

주기적 연료공급에 따른 화염거동에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on Flame Characteristics with Periodical Fuel Supply

이 태 원*, 이 동 혁*, 이 병 준*, 정 석 호**
T. W. Lee , D. H. Lee , B. J. Lee , S. H. Chung

Key words : periodic jet (주기적 제트), lift-off (화염부상), extinction (소멸), premixed flame (예혼합화염)

ABSTRACT

Flame characteristics of periodic fuel jets were studied experimentally by supplying the fuel periodically using solenoid valve. Flame was observed using a high speed camera, a 35 mm camera and a cathetometer. Hot-wire ananometer was used to measure the speed of fuel flow at the nozzle exit to analyze the flow characteristics. Various types of flame characteristics such as the flame lift-off and extinction were observed for different ranges of period, duty, and flow rate of the jet. Especially lift-off and extinction were affected by variations in the period and the flow rate, but the flame shape was not affected much by the variation in the flow rate. Decreasing duty of the pulses applied to the solenoid valve promotes lift-off and enhances premixed flame characteristics.

1. 서 론

확산 분류(diffusion jet)는 가스 터빈 연소실, 보일러 등의 광범위한 응용 분야로 인하여 널리 연구되어오고 있는 분야이다. 특히 난류 확산 분류와 관련된 연구는 주로 난류 혼합과 거대구조(coherent structure)와의 관계규명, 난류화염과 난류유동장과의 상호작용 및 이들의 모델링으로 대별할 수 있다.

난류 확산 화염의 경계에서 연료를 함유한 거대 구조와 외부 공기가 간헐적(intermittent)으로 교차하며¹⁾, 또한 이들 거대 구조

의 생성은 유동장에 주기적인 가진을 줌으로써 조절할 수 있음이 밝혀졌다.²⁾ 유동장에 대한 가진은 음향진동(acoustic oscillation)과 화염의 펄럭임(flickering)을 유발시키고, 유발된 음향진동은 화염 진동과 상호작용하게 된다. 화염의 펄럭임은 적절한 조건아래에서는 화염을 작은 진동수로 매우 강하게 진동하게 하여, 화염이 주기적으로 노드지게 하거나, 두개의 화염으로 분리되게 한다.

화염진동과 관련된 연구는 화염 외부에 존재하는 외부 예열층에 발생한 수직 부력 경계층(vertical buoyant boundary layer)의 안

* 서울대 기계공학과 연소실험실

** 정회원, 서울대 기계공학과

정성에 기인한다는 연구분야³⁻⁷⁾, 연료 제트와 화염주위 공기와외의 전단력에 의한 경계층 불안정성 이론과 연관된 Tollmien-Schlichting 교란파로 설명하려는 연구분야⁸⁾와 층류 제트의 불안정성⁹⁾으로 설명하려는 분야 등으로 대별할 수 있다.

이상의 연구들은 주로 화염의 외부에 관을 두고 스피커를 이용하여 연료장, 또는 화염 외부의 관을 흐르는 공기의 유동장에 평균 유동장의 속도에 비해 상대적으로 작은 크기의 가진을 주어 실험하였다. 이러한 방법은 화염의 특성에 여러가지 효과를 미쳐 실용적인 적용에 관심이 있으나 스피커를 이용하는 방법은 연료 혹은 공기류 중에 스피커가 장착될 수 있는 공간이 구비되어야 한다는 문제점이 있다.

본 연구는 난류 확산 분류에서 발생하는 간헐적인 연료 공급에 의한 화염의 안정화와 형상에 미치는 요인에 대한 기초 모델링으로 솔레노이드 밸브를 여닫음으로써 주기적 유동장을 만들어 노즐을 통해 대기중으로 분사하여 화염에 공급되는 연료의 주기와 속도변화에 의한 화염의 안정성과 비예혼합제트의 상호작용에 관하여 고찰하였다.

이러한 방법은 유동의 평균속도와 변동성분속도가 거의 같은 특성을 지니며, 주류는 정상상태로 분사시키며 보조류에만 주기성을 부여하여 변동성분의 특성을 다양하게 변화시킬 수 있는 장점이 있는 반면에 밸브의 기계적인 특성으로 인하여 가진 주기의 범위가 제한되는 문제점이 있다. 이러한 연구의 초기단계로 주류 중에 펄스를 준 비예혼합 제트 화염의 특성을 실험적으로 고찰하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

실험장치의 개략도는 Fig.1과 같다. 유체 유동에 주기적 변동(Oscillation) 특성을 주기 위하여 솔레노이드 밸브에 사각 펄스파의 전압을 가하여 밸브를 개폐 함으로써 연료(LPG)의 강한 펄스 제트를 형성하였다.

사각 펄스파의 주기와 듀티(duty : 전체 시

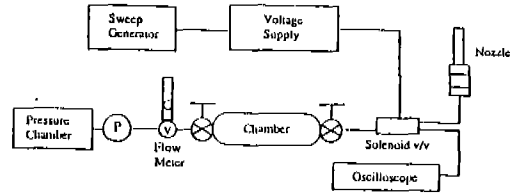


Fig.1 Schematic diagram of the experimental apparatus

간에 대한 솔레노이드 밸브가 열리는 시간의 비)는 스위프 제너레이터(WAVETEX, Model 164)로 조절하였다. 솔레노이드 밸브를 여닫을 때 압력파가 발생하므로, 그 영향이 유량계에 미치지 않도록 챔버를 유량계와 솔레노이드 밸브 사이에 연결되었다. Bubble flow meter로 검증한 결과 유체의 요동이 유량계에는 영향을 거의 미치지 않았으며, 따라서 로타미터를 검정하여 유량을 측정하였다.

노즐은 2mm I. D.의 석영으로 만들었으며, 노즐길이는 3.7cm이고, 솔레노이드로부터 노즐까지는 길이 144cm, 내경 4.5mm인 테프론관을 사용하였다.

