Appl. Chem. Eng., Vol. 22, No. 5, October 2011, 566-574

강두환 교수님 헌정논문

CFD 해석을 통한 4종의 건식 분류층 석탄가스화기 설계개념 비교

윤용승† · 주지선* · 이승종

고등기술연구원 플랜트엔지니어링센터, *한전 전력연구원 수화력발전연구소
(2011년 8월 21일 접수, 2011년 9월 23일 심사, 2011년 9월 27일 채택)

Comparison of Design Concepts for Four Different Entrained-Bed Coal Gasifier Types with CFD Analysis

Yongseung Yun†, Jisun Ju*, and Seung Jong Lee

Plant Engineering Center, Institute for Advanced Engineering, Gyunggi 449-863, Korea
**Power Generation Lab., KEPCO Research Institute, Daejeon 305-750, Korea*
(Received August 21, 2011; Revised September 23, 2011; Accepted September 27, 2011)

석탄가스화기는 석탄가스화복합발전과 석탄간접액화 공정에서 고효율을 얻기 위한 중요한 설비 중 하나이다. 현재 여러 종류의 석탄가스화기가 성공적으로 사용되고 있지만, 간단하면서도 신뢰도를 높일 수 있는 다양한 설계 변경이 가능하다. 건식 분류층 가스화기 4종류의 형태를 제시하고 이들을 체류시간, 가스화기 출구 합성가스의 온도, 합성가스 조성을 중점으로 비교하였다. 설계개념이 적정한지를 우선 파악하고자 반응을 배제한(cold-flow) CFD 해석을 먼저 수행하였고, 실제 가스화기 조건을 반영한 화학반응이 고려된(hot-flow) 해석을 수행하여 비교하였다. 가스화기 설계에 CFD를 적용하는 데는 슬랙의 거동과 슬랙탭 설계 등 측면에서 제한적이기는 하지만, 다양한 설계개념 중에서 가능성이 높은 가스화기 형태의 범위를 좁히는 데 매우 유용하게 사용될 수 있다.

Coal gasifier is a key component for achieving high efficiency in integrated gasification combined cycle and indirect coal liquefaction. Although there have been several successful coal gasifiers that were commercially proven, many different design configurations are still possible for a simple and reliable gasifier operation. Four different gasifier design concepts of dry-feeding were compared in terms of residence time, exit syngas temperature and syngas composition. First, cold-flow simulation was applied to pre-select the configuration concepts, and the hot-flow simulation including chemical reactions was performed to compare the concepts at more actual gasifier operating conditions. There are many limitations in applying CFD method in gasifier design, particularly in estimating slag behavior and slag-tap design. However, the CFD analysis proved to be useful in comparing the widely different gasifier design concepts as a pre-selection tool.

Keywords: *gasifier, design, CFD, entrained-bed, residence time*

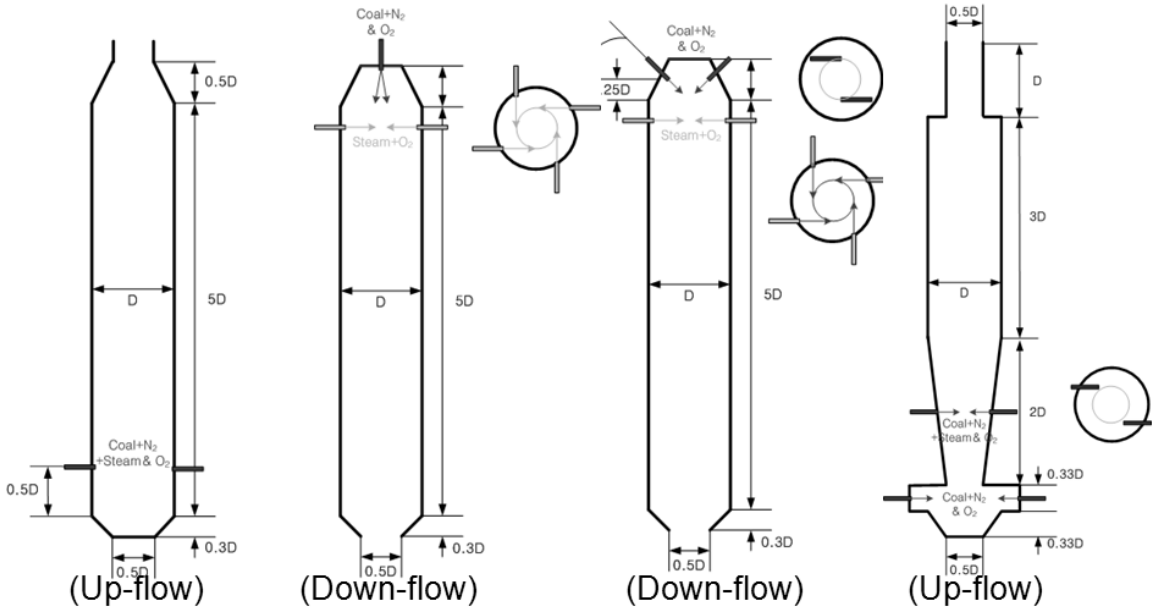
1. 서　　론

가스화기의 형태는 크게 고정층, 유동층, 분류층으로 구분된다[1]. 고정층은 루르기 가스화기가 대표적으로 남아프리카공화국 사솔 석탄액화 플랜트와 미국 노스다코다주에서 운영되고 있는 석탄 SNG (Synthetic Natural Gas)를 제조하는 Synfuels 플랜트에서 오랫동안 사용되고 있는 방식이다. 유동층은 미국 GTI가 개발한 U-Gas 공정과 미국의 KBR 공정이 대표적이다. 고정층과 유동층 가스화기는 반응시간이 15~30 min과 5~50 s로서 분류층의 1~10 s에 비해서 길다. 체류시간이 길게 되면 같은 합성가스 생산에 필요한 반응기 크기가 커지게 되므로, 하루 수천톤의 석탄을 1기의 가스화기에서 처리하는 경우에는 설비 제작 측면에서 불리하게 된다. 상업용으로 활용되고 있는 대표적인 분류층 가스화기에는 네델란드 쉘사 가스화기, 독일 우데사의 Plenflo 가스화기, 미국 GE에너지사와 코노코필립스사의 가스화기가 있으며 최근 일본에서 개발한 미쯔비시중공업사의 2단 가스화기 형태가 있다. 중국은 미쯔비시중공업 가스화기와 유사한 2단 형태로 TPRI에서 개발한 가스화기를 상용화하고 있기도 하다[2,3].

분류층 가스화기는 빠른 반응시간으로 인해서 대용량 설비에 유리하다. 가장 대표적인 적용처는 석탄가스화인데 하루에 2000~3000톤의 석탄을 1개의 가스화기에서 처리해야 하는 IGCC (Integrated Gasification Combined Cycle)에 많이 적용되는 반응기 형태이다. 상용급으로 현재 사용되고 있는 석탄가스화기 형태는 상부 원료공급 하방향(down-flow) 흐름(미국 GE에너지, 독일 지멘스)과 벽면 연료공급 상방향(up-flow) 흐름(네델란드 쉘, 독일 우데, 미국 코노코필립스, 일본 미쯔비시중공업, 일본 히다치, 중국 TPRI)으로 크게 구분할 수 있다.

가스화기에 원료를 공급하는 방식에는 건식(dry-feeding)과 습식(wet-feeding)이 있다. 습식 방식은 분쇄된 석탄입자와 물을 55 : 45 비율 정도로 섞은 슬러리 형태로 공급하므로 고압 이송에 유리하고 물

† 교신저자 (e-mail: ysyun@iae.re.kr)



(a) Case 1 (b) Case 2 (c) Case 3 (d) Case 4

Figure 1. Four coal gasifier configurations compared in the CFD analysis.

