

석탄가스화 시스템 공정모델에 관한 연구

김수완 · 김형택 · 이 찬*

이주대학교 대학원 에너지학과, *수원대학교 공과대학 기계공학과

Process Model for the Coal Gasification System

Su Wan Kim, Hyung Taek Kim and Chan Lee*

Department of Energy, Graduate School, Ajou University

*Department of Mechanical Engineering, College of Engineering, Suwon University

요 약

본 연구는 현재 이주대학교 구내에 건설중인 3T/D 석탄가스화 실증실험장치의 엔지니어링 설계자료 및 실험장치 각 부분의 사양을 종합화하여 최적의 설계조건을 도출하고 향후 스케일 업에 따른 장치변화 및 관련변수를 예측할 수 있는 공정모델을 개발하는데 그 목적이 있다. 모델은 3T/D 석탄가스화 장치와 같이 가스화기부분, 산화제 및 연료의 주입부분, 생성가스의 냉각부, 가스화기 예열부분 및 회분처리부로 구성된다. 개발된 모델에 의해 부분별 대체가능성을 평가하여 최적 조합형태를 제시하였고 결과의 타당성을 입증하기 위해 실제 플랜트의 설계자료와 프로그램에 의한 결과를 비교하였다. 또한 스케일 업 결과 변화폭이 가장 큰 부분은 냉각기 부분으로 냉각기의 길이가 냉각수 유입량 증대에 따라 급격히 변화되어 냉각수 유입을 위한 냉각수 분사장치의 교체가 필요한 것으로 판단되었다.

Abstract—The purpose of this study is to develop process model of coal gasification system by integrating engineering design data and design specification of 3T/D IGCC bench scale unit which is built in Ajou University. The resulted process model is verified to be suitable for the optimization of design condition and is utilized for the scale-up of the unit according to the change of equipment as well as operating variables. The model is composed of gasifier part, oxidants and coal injection part, flue gas cooling part, gasifier preheating part, and ash discharging part like those of 3 TPD BSU unit. With the developed model, the possibility of partial replacement of the unit is proposed and the results derived from computer model were compared with the design data of actual plant. Scale-up of BSU results showed that cooling part has the most wide variation range. Gas cooler length varies dramatically in accordance with increment of the amount of cooling water so that it might be needed to replace the atomizer for appropriate cooling water spray in case of scale-up.

1. 서 론

2000년대에 들어 경제성장에 따른 에너지수요 증가와 국내 전력수요량의 증대 가능성에 비추어 탈석유정책의 일환으로 석탄 및 타 에너지자원의 연구개발사업은 정책적으로 중요시되어 현재 관련분야에 대한 연구과제가 수행 중에 있다. 또한 국제적인 환경규제 강화정책 실시에 대한 대응책으로 선진 외국에서도 추진중인, 차세대 화력 발전기술의 실용화 노력의 중요성은 가히 논하지 않아도 알 수 있을 것이다. 최신 화력발전

기술 중 석탄가스화 복합발전기술은 석탄가스화장치, 가스정제장치, 가스연소장치, 가스터빈, 폐열회수보일러 및 증기터빈 등으로 구성되는 복합적인 발전개념으로 특히 고효율 및 저공해 발전기술이라는 점이 특징이다¹⁻³⁾.

석탄가스화의 기본원리는 석탄을 불완전 연소시켜 CO, H₂, CH₄ 등의 가연성 기체로 변환시키는 것으로서, 생성된 가스의 조성 및 발열량은 가스화기의 반응온도 및 산화제의 종류에 따라 다르나, 주로 발전용으로 사용되는 IGCC(Integrated Coal Gasification Combined Cy-

cle) 기술에서는 천연가스에 비하여 발열량이 낮은 중열량 또는 저열량 가스가 생성된다. 생성된 가스내에는 회분 및 유황성분 등의 유해성분이 포함되어 있어 가스터빈 날개의 부식 및 환경문제를 유발시킬 수 있으므로 가스정제장치가 필요하다. 가스정제 장치는 황 제거 공정과 분진 제거 공정으로 나눌 수 있으며, 이곳에서 정제된 가스를 가스터빈의 연료로 사용하여 일차적으로 전력을 생산하며 또한 가스화기 및 가스정제공정에서 발생하는 열원과 가스터빈 배기가스의 열원을 이용하여 증기를 생성하여 스팀터빈을 구동시켜 부가적인 전력을 생산하게 된다. 이러한 IGCC 개념은 가스터빈과 증기터빈을 동시에 구동시켜 전력을 생산하므로 기존의 미분탄연소 화력발전방식에 비하여 발전효율이 높고 또한 생성 가스 중의 오염물질을 연소전 제거함으로써 환경보존성이 우수하다는 장점이 있다. 향후 이 기술을 이용한 화력발전소가 세계적으로 계속 증가될 전망이다. 국내에서도 한전기술연구원을 비롯한 여러 관련기관들이 IGCC 기술개발을 추진 중에 있다.

