

다양한 구성의 가스터빈 복합화력발전소에 대한 열역학적 해석과 경제적 최적화 연구

김승진* · 최상민**

Thermodynamic analysis and economical optimization on various configuration of Gas Turbine Combined Cycle Power Plants

Seungjin Kim*, Sangmin Choi**

ABSTRACT

Thermodynamic and economic analysis on various type of gas turbine combined cycle power plants was presented to build up the criteria for optimization of power plants. The efficiency considered about energy level difference between electricity and heat was introduced. The efficiency on power and heat generation of power plants whose have different purpose was estimated and power generation costs on various type of combined heat and power plants : fired/ unfired, condensing/ non-condensing mode, single/ double pressure HRSG.

Key Words : Gas Turbine Combined Cycle Power Plants, Efficiency

최근 몇 년간 복합 사이클 발전 플랜트 (CCPP, Combined Cycle Power Plant) 에 대한 관심이 높아지고 있다. 이런 복합 사이클 발전 플랜트 시장의 성장은 미국과 유럽에서의 배출가스 규제 정책 등에 의해 야기되었다.[1] brayton 사이클과 rankine 사이클의 두가지 파워 사이클을 합친 형태로, 가스터빈과 스팀터빈을 동시에 사용하는 복합사이클 발전플랜트는 탄소함유량이 작은 천연가스와 같은 연료를 사용하고 높은 효율을 가지고 있다는 점에서 주목 받고 있다. 복합사이클 발전플랜트는 가스터빈과 가스터빈 후단에서의 열을 이용하여 고온·고압의 스팀을 발생시켜 두가지 파워 사이클을 연결하는 역할을 하는 보일러를 배열회수 보일러 (HRSG, Heat Recovery Steam Generator), 그리고 스팀터빈으로 이루어져 있다. 지금까지의 복합발전 플랜트의 설계는 단순히 기존 가스터빈 후단에 배열회수 보일러와 스팀터빈을 bottoming cycle 형태로 설치하고, 가스터빈의 용량, 후단온도, 가스유량 등이 정해지면 스팀터빈과 배열회수보일러의 디자인이 정해지는 가스터빈 위주의 설계가 대부분이었다. 하지만, 동력생산 이외에 열이나 스팀도 생산해야 하는 열병합 발전소, 담수화 플랜트 등의 용도로 복합사이클 발전플랜트가 설계되면서 가스

터빈의 성능 및 디자인뿐만 아니라 전체 사이클의 효율, 전력생산량, 가격 등에 영향을 미치는 배열회수 보일러의 디자인도 포함한 전체 복합사이클 발전플랜트의 구성이 중요해졌다.[2] 이에 따라, 엔지니어는 복합발전 플랜트 설계에서의 상반되는 설계인자인 높은 효율과 적은 비용을 모두 만족시키는 최적 설계를 해야 하고, 플랜트의 목적에 맞게 최적 설계가 되었는지 판단할 필요가 있다. 이 연구는 사이클의 운전의 적절성 여부를 판단하는 기준을 제시하기 위해, 여러 종류의 상용화된 복합사이클 발전플랜트에 대하여 열역학적 효율을 비롯한 다양한 평가 기준을 적용해보고, 일정한 가스터빈과 스팀터빈에 대하여 사이클 구성을 달리 하였을 때 사이클의 운전 변화와 그에 따른 경제성을 평가하였다. 복합사이클 발전플랜트의 최적 설계에 관한 연구는 대부분 HRSG의 최적설계에 관한 내용으로 [3-5], 대부분 최적설계 여부를 판단하는 기준으로 전체 사이클의 1차 2차 효율을 제시하고 있다. 이에 더하여 열 경제적 평가를 하거나[6], 배열회수 보일러에서의 스팀 발생량과 stack 온도를 기준으로 배열회수 보일러의 최적 설계조건을 정하는 연구[7]들이 진행되어왔다. 또, 다양한 구성의 사이클에 대한 경제적 평가[8-9]와, 가스터빈 사이클을 중심으로 하는 복합사이클 발전플랜트의 최적설계 연구[10-11]등이 있었다. 하지만, 다양한 목적의 복합발전 플랜트의 성능을 요구에 맞게 평가하는 것에 대한 고민은 부족한 실정이다.