이 과량 포함되므로 합성가스 내 수소함량이 높은 장점이 있는 반면에 포함된 물로 인해서 저급탄에 적용이 어려워지는 측면이 있다. 반면에 건식 방식은 분쇄된 미분탄을 질소를 이용하여 가스화기로 공급하므로 수소와 CO 발생량을 극대화 할 수 있고 열손실을 최소화할 수 있어서 IGCC와 같은 전력생산에 많이 이용되나 발생되는 합성가스의 수소/CO비는 일반적으로 0.5 이하이다. 습식 방식은 50 bar 이상의 고압이 요구되거나 수소함량이 극대화되면 유리한 화학원료 생산에 많이 적용된다.

또한, 분류층 가스화기는 미분탄 공급 단수에 따라 1단과 2단으로 구분할 수 있다[3]. 1단은 반응기 내로 같은 높이에서 석탄 미분탄이 공급되는 경우(미국 GE에너지, 네델란드 쉘, 독일 우데, 독일 지멘스)와 높이가 다른 2곳의 노즐들을 통해서 미분탄을 공급하는 경우(미국 코노코필립스, 일본 미쯔비시중공업, 일본 히다치, 중국 TPRI)가 있다. 2단은 운전변수를 조정해서 다양한 석탄에 대응할 수 있는 장점이 있는 반면에 설비가 복잡해지고 제작에 난이도가 높아지는 단점이 있다.

상용급 석탄가스화기의 대표적 형태들은 이미 문헌에 널리 공개되어 있다[1,3-5]. 이들 형태는 1970년대와 1980년대를 거치면서 확립되었지만 어떠한 방식으로 최적화 과정을 거쳐 왔는지 공개된 바가 없다. 석탄이나 중질잔사유, pet coke을 파일롯 크기로 운영하면서 10배씩 scale-up하면서 주로 실험실적인 접근법에 근거하여 지금의 상용가스화기를 완성시켰지만 현재의 가스화기 형태와 방식보다 효율과 운전방식에서 더 유리할 수 있는 가능성을 점검할 필요가 있다. 특히 최근 고유가와 에너지원 자체의 유한성이 부각되면서 석탄이나 중질잔사유, pet coke의 고부가가치 활용방식으로 가스화에 대한 사업이 국내외적으로 크게 늘고 있다. 이러한 때에 국내에서도 해외의 기존 가스화기와는 차별화된 가스화기 기술을 보유하고자 하는 노력이 경주되고 있다.

가스화기에서 최적의 성능을 얻기 위해서는 여러 설계변수들이 비교 검토되어야 한다. 분류층 가스화기의 설계변수로는 합성가스 흐름방향, 가스화기 출구 가스온도, 반응 비활용영역(dead zone)의 크기, 반응기의 길이/직경(L/D)비, 체류시간, 노즐버너의 개수들이 가장 중요하다. 본 연구에서는 2000년대 들어 크게 발전한 CFD (Computational Fluid Dynamics) 해석방법을 적용해서 4종의 건식 분류층 가스화기 형태를 비교함으로써 반응시간과 효율 측면에서 유리한 가스화기의 한 예를 제시하고자 한다. 4종류 가스화기 형태의 선택은 기존 운영 중인 파일롯 석탄가스화기를 기준으로 하고 상부에서 시료를 주입하는 방식과 2단 가스화기로 변형시킨 구조로 하였다. 가스화기 형태에 대해서 가스화기 내 온도분포와 가스농도 분포, 입자 흐름경로 등을 기준으로 상대 비교를 수행하였다.

2. 실 험

CFD 해석은 상용프로그램인 Fluent 6.3 버전을 사용하였다. 가스화기 형태별 상대적인 비교는 체류시간, 비활용영역(dead zone), 길이/직경(L/D)비, 가스화기 출구온도에 중점을 두어 수행하였다.

본 연구에서는 건식 분류층 가스화기 4가지를 선정하였다. Figure 1에 나타난 2개의 상향흐름 가스화기와 2개의 하향흐름 가스화기이다. 4가지 모두 원료 주입 노즐은 내부 체류시간을 증대시키기 위해서 사이클론 형태의 소용돌이(swirl)를 형성시키도록 배치하였다.

Figure 1의 Case 1은 고등기술연구원에서 1994년부터 운영하고 있는 3톤/일급 석탄가스화기 형태와 유사한 경우이다. 따라서 Case 1에 대해서는 10종 이상의 석탄에 대한 실제 가스화 자료[6-10]를 통한 비교가 가능하다. 습식 공급형태는 본 연구에서 사용하지 않았다. Case 2는 상부에서 원료가 주입되는데, 미분탄과 1차 산소는 상부 노즐에서 공급되고 2차 산소와 스팀을 미분탄 공급노즐 바로 밑에 설치하여 2단 반응의 특성이 추가되도록 한 형태이다. Case 3에서는 Case 2를 추가로 변형시켜서 상부 미분탄 공급노즐을 수직하방 형태에서 45° 각도를 경사지게 설치한 2개 노즐로 분산 공급되는 형태를 고려하였다. Case 4는 미국 코노코필립스사 2단 습식 가스화기와 일본 미쯔비시중공업 2단 건식 가스화기 구조를 조합한 형태로 구성하였다. 여기

Table 1. Models Used for Gasifier CFD Simulation

Physical phenomena	Used Model
Turbulence	k-ε turbulent model
Gas phase chemical reaction	Mixture fraction model/ PDF Gibbs chemical equilibrium
Particle dispersion	Lagrangian tracking
Devolatilization	Single rate model
Radiation	P1 model

서 Case 2와 3의 형태는 현재 운영하고 있는 파일롯 가스화기 형태인 Case 1과 같은 외형을 가지면서 2단 가스화기 구조를 단순화시켜서 Case 4와 같은 복잡한 2단 가스화기 구조를 갖지 않더라도 유사한 성능이 가능할지를 살피고자 구성한 형태들이다.

CFD 해석에 사용한 세부모델들은 Table 1과 같다. 난류해석에는 대표적 표현식인 k-ε 난류모델을 사용하였고 가스화반응에 의한 합성가스 조성 계산은 깁스(Gibbs)에너지 최소화 화학평형계산 방법을 사용하였다. 분류층 가스화기의 내부온도는 일반적으로 1200 ℃ 이상으로 고온이어서 깁스 에너지최소화 계산만으로도 실제 석탄가스화기의 출구 가스조성을 거의 정확하게 계산할 수 있다[11,12]. 입자분산은 Lagrangian 추적방식, 열분해단계는 1단 반응식, 복사열 계산에는 P1 모델을 사용하였다.

Figure 2에 4개 경우에 대한 전산해석 메쉬 구성도를 나타내었다. 석탄과 산소가 주입되는 노즐 근처가 가장 고온이고 반응이 빨리 진행되는 구간이므로 이 영역에 메쉬를 더 촘촘하게 배치하였다.

