

음향가진과 보염기형상이 확산화염의 특성에 미치는 영향

전충환, 장영준 (부산대학교 기계공학부)

Effect of Acoustical Excitation and Flame Stabilizer on a Diffusion Flame Characteristics

C. H. Jeon and Y. J. Chang (Pusan National University)

KeyWords : Diffusion flame (확산화염), Flame stabilizer (보염기), Sound pressure level (SPL, 음압), Acoustical excitation (음향가진), Flammable limit(가연한계)

ABSTRACT

Lots of techniques are adopted for a flame stabilization and a high-load combustion. But the techniques being used were passive control method which have to change combustor shape like pilot flame, flame stabilizer, pressure profile, etc. Active control method which is not necessary to transform its shape is employed. Acoustical excitation is broadly used for its convenience in changing frequency and intensity. Both acoustical excitation and flame stabilizers were adopted to study their relationship. So, we investigated flammability limits. Flame visualization. And mean temperature in the condition of various frequencies, intensities, and flame stabilizers. As a consequence, flammability limit were advanced in acoustically excited flame at some frequencies. Coherent structure was extended to the downstream region through acoustical excitation and a size of vortice was curtailed. Also width of recirculation zone was magnified. In addition, Effects of acoustical excitation was stood out at 25mm flame stabilizer rather than another ones.

1. 서 론

연소장에 있어서 화염을 안정시키고 가능한 변동을 억제하여 연소를 시키는 것은 연소기술의 기초가 되며, 화염의 안정화와 고부하 연소를 위한 여러 기술이 채용되어지고 있다. 이러한 화염의 안정화를 위해 적용되고 있는 방법에는 종래의 경우 1) 시동과 안정성을 위한 파일럿 화염, 2) 비유선형물체(Bluff Body)나 유로를 스텝상으로 확대시켜 순환류를 발생시키는 방법, 3) 연소실 내면을 적열시키는 적열고체면을 이용하는 방법, 4) 허니콤이나 다공판을 이용하여 복사열유속을 내어 안정화시키는 방법, 5) 확대각 변화 등을 통한 유동장 내에 압력구배를 주는 방법⁽¹⁾⁽²⁾ 등이 있다. 그러나, 이러한 제어기법들은 연소기 형상의 변경 등을 통한 수동적(Passive) 제어기법이다. 이에 비해 근년에 능동적(Active) 제어기법에 관한 많은 연구가 이루어지고 있는데 이러한 제어의 한 방법으로 주파수와 음압의 강도조절이 용이한 음향가진이 이용되고 있다. 음향가진에 의한 제어에 관한 연구는 확산화염과 예혼합 화염, 그리고 층류화염, 난류화염에 적용되어 왔다.⁽³⁾⁻⁽¹⁰⁾ 하지만 선행연구들은 대부분 비가진 시의 연소조건에 대해, 한가지 혹은 두 가지의 주파수와 음압강도에 대한 비교를 하였다.

따라서 본 연구에서는 음향가진에 따른 화염의 여러 특성의 관찰에 있어 수동적 제어방법과 능동적 제어방법 모두를 변수로 하여, 주파수와 음압강도 그리고 보염기의 제원을 변화시키면서 화염의 특성에 대한 전반적인 관찰을 행하였다.

2. 실험장치 및 방법

본 실험에 사용된 장치도를 Fig. 1에 나타내었다. 연소용 공기는 송풍기를 통해 공급되며 확대부로 흐르면서 허니콤과 40메쉬의 정류망을 거쳐 축소비가 6인 수축부를 통과하여 단면적이 50mm×100mm인 연소기로 들어온다. 이 때 연소기 입구에서 균일한 속도분포를 얻기 위해 수축부는 Morel⁽¹¹⁾의 제안과 같은 형상을 취하였다. 연료는 상용 프로판 가스(LPG)를 사용하였고 원주형 보염기(flame stabilizer)를 통해 분출된다. 음향에 의한 가진은 합수발생기에서 발생된 정현파가 증폭기를 거친 후 보염기의 중심에서 상류측으로 275mm에 대향으로 부착된 두 개의 스피커(120W, 8Ω)를 통해 발생된다. 이 때, 신호의 위상차를 없애기 위해 동일 신호를 양 스피커에 동시에 공급하였다.

Fig.2는 연소기와 측정부의 상세도를 나타낸 것이다. 연소기의 입구단면 형상은 50mm×100mm인 직사각형이고, 연소실은 좌우 두께 5mm인 두개의 바이콜(Vycol)유리(300mm×100mm)로 가시화 창을 평행하게 끼운 두께 12mm의 철판으로 제작하였다. 원주형 보염기는 직경이 15mm, 25mm, 그리고 35mm의 3가지 종류이다. 연료가 분출되는 슬릿의 길이는 15mm이고, 폭은 1mm로 하였다. 원주의 길이는 모두 유로 폭과 같다. 연료는 주유동에 대해서 $\theta = \pm 30^\circ$ 로 두개의 슬릿을 통해 분출된다. 원주형 보염기의 중심을 원점으로 하고 화염에 대하여 수직인 방향을 x축, 화염의 하류방향을 y축으로 설정하였다. 주류공기가 보염기의 위치를 통과할 때의 평균유속 U^* 은 아래와 같이 계산하였다.

$$U^* = \frac{H}{H-d} U \quad (1)$$

여기서 H는 연소실 유로높이, d는 보염기 직경, 그리고 U는 출구공기 유량을 단면으로 나눈 값이다. 본 실험에서는 스피커의 출력음압(SPL)과 전압이 주파수에 따라 변하므로 증폭기에서의 볼륨조절스위치를 기준으로 출력단계를 LEVEL 1~LEVEL 7로 정하였다. 연소실 출구의 음압측정을 위한 마이크로폰(JEIC Sound Level Meter, Type1015)은 원점을 기준으로 x=0mm, 하류방향 y=400mm에 위치해 있으며, 비연소시에 대해서만 측정하였다. 음압스피커 공급전압은 디지털 멀티미터(EDM-4750)를 연결하여 측정하였다.

