

IGCC 플랜트에서 산소공급방식이 성능에 미치는 영향

안지호¹ · 김동섭^{2†}

¹인하대학교 대학원, ²인하대학교 기계공학부

Influence of Oxygen Supply Method on the Performance of IGCC Plants

JIHO AHN¹, TONGSEOP KIM^{2†}

¹Grad. School of Inha Univ., Yonghyeon 4-dong, Nam-gu, Incheon, 402-751, Korea

²School of Mechanical Engineering, Inha Univ., Yonghyeon 4-dong, Nam-gu, Incheon, 402-751, Korea

Abstract >> In this paper, two types of integrated gasification combined cycle (IGCC) plants using either an air separation unit (ASU) or an ion transport membrane (ITM), which provide the oxygen required in the gasification process, were simulated and their thermodynamic performance was compared. Also, the influence of adopting a pre-combustion CO₂ capture in the downstream of the gasification process on the performance of the two systems was examined. The system using the ITM exhibits greater net power output than the system using the ASU. However, its net plant efficiency is slightly lower because of the additional fuel consumption required to operate the ITM at an appropriate operating temperature. This efficiency comparison is based on the assumption of a moderately high purity (95%) of the oxygen generated from the ASU. However, if the oxygen purity of the ASU is to be comparable to that of the ITM, which is over 99%, the ASU based IGCC system would exhibit a lower net efficiency than the ITM based system.

Key words : IGCC(석탄가스화 복합화력발전), ASU(공기분리기), ITM(이온전도성 분리막), Carbon dioxide capture(이산화탄소 포집), Pre-combustion capture(연소전 포집)

Nomenclature

AAC : auxiliary air compressor
 ASU : air separation unit
 BAC : booster air compressor
 CSU : carbon separation unit
 GT : gas turbine
 HHV : higher heating value [kJ/kg]
 HRSG : heat recovery steam generator
 HP : high pressure
 IGCC : integrated gasification combined cycle
 IP : intermediate pressure

ITM : ion transport membrane
 LP : low pressure
 \dot{m} : mass flow [kg/s]
 MAC : main air compressor
 MEA : monoethanol amine
 Misc : miscellaneous
 ST : steam turbine
 \dot{W} : power [MW]
 WGS : water-gas shift reaction
 η : efficiency [%]

Subscripts

aux : auxiliary
 CCS : carbon capture and storage

[†]Corresponding author : kts@inha.ac.kr

[접수일 : 2012.4.22 수정일 : 2012.6.16 게재확정일 : 2012.6.22]

C : compressor
 gen : generator
 m : mechanical
 mo : motor
 P : pump
 T : turbine

1. 서 론

근대 이후로 공업이 발전됨과 동시에 산업의 기반이 되는 화석연료가 점차 고갈되고 있다. 이런 이유로 대체에너지 즉, 신재생에너지를 개발하려는 노력과 함께 화석연료 중 가장 풍부한 매장량을 지닌 석탄을 다양한 발전 시스템에 연료로 이용하려는 시도가 진행 중이다. 이러한 요구에 따라 석탄을 가스화하여 연료로 사용하는 석탄가스화 복합 화력발전 시스템(IGCC)이 친환경적이고 에너지효율 측면에서 미래지향적인 발전설비로 대두되고 있으며, 다양한 연구 및 개발을 통해 그 타당성이 인정되어 전 세계 곳곳에 건설되고 있다¹⁾.

IGCC시스템에서는 석탄을 가스화하기 위해 가스화 기기로 산소를 공급해야 한다. 공기를 직접 공급하는 형식도 있지만, 산소를 공급하는 방식이 더 일반적이며, 공기 중에서 산소를 분리해 내기 위해서 일반적으로 극 저온형 공기분리기(cryogenic ASU)²⁾가 사용된다. 이하 본문에서 사용되는 ASU라는 표현은 극저온 형 공기분리기를 지칭한다. 그러나 이를 사용할 경우 추가적인 소모동력이 요구되는 단점이 있는데 최근에는 이온전도성 분리 막(ITM)을 사용하여 그 단점을 극복하려는 노력이 진행되고 있다. ITM은 세라믹으로 구성된 분리 막 양면에 산소의 분압차를 유지함으로써 막을 통해 산소만 선택적으로 투과시켜 분리하는 장치이다. 이를 이용하여 공기로부터 99%이상의 순도를 가지는 산소를 얻는 것이 가능하다. 가스화기기에 공급되는 산소의 순도가 높을수록 가스화기기로부터 생산된 합성가스에서 질소(상대적으로 미량인 아르곤 포함)의 비율이 낮아지게 되어 좋은 품질의 가스를 얻을 수 있다³⁾. 그러나 IGCC 시스템에서 ITM을 작동시키기 위해서는 200~300psig

의 높은 압력 및 800~900°C의 높은 온도가 요구되기 때문에 이를 충족시킬 필요성이 있고, 현재 ITM을 이용한 산소의 생산용량이 작기 때문에 발전시스템에 적용을 하기 위해서는 더 많은 연구 및 개발이 필요하다⁴⁾.

