

300MW급 가압유동층복합발전 성능평가

주용진 · 김시문 · 안달홍 · 김종진
한전전력연구원

Performance Prediction of 300MW Class Pressurized Fluidized Bed Combustion Combined Cycle

Joo Yong Jin · Kim Si Moon · Ahn Dal Hong
Korea Electric Power Research Institute

1. 서론

지구 환경 문제에 적극적으로 대응하며 발전용 석탄 사용의 효율 극대화를 위하여 환경 친화적 고효율 발전 방식의 국내 도입 필요성이 대두되고 있다. 입법 예고된 2005년 1월 1일 이후의 배출 허용 기준치는 불과 10년 사이 황산화물(SOx) 1/6, 질소산화물(NOx) 1/4, 분진 1/5의 수준으로 강화된 것이다. 이 추세는 향후 더욱 심화될 전망이다. 이에 대응할 가장 적합한 기술은 청정석탄발전 기술(CCT; Clean Coal Technology)이며 청정석탄발전기술의 후보 기술로는 가압유동층 복합발전(PFBC; Pressurized Fluidized Bed Combustion) 및 석탄가스화 복합발전(IGCC; Integrated Gasification Combined Cycle) 기술이 있으며 전 세계적으로 각각 1,480MW 및 1,060MW 규모의 실증 실적을 가지고 있다.

PFBC 기술은 기존 복합발전 방식과 유사하여 친숙성이 뛰어나고 보일러 노내 원천 탈황으로 별도의 배연탈황설비가 불필요하다. 또한, 질소 산화물의 배출량이 낮고 소요 부지 면적이 작으며, 고효율인 특징을 가지고 있으므로 미래 발전 사업 도입에 우선 고려되는 기술이다.

본 연구는 PFBC 기술의 국내도입에 대비하여 기술의 철저한 이해와 심도있는 평가를 수행할 수 있는 PFBC 성능평가 시뮬레이션 기술을 개발하는 것이 목적이다. 이를 위하여 발전플랜트의 열성능을 평가할 수 있는 GateCycle™ 시뮬레이터를 이용하여 Alstom Power사의 개발품인 P800 유동층 보일러와 GT140P 가스터빈을 설계대상으로 선정하여 모델을 구성하고 전체 300MW급 PFBC 시스템의 성능을 평가하였다.

2. PFBC 성능해석 모델

2-1. PFBC 발전원리

PFBC는 가압된 보일러 내에서 연료(석탄)를 탈황제(석회석, 백운석)와 함께 유동화 상태에서 연소시켜 보일러에서의 연소열을 회수하여 증기터빈을 구동하기 위한 증기를 생산하고, 보일러에서 배출되는 고압의 연소 가스는 함유된 분진을 제거한 후 가스터빈 구동에 사용, 전력을 생산하는 고효율 복합발전 방식이다. 일반적으로 가압유동층 복합발전에서의 전력 생산 분담율은 증기터빈 80%, 가스터빈 20%이다.

PFBC 플랜트에서 유동층 보일러는 대략 1.1~1.6 MPa의 압력 용기에서 석탄을 연소하며 연소온도는 약 850~870℃이다. 석탄 내의 황은 연소 중 석회석과 반응하여 SO₂ 배출량을 감소시킨다. 또한 PFBC 보일러의 낮은 연소온도로 인해 본질적으로 열 NO_x 발생량이 작다. 고온 고압의 연소가스 내에 포함되어 있는 대부분의 분진은 사이클론에서 제거된 후 가스터빈을 구동하게 된다. 동시에 보일러에서 생산된 증기로 증기터빈이 구동된다. 이와 같은 방법으로 석탄을 깨끗하게 연소하고 효율적으로 발전하므로 PFBC 발전소는 화석연료 발전 방식과 관련된 가장 중요한 문제인 온실 가스 저감을 효과적으로 달성할 수 있다.

