

복합화력 발전플랜트의 근사 최적 열설계 해석

전용준* · 신흥태* · 이봉렬** · 김동섭*** · 노승탁****

Approximate Optimum Thermal Design Analysis of Combined Cycle Power Plant

Y.J.Jeon, H.T.Shin, B.R.Lee, T.S.Kim and S.T.Ro

Key Words: Optimum Thermal Design(최적 열설계), Combined Cycle(복합화력발전), Heat Recovery Steam Generator(열회수 증기발생기), Steam Turbine(증기터빈)

Abstract

An optimum thermal design analysis of the combined cycle power plant with triple pressure heat recovery steam generator was performed by the numerical simulation. The optimum design module used in the paper is DNCONF, a function of IMSL Library, which is widely known as a method to search for the local optimum. The objective function to be minimized is the cost of total power plant including the steam turbine power enhancement premium. The result of this paper shows that the cost reduces if the design point of power plant becomes the local optimum, and many calculations at various initial conditions should be carried out to get the value near the global optimum.

1. 서 론

복합화력 발전플랜트는 효율이 높고, 환경친화적일 뿐만 아니라, 건설 시공 기간이 짧고, 빠른 운전 응답특성을 보이기 때문에, 세계적으로 매우 활발하게 도입되고 있다.

현재까지 국내에는 대용량의 복합화력 발전설비가 상당수 설치·운전되고 있으며, 향후에도 적극적으로 설치될 것으로 전망된다.

복합화력 발전플랜트 설계에 있어서 중요한 사항은 설계점·탈설계점에서의 성능해석이며, 이들에 관한 연구결과^(1,2)는 국내에서도 다수 발표되고 있다. 또한 최근 국내 발전플랜트의 민영화에 부응하고, 발전시스템의 효율적 운전·유지관

리를 위하여 발전시스템의 동적 성능특성에 관심이 높아지고 있다. 이는 복합화력 발전플랜트를 설계할 때 기본적으로 이러한 열역학적 성능특성을 파악해 둘 필요가 있음을 말해 준다.

열적특성 외에 발전플랜트 설계시 반드시 고려해야 할 사항이 플랜트의 경제성이다. 요구되는 시스템 성능을 만족시키면서 저렴한 가격으로 시스템을 설계하여야 하기 때문이다.

Manen⁽³⁾은 핀치온도차(pinch point temperature difference) 등의 변화에 따른 열교환기 면적 즉 열교환기 가격추이를 나타내는 연구를 수행하였다. 그러나 이는 단순한 시스템에 대한 정성적인 연구로써 한정된 정보만을 제공한다. 이 외에는 복합화력 발전플랜트의 최적설계에 관한 연구는 찾아보기 힘들다.

따라서 본 연구에서는 대형 복합화력 발전시스템에서 일반적으로 채택하는 삼중압 열회수 증기발생기(heat recovery steam generator, HRSG)를 기본 구성요소로 하는 발전 시스템의 최적설계 해석을 시도한다.

본 연구의 최적해석 모듈은 IMSL Library 중의

* 현대건설(주) 기술연구소
** 서울대학교 대학원 기계공학부
*** 인하대학교 기계공학과
**** 서울대학교 기계항공공학부

DNCONF 함수⁽⁴⁾를 이용하였다. 최적 함수를 비용으로 두고, 이를 최소화하도록 하였다. 정확한 비용 데이터는 알기가 힘들기 때문에 기본적으로 고정비용의 대부분을 차지하는 HRSG와 증기터빈의 가격을 산출하고, 여기에 효율 증가에 따른 비용삭감 효과를 포함시켰다. 전체적으로 보면 HRSG와 증기터빈으로 대표되는 열설계 모듈과 최적해석 모듈이 서로 데이터를 피드백하여 최적 설계점을 찾도록 구성하였다.

2. 구성부 모델링 및 해석방법

본 연구에서 적용한 대상플랜트는 520MW 급 복합화력 발전플랜트로서, 하부시스템의 개략도 및 HRSG의 온도 분포도는 Fig.1 과 Fig.2 와 같다.

하부 시스템에서 순환수가 HRSG를 지나면서 증기가 발생하는 과정은 다음과 같다.

