

열회수 증기발생기의 최적설계에 대한 연구(I)

신 지 영*

Optimum Design of a Heat Recovery Steam Generator(I)

J. Y. Shin

Key words : HRSG(Heat Recovery Steam Generator ; 열회수 증기발생기), Optimum Design (최적설계), Combined Cycle Power Plant(CCPP ; 복합화력발전소)

Abstract

Heat recovery steam generator (HRSG) is a principal component of the combined cycle power plant (CCPP), which utilizes the waste energy of the gas turbine exhaust gas. A design of the HRSG is a keypoint to achieve high cycle efficiency with competitive cost. This paper presents a brief review on the design of a HRSG, which covers the basic design parameters and their effects on the performance and the investment cost. Finally the concept of the optimum design point is presented according to the selection of a pinch point temperature difference and a steam pressure as an illustrated case.

기호설명

A	: 열전달 면적 [m ²]	HP	: 고압조건
Q	: 열전달량 [kW]	EC	: 절탄기(Economiser)
U _o	: 총괄열전달계수 [kW/m ² K]	EV	: 증발기(Evaporator)
ΔT_{LM}	: 대수평균 온도차 [°C]	SH	: 과열기(Superheater)

1. 서 론

약어

HRSG	: 열회수 증기발생기 (Heat Recovery Steam Generator)
LP	: 저압조건

복합 발전 시스템이란 한가지 이상의 진기 에너지를 생산 기기가 결합되어 있는 발전 시스템이다. Figure 1에 나타낸 바와 같이, 일반적으로 가스터빈과 열회수 증기발생기(Heat Recovery Steam

* 정희원, 동의대학교 기계·산업시스템공학부(원고접수일: 1999년 7월)

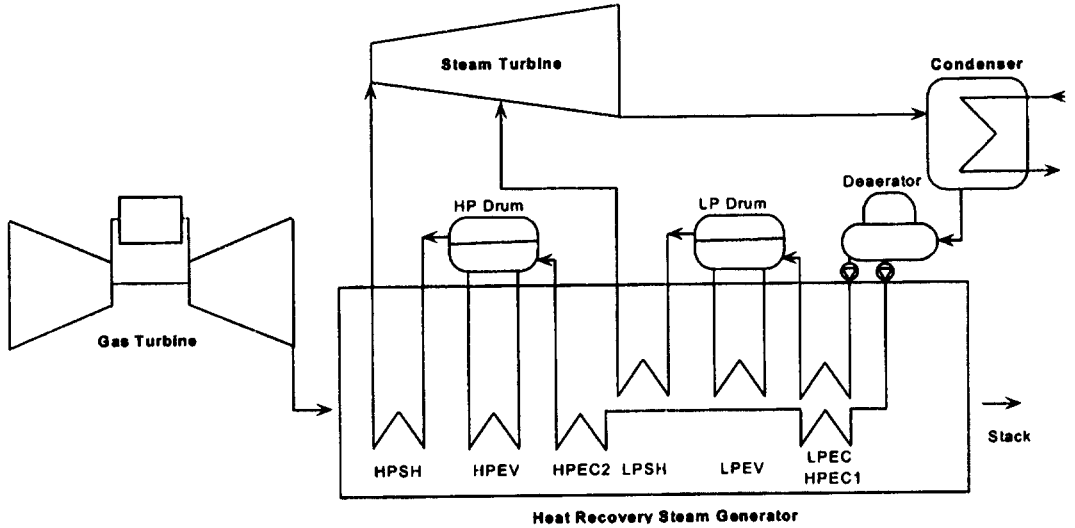


Fig. 1 Schematic of a typical combined cycle power plant

Generator ; HRSG), 그리고 증기터빈을 결합한 발전시스템을 복합화력 발전플랜트(Combined Cycle Power Plant)이라 하며, 이 시스템은 최근 다음과 같은 여러 가지 이유로 인하여 각광받고 있다.

복합화력 발전시스템은 가스터빈에서 방출되는 고온의 배기가스로부터 에너지를 회수함으로써 가스터빈 단독 운전만으로는 도달할 수 없는 높은 발전 효율을 달성할 수 있기 때문에 기존의 가스터빈 발전 시스템보다 훨씬 효율이 좋다.

또한, 가스터빈 연소기술 등의 발전은 계속적으로 강화되고 있는 대기 오염물질에 대한 환경규제를 충족시킬 수 있는 기술적 바탕을 제공하였고, 지급의 에너지원을 연료로 사용할 수 있는 시스템인 석탄 가스화 복합화력 발전시스템(Integrated Gasification Combined Cycle ; IGCC)의 개발은 연료의 다양성 확보와 더불어, 연료비 절감을 가능하게 하고 있다.