2-2. PFBC 주요 모델 대상

2-2-1. PFBC 보일러(P800)

P800보일러는 Fig. 1에서와 같이 압력용기 내의 증상에 위치하고 있으며 같은 용량에서 보일러 크기를 감소시키기 위해 보일러 3개가 조합된 육각형의 단면을 가지고 있다. 압력용기는 보일러 이외에 연료노즐, 기동용 버너, 충물질 저장용기, 사이클론 등을 포함하고 있다.

보일러의 연소영역은 층과 프리보드로 구분되며 각기 4.2m, 7m의 높이를 가진다. 층에는 증기터빈의 에너지원인 증기를 생산하기 위하여 2단의 과열기와 재열기를 가지고 있다. 연료(석탄+석회석+물)를 유동화하기 위한 연소용 공기는 저압 및 고압압축기에서 약 16bar로 압축되어 압력용기 내부를 거쳐 보일러 하부에 위치한 분배기를 통해 보일러로 공급된다.

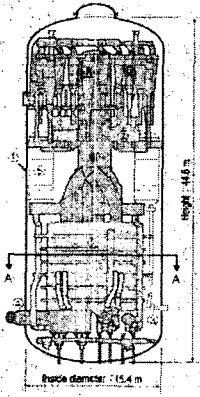


Fig. 1 PFBC Boiler

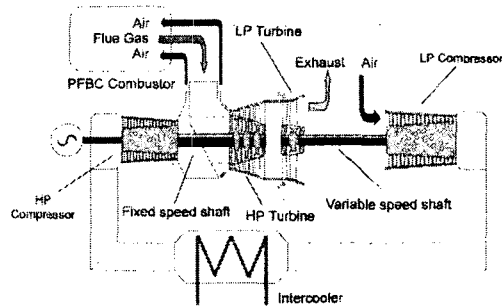


Fig. 2 PFBC Gas Turbine

2-2-2. PFBC 가스터빈(GT140P)

PFBC용 가스터빈은 Fig. 2에서 좌측의 고압부에 해당되고 정속 운전되는 가스터빈, 우측의 저압부에 해당되고 변속 운전되는 터보차지, 그리고 인터쿨러로 구성된다.

전부하에서 저압 축은 최대 속력으로 운전하고 저압 압축기는 이 속력과 대기조건에 해당하는 공기유량을 인터쿨러를 거쳐 고압 압축기로 전달한다. 고압 압축기는 일정한 속력으로 운전되므로 정해진 체적용량을 갖는다. 이는 전달된 질량 유량의 밀도가 이 체적 용량과 일치할 때까지 인입 압력을 증가시킨다.

고압터빈 인입 압력은 기본적으로 입구 안내익의 체적용량에 의해 정해진다. 이 인입 압력이 연소가스 유량과 온도를 조정한다. 고압압축기 출구압력은 고압터빈 인입압력과 유동층 연소기에서의 압력손실의 합과 같다. 저압터빈은 변동 안내익을 갖는 1단 설계로 되어 있다. 저압터빈 인입 압력은 변동 안내익의 체적용량에 의해 정해지며, 이 인입 압력이 연소가스 유량과 온도를 조정한다. 저압터빈 용량은 변동 안내익의 차단각을 줄임에 의해서 증가되고, 이로 인해 원주속도는 감소한다. 이는 인입 압력을 감소시키고 저압터빈에서의 팽창량을 감소시키며 그러므로 저압 압축기의 동력 소모가 감소된다. 새롭게 변화된 저압터빈 출력에 해당되도록 질량유량과 압력비가 맞추어 질 때까지 저압압축기 속력은 감소한다. 감소된 질량유량이 체적용량에 필적할 때까지 고압 압축기 인입 압력을 하강시킨다. 유동층으로부터 감소된 온도로 인하여 고압터빈 인입 압력이 하강되고 그로인해 고압 압축기 출구압력 또한 감소된다. 이와 같은 방법으로 부분부하 운전조건이 설정된다.