본 연구에서는 현재 아주대학교 내에 설치중인 3T/D IGCC BSU(bench scale unit) 플랜트의 설계자료를 토대로 석탄가스화기 시스템의 공정모형을 개발하여 최적설계에 따른 부분별 대체가능성을 분석하여 대체가능한 재질 및 정보를 자료화 하고자 한다. 또한 스케일업(Scale-up)에 따른 가스화기부분, 산화제 및 연료의 주입부분, 생성가스의 냉각부분, 가스화기 예열부분, 그리고 회처리부분에 대해 탄중 변화 및 운전변수에 따른 장치변화를 분석하여 스케일업 설계자료의 기준으로 확보하고자 한다. 공정모형에 의해 도출되는 각 장치의 변화와 장치간에 미치는 영향분석은 차 후 설계자에게 입력자료로 제시되어 개선된 가스화기 공정의 기본설계에 기여할 것으로 사료된다.

2. 석탄가스화 공정 시스템

공정모형에 사용한 가스화기의 형태는 건식 분류층 슬래그형 가스화기로서 산화제로는 공기와 산소를 모두 사용할 수 있도록 설계되었고 운전조건은 최대 1650°C, 30 기압이다. 석탄가스화 공정은 석탄처리, 석탄/Flux 주입, 가스화기, 슬래 제거, 생성가스 냉각, Fly ash/Fly slag 제거장치로 구성되어 있다. 전처리장치에서는 괴탄이 이송장치를 통하여 미분기에 들어가 미분화된 후 4개의 Lockhopper로 구성된 석탄 주입장치를 통해 가스화기로 유입된다. 석탄의 주입은 4개의 환형노즐의 내관을 통해 산소, 질소와 혼합되어 연속적으로 유입된다. 예혼합을 제외한 나머지 산소와 증기는 환형노즐의 외관을 통해 유입되며 산소, 스팀, 석탄 그리고 이송가

스는 가스화기로 들어가기 직전 환형노즐 끝단의 수렴부분에서 혼합되어 가스화기 내부로 주입된다. 주입장치에 사용된 예혼합 설계는 기체와 고체간 접촉을 증대시키므로서 높은 가스화 효율을 얻어낼 수 있을 것으로 판단된다. 가스화 반응에 필요한 산소의 일부는 석탄 이송가스로 사용되며 나머지는 증기와 함께 환형노즐을 통하여 접선 방향으로 가스화기 내부에 유입된다. 석탄 중의 유효성분은 산화제 및 증기와 반응하여 생성가스가 되고 회 성분은 가스화기 내벽에서 용융된 후 벽을 타고 흘러내려 슬래 제거장치를 통해 배출된다. 가스화기에서 생성된 가스는 냉각장치에서 물 분사에 의해 냉각된 후 Cyclone에서 잔여 Fly ash/Fly slag를 제거한 후 Flarestack을 통해 배출된다. 생성가스의 분석은 가스화기 상단의 가스포집장치 및 가스분석장치에 의해 수행된다. 또한 가스화기를 예열시키기 위해서는 예열버너를 통해 LPG와 공기를 사용하여 가열하고 또한 운전정지할 경우에도 이 버너를 사용하여 잔여 슬래를 제거할 수 있다. 본 연구에서는 이러한 플랜트 구성부분의 일부인 가스화기, 예열버너, 회분처리부, 냉각부, 석탄 및 산화제 주입부의 설계자료를 기초로 한 공정 모형을 구성하였다.

3. 프로그램 구성을 위한 수학적 모델

석탄가스화 공정 모델은 주 프로그램 및 부 프로그램으로 구성되어 있다. 주 프로그램은 3T/D 석탄가스화 BSU의 주요 장치, 즉 예열 버너, 주입 노즐, 가스화기 내화벽, 냉각장치, 슬래 처리 장치의 설계를 위한 수학적 모델로 구성된다. 가스화기의 수학적 모델에서는 운전온도를 유지하기 위한 내화벽의 두께를 계산하였다. 가스화기는 내층, 중간층, 외곽층의 3개의 내화벽으로 구성되어 있으며 가스화기 운전시 요구되는 온도 유지를 위한 내화벽의 두께를 시행착오법을 이용하여 계산하였다. 예열버너에 의한 입열량이 내화벽을 가스화기 운전온도로 올린다고 가정하고 이때 내화재의 외벽을 통해서 빠져나가는 열량이 예열 버너의 입열량과 정상상태에 도달하여 가스화기 운전온도를 유지할 때 내화벽 각 층의 두께를 계산하였다.

가스화기로 석탄, 산화제, 스팀을 유입시키는 노즐의 최적속도를 도출하는 방법은 다음과 같다. 가스화기에서는 이중 환형 노즐을 사용하여 1차 노즐로는 미분탄과 질소가 2차 노즐로는 산소와 스팀이 유입되게 설계하였다. 본 연구에서 모델로 삼은 3톤/일 BSU에서는 생성가스 효율을 높이기 위하여 운반가스로 질소 대신 질소/산소 혼합가스를 사용하였다. 미분탄 이송에 필요한 가스의 양은 미분탄의 약 10 wt%가 요구되어지는 것으

로 알려졌으며⁹, 반응제로 유입되는 산소와 스팀은 최대 생성가스 효율을 얻기 위한 질량비에 의해 주입양을 결정한다. 주입온도 및 압력은 300°C, 35.5 기압으로 주입된다. 1차측 노즐로 주입되는 석탄의 유동 형태를 규정해 주는 척도로는 Ambrose's 경험식⁷을 이용하여 변동속도(saltation velocity)를 결정하고 1차측 노즐직경에 따른 노즐 속도를 계산하여 밀집상(dense phase)이나 희박상(dilute phase)을 파악할 수 있다. 1차측 속도가 변동속도보다 큰 경우 희박상(dilute phase), 작은 경우 밀집상(dense phase)으로 판단되어지고 Ambrose's의 경험식은 다음과 같다.