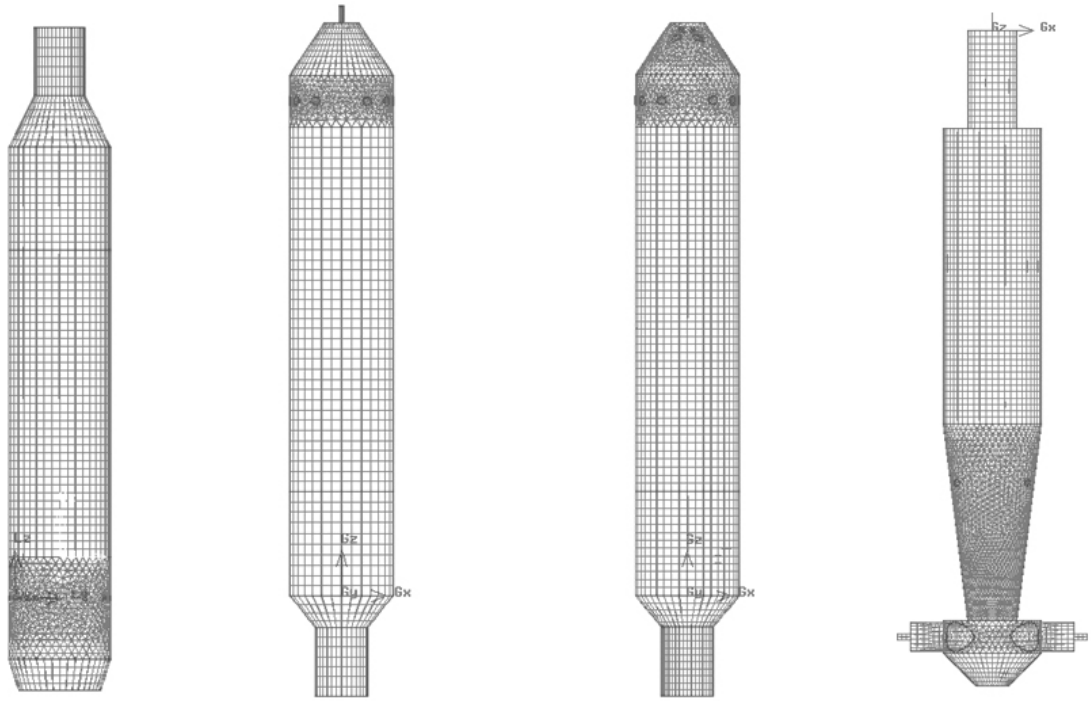
먼저 화학반응이 없는 유체흐름(cold-flow) 상태에 대한 CFD 해석을 수행해서 입자 체류시간을 비교하였고, 화학반응이 포함된 유체흐름(hot-flow) 상태에서 CFD 해석을 수행해서 가스화기 출구온도와 가스화기 내 합성가스 조성을 분석하였다. 화학반응이 포함된 해석에서는 가스화기 압력 8 bar, 석탄공급량 1톤/일, 산소/석탄 무게비 0.9, 스팀/석탄 무게비 0.1, 질소/석탄 무게비는 0.9를 적용하였다. 질소는 미분탄을 가스화기 내부로 주입하는데 필요한 운송용으로 사용된다. 이 조건들은 Case 1 형태에 해당하는 3톤/일 규모 석탄가스화기를 운전하는 전형적인 조건들로서 여러 탄종 결과들과 추후 비교하기 위하여 선택하였다.

3. 결과 및 해석

가스화기 설계인자로는 반응기 형태 측면에서 미분탄을 공급하는 위치에 따라 상부공급(top-feeding)과 벽면공급(side-feeding)이 있고 L/D 비율, 노즐 개수와 노즐 주입각도 등이 있으며, 반응기 내부 특성 측면에서는 입자 체류시간, 가스화기 출구에서의 가스온도, 가스화기 내 합성가스 조성이 있다.

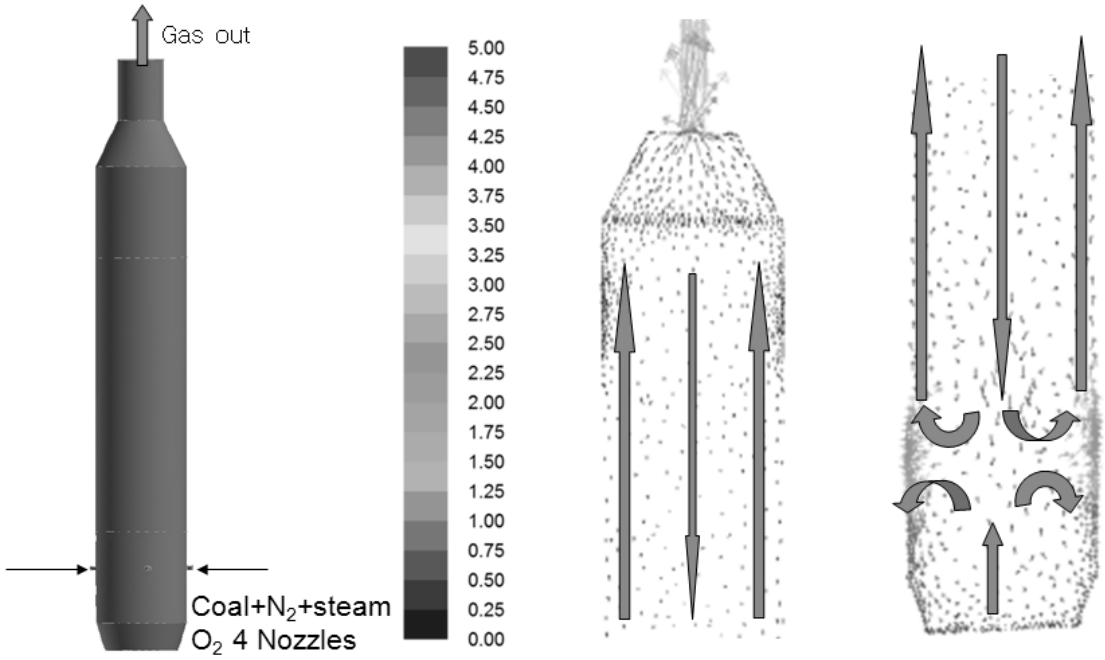
이들 설계인자 중에서 가장 먼저 결정하고 확보해야 하는 부분이 가스화기 내에서 입자가 머무는 체류시간이다. 상업적으로 사용되고 있는 대부분의 분류층 석탄가스화기에서 반응 체류시간은 3~5 s 정도이다. 체류시간이 충분히 반응기 내부에서 확보되어야 높은 전환율을 기대할 수 있다. 체류시간이 충분치 못하면 미반응된 석탄입자가 가스화기에서 유출되어 전체적으로는 낮은 탄소전환율로 나타난다.

가스화기 출구 가스온도도 슬래깅 가스화기 설계에서는 매우 중요한 인자이다. 석탄을 가스화하는 경우에 석탄 내에 함유된 회분이 녹은 상태로 가스화기 후단부로 날아가게 되어 온도가 낮은 부분과 접촉하게 되면 입자가 엉겨 붙게 되면서 유로가 폐색되거나 가스화기 후단설비인 복사열교환기(radiant syngas cooler)의 성능이 저하된다. 대부분 석탄 회분의 융점은 1100~1600 ℃이므로 이 온도보다 낮은



(a) Case 1 (b) Case 2 (c) Case 3 (d) Case 4

Figure 2. Computational mesh used for modeling in the study.



(a) Gasifier shape (b) Vector plot

Figure. 3. Vector plot by cold-flow analysis for case 1 of top-flow gasifier configuration.

온도가 되어야 녹은 상태의 회분입자가 가스화기로부터 유출이 안 되게 된다. 쉘사와 우데사의 건식분류층 석탄가스화기는 가스화기 출구의 가스온도를 900 ℃ 이하로 제어하기 위해서 가스화기에서 발생하는 합성가스의 상당부분을 가스화기 상부로 보내 고온의 합성가스와 섞어서 온도를 낮추는 방식을 채택하고 있다.