인터쿨러는 저압압축기와 고압압축기 사이의 공기덕트에 위치하며 약 1400개의 핀튜브로 구성된다. 고압압축기 입구온도를 조절하여 보일러로 공급되는 공기온도를 300℃로 유지하기 위해 설치된다.

2-3. PFBC 시스템 연계

PFBC 공정은 하나의 복합발전 사이클이다. Fig. 3에서와 같이 가스와 증기 사이클이 유동층 보일러와 급수가열기, 절탄기 등의 열교환기와 연계된다.

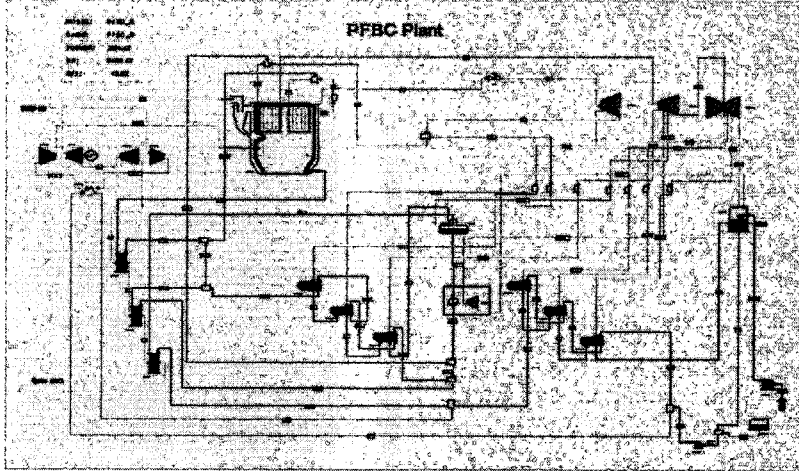


Fig. 3 Model Diagram for PFBC Power Plant Using P800 and GT140P

인터쿨러는 저압 급수가열기와 병렬로 연결되어 급수를 가열하므로 저압 증기터빈 추기의 양을 감소시킨다. 그리고 최종단 절탄기를 사용하여 저압 증기터빈 추기의 양을 더 낮출 수 있다. 나머지 2기의 절탄기는 고압측 급수가열기와 연결되고, 여기서 이들은 고압 증기터빈 추기의 양을 감소시킨다. 증기터빈 추기의 감소는 증기터빈에서 발생하는 전력을 증가시킨다. 완전히 통합된 복합사이클의 효율은 다음과 같이 표현된다.

$$\eta_{CC} = \frac{P_{ST} + P_{GT}}{Q_B} \quad (1)$$

가압유동층 보일러 입열량은 증기 생산과 고온 연소가스 생산이라는 두 가지 목적을 위해 사용된다.

$$Q_B = Q_S + Q_G \quad (2)$$

단순 사이클 증기터빈 효율이 η_{ST} 라면, 유동층 내에서 증기사이클로 전달된 열로부터 발생된 증기터빈 출력은:

$$P_{ST1} = Q_S \times \eta_{ST} \quad (3)$$

그리고 가스터빈 출력은:

$$P_{GT} = Q_G \times \eta_{GT} \quad (4)$$

급수가열기 추기량 절감으로 인한 추가적인 증기터빈 출력의 발생분은:

$$P_{ST2} = \gamma_{ECO1} \Delta Q_{ECO1} + \gamma_{ECO2} \Delta Q_{ECO2} + \gamma_{ECO3} \Delta Q_{ECO3} + \gamma_{IC} \Delta Q_{IC} \quad (5)$$

여기서 열이용계수(γ)는 다음과 같이 정의된다:

$$\gamma_0 = \frac{\Delta P_{ST}}{\Delta Q_0} \quad (6)$$

이러한 정의에 의해서 복합사이클 효율은 다음과 같이 표현된다.

$$\eta_{CC} = \frac{Q_S}{Q_B} \times \eta_{ST} + \frac{Q_G}{Q_B} \times \frac{P_{GT} + \sum \gamma_0 \Delta Q_0}{Q_G} \quad (7)$$

