

IGCC 시스템 분야 연구 동향

이윤경* 서석빈, 안달홍
한국전력 전력연구원

1. 서론

새로운 형식의 발전설비를 도입하고, 그 설계기술을 도입 및 개발하는 것은 많은 인력과 자본을 장기간에 걸쳐 투입하여야 하므로 설비도입, 기술도입, 기술 개발, 기술 자립 등 각 기술개발 단계에 대하여 신중하고 효과적인 정책을 수립하여 시행하여야 한다. 이와 함께 해당 설비의 도입에 대한 기술적, 경제적 타당성을 우선적으로 확인하여야 하며, 설계기술의 개발이 동일형식 설비를 지속적으로 건설하는 것을 전제로 하므로 기술개발에 대한 기술적, 경제적 타당성 또한 충분히 확보되어야 한다.

현재 IGCC 관련 개발 기술은 대용량 가스터빈, 고온가스 터빈, 고온탈황의 최적 integration 등에 대하여 집중되고 있으며, 이들 기술의 상용화 전망에 따른 기술개발에 따라 열효율 향상이 충분히 예상될 뿐만 아니라 설비의 대용량화, 설계 및 제작 기술의 향상 등에 따른 건설비용 절감의 잠재성도 매우 높다고 할 수 있다. 따라서 IGCC의 국내 도입은 이러한 기술 개선의 여지와 국내 기술 자립의 효과를 고려하여 도입 기술의 소화를 위한 노력이 뒷받침되어야 한다.

IGCC는 각각 다른 용도로 사용되어 왔던 플랜트들을 발전을 목적으로 조합한 것이므로 이들 설비들의 특성을 파악하고 그 차이점을 분석하는 것은 전체 IGCC 플랜트의 기술 특성을 이해하는데 도움이 된다. 전체적으로 볼 때, IGCC는 기존의 가스터빈 복합발전설비에 연료공급 설비인 석탄 가스화 플랜트가 추가된 형태를 이루고 있으며, 그 설계기술은 정유화학플랜트 설계기술과 복합발전 플랜트 설계기술이 유기적으로 결합된 구조를 갖는다. 이는 각각 독립적으로 발전되어 온 기술들이 하나의 목표를 위하여 결합된 것으로서 이들의 효율적인 결합은 IGCC의 성공적인 사업수행에 있어 매우 중요한 사항이 된다. 따라서 IGCC의 효율적인 기술개발 및 사업 수행을 위해서는 각 분야별 설계기술의 특성을 우선적으로 파악하여야 하고 한다.

IGCC 시스템 설계 기술이라 함은 소프트웨어 중심의 기술로 가스화 설비, 산소 플랜트, 가스정제 설비 및 복합발전 플랜트에 대하여 각 시스템의 주요 구성 설비를 구성하고 성능과 함께 출력, 열효율, 환경 성능 등을 산출하는 기술을 말하며 이 과정에서 총 플랜트 성능에 영향을 줄 수 있는 여러 가지 다양한 옵션, 일례로 현재 적용되고 있는 IGCC용 가스터빈 대신 고온 가스터빈을, 저온정제 공정 대신 고온정제 공정을 적용하여 목적하는 최적의 IGCC 시스템을 도출하는 것을 최적화라 한다.

본 문에서는 상용 IGCC의 도입 대비를 목적으로 한전 전력연구원에서 수행한 IGCC 시스템 설계 연구의 성과물을 소개하며 또한 IGCC 기술 개발의 요람이 된 청정석탄발전기술 프로그램을 지원하는 미국 에너지성에서 발표된 IGCC 시스템 설계 연구 결과를 함께 소개하고자 한다.

2. 본론

(1) 300MW급 IGCC 시스템 설계⁽¹⁾

가. 설계 조건

- 가스화기 : Texaco 분류층 가스화기
- 가스터빈 : GE7FA
- 설계코드 : 복합사이클 - GateCycle, 가스화 플랜트 - AspenPlus, TSWEET(저온정제 전용)
- 적용탄 : 대동탄 (발열량 : 7026 kcal/kg, HHV, 건식기준)

