

제 4 장 석탄가스화기술

- 무산소 가열 - coal gas + coke
- 석탄내의 모든 유기물을 가연성기체로 바꾸는 것이 목적
- 석탄의 H/C가 증가하면 가스상태로 됨 (수소첨가반응)
 - 고체: 무연탄(0.34) → 역청탄(0.75) → 갈탄(0.87)
 - 액체: 벤젠(1) → 가솔린(1.78) → 이소옥탄(2.25)
 - 기체: 아세틸렌(1) → 부탄(2.5) → 메탄(4.0)
- 석탄가스의 평형 농도 : 교과서 표 3-8 & 그림 3-16

1. 가스화반응

- 건조: 건조석탄 + 수분
- 열분해: 건조석탄 → char + 휘발분 (H₂O, H₂, N₂, O₂, CO₂, CH₄, H₂S, NH₃, 타르)
- 가스화(>815°C):

C + H ₂ O = CO + H ₂	C + CO ₂ = 2CO
CO + H ₂ O = CO ₂ + H ₂	C + 2H ₂ = CH ₄
부반응: CO + 3H ₂ = CH ₄ + H ₂ O	
- 연소: C(char) + O₂ → CO₂ 회분 → slag → clinker

가. Char-Gas Reaction

- volumetric rxn(용적반응): 화학반응이 율속단계
- surface rxn (표면반응): 확산이 율속단계
- 탄소농도분포도: 표면반응 대 용적반응
- 기체농도분포도: 표면반응 대 용적반응
- 용적반응율 대 표면반응율
- shrinking core model

[알아보기 4-1] 용적반응과 표면반응에 관련된 율속단계에 대해 알아보고 각각에 대해 탄소 및 기체농도분포를 그려보시오.

나. Coal/Char-H₂ rxn: hydrogasification, hydrocarbonization

- $$C + 2H_2 = CH_4 \quad H_{298} = -74.8KJ/mol$$
- 수소화반응율은 느림

다. C-CO₂ rxn

- 화학반응이 율속단계
$$C + CO_2(g) = CO^* + CO(g) \quad : \quad CO^* \rightleftharpoons CO(g)$$
- 반응율: free active site + CO* = 일정 ; dCO*/dt = 0
- CO₂ 분압이 낮으면 1차반응, 높으면 0차반응

라. Char-O₂ rxn

- 가장 빠른 반응임
- $d < 50\mu\text{m}$: 화학반응이 율속; $d > 100\mu\text{m}$: 확산에 의해 율속

마. Coal/Char-H₂O rxn

- i) $\text{C} + \text{H}_2\text{O}(\text{g}) = \text{H}_2(\text{g}) + \text{CO}^*$: $\text{CO}^* \rightarrow \text{CO}(\text{g})$
- ii) $\text{C} + \text{H}_2\text{O}(\text{g}) = \text{H}_2(\text{g}) + \text{CO}^*$
 $\text{CO}^* \rightarrow \text{CO}(\text{g})$: $\text{CO}^* + \text{CO} = \text{CO}_2(\text{g}) + \text{C}$
- 반응율 계산방법

2. 가스화반응기

- Fixed bed, Fluidized bed, Entrained bed
- 고열량기체(35~38MJ/m³): CH₄ (90%이상), 천연가스 대체
- 중열량기체(10~20MJ/m³): CO + H₂, 연료가스
- 저열량기체(3.5~10MJ/m³): 수증기생산 및 전기발전용

가. 고정층가스로

- 입자(3~50mm)/ 단점: 작은 입자 사용불가/ 장점: 높은 열효율 (항류)
- Lurgi gasifier (수증기/산소 이용)

나. 유동층가스로

- 1921년 Winkler유동층 가스화로 : 합성가스제조에 이용, 대기압
- 장점: 열전달효과가 좋음, 높은 처리용량, 원하지 않는 화분의 용융물이 없음
- 단점: swelling이나 caking되는 석탄의 사용이 불가능
- 최적 입자크기: 8~200mesh(0.074~2.36mm)
- IGT사(U-Gas gasifier, Hygas gasifier); Westinghouse사

다. 비말동반가스로

- 입자 (75 μm)
- 고온: 고전환율, 거의 완전한 가스화, 산소소모가 큼, 높은 CO/CO₂ 비,
탄소전환율(90-100%)
- 장점: 공정 및 장치가 간단, 처리용량이 큼, 석탄종류에 무관
- 단점: 낮은 열효율(병류), 높은 배기가스온도(급냉이 필요), slag상태로 회재제거
- Kopper-Totzek가스로, Combustion Eng'g사, Foster Wheeler사

[알아보기 4-2] 다음은 석탄가스화발전에 대해 작성된 충남대학교 화공과 대학원생(이효송)의 에너지공학특론 기말보고서이다. 이를 읽고 석탄가스화발전의 중요성과 화학공학도가 공헌할 수 있는 요소기술에 대해 알아보시오. 또한 기말보고서 작성방법에 대해서도 주의깊게 검토해 보기 바랍니다.

석탄가스화복합발전 (IGCC)

1. 서론

에너지는 국가의 경제·사회발전과 국가목표를 달성하기 위한 기본요소로서 사회복지와 국가경쟁력을 향상시킴과 동시에 기간산업 육성을 위한 필수요소이다. 1990년 세계 전체 에너지 요구량의 3/4은 산업부문의 화석연료로 공급되었다. 하지만 화석에너지 사용으로 인한 이산화탄소의 배출량이 전체 이산화탄소의 14%를 차지할 정도로 급속한 에너지사용량의 증가와 더불어 환경오염도 심각해지고 있으며, 이를 극복하기 위한 기술의 개발은 중요한 위치를 차지해오고 있으며 대체연료 개발이나 에너지효율 향상 등이 주요한 수단으로 이용되고 있다. 특히 근래에 전세계적으로 관심이 되고 있는 지구환경 보호와 연계된 새로운 세계 무역질서의 생성은 수출증대를 정책으로 삼고 있는 우리로서는 해결하기에 매우 어려운 과제로 적극적인 대책의 수립이 강구되어야 한다. 이미 선진국에서는 공해물질을 배출하지 않는 청정 연료로의 전환기술의 개발이나 공정효율의 향상과 연소기의 개량을 통하여, 산성비의 원인을 제거하고 이산화탄소의 절대배출량을 감소시키려는 연구가 활발히 진행되고 있다.

최근 수 십년간 편리한 에너지원으로서 사용되고 있는 석유에 비하여, 석탄은 매장량이 풍부하고 부존 지역도 고르게 분포되어 있어 공급의 안정성이 높다. 화석 에너지원의 매장량을 Table. 1에 나타내었다.