식(7)에 식(8)의 가스터빈 효율을 대입하면

$$Q_G = \frac{P_{GT}}{\eta_{GT}} \quad (8)$$

복합발전 효율은 식(9)와 같이 정의된다.

$$\eta_{CC} = \frac{Q_S}{Q_B} \times \eta_{ST} + \frac{Q_G}{Q_B} \times \eta_{GT} \times \left(1 + \frac{\sum \gamma_0 \Delta Q_0}{P_{GT}} \right) \quad (9)$$

일반적으로 850℃의 보일러 연소가스 출구온도를 갖는 가압유동층 보일러에서의 Q_G/Q_B 의 값은 0.20~0.30이다. 실제의 경우, 가스터빈 효율 η_{GT} 은 항상 증기사이클 효율 η_{ST} 보다 작다.

3. 결과 및 고찰

시뮬레이션을 위한 대기조건은 ISO 조건(15℃, 상대습도 60%, 1.01325 bar)을 기준으로 정하였으며, 설계탄으로는 호주의 드레이톤(Drayton Coal)을 사용하였다. 또한 주요 구성기 기인 유동층 보일러와 가스터빈은 Alstom Power사에서 기술개발하고 현재 일본에서 상업용으로 사용되고 있는 P800 보일러와 GT140P 가스터빈을 모델에 적용하였다.

100% 운전부하조건에서 시뮬레이션을 수행한 결과, 총 출력은 372.6MW(net)를 생산한다. 이중 증기터빈의 출력이 297.8MW(net), 가스터빈 출력이 74.8MW(net)를 각기 분담한다. 시스템 전체 효율은 41.2%(HHV 기준)로 일본의 300MW급 Karita PFBC 플랜트의 효율과 유사한 경향을 보인다.

가스 흐름을 살펴보면, 1.013bar, 15℃ 대기조건에서 356.1 kg/sec의 공기를 흡입하여 저압 압축기, 인터쿨러, 고압압축기를 거치면서 압력 16.65bar, 온도 300℃로 상승되어 PFBC 보일러의 연소용공기로 주입된다. 보일러 내에서 연료와 연소된 가스는 16.47bar, 850℃의 고온고압상태로 고압가스터빈에서 팽창하여 74.8MW의 출력을 생산하고 에너지가 감소된 2.7bar, 514.3℃의 저준위 에너지 배기가스는 저압가스터빈을 구동하여 이와 같은 축에 연결된 저압압축기의 동력원으로 전량 이용된다. 전체 시스템 효율을 상승시키기 위하여 3개의 절단기에서 배기가스의 잔열을 충분히 회수할 수 있도록 구성하였으며 최종 배기가스 상태는 1.103bar, 138.6℃의 조건에서 연돌로 배출된다.

급수 및 증기 흐름은, 유량 238.7 kg/sec, 온도 306.09℃, 압력 267.83bar의 급수가 PFBC 보일러의 수냉벽과 과열기를 거쳐 241.24bar, 566℃의 과열증기가 되어 고압증기터빈을 구동하고, 팽창된 증기의 일부는 다시 재열되어 48bar, 593℃의 과열증기가 되어 중압 및 저압증기터빈을 구동하여 3297.8 MW의 출력을 생산한다. 보일러급수펌프(BFP)는 터빈구동으로 구성하였으며 이의 구동원은 중압 증기터빈 추기를 이용하였다. 보일러급수펌프에서 소요되는 에너지는 8.694MW이다. 급수가열을 위해 저압급수가열기 3단, 탈기, 고압급수가열기 3단으로 구성하였으며 이들의 열원으로는 고압증기터빈에서 1단추기, 중압증기터빈에서 2단추기, 저압증기터빈에서 3단추기를 이용하였다.

