

## 가스터어빈 연소기의 화염 안정화와 제어

### Flame Stabilization and Control in Gas Turbine Combustor

최경민\*

G. M. Choi

#### ABSTRACT

This paper presents the characteristics of lifted height and flame length from non-premixed jet flames in highly preheated air to investigate the detail combustion mechanism in the gas turbine or HCCI engine, etc. Special attention was paid to the effect of preheated air temperature, oxygen concentration and fuel injection flow rate on flame length and lifted height. By using highly preheated air, stable flames were formed even in low oxygen concentration condition. The lifted height increased with decreasing preheated air temperature, where the flame length showed opposed phenomena. The flamelet model, which is thought to have very thin flamelet, is difficult to applicable to the present flame conditions which is formed in low oxygen concentration in highly preheated air.

주요기술용어 : Lifted height(부상높이), Flame length(화염길이), Non-premixed jet flame(비예혼합분류화염), HCCI engine(예혼합압축착화엔진), Flamelet model(화염편모델),

#### 1. 서론

가스터어빈 연소기에 있어서 저NO<sub>x</sub>연소와 연료절감을 위하여 회박연소기법을 널리 이용하고 있다. 가스터어빈 연소기의 경우, 고온의 재순환영역에서 회박조건의 화염이 안정화되고, NO<sub>x</sub>도 저감되어 환경보호의 측면에서도 높이 평가되고 있다. 이러한 가스터어빈 연소기에 있어서 저NO<sub>x</sub>연소를 실현하기 위해서는, 고온연소가스의 재순환을 이용하여 반응전에 연소용 공기와 연료를 희석하여, 저산소농도나 연료를 희석한 상태에서 연소시키는 기술이 유효하다. 특히, 연소실 내부의 분위기온도가 사용연료의 자착화온도보다 높으면, 연소기의 어

디에션가 연소반응이 일어나므로, 가능한 한 국소고온영역을 제거하여 평활한 온도분포를 유지하는 것이 저NO<sub>x</sub>연소의 열쇠이다. 이러한 고온 분위기에 있어서의 가연범위는 재순환가스의 온도, 산소농도, 연료의 분사속도 등의 영향에 민감하다. 따라서, 이러한 여러 인자들이 화염의 형태에 미치는 영향에 관한 상세한 데이터베이스는 현재까지 보고되지 않고 있다. 이러한 연소장의 연소속도는 화학반응속도만의 함수라기 보다는, 혼합속도와 화학반응속도간의 상호상관에 의해 결정된다고 생각된다. 공업적인 이용을 전제로 하는 연소모델은 가능한 간단한 형태가 바람직하나, 넓은 온도범위, 넓은 산소농도범위에 있어서도 만족시킬 수 있는 새로운 연소모델의 구축을 위해서는 적절한 실험적 데이터베이스가 필수적이다. 하지만, 복

\* 일본항공우주연구소

잡한 형상의 연소기를 대상으로 복잡한 현상을 관찰하는 것은 연소반응에 미치는 인자의 특성 파악에 어려움을 주므로, 가능한 한도내에서 간단한 현상을 관찰할 필요가 있다<sup>[1]</sup>. 현재까지 고온 분위기에서의 열유동과 열전달특성을 수치계산기법을 통하여 상세히 조사한 보고가 있으나, 그 대부분은 공업용로를 대상으로 하고 있다<sup>[2]</sup>. 그리고, 저NOx연소법의 연구로서 국소고온영역을 제거하기 위해, 연료를 고속분출하여, 화염을 부상시킨 실험결과와 수치해석에 의한 조사도 보고되고 있다<sup>[3,4]</sup>. 그러나 각 인자가 연소장에 미치는 영향을 상세히 조사한 연구보고는 찾아보기 어렵다. 따라서, 본 연구에서는 가스터빈연소 및 HCCI엔진내부의 연소현상을 상세히 밝히고, 제어이론을 확립하는 것을 목적으로, 연료의 자착화온도이상의 고온공기가 연소에 미치는 기초적인 특성을 실험적으로 상세히 조사하였다. 연소현상을 검토하는 대상으로서 동축분류화염을 이용하여, 산화제의 온도, 산소농도, 연료의 분출속도의 변화에 의한 화염형상의 변화를 관찰하였다.

