

예혼합 메탄-미분탄-공기 화염구조에 관한 연구

박 호 영, 안 달 홍
한전 전력연구원

Study on structure of premixed methane-coal-air flame

Park, Ho Young; Ahn, Dal Hong
Korea Electric Power Research Institute

1. 서 론

미분탄연소에 포함된 복잡한 현상을 이해하기 위해서는 이에 포함된 현상들에 대한 기초적인 연구가 필요하게 된다. 미분탄 입자의 가연 특성, 열분해, 방출된 휘발분의 공기와 혼합과 연소, 그리고 화의 연소에 대한 연구가 필요하다. 본 연구에서는 이러한 과정에 대한 수학적 모델링과 실험을 수행하였다. 저압(30.4 kPa)에서 운전되는 Flat flame burner를 사용하므로 화염내 농도분포 측정에 용이한 space resolution을 얻었으며 수학적 모델링은 1차원 예혼합, 층류, 기-고 흐름에 대해 Finite difference 방법을 사용하였다.

2. 실험장치 및 방법

[그림 1]은 실험장치의 개략적인 구조도를 보여주고 있다. 미분탄 투입전 메탄-공기를 사용하여 화염을 안정시킨 후, 평균입경 $36\mu\text{m}$ 의 역청탄을 유동층형 미분탄 공급기에서 비말 동반시켜 버너 입구 바로 전에 메탄과 공기와 합류되어진다. 이후 실험조건에 맞게 메탄, 미분탄, 공기의 공급량을 조정하고 버너의 이송장치로 burner tube의 높이를 조정하고 sampling probe(burner 외부 본체에 고정)를 사용하여 생성가스 및 반응입자를 채집하였다. 화염내에서 빨아들인 고체 입자는 트랩에서 걸러지고 그 이후 다수의 필터와 dryer를 사용하여 생성가스의 습분을 제거후 O_2 , CO , CO_2 , NO 분석기로 이송되어 각각의 가스농도를 측정하였다. 채집된 고체 입자는 ash tracer method로 탈휘발화 정도와 탄소전환율을 구하였다. 공급된 메탄, 공기량의 측정은 오리피스 플래이트를 사용하였고 매 10분마다 유동층형 미분탄공급기의 무게를 측정하여 공급기 전후의 압력차로 캘리브레이션하여 미분탄의 공급량을 구하였다. burner matrix는 직경 76mm, 두께 20mm로서 직경 2mm의 700 hole로 이루어졌으며 샘플링 프로브는 내경 5mm, 외경 12.7 mm의 이중 수냉각 stainless steel pipe로 제작하였다. 가스 분석기에 필요한 최소 유량($1.5\ell/\text{min}$), 프로브의 흡인 단면적 (0.000017m^2) 및 저압에서의 실험조건을 고려할 때 등속 흡인(Isokinetic) 샘플링은 불가능하였으며 고체입자 및 가스농도 채집시 oversucking을 피할 수 없었다 [1,2].

3. 모델링

가. 가정

1차원, flat, 단열화염으로서 미분탄 입자는 동일 크기($36\mu\text{m}$)로 화염내에서 균일하게 분포되며 입자의 밀도는 일정하게, 직경이 감소하는 형태로 연소된다. 입자의 온도는 직경에 관계없이 균일하게 분포한다. 최초 미분탄 입자는 화, 회분, 1차 휘발분(CH_4 , HCN , H_2 , CO ,

CO₂, H₂O, tar)으로 구성되어 있고 tar는 다시 2차 휘발분(CH₄, HCN, H₂, CO)과 soot로 구성되어 있다고 가정한다. 열분해된 1, 2차 휘발분은 주위가스와 순간적으로 혼합되고 가스상의 연소는 gas phase chemical kinetics에 따른다. 화와 soot의 산화반응물 역시 주위 가스와 순간적으로 혼합된다. 가스상의 transport flux는 고체입자에 의해 영향을 받지 않으며 입자의 swelling은 고려되지 않았다.