$$V_s = \frac{3.51 \times g^{2/5} \times M^{1/5} \times D_1^{2/5} \times \left[\left(\frac{\rho_p}{\rho_f} \right) - 1 \right]^{2/5}}{\rho_f^{1/5}} \quad (1)$$

식 (1)에서 g는 중력가속도, M은 단위시간 단위면적당 질량, D₁은 1차측노즐의 직경을 나타낸다. 사용하는 탄종에 따라 입자의 밀도와 1차측으로 유입되는 가스의 밀도, ρ_p와 ρ_f에 따라 미분탄 수송을 위한 최소속도 V_s가 달라지게 된다. 2차측 노즐의 속도는 나머지 산소양과 스팀양에 따라 이상기체 방정식으로 간단히 계산될 수 있다. 이상과 같이 계산된 1차측, 2차측 노즐의 속도를 비교하여 유사한 속도를 나타내는지 확인하여 노즐 직경 결정의 타당성을 확인한다.

예열버너는 semi-theoretical method¹⁰를 사용하여 어느 정도의 가열속도로 몇시간 가열하면 가스화기가 운전온도에 도달할 수 있는지, 그때의 연료와 공기비는 얼마인지 유추할 수 있다. 예열버너의 용량은 상수값으로 입력하며 버너용량에 따른 예열시간, 연료소모량이 계산되어진다. 이 때 입력되는 각 층의 내화벽의 부피는 이미 계산된 가스화기의 길이와 내화벽의 두께에 의해 결정된다. 예열을 위해 사용되는 연료양은 예열버너의 열용량과 사용하는 연료의 발열량으로 결정된다. 생성가스의 양에 따른 단위질량당 열용량과 내화층의 열용량을 비교하여 가스화기의 운전온도에 따라 그 온도에 도달하기 위해 걸리는 가열시간을 결정하게 된다.

가스 냉각기의 설계는 냉각기의 열용량에 의한 냉각수 유입량의 계산, 가스 냉각기 높이의 계산, 가스 냉각기에서 냉각수와 생성가스 및 비산회의 접촉유무의 측정과 냉각수의 분사장치의 선정 등으로 구성된다. 본 연구에서 사용된 분류층 슬래깅 가스화기에서는 최대 50%의 회분이 슬래입자로 상부로 이동되어 냉각장치에서 물방울과의 접촉이 일어난다고 가정하였다. 또한 냉각기 내경은 가스-물의 접촉면의 열 및 물질전달을 촉진시키기에 충분한 가스속도가 유지되도록 2 in 내경으

로 선정되었다. 가스냉각기의 길이는 분사된 물방울의 완전한 증발에 요구되는 시간에 의해 결정되며 모델에 사용된 식은 가스, 물방울간 열전달의 수학적 추정에 의해 개발되었다. 이론적 접근법은 Laskowske와 Ranz⁹에 의해 개발되었고 냉각기의 내경과 물방울직경은 Nukuyama와 Tanasawa¹⁰경험식에 의해 예측된 평균 직경으로 400 μm의 최대 물방울 직경을 선정하여 냉각시간 측정에 따른 접촉길이를 결정함으로써 냉각기의 길이를 계산하였다.

탄의 유입량이 결정되어지고 탄에 함유된 회분의 양을 공업분석에 의해 구한 후 가스화기 가동시간을 기준으로 하여 유입된 탄의 회분양 뿐만아니라 부피를 계산할 수 있다. 회분이 누적되는 형태는 보편적으로 top cone, bottom cone, cylinder형태로 구분할 수 있고 top cone과 bottom cone, cylinder의 높이를 계산함으로써 처리해야할 회분의 양을 유추할 수 있다. 단 호퍼의 형태적 변화는 유발하지 않도록 하기 위해 실제 설계 형태로서 top cone은 90°로 bottom cone은 60°로 설치하도록 하였다.

이상과 같은 장치의 부분별 수학적 모델을 조합하여 Fig. 1과 같이 주프로그램을 구성하고 장치별 출력결과는 상호 연결되어 다른 장치의 입력자료로 이용됨으로써 최종적으로 전체적인 장치설계의 결과를 도출하게 된다. 주 프로그램은 내화벽 재질의 자료와 예열연료의 종류, 냉각기 입자크기, 냉각수 분사장치, 압력 및 온도 측정장치가 데이터베이스화 되어있는 부프로그램의 도움을 받아 이상의 시뮬레이션을 수행하게 된다. 주 프로그램과 부 프로그램의 연결에 따른 전체 프로그램의 진행과정은 Fig. 2와 같다.

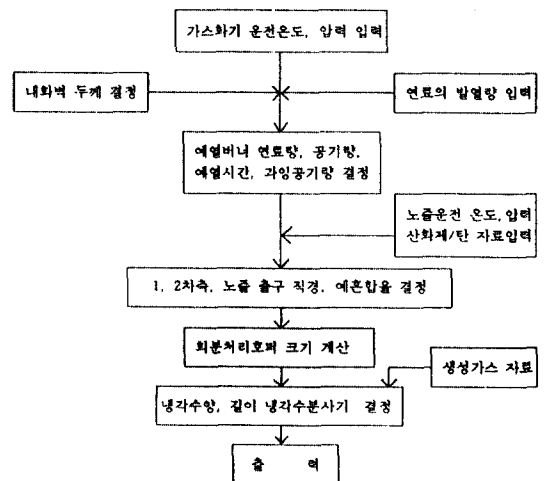


Fig. 1. Flowchart of main program to determine gasifier design parameter.

