

〈論 文〉

다공성 물질에 의한 열재순환 화염에 관한 실험적 연구(I)

유 영 돈* · 민 대 기* · 신 현 동**

(1988년 4월 14일 접수)

An Experimental Study on the Heat Recirculation Flame in Porous Media

Young-Don Yoo, Dai-Ki Min and Hyun-Dong Shin

Key Words : Ultra Lean Mixture(초희박 혼합기), Excess Enthalpy Flame(초과 엔탈피 화염), Porous Block(다공성 블럭), Flammability Limit(가연 한계)

Abstract

This paper presents the results of an experimental investigation on one dimensional excess enthalpy flame formed in a porous block. The investigation is undertaken in order to further the physical understanding of internal heat recirculation from reaction zone to unburned mixture. Two porous blocks are placed at both sides of combustion block to control the temperature distribution in the combustion block by means of radiation heat transfer. Mean temperature measurement reveals the general nature of the reaction zone in the porous material. It is conformed that the temperature of reaction zone exceeds the adiabatic flame temperature and the flame is stabilized at the out range of flammability limit derived by conventional burner.

1. 서 론

Weinberg에 의해서 미연 혼합기를 예열함으로써 연료 공기비가 희박하여 통상의 조건에서는 연소시킬 수 없는 초희박 혼합기를 안정하게 연소시킬 수 있음이 보고되었고 이 원리에 기초하여 초희박 혼합기에서 초과 엔탈피(excess enthalpy) 연소 개념을 정립하였다^(1~5). 이 방법은 소위 열재순환법으로 인용되며 구체적으로 외부 열재순환법(external heat recirculation)과 내부 열재순환법(internal heat recirculation)으로 분류될 수 있다. 외부 열재순환법은 화염대 구조를 본질적으로 바꾸지 않고 열을 화염대 밖에서 귀환시키는 방법이다. 대표적인 예로는 Weinberg가 제안한 이중 나선형, 버너, 즉 Swiss roll burner가 가장 잘 알려져 있다. 내

부 열재순환법은 큰 열전도도를 갖는 다공성 블럭(porous block)을 직접 화염대 내에 삽입시켜 화염대 내부구조를 변화시킴으로서 초과 엔탈피 화염을 얻는 방법이다. 이 방법은 주로 Takeno⁽⁶⁾, Echigo⁽⁷⁾등에 의해서 이론적, 실험적 연구가 수행되었다. 복잡한 열교환기 및 큰 공간을 요구하는 외부 열재순환에 비해 내부 열재순환은 장치가 간편할 뿐 만 아니라 우수한 연소 특성 및 전열 특성으로 최근 많은 관심을 끌고 있다. 이에 관련된 일련의 연구는 1차원 층류 예혼합 화염으로 가정하여 수치 계산에 의해 화염대 구조를 예측하고 있는 정도이고 실험적으로는 온도 측정에 의해 연소반응대 유무를 확인하고 있는 정도이다. 따라서 본 연구에서는 4종류의 실험 모델을 채택하여 연소 반응용 다공성 블럭(combustive reacting porous block)내의 화염대 위치와 화염의 온도 분포, 화염이 안정화 되는 범위를 고찰하여 내부 열재순환 효과를 규명하고 예열용 다공성 블럭(preheating porous

*한국과학기술원 기계공학과

**정회원, 한국과학기술원 기계공학과

block)과 복사 차폐용 다공성 블럭(radiative insulating porous block)의 효과에 대한 연구와 초회박 혼합기나 저 발열량 연료의 연소 가능성을 제시하고 수치 계산에 필요한 자료를 제시하는 것이다.

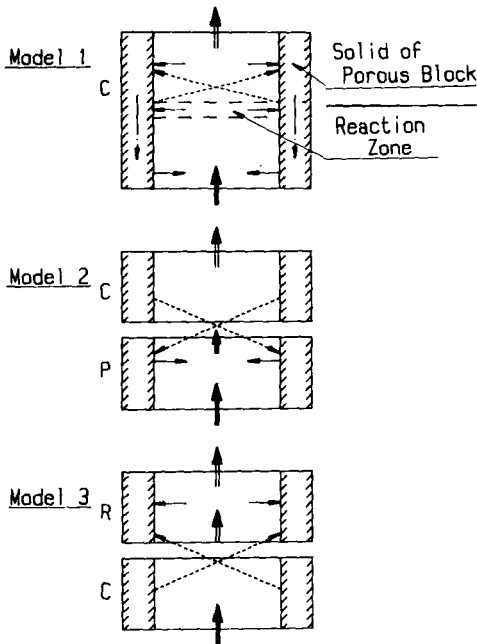
2. 실험모델

다공성 블럭 내에서 생성되는 연소 반응에 의한 발열량의 일부를 각종 열전달 기구를 통하여 반응대로 들어오는 예혼합기의 엔탈피를 높이기 위하여 본 실험에서는 Fig. 1과 같은 몇가지 실험 모델을 선정하여, 각종 열전달 방법에 따른 연소 상태를 계통적으로 조사하였다. 실험 모델1은 연소 반응용 다공성 블럭 내에 화염을 안정화 시킴으로써 반응열이 다공성 블럭으로 대류 열전달과 다공성 블럭과의 상호 복사 열전달에 의해 고온이 된 다공성

