

원통형 연소기에서의 열-덕트 연성 소음의 능동 제어 연구

°조상연*, 이용석**, 엄승신*, 이수갑***

Active Control Method of Heat-Duct Coupled Noise in a Cylindrical Combustor

Sangyeon Cho, Yongseok Lee, Seungsin Eom and Soogab Lee

ABSTRACT

Combustion instability by thermoacoustic feedback incite strong low frequency noise and vibration which damage the system and provoke the environmental problems. Therefore, it is necessary to control the thermoacoustic oscillation. In the way of controlling the instability, active control method using adaptive algorithm is applied. In this study, active noise control method using anti-sound technique is selected, whose principle is cancelling the noise with the addition of opposite phase sound. At first, simulation is performed to confirm the stability of controller, and after that control of combustion instability is carried out to get cancellation of 20~30dB SPL.

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 상호 작용에 의한 열 음향학적 피드백(thermoacoustic feedback) 현상이 발생될 수 있으며 이 경우 강한 음향학적 진동(oscillation)을 야기하게 되어 그 결과 저주파의 큰 진동과 소음을 유발하게 된다. 특히 그 강도가 강할 경우, 항공기의 후방 연소기나 로켓 등에 있어서는 구조적 손상이 발생할 수도 있고 환경 소음 측면에 있어서도 심각한 문제를 야기할 수 있으므로 이의 제어가 필요하다.¹ 따라서 이러한 문제를 이해하기 위한 과정의 일환으로 열 음향 간섭에 의한 불안정을 모사할 수 있는 모델 연소기를 제작하고, 이를 이용한 연구가 수행되었으며 예혼합 화염을 갖는 관형의 연소기에 있어서 여러 가지 변수들의 특성들을 살펴본 바 있다. 이러한 연구를

통하여, 관형 연소기에서의 저주파 진동과 그 변화를 확인하였다.² 이와 같은 연소기에서의 제어에 있어서 흡음 처리와 같은 수동적 방법은 저주파 영역에서 그리 효과를 발휘하지 못하므로 이에 본 연구에서는 저주파 대역에서 효과적인 능동 제어(active control) 기법을 도입하게 되었다. 능동 제어란 연소실 내의 음향 모드를 센서로 측정 후 적절한 제어 알고리즘을 이용하여 물리적 기구를 구동시켜 소음을 제어한다는 개념이다. 본 연구에서는 역음향(anti-sound) 방식에 의한 능동 소음 제어(active noise control) 방법을 채택하였다. 이는 마이크로폰을 사용해 음향파를 측정하고 스피커를 통해 위상이 반대인 음을 방출함으로써 소음을 제거하는 것을 기본 원리로 한다.³

능동 제어 알고리즘으로는 적응 제어 방법(adaptive control)의 하나인 LMS(least mean square)방법이 주로 이용되고 있다.

우선 연소가 없는 상태에서 제어기의 성능 특성을 알아보고 제어기의 이득(gain)을 조절하여 안정적인 제어 시스템을 만들기 위한 목적으로 2차 음원을 관내에 삽입한 모사 실험(simulation)을 실시하였으며 이에 이어서 실제로 연소가 있는 상태에서의 제어를 수행하였다. 제어 방법으

* 서울대학교 대학원 항공우주공학과

** 현대자동차

*** 서울대학교 항공우주공학과

로는 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 존재할 때 관의 기본 진동수와 같은 tone의 진동수로 관이 공진을 일으키게 된다.