나. 휘발분 및 devolatilization kinetics

사용된 역청탄의 고정탄소, 휘발분 및 회분은 각각 49.4, 29.4, 21.2 wt. %이고 원소분석치(C,H,O,N,S)는 각각 84.5, 4.9, 7.7, 1.8, 1.1 wt. %이었다. 위에서 언급된 1차 휘발분량(wt. %)은 공업 및 원소분석치와 특정 휘발분(tar, CO₂, H₂O)과의 상관관계를 사용하여 atomic balance로부터 구하였다.[3, 4]. tar로부터의 2차 휘발분 및 soot의 량(wt. %)도 같은 방법으로 구하였으며 이때 tar의 원소분석치는 원탄과 같다고 가정하였다. <그림 2>에 본연구에서 채택한 열분해모델과 각 성분의 량(wt. %)를 나타내었다. 탈휘발화된 휘발분과 gas phase 반응을 연계하기 위하여 탈휘발화율을 식 (1)과 같이 나타낼수 있다 [1].

$$R_{v,k} = k_{v,k} \rho_g \frac{Y_k/m_k}{1 - \sum Y_{kcoal} - \sum Y_{ktar}} \quad (1)$$

여기서 $k_{v,k}$ 는 아레니우스식으로 표현되는 휘발분 k 의 열분해 속도상수, ρ_g 는 가스상의 밀도, Y_k 는 휘발분 k 의 질량분율, 식 (1)의 분모항은 기-고 혼합물중의 가스상 질량분율(θ)이다. 1차, 2차 탈휘발화에 대하여 $k_v = 5.5 \times 10^5 \exp(-8907/T_p)$ 를 사용하였다 [5].

다. chemical kinetics of gas/solid phase

가스상의 chemical kinetics는 간략화된 CH₄-공기 반응메카니즘 (27 반응)에 기초하고 있고 연료 질소의 NO kinetics(41 반응)를 포함하고 있으며 참고문헌 [1]에 자세히 소개되어 있다. 화 및 soot의 산화반응은 반응가스와 입자 표면반응으로서 산소와 O, H, OH의 입자 외부표면에서의 충돌에 의해 탄소입자와 반응한다 [6]. 이때 반응 생성물은 CO이며 가스상의 chemical kinetics와 연계되어 진다.

라. 지배방정식

기-고 혼합물에 대한 1차원, 층류화염에 대한 지배방정식은 다음과 같다.

i) 질량보존 (기-고 혼합물)

$$\frac{\partial \rho_i}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial y} = 0 \quad [\text{kg/m}^3\text{s}] \quad (2)$$

ii) 가스상, i 의 보존

$$\rho_i \left(\frac{\partial(\theta \sigma_{ig})}{\partial t} \right) + M \left(\frac{\partial(\theta \sigma_{ig})}{\partial y} \right) = - \frac{\partial(j_i/m_i)}{\partial y} + R_i \quad [\text{moles/m}^3\text{s}] \quad (3)$$

iii) 고체상, k 의 보존

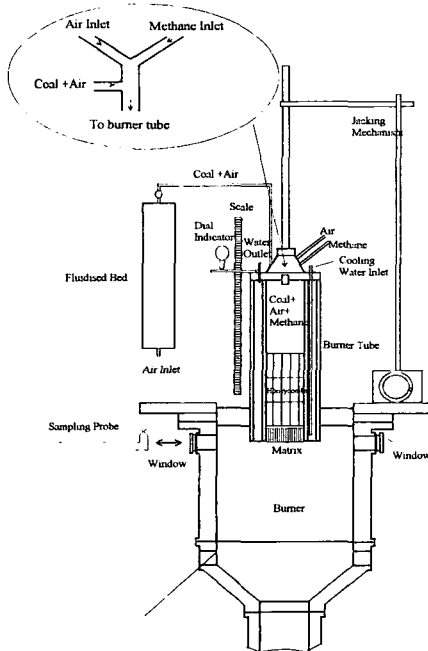
$$\rho_i \left(\frac{\partial Y_k}{\partial t} \right) + M \left(\frac{\partial Y_k}{\partial y} \right) = R_k m_k \quad [\text{moles/m}^3\text{s}] \quad (4)$$

