

IGCC PDU 플랜트의 3차원 개념설계

이승중, 윤용승

고등기술연구원 플랜트엔지니어링센터 및 아주대학교 시스템공학과

3 Dimensional Conceptual Design of the IGCC PDU System

Seung-Iong Lee and Yongseung Yun

Institute for Advanced Engineering and

Dept. of Systems Engineering, Ajou University

1. 서 론

석탄가스화 복합발전시스템(Integrated Gasification Combined Cycle, IGCC)은 기존의 미분탄 연소 발전 방식에 비해 발전효율이 5-10%이상 높고, 공해물질 배출 특성에 있어서도 SOx와 NOx를 각각 95% 및 75% 이상 감소시키고 재는 용융 슬래크 형태로 처리하는 발전시스템이다. 이와 같은 고효율 및 환경 친화적인 특성으로 인하여 IGCC 기술은 차세대 석탄 화력 발전 방식으로서 각광받고 있으며, 이미 선진 공업국들은 IGCC 기술의 개발을 활발히 진행하여, 최근에는 250MW 이상 출력의 상용화급 플랜트를 가동 또는 건설 중에 있다^{[1][2]}. 또한 국내에서도 최근 전력 수요의 급증과 전세계적으로 확산되고 있는 환경 규제의 강화 등으로 전력연구원, 고등기술연구원 및 에너지기술연구소를 중심으로 우리의 실정에 맞는 IGCC 공정의 개발을 위한 기초연구가 활발히 진행되고 있다.

본 연구에서는 BSU(Bench Scale Unit)의 설계, 건설 및 운전 경험^[3]을 바탕으로 하루 석탄처리용량 100톤/일급 IGCC PDU(Process Development Unit) 플랜트에 대한 개념설계를 수행하고, 이에 대한 3차원 설계를 하였다. PDU급 IGCC 플랜트의 3차원 설계는 상용 패키지인 PDS(Plant Design System)를 이용하였으며, PDS로 설계된 가상 플랜트를 이용하여 플랜트 전체 규모, 설비/기기 배치 및 플랜트의 실제 건설시 진도상황의 가시화 등 사용자의 다양한 요구에 대한 결과를 제시가 가능하다. 이러한 3차원 설계의 사전 작업으로는 시스템 구성 설비의 사양 및 형상이 결정되어야 하며, 이를 바탕으로 plant site plan, equipment allocation drawing 및 structure design 등 기본적인 도면을 생산할 수 있다. 본 연구에서는 모든 설계 자료를 갖추고 있는 BSU에 대한 3차원 설계^[4]를 통하여 3차원 설계에 대한 경험을 축적하였으며, 이를 바탕으로 PDU에 대한 3차원 설계를 하였다.

2. PDU 시스템 구성 및 Process Flow Diagram 작성

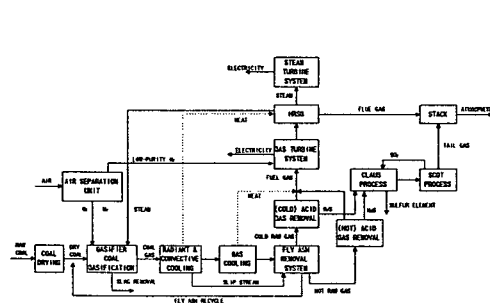
100톤/일급에 대한 표준 IGCC 플랜트는 존재하지 않기 때문에, PDU의 개념설계를 위한 공정도의 PFD(Process Flow Diagram) 초안을 작성하였으며 개괄적인 BFD(Block Flow Diagram)를 [그림 1]에 나타내었다. 석탄시료는 옥외 석탄저장소에 입고되어 보관되며, 가스화기 운전시 연속 conveyor system을 통하여 분쇄시스템으로 옮겨진다. 분쇄기에서 200