한편으로는 여러 가지 시비가 끊이지 않고 있는 원자력 발전의 대안으로서 소비자의 전력수요를 만족시킬 수 있으며, 기존 석탄 화력 발전 시스템에 비해서 운전 및 유지·보수가 용이할 뿐만 아니라, 노후 발전소의 개량 등의 용도로도 사용될 수 있기 때문에, 전 세계적으로 향후 10여년간 가장

경쟁력있는 발전시스템의 하나로 평가된다.

복합화력 발전시스템의 주요 구성요소로는 가스터빈, 열회수 증기발생기, 증기터빈 등이 있다. 먼저 건설하고자 하는 발전소의 용량과 가스터빈, 열회수 증기발생기, 증기터빈의 댓수 등의 구성 방법이 결정되어야 하며, 이 때 가스터빈은 용량, 연료 등의 조건을 감안하여 선정한다. 열회수 증기발생기는 선정된 가스터빈의 배기가스를 이용하여 증기를 생산하게 되며, 생산된 증기는 증기터빈으로 보내어져 전기를 추가로 생산하게 된다.

이 때 플랜트 엔지니어링의 설계 측면에서 보면 열회수 증기발생기는 복합화력 발전시스템의 최적설계에 아주 중요한 역할을 한다. 즉, 가스터빈은 어느 정도 유동성이 있기는 하지만, 용량에 따라 소수의 제품군에서 선택하여야 한다. 선택된 가스터빈의 성능 및 가격 자료는 물론 제작자가 제공하게 된다. 증기터빈은 가스터빈처럼 정해진 제품군이 있는 것은 아니지만, 열회수 증기발생기의 실제조건에 따라 증기 조건이 주어지게 되므로 사실상 그 선택의 범위가 넓은 것은 아니다. 그러나, 열회수 증기발생기는 기본설계 과정에 경제성 개념을 도입함으로써 전체 복합화력 사이클의 출력, 효율 및 비용을 최적화 할 수 있다. 가스터빈의 경우처럼 특정한 제품이 반복 재생산되는 것이 아니고,

전적으로 사용자의 설계의도가 반영될 수 있다. 즉, 제작회사에 대한 의존도가 가스터빈, 증기터빈에 비해 상대적으로 낮다는 것을 의미한다.

본 논문에서는 이러한 열회수 증기발생기의 기본 원리, 특징, 종류, 설계변수 등에 대한 기본적인 고찰을 진행하고자 한다. 아울러, 열회수 증기발생기의 중요한 설계 변수들이 전체 복합화력 발전 시스템의 효율, 성능, 가격에 미치는 영향을 파악하고 이들이 최적 설계의 관점에서 어떠한 역할을 담당하는지 살펴보기로 하겠다.

2. 열회수 증기발생기의 개요 및 작동 특성

2.1 개요

서론에서 설명한 바와 같이 가스터빈의 배기열을 회수하여 과열증기를 발생시키고 이를 증기터빈에 보내어 전기를 발생시키는 것이 열회수 증기발생기의 주요 기능이다.

그 종류로는 증기의 순환방식에 따라 증기/물의 밀도차를 이용한 자연순환형 방식과 증기의 순환을 위한 펌프가 필요한 강제순환형 방식으로 나눌 수 있다. 두가지 방식 중 어느 방식이 더 우월한지는 정확히 평가할 수는 없으나, 사용자의 요구 조건과 설치 공간 등 여러 가지 조건을 평가하여 그 형태를 결정한다. 일반적으로 강제순환 방식은 자연순환방식에 비해 증발기의 체적이 작기 때문에 기동이나 부하의 변동에 빠르게 응답할 수 있다는 이점이 있다.

한편, 보조 연소장치의 유무에 따라 일반 방식과 보조 연소 방식으로 나눌 수 있다. 보조 연소의 경우 가스터빈의 배기 가스에 연료 또는 연료와 산소를 추가로 공급하여 열회수 증기발생기 내에서 다시 연소시킴으로써 필요한 정도의 고온의 가스로 만든 후 다시 이 배열을 회수하는 방식이다. 열회수 증기발생기에 공급되는 배기가스의 에너지가 많아지기 때문에 추가연소를 하지 않는 일반 방식에 비해 더 많은 증기를 발생시킬 수 있고, 한편으로는 증기의 고압, 고온화가 가능하기 때문에 증기터빈에서 더욱 높은 출력을 생산할 수 있다. 그러나,

