

미분 석유코크스연소에서 스윙강도변화가 연소과정에 미치는 영향

차천륜* · 이호연* · 황상순**

The Effects of Various Swirl Flows on Pulverized Petroleum Coke Combustion

Chun Loon Cha*, Ho Yeon Lee*, Sang Soon Hwang**

ABSTRACT

Petroleum coke has high heating value and low price. Due to the steadily increasing demand for heavy oil processing, the production volume of petroleum coke tends to be expanded. The high availability and low price of petroleum coke have been strongly considered as candidate fuel for power generation facilities. However the high carbon content, high sulfur content and nitrogen content of petroleum fuel are known to produce relatively large quantity of CO₂, high NO_x and SO₂ emission. In this work, a series of numerical simulations have been carried out in order to investigate the effects of swirl flow intensity on combustion furnace, which is most important operating condition. Results show that the temperature distribution was spatially uniform at about 1600K but high temperature region are located quite differently depending on swirl number. In addition, numerical temperature data was compared with experimental temperature data and its temperature difference shows less than 10%. On the other hand, discrepancy between numerical and experimental emission data were slightly large with necessities of improved emission model.

Key Words : Pulverized petroleum coke, Swirl Number, NO_x, SO_x

석유코크스(Petroleum Coke)는 석탄을 능가하는 발열량과 타 연료대비 매우 경제적인 가격이 시장에 형성되어 있으므로, 이를 연료로 사용하는 대형 발전 플랜트 및 보일러 시스템의 개발은 에너지 비용 절감에 크게 기여할 수 있다. 하지만 석유코크스는 원유의 정유과정에서 생성되는 최종부산물로써 많은 양의 유기황과 회분을 함유하고 있어 사용에 어려움이 있다. 석유코크스는 기본적으로 고정탄소의 함량이 88% 이상이며 발열량이 8500kcal/kg 이상으로 높아 좋은 연료가 될 수 있으나 황 함량 역시 6%이상으로 높아 다량의 SO_x 및 NO_x 대기오염 물질을 배출하여 이러한 환경문제 개선에 대한 많은 연구가 이루어져 왔다.[1] 최근에는 석유코크스 또한 미분탄처럼 가루로 미분화하여 연소시키는 기술이 개발되어 산업용 연소기에 적용되어지고 있다. 일반적으로 10%정도의 수분을 포함하는 석유코크스를 미분화과정과 건조공정을 거쳐 2~3%정도의 수

분만을 포함하는 분말을 제조하는방식이 있는데 이런 방식은 석유코크스의 착화효율을 높이고 버너의 노즐을 막을 우려가 없어 공기 혼합식으로 연소되는 버너 타입의 보일러 등에도 유류대신 이용할 수 있는 장점이 있다.[2]

그러나 이러한 석유코크스의 연소특성 및 배기특성을 밝혀내는 연구가 현재까지 거의 진척되지 못하였기 때문에 보다 체계적인 연구가 필요한 상황이다.

미분탄과 미분석유코크스와 같은 고체연료의 연소반응은 크게 수분증발과정, 탈휘발과정과 최의 산화과정으로 분류되는데 수분과 휘발성 물질의 연소 후 진행되는 최의 연소는 반응에 필요한 체류시간, 유동에 따른 연소체적 등을 결정하는데 중요한 과정이다. 기존의 연구들이 상용화되어있는 미분탄에 대해 연구가 진행되고 있는 반면 미분석유코크스에 대한 연구는 국내외적으로 미흡한 실정이다.[3] 석유코크스의 경우 석탄에 비하여 발열량은 높지만 휘발분이 적고 고정탄소의 함량이 많아 연소성이 떨어지고 연소시간 또한 길어 석탄과는 매우 다른 연소특성을 갖는다.[4] 따라서 연소로에서의 체류시간을 확보하기위한 방법 중의 하나로 스윙을 사용한 버너를 통하여

* 인천대학교 기계공학과

† E-mail : hwang@incheon.ac.kr

Tel : (032)835-8417 Fax : (032)835-0793

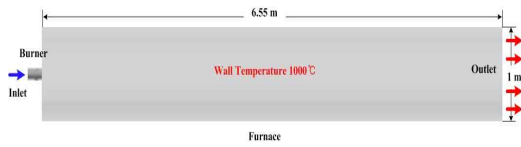


Fig. 1 Schematic of numerical analysis for swirl petroleum coke combustor and furnace.

