

## 다공성물질을 이용한 초단열 연소장치에서의 연소특성의 실험적 연구

### An Experimental Study on the Combustion Characteristics with Superadiabatic Combustor in Porous Media

채 재 우\*, K.V.Dobrego\*\*, 심 민 섭\*\*\*, 정 성 찬\*\*\*  
J.O.Chae, K.V.Dobrego, M. S. Sim, S. C. Chung

**Key words** : Excess Enthalpy Phenomena(초과 엔탈피 현상), Porous Media(다공성 물질) Super-lean Combustion(초희박 연소), Adiabatic Flame Temperature(단열 화염온도)

#### Abstract

Beacuse of the energy resources exhaustion, the aggravating environmental air pollution and the smoke phenomena etc., the importance of clean gas fuel compared with liquid fuel is highly considered in recent years. The combustion system which consists of porous media is actively studied as a new method for solving above problems. Therefore, excess enthalpy combustion using porous media was interested by many researchers and investigated through numerical and experimental analysis. In this study, the simplified combustor has the unique combustion characteristics of mixture gas preheated effect using radiative and convective heat energy by changing the flow passage of unburned gas with solenoid valves and has the intensive excess enthalpy phenomena. As the result of according to reduce equivalence ratio, flame temperature was remarkably higher than adiabatic flame temperature. This show the ability of super-lean combustion.

---

#### 기 호 설 명

$T$  : 온도 [K]  
 $dT$  : 온도차 [K]  
 $X$  : 열전대 [No.]  
 $Qt$  : 총유량 [l/min]  
 $Q$  : 공기유량 [l/min]  
 $\phi$  : 당량비  
 $Re$  : Reynolds 수  
 $Pe$  : Peclet 수  
 $c$  : 실험상수

- \* 정희원, 인하대학교 기계공학과 교수
- \*\* Heat & Mass Transfer Institute, Byelorussian Academy of Science
- \*\*\* 인하대학교 기계공학과 대학원

#### 1. 서 론

에너지 자원의 고갈로 인한 에너지의 수급 불균형과 에너지 절약 및 불완전 연소로 인한 환경오염문제등이 크게 대두되고 있다. 특히, 환경보호면에서 각종의 산업체 및 광산등에서의 배출오염물질은 보통 초희박 상태로 배출되며, 이로인한 오염정도는 아주 심각한 상태이다. 이와 같은 문제를 해결하기 위하여 최근에 초희박 가스를 연소시키는 방법을 고안하는 연구가 많은 연구자들에 의해서 수행되고 있다. 따라서 초희박 상태로 배출되는 대기 오염물을 일반적인 연소기술을 택하여 이같은 가스를 연소시키기 위해서는 큰 외부 에너지를 공급해야만 한다. 만약 이처럼 낮은 열용

량을 가지는 초회박 가스 자체로만 연소가 가능하게 할 수 있다면 모든 부가적인 에너지가 절약된다. 또는 이같은 회석 연료로부터 에너지 추출도 가능하게 될 것이다. 이같은 요구에 따라 초과엔탈피 연소개념에 기초를 둔 연소효율 증대가 제시되어 왔는데 이 연소에서 열은 고온의 연소가스로부터 미연혼합가스로 전달되어 연소기내의 자체 열전달을 촉진시켜 초회박 연료를 착화점에 도달시켜 연소시키는 방법을 연구하고 있다.

