

IGCC 합성가스 냉각기 GRC의 열유동 및 입자거동 특성에 대한 전산해석 연구

박상빈* · 예인수* · 류창국** · 김봉근**

Numerical Simulations on the Thermal Flow and Particle Behaviors in the Gas Reversal Chamber of a Syngas Cooler for IGCC

Sangbin Park, Insoo Ye, Changkook Ryu and Bongkeun Kim

ABSTRACT

In the Shell coal gasification process, the syngas produced in a gasifier passes through a syngas cooler for steam production and temperature control for gas cleaning. Fly slag present in the syngas may cause major operational problems such as erosion, slagging, and corrosion, especially in the upper part of the syngas cooler (gas reversal chamber, GRC). This study investigates the flow, heat transfer and particle behaviors in the GRC for a 300 MWe IGCC process using computational fluid dynamics. Three operational loads of 100%, 75% and 50% were considered. The gas and particle flows directly impinged on the wall opposite to the syngas inlet, which may lead to erosion of the membrane wall. The heat transfer to the wall was mainly by convection which was larger on the side wall at the inlet level due to the expansion of the cross-section. In the evaporator below the GRC, the particles were concentrated more on the outer channels, which needs to be considered for alleviation of fouling and blockage.

Key Words : Fly slag(비산슬래그), Gas eversal Chamber(GRC), IGCC(석탄가스화복합발전), Syngas cooler(합성가스 냉각기)

1. 서론

석탄 가스화란 석탄을 불완전 연소를 통해 가연성 기체 연료를 얻어내는 기술이다. 생성된 합성가스는 가스터빈과 스팀터빈을 이용한 복합발전(Integrated Gasification Combined Cycle, IGCC)에 활용하거나 메탄, 수소 또는 액체 수송연료를 합성하는데 이용된다[1].

석탄 가스화의 방식은 반응기 형태에 따라 분류층, 유동층, 고정층 등의 방식, 석탄 공급(feeding) 방식에 따라 건식, 습식 등으로 구분된다[2,3]. 이 중 Shell사의 석탄 가스화 공정은 건식 분류층 방식으로서 산소와 수증기를 이용하여 물 기준으로 약 60%의 CO와 30%의 H₂로 구성된 합성가스를 생산한다[4]. 이 공정의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 가스화기 상부의 합성가스는 약 1600°C의 고온으로서, 냉각을 위해 재순환된 250°C의 저온 gas와 급속 혼합된 뒤 이송

관(transfer duct)을 거쳐서 합성가스 냉각기(syngas cooler)로 공급된다. 합성가스 냉각기의 벽면 구조는 수냉벽이며, 내부에는 채널형 증발기가 동심원으로 중첩되어 설치된다.

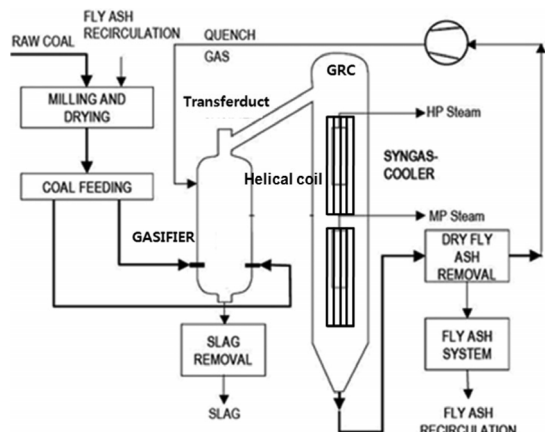


Fig. 1. Schematic of gasification block in the Shell IGCC process.

