

수학적 모델링 방법에 기초한 복합발전 공정의 정상상태 모사시스템 개발

김신혁 · 이시황 · 주용진* · 이상욱** · 손병모** · 오 민†

한밭대학교 화학생명공학과
34158 대전시 유성구 동서대로 125
*한국전력공사 전력연구원
34056 대전시 유성구 문지로 105
**GS 건설 발전설계 Proposal 팀
03159 서울시 종로구 종로 33 그랑서울
(2015년 1월 7일 접수, 2015년 1월 27일 수정본 접수, 2015년 2월 3일 채택)

Process Modeling System of a Combined Cycle Plant for Steady State Simulation with Model Based Approach

Shin Hyuk Kim, Lee Si Hwang, Yong Jin Joo*, Sang Uk Lee**, Byung Mo Shon** and Min Oh†

Hanbat National University, 125, Dongseo-daero, Yuseong-gu, Daejeon 34158, Korea

*KEPCO Research Institute, Moonji-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34056, Korea

**GS E & Corp, Jong-ro 33, Jongno-gu, Seoul 03159, Korea

Received 7 January 2015; Received in revised form 27 January 2015; accepted 3 February 2015)

요 약

복합발전 공정의 모델링 및 모사는 공정의 운전 및 설계 조건에 따른 공정변수의 변화를 정량적으로 예측하기 위한 중요한 접근방법이다. 본 연구에서는 현재 사용되는 복합발전공정의 정상상태 모사기의 단점을 보완하여, 사용자의 편의성과 개발자의 핵심기술 모델링을 가능하게 하는 공정 모델링 시스템을 개발하였다. 복합발전 공정의 주요 장치들을 분석하여 수학적 모델을 개발하였으며 이를 종합하여 모델라이브러리로 구성하였다. 또한 모사의 목적과 입수 가능한 자료에 따라 사용되는 모델의 상세도가 다르다는 점을 고려하여 주요장치에 대해 다른 상세도의 모델을 개발하였다. 복합발전 상업공정을 개발된 모델링 시스템을 사용하여 모델링과 모사를 수행하였으며 모사의 결과를 데이터자료와 비교 검증하였다. 검증의 모사결과와 자료데이터는 1% 내의 오차를 보였으며 개발된 모델링 시스템이 실제 공정에 응용될 수 있음을 보여주었다.

Abstract – Process modeling and simulation is a powerful methodology to quantitatively predict the change of process variables when operating and design conditions are changed. In this study, considering drawbacks of currently used process simulator for combined cycle plants, we developed process modeling system equipped with an ease of use and flexibility for model development. For this purpose, the analysis of combined cycle processes was carried out and consequently, mathematical models and libraries were developed. Furthermore, in view of the fact that the level of the abstraction of process models depends on the purpose of simulation as well as the available data, simple and rigorous models were also developed for some important units. In use of reference combined plant, we executed process simulation using the developed modeling system and the comparison was made between the results of simulation and the reference data. Less than 1% marginal error was identified and we concluded that the modeling system can be applied for commercial combined cycle processes.

Key words: Combined Cycle, Modeling System, Process Simulation, Two Level Approach, Model Library, gPROMS

†To whom correspondence should be addressed.

E-mail: minoh@hanbat.ac.kr

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서 론

가스터빈 복합발전은 가스터빈과 고온의 배열가스를 이용하여 생성된 증기로 전기를 생산하는 스팀터빈으로 구성된 전력생산 공정이다. 복합발전 공정은 가스터빈과 스팀터빈의 균형과 연소기에서 사용되는 산소, 질소의 주입량이 주요 운전 인자로 작용하며[1], 배열회수보일러(HRSG, Heat Recovery Steam Generator)의 내부 구조는 전체 에너지 효율에 관계된다[2,3]. 유입되는 조건의 변화에 따라 결정되는 공정의 조건과 생산되는 전력량을 계산하는 것은 매우 중요한 일이며 이를 위하여 각종 공정 모사기가 사용되고 있다[4].

복합발전의 모델링 및 정상 상태 모사를 위하여 GE사의 GateCycle [5], Aspen 사의 Aspen+[6], Schneider 사의 PRO/II[7] 등이 널리 사용된다. 이와 같은 소프트웨어는 수학적 모델 라이브러리를 아이콘의 형태로 제공하여 사용자가 쉽게 접근할 수 있으며 모델링 및 모사에 소요되는 시간을 크게 단축시킬 수 있다는 장점을 가지고 있다. 특히 GateCycle의 경우, 스팀터빈 발전, 가스터빈 발전 및 복합 발전 분야에 특화되어 사용되고 있는 소프트웨어로 각 구성요소들에 대한 기술적 자료를 라이브러리로 내장하고 있으며 자료의 범위와 전문성에서 매우 뛰어나다는 평가를 받고 있다. 그러나 이와 같은 소프트웨어는 제공되는 라이브러리와 구성 장치의 수학적 모델이 근본적으로 사용자가 접근할 수 없도록 설계되어 있다는 문제점을 가지고 있다. 위와 같은 소프트웨어를 사용하여 대상 발전 공정을 모사할 경우 사용된 수학적 모델의 상세 내용을 알 수 없으며, 따라서 사용된 모델의 적정성 및 정확도를 사용자가 모델링의 입장에서 판단할 수 있는 근거를 갖지 못하게 되며, 모사된 결과가 적절하지 않다고 판단되는 경우 사용자 입력 파라미터를 변화시켜 결과 값을 맞추게 된다. 또한 대상 공정이 라이브러리에서 제공되는 일반적인 경우와 차이가 있거나 새로운 파라미터의 영향을 모사하고자 할 때 수학적 모델에 접근할 수 없기 때문에 이에 대한 모사가 가능하지 않게 된다. 복합 발전의 모사를 수행하는 다른 방식으로는 gPROMS[8]나 Matlab[9] 등과 같이 방정식 기준(Equation-oriented) 모사기를 사용하는 것을 들 수 있다. 이와 같은 소프트웨어는 사용자에게 수학적 모델링을 수행할 수 있는 환경을 제공하여 GateCycle, PRO/II 등에서 발생하는 문제점을 해결할 수 있으나, 사용이 용이하지 않다는

단점을 가지고 있다. 수학적 모델링을 사용자가 직접 수행할 경우 대상 공정에 대한 물리, 화학적 특성에 대한 지식이 요구되며 기본적으로 라이브러리가 제공되지 않아 각 장치에 대한 코딩이 수반되어야 한다.

