

DSP를 이용한 연소불안정 능동 제어장치 설계

박익수* · 박주원** · 최호진* · 황용석* · 진유인*** · 윤현걸*

Design of active combustion control system using DSP

Iksoo Park* · Joowon Park** · Hojin Choi* · Yongseok Hwang* · Yoojin Jin*** · Hyungull Yoon*

ABSTRACT

Digital control system for active combustion control of lab-scale combustor equipped with secondary fuel injection is designed. Controllability with adaptive law is revealed with the Cambridge Combustor model and the requirement for control system is derived. The input and output requirements of frequency estimator and fuel supply actuator for the adaptive control law is verified with cold tests. The system can be used as digital based active combustion controller having 150Hz combustion instability.

초 록

2차 연료 분사장치를 이용한 연구용 연소기의 연소불안정 능동 제어장치를 설계하였다. Cambridge Combustor 모델을 이용하여 제어 가능성을 보였고, 적용한 적응제어 알고리즘에 대한 제어장치의 요구조건을 도출하였다. 적응제어 법칙을 구현하기 위하여 주파수 추정기가 가져야 할 성능과 연료제어 밸브의 주파수 대역에 대하여 제어장치를 이용하여 실험적으로 검증하였다. 시험 결과 대역폭 150Hz 이하의 연소 불안정 모드에 대하여 귀환제어 방식의 연소불안정 능동제어기로 사용 가능성을 보였다.

Key Words: Combustion Instability(연소 불안정), Active Combustion Control(능동 연소제어), Adaptive Control(적응제어), 주파수 추정기(Frequency Estimator), Digital Controller(디지털 제어기)

1. 서 론

가스터빈 엔진 및 램제트 엔진은 연료가 희박한 영역에서 작동할 수 있도록 설계하여 NOx의

배출 감소 및 높은 연소 효율을 얻기 위한 노력을 해왔다.[1] 과거에는 이러한 연소 조건에서 상대적으로 발생할 가능성이 큰 불안정한 연소 현상을 제거하기 위하여 엔진 형상 변경에 의한 설계가 시도되었고, 현실적으로 가장 널리 사용되는 방법이었다. 하지만 보다 광범위한 엔진의 작동 요구에 따라 형상 설계에 의한 불안정 연소 현상의 제거는 그 한계에 도달했으며 능동제

* 국방과학연구소 1-5-2

** (주) 서원무인기술

*** 과학기술연합대학원

연락처, E-mail: gaunst@hanmail.net

어의 필요성이 차츰 제기되기 시작하였다.[1][2]

과거의 연소 불안정 능동제어 기법에 대해서는 실험실 수준의 많은 연구가 진행되었고, 이러한 연구는 연소 불안정 현상을 밝히거나, 불안정 특성 모델링 및 불안정 제어에 대한 적당한 제어 수단을 찾는 문제가 주된 관심분야였다. 1999년 이후로부터 능동제어에 관한 성공적인 연구 결과가 보고되기 시작하면서 구현 가능한 기술 분야로 인식되어 왔다.[1] 지금까지 연구된 능동제어 기법은 위상전이 제어, 모델 기반 제어, 관측기 기반제어, 시스템 식별법에 의한 모델 기반 제어, 비 귀환제어로 크게 나눌 수 있다.[3]

본 연구에서는 연구용으로 제작된 연소기의 불안정 연소를 제어하기 위하여, Cambridge Combustor 모델을 이용하여 적응 제어기를 설계하고 제어 가능함을 보였다.[4] 제시된 제어모델을 DSP(Digital Signal Processor) 기반의 제어장치를 통해 구현하기 위하여 제어장치의 요구조건을 도출하였고, 설계한 제어 알고리즘을 탑재하여 입출력 시험을 수행하였다. 시험 결과 150Hz 이하의 주파수 대역폭을 가지는 불안정 모드에 대한 제어 가능성을 보였다.