이에 Weinberg<sup>(1-3)</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 열에너지를 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 있는 것 중의 하나가 내부 열재순환법으로, Takeno, Echio<sup>(4-8)</sup> 등은 다공성 물질을 이용한 정적연소현상의 이론적, 실험적 연구를 수행하여, 보통의 가연한계 이상의 회박연소의 가능성을 제시하였으며, 이 가능성의 중요인자로 열복사등의 효과인 열순환이 매우 중요함을 보여 주었다. 또한, 내부 열재순환법의 장점으로 우수한 배출특성과 적절한 다공성 물질(Porous Media)의 설계를 통해서 화염 특성을 편리하게 제어할 수 있음을 제시하였다.<sup>(7)</sup> Bakin<sup>(9-10)</sup> 등은 화염전파속도가 압력과 당량비 그리고 기공율에 따라서 변화되는 상황을 실험 및 수치적으로 수행하여, 이것의 비례관계를  $Re = c \times Pe^3$ <sup>(10)</sup>으로 나타내었다. 여기서, Reynolds 수는 화염전파속도와 층류 연소속도의 관계를 나타내며, Peclet 수는 층류 연소속도에 기초하여 나타내며,  $c$ 는 실험상수를 나타낸다.

따라서 본 연구에서는 다공성 물질로부터 방출되는 대류열과 복사열을 효과적으로 이용하고자 지금까지 한방향의 미연 혼합가스 유입경로를 양방향으로 변경시키므로써, 열복사와 열전도에 의한 열효과를 극대화 시킨후 연소시킴으로써 이론단 열화염온도보다 높은 온도에서 연소시키는 초단열 연소현상(Super Adiabatic Combustion Phenomena)

과 회박연소영역에서의 초과엔탈피 연소현상을 혼합기의 조건에 따라 규명하고자 한다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

본 실험에서 사용된 실험장치는 Fig.1에 나타낸 바와 같이 공기 공급장치, 연료 공급장치 및 연소기로 구성되어 있다. 공기 공급장치로는 공기 압축기로부터 나온 공기를 압력조절기로 1차 조절되고 공기 필터에 의해 수분 및 오일이 제거된다. 이를 통과한 공기는 저장탱크(Surge Tank)와 2차 압력 조절기를 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 예혼합실(Pre-Chamber)에 유입되어, 공기와 혼합한후 연소기 내로 유입된다. 측정장치로는 화염대와 화염대 전·후의 가스 온도를 측정하기 위해 직경 0.25mm의 Pt-Pt/13%Rh의 PR열전대를 연소기의 축방향에 48mm의 등간격으로 7개를 설치하여

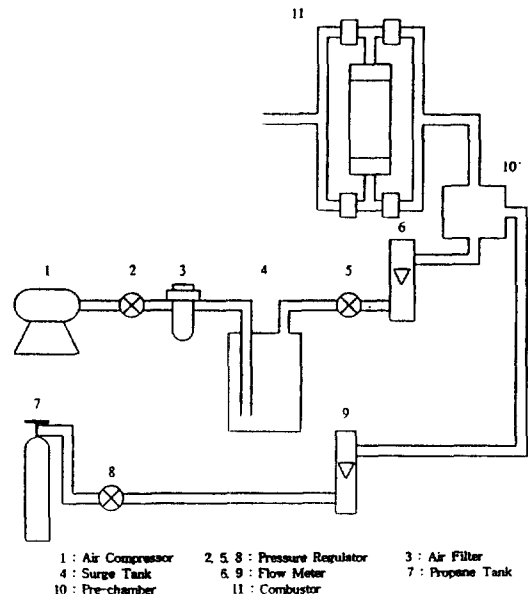


Fig.1 Schematic Diagram of Experimental Apparatus

사용하였으며, 또한 열전대의 지지와 화염대이후의 강한 복사열에 의한 측정오차를 방지하기 위해 Pt-Pt/13% Rh의 PR열전대에 세라믹재의 열전대용 전 열관으로 피복하였다. 온도 측정기는 열전대에서 발생하는 기전력을 측정하는 디지털 온도계(Digital Thermometer, 2112A)를 사용하였다.