* KAIST 기계공학과

† 연락처, smchoi@kaist.ac.kr

TEL : (042)350-3030 FAX : (042)-350-1284

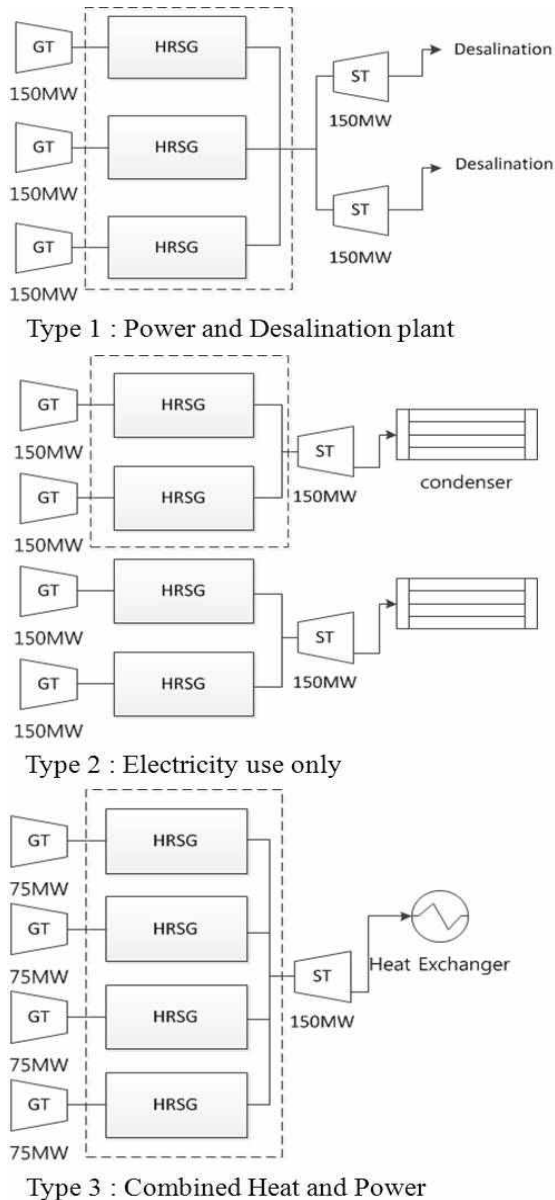


Fig 1 Schematic Diagram of Case Power Plants

Table 1 Case Combined Cycle Power Plants

| | Type 1 | Type 2 | Type 3 |
|-----------------------------|--------|---------|---------|
| Firing | Fired | Unfired | Unfired |
| GT outlet temp. Of gas (°C) | 573 | 520 | 605 |
| GT capacity per each(MW) | 166 | 85.9 | 161.21 |
| Number of GT | 3 | 4 | 2 |

| | | | |
|------------------------------------|-----------------|--------------------------|-------------------|
| HP steam temp.(°C) /pressure (MPa) | 544 / 9.040 | 492.3 / 6.149 | 523.7 / 0.539 |
| ST capacity(MW) | 322 | 160.8 | 190.99 |
| Number of ST | 2 | 1 | 1 |
| Plant gross output (MW) | 735.25 | 427.7 | 511.31 |
| Heat output(MW) | 564.1 | 342.5 | - |
| Fuel consumption(MW) | 1496.00 | 981.05 | 966.48 |
| Combined cycle efficiency (%) | 49.15 | 43.60 | 52.9 |
| Purpose | Power and steam | Combin ed heat and power | Electrici ty only |

본 연구에서는 Fig 1 과 table 1에서와 같은 다양한 목적과 구성의 케이스 플랜트에 대하여 열역학 제 1법칙 해석을 수행하고, 이 플랜트들의 성능을 평가하기 위한 효율계산을 진행하였다. 이때 사용된 효율 표현방식은 다음과 같다.

$$\eta = \frac{W_{output}}{Q_{input}} \quad (1)$$

$$UF = \frac{W_{output} + Q_{output}}{Q_{input}} \quad (2)$$

$$R1 \text{ energy efficiency} = \frac{2.6 \times W_{output} + 1.1 \times Q_{output}}{\text{fuel consumption}} \quad (3)$$

식(1)의 Electrical efficiency는 우리가 흔히 power plant 에서 쓰고 있는 효율로, 발생된 동력과 소모된 에너지의 비를 나타내는 것이다. 식(2)의 Fuel utilization factor 는 발생된 동력과 발생된 열의 총합을 소모된 에너지에 대하여 비로 나타낸 것이다. 마지막으로 식(3)의 R1 energy efficiency 는 동력과 열을 분리해서 생산할 때와 열병합 방식으로 생산했을 때를 비교하기 위해, 발생된 동력과 열에 각각을 분리해서 생산할 때의 효율을 고려한 equivalence factor를 곱하여 소모된 연료에 대한 비로 나타낸 것으로 동력과 열의 에너지 레벨을 고려한 기준으로 불

수 있다. [12-13]

이와 더불어, 가스터빈 복합사이클 발전플랜트의 형태 중 스팀의 사용량이 상대적으로 많은 열병합 발전소에 대하여 스팀터빈과 가스터빈의 종류가 정해졌을 때, 사이클 구성을 달리하여 동력과 열의 발생량의 변화를 알아보고, 경제성에 대하여 다음 식 (4) 를 이용하여 평가하였다.

$$Y_{EL,yr} = I_C \times \Psi + \frac{I_{fuel} \times C \times 8760}{\eta_{elec}} \quad (4)$$

여기서 $Y_{EL,yr}$ 은 1년간 발전소를 운영하는 데 들어가는 비용을 뜻하고, I_C 와 Ψ 는 각각 발전소를 짓는데 필요한 건설비와 고정비율을 뜻하며, I_{fuel}, C, η_{elec} 은 각각 연료단가, 설비이용률, 전기 생산 효율을 뜻한다.

