

다공 세라믹 오일 연소기의 온도분포 및 CO, NOx 배출 특성에 관한 실험적 연구

조제동* · 강재호* · 임인권**

Experimental Study on the Temperature Distribution and CO, NOx Emission of Porous Ceramic Oil Burner

J. D. Cho, J. H. Kang, I. G. Lim

Key Words : Porous Ceramic (다공세라믹), Oil Burning (액체연료 연소), Efficiency of Combustion (연소효율)

Abstract

Experimental study on the porous ceramic burner for oil burning has been performed. Temperature profile of the combustor and CO and NOx emission have been obtained for with and without porous ceramic plate. It is found that very uniform and high temperature region with porous ceramic plate can be realized due to high radiation emission from the plate and also obtained lower CO and soot particulate emission, when compared to the conventional burner. When this burning method is applied to conventional boiler of small heating capacity, it is found that near 6 and 7 percent increase in thermal efficiency could be obtained without a proper calibration for optimization.

1. 서론

석탄, 석유, 천연가스 등의 화석에너지는 자원의 유한함과 연소시 발생하는 유해가스로 인해 세계적으로 유가상승 및 환경오염의 문제를 가져오고 있으며, 특히 연료 연소시 발생하는 유해가스는 지구 표면의 평균온도의 상승과 산성비등 많은 피해를 가져오고 있다. 이로 인하여 전 세계적으로 각종 환경규제에 가입하였고 또한 강요를 받고 있다.

이러한 문제점을 해결하고자 청정 고효율 연소 연구가 활발히 진행되고 있으며 다공성 세라믹을 이용한 연소기 개발 또한 활발히 진행되고 있다.⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾

다공성 세라믹 물질을 적용한 연소기는 연소기 안에서 대류 열 전달 및 복사에 의한 열 재순환 영역이 존재하게 되고, 이로 인하여 초과 엔탈피 연소 현상이 일어나게 되며, 또한 일반적인 화염형태에 비해 특이한 일차원 화염형태를 보이고 모든 혼합기가 다공성 세라믹의 화염면을 통과하므로 일산화탄소(CO) 및 미연 탄화수소(UHC)의 발생이 매우 적고 다공성 세라믹의 고온 방사열에 균일한 온도 분포를 얻을 수 있다.

또한 다공성 세라믹 하류지역의 고온 연소가스는 상류로의 열전달과 하류 및 연소기 출구로의 열 전달에 의하여 온도가 감소하므로 고온에서의 체류시간에 민감한 질소산화물(NOx)의 생성을 억제시킬 수 있다는 장점을 가지고 있으며 고온 균일한 복사 및 대류 열 전달에 의해 고효율의 연소가 가능하다.⁽²⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾

다공성 세라믹을 적용한 연구 개발은 기체연료에 대해서는 많은 연구가 진행되고 있지만 액체연료의 경우는 공기와 이룬 적 예 혼합과 화염의 불안정으로 인해 많은 연구가 이루어지지 못하고 있다.

* 명지대학교 기계공학과 대학원

** 명지대학교 기계공학과

본 연구에서는 다공성 세라믹을 일반 액체 연료 연소기에 적용시켜 온도분포 및 화염영역 특성과 NOx 및 CO의 배출특성을 알아보고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

본 실험에서 사용된 장치의 개략도는 Fig. 1 에 도시되어있다. 주요한 실험장치로는 다공 세라믹을 이용한 버너, 연소실, 2축 이송장치, 배기 가스 분석기 등으로 구성되어 있다.

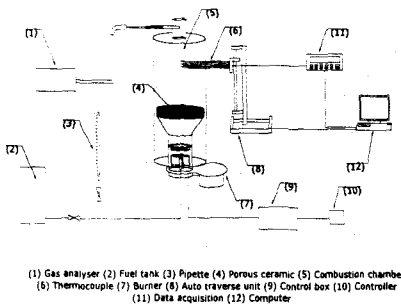
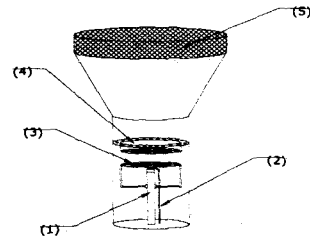


Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

본 실험에서 사용된 연소기는 세라믹 연소기를 이용하여 Nozzle은 0.4gal/h 80° Hollow Type 과 0.5gal/h 80° Hollow Type을 교체해 가면서 연소기 전면부의 화염분포 및 배기가스 농도를 측정하였다. 여기서 강한 선화 유동을 유발시키기 위하여 Fig. 2와 같이 다단 스윌을 선택하였고 하부 스윌러와 상부 스윌러와의 간격은 지속적인 점화가 일어나는 최소한의 간격인 3cm로 설정하였다. 이는 3cm 이하에서는 빠른 선화 유동에 의해 지속적인 점화 과정이 일어나지 않았고 연료의 날림이 일어나기 때문이다. 세라믹 연소기와 상용 연소기의 온도 측정은 2축 이송 장치를 이용하여 세라믹 표면을 기준으로 하여 3cm 간격으로 30cm 높이 까지 측정을 하였으며, 세라믹의 직경방향인 가로축의 온도 측정은 15개의 Thermocouple을 2cm 간격으로 수평 정렬하여 측정을 하였다. 상용 연소기의 화염온도 및 배 가스 측정은 Nozzle을 0.4gal/h 80° Hollow Type 과 0.5gal/h 80° Hollow Type을 교체해 가면서 하부 스윌만을 이용하여 측정하였으며 자체 제작한 세라믹 dust 기의 온도 측정은 다단 스윌을 이용하였고, 또한 기공률 10ppi 와 20ppi 두 가지 세라믹을 이용하여 화염온

도 및 배기 가스를 측정하였다. 공급되는 공기량은 일반 연소기의 공기량 표시 기준으로 2.0 ~ 5.0 까지 0.5 씩 공기량을 증대 시켜 가면서 화염온도 및 배기 가스를 측정하였다. 각 표시기준에 대한 공기량과 당량비는 Table 1.에 나타내었고 배기가스 측정은 연소실내에 연소기를 설치하여 연소기 상단부분에서 60cm 되는 거리에 Kane-May Quintox사의 Gas Analyser를 사용하여 일산화탄소 및 질소산화물을 측정하였다.



(1) Nozzle (2) Ignitor (3) Swirler 1 (4) Swirler 2 (5) Ceramic

Fig. 2 다공 세라믹을 이용한 연소기

Table 1. 공기량에 따른 당량비

공기량	Q(ℓ/min)	Q(m ³ /min)	당량비Φ
1	66	0.066	3.53
1.5	183	0.183	1.27
2	221	0.221	1.05
2.5	255	0.255	0.91
3	285	0.285	0.82
3.5	294	0.294	0.79
4	305	0.305	0.76
4.5	315	0.315	0.74
5	320	0.320	0.73

Fig. 3은 본 실험에서 사용한 축열재인 다공성 세라믹은 두께가 2.5cm, 직경이 15cm 인 스폰지 형태로 기공률 10ppi 와 20ppi 두종류로써 부분 안정된 지르코니아 (Partially Stabilized Zirconia : PSZ).를 사용하였다.

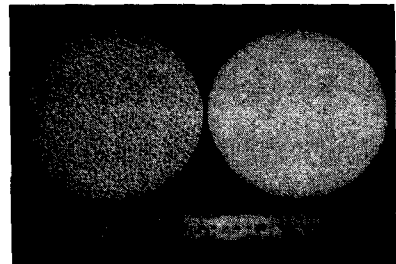
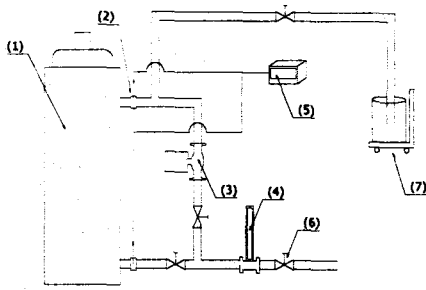


Fig. 3. Photo of Porous Ceramic



(1) Boiler (2) Thermocouple (3) Pump (4) Flowmeter
(5) Thermometer (6) Valve (7) Scale

Fig 4. 다공 세라믹 버너를 이용한 보일러의 성능실험 장치

Fig. 4는 다공 세라믹 연소기를 보일러에 적용하여 상용 연소기와의 연소효율, 열효율을 비교 실험하기 위하여 구성된 성능실험 장치를 나타낸 것이다. 열효율 계산을 위한 온도 및 출탕량(kg/h) 측정은 Thermometer, K-Type Thermocouple과 전자 저울을 사용하였다. 유량조절을 위한 밸브는 Gate Valve를 사용하였으며 배관으로는 15mm 강관을 사용하였다.