블럭으로 미연 혼합기(unburned mixture)를 유입시켜 다공성 블럭에서 다시 미연 혼합기로 대류 열전달에 의하여 미연 혼합기를 예열시키고자 한다. 실험 모델2는 연소 반응용 다공성 블럭의 상류단에 또 다른 다공성 블럭(예열용 다공성 블럭, preheating porous block)를 설치 함으로써 고온의 연소 반응용 다공성 블럭으로부터 복사 열전달에 의해 예열용 다공성 블럭을 가열시켜서 이 예열용 다공성 블럭을 통과한 미연 혼합기를 1차로 예열시키는 모델이다. 그리고 실험 모델 3은 연소 반응용 다공성 블럭의 하류단에 또 다른 다공성 블럭을 설치 함으로써 연소 반응용 다공성 블럭으로부터의 복사 열손실을 차폐시켜 주는 모델이다. 실험 모델 4는 모델 1, 2, 3를 조합한 모델이다.

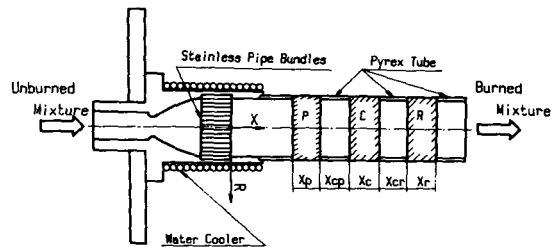
3. 실험장치 및 실험방법

압축기에 의해 공급된 공기는 개폐 밸브를 지나 공기 여과기의 조절기를 지나 오리피스에 유입된다. 특히, 연소실 내의 압력 변동에 따른 공급 유량의 변화를 억제하기 위하여, 본 실험 범위 내에서는 오리피스 목에서 임계속도가 되도록 하였다. 오리피스를 통과한 공기는 저장 탱크를 지나 공기속의 수분을 제거하기 위해 실리카겔 탱크를 지나 연료와 혼합된다. 연료는 상용 프로판 가스를 사용하여 개폐 밸브를 지나 조절기를 통과한 후 공기와 혼합된다. Fig. 2는 연소기의 개념도를 나타내고 있다. 미연 혼합기는 축소 확대 노즐을 지나며, 유동을 안정하게 하기 위하여 직경 3mm의 스테인레스 파이프의 다발을 삽입하였다. 그리고 그 주위에는 입구온도를 일정하게 하기 위해 수냉관을 설치하였다. 미연 혼합기는 예열용 다공성 블럭(P)을



- (C) : Combustive reacting porous block
- (P) : Preheating porous block
- (R) : Radiative porous block
- - - : Conductive heat transfer
- : Convective heat transfer
- ⋯ : Radiative heat transfer
- ➡ : Unburned mixture
- ⇒ : Burned mixture

Fig. 1 Experimental model



- P : Preheating Porous Block
- C : Combustive Reacting Porous Block
- R : Radiative Porous Block

Fig. 2 Schematic diagram of combustor

지나 연소 반응용 다공성 블럭(C)에서 연소 된 후 복사 차폐용 다공성 블럭(R)을 지나 배출된다. 그리고 다공성 블럭 사이의 화염의 거동을 관찰하기 위해 원통형 파이렉스 관을 사용하였다. 실험에서 사용된 다공성 블럭은 지름이 76mm이고 다공성 블럭의 단면적과 다공성 블럭를 통해서 혼합기가 유출할 수 있는 단면적과의 비(open frontal area)가 76%이고 1평방 인치당 400개의 장방형 격자(가로 1.3mm, 세로 1.3mm, 두께 0.2mm)로 구성되었다. 이 다공성 블럭의 재질은 SiO_2 49.7%, Al_2O_3 35.4%, MgO 13.5%로 구성된 코디어라이트(cordierite)이다. 이 코디어라이트의 사용 가능한 최고 온도가 1350°C 이므로 이 범위 내의 유량과 당량비에서 실험을 실시하였다. 본 실험에서 측정 온도와 비교하기 위한 기준 온도로서 단일 화염 온도를 계산하였다. 단일 화염 온도의 계산은 주어진 입력 조건(당량비, 입구온도, 압력)에 대하여 화학평형 코드를 이용하여 계산하였다. 온도 측정에서는 백금-백금 13%로듐(R type)과 크로멜-알루미늄(K type)의 열전대를 병용하였으며 열전대 선의 직경은 각각 0.1mm와 0.24mm이었다. 그리고, 다공성 블럭 내에서의 연소 가스 온도 및 블럭 자체