열병합 발전의 경우 지역별, 계절별로 열에너지와 전기에너지에 대한 수요가 다르기 때문에 이와 같은 다양한 운전모드가 존재하며, 먼저 스팀터빈후단에 열교환기를 설치하여 전기와 열을 모두 발생시키는 back pressure mode, 열교환기를 이용하지 않고 condenser 만을 설치하여 스팀터빈에서 전기만 발생시키는 condensing mode로 나눌 수 있다. 앞의 각 모드는 동절기와 하절기에 따라 달라지는 모드이고, 지역적 특성, 고객의 요구에 따라 운전 모드를 결정할 수 있다.

다양한 타입의 가스터빈 복합 화력 발전소의 효율을 계산한 것에 대하여 살펴보면 다음 Fig. 2 과 같다.

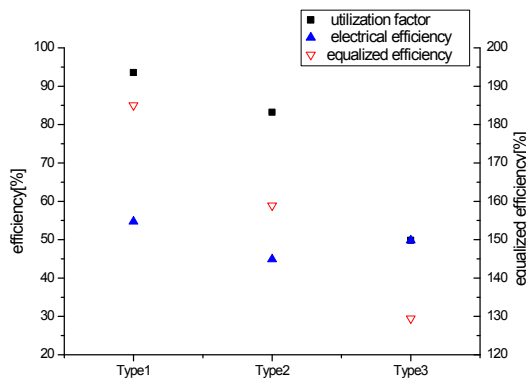
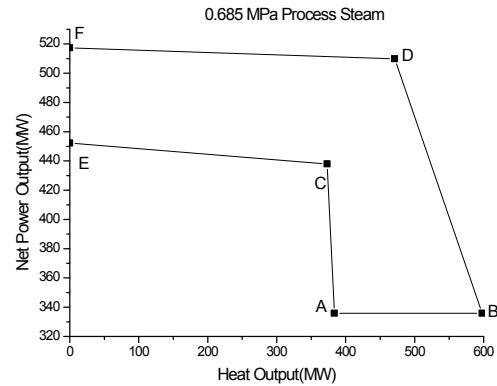


Fig. 2 Efficiency of various type Gas Turbine Combined Cycle Power Plants

1차 열역학적 효율은 type 1 의 경우 약 54.74%, type 2 의 경우 약 44.92%, 그리고 type 3 의 경우 약 49.8% 의 전기 생산 효율을 가진다. 또, 전기와 열 생산을 모두 고려한 utilization factor 는 type 1 의 경우 약 93.55%, type 2 의 경우 약 83.21% 로 계산되고, type 3의 경우는 열을

생산하지 않고 condensing 스팀 터빈을 사용하기 때문에, utilization factor를 따져보지 않았다. 마지막으로, 전기와 열을 각각 생산하는 경우에 대하여 복합 화력으로 발전했을 때의 이득을 살펴보는 equalized 효율은 type 1의 경우 약 185.02 %, type 2의 경우 약 158.92%, type 3의 경우 약 129.48% 로 계산되었다. 이를 살펴보면, type 3의 경우가 가장 낮은 효율을 나타내는 것을 알 수 있고, type 1 이 모든 효율이 제일 높은 것을 알 수 있다.

Fig. 3 는 대상 플랜트 중 열병합 발전소 형태인 type 2 에 대하여 구성을 달리 하였을 때 동력과 열의 생산량을 비교한 것이다.



Cycle A-Unfired HRSG Lp process steam
 Cycle B-Supplementary fired (922K)HRSG, LP process steam
 Cycle C-Combined cycle, unfired, two-pressure level HRSG, HP at 6.149MPa, 765K, LP at 0.685MPa, 437K (saturated), noncondensing steam turbine-generator
 Cycle D-Combined cycle, supplementary fired HRSG, HP at 6.149MPa, 765K, LP at 0.685MPa, 437K (saturated), noncondensing steam turbine-generator
 Cycle E-Same as Cycle C, but with admission condensing steam turbine-generator
 Cycle F-Same as Cycle D, but with condensing steam turbine-generator

Fig. 3 Performance envelope for gas turbine combined heat and power system

다음 table 2 는 다양한 열병합 발전소 구성에 대하여 14%의 고정비율과 100%의 설비이용률 조건으로 계산하였을 때, 전기 생산 단가를 구한 것이다. 결과에서 보이는 것과 같이, A, C, E의 구성을 비교해보면, 이중압식 보일러를 사용함에 따른 건설비의 증가가 있지만 효율이 높아짐에 따라 오히려 전기 생산 단가는 감소함을 알 수 있다. 또, C 와 D 를 비교해 보면, 추가적인 연료의 주입이 있는 보일러의 경우가 효율이 높아 지지만 건설비의 증가와 연료비의 증가로 인해 전기 생산 단가가 증가함을 알 수 있다.