KS 석유 연소 기기의 시험 방법 통칙에 있어서 열효율 측정 방법 중 본 실험에서는 직접법에 따른 실험 장치를 구성하여 측정하였다. 열효율은 상용 연소기와 다공성 세라믹 연소기를 사용하여 각각 측정하였다. 실험방법은 입구 측의 밸브와 펌프 및 부분의 밸브를 조작함으로써 난방 되돌림 구 온도가 난방 출구 온도보다 13℃ 정도의 온도차를 유지하여 난방 출력(kcal/h)을 계산하였다. 난방 출력 계산식은 다음과 같다.

Table 2. 난방출력 계산식

	$Q_w = G_h \cdot C_p (th_2 - th_1)$
Q_w	난방출력(kcal/h)
G_h	출탕량(kg/h)
C_p	물평균비열(kcal/kg·℃)
th_2	난방출구온도(℃)
th_1	급수온도(℃)

물을 데우는 방식인 기기의 열효율은 Table 3.의 KS 석유 연소 기기의 시험 방법 통칙에 따른 계산식에 의해 산출하였다.

Table 3. 기기의 효율

	$\eta = \frac{Q_w}{G H_i + \text{연료의 현열}} \times 100$
η	난방효율(%)
Q_w	난방출력(kcal/h)
G	연료소비량(kg/h)
H_i	연료발열량(kcal/kg)

3. 결과 및 고찰

3.1 다공 세라믹 연소기에서의 화염 온도 분포

다공성 세라믹을 이용한 연소기의 높이에 따른 연소특성을 알아보기 위하여 높이를 0~30 cm까지 3cm 간격으로 변화시키면서 온도측정 실험을 수행하였다. Nozzle은 0.4gal/h 80° Hollow Type을 사용하였고 상용 연소기는 하부 선회기만 적용한 점화에 따른 온도를 측정하였으며 10ppi 및 20ppi 다공성 세라믹을 이용한 연소기는 하부와 상부의 다단 선회기를 이용한 점화에 따른 화염온도를 측정하였다. Fig. 5 (a)에서처럼 하부 선회기만을 이용한 연소기의 경우 화염이 불규칙적이고 약한 선회 유동을 보이며 연소기 반경에 따라서 불균일한 온도분포의 양상을 띠고 있다. 한편 Fig. 5 (b), (c)에서 다단 선회 유동을 이용한 다공성 세라믹 연소기의 경우 세라믹의 높은 방사열에 의해 연소기 반경에 따라 전체적으로 매우 균일한 온도분포를 나타내고 있으며 강한 선회유동이 일어날수록 세라믹의 내부에서 연소가 진행되어 화염의 길이가 줄어들어 화염이 세라믹 내부에 존재하게 된다. 이러한 연소기 전면부의 전체적으로 균일한 온도분포로 인하여 전열효과를 증가시킬 뿐만 아니라 연료절감과 연소효율을 증대시킬 수 있는 효과를 볼 수가 있다.

Fig. 6 은 상용 연소기와 다공 세라믹 10ppi, 20ppi를 적용했을 때의 높이에 따른 화염온도분포를 0~18 cm 까지 6cm 간격으로 나타낸 그림으로서 다공성 세라믹 연소기와 상용 연소기와의 최고 온도 점은 1400 K 정도로 비슷하나 각 위치에서의 최대 약 350℃ 까지 온도가 차이이며, 기공률 10ppi 와 20ppi의 다공 세라믹에서의 온도차이는 거의 동일하게 나타났다. 또한 세라믹을 적용하지 않았을 경우, 높이가 0~3cm 되는 부분은 선회 유동에 의해 Fig 10. 에서와 같이 원추형태의 화염이 형성되고 그 중심부는 유입공기의 영향으로 상대적으로 낮은 온도를 형성하고 있다.