의 온도를 측정하기 위하여 열전대의 기하학적 구조의 검토가 요구된다. Fig. 3은 본 실험에서 검토한 2종류의 열전대의 구조를 나타낸 것이다. (a)와 같은 열전대를 하류측에서 상류측으로 삽입할 경우 화염대 근처에서 열전대 소선을 통한 열전도에 의한 열손실로 말미암아 비교적 정확한 화염대에서의 온도를 검지 할 수 없을 것으로 사료된다. 이것을 검토하기 위하여, (a)형의 열전대를 하류측에서 상류측으로 삽입할 경우(이하 하향 측정이라 칭함)와 상류측으로부터 하류 측으로 삽입한 경우(이하 상향 측정이라 칭함) 각각의 결과를 비교하였다. Fig. 4에서 알 수 있듯이 화염대 위치 및 중첩하여 측정한 온도 분포가 일치하지 않음을 알 수 있다. 열전대 소선을 통한 열전도 기구를 고려하면 계산에 의하여 양 결과를 수정 할 수 있으나, 본 실험에서는 유동의 특성상 반경(r) 방향으로 온도 구배가 작음을 감안하여 (b)와 같은 열전대를 제작하여, 열전대 점점 부근에서 급격한 온도 구배에 따른 측정 오차를 제거 하여 Fig. 5와 같이 상향 측정과 하향 측정 결과가 일치 함을 보였다. 한편 다공성 블럭 벽의 온도 측정은 (a)형태로 측정 구멍(가로 1.3mm, 세로 1.3mm) 내에 직접 열전대를

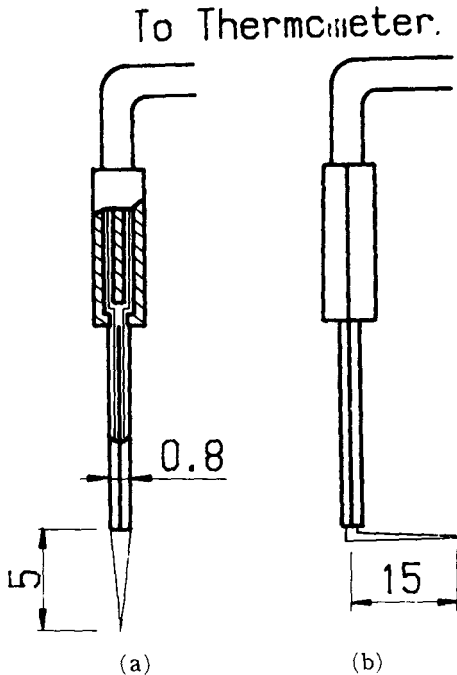


Fig. 3 Thermocouple type

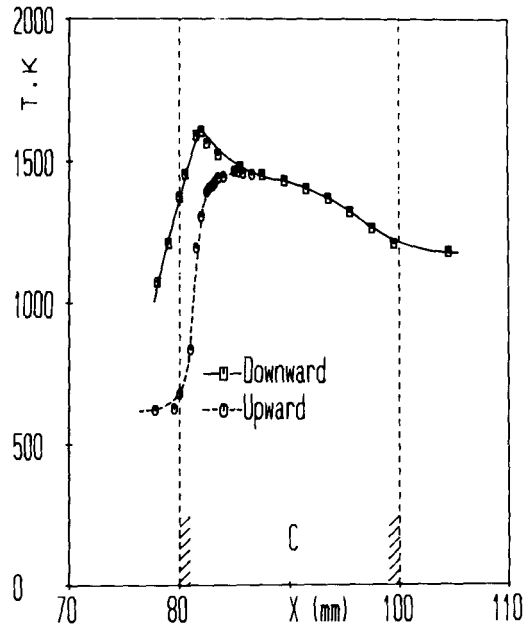


Fig. 4 Temperature distributions of two kinds of measurement directions, by using thermocouple type of (a).

삽입시킨 다음 내벽과 열전대 접점을 접촉 시킨 상태에서 상향 측정하였다. 또한 석영관으로 제작된 열전대 지지대를 이용하여 측정 구멍 내에 연소 반응이 일어나지 않게하여 다공성 블럭 벽의 온도를 측정하였다. 열전대의 접점은 세라믹으로 피복하였고 복사에 의한 열손실을 고려하지 않았다. 배기 가스의 미연 탄화 수소의 농도는 샘플링 프루브와 가스 크로마토그래프 (HP-5730A)를 사용하여 측정하였다. 샘플링 프루브는 내경 6.5mm의 석영관을 가공하여 흡입구 내경은 0.4mm로 하여 공기역학적으로 연소 반응이 동결되는 프루브를 제작하여 측정하였다⁽⁶⁾. 가스 크로마토그래프의 검출기는 F. I.D를 사용하였으며 분리관 내의 물질은 Porapak N을 사용하였고, 오븐 온도는 90°C에서 사용했으며 운반 가스로는 질소를 사용하였다. 농도 검정은 한국 표준 연구소에서 제작한 표준 가스를 사용하여 검정하였다. 산화 질소의 농도 측정은 화학 발광법식 NO/NOx 분석기를 측정하였다. 농도 검정은 일산화 질소 검정 가스를 이용하여 검정하였다. 각 농도 측정 시 분석할 시료 가스 속에 수분을 제거 시킨 건가스에 대한 측정을 위하여 입자 필터와 수분 응축기를 사용하여 입자 및 수분을 제거한 다

음 농도를 측정하였다.