Fig.3은 증폭기의 출력단계에 따라 마이크로폰으로 측정된 음압과 스피커 공급전압을 주파수별로 비교한 그림이다. 공급전압은 출력단계 및 주파수에 따라 증폭되고 있으며 저주파, 높은 출력단계에서 가장 높은 공급전압을 보인다. 스피커 공급전압값은 연속적인 함수의 형태를 나타내나, 음압의 변동은 주파수와 스피커 공급전압의 증가에 대해 불규칙적인 분포를 보인다. 전체적으로는 스피커의 출력에 따라 음압이 증가하고 있음을 알 수 있다.

Table 1에 본 실험을 수행한 실험조건을 표시하였다. 연료유량을 $12.8 \times 10^{-6} \text{m}^3/\text{s}$ 로 일정하게 한 후 각 출력단계에 대한 주파수를 80~2000Hz 범위에서 공기의 유속을 점차적으로 증가시키면서 분출한계속도(Blowoff Velocity)를 측정하였다. 분출한계속도는 일정한 연료량에 대해 공기유속을 점차적으로 증가시키면서 화염이 완전히 없어질 때의 공기유속이라 정의하고 이 때의 속도를 U_{Bo}^* 로 표시하여 화염 안정범위로 사용한다. 이와 같은 분출한계를 기초로 하여 Level 7인 경우, 화염형상의 변화가 큰 80, 100, 123, 140, 183, 249 Hz의 주파수에 대해 유속조건을 2.77m/s로 하여 화염에 대한 직접사진, 슈리렌사진을 촬영하고, 평균온도의 변화를 관찰하였다.

화염형상의 관찰을 위해 노출시간을 1/30sec와 1/1000sec로 조정하였다. 슈리렌 촬영을 위해서 초점거리 1500mm, 유효직경200mm인 2개의 오목거울을 사용하였다. 순간광원으로 스트로보스코프 (Strobo scope)를 사용하고 직경 2mm 핀홀로서 불필요한 광들을 제거하였다.

Table 1 Experimental Condition

Item	Flammable limit	Visualization
Velocity	Blowoff limit	2.77 m/s
Fuel		$12.8 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$
SPL	Level 1~7	Level 7
Frequency	80~2000 Hz	80, 100, 123, 140, 183, 249
Stabilizer		15, 25, 35mm