본 실험에서의 변수는 듀티, 유량, 주기, 실험장치의 형상(튜브와 노즐의 길이와 내경) 등이다. 실험장치의 형상은 고정시키고, 유량 30~140ml/min의 범위에서 듀티비 1/2, 1/4와 1/8, 주기 25~40ms로 변화시키면서 실험을 수행하였다.

화염의 거시적 관찰을 위하여는 노즐시간을 길게 하여 화염의 전체적인 모습을 직접 사진으로 촬영하였으며, 시간 진행에 따른 화염 형태의 변화 촬영을 위해 500fps의 중속도 카메라(LOCAM, Model 51-0003) 및 1000fps의 고속도 카메라, 35mm 카메라(NIKON FM-2), 카세토미터 등을 이용하였으며, 가시화를 위하여 솔리렌법을 사용하였다. 또한 개략적인 속도장을 알기위해 열선유속계(DANTEC)를 사용하여 노즐 출구에서의 속도를 측정하였다.

3. 결과 및 검토

솔레노이드 밸브가 항상 열려있는 정상상

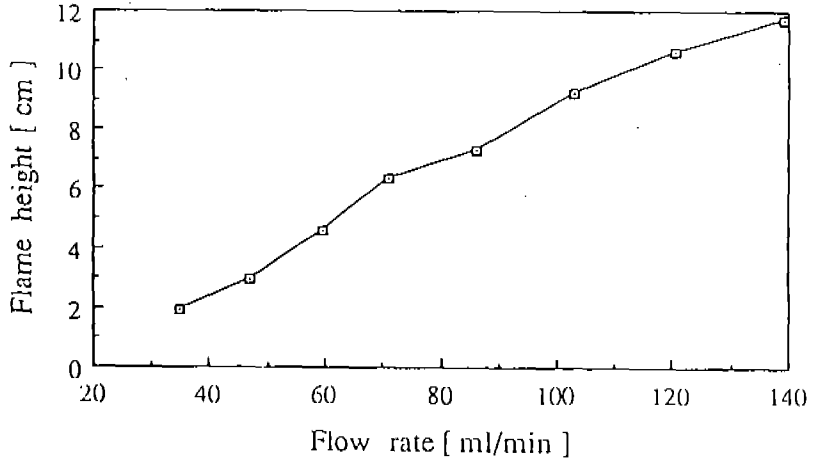
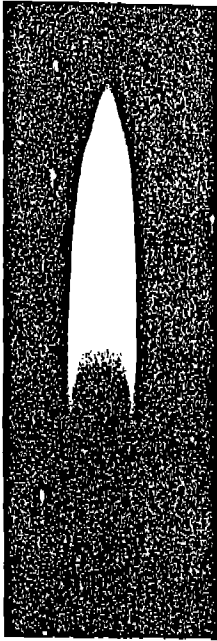


Fig.2 Direct photograph of the flame with 60ml/min fuel flow rate, exposure time 1/8 sec and Attached flame height with fuel flow rate for the steady state

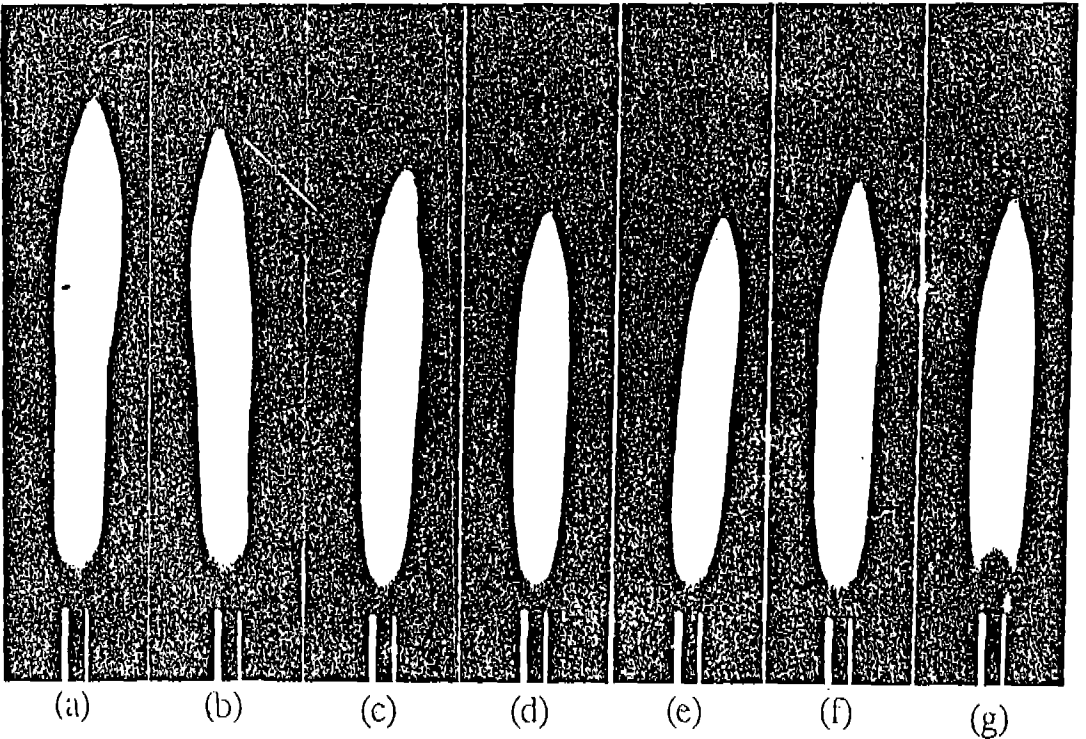


Fig.3 Direct photographs of the flames at duty 1/4, fuel flow rate 60ml/min Exposure time 1/8 sec : (a) Period 35, (b) 33, (c) 31, (d) 29, (e) 27, (f) 25, (g) 20ms

태에서 유량이 60 ml/min 인 경우의 화염형상을 노출시간 1/8 초로 촬영한 직접사진과 유량의 증가에 따른 화염길이 변화를 Fig.2 에 나타내었다. 화염은 항상 노즐 팁에 부착되어 있고, 유량의 증가에 따라 거의 선형적으로 화염길이 증가하였다.