언급된 2가지 방식에 대한 고찰을 고려할 때 가장 이상적인 모델링 시스템은 GateCycle과 같이 기본 장치에 대한 라이브러리를 아이콘 형태로 제공하여 사용자의 편의성을 증진시키고 gPROMS와 같이 수학적 모델링이 가능한 형태라 할 수 있다. 본 연구에서는 gPROMS 소프트웨어를 기반으로 하여 복합발전의 기본 구성요소를 라이브러리로 제공하는 복합발전 전용 모델링 시스템을 개발하였다. 본 연구를 통해 개발된 모델링 시스템은 일반 사용자를 위한 아이콘 기반의 모델링 환경과 라이브러리의 수학적 모델 개발자를 위한 모델링 환경을 제공하여 편의성과 전문성을 동시에 얻을 수 있도록 하였다. 개발된 모델링 시스템을 문헌에 발표된 복합발전 공정[10]에 대해 적용하여 응용성과 정확도를 검증하였다.

2. 공정 모델링 시스템 개발

2-1. 시스템 개발의 기본 방향

복합발전공정의 모사를 위한 모델링 시스템을 구축하기 위하여 고려된 사항은 다음과 같다.

2-1-1. 사용자 및 개발자의 통합 환경(Two level approach)

일반 사용자의 경우 주사용 목적은 이미 개발된 라이브러리에서 제공된 수학적 모델 및 아이콘을 이용하여 공정 모델링 및 모사를 수행하는 것으로 사용의 용이성이 주요한 고려 사항이 된다(Fig. 1(a) 참조). 반면 개발자의 경우 대상공정의 물리/화학적 현상을 고려하여 수학적 모델을 개발하고(Fig. 1(b)) 일반 사용자가 편하게 사용할 수 있는 그래픽 사용자 인터페이스(GUI, Graphic User Interface)를 개발하는 것이 중요한 사항이 된다. gPROMS 소프트웨어를 기반으로 구축된 모델링 시스템에서는 사용자 및 개발자의 주요업무가 통합된 환경에서 이루어질 수 있도록 고려하여 설계되었다.

2-1-2. 핵심기술의 라이브러리 구축(Model library of core technology)

연구 과제의 수행 혹은 상업공정 프로젝트의 수행으로 얻어진 공

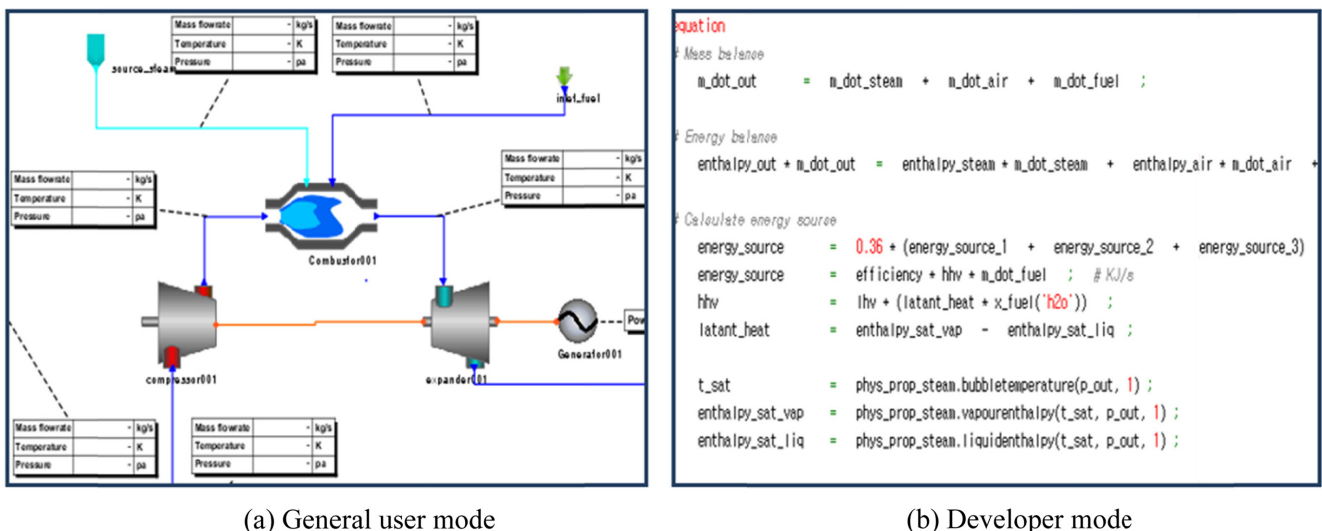


Fig. 1. Two level approach for the modeling system; (a) general user mode, (b) developer mode.

