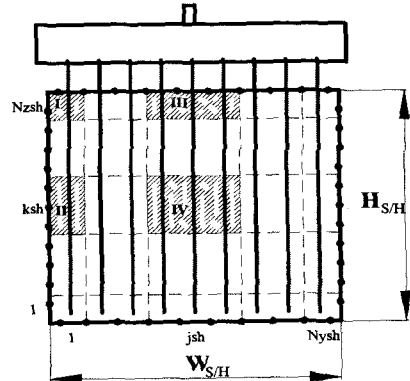


Fig. 2 Superheater section.

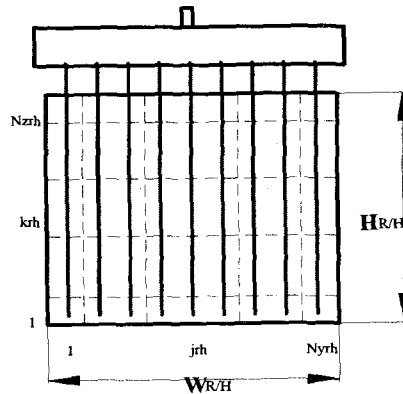


Fig. 3 Reheater section.

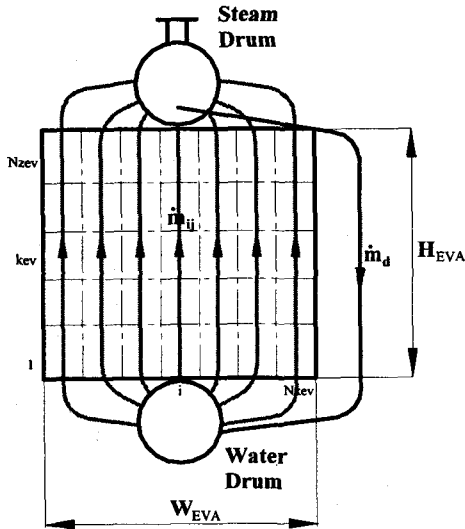


Fig. 4 Evaporator section

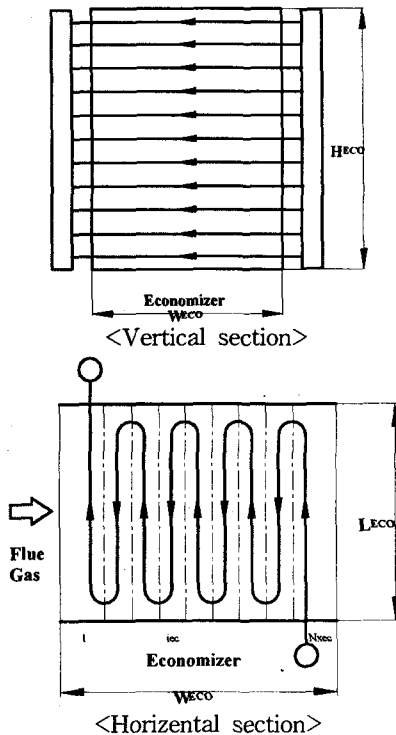


Fig. 5 Economizer section

2.2 절탄기의 설계

절탄기에서는 펌프로부터 공급되는 급수를 일반적으로 포화 온도보다 약간 낮은 온도로 가열하게 되며 증기는 발생되지 않아야 한다. 절탄기의 설계에서는 보일러의 증기드럼에 유입되는 급수의 온도(절탄기 출구의 물온도) 및 절탄기 출구의 배

기가스 온도를 적절히 제어할 필요가 있다.

본 연구에서 고려하고 있는 절탄기의 단면도는 Fig. 5에 나타낸 바와 같으며, 절탄기를 감싸고 있는 연도벽은 거의 단열된 상태로 운전되기 때문에 가스흐름에 직각인 단면에 대하여는 작은 열교환 요소로 분할할 필요가 없다. 다만 연소가스 흐름 방향으로는 가스의 온도가 급격히 변하기 때문에 절탄기 전열관 별 가스 온도의 변화를 고려할 필요가 있다.