Table 2. 화석 에너지원의 매장량

구 분	석 유	석 탄	천연 가스	합 계
이용가능 매장량(A)	1,350	6,800	970	39,370
'96년 기준 생산량(B)	33.128	22.57	19.716	75.41
이용가능 년수(A/B)	40.8년	301.3년	49.2년	121년

한편, 세계적인 지구 환경보전 및 오염 규제강화 추세에 따라 우리 나라도 대기오염물질의 배출허용기준이 강화될 예정이므로 신규 화력발전소 뿐 아니라 기존의 미분탄 발전소에도 배연탈황장치(FGD : Flue Gas Desulfurization)의 추가설치가 요구되는바 이에 따른 추가설비 투자비 및 열효율 저하는 발전원가에 커다란 상승요인이 된다. 또한 배출허용기준을 초과한 사업자에게 그 처리비용에 상당하는 경제적 부담을 주어서 배출허용기준 준수를 확

보하기 위한 배출 부과금 제도를 눈앞에 두고 있는 실정이다. 주요 배출 허용 기준과 배출 부과금 부과대상 오염물질을 Table.2 와 Table.3에 나타내었다.

Table 3. 화석 에너지원의 매장량

구 분	석 유	석 탄	천연 가스	합 계
이용가능 매장량(A)	1,350	6,800	970	39,370
'96년 기준 생산량(B)	33.128	22.57	19.716	75.41
이용가능 년수(A/B)	40.8년	301.3년	49.2년	121년

Table 3. 배출 부과금 부과대상 오염물질

분 야 별	오 염 물 질
대기 분야 (10)	황산화물, 불소화합물, 먼지, 악취, 염화수소, 염소, 시안화수소, 암모니아, 황화수소, 이황화탄소
수질 분야 (17)	유기물질, 부유물질, 카드뮴 및 그 화합물, 시안화합물, 유기인 화합물, 납 및 그 화합물, 6가크롬 화합물, 비소 및 그 화합물, 수은 및 그 화합물, PCB, 구리 및 그 화합물, 크롬 및 그 화합물, 페놀류, 테트라 클로로에틸렌, 트리 클로로에틸렌, 망간 및 그 화합물, 아연 및 그 화합물
축산 폐수 분야 (2)	유기물질, 부유물질

이러한 여건 변화에 대처할 수 있는 새로운 석탄 이용기술 중 석탄가스화 복합발전(IGCC : Integrated coal Gasification Combined Cycle)방식은 환경보전성이 매우 우수하여 향후 강화될 대기오염물질 배출 기준에 용이하게 대처할 수 있다. 또한 기존의 미분탄 연소 발전 방식에 비해 발전효율이 5~10%이상 높고, 공해물질 배출 특성에 있어서도 SOx와 NOx를 각각 95% 및 75% 이상 감소시키고 회분은 용융 슬래그 형태로 처리한다.

2. 석탄가스화 복합발전의 개요 ^{1), 2), 3)}

석탄가스화 복합발전(IGCC : Integrated coal Gasification Combined Cycle)은 석탄을 가스화하여 정제한 가스 연료로 가스터빈을 구동하고 그 배열을 이용하여 증기터빈에서 다시 발전하는 복합발전시스템으로 석탄 전처리 설비, 석탄가스화 설비, 가스정제 설비(탈황, 탈진), 복합발전 설비(가스터빈, 배열회수설비, 증기터빈 등)가 주된 구성설비이다.

석탄가스화 복합발전의 조업과정은 원료석탄을 분쇄한 후 가스화제(증기, 산소 또는 공기)와 함께 가스화로에 공급하여 가연성가스(주성분 CO, H₂)를 생성하고, 가스냉각기에서 가스를 냉각하고 분진과 유황산화물(H₂S, COS) 등을 가스정제장치에서 제거한 후, 가스터빈연료로 사용하여 발전하며 가스터빈의 배열을 배열회수장치에서 회수하여 가스냉각기로부터 회수된 증기와 함께 증기터빈에 보내 발전에 이용된다. IGCC방식은 구성요소 중 석탄가스화로, 가스정제장치 및 가스터빈 등의 성능을 향상시킴으로써 높은 열효율(43~46%)을 달성할 수 있다. 석탄가스화로의 방식으로는 탄중적합성과 설비운용성이 뛰어난 분류층 방식이 가장 적합하며, 경제성 측면에서는 가스화제로 산소보다 공기의 사용이 유리하나, 장치가 대형화되고, 발생가스의 발열량이 낮은 단점이 있다.