국부적인 열 방출 섭동(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, 시스템 내부에 계속적으로 에너지의 증가가 발생, 음향학적 진동이 증폭된다. 이를 'Rayleigh의 기준(Rayleigh's criterion)' 이라고 부르며 열 음향학적 불안정성을 판별하는 기준이 된다.⁴ 이 Rayleigh의 기준을 식으로 나타내면

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

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

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

이때 $G(x)$ 를 Rayleigh Index라고 부르며 시스템의 열 음향 불안정성을 평가하는 척도로 사용되고 있다. 또한 그 크기는 이를 구성하는 두 개의 변수인 p' 과 q' 간의 상호 관련(coupling)의 정도를 나타내는 값으로 사용되고 있다.⁵

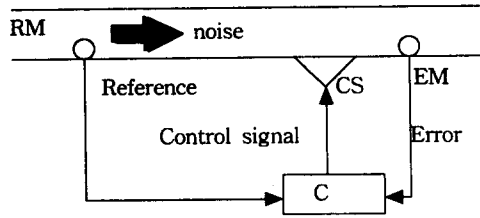
이러한 열 음향학적 진동 현상은 관내에 유동과 열 전달이 존재하는 매우 넓은 영역의 연소기에 있어서 발생되고 있으며 그 형상과 유동 특성의 차이에 의해 각각을 정확히 표현하는 이론을 세우기는 어렵지만 기본적으로는 Rayleigh의 기준에 의해 지배된다고 할 수 있다. 따라서 이러한 Rayleigh의 기준을 이해하고 연구할 필요에서 열 음향학적 진동 현상의 가장 전형적인 장치인 Rijke형의 연소기를 이용한 실험을 수행하였다.

Rijke형의 연소기는 양단이 개방된 관으로 하반부에 열원이 위치하고 있으며 관내에 상방의 유동이 존재할 때 열 음향학적 되먹임에 의해 공진이 일어나는 장치이다.⁶

2.2 능동 제어 기법 (Active Control Method)

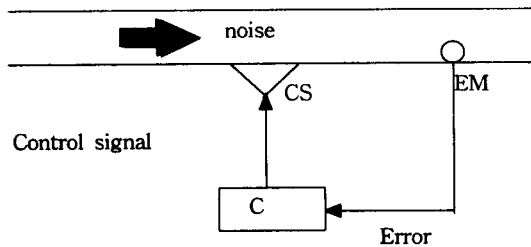
능동 제어 방법은 음장에서 발생하는 음압의 변화를 참조 마이크로폰(reference microphone)으로 측정하여 이를 제어기에 통과시킨 뒤 2차 음원인 스피커를 통해 반대 위상의 음파를 방출하여 중첩시킴으로써 2차 음원 이후의 영역에서 음압을 최소로 만드는 방식을 취한다.⁷ 이 방법은 높은 주파수의 음에 대해서는 위상을 맞추기 어려워 그 효과가 크지 않다는 한계를 가지고 있다. [그림 1]은 1차원 관에서의 능동 소음 제어에 널리 이용되는 적응 피드포워드 제어(adaptive feedforward control)의 개략도이다. 적응 피드포워드 제어는 복잡한 신호에서도 제어가 가능하지만 제어기로부터의 음향학적 피드백(acoustic feedback) 현상을 없애주어야 하고 인과 조건(causality condition)을 만족시켜야 하는 등 복잡한 제한 조건이 따르게 된다. 또한 열 음향학적 진동과 같이 음장이 연소에 의해 고온의 환경이 되었을 경우에는 위와 같은 형태로 시스템을 구축하기가 매우 어렵고 스피커가 마이크로폰 사이에 있어야 하므로 고온에 노출된다는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 [그림 2]와 같이 스피커의 위치를 후방으로 돌리고 마이크로폰을 한 개만 사용하는 적응 피드백 제어(adaptive feedback control)를 채택하였다. 이로 인해 제어 스피커를 고온의 연소 가스로부터 보호할 수 있다. 참조 신호는 Kuo등이 제안한 선형 예측(linear prediction) 방법을 통해 구성하였다.⁸

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 최소화(minimize)하면서 오차 경로에 의한 에러 신호의 위상 및 크기 변화를 보상할 수 있는 Filtered-X LMS 알고리즘을 적용하였다. 실제 시스템은 제어 신호가 발생하는 부분으로부터 에러 신호를 얻는 과정에서 경로차가 발생하며 이를 오차 경로(error path)라 한다.