슬래깅 가스화기에서 수소와 일산화탄소가 주성분인 합성가스 조성은 화학평형 계산에 의해서 계산하게 된다. 화학평형 계산이란 열역학적으로 반응이 진행될 수 있는 한도까지 충분한 반응시간이 주어진 조건의 조성 값 계산을 의미하는데, 이는 가스화 반응온도가 1400 ℃에 달하므로 반응속도가 워낙 빨라서 반응물 반응에 필연적으로 수반되는 열전달 또는 물질전달의 제한요소를 무시해도 무리가 없기 때문이다. 가스화기가 슬래깅 가스화기 형태가 아닌 경우에는 일반적으로 반응온도가 1200 ℃ 이하로 낮으므로, 열역학 평형계산으로 합성가스 조성을 계산하면 실제 가스화기에서 얻어지는 수소, 일산화탄소 농도보다 높게 계산된다.

가스화기 크기를 결정짓는 L/D 비율은 건설비용와 체류시간 측면에서 매우 중요하다. 유럽 쉘사, 우데사, 지멘스사와 미국 GE에너지사의 현존하는 대부분 상업용 1단 석탄가스화기의 L/D 비율은 1.5 근방이다. 2단 가스화기 형태를 취하고 있는 일본 미쯔비시중공업과 이를 모방한 중국 TPRI 석탄가스화기에서 L/D 비율은 10에 이른다. 본 연구에서는 L/D비 5를 기준으로 선택하였다.

L/D 비율이 1.5 근방인 경우는 미분석탄과 산소, 스팀이 반응하여 형성하는 고온의 화염 길이가 거의 슬랙탭까지 도달하게 된다. 이 경우 가스화기 출구에서의 합성가스 온도는 1200 ℃를 넘는다. 따라서 가스화기 내부의 고온 합성가스가 석탄에 함유된 회분이 녹아 흐르는 슬랙탭을 고온으로 유지시킬 수 있으므로 가스화기 자체에서 회재 응고에 의한 슬랙탭 폐색 등의 문제는 최소화할 수 있다. 그러나 가스화기 출구 합성가스의 온도를 일정온도(900 ℃) 이하로 낮추지 않으면 녹아서 날아가는 회분입자들에 의해서 가스화기 후단에 문제가 야기된다.

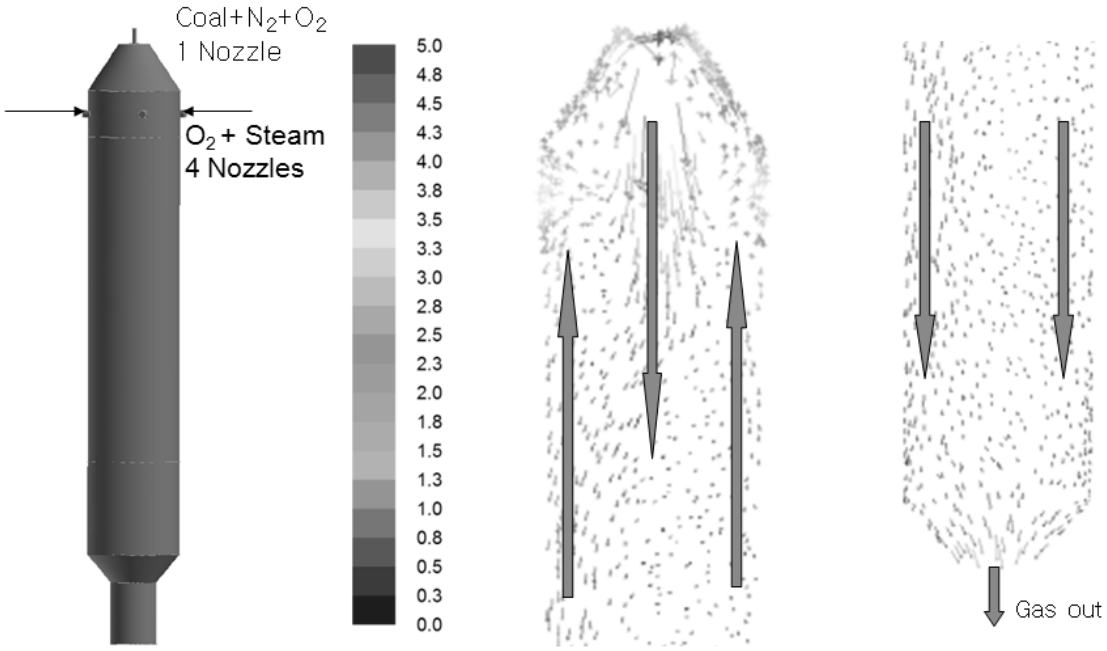
3.1. 반응 배제(Cold-Flow) CFD 해석

먼저 화학반응이 없는 CFD 해석을 수행하였다. 이는 복잡한 과정을 거치지 않고 가스화기 형태를 비교하기 위해서인데 입자의 체류시간을 상온상압 조건에서 계산하였다. 반면에 화학반응까지 고려한 CFD 해석은 고온고압의 가스화 조건을 반영하여 계산하였다.

화학반응을 배제한 CFD 해석에서 얻은 속도벡터 결과를 Figures 3~6에서 볼 수 있다. 속도벡터 결과는 반응기 내부에서 반응원료 물질들 혼합이 적정한지와 반응기 내부에 흐름이 정체된 지역(dead zone)이 없는지를 판별하는데 사용된다. 가스화 반응의 기본은 미분탄과 같은 원료와 산소, 스팀을 얼마나 효과적으로 잘 혼합해주는가에 달려있다. 또한 흐름 정체지역은 반응기 크기를 필요 없이 크게 제작하게 만들고 더 큰 문제는 이 지역에 용융된 석탄회재가 점착되면서 벽에 붙게 되면 전체 반응기 내부 흐름에 방해가 되는 경우가 발생할 수 있다는 점이다. 특히 슬랙이 배출되는 지역이라면 이러한 흐름 정체지역은 관로가 막히는 가능성이 높아지게 된다.