열회수 증기발생기내 추가연소기에 별도의 연료를 공급하여야 하기 때문에 전체 발전시스템의 측면에서 보면, 일반 방식에 비해 효율이 비슷하거나 저하되는 측면이 있다 또한, 보조연소 방식은 가스터빈의 부하 변동에 따라 추가되는 연소량을 조절함으로써 일정한 증기생산량과 증기터빈 출력을 유지할 수 있는 장점이 있어 항상 일정량 이상의 증기 또는 전기가 필요한 공장용 열병합 발전의 경우에 유리한 이점이 있다. 그러나, 추가 연소 장치로 인해 별도의 투자비 및 운전 비용이 증가하는 단점이 있다.

증기를 생산하는 열회수 증기발생기의 작동압력단 수에 따라 단압식(single pressure type), 다압식(multi-pressure type)으로 구분할 수 있다. 작동압력단의 수를 증가시키면 일반적으로 열회수 효율을 높일 수 있으나, 열회수 증기발생기의 열교환 면적이 증가하게 되어 투자비가 상승하므로, 사용자의 요구 사항에 맞는 최적의 시스템 디자인이 필요하다.

한편, 증기터빈의 형식과 연관되어 일반 방식(비재열 방식)과 재열방식의 구분이 가능하다. 재열방식은 증기터빈을 한번 통과하면서 팽창과정을 거친 증기(cold reheat steam)를 다시 열회수 증기발생기로 보내서 가열한 후 그 증기(hot reheat steam)를 증기터빈으로 보내는 방식이다. 이러한 방식은 또한 증기터빈의 출력을 증가시킬 수는 있으나 전체 투자비의 상승으로 이어지므로, 역시 선정에 세심한 최적화 과정이 필요하다.

2.2 설계변수

열회수 증기발생기 설계시 고려해야할 인자는 열역학적 설계 인자와 열교환기의 형상 설계인자로 나눌 수 있다. 즉, 열회수 증기발생기 입구(가스터빈 출구)의 가스 온도, 열회수 증기발생기 출구 증기 압력 및 온도, 핀치점 온도차(pinch point temperature difference), 접근 온도차(approach temperature difference), 가스제거장치(deaerator)의 압력 등이 시스템의 열역학적 설계 인자이며, 열교환기의 크기와 배열, 핀(fin)의 형상과 배열 등이 형상 설계 인자이다.

본 논문에서는 열역학적인 설계 인자가 열회수

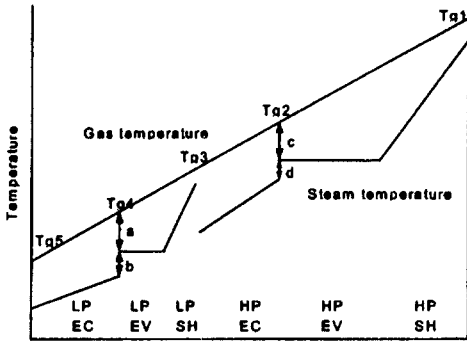


Fig. 2 Typical temperature diagram of dual pressure type heat recovery steam generator

증기발생기의 열교환기 면적 및 효율 등에 미치는 영향을 살펴보기로 하겠다. 배기가스의 온도 및 유량 등은 가스터빈의 성능에 따라 결정되는 값이지만, 앞서 설명한 바와 같이 열회수 증기발생기 내의 증기 압력, 온도, 핀치 온도차, 접근 온도차 등은 설계자의 의도에 따라 최적화의 가능성을 가지고 있는 중요한 설계 인자들이다. Figure 2에 고압과 저압 두개의 압력단을 갖는 진형적인 다압식 열회수 증기발생기의 온도 변화를 개념적으로 나타내었다.

2.3 작동특성

2.3.1 핀치점 온도차

열회수 증기발생기에서의 열교환 과정은 기본적인 식 (1)을 통해 간략히 이해 할 수 있다. 즉, 열전달량(Q)는 총괄열전달계수(Uo), 열전달 면적(A), 대수평균 온도차(ΔT_{LM})의 곱으로 표현할 수 있다.

$$Q = U_o \cdot A \cdot \Delta T_{LM} \quad (1)$$

Figure 2에 나타낸 바와 같이 핀치 온도차 (a와 c)는 증발기 입구에서 작동유체와 배기가스와의 온도차를 의미한다. 예를 들어 다른 작동 변수를 일정하게 유지한 상태에서 고압부 핀치점 온도차를 감소시키면, 고압부 증발기(HPEV) 출구에서의 가스온도(Tg2)가 감소한다. 따라서, 배기가스가 고압부 증발기(HPEV)와 과열기(HPSH)를 지나면서 방출하는 열량(Q_{HP})이 많아진다. 이로 인해 열회수 증기발생기의 고압부에서 증기의 발생량

이 많아지고 결과적으로 증기터빈의 출력은 증가한다.