스팀터빈을 나온 증기가 컨덴서를 거친 다음 저온 열교환기(low temperature heat exchanger, LTE)를 거치면서 열을 회수하고 탈기(deaerator, D/A)로 유입된다. 포화액 상태로 배출된 물은 요구되는 압력으로 가압되어 고압과 중압 절탄기(high pressure & intermediate pressure economiser, HP & IP EC)로 들어간다. 고압으로 가압된 물은 고압 절탄기를 거쳐 온도가 상승되고 증발기(evaporator, EV)에서 증기로 된 후, 과열기(superheater, SH)를 지나 고온의 증기가 되어 스팀터빈으로 들어간다. 중압으로 가압된 물은 절탄기, 증발기, 과열기를 지난 후 고압터빈에서 배출되는 증기와 합쳐져 재열기(reheater)를 통과하여 고온의 증기가 되어 중압 터빈으로 유입된다. 또한 저압 드럼에서 발생한 저압(low pressure, LP)의 증기는 과열기를 거쳐서 온도가 상승된 후 중압터빈에서 배출되는 증기와 합쳐져서 저압터빈으로 유입되어 축일을 생산한다.

본 연구의 해석모듈은 크게 삼중압 HRSG 및 증기터빈 열설계 모듈, 최적해석 모듈로 나뉜다.

2.1 HRSG 모듈 모델링

HRSG내 열교환기는 대량류형 열교환기로 보면 각각의 열교환기에 대한 에너지 균형식은 다음과 같다.

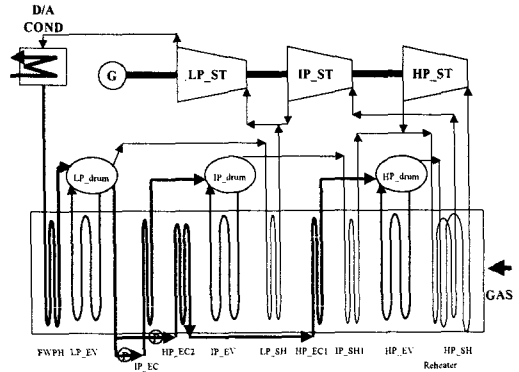


Fig.1 Schematic diagram of a triple pressure bottoming system of combined cycle power plant

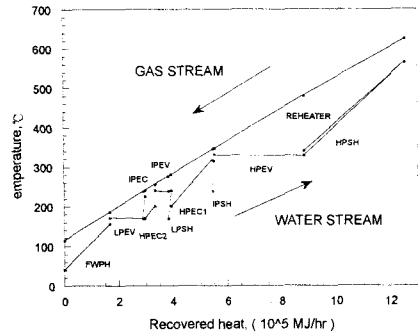


Fig.2 Temperature profile of a triple pressure HRSG

$$\dot{m}_g (h_{g, in} - h_{g, out}) = \dot{m}_s (h_{s, out} - h_{s, in}) = UA \Delta T_{lm} \quad (1)$$

위식에서 첨자 g 는 가스, 첨자 s 는 물 또는 증기를 의미하고, in 과 out 는 각 요소 열교환기, 즉 과열기, 증발기, 절탄기, 급수예열기 등의 입출구를 나타낸다.

열전달용량은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{1}{U_g A_g} = \frac{1}{E_{fo} h_g A_g} + \ln \left(\frac{d_o/d_i}{2\pi kL} \right) + \frac{1}{h_s A_s} \quad (2)$$

Fouling의 효과는 무시하였다. E_{fo} 는 가스측의 열

교환기 핀의 존재에 의한 표면효율을 의미한다.

일반적으로 원관내 유동에서의 열전달계수⁽⁵⁾는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$h_s = 0.023 \text{ Re}^{0.8} \text{ Pr}^{0.4} \frac{k}{d_i} \quad (3)$$

위식은 급수에열기, 절탄기, 과열기에서 물 또는 증기의 열전달계수 계산시에 사용된다.

증발기에서는 강제대류 열전달과 핵비등 열전달을 조합하여 열전달계수를 계산하여야 하므로, 본 계산에서는 아래의 경험식을 사용하였다.

$$h_{TP} = h_{FC} + h_{NB} \quad (4)$$

위식에서 h_{FC} 는 강제대류 열전달계수, h_{NB} 는 핵비등 열전달계수이며, 이들 상관식으로써 Chen의 경험식⁽⁶⁾을 사용하였다.

