

# 석탄가스화기내의 반응 유동장 특성 연구

나 혜령\*, 이 진욱  
고등기술연구원 전력에너지연구소

## 요약

본 연구는 석탄가스화복합발전(IGCC) 시스템중 핵심 단위 장치중의 하나인 가스화기 내부에서 일어나는 석탄의 가스화 반응 연구를 PCGC-2 프로그램을 통해 수행하였으며 일차적인 목표로 반응장에서의 선회 강도에 따른 가스화기내 유동 및 반응 특성을 파악하고자 하였다.

## 1. 서론

석탄가스화 복합발전 시스템(IGCC)은 석탄을 이용하는 다른 화력발전과는 달리 황화합물 및 분진 등의 공해 물질 배출율이 낮아 전세계적으로 각광받고 있는 차세대 발전 기술중의 하나이다[1,2]. 특히 전체 시스템중 핵심 단위 장치중의 하나인 가스화기 내에서의 석탄의 가스화 과정중 일어나는 물리화학적 현상의 해석은 시스템의 전체 설계에 중요한 인자로 작용될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 난류 선회 유동장하에서 석탄의 화학반응을 포함한 유동장에 대한 수치해석을 시도하였다. 석탄가스화 현상을 수치적으로 해석하기 위해서는 기체-고체 이상 유동장, 각종 화학반응 및 대류/복사 열전달등이 연립된 복잡한 형태의 편미분 방정식에 대한 해석이 수행되어야 한다[3]. 이를 위해 축대칭 좌표계에서 비반응 유동장, 가스 연소시의 확산 화염, 미분탄 연소 및 가스화에 적용될 수 있는 미국 BYU(Brigham Young University)의 ACERC(Advanced Combustion Engineering Research Center)에서 개발한 93-PCGC-2(Pulverized Coal Gasification and Combustion:2-Dimensional) 프로그램을 이용하여 수치해석을 시도하였다. 본 연구는 궁극적으로 가스화기 내에서의 제반 현상에 대한 충분한 이해로 가스화기 최적 설계 기준을 제시하는 것이나 연구의 제 1단계로 상단 공급 방식의 상압 가스화기 내에서 석탄의 가스화 반응을 통한 유동 특성과 생성가스의 조성 변화등을 예측하고자 하였다. 대상 석탄은 Illinois No. 6 탄으로 선정하였으며 가스화기내 유동 특성에 커다란 영향을 미칠것이라 생각되는 선회 강도 변화를 주요 변수로 하여 본 수치해석을 수행하였다.

## 2. 수학적 모델 및 해법

난류 유동과 석탄의 입자 궤적을 계산하기 위해 2차원 축대칭 좌표계에서 기체 유동을 정상상태, 비압축성, 뉴우톤 유체로 가정했을 때 기체상 지배방정식은

아래와 같이 나타내어진다[3].

$$\frac{\partial}{\partial x} (\bar{\rho} \bar{u} \phi) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \bar{\rho} \bar{v} \phi) - \frac{\partial}{\partial x} (\Gamma_{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial r}) - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \Gamma_{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial r}) = S_{\phi}$$

윗 식에서  $\phi$ 는 일반 종속 변수로서 축방향( $\bar{u}$ ), 직경방향( $\bar{v}$ ), 접선방향( $\bar{w}$ )의 평균속도성분과 난류운동에너지(k)와 그 소멸율( $\epsilon$ ), 혼합분율(f)과 혼합분율의 변동량( $g$ ), 석탄가스 혼합분율( $\eta$ ) 및 혼합분율의 변동량( $g_{\eta}$ ) 그리고 엔탈피(h) 등을 나타낼 수 있다.  $\Gamma_{\phi}$ 와  $S_{\phi}$ 는 종속 변수  $\phi$ 에 대한 확산 계수와 생성 및 소멸항을 나타내며 이를 table 1에 정리하였다. 난류 모델은  $k-\epsilon$  모델을 사용하였으며 압력과 속도의 연계 문제는 SIMPLER 알고리즘을 사용하였다[3]. 입자상 지배 방정식은 Lagrangian 방법에 의한 PSI Cell(Particle Source In Cell)법을 이용하여 해석하였다[3].

### 3. 결과 및 토론

Fig. 1에 본 연구의 수치 해석 대상인 가스화기의 개략도를 나타내었다. Fig. 1의 가스화기는 상압 가스화기로 상단 공급 방식을 취하고 있으며 대상 석탄은 Illinois No. 6탄으로 원소 분석 결과는 C:77.72%, H:5.00%, O:13.53%, N:1.37%, S:2.38%이다. 일차 주입구로 석탄과 320K의 산화제( $O_2$ )가 각각 29.88kg/hr, 3.96kg/hr로, 이차 주입구로 489K의 산화제( $O_2$ )가 18.72kg/hr로 공급되고 있는 본 가스화기의 내부 유동 특성 파악을 위해 선회 강도를 변화시켜 가며 수치 해석을 수행하였다.