나. 설계 대상 시스템

- Case 1 : RSC(radiant syngas cooler) / CSC(convective syngas cooler)
디자인 가스화기 적용 시스템,
Syngas cooler에서 고압 증기를 생산, HRSG의 주증기와 연계하여 증기터빈 출력 증대,
Fuel saturator, N₂ heater를 설치하여 syngas 냉각시의 열을 효과적으로 회수하며 ASU의 잉여 질소를 가스터빈으로 회수하여 연소기에 주입, NO_x 제어 및 출력 증대
- Case 2 : Quench 디자인 가스화기 적용 시스템,
풍부한 저준위의 열원을 효과적으로 회수하기 위해 expander, fuel & N₂ 열교환기 위치 등 9가지 case에 대해 option study를 수행하여 최적 시스템을 설정하고 ASU의 잉여 질소를 가스터빈으로 회수하여 연소기에 주입, NO_x 제어 및 출력 상승, 가스터빈 압축공기를 ASU로 공급하여 ASU 소비동력을 감소시켰다.

CASE	Expander Location	Fuel Saturator	N2 Heat Exchanger	Air Extraction
Case 1	After AGR	Yes	No	No
Case 2	After AGR	Yes	Yes	No
Case 3	Before AGR	Yes	No	No
Case 4	Before AGR	Yes	Yes	No
Case 5	Before AGR	No	No	No
Case 6	Before AGR	No	Yes	No
Case 7	After AGR	Yes	Yes	Yes
Case 8	Before AGR	Yes	Yes	Yes
Case 9	Before AGR	No	yes	yes

각 case에 대한 성능 해석 결과 최적 성능을 나타낸 case 8을 최종 시스템으로 설정하여 설계를 완료하였다.

다. 설계 결과

Items	High Eff. Case	Low Cost Case
Gas Turbine Power Output(MW)	197.1	196.9
Steam Turbine Power Output(MW)	133.8	114.4
Gross Power Output(MW)	330.9	321.0
Auxiliary Power Consumption(MW)	53.4	40.0
Net Power Output(MW)	277.4	281.0
Thermal Efficiency(% , HHV, Net)	42.6	40.2

(2) 고온정제를 채용한 IGCC 시스템 설계⁽²⁾

가. 설계 조건

- 가스화기 : Texaco 분류층 가스화기
- 가스터빈 : GE7FA
- 설계코드 : 복합사이클 - GateCycle, 가스화 플랜트 - AspenPlus
- 정제과정 : 고온정제, zinc titanate 흡수제
- 적용탄 : 대동탄 (발열량 : 7026 kcal/kg, HHV, 건식기준)

나. 설계 결과

Gas Turbine	GE 7FA
Gas Turbine Power(MW)	197.0
Steam Turbine Power	133.0
Aux. Power(MW)	51.1
Net Power(MW)	278.9
Efficiency, HHV(%)	43.65

(3) Advanced IGCC Case Study 성능 및 경제성 분석⁽²⁾

가스터빈의 기술의 진보에 따라 3가지 고급형 가스터빈을 선정하고 이들 가스터빈을 고온정제를 채용하는 IGCC 시스템에 적용하였을 경우 시스템 성능과 경제성을 분석하였다.

가. 시스템 성능 분석

① 설계기준

- 연료 : 대동탄
- 가스화과정 : Texaco 공정
- 가스터빈 : 3 Type(GE 7FA, W501G, GE 7H machine)
- 정제과정 : 고온정제, zinc based sorbent(운전온도 : 600℃)

② Case 설정

Case 연구를 위해 Texaco 가스화기와 고온정제를 기본으로 적용하고 가스터빈 종류에 따라 3 Case를 선정하였다.

Case 1 : Texaco Gasifier + HGCU + GE 7FA

Case 2 : Texaco Gasifier + HGCU + W501G

Case 3 : Texaco Gasifier + HGCU + GE 7H

③ 시스템 성능해석 결과

Items	Case 1	Case 2	Case 3
Gas Turbine	GE 7FA	W501G	GE 7H
Gas Turbine Power(MW)	197.0	272.1	340.3
Steam Turbine Power	133.0	165.4	196.3
Aux. Power(MW)	51.1	44.7	73.7
Net Power(MW)	278.9	392.8	462.9
Efficiency, HHV(%)	43.65	46.31	47.76

