

# 세라믹 가스 터빈용 촉매연소기의 연소특성 Combustion Characteristics of a Catalytic Combustor for an Automotive Ceramic Gas Turbine

김 영일\*  
Young-Il Kim

## <Abstract>

In the catalytic combustor, combustion characteristic and deterioration of catalysts were affected by non-uniformity of pre-mixed gas. Therefore, formation of uniform pre-mixed gas is one of important subjects. In this study, the effect of uniformity and non-uniformity of pre-mixed gas supplied to the catalyst was examined to clarify reaction acceleration and combustion characteristic of the catalytic combustion. It was clarified that static mixer or vaporizer tube length of about 150mm and weak swirl to a combustion air were effective expedient to make uniform pre-mixed gas. And catalytic inlet temperature needs more than 600°C with rich pre-mixed gas to active reaction.

**Key words** : automotive ceramic gas turbine, uniform, mixture formation, catalytic combustion

## 1. 서 론

고효율성과 저공해성 및 다중연료성에 뛰어난 세라믹 가스 터빈(CGT)은 장래의 엔진으로서 유망시되고 있다. 일본 잔오차연구소에서는 질소 산화물(NOx)의 저감을 위해 예증발 예혼합 희박연소 방식의 연소기를 사용한 자동차용 CGT의 연구 개발이 행하여지고 있다<sup>1,2)</sup>.

촉매를 이용한 연소 방식은 초저 NOx화가 가능한 저공해 연소기로써의 높은 잠재력을 갖고 있다<sup>3,4,5)</sup>.

촉매 연소기에서는 촉매에 공급되는 예혼합기의 균일성이 연소 특성이나 촉매의 내구성에 영향을 미치기 때문에, 균일한 예혼합기를 형성할 필요가 있다. 저자등은 예혼합기의 농도분포가 촉매연소 특성에 미치는 영향을 보고한바 있다<sup>6)</sup>.

본 연구에서는 촉매 연소기에 있어서, 예혼합기를 형성하는 여러 가지 요소가 예혼합기의 균일성이나 연소 특성에 미치는 영향에 대해 조사하여, 촉매연소기 설계의 기초자료를 얻었기에 보고한다.

\*정회원, 대천대학 기계자동차학부 전임강사 · 공학석사  
武藏工業大學 大学院 卒業  
355-830 보령시 주포면 관산리  
E-mail yikim@dcc.ac.kr

Full-time Instructor, Dept. of Mechanical Automotibe  
Eng. Daecheon College, M.Eng.  
Graduate from Musashi Institute of Technology  
Jupomyun, Boryungsi, Chungnam, 355-830, Korea

## 2. 실험 장치 및 방법

실험 장치의 개략도를 Fig. 1에 나타낸다. 예증발관(豫蒸發管)과 균일혼합기(均一混合器), 정류기(整流器) 및 디퓨저와 저온 활성이 뛰어난 촉매 1단으로 구성되어 있다. 이것들의 구성은 임의로 변경할 수 있는 구조로 하여, 예혼합기의 농도와 온도 및 속도등의 분포특성이 촉매 연소특성에 미치는 영향을 조사했다. 디퓨저는 관벽으로부터 흐름의 세퍼레이션(separation)을 방지 하기 위해 14°의 확대각을 주었다. 촉매는 셀밀도가 200cell/in<sup>2</sup>, 두께 20mm, 직경 100mm의 Pd/SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 계의 Honeycomb monolith type을 사용했다. 균일 혹은 불균일 예혼합기는 균일 혼합기의 탈착에 의해 형성하였다. 또 예혼합기 농도 분포의 불균일성의 조건에서는, 예증발관 길이(L<sub>v</sub>)를 50mm와 150mm로 변경해 그 영향을 조사하였다. 흐름의 선회 강도는 정류기를 떼고 상류측의 가변블록swirler를 사용해 조절하였다. 촉매의 연소 특성은 촉매에 유입되는 예혼합기의 온도나 농도등의 특성에 의해 변화하기 때문에, 촉매 입구의 예혼합기 농도와 온도 및 촉매 출구에서의 온도를 측정하였다. 촉매 입구면의 예혼합기의 농도분포의 측정은, 촉매입구면의 수평·수직방향 9곳에서 채취한 예혼합기를 촉매 반응기로 반응시켜 생성가스로 변환시킨 다음, 그 생성가스를 Gas chromatograph로 분석해 산소농도로 부터 예혼합기의 농도를 산출하는 방법<sup>7)</sup>