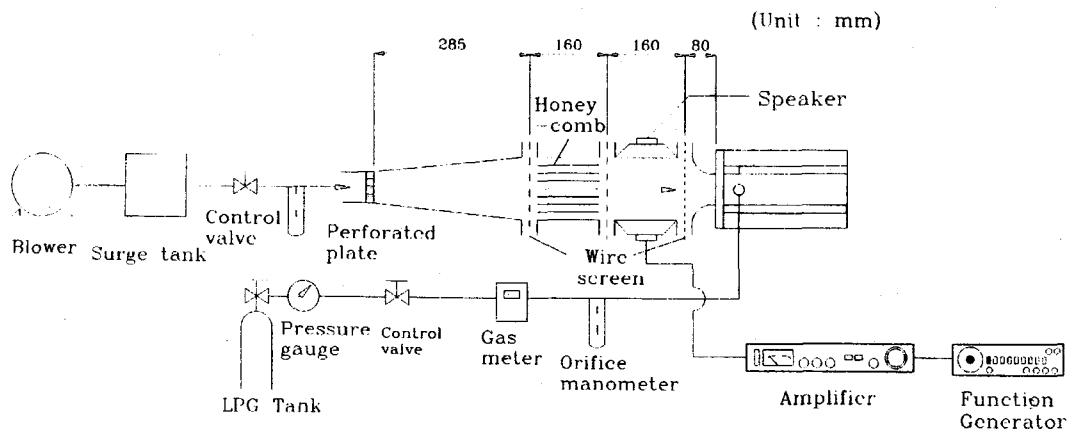


Fig. 1 Schematic diagram of the test apparatus

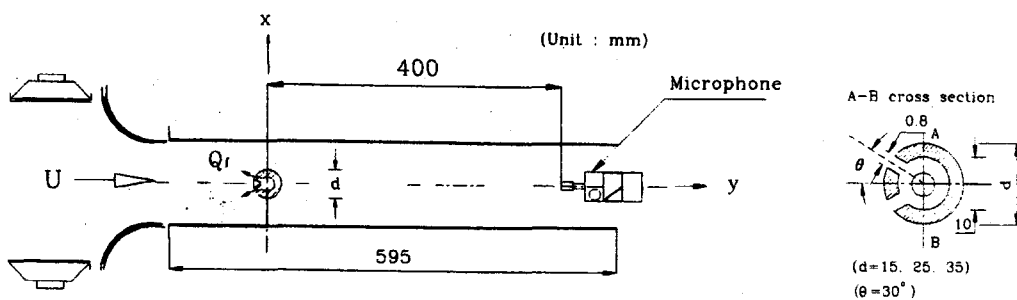


Fig. 2 Schematic of test section and SPL operation

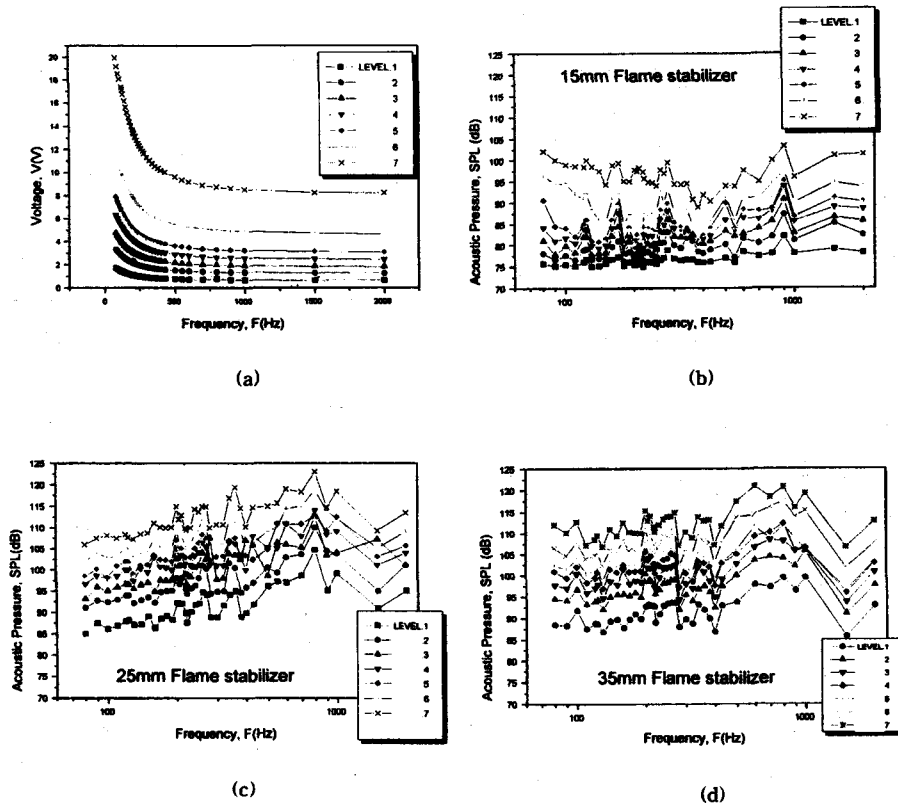


Fig. 3 Typical history of speaker input voltage and SPL signal of the test section

3. 실험결과 및 고찰

3.1 가연한계

음향가진에 의한 가연한계의 변화를 조사하기 위해 가진주파수를 80~2000Hz, 음압 조건을 Level 1 ~ 7로 변화시키면서 화염의 분출한계속도를 측정하였다. Fig. 4는 15mm, 25mm, 그리고 35mm의 보염기에 대해서 음압과 주파수의 변화에 따른 분출한계속도, U_{Bo}^* 의 분포를 나타낸 것이다. 전체적으로 보염기의 직경에 따라 가연한계 범위에 차이를 보이고 있다. 15mm 보염기인 경우가 모든 주파수 영역에서 높은 분출한계속도를 나타내고 있다. Level 1과 Level 2의 경우에는 전체적으로 80~100 Hz 범위에서 보염성이 향상되었다가 점차적으로 감소되는 경향을 보이고 있다.

특히 80Hz이하에서의 보염성을 비가진시와 비교하면, 15mm보염기의 경우에는 Level 3부터 25mm 보염기는 Level 5부터 감소되며 Level 7에서는 보염기에 관계없이 떨어진다. 이는 슈리렌 촬영에서 나타난 것과 같이 보염기와 연소실의 크기비의 차이에 따라 보염기 후류에서 발생하는 와(eddy) 크기에 좌우된다고 사료된다. 100Hz이상에서는 음압이 증가됨에 따라 25mm 보염기에서는 120~280Hz에 이르는 영역에서 주로 보염성의 향상을 보이고 있으며, 그 외의 보염기에서는 일부의 주파수에서 보염성이 약간 향상되는 경향을 보이거나 특별한 경향을 보이지는 않는다.

세 종류의 보염기에 대해 전체적으로 보면 25mm 보염기의 경우가 음압과 주파수의 변화에 가장 민감하게 나타난다. 15mm 보염기인 경우, 분출한계속도 U_{Bo}^* 의 변화는 가장

적게 나타나고 있다. 그러나 비가진시보다 낮은 분출한계속도 분포를 가지고 있다. 다만 Level 7의 경우 100, 120, 123, 130, 그리고 250Hz에서 약간의 속도증가를 보인다. 25mm 보염기의 경우, 낮은 음압에서는 80~100Hz의 저주파수 범위에서 U_{Bo}^* 가 향상되고, Level 5이상의 높은 음압에서는 120Hz ~ 300Hz의 범위에서 전반적으로 보염성이 향상됨을 보이나, 이후의 주파수에서는 보염성이 오히려 나빠지고, 다시 500Hz이상의 주파수에서 서서히 회복이 된다. 35mm 보염기의 경우, 전반적으로 음압과 주파수에 대한 큰 차이는 보이지 않고, 다만 80~100Hz의 범위에서 약간의 보염성 향상을 보이고 그 이외의 범위에서는 약간의 저하를 보인다.

