

〈논 문〉

## 저속 유동장이 있는 원통형 연소기에서의 열-음향학적 불안정에 대한 능동 제어 연구

Active Control of Thermoacoustic Instability in Cylindrical Combustor with Low Speed Flow Field

조상연\* · 이용석\*\* · 이수갑\*\*\* · 배충식\*\*\*\*

Sangyeon Cho, Yongseok Lee, Soogab Lee and Choongsik Bae

(1998년 6월 5일 접수 : 1998년 9월 11일 심사완료)

**Key Words :** Combustion Instability(연소 불안정), Cylindrical Combustor(원통형 연소기), Rayleigh Criterion(Reyleigh의 기준), Rijke Burner(Rijke형 연소기), Active Control(능동제어), Filtered-X LMS Algorithm(Filterd-X LMS 알고리즘)

### ABSTRACT

Combustion instability due to thermoacoustic feedback in a ducted combustor usually excites severe noise and vibration, which could lead to result in the failure of the system or environmental dispute. In the present study, an active noise control(ANC) method with an adaptive algorithm is hired to suppress instability which has very discrete behavior in the frequency domain. Especially a feedback system is composed to evade hot environment of the combustor, and as a preliminary, the performance and stability of the controller is checked by simulating the real situation with harmonic waves. Application to the real combustor showed serious reductions in sound pressure level by 20~30 dB. It was also shown that the selected control system was very stable and effective.

### 1. 서 론

산업용의 로(爐)나 비행체의 연소기와 같은 고성능 연소기의 일반적인 형태는 화염이 시스템 내부에

위치한 관형 연소기(ducted flame burner)의 형태이다. 이러한 연소기에서는 열원과 음장간의 상호작용에 의한 열 음향학적 피드백(thermoacoustic feedback) 현상이 발생할 수 있으며 이 경우 강한 음향학적 진동(oscillation)을 야기하게 되어 그 결과 저주파의 큰 기계적 진동(vibration)과 소음을 유발하게 된다. 특히 그 강도가 강할 경우, 항공기의 후방 연소기나 로켓 등에 있어서 구조적 손상이 발생할 수도 있고 환경 소음 측면에 있어서도 심각한 문제를 야기할 수 있으므로 이러한 열 음향 불안정에

\* 정회원, 서울대학교 대학원 항공우주공학과

\*\* 서울대학교 대학원 항공우주공학과, 현재 현대자동차

\*\*\* 정회원, 서울대학교 공과대학 항공우주공학과

\*\*\*\* 충남대 항공우주공학과, 현재 KAIST 기계공학과

대한 이해와 그 제어가 필요하게 되었다.<sup>(1)</sup> 이러한 문제를 이해하기 위한 연구의 일환으로 열 음향 간섭에 의한 불안정을 모사할 수 있는 모델 연소기를 제작, 예혼합 화염을 갖는 관형의 연소기에 있어서 여러 가지 변수들의 특성들을 살펴보았으며 관형 연소기에서의 저주파 진동과 그 변화를 확인한 바 있다.<sup>(2)</sup> 이와 같은 연소기의 제어에 있어서 흡음 처리와 같은 수동적 방법은 저주파 영역에서 그리 효과를 발휘하지 못하므로 이에 본 연구에서는 저주파 대역에서 효과적인 능동 제어 기법을 도입하게 되었다. 능동 제어란 연소실 내의 음향 모드를 센서로 측정된 후 적절한 제어 알고리즘을 이용, 물리적 기구를 구동시켜 소음 및 불안정성을 제어한다는 개념이다. 본 연구에서는 역음향(anti-sound) 방식에 의한 능동 소음 제어(active noise control) 방법을 사용하였는데 이는 마이크로폰을 사용해 음향파를 측정하고 스피커를 통해 위상이 반대인 음을 방출함으로써 소음을 제거하는 것을 기본 원리로 한다.<sup>(3)</sup> 그러나 일반 덕트 전달음의 능동 제어와는 달리 열 음향 진동에 있어서의 능동 제어는 제어음이 음원인 화염에 영향을 끼치고 열과 음압간의 상호 관련(coupling)을 저해하여 방출되는 음압이 줄어들게 되는 차이가 있다고 할 수 있다.

본 연구에서는 우선 연소가 없는 상태에서 제어기의 성능 특성을 알아보고 제어기의 이득(gain)을 적절히 조절, 안정적인 제어 시스템을 만들기 위한 목적으로 2차 음원을 관내에 삽입한 모사 실험을 실시하였으며 이에 이어서 실제로 연소가 존재하여 열 음향 진동이 활발한 상태에서의 제어를 수행하였다. 제어 방법으로는 실제 연소가 있을 경우, 이에 의한 열로부터 스피커를 보호하고 음향 피드백을 방지하기 위하여 적응 피드백 기법을 적용하였으며 능동 소음 제어에 널리 이용되는 Filtered-X LMS 알고리즘을 채택하였다.

