

## 미분탄 시험연소로 난류장 해석을위한 수치연구

도희준, 김성철, 김재평, 장동순\*  
한전기술연구원전력연구실, 충남대환경공학과\*

### A Numerical Study on the Turbulence Flow Field in the Pulverized Coal-Fired Test Furnace

Hwae-June Doh, Sung-Chul Kim, Jae-Pyung Kim, Dong-Soon Jang  
KEPCO R&D Center, Dept. of Electric Power Research  
Chungnam Univ. Dept. of Environmental Engr.\*

#### 1. 서 론

미분탄 시험연소로 모사용 종합컴퓨터 프로그램 구축을위한 일차연구로서 2차원 비반응 난류유동장 특성을 전산유체역학을 이용하여 조사하였다. 한전기술연구원 시험연소로를 대상으로한 본연구는 가로세로  $1.62 \times 1.86\text{m}$ 에 전장 7.98m의 크기에 시간당 200kg 처리용량을 기준으로 하였으며 연소형태(front wall, opposite wall-firing 등), 연소용 공기주입각등 주요변수에 따른 유동장 특성의 파악과 입자 궤적의 규명을 목적으로 하였다.

국내 발전용 연료로서 석탄은 공급원의 다양화 및 안정적인 공급가격등에 따른 장점으로 향후 지속적인 수요가 예상되나 1995년을 시점으로한 우리나라 환경기준치의 선진국수준 강화 입법은 특히 석탄사용에 따른 고효율,저공해 기술개발에 대한 압력을 가중시켰다. 그러나 발전용 보일러와 같은 미분석탄의 연소는 석탄과 공기의 고-기이상(solid-gas two phase) 유동에 비등방성 다중충돌 열복사가 관여하는 난류반응으로 나타나는 복잡한 현상이다. 즉 석탄의 물성,입도,유동장의 패턴 및 난류강도,입자의 궤적,휘발기체 및 고체입자의 연소특성등이 유기적으로 상호관련되어 연소효율,열전달, fouling, slagging, 그리고 NO 생성등에 종합적으로 영향을 미친다. 이러한 복잡한 시스템에대한 고효율 연소와 공해물질 배출 저감의 목적을 달성하기위한 종합적인 설계나 최적운전조건 설정을 위해서는 고-기이상(solid-gas two phase)으로 이루어지는 난류반응장에 대한 종합적인 미케니즘규명이 필요하며, 연료물성의 파악이나 단일입자에대한 연소특성의 규명으로는 충분치 못하고 아울러 발전용 보일러를 이용한 신중연료나 혼소에대한 연소특성 규명에대한 시도는 대규모 시험에 따른 시험조건 설정이나 범위의 한계와 시험수행상의 위험이 따르며 시험결과에 대한 구체적인 영향력 파악이 쉽지않다.

그러므로 중요 미분탄 연소에대한 반응미케니즘의 파악을 위해 본연구에서는 중요변수에대한 조직적인 변수연구와 그에따른 결과분석을위해 시험연소로를 건설중이며 이와같은 실험실적 방법에대한 상호보완의 방법으로서 본논문에서는 일차적으로 검차체적에 기초한 유한차분방법을 이용하여 비반응 난류장에대한 수치해석을 시도하였다.

RNG  $k-\epsilon$  모델은 주어진 시스템유동에대한 큰 scale과 긴시간 거동을 지배하는 운동방정식을 뽑아내는 방법으로서 표준  $k-\epsilon$  모델의 등방성가정 및 기타 난류

상수에 대한 경험성을 배제함으로써 관심을 모으고있다<sup>(2)</sup>. RNG  $k-\epsilon$  모델은 표준  $k-\epsilon$  모델 생성항에 약간의 수정으로 접목이 가능하며, curvature, swirl, rotation, separated flow, low Reynolds number, strong anisotropic flow 등에서 더욱 신뢰성있는 결과가 도출됨이 입증되었다<sup>(3)</sup>. 이 보고서는 Khalil 등<sup>(4)</sup>의 2차원 연소로에서의 실험치를 RNG  $k-\epsilon$  모델과 표준  $k-\epsilon$  모델을 사용하여 비교하여 만족한 결과를 얻었으며, 이를 2차원 미분탄 시험연소로에 적용하였다.

**2. 수학적 모델 및 해법**

2차원 비반응 난류모델에 대한 유동장 해석을 위한 일반중속 변수에 대한 지배방정식은 단위체적당 시간에 따른 변화하는 물리량이 유동 및 확산 flux의 divergence와 단위체적당 생성항의 합으로 표시되며 표현식은 아래와같이 나타내어진다

$$\frac{\partial(\rho \phi)}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{u} \phi) = \vec{\nabla} \cdot (\Gamma_{\phi} \vec{\nabla} \phi) + S_{\phi}$$

윗식에서  $\phi$ 는 일반중속 변수로서  $x, y$  각 방향에 따른 속도  $u, v$ , 압력  $p$  등을 나타내며  $\Gamma_{\phi}$ 와  $S_{\phi}$ 는  $\phi$ 에 해당되는 난류확산계수와 생성항을 각각 나타내고 있다. 이 식을 검사체적에 기초한 Patankar의 유한차분법과 power law scheme을 이용하여 이산화하였다. 또한 압력과 속도의 연계문제는 SIMPLEC(SIMPLE consistent) 알고리즘을 사용하였다. Reynolds 전단력은 Boussinesq 가정, 난류점성계수  $\mu_t$ 는 Prantle-Kolmogorov 관계식으로 나타내어지는 Standard  $k-\epsilon$  모델과 RNG  $k-\epsilon$  모델을 각각 사용하였다.