mesh이하 70%가 통과하도록 분쇄된 석탄은 LPG 연소가스에 의해 건조된 다음에 storage hopper로 운송되어 저장된다. 가스화기로의 운송은 질소에 의해 이루어지고 가스화기 압력까지의 가압은 lock hopper system을 사용한다. PDU급에서는 lock hopper 2개로부터 출발하여 1단계의 flow splitter를 거쳐서 4개까지의 석탄주입 노즐로 공급되도록 설치된다. 가스화기의 최대 운전압력의 선정은 전적으로 선정되는 가스터빈의 운전특성에 달려 있는데, 현재까지 알려진 석탄사용 상업용급 IGCC 발전플랜트들의 경험으로 보아 25기압이 적절하다고 판단하였다. 가스화기로부터 발생하는 fly slag은 싸이클론과 metal filter로 이루어진 분진제거 시스템에서 걸러진 후, 최대 탄소전환율을 위해 다시 lock hopper system으로 순환된 다음에 가스화기로 재주입된다. 또한 본 연구에서는 고온가스정제설비에서 사용할 흡착제의 운전 온도를 고려하여 고온탈황용 slip-stream의 분기 위치를 대류형 열교환기 후단으로 하였으며, 고온용 싸이클론을 별도로 설치하여 고온가스정제설비로 유입되는 fly slag을 제거하도록 하였다.

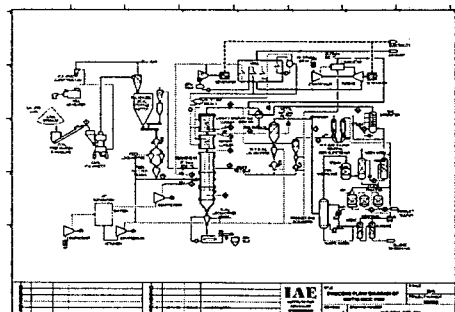
또한 산소분리공정은 상업용처럼 하루 2,000톤 이상의 산소를 요구하는 규모가 아니므로 cryogenic방식이 아니라 membrane separation 방식으로 하는 것도 고려하였으나, 궁극적 적용 대상인 상업용 규모에서의 운전특성을 정확히 파악하고자 PDU급 100톤/일 플랜트에는 규모가 작아서 경제적이지는 못하지만, 상업용 규모에서 적용되고 있는 cryogenic 방식을 적용하였다. 산소분리공정으로부터 생성되는 질소는 PDU IGCC plant 공정의 석탄운송 주입용과 fly slag을 재순환시키는 가압가스로 사용되고, 나머지는 가스터빈에서 출력증대와 NOx 발생량을 줄이기 위한 가스희석제로 사용된다^{[5][6]}.

가스화기로부터 나온 석탄가스는 복사형 및 대류형 열교환기를 거쳐서 온도가 냉각되며 고압의 증기를 발생시킨다. 복사형 열교환기에서 발생된 증기중 일부는 가스화공정과 여타 공정에서 사용되고, 나머지 증기는 대류형 열교환기에서 발생된 증기와 함께 HRSG를 거쳐 증기터빈에서 전력을 발생시킨다. 그러나, PDU 플랜트에서 발생되는 증기의 양이 적고 규모가 작으므로, 상용급 IGCC 플랜트에서 적용하고 있는 고압/중압/저압(또는 고압/저압)의 증기를 발생시키는 시스템이 PDU급 플랜트에 적용하기에는 다소 시스템이 복잡하고 상용급에 비해 상대적으로 초기 투자비와 운전비용의 비율이 클 것으로 예상되므로, 단일 압력의 증기만을 생산하는 HRSG를 도입하였으며, 증기터빈도 이에 상응하는 형태를 고려하였다. 상기와 같이 구성된 PDU급 플랜트의 PFD를 [그림 2]에 나타내었다.

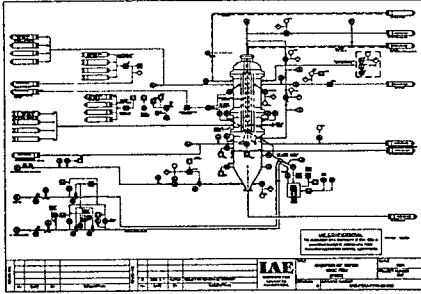
이상과 같이 작성된 PFD를 기준으로 상용 프로그램인 ASPEN을 이용하여 100톤/일급 IGCC PDU에 대한 정적해석^[7] 및 BSU 설계/건설 경험을 통하여 각 설비 또는 기기에 대한 용량 및 운전 조건, P&ID(Piping and Instrument Diagram) 등 설비 또는 기기 선정의 기본적인 자료를 도출하였으며, [그림 3]과 [그림 4]에 가스화기 시스템 및 산성가스제거공정에 대한 P&ID를 나타내었다.