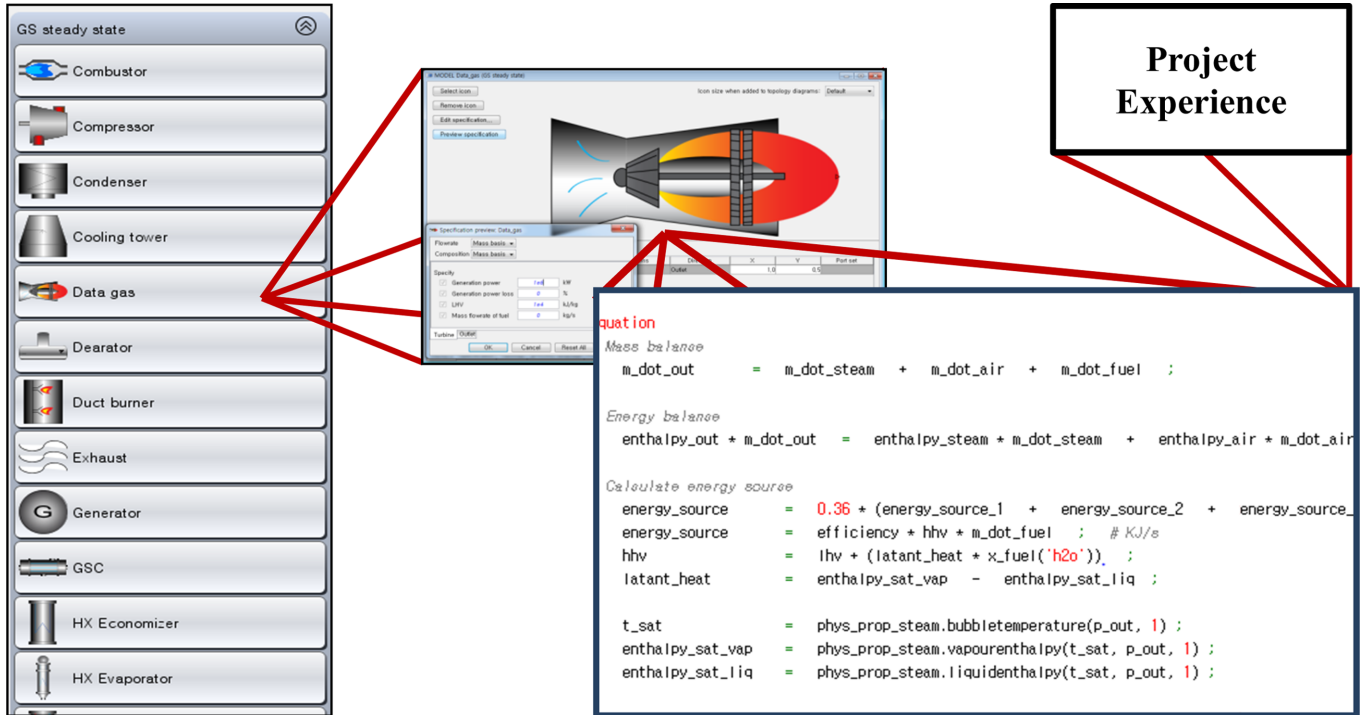


Fig. 2. Customization of core technology.

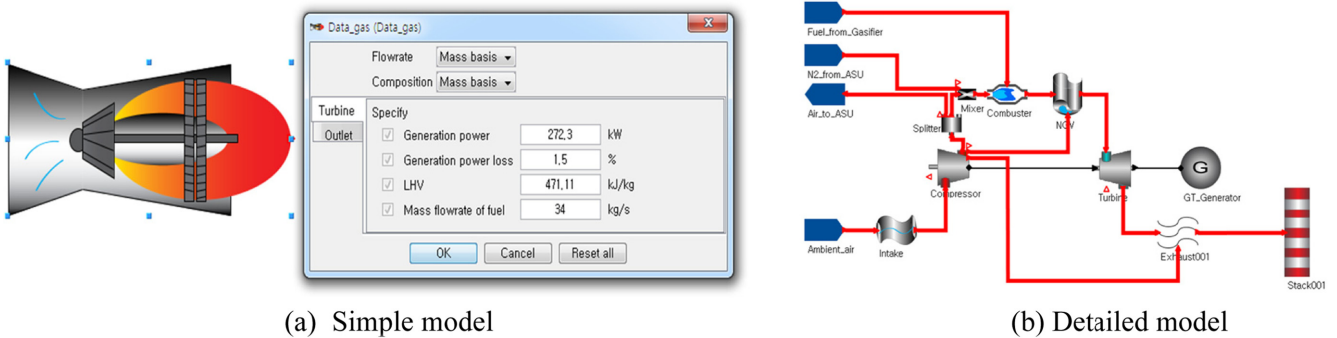


Fig. 3. Level of abstraction for process modeling; (a) simple model, (b) detailed model.

정에 대한 핵심기술은 개발자에 의해 수학적 모델의 형태로 만들어 지며 이를 종합하여 핵심기술 라이브러리를 구축한다. 이에 대한 과정은 Fig. 2에 나타난 바와 같다.

2-1-3. 모델상세도의 층위(Level of abstraction)

모사의 용도와 목적, 그리고 사용 가능한 자료의 유효성에 따라 모델의 상세도가 달라져야 한다. 예를 들어 가스터빈의 경우 압축기, 연소기, 팽창기 그리고 전기발전기로 구성되며, 더 상세한 계산을 위해서는 Intake, NGV(Nozzle Guide Vane), Exhaust 등의 세부장치 반영과, 터빈의 다단식 표현 등의 계산 기법을 반영할 수 있는 모델링이 이루어져야 한다. 모사 목적이 가스터빈의 상세 모사가 아닌 복합화력발전의 후단의 효율의 예측하는 것에 중점을 두고 있다면, 벤더로부터 입수한 가스터빈 배출가스 데이터를 직접 이용하여 후단의 계산을 진행할 수 있다.

2-2. 복합발전 공정의 분석

가스터빈과 스팀터빈을 결합한 복합발전기술은 열기관을 이용하는

발전기술 가운데 가장 높은 효율을 제공할 수 있는 기술로서 최신의 천연가스 복합발전소에는 60%의 열효율 달성이 가능한 것으로 알려져 있다. 이러한 복합발전의 장점을 활용하고자 하는 석탄이용 발전기술이 석탄가스화 복합발전(IGCC, Integrated Gasification Combined Cycle) 기술로서 청정석탄이용기술의 근간을 이루고 있다[11,12]. 복합발전 공정은 Fig. 4에 나타난 바와 같이 가스터빈, 스팀터빈, 배열회수보일러[13], 복수기의 4부분으로 구성되어 있다[14].

가스터빈은 압축기를 통해 공기를 압축하여 다양한 화석연료의 연소를 통해 가열한 후 터빈을 통해 팽창하여 전력을 생산하는 회전형 발전용 열기관으로 합성가스 혹은 천연가스를 연료로 사용한다 [15]. 가스터빈은 압축기, 연소기, 터빈, 팽창기 등으로 구성되어 있다. 연소 후 전기를 생산하고 나온 고온의 폐가스는 고온, 고압의 증기를 생산하기 위하여 배열회수보일러에 사용된다. 생산된 고온, 고압의 증기는 2-3단의 스팀 터빈에서 사용되어 전력을 생산하게 된다. 전력생산을 위해 사용된 증기는 압력과 온도가 낮아지게 되며 이를 다시 배열회수보일러에 사용하기 위해 복수기에 유입되며 냉각을 거쳐 액체상태의 물로 전환된다.