4. 결 론

기존 석탄화력발전의 기술적 한계(저효율, 환경특성 저하 등)를 극복하고 환경규제 강화 등 미래의 여건변화에 효과적으로 대응하기 위해 청정석탄발전(CCT)을 응용한 신기술 발전 방식으로서의 기술전환 필요성이 요구되고 있다. 이에 따라 정부는 제1차 전력수급기본계획(2002.08)에 청정석탄발전소 건설계획(CCT 1호기, 300MW급, 2009년 준공)을 반영하게 되었다. CCT의 후반기술의 하나인 가압유동층 복합발전(PFBC) 기술의 국내도입에 대비하여 기술의 철저한 이해와 심도있는 평가를 수행할 수 있도록 PFBC 성능을 해석할 수 있는 모델을 개발하였다. 설계조건에서의 시뮬레이션 결과, 실제 가동되고 있는 PFBC 플랜트 데이터와의 상세한 비교는 수행할 수 없었으나 주요 성능결과값은 매우 유사한 경향을 보였다.

5. 참고문헌

1. Cuenca, M.A. and Anthony, E.J., 1995, "Pressurized Fluidized Bed Combustion", BLACKIE ACADEMIC & PROFESSIONAL.
2. Bejan, A. and others, 1996, "Thermal Design & Optimization", JOHN WILEY & SONS, INC.
3. "Karita PFBC Brochure", 2001, Kyushu Electric Power Co., Inc.
4. Suga, N. and others, 1998, "Operation Experience of First Commercial PFBC Plant in Japan and its Future Application", POWER-GEN, Europe '98, June 9-11, Milan, Italy.
5. Huang, Y. and McMullan, J.T., Williams, B.C., 2000, "Influences of coal type on the performance of a pressurized fluidized bed combustion power plant", FUEL, Vol 79, pp. 1595-1601.
6. Erbes, M.R. and Gay, R.R., 1989, "GATE/CYCLE Predictions of the Off-Design Performance of Combined-Cycle Power Plants", Simulation of Thermal Energy Systems, ASME AES-Vol.6/HTD-Vol.124, pp. 43-51.
7. Palmer, C.A. and Hakim, T., 1996, "Merging Diverse Vendor Data in a Combined-Cycle Plant Acceptance Test", Power-Gen International, USA.
GateCycle User Guide, GE Enter Software.
8. Palmer, C.A. and Erbes, M.R., 1994, "Simulation Methods used to Analyze the Performance of the GE PG6541B Gas Turbine Utilizing Low Heating Value Fuels", ASME COGEN-TURBO, October 25-27, Portland, Oregon.
9. Korakianitis, T. and Svensson, K. 1999, "Off-Design Performance of Various Gas Turbine Cycle and Shaft Configurations", ASME, Vol. 121, pp. 649-655.
10. Palmer, C.A. and Pecht, P.A., 1993, "GateCycle Performance Analysis of the LM2500 Gas Turbine Utilizing Low Heating Value Fuels, ASME COGEN-TURBO, IGTI-Vol.8.
11. Cui, Y. and John, F.S., 2001, "A mathematical model of in-bed char combustion of Australian coals in PFBC", FUEL, Vol 80, pp. 2049-2056.
12. Alvarez, E and Gonzalez, J.F., 1998, "Combustion of Spanish coals under simulated

- pressurized-fluidized-bed-combustion conditions", *FUEL*, Vol 78, pp 335-340.
13. Lin, S.Y. and others, 2000, "Pressure effect on char combustion in different rate-control zones: initial rate expression", *Chemical Engineering Science*, Vol 55, pp 43-50.
 14. Romeo, L.M. and Cortes, C, 1998, "Simulation of a full-scale pressurized fluidized bed combustor by using semi-empirical pilot plant correlations", *Rev. Gen. Therm.*, Vol 37, pp 862-873.
 15. Kulasekaran, S. and others, 1999, "Mathematical modeling of fluidized bed combustion: 3. Simultaneous combustion of char and combustible gases, *FUEL*, Vol 78, pp 403-417