본 연구에 사용된 연소기의 구조는 Fig2에 나타내었다. 연소기의 구조는 원통형으로 직경 61mm, 두께 3.5mm, 길이 384mm인 스테인레스강을 사용하였다. 한편, 연소기 내부에 채워진 다공성 물질(Porous Media)의 재질은 알루미나( $Al_2O_3$ )로 직경 3.25mm, 기공율(Porosity) 34%, 녹는점 2305K, 열전도율(Thermal Conductivity)  $31kcal/mh^{\circ}C$ 의 물성치를 가지고 있다. 또한 연소기의 열손실을 줄이기 위해 연소기 내부에 6mm, 외부에 38mm의 두께의 단열재(Ceramic Blanket)를 사용하였다. 공기와 연료의 미연 혼합기의 안정성을 위해서 연소기 양 끝단에 하니컴(Honeycomb)을 설치하였으며, 또한 혼합기의 유로를 변경하기 위해 솔레노이드 밸브(Solenoid Valves)를 장착하였으며, 이 솔레노이드 밸브(Solenoid Valves)을 제어할 수 있는 타이머를 장착하였다.

2.2 실험 방법

초기 점화는 다공성 고체내에 있는 전기 점화봉에 의해 점화하였으며, 이때 시동점은 실험의 일관성을 부여하기 위해 미연 혼합가스량을 일정한 조건( $\phi=0.65$ )으로 하여, 점화 시킨후 본 실험을 실시하기 전의 정상 상태는 외부에 유출되는 기연 연소가스의 열손실과 미연 혼합 가스의 예열 즉, 내부 열재순환량이 균형을 이루는 것으로 연소기 양끝의 온도가 일정한 상태를 나타낸 이후에 본 실험에 들어갔다. 이때 미연 혼합가스의 유로를 변경시키는 기준은 60초로 일정한 시간간격이 경과 된후에 미연 혼합가스를 반대 방향으로 변경시킨다. 즉, Fig3에서 나타낸 바와 같이 경로 I(Path I)를 통해서 유입된 미연 혼합가스가 연소기의 중앙부분에서 연소된다. 이후에 발생된 배기가스는 경로 I(Path I)를 따라 연소기 밖으로 배출된다. 이때 다공성 물질(Porous Media)부분은 연소된 배기가스에 의해 예열되어 복사열을 방출하며, 일정시간후 장착된 솔레노이드 밸브(Solenoid Valves)에 의해 유로가

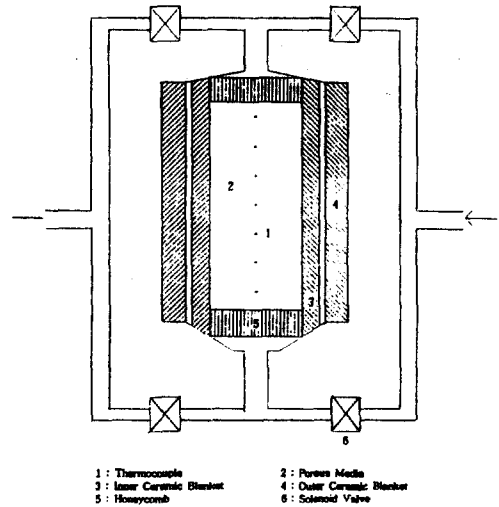


Fig.2 Schematic Diagram of Combustor

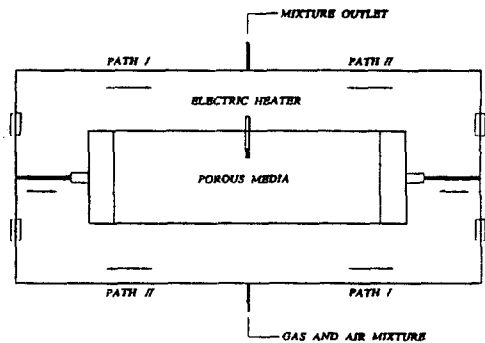


Fig.3 Schematic Diagram of Flow System

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 연소기 내부를 순차적으로 가열한후 경로 II(Path II)를 따라 연소기 밖으로 배출되며, 이와같은 과정이 일정한 시간 간격(60Sec)으로 계속 반복된다. 본 실험장치에서 유로의 변경은 연소기 전·후면에 각각 2개씩 총 4개의 솔레노이드 밸브(Solenoid Valves)를 장착하여 혼합가스의 흐름을 전기신호로서 제어하도록 하였다. 본 실험은 공기의 유량을 각각 20, 22, 25l/min로 고정하여 연료의 유량을 변화시킨다. 즉, 당량비를 변화시켜가며 실험을 수행하였