나. 3 Case Advanced IGCC 경제성 분석

① 투자비 산정기준

- 가격 기준일 : 2000년 1월
- 환율 : 1,200 원/US\$
- 사업기간 : 5년
- 건설 중 이자 : 연 8%의 이자율 적용
- 산정 데이터 및 방법 : EPRI TAGTM 투자비 계산절차 준수, NETL 및 전력연구원 보유 자료 적용

② 투자비 산정결과

(단위 : \$1,000)

	Case 1	Case 2	Case 3
Coal Slurry Preparation	20,572	25,267	27,878
Oxygen Plant	40,519	49,765	54,909
Texaco Gasifier(RSC+CSC)	50,513	62,040	68,452
Gas Cleanup	35,808	43,981	48,527
Gas Turbine System	41,384	52,642	54,675
HRS&G & Steam Turbine	51,140	62,812	69,303
Piping, Electric, Control etc.	57,194	70,247	77,508
Engineering Fees	29,861	36,675	40,466
Contingency	34,020	60,303	66,025
Total Plant Cost	361,013	463,734	507,741
	\$1,294/KW	\$1,180/KW	\$1,097/KW

③ 발전원가 산정 기준

- 일반 사항
 - 할인율 : 8%/년
 - 경제수명기간 : 25년
 - 물가상승율 : 3%/년
- 비용산정기준
 - 연료비 단가 : 48.983원/Kg
 - 보험료 : 총 투자비의 0.28%
 - 법인세 및 제세 : 총 투자비의 0.18%

④ 발전원가 분석 결과(이용률 70% 기준)

항목\발전형식	Case 1	Case 2	Case 3
TPC(\$1,000, \$/kWh)	361,013 \$1,294/KW	463,734 \$1,180/KW	507,741 \$1,097
발전원가(원/kWh)	51.96	47.54	44.93

다. 결론

Advanced IGCC 시스템 설계에 적용된 3가지 고급형 가스터빈의 출력이 일정치 않으므로 일괄적인 비교를 하는 것은 어렵지만 기타 조건을 동일하게 적용했을 때 가스터빈의 출력이 커짐에 따라 제반 설비의 용량 증가로 총 투자비는 증가하지만 총 출력과 플랜트 효율 역시 가스터빈의 출력과 비례하여 증가하며 발전 원가와 단위 전력 당 투자비는 반비례하는 것을 확인 할 수 있었다. 이는 IGCC 시스템은 그 출력이 증가할수록 경제성 측면에서의 경쟁력이 커짐을 의미한다.

(4) 가스화 조건 및 정제조건 변화에 따른 IGCC 성능 및 경제성 분석⁽³⁾

가. 공통 적용 조건

- ① 석탄 : Illinois No. 6

- ② 가스터빈 : WG501G
- ③ 저온 탈황 및 유황 회수 공정 : MDEA/Claus/SCOT Process
- ④ 고온 탈황 및 정제 공정 : Morgantown transport absorber, zinc based sorbent
- ⑤ 고온 탈황 유황 회수 (1) : Monsanto Sulfuric Acid Plant
- ⑥ 고온 탈황 유황 처리 (2) : Sulfator
- ⑦ HRSG/증기 터빈 : 3압(고압, 중압, 저압, 증기조건 : 72.7/352/1911psia, 305/432/629℃) 재열 공정

나. 성능 및 경제성 비교 옵션 (총 14case)

- ① Texaco Gasifier IGCC Base Case
 - Case 1 : Quench design gasifier + 저온정제
 - Case 2 : RSC/CSC design gasifier + 저온정제
 - Case 3 : RSC/CSC design gasifier + 고온정제
- ② Shell Gasifier IGCC Base Case
 - Case 1 : Shell 가스화기 + 저온정제
 - Case 2 : Shell 가스화기 + 고온정제
- ③ Transport Gasifier IGCC Base Case
 - Case 1 : Air-blown transport 가스화기 + 노내 탈황 + 고온정제
 - Case 2 : Oxygen-blown transport 가스화기 + 노내탈황 + 고온정제
- ④ British Gas/Lurgi Gasifier IGCC Base Case
 - Case 1 : BGL 가스화기 + 저온정제
 - Case 2 : BGL 가스화기 + 고온정제
- ⑤ Destec(E-Gas) Gasifier IGCC Base Case
 - Case 1 : Destec 가스화기 + 저온정제
 - Case 2 : Destec 가스화기 + 고온정제
- ⑥ KRW Gasifier IGCC Base Case
 - Case 1 : KRW 가스화기 + 노 내 탈황 + 고온정제(sulfator)
 - Case 2 : KRW 가스화기 + 저온정제
 - Case 3 : KRW 가스화기 + 고온정제(황산회수)