여기서 ρ_i 는 기-고 혼합물의 체적밀도, M 은 질량유속, θ 는 혼합물중 가스상의 질량분율, σ_{ig} 는 가스상의 물분율, j_i 는 transport flux, R_i 는 가스상의 생성항(몰), R_k 는 고체상의 생성항(질량), m 은 분자량을 나타낸다. 고체입자의 운동 및 에너지방정식으로부터 입자의 화염 내 속도와 온도가 구해졌으며 이때 입자의 온도는 열분해 속도상수 계산시에 사용되어졌다. 위 식들은 1차원 finite difference method로 해석되어 졌으며 자세한 해석방법은 참고문헌 [1, 7]에 소개되어 있다. 계산 결과로부터 화염내 가스중의 물분율과 고체상의 질량분율이 비균일 1차원 격자에 대하여 얻어졌으며 이로부터 고체입자의 탈휘발화 정도와 탄소전환율을 구하고 실험치와 비교하였다.

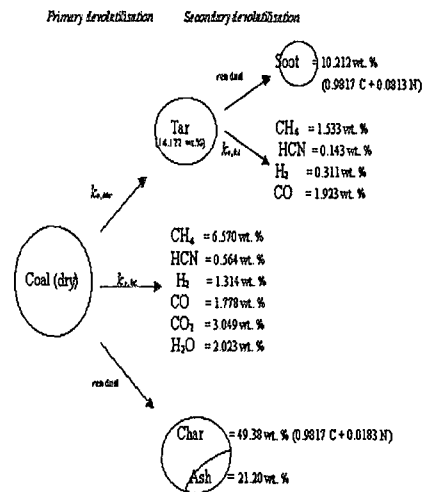
4. 결과 및 토론

미분탄 공급농도 0.0416 kg/m^3 , 가스상의 당량비 $\phi_{gas}=0.458$, 입구 가스온도 $293 \text{ }^\circ\text{K}$ 인 조건에서 측정된 가스온도[1]와 계산 결과를 [그림 3]에 비교하였다. 가스온도가 입구부로부터 급격히 증가함을 보여주며 온도 상승부분에서 계산치는 측정결과와 대체로 일치하고 있으나 화염후단부에서는 약 $150 \text{ }^\circ\text{K}$ 의 편차를 보여주고 있다. 이는 열손실 효과를 모델링시 고려해야 함을 보여준다. [그림 4]는 채집된 입자의 ash tracer method로부터 탈휘발화 정도를 질량분율로 나타내었다. 계산 결과와 비교하여 화염의 후단부에서는 대체로 좋은 결과를 보여주나 입구부에서는 편차를 보여주고 있다. 이는 가스 샘플링과 마찬가지로 입자채집시 oversucking의 가능성이 있음을 보여주며 탈휘발화 속도상수의 주의깊은 선정이 필요함을 보여준다.

[그림 5]에 측정된 산소, 일산화탄소, 이산화탄소 및 NO의 농도를 계산 결과와 비교하였다. 산소농도는 기체상의 반응 및 탈휘발화에 뒤이은 휘발분 연소에 의해 급격히 소비되어진다. 일산화탄소의 경우 주반응구역에서 증가후 다시 감소하는 경향을 보이는데 이는 예혼합 메탄-공기 화염의 경우와 비슷한 경향을 나타내 주고 있다. 이산화탄소의 경우도 계산치와 실험치는 비교적 잘 일치하나 NO의 경우 약 20 %의 편차를 보여주고 있다.



