

잔사유 분무 연소 해석에 관한 연구

최찬호[†] · 허강열^{**}

Combustion Modeling of Vacuum Residue Fuel Sprays

Chan Ho Choi, Kang Y. Huh

ABSTRACT

Extra heavy vacuum residue oil has advantage as the fuel of a power plant in reducing the cost of power generation. Numerical study is conducted by the KIVA code to understand combustion, heat transfer and flow field characteristics in the test reactor. The combustion model of pulverized coal particles is adopted as the combustion process of extra heavy oil is similar to that of coal. As an initial phase of investigation parametric study is performed with respect to SMD and spray angle of injected spray droplets.

기호설명

Key Words : Spray combustion, VR(vacuum residue), KIVA, SMD

1. 서 론

발전용 신연료로서 초중질 잔사유는 연료 단가의 절감을 통하여 발전 원가를 낮출 수 있는 장점이 있다. 초중질 잔사유의 연소반응 및 기준 보일러로 적용 시의 열유동 해석은 연소효율과 대기오염 물질 배출 등의 문제점을 방지하기 위해 필요한 연구이다. 보일러 내 연소 시 잔사유 입자 거동 해석은 연소 특성이나 열흡수율, 타설비에의 영향 파악에 필수 불가결하며 3차원 진산유체 해법에 의한 해석이 가능하다.

초중질 잔사유는 higher hydrocarbon의 혼합물로서 연소 반응장에서의 거동은 열분해와 방출된 화발분의 연소, 열분해 후 잔류물인 carbon의 연소반응 과정으로 설명할 수 있다. 이 같은 연소반응은 미분 석탄 연소 반응과 유사하기 때문에 기존의 미분탄 연소모델을 사용하여 해석할 수 있다.

본 연구에서는 잔사유 연소 전산 해석을 위해 KIVA 코드를 사용하였다. KIVA 코드는 난류유동과 분무, 화학 반응 모델이 입력되어 있으나 석탄 연소 모델은 포함되어 있지 않다. 다음에 잔사유 연소 해석을 위해 새로이 입력한 KIVA 내 입자 연소 모델에 대하여 소개하였다.

* 포항공과대학교 대학원 기계공학과

† 연락처, 연락처 : gun@postech.ac.kr

** 포항공과대학교 기계공학과

2. 수치 해법 및 지배방정식

2.1 KIVA코드의 수치 해법

KIVA에서 유동장은 Eulerian 접근법으로 해석하고, 입자유동은 Lagrangian 접근법으로 해석한다. PSIC⁽¹⁾(Particle-Source-In-Cell)방법은 입자가 없는 기상의 유동장을 먼저 해석하고, 입자가 유동장을 빠져나가거나, 연소되어 없어질 때까지 입자의 움직임을 추적하여 입자와 기상 간에 생기는 항력(drag force)과 입자의 연소량, 운동량과 에너지 등의 생성항(source term)을 계산하여 격자점마다 이를 저장하고, 이를 생성항을 유동장을 구할 때 반영하여 전체적인 해를 수렴시킨다.

2.2 기체상의 지배방정식

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_m u) = \nabla \cdot \left[\rho D \nabla \left(\frac{\rho_m}{\rho} \right) \right] + \dot{\rho} + \rho \delta_m \quad (1)$$

식(1)은 KIVA에서의 화학종에 대한 연속 방정식이다. $\dot{\rho}$ 항은 연소에 의한 생성 항, $\rho \delta_m$ 항은 입자와 기체상 간의 상호작용에 의한 생성항을 나타낸다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u u) &= -\frac{1}{a^2} \nabla P - A_0 \nabla (2/3 \rho k) \\ &+ \nabla g^* + F^* + \rho g \end{aligned} \quad (2)$$

식(2)는 운동량 방정식이다. F^* 항은 입자와 기상 간에 항력을 나타낸다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho I)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u I) &= -P \nabla g_I + (1 - A_0) \sigma : \nabla u \\ &- \nabla g_J + A_0 \rho \varepsilon + Q^c + Q^r \end{aligned} \quad (3)$$

식(3)은 에너지 방정식이다. \ddot{Q} 항은 기상의 화학반응에 의한 열에너지 생성항이고 \ddot{Q} 항은 입자와 기상 간 열전달항으로서 대류열전달과 복사열전달을 고려하고 있다.

