

## 고온정제를 적용한 IGCC 플랜트 성능 해석에 관한 연구(I)

이윤경\* · 서석빈 · 김종진

한국전력 전력연구원

## Plant Performance Analysis for IGCC Employing HGCU (I)

Yun Kyoung Lee\*, Seok Bin Seo and Jong Jin Kim

Korea Electric Power Research Institute

### 요 약

기존의 IGCC의 장점인 고효율 플랜트의 특성을 살리기 위해 고온정제를 적용하는 경우 조건변화에 따른 플랜트 성능의 영향을 관찰하고자 본 연구를 수행하였다. IGCC에 고온정제 공정을 적용하여 구성한 모델은 연구 목적에 알맞은 범위의 건전성을 가진 것으로 나타났으며 기타 조건을 동일하게 설정한 경우 저온 정제 공정(MDEA amine 공정) 적용에 비해 플랜트 효율이 약 2.7% 가량 상승하였다. 한편 동일한 고온정제 공정이라도 적용하는 흡수제를 zinc titanate에서 zinc ferrite로 달리 하는 경우 탈황제의 화학 반응상 특성 및 차이점으로 인해 연료가스의 발열량 변화를 유발하므로 결과적으로 약 0.5%의 플랜트 효율 손실이 발생함을 알 수 있었다. 또한 탈황 온도 350~650°C 사이의 온도범위에 대해 민감도 분석을 실행하였으며 민감도 분석 결과 정제 온도의 증가와 플랜트 효율은 정비례하지 않으며 500°C 이상의 정제 온도를 적용한 경우는 거의 비슷한 효율을 나타내었다. 이와 같은 결과는 정제 온도를 증가시킴으로 인해 가스터빈에 공급되는 연료가스의 온도는 높아지지만 적용한 가스터빈의 출력 및 연소 온도가 제한되어 있어 고온정제를 적용함으로써 얻어지는 이득을 가스터빈에서 충분히 보상하지 못하고 한편으로 고온정제를 채택함으로써 저온정제 적용시 보다 syngas cooler에서 회수할 수 있는 현열이 줄어들어 인한 증기 터빈 출력의 감소가 커지기 때문으로 분석되었다.

**Abstract** — This paper presents the effect of temperature and sorbent type on the plant thermal efficiency in case of HGCU (hot gas cleanup) IGCC at simulation models. HGCU IGCC model shows acceptable error for the given conditions. Plant thermal efficiency of HGCU IGCC is about 2.7% greater than conventional CGCU (cold gas cleanup-MDEA amine process) IGCC. Sorbent is changed from zinc titanate to zinc ferrite, the plant efficiency is decreased about 0.5% although the other conditions are the same as it. Plant efficiencies are not in direct proportion to cleanup temperature and doesn't show a big difference between 500°C to 650°C. It is because gas turbine output and combustion temperature are restricted within their capacities so they couldn't compensate profits from hot gas cleanup process. And steam turbine output is reduced with increase of the cleanup temperature cause sensible heat recovered from syngas cooler is decreased as the cleanup temperature is increased.

### 1. 서 론

석탄가스화 복합발전(IGCC)은 석탄을 가스화하고 가스화된 연료를 사용하여 전기를 생산하는 기술로 기존의 석탄 전환 기술에 비해 전환율이 높고 환경 영향이 적은 것으로 알려져 있다. IGCC의 가스화 과정에서 석탄 내에 존재하는 다양한 성분으로 인해 발생하는 불순

물을 제거하기 위한 가스 정제 과정이 필요하며 저온 습식 공정을 적용하는 경우 효율은 약 40% 이상이다. 저온 습식 정제 공정은 IGCC뿐 아니라 기타 중유 정제 공정 등에도 적용되는 공정으로 실증은 물론 상업화가 완료되어 있는 기술이다.

