

IGCC 합성가스 급속 냉각시스템의 운전 압력에 따른 열유동 및 입자 거동 특성 연구

박상빈¹ · 양주향¹ · 오준호¹ · 예인수¹ · 류창국^{1†} · 박성규²
¹성균관대학교 기계공학부, ²두산중공업 석탄 전환 시스템 개발팀

Effect of Operating Pressure on the Heat Transfer and Particle Flow Characteristics in the Syngas Quench System of an IGCC Process

SANGBIN PARK¹, JOOHYANG YANG¹, JUNHO OH¹, IN-SOO YE¹, CHANGKOOK RYU^{1†}, SUNG KU PARK²

¹School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University

²Coal Conversion System Development Team, Corporate R&D Institute, Doosan Heavy Industries & Construction

Abstract >> In a coal gasifier for IGCC, hot syngas leaving the gasifier at about 1550oC is rapidly quenched by cold syngas recycled from the gas cleaning process. This study investigated the flow and heat transfer characteristics in the gas quench system of a commercial IGCC process plant under different operating pressures. As the operating pressure increased from 30 bar to 50 bar, the reduced gas velocity shortened the hot syngas core. The hot fly slag particles were retained within the core more effectively, and the heat transfer became more intensive around the hot gas core under higher pressures. Despite the high particle concentrations, the wall erosion by particle impaction was estimated not significant. However, large particles became more stagnant in the transfer duct due to the reduced gas velocity and drag force under higher pressures.

Key words : Syngas(합성 가스), Heat transfer(열전달), IGCC(석탄가스화복합발전), Quench(냉각), CFD(전산해석), Fly slag(비산 슬래그), Erosion(침식)

Nomenclature

A : wall surface area, m²
K : constant
M : mass, kg
V : particle velocity, m/s
T : temperature, K
f_{erosion} : erosion property
h_{erosion} : erosion rate, m/s

x : silica content in particles, kg/kg
α : impact angle
ρ : density, kg/m³
σ_y : yield stress, Pa

Subscripts

erosion : particle erosion
m : material property of target wall
p : particle

[†] Corresponding author : cryu@me.skku.ac.kr

[접수일 : 2013.12.2 수정일 : 2014.1.7 게재확정일 : 2014.2.28]

Copyright © 2014 KHNES

1. 서 론

석탄 가스화는 석탄의 불완전 연소를 통해 가연성 기체 연료를 생산하는 기술이다. 생성된 합성가스는 복합발전(IGCC, integrated gasification combined cycle)에 직접 활용되거나 메탄, SNG(synthetic natural gas) 수소, 액체 수송연료, 암모니아 등을 생산하는데 이용된다¹⁾. 또한 IGCC의 경우 지구 온난화의 직접적인 원인인 이산화탄소를 가스화 공정 이후에 바로 연소 전 포집 방식을 적용하여 제거할 수 있으며²⁾, 합성가스 정제공정을 거치기 때문에 황산화물(SOx), 질소산화물(NOx)와 같은 대기오염물질도 미분탄 발전소에 비하여 적게 발생한다³⁾.

해외에서 Shell, GE energy, ConocoPhillips, Koppers-totzek 과 같은 세계 기업들은 높은 탄소 전환율의 분류층 방식의 가스화기를 사용하며, 이는 IGCC에 많이 사용되고 있다^{4,5)}. 중국의 경우 ECUST (East China University of Science and Technology)에서 가스화기 개발이 적극적으로 진행되고 있으며, 현재 약 총 45개(운전 중 16개 포함) 가스화기가 건설중이다⁶⁾.

국내에서도 IGCC, SNG 생산을 목적으로 한 분류층 석탄 가스화기가 추진되고 있다^{7,8)}.

