

# 비정상연소의 특성과 연소진동 평가

양영준<sup>#</sup>

## Evaluation on Characteristics of Unsteady Combustion and Combustion Oscillation

Young-Joon Yang<sup>#</sup>

(Received 24 August 2011; received in revised form 4 October 2011; accepted 6 October 2011)

### ABSTRACT

The characteristics of unsteady combustion were experimentally investigated using confined premixed flames stabilized by a rearward-facing step. The unsteady combustion used in this experiment plays an important role in controlling self-excited combustion oscillations and it has usually desirable performance such as high load combustion and low pollutant emission. It is known that combustion oscillation is occurred if Rayleigh's criterion is satisfied. The pressure fluctuation and OH-emission fluctuation were measured using pressure transducer and OH optical fiber respectively and then cross-corelation and phase difference were calculated to apply Rayleigh's criterion.

**Key Words** : Unsteady Combustion(비정상연소), Combustion Oscillation(연소진동), Forced Pulsating Mixture Supply(강제변동공급), Premixed Combustion(예혼합연소), Rayleigh's Criterion(레이리판정기준)

### 1. 서 론

최근의 지구온난화, 에너지위기, 대기오염, 오존층 파괴 등의 문제에 연소(Combustion) 현상이 깊이 관여하고 있다. 연소생성물에 의한 문제점을 보완하기 위해 신재생에너지 분야가 부상하고 있지만, 에너지를 얻기 위해 지금까지 연소분야가 담당했던 역할을 대신하기 위해서는 많은 시간을 필요로 할 것이다<sup>[1]</sup>. 따라서 현재의 연소분야의 연구에 에너지절약, 고효율화, 저배기가스 등의 달성을 위해 많은 연구가 수

행되어지고 있다. 연소기 제작에 있어서도 저NO<sub>x</sub>, 고부하 연소를 이루기 위해 예혼합연소가 유효한 방법 중의 하나로 주목받고 있다. 그러나 예혼합연소방식을 채택할 때 연소의 불안정성 및 연소진동(Combustion oscillation)이라는 문제가 발생하는 경우가 많다<sup>[2]</sup>. 이 연소진동에 의해 장치가 파손되는 경우가 있으며 특히 대형 산업용보일러나 로켓엔진 등에서 큰 사고로 이어지는 경우가 많으므로 반드시 연소진동을 억제해야만 한다. 연소진동의 발생 개시 여부는 Rayleigh 이론( $E = \oint p'q'dt > 0$ )을 만족한 경우에 일어난다. 이 연소진동의 억제법으로는 연소기 형상 등을 변경하여 시스템의 고유진동수를 변화시키는 패시브 제어(Passive control)과 연소기내의 압력변동신호를

<sup>#</sup> 교신저자 : 경남과학기술대학교 자동차공학과  
E-mail : yangyj@gntech.ac.kr

피드백하여 역위상의 압력신호를 가함으로써 압력변동을 상쇄시키는 액티브제어(Active control)로 분류되어진다<sup>[3,4]</sup>. 그러나 실용상 그 방지대책은 경험적기술에 의존하는 것 밖에 없고 현재까지 범용적인 기술은 존재하지 않는다. 연소진동과 기본적으로 같은 메카니즘으로 발생하는 펄스연소(Pulse combustion)가 있다. 이 펄스연소는 연소장치, 특히 후미 파이프(Tail pipe) 내의 유속변동이 격렬하기 때문에 고부하연소, 고열전달성, 유해배출물의 저감 등에 뛰어난 연소기술이며 추진기, 가열기, 건조기 등에 응용되어지고 있다. 실용 연소기의 대부분은 난류연소를 이용하고 있지만 연소용 공기나 혼합기는 정상류(Steady flow)로 공급되어지는 경우가 많고 비정상류(Unsteady flow)의 성질을 이용하여 연소를 수행하는 경우는 거의 드물다.