미국 에너지성(DOE)에서 지원하고 있는 Advanced IGCC 프로젝트는 목표 효율을 기준으로 크게 세 가지

로 분류된다. 첫 번째는 MDEA amine process 혹은 Sulfinol-M과 같은 습식 저온 정제 공정을 채용한 일반적인 IGCC 시스템으로 목표 효율은 40% 이상이고 현재 상업적으로 이용이 가능하며 또한 실제로 상업용 플랜트가 운전되고 있다. 두 번째는 건식 고온정제를 채용한 IGCC 시스템으로 목표 효율은 45% 정도이며 2000년까지 개발을 목표로 하고 있고 현재 고온정제를 적용한 상업적 규모의 플랜트는 Tampa(10% slip-stream HGCU)와 Pinon Pine(고온정제 전면 채용)이 있으나 정상적인 운전 케도에 진입한 경우는 아직 없다. 세 번째는 목표 효율 50% 이상으로 건식 고온 정제뿐 아니라 advanced gas turbine까지 채용한 시스템으로 2010년 개발을 목표로 하고 있다. 첫 번째 기술은 상업적으로 이용 가능한 구성 요소 및 기술을 이용해 이루어져 있으며 advanced system을 개발하기 위한 기초 역할을 하고 있다. 두 번째 및 세 번째 기술은 환경 측면과 더불어 미래의 발전 기술로서 잠재성을 가지고 있으며 고급화된 구성 요소와 기술을 사용함으로써 고효율, 저오염을 동시에 달성할 수 있다<sup>[1]</sup>.

앞서 언급한 바와 같이 가스정제공정의 온도는 IGCC 발전효율에 미치는 영향이 지대한 것으로 기대되며 특히 H<sub>2</sub>S 제거를 위한 탈황 공정은 생성가스의 조성, 플랜트의 최종생산물 및 발전 열효율 분석을 고려하여 선정하고 이에 따라 공정 가동 온도가 결정된다. 그러나 실제 고온 정제 공정을 적용하여 실증에 성공한 사례가 아직 없기 때문에 이로 인한 기대 효과가 확인된 바 없으며 따라서 고온정제 공정 개발의 지속적인 방향과 미래가 불분명한 상태다. 본 연구는 IGCC 플랜트에 습식 저온 정제 공정을 적용하는 경우와 일정 온도 범위 내에서 고온정제 공정을 적용하는 경우 효율 상승 효과를 관찰하였으며 탈황 공정에 적용하는 탈황제의 조성을 변화시킴으로써 플랜트 효율에 미치는 영향을 관찰, 분석하였다.

2. 본 론

2-1. 고온정제 IGCC 모델 구성 및 건전성 검토

2-1-1. 공정 구성

고온정제를 적용한 IGCC 모델 중 가스화기 및 가스 정제 공정은 AspenPlus를 사용하여 구성하였으며 가스 터빈 및 HRS, 증기터빈은 GateCycle을 이용하여 구성하였다. 가스화기는 Texaco, oxygen blown, full heat recovery를 대상으로 하였다.

AspenPlus에서 구성된 가스화기 및 정제공정에는 다음과 같은 조건이 적용되었다.

- ① 단위계

입력 단위 : MET 기본단위계, 온도 °C, 압력 kg/cm<sup>2</sup>

출력 단위 : MET 기본단위계, 온도 °C, 압력 kg/cm<sup>2</sup>

- ② 흐름 유형 : MIXCINC

- ③ 데이터뱅크

ASPENCD, AQUEOUS, INORGANIC, SOLIDS, PURECOMP

2-1-2. 건전성 검토

구성된 모델의 건전성 검토를 위한 모델은 NOVEM 보고서를 참고로 하였으며 이 보고서는 Shell 가스화기 및 Texaco 가스화기에 대해 탈황 공정을 온도별 적용 가능한 대상으로 선정하여 시스템 성능을 분석하였고 대상으로 한 공정은 250°C active carbon, 350°C iron oxide on silica, 그리고 600°C zinc titanate 공정이며 그 중 본 모델이 구성된 선행 연구 결과를 바탕으로 zinc titanate case를 근거로 건전성을 검토하였다<sup>[2]</sup>.

NOVEM 보고서는 Cycletemp를 이용하여 시스템을 구성하고 성능 해석을 수행하였고 Cycletemp는 Netherlands의 Delft 공대에서 개발한 코드로 IGCC 및 연료전지 전용 모사 프로그램이다. Table 1에는 NOVEM에서 적용한 모델의 조건을 나타내었으며 Table 2에는 적용된 Australian Wambo탄의 성상을 나타내었다.

건전성 검토용 모델은 위의 조건과 동일하게 600 MW 급에 GE 9F 가스터빈을 적용하였으며 가스화기에 공급되는 연료 성상도 Wambo탄을 기준으로 동일하게 적용하였다.

Table 1. NOVEM case model conditions.