보일러 하류 측에 설치된 절탄기에서의 에너지 밸런스는 앞에서 설명된 내용을 고려하여 다음과 같이 나타낼 수가 있다.

$$\begin{aligned} \delta Q &= -\dot{m}_g C_{p,g,i} A_g (T_{g,i+1} - T_{g,i}) \\ &= \dot{m}_w C_{p,w,i} A_w (T_{w,out,i} - T_{w,in,i}) \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, A_g 는 하나의 제어체적에 대한 가스의 유동 단면적, A_w 는 과열증기관의 유로 단면적을 나타낸다. \dot{m}_g , \dot{m}_w , $C_{p,g}$, $C_{p,w}$, T_g , T_w 는 연소가스 및 급수의 질량유속, 비열 및 온도를 각각 나타낸다.

LMTD값 및 총괄열전달계수를 도입하여 위에서 나타낸 열전달량을 다음과 같은 형태의 수식으로 나타낼 수도 있다.

$$\delta Q = U_{gw(i)} A_{gw} F \Delta T_{lm, gw} \quad (5)$$

여기서, U_{gw} 는 연소가스와 접촉되는 급수관을 통한 총괄열전달계수들을 나타내며, A_{gw} 는 급수관이 연소가스와 접촉되는 면의 전열면적을 나타낸다. 그리고 계수 F 는 LMTD 수정계수를 나타낸다[2]. 식 (5)의 LMTD값은 식 (3)에서와 같이 결정될 수 있다.

2.3 작동 유체의 물성

본 연구의 열전달 계산에 필요한 유체의 물성 값들은 온도, 압력 및 성분율 등에 따라 계산하여 사용하고 있다. 물 및 연소가스의 물성값은 다음과 같이 결정되고 있다.

1) 물의 물성

보일러시스템을 설계하기 위하여는 작동유체인 물의 밀도(density), 비열(specific heat), 점성계수(viscosity) 및 열전도계수(conductivity) 등과 같은 물성값을 필요로 한다. 이러한 물성값은 물의 상태가 어떠한가에 따라서 몇 개의 영역을 나누어서 보간식을 적용하여 계산하고 있다. 본 연구에서는 고려되고 있는 물 및 증기의 기본적인 물성값은 IFC(Int. Formulation Committee)에서 제시한 보간식들을 이용하여 계산하고 있으며, 이들은 6개의 영역으로 나누어서 보간된 수식들로 구성되어 있다[4].

2) 연소가스의 물성

여러 가지 종류의 가스 성분에 대한 열역학적 물성자료(비열 및 엔탈피)는 미국표준국(National Bureau of Standards)에 의하여 출간된 JANAF Tables[5]에서 찾아 볼 수 있다. 전산처리를 위하여 도표형태로 주어진 자료를 직접 이용하는 것은 비효율적이며, 다음과 같이 각각의 가스성분(i)에 대하여 다항식으로 수식화된 결과들을 이러한 물성치 계산에 이용하는 것이 효과적이다. 여기서, 계수들은 JANAF Tables를 이용하여 구한 값들이다.

$$\frac{C_{\mu}}{R} = a_1 + a_2 T + a_3 T^2 + a_4 T^3 + a_5 T^4 \quad (6)$$

기체의 열전도율 및 점성계수 등을 정확하게 계산할 수 있는 가스의 운동역학 이론 (kinetic theory) 은 상당히 발달되어 있다[6]. 예를 들어 분자량 M_i , 온도 T 인 순수 성분 가스의 점성계수는 다음의 식으로부터 계산될 수 있다.

$$\mu_i = 26.693 \times 10^{-6} \frac{\sqrt{M_i T}}{\sigma_i^2 \Omega_i} \quad [\text{poise}] \quad (7)$$

여기서, σ_i 는 분자의 지름 [angstrom] 을 나타내며, Ω_i 는 분자간 충돌에 대한 영향을 나타내는 무차원 인수이다.

가스의 열전도율 (k_i)은 병진운동에너지를 고려한 k_i' 과 내부에너지를 고려한 k_i'' 로 나누어진다.

$$k_i = k_i' + k_i'' \quad (8)$$

2.3 열전달 계수

관 내부의 단상류 유체에 대한 대류열전달계수는 Petukhov [7]에 의하여 제안된 경험식을 이용하여 계산하고 있다. 원형의 전열관 내부를 흐르는 유체의 대류열전달계수 $h_{c,i}$ 는 다음과 같은 수식을 이용하여 결정할 수 있다.

$$\frac{h_i d_i}{k_f} = \frac{(f/8) Re Pr}{1.07 + 12.7(f/8)^{1/2} (Pr^{2/3} - 1)} \left(\frac{\mu_b}{\mu_w} \right)^{0.11} \quad (9)$$

여기서, f 는 마찰계수를 나타내며, 모든 물성값들은 유체의 평균온도 $T_m = (T_{in} + T_{out})/2$ 에서 결정된 값들이다. 단, μ_b 는 유체의 입.출구평균온도 T_m 에서 그리고 μ_w 는 관벽온도 (wall Temperature)에서 각각 결정되는 물성값이다.