2.3 입자상의 운동방정식

분무 입자를 구형으로 가정하여 입자의 속도와 궤적을 다음 식으로부터 구한다.

$$m_p \frac{dU_p}{dt} = F_D + F_g \quad (4)$$

$$F_D = \frac{1}{8} \pi d^2 \rho_g C_D |U_R| U_R \quad (5)$$

F_D 는 항력, F_g 는 중력, U_R 는 입자 속도, C_D 는 항력 계수, U_R 은 입자와 기상간의 상대속도이다. 항력 계수 C_D 는 다음 식을 사용한다.

$$C_D = \frac{24}{Re_d} (1 + 1/6 Re_d^{2/3})$$

입자 레이놀즈 수 Re_d 는 다음과 같이 정의한다.

$$Re_d = \frac{2\rho |U_R| r}{\mu_{air}(T)}$$

위 식(4), (5)의 입자 운동량 방정식으로부터 입자와 기상간의 항력(drag force)과 중력을 정량화함으로서 입자의 속도와 궤적을 구할 수 있다.

입자의 운도는 다음 에너지 식에 의해 구한다.

$$mc_p \frac{dT_p}{dt} = Q_c + Q_h + Q_r$$

Q_c 항은 대류 열전달에 의한 에너지 항으로서 다음과 같다.

$$Q_c = \pi dk_g Nu(T_g - T_p)$$

누셀수(Nusselt number)는 다음의 Ranz-Marshall⁽⁴⁾의 실험식에 의해 구한다.

$$Nu = 2 + 0.6 Re^{1/2} Pr^{1/3}$$

Q_h 항은 촉(char)의 연소에 의한 반응열에너지 항으로 다음과 같다.

$$Q_h = \frac{dM_p}{dt} H$$

Q_r 항은 복사열전달 항으로 다음과 같다.

$$Q_r = \pi d_p^2 \varepsilon (T_g^4 - T_p^4)$$

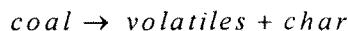
3. 잔사유 연소 모델

잔사유 입자는 완전한 구형으로서 입자의 쪼개짐이나 합체는 없다고 가정한다. 입자는 휘발분, 촉, 수분, 재(ash)로 구성되어 있다. 먼저 수분이 방출된 후 휘발분이 방출된다. 휘발성분이 모두 방출되면 촉과 재만 남게 되고 이 촉가 주위 공기와 반응하고 나면 재만 남게 된다. 또한 휘발성분은 기상의 여러 가지 반응을 거쳐 연소하게 된다. 즉 잔사유의 연소 모델은 크게 탈휘발과정, 촉 연소 과정, 휘발성분 연소 과정으로

구성된다.

3.1 탈휘발과정

탈휘발과정은 가장 중요하고 복잡한 과정으로서 다양한 해석 모델이 있다. 크게, 일단반응모델(one-step reaction model)과 다단반응모델(multi-step reaction model)이 있다. 본 해석에서 일단반응모델을 사용하였으며 다음과 같이 정리 할 수 있다.



탈휘발률은 다음과 같은 1차 식으로 구할 수 있다.

$$\frac{d\upsilon}{dt} = k(\upsilon_{\infty} - \upsilon)$$

여기서 선행계수 K는 Arrhenius식으로 표현된다.

$$k = A \exp\left(-\frac{E}{RT}\right)$$

A=7936(1/sec), E=64.15(kJ/mol)

3.2 촉 연소과정

촉 연소과정은 촉와 산소와의 반응 그리고 가스화 반응인 촉-이산화탄소, 촉-스팀 반응을 고려하였다. 반응률은 실험적으로 얻은 식(Watanabe et al. 2002)⁽⁵⁾을 사용하였다.

