

〈論 文〉

난류 제트확산화염의 연소소음 특성에 관한 실험연구

김호석* · 오상현**

(1993년 7월 21일 접수)

Experimental Study on Combustion Noise Characteristics in Turbulent Jet Diffusion Flames

Ho-Seog Kim and Sang-Heon Oh

Key Words : Combustion Noise(연소소음), Aerodynamic Noise(공기역학적 소음), Shear Noise(전단소음), Self Noise(자기소음), Monopole Source(단극생성향), Local Turbulent Intensity(국소 난류강도), Sound Directivity(음의 지향성), Turbulent Diffusion Flame(난류확산화염)

Abstract

The experimental study is carried out to identify the combustion generated noise mechanism in free turbulent jet diffusion flames. Axial mean and fluctuating velocities in cold and reacting flow fields were measured using hot-wire anemometer and LDV. The overall sound pressure level and their spectral distribution in far field with and without combustion were also measured in an anechoic chamber. The axial mean velocity is 10~25% faster and turbulent intensities are about 10 to 15% smaller near active reacting zone than those in nonreacting flow fields. And sound pressure level is about 10~20% higher in reacting flow fields. It is also shown that the spectra of the combustion noise has lower frequency characteristics over a broadband spectrum. These results indicate that the combustion noise characteristics in jet diffusion flames are dominated by energy containing large scale eddies and the combusting flow field itself. Scaling laws correlating the gas velocity and heat of combustion show that the acoustic power of the combustion noise is linearly proportional to the 3.8th power of the mean axial velocity rather than 8th power in nonreacting flow fields, and the SPL increases linearly with logarithmic 1/2th power of the heat of combustion.

1. 서 론

소음은 원하지 않은 음으로서 노출되는 경우에 초조함이나 불쾌감 등과 같은 직접적인 신체적 현상을 일으키게 되므로 다른 환경오염이나 공해보다

직접적이고 즉각적인 영향을 미친다. 소음은 여러 가지 형태로 나타나고 있으나 여기에서는 화학반응을 수반하는 연소장에서 일어나는 소음에 대해서 고찰한다. 발전용로, 항공추진기관, 가스터빈, 내연기관, 보일러 등은 주요한 연소기구로 연소과정에서 많은 소음을 야기시키고 있으며, 연소과정에서 발생하는 연소소음(combustion noise)은 유체의 수송과정에서 유동특성에 의한 공기역학적 소음

*정회원, 부산대학교 대학원 기계공학과

**정회원, 부산대학교 기계공학과

(aerodynamic noise)과 화학적 발열반응에 의한 열의 수수에 의해 생성되는 연소소음이 복합적으로 상호작용하여 일어나고 있다. 공기역학적 소음에 대해서는 Lighthill⁽¹⁾이 제트유동장에 대해서 이론을 확립한 후 Moon and Zelazny 등⁽²⁾에 의해 유동장의 유속구배, 난류량, 점성, 난류 scale 등을 이용하여 공기역학적 측면에서 전단력에 의한 유속구배와 난류에 기인하는 전단소음(shear-noise)과 난류량 자체에 의한 자기소음(self-noise)을 구분하였으며, 공기역학적 소음발생에 대해 실험과 이론을 일치시키려는 연구를 진행하여 왔다. Bragg⁽³⁾는 체적의 팽창이나 축소, 열발생에 의해 연소과정에서 단극형(monopole)소음이 발생됨을 정립한 후 Dowling, Ffowcs Williams, Strahle 등⁽⁴⁻¹⁰⁾에 의해 화학적 발열반응에 의한 체적변화, 밀도변화, 열발생을 수반하는 연소장의 소음에 대한 이론적 및 실험적 연구가 진행되어 왔다. 이런 연구들은 대부분 고온의 가스터빈 엔진에서 발생하는 소음이나 고온의 배기가스 또는 고온기류에 대해 거시적으로 공기역학적 측면에서 진행되어 오고 있으며 화염 자체에서 발생하는 연소소음에 대한 연구는 고온의 연소장에 대한 유동정보의 부족 등으로 아직은 미미한 실정이다. 따라서 연소장에서 연소반응에 의해 연소소음에 중요한 영향을 미치는 인자는 연소반응에 의한 유동장의 급격한 변화에 따른 유동장의 변화와 화학적 발열반응에 의한 다량의 열발생이 연소소음에 매우 중요한 인자이므로 이에 대한 연구가 필요하다. 그러므로 본 연구는 연소실이 없는 개방형의 난류 제트확산화염에 대한 유동장의 변화특성을 LDV를 이용하여 평균유속 및 국소 난류강도를 측정함으로써 연소반응에 의한 유동장의 변화특성, 연소장의 유속변화와 연소소음과의 상관관계, 그리고 연소반응에 의해 발열특성인 연소열과 연소소음과의 상관관계를 고찰함으로써 연소소음의 생성원에 대한 규명 및 특성을 고찰하고자 한다.

2. 연소소음 이론

연소유동장의 원거리 위치 x (far-field position x)에서 압력변동 (pressure perturbation) 은^(4,5)

$$4\pi|x|(P - P_0)(x, t) = -\frac{\partial}{\partial t} \int \left[\frac{\rho_0 \alpha}{\rho c_p (1 - M_r)} \left(\sum_{n=1}^N \frac{\partial h}{\partial Y_n} \right)_{\rho, P, Y_m} (W_n) \right. \right.$$

$$\left. - \nabla \cdot \underline{J}_n + \nabla \cdot \underline{q} - \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \tau_{ij} \right] d^3 y + \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} \int [(\rho u_i u_j - \tau_{ij})] d^3 y - \frac{\partial}{\partial t} \int \left[\frac{1}{c_0^2 (1 - M_r)} \left\{ \left(\frac{\rho_0 c^2}{\rho c^2} - 1 \right) \frac{DP}{Dt} + \frac{(P - P_0)}{\rho} \frac{D\rho}{Dt} \right\} \right] d^3 y - \frac{\partial}{\partial t} \int \left[\frac{\rho_e}{(1 - M_r)^2} \frac{DM_r}{Dt} \right] d^3 y \quad (1)$$

여기서, P : 압력

ρ : 밀도

u : 입자속도

c : 음속

τ_{ij} : 점성응력텐서,

ρ_e : 과잉 밀도 ($\rho_e = \rho - \rho_0 - (P - P_0)/c_0^2$)