이를 명확하게 이해하기 위해서는 간단한 방법으로 식 (1)과 연관지어 분석하는 것이 바람직하다. 핀치점 온도차가 감소하면 위의 식 (1)에서 대수평균 온도차(ΔT_{LM})가 감소한다. 한편, 증기 측 열전달계수와 가스 측 열전달계수의 함수로 표현되는 열전달 계수(Uo)는 설계점 변동의 영향이 다른 변수에 비해 상대적으로 작다. 따라서, 고압부에서 증가된 배기가스의 열전달량(Q_{HP})가 물/증기에 흡수되기 위해서는 고압부의 열전달 면적(A)이 증가해야 하고, 결과적으로 고압부에서의 증기발생량이 많아진다.

위에서 살펴본 바와 같이 핀치점 온도차의 감소는 일반적으로 열회수 증기발생기의 열전달 면적의 증가를 유발하고, 이는 투자비의 상승에 직접 연관이 있기 때문에 핀치점 온도차의 선정에 필요한 정확한 조건을 산정하는 과정이 필요하다.

2.3.2 열회수 증기발생기 출구 증기 압력

열회수 증기발생기 출구 증기 압력이 전체 시스템에 미치는 영향을 살펴보기 위해, 다른 설계 변수들은 일정하게 유지하고 열회수 증기발생기의 고압부 작동 압력만을 증가시키면 2.3.1절의 경우와는 반대로 배기가스가 고압부 과열기(HPSH)와 증발기(HPEV)를 지난 배기 가스의 온도(Tg2)가 높아진다. 즉, 고압부에서 배기가스가 방출해야 하는 열량(Q_{HP})이 감소한다. 이로 인해 열회수 증기발생기의 고압부에서 증기의 발생량이 줄어들고 고압부 절탄기에서의 유량 역시 감소하므로 절탄기를 거치면서 일어나는 배기가스와 작동유체(물) 간의 열교환량이 감소한다. 이로 인해 고압부에서의 열회수는 줄어들고 오히려 저압부에서의 열회수(Q_{LP})가 늘어나서 저압부에서의 증기 발생량은 증가한다.

특정한 복합화력 발전시스템의 요구조건이 주어지면 증기량과 압력 조건의 적절한 조합이 최대 출력을 만들 수 있으며, 열전달 면적의 변화에 의한 투자비 변화도 고려하여 모든 설계조건을 결정해야 한다. 이는, 3장에서 자세히 언급하기로 하겠다.

2.3.3 접근 온도차

절탄기에서의 증발을 방지하기 위해 증발기 온도와 절탄기 출구 온도의 차이를 두게되는데 이 온도의 차이를 접근 온도차(Fig. 2의 b와 d)라 한다. 접근 온도차가 작을수록 증발기에서 많은 양의 증기를 생산할 수 있기 때문에 접근 온도차를 거의 0에 가깝게 줄이는 것이 출력 및 효율 향상에 좋다.

그러나, 복합화력 발전시스템의 다양한 운전조건을 고려할 때, 실제로 접근 온도차가 작아지면 절탄기 내에서 증기가 발생하여 전체 시스템이 오동작을 일으킬 가능성이 크다. 이러한 오동작을 방지하기 위해 절탄기 출구에 조절 밸브를 설치하거나, 일부의 물을 우회(bypass)시키는 등 여러 가지 방법이 사용되기도 한다.

3. 열회수 증기발생기의 최적 설계

2장에서는 열회수 증기발생기의 성능에 영향을 미치는 몇가지 변수에 대하여 고찰하였다. 이 장에서는 이중압력 (dual pressure) 시스템에서 설계 변수 변화를 통해 열회수 증기발생기의 면적, 즉, 투자비와 증기터빈의 출력 사이에 최적점이 존재함을 살펴보겠다.

이를 위해 실제 가스터빈의 배기가스의 폐열을 열회수 증기발생기에서 회수하여 여기서 발생하는 증기로 증기터빈을 구동하는 전형적인 복합화력 발전시스템에서 열회수 증기발생기의 설계 변수 변화가 증기터빈의 전기 출력 및 열회수 증기발생기의 증기 출력 및 투자비에 미치는 영향을 살펴 보았다.

