

contractor가 있는 버너에서의 화염구조와 NOx 배출특성 파악

조한창, 박홍수, 조길원, 김진호*
 포항산업과학연구원, *(주)경원테크

Flame structure and NOx emission in the burner with contractor

Han Chang Cho, Hoong Soo Park, Kil Won Cho, Jin Ho Kim*

Research Institute of Industrial Science & TEchnology, *KyungWon Tech. Co. Ltd

1. 서론

버너 선단부의 구조는 연소로의 구조와 운전조건과 밀접한 관련이 있다. 즉 통상적인 연소로의 경우는 넓은 화염을 요구하여 버너노즐이 연소로에 그대로 노출되거나 확산부(diffuser)의 역할을 하는 quarl이 존재한다. 버너노즐이 연소로에 그대로 노출된 일자형은 화염안정성에는 불리하지만 최근 저 NOx 버너개념의 혼합지연형 버너에서 많이 채택되고 축열식 버너의 경우 많이 채택되는 방식이다. 버너선단부에 quarl이 있는 경우는 화염이 안정적으로 부착되며 혼합지연도 이를 수 있는 구조를 갖고 있어 일반 가열로, 보일러 버너 등으로 많이 쓰인다. 이외에 버너노즐 선단부에 수축되는 contractor가 있어 여기에서 연료/공기의 혼합이 진행되어 화염이 시작되고 이후 작은 노즐부를 통해 화염이 래들 또는 연소로에 분사되는 구조가 있다. 이는 안정적 화염을 얻을 수 있음은 물론 후단부의 화염으로부터 복사열전달을 최소화할 수 있고 긴 화염을 얻을 수 있는 장점이 있어 통상적으로 복사관(radiant tube) 버너나 래들가열용 버너의 경우에 많이 이용된다.

본 연구에서는 래들가열용으로 사용되는 버너 선단부에 contractor가 있는 버너구조에서 NOx 배출량과 화염구조를 파악하고자 한다. 타 버너구조에 비해 contractor가 있는 경우의 연소특성에 대한 연구는 많지 않았다.

2. 이론

contractor 가 있는 버너를 구성하는 설계인자는 Fig.1과 같다. 파이롯 버너가 없이 점화기(igniter)만으로 착화시키며, 버너노즐의 위치와 구조(C, D), 버너 직경(B)과 래들커버에 부착되는 버너 토출구직경(bore diameter, A), 그리고 contractor의 길이(E)와 혼합부 길이(F) 등이 중요한 버너 설계인자가 된다.

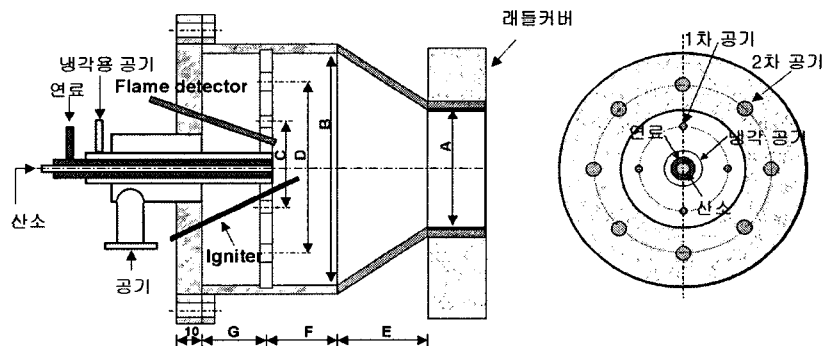


Fig. 1 Schematic burner diagram with contractor

위의 설계 인자를 모두 평가하기에는 너무 많아 A, B, C, E, F, G를 일정한 값으로 정의하고,

공기 다단분사 여부, 공기분사유속, PCD 즉 2차공기 노즐간 거리(또는 일단분사인 경우는 공기분사노즐간 거리) 등을 설계인자로 선정하여 요인수준을 2로 하면 실험계획법(DOE)에 의거하여 Table 1과 같은 실험설계를 수행할 수 있다. 이때 각 설계 요인의 요인 수준에서 A는 낮은 값, B는 높은 값을 의미한다.