한편, 산업의 발달로 인해 화석연료의 고갈뿐만 아니라 환경오염문제 또한 그 심각성이 점차 증가하고 있다. 특히 지구 온난화의 주범인 이산화탄소로 인해 전 지구적으로 피해가 발생하고 있으며 이를 규제하기 위해 탄소배출권을 제정하는 등, 다각도의 노력을 기울이고 있다. 이에 따라 발전시장에서도 이산화탄소 감축을 위한 연구가 진행되고 있으며, 그 노력의 일환으로서 연소 전, 연소 후 및 순산소 연소(Pre-, Post-, Oxy-combustion) 등과 같은 다양한 이산화탄소 포집방식^{5,6)}이 제시되고 있다. 특히 IGCC에서는 가스화 공정 이후에 바로 연소 전 포집방식을 적용을 적용하는 것이 우선적으로 고려되고 있다.

본 논문의 이전 연구들에서는 IGCC 플랜트에 천연가스를 연료로 사용하는 가스터빈을 적용할 때의 성능변화⁷⁾를 분석한 바 있으며, 터빈 블레이드의 온도를 고려하였을 때의 성능을 해석⁸⁾하였다. 또한 서로 다른 조성의 석탄을 사용한다고 가정하였으며, 각기 다른 조성을 가진 합성가스를 연료로 공급하였을 때의 시스템의 성능차이⁹⁾를 분석하였고, 더 나아가 연료전지와외의 하이브리드 시스템의 구성^{10,11)}을 제시하는 등 다양한 연구들이 진행되었다. 이 밖에도 가스터빈에서 합성가스를 연소하는 경우의 현상¹²⁾에 대해 분석된 바 있으며 IGCC시스템에서 이산화탄소의 포집을 고려한 연구들^{13,14)}이 발표되었다.

이와 같은 기존 연구들은 새로운 장치를 추가하여 시스템의 성능을 향상시키거나 이산화탄소의 배출을 저감하는 것에 관심을 두었다. 그러나 시스템의 주변기기(BOP, balance of plant)가 시스템 전체 성능에 미치는 영향에 대한 분석을 수행한 연구는 부족한 실정이다. 이에 본 연구에서는 주요 주변기기인 산소공급 장치의 선택이 시스템 성능에 미치는 영향을 분석하고자 하였다. 본 논문에서는 IGCC 플랜트에서 ASU와 ITM의 두 가지 다른 방식으로 가스화기

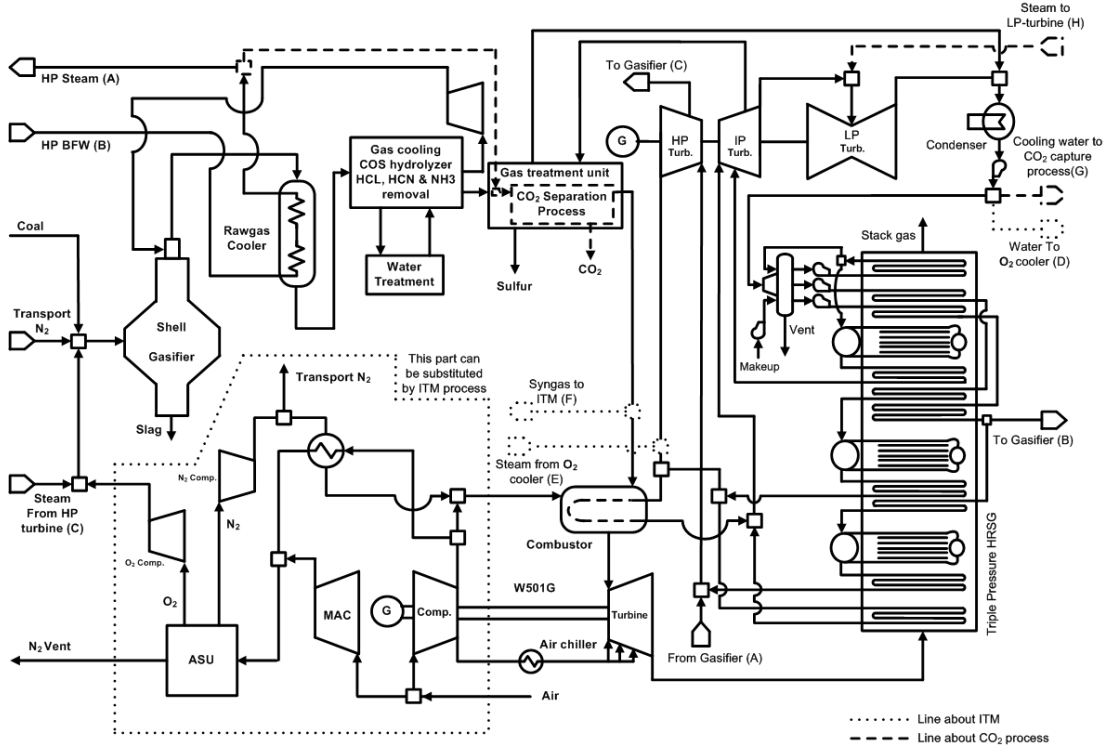


Fig. 1 IGCC system configuration

에 산소를 공급하는 것이 플랜트 성능에 미치는 영향을 분석되었다. ASU의 단점으로 복잡한 구성 및 순도가 상승할수록 동력소모량이 급격히 증가^{2,10)}하는 점을 들 수 있는데, 이를 보완하고자 ITM을 사용하는 방안이 모색되고 있다. 하지만 ITM을 IGCC에 사용하기 위해서는 적정 온도, 압력 조건을 만족시켜야 되고 이에 따라 다시 추가적인 에너지 소모가 필요하다. 그러므로 동일한 IGCC 플랜트를 대상으로 두 방식을 적용하여 성능에 미치는 차이를 확인하는 것이 필요하다. 이를 위해서 비교해석을 진행하였고, 각 시스템에서 연소 전 이산화탄소 포집방식을 적용하여 성능변화도 고찰하였다.