주기적인 연료공급을 한 경우, 듀티 1/4은 듀티 1/2 과 듀티 1/8 의 특성을 함께 보여 주므로, 듀티 1/4 의 경우를 먼저 고찰하고, 듀티 1/2, 듀티 1/8 의 순서로 고찰한다.

(1) 듀티 1/4 의 경우

Fig.3(a)-(g)는 유량 60ml/min 의 경우에 대한 주기의 변화에 따른 화염형상의 변화를 보여준다. 주기의 변화에 따라 화염의 길이가 비선형적으로 변화함을 볼 수 있다.

유량을 100ml/min 으로 증가시키면 화염의 전체적인 특성은 유량 60 ml/min 의 경우와 유사하나, 주기변화에 따라 유량 100ml/min 의 경우에는 화염부상이 발생한다. 노출시간 1/8 초로 촬영한 노즐 팁 부근의 화염 사진은 Fig.4와 같다. 주기 38ms 인 Fig.4(a)에서 작은 화염이 외부 화염 안쪽에 나타난 것을 볼 수 있으며, 이 작은 화염과 위쪽에 존재하는 외부 화염의 매연(soot) 지역이 겹치는 부분은 노드(node)가 생김을 볼 수 있다. 주기 33ms 인 Fig.4(b)는 화염의 하단부가 아래로 뺏겨진 부상 화염으로 일반적인 노즐로 부터의 정상상태 확산화염과는 상

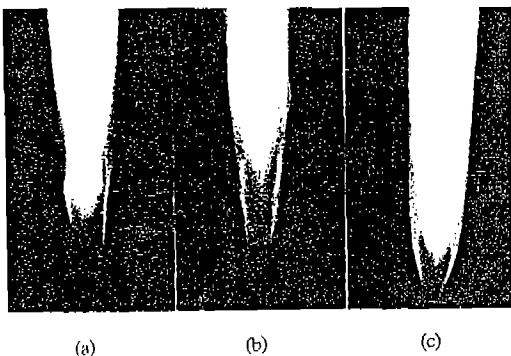


Fig.4 Enlarged photographs of the flames in the vicinity of nozzle tip at duty1/4, fuel flow rate 100ml/min
(a) Period 38. (b) 33. (c) 28ms

이한 모습을 보임을 알 수 있다. 주기 28ms 인 Fig.4(c)는 화염의 가장 아랫부분이 아래로 볼록하게 단혀 있는 매우 특이한 모습을 나타낸다.

위의 결과로부터 유량이 일정한 경우 주기가 변하면 화염형상이 변화하며, 연료의 유량이 화염부상의 여부를 결정함을 알 수 있다. 또한 화염부상이 발생하는 유량범위에서도 모든 주기에서 화염부상이 발생하는 것이 아니라 화염부상이 발생하는 특정 주기영역이 존재함을 알 수 있다.

관찰결과 화염의 필럭임이 발생하는 주기영역이 불연속적으로 존재하며, 화염이 필럭임이 사라지는 안정된 영역이 존재하였다. 그리고, 화염이 필럭있게 되는 주기영역일지라도 주기가 긴 영역일 때가 주기가 짧은 영역의 경우보다 화염이 필럭임의 강도가 큼이 관찰되었다.

열선 유속계로 노즐 팁 상단 2mm의 노즐 중앙에서 유량 60 ml/min 에 대해 측정된 속도장을 Fig.5에 나타내었다. 속도장은 매 주

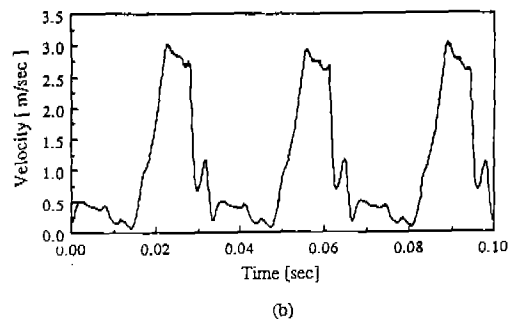
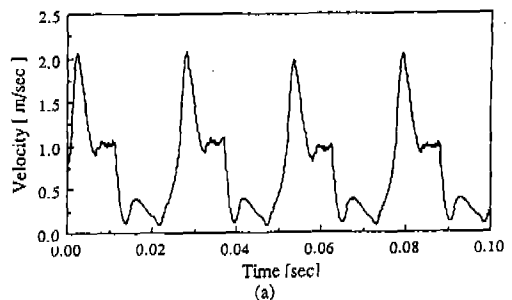


Fig.5 Velocity profile at the nozzle exit, duty 1/4, fuel flow rate 60ml/min
(a) Period 27. (b) 35ms

기마다 일정한 형태가 반복됨을 볼 수 있다. 속도장의 듀티비는 솔레노이드 개폐의 듀티비인 0.25 보다 큰 값을 나타내며 속도장의 불균일한 형태가 나타나고 있는데 이는 솔레노이드 밸브의 과도특성과 관내의 압력과 특성에 기인하는 것으로 예측된다. 속도가 작은 영역의 여러 피크특성은 열선 유속계의 특성상 속도의 양을 단정할 수는 없으나, 관내 유동의 관성특성에 기인하여 음의 속도를 가지는 경우도 있을 것으로 예측된다.