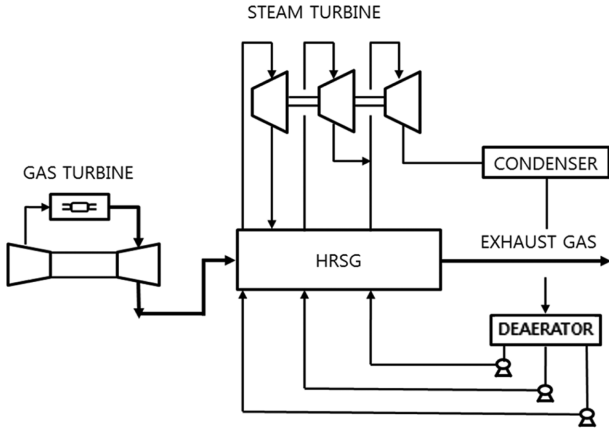


Fig. 4. Major components of a combined cycle process.

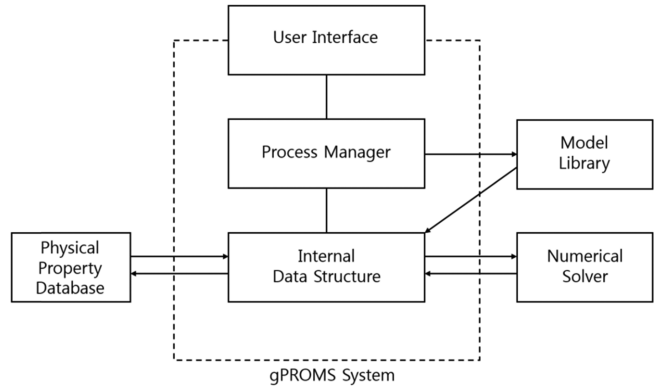


Fig. 5. Overview of the modeling system.

Table 1. Elementary objects for process modeling.

Model objects	Elementary model
Turbine object	Compressor
	Combustor
	Gas turbine, steam turbine
	Generator
	Exhaust
	Intake
HRSG object	Packing seal
	Economizer
	Evaporator
	Super heater
	Stack
Condenser object	Duct burner
	Condenser
	Tank
	Cooling tower
	Seal steam regulator
Miscellaneous object	Deaerator, pump, mixer, pipe, valve, splitter Controller, measurements, etc.

복합발전 공정의 분석에 기초하여 수학적 모델 라이브러리를 구성하기 위한 모델 오브젝트와 요소 모델을 나타내면 Table 1과 같다.

2-3. 공정 모델링 시스템의 구조

복합발전 모델링 시스템은 gPROMS 소프트웨어를 기반으로 하여 이루어져 있으며 주요 구성요소는 Fig. 5에 나타난 바와 같이 사용자 인터페이스, 물성 데이터 베이스, 수치해법, 수학적 모델 라이브러리로 구성되어 있다. 물성 데이터 베이스는 Infochem사의 Multiflash[16]와 표준 스템테이블을 사용하였다. 모델 라이브러리는 복합발전 공정에서 사용되는 요소장치(Table 1)에 대한 수학적 모델과 이에 대응되는 아이콘의 집합체로 본 연구를 통하여 개발된 가장 중요한 연구성과 중의 하나이다.

사용자 편의성을 위한 단위모델은 아이콘을 사용하여 아래 Fig. 6과 같이 구성하였다. 이를 통하여 기존 타 공정모사기들과 같은 드래그 앤 드롭(Drag and drop) 방식의 편한 업무환경을 제공하였으며, 3장에서 수행된 공정모사를 위의 환경을 사용하여 수행하였다.

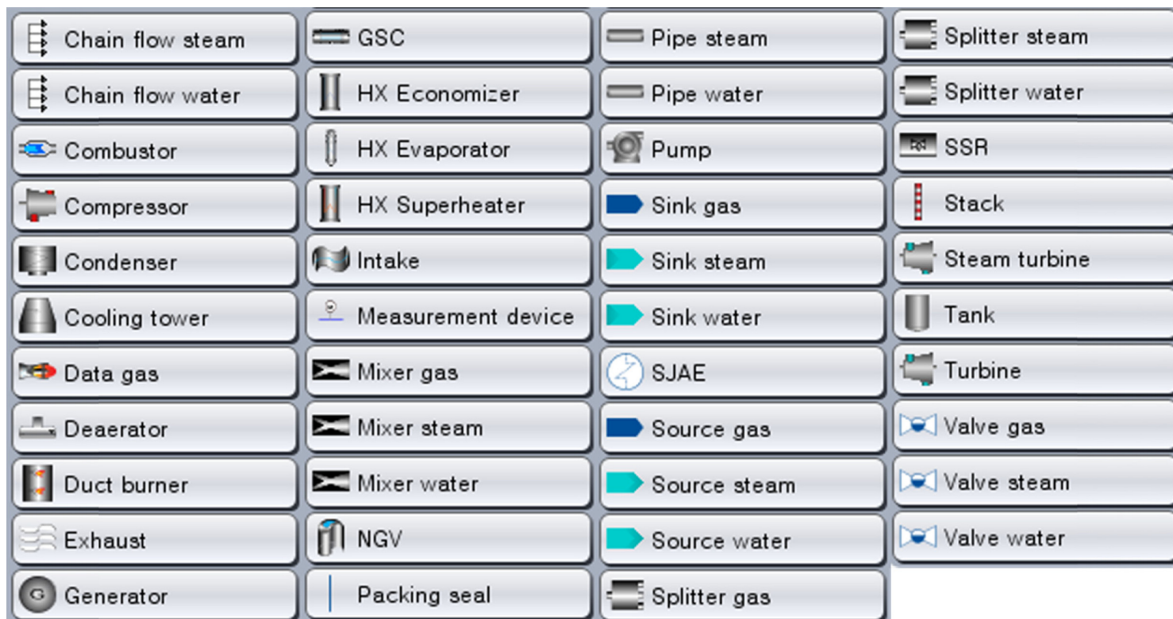


Fig. 6. Elementary icons in model library.