4. 결과 및 고찰

Fig. 6은 모델 1에 대하여 연소기에 공급되는 전유량(Q_t)이 58 l/min이고 당량비(ϕ)가 0.57일때 다공성 블럭 내에서 연소 가스 온도(T)와 다공성 블럭의 온도(T_s)분포이다. $x=80\sim 100$ mm(그림에서 사선 부분)가 다공성 블럭을 나타낸다. 가스의 최고 온도는 단열 화염 온도(T_{af})를 초과함을 알 수 있고 화염대 후의 가스과 다공성 블럭의 온도는 거의 같으나 다공성 블럭의 하류($x=95$ mm)에서는 다공성 블럭의 온도가 연소 가스의 그것보다 낮아지기 시작 함을 알 수 있다. 이는 다공성 블럭으로부터 복사 열손실이 연소 가스의 그것보다 커서 일어나는 결과로 사료된다. 그리고 연소 반응열에 의해 다공성 블럭이 국부적으로 가열 될 것이며, 나아가 다공성 블럭 자체의 열전도 때문에 블럭 자체가 전체적으로 가열 될것으로 사료된다. 따라서 미연 혼합기와 접촉하는 블럭 입구의 온도가 상승하게 된다. 한편 블럭으로 유입되는 미연 혼합기는 이와 같이 가열되는 블럭으로부터 대류열전달에 의

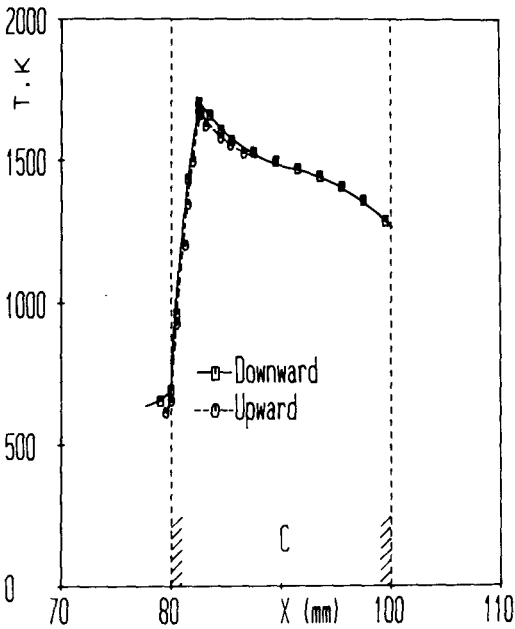


Fig. 5 Temperature distributions of two kinds of measurement directions, by using thermocouple type of (b).

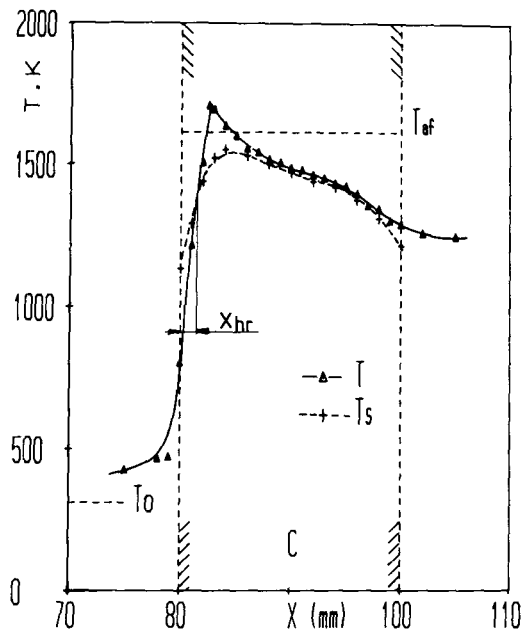
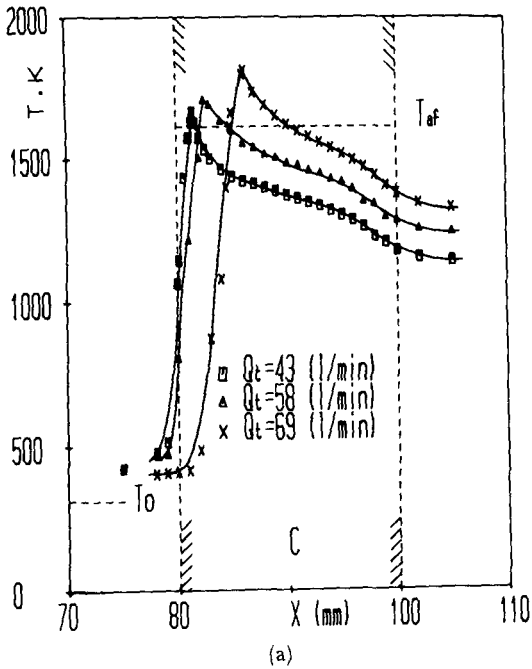
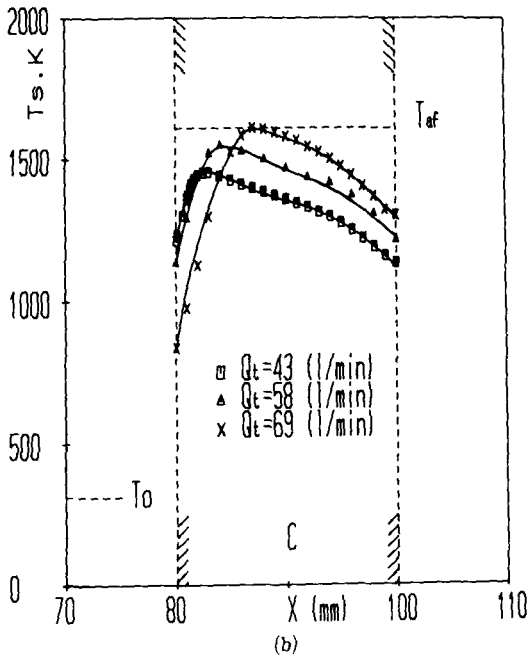