## 2. 기본 이론

### 2.1 열 음향학적 연소 불안정

유동이 있는 연소관에서 열원이 관내의 특정한 위치에 존재하고 시스템이 잃어버리는 에너지보다 더 큰 에너지가 시스템에 공급되는 경우, 관의 기본 진동수와 같은 tone의 진동수로 관이 공진을 일으키게 된다. 이것은 열 방출과 음파간의 상호 간섭에 의한 현상인 열 음향학적 피드백에 기인한다. 열 음향학적 피드백이 발생하면 열 방출에 의한 에너지 증가

가 음향학적 진동을 증가시키는 방향으로 작용하고 증가된 음향학적 진동이 다시 열 방출을 증가시키는 쪽으로 작용하게 된다. 이와 같이 국부적인 비정상 열 방출 섭동(local unsteady heat release fluctuation)  $q'$ 과 음압  $p'$ 의 위상이 같을 경우 그 점에서의 에너지 증가는 양의 값을 갖게 된다. 따라서 두 변수의 곱을 시스템의 한 주기에 대하여 적분한 값이 양의 값을 가지면 그 주기에서 시스템에 에너지의 순증가가 일어나게 되며, 시간이 갈수록 시스템 내부에 계속적으로 에너지의 증가가 발생, 음향학적 진동이 증폭되게 된다. 이를 'Rayleigh의 기준 (Rayleigh's criterion)' 이라고 부르며 열 음향학적 불안정성을 판별하는 기준이 된다.<sup>(4)</sup>

이 Rayleigh의 기준을 식으로 나타내면

$$G(x) = \frac{1}{T} \int_T q'(x, t) p'(x, t) dt$$

$$G(x) > 0 \quad - \text{unstable}$$

$$G(x) < 0 \quad - \text{stable}$$
(1)

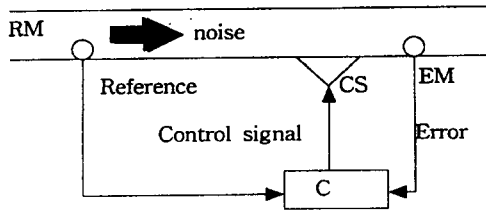
이때  $G(x)$ 를 국부적인 Rayleigh index라고 부르며 시스템의 열 음향 불안정성을 평가하는 척도로 사용되고 있다. 또한 그 크기는 이를 구성하는 두 개의 변수인  $p'$ 과  $q'$ 간의 상호 관련의 정도를 나타내는 값으로 사용되고 있다.<sup>(5)</sup>

이러한 열 음향학적 불안정 현상은 관내에 유동과 열 전달이 존재하는 매우 넓은 영역의 연소기에 있어서 발생되고 있으며 그 형상과 유동 특성, 혼합기 주입 방법의 차이 등에 의해 현상을 지배하는 메커니즘이 다르게 되어 각각을 구체적으로 표현하는 이론을 세우기 어려운 실정이나 기본적으로는 Rayleigh의 기준에 의해 지배된다고 할 수 있다.

따라서 이러한 Rayleigh의 기준을 이해하고 연구할 필요에서 열 음향학적 진동 현상을 쉽게 관측할 수 있는 장치인 Rijke형의 연소기를 이용, 저속 유동장에서 열 음향 불안정 현상에 관한 실험을 수행하였다. Rijke형의 연소기는 양단이 개방된 관으로 하반부에 열원이 위치하고 있으며 관내에 상방의 유동이 존재하고 충분한 에너지가 공급될 때 열 음향학적 피드백에 의해 공진이 일어나는 장치이다.<sup>(6)</sup>

### 2.2 능동 제어 기법 (Active Control Method)

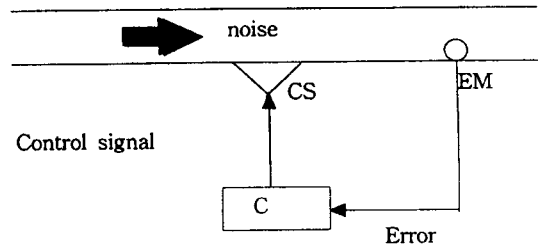
능동 제어 방법은 음장에서 발생하는 음압의 변화를 참조 마이크로폰으로 측정하여 이를 제어기에 통과시킨 뒤 2차 음원인 스피커를 통해 반대 위상의 음파를 방출하여 중첩시킴으로써 2차 음원 이후의



RM : Reference microphone  
EM : Error microphone  
CS : Control speaker  
C : Adaptive Controller