분류층 가스화기 내에서 생산되는 합성가스는 석탄이 전환된 비산 슬래그가 포함되어 있다. 합성가스의 온도 범위는 약 1250~1600°C 으로서 합성가스에 포함된 비산슬래그 회용점보다 높기 때문에 가스화기 후단 설비에 비산 슬래그 성분이 부착되어 심각한 문제를 발생시킬 수 있다⁹⁾. 이러한 문제를 해결하기 위하여 저온의 정제된 합성가스를 재순환하여 혼합(gas quench) 하거나, 수분사를 통해 냉각(water quench) 하는 방식 등을 사용한다. 하지만 이 과정에서 동력이 소모되기 때문에 플랜트 효율이 감소할 수 있다^{1,10)}. 김미영 등¹¹⁾의 연구에서는 가스화기 상부 출구온도를 제어하기 위하여 후단의 집진 설비를 통과한 합성가스의 유량비에 따른 시스템의 변화를

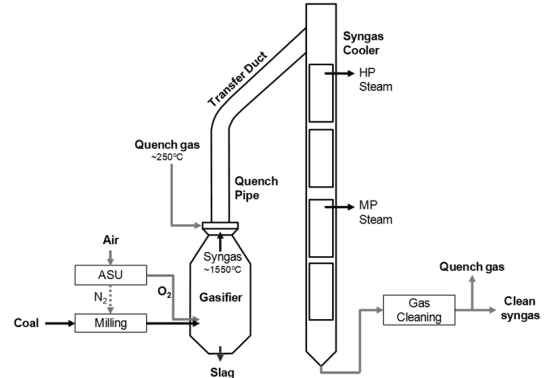


Fig. 1 Coal gasification process with a gas quench system

관찰하였다.

Fig. 1은 본 연구에서 대상으로 하는 석탄가스화 공정을 나타낸 그림이다. 미분기에서 약 2~100 μ m의 크기로 만들어진 석탄입자¹²⁾는 ASU (air separation unit)에서 정제된 산소와 질소 및 고압증기터빈에서 팽창한 수증기의 일부와 함께 가스화기기로 공급된다. 이때 공급된 산화제와 미분탄은 가스화기 내에서 고온의 연소반응과 가스화 반응을 통해 합성가스로 전환된다.

가스화기에서 생성된 고온(1550°C)의 합성가스는 가스화기 상단에 설치된 급랭파이프(quench pipe)를 거쳐서 일차적으로 급랭이 되고, 이송덕트(transfer duct)를 통해 합성가스 냉각기(SGC, syngas cooler)에 진입하게 된다.

SGC에서 다단의 열교환기를 통해 냉각된 합성가스는 정제공정을 거쳐 후단의 이용설비에 공급된다. 이 때 일부의 가스는 급랭파이프의 입구 측면으로 공급되어 합성가스의 냉각에 사용된다. 가스화기 후단 공정에서는 합성가스 내에 포함된 비산 슬래그에 의한 마모와 슬래깅이 운전상의 심각한 문제를 유발할 수 있기 때문에 가스 유동과 입자거동 특성을 파악하는 것이 필요하다. 또한 상용 가스화기는 20-60 bar의 고압에서 운전되는데, 설계 기준압력 하에서도 ASU 등 관련 공정의 운전 상황에 따라 압력의 변동

이 발생하게 된다.

운전 압력의 변화는 가스의 밀도와 유속, 입자 거동에 직접적인 변동을 가져오므로 이에 따른 운전 특성을 예측하는 것이 필요하다.

본 연구에서는 300MWe급 석탄가스화복합발전공정에서 사용되는 급랭파이프와 이송덕트를 대상으로 운전 압력 변화에 따른 가스 유동, 열전달과 입자 거동 특성을 전산해석을 통해 분석하였다.