관의 열전달계수는 핀관 제작사인 ESCOA에서 제안한 식⁽⁷⁾을 사용하였다. 관의 열전달계수는 아래와 같이 구해진다.

$$E_f \cdot h_g = f(\text{tube size, arrangement, fin geometry, flow condition, gas property}) \quad (5)$$

이러한 각 요소들에 대한 에너지 균형 및 열전달 관계식을 적용하여 설계점 열설계자료와 기본적인 기하학적 설계 자료를 구해 낼 수 있다.

2.2 스팀터빈 모듈 모델링

Spencer와 Cotton Method⁽⁸⁾를 사용하여 스팀터빈을 모델링하였다. 이 방법은 3600 rpm의 스팀터빈의 특정형태에 대한 전형적인 효율 값을 정한 후에 압력비, 유량비 등의 요인을 경험식에서 나온 계수들과 곱하여 스팀터빈의 성능을 예측하는 방법이다.

스팀터빈의 경험식과 실제 데이터에 의존하여 만들어진 상관식으로 이루어졌으며, 스팀터빈의 섹션별로 계산한다.

본 계산에서는 터빈 입구에서의 온도, 압력, 유량 등에 따라서 기본적인 효율이 결정된다. 터빈 입구 설계 유량과 실제 유량사이의 비에 따라서 효율이 결정되며, 입구 조건에 따라 변화하는 비체적에 따른 부피 유량 보정을 수행한다.

2.3 최적해석 모듈 모델링

최적해석 자체에 대한 연구는 그간 다양한 방법으로 수행되었다. 최적 해석은 크게 선형 함수 해석과 비선형 함수 해석으로 나뉜다. 또한, 각각 구속조건의 존재 여부에 따라 각각 둘로 나뉜다.

선형 함수 해석의 대표적인 경우가 Simplex Method를 사용하는 방법이다. 구속 조건의 유무에 관계없이 많은 종류의 선형 함수 최적화 방법이 개발되었으며, 정확도도 매우 높다고 알려져 있다.

하지만 비선형 함수의 경우, 특히 구속조건이 있는 함수를 최적화 시키는 것은 매우 어렵다. 해석 방법 자체가 매우 복잡할 뿐만 아니라, 만일 수치적으로 계산하더라도 최적값으로 수렴하지 않거나, 초기조건에 매우 민감한 반응을 보이는 것으로 알려져 있다.

일반적으로 독립변수가 많은 목적함수는 많은 극소점을 가지게 되기 때문에 수렴하더라도 국소 최적값일 확률이 매우 높다. 또한 최적에 가까운 값을 찾으려면 계산시간이 상당히 필요하다. 물론 찾은 값이 적합한가를 최종 판단하는 것은 엔지니어의 몫이다.

본 연구의 최적설계 모듈은 엔지니어들이 보편적으로 많이 적용하고 있는 방법으로써, IMSL Library 내장함수인 DNCONF를 이용하였다. DNCONF는 Schittkowski에 의해 개발된 서브루틴 NLPQL에 기초를 둔 코드로써, 일반적인 비선형 문제를 풀기 위해 연속 이차 프로그래밍 방법(sequential quadratic programming method)을 사용하였다. 이는 국소 최적값을 구하는 방법이므로, 찾은 값이 최적인지 판단하기 위해서는 초기치를 다양하게 변화시켜 가며 계산하여, 찾은 값들을 서로 비교하여야 한다.

이 방법으로 해결가능한 문제의 유형은 아래와 같다.

$$\begin{aligned} &\min f(x) \\ &\text{subject to} \\ &g_j(x) = 0, \text{ for } j = 1 \sim m_e \\ &g_j(x) \geq 0, \text{ for } j = m_e \sim m \\ &x_l \leq x \leq x_u \end{aligned} \quad (6)$$

문제의 구간내에서 함수 $f(x)$ 는 연속적이고 미분가능하다. 식(6)은 Lagrangian 방법과 선형화 작업을 통해서 다음과 같이 변형된다.