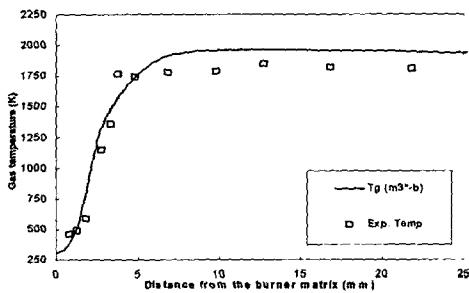
[그림 1] 저압 버너의 개략도



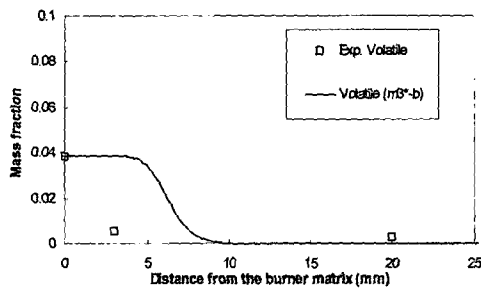
[그림 2] 탈휘발화 반응의 개략도

주 반응구역에서의 농도분포는 모두 큰 차이를 보이고 있는데 이는 앞서서도 언급했듯이 샘플링시 oversucking이 일어나고 있음을 알 수 있으며 실제로 관찰창을 통한 입자의 궤적으로부터도 이를 확인할 수 있었다.

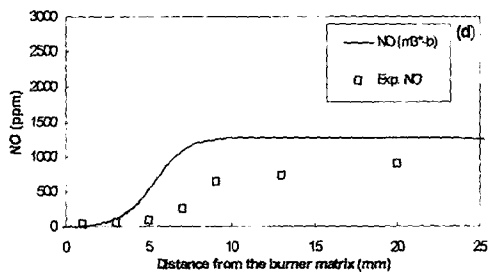
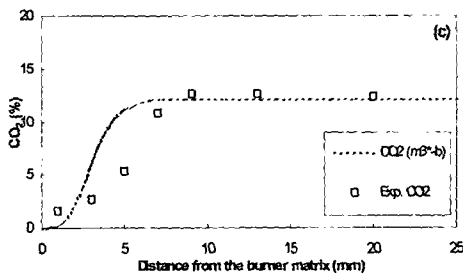
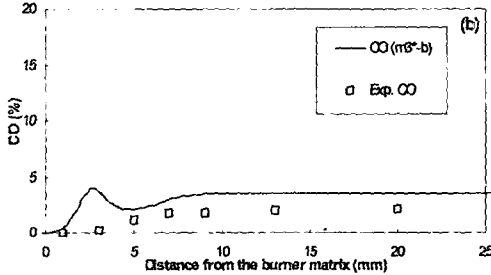
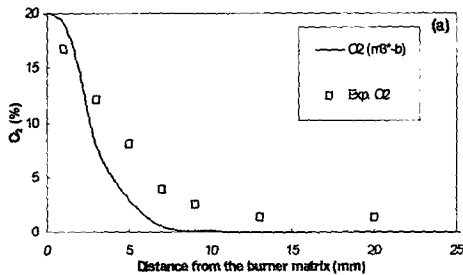
저압버너를 사용함으로써 메탄-미분탄-공기 화염의 반응영역을 확대할 수 있었으며 삼입형의 샘플링 프로브로도 화염의 구조를 어느 정도 파악할 수 있었다. 화염의 모델링은 실험 결과를 비교적 잘 모사하였고 탈휘발화 속도정수에 대한 검토가 필요함을 알 수 있었다.



[그림 3] 가스온도 분포



[그림 4] 휘발분의 질량 분율



[그림 5] 가스농도 분포 (a) O₂, (b) CO, (c) CO₂, (d) NO

<참고문헌>

1. Bradley D., Lawes D., Scott M.J. and Usta N. (2001). *Combustion and Flame*, 124, 82.
2. Chigier N. (1991). Hemisphere Publishing Corporation, New York.
3. Xu W. and Tomito A. (1987). *Fuel*, 66, 632.
4. Merrick D. (1983a). *Fuel*, 62, 535.
5. Badzioch S. and Hawksley P.G.W. (1970). *Ind. Eng. Chem. Proc. Design Dev*, 9, 521.
6. Dixon-Lewis G., Bradley D. and Habik S. (1991). *Combustion and Flame*, 86, 12.
7. Dixon-Lewis G. (1984). chapter 2, Springer-Verlag, New York.