2. 전산 해석 방법

2.1 해석 형상 및 방법

가스화기 상부 급랭파이프와 이송덕트의 기하학적 형상과 격자구성은 Fig. 2에 나타내었다. 가스화기의 출구에서 나온 고온의 합성가스는 측면에서 주입되는 냉각 가스 (quench gas)와 혼합되어 급속히 냉각된다. 냉각 가스는 주입구 측면으로 투입되며, 급랭파이프의 높이는 직경의 약 10배이다. 급랭파이프 상단에 일정한 각도로 설치되는 이송덕트는 Fig. 1에 나타나 있는 GRC (gas reversal chamber)와 연결되며, 그 길이는 직경의 약 6.6배이다. 작동압력 변화에 따른 영향을 관찰하기 위하여 30, 35, 40, 43, 50 bar (absolute)의 5가지 경우를 해석하였다.

Table 1은 합성가스 및 비산 슬래그의 유량, 온도 및 크기 분포를 나타낸 것이다. 합성 가스의 조성은 질량 분율을 기준으로 CO 0.81, H₂ 0.02, CO₂ 0.02이다. 합성가스 및 냉각가스의 온도는 각각 1550℃, 250℃으로 설정하였다. 실제 가스화기 출구 온도는 압력에 따른 반응 특성 변화에 따라 달라질 수 있으나, 본 연구에서는 가스 급속 냉각 시스템에 초점을 두고 있어 이를 고려하지 않았다. 합성가스와 함께 진입하는 비산 슬래그 입자의 유량은 석탄 회분과 점도 조절을 위한 플럭스(flux) 투입량의 30%에 해당하는 1.84kg/s으로 설정하였다. 입자의 밀도는 2800 kg/m³, 비열은 Mills and Rhine의 모델¹³⁾을 이용하여

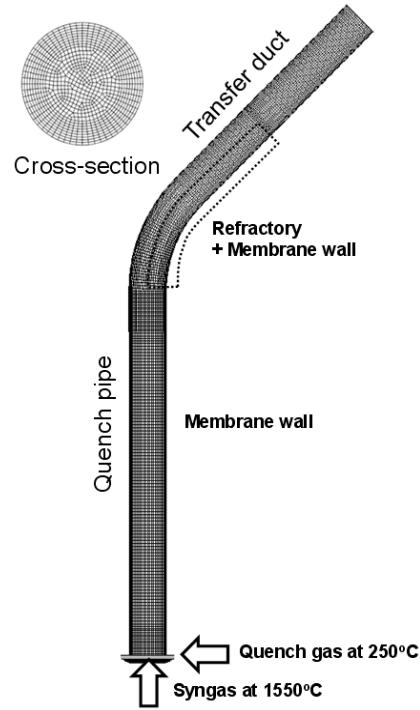


Fig. 2 Geometry and mesh of the quench pipe and transfer duct

Table 1 Gas and particle mass flow rates

		Load 100%	Load 50%
Syngas	Flow (kg/s)	53.40	26.70
	Temp.	1550℃	1550℃
Quench Gas	Flow (kg/s)	59.70	29.85
	Temp	250℃	250℃
Fly slag	Flow (kg/s)	1.84	0.92

온도의 함수로 고려하였다.

난류 모델로는 선회류 유동 계산에 효율적인 Realizable k-ε model을 사용하였고, 복사 계산은 Discrete ordinate model을 사용하였다. 입자 추적 모델은 Discrete phase method이며, 난류의 영향을 고려하기 위하여 Stochastic tracking method를 적용하였다¹⁴⁾. 벽면의 재질은 수냉벽으로 되어 있으며, 열전달 계수는 튜브의 형상을 고려하여 5000W/m²K로 설정하였다¹⁵⁾. 격자는 총 356,884개의 육면체셀로 구성하였다. 해석 CFD 코드로는 Fluent version 6.3을 사용하였다.