* 성균관대학교 기계공학부

** 두산중공업 IGCC 개발팀

† 연락처, cryu@me.skku.ac.kr

합성가스 냉각기에서는 석탄 회분이 용융된 비산 슬래그(fly slag)가 합성가스와 함께 진입하여 입자의 열교환기 표면 부착에 의한 파울링을 유발하며, 과도한 경우 가스 유로를 막는 운전상의 문제를 발생시킬 수 있다[5,6]. 이를 방지하기 위해 가스 및 입자 유동 방향을 전환하고 불균일성을 완화하기 위하여 GRC(Gas Reversal Chamber)라 부르는 빈 공간을 냉각기 상부에 두게 된다. 따라서 IGCC 공정의 안정적인 운전을 위한 요소로서 GRC 내부의 가스 유동과 입자 거동 특성을 파악하여 발생 가능한 문제점을 예상하는 것이 필수적이다.

본 연구에서는 300 MWe급 IGCC 공정의 합성가스 냉각기를 대상으로 유동, 열전달 및 입자 거동 특성을 전산유동해석을 이용하여 분석한 결과를 기반으로 한다. 대상 공정의 운전 부하 100%, 75% 및 50%를 가정된 조건에 대해 가스 유로의 형태, 벽면 열전달, 입자 궤적, 증발기 채널별 입자 분포 등을 분석하였다.

2. 운전조건 및 해석방법

가스화기 상부에 설치된 GRC의 기하학적 형상은 Fig. 2와 같다. 왼쪽의 기울어진 방향의 주입구는 가스화기 상부의 이송관에서 연결되며, GRC의 하단부는 합성가스 냉각기 내 증발기 채널의 3 m 영역까지 포함하여 형상을 구성하였다. GRC의 직경은 약 2 m, 증발기 영역을 제외한 높이는 약 8 m이다. 증발기는 튜브로 구성된 다수의 채널이지만, 본 연구에

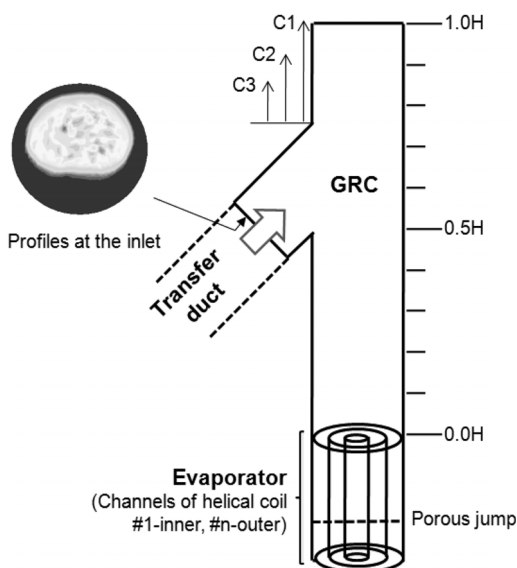


Fig. 2. Geometry of gas reversal chamber(GRC) considered in this study.

Table 1. Operating conditions of GRC

Operation load	100%	75%	50%
Pressure (bar.g)	42	42	42
Synagas (kg/s)	113	85	57
Fly slag (kg/s)	1.8	1.3	0.9
Inlet temp. (°C)	791	770	734

서는 6개의 평면벽으로 단순화하였다. 또한 증발기 채널은 6 m 이상 이어지므로 이에 따른 압력강하(2 kPa)를 Porous jump 조건으로 설정하였다[7].

운전부하의 영향과 함께, GRC 형상의 한 요소로서 GRC 상부의 높이를 변화시켜 그 영향을 분석하였다. Fig. 2에 나타난 바와 같이 기준 경우인 C1에서 1/3씩 축소된 C2, C3의 두 경우에 대해 부하 100% 조건에서 해석하여 그 영향을 파악하였다.

Table 1은 GRC의 운전조건을 나타낸 것이다. 부하 100%, 75%, 50%의 세 조건에 대해 합성가스 유량을 114, 85, 57 kg/s로 설정하였다. 합성가스 압력은 42 bar.g이며, 조성은 CO 80.8 wt.%, CO₂ 2.7 wt.%, H₂ 2.4 wt.%, N₂ 12.9 wt.%, H₂O 1.3 wt.%로 구성되었다.

