

IGCC 합성가스 냉각 시스템의 열전달 특성 연구

오준호* · 예인수* · 박상빈* · 류창국** · 박성구**

Numerical Analysis on the Heat Transfer Characteristics of Syngas Cooling System of an IGCC Process

Junho Oh* · In-soo Ye* · Sangbin Park* · Changkook Ryu** · Sungku Park**

ABSTRACT

In a syngas cooling system of coal gasification process, fly slag carried by syngas deposit on the surface of heat exchanger. The deposited materials form a fouling layer with several millimeters thickness, disturbing heat transfer between steam and syngas. This study investigates flow and heat transfer characteristics of syngas in helical coil heat exchanger using computational fluid dynamics under clean and fouled surface condition. Process model were also designed and its results are in good agreement with CFD results.

Key Words : Syngas Cooler(합성가스 냉각기), IGCC(석탄가스화복합발전), Fouling(파울링), Helical Coil(나선형 코일), Fly Slag(비산 슬래그)

석탄가스화복합발전(Integrated Gasification Combined Cycle)은 석탄을 고압에서 불완전 연소시켜 CO와 H₂가 주성분인 합성가스로 변환하고, 이 합성가스를 이용하여 가스터빈과 스팀터빈을 운전하여 전력을 생산하는 기술이다. 가스화 공정 내의 합성가스는 연소과정의 잔여물로서 석탄과 회분 입자를 포함하고 있는데, 이를 비산 슬래그(fly slag)라 한다. 비산 슬래그는 합성가스 와 함께 운반되다가 합성가스 냉각기(syngas cooler)의 열교환기 표면에 부착되어 fouling layer을 형성하게 된다[1]. fouling의 열전도도는 합성가스 냉각기 내 온도에서 1~3 W/mK정도[2]로 낮기 때문에 합성가스와 코일 내 스팀의 열교환을 방해하게 되고, 이로 인해 합성가스 냉각성과 스팀 생산 효율의 저하를 가져오게 된다.

본 연구에서는 Shell type 가스화 공정에 포함되어 있는 나선코일 형태(helical coil)의 합성가스 냉각기 내의 열유동 및 열전달 특성에 대하여 전산유체해석을 수행하고, 그 결과를 열전달 이론을 활용한 공정해석 모델의 결과와 비교 분석하였다.

본 연구에서는 Fig. 1와 같이 전체 합성가스 냉각기 중 전반부 3개에 대하여 전산해석을 수행하였다. 각 증발기는 가장 바깥쪽의 수냉벽(membr-

ane wall)과 나선형 코일로 구분되는 5~6개의 채널로 구성되어 있다.

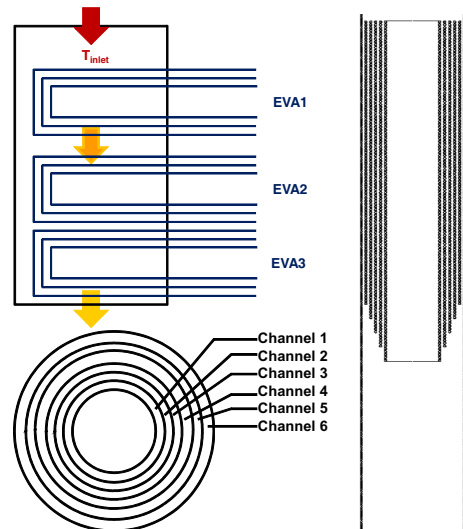


Fig. 1 Schematic diagram and grid of syngas cooler

전산해석에 사용된 상용 CFD 코드는 FLUENT 13으로 난류 모델은 Standard k- ϵ model을 적용하였으며, 복사 열전달 모델로 Discrete ordinate model을 활용하였다. 입자의 복사 열전달을 고려하기 위해 Lagrangian method와 Stochastic trac

* 성균관대학교 기계공학부

** 두산중공업 석탄전환시스템개발팀

† 연락처자, cryu@me.skku.ac.kr

TEL : (031)299-48411 FAX : (031)290-5889

king model을 활용하였다. 또한 합성가스 냉각기의 대칭형상을 고려하여 2D Axisymmetric model을 활용하여 전산해석을 수행하였다. 각 증발기 별로 격자를 분리하여 생성하고 각 증발기 채널 출구에서의 온도, 유속 등의 열유동 특성을 다음 증발기 해석의 입구 조건으로 활용하였다. 해석에 사용된 격자는 1,813,662~2,432,666개의 사각형 셀로 구성하였다. Fouling layer의 열전도도는 1.595 W/mK[2,3]의 상수로 설정하고, fouling layer가 helical coil 전체에 걸쳐 동일한 두께로 형성된다고 가정하였다.