다. 성능 및 경제성 비교 결과

	Texaco			Shell		Transport		British/Lurgi		Destec		KRW		
	Oxygen blown			Oxygen blown		Air	Oxygen	Oxygen		Oxygen		Air blown		
Coal	wet			dry		dry		dry		wet		dry		
Cooling mode	Quench	RSC +CSC	RSC +CSC	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Sulfur removal	CGCU	CGCU	HGCU	CGCU	HGCU	Inbed /HGCU	Inbed /HGCU	CGCU	HGCU	CGCU	HGCU	Inbed /HGCU	No inbed /CGCU	No inbed /HGCU
Sulfur recovery	Claus/SCOT	Claus/SCOT	Sulfuric Acid	Claus/SCOT	Sulfuric Acid	Sulfator	Sulfator	Claus/SCOT	Sulfuric Acid	Claus/SCOT	Sulfuric Acid	Sulfator	Claus/SCOT	Sulfuric Acid
GT Power (MWe)	272.7	272.4	272.1	272.3	272.4	272.6	272.6	272.6	272.5	272.8	272.6	272.6	272.4	272.8
ST Power (MWe)	152.3	191.7	183.8	188.8	187.5	162.6	142.4	133.4	130.3	172.2	171.1	184.8	177.0	174.3
Total Power (MWe)	382.9	412.8	409.6	412.8	412.2	415.4	383.7	374.9	372.1	400.6	400.4	432.9	424.1	421.6
Efficiency, HHV(%)	39.7	43.5	46.5	45.7	48.0	49.8	47.1	45.3	49.4	45.0	47.6	48.4	44.3	46.3
Total capital requirement (\$1,000)	500,599	594,053	561,229	566,101	564,963	484,062	496,722	533,664	503,640	546,996	538,933	566,641	544,961	550,305
\$/kW	1,307	1,439	1,370	1,371	1,370	1,165	1,295	1,423	1,354	1,365	1,346	1,309	1,285	1,305
Net Operating Cost (\$1,000)	48,411	49,422	43,426	46,969	42,562	45,388	47,294	46,445	40,416	46,487	41,888	54,059	48,032	43,740
COE (mils/kWh)	42.5	44.3	41.1	42.1	40.7	38.1	41.9	44.5	41.1	42.3	40.4	42.4	40.3	39.5

라. 결과

Case study 조건으로 선정된 항목을 제외한 나머지 조건을 동일하게 설정하였을 때 14가지 경우 중 플랜트 효율이 가장 높은 경우는 transport 가스화기에 air-blown 조건을 적용한 고온정제 시스템

로 49.8%(HHV) 나타났으며 플랜트 효율이 가장 저조한 것은 Texaco quench design 경우로 39.7%(HHV)를 나타내었다. 저온정제를 채용한 경우 중 가장 좋은 효율을 나타낸 것은 Shell 가스화기 경우로 45.7%(HHV)의 효율을 보였다.

총 투자비와 킬로와트 당 생산단가(\$/kW)가 가장 높은 경우는 Texaco RSC/CSC 디자인 가스화기에 저온정제 공정을 적용한 case로 나타났으며 가장 낮은 경우는 transport 가스화기, air-blown에 고온정제 공정을 적용한 case로 나타났다.

발전원가의 경우, British Gas/Lurgi 가스화기에 저온정제를 적용한 경우가 가장 높았고 가장 낮은 경우는 역시 transport 가스화기, air-blown인 경우로 나타났다.

한편, Net operating cost의 경우 KRW 가스화기에 노내 탈황과 저온 정제를 적용한 경우에 운전 비용이 가장 높은 것으로 나타났고 British Gas/Lurgi 가스화기에 고온정제 공정을 적용한 경우가 운전 비용은 가장 낮게 나타났다.

아직 개발 단계인 transport 가스화기를 제외한 다른 경우들의 결과를 살펴보면 다음과 같다.

가장 높은 효율을 나타낸 것은 British Gas/Lurgi 가스화기에 고온정제를 적용한 case이다.