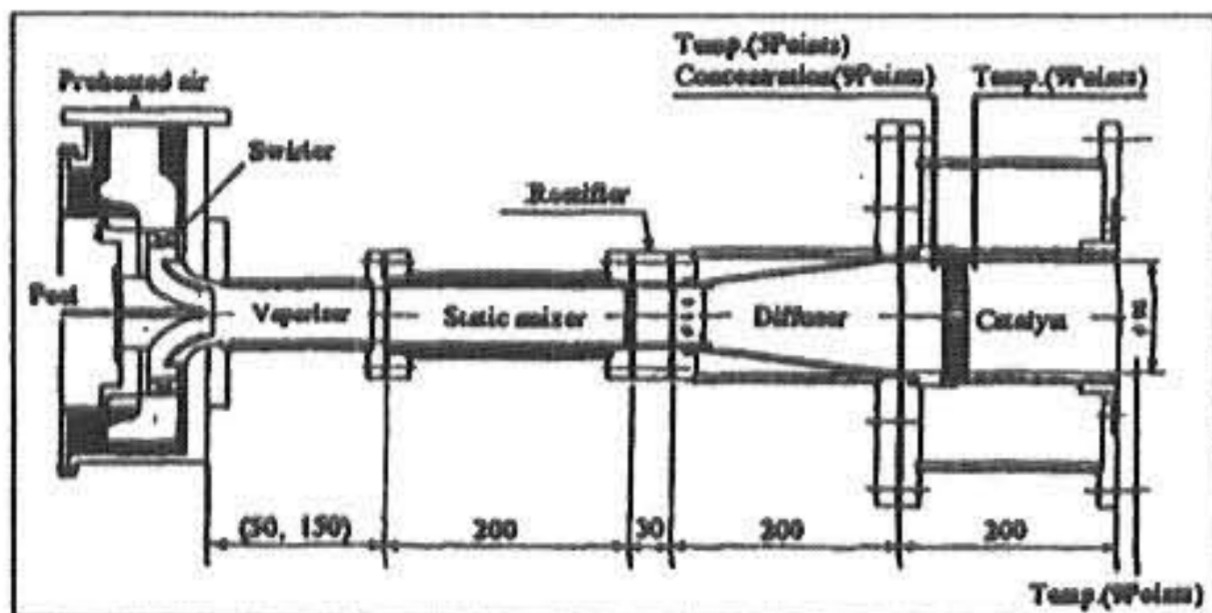


Fig. 1 Configuration of an experimental combustor

을 이용하였다. 또 온도분포는  $\phi 1\text{mm}$ 의 sheath type K열전대를 촉매 입구 수평 방향에 5곳, 촉매 출구 위치의 샘플관과 대응하는 반경 위치에 9곳, 연소기 출구의 수평방향에 9곳을 설치하여 측정하였다. 배출가스는 연소기 출구 직후와 촉매에서 2m 떨어진 곳에서 수냉다공관에 의해 샘플하여 자동차용 배기가스 분석계로 분석하였다. 공시 연료는 등유이고 분무각 60°의 기류분사변을 사용하였다. 연소용 공기는 전기 가열기에 의해 연소기 입구 온도가 800°C가 되도록 가열하여 공급하였다.

## 3. 실험 결과 및 고찰

### 3.1 균일 예혼합기에 의한 촉매 연소 특성

균일 예혼합기로 촉매의 기본적인 연소 특성을 밝히기 위해 L<sub>v</sub>를 150mm로 하고 균일 혼합기와 정류기를 설치한 조건에서 실험하였다. Fig.2에 촉매입구(L<sub>c</sub>=-10mm)에서의 반경방향(R)의 공기과잉율( $\lambda_{pi}$ )을 나타낸다. 여기에서  $\lambda_{pi}$ 는 촉매입구 반경방향에서 측정한 예혼합기 농도와 연소용 공기유량에서,  $\lambda_p$ 는 연소용 공기유량과 연료유량으로부터 구한 공기과잉율이다. 어떠한 조건에서도 반경방향에 있어서의  $\lambda_{pi}$ 의 분포는 거의 일정한 결과가 얻어지고 있어 균일성이 높은 예혼합기가 형성되었다.

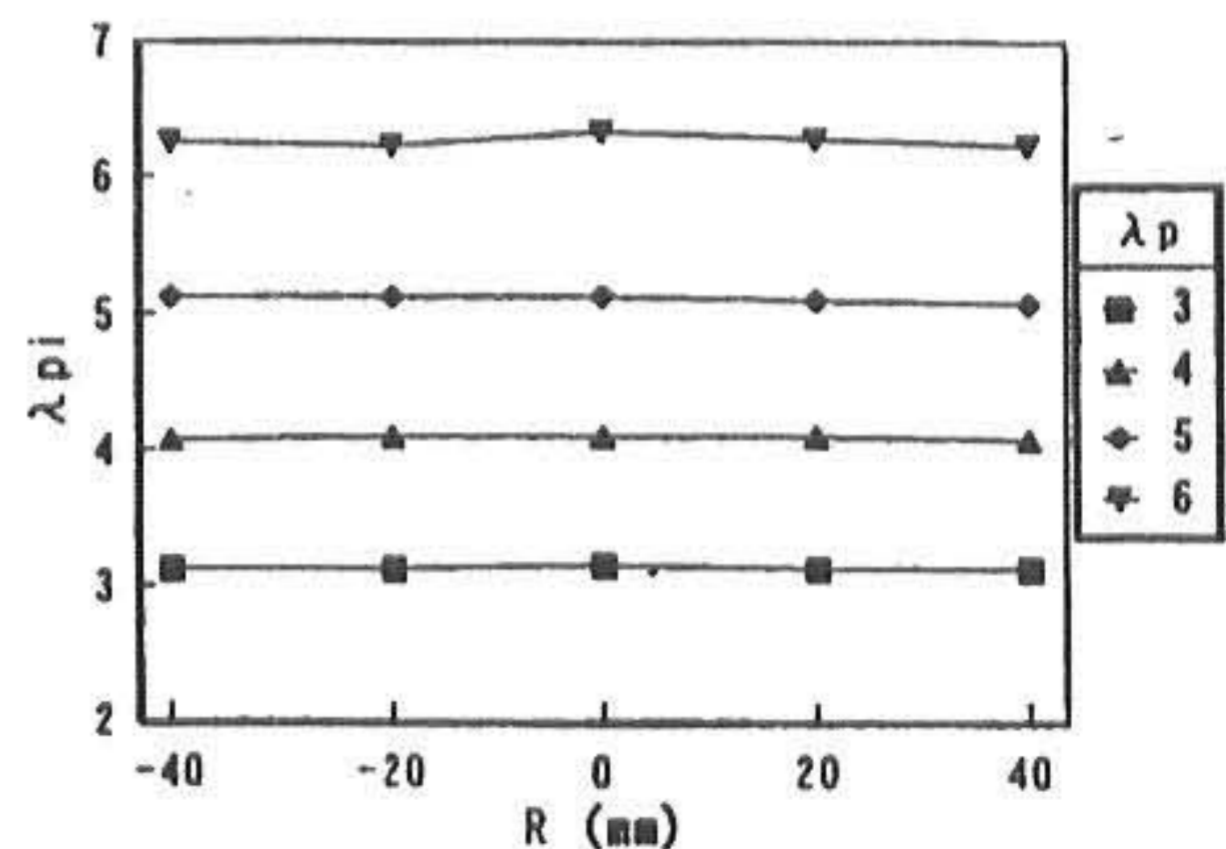


Fig. 2 Distribution of pre-mixed gas concentration at radius distance (T<sub>a</sub>=800°C, G<sub>a</sub>=47g/s)