2. 실험장치 및 방법

실험장치의 관측부의 개략을 Fig. 1에 나타내었다. 100mm X 100mm의 유로단면으로 공급된 공기는 노즐부에서 50mm X 50mm로 축류된 후, 길이 100mm의 정류부를 거쳐, 단면 50mm X 50mm, 길이 1150mm의 연소실에 공급된다. 각 유로는 두께 50mm의 단열재로 구성하여 열손실을 최소화하였다. 그리고, 관측부의 한 벽면을 길이 840mm의 석영관을 이용하여 가시화하였다. 연료노즐은 Fig. 1(b)에 나타낸 바와 같이 스테인레스관과 세라믹관을 조합하여 만든 것으로, 연결부는 외경 2.6mm, 내경 2mm의 스테인레스관과 외경 5mm, 내경 3mm의 세라믹관으로 보호하고, 분출노즐부는 외경 2mm, 내경 1mm의 세라믹관에 외경 1mm, 내경 0.4mm의 세라믹관을 접합하여 선단을 테이퍼형상으로 가공하였다. 연료로는 메탄을 사용하였다. 실험 조건을 Table 1에 나타내었다.

공기는 축열식 고온예열공기발생장치<sup>[5,6]</sup>를

이용하여 예열되었으며, 실험은 고온조건에서 실험을 개시하여 공기온도의 자연저하에 맞추어 측정하였다. 화염형상과 화염부상높이의 측정에는 광간섭필터(중심파장 430.5nm, 반치폭 1.0nm)를 통하여 얻어진 CH밴드의 자발광의 강도를 이용하였다. 화염으로부터의 발광은 광간섭필터를 이용하여 배경광을 제거한 후, 광증폭기(Hamamatu Photonics, C6653MOD)에 의해 증폭되고, CCD카메라(Kodak, MEGAPLUS camera model ES 1.0, Shutter speed 32ms)에 의해 촬영되었다. 얻어진 화상은 유효화소수 1008 X 1018 pixel<sup>2</sup>로 256단계 변환시킨 후, 디지털 기록하였다. 촬영된 화상은 광간섭필터에 의해 배경광이 제거되나, 광간섭필터대역에 있어서의 고온의 유로벽면으로부터의 고체방사광은 제거되지 않는다.

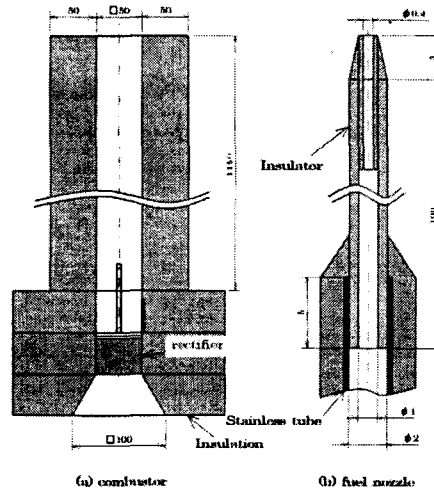


Fig. 1 Schematics of combustor and fuel nozzle

Table 1 Experimental conditions

Fuel flow rate ( mL <sub>n</sub> / s )	6, 8, 10, 12
Air flow rate ( L <sub>n</sub> / s )	1.5
O <sub>2</sub> concentration ( diluted by N <sub>2</sub> (%) )	3, 6, 9, 12, 15, 18, 21

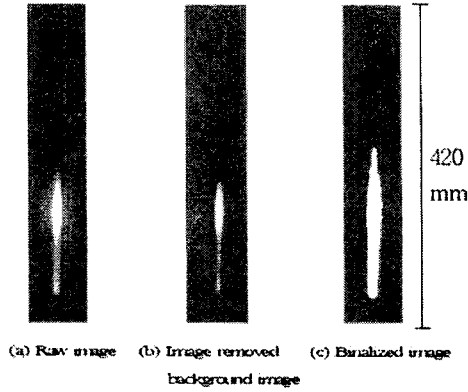


Fig. 2 Image processing procedure  
( $T_{air} = 1273K$ ,  $O_2$  concentration : 21%)