2. 시스템구성 및 모델링

2.1 시스템 구성

IGCC 시스템은 석탄가스화 공정, 가스터빈, 그리

고 열 회수 증기발생기(HRSG)를 포함한 증기발전 사이클로 구성된다. Fig. 1과 Fig. 2에 본 연구에서 사용한 시스템들의 개략도를 보였으며, 이때 가스화기는 shell 공정¹⁵⁾을 사용하였다. 가스터빈은 G-class 가스터빈을 사용하여 필요한 설계조건들은 문헌¹⁶⁾을 참고하였다. Fig. 1은 ASU를 적용한 IGCC 플랜트를 나타낸 것인데 점선 부분의 공정을 Fig. 2의 ITM 공정으로 대체하면 ITM을 이용한 IGCC 플랜트가 된다.

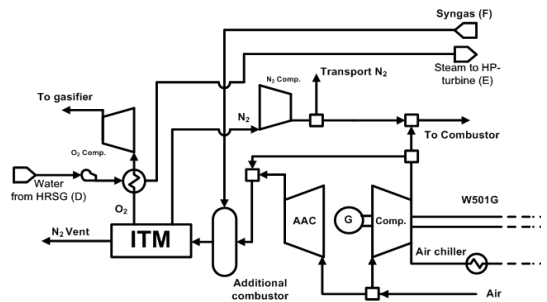


Fig. 2 Part of IGCC system configuration using an ITM

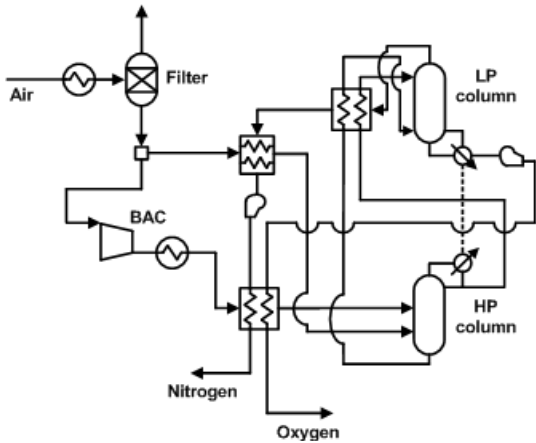


Fig. 3 Configuration of ASU

ASU를 사용한 시스템을 먼저 설명한다. 공기는 석탄가스화 공정에서 사용되는 산소를 분리하기 위해 ASU로 공급되며 Fig. 3에 ASU의 구성도를 도시하였다. 그 구성은 선행 연구¹⁰⁾와 동일하고, 모델링의 검증은 선행연구에 기술되어 있다. ASU로 공급되는 공기의 일부는 가스터빈 압축기에서 압축되어 공급되고 나머지는 MAC을 통해 압축되어 공급된다. ASU로 공급된 공기는 필터에서 수분, 탄화수소 등의 불순물이 제거된 후 일부는 BAC를 통해 가압된다. 가압된 공기는 저압 증류탑에서 배출되는 질소 및 산소와 순차적으로 열 교환을 통해 액화되어 고압 증류탑으로 공급된다. 나머지 공기 또한 저압 증류탑에서 배출되는 질소와 열 교환을 통해 냉각된 후 고압 증류탑으로 공급된다. 고압 및 저압 증류탑에서 팽창 및 냉각과정으로부터 액체 상태로 질소와 산소가 분리되며, 가압 및 열 회수 과정을 거쳐 기화되어 공기 분리기 밖으로 배출된다. ASU로부터 공급된 질소는 설계변수에 따라 일부가 외부로 배출되며, 나머지는 가스화 공정에서 미립화된 석탄의 수송용으로 사용하거나 가스터빈 연소기로 공급된다. 분리된 산소는 질소 및 고압증기터빈에서 팽창한 수증기의 일부와 함께 가스화기기로 공급된다. 공급된 혼합기체와 미립화된 석탄이 여러 연소 반응 및 평형반응을 일으키고 냉각되어 처리가스(raw gas)가 생성된다. 처리가

스에서 불순물을 제거(HCL, NH₃, sulfur 등)하여 정제된 합성가스(syngas)는 가스터빈 연소기로 공급되어 연소된다. 이후 고온 고압의 가스는 터빈으로 공급되어 팽창된다. 이때 압축기 출구 공기를 사용한 터빈 냉각이 고려되었다. 냉각 효과를 높이기 위해서 냉각 공기를 미리 냉각(pre-cooling)하여 공급하는 것도 모사되었다. 터빈 출구 가스는 삼중압(triple-pressure) HRSG에서 열 교환을 하여 수증기를 발생시키고 외부로 배출된다. HRSG에서 생성된 수증기는 각각의 압력에 따라 증기터빈으로 공급되어 출력을 생산한다. 이때 고압 증기터빈의 출구 수증기의 일부가 연소기 냉각용으로 사용되며, 재 가열되어 중압 증기터빈으로 공급된다. 또한 고압의 물이 처리가스 냉각을 위해 사용되고, 중압터빈에서 팽창된 수증기의 일부를 사용하여 처리가스에 포함되어 있는 황을 제거하기 위해 열을 공급한 후 응축기로 재순환 된다.