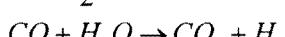
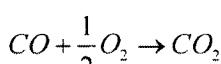
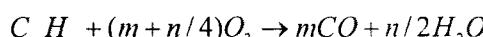
$$\frac{dx}{dt} = AgP_i^n \exp\left(-\frac{E_{ai}}{RT}\right)$$

P는 반응하는 기상의 부분 압력(partial pressure)이다. 촉와 산소와의 반응으로 생기는 일산화탄소와 이산화탄소의 생성비는 Arthur⁽²⁾가 제안한 식으로 구한다.

$$\frac{CO}{CO_2} = 2500 \exp\left(-\frac{6250}{T_r}\right)$$

3.3 휘발성분 연소과정

탈휘발 과정중 생성되는 기상 화합물들의 반응은 다음 반응만을 고려하였다.



각각의 반응률은 화학 반응 시간스케일과 확산과정 시간 스케일 중 더 오랜 시간을 요하는 과정에 의해 지배되므로 이를 택하여 사용한다. 화학 반응의 시간 스케일은 Arrhenius 반응식, 확산 과정의 시간스케일은 EBU⁽³⁾(Eddy Break Up)모델에서 결정한다.

$$W_s = \min(W_{s,EBU}, W_{s,Arr})$$

$$W_{s,EBU} = C_\mu \rho \frac{k}{\varepsilon} \min(Y_{fu}, \frac{Y_{ox}}{\phi})$$

$$W_{s,Arr} = B \rho^2 Y_F Y_{ox} \exp\left(-\frac{E}{RT}\right)$$

3.4 잔사유 물성치

잔사유의 원소 분석(ultimate analysis)는 다음과 같다. C 84.1%, H 10.3%, N 0.15%, S 3.76%, O 1.69%이다. 공업 분석(proximate analysis)로부터 회발분(volatiles) 86.7%, 고정 탄소(fixed carbon) 11.24%, 회분(ash) 2.06%의 조성을 얻었다.

4. 계산과정 및 결과

Table 1 Kinetic parameters for char

	A	n	E_A (J/kmol)
O_2	1.36×10^6	0.68	1.30×10^8
CO_2	2.07×10^7	0.733	2.2×10^8
H_2O	2.07×10^7	0.733	2.2×10^8

본 연구에 적용된 연소기의 형상은 Fig. 1과 같다. 원통형으로 직경이 20cm이고 길이는 3.2m이며 노즐의 직경은 3mm이다. 계산 격자는 60도 sector mesh로서 축 방향으로 periodic boundary 경계 조건을 주었다. 입자 크기 분포는 KIVA의 Rosin-Rammler 함수를 사용하였다. 본 해석에서는 복사에 의한 열전달은 고려하지 않았다. 탈휘발과정에서 생성되는 휘발성분은 CH₄, H₂, CO, CO₂, H₂O 만을 고려하였다. 실제로 여러 가지 hydrocarbon이 생성되지만 여기서는 CH₄만을 고려하였다.

4.1 냉간 유동 해석

SMD와 분무각에 따른 분무와 유동 특성을 확인하기 위해 입자를 연소시키지 않고 우선 냉간 해석을 수행하였다. SMD는 두 가지 경우로

84.6um 와 39.2um 이고 분무각은 15도와 10도의 경우에 대하여 각각 계산하였다.

Fig. 2와 Fig. 3는 유동장을 나타낸 그림이다. Fig. 3는 노즐 부근의 유동장을 나타낸 그림으로, 입구 부분에서 유동이 순환함을 볼 수 있다. Fig. 4, Fig. 5는 SMD가 84.6um일 경우 동일한 분무각일 때 난류강도 분포를 나타낸 것이다. 노즐 부위에 난류 강도 분포가 변함을 볼 수 있다. 그러나 Fig. 6, Fig. 7를 보면 SMD가 39.2um이고 동일 분무각일 때 난류강도 분포가 거의 변함이 없다. 이는 입자의 크기가 작을 경우 난류강도에 큰 영향을 미치지 않는 것이다.