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

[그림 1] 적응 피드포워드 제어의 원리



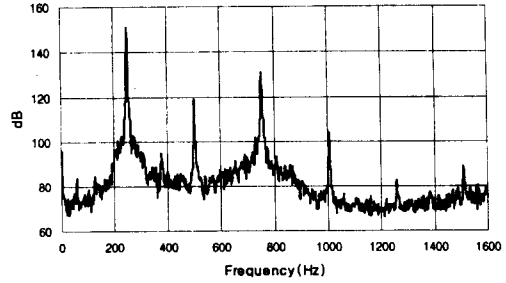
EM : Error microphone
 CS : Control speaker
 C : Adaptive filter(controller)

[그림 2] 적응 피드백 제어의 원리

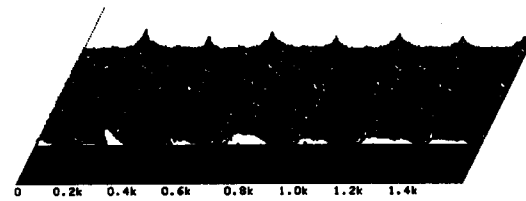
Filtered-X LMS 알고리즘은 오차 경로의 충격 응답(impulse response) 특성을 모델링 하여 사용한다.

3. 연소에 의한 불안정성의 측정

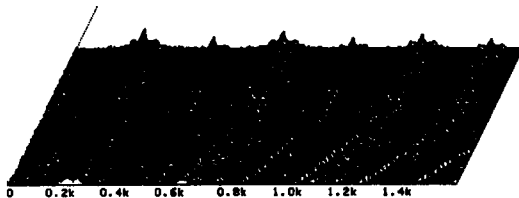
실험에 사용된 연소기는 Rijke형의 버너로 길이 1m, 직경 60mm의 관을 이용하였으며 관의 하부로부터 약 1/4지점에 예혼합 화염이 전단면에 걸쳐서 안정되도록 하였다. 연소기의 하부에는 부피 60ℓ의 분리기(decoupler)를 설치하여 연료의 충분한 혼합이 가능하게 하였으며 직선 유도관(straightener)으로 가는 스테인레스 관(stainless pipe)들을 연결하여 사용하였다. 화염이 위치하는 지점에 석영창(quartz pipe)을 사용하여 광학창으로 사용할 수 있도록 하였다. 공기



[그림 3] Rijke형 연소기에서의 소음의 스펙트럼



(a) lean mixture ($\phi=0.8$)



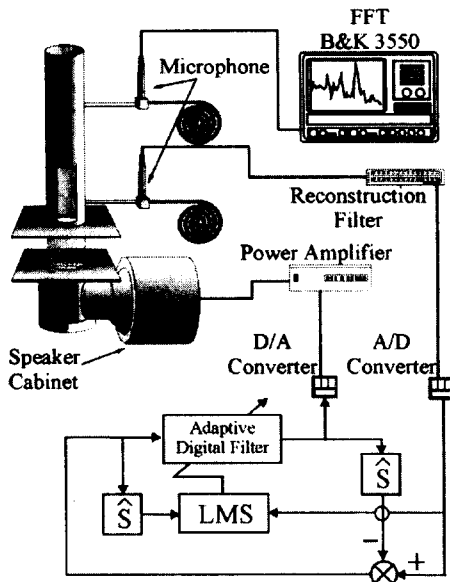
(b) rich mixture ($\phi=1.3$)

[그림 4] 시간에 따른 스펙트럼의 변화형태

의 유동 속도는 입구에서의 Reynolds수가 10000 이하인 영역을 선택하였다. 연료로 사용된 프로판은 로타메터식 유량계를 이용하여 조절되며 분리기(decoupler) 이전에서 혼합된다.