촉매 입구의 온도가 640°C일 때의  $\lambda_p$ 가 3부터 6까지의 경우, 축방향 거리에 있어서의 온도 분포를 Fig. 3에 나타낸다. 어떠한 조건에서도

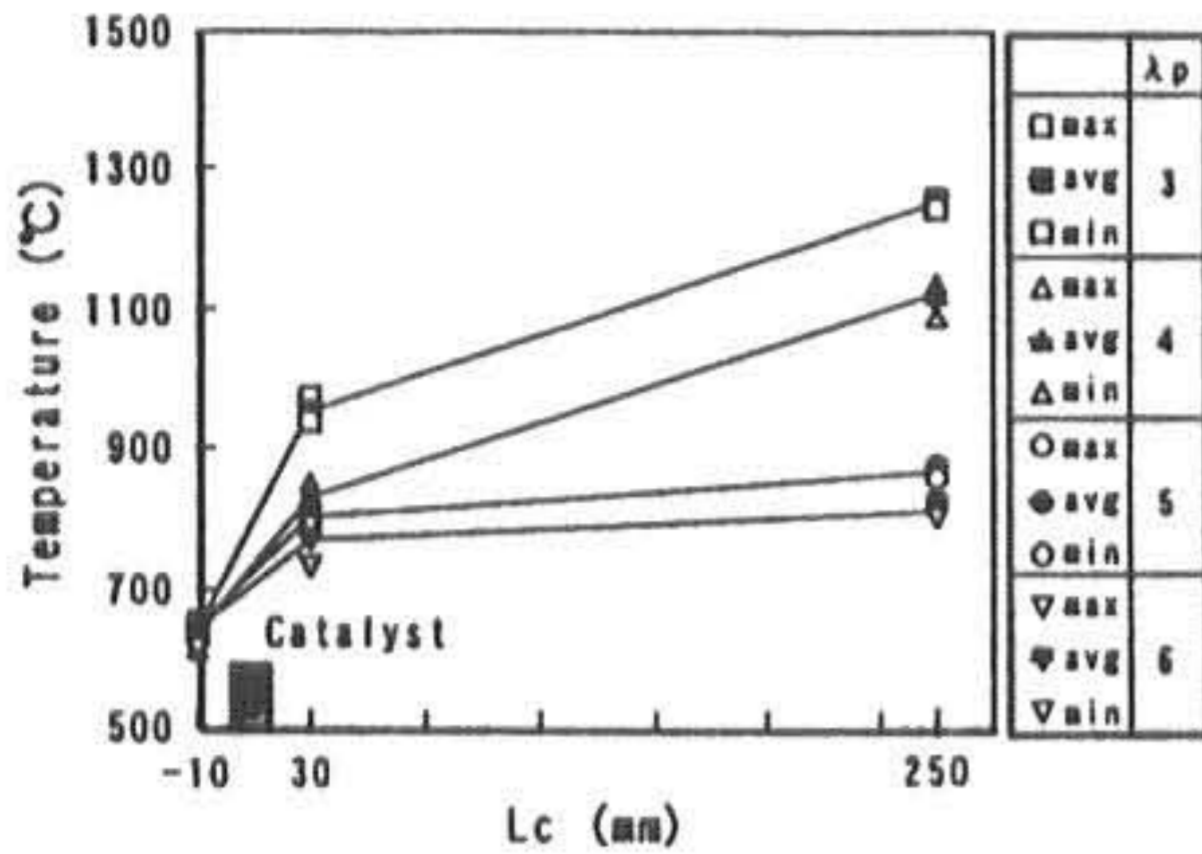


Fig. 3 Characteristic of temperature distribution on axial distance ( $T_a=800^\circ\text{C}$ ,  $G_a=47\text{g/s}$ )

촉매 출구 ( $L_c=30\text{mm}$ )와 연소기 출구 ( $L_c=250\text{mm}$ )에서의 온도의 최소와 최대치에 커다란 폭이 없고, 균일성이 높은 분포가 얻어졌다.  $\lambda_p=3$ 에서는 연료 유량이 증가함에 따라 발열량이 증가해 다른 조건에 비해 촉매 내의 반응이 진행하게 되고, 그 결과  $L_c=250\text{mm}$ 에서의 연소 가스 온도가 높아졌다. 이 경우  $L_c=30\text{mm}$ 의 위치에서 약 950°C부터 약 1254°C까지 온도 상승이 일어나고 있어, 이 사이에서 기상반응(Gas phase reaction)이 일어나고 있는 것이 추측된다.  $\lambda_p=5$ 와 6에서는  $L_c=30\text{mm}$ 에서의 온도가 약 800°C 이하로 낮다. 이것은 촉매를 통과한 후에도 반응이 지속될 정도의 온도까지 달성하지 못해, 촉매 후류에서의 기상반응이 거의 일어나지 않기 때문으로 추측된다. 또,  $\lambda_p=4$ 에서는  $L_c=30\text{mm}$ 에서의 평균온도가  $\lambda_p=5$  및 6에 비해 약 30°C 정도 높고, 촉매 후류에서의 온도 상승은 약간 보이지만 단열화염온도를 생각하면 반응은 완결되지 않았다고 할 수 있다. 즉 어느 정도 농후한 예혼합기로 촉매 출구온도가 약 950°C 정도가 되면, 실험에 사용한 촉매 1단에서도 반응이 촉진되지만, 그 이하의 온도에서는 2단 이상의 촉매가 필요하게 된다.