Table 1. burner design results

RunOrder	stage	Air vel. [m/s]	PCD [mm]
1	일단	A	A
2	일단	A	B
3	이단	A	B
4	이단	A	A
5	이단	B	B
6	일단	B	B
7	일단	B	A
8	이단	B	A

실험계획법에 의해 수행된 버너 설계결과를 바탕으로 설계 인자별 화염구조와 NO_x 배출 특성을 파악하기 위하여 수치해석을 수행하였다. 수치해석에는 상용 패키지 CFD-ACE+ code를 이용하였으며, 버너노즐이 45°간격으로 동일한 구조를 갖고 있어 전체 유동장의 1/8만을 풀이하였다. 풀이 대상의 유동장과 벽면 조건은 Fig.2와 같다. 래들 크기는 직경 1m, 깊이 1.3m로 하였으며, 수직하방향으로 버너가 부착된다. 래들커버에 부착되는 버너의 형상과 공기/산소/연료 노즐의 구성은 Table 1의 버너 설계조건에 의해 바뀌게 되며, 연소 배가스는 래들과 래들커버 사이로 배출된다. 래들과 래들커버를 통한 벽면 열손실은 대류 열전달계수 $h=10W/m^2K$ 로 대입하였다. 이 값은 자연 대류열전달 계수 수준이며, 외기의 풍속이 크지 않다면 일반적인 연소로의 벽면열전달 조건과 비슷한 값이다.

CFD-ACE+ code를 이용하여 위의 풀이대상 유동장을 Fig.2와 같은 격자계로 나타낼 수 있다. 계산 격자는 경우에 따라 다소 차이가 있지만 50~60만개정도이다.

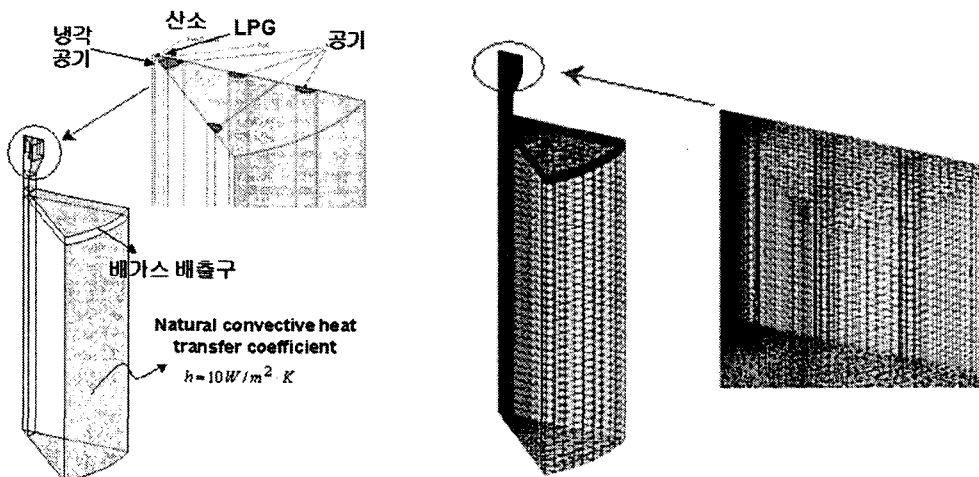


Fig.2 Computation domain and generated grid

수치해석을 위하여 연속방정식, 운동량 방정식, 에너지방정식, 화학종 방정식 등을 풀이하여야 한다.

$$\nabla \cdot (\rho \vec{u}) = S_c \quad (1)$$

$$\nabla \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \nabla \cdot (\mu \nabla \vec{u}) + S_M \quad (2)$$

$$\nabla \cdot (\rho \vec{u} h_0) = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T) + S_h \quad (3)$$

$$\nabla \cdot (\rho \vec{u} Y_i) = \nabla \cdot (J_{ij}) + M_i \omega_i \quad (4)$$

여기서 화학종 방정식은 mixture fraction으로 풀이하였다.