GRC 입구에서의 온도, 속도, 입자 농도는 가스화기 상부의 냉각파이프 및 이송관에 대한 별도의 전산유동해석을 통해 구한 뒤 입구면에서의 분포로 설정하였다. 이 때 입구 평균온도는 부하별로 각각 791, 770, 734°C이다.

비산 슬래그는 가스화기 하부로 배출된 슬래그를 제외한 나머지 회분과 슬래그 점도를 조절하기 위해 별도로 투입되는 CaO 등의 Flux 두 종류로 구성된다. 각 입자 직경은 2-100 μm 범위에 대해 총 8개 값을 고려하였다. 투입된 입자의 밀도는 고온 분위기에서 용융되었다고 보고 2800 kg/m³로 설정하였다[8]. 입자상의 해석은 총 15,576개의 입자에 대해 난류의 영향을 고려한 Lagrangian 방식으로 20번씩 추적한 뒤 운동량 및 열전달에 대한 생성항으로 가스 유동 해석에 반영된다.

GRC 벽면은 수냉벽(membrane wall)으로서 온도는 스팀 포화 온도인 340°C이고, 튜브 구조에 따른 전도열전달과 스팀의 대류열전달에 따른 열저항[9]을 계산하여 유효 열전달 계수로 5000 W/m²K을 설정하였다.

Fig. 2의 형상에 대한 격자는 약 122만 개의 육면체 셀로 구성하였으며, 상용 CFD코드인 Fluent 6.3을 이용하여 해석하였다. 내부의 선회 유동을 포함한 난류 유동을 고려하기 위하여 Realizable k-ε model[10]을 적용하였다. 또한 Discrete ordinate model[11]을 이용하여 복사열전달을 고려하였다.

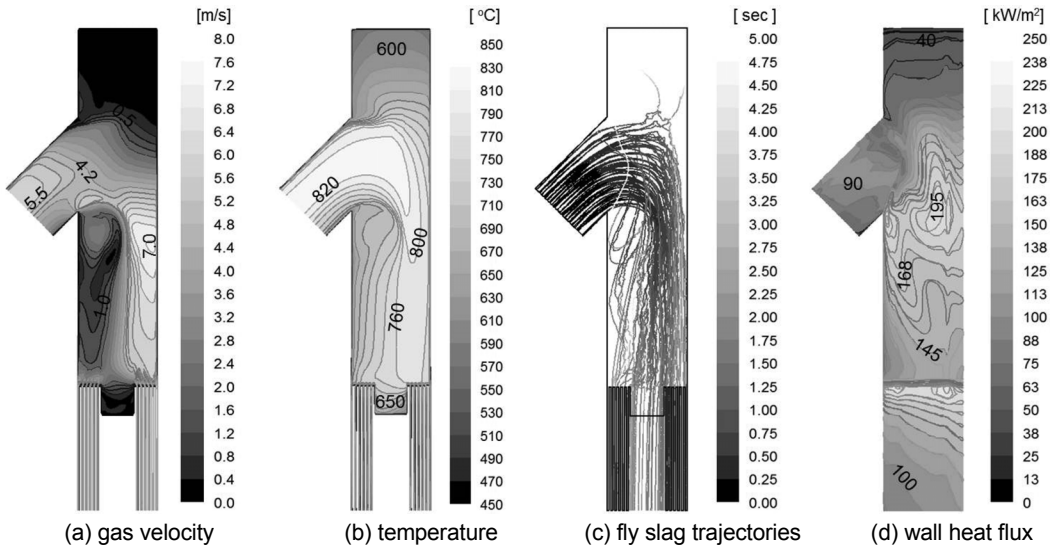


Fig. 3. Gas flow, particle trajectories and wall heat flux under the operational load of 100%.