솔레노이드 밸브가 항상 열려있는 경우, 즉 정상 상태의 경우에 본 실험의 유량범위에서는 화염부상을 관찰할 수 없으나, 노출시간을 짧게 하여 찍은 직접 사진으로부터 층류 비예 혼합 제트¹⁰⁾에서 발생하는 부상화염과 유사한 얇은 청색의 예혼합 특성의 화염이 관측되었다. 이 경우 외부공기의 확산에 의해 예혼합적 특성을 갖는 층류 화염이 존재하기에는 노출로부터의 거리가 작기 때문에 공기가 노출내로 유입되어 미리 연료와 혼합되었음을 유추할 수 있다. 즉, 한 주기 내에서 음의 속도가 존재할 수 있다. 이는 두 평행관 사이에 압력이 주기적으로 변하는 경우, 중심에서의 속도는 양이더라도 벽면 근처에서의 속도는 음일 수 있다는¹¹⁾ 결과와 부합된다.

약 두 주기의 시간 변화동안 노출 끝부터 황색화염의 선단부까지 및 화염의 밑면까지 거리의 변화를 Fig.6 에 나타내었다. Fig.6(a)는 매 주기마다 동일한 형태의 변화 과정을 보여준다. 또한 같은 유량이지만 35 ms의 주기는 화염이 강하게 펄럭이는 주기 영역임으로 안정한 주기영역인 27 ms 경우보다 화염의 최고점이 높음을 알 수 있으며, 주기보다 상당히 긴 노출시간으로 화염을 촬영하면 이러한 시간에 따른 화염변화가 모두 누적되어 나타나게 되고, 화염의 최고점이 화염의 길이로 나타나게 된다. 따라서 Fig.3에서 화염의 길이가 주기의 감소에 따라 감소하였다가 다시 증가하는 비선형적인 양상을 보이는 것도 펄럭임의 강도변화에 의한 것으로 유추된다. 또한 화염이 펄럭이게 되는 주기영역일 지라도 주기가 긴 영역일 때가 주기가 짧은

영역의 경우보다 화염의 펄럭임의 강도가 크므로, Fig.3(a)-(b)의 화염이 Fig.3(f)-(g)경우보다 화염 길이가 길게 나타나게 된다.

주기 35ms의 경우, 속도장은 매 주기마다 반복(Fig.5 (b) 참조)되는데 화염 형태는 두 주기마다 반복되는 것으로 미루어 화염의 형상 변화가 단순히 노출 선단으로 분출되는 연

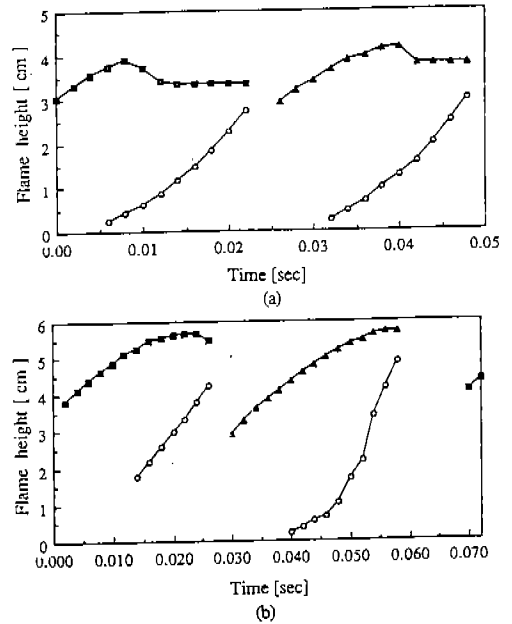


Fig.6 Flame height with time at duty 1/4, fuel flow rate 60ml/min: (a) Period 27, (b) 35 ms (○: Height of flame base, others: Height of flame tip)

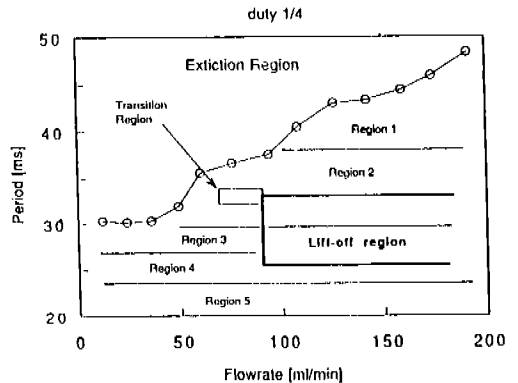


Fig.7 Schematic diagram for the flame characteristics at duty 1/4, fuel flow rate versus period

로 유동장만으로 해석할 수 없음을 알 수 있다. 또한 화염이 펄럭이는 것은 화염변화의 양상이 매 주기마다 일정한 형태로 반복되지 않기 때문임을 알 수 있다.

듀티 1/4 일때 유량과 주기의 변화에 대한 화염형상의 특성을 Fig.7에 나타내었다. 이 경우 소염이 발생하는 주기가 유량 30~50ml

/min 에서는 31ms 로 일정하고, 그 이상의 유량에서는 유량이 증가할 경우에 소염시의 주기도 증가하였다. region 1은 심한 강도 변화의 빛이 화염으로부터 발산되며 전체적으로 극히 불안정한 화염 모습을 보이는 영역이며, region 2는 화염이 두개로 보이면서 펄럭거리며 노즐 팁 부근에서 매우 불안정한