4. 결과 및 고찰

4-1. 프로그램의 타당성 검토

공학적 계산을 이용하여 구성한 프로그램의 타당성을 검토하기 위해 실제 플랜트의 설계 결과와 프로그램에 의해 도출된 결과를 비교함으로써 프로그램의 적용가능성을 평가하였다. Table 1에서 알 수 있듯이 실제 설계 자료와 프로그램에 의해 도출된 결과를 비교하면 장치에 대해 각 부분은 유사한 형태를 보이거나 예열버너의 경우 예열시간이 8시간과 7.5시간의 차이와 공기의 과잉율은 40%와 34%의 차이를 보인다. 이는 설계시 연료

의 충분한 연소반응을 위해 40%의 과잉율로 공기를 주입하므로 공기에 포함된 질소에 의한 열량의 손실로 8시간의 예열시간을 보인다. 그러나 공정모델에서는 가스화기가 2600 °F에 도달할 때 프로그램이 수렴됨에 따라 34%의 공기과잉율을 나타내어서 예열시간은 7.5시간이 된다. 따라서 공기의 과잉율을 최소화했을 때 시간당 발생되는 열량이 증대되어 예열시간은 7.5시간이 됨을 알 수 있다. 또한 회분처리호퍼의 경우 0.3 ft의 차이를 보이거나 이는 내화벽의 두께와 회분함량의 계산에 따른 오차와 프로그램에서 사용한 열역학적 값과의 차이에서 비롯된 오차로 큰 의미를 갖지는 않는다. 대부분의 설계치와 공정모델에 의한 결과치가 유사한 값을 보이므로 본 연구에서 사용한 공정모델을 3T/D BSU 설계결과와 일치하며 이 모델은 설계최적화 및 scale-up시 이용될 수 있다.

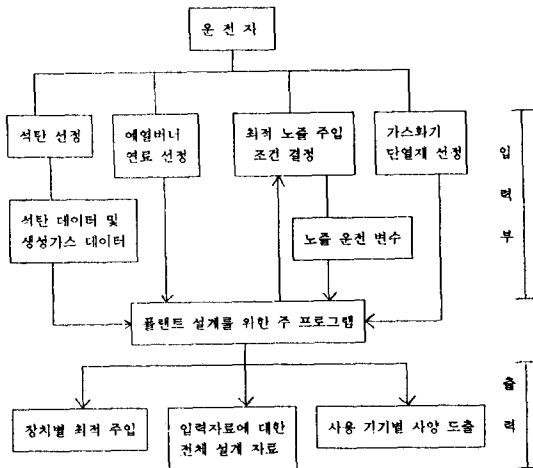


Fig. 2. Flowchart of gasifier simulation program.

Table 1. Comparison of 3T/D gasifier design data with process model simulation result.

주변장치	세부적분류	설계치	공정모델
가스화기	내층 [in]	4.00	4.00
	중간층 [in]	4.00	4.00
	외곽층 [in]	12.25	12.00
	전체 두께 [in]	46.50	46.00
예열 버너	사용 연료	LNG	LNG
	연료유입량 [1bmol/hr]	1.373	1.4534
	공기유입량 [1bmol/hr]	18.300	18.504
	가열시간 [hr]	8.00	7.50
	Excess air [%]	40.00	34.0
주입 노즐	예혼합율 [%]	30	30
	1차측 노즐속도 [ft/s]	7.3700	7.3701
	2차측 노즐속도 [ft/s]	6.9200	6.9701
가스 냉각기	가스 냉각기 높이	16.60	16.50
회분처리호퍼	높이 [ft]	6.0713	6.3442

4-2. 탄종에 따른 시뮬레이션 분석결과

탄종에 따른 가스화기의 형태변화 및 주변장치의 변화를 공정모델에 의해 분석함으로써 각종 탄에 따른 적용가능성을 예측하고 현 모델의 장치에서 탄종에 가장 민감하게 영향을 받는 부분을 제시하고자 한다. 현재 설계 기준탄으로는 U탄을 사용하였으며 대체가능탄으로 D, R, I탄을 사용하였으며 각 탄의 공업분석 결과는 Table 2와 같다.

공정모델을 이용하여 탄종에 따른 가스화기 및 주변장치 변화를 예측한 결과는 Fig. 3과 같이 대부분의 장치가 변화됨을 알 수 있다. 현재 기준탄을 사용하여 설계된 가스화기 및 주변장치의 적용가능성을 분석해 보면, 주입부분의 타당성은 가스화기 내부의 적절한 스윙 흐름을 측정하기 위해 스윙수로 비교할 수 있고 이는 주입부의 직경 또는 주입속도가 변수로 작용하는 것으로 모델에서 설정한 스윙흐름을 위해 탄에 따라 주입부의 조정이나 가스화기 직경의 조정을 필요로 한다. 탄종에 따른 예열시간은 탄의 운전온도 뿐만아니라 가스화기를 구성하고 있는 내화벽의 두께와 길이에 영향을 받

Table 2. Proximate analysis of candidate coal samples for gasifier.

