

무화염 연소 형성에 미치는 공급조건에 관한 연구

홍성원* · 이필형* · 송기종* · 황상순**

Study of injection condition on formation of Flameless combustion

Seong Weon Hong*, Pil Hyong Lee*, Ki Jong Song*, Sang Soon Hwang**

ABSTRACT

Entrainment length and recirculation ratio that are important factors of flameless combustion systems were analyzed by injection conditions using three dimensional numerical simulation. As a result, the entrainment length increased with an increase of momentum ratio and distance of between nozzle. Also, in case of increasing in momentum of oxidation, recirculation ratio was increased and the average temperature was decreased.

Key Words : Entrainment length, Recirculation ratio, Momentum ratio

무화염 연소시스템은 배기가스와의 열교환 및 회석을 통하여 효율이 높고, 균일한 온도장의 체적연소를 통하여 Thermal NOx의 배출을 감소할 수 있는 연소방식이다.

Szegő, Jianchun는 선행연구를 통하여 유입길이의 변화가 연료와 산화제의 회석률에 미치는 영향을 분석하였다. [1,2] 또한 유입길이를 공급되는 산화제에 연료가 유입되는 최소 높이로 정의하여, 식(1),(2)과 같이 수식 화하였다.

$$Z_J \approx C \left(\frac{G_f}{G_a} \right)^{1/4} S \quad (1)$$

$$Z_J \approx C \phi^2 \gamma^{-1/2} \left(\frac{T_f}{T_a} \right)^{1/4} D_a^2 D_f^{-1/2} S \quad (2)$$

수식(1)의 G_a, G_f 는 산화제와 연료의 운동량을 뜻하며 S는 연료와 산화제 노즐간의 거리를 나타낸다. 수식(2)는 수식(1)의 산화제와 연료의 운동량을 당량비(ϕ), 이론혼합비(γ), 온도(T), 노즐 직경(D)의 관계로 변환하여 유입길이에 대하여 표현하였다. C는 실험 및 수치해석을 통하여 얻어지는 상수로 본 논문에서는 4.9를 사용하였다. 위의 식(1), (2)를 통하여 유입길이는 산화제와 연료의 운동량의 비와 노즐간의 간격에 영향을 받는다고 판단하였다.

Wüning은 무화염 연소시스템에 중요한 영향인 배기가스의 재순환에 대하여 산화제와 연료의 연소반응 후 연소로의 출구부에서 입구로 돌아오는 배기가스의 질량유량과 공급되는 산화제와 연료의 질량유량의 합의 비로 재순환율을 식(3)과 같이 정의하였다.[3]

$$K_V = \frac{\dot{m}_r}{\dot{m}_a + \dot{m}_f} \quad (3)$$

또한 식(3)을 통하여 계산되는 재순환율과 평균 온도의 관계로 무화염의 형성영역을 제시하였다.

본 논문에서는 연료 및 산화제의 공급조건에 따라 변화되는 재순환율과 유입길이의 변화를 분석하기 위하여 3차원 전산수치해석 프로그램인 Ansys Fluent를 사용하여 수치해석을 진행하였다.

수치해석은 3차원 정상상태로 가정하였고 질량, 운동량, 에너지, 화학종보존 방정식 및 열전달 방정식을 적용하였다. 수치해석에 사용된 난류모델은 Realizable k- ϵ 를 사용하였으며, Radiation 모델은 P1 Radiation Model, 연소모델은 EDC (Eddy Dissipation Concept)를 사용하였다. 무화염 연소에서 발생하는 화학반응을 해석하기 위하여 22개의 화학종과 104개의 화학반응단계로 구성된 GRI-1.2 메커니즘을 사용하였다. 산화제 및 연료의 공급조건은 질량유량조건, 출구에서는 압력경계조건을 설정하여 수치해석을 진행하였다.