Table 1. Diffusion Coefficient and Source Term Expressions for 2-D Rectangular Coordinate for  $k-\epsilon$ , RNG  $k-\epsilon$  Turbulence Model.

Variable	Name	$\Gamma_{\phi}$	$S_{\phi}$	
u	horizontal velocity	$\mu_t$	$\frac{\partial}{\partial x}(\mu_t \frac{\partial u}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu_t \frac{\partial v}{\partial x}) - \frac{\partial p}{\partial x}$	
v	vertical velocity	$\mu_t$	$\frac{\partial}{\partial x}(\mu_t \frac{\partial u}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu_t \frac{\partial v}{\partial y}) - \frac{\partial p}{\partial y}$	
k	turbulent Kinetic energy	$\frac{\mu_t}{\sigma_k}$	Standard $k-\epsilon$	$G_k - \rho \epsilon$
			RNG $k-\epsilon$	$P_k - \epsilon$
$\epsilon$	dissipation rate of k	$\frac{\mu_t}{\sigma_{\epsilon}}$	Standard $k-\epsilon$	$\frac{\epsilon}{k}(C_1 G_k - C_2 \rho \epsilon)$
			RNG $k-\epsilon$	$\frac{\epsilon}{k}(C_1 P_k - C_2 \epsilon) - R$

$$G_k = \mu_t \left[ 2 \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right]$$

$$R = \frac{C_{\mu} \eta^3 \left( 1 - \frac{\eta}{\eta_0} \right)}{1 + \beta \eta^3} \frac{\epsilon^2}{k}$$

$$\eta = s \frac{k}{\varepsilon}, s = \left( \frac{D_k}{\nu_t} \right)^{1/2}, \eta_o = 4.38, \beta = 0.015$$

Table 2. Constants in Turbulence Mode

	$C_\mu$	$C_1$	$C_2$	$\sigma_k$	$\sigma_\varepsilon$
Standard $k-\varepsilon$	0.09	1.44	1.92	1.0	1.2
RNG $k-\varepsilon$	0.085	1.42	1.68	0.7179	0.7179

### 3. 수치해석 결과 및 토론

Fig. 1,2는 Khalil등의 2차원 축대칭 원통형 연소로 비반응 난류 유동장에서의 실험값을 표준  $k-\varepsilon$  모델과 RNG  $k-\varepsilon$  모델을 사용하여 비교검토했었다. 2차공기를 선회가없는 parallel 주입방법에 따른 실험치와  $k-\varepsilon$  과 RNG  $k-\varepsilon$  계산치는 모두 잘 부합되어 만족할만한 결과를 얻었으나 강한선회의 경우(S=2.0)  $k-\varepsilon$  모델은 실험치와 많은 차이를 보이거나 RNG  $k-\varepsilon$  모델은 매우근사함을 알 수있다. Fig.4는 위의 시험연소로에 대한 front firing mode에서 1차 및 2차 공기주입 방식에 따른 속도장을 나타내고 있다. 여기서 두 난류모델이 상이한 유동장 특성을 나타내고 있다. Fig.5는 opposite firing mode에서의 속도장으로서 front firing mode와 같은 변화를 보여주고있어 향후 시험연소로에서의 검증을 통한 수학적 계산 모델의 정형화를 이룩할 수 있을 것으로 사료된다. Fig.3은 본 연구원에서 건설중인 연소로의 도식도를 참고로 나타내었다.

### 4. 참고문헌

- (1) Patankar, S. V. "Numerical Heat Transfer, Hemisphere Publishing Corp. New York (1990)
- (2) Yakhot, V., Orszag, S.A. "Renormalization Group Analysis of Turbulence I. Basic Theory .J. Sci. Comp. 1 (1986)
- (3) E.E Khalil, D.B Spalding, J.H Whetelaw, "The Calculation of Local Flow Properties in Two-Dimensional furnaces", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 18, Februray '75

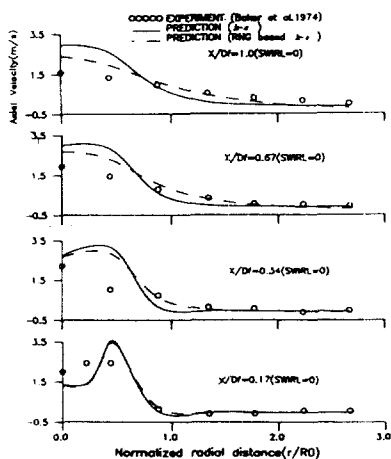


Fig.1 Mean Axial Velocity Profile in Isothermal, Axisymmetric Flow (Swirl = 0)