3. 결과 및 토의

3.1. 운전 부하 100%에서의 주요 특성

Fig. 3은 부하 100%에 대해 GRC 중앙 단면(열유속은 벽면)에서의 주요 해석 결과를 나타낸 것이다. Fig. 3(a)의 유속 분포에 나타난 바와 같이 GRC에 진입한 가스 유동은 입구 맞은편 벽면에 충돌한 후 벽면을 따라 아래쪽의 증발기 채널로 진행하는 형태를 가진다. GRC 입구에서의 유속은 5.5 m/s 정도이지만 유동 방향이 급격히 꺾이면서 7 m/s에 가까운 고속 영역이 나타난다.

유속이 상대적으로 높은 주 유동 영역은 열전달 대비 상대적인 유량이 크기 때문에 온도 하락이 낮아 Fig. 3(b)의 고온영역과 일치한다.

Fig. 3(c)에 나타낸 비산 슬래그 입자 궤적은 가스 유동과 일치한다. 이 때, GRC 입구 맞은편 벽면에 고속으로 충돌하는 입자들에 의해 장기적으로 수냉벽의 마모 문제가 발생할 가능성이 있다. 또한 GRC 상부로는 유속이 낮은 순회 영역이 형성되어 입자의 농도

가 낮음을 알 수 있다. 또한 증발기 채널 중앙에 위치한 배플에 정체되는 입자들이 많다. 따라서, 증발기 상부에 수트블로워(soot blower) 설치 없이 운전되는 경우 배플 영역에 침적되어 채울 것으로 예상된다.

Fig. 3(d)의 벽면 열유속의 경우 입구 높이의 GRC 양 측벽에서 최대 195 kW/m²으로 가장 높게 나타난다. 이는 입구보다 단면적이 넓은 GRC로 진입하고 유동이 벽을 따라 확장되면서 고속 영역이 형성되어 대류열전달이 증가하기 때문이다. 이와 같은 경향은 부하별로 유사하게 나타난다.

Fig. 4는 증발기 입구 30 cm 위에 위치한 단면에서 가스 유속 및 온도 분포를 나타낸 것이다. 앞서 설명한 유동 특성으로 인해 입구 반대편으로 고속 및 고온 영역이 이어진다. 따라서 좌우의 속도는 2배 이상, 온도는 100°C 이상의 편차가 존재하는 상태로 증발기에 진입하는 것을 알 수 있다. 단순한 유동 조건이라면 형상의 변경이나 가이드베인 설치 등을 통해 균일한 유동을 달성할 수 있다. 하지만, 이송관-GRC-합성가스 냉각기 전체가 수냉벽으로 이루어진 구조적

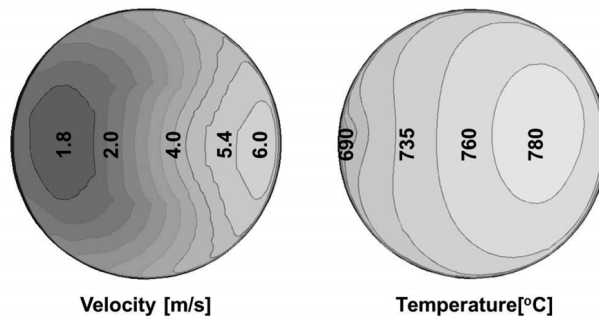


Fig. 4. Velocity and temperature at 30 cm above the evaporator inlet (load: 100%).

특성과 고온 고압의 작동 조건 및 비산 슬래그로 인해 GRC 형상 구성에 대한 현실적인 한계가 크다고 판단된다.