2. 제어장치 요구조건

2.1 연소 불안정 모델

제어 가능성 판단을 위해 선정한 Cambridge combustor 모델은 시스템 식별법을 통해 획득한 모델로, 133, 205Hz의 불안정 주파수를 가지고 있다.[5] 이 모델을 이용하여 시뮬레이션을 수행한 연소 압력은 Fig. 1과 같다.

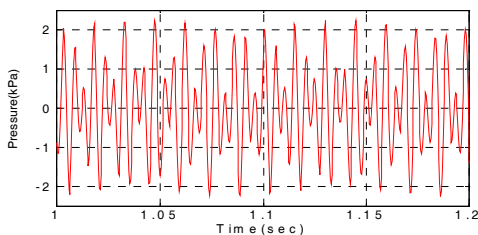


Fig. 1 Pressure Response of Cambridge Combustor

시뮬레이션 한 결과에 대한 스펙트럼을 구하면 Fig. 2와 같이 133, 205Hz의 두 가지 모드를 가지는 주파수 특성을 관측할 수 있다.

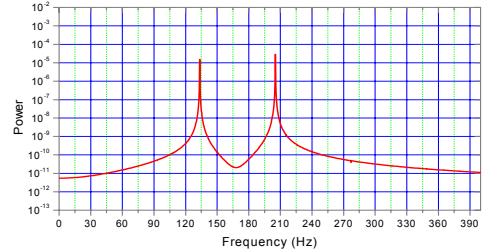


Fig. 2 Power Spectrum of Combustion Pressure

2.2 제어 법칙

불안정 제어기는 참고문헌 [5]에서 제시한 방법과 같이, 주파수 추정자와 적응제어기로 구성되어 있다. 제어기 구조는 주파수 추정기에 의한 불안정 주파수를 추정하고, 이 주파수를 이용하여 2차 연료의 시간지연 값이 Rayleigh Criteria를 만족시키도록 하는 적응 제어기로 구성되어 있다.

주파수 추정자는 STDFT(Short Time Discrete Fourier Transform)를 이용하여 관심영역의 주파수를 추정하는데, 1kHz의 샘플 시간과 1000개의 데이터를 윈도우 크기로 하여 추정한 결과 Fig. 3과 같이 0.1초 이내에 추정을 완료하는 결과를 보였다.

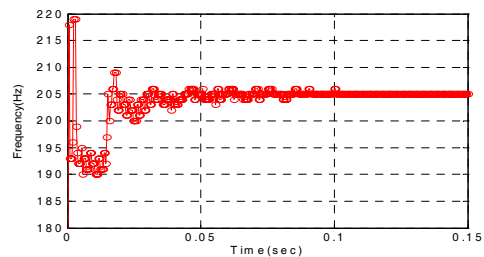


Fig. 3 Frequency Estimation of Dominant Frequency

추정한 205Hz의 주파수를 이용하여 1초간 최적의 지연시간을 찾아내고, 1.3초 이후부터 성공적으로 불안정 압력파를 감쇄시킨 결과는 Fig. 4와 같다. 205Hz에서의 불안정 연소 압력파에 대

한 능동제어를 수행하여 133Hz 대역의 압력과는 여전히 남아 있음을 알 수 있다.

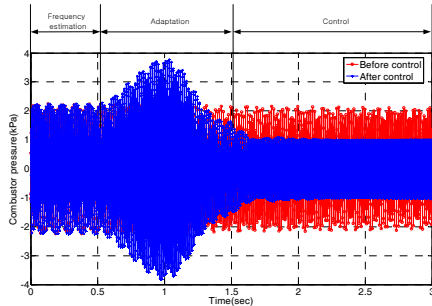


Fig. 4 Pressure response with adaptive control

2.3 제어장치 주요 요구조건

시뮬레이션을 통하여 제어 가능한 적응제어기를 디지털 제어장치를 이용하여 구현하는데 있어서의 문제점과 요구조건은 다음과 같다.