Fig. 6 Temperature profiles of the gas and block in the combustive reacting porous block (C), (Model 1) $Q_t=58$ l/min, $\phi=0.57$



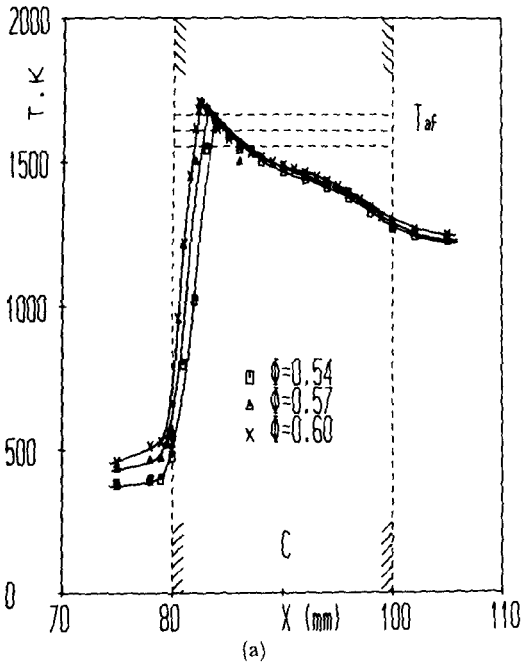
(a)



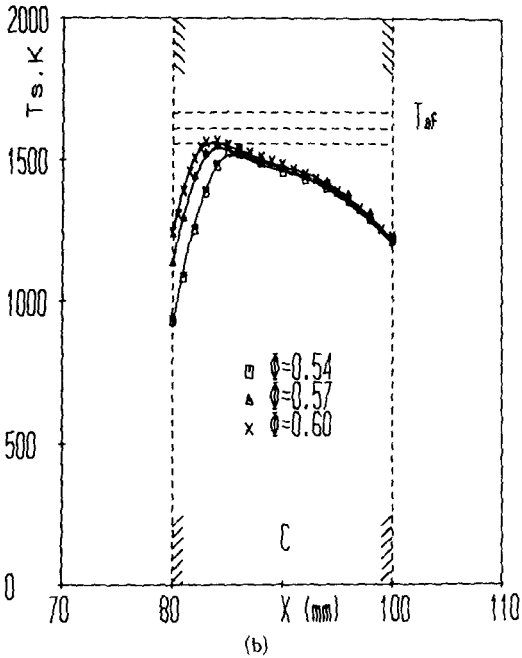
(b)

Fig. 7(a) Temperature profiles of gas in the combustive reacting porous block for various flow rate. (Model 1) $Q_t=43, 58$ and 69 (1/min), $\Phi=0.57$
 (b) Temperature profiles of porous wall in the combustive reacting porous block for various flow rate. (Model 1) $Q_t=43, 58$ and 69 (1/min), $\Phi=0.57$