계산영역은 난류영역이므로 난류 현상을 풀이하여야 하며, 여기서는 통상적인 k-ε 모델을 적용하였다. 여기서는 연료인 LPG를 프로판 100%라고 하고 일단계 반응(one-step reaction)으로 가정하였으며, 사용된 화학 반응을 아래와 같이 정의된다.

$$w_c = 8.6 \times 10^{11} C_{fuel}^{0.1} C_{O_2}^{1.65} \exp(-15.1/T) \quad (5)$$

난류와 화학반응장의 상호작용(interaction)은 eddy breakup model을 적용하였다. 이 모델은 화학반응의 시간 스케일과 혼합(mixing) 시간 스케일을 비교하여 느린 시간스케일의 과정이 전체 반응장을 지배하게 된다는 이론이다.

NOx는 열적(thermal) NOx와 prompt NOx를 고려하여 풀이하였으며, 사용되는 밀도는 이상기체방정식, 점성은 혼합 서더랜드 법칙, 비열은 혼합 Jannaf 방식을 이용하였다.

3. 결과 및 고찰

위의 계산방법으로 Table 1의 설계조건을 모두 풀이하였다. Runorder 1 조건에서 공기만을 산화제로 이용한 경우의 등온도 분포를 Fig.3(a)에 도시하였다. 버너노즐이 있는 연소통에서 contractor 부위에 화염선단이 존재하고 화염이 하류로 형성되며 래들중심부에 고온부가 위치한다. 이후 연소가스가 래들과 래들커버 사이를 통해 배출되는 모습을 볼 수 있다. 버너개발에 있어 화염선단의 위치 및 구조가 버너노즐의 열화, 소손, 그리고 내화물의 열화 등에 영향을 미치는 중요한 인자로 고려되기 때문에 Table 1의 버너 설계 조건들에서의 화염선단 모습을 Fig.3(b)와 같이 정리할 수 있다.

Fig.3(b)를 보면 공기노즐부근은 공급된 찬 공기에 의해 낮은 온도를 갖지만 래들커버가 있는 버너 토출구(throat) 부근에 화염 선단이 주로 위치하고 연소통의 후단으로 생성되는 재순환영역으로 연소배가스가 되돌아 들어가고 이것이 찬 공기와 혼합되는 모습을 볼 수 있다. 그러나 run 5, 6의 버너는 재순환영역으로 이동하는 모습이 연소배가스의 모습이 매우 적었지만 버너 목에서 화염이 매우 두껍게 생성되었다. 이렇게 화염선단부가 두껍게 존재하면 화염이 단열화될 수 있고 휘염상태를 유지하면서 복사열에 의해 버너타일이 쉽게 열화되어 손상될 수 있기 때문에 바람직한 화염구조는 아니며, run 2, 3, 4, 8과 같이 화염선단부가 얇은 구조가 선호된다. 화염선단부가 얇은 상태를 유지하면 화염에 직접적으로 버너타일이 접촉하지 않는다면 크게 열화되지 않을 수 있고 긴 화염을 얻을 수 있기 때문이다.

재순환영역으로 연소배가스가 많이 유입되면 화염안정화에는 유리하지만 고온 배가스에 의해 버너노즐과 버너타일이 손상될 수 있기 때문에 반드시 좋은 현상은 아니다. 설계된 버너들의 화염 구조로부터 최적의 화염구조를 찾을 수 없었으며, 제안될 수 있는 것은 run 6의 재순환영역 구조와 run 8의 화염선단 구조가 조합된 상태이다. 재순환영역이 강하게 나타나는 경향으로 보아 contractor에서 수축비를 작게 하는 것이 유리함을 알 수 있었다. 각 버너에서 화염의 부상거리를

대략적으로 정의하여 평가해 보면, 부상거리는 공기 다단여부는 중요하지 않았으며, 공기분사속도가 느리고 공기노즐간 거리는 적을수록 길게 얻어짐을 알 수 있었다.

