

CO₂ 포집을 고려한 가스터빈 복합화력 발전 플랜트의 시스템 대안 평가를 위한 공학 설계

이수현* · 최상민**

Engineering design procedure for gas turbine combined cycle power plant with post-combustion CO₂ capture

Soohyeon Lee*, Sangmin Choi**

ABSTRACT

As the user demand for power plants becomes various, design objective becomes complicated. To review the system feasibility, system objective and evaluation criteria need to be newly defined. In this study, engineering design procedure of the multi-purpose power plant, such as barge-mounted combined cycle power plant with CO₂ capture, was shown as a previous work for the feasibility review of the system alternatives. For the system design, heat and mass balance for each system configuration was firstly performed. Using the thermal analysis results, conceptual design of system alternatives was carried out. And then, preliminary design of the major equipment was done. The engineering calculation results of this study would be used as the evaluation data for system feasibility review.

Key Words : Gas Turbine Combined Cycle Power Plant, Post-combustion CO₂ capture, Barge-mounted Power Plant, System Configurations, Engineering Calculation

현재 기술수준에서는 carbon capture and storage (CCS) 과정에서의 추가 비용 및 에너지 사용으로 인해 경제성이 떨어지는 문제가 있다. 기존 방법의 경제성을 높이기 위한 방안으로 enhanced gas recovery (EGR) 또는 enhanced oil recovery (EOR) 기술로의 적용을 고려할 수 있다. 포집된 CO₂를 EGR 및 EOR 과정에 요구되는 주입 기체로 사용함으로써, 에너지 자원의 추가 생산 뿐만 아니라 대기 중 CO₂ 배출량 저감 시키는 것이 가능하기 때문에 이에 대한 관심과 개발이 증가하고 있다 [1]. 특히 육상 플랜트로부터 접근이 힘든 지역적 특성을 가지는 경우에서 부유식 발전 플랜트를 건설하여 가스전 또는 유전까지 CO₂를 공급하는 방안이 제안되었다.

부유식 발전 플랜트의 이동성을 보장하기 위해서는 플랜트의 소형화가 요구된다. 흡수법이 적용된 가스터빈 복합화력 발전 플랜트의 소형화와 관련하여 흡수제의 종류 및 배가스의 압력레벨의 영향에 대한 연구가 진행되었다 [2,3]. 흡수제의 종류에 상관없이 배가스의 압력레벨이 높을수록

포집 설비를 구성하는 주요 반응기인 흡수탑의 크기가 지수적으로 감소함을 확인하였다.

본 연구에서는 이러한 새로운 개념의 발전 플랜트가 실행 가능 범위에 있게 하는 시스템 구성과 운전 조건을 확인하고 열 해석을 진행하였다. 이를 바탕으로 향후 시스템 대안 평가를 진행하기 위한 시스템 개념 설계와 주요 설비의 기본 설계가 진행되었다.

Fig. 1은 시스템 대안을 나타낸 것이다. CO₂ 포집 조건에 따른 플랜트 성능을 살펴보기 위해 CO₂ 포집을 하지 않는 case 1을 기준 시스템으로 하여 동일한 구성을 갖는 발전 플랜트에 CO₂ 포집 설비를 포함하는 case 2를 추가하였다. 또한 주요 설비 중 흡수탑의 소형화 효과를 얻을 수 있는 고압 상태의 배가스로부터 CO₂를 포집하는 case 3-4을 고려하였다. Case 3는 기존의 발전 플랜트 시스템의 HRSG 후단에 가스 압축기를 추가하여 배가스를 압축시키는 시스템이며, case 4는 가스터빈을 개조를 통해 배가스를 터빈에서 대기압까지 팽창시키지 않고 중간 단계에서 고압 상태로 추기하여 사용함으로써 추가의 압축 과정을 거치지 않고 바로 CO₂ 포집을 하는 시스템이다. 특히 case4의 경우, CO₂ 포집 후 배가스를 대기 중으로 바로 배출하는 case 4-a와 바