한편, 연소기 입구에서 촉매 입구까지의 온도 저하는 예혼합기 부분에서의 열손실에 의한 것이다.

각 측정위치에서의 농도 및 온도의 불균일성의 정도를 변동계수를 사용하여 Fig. 4에 나타낸다. 변동계수는 표준편차를 평균치로 나누어 나타냈다.  $L_c=-10\text{mm}$ 에서의 농도의 변동계수는 높은 곳에서도 0.007로 낮고 대단히 균일화된 농도 분포가 얻어져 균일 혼합기를 사용함에 따라 균일한 예혼합기가 형성되었다. 또  $L_c=30\text{mm}$ 와  $250\text{mm}$ 의 온도의 변동계수도 비교적 낮고, 온도 분포도 균일화 되어 있어 촉매 입구에서의 농도 분포와 연소 가스온도 분포의 균일성에는 상관관계가 있는 결과가 얻어졌다. 즉, 연소기 출구의 균일화는 촉매 입구의 농도분포를 균일하게 함으로서 가능하다고 할 수가 있다.

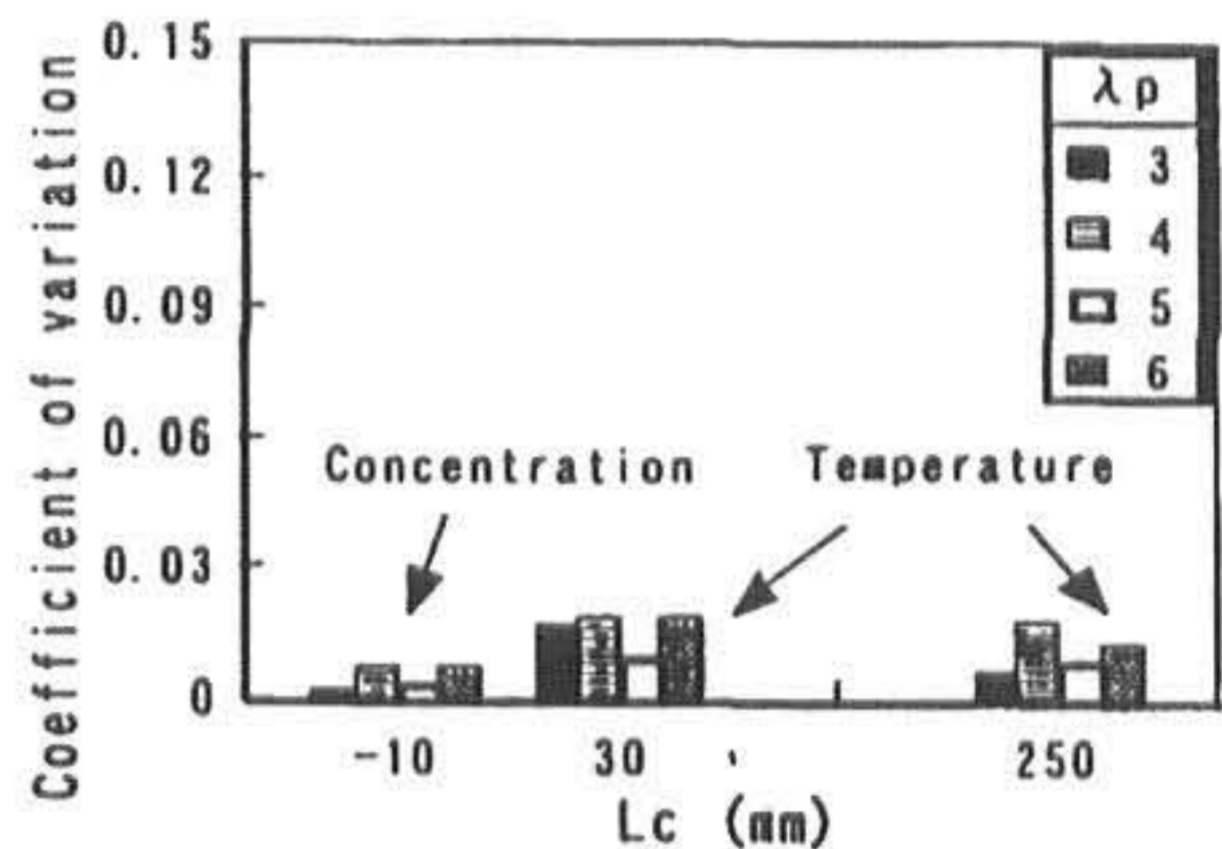


Fig. 4 Coefficient of variation characteristic of concentration and temperature ( $T_a=800^\circ\text{C}$ )

연소기 입구의 온도 ( $T_a$ )가 연소특성에 미치는 영향을 검토하기 위해 연소비율 ( $\eta_b$ )과 연소 가스온도 ( $T_g$ )와의 관계를 Fig. 5에 나타낸다. 여기서  $\eta_b$ 는 다음 식에 의해 구하였다.

$$\eta_b = \frac{h_g - h_a}{h_u} \times 100 (\%)$$

여기서,  $h_g$ 는 연소가스의 엔탈피,  $h_a$ 는 흡입 공기의 엔탈피,  $h_u$ 는 연료의 발열량이다.