본 연구에서는 다음과 같은 방법으로 고체방사광을 제거하여, 2단계화된 화상으로부터 화염길이와 부상높이를 산출하였다. 촬영된 화상의 한 예를 Fig. 2와 3에 나타내었다. 앞서 설명한 바와 같이 CH밴드의 광간섭필터에 의해 배경광은 제거되었으나, 유로벽면으로부터의 고체방사의 영향을 완전히 제거하기는 어렵다. 그리고, 휘염이 발생할 경우, 벽면으로부터의 반사광도 무시할 수 없다. 벽면으로부터의 고체방사는 단면방향으로는 거의 일정하나, 관측부의 상류에서 강하고, 하류로 갈수록 약해진다. 따라서, 여기서는 매디언필터를 이용하여 노이즈를 제거한 후, 유동방향의 화소열에 대해, 각 단면의 평균배경광강도를 촬영광으로부터 감산하였다. 원화상 및 배경광을 제거함으로써 얻어진 화상을 Fig. 2와 3의 (a)(b)에 나타내었고, 2단계 처리한 화상을 (c)에 나타내었다. 배경광의 제거후에 있어서 화염영역의 평균휘도를 구하여, 화상의 평균휘도에 대해 휘도보정을 한 후, 2단계 처리의 기준치를 결정하였다. 휘도보정하는 이유는 Fig. 2에 나타낸 산소농도가 높고, 노즐에 부착한 화염의 경우, 휘염발광 영역에서 매우 강한 강도를 나타내어 평균휘도가 상승하기 때문에 화염의 부착부분이 무시될 가능성이 높다. 따라서, 이러한 휘도보정을 함으로써 화염의 형상을 보다 정확히 가시화할 수 있다.

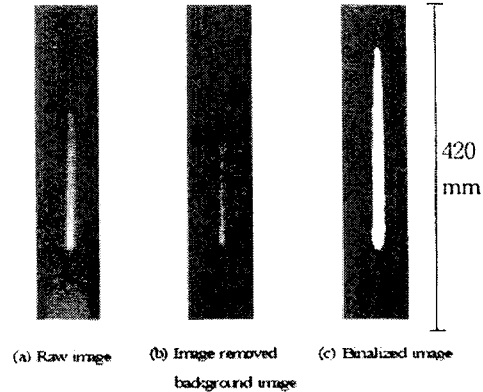


Fig. 3 Image processing procedure  
( $T_{air} = 1273K$ ,  $O_2$  concentration : 12%)

### 3. 고온예열공기를 이용한 동축분류화염의 관찰

Figure 4에 연료유량 10mL<sub>N</sub>/s, 공기중 산소농도21%의 조건에서 형성된 부상화염의 직접사진을 나타내었다. 실험은 공기의 예열온도 1350K부터 개시하였고, 공기온도의 자연저하에 맞추어 촬영하였다. 산소농도가 높을 경우, 가연한계에 도달할 때까지 화염은 노즐에 부착한 상태를 유지하였다. 그러나, 연료분출속도를 높이거나, 산소농도를 낮추면, 화염은 부상하여 안정화되는 경향이 있다. 그후, 연소조건을 원상태로 복귀시키면 어떤 온도보다 높은 경우는 다시 부착화염이 형성되나, 그 이하의 온도에서는 부상화염이 형성되었다. 이러한 방식을 본 연구에서는 강제부상방식이라고 부른다.

Figure 4는 이러한 방법에 의해 형성된 부상화염의 직접사진을 나타내고 있다. 화염의 부상높이는 공기예열온도의 저하와 함께 증가하고, 동시에 화염형상도 변화한다. 공기예열온도가 높을 경우, 분류형의 화염형상을 나타내고, 화염길이도 증가하였다. 부상높이가 증가함에 따라 화염길이는 단축되고, 화염색은 청백색으로부터 청색으로 변화하였다.