수행자	NOVEM
Scale	600 MW
Gas Turbine	GE 9F (50 Hz)
적용탄	Australian Wambo
적용 탈황 공정 CODE	zinc titanate, moving bed CycleTempo

Table 2. Wambo coal properties.

total moisture (%)		
heating value (HHV, kJ/kg)	as received	26083
	airdry basis	28938
	dry basis	29979
ultimate analysis (dry basis, wt %)	C	72.6
	H	4.77
	O	9.02
	N	1.84
	S	0.47
	ash	11.24
	Cl	0.06

**Table 3. Reliability test results for HGCU IGCC model.**

Plant performance	NOVEM	KEPRI
Coal flow, kg/hr	196970	196970
Coal, HHV	6911	6911
GT power, MW	412.4	419.8
ST power, MW	377.4	378.4
Expander power, MW	28.9	26
Gross power, MW	818.7	824.2
ASU power, MW	70.9	70.9
Aux power, MW	28.1	28.1
Net power, MW	719.7	725.2
Net efficiency, HHV, %	45.5	45.8

2-1-3. 검토 결론

Table 1 및 Table 2와 같이 동일한 조건을 적용하여 모델을 모사한 결과 및 NOVEM의 결과를 Table 3에 비교하였다.

Table 3 에서와 같이 전체 고온정제 IGCC 모델에서 적용 조건을 NOVEM과 동일하게 한 경우 Net efficiency 차이가 약 0.3% 나는 것을 알 수 있으며 위와 같은 오차 결과는 개발된 고온정제 모델의 건전성을 검토하기에 충분한 하다고 판단하여 이후의 공정 개발에 이를 보완하여 사용하였다.

2-2. 저온정제 vs 고온정제 IGCC 플랜트 모사

기준에 수행된 저온정제 공정을 적용한 IGCC의 플랜트 성능과 고온정제를 적용한 경우 IGCC 플랜트 성능을 비교하고 이후 탈황제 적용성에 따른 플랜트 성능 변화 및 탈황 온도별 플랜트 성능 변화를 예측하기 위해 본 연구를 수행하였으며 선행 연구결과의 활용을 위해

**Table 4. Datong coal properties.**

total moisture (%)		10.6
heating value (HHV, kcal/kg)	as received	6281
	air dry basis	6822
	dry basis	7026
proximate analysis (air dry basis, wt %)	moisture	2.9
	volatile	28.6
	carbon	59.2
	ash	9.3
ultimate analysis (dry basis, wt %)	C	73.5
	H	4.1
	O	11.7
	N	0.9
	S	1.1
	ash	8.7
	Cl	350 ppm

**Table 5. CGCU vs HGCU model conditions.**

	CGCU	HGCU
탈황공정 적용온도 (연료가스온도)	MDEA amine process 40°C	zinc titanate 667°C

**Table 6. Plant performance summary.**

Plant performance	CGCU	HGCU
Net efficiency (HHV, %)	42.3	45.0

대동탄(Table 4 참고)과 GE 7FA 가스터빈을 적용하였다. 저온정제를 적용한 경우와 고온정제를 적용한 경우 모사 조건은 Table 5와 같고 모사 결과는 Table 6과 같다.

이와 같이 적용 가스화기, 탄종 및 기타 시스템 조건이 동일하고 정제 공정만을 변경한 경우 저온정제를 채용한 경우보다 고온정제를 채용한 경우 약 2.7%의 효율 상승 효과를 기대할 수 있음을 알 수 있었다.

2-3. 고온정제 적용 탈황제별 플랜트 성능 변화

2-3-1. 모사 조건

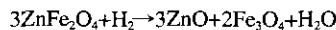
가스화기 및 기타 시스템 구성 조건은 위에서 모사한 경우와 동일하며 탈황공정에 적용하는 탈황제의 종류를 zinc titanate와 zinc ferrite로 구분하였다.

2-3-2. 결과 및 고찰

Table 7에서와 같이 zinc titanate와 zinc ferrite를 적용하는 경우 플랜트 성능이 차이를 나타내고 있는데 이는 탈황 반응 과정에서 적용하는 탈황제에 따라 clean syngas 조성이 변화하기 때문이다.

Zinc ferrite를 이용한 황화 반응 중 발생하는 화학적 변화는 다음과 같다.