Y_n : n 번째종의 질량분율

W_n : 반응에 의한 n 종의 단위체적당 생성률

h : 엔탈피

q : 열발생률

α : 체적팽창계수

\underline{J}_n : 확산에 의한 n 종의 유동량

M_r : Mach수

첨자 "0" : 원거리에서 평균값

식(1)의 오른쪽 첫째 항은 비가역과정의 연소반응에 의해 생성된 소음이며, 다음의 열역학적 관계식^(4,11)

$$\frac{\partial h}{\partial Y_n} \Big|_{T, P, Y_m} = \frac{\partial h}{\partial Y_n} \Big|_{\rho, P, Y_m} + \frac{\partial h}{\partial \rho} \Big|_{P, Y_n} \frac{\partial \rho}{\partial Y_n} \Big|_{T, P, Y_m}$$

으로부터,

$$\sum_{n=1}^N \frac{\partial h}{\partial Y_n} \Big|_{\rho, P, Y_m} \frac{DY_n}{Dt} = \sum_{n=1}^N \rho \frac{\partial h}{\partial Y_n} \Big|_{T, P, Y_m} \frac{DY_n}{Dt} - \rho \frac{\partial h}{\partial \rho} \Big|_{P, Y_n} \left(\sum_{n=1}^N \frac{\partial \rho}{\partial Y_n} \Big|_{T, P, Y_m} \frac{DY_n}{Dt} \right) \quad (2)$$

의 관계를 가지며, 화학종농도 (species concentration) 변화에 따른 단위체적당 발열량을 Q 라 하면, 식(2)의 마지막 항은 일정 온도와 압력하의 이상기체의 화학반응에 의해 평균 분자질량의 변화가 없으면,

$$\sum_{n=1}^N \frac{\partial \rho}{\partial Y_n} \Big|_{T, P, Y_m} \frac{DY_n}{Dt} = 0 \quad (3)$$

이므로, 탄화수소-공기 (hydrocarbon-air)의 연소에

$$\sum_{n=1}^N \rho \frac{\partial h}{\partial Y_n} \Big|_{\rho, p, Y_m} \frac{DY_n}{Dt} = -Q \quad (4)$$

의 근사적 관계식을 사용할 수 있다. 또한 이상기체에 대해 $\alpha/c_p = (\gamma - 1)/c^2$ 의 관계를 가지므로 저 Mach 유동에서 $\rho_0 \alpha / \rho c_p (1 - M_r) \cong \rho_0 (\gamma - 1) / \rho c^2$ 가 된다. 열과 종의 확산(heat and species diffusion)에 기인한 항들은 단순한 정상적 가열이나 종의 확산에 의해 음이 발생되지 않으며, 비정상적인 경우에도 비열비에 종속하나 그 영향이 작으며 이러한 효과는 Kempton and Morfey 등⁽⁴⁾에 의해 매우 약한 것으로 나타나고 있으므로 무시한다.

$\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \tau_{ij}$ 는 분자의 이완운동(relaxation)에 의한 체적점성(bulk viscosity) 변화로 연소과정에서는 무시한다⁽¹¹⁾.

둘째 항은 유동의 비선형에 의해 나타나는 항으로 전단력과 난류강도에 의한 영향으로 평균속도 U 의 8승에 비례하는 공기역학적 소음이다. 연소장에서는 발열반응에 의해 유동장의 변화가 수반되므로 연소반응에 의한 소음과 함께 연소장에서 주요한 소음원으로 작용한다.

셋째 항은 주위의 유체와 다른 밀도와 음속을 가진 비정상유동 영역에서 발생하는 소음으로 예를 들면 물속의 기포가 파괴되기 위하여 압력 및 온도 급격한 변화가 일어나는 경우와 같이 2상 유동(two phase flow)에서 고려되어지는 항이므로 가스상의 연소과정에서는 무시할 수 있다. 마지막 항은 밀도의 불균질성에 의한 가속성의 영향에 의해 나타나는 항으로 폭발(detonation) 등과 같이 급격한 압력구배에 의해 고온부에서 저온부로 급격한 이동이 일어나는 경우에 고려되어진다.

따라서 방정식(1)은

$$4\pi|x|(P - P_0)(x, t) = \frac{\partial}{\partial t} \int \left[\frac{\rho_0(\gamma - 1)}{\rho c^2} Q \right] dy^3 + \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} \int [(\rho u_i u_j - \tau_{ij})] d^3y \quad (5)$$

로 나타나게 된다. 본 실험적 연구에서는 방정식(5)의 오른쪽의 첫째 항인 비가역과정의 연소반응에 의한 열발생률의 변화에 의한 소음생성항과 둘째 항인 공기역학적인 운동량의 변화에 기인한 소음생성항을 연소시와 비연소시에 대해 음압레벨(sound pressure level) 및 주파수 분석을 통하여 대적으로 비교하므로써 연소과정의 열발생률의 변화가 연소장의 소음생성에 미치는 영향을 규명하

고자 한다.

3. 실험장치 및 실험방법

3.1 실험장치

Fig. 1은 난류 제트확산화염의 연소기 및 장치도이다. 연소기는 연소과정에서 발생하는 연소소음이 연소실에 의해 영향을 받지 않도록 하기 위하여 연소실이 없는 개방형으로 외측의 공기관(내경 38 mm)과 내측의 연료관(외경 13 mm)으로 구성되어 있다. 연료가 4 mm의 노즐에서 고속으로 분사되므로 화염을 안정화시키기 위하여 노즐선단을 직경 10 mm 길이 5 mm로 확대시켜 화염을 안정시켰다. 공기는 송풍기, 서지탱크, 공기설정용 마노미터, 증류유량계를 거쳐 2개의 공기관으로 분리되어 공기완충실에 유입되며, 공기완충실은 관로에 의한 공명소음의 영향을 없애기 위하여 다공성 물질로 채워져 있으며, 이를 지나 연료관과 공기관이 동심이 되도록 설치된 다공관을 지나 연료와 혼합되고, 연료는 연료탱크, 적산유량계, 유량설정용 마노미터를 지나 노즐을 통하여 분사된다. 연료는 가정용 상용프로판을 사용하였으며 산화제로 공기가 이용되었다.