본 연구에서는 유로 도중에 급확대부를 가지는 연소기를 이용하여 프로판-공기의 예혼합기에 왕복동 타입의 변동발생장치에 의해 강제적인 변동을 부가한 경우의 연소특성과, 비정상류를 이용한 연소진동 제어 및 Rayleigh 이론에 대한 적용을 실험적으로 고찰하고자 한다.

## 2. 실험 장치 및 방법

Fig. 1에 본 실험에서 사용한 실험장치를 나타내었다. 공급공기량은 200L/min로 일정하게 하고 프로판유량을 변화시킴으로써 당량비를 변화시켰다. 압축기로부터 공급되어지는 고압의 공기는 드라이 필터를 지나 제습되어진 후, 1차공기와 2차공기로 나누어진다. 1차공기는 벤츄리믹서에서 프로판과 혼합되고, 2차공기는 강제맥동 발생장치(Hitachi, 0.2 OP-5T ; 최대압력 0.5MPa, 보아 50mm, 스트로크 18mm, 1기통)에서 맥동이 주어진 후 1차공기와 프로판의 예혼합기와 혼합되어 정류부를 지나 연소부에 공급되어진다. 연소기는 유로 상류측으로부터 정류부, 연소실, 배기덕트 3개의 부분으로 구성되어진다. 혼합기는 내측단면이 종 25mm x 횡 40mm의 정류부를 통과해 연소실 직전에 설치된 높이 28mm 스텝에 의해 일단 축류 되어진 후 40mm x 40mm의 단면을 가지는 연소실에 급확대 되어 스텝후류에 형성되어

지는 재순환 영역에 화염이 형성되어진다. 배기덕트는 내측단면이 40mm x 40mm로 길이 150, 300, 600mm의 3종류를 조합함으로써 덕트길이를 변화시킬 수 있다.

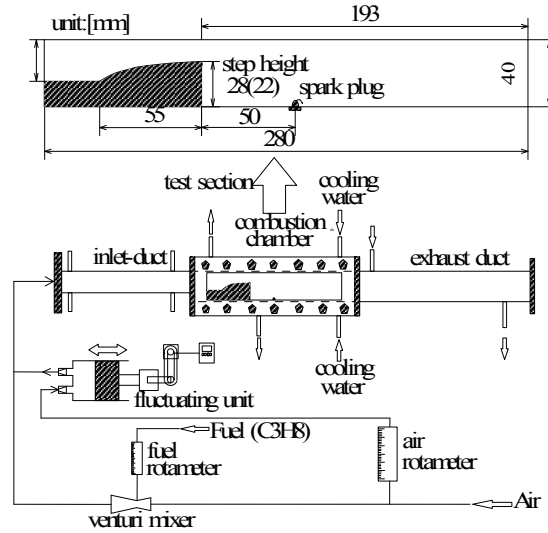


Fig. 1 Experimental apparatus

Fig. 2에 동시 측정장치를 나타내었다. 고속도카메라(Kodak, hs motion analyzer)와 A/D 컨버터(Elmec EC2390 sampling time 50μs)의 동기에는 펄스 딜레이 제네레이터(Pulse delay generator, Stanford research system, WC Model DG535)을 이용하였다. OH 자발광상의 촬영은 OH 필터를 장착한 렌즈(Nikon)를 끼워 화상증폭기(Image intensifier, Yokohama C4412MOD)에 의해 증폭되어진 후 고속도카메라에 촬영되어진다. 압력측정에는 압력변환기(Nagano Keiki, type KH15)를 이용하였다. 실험조건으로서 변동발생장치는 왕복동타입의 용적형이므로 공급하는 강제변동의 주파수에 의해 유량의 변동진폭이 변화한다. 변동발생장치의 주파수는 5Hz에서 65Hz까지 5Hz 간격으로 하였으며 공기유량은 200L/min으로 일정하게 유지한 후 당량비 1.3에 해당하는 프로판유량 13.65L/min까지 변화시켰다.