산화제와 연료의 운동량비와 노즐간의 간격변화가 유입길이에 미치는 영향을 비교하고자 연소로 내부의 연료의 분포도와 유입길이를 비교분석하

* 인천대학교 기계공학과

** E-mail : hwang@incheon.ac.kr

Tel : (032)835-8417 Fax : (032)835-0772

였다. 운동량은 공급되는 질량유량이 일정한 조건에서 노즐의 직경이 작아지면 공급유속이 증가하여 증가하게 된다. 따라서 산화제의 운동량의 변화에 따른 영향을 분석하고자 노즐직경을 변경하여 연료의 분포도를 Fig.1에 비교하였다. 그 결과 산화제의 운동량이 증가하는 경우 Z축 방향으로의 연료의 분포길이가 짧아짐을 확인하였다.

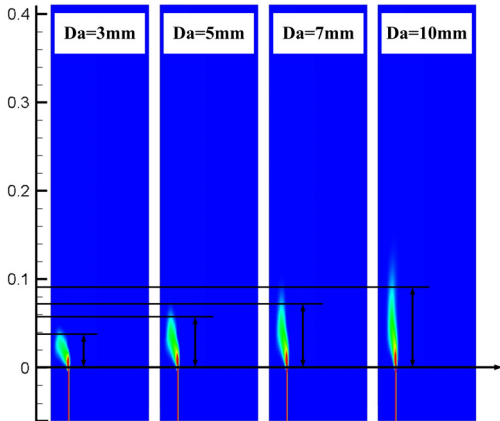


Fig. 1 Effect of air nozzle diameter on CH_4 contour in the X-Z plane

Fig.2는 운동량비에 따른 유입길이의 수치해석 결과와 식(1)을 통하여 얻어진 유입길이의 이론값을 비교한 그래프이다. Fig.2의 수치해석 결과를 살펴보면 식(1)을 사용한 유입길이의 이론값과 같은 경향성을 나타낸다. 산화제의 운동량이 증가하는 경우 유입길이는 짧아지고 연료의 운동량이 증가하는 경우에는 유입길이가 길어지는 결과를 확인할 수 있었다.

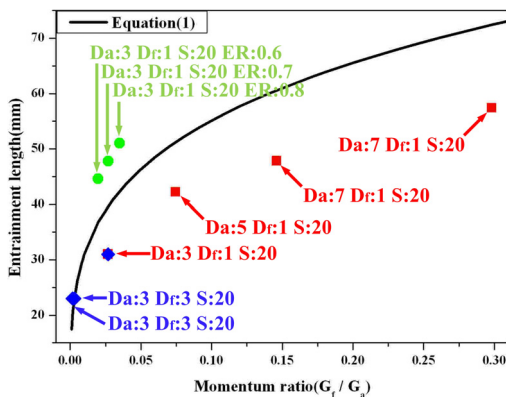


Fig. 2 Comparison of entrainment length at change the momentum ratio

운동량의 비가 동일한 경우에서 노즐간의 간격

이 유입길이에 미치는 영향을 수치해석을 통하여 비교하였다. 노즐간의 간격 변화에 따른 연료분포도를 Fig.3에 비교하였다. Fig.3을 비교한 결과 노즐간의 간격이 좁아짐에 따라 Z축으로의 연료 분포길이가 짧아짐을 확인하였다. 수치해석 결과 노즐간의 간격이 좁아지는 경우 유입길이가 감소하는 연료분포의 결과와 같은 경향성을 확인할 수 있으며 식(2)를 적용하여 확인한 유입길이에 대한 이론값 일치함을 Fig.4에서 확인할 수 있었다. 위의 결과를 통하여 무화염 연소시스템에 중요한 영향으로 작용하는 유입길이에 대하여 공급 조건에 따른 변화를 비교할 수 있었다.