* KAIST 기계공학과

† 연락처자, smchoi@kaist.ac.kr

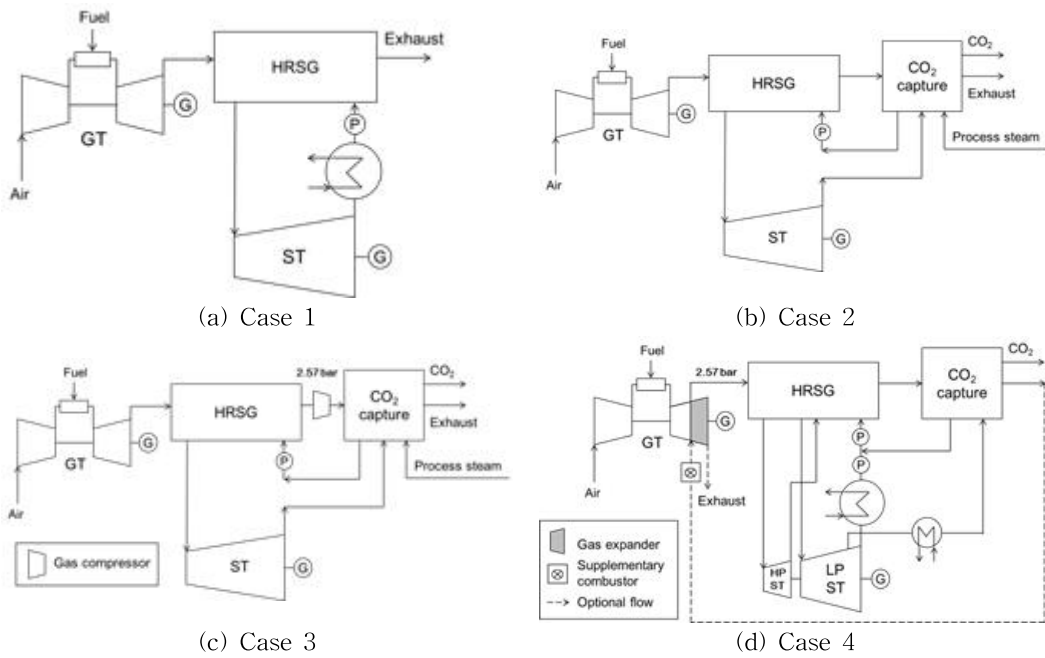


Fig.1 System Configurations

로 배출하지 않고 가스 팽창기를 통해 추가로 동력을 생산하는 case 4-b로 나누어 동력 생산의 측면에서 가스 팽창기의 효율성을 살펴보았다. 이때, case 2-4은 모두 동일한 CO₂ 포집 시스템 구성을 가진다고 가정하였으며, case 4-b의 가스 팽창기는 기존의 가스터빈의 마지막 단과 동일하다고 가정한다. 기준 시스템의 구성 및 운전 조건은 문헌을 참고하였으며 [4], CO₂ 포집 기술로써 산성 기체 제거에 널리 쓰이는 MEA를 이용한 화학적 흡수법을 고려하였다.

시스템 설계 절차는 다음과 같다.

Step 1. 시스템 개념 설계

: 주어진 시스템 구성에 대한 열/물질 정산

Step 2. 주요 설비들의 기본 설계

우선, 열/물질 정산을 수행하여 시스템을 구성한다. 개념 설계된 결과를 바탕으로 시스템 출력을 산정하고 주요 설비를 기본 설계한다.

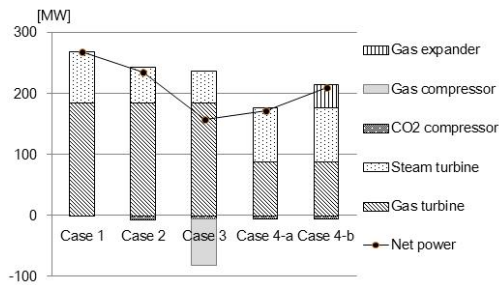


Fig.2 Net power generation

Fig. 2는 열/물질 정산 결과를 바탕으로 시스템 생산 동력을 산정한 결과이다.

HRSG의 크기를 대표할 항목으로써 전열 면적을 선정하고 이를 대안 별 비교/평가하였다. 전열 면적을 산정하기 위해 우선 각 열 교환기에 대한 전달 단위 수를 구하였다. 두 가지 열 교환기 해석법인 LMTD법 및 유용도-NTU법으로부터 다음의 관계를 유도할 수 있다 [5, 6].

$$\ln\left(\frac{T_{g,out} - T_{s,\in}}{T_{g,\in} - T_{s,out}}\right) = -NTU\left(1 - \frac{1}{x} \frac{c_g}{c_s}\right) \quad (1)$$

식 (1)로부터 산정된 전달 단위 수와 식 (2)와 같이 표현되는 전달 단위 수의 정의를 이용하여 각 열 교환기에 대한 전열면적을 산정하였다.

$$NTU = \frac{UA}{c} \quad (2)$$

Fig. 3은 HRSG를 구성하는 열교환기 별 전열 면적을 나타낸 결과이다.