2.2 입자 충돌에 의한 마모 속도 분석

이송덕트 벽면은 유동 방향이 꺾이기 때문에 입자와의 지속적인 충돌이 발생한다. 이 때 입자의 입사각과 속도가 크고, 벽면보다 충돌입자의 경도가 높을 시 마모가 크게 증가할 수 있다. 입자의 충돌에 의해 벽면에서 손실되는 총 질량은 아래와 같이 표현할 수 있다¹⁶⁾.

$$M_{erosion} = \frac{Kx^{4.95} \rho_m \rho_p^{1/2}}{\sigma^{3/2_y}} M_p (V \sin \alpha)^3 \quad [kg] \quad (1)$$

위의 식에서 입자의 물성치와 관련된 분수 항은 고정된 값이다. 따라서 유동 해석 시 입자 추적을 통해 계산해야 하는 충돌 질량 및 속도, 입사각 및 셀 면적은 다음과 같이 $f_{erosion}$ 으로 분리하여 정의하였다¹⁷⁾.

$$f_{erosion} = \sum_i^n M_{p,i} (V_i \sin \alpha_i)^3 / A \quad (2)$$

$f_{erosion}$ 이 각 벽면 셀에 대해 계산되면, 이를 기초로 벽면의 마모 속도($h_{erosion}$)를 아래와 같이 계산할 수 있다¹⁷⁾.

$$h_{erosion} = \frac{M_{erosion}}{A \rho_m} = \frac{Kx^{4.95} \rho_p^{1/2}}{\sigma^{3/2}} f_{erosion} \quad [m/s] \quad (3)$$

α_y 는 항복각도로서 실제 재질과 작동온도를 보수적으로 고려하여 200MPa을 적용하였고, 입자의 경도를 표현하는 상수 K는 석탄 보일러 비산재 분석을 통해 제시된 0.47을 적용하였다¹⁷⁾. 또한 입자 내 SiO₂ 함량(x)은 설계탄의 특성을 고려하여 0.6을 적용하였다. 실제로는 CaO가 대부분인 플릭스가 추가되므로 이보다 낮게 된다. 따라서 식 (3)을 통해 분석된 결과는 보수적인 예측값에 해당한다.

3. 해석 결과

3.1 가스 온도, 속도 및 벽면 열전달 분포

Fig. 3은 급랭파이프와 이송덕트의 중앙 단면에 대해 온도, 속도, 열전달 분포를 나타낸 것이다. Fig. 3(a)의 속도 분포에서 작동 압력이 증가할수록 가스 밀도의 증가로 전체적인 속도가 감소하는 것을 알 수 있다. 측면 입구에서 주입된 저온의 냉각 가스는 벽면을 따라서 상승하면서 고온의 합성가스와 서서

