

가스 및 분무화염의 연소소음 특성에 관한 실험연구

김호석** · 백민수** · 오상헌*

Combustion Noise Characteristics in Gas and Liquid Flames

H. S. Kim · M. S. Paek · S. H. Oh

Key words : Combustion noise (연소소음), Aerodynamic noise (공기역학적소음), Sound pressure level (음압레벨), Turbulent diffusion flame (난류확산화염), Local turbulent intensity (국소난류강도)

Abstract

Combustion noise involved with chemical heat release and turbulent process in turbopropulsion systems, gasturbine, industrial furnaces and internal engines is indeed noisy. The experimental study reported in this paper is made to identify a dominant combustion noise in jet flames. Gaseous propane and kerosene fuel have been used with air as the oxidizer in a different jet combustion systems.

Combustion and aerodynamic noise are studied through far field sound pressure measurements in an anechoic chamber. And also mean temperature and velocities and turbulent intensities of both isothermal and reacting flow fields were measured. It is shown that axial mean velocity of reacting flow fields is higher about 1 to 3m/sec than that of cold flow in a gaseous combustor. As the gaseous fuel flow rate increases, the acoustic power increases. But the sound pressure level for the spray flame decreases with increasing equivalence ratio. The influence of temperature in the combustion fields due to chemical heat release has been observed to be a dominant noise source in the spray flame. The spectra of combustion noise in gaseous propane and kerosene jet flame show a predominantly low frequency and a broadband nature as compared with the noise characteristics in an isothermal air jet.

* 부산대학교 기계공학과

** 부산대학교 대학원 기계공학과

1. 서 론

유체가 고속으로 분출되거나 고속전철, 항공기 등 고속의 교통수단에 의해 정지된 공기와의 점성에 의한 소음, 공장 등에서 고속으로 회전하는 팬이나 압축기, 냉장고 및 세탁기 등 가전제품에서 발생하는 소음 등 이들은 모두 유체유동특성과 난류작용에 의해 발생된다. 이와 더불어 화학적 열발생(chemical heat release)을 수반하는 난류연소과정은 보다 큰 소음을 발생시키는 것이 일반적이다. 제트유동에 대해 M. J. Lighthill¹⁾이 유동장에 대한 공기역학적 소음이론을 처음으로 확립한 후 G. T. Csanady, L. F. Moon, S. W. Zelazny, H. S. Ribner²⁾ 등은 공기역학적 소음(aerodynamic noise) 생성에 대해 유동장의 유속구배, 난류량, 점성, 난류 scale 등을 이용하여 저온의 제트유동에 대한 난류량 자체에 의한 자기소음(self-noise)과 난류량과 평균유속구배에 의한 전단소음(shear-noise) 모델을 이용하여 제트소음 예측에 대한 이론과 실험을 일치시키려는 연구를 진행하여 왔다. 그리고 연소소음에 대해 S. L. Bragg³⁾가 연소시 체적 팽창이나 감소, 열발생에 의한 소음이 단극형(monopole source)으로 생성됨을 처음으로 정립하고, M. J. Lighthill의 공기역학적 소음이론을 이용하여 연소장에 대해 A. P. Dowling, J. E. Ffowcs Williams, W. C. Strahle⁴⁾ 등에 의해 연소시 발열반응에 의한 체적변화, 밀도변화, 열발생에 의한 엔트로피 변화 등에 의한 반응영역의 열에 의해 생성되는 직접연소소음(direct combustion noise)과 난류연소시 하류부에서 모든 유선이 연소과정에 의해 균일하게 가열되지 않음으로 인하여 고온점(hot spot)과 저온점(cold spot)이 발생함으로 유체의 비등속(nonuniformity)에 의해 연소장치와 상호작용을 일으키므로 생성되는 소음을 간접연소소음(indirect combustion noise)으로 구분하여 항공기 엔진, 터보보 추진기관, 디젤기관 등 복잡한 연소기의 소음에 대해 이론 및 실험적 연구가 수행되어 오고 있다. 그러나 유동장의 소음 연구는 주로 고속으로 분출하는 저온의 제트유동에 대한 제트소음, 다른 밀도를 갖는 2상의 경계에서 점성에 의해 발생하는 경계층소음, 고속으로 회

전하는 팬에 의해 생성되는 팬소음, 고온의 유동가스를 가지는 항공기엔진, 가스터어빈 등에서 배출되는 고온의 배기가스에 대해 주로 공기역학적 측면에서 연구가 진행되어 오고 있으나 화염자체를 대상으로 한 연소소음 연구는 아직 활발히 진행되고 있지 않다.

따라서 본 연구는 열발생, 체적변화, 밀도변화 등이 일어나는 연소과정과 유동장의 난류 상호작용에 의해 발생하는 연소소음에 관한 이용가능한 정보를 얻으므로써 터보보추진기관, 산업용로, 내연기관, 엔진 등의 설계 및 제작에 유용한 기초자료를 제공하고자 한다. 그러나 실제로 이용되고 있는 연소장치는 구조가 매우 다양하고 복잡하여 기계적인 소음, 공명소음, 연소소음 등이 복합적으로 일어나므로 진동소음, 연소실 공명소음 등이 일어나지 않는 연소실이 없는 개방형의 가정용 상용프로판가스를 사용하는 가스제트확산화염의 실험용 연소기와 액체 연료인 백등유를 사용하는 실험용 분무연소기를 제작하여 기체연료와 액체연료에 대한 연소소음분석과 화염자체에서 발생하는 연소소음에 대한 정보를 얻기위하여 비연소장 및 연소장의 평균유속과 난류강도, 연소장의 온도분포, 비연소장 및 연소장의 음압레벨(sound pressure level : SPL), 음압의 주파수분석(frequency analysis)을 하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험장치 및 실험방법