ITM을 적용한 시스템은 앞서 설명한 바와 같이 Fig. 1에 나타난 점선부분이 Fig. 2로 대체된 구성이며, 기본적으로 ASU를 적용한 IGCC 시스템과 동일하다. ASU와 동일하게 가스터빈 압축기 및 추가적인 압축기를 통해 공기를 가압하였고, ITM으로 공급하기에 앞서 추가적인 연소기를 장착하였고 가압된 공기와 합성가스의 일부를 공급, 연소시켜 ITM의 작동을 위한 온도조건을 충족하였다. ITM으로부터 분리된 산소는 냉각과정을 거친 후 압축되어 가스화기기로 공급되며, 이때 고온의 산소를 냉각하기 위해 HRSG에서 응축된 물의 일부를 가압시켜 공급하였고, 가열되어 수증기로 변환된 물은 고압증기터빈으로 재순환된다. 분리된 질소는 ASU를 적용한 시스템과 마찬가지로 가스화기기와 가스터빈 연소기 등으로 공급되고 나머지는 버려진다. 이후 과정은 기존 IGCC시스템과 동일하다.

2.2 이산화탄소 포집을 적용한 시스템

이산화탄소 포집을 위해서 연소 전 분리방식을 고려하였으며, 포집 장치를 Fig. 4에 나타내었다. 연소 전 분리 방식은 크게 수성가스화 반응(WGS)¹⁷⁾과 아민

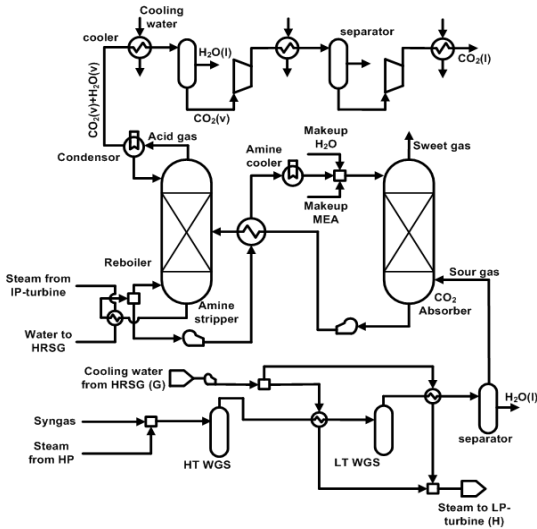


Fig. 4 Pre-combustion CO₂ capture process

(MEA)을 바탕으로 한 흡수식 포집장치¹⁸⁾, 그리고 포집된 이산화탄소의 저장을 위한 탄소 분리장치(CSU)¹⁹⁾로 나뉘며, 각각 문헌을 참고하여 모델링 하였다. 포집장치의 위치는 Fig. 1에서 점선 박스로 표시된 곳(CO₂ separation process), 즉 가스화기와 연소기 사이이다. 먼저 처리가스 냉각기에서 생산된 고온 수증기의 일부가 합성가스와의 WGS 반응을 거쳐 수소와 이산화탄소로 변환된다. 이 반응이 발열반응이기 때문에, 이를 이용하여 저압 수증기를 생산하고, 저압 증기터빈으로 공급된다. WGS 반응으로부터 변환된 합성가스는 응축과정으로부터 수분을 제거 한 후, MEA 공정으로 공급되어 이산화탄소를 분리한다. 분리된 이산화탄소는 CSU로 공급되어 응축 및 가압되어 배출되며, 대부분의 수소로 구성된 합성가스는 가스터빈 연소기로 공급된다.

2.3 시스템 모델링

ASU이나 ITM으로 공기를 공급하기 위해서는 가스터빈 압축기나 추가적인 압축기를 통해 공급하는 방식, 그리고 두 가지 방법을 혼합하는 방식이 있다. 이런 방법들은 결합도(integration degree)로 표현되며, 모든 공기를 가스터빈 압축기로부터 공급할 경우

Table 1 Major parameters of ASU, MEA CSU processes

ASU ²⁾	
O ₂ purity	95%
Main air compressor pressure	524.6 kPa
Booster air compressor pressure	1130 kPa
Liq. O ₂ delivery pressure to pump	153.5 kPa
Pumped O ₂ discharge pressure	634.3 kPa
MEA Process ¹⁸⁾	
Capture rate	85%
Inlet gas temperature	40°C
Number of stage in absorber	10
Murphree efficiency in absorber	0.25
Number of stage in stripper	6
Reflux ratio in stripper	0.3
Reboiler temperature	120°C
Minimum ΔT in heat exchange	10°C
CSU ¹⁹⁾	
CO ₂ compression pressure	15000kPa
Cooler outlet temperature	60°C