4.2 잔사유 연소 해석

Fig. 8은 SMD가 84.6um 경우에 온도분포 결과이다. 최대 온도는 2400K 정도이고, 잔사유가 배출되는 노즐 입구 부근에서 온도가 가장 높음을 알 수 있다. 입구 부근에 유동 순환 때문에 비교적 낮은 온도 분포를 볼 수 있다. 입구로부터 1/3되는 길이 이후부터는 온도가 비교적 균일한 분포를 보인다. Fig. 9는 산소 질량분율 분포이다. 온도가 가장 낮은 위치에서 산소 농도가 가장 높은 것을 알 수 있다. Fig. 10, Fig. 11은 각각 일산화탄소와 이산화탄소 농도 분포를 나타낸다. 온도가 가장 높은 노즐부근에서 일산화탄소와 이산화탄소 질량분율이 가장 높게 나타나고 있다.

Fig. 12는 SMD가 39.2um로 작은 경우의 온도 분포 결과이다. SMD와 관계없이 온도 분포에는 거의 변함이 없다. Fig. 13은 산소 질량분율 분포로서 SMD가 84.6um인 경우와 거의 동일한 분포를 보이고 있다. Fig. 14는 일산화탄소의 분포이고 Fig. 15는 이산화탄소 분포이다. SMD가 다를 경우 이산화탄소 농도 분포가 다른 것은 SMD가 휘발성분 연소 속도와 이산화탄소 생성율에 상당한 영향을 미치기 때문이다.

formation and combustion", *Proceeding of the 16th Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, 1976, pp.719-729.

[4] Ranz, W.E. and Marshall, W.R., "Evaporation from Drops", *Chemical Engineering Process*, 1952, pp.269-289.

[5] Hiroaki, W, Otaka, M and Inumaru, J "Modelling and Simulation for extra heavy oil gasification on Entrained flow gasifier", *Proceedings of IJGC 2002 International Joint Power Generation Conference*.

부 록



Fig.1 격자 형상

참고문헌

- [1] Crowe,C.T, "The Particle-Source In Cell(PSI-CELL) Model for Gas Droplet Flows", *Trans. ASME, Journal of Fluids Engineering*, 1977, pp.325-332.
- [2] Arthur,J.A, "Reactions between Carbon and oxygen", *Trans.Faraday Society*, 1951 pp.164-178.
- [3] Magnussen, B.E. and Hjertager,B.H., "On mathematical modelling of turbulent combustion with special emphasis on soot

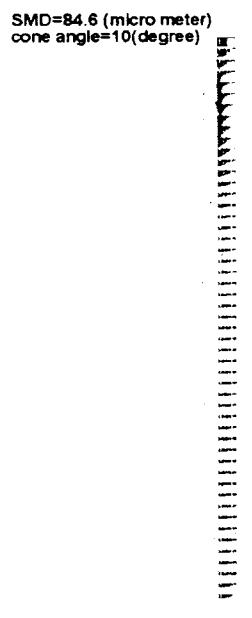


Fig.2 속도 분포
(SMD=84.6 μm , angle=10°)

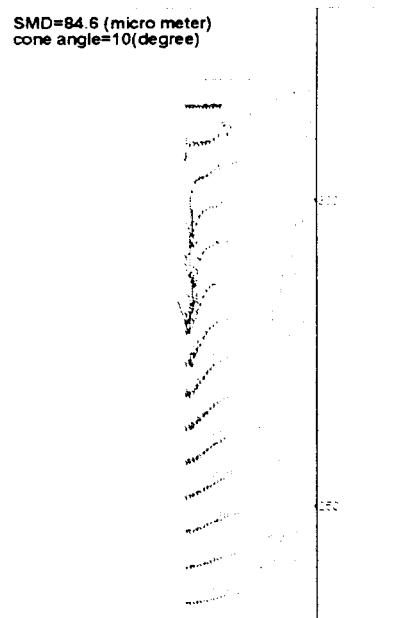


Fig.3 속도분포
(SMD=84.6 μm , angle=10°)