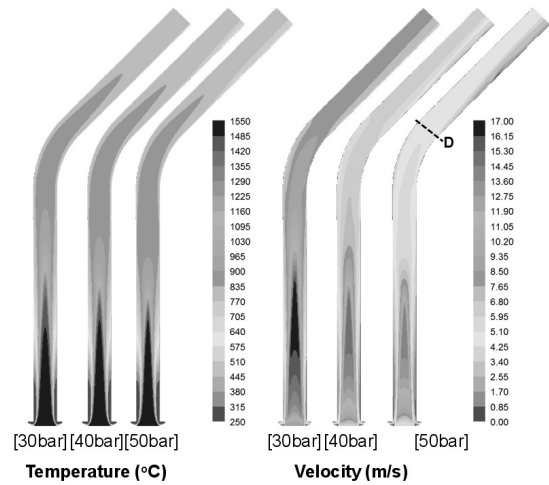


Fig. 3 Contours of temperature and velocity on the center plane at load 100%

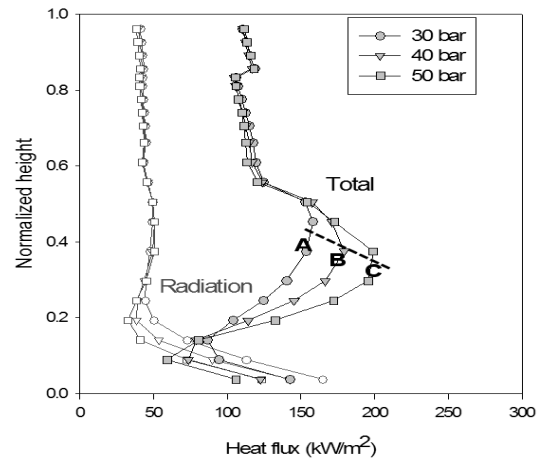


Fig. 4 Distribution of wall heat flux

히 혼합되는데, 냉각가스의 승온 및 확산에 따라 중앙부에 위치한 고온 합성가스의 유로가 좁아져 코어 부분의 속도는 점차 증가한다. 가장 압력이 낮은 30 bar의 경우 고온의 코어 영역이 급랭파이프 상부까지 지속되며 출구부에서의 속도가 약 8m/s로 50bar 나 40bar에 비해 높게 나타났다.

Fig. 3(b)의 온도분포에서 나타난 코어의 형태는 속도 분포의 경우와 유사하다. 이 때 1550°C의 고온 영역은 코어 내부로 국한되고 벽면 쪽으로 갈수록 온도가 급속히 하락한다. 따라서 슬래그를 포함한 고온의 가스가 벽면에 충돌하지 않도록 방지하면서 효과적으로 냉각되는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 4는 벽면의 총열유속 및 복사열유속 분포를 중심부 길이에 대해 나타낸 것이다. 입구 근처에서는 고온영역으로 인해 복사열전달이 지배적이며, 총 열 유속보다 크게 나타난다. 이는 벽면온도는 복사열전달에 의해 상승하지만, 온도가 낮은 냉각가스가 대류 열전달에 의해 벽면에서 열을 뺏는 역할을 하기 때문이다. 중심부 상대 길이 0.2 이상이 지나면 냉각가스의 온도가 상승하면서 대류열전달의 비중이 급격히 높아지고 복사열전달이 감소하게 된다. 총 열전달의 최고값(A, B, C)은 고온 코어가 사라지는 위치에서 나타나는데, 상대적으로 온도가 높은 가스가 벽면 근처로 유동영역을 확장하기 때문이다. 이 때 작동압력이 증가할수록 고온 영역의 코어의 길이가 줄어들기 때문에 더 낮은 위치에서 최고값이 나타나는 것을 알 수 있다. 또한, 이송덕트의 곡면부 영역에 설치된 내화벽의 영향으로 높이 약 0.6~0.9 인 구간에서 열전달이 감소하다가 내화벽 구간이 끝난 후 다시 증가한다.

3.2 압력에 따른 코어 길이 변화

Fig. 5는 가스화기 출구에서 가상의 화학종 투입 후 질량 분율이 10%로 바뀌는 지점을 기준으로 고온 영역 코어와 저온 영역 코어의 길이를 나타낸 것이

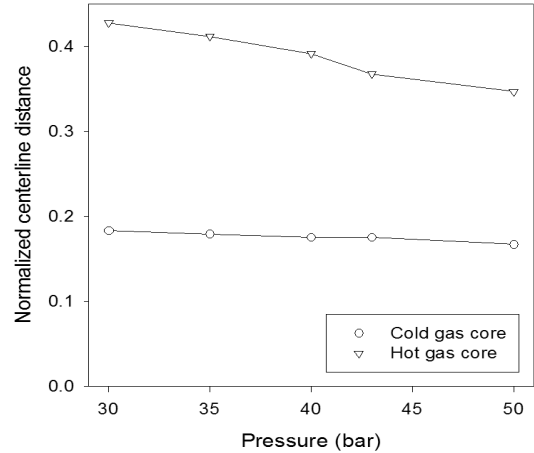


Fig. 5 Core length of the hot and cold gases at load 100%

다. 벽면을 따라 형성되는 냉각가스의 코어 길이는 작동압력에 따라서 큰 차이가 없었다. 반면, 고온의 합성가스로 생성된 코어는 압력 증가에 따른 가스 유속 저하의 영향으로 점차 감소한다. 각 코어의 길이(m)는 아래와 같이 압력(bar)의 함수로 나타낼 수 있다. 이 상관식은 열전달 공정 모델¹²⁾의 출구온도와 전체 열전달량을 계산하는데 사용된다.

