

# 다공성물질을 이용한 초단열 왕복식 연소장치의 특성에 관한 실험적연구

채 재 우, 이 강 주<sup>^</sup>, 심 민 섭<sup>\*</sup>  
인하대학교 기계공학과  
<sup>^</sup> 인하공업전문대학 기계과

## 요약

에너지 자원의 고갈과 환경오염 문제가 심각히 대두되고 있는 현재 액체연료에 비하여 청정 에너지인 가스의 연료화에 대한 연구는 과거 어느때보다도 그 중요성이 높게 인식되고 있다. 이에 본 연구에서 제시하는 연소기는 다공성 물질을 이용하는 연소장치로서 연소 경로를 바꾸어줌으로써 공기를 예열하는 효과를 극대화 시킴과 대류열 및 복사열을 방출하는 것이 큰 특징이다. 본 연구의 결과에 의하면 당량비의 감소에 따른 화염온도는 이론단열화염온도보다 높게 나타나서 당량비의 감소에 비례하여 더욱 좋은 효과를 얻을수 있었으며, 또한 왕복주기시간의 감소함에 따라 화염온도는 약간씩 증가하는 경향을 보여주었다. 이것들은 초회박 연소의 가능성을 보여준 것으로 저발열량의 연료의 연소로 인한 에너지 절약 또는 유기 화합물 즉, 페놀류나 알데히드류와 같은 공해물질들을 제거하는 연소메카니즘에 기여 할것이다.

## 1. 서론

우수한 에너지 자원의 고갈로 인한 에너지의 수급 불균형과 에너지 절약 및 불완전 연소로 인한 환경 오염 문제등이 크게 대두되고 있다. 특히, 환경보호면에서 각종의 산업체 및 광산등에서 배출되는 오염물질은 보통 초회박 상태로 배출되며, 이로인한 오염정도는 아주 심각한 상태이다.

이에 Weinberg<sup>(1)</sup>는 초회박 혼합기를 열재순환하여 연소시킬 수 있는 점에서 초과엔탈피 연소개념을 제안하였으며, 초과엔탈피 연소는 열재순환 및 열전달을 통하여 가능하다고 제시하였다. 이때, 열재순환법에는 크게 외부 열재순환법과 내부 열재순환법으로 구분이 된다. 외부 열재순환법은 배기가스의 열 에너지를 화염대로 회수하는 방법이고, 내부 열재순환법은 큰 열복사 및 열전도도를 갖는 다공성 물질(Porous Media)을 화염 내부에 직접 삽입하여 화염대 내부의 열순환을 변화시키는

방법이다. 이러한 개념중에 흥미 있는것 중의 하나가 내부 열재순환법으로 Takeno<sup>(2)</sup>등은 다공성 물질을 이용한 정적연소 현상의 이론적, 실험적 연구를 수행하여, 보통의 가연한계 이상의 회박 연소의 가능성을 제시하였으며, 이 가능성의 중요인자로 열복사등의 효과인 열순환이 매우 중요함을 보여 주었다. 또한, 내부 열순환법의 장점으로 우수한 배출특성과 적절한 다공성 물질의 설계를 통해서 화염 특성을 편리하게 제어할수 있음을 제시하였다. Kennel<sup>(3)</sup>등은 연소기 내부층의 온도와 연소 속도를 나타내는 두개의 대수 방정식을 사용하여 수치해석을 수행하였다. 특히, 식의 적용에 있어 서로 다른 압력과 예열효과에 대해서 복사배출에 의한 열손실을 언급하므로써 당량비 0.35까지 연소한계의 확장을 제시하였다. Bakin<sup>(4)</sup>등은 화염 확산속도가 압력과 당량비 그리고 기공율에 따라서 변화되는 상황을 실험 및 수치적으로 수행하여, 이것의 비례관계를  $Re = c \times Pe^3$ 으로 나타내었다. 여기서, Reynolds수는 화염 확산속도와 층류 연소속도와의 관계를 나타내며, Peclet수는 층류 연소속도에 기초하여 나타내며, c는 실험상수를 나타낸다.