제안된 제어법칙을 구현하기 위한 가장 큰 문제점은 주파수 추정 정확도와 2차 연료의 응답 특성이라고 할 수 있다. 먼저 주파수 추정 정확도는 입출력 신호의 처리 속도에 따른 데이터 측정 주기와 처리해야 할 데이터의 크기 선정에 관한 문제로 요약할 수 있다.

Nyquist 이론에 따르면 관심 주파수 보다 2배 이상의 빠른 측정 주파수를 가져야 하는데, 주파수 추정 오차가 적응제어를 수행하는 동안 제어 입력의 위상변화로 나타나는 문제가 있기 때문이다. 데이터의 크기는 주파수 분해능과 반비례 관계에 있으므로 처리 속도를 고려하여 가능하면 큰 데이터를 선정해야 하는데 1kHz 측정 주기에 대하여 데이터의 크기를 변화시켜 가며 시뮬레이션 한 결과는 Fig. 5와 같다.

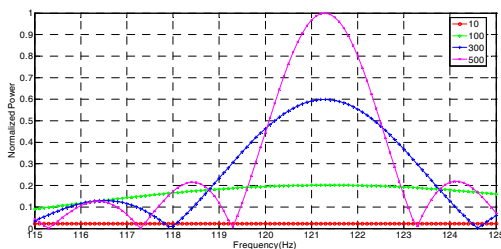


Fig. 5 Estimation Results about Data Number

시뮬레이션 결과 120Hz 주파수 대역에서 추정 정확도 0.1Hz를 얻기 위해서는 1kHz의 측정주기일 경우 500개 이상의 데이터를 획득해야 함을 알 수 있다. 따라서 주파수 측정기는 1msec 이내에 데이터를 측정하고, 500개 이상의 데이터를 이용하여 주파수 추정을 완료해야 하는 요구조건을 가진다.

3. 제어장치 설계

3.1 제어 구동장치

연소시험을 통하여 획득한 불안정 모드 60, 120Hz 대역에 대하여 충분한 2차 연소 에너지와 주파수 대역을 가진 연료 공급 밸브를 선정해야 하는데 선정할 펄스밸브의 특성은 Table 1과 같다.

Table 1. Specification of Fuel Supply Valve

항 목	특 성	비 고
제 품 명	9S1-A1-P1-9B06	PARKER
타 입	PULSE VALVE	
구동전원	28V PWM	
대 역 폭	250Hz	

3.2 제어 센서

불안정 제어를 위한 압력센서의 선정은 압력의 정확도 보다 특정 주파수의 대역폭을 충분히 전달할 수 있는 Full Bridge Type 압력센서를 사용하였다. 사용한 압력센서의 제원은 Table 2와 같다.

Table 2. Specification of Pressure Sensor

항 목	특 성	비 고
제 품 명	G830	Dynisco
센서 타입	Full bridge	
측정 정확도	0.5%	
작동 온도	Max. 120°C	
대 역 폭	수백 Khz 이상	

3.3 디지털 제어장치

디지털 제어장치는 TMS320F2812 DSP를 장착

하여 압력 1채널 측정과 펄스밸브 1채널을 구동할 수 있도록 Fig. 6과 같이 구성하였다. 디지털 제어 보드는 별도의 관리 컴퓨터와 488통신을 통하여 시험 통제 및 데이터 송수신이 가능하도록 하였다.



Fig. 6 디지털 제어보드 형상

사용한 DSP는 부동소수점 연산을 제공하지만, 주파수 추정 속도를 높이기 위하여 TI사에서 제공하는 IQ math library를 사용하여 추정 속도를 높였고 1kHz의 추정 성능을 보였다.

4. 제어장치 성능시험

4.1 주파수 추정기

디지털 제어보드의 주파수 추정 성능을 확인하기 위하여 연소시험을 통하여 추정한 결과, Fig. 7과 같은 연소 압력(위)에 대하여 0.1Hz의 추정 오차를 가지는 결과(아래)를 보였다.