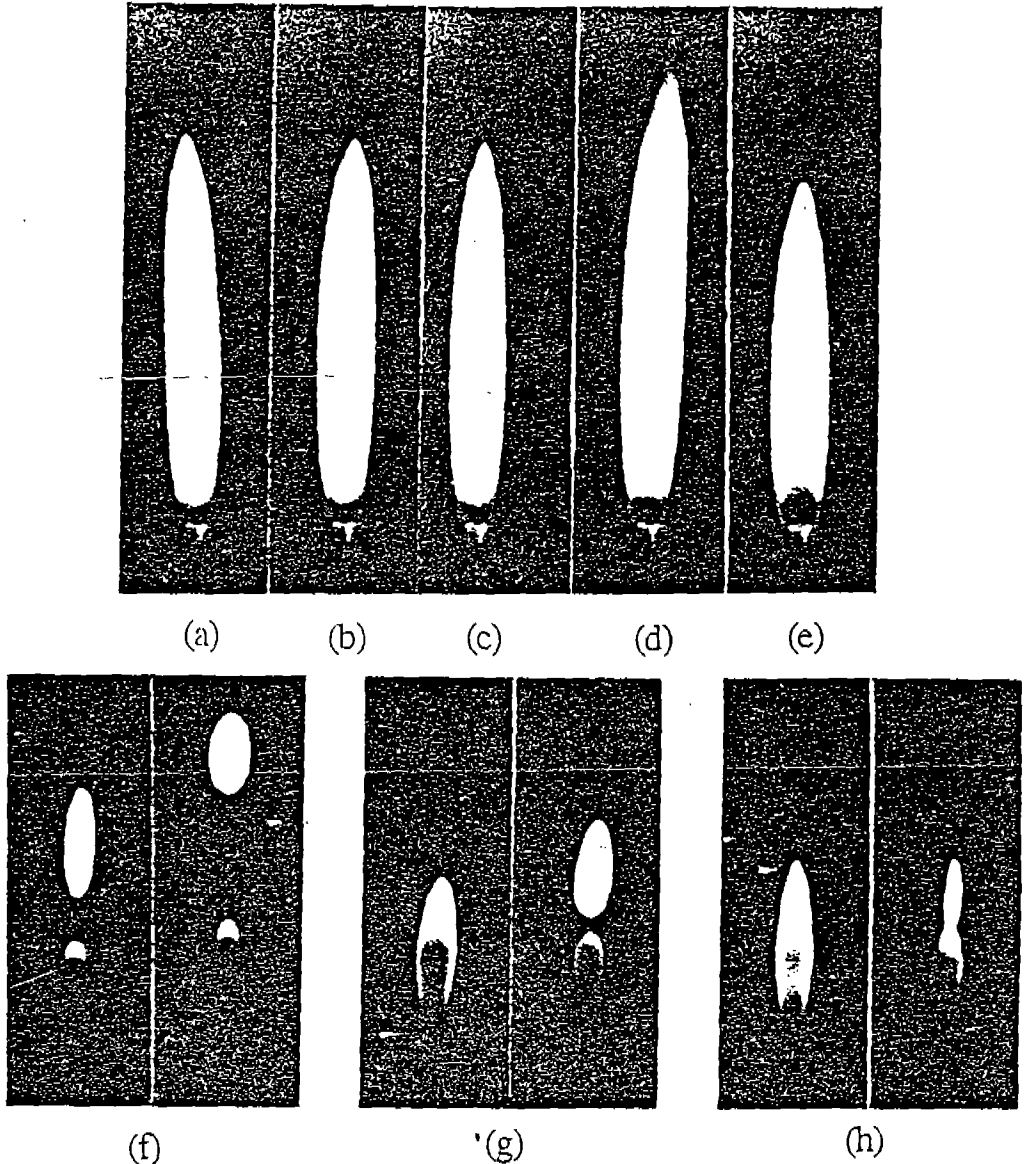


Fig.8 Direct photographs of the flames at duty 1/2, fuel flow rate 60ml/min Exposure time 1/8sec: (a) Period 39, (b) 38, (c) 37, (d) 35, (e) 27ms, Exposure time 1/500sec: (f) Period 38, (g) 35, (h) 32ms

모습을 보이는 영역이며, region 3은 두개로 보이던 화염이 하나로 합쳐진 후, 노즐 선단에 완전히 부착되기 전까지의 영역이고, region 4는 화염이 노즐 선단에 부착되어 있는 영역이며, region 5는 화염의 매연지역 하단부가 열리는 영역이다. 또한 transient region 은 화염 부상이 과도적으로 발생하는 영역이며 lift-off region 은 화염부상이 발생하는 영역이다. 유량이 70 ml/min 이하에서는 모든 주기에서 화염은 항상 노즐 선단에 부착되어 있으나, 유량 85 ml/min 이상에서는 주기 26 ms와 33 ms 사이에서 화염 부상이 발생하였으며, 70 ml/min 과 85 ml/min 사이의 유량에서는 과도적으로 노즐 팁에 붙었다 떨어졌다 하는 모습이 주기 33 ms와 35 ms 사이에서 관찰되었다.

(2) 듀티 1/2의 경우

Fig.8(a)-(e)는 듀티 1/2, 유량 60 ml/min 에 대한 주기의 변화에 따른 화염 형태의 변화를 보여준다. Fig.8(d)에서 화염길이 갑자기 증가하다가 다시 감소하는 것을 볼 수 있는데 이러한 현상은 화염의 펄럭거리는 강도의 변화에 의한 것이다. 또한 매연지역의 하단부가 주기의 변화에 따라 하방으로 볼록한 형태에서 상방으로 볼록한 형태로 변화되는 것을 알 수 있다.

Fig.8(f)-(h)에는 듀티 1/2, 유량 60 ml/min 경우에 대한 화염을 노출시간 1/500 초로 촬영한 직접사진을 나타내었다. 이러한 노드가 있거나 또는 두개의 화염으로 분리되는 것은 Toong⁸⁾ 등과 Toepler¹²⁾ 등에 의해 관찰된 self-sustained flame oscillation 과 유사한 형태를 보이고 있다.

유량 60 ml/min 의 경우에 주기를 변화시키면서 관찰한 결과, 주기 40 ms 이상에서 극히 불안정하며 강도 변화가 매우 심한 빛을 발산하던 화염이 주기 39 ms 에서는 어느정도 안정되었다. 주기를 더 감소시켜 37 ms~36 ms 에서는 노란색 화염 부분과 노즐 선단 부근의 예혼합 화염 성격의 청색 화염의 경계가 위로 밀려 올라가는 모습이 관찰되었으며, 주기 36 ms 이하에서 위로 밀려 올라간 부분

에서 노란색의 작은 화염이 하나 생성되어 전체적으로 화염이 두개로 보이게 되고, 주기가 더 짧아지게 되면 이 작은 화염이 점점 화염 하류쪽으로 뚫고 올라가듯이 커져 결국 외부 화염과의 경계가 사라져 전체적으로 화염은 하나로 보이게 되었다(Fig.9 참조). 화염이 하단부에서 뚫고 나와 화염이 두개로 보이는 경우 화염이 매우 크게 펄럭이게 되는데, Fig. 8의(d)에서 화염이 길어진 것도 이러한 원인에 기인한다. 주기가 짧아지면 뚫고 나온 화염이 어느정도 커져 외부 화염의 경계와 겹쳐지게 되어 화염의 펄럭거림은 거의 사라지고 정상 상태의 화염과 비슷한 형태를 갖게 된다.