Fig. 2와 Fig. 3은 선회 강도가 없을 경우와 선회 강도가 0.4일 경우의 속도 벡터장과 온도장을 나타낸 결과이다. 이 결과를 비교해 볼 때 Fig. 3의 속도 벡터장의 경우 선회 유동에 의한 원심력의 영향으로 직경 방향의 유동이 가시적으로 나타남을 보여주고 있다. 그리고 온도장의 경우에도 입구 근처에서 높은 영역의 온도가 분포되어 있는 것을 볼 수 있는데 이는 선회가 없을 경우에 비해 혼합이 잘 이루어져 반응이 빨리 일어나고 있음을 보여 주는 결과이다.

### 4. 결론 및 향후 연구 방향

본 연구는 PCGC-2 프로그램을 이용하여 선회 강도 변화에 따른 반응 유동장에 대한 수치해석을 수행하였다. 이 연구 결과를 바탕으로 다양한 변수 연구를 통해 가스화기 내부의 유동장, 온도장, 그리고 그에 따른 생성 가스의 조성 변화 등에 대한 세밀한 결과를 얻음으로써 석탄 가스화 반응에 대한 자세한 분석이 가능하리라 예측된다. 또한 이 결과를 통한 가스화기내 현상들에 대한 충분한 이해로 궁극적으로 가스화기의 최적 설계 조건을 제시할 수 있으리라 판단된다.

## 후기

본 논문은 통상산업부 에너지자원기술개발지원센터에서 지원하고 전력연구원  
에서 주관하는 “석탄가스화 복합발전 기반기술 개발” 과제의 지원을 받아 수행  
된 것으로서 이에 센터 및 전력연구원 관계자들에게 감사를 드립니다.

## 참고 문헌

1. Bench Scale급 건식 석탄가스화기 운전 및 모사기술개발(I), 년차보고서,  
통상산업부, Jan., 1996.
2. 이진욱, 윤용승, “석탄 가스화기내의 기체-고체 이상유동장에 대한 수치  
해석적 연구”; 한국에너지공학회지, 제4권, 제3호, pp.331-337, 1995.
3. User's Manual for 93-PCGC-2 : Pulverized Coal Gasification and  
Combustion Model(2-Dimensional) with a Generalized Coal Reactions  
Submodel(FG-DVC), Brigham Young University and University of Utah,  
June, 1993.
4. Smoot, L.D., Fundamentals of Coal Combustion for Clean and Efficient  
Use, Elsevier, New York, 1993.

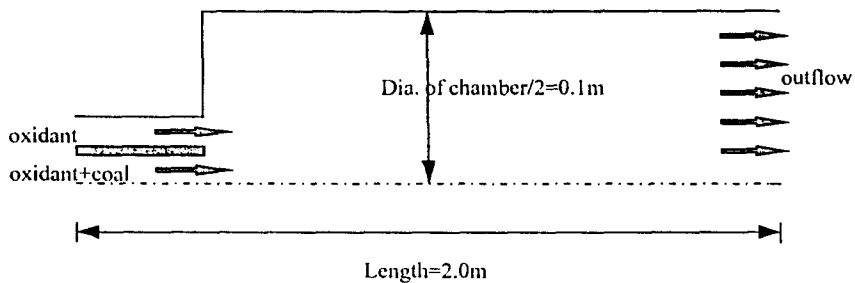
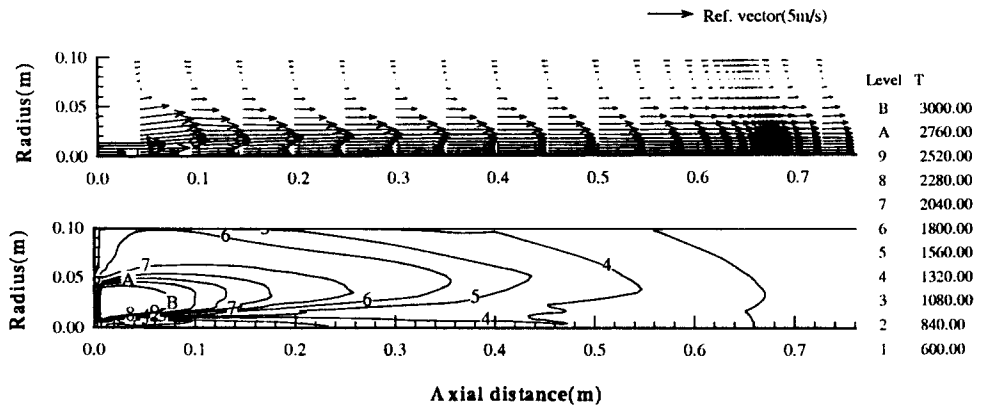