Fig.1은 가정용 상용프로판 연료를 사용하는 제트난류확산화염의 연소기의 장치도이다. 외측은 공기유입관(내경 38mm관), 내측은 연료유입관으로 외경이 13mm이고 직경은 4mm의 분사노즐에서 연료가 고속으로 분출되므로 선단에 직경 10mm, 깊이 5mm의 동심의 스텝단을 만들어 화염을 안정화시켰다. 공기의 공급은 송풍기, 서어지 탱크, 공기설정용 마노메타, 충류유량계를 지난 공기는 2개의 공기관으로 분리되어 공기완충실 및 다공판을 지나 분출되고, 연료는 적산형유량계, 마노메타, 연료분사노즐을 통해 분출되어 공기와 혼

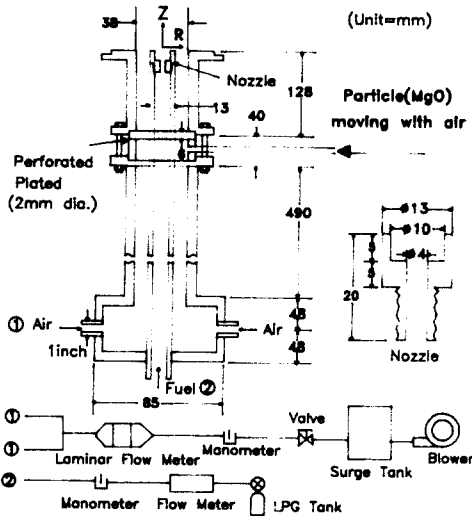


Fig.1 Combustion system of a gaseous jet diffusion flame(propane).

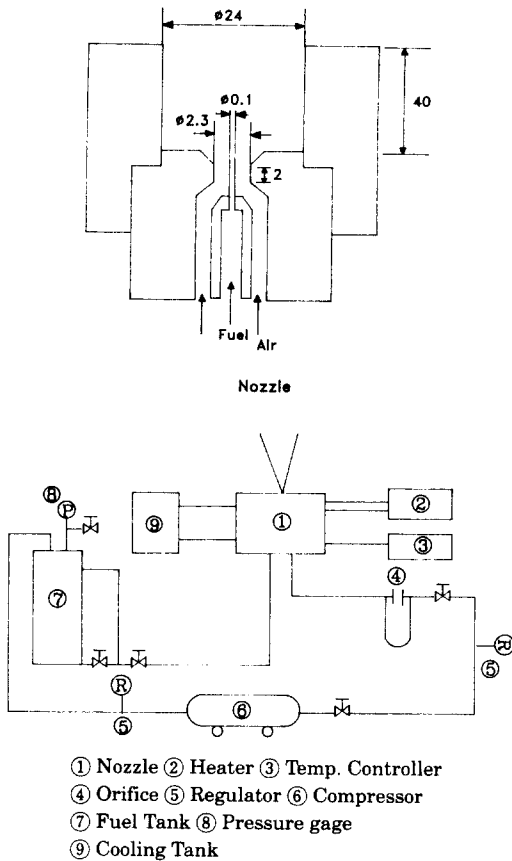


Fig.2 Combustion system of a liquid spray jet flame(kerosene)

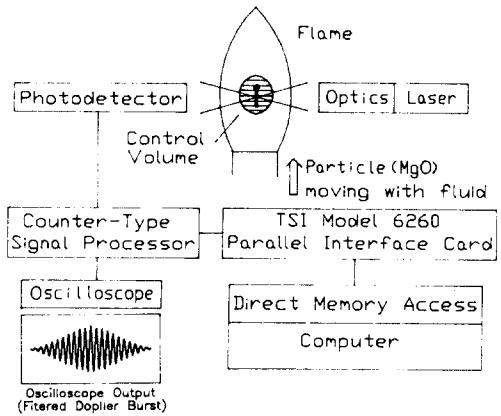


Fig.3 LDV system to measure the velocity in reacting flow fields.

합된다.

Fig.2는 백등유를 사용한 분무연소기의 장치도이며, 내부 노즐에서 연료, 외부 노즐에서 공기가 분출되는 2유체미립화(twin-fluid atomization) 형태이다. 화염을 안정화시키기 위하여 높이 40mm, 직경 24mm의 원통형의 화염안정기(flame stabilizer)를 노즐 출구에 설치하였다. 비연소장의 유속측정은 X프로브를 이용하여 열선풍속계(hot wire)로 측정하였으며, 가스 확산화염의 연소장의 유속측정은 공기유입부의 상류부에 산화마그네슘(MgO : 공칭입경 3 μ m)를 미립화시켜 유입공기와 함께 혼합되어 연소장에 유입되도록 하여 15mW Helium-Neon Laser(dual beam, 파장 632.8nm, 초점거리 250mm)를 이용하여 TSI 1980B Counter Type Signal Processor와 Model 6260 Interface System을 이용하여 신호처리를 하였다. 이와같은 신호처리 과정이 Fig.3에 있다. 연소장의 평균온도측정은 직경 0.1mm의 Pt/Pt-Rh13%R type)의 열전대를 사용하였다.

Fig.4는 음향특성을 측정하기 위한 무향실(anechoic chamber)로 흡음효율이 좋은 스폰지(두께 10cm)를 각 벽면에 부착하여 흡음효율을 높였다. Fig.5는 음의 지향성을 측정하기 위한 마이크로폰의 설치각도로 유동 방향축에 대해 시계방향으로 설정하였다. 연소장 및 비연소장의 소음을 측정하기 위하여 마이크로폰(1inch condenser micro-

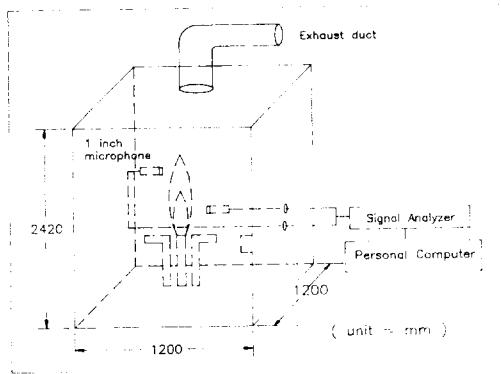


Fig.4 Anechoic chamber to measure the overall sound perssure.