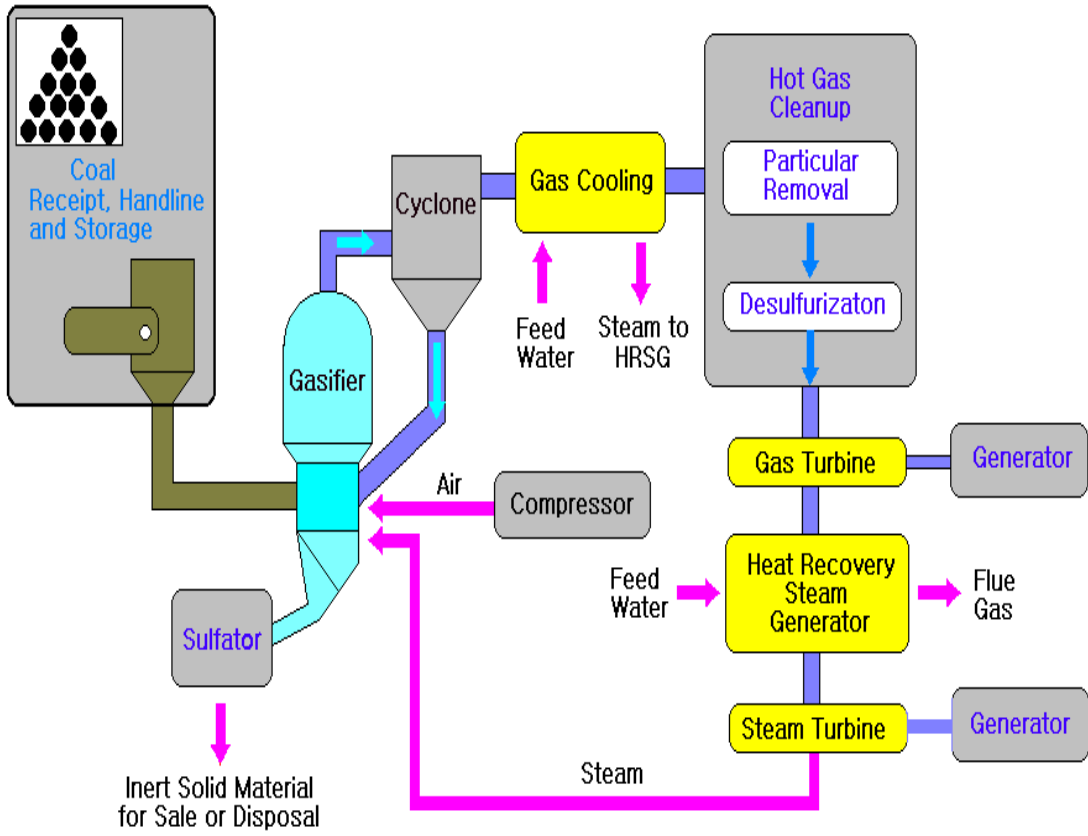


Figure 1. 석탄가스화 복합발전 플랜트 개념도

석탄 공급방식은 건식 미분탄방식이 열효율 면에서 유리하나 기기의 신뢰성 면에서는 습식보다 다소 불리한 것으로 평가되고 있다. 가스정제방식은 습식이 상용화되어 있으나 열효율 향상을 위하여 고온 건식방식이 개발 중에 있다. 석탄 특성이 가스화에 미치는 영향을 Table. 4에 나타내었다.

Table 4. 석탄 특성이 가스화에 미치는 영향 ⁴⁾

검토 항목	석탄 가스화에 미치는 영향	
	습식 연료공급 가스화기	건식 연료공급 가스화기
발 열 량	<ul style="list-style-type: none"> - 발열량이 높은 탄일수록 고정탄소의 함량이 높으며 양질의 연료 가스 생산이 가능하지만, 가스화 반응성이 낮은 편임 - 반면 연료소모량을 상대적으로 줄일 수 있으므로 하부공정의 설비규모를 축소시킬 수 있음 	
고정 탄소	<ul style="list-style-type: none"> - 고정탄소의 비율은 석탄의 등급이 높을수록 증가하며 가스화 반응시 상대적으로 많은 양의 산소가 요구됨 - 또한 고정탄소의 비율이 과다할 경우에는 가스화 반응속도에 영향을 미치므로 가스화기의 규모에 영향을 미침 - 반면 가스화 반응 후 양질의 가스를 발생시킬 수 있음 	
휘 발 분	<ul style="list-style-type: none"> - 휘발분 함량이 높을수록 착화성이 우수하고 가스화 반응성을 증가시킴 - 일부 가스화기(고정층)에서는 휘발분이 과다할 경우 발생가스 중에 타르 및 유분의 생성 가능성이 높아지는 점이 있음 	
회 분	- 가스화기의 용량과 효율에 제한을 줌	- 가스화기 용량과 효율에 큰 영향을 미치지 않음
	<ul style="list-style-type: none"> - 회분함량의 과다 시 착화성 및 분쇄도에 영향을 미침 - Fe₂O₃ 및 CaO, MgO 등의 Basic Compound 함량이 높을수록 낮은 슬래깅 온도를 유지할 수 있음 	
수분 함량	- 수분함량의 과다 시 슬러리 농도에 영향을 미침	- 일정한 수분함량을 유지하기 위한 건조열원이 필요하게 됨
	<ul style="list-style-type: none"> - 고유수분의 함량이 높을수록 착화성이 떨어짐 	
회 분 용융 온도	<ul style="list-style-type: none"> - 대부분의 분류층 가스화기는 운전온도를 높게 유지하여 회분을 용융 슬래그의 형태로 처리하므로 용융온도가 낮은 탄일수록 가스화에 유리 - 특히 회분의 슬래깅 성향은 탄종의 선정에 있어서 매우 중요한 요소로 작용함 - 가스화기의 신뢰도에 큰 영향을 미침 	
O/C비율	<ul style="list-style-type: none"> - O/C 함량이 높은 석탄일수록 공급 산화제의 양을 줄일 수 있으며, 동일한 발열량을 가진 탄의 경우에 이 양을 감안하여 적용하는 것이 유리함 	

3. 석탄가스화 공정

3-1. 기본반응^{1), 3), 8)}

석탄가스화 반응의 주 반응을 살펴보면 아래와 같다.



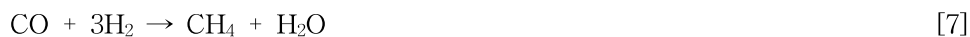
이 반응은 발열반응으로서 C의 반응은 CO로 그치지 않고 다른 자유산소들이 급속히 가스상의 CO와 반응하여 CO₂가 된다.



반응[3]은 흡열반응으로서 에너지를 사용하기 때문에 반응[1]에 의존하며, [1]에 비해 매우 느리다. 그렇지만 생성가스의 발열량은 증가한다. 대표적인 고휘발분 유연탄을 대상으로 실험한 결과, 평형온도는 산소량 증가와 함께 상승하고 증기량 증가에 따라 감소한다. 또한 최대 냉가스효율의 궤적도 나타나 있는데 냉가스효율이란 대기온도에서의 생성가스 발열량의 무수 무회 기준 석탄 발열량에 대한 비율이다. 이 냉가스효율은 증기량의 증가와 함께 상승하고 산소량 증가에 따라 감소한다. 그러므로 가스화 공정의 개발 시에는 화염안정과 탄소 전환에 충분한 반응온도 유지와 가능한 한 최대의 냉가스효율간 균형이 달성되어야 한다.



반응[4]는 산소를 급속히 소비하여 가스온도를 상승시키고 느린 고체상의 C와 CO₂ 반응요건을 조성한다. 반응[5]는 가벼운 발열성의 water-gas shift 반응으로서 CO로부터 CO₂를 생성하며 최종생성물 조성을 조절하는데 기여한다.



일부 가스화 공정에서는 메탄의 생성량을 증대시키기 위해 수소를 반응물로 투입한다, 그러나 수소의 생산비가 높으므로 실제적인 가스화 공정에서는 통상 사용하지 않는다.

3-2. 가스화로의 형태와 특징^{1), 2), 4)}

가스화로는 bed의 형태에 따라서 고정층(fixed bed), 유동층(fluidized bed) 및 분류층(entrained bed)으로 구분할 수 있다. 또한 공기주입 방식(air-blown)과 산소주입 방식

(oxygen-blown)가스화로 구분된다. 공기주입방식은 생성가스 중에 다량의 질소가 함유되어 저열량 가스라 하고 주로 산업용 연료로 사용되며, 산소주입방식은 열량이 높아 중열량 가스라 하고 화학공업의 합성가스원료 또는 SNG 및 복합발전 연료로 사용된다.