Fig. 1 Adaptive feedforward control

영역에서 음압을 최소로 만드는 방식을 취한다.<sup>(7)</sup> 이 방법은 높은 주파수의 음에 대해서는 위상을 맞추기 어려워 그 효과가 크지 않다는 한계를 가지고 있다. Fig. 1은 1차원 관에서의 능동 소음 제어에 널리 이용되는 적응 피드포워드 제어의 개략도로 이 방법은 복잡한 신호를 참조 마이크로폰으로 측정하여 이의 제어 신호를 방출, 에러 마이크로폰에서의 에러 값을 최소화하는 방식으로 제어가 이루어진다. 이 경우 실제로 참조 마이크로폰으로 측정되는 신호는 소음뿐만 아니라 제어 스피커로부터 방출되는 제어 신호도 포함되며 이러한 현상을 음향학적 피드백(acoustic feedback, acoustic coupling)이라고 한다. 음향학적 피드백에 의해 야기되는 효과는 피드백에 의해 전체 시스템에 폴(pole)을 형성하게 되어 시스템이 불안정해질 수 있다는 것으로 이는 능동 소음 제어에서 매우 중요한 요소이다. 제어기로 사용되는 FIR 필터는 무조건적인 안정성을 가지고 있으나 이렇게 폴이 형성되면 피드백 루프의 이득이 클 경우 안정성을 상실하게 된다.<sup>(8)</sup> 또한 음향 경로보다 전기적 경로가 짧아야 한다는 인과 조건(causality condition)을 만족시켜야 하며 열 음향학적 진동과 같이 음장이 연소에 의해 고온의 환경이 되었을 경우에는 스피커가 마이크로폰 사이에 있어야 하므로 고온에 노출된다는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 Fig. 2와 같이 스피커의 위치를 후방으로 돌리고 마이크로폰을 한 개만 사용하는 적응 피드백 제어를 채택하였다. 적응 피드백 제어는 오차 마이크로폰만이 사용되며 제어기로 입력되는 참조 신호는 제어기 내부에서 Kuo등이 제안한 선형 예측(linear prediction) 방법을 통해 구성되므로<sup>(9)</sup> 음향학적 피드백의 문제가 발생하지 않는다. 하지만 참조 신호를 예측해야 하기 때문에 이 시스템은 어느 정도 에



EM : Error microphone  
CS : Control speaker  
C : Adaptive filter(controller)

Fig. 2 Adaptive feedback control

측 가능한 주기적인 소음 신호에만 유용하다는 한계를 가지고 있다. 이 방법은 본 연구의 경우와 같이 이산형의 주파수가 지배적인 경우에는 유용하게 사용할 수 있는 방법이다. 한편 본 연구에서는 Fig. 2와는 또 다르게 연소가 있을 경우 발생하는 고온에 의한 시스템의 손상을 방지하기 위해 스피커를 Fig. 6과 같이 보焰기(flame holder)의 아래쪽에 위치시켰다. 따라서 이 경우 음원보다 아래쪽에 제어 스피커가 위치하게 된다. 능동 제어 방법에서 제어기는 일반적으로 디지털 필터를 이용하여 구성한다. 적응 제어 기법은 음압과 같이 입력 값이 계속해서 변하는 상황에서 그 변화에 따라 필터의 계수를 조정(update)할 수 있는 알고리즘으로 본 연구에서는 에러 신호의 평균값을 최소화하면서 오차 경로에 의한 에러 신호의 위상 및 크기 변화를 보상할 수 있는 Filterd-X LMS 알고리즘을 적용하였다.<sup>(10)</sup> 실제 시스템은 제어 신호가 발생하는 부분으로부터 에러 신호를 얻는 과정에서 경로 차가 발생하며 이를

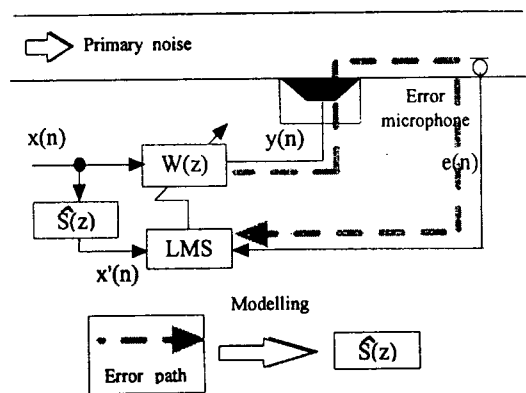


Fig. 3 Block diagram of filtered - X LMS algorithm

오차 경로(error path)라 한다. 이때, 오차 경로의 전달 함수(충격 응답 함수)를 모델링한 새로운 디지털 필터  $\hat{S}(z)$ 를 LMS 조정 부분에 삽입한다. Filtered-X LMS 알고리즘에 의한 블록 선도는 Fig. 3에 잘 나타나 있다.

### 3. 연소에 의한 불안정성의 측정

실험에 사용된 연소기는 Rijke형의 버너로 길이 1 m, 직경 60 mm의 관을 이용하였으며 관의 하부로부터 약 1/4지점에 예혼합 화염이 전단면에 걸쳐서 안정되도록 하였다. 연소기의 하부에는 부피 60 l의 분리기(decoupler)를 설치하여 연료의 충분한 혼합이 가능하게 하였으며 직선 유도관(straightener)으로 가는 스테인레스 관들을 연결하여 사용하였다. 화염이 위치하는 지점에 석영창(quartz pipe)을 사용하여 광학창으로 사용할 수 있도록 하였다. 공기의 유동 속도는 입구에서의 Reynolds수가 10000 이하인 영역을 선택하였다. 연료로 사용된 프로판은 로타메터식 유량계를 이용하여 조절되며 분리기 이전에 혼합된다.

