

IGCC 플랜트에 적용할 가스화기부의 모델링

박 진후¹⁾, 김 태현²⁾, 고 영건³⁾, 최 상민⁴⁾

Modeling of the gasifier section for IGCC plant

Jinhoo Park, Taehyun Kim, Young Gun Go, Sangmin Choi

Key words : Integrated Gasification Combined Cycle(석탄가스화 복합발전), Coal gasifier(석탄가스화기), Process model(공정모델)

Abstract : 석탄가스화 복합발전(IGCC)에서 석탄 가스화 기술이 전 공정의 성능에 큰 영향을 미치는 중요한 요소이다. 연료 및 산화제의 공급방식, 가스화기의 기본 구조, 벽면의 구성 방식, 용융 슬래크 및 생산되는 합성가스 배출 방식 등에 따라 가스화의 성능이 영향을 받는다. IGCC plant의 정확한 성능 해석을 위해서는 석탄가스화기 공정 모델의 정밀도를 높일 필요성이 있다. 기존의 열병합 발전 사이클 해석에서 적용되었던 열 및 물질정산과 평형계산 방식을 통하여 석탄가스화기 공정을 해석하는 방법을 확인, 정리하고 이를 개선하기 위한 절차 및 방안을 제시하고자 한다. 가스화기 내부 공정을 크게 탈휘발과 가스화의 단계로 구분하여 가스화기 출구조건을 예측하였으며, ASPEN PLUS를 이용한 공정해석을 실시하였다. 가스화기 출구에서의 합성가스는 주생성가스인 CO, H₂를 위주로 하여 조성을 얻을 수 있고, 그 결과들을 선행연구들과의 비교를 통하여 가스화기 모델의 분석을 실시한다. 그리고 가스화기 해석의 정밀도를 높이기 위한 향후 고려될 가스화기 모델에 관하여 논의한다.

Nomenclature

R_{sc} : steam/coal ratio

Subscript

IGCC : Integrated gasification combined cycle

1. 서 론

석탄가스화 복합발전(IGCC)은 발전효율이 42~50%정도로 기존의 미분탄 화력발전방식에 비해 발전효율이 높고, CO₂ 저감, SO_x, NO_x 등의 대기오염을 유발하는 물질을 줄일 수 있는 친환경적인 발전방식이다. 석탄가스화 복합발전은 크게 석탄을 가스화하는 가스화기, 생성된 가스를 정제하는 가스정화장치, 생성가스를 연소시켜 동력을 얻는 가스터빈과 폐열을 회수하는 폐열회수 증기발생기(HRSG), 생성된 증기를 이용하여 동력을 얻는 스팀터빈으로 구성된다. 해외에서는 미국, 일본, 유럽을 중심으로 IGCC 플랜트의 실증설비 건설을 통해 각 구성요소들의 설계 및 운전등과 관련한 기술을 확보한 상태이다. 국내에서는 2006년 말 시작한 석탄 IGCC 사업단의 한국형 300MW급 IGCC 실증플랜트 건설사업과 관련

하여 IGCC 플랜트에 대한 설계, 건설, 운전기술을 확보하기 위한 연구가 진행중이다.¹⁾

가스화기는 석탄에서 합성가스를 생성시키는 장치로 가스화 성능에 따라 전공정에 큰 영향을 줄 수 있는 장치이다. 가스화기는 미분탄의 공급 방식, 가스화로 본체의 기본 구조 및 벽면 구성 방식, 용융 슬래크배출 및 생성가스 배출방식등에 의해 구분되어진다. IGCC 플랜트의 성능 예측을 더욱 정확하게 하기 위해서는 가스화기에 대한 정확한 성능 해석이 필수적이다. 과거부터 가스화기에 대한 다양한 수치해석 방법 및 결과들이 진행되어왔고, 현재에도 진행중이다. 본 연구에서는 열물질정산 및 열역학적 평형계산을 이용한 기존의 연구방법을 통하여 가스화기의 출구조건을 예측해보고 가스화기 해석과 관련한 향후 연구 진행방향을 논의한다.