*Sulfidation*

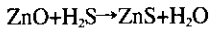
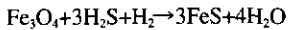


**Table 7. Plant performance summary for each sorbent.**

Plant performance	zinc titanate	zinc ferrite
Coal flow, kg/hr	83803	84906
Coal, HHV	6281	6281
GT power, MW	196.9	196.7
ST power, MW	130.9	131.4
Gross power, MW	327.8	328.4
ASU power, MW	42.9	43.3
Aux power, MW	9.2	9.2
Net power, MW	275.7	275.9
Gross efficiency, HHV, %	53.6	52.9
Net efficiency, HHV, %	45.0	44.5

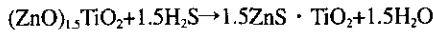
**Table 8. Comparison of sorbent salient features.**

zinc titanate	zinc ferrite
No steam addition necessary	Steam addition for highly reducing fuel gas
Sulfate formation can be controlled	Sulfate formation difficult to control
Minimal H <sub>2</sub> loss	H <sub>2</sub> loss can be significant
Projected mechanical stability	Mechanically unstable from sulfates
Less zinc loss due to chlorides	Zinc loss could require chloride guard
Higher cost (15~20%)	Lower cost
Lower loadings (30~40%)	Higher loadings



Zinc titanate는 zinc ferrite의 문제점을 극복하기 위해 개발된 흡수제로 황화 과정에서 발생하는 화학적 변화는 다음과 같다.

**Sulfidation**



위와 같은 화학 반응에 의한 Zinc ferrite와 zinc titanate의 탈황제로서 고유한 특성을 비교하면 Table 8과 같다.

Table 8의 탈황제 특성은 실제 모사 결과에서 Table 9와 같이 나타나며 zinc ferrite를 사용하는 경우 zinc titanate를 사용하는 경우에 비해 H<sub>2</sub>, CO, H<sub>2</sub>O의 조성이 주로 변화함을 알 수 있다. 이처럼 syngas 조성이 변화함에 따라 가스터빈으로 공급되는 가스의 발열량이 변화하게 되며 가스터빈의 출력을 맞추기 위해 또한 연료량 및 질소량의 변화가 유발된다. 즉 zinc ferrite를 사용하는 경우 zinc titanate를 사용할 때보다 syngas의 발열량이 낮아지므로 동일한 가스터빈 연소온도를 유지하기 위해서는 syngas의 유량, 즉 공급되는 연료량이 증

**Table 9. Clean syngas composition and calory change for each sorbent.**

Syngas composition (mole fraction)	Raw syngas	zinc titanate	zinc ferrite
N <sub>2</sub>	0.009	0.009	0.009
Ar	0.007	0.007	0.007
H <sub>2</sub> O	0.132	0.108	0.109
CO	0.457	0.430	0.419
H <sub>2</sub>	0.290	0.317	0.302
CO <sub>2</sub>	0.102	0.129	0.143
CH <sub>4</sub>	309 ppm	309 ppm	0.011
발열량 (LHV, kCal/kg)	-	2278	2249

가하게 된다. 따라서 zinc ferrite를 사용하는 경우 동일한 출력을 내기 위해 더 많은 양의 연료를 소모하게 되는 것이며 이는 효율의 감소를 초래한다.

Table 8과 반응식 등을 살펴볼 때 Sulfur loading 측면에서는 zinc ferrite가 우수하다고 할 수 있으나 zinc titanate를 사용하는 경우에도 황화 수소 제거율은 이미 만족할 만한 수준이므로 연료가스 손실 측면, 즉 플랜트 효율 감소 측면에서 zinc ferrite 보다는 zinc titanate가 우수하다고 할 수 있다.

한편, 본 모사에서는 단순한 탈황 반응 특성만을 반영하였으며 실제 공정의 운전상에 있어 흡수제를 달리 적용함으로써 발생하는 조업상의 측면은 고려되지 않았다. 즉, 반응열 생성 등으로 인한 반응기의 온도 제어 혹은 재생 반응 특성 등이 모사에서 표현되지 않았으므로 본 모사에서의 결과를 syngas 조성의 변화 이외의 기준으로 평가할 수는 없다.