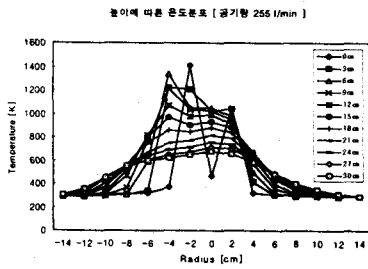


Fig 5. (a) 세라믹을 적용하지 않았을 때의 온도분포

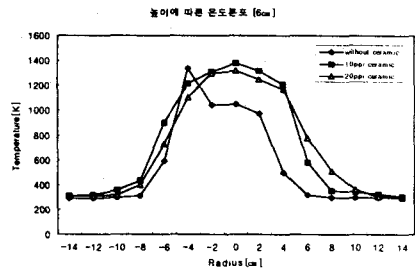


Fig 6. (b) 높이에 따른 온도분포 [6cm]

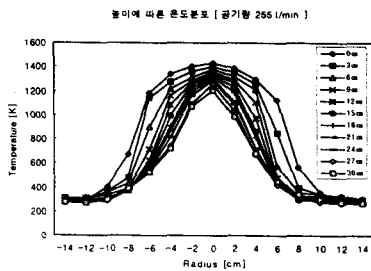


Fig 5. (b) 10ppi 세라믹을 적용했을 때의 온도분포

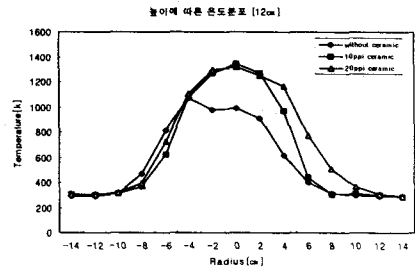


Fig 6. (c) 높이에 따른 온도분포 [12cm]

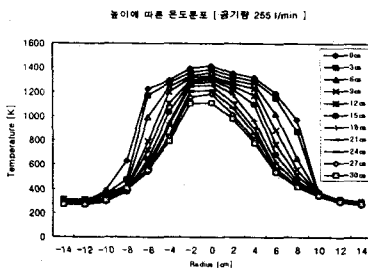


Fig 5. (c) 20ppi 세라믹을 적용했을 때의 온도분포

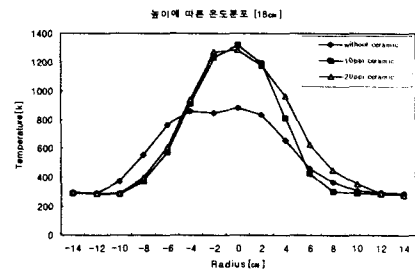


Fig 6. (d) 높이에 따른 온도분포 [18cm]

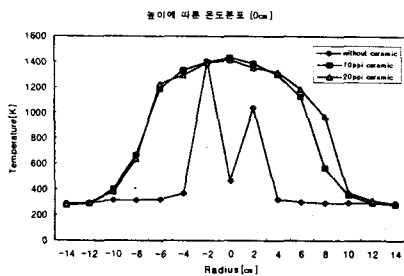


Fig 6. (a) 높이에 따른 온도분포 [0cm]

Fig 7. 은 공기량이 증가함에 따라 다공 세라믹을 적용하지 않았을 때와 다공 세라믹을 적용했을 때의 연소기 중심 축에서의 온도 분포를 나타내고 있다.

세라믹을 적용했을 때가 세라믹을 적용하지 않았을 경우에 비해 더 고온 균일한 온도분포를 이루며 공기량이 증가하여도 완만하게 온도가 감소하는 것을 볼 수 있다. 세라믹을 적용하였을 경우는 공기량이 증가하여도 1100 K 이상의 고온을 유지하고 있다.

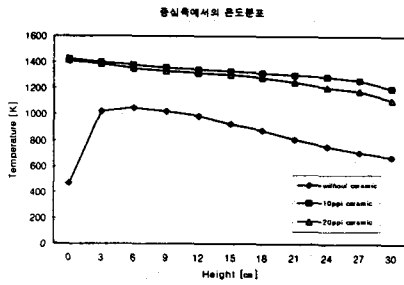


Fig 7. 세라믹 중심에서의 온도분포

Fig 8, 9. 는 세라믹을 적용하지 않았을 경우와 하단 선화유동일 때의 20ppi 세라믹 한 장과 두 장 그리고 다단 선화유동일 때의 세라믹 한 장을 적용하여 CO 및 NOx의 배출농도를 도시하였다.