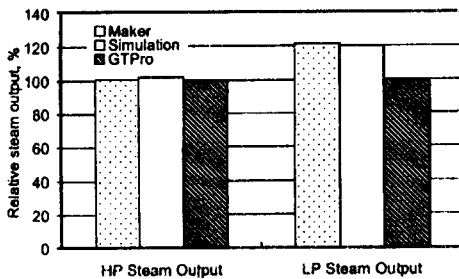


Fig. 3 Comparison of steam output performance using different simulation tools and the design data of the manufacturer

가스터빈의 배기가스 조건은 실제 가스터빈 제작업체의 자료를 이용하였고, 열회수 증기발생기와 증기터빈의 모사는 Thermoflow사의 상용프로그램인 GTProTM를 이용하였다. 열회수 증기발생기에 대해서는 실제 제작업체의 결과 및 서울대학교 티보·동력기계연구센터가 개발한 복합화력 발전시스템 성능평가 프로그램^[8] 중 열회수 증기발생기에 대한 부분을 별도로 이용한 결과와 상용 프로그램의 결과를 비교함으로써, 상용 프로그램의 타당성을 검증하였다.

Figure 3에는 열회수 증기발생기의 증기 생산량에 대한 두가지 모사 프로그램의 계산결과와 제작사의 결과를 나타내었다. 또한, 열회수 증기발생기 각각의 구성요소의 열전달 면적에 대한 비교를 Fig. 4에 나타내었다. 종축의 값은 각 구성요소의 면적을 전체 열전달 면적으로 나눈 값이다. 증기 생산량과 열전달 면적이 세가지 경우 모두 큰 오차 없이 일치하는 것을 볼수 있다. 한편 전체 시스템의 모사에 사용한 조건을 Table 1에 간략히 정리하여 나타내었다. 이 조건은 최근의 발전시스템에 사

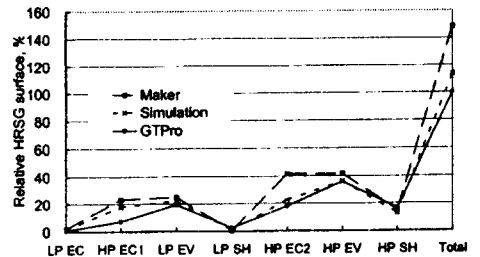


Fig. 4 Comparison of relative heating surface using different simulation tools and the design data of the manufacturer

Table 1. HRSG design parameters in this study

Parameter	Unit	Value
Tube Wall Thickness	mm	3.05
Tube Outside Diameter	mm	50.8
Blowdown	%	0
Feedwater Temperature	°C	40
Exhaust Gas Temperature	°C	550
Exhaust Gas Mass Flow Rate	t/h	1,358
Steam Pressure, HP	bara	80
Steam Pressure, LP	bara	3.1

용되는 실제 2중압력 열회수증기발생기의 작동범위를 고려하여 선정하였다. 이러한 검증을 통해 상용 프로그램의 열회수 증기발생기 설계에 대한 타당성을 확인하였으며, 성능 및 비용 면에서의 최적 설계점을 찾는 도구로 사용하였다.

이중압력식 열회수 증기발생기의 경우 고압부 핀치점 온도차 이외에 저압부 핀치점 온도차와 고압부/저압부 접근 온도차, 가스제거장치(deaerator)의 압력, 고압부/저압부 증기 압력과 온도 등의 변동이 최종 증기의 생산량과 질, 즉 증기터빈의 출력 및 투자비 산정에 영향을 미치게 된다.

한편, 이중압력식 열회수 증기발생기는 단압 시스템에 비해 설계변수가 두배가 되고 또한 모든 변수들의 변화가 서로 영향을 미친다. 따라서 최적 설계 과정에서는 나머지 설계변수를 고정시키고 하나의 설계변수만을 변화시키면서 그 특성을 고찰하는 것이 필요하다.

본 장에서는 대표적으로 고압부의 핀치점 온도차와 압력의 변동에 따른 출력 및 비용에서의 최적점의 존재를 살펴보았다. 비교의 일관성을 위하여 열회수 증기발생기에서 동일한 열량을 회수하도록 유지한 상태에서, 각 변수의 변화에 따른 영향을 살펴보았다. 예를 들어, 고압부 핀치점이 커지면 고압부에서의 열회수가 작아지지만, 그 만큼의 열량을 저압부 핀치점을 조절하여 저압부에서 회수함으로써, 전체적인 열량회수가 동일하도록 유지한 상태에서 각종 요소들의 변화를 살펴보았다.