본 연구에서는 상용 가스화기의 운전 부하조건과 fouling layer의 두께조건에 따라 각각의 케이스로 나누었다. 해석에 사용된 부하조건은 100%, 75%, 50%로 총 3개이다. fouling layer의 두께는 첫 단 증발기의 전산해석 결과와 설계 조건을 고려하여 깨끗한 표면, 1.5mm, 2mm인 경우의 3가지 조건에 대하여 전산해석을 수행하였다. 가스화기의 운전 압력은 43 bar이며, 각 부하 조건별 합성가스 유량과 입구 온도는 Table 1에 정리된 것과 같다. 합성가스 조성은 부하 조건별로 다르지만, 평균적으로 CO 75 wt.%, CO₂ wt.13%, H₂ wt.3%와 소량의 H₂O, O₂, N₂를 포함하고 있다.

Table 1 Syngas cooler operating condition under different loads

부하 조건	100%	75%	50%
가스 유량 (kg/s)	113	87	63
입자 유량 (kg/s)	6	4.5	3
입구 온도 (°C)	740	720	670

본 연구에서 개발한 process model은 채널 영역과 채널 이후의 mixing 영역을 계산하기 위해 동일한 계산을 각 채널에 대해 반복하고, 채널 출구유량과 엔탈피를 모두 더하여 채널 중단부터 증발기 출구까지의 열전달을 계산하는 방식으로 구성되어 있다[4]. 상부 증발기에 대해 계산이 완료 되면 증발기 출구 조건을 다음 증발기의 입구 조건으로 설정하여 순차적으로 모든 증발기의 열전달을 계산하도록 하였다.

식 (1)은 fouling factor로서, fouling에 의한 열전달 영향을 나타내는 값이다.

$$f_{foul} = \frac{t_{foul}}{k_{foul}} \quad (1)$$

실제로 열교환기는 환형의 채널이지만, fouling layer의 두께가 채널의 폭에 비해 매우 얇기 때문에 본 연구에서는 평판에서의 fouling factor를

적용하여 계산하였다. Fouling factor는 표면에서의 식 (2)에 나타난 총괄 열전달 계수[5]에 적용되어 열전달에 영향을 준다.

$$U = \frac{1}{\frac{A_w}{h_{i,conv}A_{i,w}} + \frac{A_w f_{foul}}{A_{i,w}}} + \frac{1}{\frac{A_w}{h_{o,conv}A_{o,w}} + \frac{A_w f_{foul}}{A_{o,w}}} \quad (2)$$

합성가스 및 열교환기 표면의 대류열전달은 온도 경계층 발달 구간과 확립 구간을 고려하여 계산하였으며, 확립구간의 열전달을 나타내는 식은 아래 (3)의 경험식[6,7]을 적용하였다.

$$Nu_{\infty} = 0.0595 Re^{0.8} Pr^{0.33} \quad (3)$$

복사 열전달은 가스와 입자, 벽면 사이의 복사 열전달을 모두 고려하였다. 가스의 방사율은 입자의 유동과 크기 분포로부터 결정하도록 하였고, 입자의 흡수 계수는 입자의 방사율과 총 가스의 부피 대비 투영 면적으로 결정되도록 하였다. [8]

$$Q_{rad} = \frac{\sigma A_w (T_{gas}^4 - T_{wall}^4)}{\frac{1}{\epsilon} \frac{D_{inner}}{D_{outer}} + \frac{1}{\epsilon_w} - 1}, \text{ where } \epsilon = 1 - e^{-\alpha L_{rad}} \quad (3)$$

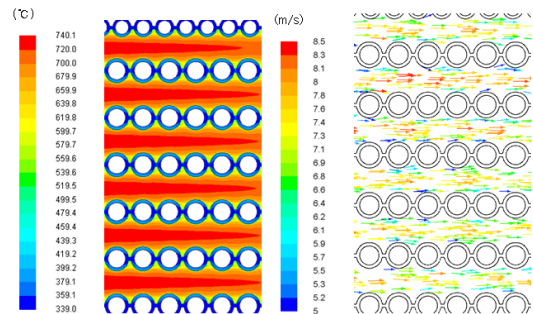


Fig. 2 Temperature(left) and velocity(right) distribution of syngas at the inlet of syngas cooler

Fig. 2는 합성가스 냉각기 입구 영역에서의 온도 및 속도 분포를 나타낸 것이다. 속도 분포를 보면 바깥쪽으로 갈수록 유속이 빠르지는 경향을 보이는데, 이는 채널의 길이가 짧아 압력강하가 줄어들기 때문이다. 가장 바깥쪽에 위치한 채널의 경우, 채널 폭이 다른 채널에 비해 좁기 때문에 압력이 크에 따라 가스 유입량이 줄어들어 유속이 느리고 다른 채널에 비해 가스의 냉각도 더 빠르게 일어난다.