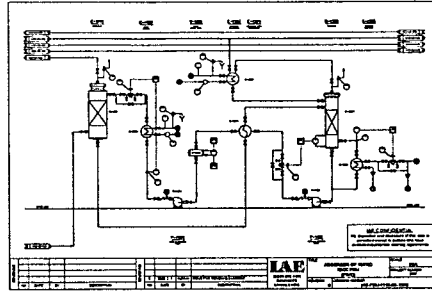
[그림 1] 100톤/일급 IGCC PDU block flow diagram



[그림 2] 100톤/일급 IGCC PDU의 process flow diagram



[그림 3] IGCC PDU 가스화기 시스템 P&ID



[그림 4] IGCC PDU 산성가스 흡수 및 용매 회수 시스템 P&ID

3. PDU 시스템 3차원 설계

(1) 주요 장치 설계

PDU를 구성하고 있는 주요 설비들은 석탄공급 설비, 가스화 설비, 가스정제 설비, 황회수 설비 및 잔류가스 처리설비와 석탄 가스화시 요구되는 산화제를 공급하는 공기분리설비, 생산된 석탄가스를 이용한 가스터빈 발전시스템 및 Utility 시스템으로 구성되어 있고, 이는 다시 다수의 기기(component)들로 세분화된다. 이러한 여러 기기들로 구성된 PDU의 설계시, 설계자료의 체계적인 관리를 위하여 <표 1>과 같이 PDU를 구성하고 있는 각 설비에 단일코드를 부여하였다.

<표 1> PDU 구성 설비의 numbering system

Area	Area Description	Unit	Unit Description	Area	Area Description	Unit	Unit Description
100	Pulverizing & Feeding System	110	Coal receiving, Pulverizing & Drying	700	Air Separation Unit	710	Air Compression and Cooling
		120	Pulverized Coal Feed			720	Air Pretreatment
200	Gasification System	210	Gasification and Syngas Cooler			730	Air Separation System
		220	Particulate Removal System			740	Air Separation Unit Products & Storage
		230	Wet Solid Removal System	800	Utility System	810	Condensate and Feedwater System
300	Syngas Treatment System	310	HCN/COS Removal and Low Temperature Gas Cooling			820	Cooling Water
		320	Sour Water/Shurry Stripper			830	Plant and Instrument Air
400	Gas Cleanup System	410	Acid Gas Removal(MDEA)			840	Water System
		420	Acid Gas Removal(HGCU)			850	Fuel System
		430	Sulfur Recovery(Claus Process)			900	Off-site Facilities
		440	Tail Gas Treating(SCOT Process)	920	Fire Water System		
500	Saturation System	510	Fuel Gas Saturation	930	Buildings		
600	Power Generation System	610	Gas Turbine Power Generation				
		620	Heat Recovery Steam Generator				
		630	Steam Turbine Power Generation				

PDU급 3차원 설계는 크게 두가지 방법으로 나누어 진행하였는데, <표 1>에서 언급된 각각의 Unit을 구성하는 기기 중 현재 상업화되어 있는 기기는 공급업체로부터 설계 및 형상 정보를 입수하여 PDS에 적용하는 방법과 석탄가스화기, 생성가스 냉각기 및 미세 분진 제거 시스템과 같이 주문제작에 의한 설비들은 BSU의 운전 데이터를 이용한 scale-up 설계를 함으로써 PDS에 적용하는 방법으로 추진하였으며 PDU를 구성하는 시스템별 설계 사양은 다음과 같다.