1, 추가적인 압축기로부터 공급할 경우는 0이다. 또한 분리된 질소를 가스터빈 연소기로 공급하는 비율을 희석도(dilution Level)라고 한다. 본 시스템에서는 문헌¹⁵⁾과 동일하게 결합도와 희석도를 각각 50%, 63.83%로 가정하였다. ASU에서 분리되는 질소와 산소의 순도 또한 문헌¹⁵⁾을 참고하여 98.9%, 95%로 가정하였으며, ITM에서 분리되는 산소는 참고 자료⁴⁾에 언급한 내용을 바탕으로 99.9%로 모사하였다. 모사한 ASU와 ITM의 소모동력을 다음과 같이 계산하였고, Table 1에 ASU의 운전 압력들을 표시하였다.

$$\dot{W}_{ASU} = (\dot{W}_{MAC} + \dot{W}_{BAC} + \dot{W}_{C,O_2} + \dot{W}_{P,O_2} + \dot{W}_{C,N_2}) \times \eta_{mo} \quad (1)$$

$$\dot{W}_{ITM} = (\dot{W}_{AAC} + \dot{W}_{C,O_2} + \dot{W}_{C,N_2}) \times \eta_{mo} \quad (2)$$

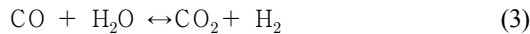
이때 ITM의 작동압력은 가스터빈의 고압부 압력과 동일하며, 온도는 850°C로 가정하였다. 이 조건은 문헌⁴⁾에서 언급한 작동조건 범위에 속한다. 석탄은

Table 2 Coal composition

composition	Mass fraction [%]
C	71.72
H ₂	5.06
N ₂	1.41
Cl	0.33
S	2.82
Ash	10.91
O ₂	7.75
HHV [kJ/kgK]	30531

Illinois #6 Coal이며, 그 조성을 Table 2에 나타내었다. 선행 연구⁷⁻¹¹⁾들에서 이미 가스화기기를 모사하였고 본 연구에서도 동일한 모델로서 해석을 진행하였다. 생성된 합성가스의 주요 구성요소인 수소와 일산화탄소의 몰 비율이 29.25%, 64.27%로써 문헌²⁰⁾과 거의 일치하였다.

합성가스는 연소 전 이산화탄소 포집을 위해 먼저 WGS반응을 거치는데, 반응식은 다음과 같다.



이때 필요한 증기의 양은 증기와 일산화탄소의 몰 비율(steam to CO ratio, SCR)로 결정되며 1.5로 가정하였다. 이산화탄소 포집 시 흡수식 포집장치(MEA processor) 및 CSU의 주요 설계 파라미터들을 Table 1에 나타내었다. 소모되는 동력은 다음의 식으로 계산된다.

$$\begin{aligned} \dot{W}_{\text{CCS}} &= \dot{W}_{\text{MEA}} + \dot{W}_{\text{CSU}} \\ &= \dot{W}_{\text{P,Amine}} + \Sigma \dot{W}_{\text{C,CO}_2} + \Sigma \dot{W}_{\text{P,H}_2\text{O}} \end{aligned} \quad (4)$$

문헌을 참고하여 가스터빈¹⁶⁾과 스팀터빈을 모사하였고, 그 설계 값을 Table 3에 나타내었다. 참고로 본 해석의 모든 시스템들에서 가스터빈의 배가스 온도가 620°C를 상회하여 3중압 HRSG를 구성하기에 충분하였다. 출력은 다음과 같은 식으로 계산되었다.

Table 3 Power block design parameters

Gas turbine	
Inlet air flow rate	544.3 kg/s
Combustor outlet temperature	1541°C
Turbine inlet temperature	1500°C
Turbine rotor inlet temperature	1417°C
Compressor pressure ratio	19.1
Coolant fraction relative to compressor inlet air	16.8%
Compressor polytropic efficiency	90.8%
Turbine polytropic efficiency	90.5%
HRSG and steam turbine	
HP/IP turbine inlet temperature	565.6°C
LP turbine inlet temperature	250°C
HP/IP/LP pressure	12411/2358/241.3 kPa
Condensing pressure	5 kPa
HP/IP/LP pinch temperature difference	35/40/10°C
Turbine polytropic efficiency	86.4/89.0/91.4%
Pump isentropic efficiency	80.0
Others	
Pressure losses	0.5~5.0%
Mechanical efficiency	99.5%
GT/ST generator efficiency	98.6/98.5%
Motor efficiency	95.0%

$$\dot{W}_{\text{GT}} = (\dot{W}_{\text{T}} - \dot{W}_{\text{C}} / \eta_{\text{m}}) \times \eta_{\text{gen}} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \dot{W}_{\text{ST}} &= (\dot{W}_{\text{T,HP}} + \dot{W}_{\text{T,IP}} + \dot{W}_{\text{T,LP}}) \times \eta_{\text{gen}} \\ &\quad - \dot{W}_{\text{aux,ST}} \end{aligned} \quad (6)$$

또한 ASU와 ITM등이 포함된 부가적인 소모동력을 아래와 같이 나타내었으며, 연료압축기 및 재순환 시 소모되는 동력도 고려하였다.

$$\dot{W}_{\text{aux}} = \dot{W}_{\text{ASU}} + \dot{W}_{\text{ITM}} + \dot{W}_{\text{CCS}} + \dot{W}_{\text{Mfsc}} \quad (7)$$

이러한 출력들을 고려하여 시스템의 총 출력과 효율은 다음과 같다.