Figure 5는 부상화염을 확대촬영한 사진을 나타내고 있다. 부상높이가 증가함에 따라 화

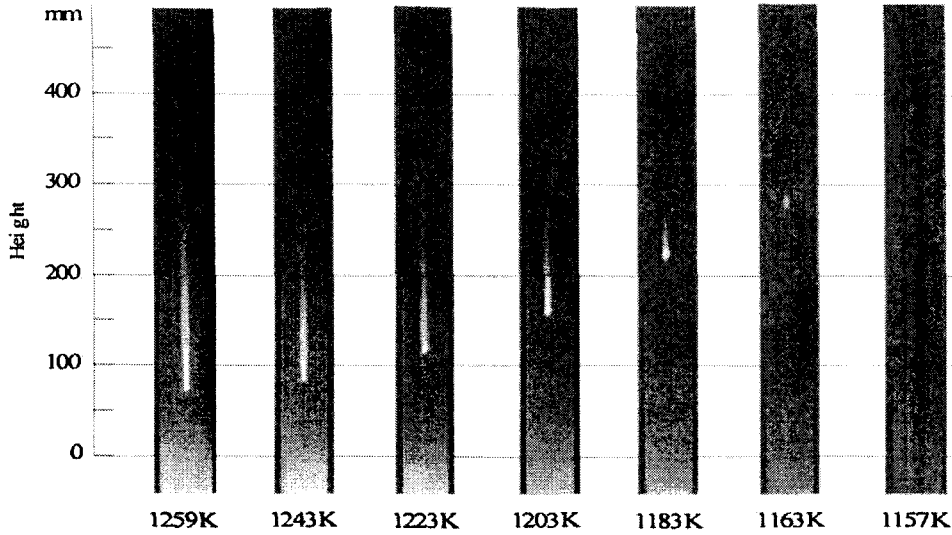


Fig. 4 Effect of preheated air temperature on lift height of flames  
(Fuel flow rate : 10mL/s, O<sub>2</sub> concentration : 21%)

염의 기부외측에 있어서 희박예혼합화염이라고 여기어지는 영역이 확대되고, 분류내부의 과농예혼합화염이라고 여기어지는 부분이 축소, 소멸되는 현상을 관찰할 수 있다.

질소희석에 의해 산소농도를 변화시킨 경우, 공기예열온도에 대한 화염의 부상높이의 변화와 화염길이의 변화를 Fig. 6에 나타내었다. 여기서는 노즐립에 부착한 화염이 자연히 부상하는 방식으로 실험을 진행하였다.

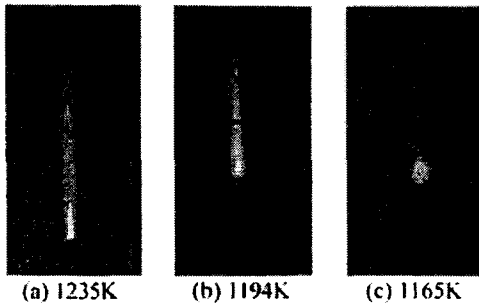
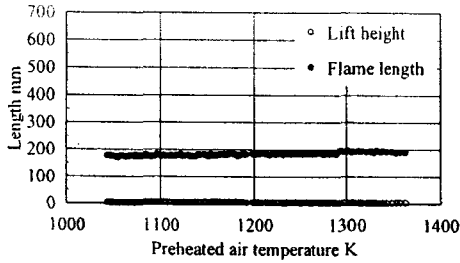
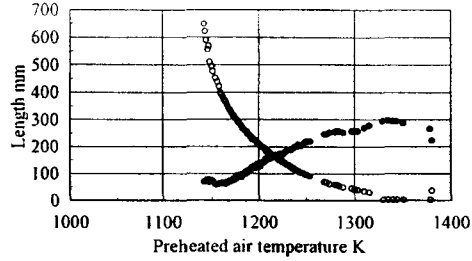