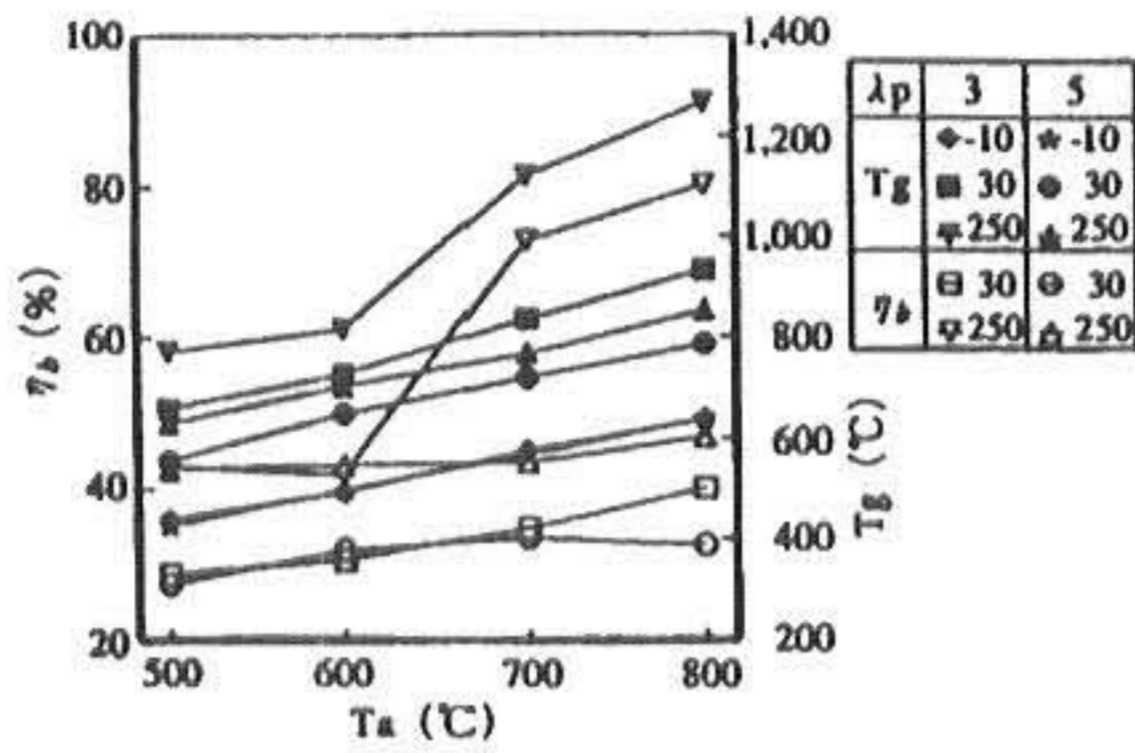


Fig. 5 Effect of combustor inlet temperature ( $G_a=47$  g/s)

$\lambda_p=3$ 일 때,  $T_a=500^\circ\text{C}$  및  $T_a=600^\circ\text{C}$ 에서는 촉매내에서의 반응이 충분하지 않고, 촉매 출구에서 연소기 출구사이에서의 기상반응이 보이질 않는다. 그러나,  $T_a=700^\circ\text{C}$  및  $T_a=800^\circ\text{C}$ 에서는 촉매 출구에서 기상반응이 일어나고 있어 연소기 출구에서의  $\eta_b$ 도 약 80%에 달하고 있다.  $\lambda_p=5$ 에서는 촉매 안에서의 반응이 일어나고는 있지만 그 반응이 지속하지 않기 때문에 연소기 출구에서의  $\eta_b$ 도 약 50% 이하로 되어 있다. 이 결과에서 촉매를 1 단만 사용할 경우에 반응을 활성화시키기 위해서는,  $\lambda_p=3$  정도의 농후한 혼합기에 촉매 입구온도를 약  $600^\circ\text{C}$  정도로 할 필요가 있음을 알 수 있다.