3. 복합발전 공정의 모사

개발된 모델링 시스템을 사용하여 복합발전공정의 정상상태 모사를 수행하였다. 모사를 위해 사용된 복합발전 공정은 400 MW의 용량을 가진 Shell 가스화기에 기초한 석탄가스화 복합발전 공정이다 [10]. 대상 공정은 272 MW의 전력을 생산하는 가스터빈과 188 MW의 전력을 생산하는 3개의 스팀터빈으로 구성되어 있다. 공정의 상세 구성은 Fig. 7에 나타내었다.

개발된 모델링 시스템을 사용하여 대상 공정의 공정도를 작성하면 Fig. 8과 같이 나타난다. 가스터빈으로 유입되는 원료gas는 석탄 가스화 복합발전 공정을 통하여 생성된 합성가스로서 주성분이 CO와 N₂로 구성되어있다. 압축기를 이용하여 압력을 상승시킨 공기에는 추가로 N₂를 보충하여 가스터빈의 출력효율을 증대시키고 있다. 가스터빈의 폐가스의 주성분은 N₂, O₂, H₂O등인 비극성 혼합기체로 모사과정에서 필요한 엔탈피, 열용량 등의 열역학적 물성치 계산은 Peng-Robinson[17] 방법을 사용하였다. 해당 EOS 아래 식 (1)과 같다.

$$\left[P + \frac{a_T}{V_M(V_M+b)+b(V_M-b)} \right] (V_M-b) = RT \quad (1)$$

사용된 매개변수 $b=0.07780 \frac{RT_c}{P_c}$, $a_c=0.45724 \frac{R^2 T_c^2}{P_c}$, $a_T = a_c \alpha$, $\alpha^2 = 1 + m \left(1 - T_r \right)$, $m = 0.37464 + 1.64226\omega - 0.26992\omega^2$ 으로 표현된다.

증기와 액상의 물에 대해서는 표준 스팀테이블[18]이 사용되었다. 배열회수보일러는 수직으로 세워진 스팀파이프를 이용해 열교환을 하는 다관형 열교환기를 사용하였으며[19], 생성된 증기는 고압(HP, High Pressure), 중압(IP, Intermediate Pressure), 저압(LP, Low Pressure)의 세 압력 부분으로 나누어 스팀터빈을 운전하여 발전을 시키는 형태이다.

물질 및 에너지 수지를 계산하기 위하여 Fig. 9와 같은 배열회수보일러의 핀치점 다이어그램(Pinch point diagram)을 사용하였다. Shell IGCC Plant[10]에 사용된 HRSG의 경우 참고자료를 토대로 나타낸 HP, IP, LP의 핀치점 온도차이가 각각 33.9 K, 17.3 K, 26.6 K 이었다[10]. 이를 이용하여 계산된 열 및 물질평형결과는 Table 2와 같다. 가스흐름의 경우(G1~G4) 질량 유속은 두 경우 모두 같은 조건으로 입력된다. 계산된 온도의 경우 최대 3.5 °C(G4 흐름) 가량의 오차를 나타내고 있다. 증기흐름의 경우에도(S1~S4) 동일한 질량 유속을 갖도록 입력 값을 사용하였으며, 온도의 경우 0.7 °C(S4 흐름), 압력의 경우 0.8 bar(S1 흐름)의 차이를 보이는 것으로 나타났다. 이와 같은 차이는 참조 공정의 모사 시 사용된 물성치 계산, 문헌에 나타나지 않은 입력변수의 차이 등에 의해 발생된 것으로 사료되며 모사의 정확도는 받아들일 수 있는 수준이라 할 수 있다.

Fig. 9와 Fig. 10에서는 가스터빈과 스팀터빈을 통하여 생성된 전력량과 소비전력을 나타내었다. 가스터빈 및 스팀터빈의 계산을 위한 각 터빈의 등 엔트로피 효율은 대상공정 참조자료에 나타나 있지