3.2. 부하별 열전달 특성

Fig. 5는 GRC 벽면의 총 열유속 및 복사열유속을 높이에 따른 각 구간별 평균값으로 나타낸 것이다. 두 값의 차이는 대류열유속을 의미한다. 총 열유속은 높이에 따른 변화가 크며, 최대값은 입구 아래쪽인 상대 높이 0.4에서 공통적으로 나타난다. 이는 앞 절에서 설명한 바와 같이, GRC입구에서 진입한 유동이 측벽을 따라 진행하면서 대류열전달이 크게 증가하기 때문이다. GRC 상부($H > 0.5$)에서는 가스 유속이 낮아 열유속이 크게 감소한다. 또한, 하부에서는 유동이 상대적으로 균일해지면서 열유속 변화가 작아진다. 복사 열유속은 총 열유속의 약 25% 정도로서 온도가 높지 않기 때문에 열전달에서 차지하는 상대적인 비중이 작다. 또한, 높이에 따른 변화가 크지 않고 균일한 분포를 가진다.

Table 2는 부하별로 총 열전달량과 증발기 채널 입구 30 cm 상단에서의 가스 온도를 나타낸 것이다. 입구 온도(Table 1)와 비교 시, 부하별로 약 42, 46, 59°C의 온도감소를 보였다.

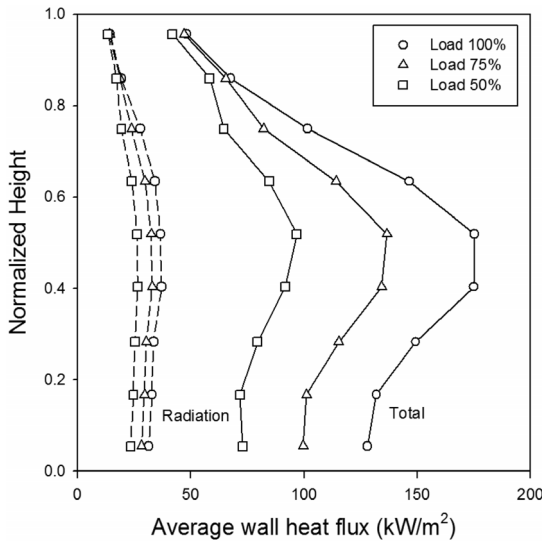


Fig. 5. Total and radiation heat flux on the wall of the GRC.

Table 2. Total heat transfer and exit gas at the exit of the GRC

Load	100%	75%	50%
Heat transfer (MW)	7.2	5.9	4.4
Exit temp. (°C)	749	724	675

3.3. 증발기 채널 내 입자 분포

Fig. 6은 증발기 채널별로 진입하는 비산슬래그의 분포를 단위면적당 입자 유량($\text{kg/m}^2\text{s}$)으로 나타낸 것이다. 안쪽에 위치한 채널 1번에서 4번까지는 비교적 균일하지만, 수냉벽과 바깥쪽 코일 사이에 위치한 6번 채널에서 크게 증가한다. 이는 가스의 주 유동이 입구 맞은편 벽면을 따라 진행하기 때문이다. 입자 분포에 실제 채널 면적을 곱한 질량 유량(kg/s)으로 환산하면 6번 채널에는 1번 채널의 5배 정도의 입자가 진입한다. 따라서, 6번 채널에서 파울링에 따른 영향이 더 크게 나타날 가능성이 있다.

Fig. 7은 증발기 채널 내 입자의 부착률을 GRC 중

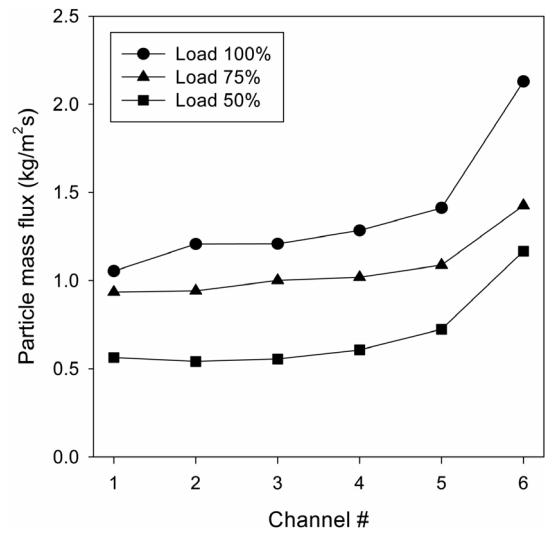


Fig. 6. Particle mass flux in evaporator channels below the GRC.