가. 석탄분쇄 및 건조계통

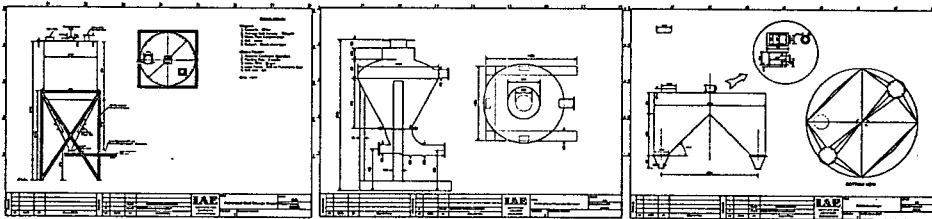
석탄분쇄 및 건조계통은 미국 Williams사의 씨스템 중 Super-Titan size를 적용하였다. 석탄분쇄 및 건조계통에 대한 기기 배치도 및 size는 [그림 5]와 같다.



[그림 5] 석탄분쇄 및 건조계통 기기배치도

나. 석탄주입계통

석탄주입계통은 미분화된 석탄(200mesh, 70% under)을 분쇄장치로 받아 저장하는 미분탄 저장호퍼, 저장된 미분탄을 기계적으로 공급하는 스크류공급기, 미분탄을 과밀상태(dense phase)로 이송하는 공압수송기, 공압 수송된 미분탄을 저장/분배하는 분배호퍼, 분배된 미분탄을 일시적으로 계량하고 저장하는 계량호퍼 및 록호퍼, 스크류공급기가 부착되어 가스화기 노즐로 미분탄을 공급하는 사출용기(injection vessel)로 구성된다. 미분탄 저장호퍼는 석탄 분쇄기로부터 미분탄을 받아 약 50톤을 저장 할 수 있는 규모로 설계를 하였으며, 이는 PDU급 플랜트를 12시간정도 운전할 수 있는 용량이다. 또한 공압수송기와 연결되는 스크류공급기는 가스화기에 공급되는 미분탄의 유량조건과 동일하게 100 ton/day의 용량을 갖게 설계하였다. [그림 6]과 [그림 7]에 각각 미분탄 저장호퍼, 공압수송기의 개략도를 나타내었고, [그림 8]에 각각 분배호퍼의 개략도를 나타내었다.



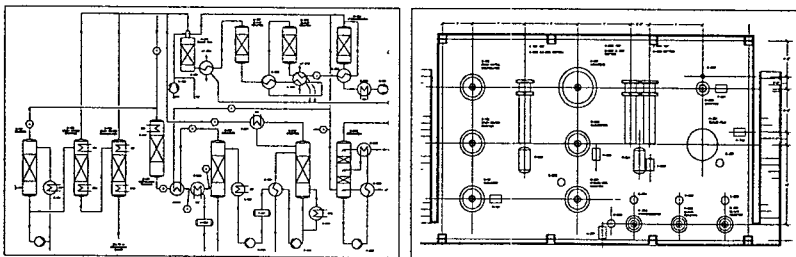
[그림 6] 미분탄 저장호퍼 개략도

[그림 7] 공압수송기 개략도

[그림 8] 분배호퍼 개략도

다. 가스정제공정

저온정제공정(Cold Gas Cleanup, CGCU)은 MDEA/Claus 조합의 공정을 채택하였으며 Claus공정에서 나오는 잔류가스(tail gas)는 hydrogenation을 거쳐 재순환되도록 하였다. 저온정제공정에 대한 pfd와 layout 도면을 [그림 9~10]에 나타내었다.