세라믹을 적용하지 않았을 때에 비해 세라믹을 적용하였을 경우 연료와 공기의 혼합기가 고온의 방사열을 내는 세라믹을 전부 통과하기 때문에 CO의 배출농도가 크게 감소하는 것을 볼 수 있으며 공기량이 증가할수록 화염의 온도가 낮아지므로 조금씩 CO의 배출농도가 증가함을 볼 수 있다.

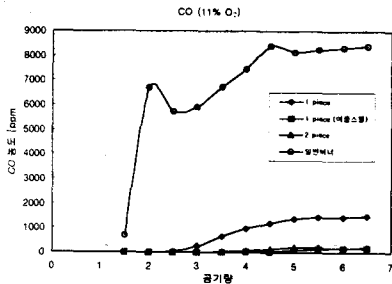


Fig 8. 공기량 증가에 따른 CO 배출량

반면에 세라믹이 있을 경우보다 세라믹이 없을 경우 NOx의 배출농도가 적게 배출되는 것을 볼 수 있다. 고온에서의 체류시간에 민감한 NOx는 세라믹을 적용했을 경우 세라믹과 유동 선화기 사이에서 세라믹을 통과하지 못한 고온의 연소가스의 재순환에 의해 체류시간이 증가되어 발생한다. Fig 9의 그림에서 보듯이 세라믹 두 장의 경우가 세라믹 한 장일 경우보다 세라믹을 통과하지 못하고 재순환되는 고온의 연소가스가 많게되어 NOx 배출농도가 높게 나타나고 있다. 따라서 NOx의 배출농도를 감소시키기 위해서는 유동선화 강도를 증가시키는 동시에 화염유동 방향으로의 공기 공급을 증가하여 고온 연소가스의 세라믹 통과가 빨리

이루어져야 할 것이다.⁽¹⁾

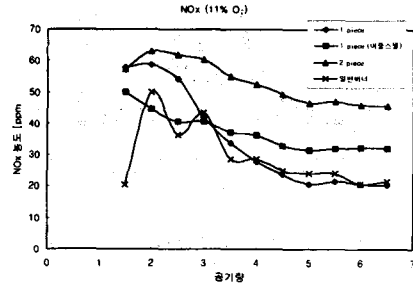


Fig 9. 공기량 증가에 따른 NOx 배출량

Fig 10~12 는 공기량을 증가시키에 따른 화염의 모습의 사진이다. 공기량이 증가됨에 따라 강한 선화유동에 의해 상용 연소기의 경우는 원추형의 화염의 길이가 작아지는 것을 볼 수 있으며, 세라믹을 적용했을 경우의 화염의 길이는 점차 짧아져서 세라믹내부에서 연소되는 것을 볼 수 있다.

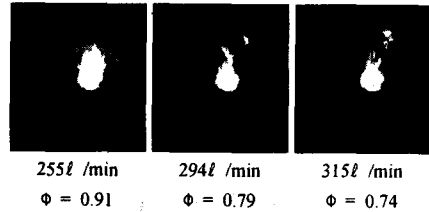


Fig 10. Nozzle 0.4gal/h 80° H Type

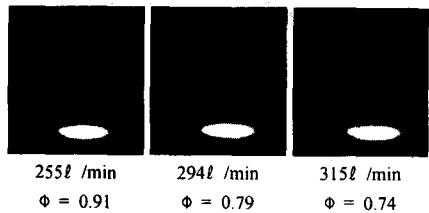


Fig 11. Nozzle 0.4gal/h 80° H Type [20ppi ceramic]

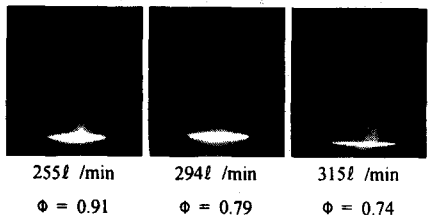


Fig 12. Nozzle 0.5gal/h 80° H Type [20ppi ceramic]