으며, 가스 온도 측정은 디지털 온도계로 연속적으로 읽었다. 최종적인 온도는 유동 변경으로 발생하는 온도변화를 고려한 범위내에서 안정적인 때 실험을 종료하였고, 평균온도로 정하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 연소기내의 온도분포

본 실험은 연소기구의 연소특성을 파악하기 위한 실험으로서, Fig.4는  $Q_f=25.34\text{l/min}$ ,  $\phi=0.32$ 일 때 얻어진 연소기내부의 전형적인 온도 분포를 나타내고 있다. Fig.4에서 나타낸바와 같이 연소기의 중간 부분이 최고 온도를 나타내며, 이를 중심으로 양쪽에 대칭적인 현상을 보여주고 있다. 수평한 점선은 연소기내로 들어오는 초기 미연 혼합가스의 온도( $T_0=298\text{K}$ )를 기준으로 계산된 단열화염온도(Adiabatic Flame Temperature,  $T_{ad}$ )를 나타낸 것으로 실험에서 측정된 최고 온도가  $T_{ad}$ 에 비해서 약 197 K를 초과됨을 알 수 있었다. 이 결과로 인해 화염대가 연소기의 중간 부분에 생성되었음을 알 수 있었다. 또한, 배기가스의 온도는 1번과 7번 열전대에서 측정된 온도가 거의 상온과 유사한 온도를 나타내는 것으로 보아, 연소후 배출되는 배기가스는 큰 열전도도를 갖는 주위의 다공성 물질에 열이 전달되었음을 알 수 있으며, 다공성 물질에 전달된 열은 유로변경후 들어오는 상온의 미연 혼합가스를 예열한다. 예열된 미연 혼합기가 화염대로 유입을

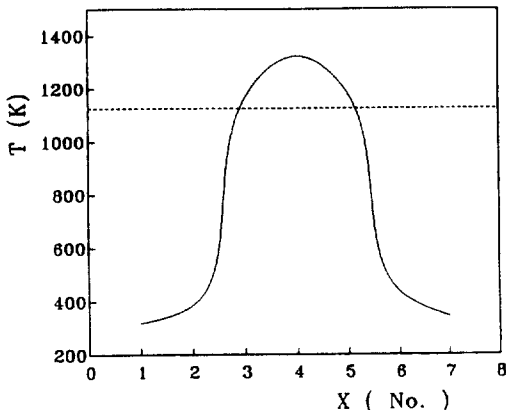


Fig.4 Typical Temperature Profiles of Combustor. ( $Q_f=25.34\text{l/min}$ ,  $\phi=0.32$ )

하여 보다 좋은 연소 분위기에서 연소가 이루어져 본 실험의 근본 목적인 내부 열재순환을 일으킴으로써 초과엔탈피 연소현상이 발생됨을 보여 주었다.

#### 3.2 당량비의 변화에 따른 온도분포

Fig.5는 공기의 유량[(a) $Q_a=20\text{l/min}$ , (b) $Q_a=22\text{l/min}$ , (c) $Q_a=25\text{l/min}$ ]을 일정하게 유지시키고, 연료의 변화에 따른 즉, 당량비의 변화를 각각  $\phi=0.24$ ,  $\phi=0.32$ ,  $\phi=0.43$ 에 따른 온도분포를 비교한 그림이다. 당량비가 증가한다는것은 연료의 증가를 나타내므로, 최고온도가 상승하고 또한 중심축을 기준으로 고온영역이 확장됨을 보여 주고 있다. 게다가 열전대 3번과 5번 위치에서의 온도역시 당량비의 증가에 비례하여 증가하였다. 이것은 당량비의 변화에 따른 유속의 증가는 화염전파속도(Flame Propagation Velocity)의 증가보다 작아서 연소기 내부에서의 열이 연소기 양끝단으로 전파되는 것이다.