$$\begin{aligned} & \min \frac{1}{2} d^T B_k d + \nabla f(x_k)^T d \\ & \text{subject to} \\ & \nabla g_j(x_k)^T + g_j(x_k), \text{ for } j=1 \sim m_e \quad (7) \\ & \nabla g_j(x_k)^T + g_j(x_k), \text{ for } j=m_e \sim m \\ & x_l - x_k \leq x \leq x_u - x_k \end{aligned}$$

여기서 B_k 는 Hessian의 positive 정의이고, x_k 는 현재 반복계산에서의 값이다. d_k 는 서브문제의 해이다. 따라서 현재의 값으로부터 다음 반복계산의 값은 아래와 같이 계산된다.

$$x_{k+1} = x_k + \lambda d_k, \lambda \in (0, 1] \quad (8)$$

상기의 방법을 통해서 최적의 값을 구할 때까지 반복 계산을 수행하게 된다.

본 연구에서는 아래와 같은 구속조건을 사용하였다. 즉 스팀터빈 동력, 연도가스 온도 및 저온 열교환기 입구온도는 각각 요구되는 스팀터빈 동력, 연도가스 온도 및 저온 열교환기 입구온도 이상이어야 한다.

$$\begin{aligned} & Power_{ST} - Power_{ST\ required} \geq 0 \\ & T_{gas\ stack} - T_{gas\ stack\ required} \geq 0 \\ & T_{LTE\ inlet\ steam} - T_{LTE\ inlet\ steam\ required} \geq 0 \end{aligned} \quad (10)$$

또한 시스템 최적화의 목적함수는 아래와 같이 정하였다. 즉 최적화할 목적함수는 HRSG 가격 및 스팀터빈 가격의 합에서 스팀터빈 동력초과분에 따른 premium 비용을 뺀 값으로 나타나며, 본 함수를 최소화시키는 조건을 찾는 것이 목표가 된다. 가스터빈 비용은 이미 정해진 값으로 두기 때문에 여기서 고려할 필요가 없다.

$$\begin{aligned} & \text{Min } f = HRSG\ cost + ST\ cost \\ & \quad - ST\ power\ enhancement\ premium \\ & HRSG\ cost = f_1(Area) \\ & ST\ cost = f_2(ST\ condition) \\ & ST\ power\ enhancement\ premium = f_3(ST\ power) \end{aligned} \quad (11)$$

본 연구 수행시 삼중압 복합화력 발전 시스템의 최적설계를 위해서 사용된 독립변수는 Table 1 과 같으며, 기본설계 조건은 국내에 운전중인 3중압 복합화력 발전시스템을 이용하였으며 그 구체적인 설계조건은 Table 2 와 같다.

Table 1 Independent variables

No	Independent Variable
1	HP admission pressure
2	IP admission pressure
3	LP admission pressure
4	HP pinch point temperature difference
5	IP pinch point temperature difference
6	LP pinch point temperature difference
7	HP approach subcooling temperature difference
8	IP approach subcooling temperature difference
9	LP approach subcooling temperature difference

Table 2 Basic specification of combined cycle power plant

Required minimum steam turbine power	175 MW
Required minimum stack temperature	80 °C
D/A Type	Integral
GT model	GE 7221 FA
HP turbine admission temperature	560 °C
LTE	No

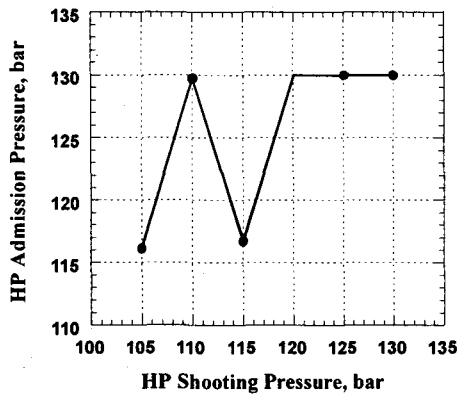
3. 해석 결과

3.1 초기조건에 따른 최적값의 변동

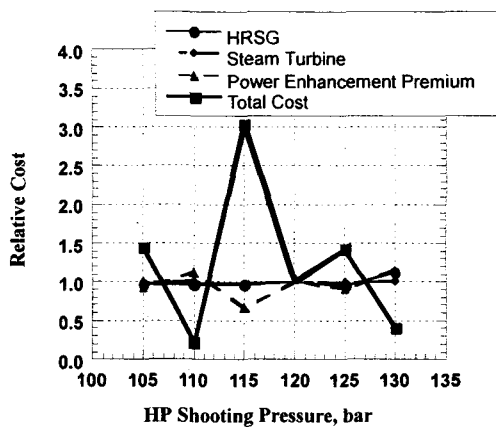
본 해석의 경우 초기값으로부터 비용이 최소가 되는 설계점을 찾는 방식을 취한다. 독립변수가 9개이므로 9차원 공간상에서 최소값을 찾는 것과 개념상 일치한다.