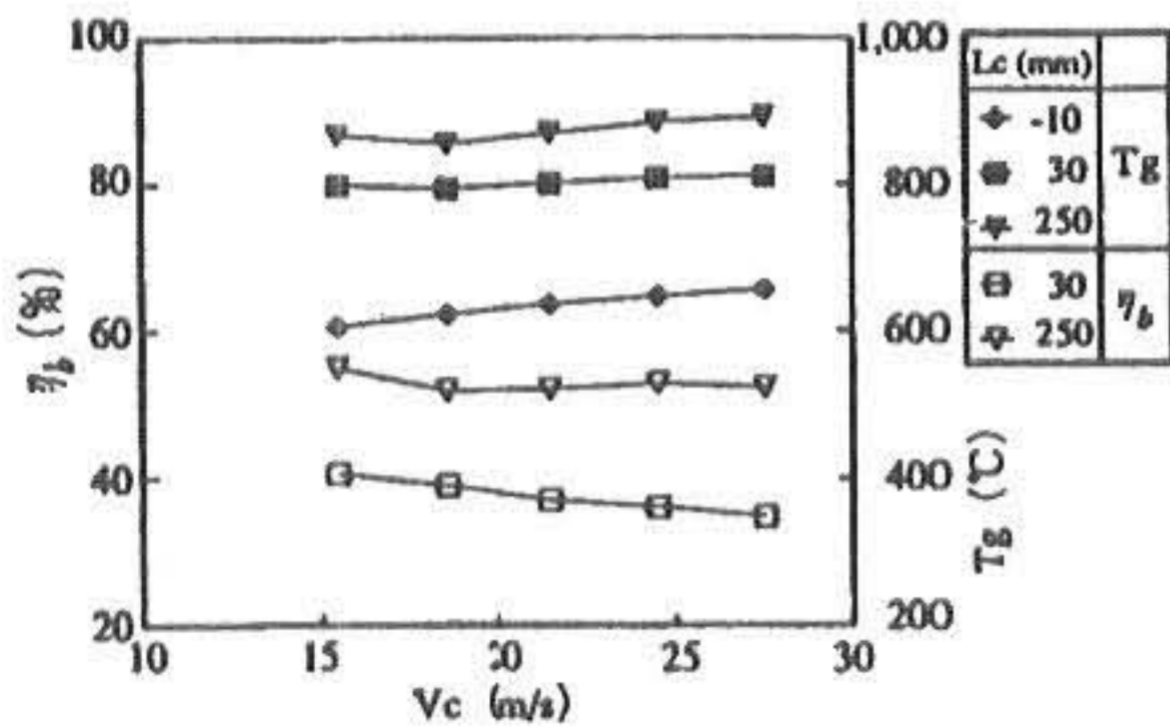


Fig. 6 Effect of mixture velocity ( $T_a=800^\circ\text{C}$ ,  $\lambda_p=5$ )

연소용 공기유량을 증가시켜 유속이 연소 반응에 끼치는 영향에 대해 조사한 결과를 Fig. 6에 나타낸다. 촉매 입구에서의 평균 농도 분포

는 거의 일정하며 촉매 출구에서의 온도도 거의 일정하여 유속의 영향은 적은 결과가 얻어졌다. 이것은 유속의 증가에 의해 예혼합기에서의 열손실 비율은 저하되고 촉매 입구에서의 온도는 높아지지만, 촉매내의 체류시간이 짧아져 반응시간이 감소되어 연소비율이 저하하기 때문이다. 이로 인해 촉매 출구에서의 온도 상승도 저하하는 결과가 되었다.

3.2 불균일 예혼합기의 균일화 조건의 검토

균일 혼합기가 있으면 균일성이 높은 예혼합기 농도가 얻어지지만, 압력 손실이 증대하기 때문에 일반적인 연소기에서의 균일 혼합기 사용은 적당하지 않다.

여기서는 균일 혼합기가 없는 상태에서 균일성이 높은 예혼합기 농도를 얻기 위한 방법으로 예혼합기에 선회를 부여하거나 예증발관 길이등의 설계요소가 균일화에 미치는 영향을 조사하였다.

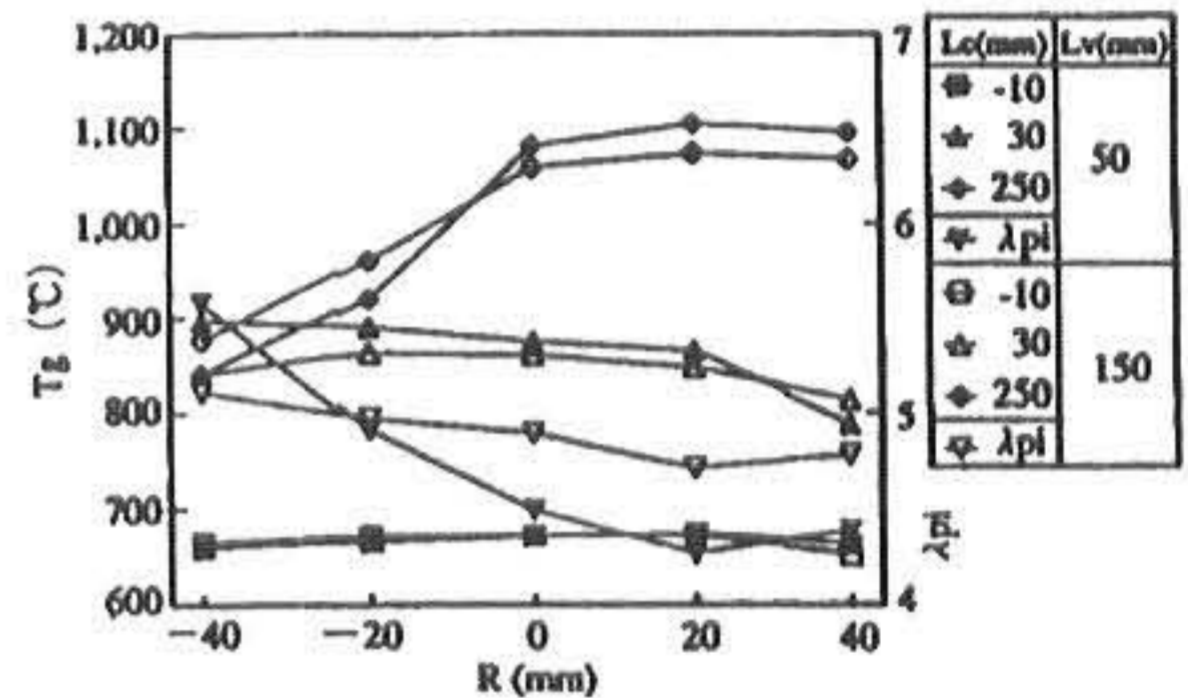


Fig. 7 Effect of vaporizer tube length ( $T_a=800^\circ\text{C}$ ,  $G_a=47$ g/s)

Fig. 7은 정류기를 장치한 상태에서 예증발관의 길이가 예혼합기 농도 분포에 미치는 영향에 대해 조사한 결과로서 예증발관의 길이를 50mm와 150mm로 했을 때의 반경방향의  $\lambda_{pi}$ 와 온도 분포의 관계를 나타낸다.