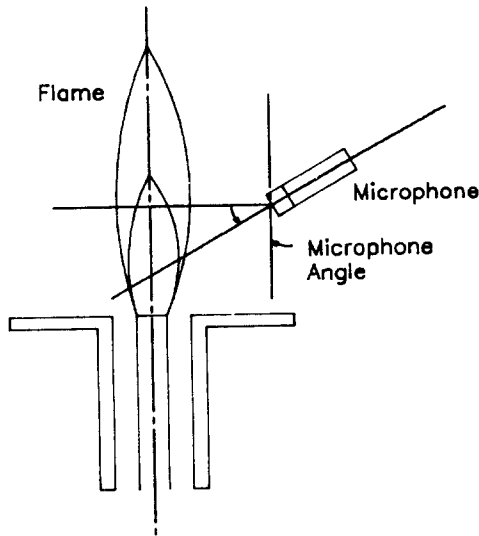


Fig.5 Coordinate system used to designate microphone angle of sound observation.

phone : JEIC 1015)을 이용 연소장과 비연소장의 음압(sound pressure level)을 측정하고 주파수 분석은 신호분석기(Signal Analyzer : Scientific - Atlanta SD380)를 이용 분석하였다. 노즐 선단 중심을 원점으로 하여 반경방향을 R, 상방향을 Z 로 표기하였다.

2.2 실험조건

Table 1은 가스확산화염과 분무화염에서 안정화된 화염들의 실험조건이다. 평균온도 및 연소소음 특성을 관찰하기 위하여 가스확산화염 연소시

Table 1 Experimental conditions

	FLAME #1	FLAME #2	FLAME #3	FLAME #4
Q _{FUEL}	4 l/min	4 l/min	4 l/min	4 l/min
Q _{AIR}	340 l/min	415 l/min	484 l/min	538 l/min

Experimental conditions of a gaseous jet diffusion Flame(propane)

	FLAME #5	FLAME #6	FLAME #7
Q _{FUEL}	13 cc/min	15 cc/min	17 cc/min
Q _{AIR}	22 l/min	22 l/min	22 l/min

Experimental conditions of a liquid spray jet flame (kerosene)

에는 연료량을 4 l/min으로 일정하게 유지하고 공기량을 변화시킨 4가지 실험조건을 설정하였으며, 그리고 연소시 및 비연소시 음압측정시에는 연료량 및 공기량을 변화시키며 음향특성을 고찰하였다. 분무연소시 연소소음 특성을 비교하기 위한 분무연소의 실험조건은 공기량을 일정하게 22 l/min로 유지하고 연료량을 3가지로 변화시켜 실험을 수행하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 비연소장의 유속분포

Fig.6은 FLAME #2에 대한 가스제트확산연소에서 비연소시와 연소시의 축방향 평균유속 분포에 대한 비교이다. 화학적 발열반응을 수반하는 연소반응은 다량의 열과 밀도 및 체적변화를 일으켜 유동장의 물리적 상태를 변화시킨다. 유동장의 밀도변화는 이에 대응되는 국소체적 팽창을 일으켜 유동장을 가속화시킨다. 이러한 결과로 연소장의 축방향 평균유속은 비연소시보다 1~3 m/sec 정도 높게 나타나고 있으며 연소반응이 활발한 영역에서는 10~25% 정도 증가하고 있다. 상류측 단면에서 연소반응이 일어나는 영역의 속도분포가 높게 나타나고 있다. 또한 중심유동 방향인 축방향 유속분포는 비연소시나 연소시 모두 Z=150mm 단면 이후의 하류부에서는 충분히 발달된 전형적인 제트유동 특성을 나타내고 있다.