3.1 고압부 핀치 온도차와 증기터빈 출력 및 열전달 면적에의한 비용

Figure 5에서 알 수 있듯이 고압부 핀치점 온도차가 감소하면 증기터빈의 출력이 증가하게 된다. 이는 고압부에서 가스로부터 회수하는 열량이 많아지고, 저압부에서의 회수열량이 줄어들지만 고압부 증기의 영향이 상대적으로 크기 때문이다. 그러나 열회수를 많이 하기 위해서는 열회수 증기발생기의 면적이 증가해야 하므로 열회수 증기발생기에 대한 투자비가 증가한다. 따라서 설계시에는 요구되는 최소한의 기본 출력을 확보한 후 투자비와 전기 출력 증가로 인한 비용이익을 고려하여 최적의 핀치 온도차를 설정해야 한다.

Figure 5에 보인 바와 같이 증기터빈 출력의 경우 핀치가 감소할수록 어느 정도 선형적인 증가형태를 보이나 열회수 증기발생기의 열전달 면적의 경우는 지수적으로 증가함을 알 수 있다. 즉, 출력 증대만을 위해 지나치게 핀치온도차를 감소시키는 것은 경제적인 설계가 아님을 알 수 있다.

좀더 명확한 이해를 위해 증기터빈 출력 증가분에 대해 kW당 추가 이익을 고려한 값과 열전달 면적을 투자비로 환산한 값을 양 축으로한 그림을 Fig. 6에 보였다. 그림에서 보는 바와 같이 핀치점

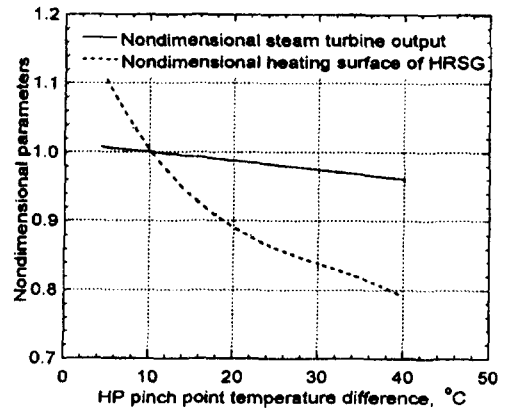


Fig. 5 Non-dimensional steam turbine output and non-dimensional heating surface of HRSG as a function of high pressure pinch point temperature difference

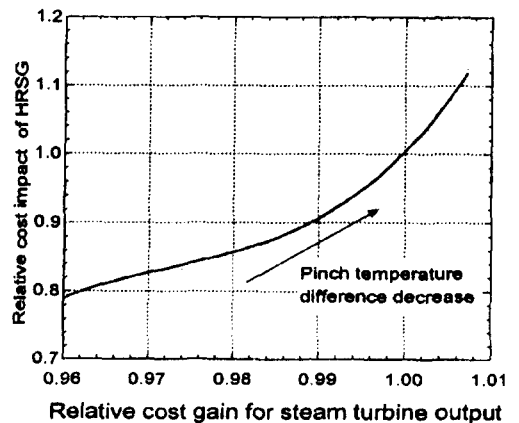


Fig. 6 Relationship between relative cost impact of HRSG and cost gain for steam turbine output due to the variation of pinch point temperature difference

온도차를 계속 줄이게 되면 그 기울기가 1보다 크게 커지게 되어 투자비 증가에 비해 수익의 증가가 이점을 가지지 못함을 알 수 있다. 즉, 횡축에 나타난 열회수 증기발생기의 크기 증가를 비용으로 환산한 값의 증가율이 횡축에 나타난 증기터빈의 출력 증가로 인한 수익보다 커지게 되는 점이 존재함을 알 수 있다. 따라서 상황에 따라 기울기 1 이하에서 최적점을 찾을 필요가 있다. 이 때, 열회수 증기발생기의 핀치점 감소에 따른 투자비는 제작비 측면에서 열회수 증기발생기의 크기에 따른 비용을 곱한 값이며, 증기터빈의 출력 증가에 따른 이익은 출력 증가분에 전력 단가 또는 추가되는 전기 단가와 투자비를 고려하여 계산하는 가중치를 곱한 값이다. 실제 그 가중치는 각각의 프로젝트 특성과 제작사에 따라 다를 것이므로 본 논문에서는 그 상대적인 값으로 표현하였다.