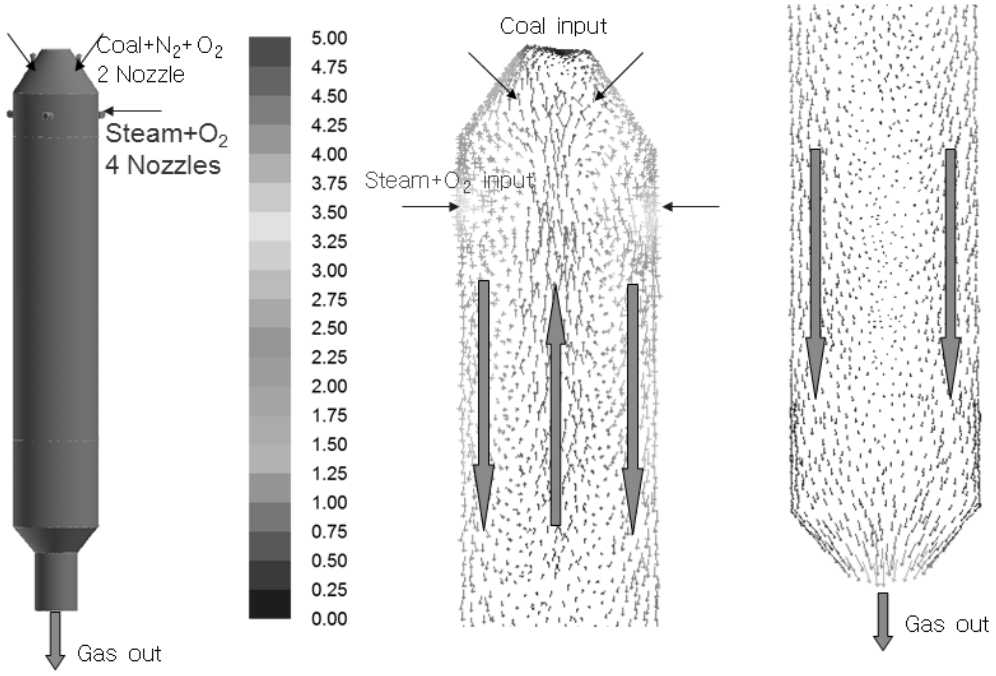
Case 1과 2 (Figures 3과 4)의 경우는 벽면을 통해서 4개의 노즐이 내부 사이클론 형태 흐름을 발생시키면서 혼합되기 때문에 유체 흐름이 벽면을 타고 오르고 이후 가스화기 중앙으로 흐름이 형성된다. Case 1은 미분탄과 산소, 스팀이 좁은 반응영역에 집중되므로 그 반응영역 위아래로 유체흐름이 형성되고 이후 벽면을 타고 오르는 흐름과 중앙으로 내려오는 흐름이 생성되어 전체적으로는 반응기 내부 체류시간이 증가하는 효과를 얻게 된다. Case 2는 미분탄이 상부 중앙에 위치한 노즐에서 공급되므로 Figure 4의 가운데 그림에서 보듯이 흐름이 중앙 하부로 먼저 형성되고 이 흐름의 일부가 벽면을 타고 상부로 오르게 된다. 가스화기 하부에 대한 흐름을 보여주는 Figure 4의 오른쪽 그림을 보면 하부에서는 흐름이 벽면을 타고 형성된다. Case 2와 같이 L/D 비가 5로 비교적 긴 경우에는 가스화기 하부 흐름은 상부 반응영역과는 다르게 유체 통로와 같은 역할을 함을 볼 수 있다.

Case 3 (Figure 5)은 미분탄을 상부 중앙에서 주입하는 대신 상부



(a) Gasifier shape (b) Vector plot

Figure 4. Vector plot by cold-flow analysis for case 2 of down-flow gasifier configuration.



(a) Gasifier shape (b) Vector plot

Figure 5. Vector plot by cold-flow analysis for case 3 of down-flow gasifier configuration.

45° 경사로 주입해서 내부에 사이클론과 같은 흐름이 형상되도록 하였고 여기에 더하여 2차 산소와 스팀도 사이클론 형태로 주입되는 영향으로 유체 흐름은 벽면을 타고 아래로 형성되고 이 흐름이 다시 가스화기 중앙으로 올라오는 형태를 보이게 된다. Case 3도 Case 2와 마찬가지로 가스화기 길이가 충분한 경우에는 가스화기 하부는 유체흐름의 통로 역할을 하여 가스화기 출구 쪽으로 전체적인 유체흐름이 형성된다.

Case 4 (Figure 6)는 4가지 가스화기 형태 중에서 가장 복잡한 2단 구조로서, 반응기 내부 유체 흐름이 2단 노즐 상부 지역에서 큰 유체 순환이 나타난다. 즉, 가스화기 벽면을 타고 오른 다음에 반응기 상부 중앙부로 하강한다. 이러한 유체 순환은 가스화기 내부에서의 체류시간을 증대시키는 데 큰 역할을 한다.

Table 2. Cold-flow CFD Simulation Results for Four Cases of Coal Gasifiers

Case	1	2	3	4
Syngas flow direction	Up	Down	Down	Up
Number of coal feeding nozzle	4	1	2	2+2
Number of O_2/Steam feeding nozzle	0	4	4	0
Particle residence time (s)	6.5	3.0	3.0	8.4

반응배제(cold-flow) 유체해석 결과를 Table 2에 정리하였다. 상향흐름 설계인 Case 1과 Case 4 반응기에서의 입자 체류시간은 6.5 s와 8.4 s인 반면에 하향흐름 반응기에서는 입자의 체류시간이 각각 3 s였다. 석탄에 휘발분을 많이 포함한 아역청탄 같은 경우는 3 s의 반응시간이 충분할 수 있지만, 역청탄이나 다른 반응성이 느린 석탄과 같은 경우에 체류시간 3 s는 부족할 수 있다. 대상 석탄입자가 제한된 가스화기 체류시간 내에 충분히 반응할지를 판별하는 빠른 방법 중 하나는 여러 탄종에 대하여 얻은 TGA 분석 자료와 실제 가스화 결과를 대상 석탄에 대한 TGA 결과와 비교해서 실제 가스화가 얼마나 빨리 진행될지를 간접 파악하는 것이다[9].

Table 2의 결과를 통해서 보면, Case 2와 3에서 시도한 미분탄/산소와 일부산소/스팀의 분리 공급은 입자 체류시간 측면에서 유리하다고 볼 수는 없다. 그러나 실제 가스화 반응이 일어나면 입자 크기는 급격히 줄어들고 일부 미연탄소와 회재만이 남아 가스화기 출구로 배출되게 된다. 따라서 반응배제 CFD 해석을 통한 결과해석은 큰 방향만을 보여주는 것이지 실제조건과는 차이가 있다. 그런데도 굳이 반응배제 해석을 수행한 이유는 반응이 없는 경우라도 체류시간이 충분한 설계개념이 결국은 유리하기 때문이다.

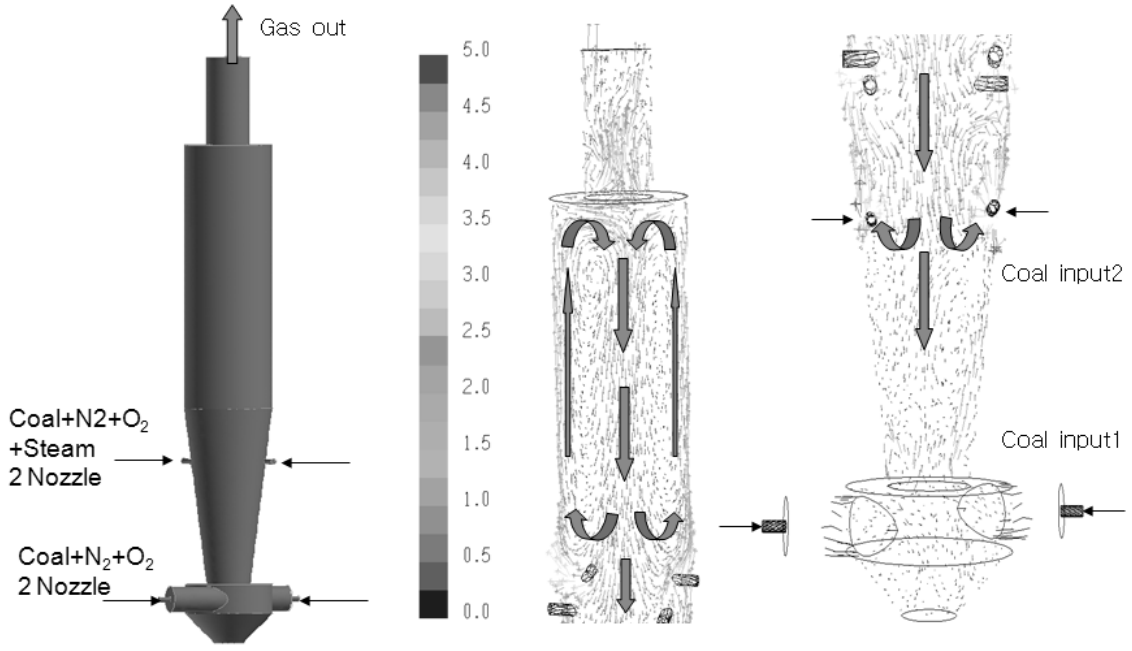
입자 체류시간을 늘리는 설계 방법에는 여러 가지가 있다. 가장 간단한 방법은 L/D 비를 증가시켜서 높이를 높이는 것이다. 고압이 필요한 가스화기의 경우에 반응기의 직경을 늘리는 것은 수 m 이상인 경우에는 제작비용 측면에서 바람직하지는 않기 때문에 일반적으로는 가스화기 직경이 4~5 m를 넘게 되면 높이를 늘려서 반응시간을 더 확보하게 된다. 반응기 높이를 높일 때 주의할 점은 반쯤 녹은 회재 입자가 가스화기 내부 온도가 낮은 벽면에서 엉겨 붙지 않게 가스화기 벽면온도가 일정온도 이하로 낮아지지 않게 하는 것이다.