논의에 앞서 사용되는 용어에 대한 간단한 정의를 내린다. 전공정이라 함은 IGCC 플랜트를 구성하는 모든 단위 공정-가스화기와 같은-이 연계된 하나의 플랜트 시스템을 말하는 것이고, 공정 모델이라 함은 기기의 성능을 예측할 수 있는 simulation 모델을 의미한다.

1) 한국과학기술원 기계공학과

E-mail : pjhlr3218@kaist.ac.kr

Tel : (042)869-3070 Fax : (042)869-3210

2. 가스화기에 대한 연구

IGCC 공정에서 가스화기는 석탄을 가스화시키는 매우 중요한 공정이다. 현재 가스화기를 제조하는 공정사는 GE, Shell, E-gas 등이 있으며, 이 기업들이 IGCC 및 가스화기 기술 개발을 주도하고 있다. 가스화기 3사의 기본운전조건에 대한 정보를 간략하게 조사하였다. 또한 가스화기에 대한 선행연구 조사를 통하여 가스화기 성능 해석에 있어 어떤 부분에 초점을 맞추어야 하는가에 대한 정보를 분석한다.

2.1 가스화기 type

가스화기 기술을 주도하는 기업은 앞서 언급한 주요 3사가 있다. 기본적인 가스화 과정은 비슷하지만 석탄 및 산화제 투입 방식, 가스화기 형상, syngas cooling 방법 등에 대해서는 각기 다른 점을 가지고 있다. 다음은 공정사별 가스화기에 대한 diagram을 GE, Shell, E-gas 순서로 나타낸 것이다.