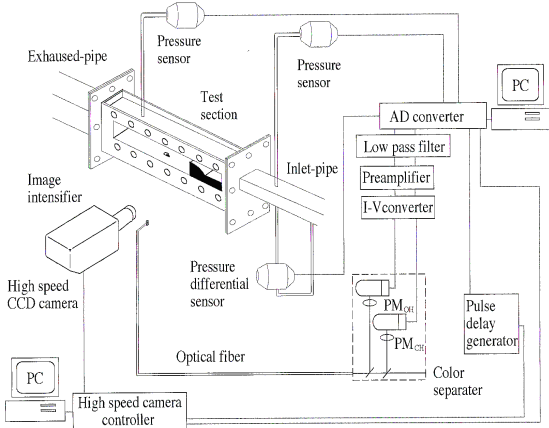


Fig. 2 Set-up of instrumentation

### 3. 실험 결과 및 고찰

강제변동류를 파악하는데 중요한 요소 중의 하나는 유량의 검증이다. 혼합 후의 유체에 강제변동을 부가함에 의해 그 영향이 혼합 전의 공기 및 프로판에 나타날 수 있으므로 강제변동공급 시의 공기와 프로판 각각의 유량특성을 미리 파악해야 한다. Fig. 3에 공기유량 200L/min 경우의 변동유량의 시간에 따른 변화(상)와 파워스펙트럼(하)을 나타내었다. Fig. 3(a)와 같이 유량의 정상공급에서는 거의 변동이 관측되지 않고, (b), (c)의 강제변동공급 조건에서는 부가한 강제변동주파수의 매우 규칙적인 변동이 관측된다. 5Hz부터 증가시켰을 때 정현파의 파형은 점점 증가하다가 25Hz(Fig. 3(b))에서 최대진폭을 나타내었다. 그 후 진폭은 점점 감소하다가 45Hz (Fig. 3(c))에서부터 65Hz까지 피크가 2개로 나뉘는 파형이 되며 이것은 변동주파수가 높을수록 현저하였다. 유량변동의 파워스펙트럼을 고찰하면, 0Hz에서는 피크(Peak)의 주파수(특성주파수)가 존재하지 않는다. 그러나 25Hz의 경우는 부가한 강제변동 주파수의 매우 큰 피크가 관측되며 그 2배, 3배 정수배의 주파수에도 비교적 높은 피크가 관측된다. 45Hz에서는 부가한 강제변동주파수에서의 피크와 그 2배의 주파수에서의 피크가 관측되며 주파수가 증가할수록 2배의 지점에서의 주파수가 높게 관측되었다. 이

것은 본 연구에서 유량검증으로 사용한 시간평균유량 200L/min의 유량과 변동발생기의 실린더의 용적 및 압축비의 관계에 의한 것으로 예상된다. 따라서 이와 같은 형식의 변동발생장치를 이용할 때에는 부가한 강제변동주파수에 의해 공급유체에 가해지는 유량의 변동 강도(Fluctuation intensity of flow rate =  $Q_{rms}/Q_{mean}$ )가 변화하는 것에 주의해야 할 것으로 판단된다.

