

과농 예혼합화염의 혼합촉진에 대한 당량비 한계

김진국*, 신현동*

Limit of equivalence ratio on mixing enhancement in rich flames.

Jin Kook Kim*, Hyun Dong Shin*

Key words : mixing enhancement, rich flame, acoustic excitation, flame separation, flame instability

Abstract

An experimental investigation has been made with the objective of studying the limits of equivalence ratio on mixing enhancement in a tone excited jet flame. The jet is pulsed by means of a loudspeaker-driven cavity and rich flames ($\phi > 1.5$) are used. The excitation frequency is chosen for the resonant frequency identified as a pipe resonance due to acoustic excitation. Methane, propane and butane are used to examine the effect of mixture property on the limit of equivalence ratio. Mixing is always enhanced in a methane/air flame as the excitation intensity increases. Constant lower limits of equivalence ratio for mixing enhancement are present in cases of propane/air and butane/air flames irrespective of mean mixture velocities. The equivalence ratio limits are also found to be related to the flame instability : the lower Le , the higher the limit of equivalence ratio. Under the equivalence ratio limits, cellular flames are generated as the excitation intensity increases. The amplitude of oscillating velocity for generating a cellular flame in the equivalence ratio limit is proportional to a mean mixture velocity irrespective of fuels.

1. 서론

음향가진을 받는 평면(plane) 또는 원형 분류(jet)에 관한 연구는, 적당히 선택된 음향가진에 의하여 주위공기가 분류로 유입되는 비율(entrainment rate)과 난류거동이 어떤 영향을 받는지에 관한 것이 대부분이다. 연구의 초기단계에서는 자유층류전단류(free laminar shear flow)의 불안정에 관한 연구가 많았으며^[1,2], 그 후 여러 자유전단류에서 거대구조(coherent structure)의 특성을 밝히는 연구가 많이 발표되었다^[3,4]. 최근에는 연소가 있는 가진분류를 혼합의 증가 및 감소와 관련지어서 연구가 수행되었다^[5,6].

Kim^[7]은 특정주파수로 유동장을 가진할 경우, 분류의 구조가 붕괴되어 난류혼합이 생긴다고 발표하였고, 상류 유동 가진에 의한 확산화염의 제어 가능성을 제시하였다. 이러한 제어의 가능성은 실제적인 연소기 설계에 있어서 고려해야 할 가장 중요한 요소 중의 하나이다. 그러나 이 연구는 혼합촉진에 직접적으로 관계하는 관 출구에서의 속도변동 크기를 정량적으로 제시하지 못하였고 연료에 따른 혼합특성 및 과잉혼합기에 대해 고려하지 않았다.

확산화염에 비하여 예혼합화염이 연소강도(combustion intensity)가 높아 고부하 연소에 적합하고 완전연소에 의하여 수트(soot)의 생성이 없다. 그럼에도 불구하고 예혼합화염에 비하여 확산화염이 많이 사용되는 이유는 안정성 때문이다. 본 연구에서는 과잉혼합기

* 정회원, 한국과학기술원 기계공학과

를 사용하여 안정성을 높이고 가진에 의해 외부공기와 혼합을 촉진시켜 연소상태를 예혼합 화염에 가깝게 만들었다. 그리고 연료종류와 당량비에 따른 혼합촉진한계를 조사하고 화염위치의 속도변동성분의 크기를 음압 측정과 파동방정식을 통하여 정량적으로 구하여 혼합촉진한계에 영향을 미치는 요소를 파악하고자 하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