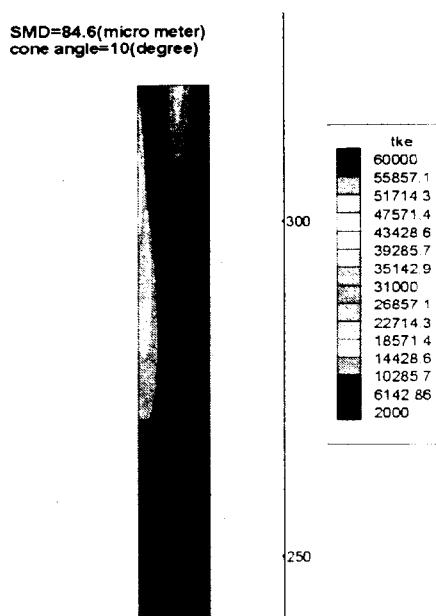


Fig.4 난류에너지 분포
(SMD=84.6 μm , angle=10°)

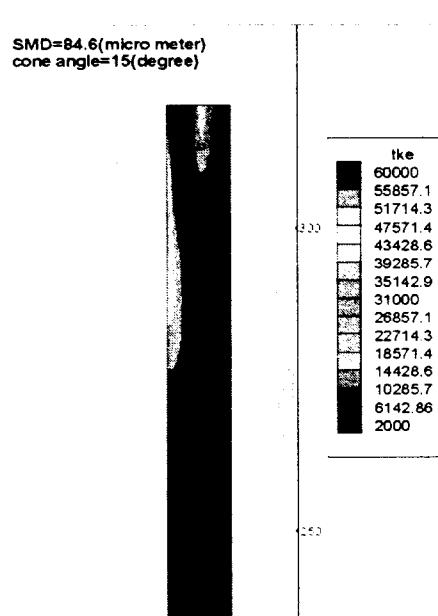


Fig.5 난류에너지 분포
(SMD=84.6 μm , angle=15°)

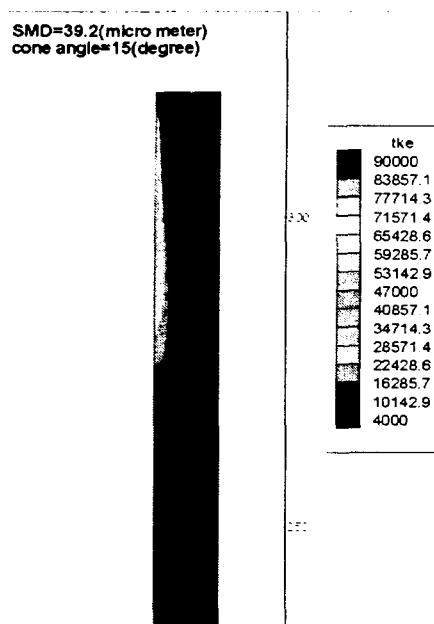


Fig.6 난류에너지 분포
(SMD=39.2 μm , angle=15°)

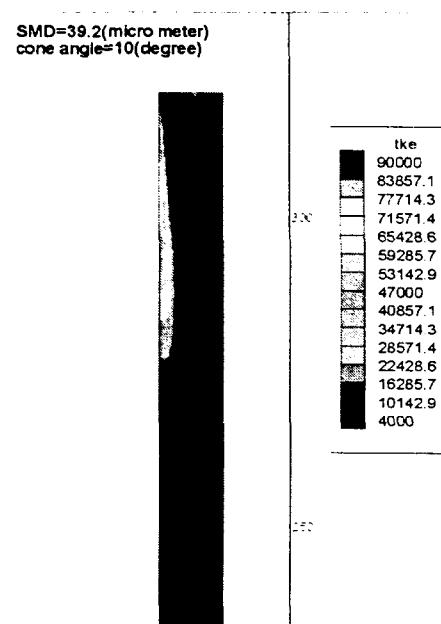


Fig.7 난류에너지 분포
(SMD=39.2 μm , angle=10°)