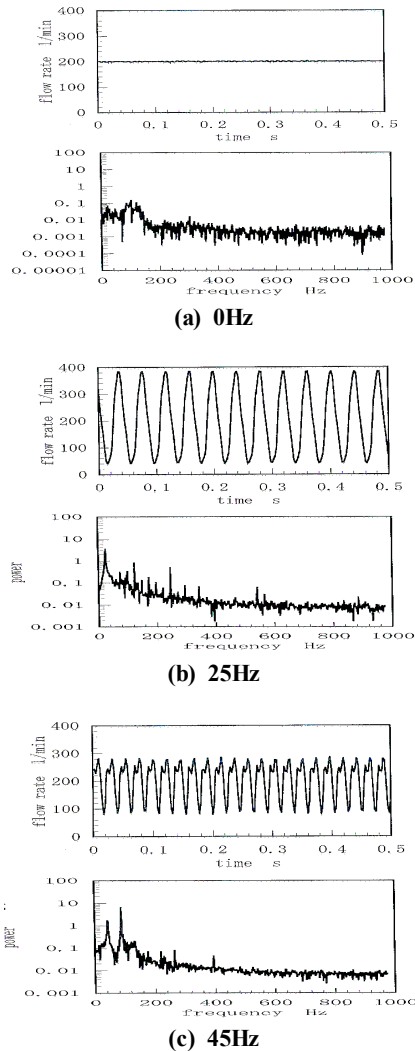


Fig. 3 Fluctuation of air flow rate

Fig. 4에 각 배기덕트(Exhaust duct)의 길이에서 강

제변동 주파수를 부과했을 때의 소음을 나타내었다. 실선으로 나타낸 부분은 정상공급조건일 때이며 급격하게 증가한 당량비부터 연소진동이 발생하고 있음을 나타낸다. 즉  $L_d=450\text{mm}$ 에서  $\phi=1.0$ ,  $600\text{mm}$ 에서  $\phi=1.0$ ,  $900\text{mm}$ 에서  $\phi=0.95$ 에서 연소진동이 발생하고 있음을 나타낸다. 실선으로 표시한 정상공급조건과 비교하여 각각의 기호로 나타낸 강제변동공급조건은 매우 다른 경향이 관측되어진다. 각 덕트길이에 있어서 연소진동이 발생하지 않는 낮은 당량비에서는 강제변동을 부가함에 의해 정상공급의 경우보다 소음이 증가하고 있다. 이것은 강제변동을 부과함에 의해 주기적인 맥동음이 발생하여 그 음이 통상의 배기음에 부과되기 때문인 것으로 예상된다. 그러나 연소진동이 발생하고 있는 조건에 강제변동을 부가하였을 때  $L_d=450, 600\text{mm}$ 의 일부 영역의 경우 강제변동에 의해 연소진동이 억제되어지는 조건이 관측되어진다.  $L_d=900\text{mm}$ 의 경우에는 연소진동이 강력하여 어떤 주파수도 연소진동의 억제에는 효과가 없고 오히려  $\phi=1.25, 1.3$ 의 조건에서는 소음이 110dB까지 상승한다.

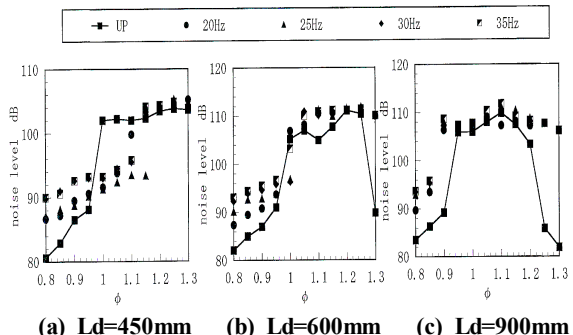


Fig. 4 Noise level with respect to duct length in forced pulsating mixture supply

이것은 덕트길이가 길수록 자려진동에 의한 연소진동의 강도가 강하고 매우 안정된 진동이 발생하기 때문에 본 실험에서 이용한 강제변동의 강도로는 영향을 줄 수 없기 때문인 것으로 예상된다. 자려진동에 의한 연소진동이 발생하는 조건에서 강제변동을 가하면 덕트길이가 짧은 경우 소음이 감소하는 영역이 존재한다. 이것으로부터 강제변동을 부가하는 방법이 일부 연소진동을 억제하는데 효과적임을 알 수 있다.