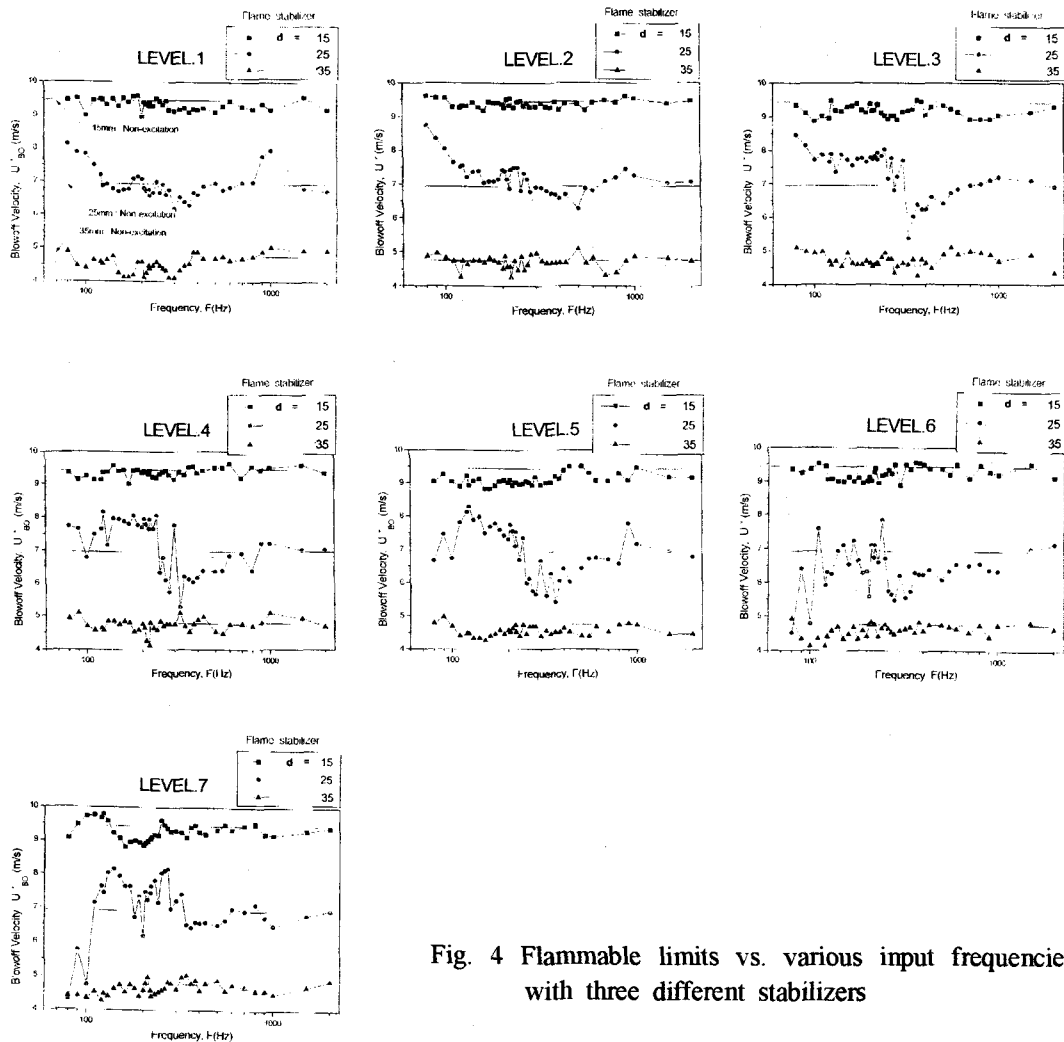


Fig. 4 Flammable limits vs. various input frequencies with three different stabilizers

3.2 화염의 가시화

가연한계에 대한 고찰에서 25mm 보염기는 가장 민감하면서도 분출한계속도가 최대 약 26%의 증가함을 보이나, 15mm, 35mm 보염기는 대해서는 큰 영향을 보이지 않았다. 화염의 형상에 대해서는 각 보염기에 대해 비가진시와 큰 변화를 나타내는 Level 7일 때의 80, 100, 123, 140, 183 그리고, 249Hz에 대해 직접사진과 슈리렌사진을 통해 화염형상의 변화를 관찰하였다. Fig. 5과 Fig. 6에 각 보염기에 있어서의 노출시간이 긴 직접사진과 순간 직접사진 촬영결과를 나타내었다. 15mm보염기의 경우에는 보염기 후류의 채순환영역내의 형

상변화가 주로 관측되었고, 장시간 및 순간 촬영과의 사이에 별다른 차이가 없었으므로 순간촬영결과는 제외시켰다.

Fig. 6의 15 mm 보염기의 변화에 대한 장시간 직접사진을 보면, 비가진시의 경우 보염기 배후에 뒤집힌 버섯형태로 좌우 대칭으로 말려 들어가는 휘염이 관찰된다. 이러한 휘염이 음향가진된 경우, 80Hz와 100Hz에서는 휘염폭이 확대되어 재순환영역 부근이 불안정하게 변동됨을 보여준다. 이후 123Hz에서는 다시 비가진시의 버섯형태가 나타나 그 폭은 보다 넓게 퍼져 있고, 140Hz에서는 휘염이 다시 보염기 배후에 부착하는 형태가 되나 80Hz, 100Hz와는 달리 안정된 상태에 있다. 183Hz와 249Hz의 경우 재순환 영역 내에서의 휘염의 순환이 보염기 배후에 완전히 부착되어 있고 횡축방향으로 퍼져있다. 그리고 하류방향의 휘염의 폭이 좁아지는 것으로 보아 연소가 비교적 촉진된 것으로 보인다.