Fig.7(a), (b)는 가스연소기에서 비연소시와 연소시의 축방향 변동속도(u')와 평균속도(U)의 비

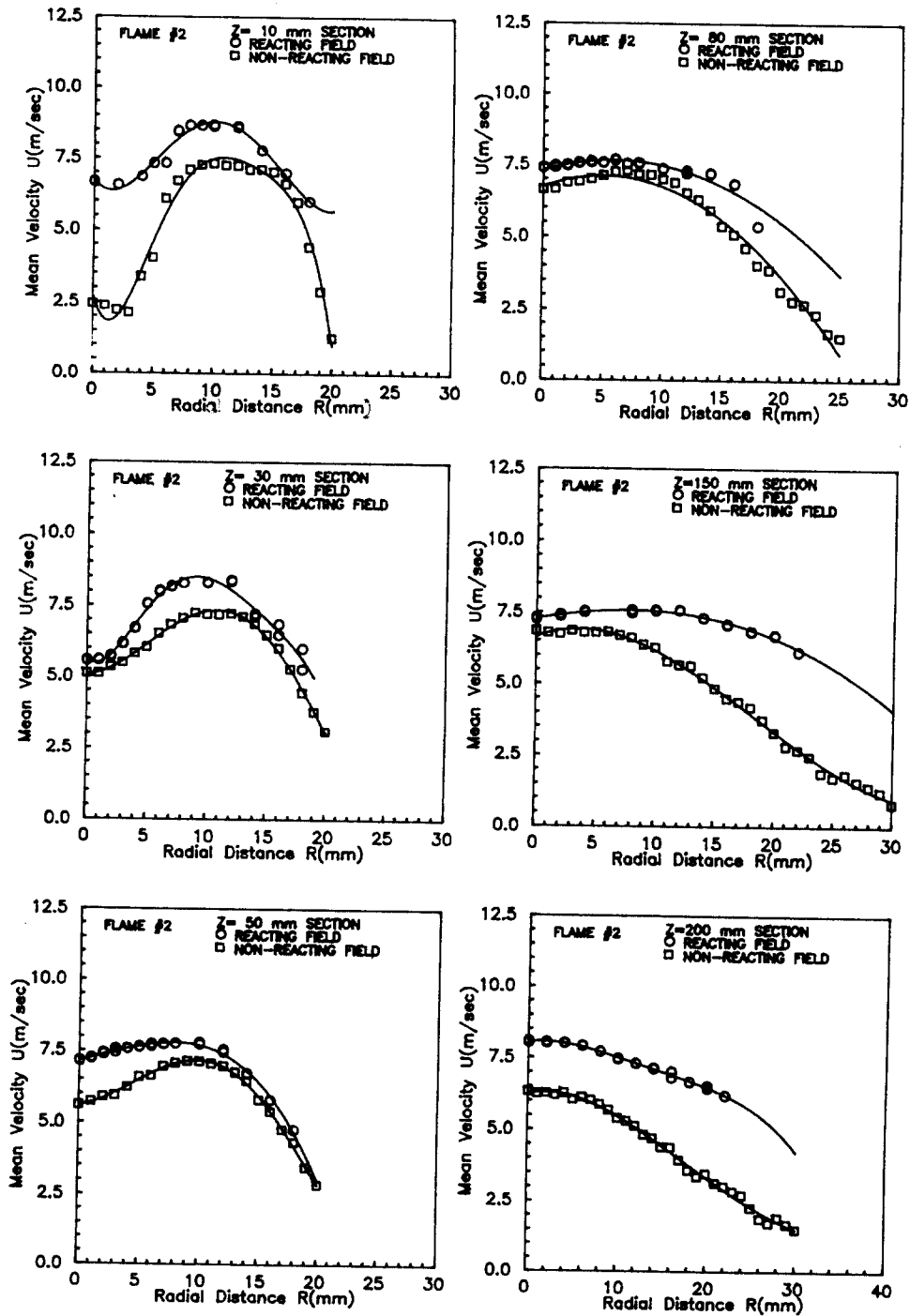
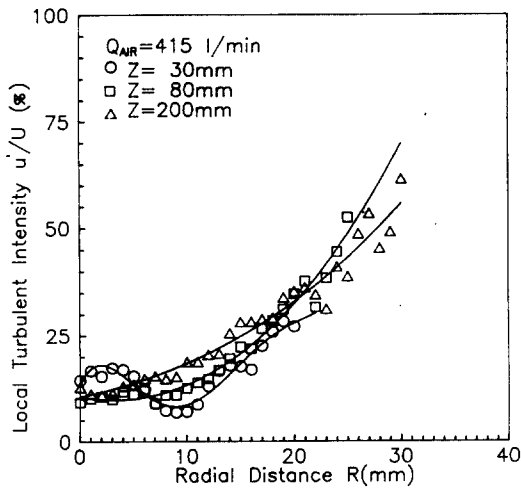
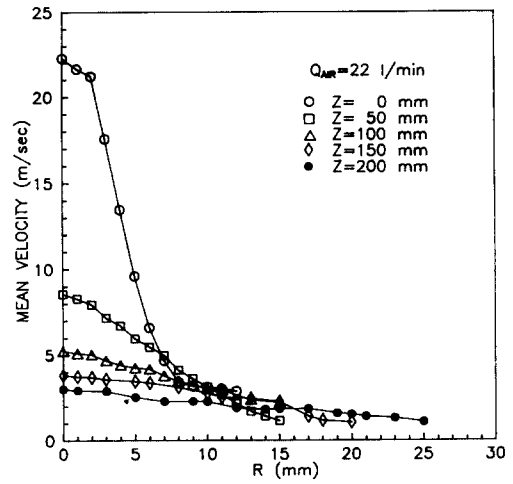


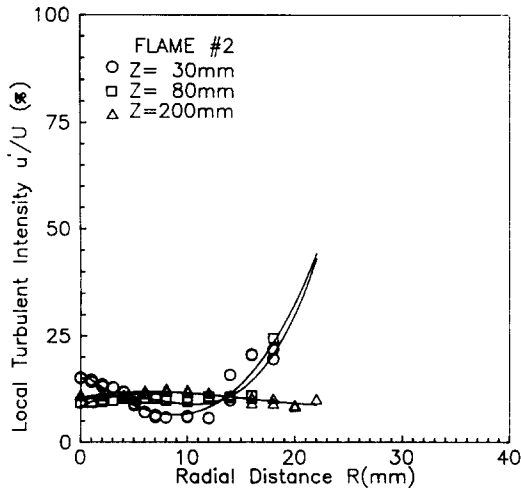
Fig.6 A comparison of axial mean velocity profiles with and without reaction in a gaseous jet diffusion combustor.



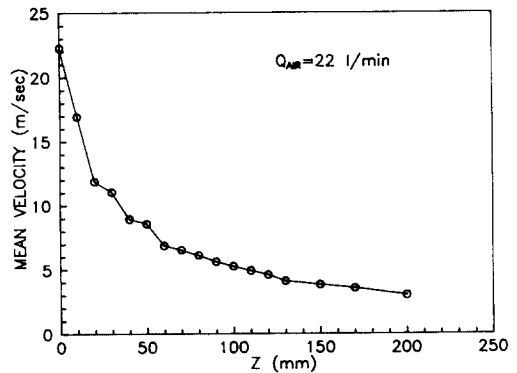
(a) cold air jet flow,



(a) radial direction,



(b) reacting flow fields.



(b) along the Z - axis.

Fig.8 Mean velocity profiles in the non - reacting flow fields in a liquid spray jet combustor

Fig.7 A comparison of local turbulent intensity profiles with and without in a gaseous jet diffusion combustor

를 나타내는 국소난류강도 (local turbulent intensity : u'/U)를 나타내고 있다. 난류강도는 비연소 시보다 연소시에 10~15% 정도 낮게 나타나고 있다. 이는 연소반응에 의하여 온도가 상승함으로써 연소장의 동점성 (kinetic viscosity)의 증가에 의하여 난류강도가 감소하고 있다. 동점성의 증가는 유동장의 길이, 속도, 시간 스케일을 증가시키게 되므로 연소반응은 비연소장의 small scale eddy를

보다 큰 에너지를 가진 large scale eddy로 변화시킬 수 있다.