3-2-1. 고정층

석탄이 상부로 공급되어 중력에 의해 천천히 하강하면서 가스화 반응을 거친 후 하부에서 공급되는 가스화제는 배출되는 회분의 고온열을 회수한 후 연료와 반대방향으로 상승하면서 가스화 반응을 한다. 장점은 가스화로 내의 석탄과 가스간의 향류 흐름으로 직접 접촉에 의한 열교환으로 열손실이 최소화되고, 체류시간이 길어 탄소 전환율이 높은 점이다. 단점은 탄종의 제한성이 있으며, 점결성이 높은 탄인 경우 교반기를 부착하거나 산화처리와 같은 전처리 과정을 거친 후 연료를 공급해야 한다.

3-2-2. 유동층

하부에서 주입되는 가스화제의 속도를 이용하여 석탄 입자를 유동화 상태에서 가스화 하는 것으로 석탄을 상부에서 공급하는 방식과 하부에서 공급하는 방식이 있다. 장점은 가스와 입자의 혼합 및 접촉이 용이하여 층 내의 온도분포가 균일하고 온도평형이 빨리 이루어진다. 단점은 점결성이 높은 탄을 사용할 때 응집에 의한 유동화의 저해와 탄화에 의한 문제점이 발생되어 산화처리와 같은 전처리 과정을 거친 후 사용해야 하며, bottom ash와 fly ash에 다량의 미 반응 탄소분이 함유되어 탄소 전환율이 낮은 점이다.

3-2-3. 분류층

석탄을 미분하여 산화제와 함께 상부 또는 하부에 위치한 버너 노즐을 통해 공급한다. 공급형태는 미분탄을 압축공기로 분사하는 방법과 슬러리 형태로 주입하는 방법이 있다. 장점은 연료탄의 사용범위가 넓고, 대용량화가 가능하여 발전용으로 좋은 평가를 받고 있다. 그러나 연료와 가스가 동일방향으로 공급되며, 고온출구가스의 냉각 시 부수적인 에너지 손실이 발생하는 단점이 있으며, 특히 고온에서 반응하므로 슬래그의 배출성, 가스화로의 재료선정과 이에 따른 기술 등이 고려되어야 한다.

3-3. 석탄의 가스화와 직접연소의 비교^{1), 2), 3), 4)}

가스화제로 산소를 주입하는 유동층 또는 분류층 가스화를 직접연소와 비교했을 때 중요한 차이점은 다음과 같다. Table. 5에 석탄의 직접연소와 가스화를 비교하였다.

- ① 질소에 의한 회석이 없으므로 최고 가스화 온도가 높다. 그러므로 가스화 시 최고 온도의 강한 영향을 받는 석탄의 탈 휘발도가 높으며, 전체 석탄의 80%(daf)에 달하기도 한다.
- ② 이러한 휘발성 생성물은 가스상의 산소와 급속히 혼합 및 반응하여 산소를 완전히 소비시키면서 고온을 발생하여 탈 휘발도의 증가를 가져온다. 이 가스 상 반응과정에서 높은 CO₂ 농도와 H₂O 농도의 증가가 나타난다.

- ③ 잔류 char도 CO₂와 증기에 의해 속도가 느린 고체-기체 반응을 한다. 이 과정은 고온에서 빨라지지만 직접연소시의 O₂-char 반응에 비교할 때 느린 편이다.

Table 5. 석탄의 직접연소와 가스화 비교⁴⁾

비교항목	석탄직접연소	석탄가스화
운전온도	낮음	높음
운전압력	보통 상압	보통 고압
회배출성상	주로 ash	주로 slagging
산화제	공기	증기, 산소, 공기
생성가스	CO ₂ , H ₂ O	CO, H ₂ , CH ₄ , CO ₂ , H ₂ O
가스정제	연소후 배가스 정제	연료가스 정제
공해물질	SO ₂ , NO _x	H ₂ S, HCN, NH ₃
최 반응율	빠름	늦음
산화제공급	과잉	부족
타르 생성	없음	생성 경우 있음
목적	고온가스	Fuel-rich 가스

3-4. 주요 분류층 석탄가스화 공정^{1), 2), 4)}

석탄가스화 복합발전의 핵심기술인 석탄가스화 공정 중 가압 분류층 석탄가스화 공정은 가스화 온도와 압력(1,200~1,700℃, 20kg/cm²이상)이 높아, 탄소 전환율(90~98%)이 높고, 타르와 오일이 생성되지 않고, 회를 용융처리하며, 탄종 적합성이 매우 우수한 방식이다. 또한, 연료가스의 온도가 매우 높아 많은 열량이 증기상태로 회수되므로 발전용으로 적합하며, 탄종적합성, 부하추종성 및 대용량화, 운용성 등에 유리하다. 분류층 가스화 공정에는 석탄의 공급방식(건식 및 습식)과 가스화로 운전조건(가압 및 상압), 산화제(공기 및 산소)의 종류에 따라 각각 독측한 기술 및 발전방식을 가지고 있다. 현재 전 세계적으로 기술이 개발되고 있는 주요 분류층 석탄가스화 공정에 대해 살펴보면 다음과 같다.

- ① Texaco(미국)
- ② Krupp-Koppers(독일)
- ③ Shell(네덜란드)
- ④ CRIEPI & ABB CE

3-4-1. Texaco 공정 : 습식, 산소 분류층

가장 상업화 단계에 근접한 석탄가스화 기술로 40년의 역사를 갖고 있으며, 미국 L.A에 위치한 Texaco Syngas Inc. 부설 몬테벨로 연구실은 1948년부터 석탄, 석유 코크스 등을 원료로 하여 합성가스 제조에 관해 연구하고 있으며, 분류층 형식의 Texaco 석탄가스화 공정을 개발하였다.

몬테벨로 연구실에는 압력이 350~1,200psi인 석탄처리능력 20T/D규모의 가스화로 2기와 압력 1,200psi, 50T/D의 가스화로 1기가 설치되어 있으며, 탄종에 따른 석탄가스화 반응성 또는 가스공급 조건 등의 상업화공정에 필요한 실험자료를 도출하기 위해 고압하에서 가스화 실험을 수행하고 있다.

3-4-2. Krupp-Koppers 공정 : 건식, 산소 분류층

Krupp Koppers GmbH의 본사는 독일의 에센에 위치하고 있으며, 1941년 상업용 산소 분류층 가스화 기술인 Koppers-Totzek 공정을 개발하여, 1950년에 상업화 플랜트를 건설한 바 있다.