따라서 본 연구에서는 다공성 물질로 부터 방출되는 대류열과 복사열을 효율적으로 이용하고자 지금까지 한방향의 미연 혼합가스의 유입경로를 양방향으로 변경시키고, 혼합기의 유속, 당량비와 왕복주기시간에 따른 열복사와 열전도에 의한 예열효과를 극대화 시킨후 연소시킴으로써 이론 단열화염온도보다 높은 온도에서 연소시키는 초단열 연소현상(Superadiabatic Combustion Phenomena)과 회박 연소의 영역을 규명하고자 한다.

## 2. 실험내용

### 2-1. 실험장치

본 실험에서 사용된 실험장치는 Fig. 1에 나타낸바와 같이 공기 공급장치, 연료 공급장치 및 연소기로 구성되어 있다. 공기 공급장치로는 공기압축기로부터 나온 공기를 압력조절기로 1차 조절되고 공기필터에 의해 수분 및 오일이 제거된다. 이를 통과한 공기는 저장탱크(Surge tank)와 2차 공기필터와 압력조절기를 거치면서 압력변동의 요인이 제거된후 면적식 유량계를 거쳐 예혼합실(Pre-chamber)에 유입된다. 연료는 상용 프로판 가스를 사용하였으며, 연료 공급장치에 있어서는 먼저, 연료탱크의 개폐밸브를 지나 압력조절기를 통과하고 유량계를 거쳐 예혼합실에 유입되어, 공기와 혼합한 후 연소기 내로 유입된다. 측정장치로는 화염의 온도를 측정하기위해 직경 0.25mm의 Pt-Pt/13%Rh의 PR열전대를 연소기에 총 11개를 축방향으로 설치하여 사용하였으며, 특히 연소기 중심을 기준으로 양방향에 12mm간격

으로 7개를 설치하여 화염의 확산됨을 확실히 보도록 하였다. 열전대의 지지와 화염대이후의 강한 복사열에 의한 측정오차를 방지하기 위해 Pt-Pt/13%Rh의 PR열전대에 세라믹재의 열전대용 절연관으로 피복하였다. 온도 측정기는 열전대에서 발생하는 기전력을 측정하는 디지털 온도계(Digital multi-thermometer, 2112A)를 사용하여 연속적으로 읽었다.

연소기의 구조는 원통형으로 직경 61mm, 두께 3.5mm, 길이 384mm인 스텐인레스강을 사용하였다. 한편, 연소기 내부에 채워진 다공성 물질의 재질은 알루미나( $Al_2O_3$ )로 직경 3.25mm, 기공율 34%, 녹는점 2305K, 열전도율 31 kcal/mh  $^{\circ}C$ 의 물성치를 가지고 있다. 또한 연소기의 열손실을 줄이기 위해 연소기 내부에 6mm, 외부에 38mm의 두께의 단열재(Ceramic blanket)로 둘러 쌓았다. 공기와 연료의 미연 혼합기의 안정성을 위해서 연소기 양끝단에 허니콤(honeycomb)을 설치 하였으며, 또한 혼합기의 유로를 변경하기 위해 솔레노이드 밸브(Solenoid Valves)를 장착 하였으며, 이 솔레노이드 밸브를 제어할수 있는 타이머를 장착하였다.

## 2-2. 실험 방법

초기 점화는 다공성 고체내에 있는 전기 점화봉에 의해 점화되었으며, 이때 시동점은 실험의 일관성을 부여하기 위해 미연 혼합가스량을 일정한 조건( $\phi=0.65$ ,  $U_m=34cm/sec$ )으로 하였다. Fig. 2에서 나타낸 바와 같이 경로 I(Path I)를 통해서 유입된 미연 혼합가스가 연소기의 중앙부분에서 연소된다. 이후에 발생된 배기가스는 경로 I를 따라 연소기 밖으로 배출된다. 이때 다공성 물질부분은 연소된 배기가스에 의해 예열되어 복사열을 방출하며, 일정시간후 장착된 솔레노이드 밸브에 의해 유로가 변경된다. 변경된 유로 즉, 경로 II(Path II)를 따라서 미연 혼합가스가 유입될때 이미 전단계에서 예열된 다공성 물질로 인하여 예열되어 보다 좋은 분위기에서 연소가 시작된다. 연소된후 배기가스는 전단계의 반대부분에 있는 다공성 물질을 순차적으로 가열한후 경로 II를 따라 연소기 밖으로 배출되며, 이와 같은 과정이 일정한 시간 간격으로 계속 반복된다.