유량이 100 ml/min 이상에서는 60 ml/min 에서 관찰된 양상과는 달리 듀티 1/4의 경우처럼 주기 36 ms 에서부터 화염 안쪽에 어두운 부분이 존재하며 주기가 짧아짐에 따라 이 어두운 부분이 점점 커지며 주기 35 ms 에서 화염의 노란색부분 하단이 열리게 된다.

유량을 변화시키며 관찰한 결과, 모든 유량과 주기의 범위에서 듀티 1/4과는 달리 화염부상을 관찰할 수 없었다. 유량을 일정하게 유지하면서 주기를 변화시키면 화염의 전체적인 형상이 변하며, 특히 화염의 윗쪽 보다는 아랫쪽인 노즐 선단 부근에서 확연한 변화를 보였다. 주기가 일정한 경우에 유량을 증가시키면 화염의 길이에만 영향을 미치고, 화염의 형상에는 별다른 영향을 주지 못하였다.

듀티가 1/2 일때 유량과 주기의 변화에 따

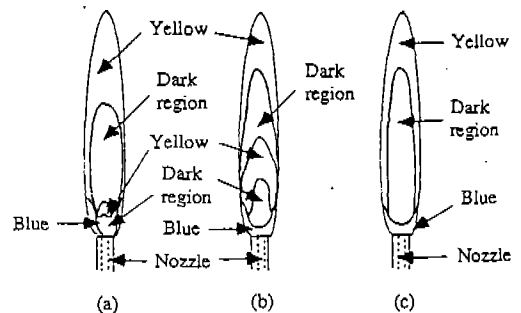


Fig.9 Schematic diagram showing the variation of the flames at duty 1/2, fuel flow rate 60 ml/min
(a) Period 35, (b) 32, (c) 27 ms

큰 화염형상의 특성을 Fig.10에 도시하였다. 유량 30~50 ml/min 에서는 소염시의 주기가 38ms로 일정하고, 50 ml/min 이상에서는 유량이 증가하면 소염시의 주기도 증가하여 유

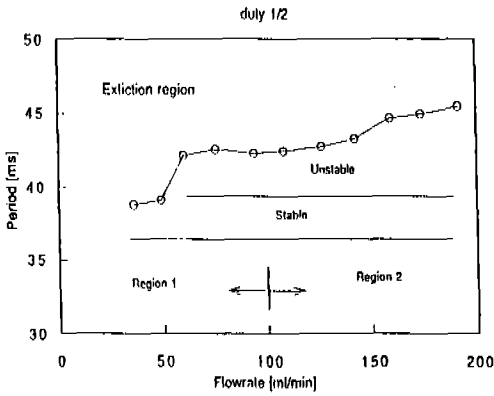


Fig.10 Schematic diagram for the flame characteristics at duty 1/2, fuel flow rate versus period

량 190 ml/min 에서는 주기 46ms에서 소화가 일어났다. 여기서 region 1은 주기 36ms 이하에서 위로 밀려 올라간 부분에서 작은 화염이 하나 생성되어, 이 작은 화염이 점점 화염 하류쪽으로 뚫고 올라가듯이 커지는 영역이며, region 2는 주기 36ms에서부터 화염 안쪽에 어두운 부분이 존재하며 주기가 짧아짐에 따라 이 어두운 부분이 점점 커지며 주기 35ms에서 화염이 노란색부분 하단이 열리게 되는 영역이다. 듀티비가 1/2인 경우의 화염에서는 화염부상은 관측되지 않았다.

(3) 듀티 1/8의 경우

Fig.11(a)-(f)에 유량 60ml/min의 경우에 대한 주기의 변화에 따른 화염형상 변화를 노출시간 1/8초로 촬영한 직접사진을 나타내었다. 화염이 부상하였다가 다시 노출 틈에 부착되는 모습을 볼 수 있다. Fig.11(a)에서 화염이 두개로 보이며, 이 두 화염이 겹치는