비연소 유동장의 유속측정은 열선풍속계(hot-wire)를 사용하여 X프로브로 측정하였으며, 연소시 유동장의 유속을 측정하기 위하여 공기유입관의 상류부에 MgO (공칭입경 3 μm)를 유입공기와 혼합

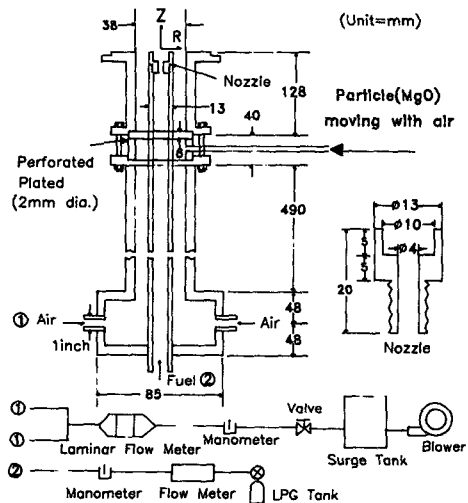


Fig. 1 Schematic diagram of the combustion system

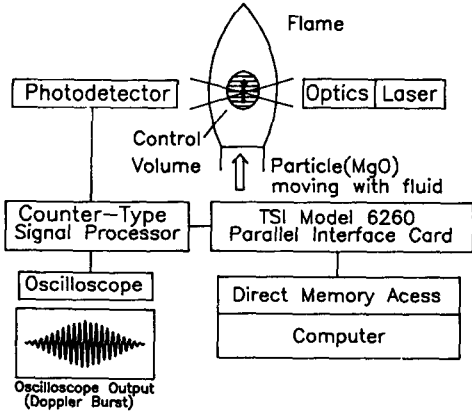


Fig. 2 LDV system to measure the velocity of reacting flow fields

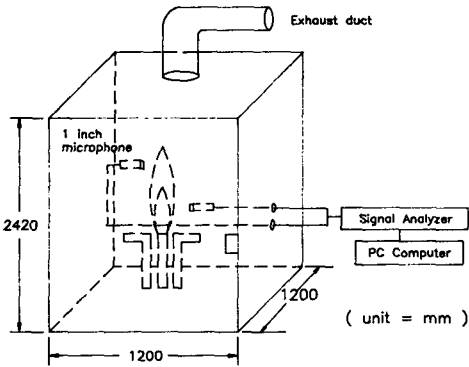


Fig. 3 Anechoic chamber to measure the overall sound pressure

시켜 연소장에 유입되도록 하여 15 mW Helium-Neon Laser (dual beam, 파장 632.8 nm, 초점거리 250 mm)를 이용하여 측정하였으며,⁽¹²⁻¹⁵⁾ 신호처리는 TSI 1980B Counter Type Signal Processor와 Model 6260 Interface System을 이용한 신호처리 과정이 Fig. 2에 나타나 있다.

평균온도 측정은 직경 0.1 mm의 Pt/Pt-Rh 13%의 열전대(수냉식 프로브외경 5.5 mm)를 이용하였다.

Fig. 3은 연소장의 음향특성을 고찰하기 위한 무향실(anechoic chamber)로 연소음의 벽면에 의한 반사영향을 없애기 위하여 흡음효율이 좋은 스폰지를 각 벽면에 부착하여 흡음효율을 높였다. Fig. 4는 비연소시와 연소시 음의 지향성을 비교 측정하기 위한 마이크로폰의 설치각도로 제트의 주 유동 방향에 대해 시계방향으로 설정하였다. 연소장 및

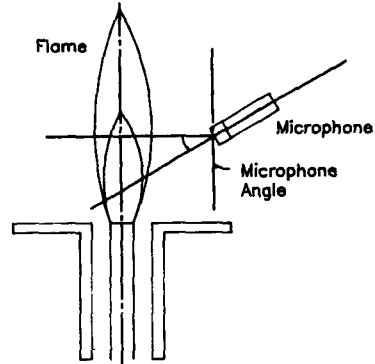


Fig. 4 Coordinate system used to designate microphone angle of sound observation

비연소장의 소음을 측정하기 위하여 마이크로폰(1 inch condenser microphone: JEIC 1015)을 사용하여 음향실의 암소음을 측정한 후 연소장과 비연소장의 음압(sound pressure level) 측정과 신호분석기(scientific-atlanta SD380)를 이용하여 소음특성에 대한 주파수 분석을 하였다.

실험결과에 대한 좌표 설정은 연료분사노즐의 선단중심을 원점으로 하여 반경방향을 R축, 상방향을 Z축으로 설정하여 표기하였다.

3.2 실험조건

제트화산화염의 연소특성과 연소장의 소음특성을 고찰하기 위하여 연료량을 4 l/min으로 일정하게 유지된 조건에서 공기량을 변화시킨 4가지 실험조건을 설정하였다. Table 1은 연소장의 실험조건을 나타낸다. 또한 연소시 음압측정 및 음향스펙트럼 분석시에는 공기량을 일정하게 유지하고 연료량을 변화시켰으며 비연소시에는 공기량을 변화시키며 고찰하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 연소장의 평균온도

Fig. 5의(a)~(d)는 Table 1의 실험조건에 대한 연소장의 평균온도분포로서 연료량을 고정시키고 공기량을 변화시키면서 측정한 결과로, Z=30 mm 단면에서는 R=0~4 mm 사이는 분출되는 연료의 영향으로 상온의 온도분포를 나타내며, 하류부로부터 따라서 중심축의 평균온도 분포가 재순환과 고온의 연소가스에 의해 높게 나타난다. 공기량이 증가함에 따라 150 mm 이하에서는 공기유속이 증