Coal	U	D	I	R
Moisture(wt %)	27.00	10.00	14.21	19.97
Volatile	50.68	29.48	42.97	47.34
Fixed carbon	37.12	54.73	46.00	51.06
Ash	12.19	15.79	11.03	1.60
Total	100	100	100	100

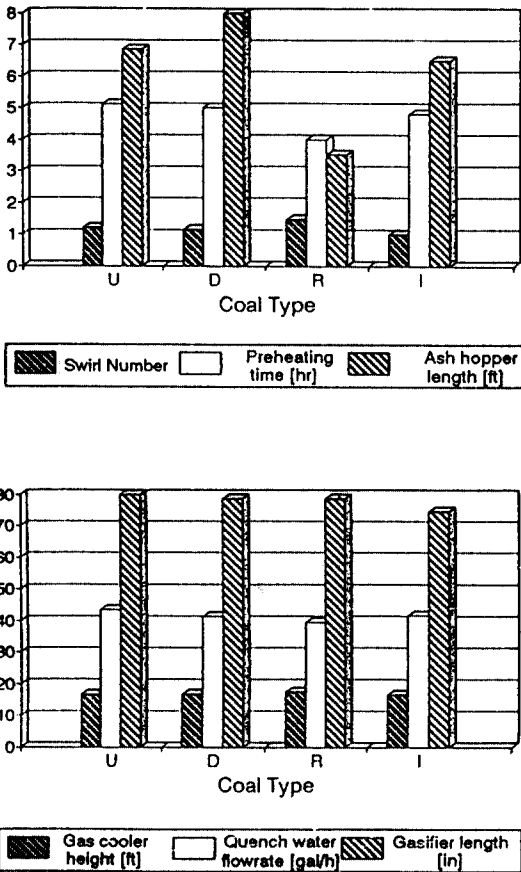


Fig. 3. variation of gasifier design parameters with various coal type.

는 부분으로 내화벽의 용량을 변화시키는 가스화기의 길이 또한 변수로서 작용한다. 즉, 탄에 따라 주입되는 산화제의 양이 달라짐에 따라 가스화기의 길이변화를 일으켜 내화벽의 부피가 변화하고 이는 가스화기 운전 온도에 도달하기 위한 내화벽의 유입열량의 변화를 일으킨다. I탄의 경우 U, D탄과 동일한 운전온도임에도 불구하고 예열시간의 차이는 가스화기 길이의 차이로 인한 내화벽의 유입열량이 변화하기 때문이다.

탄중에 따라 스윌수에 영향을 미치므로 가스화기 내부의 최적 반응조건을 위해서는 주입노즐의 설계가 변화하게 된다. 스윌수가 0.99로 상대적으로 약스윌을 나타내는 I탄의 경우 동일한 운전온도에서 탄과 산화제의 비가 U탄에 비해 낮기 때문에 가스화기로 주입되는 양이 감소하여 약스윌의 형태를 보인다. 그러나 1.46의 강스윌호름을 나타내는 R탄의 경우 U탄에 비해 탄과 산화제의 비는 낮으나 운전온도가 U탄에 비해 200 K 낮아 주입되는 탄 및 산화제의 부피에 영향을 미쳐 강스윌을 형성하게

된다. 스윌수의 변화로 인해 탄 및 산화제의 양 뿐만 아니라 운전온도와 압력에도 결정적인 영향을 미치게 된다. 결국 U탄과 동일한 스윌호름을 위해서는 운전온도가 낮은 탄의 경우나 산화제/탄의 비가 낮은 탄은 운전압력의 변화나 주입부의 형태변화를 필요로 하게 된다.

회분처리호퍼의 경우 기준탄이 약 7ft의 길이를 필요로 하여 대부분의 시료의 경우 본 BSU에서 처리가능하나 D탄의 경우 8ft로 길이의 확대가 필요됨에 따라 종래 2일의 회분처리시간에서의 변화를 가져와야 한다. 또한 가스화기의 길이 역시 탄에 따른 O₂/탄, H₂O/탄의 비, 운전조건에 따라 달라지며 U탄의 경우 가장 길고 기타탄은 비슷한 유형을 나타낸다. 즉, 동일한 가스화기 직경에서 탄중에 따른 회분함량에 영향을 받아 회분처리호퍼는 변화를 일으킴을 알 수 있다. 가스화기 직경이 변화하는 경우는 회분함량 뿐만 아니라 슬랙 호퍼 직경에도 영향을 받아 변화하게 된다.

가스냉각기의 길이 및 냉각시간은 단위 시간당 발생하는 생성가스 양과 이에 따른 생성가스 발열량이 가장 높은 R탄에서 최대를 보여주며 반면 예열버너의 가열시간은 가스화기의 운전온도가 낮음에 따라 가장 낮음을 보여 준다. 이는 예열버너의 용량이 가장 작음을 의미하는 것이다. 또한 냉각수의 사용량에 따라 냉각수 분사장치인 분사기(Atomizer)의 선택이 변화하는데 이는 가스화기에서 생성되는 가스의 발열량에 의해 주입되는 냉각수의 양이 각각의 탄에 따라 달라짐을 의미한다.