음향가진을 주기 위하여 Fig.1에 나타나는 간단한 실험장치를 제작하였다. 연료와 공기는 압력조절기(regulator)와 유량계(flowmeter)를 지나서 혼합실(mixing chamber)로 들어간다. 이 혼합실에는 유동가스에 들어 있는 수분을 제거하기 위하여 실리카겔이 들어 있다. 그리고 음파는 함수 발생기(function generator), 파워앰프(power amplifier) 와 스피커를 이용하여 생성된다. 함수발생기를 이용하여 주어진 혼합기의 공진주파수를 설정하고, 가진강도(excitation intensity)는 파워앰프를 이용하여 조절된다. 공기를 기준으로 계산한 Helmholtz 와 관 공명 주파수는 각각 40Hz와 133Hz인데 본 실험에서는 관 공명 주파수를 이용하였다. 관에서 음압(acoustic pressure)과 음향속도(acoustic velocity 또는 particle velocity)는 관의 위치에 따라서 달라지는데 출구 끝은 음압은 마디(node)가 되고 여기에서 음향속도가 가장 크다. 여기에서 음향속도는 음향가진에 의하여 생성된 주기적인 속도변동을 의미한다. 그리고 주어진 관을 채우는 매질의 특성이 일정할 때 스피커로 들어가는 전압에 비례하여 음압과 속도변동은 커진다. 연소기 부분은 파이렉스관(Pyrex tube)과 가진실(plenum chamber)로 구성된다. 내경 47mm, 길이 1.23m의 파이렉스관을 사용하고 연료는 메탄과 프로판, 부탄을 사용하였으며 모든 실험은 과농혼합기($\phi > 1.5$) 상태에서 수행되었다. 주어진 연료유량에 공기유량을 점점 늘려가면서 당량비를 변화시켰으며 혼합촉진에 미치는 당량비의 영향을 조사하였다. 화염상류 두 곳에서 마이크로폰(microphone)으로 음압을 측정하였고 파동방정식(wave equation)과 측정된 음압을 이용하여 화염위치에서의 속도변동크기를 구하였다.

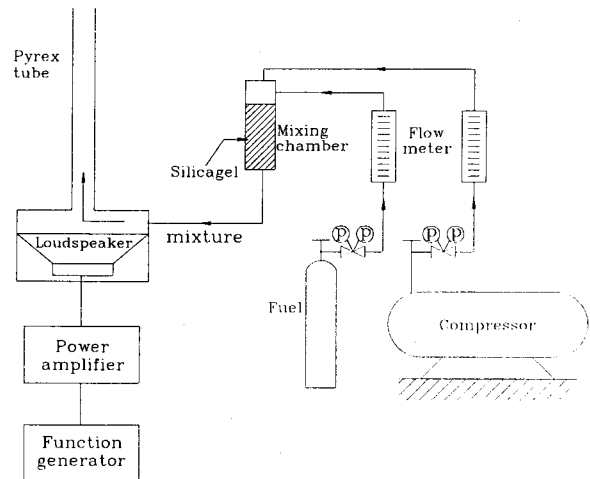
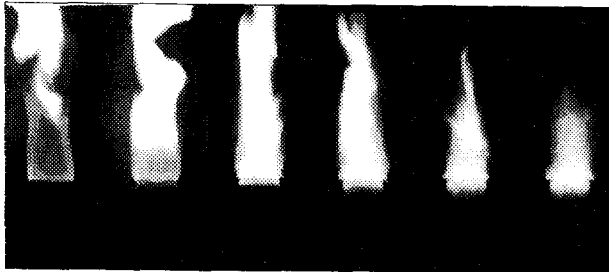


Fig.1 Schematic diagram of experimental setup

3. 실험결과

Fig.2는 프로판/공기 혼합기의 당량비가 2.15 인 경우 스피커에 주어지는 입력전압 증가에 따른 화염모양변화를 직접촬영한 것이다. 실험장치에서 언급한 것처럼 음향속도 즉 속도변동성분은 입력전압에 비례한다. 따라서 Fig.2 의 (a)에서 (f)로 갈수록 화염위치의 속도변동이 증가함을 의미한다. Fig.2(a)는 전형적인 과농 예혼합 화염이며, 여기서 바깥부분의 확산화염을 외부염, 내부의 예혼합화염을 내부염이라 정의한다. 입력전압이 증가함에 따라 화염길이 점점 짧아짐을 알 수 있다. 이는 속도변동의 증가에 의하여 외부 공기의 혼합이 촉진되었기 때문이다. 그러나 Fig.3에서 보는 것처럼 당량비가 2.05 인 경우는 입력전압의 증가에 따라 외부염의 길이는 변화없이, 내부염만이 세포형 구조(cellular structure)로 변하면서 상류로 이동한다. 이러한 현상을 화염분리(flame separation)라고 정의하고, 화염분리가 발생하는 최소 당량비를 혼합촉진에 대한 당량비한계(equivalence ratio limit)라고 정의한다. 이러한 당량비한계는 당량비를 무한대(확산화염)에서 1로 접근시키면서 실험적으로 발견할 수 있다. 이렇게 화염 분리가 일어나면 관 내부로 이동된 내부염에 의해서 내부염 후류의 온도가 높아지기 때문에 음파가진에 의한 관 끝에서의 속도 변동이 급격히 감소되어 더이상 혼합이 촉진되

지 않는다. 부탄의 경우도 프로판과 같이 어느 값 이상의 당량비에서만 혼합촉진이 일어남을 확인하였다. 그러나 메탄의 경우에는 이러한 실험한 당량비 범위($\phi > 1.5$)에서 가전의 증가에 따라 항상 혼합이 촉진된다.