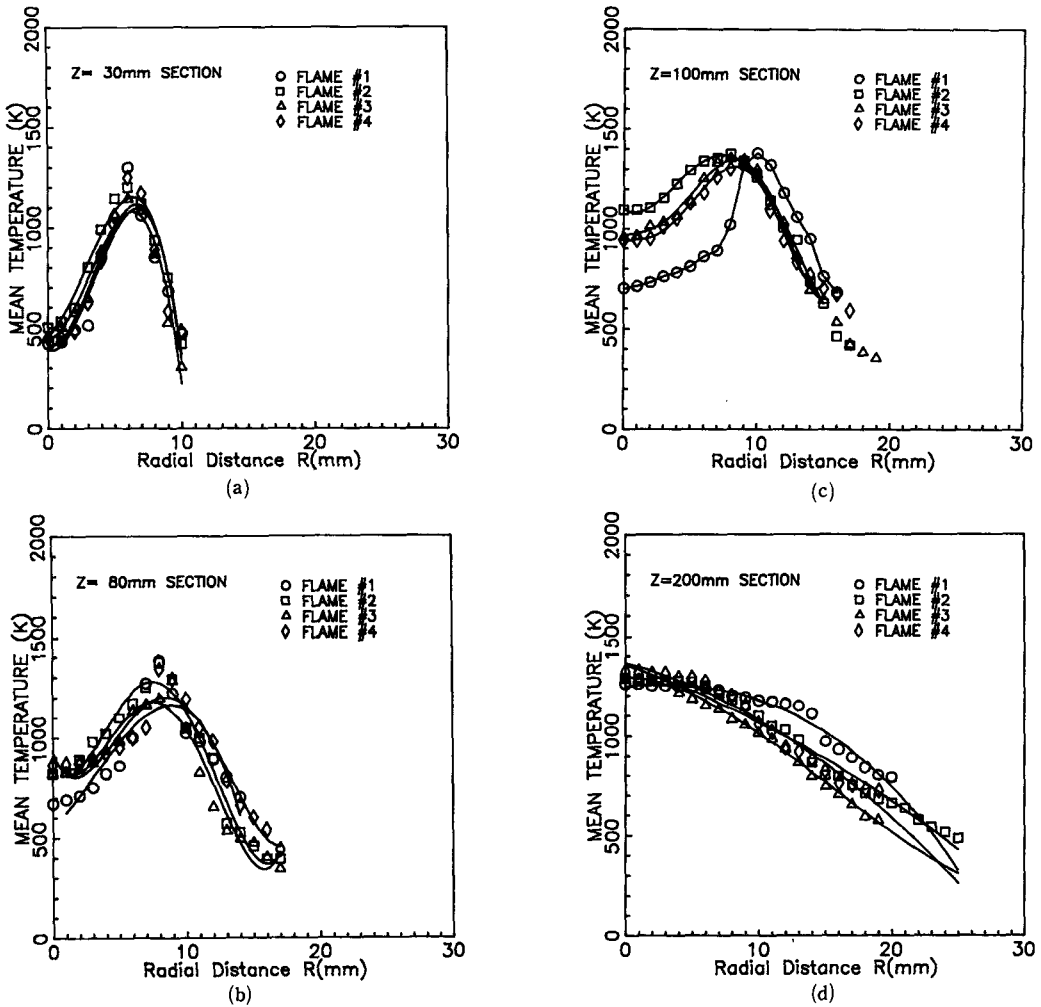


Fig. 5 Mean temperature profiles in reacting flow fields

가함에 따라 반응영역이 축중심으로 이동하고 있으며, 또한 연료와 공기의 화산이 빠르게 일어나므로 온도분포도 높게 나타나고 있다. 하류부의 중심축에서 온도분포가 높게 나타나는 것은 연소반응이 상류부에서 완전히 일어나 기연의 고온가스가 하류로 이동하기 때문이며, 이는 비연소시의 공기유속 분포가 $Z=150\text{ mm}$ 단면 이후 하류부에서 충분히 발달된 제트특성을 가지는 것과 잘 일치 하고 있다. 연료와 공기의 화산이 잘 일어나 연소반응이 활발한 영역은 $Z=150\text{ mm}$ 영역까지는 $R=5\sim 10\text{ mm}$ 영역이다.

4.2 비연소장과 연소장의 평균속도 및 변동량

Fig. 6은 비연소장의 축방향 공기의 평균유속과

연소시 반응장의 축방향 평균유속 분포에 대한 비교이다. 연료량을 4 l/min 으로 일정하게 유지하고 공기량을 증가시키에 따라 각 화염에서 유속 분포는 비연소시의 공기유속 분포보다 연소반응에 의하여 $1\sim 3\text{ m/sec}$ 정도 높게 나타나고 있으며 연소반응이 활발한 영역에서는 $10\sim 25\%$ 정도 증가하고 있다. 상류측 단면에서 비연소시보다 연소반응이 일어나는 영역에서 속도분포가 축중심쪽으로 약간 편향되어 높게 나타나고 있다.

Fig. 7(a), (b)는 비연소시와 연소시의 각 지점에서 축방향 변동속도(u')와 평균속도(U)의 비를 나타내는 국소 난류강도(local turbulent intensity : u'/U)에 대한 그림이다. 비연소시의 경우 상류측인 $Z=30\text{ mm}$ 단면에서 $R=5\text{ mm}$ 부근에서는 연

료노즐의 영향으로 난류강도가 높게 나타나고 있으나 전반적인 난류강도는 주위의 공기 유입에 의해 중심축보다 $R=20$ mm 부근의 제트 경계면에서 높게 나타나고 있다. 난류강도(turbulent intensity)는 비연소시보다 연소시 낮고 연소장의 상류측에서 상대적으로 비연소시의 난류강도보다 10~15%의 낮은 값을 가지며 하류부에서는 증가하고 있다. 발열반응에 의해 연소장에서 온도가 증가하여 연소유

Table 1 Experimental conditions of turbulent jet diffusion flames to estimate the combustion noise.

Experimental condition	Air flow rate Q_{AIR} (l/min)	Fuel flow rate Q_{FUEL} (l/min)	Notation
1 (6 Conditions)	340	4	Flame #1
		0	Cold flow
		3.2, 4.7, 5.2, 5.7	
2 (6 Conditions)	415	4	Flame #2
		0	Cold flow
		3.2, 4.7, 5.2, 5.7	
3 (6 Conditions)	484	4	Flame #3
		0	Cold flow
		3.2, 4.7, 5.2, 5.7	
4 (6 Conditions)	538	4	Flame #4
		0	Cold flow
		4.7, 5.2, 5.7	