25mm 보염기에서는, 비가진시 보염기 배후에 넓게 자리하던 휘염이 가진에 의해 그 폭이 줄어들고 있음을 보인다. 주파수의 증가에 따라 하류방향의 휘염폭이 상당히 감소하고 있고 이러한 휘염의 확대는 가연한계에서 나타난 휘염안정성의 증대와 일치한다. 특히 140Hz와 249Hz에서 휘염의 분포가 가장 낮게 나타나며, 가연한계에서의 결과와 잘 일치하는 것으로 보인다.

35mm 보염기에서는 전반적으로 휘염이 넓게 불규칙적으로 분포되어 있고 휘염이 지배적이다. 80Hz의 경우에는 강한 저주파 떨림으로 휘염의 크기가 상당히 위축되어 있으나 그 이외의 주파수에서는 전반적으로 휘염이 비가진시보다 상류로 약간 당겨져 있음을 알 수 있다.

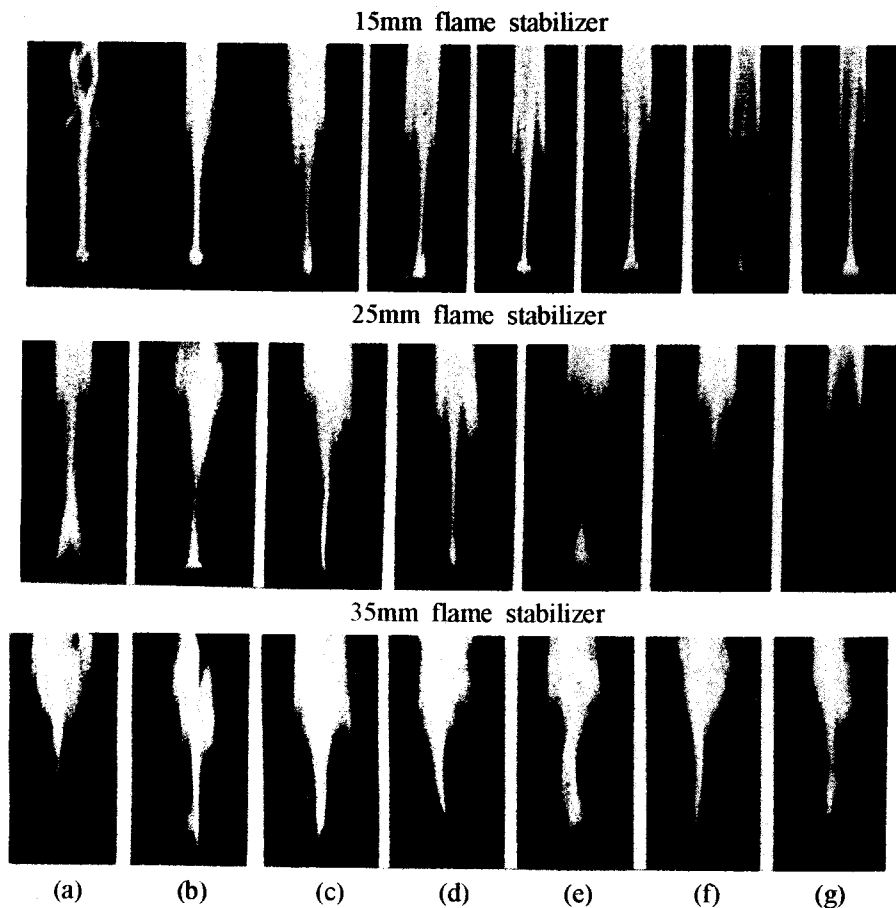


Fig. 5 Direct photographs of flames with long exposure time

(a)non-excitation (b)80Hz (c)100Hz (d)123Hz (e)140Hz (f)183Hz (g)249Hz

Fig. 6의 25mm 보염기에 대한 순간 직접사진을 보면, 비가진시와 비교할 때 80Hz의 경우에는 와 구조가 찢어지는 형태를 가지나 100Hz 이상에서는 다시 와가 정렬이 되고 123Hz 이후에서는 비가진시의 와 구조보다 와의 정렬이 두드러지고 특히 주파수의 증가에 따라 249Hz에서는 와의 크기가 작아지면서 와의 정렬이 두드러진다. 35mm 보염기에 있어서는, 비가진시와 가진시 모두 와의 모양이 찢어지는 형태를 가지고, 특히 80Hz에서는 상당히 불안정하지만 그 와의 주파수에서는 가진시의 경우에서 와의 모양이 보다 규칙적으로 나타난다.

화염대의 위치와 에너지 소산율을 결정하는 중요한 인자는 전단층에서 큰 스케일과 작은 스케일 와의 혼합과 보염기 배후에서 이들의 상대적 위치라고 할 수 있다⁽¹³⁾. 이로 미루어 화염의 관찰에 있어서 와 조식을 관찰하는 것은 아주 중요한 일이다. 또한 전단류에서의 큰 스케일을 가진 와 구조의 존재는 높은 주기의 압력 진동을 발생하여 연소 효율과 보염한계를 저하시키므로 보다 작은 스케일의 와 조식이 화염에 이로운 영향을 줄 것으로 보여진다⁽¹³⁾. 보염기 배후에 형성되는 고온 연소가스의 순환류와 보염기로부터 분리된 미연가스와 와의 사이에서 생성된 전단층에는 2차원 코히어런트 와 (coherent eddy) 구조가 지배적이다. 이러한 코히어런트 와 구조는 보염기 양측에서 대칭적으로 발생하며 와가 말려 들어감으로서 미연가스와 고온연소가스가 혼합되고 전단층 내에 화염이 형성된다. 와의 크기는 처음에는 보염기로부터의 거리에 따라 증가하나, 환류영역보다 하류측에서는 코히어런트 와 구조가 붕괴되고 불규칙한 3차원 와에 의해 지배되는 전파화염으로 변화한다. 따라서 화염을 두 가지로 나누어 보면 재순환영역 주위의 전단층에서 나타나는 코히어런트 와 구조에 의해서 지배되는 화염과 하류측에서 불규칙하게 변하는 전파화염이다. 특히 코히어런트 와가 일찍 붕괴될 경우 화염의 안정성에 나쁜 영향을 주므로 화염의 분출한계에 있어 중요한 역할을 한다⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾.