나관 (bare tube)으로 구성된 전열관외부의 가스측 대류열전달계수 $h_{c,o}$ 는 다음과 같이 층류 및 난류의 영향을 고려하여 계산하는 수식을 이용하여 산출하였다[8].

$$h_{c,o} = \left(\frac{k_f}{d_o} \right) F_A (0.3 + \sqrt{Nu_{L,lam}^2 + Nu_{L,turb}^2}) \quad (10)$$

여기서,

$$Nu_{L,lam} = 0.664 \sqrt{Re_{\phi,L}} Pr^{1/3} \quad (11)$$

$$Nu_{L,turb} = \frac{0.037 Re_{\phi,L}^{0.8} Pr}{1 + 2.443 Re_{\phi,L}^{-0.1} (Pr^{2/3} - 1)} \quad (12)$$

F_A 는 기하학적 보정계수, Re_{ϕ} 관 사이를 흐르는 유체의 최대 속도에 대한 Reynolds 수를 각각 나타낸다.

Fin 이 부착된 전열관외부의 가스측 대류열전달계수 $h_{c,o}$ 는 Schmidt[9] 등이 제안하고 있는 다음과 같은 경험식들을 이용하여 계산하고 있다 [2, 10].

$$h_{c,o} = \left(\frac{k_f}{d_o} \right) N_u \quad (13)$$

여기서 N_u 수는 관 배열 및 유동의 조건들에 따라 달라진다.

Fin 이 부착된 관인 경우 바깥지름을 기준으로

한 매끈한 관에 상당하는 총괄열전달계수 U_o 는 다음과 같이 산출될 수 있다.

$$\frac{1}{U_o} = R_{f_o} + \frac{A_o}{A_i \eta_i h_o} + \frac{d_o \ln(d_o/d_i)}{2k_m} + \frac{d_o}{d_i} \frac{1}{h_i} + R_{f_i} \frac{d_o}{d_i} \quad (14)$$

여기서, R_{f_i} 및 R_{f_o} 는 관 내부 및 외부의 오염계수를, h_i 및 h_o 는 관 내부 및 외부의 열전달계수를, d_i 및 d_o 는 관의 안지름 및 바깥지름을 각각 나타낸다. k_m 은 관의 열전도 계수이며, η_i 는 fin이 부착된 전열면의 총괄표면효율이다.

열전달면의 오염에 따른 영향을 고려한 오염계수는 경험적으로 결정되는 값으로서 접촉되는 유체와 표면의 조건에 따라 상당히 다른 값을 갖게 된다[11]. 보일러 열전달면에서의 오염저항은 연료의 종류, 연소상태, 가스속도, 보일러 급수의 상태 등과 같은 보일러 운전조건에 따라 크게 차이가 있으므로 설계시 여유있는 값으로 취하는 것이 바람직하며 본 연구에서는 이창룡 등[12]이 제안하고 있는 값을 사용하였다.

2.4 가스측 압력 손실

관외의 가스측 압력강하 Δp 는 최소 유로 단면 을 지나는 가스의 최대유속 u , 관의 간격 s_1 및 s_2 , 관의 바깥지름 d_o , 관열수 z , 가스의 점성계수 (μ) 및 밀도 (ρ)의 함수로 다음과 같이 표시할 수 있다[2, 10].

$$\begin{aligned} \Delta p &= f(u, s_1, s_2, d_o, z, \mu, \rho) \\ &= E_u \frac{\rho u^2}{2} z \\ &= 4f \frac{\rho u^2}{2} z \end{aligned} \quad (15)$$

여기서, E_u 는 Euler 수로서 Zukauskas의 실험결과로부터 주어진 값이다.