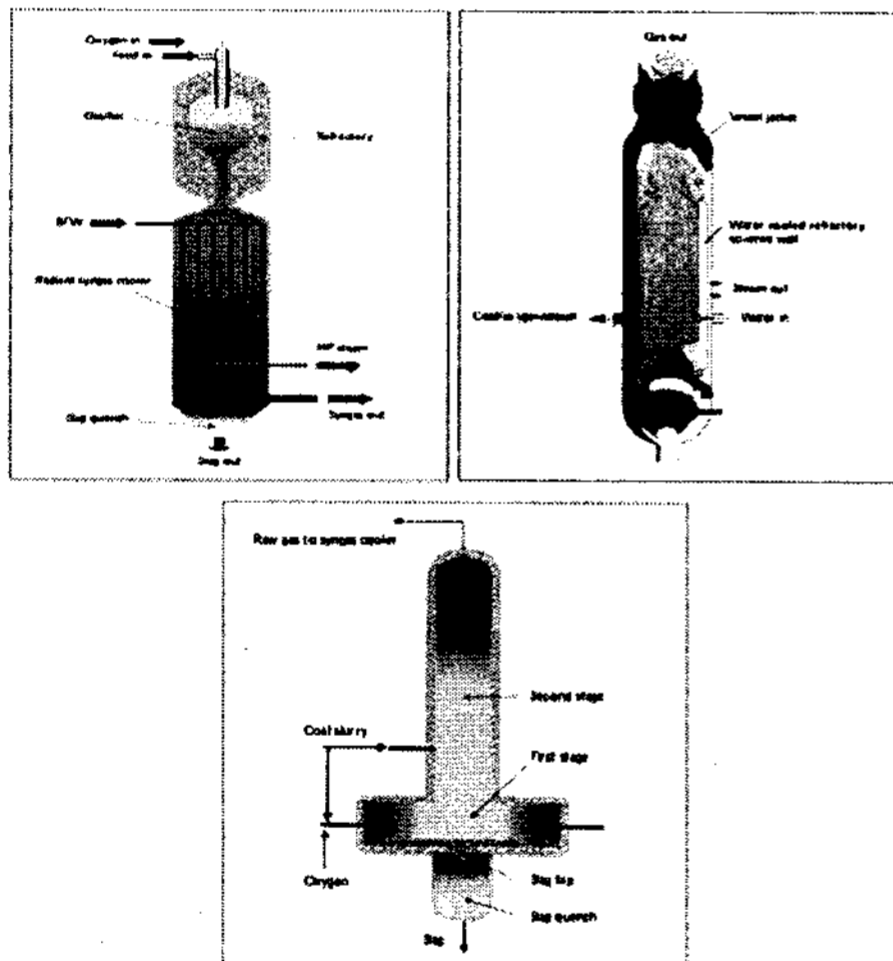


Fig. 1 공정사별 diagram(GE, Shell, E-gas)

GE 가스화기는 single stage down flow type이고 coal slurry와 oxygen은 가스화기의 윗부분에서 투입된다. Coal을 grinding하여 water와 섞어 slurry를 만드는 전처리 공정이 필요하다. GE의 가스화기는 타사의 가스화기보다 높은 압력에서 가동되는 장점이 있다. Shell 가스화기는 up-flow type으로 dry coal을 투입하는 것이 타사의 가스화기와 다른 점이다. Dry coal을 사용하기 때문에 투입되는 coal의 범위가 다양해질 수 있어 가스화기 운전범위가 비교적 넓은 것이 장점이다. E-gas 가스화기는 2stage로 구성되어있는 것이 특징이고 lower stage의 2개의 burner에 coal slurry와 Oxidant가 투입되어 연소되고 이 때 발생하는 fuel gas는 upper stage로 이동한다. Upper stage에서는 일부의 coal slurry가 투입되어 fuel gas와 반응하여 합성가스가 생성된다. E-gas 가스화기는 플랜트 건설비용이 비교적 적게 든다는 장점이 있다.^{2, 3)}

공정사별 가스화기의 기본적인 운전조건은 어

는 정도 차이가 조금씩 있겠지만 대략적으로는 Table 1과 같다.⁴⁾

Table 1 각 공정사별 기본운전조건

	GE	Shell	E-gas
온도(°C)	1250-1450	1500-1600	1350-1400
압력(MPa)	3-8	4	3

2.2 가스화기에 대한 선행 연구

가스화기의 성능해석과 관련하여 다양한 연구들이 진행되었고 많은 연구결과들이 있다. 미국의 Department of Energy(DOE)와 Fluent사에서는 2stage, oxygen blown, entrained flow, coal slurry gasifier에 대하여 discrete phase model을 이용한 수치해석을 수행하여 가스화기 내의 합성가스 분포 및 출구에서의 합성가스 조성을 예측하였고,⁵⁾ H.Watanabe, M.Otaka는 2t/d급 research scale의 가스화기에 대한 수치해석을 통하여 운전조건에 따라 가스화특성이 어떻게 변화하는가를 예측하고 실제 운전 데이터들과 비교 및 분석하였다.⁶⁾ William Vicente, Salvador Ochoa등은 Eulerian method를 통하여 가스화기 수치해석에 관한 접근을 시도하였고⁷⁾, Qizhi Ni and Alan Williams는 Shell coal gasifier에 대하여 equilibrium, mass balance and energy balance를 이용한 non-linear programming을 통하여 가스화기 성능을 예측하였다.⁸⁾ Despina Vamvuka는 1-dimension, steady-state의 축방향 plug flow 모델에서 coal particle내의 온도는 uniform하다는 가정 하에 가스화기 성능을 예측하였다.⁹⁾ 국내에서는 고등기술연구원에서 IGCC 플랜트에 관한 연구를 진행하였는데 플랜트의 성능을 탄종과 터빈의 모델에 따라 예측하였고, 공정해석 코드를 이용한 가스화 플랜트에 대한 성능예측도 실시하였다.¹⁰⁾ 또 3t/d급의 pilot-scale 가스화기를 이용한 실험을 통하여 가스화기 성능에 대한 분석을 실시한바 있다.¹¹⁾ 그 외에도 많은 선행연구들이 실시되었고, 다양한 연구결과들이 제시되었다.