Table 4 Performance of IGCC systems

Air supply method	ASU		ITM	
O ₂ purity	95.0%		>99.9%	
CO ₂ capture method	w/o	Pre-	w/o	Pre-
GT power [MW]	279.7	289.3	280.5	289.1
ST power [MW]	208.6	142.3	237.8	168.2
Auxiliary power [MW]	-59.1	-98.6	-51.2	-94.4
ASU power [MW]	-47.0	-52.3	-	-
ITM power [MW]	-	-	-37.6	-42.7
Misc. power [MW]	-12.1	-13.4	-13.6	-15.3
CO ₂ capture power [MW]	-	-32.9	-	-36.4
Coal mass flow [kg/s]	30.4	33.8	33.5	37.5
System net power [MW]	429.2	333.0	467.1	363.0
System efficiency [%]	46.33	32.26	45.66	31.68

$$\dot{W}_{\text{Net}} = \dot{W}_{\text{GT}} + \dot{W}_{\text{ST}} - \dot{W}_{\text{aux}} \quad (8)$$

$$\eta_{\text{system}} = \frac{\dot{W}_{\text{Net}}}{(\dot{m} \cdot \text{HHV})_{\text{coal}}} \quad (9)$$

본 연구를 위해 상용 공정해석 프로그램인 Aspen HYSYS²¹⁾를 사용하였다.

3. 결과 및 논의

산소의 분리를 위해 사용되었던 ASU는 공정이 복잡하고 소모동력이 많이 발생하며, 산소의 순도를 높일수록 그 동력이 증가한다. 이에 반해 ITM은 항상 높은 산소 순도(>99.9%)를 얻을 수 있으며, 공정이 단순하고 작동 조건을 유지시켜 주기 위한 에너지 소모가 일정하다. 산소의 순도가 높으므로 합성가스 내 질소 및 아르곤의 성분비가 감소하여 보다 좋은 품질의 가스를 얻을 수 있음을 확인하였다.

이러한 내용을 바탕으로 계산된 각 시스템의 성능을 Table 4에 비교하여 나타내었다. ITM을 적용한 시스템은 합성가스를 연소시킴으로서 ITM의 작동조건을 유지하기 때문에 ASU를 적용한 시스템보다 합성가스의 생산량이 많다. 이 같은 이유로 ITM으로 공기공급이 증가하며, 분리된 질소가 가스터빈 연소

기로 공급되는 양 또한 증가하게 된다. 이것은 가스터빈으로 공급되는 유량을 증가시켜 가스터빈 출력이 상승하는 결과를 나타낸다. 또한 ITM에서 분리된 산소의 냉각을 위해 HRSG에서 응축된 물의 일부를 가압하여 공급한 후 고압 증기터빈으로 보내진다. 이 같은 효과로 인해 증기터빈의 출력이 약 14.4% 증가한다. ITM을 적용할 경우 공기를 분리하는 공정이 단순하기 때문에 ASU보다 소모되는 동력이 적고 터빈의 출력이 증가하기 때문에 시스템의 전체 출력이 약 9.1% 증가하지만, 작동조건을 유지하기 위한 연료공급이 증가하여 전체 시스템 효율은 소폭 감소한다.

가스화기로부터 만들어진 합성가스에서 이산화탄소 포집을 고려할 경우 일산화탄소는 수증기와 반응하여 수소와 이산화탄소로 변환되며 포집장치를 통해 결과적으로 약 84.2%의 수소를 가지는 연료가스가 생성된다. 이렇듯 수소 성분이 높은 연료가 가스터빈에서 연소하게 되면 연소가스의 수증기 성분비가 높아져 이산화탄소 포집이 없는 운전에 비하여 가스의 비열 및 비열비가 커지게 되고, 따라서 터빈에서 가스의 엔탈피 낙차가 증가한다. 이 영향으로 터빈으로 공급되는 유량이 감소함에도 불구하고 출력이 증가하게 되었다. 그러나 이산화탄소 포집 시 필요한 열량을 공급해 주기 위해 HRSG의 증기를 일부 사용하기 때문에 증기터빈의 출력은 크게 감소한다. 또한 이산화탄소 분리를 거치면서 가연 연료의 양이 줄어들기 때문에 동일한 수준의 가스터빈의 터빈입구온도를 얻기 위해서는 공급되어야 하는 석탄 유량이 증가해야 한다. 따라서 필요로 하는 산소의 양도 증가하므로 소모동력도 증가한다. 이러한 이유로 인해 이산화탄소의 포집을 고려한 시스템은 일반 시스템에 비해 순출력이 약 30.4% 감소하게 된다. 이 같은 사실은 ASU, ITM을 적용한 시스템 모두 동일하다.