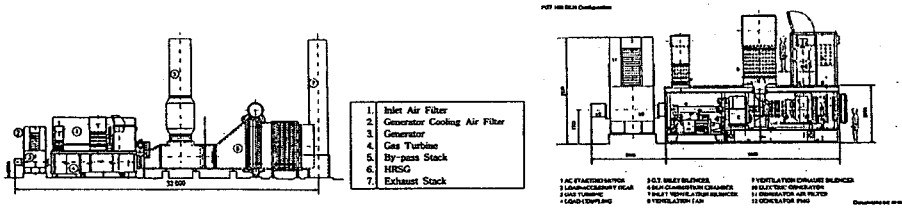


[그림 9] Process flow diagram of cold gas cleanup

[그림 10] Cold gas cleanup layout drawing

라. 가스터빈 및 증기터빈 공정

가스터빈은 IGCC용으로 개발된 모델이 없으므로, PDU 플랜트에 적합한 모델을 선정하고자 GE 자회사인 Nuovo Pignone사의 PGT 계열의 PGT 10B를 선정하여 PDU 3차원 설계에 반영하였으며 PGT 10B에 대한 설계 사양을 [그림 11]에 나타내었다.



[그림 11] PGT 10B configuration

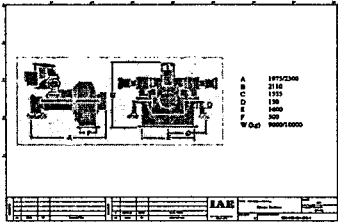
스팀터빈은 공정해석 결과를 반영하여 Nuovo Pignone사의 증기터빈 모델 선정 기준표를 참조하여 PDU 플랜트에 적합한 형태의 터빈을 선정하였으며 선정 기준은 <표 2>와 같다. 선정된 증기터빈의 설계 사양을 [그림 12]에 나타내었다.

<표 2> 증기터빈 모델 선정 기준

Inlet Steam Condition	Temperature	400°C
	Pressure	22.97 bar
	Mass Flow	13700 kg/h
Condensing Pressure		0.2 bar
Speed		7200 rpm
Front Section		N 32
Condensing Section		K 36
Turbine Model		NK 32/36

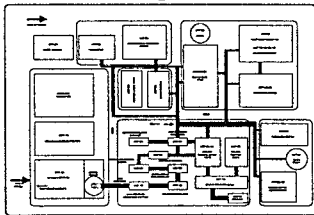
(2) IGCC PDU 플랜트 3차원 설계

BSU급에 대해 완성된 3차원 설계 기술을 적용하여 IGCC PDU급에 대한 3차원 설계시스템 구축 및 3차원 설계를 하였다. 3차원 설계시 PDS를 활용하였는데, PDS는 3차원 설계뿐만 아니라 여러 가지 software module을 통합하는 기능도 하고 있다. 3개의 Clients와 데이터베이스 서버 1개와 product 파일서버 1개의 2개의 서버로 구성된 Dual Server Configuration 시스템을 사용하여 완성된 BSU 설계시스템과는 달리 PDU급 설계에는 2개의 Clients와 1개의 서버로 구성되어, RDBMS (Relational DataBase Management System)와 design 파일들이 하나의 서버에 모두 저장되는 시스템인 Single Server Configuration 시스템을 사용하여 모델링하였다.

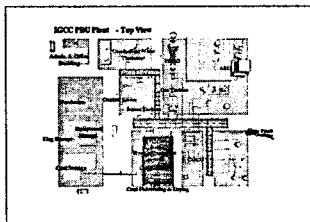


[그림 12] NK 32/36 configuration

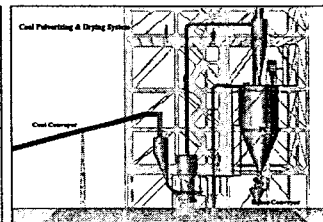
[그림 13]은 100톤/일급 PDU IGCC 플랜트의 general site plan으로서 PDU를 구성하고 있는 주요 설비에 대한 기본적인 배치를 보여주고 있다. 상기와 같이 공급업체 또는 직접 설계에 의해서 주요 설비들의 형상이 결정되고 각 설비들의 1차적인 배치가 완료된 후, 이를 근거로 철골 구조를 설계하였다. [그림 13]과 철골구조 도면을 바탕으로 각 설비의 배치를 수정하여 최종 배치를 확정하였고, 이를 바탕으로 기기 및 배관간의 간섭 문제 등을 검토하면서 3차원 설계를 완성하였으며, [그림 14]에 PDU 플랜트 전체에 대한 기기 배치 도면을 나타내었다. 위와 같은 작업으로 PDS를 이용하여 구현한 PDU 시스템을 구성하고