선행 연구결과들을 참고로하여 가스화기 공정 모델에 대한 연구 진행방향을 생각해보고 저차원의 평형계산부터 시작하여 어떠한 방법을 이용해서 단계별로 가스화기 공정 해석 모델을 발전시켜나갈 것인가라는 점이 연구의 핵심이다.

3. 가스화기 공정모델

가스화기 성능 해석과 관련하여 열물질정산 및 평형계산, CFD해석등 다양하고 많은 선행연구들이 실시되었고 현재에도 진행중이다. 여기서는 기존의 평형계산을 이용한 방법으로 가스화기 출구조건을 예측해보고 결과를 분석한 후, 가스화기 성능 해석에 대해 앞으로 어떠한 방향으로 나아가야 하는가에 대해 논의한다.

3.1 단순화한 가스화기 모델 해석

가스화기 해석과 관련하여 다양한 수치해석 방법들이 제시되어 있다. 여기서는 가스화기에 대한 평형계산을 실시하여 출구조건을 예측해보

고 평형계산과 관련한 유효성 및 한계점을 분석해본다. 그 후 평형계산에서 발전된 해석 방법에 대해 논의한다. 평형계산에 사용할 가스화기 타입은 Shell사의 dry-feed, oxygen-blown, entrained-flow gasifier로 선정하고 ASPEN PLUS 코드를 이용하여 계산을 실시하였다.

3.1.1 입력조건 및 운전조건

계산에 사용한 입력조건은 dry-coal을, transport gas로는 Nitrogen을 이용하여 투입한다. 그리고 산화제와 가스화제로 oxygen과 steam을 투입한다. Coal의 물성치와 투입량은 Table 2, 3과 같다.¹²⁾

Table 2 Coal의 원소분석 및 공업분석

Coal type		Illinois#6
Proximate analysis (Wt. %)	Moisture	11.12
	FC	44.19
	VM	34.99
	ASH	9.70
Ultimate analysis (Wt. %, dry)	Carbon	71.72
	Hydrogen	5.06
	Nitrogen	1.74
	Sulfur	2.82
	Oxygen	7.75
	ASH	10.91

Table 3 가스화기 입력조건

	Flow rates(tons/hr)
Coal	112.5
Oxidant	96.7
Steam	3.3
Transport Nitrogen	8.6

가스화기에 투입되는 물질들의 기본적인 조건이다. 평형계산방법의 유효성을 알기 위해 기본 조건에 대한 계산 및 R_{sc} 에 변화를 주고 어떻게 출구조건이 바뀌는가를 살펴본다. 가스화기는 압력 2.4MPa, 온도 1500℃에서 작동한다고 가정하였다.

가스화기 내에서 일어나는 반응은 크게 coal이 휘발분으로 분해되는 과정과 가스화과정의 두 부분으로 나누었다. ASPEN PLUS코드를 이용하여 과정을 구현하고 계산에는 Gibbs free energy 최소화법을 이용하여 평형계산을 실시하였다.