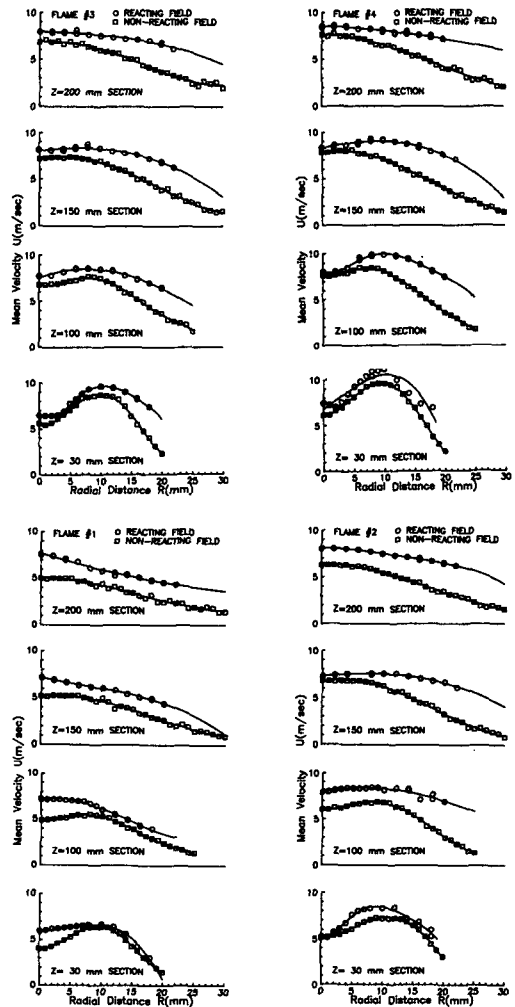
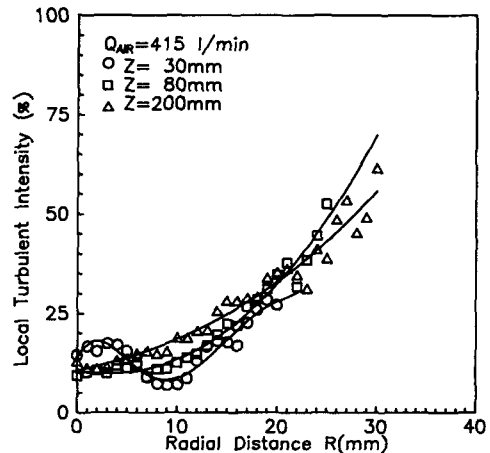
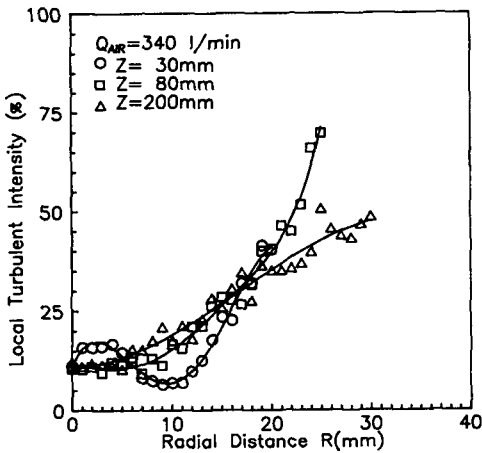
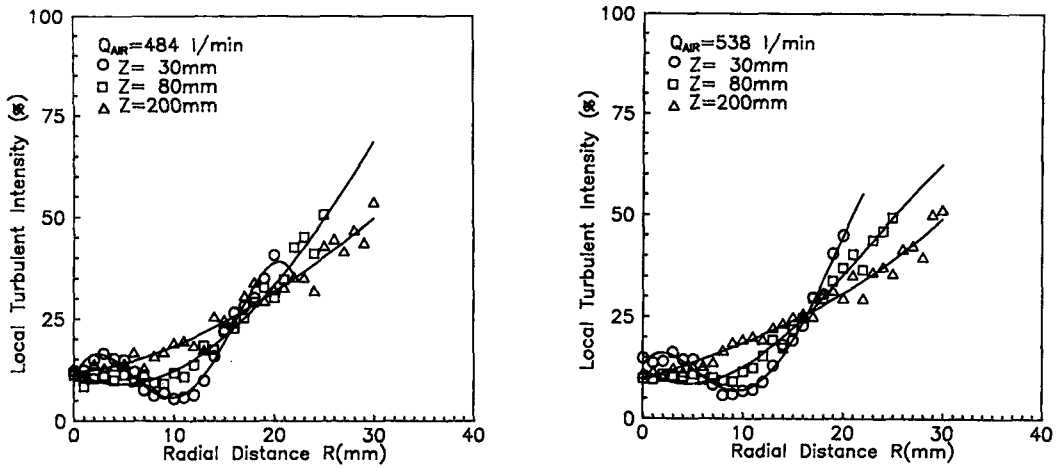


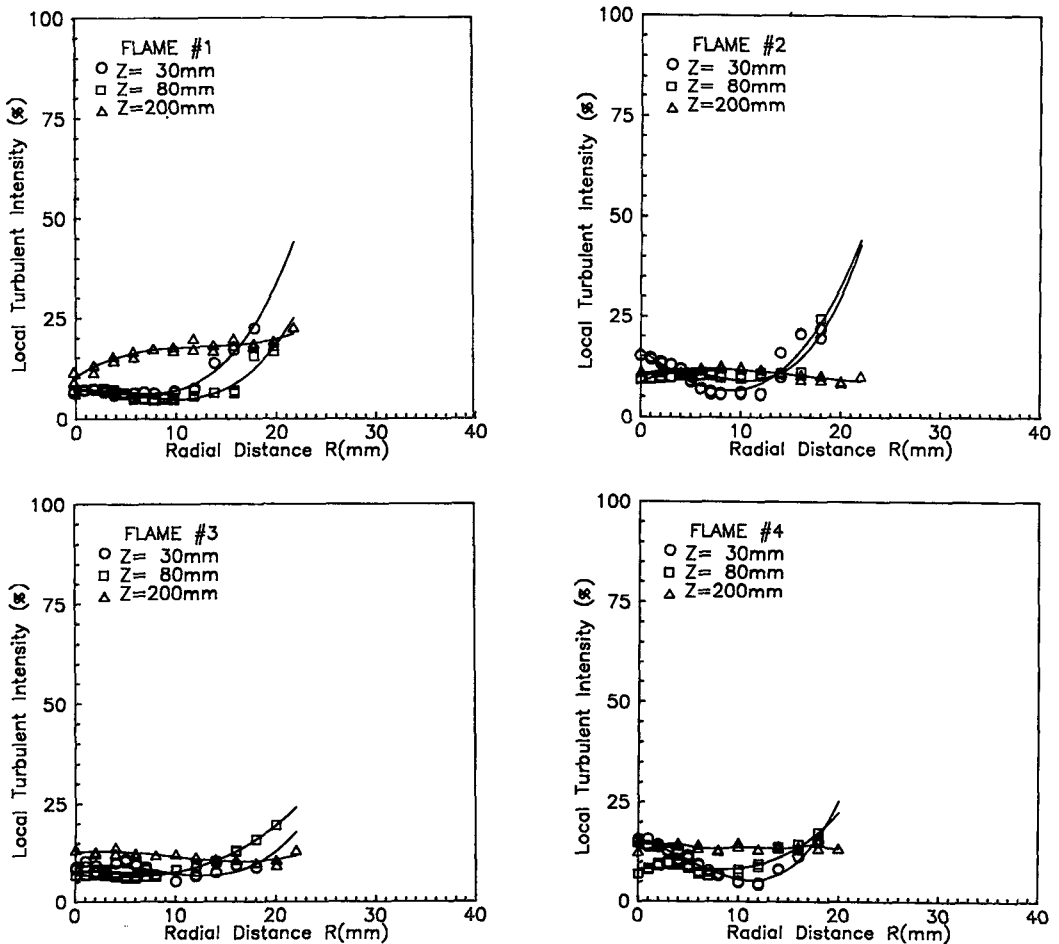
Fig. 6 A comparison of axial mean velocity profiles with and without reacting