3.2 상용 연소기와 다공 세라믹 연소기를 이용한 보일러의 성능 비교 실험

상용 연소기와 다공 세라믹 연소기를 이용한 보일러의 성능 비교 실험에 사용된 연료는 발열량이 10,400kcal/kg인 등유이며, 0.4gal/hr 80° Hollow Type의 Nozzle를 사용하였다. 성능 실험을 하는데 있어서 가장 크게 대두된 문제점은 난방 출구 온도가 65°C 이상인 경우에 있어서는 밸브의 작은 변화에도 급격한 온도 상승이 일어나서 급수 온도와 차이를 지속적으로 유지하기가 어려워져 측정하는데 많은 시간이 소모가 된다. 따라서 본 실험에서는 난방 출구 온도를 65°C 로 유지해 가면서 급수 온도와 차이를 13°C 로 설정하였다. Table 4의 상용 연소기와 다공 세라믹 연소기를 이용한 보일러의 성능 실험 비교 Data를 보듯이 난방 출력 및 열효율 측정에 영향을 미치는 순환수량에 차이가 있다는 것을 알 수가 있다.

Table 2 와 Table 3의 계산식을 이용하여 열효율을 계산한 결과 약 6.3%의 열효율 증가를 볼 수가 있다.

Table 4. 성능 실험 비교 Data

	With no ceramic	With 20ppi ceramic
연료 온도 [°C]	15	15
연료 유량 [kg/h]	1.32	1.32
T1 / T2	50 / 63	50 / 63
배가스 온도 [°C]	173.7	179.4
순환수량 [kg/h]	168.9	185.7

4. 결론

본 연구에서는 상용 연소기에 다공성 세라믹을 적용하여 화염분포, NO_x, CO의 배출 특성을 알아보았으며 그 결과는 다음과 같다.

(1) 기존 연소기에 비해 다공성 세라믹을 적용한 연소기는 최고 온도는 거의 같지만 버너 전방의 화염 영역이 기존 연소기에 비해 전체적으로 고온 균일한 분포 영역을 가지는 것을 볼 수 있었다. 이는 연소기의 연소효율을 향상시킬 수 있다고 사료된다.

(2) 연료와 공기의 혼합기가 고온의 세라믹 화염면을 전부 통과하게 되므로 일산화탄소량이 크게 감소하였다.

(3) 고온에서 생성되는 질소산화물의 경우는 다만 스월러를 사용하여 스월의 강도를 높였음에도 크게 줄지는 않는 것을 볼 수 있었다. 이는 세라믹을 통과하지 못한 고온의 연소가스가 세라믹과 스월러 사이에 재순환되어 체류시간을 오래가지기 때문이라 생각된다. 따라서 연소가스가 고온 영역을 빨리 통과하기 위해 스월의 강도뿐만 아니라 공기량도 같이 높여주어야 한다고 사료된다.

참고문헌

- (1) 유현석, 이중성, 한정옥, 1999, "천연가스 선회 예혼합 화염의 NO_x 생성 및 배출 특성", 대한기계학회논문집 B 권, 제23권 제6호, pp. 788-794
- (2) 정경현, 양병옥, 이신민, 임인권, 1999, "다공 세라믹 액체 연료 연소기에 대한 실험 연구", 대한기계학회 1999년도 춘계학술대회 논문집 B, pp. 827-831.
- (3) Howell, J. R., Hall, M. J., Ellzey, J. L., 1996, "Combustion of hydrocarbon fuels within porous inert media", Progress in Energy & Combustion Science, Vol. 22. No. 2, pp. 121-145.
- (4) Tseng, C. J., and Howell, J. R., 1994, "Liquid fuel combustion within porous inert media in heat transfer with Combined Modes", D. E. Beasley and K. D. Cole, ASME HTD Vol. 299, pp. 63-69.
- (5) Tseng, C. J., 1995, "Liquid fuel combustion in porous ceramic burners", PhD Dissertation, Department of Mechanical Engineering, The University of Texas.
- (6) Hiatt, J. P. and Hall, M. J., 1994, "Pore scale turbulence in porous ceramic burners." Proceedings of the Central States Section meeting of the Combustion institute, Madison, WI, pp.49-54.
- (7) Weinberg, F. J., 1986, "Combustion in Heat Recirculating Burners", In F. J. Weinberg(ED), Advanced Combustion Methods, pp. 183-236.
- (8) Kotani, Y. and Takeno, T., 1982, "An Experimental Study on Stability and combustion Characteristics of an Excess Enthalpy Flame", 19th Symp. on Combustion, pp. 1503-1509.