ASU로부터 얻어진 산소의 순도는 문헌¹²⁾의 설계 값(95%)을 참고하였기 때문에 ITM의 산소 순도보다 낮다. 동일한 순도의 산소 발생 조건에서 두 시스템의 성능을 비교하기 위해서 ASU에서 분리된 산소의 순도를 증가시키며 추가적인 해석을 하였다. 산소의

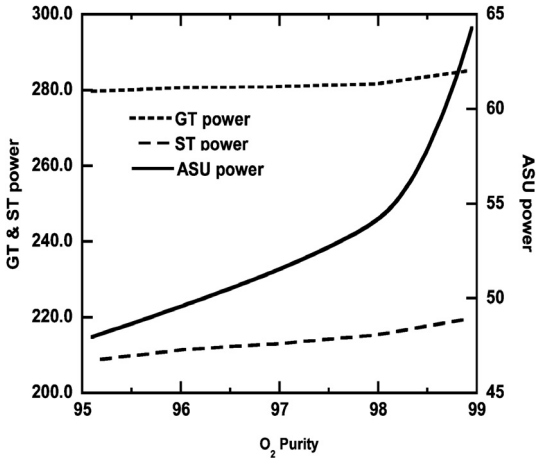


Fig. 4 Influence of oxygen purity of ASU on power

순도를 높일수록 ASU로 공급되는 공기의 유량이 증가하면서 Fig. 4에 보인 것처럼 소모동력이 증가한다. 특히 일정 수준 이상 순도를 증가시키면 소모 동력이 급격히 증가한다. ASU 공급 공기량의 증가는 산소를 제외한 가스터빈 연소기로 공급되는 나머지 유량(질소가 주성분)의 증가로 이어지며, 이는 다시 연소기에서 필요로 하는 합성가스의 증가로 이어진다. 결국 터빈 유량이 증가하게 되어 가스터빈 출력이 상승한다. 가스터빈 배기가스 유량이 증가하고, 늘어난 합성 가스 유량으로 인해 가스화기에서 처리가스 냉각 후 생성되는 증기유량도 증가하기 때문에 결과적으로 증기터빈의 출력 또한 상승한다. 이 부분이 반영되어 본 연구의 기준 순도인 95%이상으로 산소의 순도를 증가시키면 Fig. 5에 보인 바와 같은 시스템의 성능 변화를 가져온다. 가스터빈 및 증기터빈의 출력이 증가하여 ASU에서의 손실을 일부 보전해 주기 때문에 순출력의 변화폭 자체는 아주 크지 않다. 한편 산소의 순도가 증가할수록 앞서 서술한 바와 같이 합성가스의 양이 증가하게 되고 이에 따라 석탄의 공급량이 증가한다. 결국 출력 감소와 석탄 공급량의 증가에 의해 효율은 감소한다. 특히, 산소 순도가 96.5%이상 될 경우 ITM을 적용한 시스템보다 효율이 낮아지는 것을 확인하였다. 결과적으로 두 시스템에서 분리된 산소의 순도가 비슷해

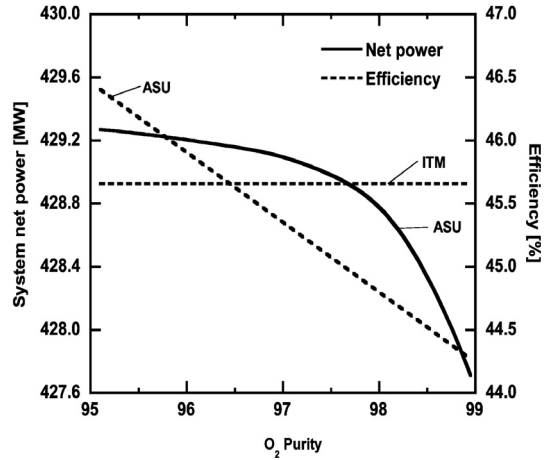


Fig. 5 Influence of oxygen purity of ASU on the system efficiency and power

질 경우에, 특히 ASU에서 분리된 산소의 순도가 ITM의 순도인 99%이상으로 높아지게 되면 ITM을 적용한 시스템이 효율 면에서 비교우위에 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 가스화기에서 요구된 산소를 공기로부터 분리하기 위해 ASU 및 ITM을 적용하였고, 이때의 IGCC 시스템들을 비교하였으며 그 결과는 다음과 같다.

- 1) ITM을 적용할 경우 시스템의 작동유량이 증가할 뿐만 아니라 공기분리 시 소모되는 동력이 적기 때문에 ASU를 적용한 시스템에 비해 전체 출력은 8.8% 증가한다. 그러나 ITM의 작동 온도, 압력조건을 유지하기 위해 연료소비가 증가하여 효율은 ASU를 사용하는 시스템 보다 다소(1.4%) 낮을 것으로 예상되었다.
- 2) 위 결과는 통상적인 값을 반영하여 두 시스템의 산소순도를 서로 다르게(ASU는 95%, ITM은 99% 이상) 가정한 경우이다. ASU를 사용한 시스템에서는 ASU의 산소 순도를 증가시킬수록 전체 시스템의 성능은 감소하는데, ITM으로 가능한 수준의 매우 높은 산소 순도를 달성하고자 한다면 오

히려 ITM을 사용하는 시스템의 효율이 더 높을 것으로 예상되었다.