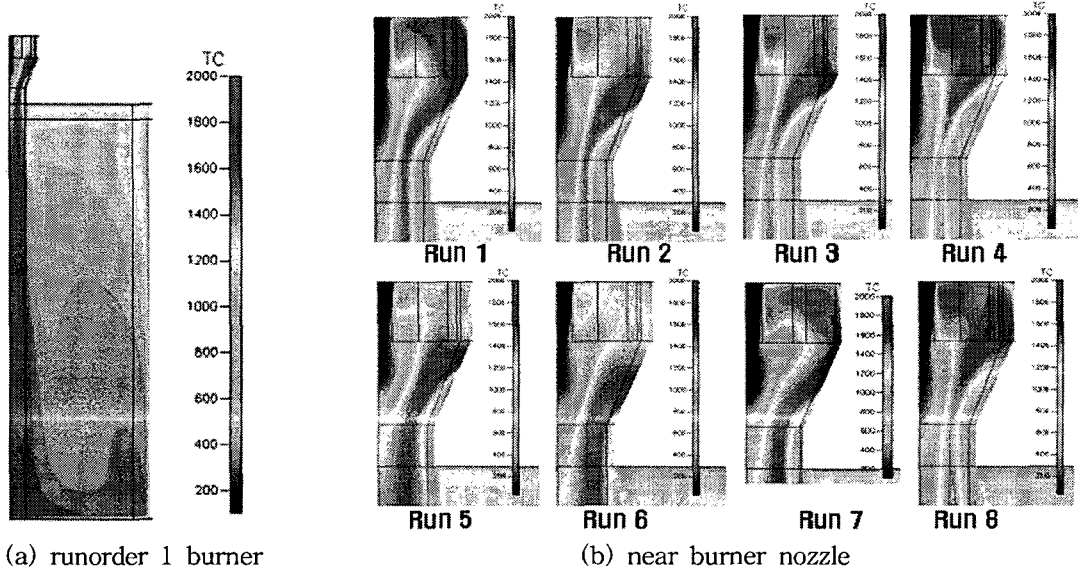


Fig.3 Uniform gas temperature contour

각 설계버너에서 공기만을 산화제로 이용한 경우 추정된 NOx 농도를 Fig.4에 도시하였다. 화염대 후반부에 집중적으로 생성되는 것을 볼 수 있으며, 배출되는 NOx 농도는 Table 2와 같다. Table 2로부터 저속의 공기가 이단으로 분사되고 공기노즐간 거리가 넓은 경우가 가장 많은 NOx가 발생하며, 고속의 공기가 이단으로 분사되고 공기노즐간 거리가 좁은 경우에 가장 적게 발생한다고 평가된다.