1973년에 PRENFLO(Pressurized Entrained Flow) 공정개발이 착수되었으며, 1976년에 Shell사와 공동으로 석탄가스화 장치를 개발하여 1978~1981년에 150T/D 규모의 Shell-Koppers 플랜트를 Harburg에 건설한 바 있다.

3-4-3. Shell : 건식, 산소 분류층

Shell사는 1972년부터 본격적으로 석탄가스화 기술개발에 착수하여, 암스테르담의 Royal Dutch/Shell연구소에서 6T/D 공정개발장치를 제작하였으며, 현재에도 이 설비를 이용하여 계속 연구를 하고 있다. 1978년 Krupp-Koppers와 공동으로 독일 Harburg의 Deutsche 정유 공장 부근에 150T/D 규모 석탄가스화 파일롯 플랜트를 건설하여 1983년까지 시험가동에 성공한 바 있으며, EPRI의 연구자금으로 1985년 미국 Houston의 Deer Park에 250~400T/D 규모의 실증플랜트를 건설하여 1987년부터 시험가동하고 있다.

3-4-3. CRIEPI & ABB CE : 건식, 공기 분류층

분류층 방식의 석탄가스화기술을 개발하기 위하여 일본은 '82년부터 전력중앙연구소(CRIEPI)와 미쓰비시 중공업이 공동연구로 CRIEPI의 요코스카 연구소 구내에 2.4T/D 건식, 가압공기 분류층 실험장치를 건설하여 계속 실험연구 중이다.

특기할 사항은 기존 상업화 기술이 대부분 건식 및 습식 산소 분류층인데 비해, 일본은 CE의 건식, 상압, 공기 분류층 방식을 도입하여 이를 가압 방식으로 개선한 건식, 가압, 공기 분류층 공정을 개발하였다.

Table. 6에 가스화 공정별 계통구성 특성을 나타내었다.

Table 7. 가스화 공정별 계통구성 특성 ⁴⁾

구 분	검토 항목	Shell 공정	Texco 공정	Destec 공정	PRENFLO공정
석 탄 전처리 설 비	-석탄공급 방법 -건조용 열원 -석탄 공급설비	-건식 -가스발생기 및 N ₂ 가스 -Lockhopper 공급설비	-습식 -No -가압 용적펌프	-습식 -No -가압 용적펌프	-건식 -가스발생기 및 N ₂ 가스 -Lockhopper 공 급설비
가스화기	-가스화기 단수 -슬래그 처리 -사스냉각 여부 -최의 재순환여부 -산소요구량 -버너의 위치 -벽온도 보호방식 -가스흐름의 방향	-1단 -주기적 -재순환가스 -Optionable -낮음 -측면(양방향) -수냉벽 -상향	-1단 -주기적 -No -Optionable -높음 -상부 -내화벽 -하향	-2단 -연속적 -No -Yes -보통 -1단 측면, 2단 측면 -내화벽 -상향	-1단 -주기적 -재순환가스 -Optionable -낮음 -측면 -수냉벽 -상향
고온가스 냉각기	-복사형 냉각기 -대류형 냉각기 -냉각원 -발생증기의 질	-No -Yes -고압급수 -중압 및 고 압 포화증기	-Yes -Yes -고압급수 -고압포화증기	-No -Yes -고압급수 -중압 및 고압 포화증기	-No -Yes -고 압 급 수 Clean 가스 -중압 및 고압 포화증기
고체입자 처리설비	-설비형식	- Ceramic Candle Filter	-Cyclone & Wet Scrubber	- Ceramic Candle Filter, Wet Scrubber	- Ceramic Candle Filter
탈황 및 유황회수 설 비	-탈황설비 형식 -유황회수설비 형 식 -잔류가스처리형 식	-Sulfinol -Claus -Scot	-Optionable	-Optionable	-Optionable
운전실적	-입증설비 -운전현황	-Demkolec (250MW) -1993년말 운 전개시 -현재 입증 시험중임	-Polk Power (236MW) -1996년 운전 개시 -현재 Start up 단계	-W a b a s h (238MW) -1995년 운전 개시 -Repowering 플랜트임 -현재 입증시험 중임	-Puertollano (300MW) - P h a s e d Construction -현재 복합발전 설비운전중 -1997.7 가스화 플랜트 운전예 정

4. 석탄가스 정제과정 ^{1), 2), 3), 4), 7)}

4-1. 생성가스 중의 불순물

생성된 석탄가스 중의 주요 불순물은 유황, 질소의 화합물과 석탄회 성분이다. 석탄회의 주요 구성성분은 실리카, 알루미나, 칼슘, 마그네슘, 티타늄, 나트륨 및 칼륨이며, 미량원소의 함량은 0.1% 이하로 간주된다. 또한 가스화기에서 응축성 탄화수소(타르 및 오일)가 발생되어 사용하기 전에 제거할 필요가 있는 경우도 있다. Table. 6에 가스화기 종류별 생성 불순물을 나타내었다.

Table 8. 가스화기 종류별 생성 불순물 ⁴⁾

구 분	분류층 가스화기	유동층 가스화기	이동층 가스화기
석탄가스온도(°C)	1,350 ~ 1,650	약 1,000	500 ~ 600
산 성 가 스	H ₂ S, COS, CS ₂	H ₂ S, COS, CS ₂	H ₂ S, COS, CS ₂
질소함유 가스	NH ₃ , HCN	NH ₃ , HCN	NH ₃ , HCN
알칼리, 중금속	발생	발생	발생
미 세 먼 지	비산회, Slag	비산회	회, Coal dust
중탄소화합물	없음	없거나 매우 낮음	Oil, Tar, Phenols 등

4-1-1. 분진

고정층 가스화로의 생성가스 중 분진 발생량은 유동층 및 분류층보다 적으며 보통 5~6g/Nm³ 정도이다. 유동층과 분류층 가스화로에서의 분진 발생량은 가스화의 심도에 따라 크게 변화한다. 분류층 가스화로는 미분도가 200mesh, 통과율 90%인 미분탄 공급시 미정제 생성가스 중에 20~80g/Nm³의 분진이 함유된다.

4-1-2. 응축성 탄화수소

생성가스 중의 tar 등 응축성 탄화수소의 형태와 양은 가스화로 종류, 공급탄종 및 가스화로 운전조건에 크게 영향을 받는다. 중요한 운전변수는 접촉시간, 접촉형태, 운전압력과 함께 가장 영향이 큰 운전온도 및 열분해 시 가열속도이다. 가스화 온도를 올리면 탄화수소가 hydrocracking반응으로 light oil이 되며, 고온가스화로에서는 이 oil도 가스 상으로 분해된다. 고정층 및 유동층 가스화 반응시에는 응축성 탄화수소의 생성량이 많아 회수처리의 문제가 있으나 분류층 가스화시는 고온 반응이므로 응축성 탄화수소의 발생을 억제할 수 있다.