**2-4. 고온정제 온도별 플랜트 성능 변화**

**2-4-1. 전제조건 및 결과**

Zinc titanate가 플랜트 성능 측면에서 우수한 것으로 나타났으므로 zinc titanate를 적용할 수 있는 온도 범위 (350~650°C)에서 탈황 온도별 플랜트 성능을 비교하기 위한 모사를 수행하였다. Zinc titanate는 본래 고온에서 사용될 목적으로 개발되었으나 근래에 탈황 온도를 높임으로써 얻어지는 효율 이득에 비해 고온에서 사용할 재질 등을 선정하고 운전 및 제어에 소모되는 비용이 너무 크다는 우려로 중저온용 흡수제로서 개발되고 있고 본 연구에서는 그 온도 범위를 350°C로 선정, 모사 하였다.

**2-4-2. 고찰**

Table 10에서와 같이 온도가 증가함에 따라 어느 정도의 효율 증가를 나타내는 것은 사실이지만 350°C에서

**Table 10. Plant performance summary for each clean-up temperature.**

Plant performance	정제온도			
	350°C	500°C	600°C	650°C
Coal flow, kg/hr	88143	85875	84777	83891
Coal, HHV	6281	6281	6281	6281
GT power, MW	197.0	196.9	196.9	197
ST power, MW	141.9	135.7	131.2	128.9
Gross power, MW	338.9	332.7	328.2	325.9
ASU power, MW	45.2	44.0	43.5	43.0
Aux power, MW	9.2	9.2	9.2	9.2
Net power, MW	284.6	279.4	257.6	273.7
Net efficiency, HHV, %	44.2	44.55	44.5	44.67

500°C로 온도가 증가될 때와는 달리 650°C로 증가될 때 효율 증가는 거의 없는 것으로 관찰되었다. 이와 같은 결과를 검증하기 위하여 500°C와 650°C 사이의 온도인 600°C에 대해 동일한 조건으로 모사를 수행한 결과를 함께 나타내었다. 모사 결과, 정제 온도의 증가로 인한 효율 증가 효과는 600°C 이하에서만 그 의미를 가지는 것으로 판단되며 정제 온도와 플랜트 효율은 비례하지 않는다.

고온정제를 적용하는 경우 syngas cooler에서 회수할 수 있는 현열이 저온 정제를 적용하는 경우에 비해 줄어들 수밖에 없다. 따라서 고온정제를 적용함으로써 인해 증기터빈 출력은 감소하게 된다. 반면, 고온정제를 채택함으로써 연료가스 공급 온도가 높아지고 필요 연료량이 줄어들므로 인해 효율 증가에 기여할 수 있다. 그러나, 본 모델에 적용한 가스터빈(GE 7FA)의 경우 출력(197 MW) 및 연소온도(1288°C)가 제한되어 있으므로 정제 온도를 상승시킴으로써 가스터빈에 공급되는 연료가스의 온도가 증가한다는 이득을 가스터빈에서 100% 반영하지 못하고 있으며 이는 Fig. 1에 잘 나타나 있다. 즉, 가스터빈 출력은 모든 정제 온도범위에서 동일하나 증기터빈 출력은 정제 온도 증가와 함께 감소하고 있는 것을 관찰할 수 있다. 또한 Fig. 2에는 net efficiency와 출력을 정제 온도에 대해 나타내었는데 Fig. 1에서도 관찰할 수 있었던 net output은 증기터빈 출력 감소의 영향으로 온도 증가와 함께 감소하며 net efficiency는 500°C 이상에서 거의 변화하지 않음을 알 수 있다. 따라서 현재와 같이 가스터빈의 출력 및 연소온도 조건이 제한되

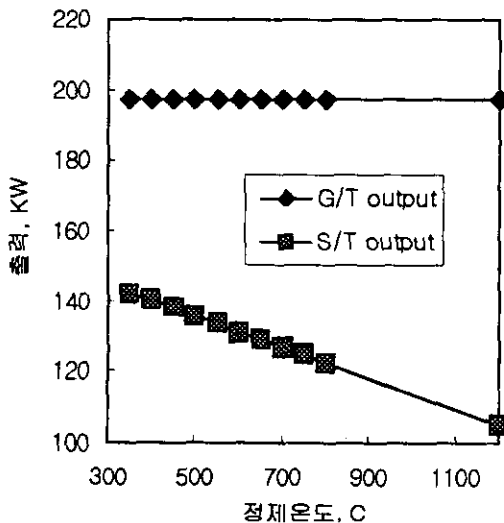


Fig. 1. G/T output, S/T output vs. cleanup temperature.