#### 3.3 유량의 변화에 따른 온도분포

Fig.6는 당량비[(a) $\phi=0.24$ , (b) $\phi=0.32$ , (c) $\phi=0.43$ ]를 일정하게 할 때 유량의 변화상태에 따른 연소기내의 온도분포이다. 각 그림에서 공통적으로 유량의 증가에 따라 연소기내의 최고온도는 수평한 점선으로 나타내는 단열화염 온도를 Fig.6(a)에서는 최고온도가 약 300K, Fig.6(b)는 최고 약 190K, Fig.6(c)는 최고 약 8K 초과함을 알 수 있었다. 또한 열전대 3, 5번의 온도는 유량의 증가에 따라 감소하는 경향을 보여줌으로써 고온 영역이 좁아지는 것을 볼 수 있었다. 이것은 증가된 유량의 유속이 화염대가 형성된 연소기의 중심에서 양쪽 끝단으로의 화염확산속도보다 더욱 빨라서 끝단으로의 화염의 확산을 저지 시켜서 오히려 화염이 연소기의 중간 부분에 계속 고정되어 열의 확산을 감소시킨 것이다.

#### 3.4 초과엔탈피 연소특성의 경향

Fig.7은 공기의 유량을 일정하게 할 때 당량비의 변화에 따른 초과엔탈피 연소특성(Super Adiabatic Combustion Characteristics)을 나타낸 것이다. Fig.7에서 보여준바와 같이 당량비의 감소에 따른 초과엔탈피 연소특성이 더욱 크게 증가를 하는 것으로

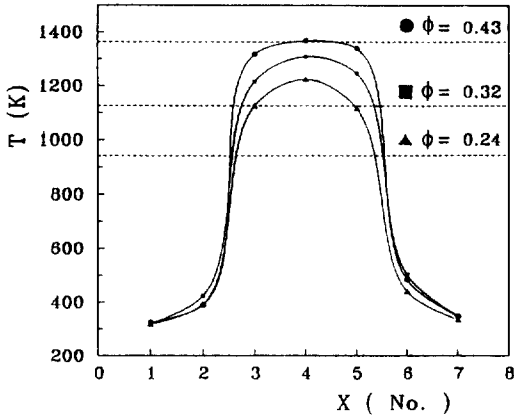


Fig.5(a) Temperature Profiles of Combustor with Various Equivalence Ratio( $Q_a=20$ l/min)

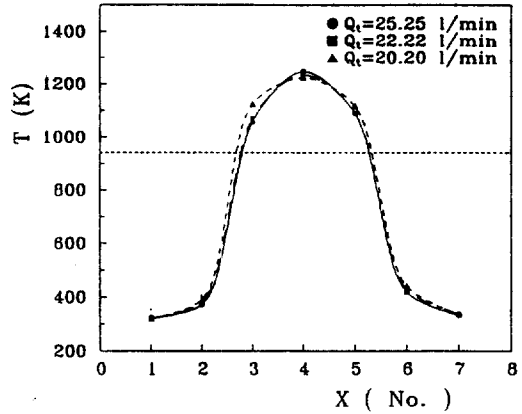


Fig.6(a) Temperature Profiles of Combustor with Various Flow Rate( $\phi=0.24$ )