(a) 0.27V (b) 1.34V (c) 2.41V (d) 3.48V (e) 4.56V (f) 6.70V

Fig.2 Direct photographs of mixing enhancement as input voltage increases.



(a) 0V (b) 1.07V (c) 2.14V (d) 2.68V (e) 4.02V (f) 8.04V

Fig.3 Direct photographs of flame separation as input voltage increases.

Fig.3의 (c)에서 (f)까지의 세포형화염은 입력전압의 증가에 대해서 화염위치가 상류 쪽으로 이동할 뿐 화염 구조의 변화는 거의 없다. 변화하는 각 화염위치에서 속도변동을 조사하기 위하여 화염상류에서 두 곳에서 마이크로폰을 사용하여 음압을 측정하였다. 간단한 파동방정식을 이용하여 측정된 음압으로부터 화염위치에서 속도변동성분을 구할 수 있다. Fig.4는 프로판/공기 과잉예혼합화염($\phi=2.09$)에서 스피커로 들어가는 전압에 대한 측정된 음압을 나타낸 것이다. X_f 는 관 출구에서 화염까지의 거리이며 P_1 과 P_2 는 관 끝으로부터의 거리가 각각 $X_1(0.15m)$ 과 $X_2(0.35m)$ 인 위치에서 측정된 음압의 크기이다. 전압이 증가할 수록 측정된 음압의 크기는 화염위치가 변하지 않는 영역($X_f=0$)에서는 증가하지만

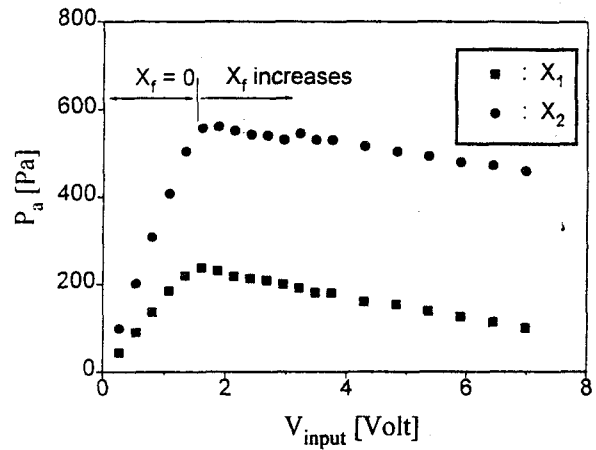


Fig.4 Acoustic pressures at X_1 and X_2 as input voltage increases

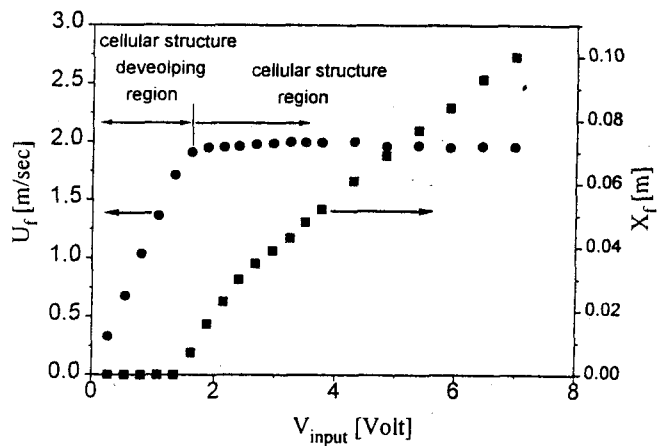


Fig.5 Oscillating velocity at flame positions as input voltage increases

전압이 어느값 이상이 되어 즉 속도변동이 어느값 이상이 되어 화염이 관의 상류로 이동하기 시작하면 오히려 감소한다. 이것은 상류방향으로 이동한 화염에 의해 음향학적인 경계조건이 바뀌기 때문이다. 음향의 파장에 비하여 관의 직경이 충분히 작기 때문에 일차원 음파라고 생각할 수 있고 이러한 조건에서 속도변동의 크기를 나타내는 음향속도(U_f)는 다음과 같이 표현된다.^[8]