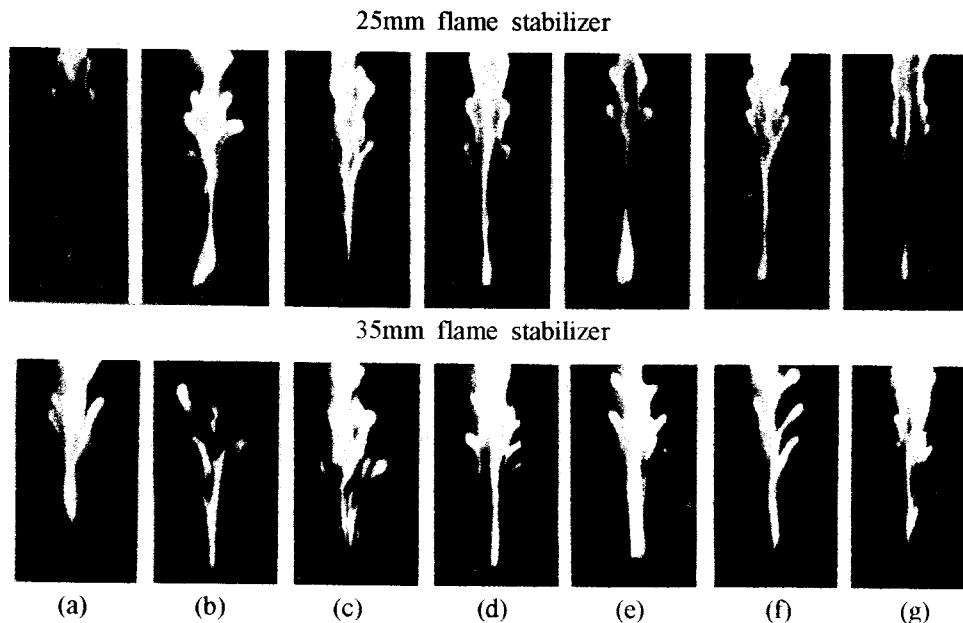


Fig. 6 Instant direct photograph of flame at level 7 with 25 and 35mm flame stabilizers
(a)non-excitation (b)80Hz (c)100Hz (d)123Hz (e)140Hz (f)183Hz (g)249Hz

Fig. 7에 각 보염기에 대한 슈리렌 촬영결과가 나타나 있다. 15mm 보염기에서는, 비가진시의 경우 비교적 와의 정렬이 잘 이루어져 있고 코히어런트 와 구조에 의해 주로 지배되는 화염의 형태를 가지고 있다. 하지만 80Hz의 경우 대부분의 화염이 전파화염에 지배

되고 있어 화염이 불안정하다. 이후 100Hz 이상의 주파수에서는 코히어런트 와조적이 비가진시보다 보다 정렬이 잘 이루어져 있고, 특히 123Hz이후의 주파수에서는 비가진시의 코히어런트 와 구조보다 더 작은 와로 구성되어 있어 전단층의 혼합이 보다 원활하게 이루어지는 것으로 보인다.

25mm 보염기의 경우, 가진에 의해 비가진시 보다 코히어런트 와 고조의 발생위치가 상류측으로 옮겨지는 것이 나타난다. 특히 100Hz와 123Hz에서는 보염기 직후부터 곧 바로 코히어런트 와가 발생한다. 또한 주파수의 증가에 따라 와의 크기가 감소하면서 보다 이상적인 정렬이 이루어지며 특히 249Hz의 경우 코히어런트 와가 상당히 하류까지 연장되어 있어 화염의 안정성에 유리할 것으로 보이며 분출한계속도의 측정결과와도 일치한다. 80Hz의 경우는 대부분이 전파화염에 의해 지배되는 형태를 가진다. 35mm 보염기에서는 비가진시와 가진시의 상태는 크게 변화가 없고 80Hz에서 역시 다른 보염기의 경우처럼 대부분이 전파화염에 의해 지배되고, 100Hz와 123Hz에서 코히어런트 와 구조의 발생위치가 상류측으로 앞 당겨진다. 각 보염기에 대해 가진시의 주파수 변화에 따른 와 구조의 분석 결과에서, 25mm 보염기는 코히어런트 와의 크기 감소와 하류부로의 확장이 두드러졌고, 그 외의 보염기에서는 커다란 크기의 변화를 보이지는 않는다. 분출한계속도의 결과에서 25mm 보염기가 가장 큰 변화를 보인 것을 볼 때, 코히어런트 와 구조의 확장과 와 스케일의 소형화로 화염의 가연한계 확대에 좋은 영향을 주었다. 또한 15mm, 35mm 보염기에서 가연한계의 변화가 적은 것은 와 구조에 있어 상대적으로 가진에 의한 변화가 작기 때문이다.