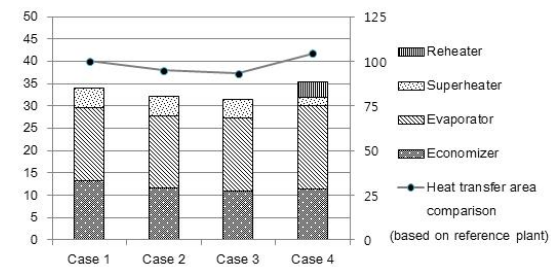


Fig.3 HRSG heat transfer area

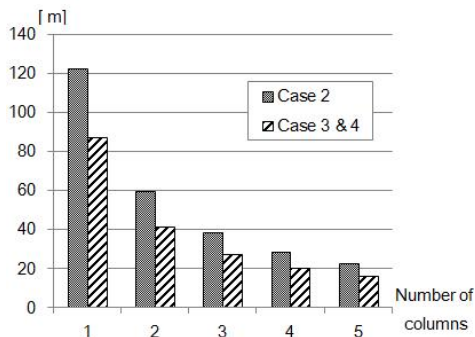


Fig.4 Absorber height

시스템을 구성하는 대표 반응기로서 흡수탑을 선정하고 그 크기를 산정하였다. 흡수탑 설계에 영향을 미치는 주요 인자로는 배가스 내 CO₂ 함량, 배가스 유량 및 유입 온도, 그리고 MEA 농도 등이 있다. 문헌 분석을 통해 주요 인자의 타당한 설계 범위를 확인하고 이를 적용하여 도출된 단일 흡수탑의 최대 지름은 7.9 - 12.8 m의 범위에 있다 [7]. 흡수탑의 높이는 복잡한 화학 반응 매커니즘에 의해 결정된다. 특히 배가스-흡수제 간의 기-액 평형 곡선 및 조작선에 따라 결정되는 물질 전달율의 영향을 지배적으로 받으며 의해 식 (3)과 같이 표현된다 [8].

$$Z_T = \frac{\tilde{G}}{P} \int_{Y^*}^{Y_b} \frac{1}{\tilde{a}K_G} + \frac{H}{\tilde{a}\sqrt{\frac{D_L}{t_r}}} \frac{dY}{(1-Y)^2(Y-Y^*)} \quad (3)$$

흡수탑 단면적은 배가스 유량 및 흡수탑의 설계 선속 (design flux)에 의해 크게 좌우된다. 따라서 본 연구에서는 흡수탑의 크기와 적정 개수를 산정하기 위해서, 우선 현실적인 설계 범위에 있는 흡수탑 지름과 주어진 배가스 유량을 기준으로 설계 선속에 대한 단일 흡수탑의 허용 가능한 배가스 유량을 산정하였다. 이를 기준으로 90 % CO₂ 포집에 요구되는 단일 흡수탑의 높이를 흡수탑 개수에 따라 구하였다. Fig.4는 이상의 가정으로부터 도출한 결과를 정리한 것이다.

대상 플랜트는 전력과 CO₂, 그리고 포집 과정에 필요한 공정증기 생산과 설비 소형화를 설계 목적으로 갖는다. 본 연구에서는 이렇게 하나의 발전 설비로부터 다수의 생산물을 얻는 다목적 발전 플랜트의 타당성 평가를 위한 선행 작업으로써, 시스템 대안의 개념 설계 및 주요 설비의 기본 설계가 진행되었다. 향후 본 연구의 결과를 기반으로 대상 시스템의 성능을 정량적으로 평가하고, 더 나아가 개념 설계 단계의 시스템 타당성을 평가할 예정이다.

후 기

본 연구는 한국과학기술원 가치제조 기계사업단 (BK21)의 지원을 받았습니다.

참고 문헌

[1] Intergovernmental Panel on Climate Change, "IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage", 2005.
 [2] Nathaniel Bo Jensen, "Techno-Economic Feasibility of Post Combustion Carbon Capture at Elevated Absorption Pressure", Master's thesis, Technical University of Denmark, 2013.
 [3] 김승진, "가스 터빈 복합화력 발전 플랜트의 시스템 구성 제안-CO₂ 포집 대안 별 비교 평가", 석사학위논문, KAIST, 대전, 2013.
 [4] Murad A. Rahim, "Combined Cycle Power Plant Performance Analyses Based on the Single-Pressure and Multipressure Heat Recovery Steam Generator", Journal of Energy Engineering(Vol.138 No.3), 2012, pp.136-145.
 [5] Frank P. Incropera, David P. Dewitt, Theodore L. Bergman, Adrienne S. Lavine, 2008. Fundamentals of heat and mass transfer, John Wiley & Sons, Inc., sixth edition.
 [6] In J.S. Lee S. Y., 2008. Optimization of heat recovery steam generator through exergy analysis for combined cycle gas turbine power plants. International Journal of Energy Research 32, 859-869.
 [7] Anand B. Rao, Edward S. Rubin, Michael B. Berkenpas, "An integrated modeling framework for carbon management technologies", 2004.
 [8] Gianni Astarita, David W. Savage, Attilio Bisio, 1983. Gas treating with chemical solvents, John Wiley & Sons, Inc..