Fig. 5 Observation of flame shape with changing preheated air temperature  
(Fuel flow rate : 10mL/s, O<sub>2</sub> concentration : 21%)

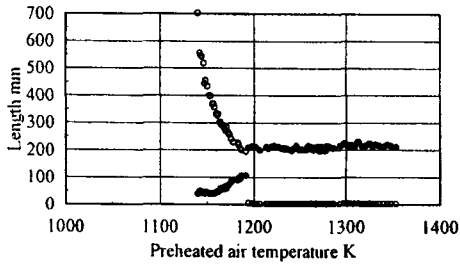
이러한 부상방식을 본 연구에서는 자연부상방식이라고 부른다. 이에 대해, Fig. 7은 상술한 강제부상방식에 의한 결과를 나타내고 있다. Fig. 6(a)에 나타낸 바와 같이 산소농도가 높을 경우에는 온도가 저하하여도 노즐에 의한 보염의 효과로 부착화염이 형성된다. 이후, 가연한계에 도달하면 화염은 부상하지 않고 날아가 버린다. 산소농도 21%의 조건에서는 약 1040K까지 부착화염이 관찰되었다. 산소농도가 18%이하에서는 공기예열온도가 저하하여 일정온도에 이르면, 화염은 노즐로부터 이탈하여 부상화염이 형성된다. 화염길이는 부착화염의 경우에 있어서 공기예열온도에 관계없이 거의 일정하고, 부상화염으로 천이하면 짧아졌다. Fig. 6(c)에서는 화염의 부상높이가 더욱 길어진 조건에서 화염길이가 약간 길어진 것을 관찰할 수 있다. 전체적인 경향을 정리하면 다음과 같다. 부상화염이 형성되어 부상높이가 증가하면 화염길이는 감소한다. 이후, 화염의 길이는 어느 온도조건에서 극소치를 나타낸 후, 공기예열온도의 저하와 함께 화염길이는 증가하는 경향을 나타낸다.



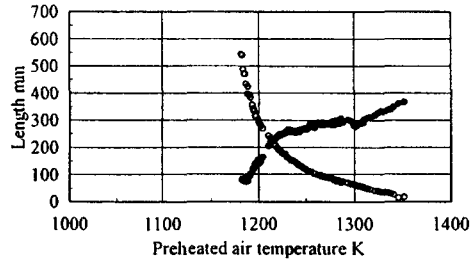
(a) 21% O<sub>2</sub>



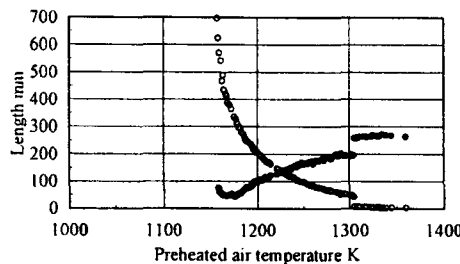
(d) 12% O<sub>2</sub>



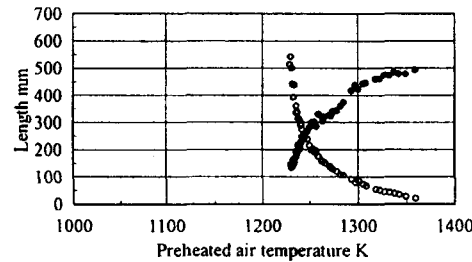
(b) 18% O<sub>2</sub>



(e) 9% O<sub>2</sub>



(c) 15% O<sub>2</sub>



(f) 6% O<sub>2</sub>

Fig. 6 Lift height and flame length distribution as a function of preheated air temperature

Fig. 6 Lift height and flame length distribution as a function of preheated air temperature (continued)

