

교육훈련용 IGCC(Integrated Gasification Combined Cycle) 플랜트 시뮬레이터 개발

김미영*, 주용진, 최인규
한국전력공사 전력연구원
(Elysium003@kepc.co.kr*)

Training Simulator Development for IGCC(Intergrated Gasification Combined Cycle) plant

Kim, Mi-yeong*, Joo, Yong-jin, Choi, In-kyu
Korea Electric Power Corporation Research Institute
(Elysium003@kepc.co.kr*)

서론

지난 30년동안 탄화수소화합물을 다루는 산업에서 가장 재산 손실을 낸 170건의 산업사고 중 28%가 운전원의 조작 실수 혹은 공정 외란에 의해 원인이 됐다. 이처럼 플랜트 운전 중에 있어 운전원의 조작 실수나 공정 외란에 대한 대처는 플랜트 가동률에 큰 영향을 미친다. 이러한 운전원이 조작 실수를 줄이고, 공정 외란에 대해 대처 운전 능력을 높이기 위해 산업 전반에 걸쳐 시뮬레이터를 활용한다. 시뮬레이터란 실제 플랜트와 동일한 환경을 제공하는 가상 플랜트로, 정상적인 운전 환경뿐만 아니라 플랜트 기동/ 정지를 포함한 비정상적인 비상 운전 환경을 재현하는 도구로서, 운전원의 교육용으로 이용하고 있다. 본 논문에서는 본 시뮬레이터는 향후 한국에 도입될 IGCC 플랜트에 적용하기 위해 상용급 IGCC(Integrated Gasification Combined Cycle) 플랜트에 대해 교육 훈련용 시뮬레이터를 개발하고, 단한 계 조건 하의 외란에 대한 공정특성분석을 수행하고자 하였다.

본론

1. IGCC

석탄가스화복합발전플랜트(IGCC : Integrated Gasification Combined Cycle)는 석탄을 가스화하여 합성가스를 생산하고 복합발전 방식으로 전기를 생산하는 플랜트이다. 석탄을 합성가스로 전환한다는 점에서 완전 연소를 통해 발전하는 방식의 일반적인 미분탄 화력발전플랜트와 차이를 보이며, 합성가스를 생산하는 석탄가스화 공정은 발전의 용도 뿐만 아니라 화학제품을 생산하는 용도로도 이용되고 있다. IGCC 플랜트의 구성은 그림 1과 같다. 석탄이 미분되어 가스화기를 거쳐 이 석탄 가스화 공정, 가스 정제공정, 산소공급장치 및 복합발전공정으로 구성되었다. 석탄이 미분되고 가압되어 산소, 증기와 함께 가스화기로 공급된다. 가스화기는 약 1500℃에서 운전하여 CO, H₂를 주성분으로 하는 합성가스를 생산한다. 본 시뮬레이터 모델에 적용된 가스화기는 Shell사의 건식 분류층 1단 가스화기로 탄소전환율이 99.5%을 가진다. 가스화기는 부산생산된 합성가스는 냉각기를 거쳐 증기를 생산하면서 냉각된다. 냉각된 합성가스는 전기 생산을 위한 가스터빈에 연료로 공급되고, 일부는 가스화기로 재순환되어 합성가스를 1차적으로 급냉시키기 위해 이용되는데, 공급하기 전 불순물을 제거해야 한다. 불순물을 제거하기 위해 합성가스는 집진설비 및 습식 세정을 거치고, 산성가스를 제거 후 가스터빈에 공급된다. 냉각기를 통해 생산된 증기는 배열회수보일러를 거쳐 증기터빈에 공급되어 전기를 생산한다. 된다. 공정의 부산물은 슬래그, 비회, H₂S 등이 있다. 슬래그는 가스화기가 합성가스를 생산하면서 석탄의 회분이 용융되면서 생성되는 물질로 가스화기 하부로 배출시킨다. 비회 역시 석탄의 회분으로 밀도에 따라 비교적 무거운 회분은 슬래그로 용융되고, 가벼운 비회는 합성가스 내 섞여 배출된다. 비회는 냉각기를 거친 후 집진설비를 통해 걸러진다. 합성가스 내 H₂S는 가스정제 공정에서 제거되어 황회수설비를 통해 고체 황으로 배출된다.