본 연구에서는 혼합비나 유량과 같은 다른 입력 변수들에 의한 연소기의 내부 압력값을 측정하여 영향을 살펴보았다. 측정은 관의 1/2 지점에 측정용 포트를 설치하여 측정하였다. 이때 사용한 센서는 B&K의 콘덴서형 4134 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.

그 결과로서 측정되는 전형적인 파워 스펙트럼 형태는 [그림 3]과 같다. 이때 기본 주파수(fundamental frequency)는 대략 200~230Hz이고 그 크기는 150dB~160dB의 매우 큰 압력값을 나



[그림 5] 제어 실험 장치

타낸다. 이러한 공진 현상이 일어날 경우 화염이 심하게 떨리며 매우 강한 소음과 진동을 주위에 전달한다. 위의 결과를 통해서 열 음향학적 불안정에 의한 소음은 비교적 낮은 주파수의 음향 진동이 지배적임을 알 수 있었다.

[그림 4]는 시간에 따른 압력값의 파워스펙트럼 변화 형태를 나타낸 것이다. 기본 주파수는 음속 즉, 온도의 함수이므로 시간에 따른 온도 변화에 따라 변화가 발생하는 것을 볼 수 있다. 이때 회박 연소의 경우, 진동(oscillation)이 생성되는 온도가 과농 연소의 경우보다 훨씬 높게 나타나며 진동이 생성된 후에 온도가 잠시 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 열 음향학적 불안정의 기본 조건인 계의 에너지 손실을 극복하기에 충분한 에너지의 필요성과 관련이 있다.² 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 열에너지가 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 [그림 4]와 같은 변화 형태를 보여주게 된다.

결국, 혼합비나 시스템의 온도 변화에 따른 저주파 진동 형태의 변화와 관내의 큰 온도 차이에 의한 온도 분포의 심한 비선형성으로 전체 관내부의 압력 분포를 정확히 알 수 없으므로 능동적 제어 방법, 그 중에서도 적응 제어의 방법을 사용하게 되었다.

4. 능동 소음 제어 실험 장치

제어 실험 장치의 형태는 [그림 5]와 같다. 제어를 위한 제어 음원은 직경 6.5인치, 최대 출력이 200W인 스피커를 연소기 열원의 아랫 부분에 장착하여 사용하였다. 이 위치에서는 연소가 일어나더라도 고온 가스의 영향을 피할 수 있다.

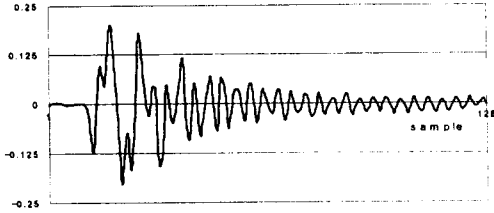
에러 신호의 샘플링 주파수는 2kHz로 하였으며 anti-aliasing과 reconstruction을 위하여 저주파 필터인 IOtech의 Filter488/8과 신호 조절기인 B&K NEXUS 2690 시스템을 사용하였다. 또한 이때의 차단 주파수는 500Hz로 하였다.

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

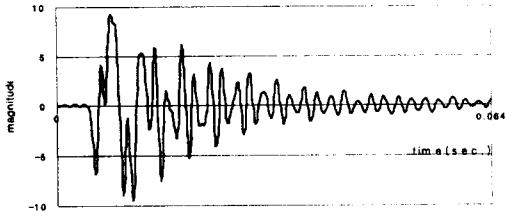
에러 신호의 측정에는 앞서 사용된 B&K 4134 마이크로폰을 이용하여 이루어졌다. 여기서 측정된 신호는 A/D 변환기를 거쳐 DSP 보드로 입력되며 적응 제어 필터를 통과하게 된다. 여기서 발생된 제어 신호는 D/A 변환기를 거쳐 파워 앰프로 공급되고 스피커를 통해 최종적으로 제어음을 발생시키게 된다. 원래 적응 피드백 제어를 위해서는 마이크로폰이 하나면 충분하지만 제어 결과를 모니터하기 위하여 마이크로폰을 하나 더 사용하여 FFT에 연결하였다.