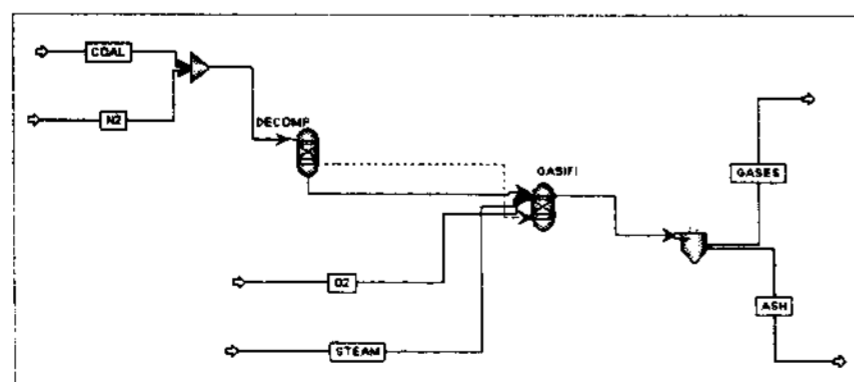


Fig. 2 가스화기 공정의 flowsheet

3.1.2 계산 결과

Table 2, 3으로 주어진 기본조건에 대한 평형

계산의 결과를 Table 4에 나타내었다.

Table 4 평형계산 결과 및 비교

	H ₂	CO	CO ₂	N ₂	H ₂ O	Others
계산	29.1	64.1	1.1	2.0	3.0	0.7
Ref.	29.7	62.7	2.06	4.32	0.3	0.92

주생성가스인 H₂와 CO가 90%이상을 차지하고 그 외에 CO₂, N₂, H₂O, CH₄, H₂S, COS가 소량으로 생성되는 것을 알 수 있다. 이 결과가 가지는 타당성을 검증하기 위해 Shell사의 가스화기를 기반으로 하여 IGCC 플랜트 성능 해석을 실시한 자료와 비교해 보았다. 합성가스의 조성이 Reference 자료와 큰 차이를 보이지 않지만 0.6~2.7%까지 오차가 나타나는 것을 볼 수 있다. Reference로 선정한 모델의 운전조건이 평형계산한 모델의 운전조건과 비슷했다. 하지만 Table 4의 Ref.는 가스화기 출구를 거쳐 정제를 어느 정도 거친 자료를 바탕으로 하였기 때문에 H₂나 CO와 같은 주생성 가스는 크게 차이가 나지는 않지만 후처리공정과 관련된 그 외의 CO₂, N₂, H₂O의 가스는 조금씩 차이를 보이게 된다. 전체적으로 계산 결과가 크게 문제가 되는 것은 아니므로 계산 모델에 대한 타당성은 확보될 수 있다.

그리고 입구조건의 변화에 대해 출구조건이 어떻게 바뀌는가를 확인해보기 위하여 steam/coal ratio에 변화를 주고 결과를 확인하였다.