본 연구에서는 혼합비나 유량과 같은 다른 입력 변수들에 의한 연소기의 내부 압력 값을 측정하여 영향을 살펴보았다. 측정은 관의 1/2 지점에 측정용 포트를 설치하여 측정하였다. 이때 사용한 센서는 B&K 4134 콘덴서 마이크로폰을 이용하였고 pre-amp를 거쳐 주파수 분석기(FFT)인 B&K Type 3550으로 보내어 주파수 대역에서 분석하였다. 마이크로폰의 옆쪽에는 열전대를 설치하여 압력 측정과 동시에 평균 온도를 측정하도록 하였다. 또한 방출되는 빛의 광도를 Hamamatsu R943-02

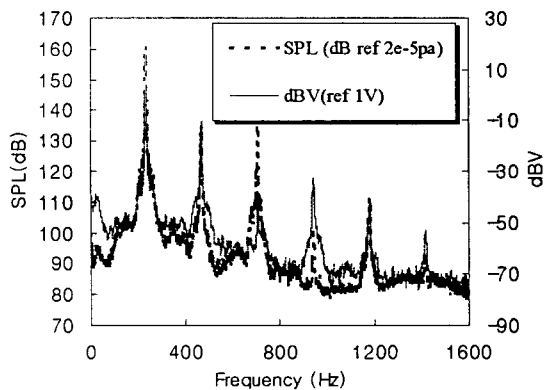


Fig. 4 Powerspectra of thermoacoustic oscillation ( pressure, C<sub>2</sub> emission)

PMT (photomultiplier tube)를 이용하여 측정하였다. 이때 PMT의 앞부분에는 최대 통과 파장 516.4 nm의 광학 필터를 설치하여 C<sub>2</sub>의 방출 강도만을 선택적으로 측정한다. 이전의 많은 연구를 통해, C<sub>2</sub>의 방출 강도는 비정상 열 방출과 서로 상관 관계가 있음이 밝혀져 있으며<sup>(11,12)</sup> 본 연구에서도 이를 비정상 열 방출의 척도로 다루었다.

그 결과로서 측정되는 전형적인 파워 스펙트럼 형태는 Fig. 4와 같다. 이때 기본 주파수(fundamental frequency)는 대략 200~280 Hz사이에서 Fig. 5와 같이 지속적으로 변화하고 압력 섭동의 크기는 150~160 dB의 매우 큰 값을 나타낸다. 이러한 공진 현상이 일어날 경우 화염이 심하게 떨리며 매우 강한 소음과 진동을 주위에 전달한다. 유동장의 영향이나 연소기 내부의 큰 온도차 때문에 본 실험 장치에 정확한 정상파가 형성되는 것은 물론 아니지만 이러한 기본 주파수 값은 연소기의 형상, 관의 길이와 내부 온도 등의 변수와 밀접한 관계를 갖는다고 보인다. 1차원 덕트 음향학에서 얻어지는 기본 주파수 공식을 통해서도 알 수 있듯이 이보다 규모가 큰 관형의 연소기라면 더 저주파의 진동이 발생되리라 예상할 수 있다.

Fig. 5에서 기본 주파수는 음속 즉, 온도의 함수이므로 시간에 따른 온도 변화에 따라 주파수의 변화가 발생하는 것을 볼 수 있다. 이때 희박 연소의 경우, 진동(oscillation)이 생성되는 온도가 과농 연소의 경우보다 훨씬 높게 나타나며 진동이 생성된 후에 온도가 잠시 감소하는 것을 확인할 수 있다.

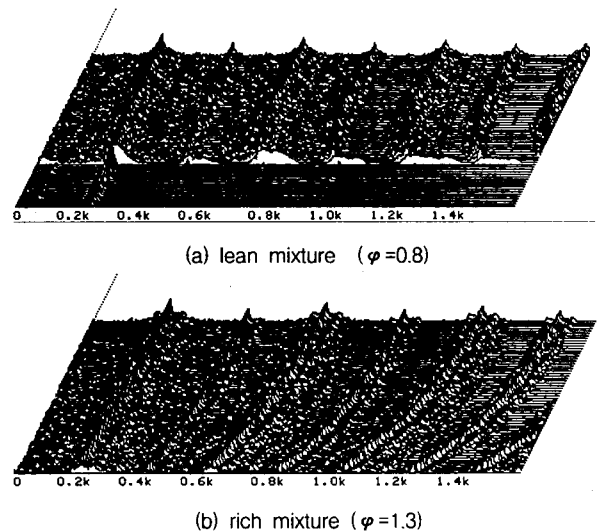


Fig. 5 Time history of pressure powerspectrum

이는 열 음향학적 불안정의 기본 조건인 계의 에너지 손실을 극복하기에 충분한 에너지의 필요성과 관련이 있다.<sup>(2)</sup> 즉, 회박 연소의 경우 열 방출이 작기 때문에 한 주기당 에너지의 순 증가분이 과농(rich)한 경우보다 작아서 공진을 일으킬 임계 에너지 수준에 도달하는 시간이 필요하기 때문이라고 사료된다. 또한 진동이 발생한 초기에 어느 정도의 열 에너지가 순간적으로 압력 섭동을 가진하는 방향으로 이동하여 온도의 감소가 이루어지고 다시 에너지의 축적으로 온도의 증가가 일어나는 것으로 보인다. 이와 같은 온도의 변화는 직접적으로 기본 주파수의 변화를 가져오게 되어 Fig. 5와 같은 변화 형태를 보여주게 된다. 또한 시스템의 온도가 과도하게 상승하였을 경우, 음향학적 모드의 변화가 발생하기도 한다.<sup>(13)</sup>