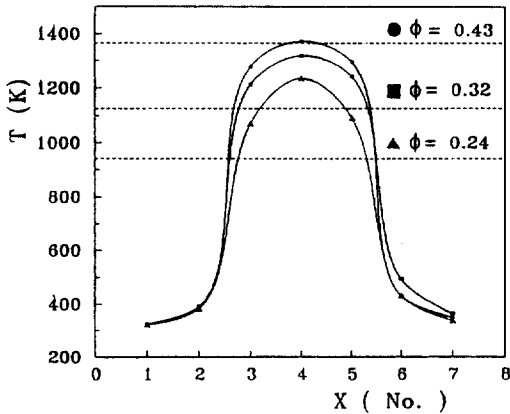


Fig.5(b) Temperature Profiles of Combustor with Various Equivalence Ratio( $Q_a=22$ l/min)

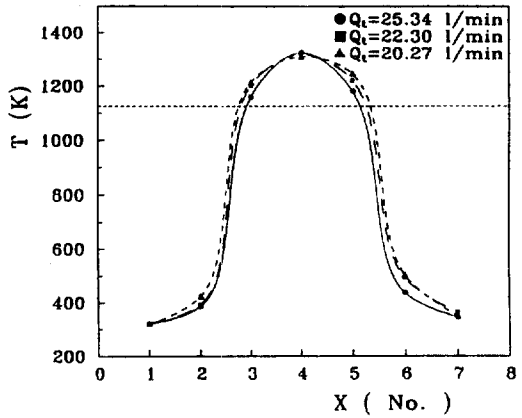


Fig.6(b) Temperature Profiles of Combustor with Various Flow Rate( $\phi=0.32$ )

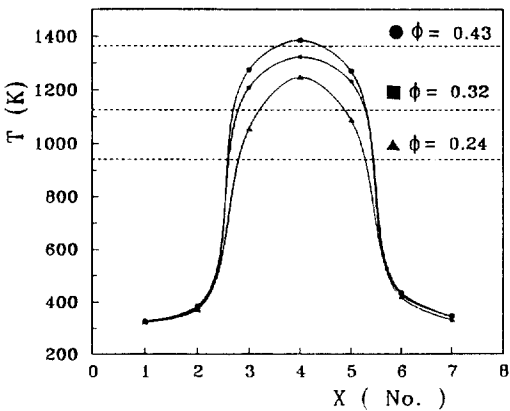


Fig.5(c) Temperature Profiles of Combustor with Various Equivalence Ratio( $Q_a=25$ l/min)

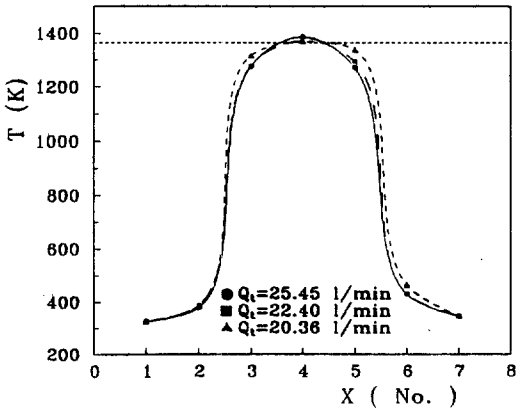


Fig.6(c) Temperature Profiles of Combustor with Various Flow Rate( $\phi=0.43$ )