(Fig. 7 Continued)



(a) Cold air flow fields



(b) Reacting flow fields

Fig. 7 A comparison of local turbulent intensity profiles with and without reacting

동장의 동점성(kinetic viscosity)이 증가됨으로 시간, 길이, 속도 scale은 증가한다.^(11,12,14,15) 따라서 연소 유동장은 발열반응에 의해 비연소 유동장의 eddy를 large scale의 eddy로 변화시키고 있다. 이러한 연소장의 유속증가와 난류강도의 감소는 연소장의 유동특성이 large scale eddy에 의해 지배되고 있음을 나타내며 또한 연소소음의 음압과 스펙트럼에 영향을 미치게 된다.

4.3 연소소음 분석

4.3.1 비연소장의 공기역학적 소음

소음의 세기를 나타내는 음압레벨(sound pressure level)의 관계는 다음과 같다.^(5,16)

$$\text{Sound Pressure Level} = 20 \log(P/P_{ref})$$

$$P/P_{ref} : \text{기준음압}(2 \times 10^{-4} \text{ dyne/cm}^2)$$

$$P : \text{측정음압}(\text{dyne/cm}^2)$$

비연소장에 대해 마이크로폰을 $Z=100 \text{ mm}$, $R=200 \text{ mm}$ 인 위치에 설치하고 공기량 변화에 따른 축방향과 마이크로폰이 이루는 각을 30° , 45° , 60° , 90° 에서 측정한 음압레벨과 공기유동 출구 단면에서 평균유속과의 관계가 Fig. 8에 있다. 제트 소음이론^(1,2)에 따르면 음압이 유속의 8승에 비례한다는 관계에 따라 평균유속과 음압과의 관계를 공기의 유동속도와 선형화시킨 결과 $SPL \propto U^8$ 에 대해 비연소시 음압은 최대 $3 \sim 4 \text{ dB(A)}$ 범위 내에서 잘 일치하고 있다. 여기 U 는 노즐출구에서 축방향(Z 축 방향)의 평균유속이다. 공기역학적 소음은 난류성분과 평균유속구배에 지배되는 저주파수의 전단소음(shear noise)인 $\frac{\partial U}{\partial x_j} \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_j)$ 와 난류성분 자체에 의한 고주파수의 자기소음(self noise)인 $\frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j}(\rho u_i u_j)$ 에 지배되므로,⁽²⁾ 공기량의 증가에 따라 유동장의 유속구배에 따른 전단력과 난류량에 의해 음압레벨이 증가하고 있다.

4.3.2 연소장의 소음

Fig. 9는 난류 제트확산화염에서 발생하는 소음을 $Z=100 \text{ mm}$, $R=200 \text{ mm}$ 위치에서 마이크로폰이 Z 축과 30° , 45° , 60° , 90° 이루는 위치에서 측정한 음압과 $Z=10 \text{ mm}$ 단면에서 연소장의 평균유속과의 관계를 나타낸 그림이다. 실험결과는 노즐출구 $Z=10 \text{ mm}$ 단면에서 축방향의 평균유속의 3.8승에 비례하는 선형성을 나타내고 있다. 이는

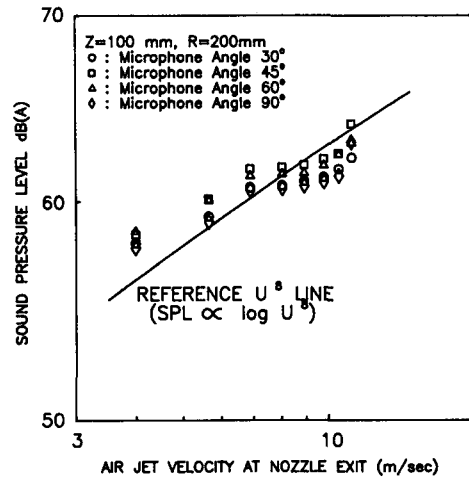


Fig. 8 Overall sound pressure level of cold air jet

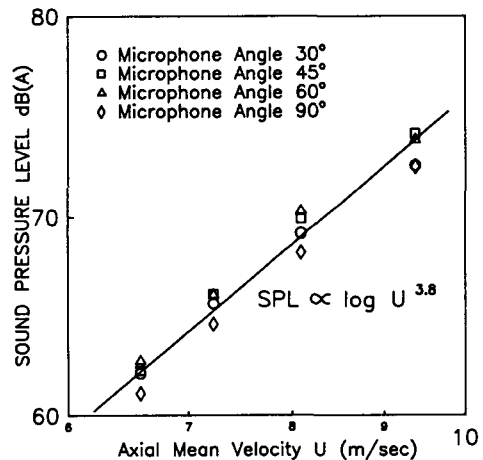
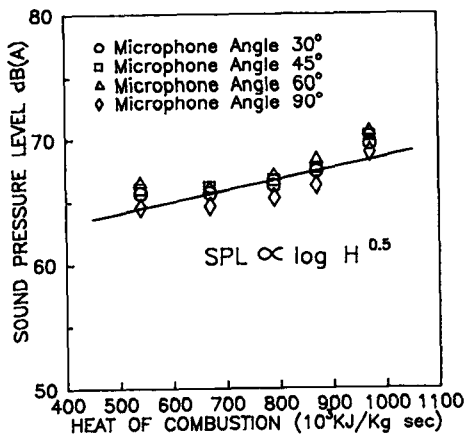


