

IGCC 발전 플랜트에서 복합발전공정-공기분리장치의 연계에 관한 열역학적 성능 평가

원은누리* · 김현정* · 박성구** · 나종문*** · 최경민** · 김덕줄*

Thermodynamic Performance Evaluation of an Integration Design between the Combined-cycle and Air Separation Unit in an IGCC Power Plant

On Nu-ri Won*, Hyun-jeong Kim*, Sung-koo Park, Jong-moon Na**, Gyung-min Choi**, Duck-jool Kim*,

ABSTRACT

In this paper, the integration issue, such as an air-side integration design between the gas turbine and air separation unit, is described and analyzed by the exergy and energy balance of the combined-cycle power block in an IGCC power plant. The results showed that the net power of the system was almost same, but that of the gas turbine was decreased as the integration degree increased. The highest exergy loss was occurred in the combustor of gas turbine, which was affected by the chemical reaction, heat conduction, mass diffusion, and viscous dissipation.

Key Words : IGCC, Combined cycle, Air separation unit, Integration design, Exergy analysis

석탄 가스화 복합발전(IGCC; Integrated Gasification Combined Cycle) 기술은 석탄발전에 따른 환경 영향을 줄이기 위한 청정석탄기술 중 하나로써 최근 주목받고 있다. 다양하고 복잡한 설비로 구성된 IGCC 플랜트는 건설비용이 높고 기존의 천연가스복합화력발전 또는 초임계압화력발전 등과 비교하여 효율보장이 어렵다고 알려져 왔다. 하지만 IGCC 기술은 단위 공정들 간의 최적 연계에 의해서 효율 향상을 도모할 수 있으며 저급탄을 비롯한 다양한 탄종을 원료로 이용할 수 있는 장점이 있다. 또 오염원 배출을 현저히 감축시킬 수 있으며 이산화탄소 포집에 용이하다. 따라서 온실가스 배출권 거래제가 도입되면 기존의 화력발전 플랜트와 비교했을 때 충분히 경제성이 있을 것으로 예상된다. 한편, IGCC 발전효율을 최대화하기 위한 방안으로 최근 수년간 가스터빈과 공기분리장치의 연계에 관한 연구가 활발히 진행되어져 왔다[1]. 본 연구에서는 상용 복합발전 설계 프로그램을 이용하여 복합발전 사

이클 모델을 구성하고 해석을 수행하였다. IGCC 발전 플랜트의 복합발전 및 공기분리 공정을 관심영역으로 설정하고 이 경계면 내에서 두 공정 간의 연계정도(ID; Integration degree)에 따른 열역학적 해석을 수행하여 ID 변화에 따른 출력 및 소모동력, 엑서지 효율, 엑서지 손실 분포 등을 통해 복합발전 공정의 성능 특성을 고찰하였다.

본 연구의 대상인 복합발전 및 공기분리장치의 시스템 구성을 Fig. 1에 도시하였다. 상부 사이클인 가스터빈은 GE 7F Syngas Turbine을 사용하였으며 하부사이클은 3중압(Triple pressure), 재열 HRSG를 사용하였다. 가스터빈으로 공급되는 합성가스의 유량 및 연소기출구온도는 모든 Case에서 일정하게 고정시켰다. 즉, 가스터빈과 공기분리장치 연계정도에 따라 가스터빈 압축기로 유입되는 공기의 양은 증가하고 터빈 입구로 유입되는 연소가스의 양은 일정하게 유지된다. 공기분리장치는 원료공기를 증류탑 운전압력 이상으로 가압시키는 주공기압축기(MAC; Main air compressor)만을 고려하였다. MAC는 내부냉각이 가능한 4단의 원심압축기로 설정하였다. 계산에 필요한 입력데이터는 Table 1에 나타내었

* 부산대학교 기계공학부
** 두산중공업 IGCC 개발팀
*** 서라벌대학 자동차기계과
† 연락처, choigm@pusan.ac.kr
TEL : (051)510-2476 FAX : (051)-516-9598