각 점에서 나머지 8개의 값을 일정하게 유지시킨 상태에서 나머지 한 변수의 미분계수를 통해 계산방향을 설정한다. 그런데 2차원 곡선과는 달리 독립변수가 많을 경우 국소적으로는 최적값이라고 여겨지는 점들이 매우 많기 때문에, 찾은 값이 국소 최적인지 실제 최적인지 판단할 수 없다. 따라서 설계자가 가능한 한 최적에 가까운 값을 초기조건으로 주는 것이 매우 중요하다. 또한 초기값을 가급적 많이 대입하여 계산한 결과로부터 최적에 가까운 값을 찾아야 한다.

Fig.3 (a)-(b) 는 나머지 8개의 변수는 일정하게 하고 HP shooting admission pressure, 즉 계산초기



(a) HP admission pressure



(b) Total cost

Fig.3 Effect of initial HP shooting admission pressure on total cost

에 부여한 고압의 값을 변화시킬 경우 최적값에 대한 결과를 나타내었다. Fig.3 (b)의 종축은 HP shooting admission pressure가 120 bar일 때의 비용을 기준으로 했을 경우 상대적인 비용을 나타낸 것이다.

그림으로부터 초기조건의 변동에 따라 각각 다른 국소 최적값을 찾았음을 알 수 있다. 이와 같이 여러 최적해가 구해졌을 경우는 Fig.3 (b)와 같이 전체비용이 최소인 값을 최적값으로 정할 수 있다. 따라서 최적조건은 HP shooting admission pressure를 110 bar로 했을 때, HP

pressure는 약 130 bar, steam turbine power는 약 197MW이다.

또한 Fig.3 (b)에서 알 수 있듯이 HP shooting admission pressure가 변화함에 따라 HRSG 및 스팀터빈 가격은 큰 변화없는 반면, steam turbine power enhancement premium은 전체 비용과 반대되는 경향을 나타내므로 power enhancement premium은 전체비용에 상당한 영향을 줄 수 있다.

본 연구에서 구한 최적값은 국소 최적값일 수 있으므로, 실제 최적값에 가까운 값을 찾기 위해서는 초기값을 좀더 다양하게 하여 계산할 필요가 있다. 또한 비용에 민감한 변수를 찾아내어 다양한 초기값에 대한 계산을 수행하고 이를 면밀히 비교 검토하는 것이 바람직할 것이다.

이렇게 구해진 최적값은 엔지니어의 검토 및 판단에 따라 최종 선택되어야 한다.

3.2 비용 민감도 해석

초기조건을 일정하게 하고 다른 구성부의 비용을 일정하게 두었을 때, HRSG 단가를 변화시키면서 최적해석을 수행한 결과를 Fig.4에 나타내었다. HRSG 단가를 10 ~ 5%까지 변경시켰을 경우 각각 다른 최적점을 찾았음을 볼 수 있다. 낮은 단가에서는 전체 비용의 차이가 별로 크지 않지만 각종 단가가 올라가면 총비용이 크게 상승함을 볼 수 있다.

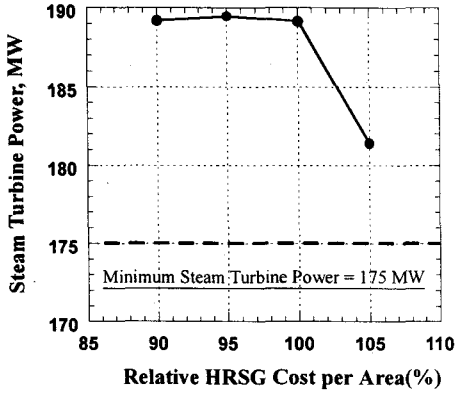
Fig.5는 출력 증가에 따른 보상금의 단가를 변화시키면서 계산한 결과는 나타낸다. 보상금의 증가에 따라 전체비용이 감소함을 알 수 있다.