이와 같이, 혼합비나 시스템의 온도 변화에 따라 저주파 진동 형태가 변화하고 관내의 큰 온도 차이에 의한 온도 분포의 심한 비선형성으로 전체 관 내부의 압력 분포를 정확히 알 수 없으므로 적응 제어를 이용한 능동적 제어 방법을 사용하게 되었다.

#### 4. 능동 소음 제어 실험 장치

제어 실험 장치의 형태는 Fig. 6과 같다. 제어를 위한 제어 음원은 직경 6.5인치, 최대 출력이 200 W인 스피커를 고온 가스의 영향을 피하기 위해 연

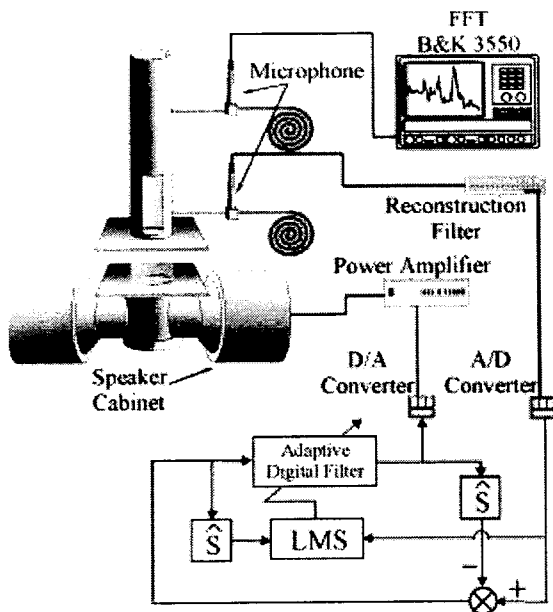


Fig. 6 Experimental setup

소기 열원의 아래 부분에 장착하여 사용하였다.

에러 신호의 샘플링 주파수는 2 kHz로 하였으며 anti-aliasing과 재구성을 위하여 저주파 필터인 IOtech의 Filter 488/8과 신호 조절기인 B&K NEXUS 2690 시스템을 사용하였다. 또한 이때의 차단 주파수는 500 Hz로 하였다.

적응 제어를 위한 실시간 신호 처리를 구현하기 위해 Texas Instruments사의 TMS320C25 칩을 장착한 DSP 보드를 사용하였다.

에러 신호의 측정에는 앞서 사용된 B&K 4134 마이크로폰을 이용하여 이루어졌다. 여기서 측정된 신호는 A/D 변환기를 거쳐 DSP 보드로 입력되며 적응 제어 필터를 통과하게 된다. 제어 신호는 D/A 변환기를 거쳐 파워 앰프로 공급되고 스피커를 통해 최종적으로 제어 음을 발생시키게 된다. 원래 적응 피드백 제어를 위해서는 마이크로폰이 하나면 충분하지만 제어 결과를 모니터하기 위하여 마이크로폰을 하나 더 사용하여 FFT에 연결하였다.

#### 5. 능동 소음 제어 결과 및 고찰

Filtered-X LMS 알고리즘을 이용하는 능동 제어에서는 오차 경로의 특성을 모델링해야 한다. 따라서 능동 소음 제어 실험에 앞서 적응 시스템 식별(adaptive system identification) 방법을 이용하여 오차 경로에 대한 모델링을 수행하였다.<sup>(14)</sup> 오차 경로를 실험 장치의 측면에서 보면 D/A 변환기, 재생 필터, 제어 스피커용 파워 앰프, 제어 스피커, 그리고 제어 스피커로부터 상쇄점, 상쇄점으로부터 오차 마이크로폰에 이르는 관의 음향학적 경로, 오차 마이크로폰, 마이크로폰 프리 앰프, anti-aliasing 필터, A/D 변환기를 포함한다. DSP에서 경로가 시작하므로 입력 신호는 DSP자체에서 랜덤 신호를 발생시