Fig. 9 Overall sound pressure level of reacting flow fields

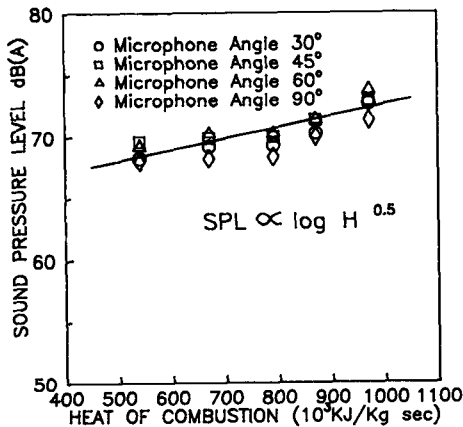
연소반응에 의해 유동장의 속도가 증가함으로 인하여 비연소장의 유동장의 음압레벨이 평균유속의 8승에 비례하는 반면에 연소장에서는 화학적 발열반응과 유동장의 속도가 증가함으로 반응장에서 음압레벨은 평균속도의 8승보다 낮은 지수에 의해 지배됨을 알 수 있다. 이는 비연소장에서 소음은 유속의 8승에 비례하는 공기역학적 소음이 주요인자이나 연소장의 소음의 세기는 화학반응에 의한 발열 및 그에 따른 음속, 난류강도, 속도구배 등과 같은 유동장의 변화에 주로 영향을 받으므로 유속의 3.8승에 비례하여 상대적으로 공기역학적 소음이 작게 나타나고 있다. 연소시 음압은 비연소시보다 일정한 연료량 4 l/min에 대해 같은 공기량에서

10~25% (5~13 dB(A)) 정도 음압이 증가하고 있다. 연소장의 음의 지향성(sound directivity)을 비연소장과 비교하여 보면 $Z=100$ mm, $R=200$ mm에서 측정된 음의 지향성은 45° 에서 높게 나타나고 연소시에는 60° 에서 높게 나타나는 음의 지향성이 약간 변화하고 있으나 그 영향이 크지 않은 것은 연소시 체적의 팽창과 열발생에 의해 단극생성향(monopole source)의 음향특성^(3,5,6)을 가지고 있기 때문이다.

Fig. 10(a), (b)는 각각 $Q_{AIR}=415$ l/min, $Q_{AIR}=184$ l/min의 일정한 공기량에 대해 연료량의 증가에 따른 연소열(heat of combustion)과 $Z=100$ mm, $R=200$ mm에서 음압과의 관계를 나타낸 그림이다. 음압과 발열량과의 관계는 음압이 발열량 H 의



(a) $Q_{AIR}=415$ l/min



(b) $Q_{AIR}=484$ l/min

ig. 10 Overall sound pressure level and directivity of reacting flow fields for heat of combustion at

0.5승에 비례하여 증가하고 있다. 이는 Strahle⁽¹⁰⁾ 등에 의한 난류 예혼합화염에서 음향파워(acoustic power)가 연공비(fuel-to-air ratio)의 0.4승과 유속의 2.69승 등의 곱에 비례한다는 결과와 비교하여 보면 연소열은 연료량에 비례하므로 이런 결과와 일치성을 나타내고 있다. 연소장에서 발생하는 연소열 H 의 증가는 방정식(5)의 첫째 항에서 발열량 Q 의 증가로 나타나므로 Q 의 증가는 음압에 영향을 미치게 된다. 따라서 발열량이 클수록 음압이 증가하게 된다. Shivashankara 등⁽¹⁰⁾의 연구 결과 프로판이나 프로필렌 연료를 사용한 경우에도 당량비의 증가에 따라 음압이 증가하고 있다는 결과와 일치하고 있다.

Fig. 11은 FLAME #1~#4에 대해 $R=200$ mm 위치에서 축방향으로 측정된 음압을 나타낸다. 연료를 4 l/min으로 일정한 조건에서 공기량의 증가에 따라 축방향의 음압은 노즐출구에서보다 $Z=100$ mm 단면 부근에서 높게 나타나고 있다. 하류부에서 FLAME #3, #4의 경우가 FLAME #1, #2에 비해 음압크기의 감소가 적은 것은 공기량의 증가로 출구의 유동속도와 난류강도가 $Z=100$ mm 이후의 하류부까지 영향을 미침으로 미연의 혼합기가 활발히 반응하고 있기 때문이다.

4.3.3 소음 스펙트럼분석

Fig. 12(a), (b)는 공기량 415 l/min인 비연소시와 연소시(FLAME #2)와 공기량 484 l/min인 경우 연료량 변화에 따른 연소시의 음압스펙트럼이다. 비연소시의 경우 소음은 평균유속과 난류성분

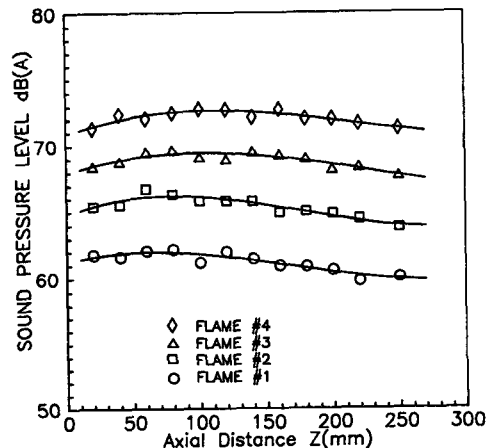


Fig. 11 Overall sound pressure level of reacting flow fields along Z -axis

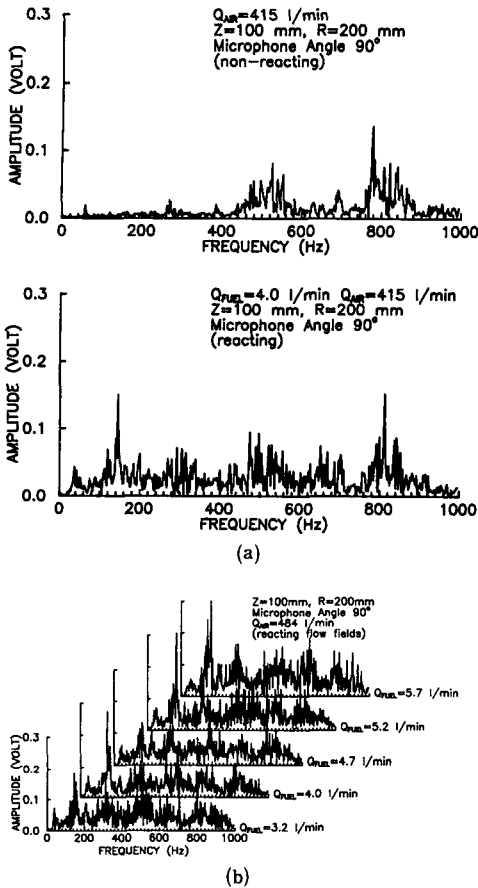


Fig. 12 (a) Spectral characteristics of sound pressure in non-reacting and reacting flow fields
 (b) Spectral characteristics of sound pressure in reacting flow fields for equivalence ratio increasing at $Q_{AIR}=484$ l/min