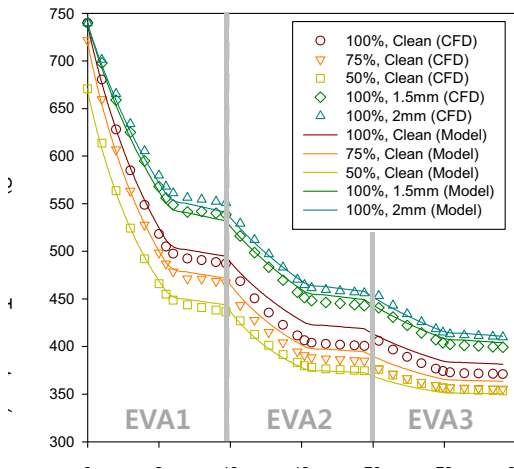


Fig. 3 Comparison of temperature distribution in the helical coil channel from CFD and process model of the entire syngas cooler

Fig. 3과 Table 2는 총 3단의 고압 증발기 전체에 대한 증발기 내의 온도 분포, 출구 온도, 총 열전달량을 정리한 것이다. Fig. 6을 보면, 전반적으로 process model이 CFD 결과와 유사하게 증발기 내에서의 온도를 예측하고 있다. 하지만, 100% 부하의 깨끗한 표면 조건의 경우, 2번째 단의 증발기와 그 이후에서 열전달을 지나치게 과소예측하는 경향을 보이고 있다.

열교환기 출구 온도 및 열전달량은 Table 2에 정리한 것과 같다. Process model은 실제 운전조건과 유사한 환경을 예측할 수 있도록 fouling layer가 있는 조건에서 정확하도록 설계되었는데, 출구 온도와 총 열전달량도 이에 따라 fouling layer가 있는 상태에서의 해석 결과가 깨끗한 표면 조건에 비해 전산해석 결과와 조금 더 유사한 것을 확인할 수 있다.

본 연구에서 설계된 process model은 간단한 알고리즘을 활용하여 상용코드 기반의 전산해석을 대체함으로써 가스화공정의 열교환 시스템의 운전 조건을 보다 경제적으로 예측하기 위해 개발된 것이다. 합성가스 냉각기의 주된 목적인 스팀 생산과 합성가스 냉각 효과와 관련되어 있는 출구 온도와 총 열전달량을 유사하게 예측함으로써, 본 process model이 합성가스 냉각기 설계 및 운전조건 설정에 도움이 될 것이라 판단된다. 하지만, 부하 및 fouling 조건에 따라 특정 위치에서의 온도 분포 및 열전달의 오차는 향후 추가적인 연구를 통해 해결해야 될 것으로 판단된다.

Table 2 Comparison of exit temperature and heat transferred results from CFD and process model of the entire syngas cooler

Load	100%			75%	50%
	Clean	1.5mm	2mm	Clean	Clean
Fouling factor	0	9.4e-4	1.3e-4	0	0
T_{exit} CFD [°C]	370	400	410	360	350
T_{exit} Model [°C]	$T_{CFD} + 10$	$T_{CFD} + 5$	$T_{CFD} + 1$	$T_{CFD} + 8$	$T_{CFD} - 3$
Q_{tot} CFD [MW]	69	61	59	49	32
Q_{tot} Model [%]	-7%	-2%	-1%	-2%	5%

후 기

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

참고 문헌

- [1] 박상빈, 예인수, 류창국, 김봉근, IGCC 합성가스 냉각기 GRC의 열유동 및 입자거동 특성에 대한 전산해석 연구, Vol. 18, No.1, 2013, pp. 21-26.
- [2] A. Zbogor, F.J. Frandsen, P.A. Jensen, P. Glarborg, "Heat transfer in ash deposits: A modelling tool-box", Progress in Energy and Combustion Science, Vol. 31, 2005, pp. 371-421.
- [3] H. Rezaei, "Thermal conductivity of coal ash and slags and models used", Fuel, Vol.79, 2000, pp. 1697-1710.
- [4] I.S. Ye, S. Park, C. Ryu, S.K. Park, "Flow and heat transfer characteristics in the syngas quench system of a 300 MWe IGCC process", Applied Thermal Engineering, Vol. 58, 2013, pp. 11-21.
- [5] B.D. Bowen, M. Fournier, J.R. Grace, "Heat Transfer in Membrane Waterwalls", Heat Mass Transfer, Vol. 34, 1991, pp. 1043-1057.
- [6] V. Gnielinski, "New equations for heat and mass transfer in turbulent pipe and channel flow", International Journal of Chemical Engineering, Vol. 16 1976, pp. 359-368.

[7] W.M. Rohsenow, J.P. Hartnett, Y.I.Cho, Handbook of Heat Transfer, 3rd Ed., McGraw-Hill, 1998.

[8] R. Siegel R, J.R. Howell, "Thermal radiation heat transfer". 3rd Ed., Hemisphere, 1992.