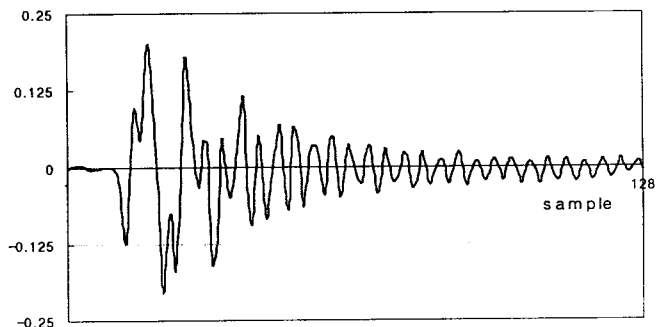


Fig. 7 Modelling of impulse response of error path

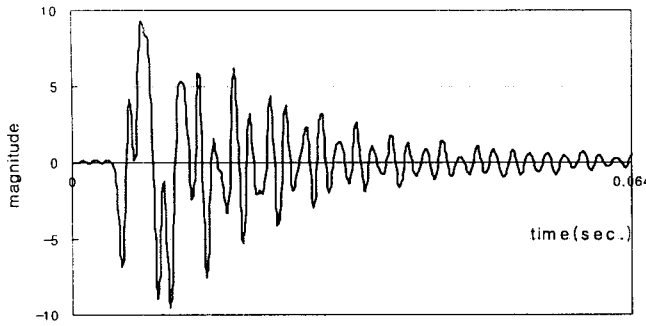


Fig. 8 Impulse response of error path

키는 프로그램을 작성하여 모델링 프로그램에 포함시켰다. 이렇게 결정된 필터 계수는 제어 프로그램에 고정된 값으로 입력된다. 이와 같은 시스템의 충격 응답 모델링의 정확성을 확인하기 위하여 임펄스를 직접 오차 경로에 입력한 후 그 반응을 측정, 비교해 보았다. Fig. 7은 모델링을 통해서 구한 오차 경로의 충격 응답이며 Fig. 8은 오차 경로의 실제 충격 응답을 나타내는 것으로 두 개의 그래프가 거의 일치하며 오차 경로의 모델링이 정확히 이루어지고 있음을 알 수 있다. 제어기의 설치를 마친 후 실제 연소가 존재할 경우의 실험에 앞서 제어기의 성능을 평가하고 입력 이득(input gain)의 적절한 조절을 통해 안정성을 확보하기 위한 목적으로 먼저 연소 없이 음장에 대한 제어만을 통해 관의 위쪽 개구부로 전파하는 음향파에 대한 능동 소음 제어의 실험을 실시하였다. 이 실험은 연소가 존재할 경우 발생하는 진동 현상을 모사하기 위하여 화염의 위치와 동일한 곳에 소음원으로 스피커를 설치하고 상온에서의 공진 주파수인 174 Hz와 연소가 있을 경우의 대표 주파수인 258 Hz의 정현파를 신호 발생기를 이용하여 약 140 dB로 가진한 후, 이를 제어하는 방법으로 수행되었다. 제어를 위하여 사용된 장치는 앞서 설명한 바와 같다. Fig. 9는 상온 174 Hz

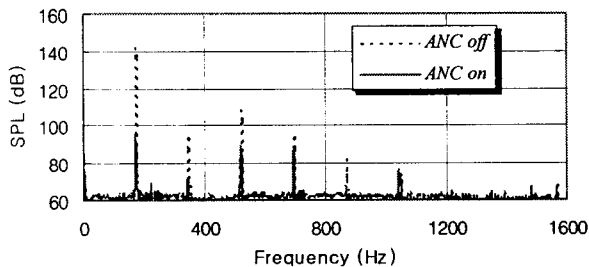


Fig. 9 Controller test at the resonant frequency of duct (normal temperature,  $f = 174$  Hz)

의 정현파 소음에 대한 제어 결과이다. 상온에서의 관의 1차 모드에 해당하는 174 Hz에서 약 50 dB 정도의 소음 저감을 얻을 수 있었다. Fig. 10은 258 Hz의 정현파 소음에 대한 소음 제어 실험 결과이다. 258 Hz에서의 최대 피크 값도 역시 약 50 dB 정도 감소하였음을 볼 수 있다. 이러한 결과들로부터 연소가 없을 경우의 제어에 있어서 본 제어기의 안정성과 적응성(adaptability)을 확인할 수 있었다. 하지만 이러한 모델링은 열원의 존재에 의한 비선형성을 모사할 수 없을 뿐만 아니라 음원 자체의 변화가 없기 때문에 이를 가지고 연소에 의한 열 음향 불안정의 제어가 되었다고 말할 수는 없다. 위와 같은 모사 실험 후, 실제 연소가 있을 경우에 대한 실험을 수행하였다. 실제 연소가 있을 경우는 앞서 본 바와 같이 음압의 크기가 크고 온도나 공급되는 혼합비의 변화에 따라서 주파수가 변화 형태가 다르므로 제어기의 출력이 충분히 크고 그 변화에 빠르게 적응하여야 한다. 모사 실험시 음원에서 가한 음압은 대략 140 dB 정도의 낮은 값이었으나 이를 150 dB 이상의 최대 출력이 가능하도록 가진부를 재설계, 스피커 콘에서 연소관까지의 거리를 대폭 줄이도록 하였으며 두 개의 동일한 스피커를 서로 마주보도록 장착하였다. 이론상 두 스피커의 위상이 정확히 일치할 경우 최대 3 dB의 압력 증가를 얻을 수 있으며 실제로 두 스피커간의 위상차는 Fig. 11과 같이 차단 주파수(cut-off frequency)인 500 Hz