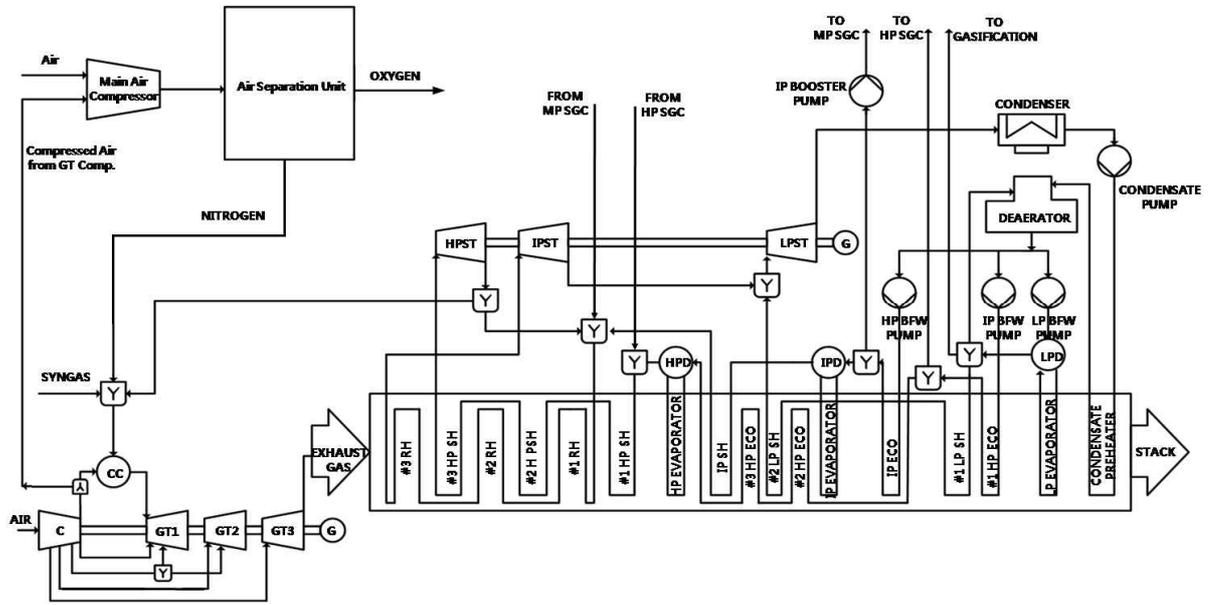


Fig. 1 System layout of the combined cycle in the IGCC power plant

다. 해석 대상 시스템의 열역학적 성능 특성을 고찰하기 위해 아래의 식과 같이 가스터빈 및 공기 분리장치 간의 연계 정도, 각 시스템의 출력, 엑서지 효율 및 각 장치에 따른 엑서지 손실을 정의하였다.

$$ID = \frac{m_{extracted\ air, GT}}{m_{air}} \quad (1)$$

$$\dot{W}_{GT} = \left(\dot{W}_{Turb} - \frac{\dot{W}_{comp}}{\eta_{mech}} \right) \cdot \eta_{gen} \quad (2)$$

$$\dot{W}_{ST} = \left(\dot{W}_{HP, ST} + \dot{W}_{IP, ST} + \dot{W}_{LP, ST} \right) \cdot \eta_{gen} - \dot{W}_{aux, ST} \quad (3)$$

$$\dot{W}_{net} = \dot{W}_{GT} + \dot{W}_{ST} - \dot{W}_{aux} \quad (4)$$

$$\eta_{energy} = \frac{\dot{W}_{net} + \dot{W}_{MAC}}{m_{fuel} \Delta G_r} \quad (5)$$

$$\dot{X}_{loss} = \sum_i \dot{m}_i \omega_i - \sum_e \dot{m}_e \omega_e \quad (6)$$

$$\omega = (h - h_0) - T_0(s - s_0) + \sum y_k \omega_{ch,k} + RT_0 \sum y_k \ln x_k \quad (7)$$

여기서 ω 는 단위질량 당 엑서지를 나타내고 물리적엑서지와 화학적엑서지의 합으로 구성된다. 주위공기는 101.35kPa, 288.71K, 상대습도 60%로 가정하였다. 가스화공정과 관련 있는 입력조건들은 설계조건으로 고정시켰으며 공기 분리 장치와의 연계정도만을 0~100% 조절하여 시스템 성능을 해석하였다. 가스터빈 출력증가 및 NOx

발생 억제를 위해 가스터빈과 공기분리장치의 질소 연계를 고려하였다. 가스터빈으로 들어가는 희석된 Syngas의 발열량은 약 5039.7kJ/kg 정도이다.

HRSG 내 열전달 흐름을 도식화한 T-Q선도를 Fig. 2에 도시하였다. 이 선도를 통해서 가스 터빈 Flue gas와 Water/Steam 간의 열전달 특성을 알 수 있다. HRSG 내의 열교환기들은 이들 stream 간의 엑서지 손실을 최소화하기 위해 최소온도차를 유지하도록 배치되었다.

Table 1 Main input data for the calculation.

Gas turbine	GE 7F Syngas
Pressure ratio	16
Compressor isentropic efficiency	87%
Turbine stage efficiency	88%
Syngas flow rate	53.78kg/s
Nitrogen diluent flow rate	49.75kg/s
Steam diluent flow rate	7.735kg/s
Firing temperature	1590.72K
Turbine exhaust temperature	869.91K
Turbine cooling fraction	12.56%
Steam cycle	triple pressure, reheat cycle
HP/IP/LP isentropic efficiency	0.89/0.89/0.89
HP/IP/LP pressure	12856.5/3808.9/700kPa
HP/IP/LP pinch temperature difference	37.5/86.8/7.58K

HP/IP approach temperature	10K
LP approach temperature	40K
Condenser pressure	4.903kPa