$L_v=50$ mm에서는 증발 혼합부분이 짧기 때문에 혼합시간이 짧아져 촉매 입구에서의  $\lambda_{pi}$  분포의 불균형이 커졌다. 한편  $L_v=150$ mm에서는,  $L_v=50$ mm에 비해 비교적 균일한 혼합기가 얻어졌다. 즉 균일혼합기가 없어도

$L_v = 150mm$  정도의 예증발관을 장치한다면, 촉매의 내구성이나 연소 특성에 악영향을 끼치지 않을 정도의 균일한 예혼합기의 형성이 가능하다고 볼 수 있다. 또  $\lambda_p$  분포와  $L_c = 250mm$  에서의 온도 분포는 비교적 대응하고 있어 연소기 출구의 가스온도 분포로부터 예혼합기의 농도 분포의 파악이 가능하다고 할 수 있다.

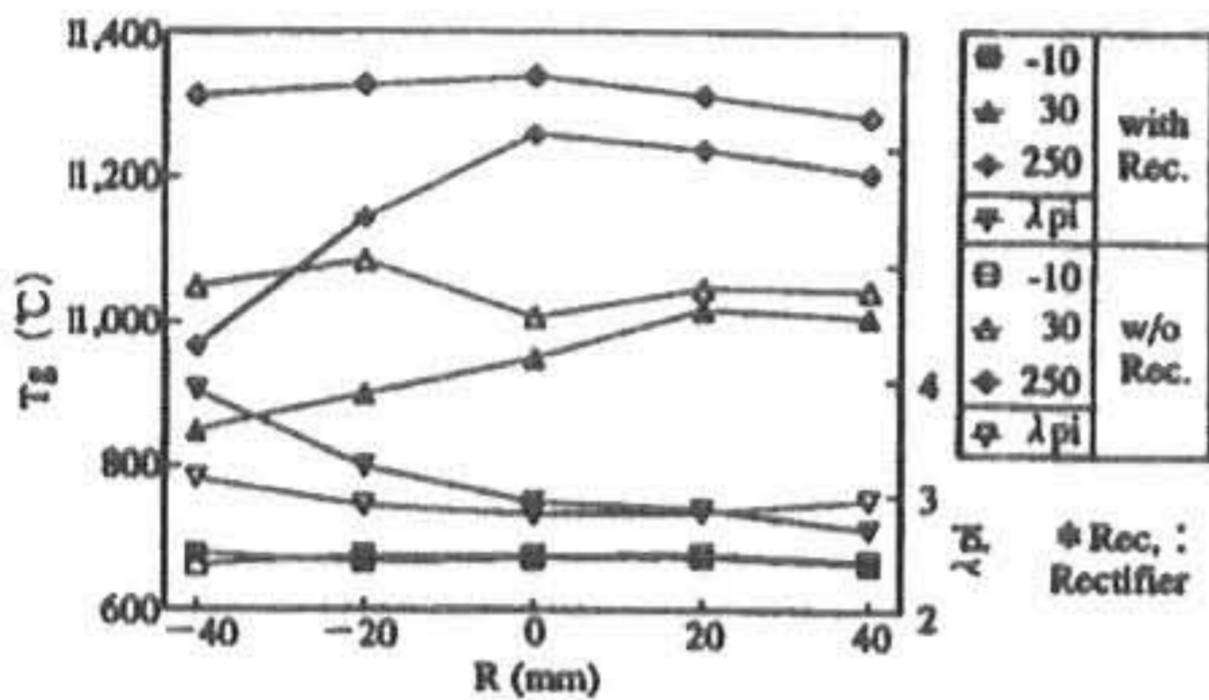


Fig. 8 Effect of rectifier  
( $T_a=800^\circ C$ ,  $G_a=47g/s$ ,  $\lambda_p=3$ )

Fig. 8에  $L_v = 50mm$  에서 선회의 유무가 축방향거리에 있어서의 연소가스온도 특성에 미치는 영향에 대해 조사한 결과를 나타낸다. 정류기를 떼어낸 선회류가 정류보다 연소가스온도의 최대값 및 최소값의 폭이 작고, 균일성이 높은 예혼합기가 얻어지는 결과가 되었다. 이것은 정류기를 떼어냄에 따라 연소기의 상류측에 있는 가변블럭swirler로 예혼합기에 주어지는 swirl number 0.172정도의 약한 선회가 영향하고 있다고 생각된다. 즉  $L_v = 50mm$  와 같은 혼합시간이 짧은 조건에서 균일성이 높은 예혼합기를 형성하기 위해서는, 정류보다도 예혼합기에 약한 선회를 주어지는 것이 유효하다고 할 수 있다.

$\lambda_p = 3$  의 조건에서 예증발관의 길이와 선회의 유무가 축방향에 있어서의 농도와 온도의 변동계수에 미치는 양향에 대해 Fig. 9에 나타낸다. 균일혼합 조건인 Fig. 4의 결과와 비교하면 전체적으로 변동계수가 높고 균일하지 않다. 정류(整流)와 선회류의 어떠한 조건에서도 촉매를 통과한 후 체류시간이 길어지는

$L_c = 250mm$  에서의 변동계수가 작아져 정류보다 선회류의 경우가 균일화되었다.  $L_c = -10mm$  와  $30mm$  및  $250mm$  에 있어서 각 요소의 조건에 대한 변동계수의 증감도 같은 경향이 얻어졌다.