체류시간을 늘리는 다른 방법은 원료가 투입되어 반응이 가장 격렬하게 진행되는 영역을 크게 만드는 것이다. Case 4가 이 경우로서, 체류시간이 8.4 s로 가장 길게 나타났다. 그러나 여기서 제시한 4가지 경우를 비교할 때 그렇다는 것이지, Table 2의 결과만을 가지고 상향흐름 설계가 하향흐름 설계보다 좋다는 의미는 아니다. 체류시간은 적절한 반응기 영역을 크게 만들거나 원료주입 조건을 조정해서 변경시킬 수가 있다. 반응배제(cold-flow) 조건에서 구한 입자 체류시간 결과는 초기 반응기 형태를 결정하는 데 제한적으로 사용되는 것이고, 실제 고온 고압의 가스화조건에서의 입자 체류시간과는 분명히 다르다.

3.2. 반응 포함(Hot-Flow) CFD 해석

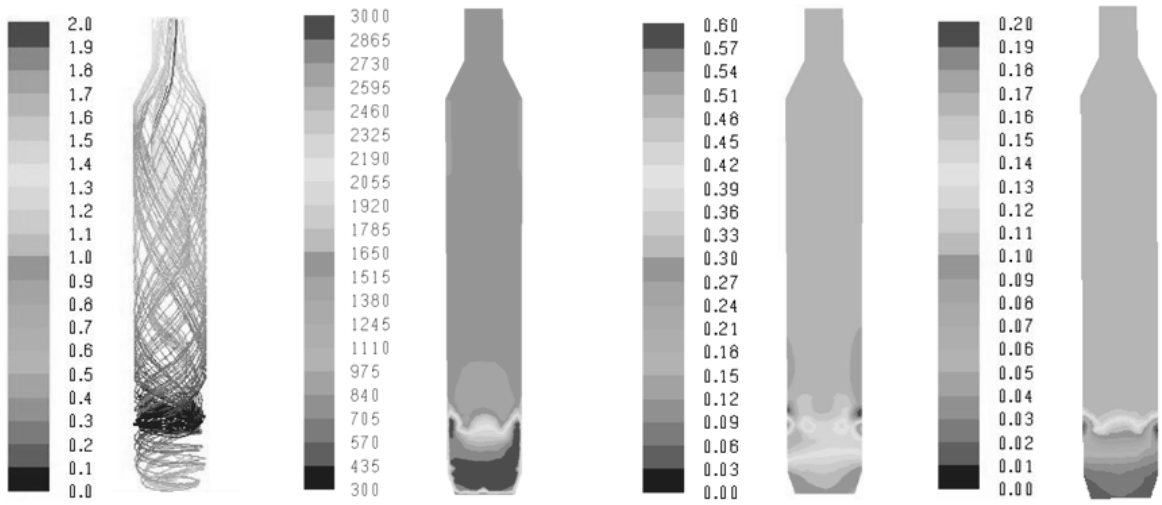
실제 반응온도와 압력조건에서 화학반응이 포함된 해석을 하면 반응기 내 가스 체류시간만이 아니라 합성가스 조성과 온도가 계산된다. 가스 체류시간은 석탄 입자가 반응에 참여하여 가스로 변하고 가스화기 출구까지 도달하는 체류시간의 평균값을 계산한 것이다.

반응을 포함한 CFD 해석 결과가 Figures 7~10에 나타나 있다. 각 그림에서 가장 왼쪽 그림은 체류시간 계산에 사용된 유체흐름도이고, 왼쪽에서 두 번째 그림은 가스화기 내부 온도분포도이다. 온도분포도에서 중요한 포인트는 석탄미분이 공급되는 지역에서 충분히 높은 온도가 구현되는가 하는 점이다. 이 높은 온도가 석탄 내 회재를 녹이고 산소가 효과적으로 잘 사용되어 산소 사용량이 필요 이상으로 사용되는지를 판별하게 해준다.



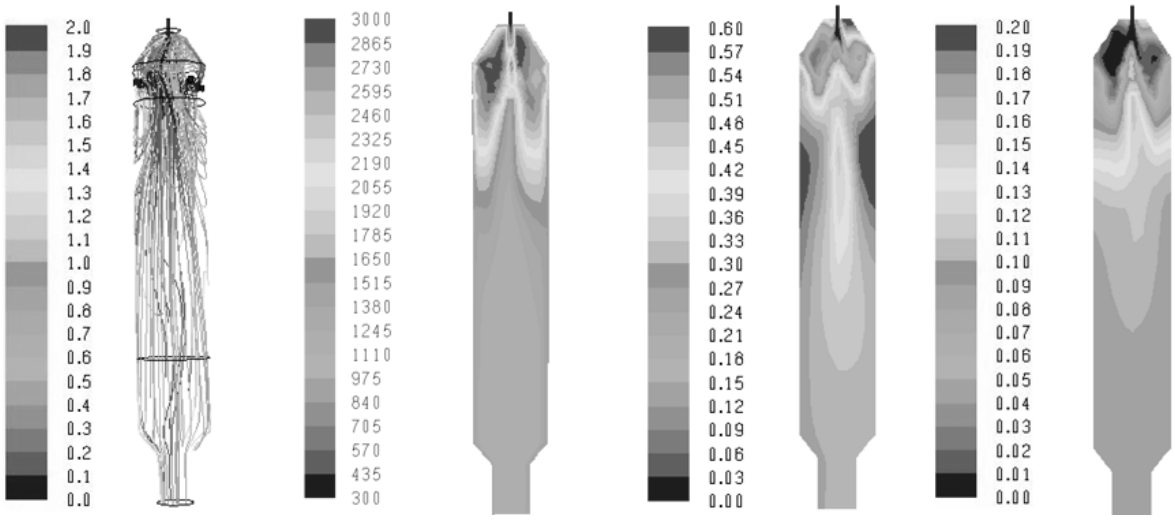
(a) Gasifier shape (b) Vector plot

Figure 6. Vector plot by cold-flow analysis for case 4 of top-flow two stages gasifier configuration.



(a) Retention time (b) Temperature (c) CO (d) H_2

Figure 7. Hot-flow simulation result for up-flow Case 1.



(a) Retention time (b) Temperature (c) CO (d) H_2

Figure 8. Hot-flow simulation result for up-flow Case 2.