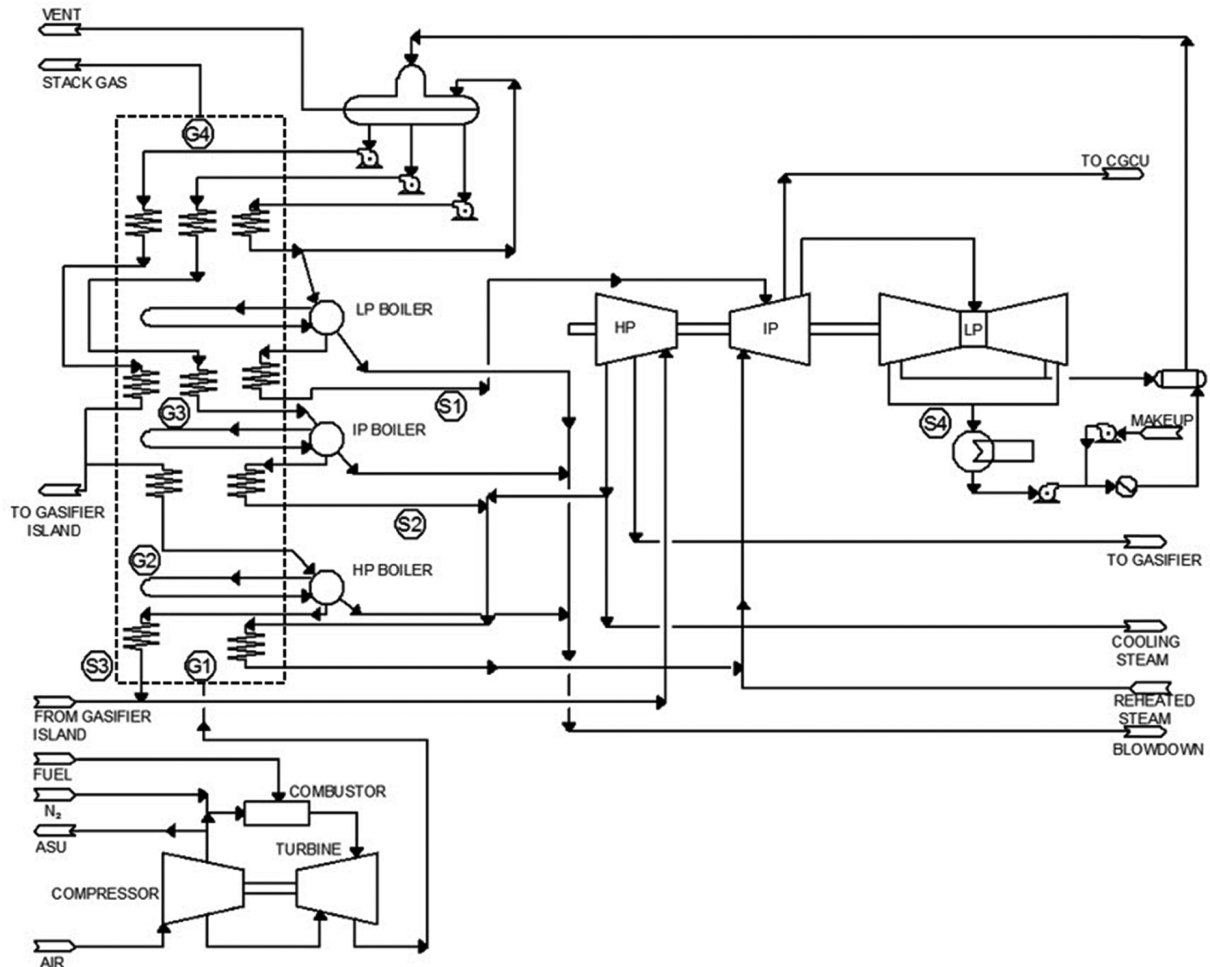


Fig. 7. Combined cycle process in Shell IGCC plant [10].

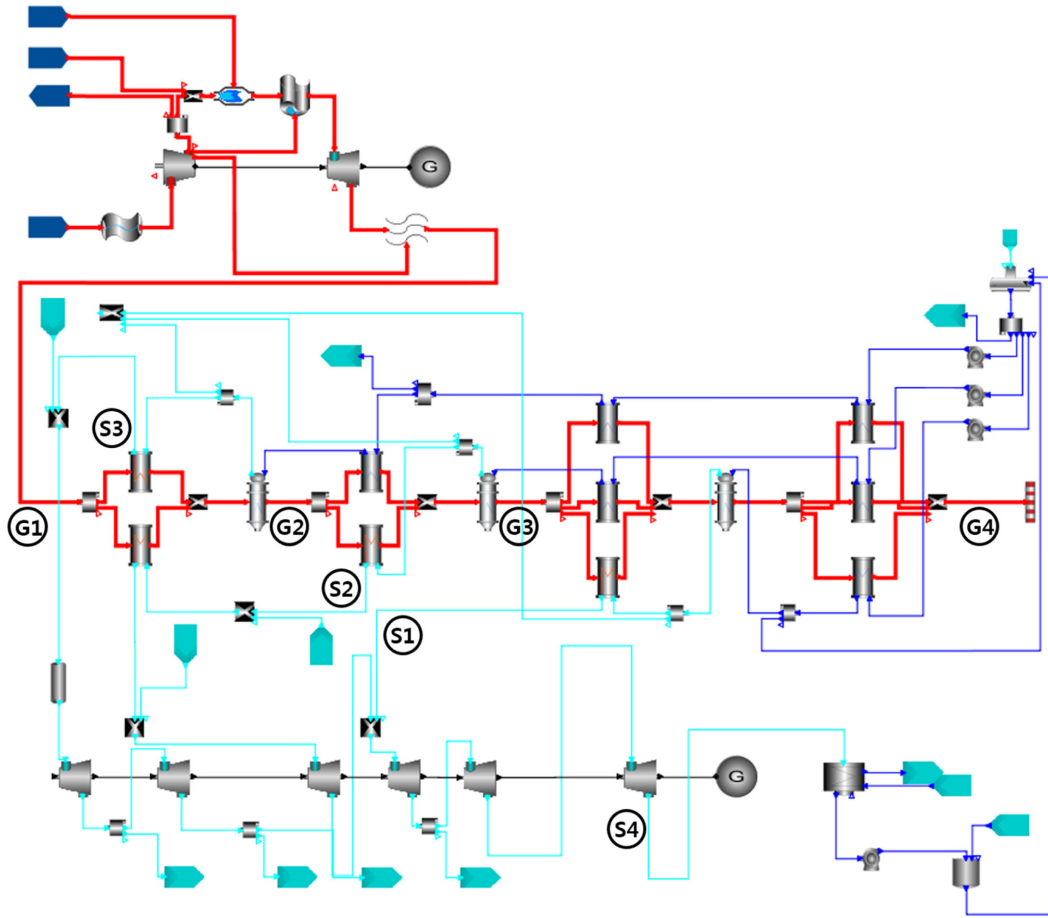


Fig. 8. Combined cycle process in the modeling system.