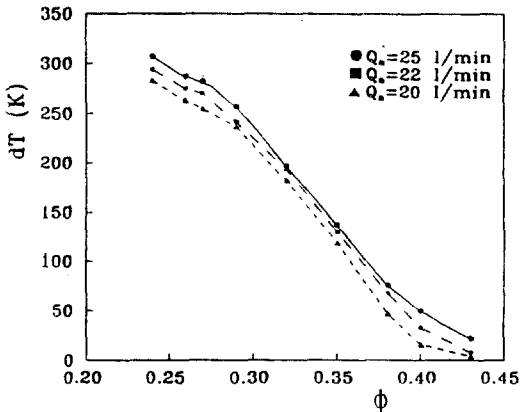


Fig.7 Effect of Superadiabatic Combustion Characteristics with Equivalence Ratio

나타났다. 이것은 저당량비의 연소에서는 배기가스의 예열작용으로 인하여 미연혼합기의 엔탈피 증가의 효과가 고당량비보다 더욱 뚜렷한 것으로 보이며, 이것은 낮은 당량비의 연료를 연소할 수 있는 가능성, 즉 회박연소의 가능성을 제시한 것이라 볼 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구는 단순화된 연소기를 이용하여 공기의 유량을 각각 20, 22, 25l/min로 고정하여 당량비를 변화시켜가며 실험을 수행할 때 열전도도가 뛰어난 다공성 물질의 삽입과 이 물질로 인하여 발생하는 대류 및 복사 열전달 효과에 의한 미연혼합기의 예열효과를 극대화시킴으로써 연소기의 중간부분에 화염대가 형성하면서 연소기 양끝으로 대칭적인 분포를 보여 주었다. 고온 영역에서의 최고 온도는 유입되는 초기 미연 혼합가스의 온도를 상온( $T=298K$ )을 기준으로 하여 이론적으로 계산된 단열 화염온도를 초과함으로써 초과엔탈피 연소현상이 나타남을 보여주었다. 공기 유량을 일정하게 하고 당량비의 변화에 따른 온도분포 변화는 고온 영역이 당량비의 증가한것과 마찬가지로 증가를 하였으나, 당량비를 일정하게 하고, 유량을 변화시킴에 따라 고온영역이 축소를 하여 최고 온도가 증가를 하여 보다 좋은 초과엔탈피 연소현상을 보였다.

또한, 프로판의 일반 가연한계는 당량비가 0.50로 알려져 있으나, 본 실험에서는 이보다 낮은 회박한

영역, 즉, 당량비 0.24까지 확장하여 초회박 연소의 가능성을 제시하였으며, 이 효과를 이용하여 공해물질인 유기물 구체적으로 니켈도금시 환원제로 쓰이는 알데히드류와 페놀류등의 유독하고 회박한 공해물질 제거와 폐기에너지의 재활용에 적용하여 에너지 및 공해 산업에 응용할 수 있을 것이다.

#### 후 기

본 연구는 인하대학교 1992학년도 연구비 지원에 의하여 수행되었기에 관계자 여러분께 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

1. Weinberg, F.J., 1971, "Combustion temperature : The future ? ", Nature, Vol.233, pp.239-241.
2. Lloyd, S.A. and Weinberg, F.J., 1974, "A burner for mixtures of very low heat content", Nature Vol.251, pp.47-49
3. Felix J. Weinberg, F.R.S., 1986, "Advanced Combustion Methods", Academic press, London, pp. 237-232
4. T.Takeno and K.Sato, 1979, "An excess enthalpy flame theory", Combustion Science and Technology, Vol.20, pp.73-84
5. Y. Kotani, H.F.Behbahani and T.Takeno, 1984, "An excess enthalpy flame combustion for extended flow ranges", twentieth Symposium(International) on Combustion, The Combustion Institute, pp.2025-2033
6. T.Takeno, K.Sato and K.Hase, 1981, "A theoretical study on an excess enthalpy flame", Eighteenth Symposium(International) on Combustion, The Combustion Institute, pp.465-472
7. Y.Kotani and T.Takeno, 1982, "An experimental study on stability and combustion characteristics of an excess enthalpy flame", Nineteenth Symposium(International) on Combustion, The Combustion Institute, pp.1503-1509
8. K.Hanamura, Y.Yoshizawa and R.Echigo, 1984, "Analytical and experimental studies on radiative

- propagation in porous media with interal heat generation", Proceeding of the 8th International Heat Transfer Conference, San Francisco, Vol.II, pp.827-832.
9. V.S.Babkin, G.I.Drobishevich and Yu.Potylnikov, 1982, "On mechanism of combustion waves propagation in porous media", Doklady an USSR, Vol.265, No.5, pp.1157-1161
10. V.S.Babkin, A.A.Kokzhavin and V.A.Bunen, 1991, "Propagation of premixed gaseous explosion flames in porous media", Combustion and Flames, Vol.87, pp.182-190