[그림 13] General site plan of 100 ton/day IGCC PDU

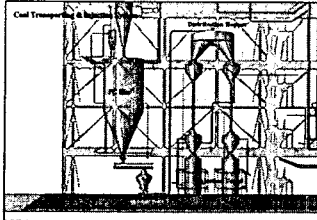


[그림 14] 3D Layout of IGCC PDU plant

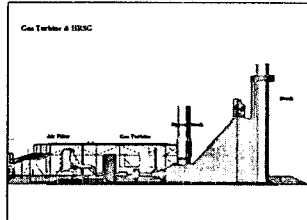


[그림 15] Coal pulverizing & drying system

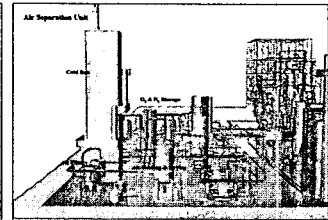
는 주요 기기 및 주변 배관계통의 3차원 설계 모델을 [그림 15~18]에 도시하였으며, PDU 플랜트에 대한 3차원 전경을 [그림 19~21]에 도시하였다.



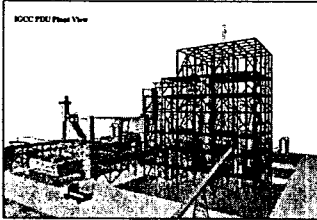
[그림 16] Coal transporting & injection system



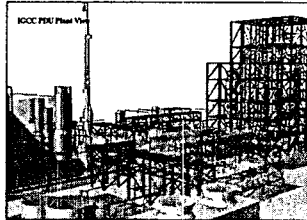
[그림 17] Gas turbine & HRSG system



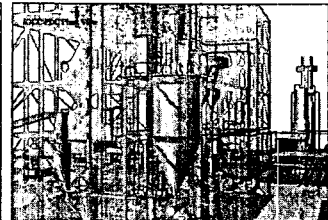
[그림 18] Air separation unit system



[그림 19] 3D model view of IGCC PDU plant



[그림 20] 3D model view of IGCC PDU plant



[그림 21] 3D model view of IGCC PDU plant

4. 결 론

이상과 같이 본 연구에서는 100톤/일급 IGCC PDU 플랜트에 대한 정적해석과 BSU 설계/건설 경험을 통하여 각 설비 또는 기기 선정에 필요한 기본적인 자료를 도출하였고, 이를 바탕으로 PDU의 개념설계 및 일부 기본설계를 완성하였으며, 이들 결과들을 PDS를 이용하여 3차원 설계시스템으로 구현하였다. 최근의 추세는 대규모 공정이 포함된 발전소들의 3차원 설계를 우선 완성한 후에 실제 공사에 착수하므로, 이러한 3차원 설계시스템을 IGCC 발전시스템에 적용하여 IGCC PDU 플랜트의 규모와 형태 등을 software적으로 현실감있게 살펴보는 것은 시기적절한 것으로 판단된다.

참고문헌

1. Zon G.D.: "Integrated Coal Gasification Combined Cycle Demonstration Project Buggenum", EPRI conference(1995).
2. Motter J.: "Advanced Coal-Fired Power Generation Systems", EPRI conference(1995).
3. 통상산업부: "Bench Scale급 건식 석탄가스화기 운전 및 모사기술개발(I)", 951E104-252FG1 (1996).
4. 산업자원부: "Bench Scale급 건식 석탄가스화기 운전 및 모사기술개발(II)"(1998).
5. Smith, A., Alsandor, E., Doering E. and Unger P.: "Improved IGCC Power Output and Economics Incorporating a Supplementary Gas Turbine", EPRI Conference(1994).
6. 전력연구원: "석탄가스화 복합발전 기술개발 (I): IGCC 예비 타당성 검토 및 기술규격서 작성"(1996).
7. 이승중, 이진욱, 김용철, 이찬, 윤용승: 화학공학, 37(1), 47 (1999).