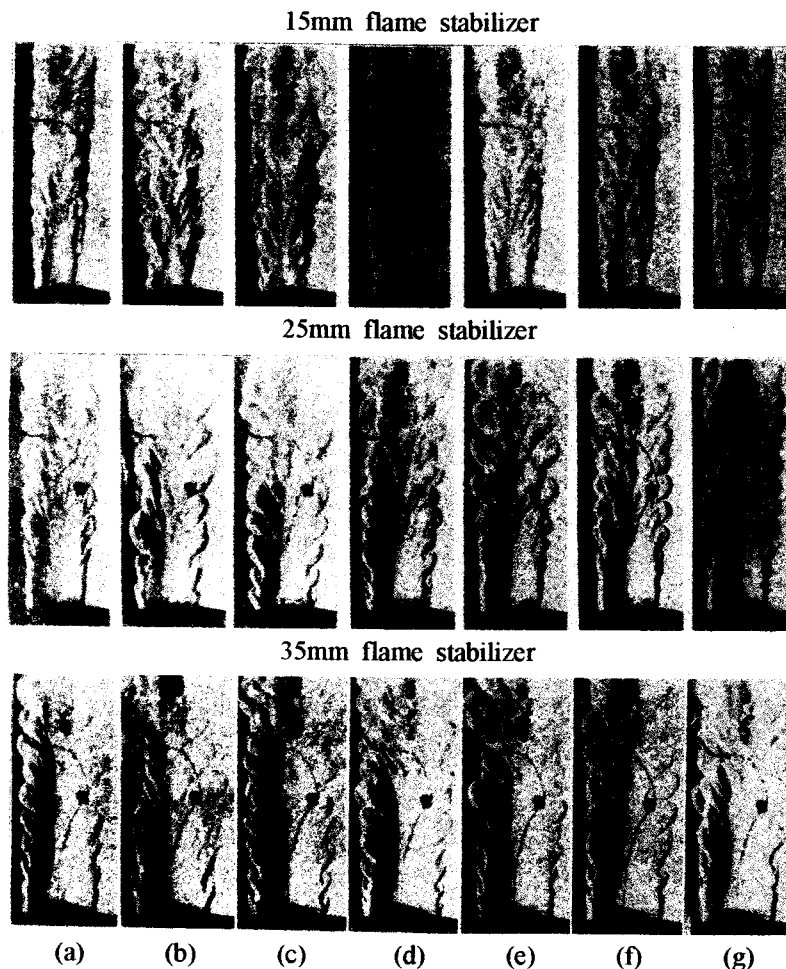


Fig. 7 Schlieren photographs at level 7 with three different flame stabilizers

(a)non-excitation (b)80Hz (c)100Hz (d)123Hz (e)140Hz (f)183Hz (g)249Hz

3.3 평균온도측정

Fig. 8에 재순환영역내의 평균온도분포를 나타낸다. 재순환영역의 길이는 보염기의 형상에 따라 다르나 동일한 연소장에서 가진이 없을 때 약 120mm 부근까지라는 선행연구⁽²⁾의 결과로부터 보염기의 중심에서 하류방향으로 $y=70\text{mm}$ 를 재순환영역의 중심 부근이라고 가정하여, 이 위치에서 x방향으로 이동하면서 평균온도분포를 측정하였다. 온도분포는 좌우대칭이므로, 보염기 원점에 대한 단면을 중심으로 $x=40\text{mm}$ 까지 5mm단위로 측정하였다. 단 15mm 보염기의 경우 $x=25\text{mm}$ 까지의 값만 나타내었다. 가진시의 경우 온도의 변화가 가장 뚜렷한 249Hz에 대해서만 비가진시와의 결과를 비교하였다. 15mm 보염기에 대한 평균 온도분포도를 보면 최고온도의 위치가 비가진시의 경우 $x=5\text{mm}$ 에서 나타나지만 가진시는 $x=10\text{mm}$ 에서 나타나서 재순환영역의 폭이 증가했음을 보이며, 또한 온도구배도 높아서 난류성 와의 거동이 활발하여 화염안정성이 높을 것으로 보인다. 25mm 보염기에서도 가진시의 경우에서 재순환 영역의 폭이 증가한 것으로 보이며, 중심과 최고 온도차와의 온도차가 크게 나타난다. 35mm 보염기에서도 재순환영역의 폭이 확대하나 중심과 최고온도치와의 온도차가 별로 없어 보염에 있어서도 그 효과는 크지 않으리라 보인다. 그러나 가진에 의해 중심의 온도가 감소하여 보염성이 약간 나아진다고 볼 수 있다.

평균온도분포 결과를 볼 때 전체적으로 가진에 의해 재순환영역의 폭이 증가함을 보이고, 중심과의 온도 비교에서 15mm 보염기가 가장 나은 화염안정성을 나타내지만 35mm 보염기는 화염안정성에 있어 떨어짐을 보인다. 또한 가진에 의해 재순환영역 중심의 온도가 다소 높아지는 경향이 있어 점화원으로서의 재순환영역의 역할이 향상되어 화염안정성에 기여한다.