Table 1 Swirl number with different swirl angle

Swirl angle	Inner swirl number	Outer swirl number
30	0.5295	0.5186
40	0.7695	0.7537
50	1.0929	1.0705

$$S_N = \frac{2}{3} \left[\frac{1 - (D_{hub}/D_{sw})^3}{1 - (D_{hub}/D_{sw})^2} \right] \tan\theta \quad (1)$$

스윙유동을 형성함으로 석유코크스의 연소시간과 화염안정성을 확보하는 방법이 많이 사용되어 지고 있다.[5-6] 본 연구에서는 1ton/hr급 pilot scale 석유코크스 연소기 및 연소로에서 스윙각도 변화에 따른 유동특성과 미분석유코크스의 연소특성 및 배기가스배출을 알아보기 위하여 전산수치해석을 진행하였다. 수치해석은 상용 CFD코드인 ANSYS Fluent 15.0을 사용하였으며 수치해석결과와 실험결과를 비교를 통하여 수치해석모델의 검증을 수행하였다.

수치해석을 위해 Fig.1과 같은 3차원 유동장을 모델링하였으며 1000°C의 일정한 벽면온도에 22.5 μ m 크기의 석유코크스 입자만의 반응을 가정하였다. 수치해석을 진행하기 위하여 Realizable $k-\epsilon$ 난류모델을 적용하였고, 화학종 보존방정식과 DO(Discrete Ordinate)모델을 사용하여 화학반응과 복사열전달을 고려하였다. 또한 Lagrangian 방법으로 입자의 궤적을 계산하며 가스상과 운동량, 에너지, 질량을 서로 교환하는 DPM (Discrete Phase Model)을 사용하였다.

본 연구에서 모델링한 석유코크스연소기는 산화제인 공기가 1차, 2차, 3차로 다단으로 공급되어지며 2차와 3차공기 공급부에는 스윙이 장착되어 2중 스윙의 구조를 갖고 있다. 스윙강도를 나타내는 스윙넘버를 계산하는 식(1)을 살펴보면 스윙넘버는 스윙의 직경과 각도에 따라 변하는데 특히 각도에 지배적인 영향을 받으며 각각의 결과는 Table.1과 같다. 먼저 스윙각도에 따른 스윙넘버의 변화가 연소로 내에서 어떻게 작용하는지 알아보기 위하여 Fig.2에 속도벡터를 나타내었다. Fig.2를 살펴보면 스윙유동의 대표적인 특징인 Corner recirculation zone이 스윙각이 증가함에 따라 연소기에 가까운 방향에 강하게 생성되는 것을 볼 수 있다. 이는 스윙강도가 강해지면

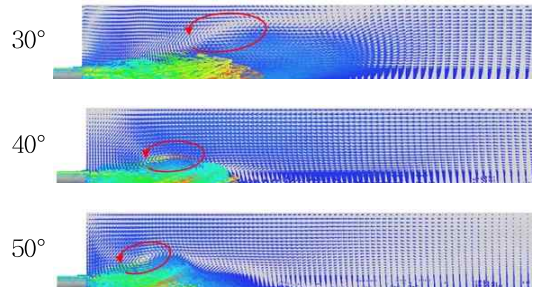


Fig. 2 Velocity vector of swirl flow with different swirl angle(θ).

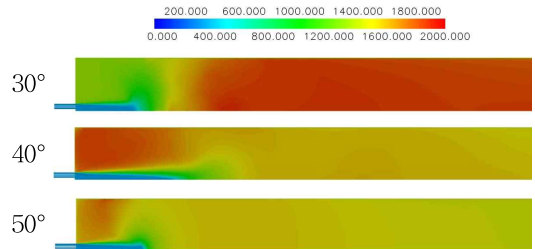


Fig. 3 Contour of temperature with different swirl angle(θ).

생기는 일반적인 현상으로 강한 재순환유동의 형성으로 인해 연소로 내부에서의 유동의 체류시간을 증가시킬 수 있음을 알 수 있다. 이러한 유동특성을 바탕으로 Fig.3의 온도분포를 살펴보면 스윙강도가 가장 약한 스윙각도 30°의 경우 Corner recirculation zone이 형성된 지점 이후부터 연소로 출구부까지 고온의 영역이 존재하는 것으로 나타났다. 스윙강도가 강해지며 Corner recirculation zone이 생성되는 지점을 따라 고온인 영역이 연소기에 가깝게 생성되는 것을 확인할 수 있다. 한편으로 온도분포계산결과 연소로 내부의 온도가 대부분 균일한 것을 볼 수 있는데 이는 외부로의 열전달이 고려되지 않아 발생하는 문제로 생각된다.