4-1-3. 유황화합물

잔류 char가 없는 형태의 분류층 가스화로에서는 공급석탄 중 유황성분의 대부분이 생성 가스에 함유된다. 하부 ash/slag 중이나 상부 배출 분진 중에는 유황함량이 거의 없다. 일반적으로 석탄 중 유황의 대부분은 H₂S로 전환되며, COS형태로도 상당량 발생한다. H₂S와 COS의 상대적 발생량은 가스화로 운전조건의 함수이다. 즉 mercaptan, thiophene 및 sulfide 등 미량성분의 생성은 석탄가열속도, 접촉시간, 로형태 및 접촉조건에 따라 영향을 받는다. H₂S와 COS의 분포는 최종적으로 COS의 hydrolysis평형과 관련이 있다. 조건에 따라서는 유황성분의 10%가 COS로 전환되기도 한다. COS는 수용성이 낮기 때문에 wet scrubbing으로 제거할 수 없다. 상대적으로 타르와 오일을 많이 생성하는 가스화 공정에서는 마찬가지로 생성가스 중에 고 분자량의 유기적 황 화합물이 많이 발생하는 것으로 보여진다.

4-1-4. 질소화합물

Lurgi 가스화로에서는 공급석탄에 함유된 질소의 50~70%가 NH₃ 형태로 응축되고 30~50%가 N₂ 가스형태로 생성가스에 포함된다. 응축 타르와 오일에는 2~3%의 석탄함유질소가 포함되며 하부 ash 중에는 석탄함유질소가 거의 없다. 유동층 가스화로에서도 석탄함유질소가 탄소보다 앞서 가스화 된다. Hy-gas 반응로에서는 석탄함유 질소 중 30~70%가 응축수 중에서 용해되며, synthane 가스화로에서는 60~70%의 석탄층 질소가 NH₃로 전환됨이 보고되고 있다. 나머지 질소는 char나 생성가스 중에서 주로 N₂형태로 존재하는 것으로 보여진다. 보통 NH₃와 HCN이 생성된 합성가스에 존재하며 이들은 수용성이므로 대부분이 wet scrubbing 단계에서 제거된다. Hydrogen cyanide는 높은 NH₃의 분압, 긴 접촉시간 및 고온에 크게 영향을 받지만 증기 농도가 증가하면 크게 억제된다. Lurgi 가스화로에서는 생성가스 중 5~50ppm이 발생되며, 응축수 중에는 중량으로 5~40ppm의 CN과 5~200ppm의 CHS가 응축됨이 보고되고 있다.

4-2. 분진제거 공정

가스정제과정 중 탈황의 이전 공정으로 채택되는 분진제거 공정은 생성가스 중의 미립자를 가스 터빈의 운전시 마모를 최소화할 수 있는 10mg/Sm³ 이하로 유지하는데 필요한 공정이다. IGCC에서 발생하는 가스에는 대개2~20 μ m의 입자가 20~80g/Sm³로 분포될 것으로 예상된다. 이를 300~500℃와 5~30atm의 고온·고압에서 제거시키기 위하여 현재 전기 집진기, 입자층 여과기, 금속 소결 여과기, 그리고 세라믹 여과기 등이 사용되고 있다. 특징을 살펴보면 전기 집진식은 운전비가 저렴한 반면 집진 효율이 낮고, 고온에 의한 전극의 영향이 크다. 입자층 여과기는 구조가 간단한 반면 효율이 낮고 세정이 어려운 것이 단점이다. 금 소결 여과기는 분진제거 효율이 높으나 금속의 부식성과 초기의 비용이 높고 운전 중 소재구조와 소결 부분의 파괴 등의 문제점이 지적되고 있다. 그리고 세라믹 여과기는 집진 효율이 높고 구조가 간단하며, 설치비가 적게드는 반면 재료의 파괴에 대한 세심한 기술이 요구된다. 고온의 여과기로 사용되는 세라믹은 실리카 산화알루미늄 및 탄화규소 등으로 제작되고 있다. 그리고 여과기의 형태로는 입자형, 미세섬유형 그리고 이들의 복합형으로 제조될

수 있는 등 용도와 조건에 따라 그 활용성이 넓다. 금속 소결 여과기의 소재는 스텐레스강, hastalloy, inconel, nicrome 및 driver harris 합금 등이며, 소재에 따라 900℃까지 운전이 가능하다. 최근에는 금속의 부식성을 고려하여 산화금속으로 만든 여과포의 개발도 진행되고 있다.

Ceramic porous filter 방식은 일본 중앙전력연구소와 미국의 Westing-House에서 가스화 발전에 적용하여 500℃ 이상 10atm 이상에서 3,000m³/hr까지 운전한 사례가 있다.

4-3. 황 화합물 제거 공정

중래의 석유화학공업 및 천연가스공업의 경우 생성된 황 화합물을 제거하기 위하여 120℃ 이하의 습식 탈황공정을 사용하였다. 그러나 이와 같은 습식 공정의 경우 석탄가스화로에서 생성된 고온의 석탄가스를 정제하기 위하여 저온으로 냉각시켜야 하므로 IGCC의 경우 발전 열효율이 낮게 된다는 점에서 고온·건식 탈황공정에 대하여 활발한 연구가 진행되고 있다.

4-3-1. 습식 탈황법

습식 탈황법은 공통적으로 생성가스를 먼저 수 냉각 처리하므로 HCl이나 Cl₂, HCN, 암모니아 등의 불순물을 제거할 수 있는 장점을 지니고 있으나, IGCC의 경우 열효율 감소라는 단점으로도 작용하게 된다. 현재 개발된 공정은 크게 화학 흡수법, 물리적 흡수법, 혼합법, 상온 고체 흡착법으로 구분된다.