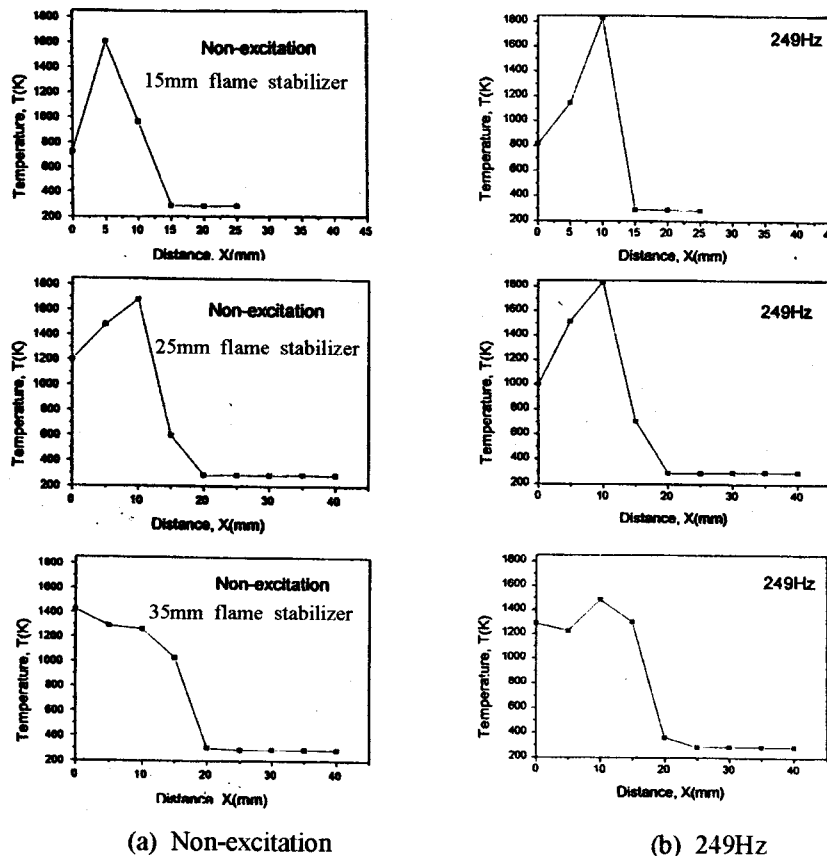


Fig. 9 Mean temperature distributions at $y=70\text{mm}$ with 15mm flame stabilizer

4. 결 론

음향가진과 보염기의 형상이 확산화염의 구조 및 가연한계에 미치는 영향을 조사하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 음향가진에 의해 가연한계의 변화를 보였다.
- (2) 음향가진으로 보염기 후류의 코히어런트 와 구조의 확대와 정렬을 가져온다.
- (3) 음향가진으로 재순환영역의 크기와 온도를 증가시키므로 내부혼합을 보다 강화시킨다.
- (4) 25 mm보염기에서 음향가진에 따른 코히어런트 와 구조의 확장과 정렬이 잘 나타나고 보염성의 향상도 뛰어나다.

참고문헌

- (1) 水谷幸夫, 1989, "연소공학", 森北出版(株), 東京, pp.126 ~133, 1989.
- (2) 이중성, "확대유동장내의 난류 확산화염의 구조 및 특성에 관한 실험적 연구", 공학박사학위논문, 부산대학교, 1996.
- (3) Putnam, A. A., "Combustion Driven Oscillations In Industry", Elsevier, New York, pp. 63~76, 1971.
- (4) Vermeulen, P. J., "The Acoustically Excited Flame", Journal of Engineering for Power, pp. 147~158, 1976.
- (5) 石野 洋二郎, 山口, "음향에 의해 여기된 평면 전단 조직구조 화염의 연구", 제29회 연소シンポジウム, pp.430~432, 1991.
- (6) 石野 洋二郎, 山口, "조직구조를 동반하는 평면전단 확산 화염의 음향여기(음향여기에 의한 연소특성의 변화)", 일본기계학회(B), 59권 566호, pp. 322~328, 1993.
- (7) 石野 洋二郎, 山口, et. al., "조직구조를 동반하는 평면전단 확산 화염의 음향여기", 일본기계학회(B), 59권566호, pp. 343~348, 1993.
- (8) Ishino, Y., et. al., "Acoustic Excitation of Diffusion Flames with Coherent Structure in a Plane Shear Layer (Application of Active Combustion Control to Two-Dimensional Phase-Locked Averaging Measurement)", JSME International Journal B, Vol. 39, No. 1, pp. 156~163, 1996.
- (9) 김태권, "가진된 비 예혼합 화염의 혼합기구에 관한 실험적 연구", 공학박사학위논문, 한국과학기술원, 1992.
- (10) 김진국, "음향에서의 예혼합화염의 거동에 관한 실험적인 연구", 공학박사학위논문, 한국과학기술원, 1996.
- (11) T. Morel, "Comprehensive Design of Axisymmetric Wind Tunnel Contradictions", Journal of Fluid Engineering, pp.225~233, 1975.
- (12) R. Gunther, "Turbulence properties of flames and their measurement", Prog. Energy Combust. Sci., Vol. 9, pp. 105~154, 1983.
- (13) Gutmark, E., "Closed-Loop Amplitude Modulation Control of Reacting Premixed Turbulent Jet", AIAA Journal, Vol. 29, No. 12, pp.2155~2162, 1991.
- (14) 최병륜, "난류예혼합화염의 구조에 관한 연구" 박사학위논문, 대판대학, 1983.
- (15) Tsuji, H., "Combustion Phenomena", Science of Machine, Vol.29, No.9, pp.1123~1128, 1977.
- (16) Katsuki, N., and Mizutani, Y., "Flame Stabilization Behind a Bluff-Body Flame Holder", Technology Reports of the Osaka University, Vol. 27, No.1385, pp.495~505, 1977.