해 예열된다. 따라서 초입에서는 미연 혼합기의 블럭으로 유입 온도가 블럭 온도보다 훨씬 낮지만 상기환파와 같이 예열 효과 때문에 미연 혼합기의 온도가 점차 상승된다. 이때 그림에서 보는 바와 같이, 화염대 앞 부분에서 다공성 블럭의 온도와 미연 혼합기의 온도가 같아지는 점이 있게 되는데 블럭 입구에서 이 지점까지의 거리를 편의상 열재순환대(heat recirculation zone, X_{hr})로 정의한다. 여기서 T_0 는 $X=0$, 즉 스테인레스 파이프 다발의 출구에서의 미연 혼합기의 온도를 나타낸다. Fig. 7(a)는 $\Phi=0.57$ 로 고정하고 전 유량 변화($Q_t=43$ 1/min, $Q_t=58$ 1/min, 그리고 $Q_t=69$ 1/min) 따른 연소 가스의 온도 분포이고, Fig. 7(b)는 (a)경우에 대한 다공성 블럭 벽의 온도 분포이다. 여기서 유량이 증가 할수록 화염의 최고 온도는 증가되고 그리고 반응대의 위치는 하류 방향으로 이동 함을 알 수 있다. 다공성 블럭이 존재하지 않을 경우 1차원 단일 예혼합 화염에서 유동 단면적이 일정할 때 질량 유속은 고유치(eigenvalue)이다. 그리고 본 실험에서는 당량비가 0.6이하의 희박한 조건에서 실험을 행하였으므로 이 희박한 당량비에서 연소 속도를 구한 실험 자료가 없기 때문에 다공성 블럭이 존재하지 않을 경우 고유치인 질량 유속을 예측 할 수 없었지만 다공성 블럭이 존재 함으로써 전유량이 변화함에 따라 질량 유속이 변화하여도 화염이 다공성 블럭 내에 존재 함을 알 수 있다. 즉 당량비가 0.57로 일정할때 전 유량은 43, 58 그리고 69(1/min)으로 변화할때 질량 유속은 각각의 경우에 대하여 0.192, 0.264 그리고 0.325(kg/m²s)로 변화하여 다공성 블럭에 화염이 존재함을 알 수 있다. 이것은 유량이 증가 함에 따라 화염은 다공성 블럭의 하류 측으로 이동하게 되나 열재순환대(X_{hr})의 증가로 즉, 다공성 블럭과 미연 혼합기 사이의 열교환 할 수 있는 구간의 증가로 더 많은 열이 미연 혼합기 측으로 귀환되므로 미연 혼합기의 온도 상승을 초래하여, 결과적으로 미연 혼합기의 연소 속도(burning velocity)의 증가를 가져와 다공성 블럭의 하류의 연소 속도와 유동 속도가 일치되는 위치에서 화염이 고정 됨을 알 수 있다. Fig. 8(a), (b)는 $Q_t=58$ 1/min으로 일정 할때 당량비 변화에 따른 연소 가스의 온도 분포와 다공성 블럭의 온도 분포를 나타낸 것이다. 당량비가 증가 하면 당연히 화염의 최고 온도는 상승되며 결과적으로 연소 속도의 증가를 가져온다. 이로 인해 화



(a)



(b)

Fig.8(a) Temperature profiles of porous wall in the combustive reacting porous block for various equivalence ratio. (Model 1) $Qt=58(1/min)$, $\Phi=0.54, 0.57$ and 0.60

(b) Temperature profiles of porous wall in the combustive reacting porous block for various equivalence ratio. (Model 1) $Qt=58(1/min)$, $\Phi=0.54, 0.57$ and 0.60

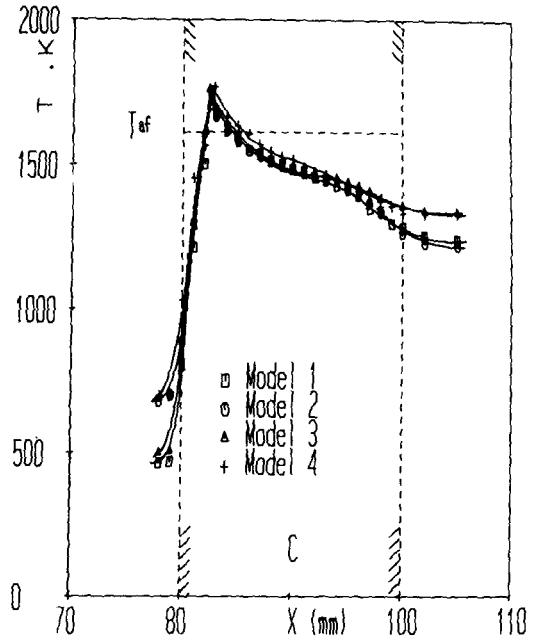


Fig. 9 Temperature profiles of gas in the combustive reacting porous block for each models. $Qt=58(1/min)$, $\Phi=0.57$

염대는 다공성 블럭의 상류 측으로 이동하여 미연 혼합기로의 열재순환량이 감소함으로써 연소속도와 유동속도가 균형을 이루는 연소 반응용 다공성 블럭의 상류에 화염이 고정 됨을 알 수 있다. Fig. 9 는 4가지 모델(모델 1($X_c=20mm$), 모델 2($X_c=20mm, X_p=20mm, X_{cp}=20mm$), 모델 3($X_c=20mm, X_r=200mm, X_{cr}=20mm$), 모델 4($X_c=20mm, X_p=20mm, X_r=20mm, X_{cp}=20mm, X_{cr}=20mm$))에 대하여 연소 반응용 다공성 블럭 내에서 연소 가스의 온도 분포를 비교한 것이다. 먼저 모델 2에 대해서 연소 반응용 다공성 블럭의 상류단에 예열용 다공성 블럭을 설치한 경우로 이 예열용 다공성 블럭과 미연 혼합기와의 열전달에 의해 미연 혼합기와의 열전달에 의해 미연 혼합기의 연소 반응용 다공성 블럭의 유입 온도가 모델 1에 비해 $100^{\circ}C$ 정도 상승 됨을 알 수 있다. 또 모델 3은 연소 반응용 다공성 블럭의 하류 측에 또 하나의 다공성 블럭을 설치 함으로써 연소 반응용 다공성 블럭으로부터 하류로의 복사 열손실을 작게하여 줌으로써 연소 반응용 다공성 블럭의 유동 방향으로의 온도 기울기를 작게하여 상대적으로 열손실을 감소시켜 화염대의 온도 상승을 초래한다. 모델 4