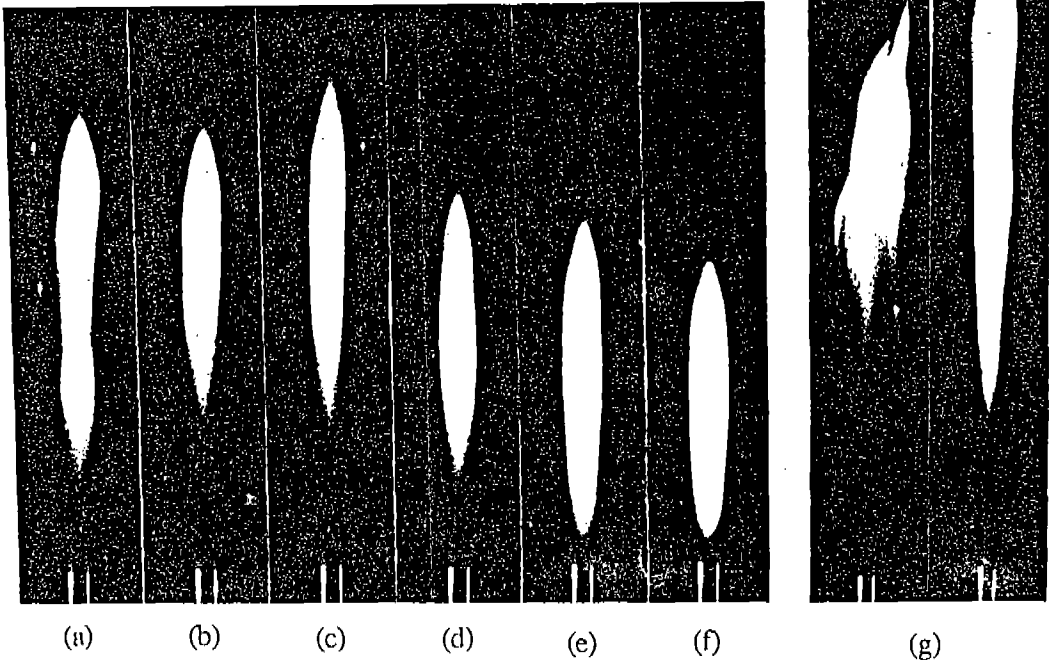


Fig.11 Direct photographs of the flames at duty 1/2, exposure time 1/8sec :
 Fuel flow rate 60 ml/min : (a) Period 33, (b) 31, (c) 29, (d) 27, (e) 25, (f) 23
 Fuel flow rate 140 ml/min : (g) Period 30ms

경계가 노드져 있음을 알 수 있다. 유량 140 ml/min, 주기 30ms의 경우 불규칙하게 화염의 밑단이 간헐적으로 위쪽으로 말려 올라가 화염의 밑면적이 매우 넓어지게 되는데 Fig.11(g)는 말려 올라간 경우의 사진과 그렇지 않은 경우의 사진을 함께 보여준다.

유량과 주기를 변화시키며 관찰한 결과, 유량에 관계없이 주기가 27ms 이상에서 화염 부상이 일어났으며, 주기 31ms 이상에서 부터 소염이 발생하기 전까지의 화염이 두개로 보이며 펄럭거리고(Fig.11(a)참조), 주기 31~30ms에서 화염이 하나로 보이면서 어느정도 일정한 부상높이를 가지며, 주기 30~27ms에서는 다시 화염이 두개로 보이며 펄럭였다. 그러나, 주기가 31ms 이상에서는 주기가 짧아지는 경우 안쪽화염이 커지고, 화염의 부상높이 또한 증가하는 영역이지만, 주기 30~27ms에서는 주기가 짧아질 수록 안쪽의 화염이 줄어들며 부상높이가 줄어드는 영역으로 서로 반대의 현상을 관찰할 수 있었다. 화염의 펄럭거리는 강도는 주기 31ms 이상의 영역이 주기 30~27ms 영역보다 훨씬 컸다. 27ms 이하의 주기에서 화염은 노즐에 부착되어 있었다.

관찰결과 화염형상의 변화는 유량의 변화에는 거의 무관하며, 주기의 변화에 의존함을

알 수 있었다. 이러한 특성들은 듀티 1/2, 1/4, 1/8의 모든 경우에서 관찰되므로, 이러한 특성들은 듀티에 무관함을 알 수 있다. 또한 듀티 1/2, 듀티 1/4, 듀티 1/8의 경우를 비교하여 볼 때 듀티의 감소는 화염부상을 촉진시킴을 알 수 있었다.

Fig.12는 유량 126ml/min, 주기 28ms인 경우의 고속도 슬리렌 사진으로 화염과 유동장의 변화과정을 나타낸다. 슬리렌 사진은 농도의 구배에 비례하므로 사진에서 화염 하부의 명암이 교차하는 경계는 농도의 변화, 즉 연료와 공기의 경계를 나타낸다. 화염이 존재하는 경우 화염에 의한 예열 지역의 두께가 예혼합화염의 경우 1mm이하이므로 화염 상류의 영역은 순수한 유동장의 변화로 볼 수 있다. 두번째 사진 이후 8번째 사진까지의 노즐 부근의 농도 변화점이 노즐 단면 전체에 퍼져 있지 못하고 뾰족한 형태를 취함에 비추어 노즐로부터의 연료 유출이 없음을 유추할 수 있다. 9번째 사진에서 노즐 부분의 뾰족하던 부분이 밀려올라가는 것과 외부와의 밀도차가 없는 것으로 미루어 공기의 유동이 있음을 유추할 수 있다. 이것으로 Fig.5의 열선 유속계로 측정된 부분에서 음의 속도가 있음을 유추한 가정을 뒷받침할 수 있다. 즉, 끝부분이 뾰족한 두번째에서부터 8번째사이의 연료유출이 없는 사

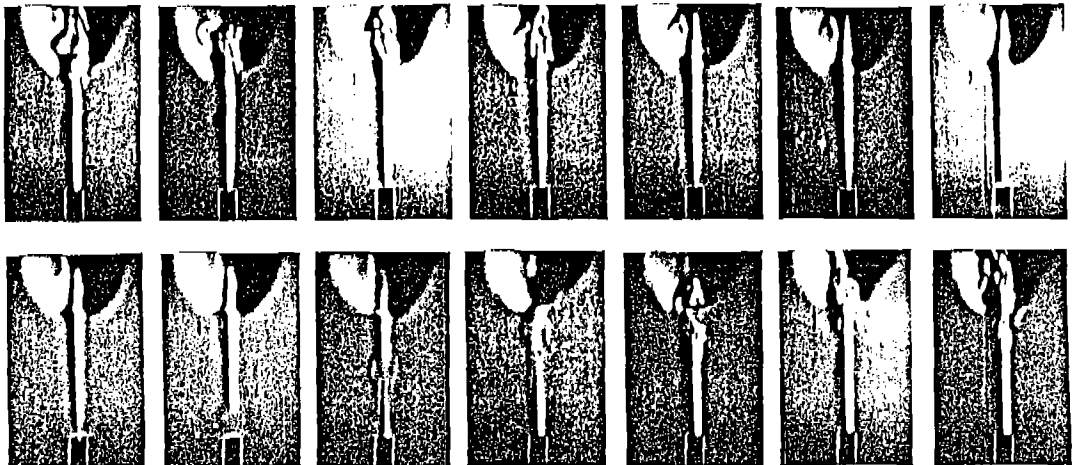


Fig.12 Schlieren photographs of the flame at duty 1/8, period 28ms, fuel flow rate 126ml/min, time interval 2ms