Fig.8 (a), (b)는 분무제트 연소기에서 비연소시 공기량 22 l/min에 대한 축중심에서 하류로의 평균속도 분포로 Z=120mm 단면까지는 비교적 높은 유속분포를 나타내고 있다. Fig.6 과 Fig.8에서 공기량은 가스제트연소기가 매우 많으나 속도는 분무연소기가 매우 높다. 이는 다음에 고찰될 비연소시의 음압과 비교하여 보면 공기량 보다 속도구배에 의해 공기역학적소음이 지배됨을 알 수 있다.

3. 2 연소장의 평균온도

Fig.9의 (a), (b), (c)는 Flame #1~#4의 가스확산화염에서 Z=30mm, 100mm, 200 mm 단면에서의 평균온도 분포이다. 연료량 4 l/min에 대해 공기량을 변화시킨 결과 Z=30mm 단면 (Fig.9 (a))에서 R=0~4mm사이에는 분출되는 연료의 영향으로 저온분포를 나타내며, R=6mm 부근에서는 찬공기의 유입량이 적은 Flame #1에서 평균온도가 약간 높게 나타나고 있다. Z=100mm (Fig.9 (b))에서는 유속이 증가함에 따라 축중심으로 고온영역이 약간 이동하고, Flame #3, #4는 Flame #2의 경우보다 주위공기의 유입영향으로 중심에서 낮다. Z=200mm (Fig.9 (c))에서 Flame #1이 온도 분포가 반경방향으로 감에 따라 화염이 퍼짐으로 인해 높게 나타난다.

Fig.10의 (a), (b), (c)는 Flame #5, #6, #7의 분무화염의 Z=50 mm, Z=150 mm와 중심에서 축방향의 평균온도 분포를 나타낸 것이다. Fig.10 (a)는 Z=50mm 단면에서 온도분포로서 연료량이 증가함에 따라 반경방향으로 고온영역이 이동하고 있다. Fig.10 (b)는 단면 Z=150mm에서의 평균온도 분포로 Flame #7에서는 휘염이 생김으로 인하여 반경방향으로 감에 따라 높게 나타나고 있다. Fig.10 (c)는 노즐 중심에서 축방향의 평균온도 분포로 연소반응이 가장 활발한 Flame #5에서 온도분포가 가장 높게 나타나고 있다.

3. 3 연소소음분석

소음의 세기는 유동장의 음압에 의존되므로 진폭의 실효치를 사용하는 음압레벨 (sound pressure level : SPL)이 소음측정에 사용되는데 음압레벨의 관계식은 다음과 같다¹⁰⁾.

$$SPL = 20 \log (P/P_{ref}) \quad (1)$$

이며, 여기서 P_{ref} 는 기준음압 (2×10^{-4} dyne/cm²), P는 측정음압 (dyne/cm²)이다

(1) 가스확산화염의 연소소음

비연소장에 대해 공기량을 변화시키며 마이크로폰을 Z=100mm, R=200mm인 위치에 설치하

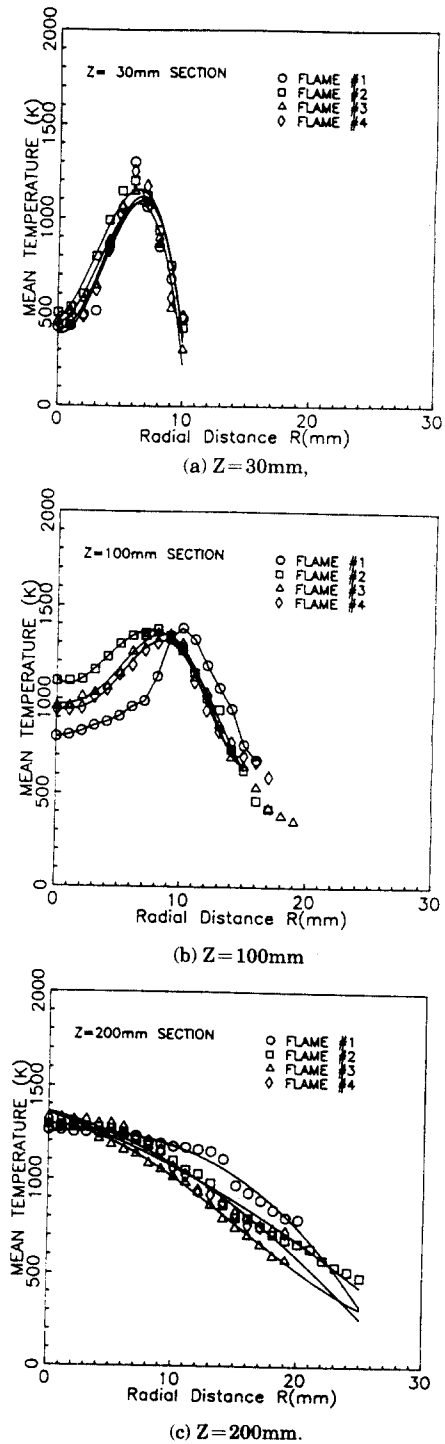


Fig.9 Mean temperature profiles of a gaseous diffusion jet flames at (a) Z=30mm, (b) Z=100mm, and (c) Z=200mm