- 3) 이상의 결과는 ITM 자체만 놓고 보면 동력소모가 ASU보다 월등히 낮아 발전 시스템에 사용할 때 유리할 것으로 예상되지만, 실제로는 작동 온도를 유지하기 위해서 상당한 양의 에너지를 공급해야 하므로 효율의 이득이 크지 않을 것임을 보여주는 것이다. 앞으로 추가적으로 ITM의 작동 온도 변화 가능성이나 온도를 맞추기 위한 열공급 방식의 개선(예를 들어 시스템 내부에서 열교환) 등의 성능 개선 방안에 대한 해석이 필요할 것이다.
- 4) ITM과 ASU를 적용한 시스템 모두 연소 전 이산화탄소 포집을 고려할 경우 시스템의 성능은 유사한 정도로 감소한다. 이러한 결과는 가스화기기로 공급되는 산소의 순도가 합성가스의 품질에는 영향을 주지만 이산화탄소 포집을 고려한 시스템의 성능에는 크게 영향을 미치지 않음을 의미한다.

후 기

본 연구는 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(2012-001443).

참 고 문 헌

1. R. A. Dennis and R. Harp, "Overview of the U. S. Department of energy's Official of Fossil Energy Advanced Turbine Program for Coal based Power Systems with Carbon Capture", ASME paper GT2007-28338, 2007.
2. J. M. Amann, M. Kanniche and C. Bouallou, "Natural Gas Combined Cycle Power Plant Modified into an O₂/CO₂ Cycle for CO₂ Capture", Energy Conversion and Management, Vol. 50, 2009, pp. 510-521.
3. J. Klosek, A. R. Smith and J. Solomon, "The Role of Oxygen in Coal Gasification", Proceeding from the Eighth Annual Industrial Energy Technology Conference, Houston, Texas, 17-19 Jun. 1986.
4. P. A. Armstrong, D. L. Bennett, E. P. Foster and V. E. Stein, "ITM Oxygen: The New Oxygen Supply for the New IGCC Market", Gasification Technologies 2005, San Francisco, California, 9-12 Oct. 2005.
5. J. Gibbins and H. Chalmers, "Carbon Capture and storage", Energy Policy. Vol 36, 2008, pp. 4317-4322.
6. M. Kanniche, R. Gros-Bonnivard, R. Jaud, J. Valle-Marcos, J. M. Amann and C. Bouallou, "Pre-combustion, Post-combustion and Oxy-combustion in Thermal Power Plant for CO₂ Capture", Applied Thermal Engineering, Vol. 30, 2010, pp. 53-62.
7. Y. S. Kim, J. J. Lee, T. S. Kim, J. L. Sohn and Y. J. Joo, "Performance Analysis of a Gas Turbine for IGCC Considering Plant Configuration", Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers-B, Vol. 32, No, 9, 2008, pp. 704-711.
8. Y. S. Kim, T. S. Kim, J. L. Sohn and Y. J. Joo, "Performance Analysis of The Gas Turbine For a IGCC Plant Considering Turbine Blade Temperature", Conference of Korean Fluid Machinery Association 2008, Jeju-Island, Korea, 4-5 Dec. 2008, pp. 341-342.
9. Y. S. Kim, J. J. Lee, T. S. Kim and J. L. Sohn, "Influence of Syngas Composition on the Operating Characteristics of a Gas Turbine", Asian Congress on Gas Turbines 2009, Tokyo, Japan, 24-26 Aug. 2009.
10. S. K. Park, J. H. Ahn and T. S. Kim, "Performance evaluation of integrated gasification solid oxide fuel cell/gas turbine systems including carbon dioxide capture", Applied Energy, Vol. 88, 2011, pp. 2976-2987.
11. J. H. Ahn and T. S. Kim, "A study on the integrated gasification solid oxide fuel cell/gas turbine system", Proceedings of the KHNES Annual Spring Meeting 2011, Jeju-Island, Korea, 12-13 Mar. 2011, pp. 281-286.
12. E. O. Oluyedo and J. N. Phillips, "Fundamental

- impact of firing syngas in gas turbines”, ASME paper GT2007-27385, 2007.
13. C. Descamps, C. Bouallou and M. Kanniche, “Efficiency of an integrated gasification combined cycle (IGCC) power plant including CO₂ removal”, Energy, Vol. 33, 2008, pp. 874-881.
 14. M. Kanniche, and C. Bouallou, “CO₂ Capture Study in Advanced Integrated Gasification Combined Cycle”, Applied Thermal Engineering, Vol 27, 2007, pp. 2693-2702.
 15. W. Shelton, and J. Lyons, “Shell Gasifier IGCC Base Case”, NETL report PED-IGCC-98 -002, 1998.
 16. I. Diakunchak, H. J. Kiesow and G. McQuigg an, “The History of the Siemens Gas Turbine”, ASME paper GT2008-50507, 2008.
 17. A. Posada and V. Manousiouthakis, “Heat and power integration opportunities in methane reforming based hydrogen production with PSA separation”, AIChE 2004 Annual Meeting Conference Proceedings, Paper 22f, 2004.
 18. L. E. Oei, “Aspen HYSYS Simulation of CO₂ Removal by Amine Absorption from a Gas Based Power Plant”, SIM2007 conference, Goteborg, Sweden, 30-31 Oct. 2007.
 19. H. Li and J. Yan, “Preliminary Study on CO₂ Processing in CO₂ Capture from Oxy-Fuel Combustion”, ASME paper GT2007-27845, 2007.
 20. C. Hugman and M. van der Burgt, “Gasification”, Elsevier, Netherlands, 2003, pp. 9-17.
 21. Aspen Technology, AspenOne HYSYS, Ver. 7.2