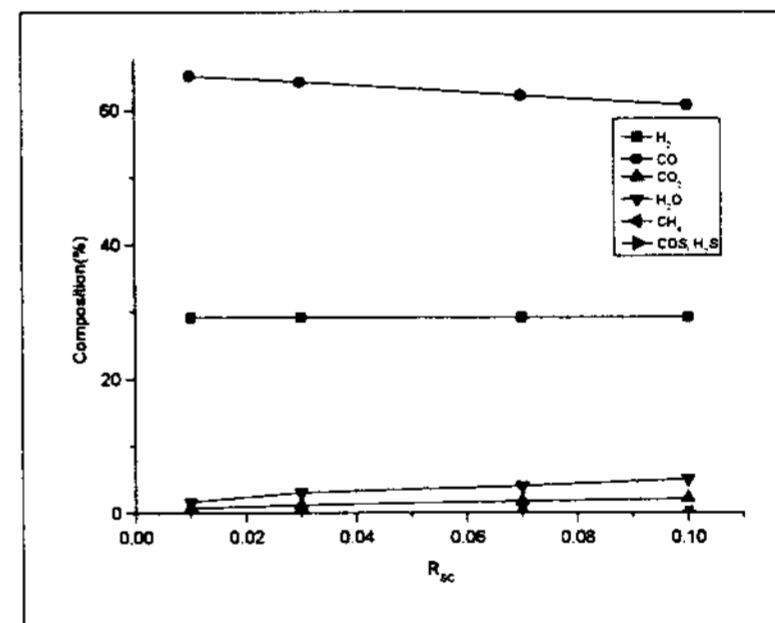


Fig. 3 R_{sc} 에 따른 합성가스 조성의 변화

Fig. 3는 R_{sc} 가 변함에 따라 합성가스 조성이 어떻게 변하는가를 나타내는 그래프이다. 투입되는 steam의 양이 증가할수록 CO는 감소하고 H₂는 조금씩 증가하고, CO₂는 증가하는 것을 알 수 있다. 투입되는 steam량이 증가함에 따라 H, O의 mass가 증가하기 때문에 위와 같은 현상이 나타난다. 기존의 연구결과에서도 비슷한 결과를 확인할 수 있다.⁸⁾

3.2 가스화기 공정 해석

앞선 평형계산을 통하여 합성가스의 조성과 관련한 결과를 얻을 수 있다. 평형계산을 이용하면 가스화기 출구조건에 대한 결과를 쉽고 빠르고 실제와 유사하게 예측할 수 있는 장점이 있다. 또한 입력조건과 운전조건을 변화시켰을 때 출구조건이 어떻게 바뀌는가를 빠르게 예측할 수도 있다. 하지만 이러한 장점을 가지고 있음에도 평형계산의 결과가 실제로 유용하게 사용될 수는

없다. 실제 IGCC 플랜트에서는 가스화기의 합성 가스 조성이 조금만 변화해도 전체 플랜트의 효율이 바뀌게 되고 이는 플랜트의 경제적 효율에도 큰 영향을 주게 된다. 따라서 가스화기에 대한 매우 정확한 성능 예측이 필요하게 되고 어떻게 하면 정확한 성능 예측을 할 수 있을 것인가가 중요한 논점이 된다. 이런 관점에서 볼 때 정밀도가 높고 IGCC 플랜트의 운전과 연결하여 공정을 모니터링할 수 있는 가스화기 공정 해석 모델의 필요성이 제기된다.

앞서 실행했던 평형계산이 쉽고 빠른 결과의 예측을 가능하게는 하지만 최종적으로 원하는 정밀도가 높고 전공정 해석과 연결되는 현실적인 결과를 주지는 않는다. 따라서 최종적인 목표를 위해 가스화기 공정 해석에 대한 단계적인 접근을 시도하려고 한다. 시공간의 변화를 고려하지 않고 단순한 input 및 운전조건을 주면 output을 얻을 수 있는 평형계산에서 시작하여 가스화기를 여러개의 작은 reactor로 나누어 drying, devolatilization, gasification, combustion의 가스화 모델을 고려하는 1-D의 simple plug flow 모델이 있을 수 있다. 이후 가스화기 형상을 고려한 2-D, 3-D에서의 가스화 turbulent flow등으로 확장할 수 있다. 가스화 반응 모델에서는 단일자에서의 열물질전달 및 devolatilization kinetics, surface reaction등 gasification reaction을 이용한 석탄 연소 모델을 적용하거나 phase간의 reaction 및 입자 사이의 interaction을 고려한 보다 복잡한 kinetics를 고려하는 모델등을 적용하는 것이 가능할 것이다. 여기에는 선행연구에서 살펴보았던 많은 모델들이 연구의 방향을 제시해 줄 것이다.