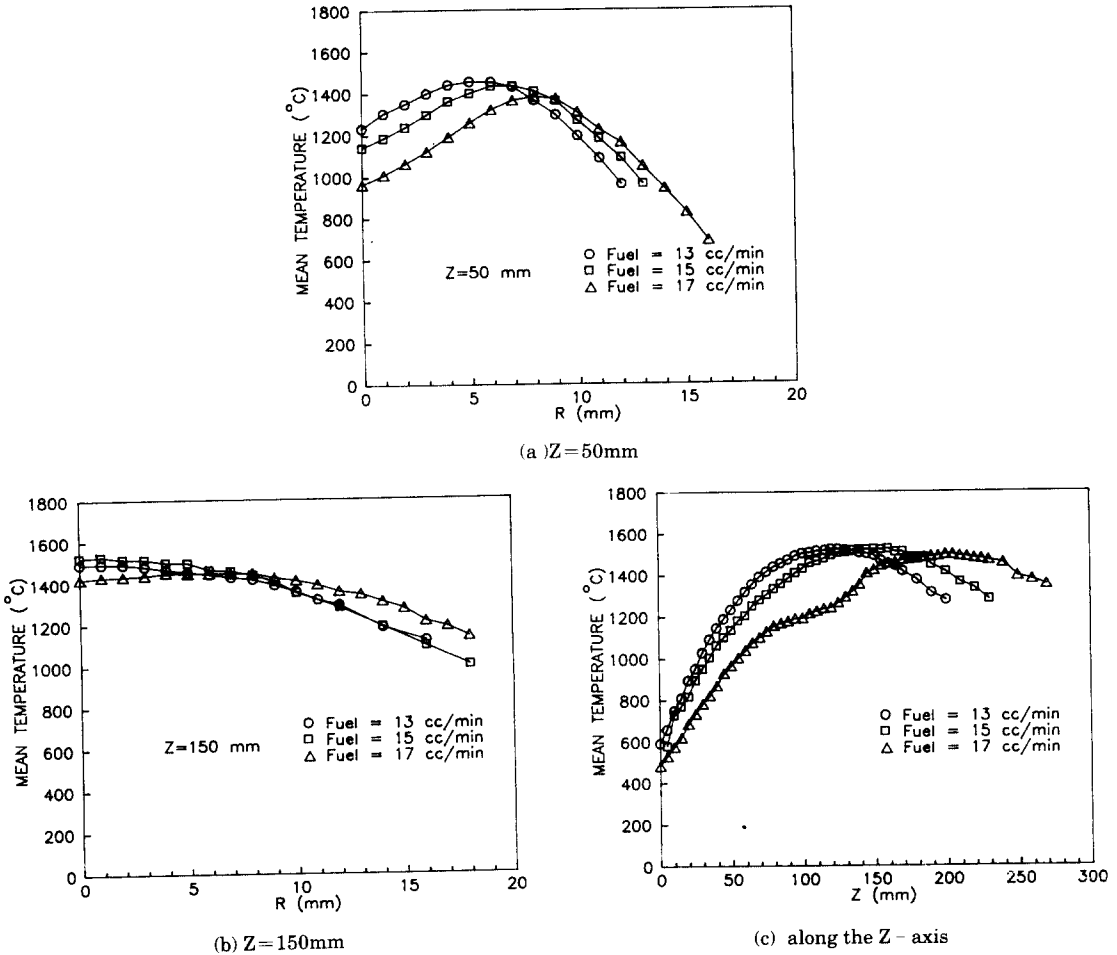


Fig.10 Mean temperature of a liquid spray jet flames at (a) Z=50mm, (b) Z=150mm, and (c) along the Z-axis

고 공기량 변화를 노즐 출구의 이론 속도로 환산하여, 비연소장의 공기분출방향에 대해 마이크로폰의 측정 각도를 30°, 45°, 60°, 90°로 변화시키며 측정된 음압레벨이 Fig. 11에 나타나 있다. 공기역학적 제트소음은 M.J.Lighthill¹¹⁾ 등에 의해 제트 유동속도 U의 8승에 비례하므로 이를 $\log U^8$ 과 U에 대한 이론적인 관계와 실험측정 결과를 비교하면 3~4dB(A)에서 잘 일치하고 있다⁸⁾. Fig. 12는 제트 난류확산화염에서 발생하는 소음을 Z=100mm, R=200mm 위치에서 마이크로폰이 Z축과 30°, 45°, 60°, 90°를 이루는 위치에서 측정된 음압과 Z=10mm 단면의 연소장에서 LDV로 측정된 고온의 연소가스 유동장의 축방향 평균유속과의 관계를 나타낸 것이다. 회귀분석법에 의해 선형화시킨 결과 축방향 평균유속의 3.8승에 비례하는

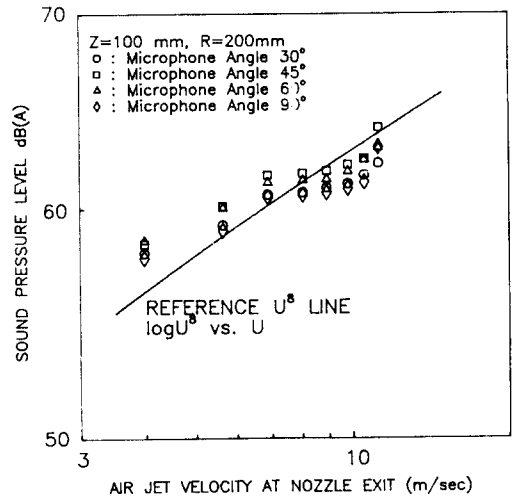


Fig.11 Overall sound pressure level of cold air jet.

전형적 결과를 나타내고 있다. 이는 연소반응에 의하여 유동장의 속도가 증가함으로 반응장에서 음압은 비연소시의 유동장의 평균속도의 8승보다 낮은 지수에 비례하고 있다.

Fig.13은 공기량의 변화에 대한 음압의 증가율과, 같은 공기량에 대한 연소장의 음압증가율에 대한 비교로 비연소시 공기량의 증가율에 대한 음압의 증가비율보다 연소시 연료량의 증가에 따른

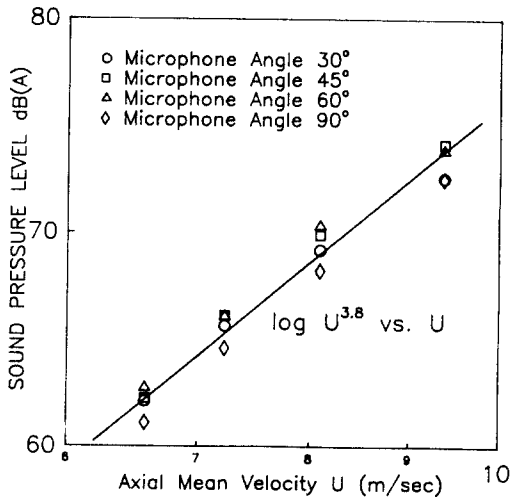


Fig.12 Overall sound pressure level of reacting flow fields.