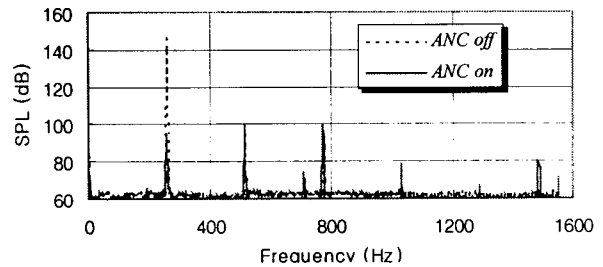


Fig. 10 Controller test at the arbitrary frequency (normal temperature,  $f = 258$  Hz)

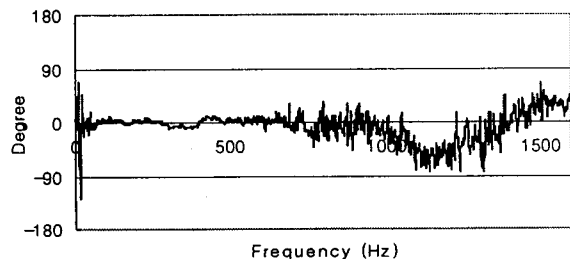


Fig. 11 Phase difference between two loudspeakers

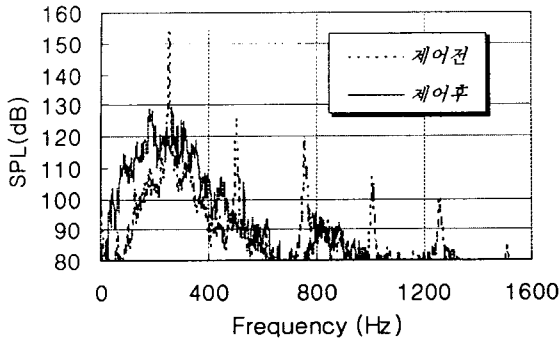


Fig. 12 Comparison of pressure powerspectrum (before and after control)

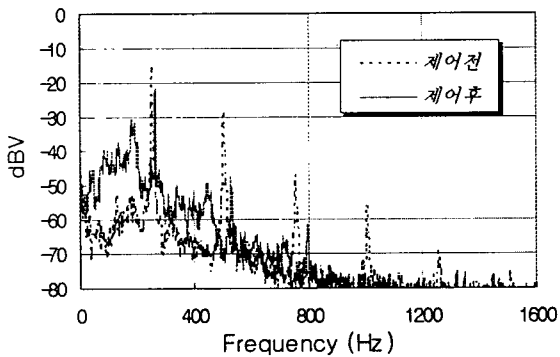


Fig. 13 Comparison of C2 emission powerspectrum (before and after control)

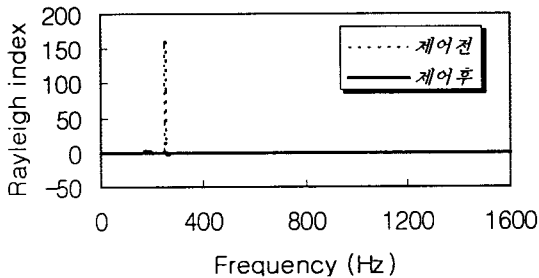


Fig. 14 Comparison of Rayleigh index (before and after control)

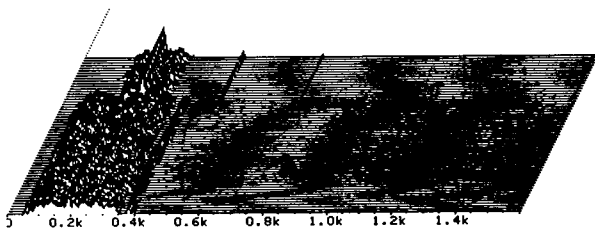


Fig. 15 Time history of pressure powerspectrum

미만의 영역에서는 거의 무시할 정도임을 확인하였다. 제어의 결과는 Fig. 12, Fig. 13과 같다. 제어의 결과 압력 섭동은 total SPL이 20~30 dB가량 저감되었다. 그 파워 스펙트럼 형태는 그림과 같이 기본 주파수의 피크 값이 완전히 깎여 나가고 대신 약간 광대역 성분이 증가한 형태를 띄고 있으며 다른 하모닉 성분들마저 줄어들어 광대역 소음의 형태와 가까워진 것을 확인 할 수 있다. 한편, 압력 섭동량의 저감에 비해 열량 섭동량의 크기는 그다지 줄지 않은 것을 확인할 수 있었다. 광확장을 통해 관측한 화염의 형태는 불안정성이 활발히 나타날 경우 화염의 진동 폭이 좁고 기본 주파수와 같은 값으로 진동하지만 제어가 이루어지면 화염 형태가 깨어지면서 매우 불규칙한 난류 화염의 꼴로 바뀐다. 이는 제어에 의한 기본 주파수 피크의 소멸로 주파수 특성이 난류 연소의 광대역 소음 특성 형태와 같이 변화한 것에 기인하며 연소 불안정과 압력-열방출간의 상호 관련(coupling)이 해소되었음을 뜻하게 된다. 이러한 결론은 Fig. 14의 화염 영역에서의 Rayleigh index 측정 결과를 보면 더 명확하게 알 수 있다. 제어 전에 보이는 강한 불안정성은 제어 후에 있어서 거의 찾아 볼 수 없게 되며 압력 섭동과 열량 섭동간의 상호 관련도 떨어지게 된다. 따라서 제어가 되고 있는 압력 신호와는 달리 비정상 열량 방출은 어느 정도 계속 이루어지게 되어 Fig. 13과 같이 열량 섭동량의 감소가 크지 않은 것으로 보인다. 물론 제어 후에도 Rayleigh index값은 작지만 양수이므로 매우 약한 연소 불안정 상태를 보이며 기본 주파수와 하모닉 영역이 강조된 미약한 이산형의 스펙트럼을 보이는 것을 확인할 수 있다.