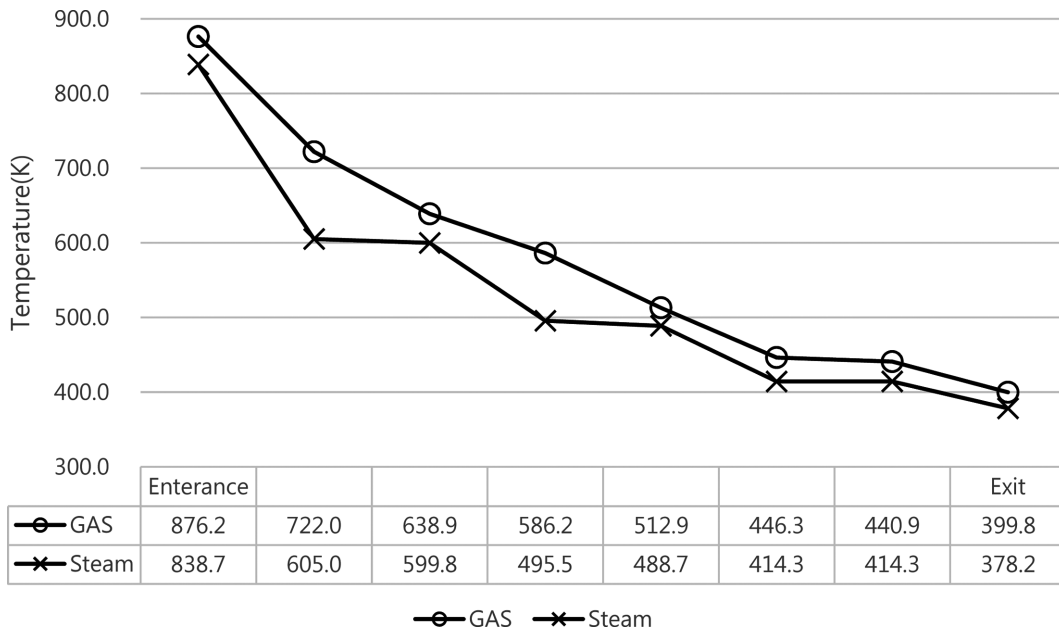


Fig. 9. Pinch point temperature diagram of HRSG.

않으며, 이에 따라 가스터빈과 스팀터빈에서 일반적으로 사용되는 값 0.88과 0.92를 각각 사용하였다. 가스터빈의 경우 총 생산되는 전력량은 참조자료의 경우 513.3 MW, 모사결과의 경우 515.047 MW로 나타났다. 압축기를 운전하기 위하여 사용되는 소비전력은 참조

자료의 경우 237.1 MW, 모사결과의 경우 238.903 MW이며 동일한 전력발전기 손실(3.9 MW)가 사용되었다. 결과적으로 총 생산된 전력과 압축기 소비전력 그리고 발전기 손실을 고려한 실제생산전력은 두 경우에 대하여 각각 272.3 MW, 272.279 MW로 나타났다.

Table 2. Comparison of simulation results with reference data [10]

Stream No.	G1		G2		G3		G4	
	Ref.	Result	Ref.	Result	Ref.	Result	Ref.	Result
Mass flowrate (kg/s)	592.9	592.9	592.9	592.9	592.9	592.9	592.9	592.9
Temperature (K)	876.2	877.9	638.9	638.9	512.9	512.9	399.8	396.3
Pressure (bar)	1.048	1.048	1.048	1.048	1.048	1.048	1.034	1.037

Stream No.	S1		S2		S3		S4	
	Ref.	Result	Ref.	Result	Ref.	Result	Ref.	Result
Mass flowrate (kg/s)	1.554	1.603	24.86	24.61	46.96	46.14	117.0	116.8
Temperature (K)	488.7	488.7	599.8	599.8	838.7	838.7	304.7	305.4
Pressure (bar)	4.861	4.061	24.13	24.13	125.1	125.1	0.048	0.048

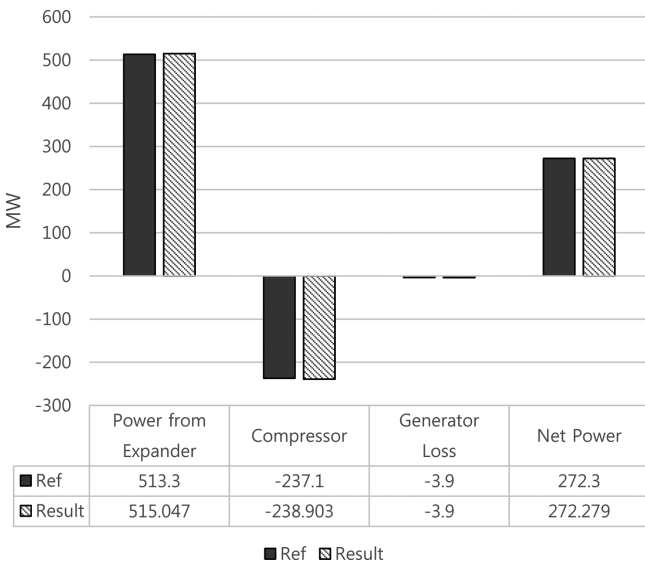


Fig. 10. Power generation and consumption of a gas turbine.

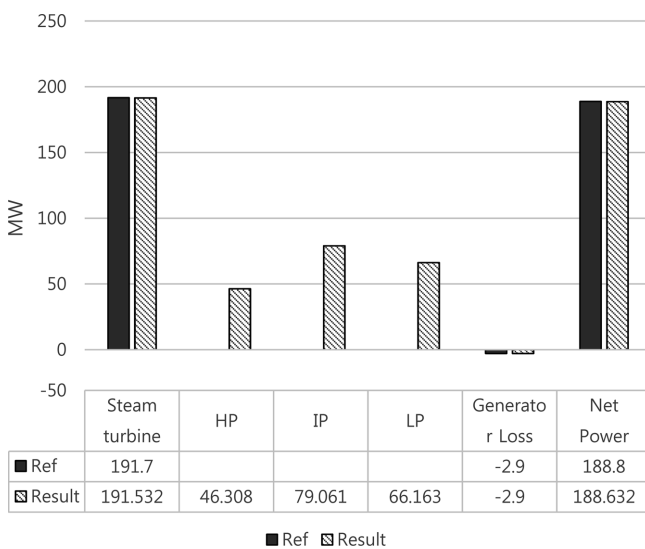


Fig. 11. Power generation and consumption of steam turbines.

스팀터빈을 통한 총 전력 생산량은 참조자료의 경우 191.7 MW, 모사결과의 경우 191.532 MW로 나타났다. 가스터빈의 경우와 같이 동일한 발전기 손실(2.9 MW)이 사용되었으며 이를 고려한 실제 전력생산량은 두 경우에 대해 각각 188.8 MW, 188.632 MW로 나타났

다. 참고자료의 경우 고압, 중압, 저압 스팀터빈에서 생산되는 전력량을 각기 고려하지 않고 전체의 합으로 나타내었으나, 본 연구의 경우 각 스팀터빈에서 생산되는 전력량을 개별적으로 계산하였다. 가스흐름과 증기흐름에 있어 온도에 대한 참고자료와 모사결과의 차이는 3.5 °C와 0.8 °C로 나타났다. 가스터빈과 스팀터빈으로부터 생산되는 전력량을 비교하였을 때, 참고자료와 모사결과의 차는 무시될 수 있을 정도로 미미한 것으로 나타났다.