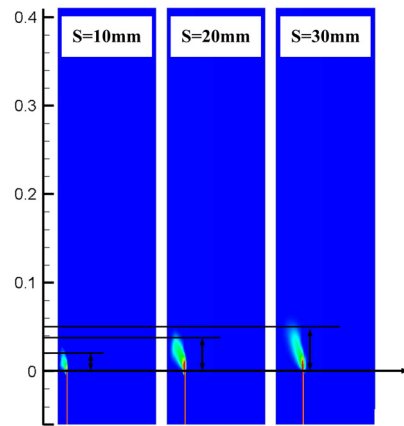


Fig. 3 Effect of distance of between the nozzle on CH_4 contour in the XZ plane

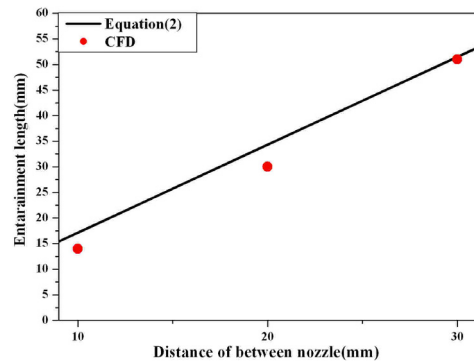


Fig. 4 Comparison of entrainment length at distance of between the nozzle

유입길이가 더불어 무화염 연소시스템에 중요한 영향을 미치는 배기가스의 재순환에 대하여 분석하고자 식(3)을 이용하여 재순환율을 비교하였다. 재순환되는 배기가스의 질량유량은 연소로의 Z축 높이 방향에 따라 음의 속도를 가지는 영역에서의 질량유량으로 계산하였다. 배기가스의 재순환의 경우 산화제의 운동량변화에 큰 영향을 받

는다고 알려져 있어 산화제의 유속 및 유량을 변경하여 재순환율의 변화를 비교하였다. 유속변경에 따른 재순환율의 변화를 Fig.5에 비교하였다. Fig.5를 살펴보면 유속이 증가하면 재순환율이 증가됨을 확인할 수 있었다. 배기가스의 재순환이 강해지면 산화제와 연료의 희석효과가 증가되어 연소로 내부의 평균온도는 감소되었다. 산화제 유량 변화에 따른 재순환율의 변화를 Fig.6에 비교하였다. Fig.6을 살펴보면 당량비가 감소하면 산화제 유량이 증가하여 재순환율이 증가되고 평균온도가 감소되는 경향을 확인할 수 있었다.

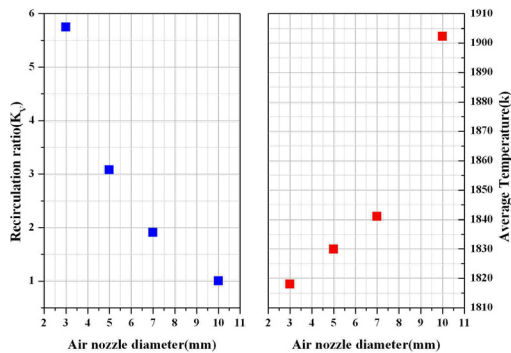


Fig. 5 Comparison of recirculation ratio and average temperature at change of Air nozzle diameter

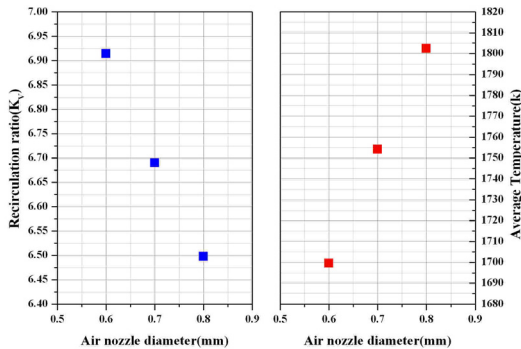


Fig. 6 Comparison of recirculation ratio and average temperature at change of Air nozzle diameter

공급조건에 따른 유입길이와 재순환율을 비교한 결과 운동비 및 노즐간의 간격에 따라 유입길이와 재순환율에 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 무화염 연소시스템의 안정적인 형성 및 설계를 위해서는 유입길이와 재순환율의 효과를 상호 비교분석하여 최적의 무염화염 형성 영역을 확보해야 한다고 판단된다.

참고 문헌

- [1] G.G. Szegő, B.B. Dally and G.J. Nathan, "Operational characteristics of a parallel jet MILD combustion burner system", *Combustion and Flame*, Vol. 156, 2009, No. 2, pp. 429-438.
- [2] J. Mi, P. Li and C. Zheng, "Impact of injection conditions on flame characteristics from a parallel multi-jet burner", *Energy*, Vol. 36, 2011, pp. 6583-6595.
- [3] J. A. Wünnig and J. G. Wünnig, "Flame-less oxidation to reduce thermal No-formation", *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 23, 1997, NO. 1, pp. 81-94.