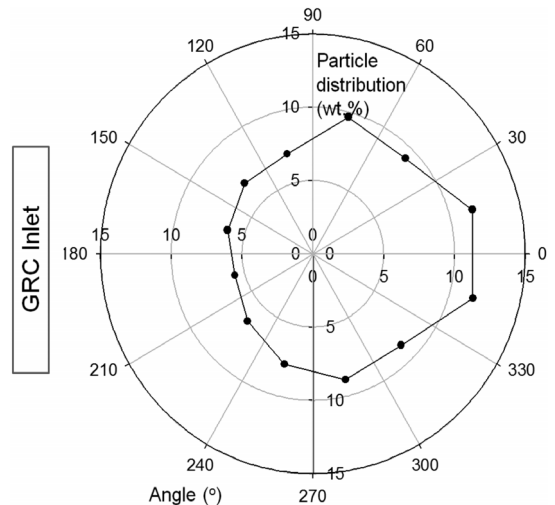


Fig. 7. Distribution of particle deposition in the evaporator in the angular direction.

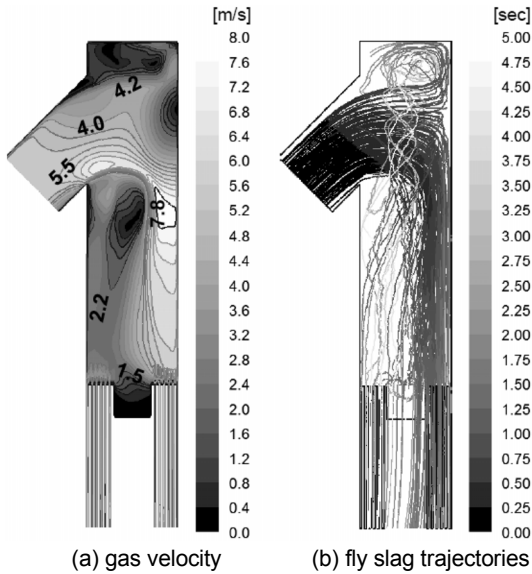


Fig. 8. Gas velocity, particle trajectories in Case C3 for load 100%.

심을 기준으로 각도에 따라 나타낸 것이다. 주입부 반대면 0-30°, 330-360°에서 부착률이 10% 이상으로 높게 나타나기 때문에 이 영역에서 입자의 침적과 파울링이 클 것으로 예상된다. 따라서 증발기 위에 수트블로워를 설치할 경우 GRC 입구 반대편으로 주입되는 가스의 유량을 크게 증가시키는 것이 필요하다.

3.4. GRC 상부 높이의 영향

Fig. 8은 GRC 상부 높이가 가장 낮은 경우 C3 (Fig. 2 참조)의 유속과 입자추적 결과이다. 전체적인 유동 및 열전달, 입자 거동의 경향은 C1(Fig. 3), C2, C3에서 모두 동일하게 나타났다. 그러나, 높이를 1/3로 축소시킨 경우 C3에서는 입구 맞은편 벽면에 충돌한 유동이 GRC 윗면으로 선회하는 유동이 강하게 나타난다. 따라서 벽면의 열손상이 원래의 높이인 C1보다 심각할 것으로 예상된다.