4. 결론 및 향후 연구 방향

본 연구를 통하여 복합발전 공정의 모델링 및 모사를 수행할 수 있는 모델링 시스템을 개발하였다. 모델링 시스템은 수학적 모델을 개발하는 개발자와 개발된 모델 라이브러리를 이용하여 복합공정의 모사를 수행하는 일반 사용자가 통합된 환경에서 사용할 수 있도록 구현하였다. 이를 위하여 복합발전 공정에 모델링과 모사에 필요한 요소 장치들을 분석하였고, 이를 기반으로 복합발전 공정 전용 수학적 모델 라이브러리를 개발하였다. 수학적 모델 라이브러리는 일반 사용자를 위한 아이콘 기반의 환경과 개발자를 위한 텍스트 환경으로 구성되어 있다. 마지막으로 개발된 모델링 시스템을 사용하여 상업용 복합발전 공정의 모델링 및 모사를 수행하였다. 참고자료와 모사의 결과를 비교하였을 때, 가스터빈의 전력량 생산의 경우 각각 272.3 MW, 272.279 MW로, 스팀터빈의 전력량 생산의 경우 188.8 MW, 188.632 MW로 그 차이는 미미하게 나타났다. 모사를 통한 비교를 통하여 개발된 복합발전용 모델링 시스템은 실제 공정에 유효하게 사용될 수 있음을 검증할 수 있었다.

본 연구를 통하여 개발된 모델링 시스템은 정상상태의 모사를 지원 하는 것이다. 그러나 복합발전 공정의 응용 중 큰 비중을 차지하고 있는 것으로는 동적모사 및 공정의 최적화를 들 수 있다. 동적 모사의 경우, 제어 구조의 동특성 분석 및 적합성, 시운전의 절차 점검 등에 유용하게 사용될 수 있다. 이를 위해 정상상태의 수학적 모델을 동적상태의 수학적 모델로의 전환이 요구되며 수학적 모델과 수치해법과의 연관성에 대한 추가적인 연구가 요구된다. 이에 더하여 주어진 조건에서, 목적함수를 최적화시키기 위한(예를 들어 운전비용의 최소화, 투자 비용의 최소화) 설계 변수를 구하는 최적화 문제 또한 중요한 문제이다. 통합된 환경에서 복합발전 공정의 모델링, 정상상태모사, 동적모사 및 최적화가 가능한 소프트웨어 시스템을 개발하는 것은 복합발전 공정의 설계 및 운전에 대한 이론적 연구 및 응용에 중요한 사항이며 이에 대한 추가적인 연구가 진행될 예정이다.

감 사

본 연구는 GS 건설의 연구개발 사업으로 공동으로 수행되었습니다. 연구비 지원에 감사드립니다.

References

1. Kim, C. M., Kang, D. W. and Kim, T. S., "Performance Analysis of IGCC Gas Turbine Considering Turbine Operation Condition Change due to Modulation of Nitrogen Dilution," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng.*, **37**(11), 1023-1029(2013).
2. Sharma, M. and Singh, O., "Parametric Evaluation of Heat Recovery Steam Generator," *Heat Transfer-Asian Research*, **43**(8), 691-705 (2014).
3. Park, Y. C., Lee, T. Y., Park, J. H. and Ryu H. J., "Performance and Economic Analysis of Natural Gas/Syngas Fueled 100 MWth Chemical-Looping Combustion Combined Cycle Plant," *Korean Chem. Eng. Res.*, **47**(1), 65-71(2009).
4. Seyedan, B., Dhar, P. L., Gaur, R. R. and Bindra, G. S., "Computer Simulation of a Combined Cycle Power Plant," *Heat Recovery Systems & CHP*, **15**(7), 619-630(1995).
5. GateCycle, <http://www.ge-mcs.com/en/bently-nevada-software/320-performance/1831-siweb-pl655.html>.
6. Aspen Plus, <http://www.aspentech.com>.
7. PRO/II, <http://software.invensys.com/products/simsci/design/pro-ii/>.
8. gPROMS, <http://www.psenterprise.com/gproms/>.
9. Matlab, <http://www.mathworks.com/products/matlab/>.
10. Process Engineering Division, Shell Gasifier IGCC Base CasesPED-IGCC-98-002(1998).
11. Lee, H. J. and Lee, J. H., "Linear Model Predictive Control of an Entrained-flow Gasifier for an IGCC Power Plant," *Korean Chem. Eng. Res.*, **52**(5), 592-602(2014).
12. Park, M. H., Kim, J. J., Kim, Y. H. and Kim C., "Conceptual Design of the Minimum Integration IGCC," *Energy Eng.*, **9**(1), 1-9(2000).
13. Frank, P. I., David, P. D., Theodore, L. B. and Adrienne, S. L., Principles of HEAT and MASS TRANSFER, 7rd Ed., John Wiley & Sons, INC(2013).
14. Chase, D. L. and Kehoe, P. T., GE Combined-Cycle Product Line and Performance, GE Power Systems Schenectady, NY.
15. Shi, X. and Che, D., "Thermodynamic Analysis of an LNG Fuelled Combined Cycle Power Plant with Waste Heat Recovery and Utilization System," *International Journal of Energy Research, Int. J. Energy Res.*, **2007**(31), 975-998(2006).
16. Multiflash, <http://www.kbcat.com/infochem-software/flow-assurance-software-multiflash>.
17. Smith, J. M., Van Ness, H. C. and Abbott, M. M., Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics, 7rd Ed., McGRaW-HILL(2005).
18. Khurmi, R. S., Steam Tables: with Mollier Diagrams in S.I. Unites, S.CHAND.
19. Ryu, T. Y., Yang, S. M., Jang, H. M., Choi, J.B., Myung, K. C., Lee, D. Y. and Choi, S. B., "Study on Safety Design of Vertical-Type Heat Recovery Steam Generator Based on Large-Scale Analysis," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng.*, **36**(12), 1535-1542(2012).