Table 3에 4개 경우에 대한 반응포함 해석 결과를 요약하였다. Case 4 (상향흐름, 2단 구조)에서 가스 체류시간이 1.43 s로 가장 높게 나타났으며, Case 2 (하향흐름, 석탄과 산소/스팀 공급부 별도인 구조)에서 가장 짧은 1.03 s 체류시간이 계산되었다. Case 1은 그 중간인 1.17 s의 체류시간을 보였고 Case 3은 1.26 s 체류시간이었다. 가스 체류시간 자료만 보면 2단 구조인 Case 4가 반응 체류시간이 가장 길므로, 반응속도가 느린 석탄에도 적용이 가능한 장점이 예상된다. Case 1의 외부 형상을 유지하면서 미분탄/산소와 일부산소/스팀의 분리 공급개념을 추가한 Case 2와 Case 3의 형태는 반응배제(cold-flow) 해석에서 얻은 Case 1 및 Case 4 대비 반 이하였던 입자 체류시간의 큰 차이는 나타나지 않고 Case 1인 기준형태와 유사한 가스 체류시간을 보여주고 있다. Case 3는 Case 1의 1.17 s 평균 체류시간보다 높은 1.26 s의 체류시간을 나타내고 있어서 설계측면의 개선 가능성을 보여주고 있다.

Case 1은 실제 파일롯 설비에서 얻은 가스화 결과가 있으므로 그 결과를 보면, 인도네시아 아역청탄을 사용하여 가스화기를 한번 통과한 경우에 98% 이상의 탄소전환율을 보였다[6,8]. 반응성이 낮은 러시아 유연탄과 석탄화재 용융온도가 1600 ℃ 이상으로 높은 호주탄의 경우에는 Case 1 구조에 대한 실제 파일롯 가스화실험에서 90% 이하의 탄소전환율이 나타나 체류시간이 충분치 않음을 검증한 바 있다[9]. 이러한 경우에는 미반응된 입자를 포집해서 다시 가스화기로 재투입하는 과정을 거쳐서 탄소전환율 99% 이상을 얻게 된다. 실제로 2단 가스화기를 개발한 일본 미쯔비시중공업 가스화기의 경우에는 포집되는 미반응 석탄입자를 재순환시키는데 그 양이 석탄투입량의 20~40%에 달한다[13].

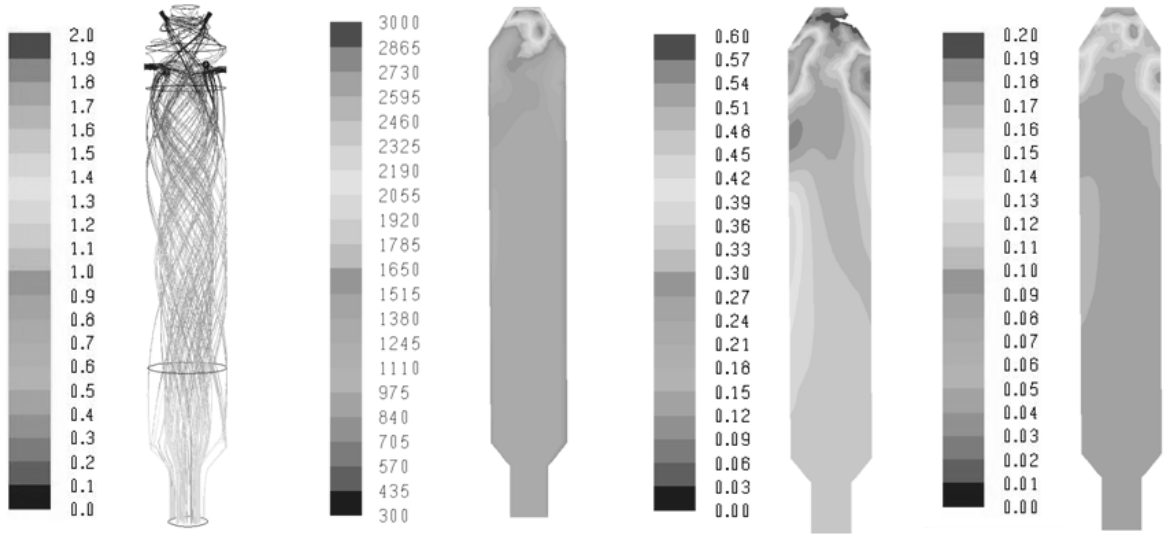
실제로 가스화기 구조 선정단계에서 한번 반응기를 거치면서 99% 이상 탄소전환율을 목표로 할지 여러 번 미반응 촤를 포집 순환시키는 방식으로 갈지는 결정을 해야 한다. 궁극적으로 가스화기에서 최종 탄소전환율은 99% 이상이 되어야 하고 대형 가스화기 경우에는 가능한 한 99.7% 이상 수준이 바람직하다. 상업용 300 MW급 석탄가스화기는 하루에 석탄을 2000~2500톤을 사용하게 되는데, 만약 1%

Table 3. Hot-flow CFD Simulation Results for Four Cases of Coal Gasifiers

Case		1	2	3	4
Gas residence time (s)		1.17	1.03	1.26	1.43
Gasifier exit gas temperature (℃)		1,202	1,081	1,065	1,021
Gasifier exit gas Comp. (vol%)	CO	54.13	52.81	52.70	51.46
	H_2	16.37	17.09	17.25	18.12

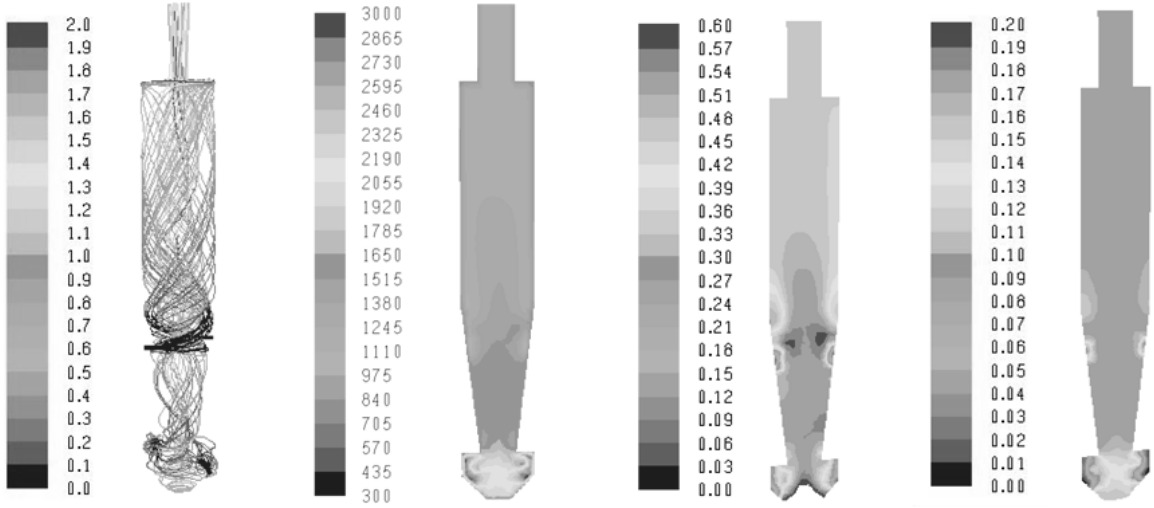
의 미반응 석탄이 배출된다고 하면 그 양은 하루에 20~25톤에 달하게 되어 이 배출량을 적절히 활용하거나 하지 못하면 폐기물로 처리해야 하는 상황에 처할 수도 있으므로 가능한 한 미반응으로 배출되는 양은 최소화하는 방안이 선호된다. 발생되는 미반응입자 내에 포함된 탄소함량이 5% 이하라면 시멘트 혼합제 등으로 사용이 가능한데, Case 1 형태의 파일롯 가스화기에서 실험을 해본 결과를 보면 석탄가스화기에서 배출되는 미반응 입자에 함유된 탄소함유량은 20~40%에 달한다[6,12]. 따라서 저급 연료에 혼합해서 사용하거나 다른 방안을 강구하여야 한다.