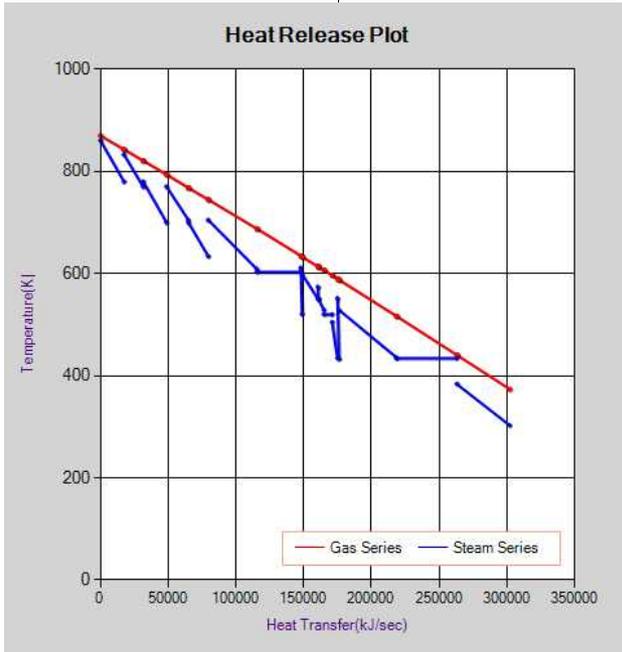
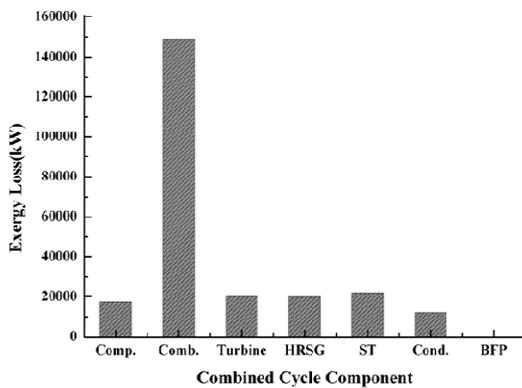


Fig. 2 Temperature-heat transfer rate (T-Q) diagram of the combined cycle

공기분리장치와의 연계 정도에 따른 복합발전공정의 엑서지 및 출력에 대한 계산결과를 Fig. 3에 나타내었다. 먼저 출력에 대한 부분을 살펴보면 ID가 증가할수록 가스터빈의 출력이 큰폭으로 감소하고 공기분리장치의 소모동력은 감소하는 것으로 나타났다. 공기분리장치의 소모동력이 감소함에 따라 전체 시스템의 출력이 상승할 것으로 예상했었으나 가스터빈의 출력 감소폭이 너무



커서 전체 효율에 별다른 영향을 주지 못하는 것으로 나타났다. 모든 ID에서 연소기에서 가장 큰 엑서지 손실이 발생하였다. 특히 ID 0%일 때 전체 손실의 40% 이상을 차지하였다. 연소기의 엑서지 손실이 큰 이유는 주위와의 온도차 뿐만 아니라 연소기 내부의 화학반응, 열전도, 점성의 소산 및 확산 등에 의한 비가역성을 증가시키는 유체역학적 요인에 의한 것으로 사료된다. Nishida 등[2]은 예혼합화염에서는 화학반응이 엑서지 손실에 지대한 영향을 미치지만 확산화염에서는 화학반응보다 열전도가 엑서지손실에 큰 영향을 준다고 보고하였다. Syngas 가스터빈의 경우 연료의 연소특성의 이유로 확산연소모드가 주로 적용되며. 따라서 열전도도 특성이 좋은 재료를 연소기 제작에 이용하면 이러한 엑서지 손실은 줄일 수 있을 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 2011년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)과 두산중공업의 지원을 받아 수행한 한국형 300MW급 IGCC 실증플랜트 기술개발사업 연구과제입니다. (2011951010001A)

참고 문헌

- [1] M. Liszka, J. Tuka, "Parametric study of GT and ASU integration in case of IGCC with CO₂ removal", Energy, Vol. 45, 2012, pp. 151-159
- [2] K. Nishida, T. Takagi, S. Kinoshita, "Analysis of entropy generation and exergy loss during combustion", Proceedings of the combustion institute, Vol. 29, 2002, pp. 869-874

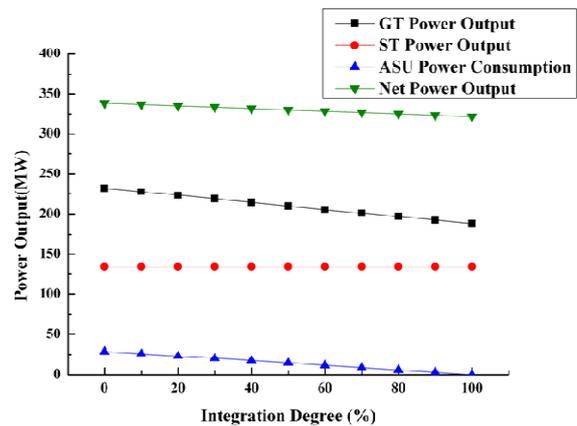


Fig. 3 Exergy loss(lesft) and power output(right) of the combined cycle