- ① 화학 흡수법 : 화학흡수 공정은 가스 중 CO₂, H₂S와 같은 산성가스와 화학적으로 반응이 일어나는 흡수액을 사용하여 산성가스를 제거한 후 온도 압력 변화 과정을 통하여 가역반응에서 흡수액을 재생하는 방법으로, 물리적 흡수법에 비하여 CH₄, H₂, 고분자 탄화수소 등의 유용한 기체가 소모되는 것을 막을 수 있고, 고효율의 정제를 할 수 있으며, 용제의 가격이 저렴하다는 장점이 있다.
- ② 물리적 흡수법 : 물리적 흡수법은 고압상태에서 산성가스가 유기용제에 물리적으로 용해하는 성질을 이용한 것으로 산성가스의 분압이 높거나 많은 양의 산성가스를 처리하는데 유효한 공정이다. 흡수액의 흡수능력이 우수하여 용매 순환량이 적으며, 압력 강하를 통하여 재생이 이루어지므로 재생을 위하여 낮은 에너지가 사용되고, H₂S의 선택적인 흡수가 가능하다는 장점이 있다. 그러나 화학흡수에 비하여 유효한 석탄가스의 많은 소모도 동반되며, 고농도의 용제를 사용하므로 용제의 가격이 비싸다는 단점이 있다. 상업적으로는 selexol, fluor solvent, purisol과 rectisol 공정이 개발되어 있다.
- ③ 혼합법 : 혼합법은 화학 흡수법의 장점과 물리적 흡수법의 장점을 취하기 위하여 개발된 공정으로, 산성가스의 분압이 낮을 때는 화학흡수제가 작용하고, 산성가스의 분압이 높을 경우에는 물리적용제로 작용하는 특성을 지니고 있다. 또한 용액의 열화 없이 COS, CO₂, mercaptane의 제거에도 우수한 성능을 발휘하였다.
- ④ 상온 고체 흡착법 : 고체 흡착제를 사용하여 산성기체를 제거하는 공정은 처리할 기체의 양이 많고 농도가 높은 경우에는 상대적으로 비경제적이다. 그러나 H₂S만을 선택적으로 제거할 수 있고, mercaptan 같은 화합물도 제거할 수 있으며 처리 수준이 수 ppm 이하로 아주 우수하므로 다른 정제 공정을 일차로 거친 가스에 대한 최종적인

polishing공정으로서 사용 가능성 여부에 대한 검토가 계속되고 있다.

- ⑤ 직접 전환 공정 : 미 정제가스 중의 황 화합물만을 선택적으로 화학 용매에 흡수시키고, 흡수된 황화물을 액상에서 직접 원소형태의 황으로 변환시키는 공정으로 가스의 압력이 매우 낮은 경우에 적합하다.

4-3-2. 고온·건식 탈황법

고체상의 탈황제에 300℃ 이상의 고온 가스를 접촉시켜 가스 중의 유황화합물을 탈황제에 흡착시켜 제거하는 방법이다. 흡착된 탈황제는 공기, 증기 탄산가스 등으로 재생되며, 재생시 배출되는 유황화합물은 유황이나 유산으로 변화시켜 회수한다. 전체 탈황공정은 흡수장치, 재생장치, 유황처리장치로 구성되며, 고정층, 이동층, 유동층 또는 honeycomb형 등 특수한 형태가 채용되고 있다. 크게는 고정 탈황제 사용공정과 용융 탈황제 사용공정 및 노내 직접 탈황공정으로 나눌 수 있다.

- ① 고정 탈황제 사용공정 : 고정 탈황제는 칼슘계, 철계, 동계, 아연계, 기타 고체계로 분류가 가능하다. 각 탈황제에 따라서 최적운전온도에 차이가 나타나며, 재생 이용에 의한 물리적 강도 저하, 마모, 활성열화현상이 발생하므로 탈황능력과 함께 재생능력도 고려한 탈황제 선정이 요구된다.
- ② 용융 탈황제 사용공정 : Li, Na, K의 용융염 계열이나 용융납을 탈황제로 사용하였고, 수증기나 CO₂를 사용하여 H₂S형태로 재생하여 재생 공정이 덜 복잡하며 염소화합물도 제거할 수 있는 특징이 있다. 그러나 탈황제의 부식성이 격심하여 특수한 장치 재료가 필요하고 탈황제 취급에 어려움이 많으며, 정제가스 중에 Na와 K 등의 알칼리 금속이 동반되므로 이의 완전한 제거가 요구된다. 공간 속도가 매우 낮아 처리용량이 한정되고 탈황제의 수명이 짧은 점도 고려사항이다.
- ③ 노내 직접 탈황공정 : 석탄가스화로 내에 탈황제를 함께 투입하여 석탄의 가스화와 함께 탈황을 이루는 공정으로 탈황제는 가격이 싸고 최종 생성물이 무해하여야 한다는 조건을 만족시켜야 한다. 이러한 조건을 만족하는 물질로 석회석, 백운석, Na₂CO₃, K₂CO₃ 등이 사용되며, 이 물질들은 탈황과 아울러 석탄가스화 반응에 촉매작용을 하므로 석탄가스화 공정에 유용하게 된다.

H₂S 이외의 유황화합물은 탈황제의 촉매작용으로 H₂S로 신속히 변환되어 전체 탈황공정을 H₂S의 제거공정으로 볼 수 있다.

4-4. 가스터빈과 스팀터빈을 이용한 발전 ^{1), 2), 7), 9)}

가스터빈 시스템에서는 대기 중의 공기를 유입하여 압축기에서 가압한 후 연소기로 압축된 공기를 보내고, 연소기로 보내진 공기는 연료와 반응하여 고온/고압의 연소 공기를 생성한다. 연소가스는 팽창과정을 통한 유속의 증가를 수반하여 발전을 한다. 가스터빈 시스템의 배기가스는 포화증기를 생산하는데 필요한 열원으로 사용되며, 발생된 증기는 다시 스팀터빈의 발전에 이용되어 복합발전을 하게된다.

산소공급 분류층 가스화기에서 생산되는 석탄가스의 발열량은 체적기준으로 천연가스에 비해 약 1/4이다. 석탄가스에는 회석제를 넣어 발열량을 낮춤으로서 화염온도와 NO_x배출을

저감한다. 가스터빈에서 공기추출의 장점은 다음과 같다.

- 압축공기 추출은 가스터빈이 당초 설계연료 사용시의 질량유량으로 운전될 수 있게 한다.
- ASU의 보충용 공기압축기 규모가 축소되므로 ASU의 비용이 절감된다.
이에 대한 단점은 다음과 같다.
- 전체적인 IGCC의 설계 및 운전이 공기추출 및 열회수 통합설계에 따라 복잡해진다.
- 낮은 추출률(20%이하)에서는 ASU 보충용 공기압축기 비용감소분이 공기추출 관련 시설 및 배관 소요비용보다 작게 된다.

4-5. IGCC 공정평가 ^{2), 3), 7), 9)}

IGCC 공정평가의 경우에는 경제성, 환경친화성, 운전특성 등 여러 가지 요인을 감안하여야 하고, 이 요인간의 중요도 결정에 가치판단이 개입되며, 여러 전문가 집단의 식견과 판단이 집약되어야 하는 특성이 있다.