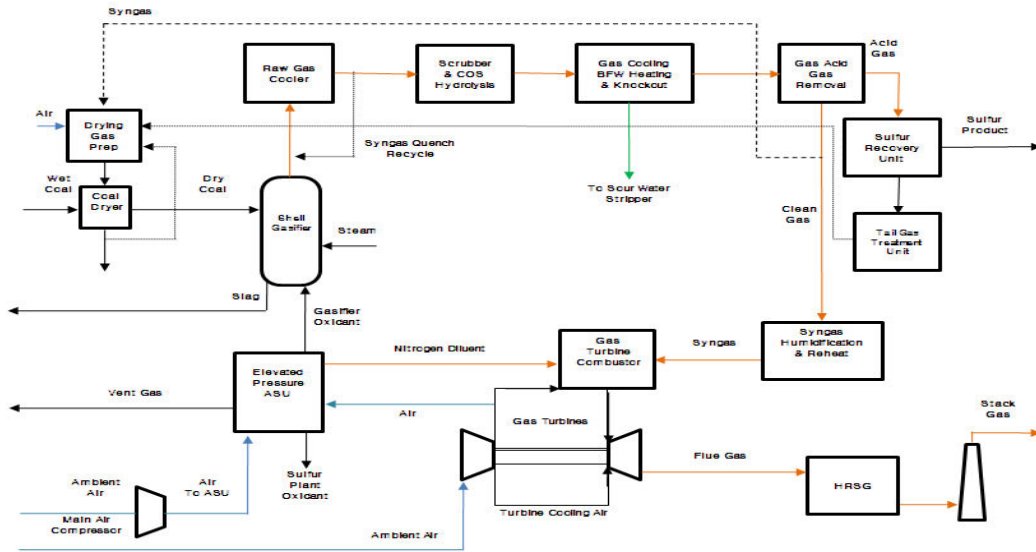


그림 1. IGCC Plant Diagram.

2. 시뮬레이터 구성

시뮬레이터는 제어로직을 포함한 공정모델과 운전화면으로 구성한다. 공정모델은 시뮬레이터에서 가장 핵심이 되는 부분으로, 가상 플랜트를 재현한다. 공정모델은 플랜트 운전이 가능하도록 공정설계 틀을 사용하여 장치 및 제어기, 제어로직으로 동적 모델을 구축한다. 실제 운전환경과 동일하게 구성하기 위해 실제 플랜트에 이용되는 DCS(Distributed Control System)를 사용해 제어로직으로 사용하기도 하나, 본 시뮬레이터에서는 공정모델에서 제어로직을 구성하였다. 본 시뮬레이터에서는 IGCC 플랜트의 동적모델을 모사하기 위해서 DYNASIM™ 틀을 사용하여 그림 2와 같이 모델링하였으며, 비상 상황을 재현하기 위해 40여개의 Malfunction을 적용하였다. 또한 공정 상 심각한 문제가 발생하였을 때, 비상정지되도록 Interlock을 설계하였다. 그림 2는 IGCC 플랜트 중 가장 대표적인 설비인 가스화기에 대한 PFD(Process Flow Diagram)이다. 플랜트 기동을 모사하기 위해 점화버너, 기동버너, 석탄버너에 대해 모사되어 있다. 가스화기는 가스화반응과 열전달을 모사하기 위해 계산하기 위해 Plug Flow 반응기를 선택하였다.

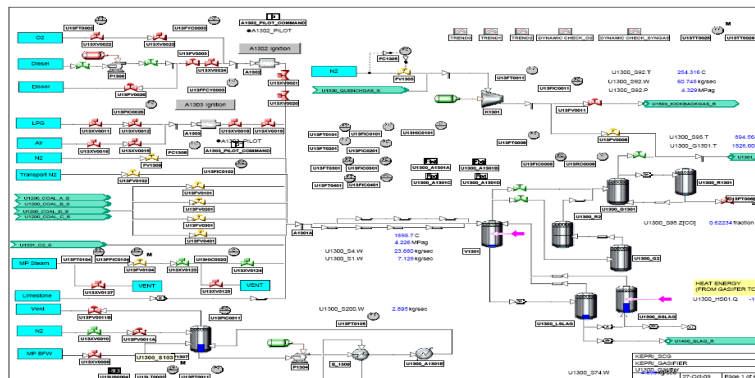


그림 2. PFD of Gasifier.

시뮬레이터에서 사용된 반응식 및 반응기, 반응상수는 표 1에 표기하였다.