이러한 현상은 부상한 영역에서 연료와 공기의 혼합이 진행되어 착화 후, 빠른 속도로 연소반응이 진행되기 때문에 전체적으로 화염길이는 감소하나, 과한 혼합이 진행된 희박예혼합기의 조건에서는 연소속도의 저하로 다시 화염길이가 증가한다고 생각된다. 그러나 산소농도가 매우 낮은 조건에서는 극소점이 관찰되지 않았다. 이는 산소농도의 저하에 의해 반응속도가 느려지면, 높은 온도의 예열공기를 공급하여도 부상높이가 증가하게 되어, 본 연구에서 사용한 관찰부의 길이내에서는 극소점의 화염조건이 형성되기 전에 관측범위를 벗어나기 때문이라고 생각된다. Fig. 7(a)에 나타난 바와 같이, 화염을 강제적으로 부상시킨 경우,

1235K에서 부상화염이 형성되었다. 이 경우에 있어서도, 1150K부근에서 극소점을 나타낸 후, 화염길이는 증가하는 경향을 나타내었다. 부상높이와 함께 화염길이가 변화하는 이유와 과 같이 생각되어진다. 착화지연 또는 전단류에 의한 소멸에 의해 화염이 부상하면, 화염기부에 있어서의 연료와 공기의 혼합만이 존재한다고 생각되어지고, 이러한 이유로 부상거리가 증가할수록 예혼합이 촉진되기 때문이다. 예혼합화에 의해서 화염기부의 연소율이 증가하고, 많은 연료가 화염의 기부에서 소비되기 때문에 화염길이가 감소한다고 생각된다. 그러나 부상높이가 어느 한계를 넘으면, 화염기부에서는 극히 희박한 예혼합상태로 되어, 역으로 연소

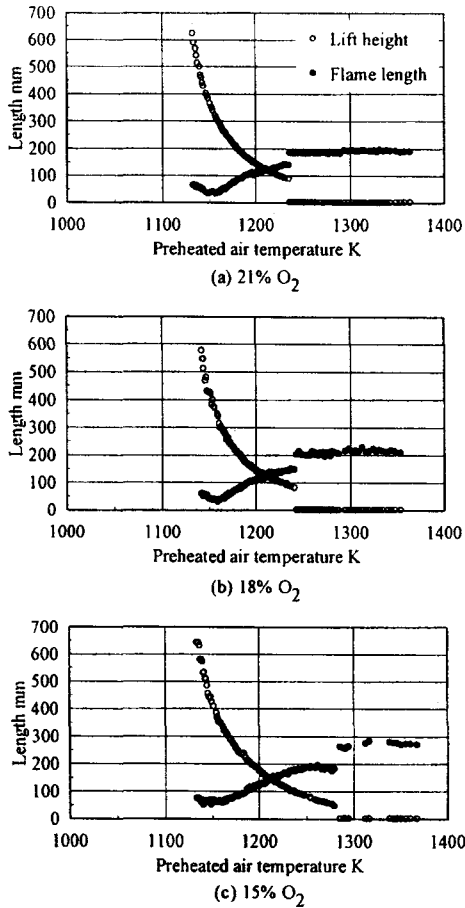


Fig. 7 Lift height and flame length distribution as a function of preheated air temperature (forced lift method)

율이 저하되기 때문에 화염길이가 증가한다고 생각된다.

각 연료유량조건에 있어서, 공기를 질소로 희석하여 산소농도를 변화시킨 경우의 화염부상높이와 화염길이의 변화를 Fig. 8에 나타내었다. 부상화염기부까지의 공기와의 혼합에 의해 연료분출속도는 감소되기 때문에, 연료분출속도는 부상높이에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 생각된다. 그러나 화염길이에 대해서는 그 영향이 커서, 분출속도가 빠를수록 연료유량이 증가하여 화염길이가 길어진다. 자연부상방식의 경우, 연료유량이 증가할수록, 부착화염