$$\rho c U_f = A \cos(kX_f) - B \sin(kX_f) \quad , \quad k = 2\pi f/c$$

$$A = (P_2 \cos(kX_1) - P_1 \cos(kX_2)) / \sin(kX_2 - kX_1)$$

$$B = (P_1 \sin(kX_2) - P_2 \sin(kX_1)) / \sin(kX_2 - kX_1)$$

ρ, k, c, f 는 각각 밀도, wave number, 음속(sound speed), 주파수(frequency)이다. 연료에 대한 공기의 부

피비가 10배 이상이므로, 밀도와 음속은 온도 300K인 공기를 기준으로 계산하였다. 위 식을 이용하여 계산된 세포형화염의 위치에 대한 속도변동크기를 나타낸 것이 Fig.5 이다. 화염이 관 출구에 있을 경우는 입력전압에 대하여 속도변동은 선형적으로 증가하지만 세포형화염이 생성되면 화염위치에 관계없이 속도변동은 같은 크기를 갖는다. 따라서 세포형화염이 형성되면 스피커에 주어지는 전기적에너지의 증가는 화염의 위치이동에는 기여하지만 화염위치 변화에 따른 경계조건의 변화때문에 속도변동의 크기에는 영향을 주지 못한다.

프로판과 부탄을 사용한 혼합기의 평균유속을 변화시키면서 혼합촉진의 당량비한계를 살펴보았다(Fig.6). 그림에서 볼 수 있듯이 프로판과 부탄은 혼합기의 평균유속이 변화하여도 혼합촉진의 당량비 한계는 거의 변화하지 않는다. 이는 가진에 의한 혼합촉진의 당량비 한계가 유동에는 무관하게 혼합기의 물성치에 의하여 결정된다는 사실을 보여준다. 주어진 파동방정식과 음압 측정을 통하여 계산된 세포형화염 위치에서의 속도변동의 크기를 Fig.7에 나타내었다. 혼합촉진 한계시 나타나는 세포형화염의 속도변동 크기는 혼합기의 종류에 관계없이 혼합기의 유속에 비례함을 알 수 있다. 이는 혼합촉진한계에서 평균유속이 증가할 때 내부염이 관 내부에 존재하기 위해서는 유속의 증가에 대응하는 내부염의 전파속도의 증가가 필요하기 때문이다. 즉 평균속도의 증가에 대응하는 화염 전파속도의 증가를 위해 속도 변동의 크기가 증가한다.

Fig.7에서 보듯이 혼합촉진 당량비 한계에서의 내부염은 같은 유속에서 두 연료에 대하여 같은 속도변동과 같은 화염 전파속도를 갖는다. 그러나 실험에서 얻어진 프로판과 부탄의 혼합촉진 당량비 한계는 Fig.6에서 나타나듯 각각 2.11 과 2.44로써 부탄의 경우가 프로판에 비하여 더 과잉혼합기에서 혼합촉진의 한계가 생긴다. 따라서 같은 유동조건과 같은 화염전파속도를 갖는 두 혼합기의 혼합촉진 당량비 한계가 서로 다르다는 것은 혼합촉진한계에 영향을 미치는 다른 물성치가 있음을 암시한다. 관 안에 있는 내부염이 갖는 세포형구조는 화염의 열확산불안정성(thermodiffusive instability)과 관계하고 혼합기의 Le 로 설명된다.¹⁰⁾ 여기서 $Le=\alpha/D$ 이고