## 3. 실험결과 및 고찰

Fig. 3은 왕복주기시간( $t_r$ ) 45초, 혼합기 유속( $U_m$ )은 34cm/sec로 일정하게 유지시키고, 당량비( $\phi$ )의 변화를 각각 0.15, 0.19, 0.26, 0.37에 따른 온도분포를 비교한 그림이다. 당량비의 증가는 연료의 증가를 나타내는것으로 당연히 최고온도는 수평한 점선으로 각각의 이론 단열화염온도보다 더욱 상승하고, 또한 중심축을 기준으

로 고온영역이 확장됨을 보여 주고있다. 이는 발열량이 증가함에 따라 상대적인 열 손실이 감소하여 다공성 물질을 통한 열재순환량이 증가하였기 때문이며, 혼합기의 유속이 화염확산속도보다 작으므로 화염의 확산을 유발하였다.

Fig. 4는 당량비를 0.26, 왕복주기시간은 45초로 일정하게 할때 혼합기의 유속을 각각 25cm/sec, 34cm/sec, 42cm/sec로 변화시킨 상태에 따른 연소기내의 온도분포이다. 혼합기의 유속의 증가에 따라 연소기내의 최고온도는 단열화염온도를 초과함을 알수있었다. 혼합기의 유속 증가에 따라 최고온도는 증가하는 경향을 보이며, 단열화염온도 윗부분의 고온 영역이 좁아지는 것을 볼수있었다. 이것은 증가된 유속이 화염대가 형성된 연소기의 중심에서 양쪽 끝단으로의 화염확산속도보다 빨라져서 끝단으로의 화염의 확산을 저지 시켜서 오히려 화염이 연소기의 중간 부분에 계속 고정되어 열의 확산을 감소시킨것이다.

Fig. 5는 당량비 0.26, 혼합기의 유속을 34cm/sec로 일정하게 할때 왕복주기시간을 각각 30초, 45초, 60초에 따른 온도 분포이다. 왕복주기시간의 감소에 따라 최고 온도는 증가함을 보이고 있다. 연소기에서 안정된 상태(steady state)에서는 유입열의 엔탈피(enthalpy)와 배출가스의 엔탈피는 서로 평형을 이루어야만 한다. 즉, 왕복주기시간의 감소는 배출가스의 엔탈피를 감소시킴으로써 열손실을 극소화 시킴으로 유입열의 엔탈피를 증가시킴으로 화염의 최고온도를 증가시키게 하는 것이다.

Fig. 6은 왕복주기시간을 45초로 일정하게 하고 당량비와 혼합기의 유속 변화에 따른 초과엔탈피 연소특성(Superadiabatic Combustion Characteristics)을 나타낸 것이다. 그림에서 당량비의 감소와 혼합기의 유속 증가에 비례하여 초과엔탈피 연소특성이 더욱 크게 증가를 하는 것을 볼수있다. 이것은 저당량비의 연소에서는 배기가스의 예열작용으로 인하여 미연혼합기의 엔탈피 증가의 효과가 고당량비보다 더욱 뚜렷한 것으로 보이며, 이것은 낮은 당량비의 연료를 연소할 수 있는 가능성, 즉 회박 연소의 가능성을 제시한것이라 볼 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서의 실험은 혼합기의 유속, 당량비와 왕복주기시간을 변화시켜가며 실험을 수행하였다.

① 고온 영역에서의 최고 온도는 유입되는 초기 미연 혼합가스의 온도를 상온( $T=298K$ )을 기준으로 하여 이론적으로 계산된 단열화염온도를 초과함으로써 초과엔탈피 연소현상이 나타남을 보여주었다.

② 당량비를 증가시키고, 혼합기의 유속을 증가시키며, 왕복주기시간을 줄일수

록 연소기 중심부에서의 고온 영역이 축소를 하며 최고온도가 증가를 하여 보다 좋은 초과엔탈피 연소현상을 보였다.

③ 프로판의 일반 가연한계는 당량비가 0.50로 알려져 있으나 본 실험에서는 이 보다 낮은 희박한 영역, 즉 당량비 0.15까지 확장하여 초희박 연소의 가능성을 제시하였다.