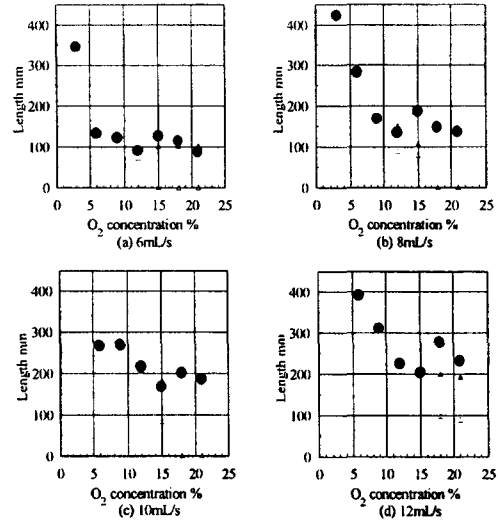


Fig. 8 Effect of O<sub>2</sub> concentration on flame length and lifted height with changing fuel flow rate (T<sub>air</sub>=1250K, ○ Lifted height, ● Flame length, △ Lifted height with forced lifted method, ▲ flame length with forced lifted method)

으로부터 부상화염으로 천이되는 산소농도가 높게되고, 화염길어도 약간 길어진다. 이는 연료유량이 증가할수록 연료분출속도가 높아지기 때문이라고 생각된다. 한편, 강제부상방식의 경우, 저산소농도의 조건에서는 화염이 날아가 버리기 때문에, 비교적 고산소농도의 조건에서 실험을 진행하였다. 연료유량 10mL/s까지는 자연부상화염의 조건과 거의 유사한 경향을 나타내었으나, 12mL/s의 조건에 이르면, 산소농도 21%의 조건임에도 불구하고 화염이 부상하여 화염길이가 감소하는 현상이 관찰되었다. 전체적으로, 부상화염이 형성되는 경우, 화염은 부상높이의 증가와함께 화염길이가 단축된 후, 증가로 전환하는 경향을 나타내었다.

위의 실험결과로부터, 공기에열온도가 자착화한계온도에 가까운 저산소농도의 경우에는 부상화염이 형성되고, 부상높이는 공기에열온도, 산소농도의 영향을 크게 받으며, 특히 온도 변화에 민감함을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

고온예열공기를 이용하여 동축류 확산화염에 있어서 예열공기온도, 연료분출속도, 공기중 산소농도가 부상높이 및 화염길이에 미치는 영향을 실험적으로 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 연소용공기를 고온으로 예열함으로써, 상온의 공기온도조건에서는 화염이 안정화되지 않을 조건에 있어서도, 노즐에 부착한 안정된 화염이 형성되었다.
2. 연소용 공기중의 산소농도의 저하에 의해, 화염이 노즐주변에서 안정화되지 않는 조건에 있어서도, 연소용 공기의 예열온도가 연료의 자착화온도이상으로 예열되면, 소멸되지 않고 부상화염이 형성된다.
3. NOx배출량을 저감하기 위하여 가스터어빈 및 HCCI엔진 등에서 연소가스에 의한 공기의 희석 및 예열이 사용되고 있으나, 이러한 저산소농도하에서 형성된 화염은 화염면모델이 적용되기 어렵다.

#### 참고문헌

1. Katsuki, M., High Performance Industrial Furnace Development Center Research Report, (1999).
2. Zhang, C., Ishii, T. and Sugiyama, S., Numerical Modeling of the Thermal Performance of Regenerative Slab Reheat Furnaces, Numerical Heat Transfer, Part A, 32, (1997), 613-631
3. Sato, J., Combustion in High Temperature Air, The First Asia-Pacific Conference on Combustion, Osaka, (1997), 286-289.
4. Fujimori, T., Reichelmann, D. and Sato, J., Experimental Study of NOx Reduction by Lifted Turbulent Jet Flame in Highly Preheated Flows, The First Asia-Pacific Conference on Combustion, Osaka, (1997), 298-301.
5. Choi, G.-M. and Katsuki, M., New Approach to Low Emission of Nitric Oxides from Furnaces using Highly Preheated Air Combustion, Journal of the Institute of Energy, 73, (2000), 18-24.
6. Choi, G.-M. and Katsuki, M., Advanced Low NOx Combustion using Highly Preheated Air, Energy Conversion and Management, 42, (2001), 639-652.