3.2 고압단 압력 수준과 증기터빈 출력 및 열전달 면적에의 한 비용

고압단 압력의 변화에 따른 열회수 증기발생기의 열전달 면적과 증기터빈 출력과의 관계를 Fig. 7에 나타냈다. 편의상 그 값들을 상대치로 표시하였다.

그림에서 보는 바와 같이 고압단의 압력이 증가하면 열회수 증기발생기의 열전달 면적은 증가한다. 그러나, 증기터빈의 출력은 증가하다가 변곡점

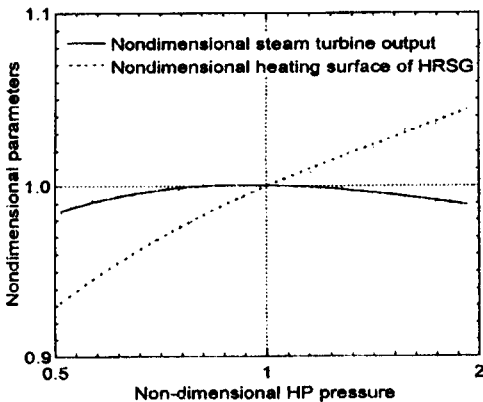


Fig. 7 Non-dimensional steam turbine output and non-dimensional heating surface of HRSG as a function of HP steam pressure

을 보이며 다시 감소하는 경향을 볼 수 있다.

비교를 위하여 시스템의 다른 모든 변수들은 일정하게 유지하였고, 다만, 고압단과 저압단을 거치면서 회수되는 전체 열량은 일정하게 유지하기 위해 고압단 압력의 변화와 더불어 저압단의 핀치점 온도차만을 변화시켰다. 고압단의 핀치점 온도차 또한 고정시켰기 때문에, 고압단 압력이 증가하면 고압단에서의 대수평균 온도차의 감소 비율이 회수열량의 감소 비율보다 크기 때문에 간단히 식 (1)에서 알 수 있는 바와 같이 고압단의 열전달 면적이 다소 증가하며, 출구 고압 증기의 엔탈피와 유량은 조금씩 감소한다. 한편, 전체적으로 일정한 열량회수를 위해서 저압단에서 더 많은 열량을 회수하게 되므로 저압단의 열전달 면적도 증가하는 경향을 보인다.

고압 증기의 온도가 고정되고 압력이 증가하면 고압부의 엔탈피와 유량은 감소하고 저압부의 엔탈피와 유량의 증가하여 두 단에서 나오는 증기가 복합적으로 작용해 결정하는 증기터빈의 전체 출력은 Fig. 7에 나타난 바와 같이 최적화된 점을 갖게 된다. 그러나, 열회수 증기발생기의 열전달 면적, 즉, 투자비는 항상 증가하게 된다.

이 결과를 바탕으로 열전달 면적과 출력에 각각의 가격 인자(가중치)를 곱하여 압력 변동에 따른 출력 변동 이익(A)과 열전달 면적에 의해 평가된 비용(B)과의 차이(C)를 Fig. 8에 나타내었다. 이

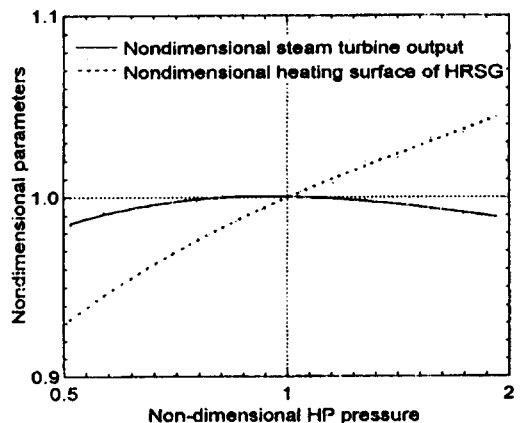


Fig. 8 Variation of relative cost gain w.r.t. the non-dimensional HP pressure

차이는 임의의 짐을 기준으로 하여 그 상대적인 변화율을 나타낸 것이다.