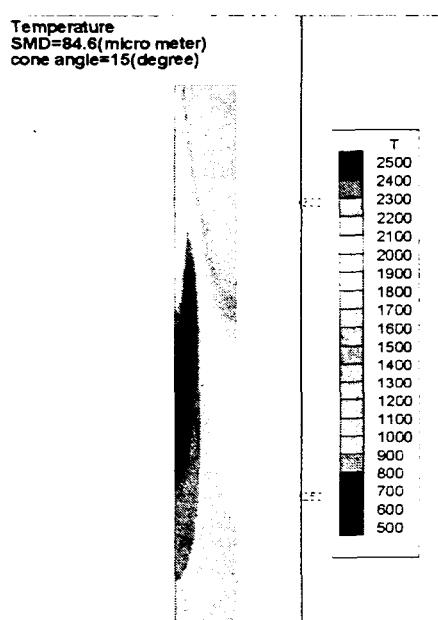


Fig.8 온도
(SMD=84.6 μm , angle=15°)

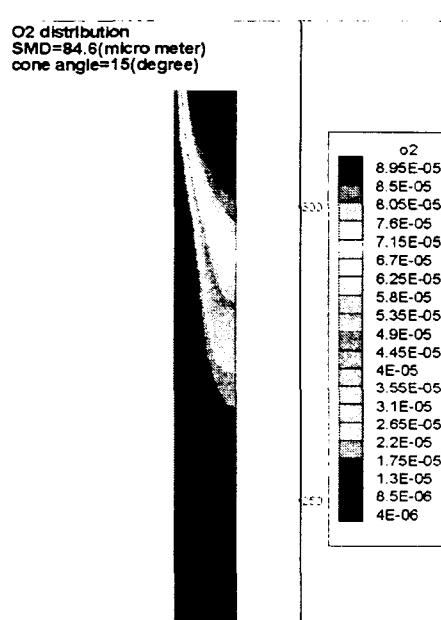


Fig.9 산소 농도
(SMD=84.6 μm , angle=15°)

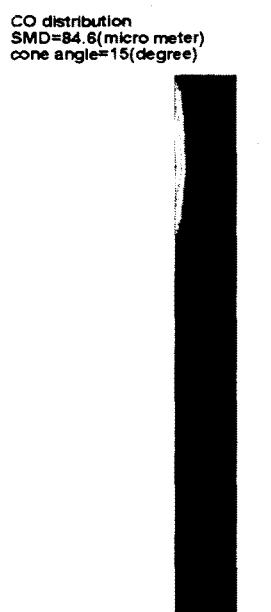


Fig.10 일산화탄소 농도
(SMD=84.6 μm , angle=15°)

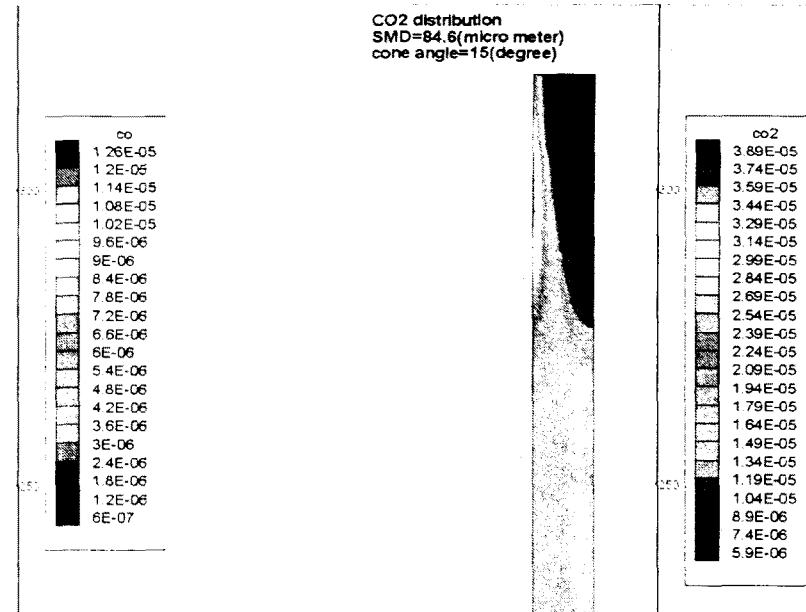


Fig.11 이산화탄소 농도
(SMD=84.6 μm , angle=15°)