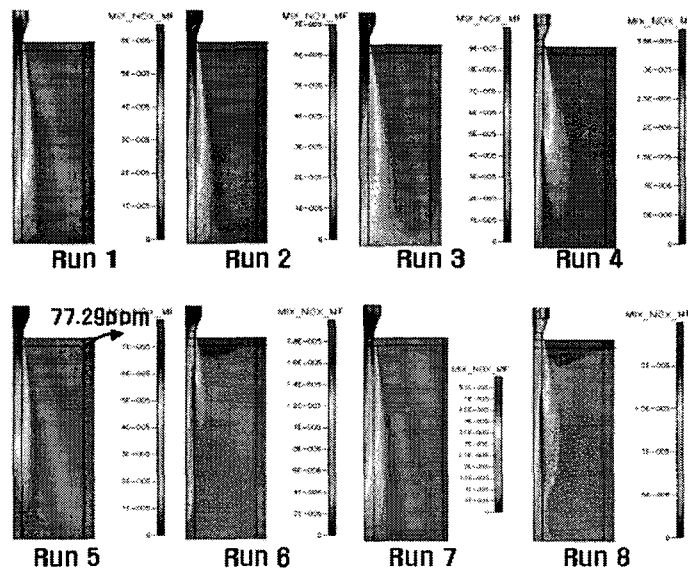


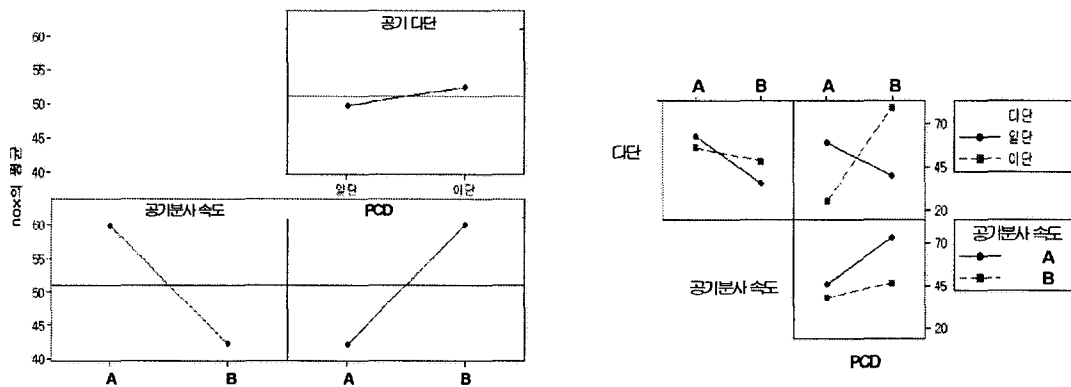
Fig.4 NOx concentration contour in several burners

버너 설계 변수들의 효과를 통계프로그램인 minitab을 이용하여 평가해 보면 Fig.5와 같다. 즉

공기의 다단 분사여부는 크게 영향을 주지 않으며, 공기분사속도가 증가하면 NOx 발생량을 감소된다. 그러나 공기분사노즐간 거리, 즉 PCD가 작을수록 NOx가 적게 발생하였다. 설계요인의 상호효과도를 나타낸 Fig.5(b)에서 보면, 공기의 다단 분사 여부와 PCD 간에는 강한 교호작용이 있어 이단분사인 경우에는 PCD가 작은 경우가 NOx 저감에 좋고, 일단분사인 경우에는 PCD가 큰 경우가 NOx 저감에 유리함을 알 수 있었다.

Table 2 NOx emission values in several burners

RunOrder	stage	Air vel. [m/s]	PCD [mm]	NOx, ppm
1	일단	A	A	62.50
2	일단	A	B	64.35
3	이단	A	B	82.45
4	이단	A	A	30.26
5	이단	B	B	77.29
6	일단	B	B	15.91
7	일단	B	A	55.94
8	이단	B	A	19.89



(a) effect of primary design factor

(b) interaction of design factor

Fig. 5 NOx emission characteristics

run 5의 버너를 실기로 제작하여 공기연소시의 화염구조 NOx 배출특성, 그리고 산소부화 연소시의 화염구조와 NOx 특성 등의 성능을 평가하였다. 제작된 버너, run 5의 모습은 Fig.6과 같다.