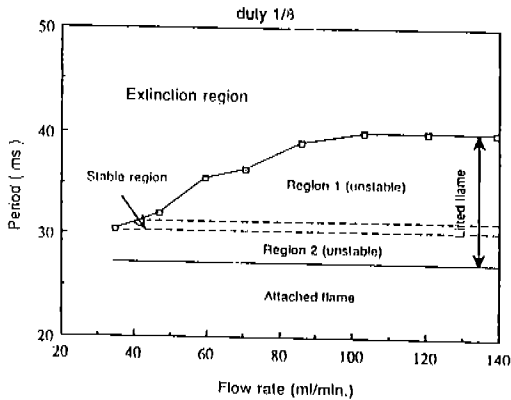


Fig. 13 Schematic diagram for the flame characteristics at duty 1/8, fuel flow rate versus period

이에 공기의 유입이 있었음을 유추할 수 있다. 유입된 공기와 잔류화염이 만나는 순간의 (11 번째 사진) 화염 형상이 가장 약한 화염이었다가 새로운 연료가 화염으로 유입되는 열두 번째 사진으로부터 화염의 강도가 강해짐을 알 수 있다. 전체적으로 화염은 항상 존재하나, 화염의 강도는 새로운 연료가 화염에 도달한 후부터 강해졌다가 점점 줄어들어 유입된 공기가 화염면을 지나는 순간 가장 약해짐을 알 수 있다.

듀티 1/8일 때 유량과 주기의 변화에 대한 화염형상의 특성 영역을 Fig. 13에 나타내었다. 유량이 증가함에 따라 소염이 일어나는 주기도 함께 증가하다가, 유량이 100 ml/min 이상에서는 40ms로 거의 일정하게 유지되었다. Fig에서 region 1은 주기 31ms 이상에서 소염 전까지의 불안정한 영역이며, stable region은 일정한 부상높이를 가진 안정한 화염이 존재하는 영역이며, region 2는 다시 불안정한 화염이 존재하는 영역이다. 27ms 이하에서는 화염이 노즐에 부착되게 된다.

4. 결 론

주기적인 연료 유동장 변화에 따른 화염의 안정화 및 형상에 미치는 여러가지 요인들을 파악하기 위한 실험적 연구를 수행하였다.

실험범위에서 유량의 변화는 소염 및 화염 부상에 영향을 미치나 화염의 형태에는 큰 영향을 나타내지 않았으며, 화염의 형태는 주로 주기의 변화에만 의존하였다. 듀티비의 감소는 노즐과 화염밀면에 형성된 노란색의 매연 발생 지역까지의 거리를 증가시켰고, 화염화단부에 형성된 예혼합화염의 성격을 강하게 했다. 주기의 변화는 화염부상과 화염 형태의 반복성에 관여하나, 화염형태의 반복성은 연료 유동장의 반복성과는 다른 양상을 보였다.

주기적인 연료 공급에 따른 화염의 특성은 본 연구에서 고정시킨 노즐 직경, 노즐과 슬레노이드 밸브간의 거리 등을 변화시키는 경우 매우 다양한 화염 형태가 존재할 수 있음이 관찰되었다. 따라서 추후 이러한 다양한 특성의 화염에 대한 연구를 통해 효율적으로 연소시킬 수 있는 연소 시스템의 설계를 위한 기초 자료를 제공할 수 있을 것으로 예측된다.

후 기

본 연구는 수암 장학 문화 재단의 지원으로 이루어 졌으며, 이에 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. W. M. Pitts (1989), "Importance of Isothermal Mixing Process to the Understanding of Lift-off and Blowout of Turbulent Jet Diffusion Flames", *Combustion and Flame*, vol.76, pp. 197-212.
2. T. K. Kim, J. Park, and H. D. Shin, (1991) "An Experimental Study on Mixing Mechanisms of Tone Excited Non-premixed Jet Flame", 한국연소학회 제7회 초록집, pp.44-54.
3. J. A. Lovett, S. R. Turns (1989), "Experiments on Axisymmetrically Pulsed Turbulent Jet Flames", *AIAA Journal*, vol.28, No.1, pp.38-46.
4. B. Gebhart (1973), "Instability, Transition, and Turbulence in Buoyancy-Induced Flows", *Annual Reviews of Fluid Mechanics*, vol.5, pp. 213-246.
5. R. P. Dring, and B. Gebhart (1968), "A Theo-

- retical Investigation of Disturbance Amplification in External Laminar Natural Convection", *Journal of Fluid Mechanics*, vol.34, pp.551-564.
6. B. Gebhart, and R. Mahajan (1975), "Characteristic Disturbance Frequency in Vertical Natural Convection Flow", *International Journal of Heat and mass Transfer*, vol.18, pp.1143-1148.
 7. J. Buckmaster, and N. Peters (1986), "The Infinite Candle and its Stability-A Paradigm for Flickering Diffusion Flames", *Twenty-First Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, Pittsburgh, PA, pp.1829-1836.
 8. T. Y. Toong, R. F. Salant, J. M. Stopford, and G. Y. Anderson (1965), "Mechanism of Combustion Instability", *10th Symposium*, pp.1301-1313.
 9. I. Kimura (1965), "Stability of Laminar-Jet Flames", *10th Symposium (International) on Combustion*, pp.1295-1300.
 10. S. H. Chung, and B. J. Lee (1991), "On the Characteristics of Laminar Lifted Flames in a Nonpremixed Jet", *Combustion and Flame*, vol.86, pp.62-72.
 11. 박상진 (1992), "원관 내의 왕복유동에서의 열전달 특성연구", 서울대학교 석사학위논문.
 12. A. Toepler (1866), *Ann. Phys. Leipzig*, 128, 126.