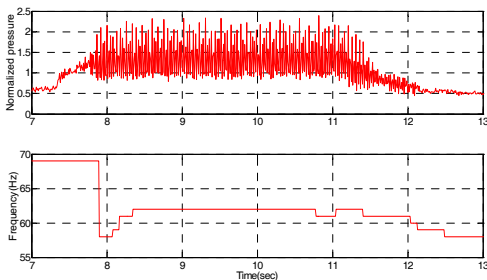


Fig. 7 Performance of Frequency Estimator

4.2 연료 유량 제어

PWM 제어 입력에 대하여 연료유량 주파수 응답특성을 살펴보기 위하여 관심 주파수 영역에서 시험을 수행하였다.

시험은 일정한 압력을 펄스밸브 전단에 인가하고 펄스밸브의 후단에 2차 연료 분사기를 장착하였다. 디지털 제어장치의 PWM 출력 신호를 증폭하기 위하여 별도의 펄스밸브 구동기를 이용하였으며 제어 입력신호가 펄스밸브로 위상 지연 없이 전달될 수 있도록 설정하였다.

연료 분사기 직 전단에서 측정한 연료 압력의 응답 주파수는 Fig. 8과 같이 제어장치를 통해 인가한 주파수 대비 0.1Hz 이내의 응답을 보였으며(위), 50Hz에서 150Hz까지 평탄한 주파수 응답 특성을 보였고(아래), 40Hz 영역에서의 과도한 응답 특성은 밸브 및 분사기 조립체의 고유 특성으로 판단된다.

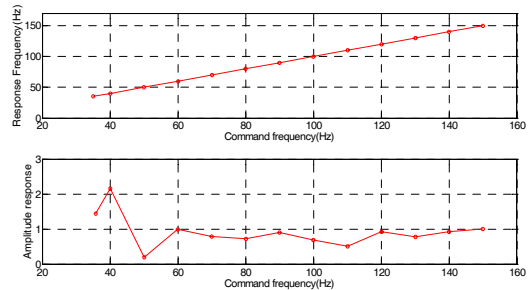


Fig. 8 Frequency Response of Fuel Supply System

5. 결 론

Cambridge Combustor 모델을 이용한 적응 제어기 시뮬레이션을 통하여 제어 가능함을 보였고, 현실적인 제어수단으로 사용할 수 있는 디지털 제어장치의 요구조건을 도출하였다. 제안된 제어장치를 이용하여 0.1Hz의 추정 정확도를 가지는 주파수 추정기를 제작하였고 그 성능을 연소시험을 통해 검증하였다. 또한 추정된 주파수 영역에서 2차 연료 밸브를 제어함으로써 해당하는 연소 불안정 모드에 대한 제어 가능성을 보였다.

본 제어장치를 이용하여 150Hz 이하의 연소 불안정 모드를 가지는 연소기에 대하여 능동제어를 수행할 수 있으리라 판단된다.

참 고 문 헌

1. Annaswamy, A.M. and Ghoniem, A.F., "Active Control of Combustion Instability: Theory and Practice," IEEE Control Systems Magazine, Vol. 22, No. 6, 2002, pp. 37-54.
2. Heckl, M. A., "Active Control of the Noise from a Rijke Tube," Journal of Sound and Vibration, Vol. 124, No. 1, 1988, pp. 117-133.
3. Jain H., N. Ananthkrishnan, N. and Culick, F.E.C., "Feedback-Linearization-Based Adaptive Control and Estimation of a Nonlinear Combustion Instability Model," AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit , SanFrancisco, CA, 2005
4. Riley, A.J., Park, S., Dowling, A.P., Evesque, S., and Annaswamy A.M., "Advanced closed-loop control on an atmospheric gaseous lean-premixed combustor," Journal of Engineering, Gas Turbines and Power, vol. 126, pp.708-716., 2004.
5. Tongxun Y. and Gutmark E.J., "Adaptive Control of Combustion Instability Based on Dominant Acoustic Modes Reconstruction," Combust. Sci. and Tech., 180: 249.263, 2008