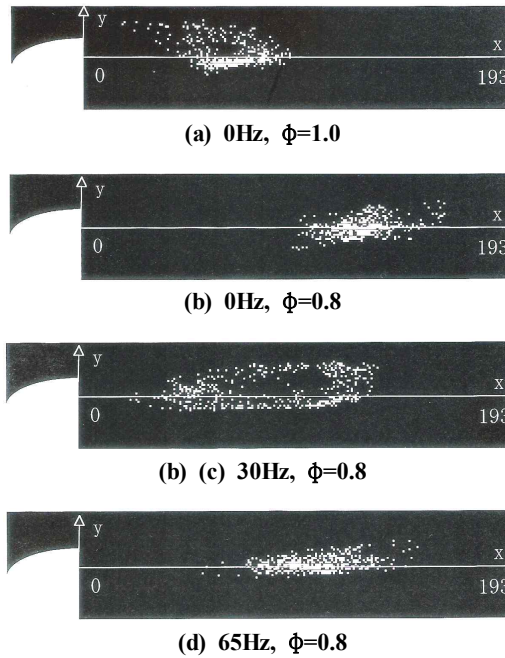


Fig. 5 Distribution of flame area( $L_d=900\text{mm}$ )

OH 자발광상으로 대표되어지는 연소반응영역의 면적을 얻기 위해 다음과 같은 화상데이터처리를 하였다. OH 자발광상이 화상증폭기에 의해 증폭되어진 후 고속도카메라에 의해 촬영되어진다. 얻어진 화상데이터는 유효 화소수  $256 \times 256$ 픽셀로 8비트 데이터로써 컴퓨터에 저장되어진다. OH 반응영역을 명확히 하기 위해 2치화처리(Binary process)를 하였다. 2치화처리 시 휘도값(Intensity value)에 대한 경계치(Threshold)를 결정하기 위해 1024장의 화상데이터의 휘도에 대한 PDF을 구한 후 휘도가 급격히 감소하는 부분을 경계치로 정하였다. 본 실험에서는 경계치를 20으로 하였으며 20 이상의 휘도값을 갖는 픽셀은 최고 휘도치 256으로 20 미만은 0의 휘도값으로 하여 2치화처리를 하였다. 이와 같은 데이터 처리로부터 화상데이터 내의 전체 화염 중에 OH 반응영역의 면적이나 분포를 수치적으로 계산할 수 있다. 이와 같은 방법을 이용하여 화상데이터 처리한 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 덕트길이  $L_d=900\text{mm}$ 일 때 (a)는 정상공급 시의 연소진동이 발생하는 경우(0Hz,  $\phi=1.0$ )이고 (b)는 정상공급 시의 연소진동이 발생하지 않는 경우(0Hz,  $\phi=0.8$ )이며 (c), (d)는 연소

진동이 발생하지 않는 조건에 변동주파수를 부과했을 때의 경우( $\phi=0.8$ 일때 각각 30, 65Hz)이다. 자려진동에 의한 연소진동 발생 시의 경우(a)는, OH 반응영역이 x 방향으로 길게 분포하지 않고 스텝(Step)의 가까운 위치에 집중하고 있는 것이 관측된다. 이것은 연소진동이 발생하면 압력변동이 격렬해지며 화염이 스텝의 상류로 역화하기 때문인 것으로 판단된다. 정상공급의 경우(b)는 OH 반응영역이 대부분 상하 변동이 적고 x 방향으로 스텝으로부터 먼 위치에 집중하고 있다. 여기에 강제변동주파수를 부과했을 경우(c, d)는 연소실 중심부근에 타원형으로 넓어지는 분포상태가 된다. 이것은 강제변동을 부과했을 때 예혼합기에 큰 운동량이 전달되어지고 화염의 위치이동이 증가되었기 때문인 것으로 예상된다. 특히 30Hz에서 넓은 분포형태를 하고 있다. 이것은 유량 검증에서 전술한 바와 같이 유량의 변동진폭이 25~30Hz 부근에서 최대가 되기 때문에 이의 영향에 기인한 것으로 판단된다.