$$\text{Cold core : } y_{\text{COLD}} = 4.5886 - 0.0170 \times P \quad (4)$$

$$\text{Hot core : } y_{\text{HOT}} = 12.3698 - 0.0940 \times P \quad (5)$$

3.3 입자 거동 및 마모 특성

Fig. 6은 식 (2)의 f_{erosion} 분포를 나타낸 것이다. 급랭파이프 영역에서는 벽면에서의 입자 충돌이 거의 없는데 이는 Fig. 7에 나타낸 바와 같이 냉각가스에 의해 벽면으로의 접근이 방지되기 때문이다. 반면, 급랭파이프 후단으로 갈수록 입자의 유동영역이 확장되면서 벽면으로의 충돌이 증가하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 6의 운전부하 100% 조건에서는 30 bar에서 f_{erosion} 이 가장 크게 나타난다. 이는 그 값이 충돌 속도의 3승에 비례하므로 압력이 낮아 가스 유속이 높은 경우 입자 유속도 함께 증가하기 때문이다. 30

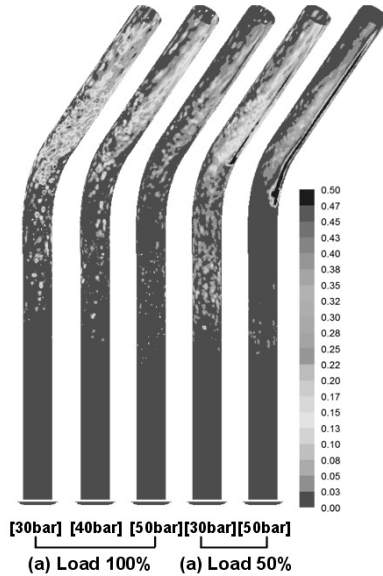


Fig. 6 Erosion propensity (ferosion) on the wall

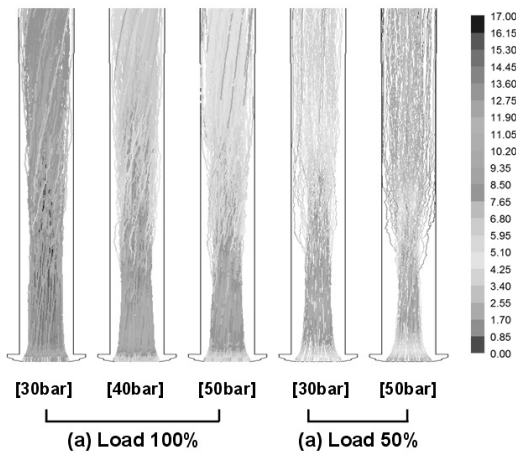


Fig. 7 Particle trajectories in the quench pipe

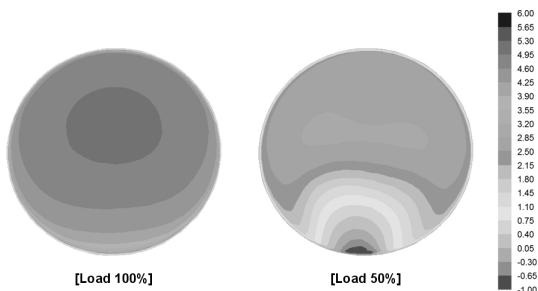


Fig. 8 Normal gas velocity at 50 bar

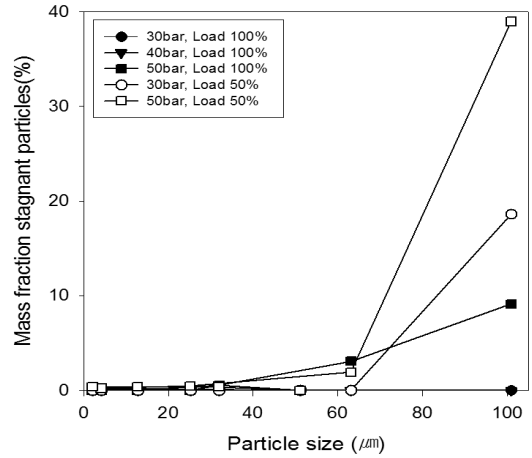


Fig. 9 Mass fraction of particles stagnant with in the transfer duct

bar에서의 $f_{erosion}$ 의 최고값은 0.5 내외로서, 식 (3)으로부터 예측된 마모속도($h_{erosion}$)는 0.011mm/yr로서 무시할만한 수준으로 판단된다.