종합해 보면, 각종 단가들의 변화에 따라 전체 비용이 민감하게 변화하기 때문에 각종 단가에 대한 데이터를 보다 정확한 값으로 입력해야 할 필요가 있다.

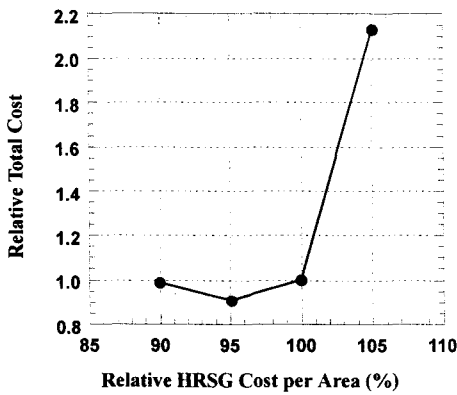
종합해 보면, 각종 단가들의 변화에 따라 전체 비용이 민감하게 변화하기 때문에 각종 단가에 대한 데이터를 보다 정확한 값으로 입력해야 할 필요가 있다.

4. 결론

삼중압 복합화력 발전플랜트의 최적 열설계 해석을 수행하였다. 본 연구에서는 9개의 독립변수를 이용하여 비용이 최소가 되는 설계점을 찾도



(a) Steam turbine power



(b) Total cost

Fig.4 Effect of HRSG area cost on total cost

록 구성되었으며, 최적설계 모듈은 국소 최적값을 찾는 방법으로 널리 알려진 IMSL Library 내 장함수, 즉 DNCONF를 이용하였다.

본 해석에서 얻은 최적 설계점은 국소값이기 때문에 몇몇 초기값을 사용하여 계산 및 비교함으로써 근사 최적값을 얻었다. 이 최적조건은 기존 플랜트의 설계시 비용보다 비용을 낮출 수 있음을 알 수 있었다. 보다 최적에 가까운 값을 얻기 위해서는 보다 많은 초기값을 사용하여 계산 및 비교하여야 한다.

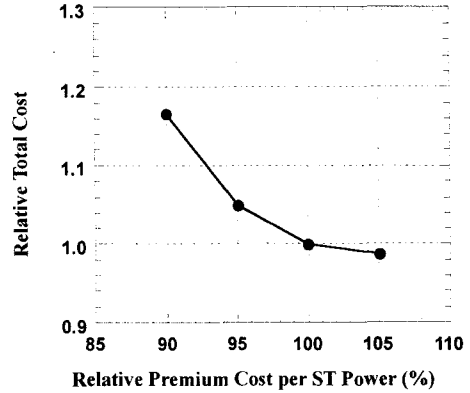


Fig.5 Effect of ST power enhancement premium cost on total cost

참고문헌

- (1) 김상준, 1997, 다압 열회수 증기발생기의 설계점 및 탈설계점 해석, 서울대학교 공학석사 학위논문.
- (2) 김동섭, 노승탁, 이봉렬, 신흥태, 전용준, 2001, 복합화력발전 하부시스템의 성능설계해석, 대한기계학회 춘계학술대회논문집 D, pp.738-743.
- (3) Manen, A. V., 1994, "HRSG Design for Optimum Combined Cycle Performance," 94-GT-278, pp.1-7.
- (4) Schittkowski, K., 1986, "NLPQL : A Fortran Subroutine Solving Constrained Nonlinear Programming Problems," *Annals of Operations Research*, Vol. 5, pp.485-500.
- (5) Collier, J. H. and Thome, J. R., 1994, *Convective Boiling and Condensation*, 3rd ed., Oxford University press.
- (6) Chen, J. C., 1966, "Correlation for Boiling Heat Transfer to Saturated Fluids in Convective Flow," *Ind. Eng. Chem. Proc. Des. Dev.*, 5.
- (7) ESCOA Corp., *Fin Tube Manual*, 1979, Tulsa, U.S.A.
- (8) Spencer, R. C., Cotton, K. C. and Canon, C. N., 1963, "A Method for Predicting the Performance of Steam Turbine-Generators... 16,500 kW and Larger," *Journal of Engineering Power*, Vol. 85, pp.249-301.