결국 각 탄에 따른 장치의 변화추이를 분석한 결과 탄의 특성에 따라 운전조건 및 연료와 산화제의 주입조건이 달라져야 하고 전체적인 장치변화에 탄종이 가장 크게 영향을 미치는 것으로 나타났다. 사용탄이 변화하는 경우 탄에 따른 생성가스의 양과 발열량이 변화함에 따라 냉각에 필요한 냉각수의 양이 달라짐으로 냉각수 분사장치(Atomizer)의 대체가 필요하고 탄 및 산화제의 주입노즐은 적절한 스윌호름을 유지하기 위해 기존의 장치로부터 변화가 필요하게 된다.

4.3. 노즐의 주입조건 선정

가스화기에서 석탄, 산화제, 스팀이 유입되는 노즐의 조건에 의해 가스화반응이 결정되므로 노즐의 최적화를 석탄가스화 공정모델을 이용하여 분석하였다. 화염의 형태는 확산화염과 예혼합화염으로 구별할 수 있으며 확산화염을 선택했을 경우 1차축 속도가 2차축 속도, 즉 변동속도(saltation velocity)에 비해 대단히 작을 뿐만 아니라 낮은 레이놀즈 수를 보인다. 따라서 약 60% 이상의 밀집상(dense phase)을 나타냄으로써 연료와 산화제의 혼합에 악영향을 초래함을 알 수 있다. 예혼합이 가능한 영역은 안전성 검토(safety check)에 의해 결정될

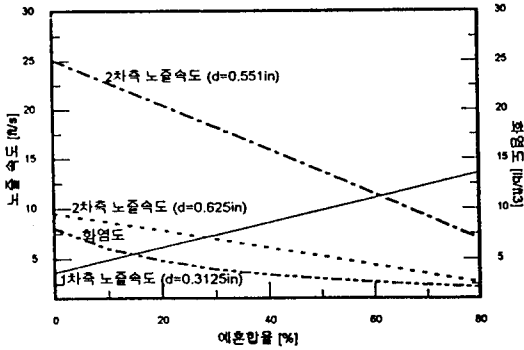


Fig. 4. Velocity profile of coal/oxygen/nitrogen flow with premixing condition.

수 있다. 그러나 예혼합율의 증가에 따라 1차속 속도가 증가하게 되고 이러한 1차속 속도와 변동속도를 비교하여 최적의 예혼합율을 결정하게 된다. Fig. 4는 모델에서 선정한 노즐의 형태(1차속-0.3125 in, 2차속-0.625 in, 출구직경-0.3125 in)와 수정된 형태 (1차속-0.3125 in, 2차속-0.551 in, 출구직경-0.3125 in)에서 확산과 예혼합 %에 따른 속도분포를 나타낸 결과이다. 화염의 안정도는 탄에 따라 약간의 차이는 보이나 대체적으로 0.3121 lb/ft가 상한 한계이므로 예혼합율의 전 구간에 걸쳐 안정함을 보임에 따라 임의의 %로 예혼합이 가능함을 보여 준다. 그러나 1차속 노즐에서 탄과 예혼합산소의 최적 주입상태를 유지하기 위해 반응을 고려하지 않고 탄과 산화제의 혼합만을 고려할 때 변동속도, 11,203 ft/s와 비교 분석에 의해 약 60에서 70%의 예혼합율이 적절한 주입상태임을 알 수 있다. 그러나 예혼합율의 증가로 상대적으로 2차속 속도가 감소함에 따라 1차속 속도분포와 2차속 속도분포의 차이에 의해 화염에 영향을 미칠 것으로 추측되므로 1차속 노즐 속도와 동일한 속도를 갖는 2차속 노즐의 직경을 결정해야 하는 것이다. 단, 이러한 예혼합율은 산화제와 석탄의 반응 메커니즘을 고려하지 않았으므로 예혼합율이 급격히 증가할 때 노즐의 출구부분이나 가스화기 입구에서 자연발화로 인한 폭발의 우려를 고려해야 한다.

1차속 노즐속도와 동일한 속도를 유지하기 위해 2차속 노즐의 직경을 종래 0.625 in에서 0.551 in로 변화함에 따라 2차속 속도는 약 11 ft/s의 속도를 유지할 수 있다. 이상과 같이 노즐의 직경을 줄여서 1차속 및 2차속 속도를 유사하게 변화시키면 예혼합 화염이 형성되어 석탄가스화 반응에 향상을 피할것으로 사료된다. Fig. 5에서 보는 바와 같이 기존의 노즐형태나 수정된 노즐 형태에서 U탄이나 D탄 모두 노즐의 측면만을 고려할 경우 수정된 노즐에서 사용가능하나 R탄이나 I탄은 적

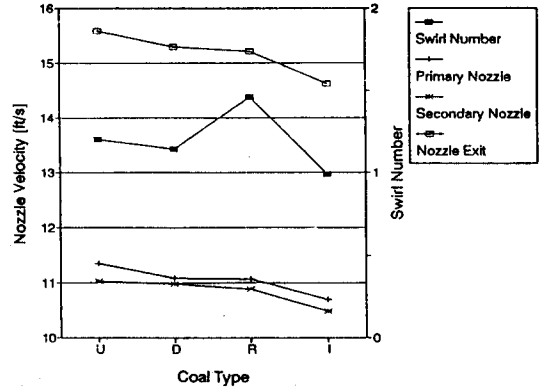


Fig. 5. Nozzle velocity profile with various coal type.