표 1. Gasification Reaction

Reaction	Kinetics Or Parameter
(1) Coal + O2 → CO + O2	Coal Conversion : 1
(2) CO + 0.5O2 → CO2	CO Conversion : 1
(3) CO + H2O ↔ CO2 + H2	$K_{WGS} = \frac{[CO_2][H_2]}{[CO][H_2O]} = \exp(-3.689 + \frac{4019}{T})$
(4) CO + 3H2 ↔ CH4 + H2O <i>r_F</i> 는 정반응속도, <i>r_R</i> 은 역반응속도	$r_F = k_F e^{\frac{-E_F}{RT}} C_{CO} (C_{H_2})^3$ $r_R = k_R e^{\frac{-E_R}{RT}} C_{CH_4} C_{H_2O}$ <i>k_F</i> : 312(m ⁹ kmol ⁻³ s ⁻¹) <i>k_R</i> : 6.09×1014(m ³ kmol ⁻¹ s ⁻¹) <i>E_F</i> : 30,000(kJ/kmol) <i>E_R</i> : 257,000(kJ/kmol)

본 시뮬레이터에서는 출력 추종에 대한 3가지 운전 방식을 구성하였다. 플랜트의 최종 생산물인 전기 출력을 제어하기 위해 출력을 추종하는 3가지 운전 방식인 가스화기 추종 모드, 가스터빈 추종모드, 협조추종모드를 가진다. 가스화기 추종모드는 설정 출력 값과 실제 출력 값이 오차가 있을 때, 실제 출력 값이 설정 출력 값이 되도록 가스화기의 부하를 조정한다. 가스화기 추종모드는 출력에 대해 비교적 느리게 추종하여 플랜트의 안정적인 운전을 할 수 있다. 가스터빈 추종모드는 실제 출력 값이 설정 출력 값이 되도록 가스터빈의 부하를 조정하는데, 출력에 대해 빠르게 추종하여 신속한 운전을 할 수 있다. 협조추종모드는 실제 출력 값이 설정 출력 값이 되도록 가스화기와 가스터빈의 부하를 함께 조정하도록 하여, 상기 두 가지 추종모드의 절충되는 추종모드이다.

시뮬레이터의 운전화면은 운전자가 제어를 조작하여 운전할 수 있도록 HMI(Human-Machine Interface)를 구성하는 것이다. HMI는 공정모델의 제어를 조작하기 위해 운전자가 쉽게 인지하여 운전할 수 있도록 공정모델과 운전자를 연결해주는 화면장치이다. 본 시뮬레이터는 Intouch 툴을 사용하였으며, 구성된 운전화면은 그림 3와 같다. 운전화면에서는 제어기 조작 화면 이외에 공정 알람 및 장치 Trip 상태, 주요 공정변수와 성능에 대해 그래프 및 수치 모니터링 기능을 제공한다.

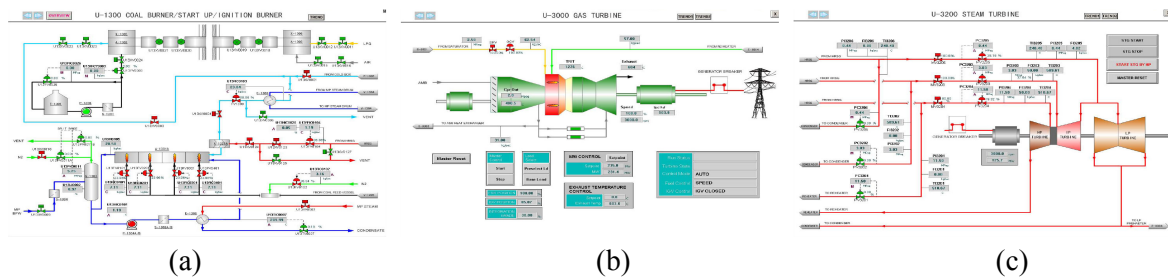


그림 3. HMI (a)Gasifier (b)Gas turbine (c)Steam turbine.

3. 공정특성시험 결과

본 시뮬레이터를 이용하여 IGCC 플랜트의 공정특성을 시험하기 위해 닫힌 계(Closed loop)조건 하에 외란 시험을 수행하였다. 외란은 가스화기에 공급되는 산소 유량의 ±1% 변화이다. 산소는 IGCC 플랜트에서 전체 공정에 영향을 줄 수 있는 가장 핵심적인 공정 변수로써, 산소 유량 변화가 전체 공정에 대해 어떠한 변화를 주는지 분석하고, 외란에 대한 운전 대책을 확보할 수 있다. 정상 운전 조건에서 1분 경과 후 산소 공급 밸브의 개도를 계단 변화를 주어 산소의 유량을 ±1% 변화시켰다. 점선은 증가를 나타내고 고딕선은 감소를 나타내고 있다. 시험 결과, 외란에 대한 IGCC의 동특성은 1분 이내로 매우 빨랐다. 그림 4.는 산소 유량 1%를 계단 변화하기 위해 산소 유량 밸브의 개도를 변화시키고, 그에 대한 산소 유량의 변화에 대한 결과이다. 그림 5.는 산소 유량변화에 대해서 가

스화기 온도와 가스터빈 출력 및 증기터빈 출력에 대한 결과를 나타내었다. 산소 유량이 감소하면, 가스화기 온도는 1분 10초 지점에서 감소하기 시작하여 10분 지점에서 정상상태가 되었다. 산소유량이 증가하면, 가스화기 온도는 증가하며, 반응초기 시점은 감소시점과 비슷하나 안정되는 시간은 감소시점보다 빨랐다. 또한 가스터빈과 증기터빈의 출력은 산소 유량의 작은 증감에 크게 변화하지 않았다.