가스화기 출구온도는 Case 1이 1202 ℃로 가장 높았고 Case 4에서 1021 ℃로 가장 낮았고, 그 온도 차이는 180 ℃에 달했다. 앞서 설명한대로 가스화기 출구온도가 900 ℃ 이상이 되면 가스화기 후단설비에서 관로 폐색이나 될 가능성이 매우 높다. Case 1 형태의 파일롯 가스화설비에서 경험으로 보면 관로에 조금이라도 튀어나온 부분(예: 열전대)이 있거나 온도가 낮은 부분이 있으면 가스화기 운전 며칠이 지나면 거의 대부분 녹은 입자가 엉겨 붙었다. 따라서 가스화기 출구 합성가스 온도를 낮추는 방안이 강구되어야 하고, 쉘사와 우데사 석탄가스화기에서는 발생한 합성가스의 대부분을 재순환시켜서 가스화기 출구온도를 낮추는 방식을 채택하고 있다. Case 2와 Case 3는 출구



(a) Retention time (b) Temperature (c) CO (d) H_2

Figure 9. Hot-flow simulation result for up-flow Case 3.



(a) Retention time (b) Temperature (c) CO (d) H_2

Figure 10. Hot-flow simulation result for up-flow two stages Case 4.

온도가 1081 ℃와 1065 ℃로 기준 Case 1보다 121 ℃와 137 ℃ 낮은 온도를 보여 출구온도 측면에서는 Case 1보다 향상된 성능을 보여주고 있다. 특히, Case 3는 복잡한 2단 구조인 Case 4 대비 44 ℃ 차이만을 보여주고 있어서 개선된 가스화기 형태로 가능성을 보여주고 있다.

합성가스 조성은 연구에서 제시한 네 가지 경우 모두 비슷한 값을 보여준다. Table 3에서 가스화기 출구온도가 높으면 CO 농도 값이 높고 수소 농도는 낮은데 이는 가스 조성이 열역학평형 계산에 의해 구해졌기 때문이다. 즉, 가스화기 온도가 높으면 CO가 증가하고 수소는 상대적으로 감소하게 된다.

Case 1에서는 다른 Case에 비해서 CO 농도가 54.13%로 가장 높고 수소농도는 16.37%로 가장 낮다. 4가지 형태에서 농도 차이는 CO에서 2.67%, 수소 1.75%였다. 이는 가스화기 출구온도가 상대적으로 가장 높게 나타난 데서 알 수 있듯이 가스화기 내부 가스온도가 가장 높기 때문이다. 네 가지 경우에서 계산된 CO와 수소농도의 차이는 그리 크지 않고, CO와 수소 농도의 합은 69.58%에서 70.5% 범위로 차이가 크지 않다. 여기서 CO와 수소 조성 이외의 성분은 4~6%가 CO_2이고 나머지는 미분탄을 분체이송해서 가스화기 내부로 주입하는데 사용된 질소이다.

CFD 해석에서 쉽게 접근하지 못하는 부분이 석탄에 포함된 슬랙의 융용에 따른 흐름 거동이다. 슬랙의 용융 거동은 가스화기의 중요한 부분인 가스화기 내부 벽면과 슬랙탭 설계에 매우 중요한 정보로서 대부분 실험실적인 자료를 설계에 사용하고 있다.

4. 결 론

분류층 석탄가스화기 성능을 개선하고자 기존 보유한 파일롯 가스화기 형태를 기반으로 모두 4가지 형태의 가스화기 형태를 설정하였고 그 설계개념을 CFD 해석을 통하여 성능을 예측 비교하였다.

CFD 해석은 반응배제(cold-flow)와 반응을 포함(hot-flow)으로 구분해서 수행하였다. 가스화기 체류시간은 반응배제 해석결과와 반응포함 해석결과에서 큰 차이를 보였다. 반응배제 해석의 경우에는 입자가 반응에 의해 소멸되는 과정이 포함되지 못하기 때문에 나타나는 결과로 사료된다. 미분탄과 산소/스팀을 분리해서 주입하는 2가지 형태에서 기준 case와 2단 구조 가스화기 case 대비 1/2 이하의 입자 체류시간으로 반응배제 CFD 해석에서 계산되었지만, 반응포함 해석 결과는 산소/스팀을 분리 공급하는 경우가 2단 구조보다는 가스 체류시간이 짧지만 하단에서 미분탄이 산소/스팀과 같은 위치에서 공급되는 기준 case 경우보다도 긴 체류시간이 가능하였다.

가스화기 출구온도는 기준 case에서 가장 높았으며 2단 구조에서 가장 낮았고 그 온도 차이는 같은 가스화기 총 높이에도 불구하고 181 ℃에 달했다. 산소/스팀을 미분탄과 분리 공급하는 경우에 출구온도는 기준 case보다 121, 137 ℃ 낮은 결과를 보이고 복잡한 2단 구조에 비해서도 44 ℃ 차이만을 보여주고 있어서 가스화기 형태를 개선할 가능성을 보여주었다.

합성가스의 조성은 4가지 모두 비슷한 값을 보여주었는데, 그 차이는 CO에서 2.67%, 수소는 1.75%였다. 가스화기 형태가 98% 이상 탄소전환율을 유지 못하는 구조가 아닌 이상 합성가스 조성에서는 가스화기 형상이 변하여도 큰 차이를 나타내지 않는다.

기존 석탄가스화기의 형상을 일부 변경하거나 복잡한 2단 가스화기 형태를 일부 간단한 구조로 변경하여도 전체적인 효율의 큰 감소 없이 저렴한 건설이 가능할 수 있을 가스화기 형태를 초기 검증하는 수단으로서 CFD 해석이 유용할 수 있다는 점을 보여주었다.

감 사

본 연구는 2011년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KEPTEP)의 지원을 받아 수행한 한국형 300 MW급 IGCC 실증플랜트기술개발사업 연구과제(*No. 2011951010001C*)의 일환으로 수행되었습니다. 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. C. Higman and M. Burgt, Gasification, 85, Elsevier, Amsterdam (2003).
2. Y. Yun, *KISTEP Green-tech Research*, **4**, 89 (2010).
3. N. Holt, Gasification Users Association Annual Report, EPRI, Palo Alto, USA (2010).
4. N. Berkowitz, An Introduction to Coal Technology, 253, Academic Press, New York (1979).
5. K. Aasberg-Petersen, T. Christensen, I. Dybkjoer, J. Sehested, M. Ostberg, R. Coertzen, M. Keyser, and A. Steynberg, Fisher-Tropsch Technology, ed. A. Steynberg and M. Dry, 152, 363, Elsevier, Amsterdam (2004).
6. Y. Yun and Y. D. Yoo, *Korean J. of Chem. Eng.*, **18**, 679 (2001).
7. Y. Yun and Y. D. Yoo, *J. Ind. Eng. Chem.*, **11**, 228 (2005).
8. Y. Yun and S. W. Chung, *Korean J. of Chem. Eng.*, **24**, 628 (2007).
9. Y. Yun, Y. D. Yoo, and S. W. Chung, *Fuel Processing Technology*, b, 107 (2007).
10. Y. Yun, S. J. Lee, and J. P. Hong, *Korean J. of Chem. Eng.*, **28**, 1188 (2011).
11. P. Schoen, Ph.D. Dissertation, Delft University of Technology, Amsterdam, Netherland (1993).
12. Y. Yun, G. B. Lee, and S. W. Chung, *J. Korean Ind. Eng. Chem.*, **14**, 511 (2003).
13. C. Chen, M. Horio, and T. Kojima, *Fuel*, **80**, 1513 (2001).