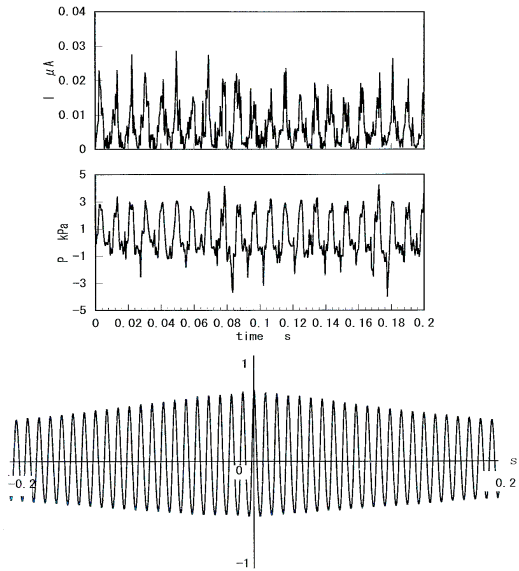


Fig. 6 Relations between pressure fluctuation, OH-emission fluctuation and cross-correlation( $L_d=600\text{mm}$ ,  $\phi=1.0$ , 0Hz)

연소진동의 발생은 전술한 바와 같이 Rayleigh 이론( $E = \oint p'q'dt > 0$ )에 근거를 두고 있다. 이때 중요한 요인이 압력변동과 발열량변동과의 관계이며 그 위

상차  $\tau$ 가  $-\pi/2 < \tau < \pi/2$ 의 범위에 있을 때 연소진동이 발생하는 것을 의미한다. 이의 검증을 위해 연소실 상부에 압력센서, 발열량으로서의 OH 자발광을 얻기 위해 광학파이버(Optical fiber)를 설치하여 동시 측정하였다. Fig. 6은 정상공급일 때 연소진동이 발생한 경우( $L_d=600\text{m}$ ,  $\phi=1.0$ , 0Hz)의 OH 자발광신호와 압력신호 및 2 신호의 상호상관을 나타내었다. Fig. 7은 Fig. 6과 동일한 조건에 강제변동주파수 25Hz를 부과하여 연소진동이 억제되었을 경우이다. Fig. 6에서 관측되는 바와 같이 연소진동이 발생할 경우 OH 자발광신호와 압력신호의 변동은 상당히 크다. 또한 2 신호의 상호상관도 매우 높은 것을 알 수 있다. 그러나 강제변동을 가하여 연소진동이 억제된 경우(Fig. 7)는 압력과 OH 자발광의 변동이 감소하고 2 신호의 상호상관도 현저하게 낮음을 알 수 있다.

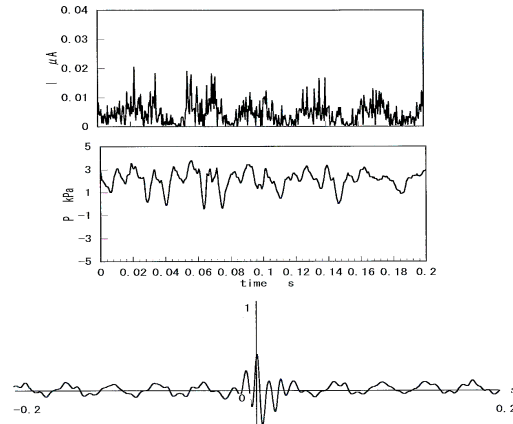


Fig. 7 Relations between pressure fluctuation, OH-emission fluctuation and cross-correlation( $L_d=600\text{mm}$ ,  $\phi=1.0$ , 25Hz)

이것은 연소진동의 발생여부를 판단할 수 있는 하나의 수단이 될 수 있는 것으로 예상된다. 즉 연소진동 발생가능성이 있는 연소장치에 압력과 발열량 신호를 감지할 수 있는 센서를 설치하고 신호처리를 통해 상호상관값을 계산할 수 있다. 이 상호상관값이 어느 이상이 되면 연소진동의 징후로 판단하여 신호를 피드백하여 공기 또는 연료 유량을 제어함으로써 연소진동 발생을 사전에 방지할 수 있을 것으로 판단된다.