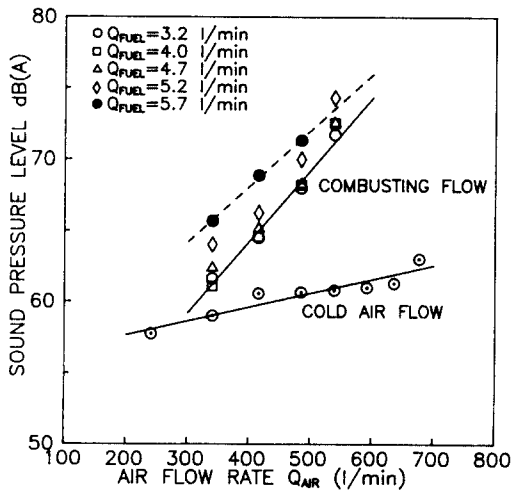


Fig.13 Sound pressure level for air flow rate with and without combustion.

음압의 증가비율이 높게 나타나고 있다. 비연소시와 연료 공급량이 4 l/min으로 일정한 연소시 음압을 비교하여 보면 비연소시의 음압은 58~65dB(A)이고 연소시 음압은 62~75dB(A)로 같은 공기량에 대해 10~25%정도 음압이 증가하고 있다. 이는 연소반응에 의한 유속의 증가율과 같은 비율의 증가를 나타내고 있다.

(2) 분무화염의 연소소음

Fig.14는 분무연소기에서 공기량을 22 l/min로 일정하게 유지하고 연료량을 13cc/min, 15cc/min, 17cc/min인 경우에 대한 음압의 비교이다. 분무화염에서는 같은 공기량에 대해 연료량이 증가함에 따라 가스제트확산화염의 경우와는 다르게 음압이 감소하고 있다. 연소장에서 연소반응에 의한 온도의 상승은 음압과 매우 큰 관계가 있으며, 이는 연소반응에 의한 열의 발생과 급격한 밀도변화를 수반하는 분무액적 연소소음의 주요한 발생원임을 알 수 있다. Fig.10의 분무화염의 온도측정 결과 연료량이 증가함에 따라 평균온도가 감소하고 있다. 이는 연료량의 증가 즉 당량비의 증가가 가스제트화염의 경우는 증가하나 분무화염의 경우는 연소소음이 당량비의 증가에 영향을 받기보다는 연소반응에 의한 열발생에 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 따라서 분무화염에서 온도가 가장

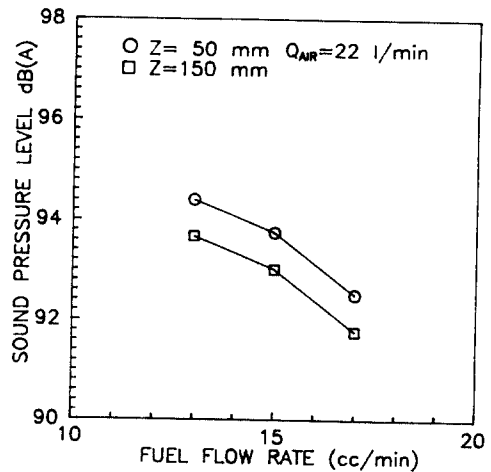


Fig.14 Overall sound pressure level of a liquid spray jet flame for fuel flow rate.

높은 FLAME #5(연료량 13cc/min)에서 연소소음도 가장 크게 나타나고 있다.

(3) 연소소음의 주파수분석

Fig.15는 가스확산화염 연소기에서 비연소시와 연소시 Z=100mm, R=200mm인 위치에서 마이크로폰 측정각도 90°일때의 음향 스펙트럼이다. 비연소시는 평균속도구배와 난류성분에 영향을 받는 저주파수의 전단소음과 난류자체 성분인 전단용력의 영향을 받는 고주파수의 자기소음 성분이 나타나고, 저주파수의 전단소음과 고주파수의 자기소음의 공기역학적 음향특성의 성분값이 크게 나타나고 있다. 공기량 415 l/min, 연료량 4 l/min 일때의 경우로 연소반응이 일어나는 경우 음압의 스펙트럼 분포에서 주파수 성분값이 비연소시의 경우와 비교하여 보면, 연소시 저주파수 영역에서 주파수 성분의 값이 크게 나타나고 있다. 이는 연소소음(combustion noise)이 연소반응에 의해 단극(monopole) 형태의 음을 발생하므로 공기역학적 소음과 비교하여서는 상대적으로 저주파수의 음향특성을 나타내고 있다^{2,5,6)}. Fig.16은 분무화염 연소기에서 Z=50mm, R=200mm인 위치에서 공기량이 22 l/min인 비연소시 마이크로폰

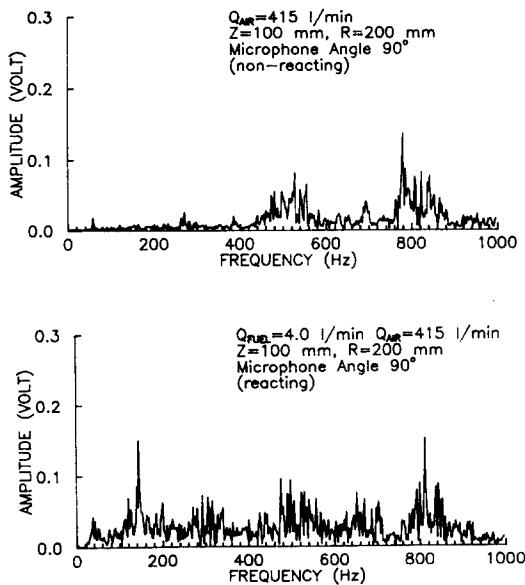


Fig. 15 Spectral characteristics of a cold air jet and flame in a gaseous fuel.