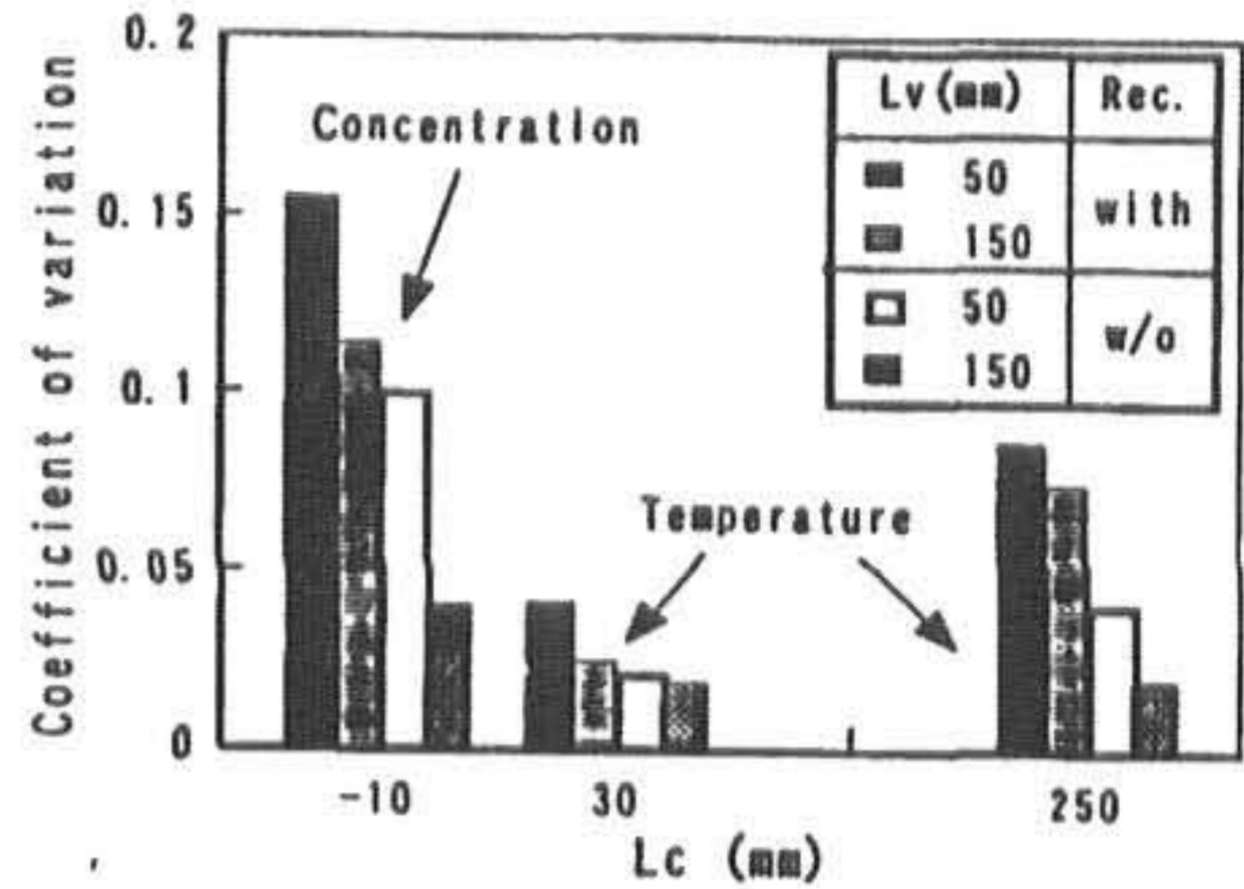


Fig. 9 Coefficient of variation characteristic of concentration and temperature  
( $T_a=800^\circ C$ ,  $\lambda_p=5$ )

$L_v$ 를  $150mm$ 로 하고 촉매 입구에서 선회류를 가해주었을 경우, 촉매 입구 온도의 변동계수는 0.032로 낮은 결과가 얻어졌다. 또 연소기 출구 온도의 변동계수는 0.02로 Fig. 4에 나타낸 균일 예혼합기의 경우와 거의 동등한 균일성의 수준을 얻었다. 즉, 연소기 출구의 가스온도 분포를 조사하는 것에 의해 촉매 입구의 균일성의 평가가 가능하다고 말할 수 있다.

#### 4. 결 과

실험용 촉매 연소기에 있어서 촉매에 공급되는 예혼합기의 균일성이 촉매 연소의 연소 특성에 끼치는 영향을 조사해 다음의 결과를 얻었다.

- (1) 균일한 예혼합기는  $L_v = 150mm$  정도의 예증발관과 균일 혼합기에 의해 형성할 수가 있다.
- (2) 균일 혼합기는 압력 손실의 증대 원인이 되기 때문에 균일혼합기를 사용하지 않을 경우, 연소용 공기에 약한 선회를 주어지는 것이 예혼합기 농도의 균일화에 유효한 수단이 된다.

- (3) 균일 예혼합기에서 촉매1단 뿐일 경우 촉매 내에서의 반응을 활성화시켜 촉매 후류에서의 반응을 지속시킬 필요가 있다. 이 경우,  $\lambda_p=3$  정도의 농후한 혼합기에 촉매 입구온도가  $600^{\circ}\text{C}$  이상을 필요로 하며, 그 이하의 온도에서는 2단의 촉매를 필요로 한다.
- (4) 촉매 입구농도의 균일성은 연소기 출구의 가스온도 분포로 평가할 수 있다.
- (5) 예증발관의 길이  $150\text{mm}$ 와 약한 선회류에 의해 균일 예혼합기와 동등한 레벨의 균일화가 가능하다.

#### 참고문헌

- 1. T.Nisiyama,et.al.,ASME Paper 96-GT-36
- 2. M.Sasaki,et.al,ASME Paper 96-GT-119
- 3. L.D.Pfefferle, W.C.Pfefferle, "Catalysis in Combustion", Catal.Rev.-Sic.Eng., 29, (1987), 219-267
- 4. H. Sadamori, et, al., 95-YOKOHAMA-IGTC-140, I-247
- 5. 古屋富明外, 第9回 觸媒燃焼に関するシンポジウム豫稿集 (1990), 23.
- 5. 金永一 外, 第9回 熱工學シンポジウム講演論文集 (1996), 15.
- 6. 林 外, ガスタービン學會秋季講演會論文集 (1992-11), 15.

---

(1998년 8월 15일 접수, 1998년 10월15일 채택)