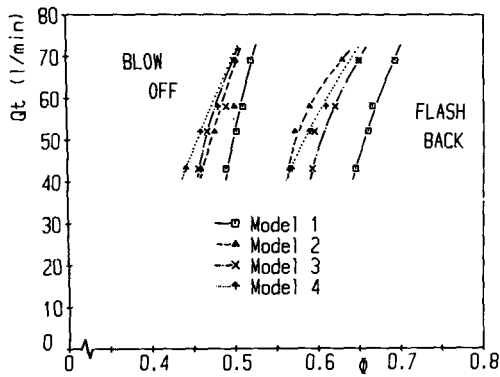


Fig. 10 Flash-back and blow-off limits for each models. $Q_t=58(1/min)$, $\phi=0.57$

는 모델 2와 모델 3의 중첩된 효과로 연소 반응용 다공성 블럭으로 유입되는 미연 혼합기의 온도 상승과 화염대 하류의 온도 기울기 감소로 화염대의 온도 상승을 초래함을 할 수 있다. Fig. 10은 이상 언급한 4가지 각각의 모델에 대하여 연소 반응용 다공성 블럭 내에 연소 반응대가 정상적으로 고정되는 영역을 유량과 당량비에 대하여 나타낸 것이다. 여기서 후래쉬 백(flash back)은 화염이 연소 반응용 다공성 블럭을 벗어나 연소 반응용 다공성 블럭의 상류, 즉 미연 혼합기 측으로 화염이 전파되는 것을 말하며 블로 오프(blow off)는 화염이 연소 반응용 다공성 블럭 출구의 가장자리부터 연소 반응용 다공성 블럭을 이탈하기 시작 할때로 정의한다. 어느 당량비 이하에서 각각의 모델에 대하여 일정한 당량비에서 유량이 증가하면 화염대로의 유입 속도가 증가되어 화염대를 하류측으로 이동시키면서 열재순환대(X_{hr})를 증가시켜 미연혼합기의 온도상승을 초래하지만 당량비가 낮기 때문에 단위 체적당 발생하는 반응열이 작아서 다공성 블럭을 가열 시켜주는 에너지의 양도 감소되어 증가된 유량과 균형을 이룰만큼 미연 혼합기의 온도를 상승시키지 못하기 때문에 블로 오프가 발생 됨을 알 수 있다. 모델 2는 모델 1에 비하여 상류로의 열손실을 예열용 다공성 블럭을 통하여 열재순환 시킴으로써 연소 반응용 다공성 블럭으로 유입되는 미연 혼합기의 온도를 증가시키기 때문에 더 낮은 당량비에서 후래쉬 백과 블로 오프가 발생 됨을 알 수 있다. 모델 3은 복사 차폐용 다공성 블럭의 효과에 의해 연소 반응용 다공성 블럭 하류의 온도를 상승시켜 블로 오프 한계를 저하 시킴을 알 수 있

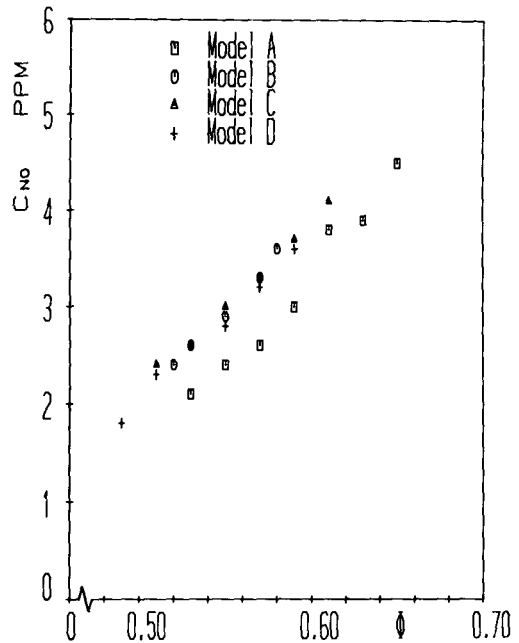


Fig. 11 CH Concentrations of exhaust gas for each models. $Q_t=58(1/min)$, $\phi=0.57$

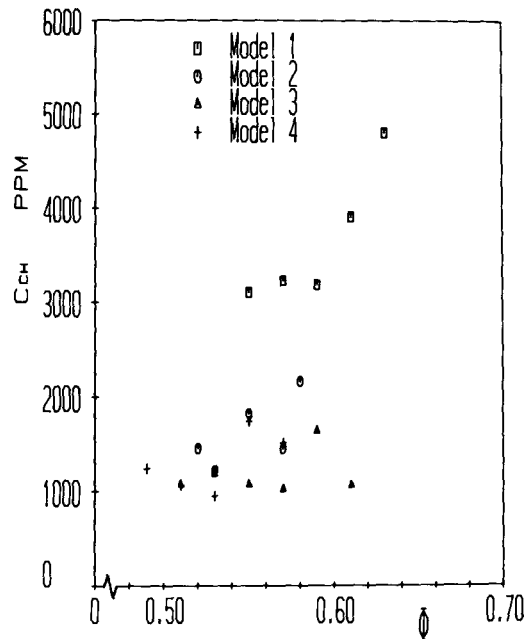


Fig. 12 NO Concentrations of exhaust gas for each models. $Q_t=58(1/min)$, $\phi=0.57$