에 크게 영향을 받으므로 전단소음과 자기소음에 의해 저주파수와 고주파수의 특성을 나타내고 있음을 알 수 있다. 비연소시에는 음향스펙트럼에서 저주파수와 고주파수의 특성을 나타내고 있다. 연소시의 경우는 비연소시의 경우보다 상대적인 광역대의 저주파수 특성을 나타내고 있다. 이는 연소소음이 발열반응에 의한 열발생과 체적팽창 등에 의해 단극형(monopole)^(3,10)의 음을 발생함으로 광역대(broadband)의 저주파수의 음향적 특성을 나타내고 있으며, 비연소시보다 연소장의 유속은 발열반응에 의하여 유속이 높게 나타나고 국소 난류강도(local turbulent intensity)는 감소하고 있다는 앞 절의 결과를 인용해 설명할 수 있다. 따라서 평균 유속구배와 난류성분에 기인한 전단소음이 저주파

수의 특성을 나타내고 난류성분 자체에 의한 자기소음이 고주파수의 특성을 나타낸다는 공기역학적 소음이론⁽²⁾으로부터 유동특성만을 고려하여 유추하여 보면 연소반응장은 저주파수의 특성을 가짐을 알 수 있다. 따라서 난류 제트확산화염의 연소 및 소음특성은 small scale eddy보다는 보다 큰 에너지를 가진 large scale eddy에 의해 지배되고 있음을 나타낸다. 이는 Gimammar나 Putnam의 연구 결과인 160~1000 Hz범위 주파수에서 연소소음이 중요하다는 사실과도 잘 일치하고 있다.^(6,9,10)

5. 결 론

난류 제트확산화염의 연소소음을 규명하기 위하여 연소장의 평균온도, 연소시와 비연소시의 유동장의 평균유속과 국소 난류강도, 연소시와 비연소시의 음압 및 음향스펙트럼의 실험적 측정과 분석을 통하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

연소장에서는 발열 및 유동장의 변화에 의해 축방향의 평균유속이 비연소시보다 연소시에 10~20% 높고, 국소 난류강도는 비연소시보다 10~15% 낮게 나타나고 있으나 비연소장의 음향파위는 평균유속의 8승에 비례하고 연소장의 음향파위는 평균유속의 3.8승에 비례하고 있다. 그리고 발열특성인 연소열과 음압과의 관계는 연소열에 대해 0.5승에 비례하여 증가하여 나타나고 있으므로 연소소음의 발생은 상대적으로 공기역학적소음 특성의 영향을 작게 받으며 발열특성의 변화에 큰 영향을 받음을 알 수 있다. 또한 연소소음의 음향스펙트럼을 비연소시와 비교하여 보면 상대적인 저주파수 특성을 나타내고, 연소장의 유동 특성이 연소반응에 의해 평균유속이 증가하고, 국소 난류강도가 감소함으로 연소장은 비연소장의 small scale eddy보다 큰 에너지를 가진 large scale eddy에 의해 지배되고 있음을 알 수 있다.

향후 연소반응영역에서의 열발생률의 변화, 체적 변화, 반응장의 length scale 등에 대한 정보를 통하여 연소와 난류의 상호작용 관계에 의한 연소소음원의 규명 및 액체연료를 사용한 화염의 연소소음의 발생원에 대한 규명도 필요하다.

후 기

이 논문은 1992년도 교육부지원 한국학술진흥재단 자유공모과제 학술연구조성비의 일부지원에 의해 연구되었으며 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Lighthill, M. J., 1961, "Sound Generated Aerodynamically," *Proceedings of Royal Society*, Vol. 267A, pp. 147~181.
- (2) Moon, L. F. and Zelazny, S. W., 1975, "Experimental and Analytical Study of Jet Noise Modeling," *AIAA Journal*, Vol. 13, No. 3, pp. 387~393.
- (3) Bragg, S. L., Jan, 1963, "Combustion Noise," *Journal of the Institute of Fuel*, Vol. 36, pp. 12~16.
- (4) Dowling, A. P., 1985, "Thermoacoustics sources," *Aero- and Hydro-acoustics*, Springer-Verlag, pp. 183~209.
- (5) 김호석, 오상현, 1993년 2월, "자유분류난류확산화염의 소음특성," 한국항공우주학회지, 제 21권, 제 1호, pp. 91~105.
- (6) Strahle, W. C., 1978, "Combustion Noise," *Prog. Energy Combust. Sci.*, Vol. 4, pp. 157~176.
- (7) Ffowcs Williams, J. E., 1982, "Sound Sources in Aerodynamics-Facts and Fiction," *AIAA Journal*, Vol. 20, No. 3, pp. 307~315.
- (8) Mostinger, R. E. and Emmerling, J. J., 21~23 1971, "Review of Theory and Method for Combustion Noise Prediction," *AIAA Paper*, No. 71~583, *AIAA 4th Fluid and Plasma Dynamics Conference*, Palo Alto, California.
- (9) Abbott Putnam and Lynn Faulkner, Nov.-Dec. 1983, "An Overview of Combustion Noise," *J. Energy*, Vol. 7, No. 6, pp. 458~469.
- (10) Shivashankara, B. N., Strahle, W. C., and Handley, J. C., 1975, "Combustion Noise Radiation by Open Turbulent Flames," *Aeroacoustics : Jet and Combustion Noise ; Duct Acoustics, Progress in Astronautics and Aeroacoustics*, Vol. 37, pp. 277~296, MIT Press.
- (11) Williams, F. A., 1985, *Combustion Theory*, 2nd Edition The Benjamin/Cummings Publishing Company, inc.
- (12) Norman Chigier, 1991, *Combustion Measurements*, Hemisphere Publishing Corporation.
- (13) Charles M. Vest, 1979, *Holographic Interferometry*, John Wiley & Sons.
- (14) Tau-Yi Toong, 1983, *Combustion Dynamics : The dynamics of chemically reacting fluids*, McGraw-Hill Book Company.
- (15) Norman Chigier, 1981, *Energy, Combustion, and Environment*, McGraw-Hill Book Company.
- (16) Lawrence E. Kinsler, Austin R. Frey, Alan B. Coppens and James V. Sanders, 1982, *Fundamentals of Acoustics*, 3rd edition, John Wiley and Sons.