경제성 측면에서 살펴보면 투자비가 가장 높은 경우는 Texaco RSC/CSC 가스화기 디자인에 저온정제를 적용한 경우로 나타났으며 투자비가 가장 낮은 경우는 Texaco Quench 디자인의 가스화기에 저온정제를 적용한 경우로 나타났다. 킬로와트당 생산 단가(\$/KW)는 Texaco RSC/CSC 경우가 가장 높은 것으로 나타났고 가장 낮은 경우는 KRW 가스화기에 노내 탈황을 채용하지 않고 저온 정제를 적용한 경우로 나타났다.

Texaco RSC/CSC 가스화기에 저온정제를 적용한 경우 투자비와 단위 전력당 생산 단가가 높게 나타난 주된 원인을 경제성 분석 입력치에서 살펴보면 다른 경우에 비해 이 가스화기 자체의 비용이 가장 높게 설정되어 있으며 증기터빈 및 HRSG 측의 투자비도 가장 높게 나타남을 알 수 있다. 이는 RSC/CSC 채용에 따른 syngas cooler 설치비용에 기인한 것이며 이에 따라 증기터빈 및 HRGS 측의 투자비도 증가한 것으로 보인다.

한편, Texaco Quench 가스화기인 경우 투자비가 적게 드는 반면, 플랜트 효율이 가장 낮게 나타났는데 이는 Quench 가스화기를 채용한 경우가 syngas cooler를 채용하지 않음으로써 저비용 IGCC 시스템을 추구하는 것이 목적인 만큼 사용자의 목적에 따라 효율과 투자비 trade-off 문제라 할 수 있다.

Oxidant	Texaco			Shell		Transport		British/Lurgi		Destec		KRW		
	Oxygen blown			Oxygen blown		Air	Oxygen	Oxygen		Oxygen		Air blown		
Coal	wet			dry		dry		dry		wet		dry		
Cooling mode	Quench	RSC +CSC	RSC +CSC	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Sulfur removal	CGCU	CGCU	HGCU	CGCU	HGCU	Inbed / HGCU	Inbed /HGCU	CGCU	HGCU	CGCU	HGCU	Inbed / HGCU	No inbed / CGCU	No inbed / HGCU
Sulfur recovery	Claus/SCOT	Claus/SCOT	Sulfuric Acid	Claus/SCOT	Sulfuric Acid	Sulfator	Sulfator	Claus/SCOT	Sulfuric Acid	Claus/SCOT	Sulfuric Acid	Sulfator	Claus/SCOT	Sulfuric Acid
단위: \$million														
coal prep.	27.7	27.3	25.9	17.8	17.2	16.7	16.4	29.3	27.2	26.1	25.1	16.2	16.9	16.4
oxygen plant	53.6	53.8	51	51.2	49.6	-	35.7	32.0	29.2	48.5	45.5	-	-	-
gasifier	32.9	79	63.6	78.4	72.3	57.6	44.0	61.8	57.6	61	55.4	72.3	76.9	74.4
limestone hd.	-	-	-	-	-	6.8	6.7	-	-	-	-	11.4	-	-
gas cooling., (gas liquor sep)	17.5	10.6	-	9.4	-	-	-	9.8 (11.6)	-	13.6	-	-	19.4	-
MDEA	5.4	5.6	-	5.1	-	-	-	4.7	-	5.2	-	-	8.8	-
Claus/SCOT	14.4	14.4	-	14.2	-	-	-	13.2	-	14	-	-	14.5	-
gas condition	-	-	13	-	15.2	20.2	16.3	-	11.4	-	14.9	24.8	(12)*	25.8
HGCU	-	-	8	-	7.3	13.6	12.1	-	9.5	-	8.6	18	-	18.5
acid plant	-	-	18.7	-	18.4	-	-	-	16.8	-	18.1	-	-	18.9
sulfator	-	-	-	-	-	13.7	11.4	-	-	-	-	16.3	-	-
G/T	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54
S/T,HRSG	45.5	50.8	49.7	50.7	50.4	47.2	44.2	43	42.5	48.2	48	50.2	48.7	48.3
ash hd/disp.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5.8	3.6	3.5

* 가스 냉각, COS 가수분해기, HCl, HCN, 암모니아 제거 공정 포함 비용

KRW 가스화기를 채용한 경우 생산 단가가 가장 낮게 나타난 것은 이 가스화기의 산화제로 공기를 사용하기 때문에 산소 플랜트 비용이 전혀 들지 않기 때문인 것으로 판단된다. KRW를 제외한 나머지 4가지(transport 가스화기 제외) 가스화기 모두 산화제로 공기를 사용한다.