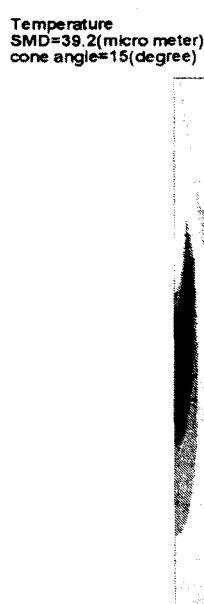


Fig.12 온도
(SMD=39.2 μm , angle=15°)

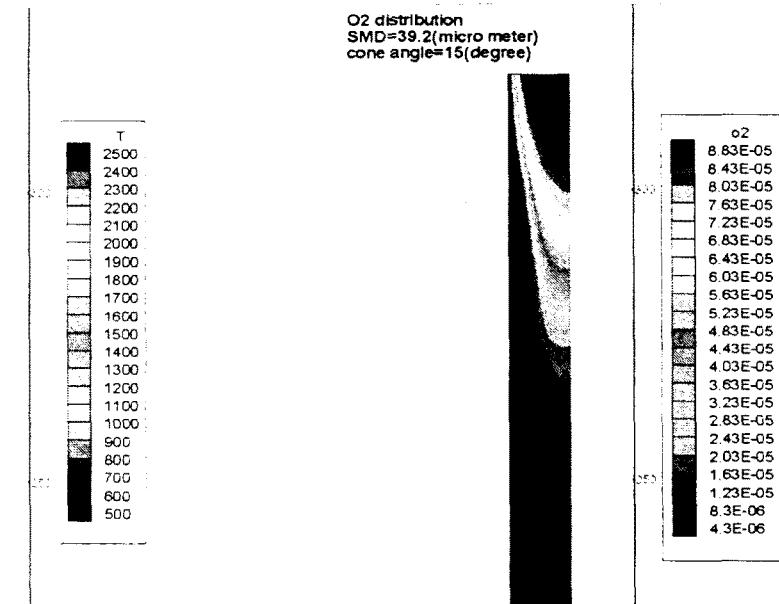


Fig.13 산소 농도
(SMD=39.2 μm , angle=15°)

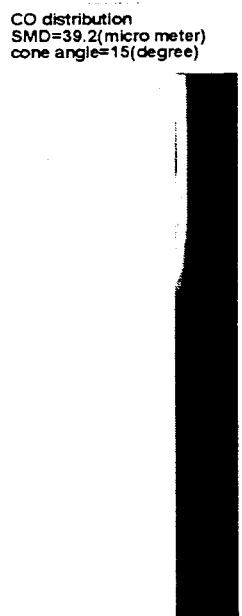


Fig.14 일산화탄소 농도
(SMD=39.2 μm , angle=15°)

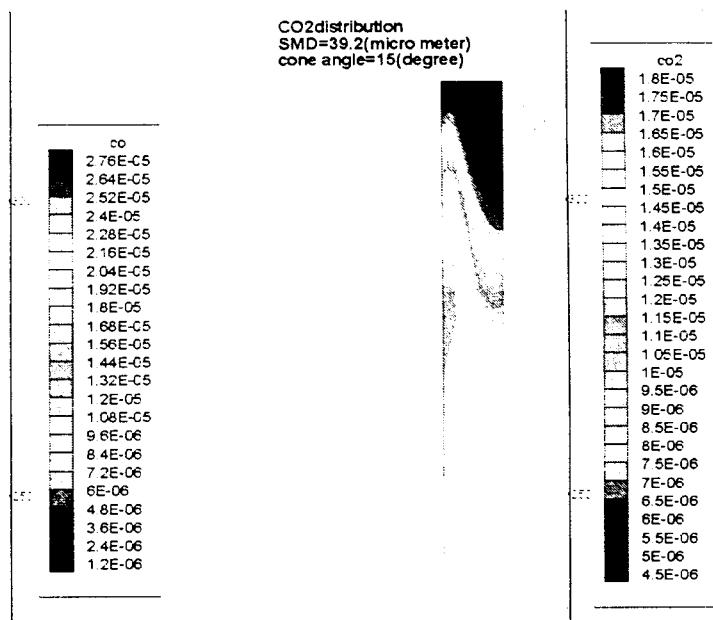


Fig.15 이산화탄소 농도
(SMD=39.2 μm , angle=15°)