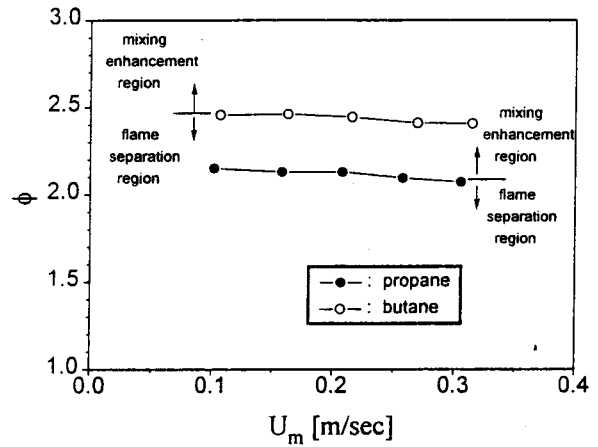


Fig.6 The limits of equivalence ratio according to mixture mean velocities

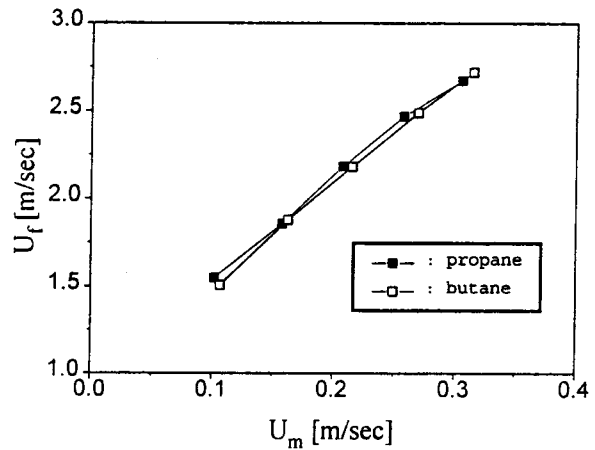


Fig.7 The amplitude of oscillating velocity according to mixture mean velocities

α 는 열확산계수 이고 D 는 반응에 부족한 성분에 근거한 물질확산계수이다. 과잉혼합기에서 메탄은 $Le > 1$ 이고, 프로판과 부탄은 $Le < 1$ 이다. Le 가 1 보다 큰경우 화염의 불안정성이 나타나지 않고 이 때문에 메탄 과잉 혼합기의 경우 혼합촉진의 한계가 없이 가진의 증가에 따라서 혼합이 계속 촉진된다고 생각된다. Le 가 작을수록 화염의 열확산불안정성이 증가하고, 같은 당량비인 경우 프로판보다 부탄이 Le 가 작다. 따라서 같은 속도 변동에 대하여 화염의 불안정이 클수록 세포형구조가 잘 발달할 것이다. 그러므로 Le 가 작을수록 높은 혼합촉진 당량비한계를 갖는다고 사료된다.

4. 결론

연료와 당량비를 변화시키면서 가진에 의한 혼합축진특성을 관찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 메탄은 당량비에 관계없이 가진의 증가에 따라 혼합이 촉진되고, 부탄과 프로판은 각각 당량비 2.44와 2.11 이상의 당량비에서만 혼합축진이 가능하다.
2. 프로판과 부탄의 당량비 한계는 혼합기의 유속에 관계없이 거의 일정한 값을 갖는다.
3. 혼합축진의 한계점에서의 세포형화염에 주어지는 속도변동의 크기는 연료의 종류에 관계없이 혼합기의 평균유속에 비례한다.
4. 혼합축진영역은 Le 가 작을수록 높은 당량비에서 제한된다.

참고문헌

1. Freymuth, P. 1966, On transition in a separated laminar boundary layer, *J. Fluid Mech.*, Vol. 26, pp. 47-61.
2. Becker, H. A., and Massaro, T. A. 1968, Vortex evolution in a round jet, *J. Fluid Mech.*, Vol. 31, pp. 435-448.
3. Crow, S. C., and Champagne, F. H. 1971, Orderly structure in jet turbulence, *J. Fluid Mech.*, Vol. 48, pp. 547-591.
4. Hussain, A. K. M. F., and Zaman, K. B. M. Q. 1980, Vortex pairing in a circular jet under controlled excitation : Part 2, Coherent structure dynamics, *J. Fluid Mech.*, Vol. 101, pp. 493-544.
5. Strawa, A. W., and Cantwell, B. J. 1989, Investigation of an excited jet diffusion flame at elevated pressure, *J. Fluid Mech.*, Vol. 200, pp.309-336.
6. Vandsburger, U., Seitzman, J. M., and Hanson, R. K. 1988, Visualization methods for the study of unsteady non-premixed jet flame structure, *Combust. Sci. Technol.*, Vol. 59, pp.455-461.
7. Kim, T. K., and Shin, H. D. 1993, Mixing mechanism near the nozzle exit in a tone excited non-premixed jet flame, *Combust. Sci. Technol.*, Vol. 89, pp. 83-100.
8. Kinsler, L. E., Frey, A. R., Coppens, A. B., "Fundamentals of acoustics", 1982, John Wiley & Sons, Inc.
9. Strehlow, R. A., "Combustion fundamentals", 1984, McGraw-Hill, Inc.