또한 이 연구는 고온정제 공정과 고급형 가스터빈이 모두 실용화 단계에 있다는 것을 가정하고 성능 분석 및 경제성 분석을 실시하였기 때문에 저온정제를 적용하는 경우보다 고온정제를 적용하는 경우 총 투자비와 운전 유지비, 그리고 단위 전력 당 투자비가 더 낮음을 알 수 있다. 즉, 고온정제 공정과 고급형 가스터빈의 개발의 실용화를 담보로 한다면 IGCC 시스템은 성능 뿐 아니라 경제성 측면에서도 타 기술과 경쟁할 수 있는 잠재성을 가지고 있음을 알 수 있다.

이와 같이 다양한 조건의 가스화기에 저온 및 고온정제를 적용한 시스템 분석을 수행함으로써 향후 IGCC 개발 방향의 이정표를 제시할 수 있으며 실제 플랜트에서 행할 수 없는 다양한 분석을 시도함으로써 시행착오를 줄일 수 있음을 확인 할 수 있었다.

그러나 이 연구에서 중점적으로 수행된 경제성 분석은 미국의 경제성 분석 데이터를 기반으로 작성된 것으로 연료비, 이자율 등 제반 조건의 우리나라와 상이하다. 따라서 우리나라에서 각 기술을 객관적으로 경제성 측면에서 비교하고자 한다면 우리나라의 실정에 맞도록 입력 데이터를 재구성하여 분석할 필요가 있음을 간과해서는 안 될 것이다.

3. 결론

소프트웨어를 기반으로 한 자체적인 IGCC 시스템 설계 기술 개발로 기본적인 IGCC 시스템 설계 및 성능 해석과 최적화를 수행하였고 또한 IGCC 분야의 기술개발 흐름에 따라 시스템 설계 기술에서도 고온정제, 고온가스터빈 등을 적용한 새로운 IGCC 시스템 설계 및 성능 해석을 수행하였다. 이에는 고온가스터빈을 적용한 고급형 IGCC 시스템 Case Study 등이 포함되며 이는 IGCC 개발을 주도해 온 NETL(미국 에너지성 소속)에서 고온정제와 고온가스터빈을 적용한 시스템 개발로 향후 IGCC의 연구방향을 정의하고 있는 현실과 그 맥락을 같이 하고 있다. 이는 시스템 설계 연구 개발은 요소 기술 개발과 별도로 진행되는 연구가 아니라 모든 요소기술 개발의 축을 이루고 있으며 또한 각 요소 기술 개발과 같은 흐름을 타고 개발, 진보되고 있음을 또한 확인할 수 있는 결과이기도 하다. 청정석탄 발전기술(CCT)의 도입이 임박한 현실에 응용성이 매우 높은 시스템 설계 기술의 적용으로 최적화된 CCT 플랜트의 도입을 가능케 하고 새로운 기술의 도입에 수반되는 기술의 risk를 최소화하고자 한다. 또한 이와 같이 개발된 시스템 개발 기술은 IGCC에 국한된 것이 아니며 새로운 종류의 발전기술 대부분에 적용, 개발이 가능할 것이다.

또한 향후 다양한 기종의 고급형 가스터빈을 적용한 연구를 수행할 수 있을 것으로 기대되며 또한 고온정제 공정을 적용한 IGCC 시스템에서도 고온정제의 온도를 다양화함으로써 고온정제로 인한 IGCC 시스템의 이득을 분석해보고자 한다.

참 고 문 헌

1. "300MW IGCC 열성능 설계", 서석빈 외, 한전 전력연구원, 99전력연-단325, TM.97GJ17.P1999.317
2. "차세대 가스화복합발전 시스템 연구(I)", 서석빈 외, 한전 전력연구원, 한국에너지공학회, 2001, 추계 학술발표회 논문집 P.87~92
3. Process Engineering Division, System studies, PED-IGCC-98-001~006, from website <http://www.netl.doe.gov>, 2000 revision.