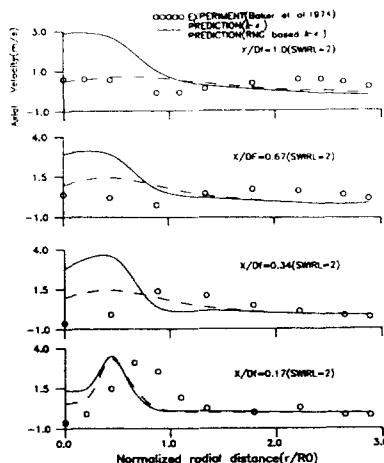


Fig.2 Mean Axial Velocity Profile in Isothermal, Axisymmetric Flow (Swirl = 2.0)

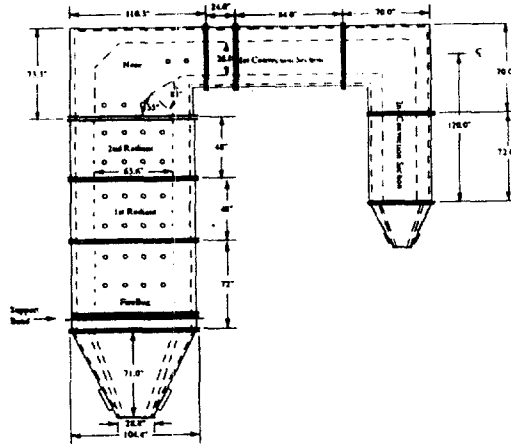


Fig.3 Schematic of Pulverized Coal-Fired Test Furnace

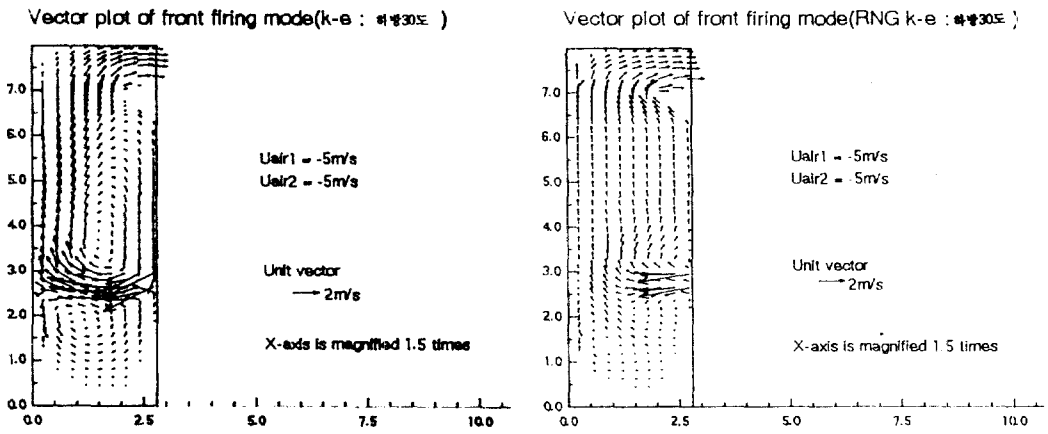


Fig.4 Velocity Vector Plot of Front Jet Firing Mode

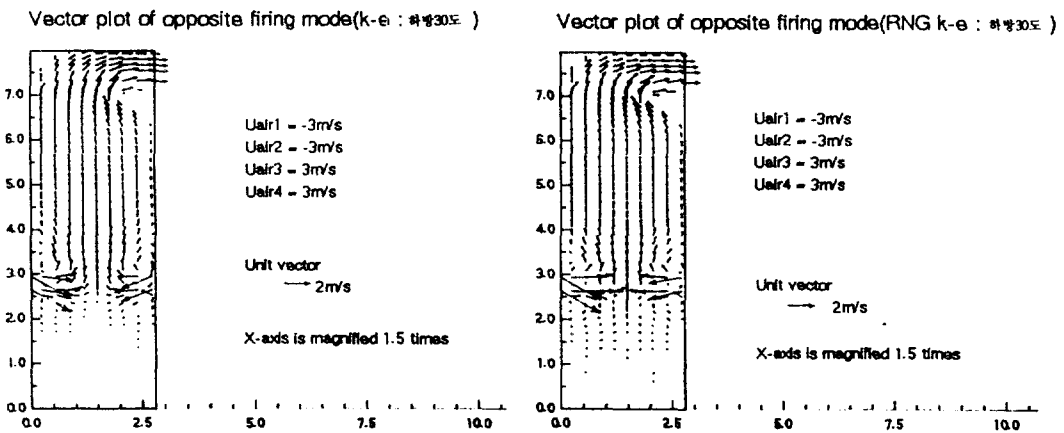


Fig.5 Velocity Vector Plot of Opposite Jet Firing Mode