III. 증발관 관내의 수순환 해석

보일러 시스템의 열 밸런스 분석에 의하여 보일러의 필요 증기용량이 결정되면 연료의 연소열을 공급받아 이러한 증기용량을 얻을 수 있는 보일러의 크기를 결정하는 것은 매우 중요하다. 용량 크면서 높은 열효율을 요구하는 보일러는 고온 고압 상태에서 운전되는 것이 일반적이며, 자연순환형 또는 관류형의 수관식 보일러로 설계되고 있다. 이러한 보일러는 그 단가가 높으므로 제작비 및 설치 공간 등이 최소가 되도록 설계되어야 하며, 동시에 원하는 성능 및 안전성이 보장되어야 하기 때문에 매우 세심한 설계가 요구되고 있다.

보일러의 설계에 있어서 보일러 내부에서의 물-증기 순환 밸런스 분석은 중요한 일이며, 순환 밸런스 분석의 목적을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 보일러의 다양한 부하에 따라 각 부위의 관내에 충분한 흐름을 확보.
- 2) 성능 및 안전운전을 위하여 설정된 제한조건을 만족하는지 확인.
- 3) 각 부품의 크기(상하 드럼사이의 높이, 관지름, 관열 수 등)를 결정.

보일러의 수순환 분석에 있어서 중요한 인자로는 증발관(evaporator)내에서 발생된 총증기량(G_g)에 대한 하강관(down comer)으로 공급되는 물의

총량(총순환수량, G_m)의 비율로 정의되는 순환비(circulation ratio, $R_{cr} = G_w/G_s$)가 있다. 이러한 순환비는 보일러의 안전한 운전을 위하여 적절한 크기 이상으로 유지되어야 하며, 이는 보일러의 종류, 용도 및 운전 압력 등에 따라 다른 값이 추천되고 있다. 보일러의 대표적인 순환비의 범위는 Kakac[13]에 주어져 있다.

Fig. 4는 본 연구에서 고려하고 있는 보일러의 순환계통에 대한 개략도를 나타내고 있으며, 보일러 수는 상부의 증기드럼(Steam drum)을 기점으로 하여 증기드럼 하부에 공급된 급수가 하강관(water drum)에 의하여 증발관(상승관)으로 분배되고 증발관을 따라 상승하면서 가열되어 일부의 물이 증발하는 과정을 거치게 된다. 증기드럼으로 유입되는 물-증기 혼합유체는 증기분리기(Steam separator)에 의하여 물과 증기로 구분되어 증기는 과열기로 보내고, 물은 다시 위와 같은 순환경로를 통하여 재 순환된다.

1) 순환 압력 밸런스

입의 순환관로에 대한 순환 밸런스로부터 다음과 같이 하강관과 증발관의 수두차와 이러한 관로를 통한 압력손실이 같아야 한다는 조건을 얻을 수 있다.

$$\rho_D H_D - \int_0^{H_D} \rho(z) dz = \Delta P_{total} \quad (16)$$

여기서, 좌측 첫 번째 항은 하강관에서의 총 수두, 두 번째 항은 상승관에서의 총 수두, ΔP_{total} 는 총 손실수두를 각각 나타낸다.

2) 기본 가정

본 연구에서는 보일러의 순환계통을 분석하는데 있어서 해석을 용이하게 하기 위하여 다음과 같은 가정을 하였다.

- i) 증발관 내부의 물-증기 이상유체는 균일한 혼합된 상태로 존재한다(Homogeneous).
- ii) 증발관 내부 및 외부면에서의 대류 열전달계수는 관의 위치별로 다른 값을 갖는다(요소분할 계산의 결과를 이용).

IV. 열/수력 설계 프로그램 개발

1) 프로그램의 구성

본 연구에서 개발된 폐열회수 보일러 설계 프로그램은 2가지의 설계 mode로 실행될 수 있도록 개발되었다. MODE=0인 경우에는 주어진 폐열회수 보일러의 구조에 대하여 예상되는 성능을 해석하게 되며, MODE=1인 경우에는 원하는 증기 용량을 얻기 위하여 필요한 폐열회수 보일러의 구조를 구하도록 할 수가 있다. Fig. 6은 본 연구에서 개발된 폐열회수보일러 설계 프로그램의 자료입력 화면을 보여 주고 있다.

2) 보일러 크기 결정 기준

보일러의 크기는 증기 출구온도, 보일러 출구 가스온도, 가스유속, 물 및 증기 유속, 증발관 내부의 순환비(R_{cr}), 증기 발생량, 및 급수 온도 등에 대한 제한 조건을 만족하도록 결정하고 있다. 이러한 각각의 제한조건들은 다음에 설명하고 있는 요령에 의거하여 적용하였다.