반면, Fig. 6의 운전부하 50% 조건에서는 가스 유량과 유속이 1/2 수준으로 감소하였음에도 이송덕트 하부를 따라 $f_{erosion}$ 이 집중되어 50bar의 경우 최대 14로 매우 크게 나타난다. 이 값을 이용해 계산된 마모속도는 0.31mm/yr로서 심각하지는 않으며, 곡관부에 설치된 내화벽이 마모를 줄이는 역할을 하게 된다. 그러나 이송덕트에서의 잠재적인 문제 요인으로서 주의가 필요하다. 이와 같은 현상의 원인은 이송덕트의 곡관부를 지나면서 유동 박리¹⁸⁾에 의한 선회영역이 발생하기 때문이다. Fig. 8은 이송덕트의 한 단면 (Fig. 3의 D 단면)에서의 수직속도를 나타낸 것이다. 부하 100%에서는 유동이 모두 위쪽을 향하지만, 부하 50%에서는 하부 벽면을 따라 최대 -1 m/s 정도의 선회영역이 발생하며, 이송덕트 전체 길이에 걸쳐 형성되었다.

Fig. 9는 유동 박리에 의한 선회영역에서 정체되는 입자의 분포를 입구와 출구의 입자 유량 차이로부터 구하여 압력 및 부하 별로 나타낸 것이다. 부하 100%의 경우 50bar를 제외한 30, 40bar에서는 대부

분의 입자가 원활하게 빠져나간다. 부하 50%, 작동 압력 50bar의 경우 100 μ m 이상의 입자의 약 40% 가 빠져나가지 못하였다. 이는 전술한 바와 같이 높은 작동압력과 낮은 운전 부하로 인한 가스 유속 감소에 의한 것이다.

4. 결 론

본 연구에서는 IGCC형 가스화 공정에서 합성가스의 급속 냉각을 위한 급랭파이프와 이송덕트의 압력에 따른 벽면 열전달 및 입자 거동에 대한 전산유동 해석을 진행하였다. 주요 결론은 다음과 같다.

- 1) 고온의 합성가스와 저온의 냉각 가스는 급랭파이프 내에서 유동이 분리된 코어 영역을 형성하며 서서히 혼합된다. 이 때 운전 압력이 증가할수록 고온의 합성가스는 급랭파이프의 짧은 구간 안에서 급속히 냉각되었다.
- 2) 측면에서 공급된 냉각 가스는 고온의 합성가스에 포함된 비산슬래그가 냉각되기 전에 벽면에 부착되는 것을 효율적으로 방지하는 것을 확인하였다.
- 3) 벽면 열전달은 급랭파이프 입구에서는 복사열전달이 매우 크지만, 가스 혼합과 온도 하락에 의해 전반적으로 대류열전달의 영향이 지배적인 것으로 나타났다.
- 4) 비산 슬래그에 의한 벽면 충돌은 이송덕트에 집중되는데, 운전 부하 및 압력에 따라 그 특성이 다르게 나타난다. 운전 부하가 낮고 압력이 높은 경우 하단부를 따라 유동바리에 의한 정체영역이 크게 형성되며, 입도가 큰 슬래그 입자가 진입하면서 상대적으로 마모의 위험성이 높게 나타났다.