Table 2 Economic Analysis on various system configuration

| | | A | C | E | B | D | F |
|------------------------------|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Net power output | MW | 335.9 | 437.9 | 452.2 | 335.9 | 509.8 | 517.4 |
| Efficiency | % | 34.5 | 44.9 | 46.4 | 34.5 | 52.3 | 53.1 |
| Capital costs | 10^3 ₩ /kW | 542 | 1063 | 1279 | 607 | 1128 | 1345 |
| Fuel consumption | kg/s | 20.5 | 20.5 | 20.5 | 24.3 | 24.3 | 24.3 |
| electricity generation costs | ₩ /kWh | 250.8 | 202.8 | 200.3 | 296.7 | 207.1 | 207.8 |

경제성 평가를 포함한 위의 결과 값들은 실제 복합사이클 발전플랜트 시스템에 비해 단순화된 모델에 대한 결과이다. 본 연구에서는 다양한 복합사이클 발전플랜트의 성능 평가 기준을 제시하기 위해 다양한 구성의 발전 플랜트에 대한 열역학적, 경제적 평가를 수행하였다. 향후, 각 플랜트에 대한 파라메트릭 스터디가 수행된다면 본 연구의 결과를 다양한 설계변수에 대하여 살펴보고 최적설계 여부를 판단하는 기준을 제시할 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 한국과학기술원 기계가치 제조사업단(BK21)의 지원을 받아 이루어졌습니다.

참고 문헌

[1] H. Nusseler et al, "Developments in HRSG Technology", 7th Annual Industrial & Power Gas Turbine O&M Conference, 2001, Birmingham, UK.
 [2] M. Valdés, J. L. Rupún, "Optimization of heat recovery steam generators for combined cycle gas turbine power plants", Applied Thermal Engineering, 2001, pp.1149-1159.
 [3] N. R. Kuma et al, "Performance Simulation of Dual Pressure HRSG in Combined Cycle. Energy Engineering", 2007, Vol. 104, No. 1, pp. 64-78.
 [4] N. Enadi, K. Roshandel, "Thermodynamic Modeling and Parametric Study and Exergy Optimization of Single, Dual and Triple

Pressure Combined Cycle Power Plants(CCPP)", 2011, IEEE, pp. 361-365.

[5] J. In, S. Lee, "Optimization of heat recovery steam generator through exergy analysis for combined cycle gas turbine power plants", 2008, International Journal of Energy Research, Vol. 32, No. 9, pp. 859-869.

[6] C. Casarosa et al, "Thermoeconomic optimization of heat recovery steam generators operating parameters for combined plants", 2004, Energy, Vol. 29, pp. 389-414.

[7] A. Pasha, S. Jolly, "Combined Cycle Heat Recovery Steam Generators Optimum Capabilities and Selection Criteria", 1995, Heat Recovery Systems & CHP, Vol. 15, No. 2, pp. 147-154.

[8] R. Kehlhofer, "Comparison of Power Plants for Cogeneration of Heat and Electricity", 1980, The Brown Boverly Review, Vol. 67, No. 8, pp. 504-511.

[9] R. Kehlhofer et al, Combined-Cycle Gas & Steam Turbine Power Plants (3rd ed.), PennWell Corporation, 2009.

[10] A. Polyzakis et al, "Optimum gas turbine cycle for combined cycle power plant", 2008, Energy Conversion and Management, Vol. 49, pp. 551-563.

[11] T. Srinivas et al, "Parametric Simulation of Combined Cycle Power Plant: A Case Study", 2011, International journal of Thermodynamics, Vol. 14, No. 1, pp. 29-36.

[12] EURELECTRIC, "European Combined Heat & Power: A Technical Analysis of Possible Definition of the Concept of "Quality CHP"." Union of the Electricity Industry-EURELECTRIC, 2002.

[13] European Commission, "Guidelines on the Interaction of the R1 Energy Efficiency Formula for Incineration Facilities Dedicated to the Processing of Municipal Solid Waste According to ANNEX II of Directive 2008/98/EC on Waste", European Commission-Directive-general environment, 2011.