다. 모델 4는 예열용 다공성 블럭과 복사 차폐용 다공성 블럭의 중첩 효과에 의해 보다 더 희박한 당량비에서 화염이 안정화 됨을 알 수 있다. Fig. 11은 각 모델에 대한 미연 탄화 수소의 양을 나타낸 것이다. 모델 1, 2에 비해 모델 3, 4의 미연 탄화 수소의 양이 상대적으로 적어짐을 알 수 있다. 이와 같은 결과로부터 복사 차폐용 다공성 블럭과 연소 반응용 다공성 블럭의 하류단에서 고온부 확장에 의한 완전연소에 기인 됨을 알 수 있다. 그러나 이들의 절대값은 매우 적은 양이므로 다공성 블럭에서의 연소는 거의 완전 연소임을 알 수 있다. Fig. 12은 각 모델에 대한 일산화질소의 양을 나타낸 것이다. 모델 1에 비해 모델 2, 3, 4에서 일산화질소의 양이 증가 됨을 알 수 있다. 일산화질소의 양은 강한 온도 의존 함수이기 때문에 예열용 다공성 블럭과 복사 차폐용 다공성 블럭을 설치함으로써 가스의 최고 온도상승과 고온부 확장에 의해 모델 1에 비해 모델 2, 3, 4의 일산화질소의 양이 증가 됨을 알 수 있다.

5. 결 론

연료 희박 혼합기를 연소시키고, 연소기구 해석을 위한 기초 연구의 데이터를 제공하기 위하여 다공성 블럭 내의 연소 반응대로부터 복사열전달을 포함한 각종 열전달 효과가 화염대에 어떤 영향을 끼치는가를 몇가지 유량 조건과 열전달 기구를 변화시킴으로써 조사하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 다공성 블럭 내에서 화염 최고 온도는 주변 온도를 기준으로 계산한 단열 화염 온도를 초과 함으로써 소위 내부 열재순환에 의한 초과 엔탈피 화염을 형성 시킬 수 있다.

(2) 예열용 다공성 블럭의 효과는 연소 반응용 다공성 블럭으로 유입되는 미연 혼합기의 온도를 증가 시킨다. 이는 연소 반응용 다공성 블럭으로부터 열복사에 의한 예열용 다공성 블럭의 가열과 미연 혼합기의 예열용 다공성 블럭과의 대류 열전달에 의한 것으로 판단된다. 복사 차폐용 다공성 블럭의 효과는 연소 반응용 다공성 블럭 내의 온도 기울기를 복사 차폐용 다공성 블럭을 설치하지 않았을 때 보다 완만하게하여 화염대로부터 열손실을 억제하

여 화염의 안정 영역을 연료가 희박한 영역으로 확장 됨을 알 수 있다.

(3) 예열용 다공성 블럭과 복사 차폐용 다공성 블럭을 설치함으로써 최고 화염 온도의 증가로 일산화 질소의 농도 증가를 초래하고 미연 탄화 수소의 양은 예열용 다공성 블럭과 복사 차폐용 다공성 블럭을 설치 함으로써 감소 된다.

(4) 프로판 가스의 가연 한계는 당량비 0.53정도이지만 본 실험에서는 유동 및 화염의 가시화와 측정을 위하여 충분히 단열시키지 못하였지만 복사 차폐용 다공성 블럭과 예열용 다공성 블럭을 설치함으로써 당량비 0.43까지 화염이 연소 반응용 다공성 블럭내에 안정 됨을 확인하였다. 따라서 본 실험에서 열손실을 극력 억제하면 가연한계의 확장은 어렵지않을것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- (1) S.A.Lloyd. F.J. Weinberg, 1971, "Combustion Temperature", Nature, Vol. 233, pp. 239~241.
- (2) S.A.Lloyd. F.J. Weinberg, 1974, "A Burner for Mixture of Very Low Heat Content", Nature, Vol. 251, pp. 47~49.
- (3) Y. Kotani, T. Takeno, 1982, "An Experimental Study on Stability and Combustion Characteristics of An Excess Enthalpy Flame", Nineteenth Symposium (International) on Combustion, pp. 1503~1509.
- (4) Y.Kotani, F.Behbahani, 1984, "An Excess Enthalpy Flame Combustor for Extended Flow Range", Twentieth Symposium (International) on Combustion, pp. 2025~2033.
- (5) T.Takeno, K.Sato, 1981, "A Theoretical Study on an Excess Enthalpy Flame", Eighteenth Symposium (International) on Combustion, pp. 465~472.
- (6) T.Takeno, K.Sato, 1979, "An Excess Enthalpy Flame Theory", Combustion Science and Technology, Vol. 20, pp. 73~84.
- (7) R.Echigo, M.Kurus, 1983, "Combustion Augmentation of Extremely Low Calorific Gases", ASME-JSME Thermal Engineering Joint Conference, Vol. 4, p. 99
- (8) R.M. Fristrom, 1965, "Flame Structure", McGraw-Hill, New York, pp. 180~183.