후 기

본 연구는 2013년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)과 두산중공업의 지

원을 받아 수행한 연구과제입니다(201395101000 1A).

본 논문은 2013년 수소 및 신에너지학회 추계학술대회에서 발표한 내용을 보완하여 투고한 것입니다.

References

1. C. Higman, M. Van Der Burgt, "Gasification", Gulf Professional Publishing, USA, 2008.
2. J. Ahn, T. Kim, "Influence of Oxygen Supply Method on the Performance of IGCC plants", Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 23, 2012, pp. 264-273.
3. G. J. Stigel, R. C. Maxwell, "Gasification Technologies: The Path to Clean, Affordable Energy in the 21st century", Fuel Processing Technology, Vol. 71, 2001, pp. 79-97.
4. L. D. Smooth, P. J. Smith, "Coal Combustion and Gasification", Plenum Press, 1985, pp. 163-210.
5. R. Hotchkiss, "Coal Gasification Technologies", Journal of Power and Energy, Vol. 217, 2003, pp. 27-33.
6. J. Lee, Y. Yoo, Y. Yun, "Research and Development & Commercial Development Status for Coal Gasification Technology-mainly from GTC 2010", Journal of Energy Engineering, Vol. 20, 2011, pp. 123-142.
7. J. Lee, M. Kim, J. Chi, S. Kim, S. Park, "A Study of Coal Gasification Process Modeling", Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 21, 2010, pp. 425-434.
8. J. Lee, U. Kim, K. Ko, J. Chung, J. Hong, "Comparison of Quench Methods in the Coal Gasification System with Carbon Capture", Trans of Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 33, 2012, pp. 285-292.
9. J. Lee, Y. Joo, J. Chung, S. Park, U. Kim, "The Gasifier Operation Method using Biogas", Trans of Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 24, 2013, pp. 249-254.
10. D. A. Bell, B. F. Towler, M. Fan, "Coal Gasification

- and Its Application”, William Andrew, USA, 2011.
11. M. Kim, Y. Joo, I. Choi, J. Lee, “The Process Simulation of Entrained Flow Coal Gasification in Dynamic State for 300MW IGCC”, Trans of Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 21. 2010. pp. 460-469.
 12. I-S. Ye, S. Park, C. Ryu, S. K. Park, “Flow and Heat Transfer Characteristics in the Syngas Quench System of a 300MWe IGCC Process”, Applied Thermal Engineering, Vol. 58, 2013, pp.11-21.
 13. K. C. Mills, J. M. Rhine, “The Measurement and Estimation of the Physical Properties of Slag formed during Coal Gasification: 2. Properties relevant to Heat-transfer”, Fuel, Vol. 68, 1989, pp. 904-910.
 14. R. Siegel, J. R. Howell, “Thermal radiation Heat transfer”, Hemisphere, USA, 1992.
 15. B. D. Bowen, M. Fournier, J. R. Grace, “Heat Transfer in Membrane Waterwalls”, Heat Mass Transfer, Vol. 34, 1991, pp. 1043-1057.
 16. J. G. Mbabazi, T. J. Sheer, R. Shandu, “A Model to predict Erosion on Mild Steel Surfaces Impacted by Boiler Fly Ash Particles”, Wear, Vol. 257, 2004, pp. 612-624.
 17. S. Park, I-S. Ye, J. Oh, C. Ryu, S. K. Park, “Flow and Heat Transfer Characteristics in the Gas Reversing Chamber of Syngas Cooler for 300MWe IGCC Process”, Applied Thermal Engineering, (Submitted).
 18. S. A. Berber, L. Talbot, L. S. Yao, “Flow in Curved Pipes”, Annual Review of Fluid Mechanics, Vol. 15, 1983, pp.461-512.