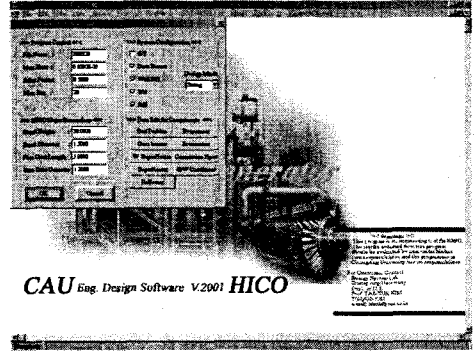


Fig. 6 Data input screen.

첫째, 보일러 출구 증기의 온도가 주어진 범위 이내가 되도록 보일러 전열면적의 크기를 결정하고, 높은 열효율을 유지하기 위하여 보일러 출구의 연소가스 온도가 적절한 범위 이내의 값을 갖도록 설계하고 있다. 이러한 조건을 만족시키기 위하여 보일러 관 열의 수 및 관 사이의 피치 등을 변화시키면서 반복 계산하여 보일러 크기를 결정한다.

둘째, 보일러를 통과하는 연소가스의 유속이 허용범위 이내로 되도록 보일러의 크기를 조절하게 된다. 여기서, 가스 유속이 너무 큰 경우에는 가스 측 압력강하가 증가하여 가스터빈의 출력저하가 과대하게 될 수 있으며, 관군 내에서의 가스 유동속도가 너무 작아질 경우에는 열전달 성능이 저하되는 문제가 발생할 수가 있다. 따라서 가스측 유속은 적절한 범위에서 유지되도록 보일러를 제한 필요가 있으며, 이러한 유속 조건을 만족하도록 하기 위하여 보일러의 관 열 수 조정, 관 피치의 조정, 또는 유로 면적의 조정 등을 필요로 한다.

셋째, 보일러 수관 내부를 흐르는 물 및 증기의 유속은 펌프의 운전비용을 감안하여 결정되어야 하며, 물인 경우 대략 0.5 - 2 m/s 범위 그리고 증기인 경우에는 대략 5 - 30 m/s 범위 내로 유지하는 것이 바람직하다. 이러한 물 및 증기의 유속 범위를 만족하기 위하여 관의 수가 이에 상응하는 개수로 결정되어야 한다.

넷째, 보일러에서 발생하는 증기량은 증발기 부분의 전열면적의 크기에 관계된다. 따라서, 증기 발생량을 적정량 범위 이내가 되도록 하기 위하여 증발관의 수를 결정하여야 한다. 이때 증발기 내부에서의 순환비는 대표적인 순환비 범위 이내가 되도록 하는 것이 바람직하다.

IV. 해석 결과 및 고찰

본 연구에서 개발된 프로그램은 자연순환식 수직 수관형 폐열회수 증기 발생 장치(HRSG)의 설계를 위하여 사용될 수가 있다. 개발된 프로그램은 시험하기 위하여 몇 가지 대표적인 HRSG 시스템을 설계하는데 적용하여 보았다. 이를 위하여 Table 1과 같은 7가지의 시스템 구성에 대하여 시스템의 크기 결정 및 성능 분석을 수행한 결과 본 연구에서 개발된 프로그램은 폐열회수 증기 발생 장치의 설계에 유용하게 활용될 수 있음을 확인하였다.

Fig. 7 및 8에는 시스템 구성 I 및 VI을 고려하

여 시물레이션한 결과를 예로서 보여주고 있다.

Table 1 Typical system configurations for HRSG.

구성 요소	HRSG 시스템 구성						
	I	II	III	IV	V	VI	VII
보조 버너	YES	YES	NO	NO	NO	NO	NO
과열기	S/H	YES	YES	YES	YES	YES	NO
	WS/H	YES	YES	YES	YES	NO	NO
재열기	YES	NO	YES	NO	YES	NO	NO
증발기	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES
결탄기	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES