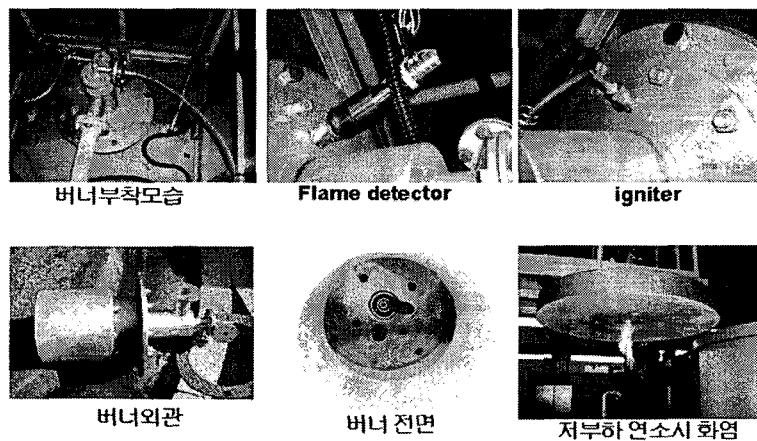


Fig.6 Photographs of run 5 burner

contractor가 있는 버너에서 NOx 배출량을 측정하였으며, 그 결과를 Fig.7에 도시하였다. 연소 부하 10만kcal/hr이고 공기비 1.16에서 세 시간을 가열한 후 로온 1050°C에서 배가스내 6.5% 산소기준으로 90ppm이 발생하였다. 이를 수치해석을 수행한 결과인 산소 3%기준으로 하면 110ppm, 그리고 11% 산소기준으로 하면 60ppm 수준으로 발생하였다. 수치해석 결과와 큰 차이가 없음을 알 수 있었다. 본 시험결과에서 래들온도에 따른 변동은 크지 않았으나, 1200°C까지 가열되면 더욱 증가되었을 것이라 사료된다.

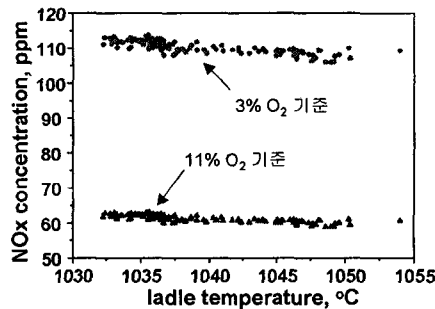


Fig.7 NOx emission in run 5 burner

4. 결론

래들가열용 버너로서 contractor가 있는 버너에서의 설계인자별 화염구조 및 NOx 배출특성을 파악하였다. 수치적으로는 부상거리가 공기 다단분사의 영향은 없었으며, 공기분사속도가 느리고 공기노즐간 거리는 적을수록 긴 부상거리가 얻어짐을 알 수 있었다. NOx 배출량에 있어서는 공기의 다단 분사여부가 영향을 주지 않았으며, 공기분사속도가 증가하면 NOx 발생량을 감소되었다. 그러나 공기분사노즐간 거리, 즉 PCD가 작을수록 NOx가 적게 발생하였다. 설계요인의 상호 효과에서 공기의 다단 분사 여부와 PCD 간에는 강한 교호작용이 있어 이단분사인 경우에는 PCD가 작은 경우가 NOx 저감에 좋고, 일단분사인 경우에는 PCD가 큰 경우가 NOx 저감에 유리함을 알 수 있었다. 실험적으로 NOx 해석결과가 수치해석결과와 비슷함으로써 유효함을 확인하였으며, 공기분사속도가 가열로 등에서 수행된 것보다 빨라져도 화염안정성에는 문제가 없음을 확인하였다. 이는 contractor에 의한 화염유지기능이 강하기 때문으로 판단되었다.

5. 참고문헌

1. Confroth, Combustion Engineering and Gas Utilization, 3rd ed. British gas, 1992
2. Combustion, I. Glassman, 1996, Academic press
3. JSME combustion handbook(연소공학파트), 일본기계학회, 1995
4. Tomeczek, J., Goral, H., and Gradon B., Gasdynamics abatement of NOx emission from industrial natural gas jet diffusion flames, *Combustion Science and Technology*, 1995, vol.105, pp.55-65