④ 초희박 연소특성은 미소량의 알데히드류와 페놀류등의 유독한 공해물질 제거와 희박하게 배출되는 폐기에너지의 재활용에 적용하여 에너지및 공해산업에 응용할 수 있을 것이다.

### 참고문헌

(1) Felix J. Weinberg, F.R.S., 1986, "Advanced Combustion Methods", Academic press, London, pp.237-232

(2) T.Takeno and K.Sato, 1979, "An excess enthalpy flame theory", Combustion Science and Technology, Vol.20, pp.73-84

(3) C.Kennel, J.Göttgens and N.Peters, 1990, "The basic structure of lean propane flames", Twenty-Third Symposium(International) on Combustion, The Combustion Institute, pp.479-485

(4) V.S.Babkin, A.A.Kokzhavin and V.A.Bunen, 1991, "Progation of premixed gaseous explosion flames in porous media", Combustion and Flames, Vol.87, pp. 182-190

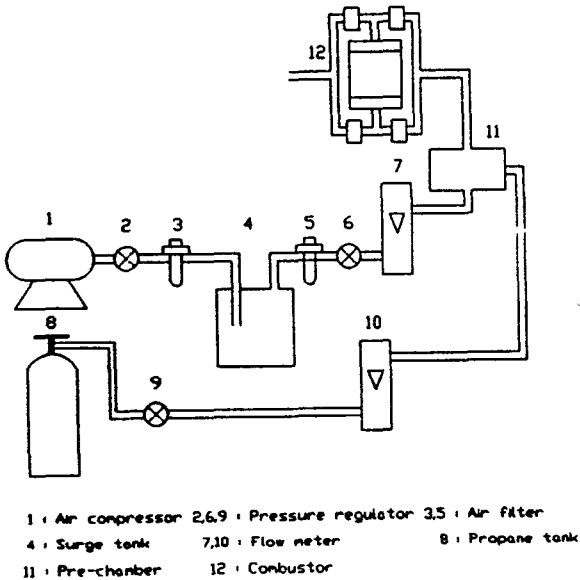


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

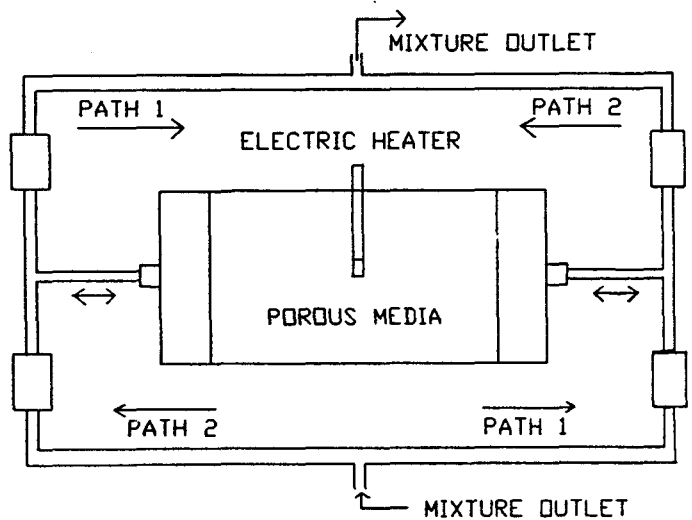


Fig. 2 Schematic diagram of flow meter

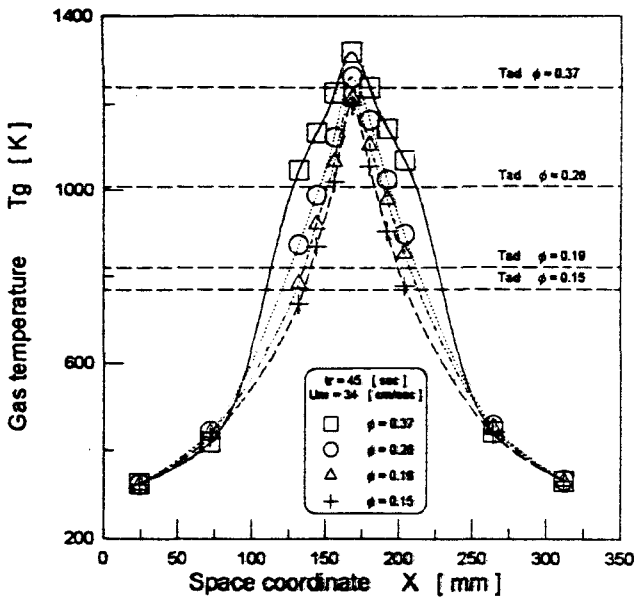


Fig. 3 Gas temperature profile with various equivalence ratio

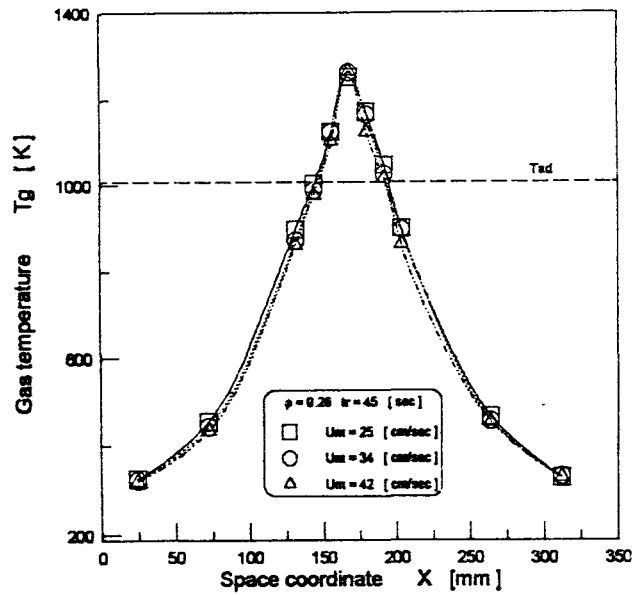


Fig. 4 Gas temperature profile with various mixing flow velocity

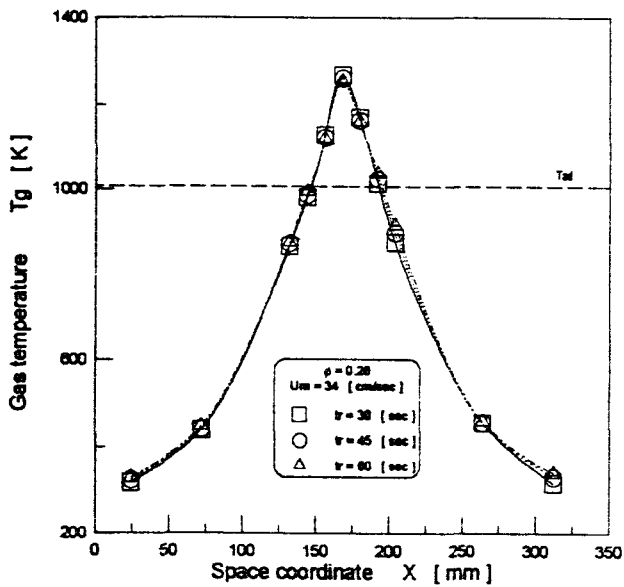


Fig. 5 Gas temperature profile with various reciprocating time

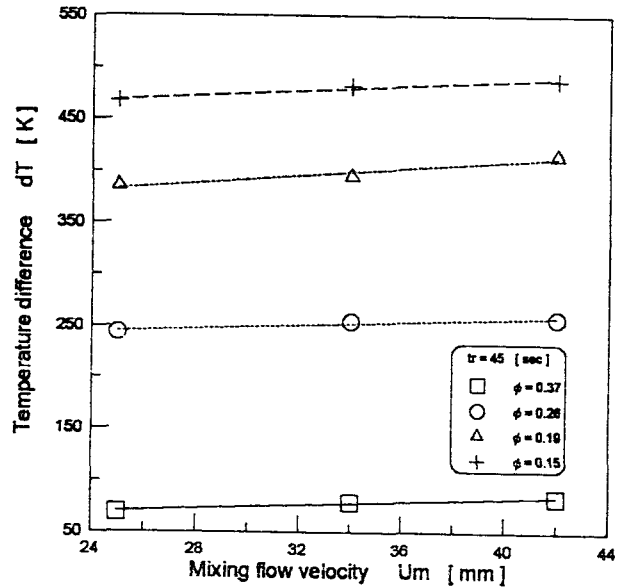


Fig. 6 Effect of superadiabatic combustion characteristics with various equivalence ratio