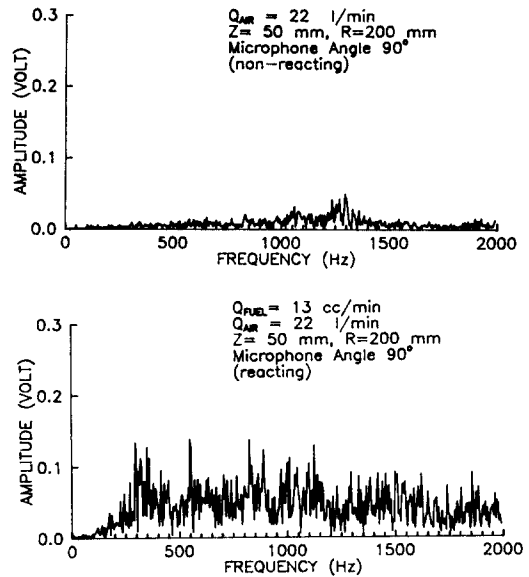


Fig. 16 Spectral characteristics of a cold air jet and flame in a liquid spray.

의 각도가 90°일때의 공기역학적소음의 음향스펙트럼으로 1300Hz 부근에서 주파수 성분값이 높게 나타나고 있다. 공기 22 l/min 백등유 13 cc/min인 분무화염의 연소소음 스펙트럼분포에서 열발생과 체적 팽창에 의해 저주파수 특성을 나타냄을 알 수 있다. 그러므로 연소시의 연소소음의 음향스펙트럼은 가스연소나 액체연소 모두 연소반응에 의해 상대적으로 공기역학적 제트소음보다 저주파수 특성을 가진다. 본 실험에서 프로판 가스확산화염과 백등유 분무화염의 음향스펙트럼에서 분무연소시에 상대적으로 고주파수의 성분값이 크게 나타나고 있다. 이는 분무연소시 연료의 미립화 과정과 미립화된 액적의 증발과정에서 급격한 밀도변화와 음속의 변화가 쌍극자형태(dipole)의 음을 발생시키고 있기 때문이다³⁾.

4. 결 론

상용프로판 가스를 사용한 가스확산화염과 백등유를 사용한 분무화염에서 비연소장 및 연소장의 평균유속과 난류강도, 평균온도, 음압 및 주파수 분석에서 다음과 같은 결과를 얻었다.

1) 가스확산화염에서 연소반응에 의해 비연소시보다 연소장의 유속은 증가되고 국소난류강도가 감소하고 있으며, 이러한 난류억제에 의해 비연소시의 **small scale eddy**를 연소장에서는 보다 큰 에너지를 가진 **large scale eddy**로 변화시키고 있다.

2) 가스확산화염에서 연료량이 증가함에 따라 음압이 증가하고, 분무화염에서는 연료량이 증가함에 따라 음압이 감소하고 있는 것은 연소소음이 열발생을 변화인 온도에 매우 큰 영향을 받고 있음을 알 수 있다.

3) 분무화염에서 연소소음이 연료량의 증가에 영향을 받기보다는 분무상태에 의한 연소장의 발열특성인 온도가 높은화염에서 연소소음이 크게 나타나는 것은 온도영향으로 분무의 증발과정에서 급격한 밀도변화가 주요 소음원임을 알 수 있다.

4) 발열반응이 활발이 일어나는 연소장에서 체적변화, 밀도변화, 열발생을 변화에 의해 음향특성은 가스확산화염이나 분무화염 모두 공기역학적 소음보다 상대적인 저주파수의 특성을 나타내고 있으나 분무화염에서는 급격한 밀도구배가 존재하는 액적주위에서 난류 성분에 의한 쌍극자형태의 음의 발생도 존재한다.

5. 참고문헌

- 1) M. J. Lighthill, "Sound Generated Aerodynamically," *Proceedings of Royal Society*, Vol. 267A, 1961, pp. 147 - 181.
- 2) L. F. Moon and S. W. Zelazny, "Experimental and Analytical Study of Jet Noise Modelling," *AIAA Journal*, Vol. 13, No. 3, March 1975, pp. 387 - 393.
- 3) A. P. Dowling, "Thermoacoustics sources," *Aero - and Hydro - acoustics*, IUTAM Symposium Ecole Centrale de Lydon 3 - 6 July, 1985, pp. 183 - 209.
- 4) W. C. Strahle, "Combustion Noise", *Prog. Energy Combust. Sci.*, Vol. 4, 1978, pp. 157 - 176.
- 5) W. C. Strahle, M. Muthukrishnan, D. H. Neal, and M. K. Ramachandra, "An investigation of combustion and entropy noise," *NASA CR 13522*, 1977.
- 6) B. N. Shivashankara, W. C. Strahle, and J. C. Handley, "Combustion noise radiation by open turbulent flames," *Progress in Astronautics and aeronautics*, Vol. 37, The MIT Press, 1975, pp. 277 - 296.
- 7) H. H. Chiu and M. Summerfield, "Theory of combustion noise," *Acta Astronautica*, Vol. - 984.
- 8) H. S. Kim and S. H. Oh, "Noise characteristics in free turbulent jet diffusion flame," *Journal of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 21, No. 1, 1993, pp. 91 - 105.
- 9) Forman A. Williams, *Combustion Theory*, 2nd edition The Benjamin /Cummings publishing company, inc., 1985.
- 10) Lawrence E. Kinsler, Austin R. Frey, Alan B. Coppens and James V. Sanders, *Fundamentals of Acoustics*, 3rd edition, John Wiley and Sons, 1982.