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.⁹ [그림 6]은 모델링을 통해서 구한 오차 경로의 충격 응답이며 [그림 7]은 오차 경로에 실제 충격 응답을 나타내는 것으로 두 개의 그래프가 거의 일



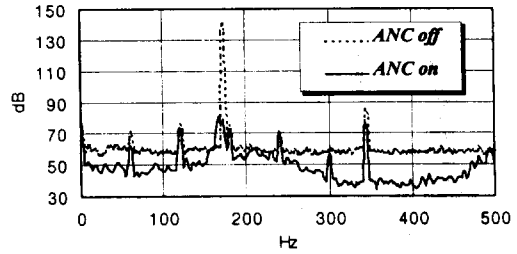
[그림 6] 오차 경로의 충격 응답 모델링 결과



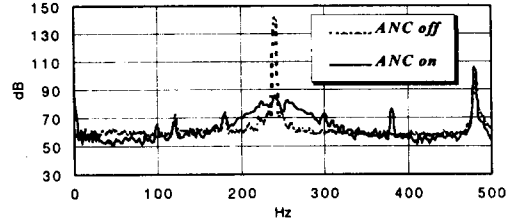
[그림 7] 오차 경로의 실제 충격응답 측정 결과

치함을 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 174Hz와 연소가 있을 경우의 대표 주파수인 230Hz의 정현파를 신호 발생기를 이용하여 가진 후, 이를 제어하는 방법으로 수행되었다. [그림 8]은 상온 174Hz의 정현파 소음에 대한 제어 결과이다. 이때 음향 진동에서 지배적인 1차 모드의 제어 결과가 중요하므로 이에 중점을 두었다. 상온에서의 관의 1차 모드에 해당하는 174Hz에서 약 62dB 정도의 소음 저감을 얻을 수 있었다. [그림 9]는 230Hz의 정현파 소음에 대한 소음 제어 실험 결과이다. 230Hz에서의 최대 피크값이 약 56dB 정도 감소하였음을 볼 수 있다. 이러한 결과들로부터 연소가 없을 경우의 제어에 있어서 적용 피드백 제어의 방법의 안정성과 적응성(adaptibility)을 확인할 수 있었다.

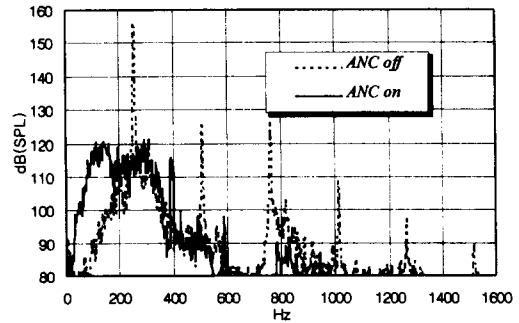
위와 같은 모사 실험후, 실제 연소가 있는 경우에 대한 실험을 수행하였다. 실제 연소가 있을 경우는 앞서 본 바와 같이 음압의 크기가 크고 온도가 공급되는 혼합비의 변화에 따라서 주파수



[그림 8] 관의 공진 주파수에 대한 제어 결과 (상온, $f = 174\text{Hz}$)

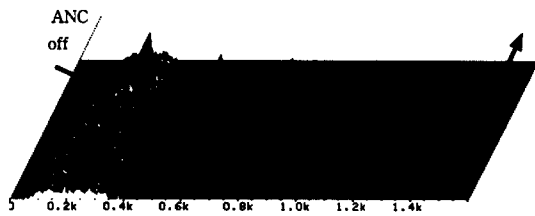


[그림 9] 입의 정현파 신호에 대한 제어 결과 (상온, $f = 230\text{Hz}$)