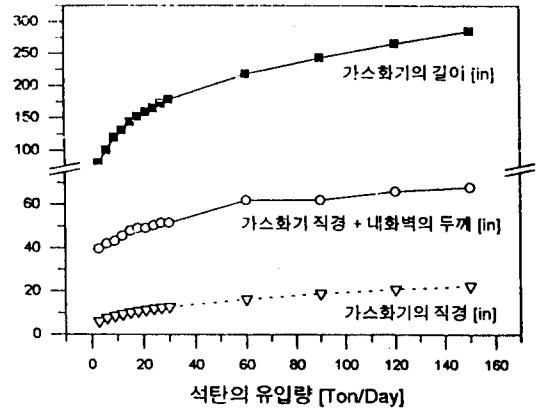


Fig. 6. Predicted values of gasifier length and width with scale-up.

절한 스윙흐름을 유지할 수 없음을 따라 동일한 스윙속도를 유지하기 위해서는 출구직경의 조정이나 노즐의 주입조건의 변화가 필요하다. 한편 최대의 예혼합율을 기하기 위해 노즐을 변화할 경우 1차속과 2차속의 적절한 혼합을 위한 속도분포는 노즐의 형태별로 달라지게 되나 출구에서는 배출되는 속도가 변화하지 않음에 따라 가스화기의 내부유동인 스윙흐름에는 영향을 미치지 않음을 알 수 있다. 다만 이 부분에서도 앞서 언급한 자연발화로 인한 폭발의 우려를 고려하여야 한다.

4-4. 스케일 업(scale up)에 따른 장치의 변화예측

공정모델을 사용하여 향후 PDU (Process Development Unit)급 설계에 필요한 자료를 예측해 보았다. 석탄의 유입량 증가에 따른 가스화기 직경의 변화는 모델에서 선정한 스윙 수 1.2를 유지할 수 있도록 변화함에 따라 Fig. 6와 같이 가스화기 길이 및 직경이 증가된다. 이때 가스화기 내부로의 노즐의 주입속도가 영향을 미

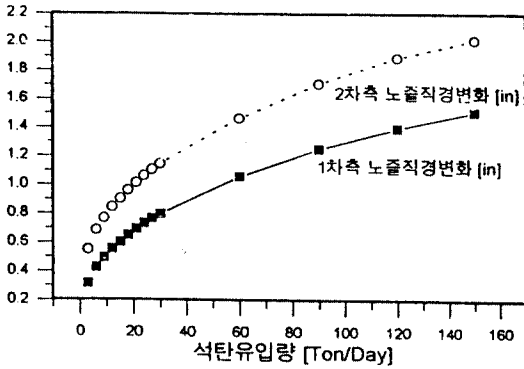


Fig. 7. Nozzle diameter variation with scale-up.

치며 노즐 출구 직경의 결정이 선행되어짐에 따라 동일한 스윌 수에 도달할 수 있다. 석탄주입량 증대에 따른 가스화기 직경변화의 주요변수인 노즐의 형태는 Fig. 7에서 볼 수 있듯이 1차측, 2차측 노즐의 직경이 증가함을 알 수 있다. 한편 내화벽을 포함한 전체 직경과 가스화기의 직경은 유입량에 비례하여 2차 함수적인 증가형태를 보이고 또한 가스화기의 직경 변화에 영향을 받아 물질수지에 의한 가스화기의 길이 역시 유사한 형태로 증가함을 알 수 있다.

석탄 유입량에 따른 예열버너의 가열시간은 Fig. 8과 같이 동일한 연료를 사용할 경우 거의 비례적으로 증가하게 되나 유입량이 대단히 큰 40 ton 이상의 경우 예열시간이 1일 이상이 소모될 뿐만아니라 연료 소모량이 급격히 증가함에 따라 LNG로의 대체해야 될 것으로 사료되고 가열시간의 단축을 위해 예열버너의 용량을 증대시켜야 할 것이다. 이외에도 석탄 유입량의 증가에 따라 수직형의 냉각기는 급격한 냉각기 길이의 증대를 초래하여 냉각수와 가스의 접촉을 위한 적절한 속도유지가 곤란하고 고압의 냉각수 분사기를 필요로 하게 되어 기존의 분사기는 사용이 불가하여 새로운 장치의 모색이 필요하게 된다. 회분처리호퍼중 top cone와 bottom cone의 변화는 cylinder 길이 변화에 비해 변화 폭이 대단히 작으며 호퍼의 전체 변화는 실린더의 변화에 의존하고 내화벽을 포함한 가스화기 직경의 변화에 영향을 받는 것으로 사료된다.

5. 결 론

석탄가스화 시스템 공정모델을 이용하여 각 부분별 장치의 최적형태 및 탄종별 변화를 분석하였고스케일업(scale up)에 따른 장치의 변화를 추정하였다. 노즐의 경우 탄의 적용기능성에 있어 가장 문제가 되는 부분으로 노즐의 제작시 변동속도(saltation velocity), 스윌 수,

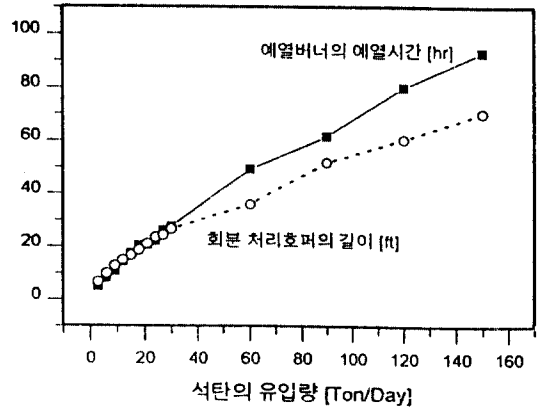


Fig. 8. Preheating period and ash hopper length with scale-up.