4-5-1. 평가기준

- ① 경제성 : 건설비용, 운전유지비용, 연료비 등 모든 비용을 감안한 발전원가인 균등화 발전원가를 의미한다. 단, 위 비용에는 기술의 도입이나 사용계약에 따르는 모든 비용이 포함된다.
- ② 운전특성 : 발전소의 운전과 유지보수특성을 평가하기 위한 것으로 세부기준으로는 연속운전 가능시간으로 정의되는 신뢰성, 분당 부하변동율로 정의되는 부하추종성, 운전 중 고장발생시 보수가 얼마나 용이한가를 평가하는 보수용이성, 발전기 정지상태에서 최대부하 도달 시까지 필요한 시간으로 평가하는 기동성, 그리고 전력수요가 낮을 때, 낮출 수 있는 최소한의 부하율인 최저부하 등의 5가지를 포함한다.
- ③ 기술성숙도 : 기술성숙도는 평가대상 IGCC 기술을 공급사는 회사의 기술적 완성도 및 잠재력을 평가하는 기준이다. IGCC는 상용설비의 축적된 운전실적이 충분치 않으므로 기술공급사의 기술력을 평가할 필요가 있다. IGCC건설기수, 최대 건설용량, 최초 건설년도, 최고 연속운전시간 등을 세부기준으로 포함한다.
- ④ 탄중적합성 : 연료로 사용할 수 있는 석탄범위의 다양성을 평가하는 기준으로 IGCC에서 사용 가능한 탄종범위를 기준으로 평가할 수 있으며, 기술이전 조건과 마찬가지로 정성적인 평가를 반영하여야 할 필요가 있다고 판단될 경우 이를 반영한다.
- ⑤ 환경특성 : IGCC 기술의 환경영향측면에서의 우수성을 평가하는 기준이며, 이를 평가하기 위해 대기오염의 주범이며 산성비, 스모그 등을 유발하는 황산화물 및 질소산화물, 지구온난화의 주요원인인 이산화탄소, 그리고 지역 대기오염의 원인인 분진 등 4가지를 포함한다.
- ⑥ 기술이전조건 : IGCC와 관련된 기술의 이전정도를 의미하며, 이를 평가하기 위하여서는 이전이 필요하다고 판단되는 기술 중 실제로 이전되는 기술의 비율을 기준으로 이를 반영한다.

5. 결론

전력수요의 급증과 에너지 자원의 고갈 및 환경문제 등에 대응할 수 있는 고효율의 환경보전성 기술들에 관한 관심이 높아지고 있으며, 특히 IGCC는 장래의 주요 발전설비로서 중요한 역할이 기대된다. IGCC 또는 가압 유동층(PFBC) 발전소의 가동이 2005년에 계획되어 있다. 그러나 기술의 전량도입은 바람직한 현상이 아니며, 핵심기술은 국내의 자체개발과 병행하여 외국과의 공동연구가 바람직하다고 여겨진다. 그러기 위해서는 IGCC 전체공정에 대한 이해가 바탕이 되어야 할 것이다.

1. 석탄가스화 복합발전(IGCC : Integrated coal Gasification Combined Cycle)은 기존의 미분탄 연소 발전방식에 비하여 비해 발전효율이 5~10%이상 높고, 공해물질 배출 특성에 있어서도 SO_x와 NO_x를 각각 95% 및 75% 이상 감소시킨다.

2. 주된 구성설비는 석탄 전처리 설비, 석탄가스화 설비, 가스정제 설비(탈황, 탈진), 복합발전 설비(가스터빈, 배열회수설비, 증기터빈 등)이다.

3. 석탄가스화 복합발전(IGCC : Integrated coal Gasification Combined Cycle)은 원료석탄을 분쇄한 후 가스화제(증기, 산소 또는 공기)와 함께 가스화로에 공급하여 가연성가스(주성분 CO, H₂)를 생성하고, 가스냉각기에서 가스를 냉각하고 분진과 유황산화물(H₂S, COS) 등을 가스정제장치에서 제거한 후, 가스터빈연료로 사용하여 발전하며 가스터빈의 배열을 배열회수장치에서 회수하여 가스 냉각기로부터 회수된 증기와 함께 증기터빈에 보내 발전에 이용된다.

4. 현재 전 세계적으로 기술이 개발되고 있는 대표적인 분류층 석탄가스화 공정으로는 Texaco(미국), Krupp-Koppers(독일), Shell(네덜란드), CRIEPI & ABB CE 등이 있다.

5. 석탄가스화 복합발전(IGCC : Integrated coal Gasification Combined Cycle)의 평가기준은 경제성, 운전 특성, 기술 성숙도, 탄중적합성, 환경특성, 기술이전조건 등이다.

6. 참고문헌

- (1). 지평삼, 박태준, 김종진 : “석탄가스화 복합발전 기술”, 화학공업과 기술 제11권 (1993)
- (2). 김종진, 김종영 : “상용 석탄가스화 복합발전 기술평가”, 화학공업과 기술 제14권 (1996)
- (3). 이승중, 이진욱, 김용철, 이 찬, 윤용승 : “공정개발급 석탄가스화 복합발전플랜트의 성능평가”, 화학공학 제37권 (1999)
- (4). “석탄가스화 복합발전 기술개발(II)”, 전력연구원 (1998)
- (5) Smith AR, Klosek J, Woodward DW, “Next-Generation Integration Concepts for Air Separation Units and Gas Turbines”, J. of Engineering for Gas Turbines & Power-ASCE, V.119
- (6) Kapat JS, Agrawal AK, Yang T, “Air Extraction on A Gas Turbine for Integrated Gasification Combined Cycle(IGCC)-Experiments and Analysis”, J. of engineering for Gas Turbines & Power-ASCE, V.119
- (7) R. Pruschek, G. Oeljeklaus and V. Brand, “Measures for Efficiency Enhancement and Cost Reduction of IGCC-Gasification, Gas Clean-Up, Power Plant Components”, Proceedings of the 3rd international Symposium on coal Combustion Science and Technology
- (8) P. Chiesa, S. Consonni, “Shift Reactors and Physical Absorption for Low-CO₂ Emission IGCCs”, J. of engineering for Gas Turbines and Power, V.121
- (9) Ingo Koch, Frank Hannemann, and Ulrich Hoffmann, “Dynamic Simulation of Operating Cases and Malfunctions fo an IGCC Power Plant Fuel System”, Chem. Eng. Technol. 21 (1999)