Fig. 1 Schematic Diagram of a Reactor

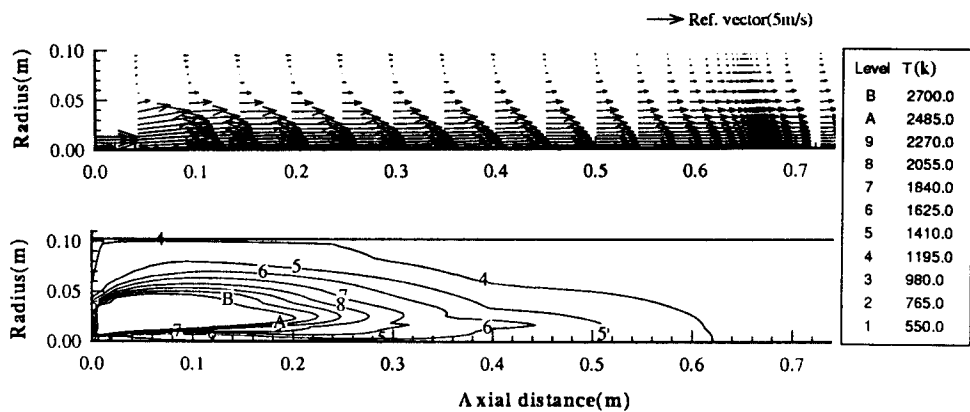
Table 1. Expressions for  $\Gamma_\phi$  and  $S_\phi$  for governing equation

$\phi$	$\Gamma_\phi$	$S_\phi$
$l$	$0$	$S_p^m$
$\bar{u}$	$\mu_s$	$-\frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_s \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \mu_s \frac{\partial \bar{v}}{\partial r} \right) \begin{cases} +\bar{p}g \text{ (down-fired)} \\ -\bar{p}g \text{ (up-fired)} \\ +0 \text{ (horizontally fired)} \end{cases} + S_p^m + \bar{u}S_p^m$
$\bar{v}$	$\mu_s$	$-\frac{\partial \bar{p}}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_s \frac{\partial \bar{u}}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \mu_s \frac{\partial \bar{v}}{\partial r} \right) - 2\mu_s \frac{\bar{v}}{r^2} + \frac{\bar{p}}{r} \bar{w}\bar{w} + S_p^m + \bar{v}S_p^m$
$\bar{w}$	$\mu_s$	$-\frac{\rho \bar{v} \bar{w}}{r} - \frac{\bar{w}}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r \mu_s)$
$k$	$\mu_s / \sigma_s$	$\Phi - \bar{p}\epsilon$
$\epsilon$	$\mu_s / \sigma_s$	$\frac{\epsilon}{k} [C_1 \Phi - C_2 \bar{p}\epsilon]$
$\bar{f}_p$	$\mu_s / \sigma_f$	$S_f'$
$g_f$	$\mu_s / \sigma_s$	$\frac{C_{f1} \mu_s}{\sigma_s} \left[ \left( \frac{\partial \bar{f}}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial \bar{f}}{\partial r} \right)^2 \right] - \frac{C_{f2} \bar{p}\epsilon g_f}{k}$
$\bar{\eta}$	$\mu_s / \sigma_\eta$	$S_\eta^m$
$g_\eta$	$\mu_s / \sigma_s$	$\frac{C_{\eta1} \mu_s}{\sigma_s} \left[ \left( \frac{\partial \bar{\eta}}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial \bar{\eta}}{\partial r} \right)^2 \right] - \frac{C_{\eta2} \bar{p}\epsilon g_\eta}{k}$
$\bar{h}$	$\mu_s / \sigma_h$	$q'_{s1} + \bar{u} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{p}}{\partial r} + S_p^h$

where  $\Phi = \mu_s \left\{ 2 \left[ \left( \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial \bar{v}}{\partial r} \right)^2 + \left( \frac{\bar{v}}{r} \right)^2 \right] + \left[ \frac{\partial \bar{u}}{\partial r} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right]^2 + \left[ r \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{\bar{w}}{r} \right) \right]^2 + \left( \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} \right)^2 \right\}$



**Fig. 2 Velocity Vector and Temperature Contour Plots of Coal Gasification without Swirl.**



**Fig. 3 Velocity Vector and Temperature Contour Plots of Coal Gasification with Swirl (Swirl No.=0.4)**