위의 Fig. 15는 제어 도중 제어기를 꺾을 경우의 거동을 보여주는 파워스펙트럼 변화 형태이다. 제어가 이루어지는 상태에서의 변화 형태는 비교적 일정하게 나타나고 있으며 제어기를 끄자 다시 원래의 강한 소음을 방출하는 형태로 돌아간다. 이를 통하여 열 음향학적 진동이 본 제어기에 의해 안정적으로 제어되고 있음을 확인할 수 있었다.

## 6. 결 론

공명관 형태의 연소기에서 열 음향학적 진동 현상에 의한 저주파의 소음 특성을 이해하기 위한 실험을 수행하였고 이를 제어하기 위해 능동 소음 제어 기법을 도입하여 제어기를 구성하였다. 이 제어기는 Filterd-X LMS 알고리즘을 이용한 적응 피드백

제어기로 연소가 있을 경우 발생할 수 있는 고온의 환경으로부터 스피커를 보호할 수 있는 방법이다. 이 제어기의 안정성을 확보하고 제어 이득을 조절하기 위하여 먼저 연소가 없는 상온 상태에서 능동 소음 제어 실험을 수행하였다. 그 결과 174 Hz와 258 Hz 정현파에 대해 약 50 dB 정도의 소음을 감소시킬 수 있었다. 다음으로 실제 연소가 있을 경우 발생하는 열 음향 진동에 대한 제어 실험을 수행하였다. 이 결과 열 음향학적 피드백 현상이 억제되어 압력 섭동값이 20~30 dB 정도 저감되었다. 또한 비교적 큰 내부 압력에도 불구하고 제어기가 안정적이고 좋은 성능을 나타내는 것을 확인하였다.

### 후 기

본 연구는 한국과학재단의 연구비 지원(1995년 목적 기초 95-0200-07-03-3)으로 수행되었으며 이에 동 재단 관계자에게 감사드린다.

### 참 고 문 헌

- (1) Candel, S. M., 1992, "Combustion Instabilities Coupled by Pressure Waves and Their Active Control," 24th Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, pp. 1277~1296.
- (2) Cho, S., Kim, J., Lee, S., 1998, "Characteristics of Thermoacoustic Oscillation in a Ducted Flame Burner," AIAA Paper No. 98-0473.
- (3) Ffowcs-Williams, J., E., 1984, "Anti-Sound (review lecture)", Proceedings of the Royal Society A395, pp. 63~88.
- (4) Poinso, T. H., Trouve, A. C., Veynante, D. P., Candel S. M. and Esposito, E. J., 1987, "Vortex Driven Acoustically Coupled Combustion Instabilities," Journal Fluid Mechanics, Vol. 177, pp. 265~292.
- (5) McManus, K. R., Vandsburger, U., and Bowman, C. T., 1990, "Combustion Performance Enhancement Through Direct Shear Layer Excitation," Combustion and Flame, 82, pp. 75~92.
- (6) Zinn, B. T., 1989, "Pulsating Combustion," Mechanical Engineering, August, pp 36~41.
- (7) Nelson, P., J., and Elliott, S., J., 1992, "Active Control of Sound," Academic Press.
- (8) Kuo, S. M., and Morgan, D. R., 1996, "Active Noise Control Systems - Algorithms and DSP Implementations," John Wiley & Sons.
- (9) Kuo, S. M., and Vijayan, D., 1994, "Adaptive Algorithms and Experimental Verification of Feedback Active Noise Control Systems," Noise Control Eng. J., 42(2), pp. 37~46.
- (10) Widrow, B., and Stearns, S. D., 1985, "Adaptive Signal Processing," Prentice Hall.
- (11) Shivashankara, B. N., Strahle, W. C., and Hardley, J. C., 1975, "Evaluation of Combustion Noise Scaling Laws by an Optical Technique," AIAA journal, Vol. 13.
- (12) Hurler, I. R., Price, R. B., Sugden, T. M., and Thomas, A., 1968, "Sound Emission from Open Turbulent Premixed Flame," Proceedings of Royal Society of London. A303, pp. 409~427.
- (13) 조상연, 이수갑, 1997, "관형 연소기의 열 음향학적 특성에 관한 실험적 연구," 한국소음진동공학회지 제 7 권 제 6 호, pp. 985~991.
- (14) Ljung, L., 1987, "System Identification : Theory for the User," Prentice Hall.