[그림 10] 연소 불안정 상태에서의 제어 결과

가 변화하므로 제어기의 출력이 충분히 크고 그 변화에 빠르게 적응하여야 한다. 모사 실험시 음원에서 가한 음압은 대략 140dB 정도의 낮은 값이었으나 이를 150dB 이상의 최대 출력이 가능하도록 가진부를 재설계하여 두 개의 동일한 스피커를 사용하도록 하였다 이 경우 이론상 두 스피커의 위상이 정확히 일치할 경우 최대 6dB의 압력 증가를 얻을 수 있게 되며 실제로도 무난한 출력을 얻을 수 있었다. 그 결과는 [그림 10]과 같다. 제어의 결과, 기본 주파수의 값은 151dB에서 117.5dB로 약 34dB가량 떨어졌고 전체 음압도(SPL)의 값도 152dB에서 132.7dB로 약 20dB가량 저감되었다. 제어 후의 파워 스펙트럼의 형태는 그림과 같이 기본 주파수의 피크값이 완전히



[그림 11] 시간에 따른 파워스펙트럼 변화

작어 나가고 대신 약간 광대역 성분이 증가한 형태를 띄고 있으며 전체적인 주파수 대역이 아래 쪽으로 이동하여 두 번째와 세 번째의 하모닉 성분 마저 줄어든 것을 확인 할 수 있다. 위의 [그림 11]은 시간에 따른 파워스펙트럼의 변화 형태이다. 제어가 이루어지는 상태에서의 변화 형태는 비교적 일정하게 나타나고 있으며 제어를 끄자 다시 원래의 강한 소음을 방출하는 형태로 돌아간다. 이를 통하여 열 음향학적 진동이 본 제어기에 의해 안정적으로 제어되고 있음을 확인할 수 있다.

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 Filtered-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 174Hz와 230Hz 정현파에 대해 약 50~60dB 정도의 소음을 감소시킬 수 있었다. 다음으로 연소가 있을 경우 발생하는 열 음향 진동에 대한 제어 실험을 수행하였다. 이 결과 비교적 큰 내부 압력과 지속적으로 주파수가 변화하는 악조건에도 불구하고 제어기가 안정적이고 좋은 성능을 나타내는 것을 확인하였다.

7. 후 기

본 연구는 한국과학재단의 연구비 지원(1995년

목적 기초 95-0200-07-03-3)으로 수행되었으며 이에 동 재단 관계자에게 감사드린다.

8. 참고 문헌

- 1 Candel, S. M., Combustion Instabilities coupled by Pressure Waves and their Active Control, *24th Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, pp. 1277-1296, 1992.
- 2 Cho, S., Kim, J., Lee, S., "Characteristics of Thermoacoustic Oscillation in a Ducted Flame Burner," AIAA Paper No. 98-0473, 1998.
- 3 Ffowcs-Williams, J., E., "Anti-Sound (review lecture)", *Proceedings of the Royal Society A395*, pp. 63-88, 1984.
- 4 Poinso, T. H., Trouve, A. C., Veynante, D. P., Candel S. M. and Esposito, E. J., "Vortex Driven Acoustically Coupled Combustion Instabilities," *Journal Fluid Mechanics*, Vol. 177, pp.265-292, 1987.
- 5 Mcmanus, K. R., Vandsburger, U., and Bowman, C. T., Combustion Performance Enhancement Through Direct Shear Layer Excitation, *Combustion and Flame*, 82, pp.75-92, 1990.
- 6 Zinn, B. T., "Pulsating Combustion," *Mechanical Engineering*, August, pp 36 - 41, 1989.
Bloxsidge, G. J., Reheat Buzz. An Acoustically Driven Combustion Instability, Ph. D Thesis, Cambridge University, Cambridge, England, 1987.
- 7 Nelson, P., J., and Elliott, S., J., "Active Control of Sound", Academic Press, 1992.
- 8 Kuo, S., M. and Vijayan, D., "Adaptive algorithms and experimental verification of feedback active noise control systems", *Noise control Eng. J.*, 42(2), pp. 37-46, 1994
- 9 Widrow, B., and Stearns, S. D., "Adaptive Signal Processing", Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1985.