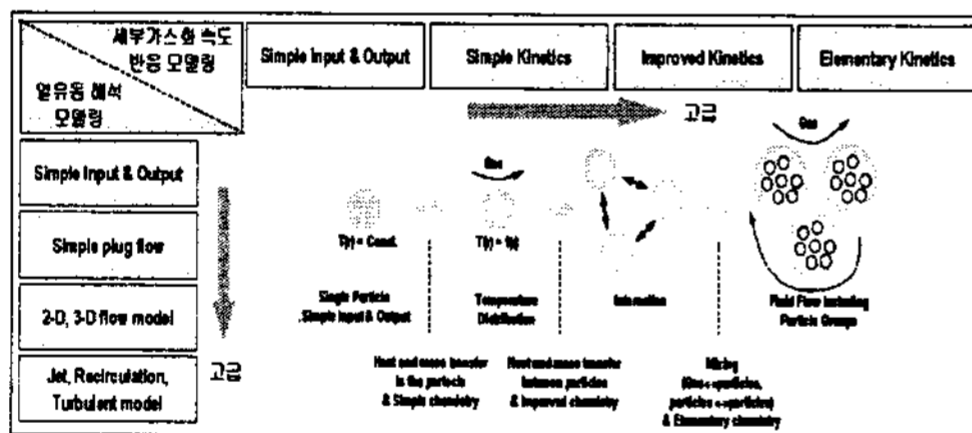


Fig. 4 가스화기 공정 모델의 flowchart

4. 결론

가스화기 공정 모델 구축과 관련하여 연구 배경 및 연구 방향에 대해 살펴보았다. 가스화기 해석 방법과 관련하여 열물질정산 및 평형계산을 이용한 방법을 비롯하여 다양한 수치해석 방법들이 존재한다. 여기서는 평형계산을 이용한 방법으로 가스화기 모델에 대한 접근을 통해 가스화기 성능 예측의 중요성에 대해 알아보았다. 저차원 평형계산부터 시작하여 단계별로 물리적 모델을 추가하는 방향으로 연구를 진행하여 가스화기 공정 모델을 발전시키도록 한다.

후 기

본 연구는 산업자원부 신재생에너지기술개발사업 및 연소기술 연구센터(CERC), Brain Korea21의 지원으로 수행되었습니다.

References

- [1] 석탄 IGCC 사업단, 2007, "한국형 300MW 급 설계기술 자립·실증플랜트 건설사업 착수 회의"
- [2] 두산중공업, 2007, "실증 가스화 플랜트 종합설계 및 자립기술개발"
- [3] Department of Trade and Industry, "Gasification of solid and liquid fuels for power generation", December 1998.
- [4] John Rezaian, Nicholas P. Cheremisinoff, "Gasification technologies - A primer for engineers and scientists"
- [5] S.-P. Shi, S. E. Zitney, M. Shahnam, M. Syamlal and W. A. Rogers, 2006, "Modelling coal gasification with CFD and discrete phase method", Journal of the Energy Institute, Vol. 79, No. 4, pp. 217-221, 2006.
- [6] Watanabe, H. ; Otaka, M., 2006, "Numerical simulation of coal gasification in entrained flow coal gasifier", Fuel, v.85, no.12/13, pp. 1935-1943, 2006.
- [7] William Vicente, Salvador Ochoa, Javier Aguillon, Esteban Barrios, 2003, "An Eulerian model for the simulation of an entrained flow coal gasifier", Applied thermal engineering, v.23, no.15, pp. 1993-2008, 2003.
- [8] Qizhi Ni and Alan Williams, 1995, "A simulation study on the performance of an entrained-flow coal gasifier", Fuel, v.74, no.1, pp. 102-110, 1995.
- [9] Despina Vamvuka, Edward T. Woodburn and Peter R. Senior, 1995, "Modelling of an entrained flow coal gasifier - 1. Development of the model and general predictions", Fuel, v.74, no.10, pp.1452-1460, 1995.
- [10] 이승중, 이진욱, 김용철, 이찬, 윤용승, 1999, "공정개발급 석탄가스화 복합발전플랜트의 성능평가", 화학공학, Vol.37, No.1, pp. 47-55, 1999
- [11] Yongseung Yun and young Done Yoo, 2001, "Performance of a Pilot-scale gasifier for Indonesian Baiduri Coal", The Korean journal of chemical engineering, Vol.18, No. 5, pp. 679-685, 2001
- [12] Process Engineering Division, "Shell gasifier IGCC Base cases", NETL, June 2000.