4. 결론

300 MWe급 합성가스 냉각기 GRC를 대상으로 유동 및 열전달과 입자의 부착 특성을 전산유동해석으로 평가한 주요 결론은 다음과 같다.

- 1) GRC 주입부 측면에서 가스의 유동이 벽면을 따라 확장되어 국부적으로 높은 열유속이 나타나는 것을 확인하였다. 이러한 경향은 부하별로 동일하였다.
- 2) 복사열유속은 비교적 균일하나 총 열유속에서 약 25%를 차지하여 대류열전달에 따른 높이별 편차에 따른 영향이 크기 나타났다.

- 3) 비산 슬래그 입자는 가스 유동을 따라 진행하면서 GRC 주입구 맞은편 벽면에 충돌하는 경향이 커서 벽면의 마모 가능성이 있는 것으로 확인되었다.

- 4) GRC 하부에 위치한 증발기의 6개 채널 중 수냉벽 쪽에 위치한 채널에서 비산 슬래그 입자 유량이 상대적으로 크다. 특히 입구 반대편 벽면을 따라 가스 유속과 입자 농도가 크게 나타났다. 따라서 고압 질소를 이용한 수트 블로워를 설치할 경우 이 분포를 고려한 설계와 운전이 필요하다.

- 5) GRC 상부의 높이가 1/3로 낮아지면 순환영역의 유속이 상승하여 입자에 의한 마모가 예상된다. 그러나, 기준 높이 및 2/3 높이에서는 이러한 문제점이 발견되지 않았다.

후 기

본 연구는 2012년도 지식경제부의 재원으로 한국 에너지 기술평가원(KETEP)과 두산중공업의 지원을 받아 수행한 한국형 300MW급 IGCC실증플랜트 기술개발사업(2011951010001A)의 지원을 받아 수행되었음.

참고문헌

- [1] C. Higman, M. Van Der Burgt, Gasification, Gulf Professional Publishing, 2008.
- [2] N. P. Cheremisinoff, R. R. J. Rezaian. Gasification Technologies, CRC Press, 2005.
- [3] L. Zheng, E. Furinsky, "Comparison of Shell, Texaco, BGL and KRW Gasifiers as part of IGCC Plant Computer Simulations", Energy Conversion and Management, Vol. 46, 2005, pp. 1767-1779.
- [4] 예인수, 박상빈, 류창국, 김유석, "석탄 분류층 가스화기 전산유동 해석 시 해석 모델의 영향 평가", 한국연소학회 KOSCO SYMPOSIUM 논문집, 2012, pp. 37-40.
- [5] P. Wang, M. Massoudi, "Slag Behavior in Gasifiers. Part 1: Influence of Coal Properties and Gasification Conditions", Energies, Vol. 6, 2013, pp. 784-896.
- [6] D. Brooker, "Chemistry of Deposit Formation in a Coal Gasification Syngas Cooler", Fuel, Vol. 72, 1993, pp. 665-670.
- [7] S. O. Akansu, "Heat transfers and Pressure Drops for Porous-ring Turbulators in a Circular Pipe", Applied Energy, Vol. 83, 2006, pp. 280-298.
- [8] S. Ghosal, S. A. Self, "Particle Size-density Relation and Cenosphere Content of Fly Ash", Fuel, Vol. 74, 1995, pp. 522-529.

- [9] B. D. Bowen, M. Fournier, J. R. Grace, "Heat Transfer in Membrane Waterwalls", Heat Mass Transfer, Vol. 34, 1991, pp. 1043-1057.
- [10] T. H. Shih, W. W. Liou, A. Shabbir, Yang, J. Zhu, "A New k Eddy Viscosity Model for High Reynolds Number Turbulent Flows Model Development and Validation", Computers and Fluids, Vol. 24, 1995, pp. 227-238.
- [11] E. H. Chui, G. D. Raithby, "Computation of Radiant Heat Transfer on a Non-Orthogonal Mesh Using the Finite-Volume-Method", Numerical Heat Transfer, Vol. 23, 1993, pp. 269-288.

논문접수일 : 2013. 03. 01
심사완료일 : 2013. 03. 19