$$C=A-B$$

$$A=C_1 \cdot \Delta(\text{Electrical Output of Steam Turbine})$$

$$B=C_2 \cdot \Delta(\text{Heat Transfer Surface of HRSG})$$

그림에서 보는 바와 같이 고압단 압력변화에 따라 증기터빈의 출력이 변화함으로써 얻는 이익과 열회수 증기발생기의 투자비 증가로 인한 비용 손실 사이에는 최적점이 존재하는 것을 알 수 있다. 즉, 최소의 비용으로 최대의 효과를 낼 수 있는 최적점이 있음을 알 수 있으며, 그 절대값은 각각의 프로젝트 특성과 제작사의 축적된 자료를 바탕으로 결정된다. 예를 들어 전력 생산의 증가로 인해 생기는 이익에 대한 가중치는 kW 당 1000\$~2000\$ 정도이며, 열회수 증기발생기의 전열면적 증가로 인한 비용 손실에 대한 가중치는 m² 당 100\$~150\$ 정도로 보고 있다. 본 연구에서는 그 값을 각각 1500\$, 100\$인 경우에 대하여 최적치를 산출한 것이다. 물론, 이 가중치는 각각의 플랜트의 성능과 관련된 특성은 물론, 건설 국가, 투자비 조달, 물품조달, 전력판매단가 등의 조건에서부터 결정되어야 하는 값이다.

4. 결 어

본 논문에서는 최근 들어 각광받고 있는 복합화력 발전 시스템을 구성하고 있는 열회수 증기발생기의 기본적인 개념 및 설계 변수에 관해 간략히 정리하고, 주요 설계 변수가 시스템의 성능에 미치는 영향을 정성적인 측면에서 간략히 살펴보았다.

또한, 고압 핀치점 온도차 및 고압단 압력변화에 따른 출력 및 투자비용, 비용이익에 대한 해석을 통해 출력과 투자 비용 간에 최적점이 존재함을 보였다. 출력과 투자비에 영향을 미치는 요소는 이밖에도 가스터빈 배기가스의 특성, 저압부 및 고압부의 근접 온도차, 저압부의 압력 및 핀치점 온도차, 가스제거장치(deaerator)의 압력 등의 많은 변수들이 있고, 이들의 조합에 의해 출력 및 열진달 면적이 결정된다. 본 논문에서는 대표적으로 고압부의 핀치점 온도차와 압력의 변화가 최적 설계에 미

치는 영향을 살펴보았다.

최적화 짐을 찾는 노력은 가장 적은 비용으로 최고의 효율 및 출력을 얻을 수 있도록 시스템을 설계하여 최대의 이익을 얻을 수 있다는 점에서 플랜트 엔지니어링의 관점에서 아주 중요한 부분이 된다.

전체 복합 화력 발전 시스템의 최적화 과정은 본 논문에서 예시한 열회수 증기발생기 외에도 다른 주기기들 및 보조기기의 기본 설계 과정을 통합하고, 각 프로젝트의 특징을 모두 반영하여 이루어져야 할 것이다.

참고문헌

1. Thermoflow, Inc., 1996, GTPRO Ver 7.01
2. A. V. Manen, 1994, "HRSG Design for Optimum Combined Cycle Performance," *ASME Paper* 94-GT-278
3. A. Pasha and S. Jolly, 1995, "Combined Cycle Heat Recovery Steam Generators Optimum Capabilities and Selection Criteria," *Heat Recovery Systems & CHP*, Vol. 15, No. 2, pp. 147~154
4. A. Pasha, 1985, "Gas Turbine Heat Recovery System : Evaluation Criteria for the Unfired System," *ASME Paper* 85-GT-89
5. N. Subrahmanyam, S. Rajaram, and N. Kamalanathan, 1995, "HRSGs for Combined Cycle Power Plants", *Heat Recovery Systems & CHP*, Vol. 15, No. 2, pp. 155~161
6. 김동섭, 노승탁, 1994, "가스터빈 열병합발전 시스템의 설계점 설정 및 부분부하 성능해석", *대한기계학회 논문집* 제18권 제8호, pp. 2167~2176.
7. J. Y. Shin, S. J. Kim, and S. T. Ro, 1998, "Design and off-design performance analysis of heat recovery steam generators", *The 11th International Symposium on Transport Phenomena*, Nov. 29 ~ Dec. 3, 1998, Taiwan, pp. 156~161.
8. 노승탁, 1996, "복합화력 발전 사이클 및 성능해석 프로그램 개발 (최종 보고서)", 서울대학교 터보·동력기계연구센터.

저 자 소 개



신지연(申智燮)

1967년 7월생, 1990년 서울대학교 기계공학과 졸업, 1992년 동 대학원 졸업(석사), 1996년 동 대학원 졸업(박사), 1996년~1998년 현대 엔지니어링 주식회사, 1998년~1999년 서울대학교 정밀기계설계공동연구소, 1999년~현재 동의대학교 기계산업시스템공학부 전임강사, 당학회 회원, 대한기계학회, 공기조화냉동공학회 회원.