가스화기직경, 예혼합율이 변수로 작용함을 알 수 있다. 본 연구에서는 예혼합율은 약 62%로 가스화기 형태는 1차측 직경이 0.3125 inch, 2차측 노즐직경이 0.551 inch, 노즐출구 직경 0.3125 inch가 기준 설계자료이다. 그러나 탄의 종류에 따라 가스화기 내에서 적절한 유동형태를 형성하기 위해서는 출구직경의 변화가 중요한 변수로 탄에 따른 적용시 고려해야 할 문제임을 알 수 있었다. 가스 냉각기는 냉각수의 분사임자크기에 따라 가장 크게 영향을 받으며 석탄종에 따라 생성가스의 발열량 차이로 인해 냉각기의 변화를 초래함을 알 수 있다.

가스화기 부분별 각 장치는 탄종에 영향을 받게 되며 탄종에 따른 노즐(주입부)의 형태변화는 탄에 따른 O₂/탄, H₂O/탄의 비가 작아질수록 노즐의 속도가 작아지고 적절한 가스화기 유동을 위해 노즐(주입부)의 크기가 작아지게 된다. 가스 냉각기의 용량은 가스화 반응 후 생성되는 생성가스의 조성과 양에 따라 영향을 받는다. U탄이 가장 많은 생성가스의 양을 배출하므로 따라서 가장 많은 냉각수를 필요로 하게 되고 가스 냉각기의 용량과 냉각수 분사장치의 변화를 초래한다. 회분처리호퍼의 형태변화는 탄에 함유된 재의 양, 내화벽을 포함한 가스화기의 두께에 따라 변화하며 동일 내화벽의 경우 회분의 함유율이 적은 R탄이 가장 작은 호퍼를 필요로 한다. 예열버너는 가스화기 운전온도에 영향을 받는 부분으로 낮은 온도에서 운전되는 탄의 경우 용량은 작아지게 된다.

석탄가스화 시스템의 스케일 업에 따라 가스화기와 내화벽, 예열버너, 회분처리부의 변화는 가스화기 주입부의 형태적 변화 즉, 스윌흐름을 형성하기 위한 노즐 형태변화에 기인한 것으로 노즐의 직경과 운전온도 및 압력에 가장 큰 영향을 받음을 알 수 있다. 또한 냉각기

의 경우, 유입량의 증대에 따른 급격한 길이의 증가 현상을 보임에 따라 냉각수와 가스의 접촉을 위한 적절한 속도유지 뿐만아니라 기존의 분사기(Atomizer)의 사용이 불가능함을 알 수 있다. 또한 예열버너의 예열시간이 증가함에 따라 더욱 큰 용량으로 예열버너의 교체가 필요하다.

이상의 연구결과로 플랜트의 대체재질의 사용, 스케일업(scale up)에 따른 장치의 변화와 설계에 영향을 미치는 주요변수에 대해 분석하였다. 본 연구에서 제시한 플랜트 설계의 기초적인 모델을 토대로 향후 부가적으로 발전부분과 탈황, 탈질부분의 장치설계 및 데이터 베이스(DATA BASE)와 결합되면 더욱 효율적인 공정모델이 될 것으로 기대된다.

참고문헌

1. Lee, C., Lee, J. W., Lee, S. J, Kim, H. T. and Chung, K. M.: "ASPEN Simulation for IGCC Power Plant with Entrained-bed Gasification and Cold Gas Clean-up Processes", Proceeding of ENERGEX '93, pp. 183 (1993).
2. Lee, J. W., Lee, C. and Kim, H. T.: "Performance Analysis and Advanced Design Concepts of Natural Gas Fired Combined Cycle", 29th Intersociety Energy Engineering Conference, Vol. 4, pp. 183-191 (1994).
3. Yun, Y. S., Lee, C., Lee, J. W., Kim, H. T. and Chung, K. M.: "Status of IGCC Engineering Package Development in Korea", 29th Intersociety Energy Engineering Conference, Vol. 4, AIAA-94-4071 (1994).
4. Kim, H. T., Chung, K. M., Lee, C., Lee, J. W. and Yun, Y. S.: "Status of Korea IGCC Bench Scale Unit Development", Proceeding of 11th Pittsburgh Coal Conference, pp. 1310 (1994).
5. Kim, H. T., Chung, K. M., Yun, Y., Lee, J. and Oh, O.: "Development Status of 3T/D Coal Gasification System in Korea", Proceedings of Tenth Korea-U.S.A. Joint Workshop on Coal Utilization Technology, pp. I-23, Daejeon, Korea, Oct. (1994).
6. Soelberg, N. R., Smoot, L. D. and Hedman, P. O.: "Entrained flow gasification of coal", Fuel, Vol 64, 776-781 (1985).
7. Institute of Gas Technology,: "Korean Coal Gasification BSU plant design package" (1994).
8. 김수완: "가스화기 설계 및 운전을 위한 공정모델 개발에 관한 연구" 아주대학교 석사학위논문 (1994).
9. Chigier, M: "Energy, Combustion, and Environment", New York, McGraw-hill Co., (1981).
10. Parrish, A: "Mechanical Engineer's Reference book (11)", LONDON, BUTTERWORTHS (1973).