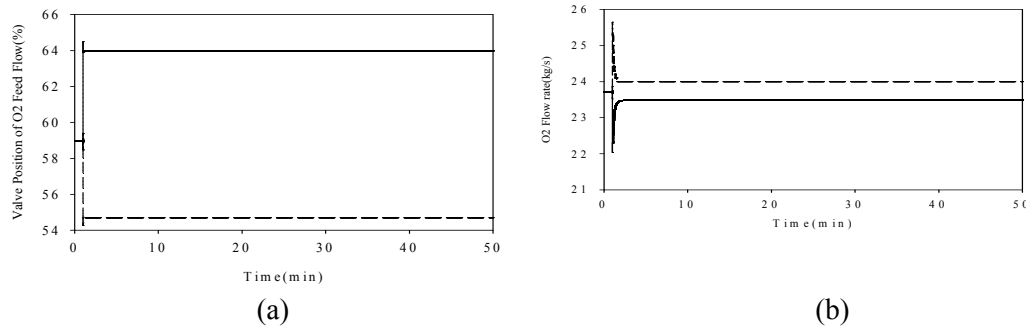


그림 4. 산소 유량변화 (a)산소 공급 유량 밸브 개도 변화 (b)산소 공급 유량 변화.

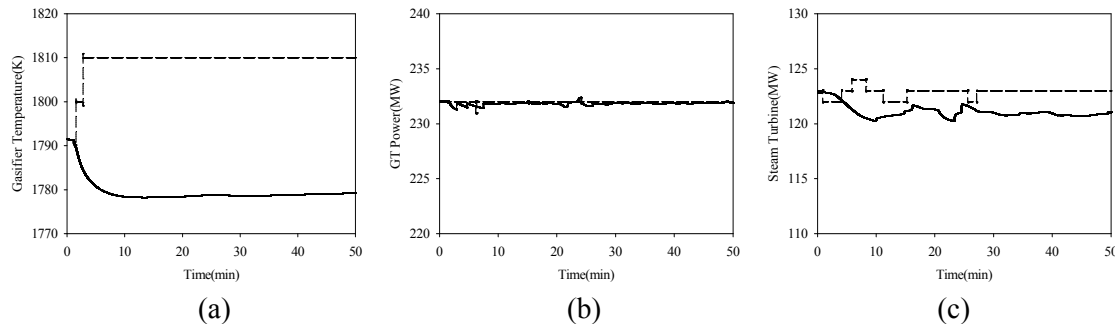


그림 5. 공정변수결과 (a)가스화기 온도 변화 (b)가스터빈 출력변화 (c)증기터빈 출력변화.

결론

본 논문에서는 현재 한국에 도입 예정의 신규 발전방식인 IGCC 플랜트의 교육훈련용 시뮬레이터를 개발하였다. 개발된 시뮬레이터는 DYN-SIM™ 툴을 이용하여 모사된 공정모델과 운전자와 공정모델을 소통시켜주는 역할의 운전화면으로 구성하였다. 공정모델은 동적모사형태이며, 제어로직을 포함한다. 본 시뮬레이터는 IGCC 플랜트의 출력에 추종하도록 3가지 운전 방식의 대표적인 제어로직이 있다. 3가지 운전방식은 추종속도와 공정 안정성에 따라 가스화기 추종모드, 가스터빈 추종모드, 협조 추종모드로 구별된다. 또한 개발된 시뮬레이터를 이용해 외란에 대한 공정특성분석을 수행하였다. 개발된 시뮬레이터는 향후 IGCC 플랜트의 운전원 훈련 뿐만 아니라 제어로직 개선 및 공정특성분석에 이용될 수 있다.

참고문헌

1. Patric J. Robinson, William L. Luyben, "Simple Dynamic Gasifier Model That Runs in Aspen Dynamics", Ind. Eng. Chem. Res., Vol. 47(2008), pp. 7784-7792
2. Peter Scho-en, "Dynamic Modeling and Control of Integrated Coal Gasification Combined Cycle Units", Doctor Thesis, Delft Univ., pp.9-13(1993).
3. F.Emun, M. Gadalla, T.Majozi, D.Boer, "Integrated gasification combined cycle(IGCC) process simulation and optimization", Computers and Chemical Engineering, Vol.34(2010), pp. 331-338.