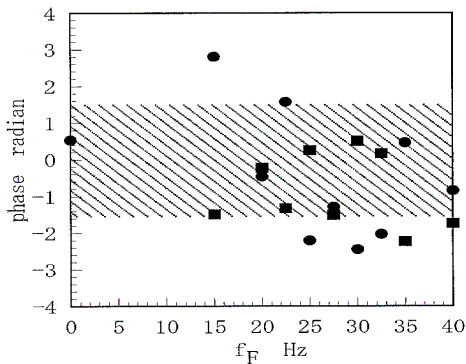


Fig. 8 Phase difference between pressure fluctuation and OH-emission fluctuation( $L_d=600\text{mm}$ ,  $\phi=1.0$ )

Fig. 8에  $L_d=600\text{m}$ ,  $\phi=1.0$ 의 경우의 연소실내 압력 변동신호와 OH 자발광신호의 위상차를 나타내었다. 그림 내의 빗금친 부분은 Rayleigh의 연소진동 발생 조건을 만족하는 위상차 범위(■ : 부과한 강제변동 주파수에 의한 변화, ● : 시스템 특성주파수에 의한 변화)를 나타낸다. 0Hz 경우에 연소진동이 발생하고 있음을 확인할 수 있으며 여기서 매우 특징적인 경향이 관측되어진다. 연소진동 억제에 효과가 있었던 강제변동주파수 조건에서는 부과한 강제변동주파수의 변화에서의 위상차가 대부분 연소진동 개시 판정 조건을 만족하고 있다. 이것으로부터 강제변동을 가해 연소진동의 억제에 효과적일 때의 연소현상이 강제변동주파수에서의 연소진동과 매우 유사한 거동을 하고 있으며 유량이 강제적으로 변동되어지고 있기 때문에 압력변동과 열발생속도가 적절히 억제되어 불쾌한 연소소음과 같은 상태에는 도달하지 않는 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

예혼합기에 강제적인 변동을 부과함에 의해 발생하는 연소특성과 연소제어 및 Rayleigh 이론에 대한 실험적 적용을 조사하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 비정상연소는 유량변동에 대한 검증이 중요하며 강제변동을 부과할 때는 강제변동주파수와 변동 강도의 영향을 고려해야 한다.

2. 연소진동이 발생할 경우 예혼합기에 강제변동주파수를 부과함에 의해 일부 영역에서 연소진동이 억제되어질 수 있다.
3. 연소실 내의 압력신호와 OH 자발광신호를 측정 한 후 2신호의 상호상관을 계산하여 연소진동을 예측할 수 있다.
4. Rayleigh 이론을 본 실험에 적용하여 위상 차가 판정조건 내에 있음을 확인하였다.

#### 참고문헌

1. S. Y. Jun, S. W. Park, H. J. Song and J. W. Park, "Assessment of GHG Emission Reduction Potential in Extension of Nuclear and Renewable Energy Electricity Generation", Journal of Energy Engineering, Vol. 18, No. 3, pp. 191-202, 2009.
2. T. Nioka, M. Kouno and J. Satou, "Principles of Combustion", Ohmsha, 2001.
3. M. Katsuki and J. H. Whitelaw, "The Influence of Duct Geometry on Unsteady Premixed Flames", Combustion and Flame 63, pp. 83-94, 1986.
4. K.R. McManus, T. Poinsot and S. M. Candel, "A Review of Active Control of Combustion Instabilities", Prog. Energy Combust. Sci. 19, pp. 1-29, 1993.