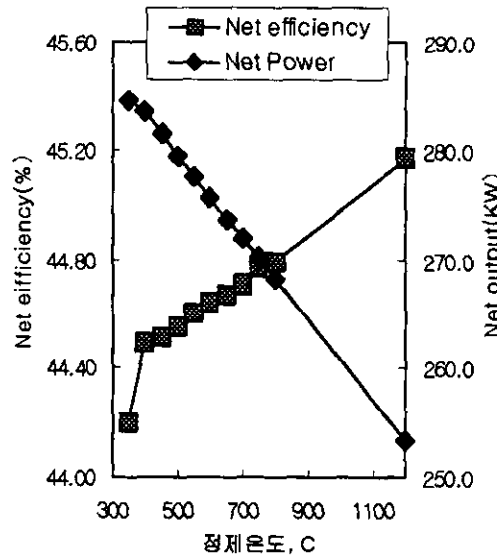


Fig. 2. Net output, net efficiency vs. cleanup temperature.

어 있는 경우 정제 온도를 상승시킨다 해도 플랜트 효율에 이득이 되지 않으므로 중·저온용 탈황 공정을 적용하는 것이 타당하다고 할 수 있다.

### 3. 결 론

본 연구는 식탄가스화 복합발전에서 기존에 적용되던 저온습식 정제 공정(정제 온도 40°C)을 고온 건식 정제 공정으로 대체하는 경우 플랜트 성능의 변화 및 고온 건식 정제 공정의 종류를 달리 하는 경우 플랜트 성능을 비교하고자 수행되었다.

Texaco 가스화기(oxygen blown)에 zinc titanate를 적용해 구성된 모델은 목적하는 바에 알맞은 건전성을 가진 것으로 나타났으며 기타 조건을 동일하게 설정했을 때 저온 정제 공정(MDEA amine 공정)을 적용한 경우에 비해 플랜트 효율이 약 2.7% 가량 상승하였다.

한편 동일한 고온정제 공정이라도 적용하는 흡수제를 zinc titanate에서 zinc ferrite로 달리 하는 경우 탈황 반응시 화학 반응의 차이로 인해 clean syngas의 조성 및 열량 변화를 초래하므로 약 0.5%의 효율 손실이 발생할 수 있었다.

또한 350~650°C 사이의 온도범위에 대해 민감도 분석을 실행하였으며 이 온도 범위는 탈황공정에 동일하게 흡수제(zinc titanate)를 적용할 수 있는 온도 범위라는 전제 조건을 두고 설정된 것이다. 실제로 적용하는 온도가 이 범위를 벗어나면 실제 공정에서 적용할 수 있

는 탈황 공정이 변화하며 따라서 정제 온도 뿐 아니라 다소간이라도 clean syngas의 조성 변화를 유발하게 된다. 민감도 분석 결과 정제 온도의 증가와 플랜트 효율은 정비례하지 않으며 500°C 이상의 정제 온도를 적용한 경우는 효율 증가폭이 완화되는 현상을 나타내었다. 이와 같은 결과는 정제 온도를 증가시킴으로 인해 가스터빈에 공급되는 연료가스의 온도가 높아지지만 가스터빈(GE 7FA 모델인 경우)의 출력 및 연소온도 제한으로 인해 고온정제에서 온도가 증가할수록 커지는 이득을 충분히 보상하지 못하는 동시에 syngas cooler에서 회수할 수 있는 현열이 줄어들음으로 인한 증기 터빈 출력의 감소가 커지기 때문으로 분석된다.

한편, 저온정제 공정(40°C)과 350°C 정제 공정 사이에는 또 다른 온도 변화에 따른 효율 변화 결과가 존재할 수도 있으며 이는 실제로 적용 가능한 탈황 공정을

모델에서 구현하고 이로 인한 기타 변화들을 반영할 수 있을 때 의미 있는 연구 결과를 가질 수 있을 것으로 판단된다. 또한 향후 출력이나 연소온도에 제한이 없는, 혹은 그 제한점이 현재보다 높은 가스터빈을 대상으로 고온정제 IGCC 시스템 성능 연구를 수행할 계획에 있다.

### 참고문헌

1. Suresh, C.J., Michael, G.K., Michael, D.R. and Roman, Z.: "Assessment of hot gas cleanup systems for IGCC and PFBC advanced power systems", Parsons, January (1997).
2. Verschooler, M.J.E. and Melman, A.G.: "System study high temperature gas cleaning at IGCC systems", Novem (Netherlands agency for energy and the environment).