사용된 수치해석모델의 검증을 위하여 1ton/hr급 pilot scale 석유코크스 연소시스템의 실험결과와 수치해석결과를 비교하여보았다. Fig.4에는 연소로의 온도분포를 비교하여 나타내었는데 화염이 주로 발생하는 연소기와 가까운 영역에서의 온도분포는 실험결과와 250°C 정도의 차이를 보이지만 연소로의 후단영역에서의 온도분포는 크게 차이가 나지 않는 것을 볼 수 있다. 연소로 6m지점의 수치해석 온도결과가 실험적 결과보다 높은 것은 앞서 설명했듯이 실험에서 발생하는 정확한 열손실을 반영하지 못하여 나타난 현상이라 생각된다. 또한 NO_x와 SO_x 배기가스배출특성을 비교해본 결과를 Fig.5에 나타내었다. NO_x의 경

우 예측의 차이가 30ppm 정도로 비교적 잘 예측하고 있으나 SOx의 경우 수치해석을 통한 배출되는 배기가스양이 실제 실험을 통해 측정된 배기가스양보다 매우 적게 배출되는 것을 볼 수 있다. 이는 본 수치해석모델의 한계로 바닥 및 벽면에 생기는 슬래그를 고려하지 못하며 실제 실험에서 발생하는 미 연소되고 바닥에 떨어진 연료 및 연료에 포함된 황(S)성분이 재 연소되며 발생하는 추가적인 SOx에 대한 예측이 이루어지지 않았기 때문이다. 따라서 석유코크스 연소시스템의 보다 정확한 해석을 위하여 벽면에서의 열전달, 배기가스의 생성 및 환원모델에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 생각된다.

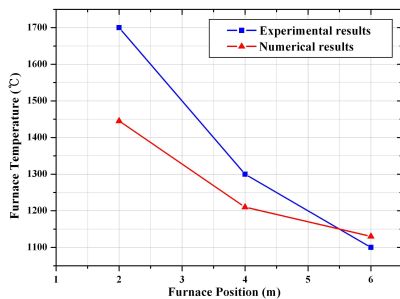


Fig. 4 Comparison of temperature between experimental data and numerical data.

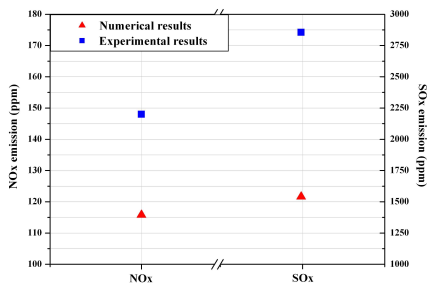


Fig. 5 Comparison of emissions(NOx, SOx) between experimental data and numerical data.

참고 문헌

- [1] E. A. Heintz, "Review the characterization of petroleum coke", Carbon, Vol. 34, No.6, pp. 699-709, 1996.
- [2] E. J. Akpabio and O. W. obot, "Optimizong utilization of petroelum coke in Nigerian metallurgical industry", Journal of minerals & materials characterization & engineering, Vol. 10, No.3, pp.267-278, 2011.
- [3] Masayuki Taniguchi, Hironobu Kobayashi, Kenji Kiyama and Yoshio Shimogori "Comparison of flame propagation properties of petroleum coke and coals of different rank", Fuel, 88 (2009) 1478-1484.
- [4] K. S. Milenkova, A. G. Borrego, D. Alvarez, J. Xiberta and R. Menendez "Devolatilisation behaviour of petroleum coke under pulverised fuel combustion conditions", Fuel, 82 (2003) 1883-1891.
- [5] Jinsheng Wang, Edward J. Anthony, Juan and Carlos Abanades, "Clean and efficient use of petroleum coke for combustion and power generation", Fuel, 83 (2004) 1341-1348.
- [6] Rohan Fernando "The use of petroleum coke in coal-fired plant", IEA Coal Research 2001.
- [7] Qihui He, Rui Wang, Weiwei Wang, Renfu Xu and Baixing Hu "Effect of particle size distribution of petroleum coke on the properties of petroleum coke-oil slurry", Fuel, 90 (2011) 2896-2901.

후 기

본 연구는 2013년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행된 연구과제(No. 20132010101900)입니다.