V. 결론

본 연구에서는 복합발전 열병합 시스템용 폐열 회수 증기보일러의 열-수력학적 설계 소프트웨어를 개발하였다. 개발된 소프트웨어는 증기용량 및 증기조건 등을 고려하여 폐열회수 보일러의 크기를 결정하거나 또는 보일러의 크기가 정해진 경우의 예상되는 성능을 분석하는 목적으로 각각 사용될 수가 있다. 그리고 보일러의 구성 요소를 다양한 조합으로 고려할 수 있도록 프로그램이 구성되었으며, 몇 가지 폐열회수 보일러의 시스템 구성을 고려하여 시물레이션을 한 결과 타당한 결과를 얻을 수 있었다. 따라서, 본 연구에서 개발된 프로그램은 추후 다양한 크기 및 구성을 하는 폐열회수 보일러 시스템의 실제 운전 데이터와 비교 검증함으로써 실제의 설계에 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

HRSG for Cogeneration

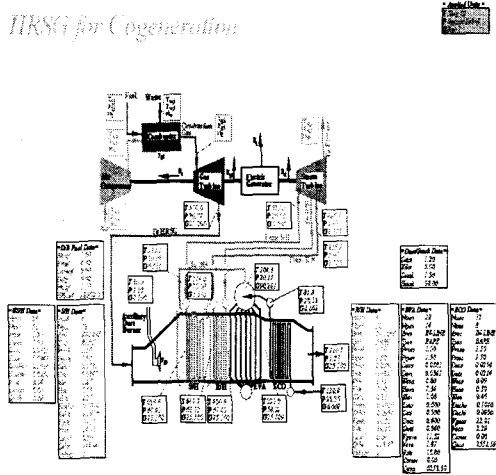


Fig. 7 Result for system configuration I

HRSG for Cogeneration

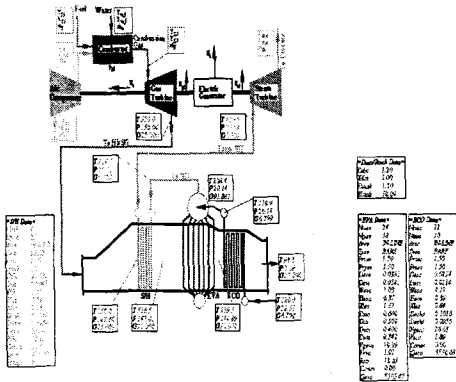


Fig. 8 Result for system configuration VI.

후기

본 연구는 산업자원부의 에너지자원 기술개발 연구 사업((주)효성 주관)의 일환으로 이루어 졌으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) ---, 1978, Steam: Its Generation and Use, 39th ed., The Babcock & Wilcox Company, New York
- (2) HEDH, 1983, "Heat Exchanger Design Handbook," VDI-Verlag GmbH, Vol.2
- (3) 김태국, 1999, "저공해상압순환 유동증보일러의 최적 열설계 기술개발에 관한 최종보고서," 산업자원부 연구 보고서
- (4) 일본 기계학회, 1968, "JSME Steam Tables"
- (5) Chase Jr., M.W., Davies, C.A., Downey Jr., J.R., Frurip, D.J., McDonald, R.A. and Syverud, A.N., 1985, JANAF Thermochemical Tables, 3rd Ed., National Bureau of Standards, 1985.
- (6) Hirschfelder, J.P., Curtiss, C.F. and Bird, R.B., 1954, Molecular Theory of Gases and Liquids, Wiley, New York, 1954.
- (7) Petukhov, B.S., 1970, "Heat Transfer & Friction in Turbulent Pipe Flow with Variable Physical Properties," in Advances in Heat Transfer, J.P.Irvine and J.P.Hartnett, eds., Academic Press, New York, pp.504-564
- (8) Schlünder, et al., eds., 1985, Heat Exchanger Design Handbook, Vol. 2 & Vol. 3, Hemisphere Publishing, New York
- (9) Schmidt, Th. E., 1951, "Heat Transmission and Pressure Drop in Banks of Finned Tubes and in Laminated Coolers," Gen. Discussion Heat Transfer, Inst. Mech. Eng., pp.186-188.
- (10) 김태국, 2000, "에너지시스템 설계 및 시물레이션", (주)인터비전.
- (11) Hodge, B.K., 1990, "Analysis and Design of Energy Systems," 2nd ed., Prentice-Hall, Inc.
- (12) 이창룡, 이효국, 성두용, 1984, "보일러 열설계 매뉴얼," 한국 동력 자원 연구소 연구보고서, KE-84-23 (IV-1)
- (13) Kakac, S., 1991, "Boilers, Evaporators and Condensers", pp792-793