

통합형 연료분사장치를 통한 연소불안정 저감

황용석* · 이종근** · 박익수* · 최호진* · 진유인*** · 윤현걸* · 임진식*

Reduction of combustion instability using flame holder integrated injector

Yongseok Hwang* · Jongguen Lee** · Iksoo Park* · Hojin Choi* · Yui Jin*** · Hyungull Yoon* · Jinshik Lim*

ABSTRACT

A new device injecting secondary fuel behind flameholder was invented and tested in order to reduce low frequency combustion instability of combustor using V-gutter flameholder. Specially designed combustion device could make large combustion instability up to 180 dB successfully, and newly invented device made a success to reduce 110~120Hz low frequency pressure pulsation up to 84%. It was found that the fuel flow rate of secondary fuel supplying behind flameholder was the only parameter which dominates reduction of instability. It is considered that stabilized flame with sufficient secondary fuel can lead to break the connection between combustion system and acoustic system due to independence of flame from fluctuation of main fuel resulted from synchronization with acoustic wave.

초 록

V-gutter 형 화염안정화장치를 장착한 공기흡입식 엔진의 연소기에서 발생하는 저주파 연소 불안정을 저감시키기 위해 화염안정화장치 뒤쪽에 2차 연료를 분사하는 장치를 고안하였다. 해당 장치는 모델 연소장치를 통해 성공적으로 발생된 110~120 Hz, 180dB 크기의 저주파 연소불안정을 84%까지 저감시키는 데에 성공하였다. 연소불안정의 감소는 2차 연료 공급 유량에만 의존하였으며, 특정 값 이상의 연료 공급량에서만 효과가 나타났다. 이와같은 결과는 2차 연료 공급에 의해 화염안정화장치 뒷면의 화염이 주연료 공급량의 섭동과 독립적으로 유지되어 연소 시스템과 연소기의 음향 시스템의 연계를 끊어주기 때문인 것으로 생각된다.

Key Words: Combustion Instability, Afterburner, Ramjet, flame holder integrated injector, Active Control, Passive Control, V-gutter Flameholder

1. 서 론

* 국방과학연구소 1-5
** Aerospace Department, University of Cincinnati
*** 연함대학원
연락처, E-mail: hpolaris@hanmail.net

연소 시스템에서 발생하는 연소 불안정은 연소기의 음향학적인 특성과 연소 메커니즘의 동역학적인 특성이 상호 연계되어 공진하면서 발

생하는 현상을 지칭하며, 주로 연소 압력의 진동으로 나타난다. 따라서, 연소 불안정은 연소기의 음향학적인 특성을 대표하는 특징적 고유 주파수의 진동을 가진다는 점, 시스템 외부의 섭동이 없는 상태에서 스스로 가진이 된다는 점 및 연소기의 압력 진동이 발산하지 않고 일정한 크기의 제한된 싸이클의 특성을 가진다는 점에서 다른 연소 동력학 현상과 구분된다.[1]

연소 불안정성에 대한 연구로는 D.H.Lee와 T.Lieuwen의 연구가 대표적이다. [2,3] 실험적인 연구로는 J.G. Lee와 B.Pang의 연구가 잘 알려져 있다. [4,5] 최근에는 불안정 연소 시스템에 대한 동역학적인 접근을 통해 시스템에서 발생하는 불안정 현상을 이해하고 이를 능동적으로 제어하는 기법이 연구되었다. [6,7]

많은 연구 결과에도 불구하고 연소 불안정 현상에 대해 명확하게 원인을 규명하고 규명된 원리를 바탕으로 이를 저감시킬 수 있는 방법이 고안되어 실험을 통해 검증된 예는 많지 않다. 특히 애프터버너와 램제트 엔진에 많이 사용되고 있는 V-gutter형 연소장치에 대해서는 고주파 연소불안정이나 연소 동특성에 대한 연구가 있었지만[8], 음향라이너와 같이 일반적인 장치로는 해결이 불가능한 저주파 연소 불안정을 저감시킬 수 있는 방법에 대한 연구는 매우 드물다. 그럼에도 불구하고 해당 현상은 엔진의 고출력화와 맞물려 점점 빈번한 현상이 되어가고 있어 해당 현상에 대한 연구가 필요하다. [9,10]

본 연구는 램제트 엔진 및 고출력 애프터버너와 같은 공기흡입식 엔진에서의 저주파 연소 불안정 현상을 모델 연소기에서 발생시키고 2차 연료분사 방식을 사용하여 이를 저감시키는 방법에 대한 것이다.

2. 본 론

2.1 연소불안정 저감 개념

일반적인 V-gutter 형 화염안정화 장치를 장착한 연소기의 경우, 연소불안정 현상이 발생하는 원인은 연소기의 음향학적인 진동에 의해 발생하는 지엽적인 속도의 진동이 V-gutter로 유입되

는 연료 증기를 규칙적으로 진동시키면서 결과적으로 화염으로 유입되는 연료/공기 혼합기의 당량비를 진동시키는 현상이라고 생각할 수 있다. 이와 같은 동적인 특성이 연소기의 길이 방향 음향 고유 주파수와 연계되면 압력진동이 증폭되는 저주파 연소불안정이 발생할 수 있다.

이를 저감시키기 위해 화염을 유입되는 주연료의 섭동과 분리시킬 수 있는 방법을 생각해 본다면 V-gutter 화염안정화 장치의 뒷면에 2차 연료를 공급해 주는 것이 가장 효과적일 수 있다. 왜냐하면 이 방법은 화염안정화 장치 뒷면에 연료를 직접적으로 공급하기 때문에 형성된 재순환 영역을 통하여 V-gutter의 날개 끝에 안착된 화염면에 연료를 음향장과 독립적으로 공급해 주는 것이 가능하기 때문이다.

이와 같은 아이디어가 본 연구의 핵심 아이디어이며 이를 구현할 수 있는 장치가 통합형 연료분사장치라는 이름으로 고안되었다.

Fig. 1은 해당 장치의 개념도이다.

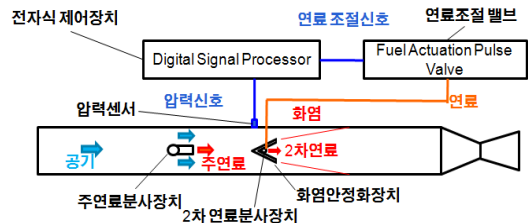


Fig. 1 Schematics of flameholder integrated injector for reduction of combustion instability

2.2 연소불안정 저감형 통합형 연료분사장치

Fig. 1에서 보여주고 있는 장치는 화염안정화 장치로 주연료를 공급해 주는 주연료 분사장치와 화염안정화장치의 뒷면에 2차 연료를 분사시키기 위해 통합되어 있는 2차 연료 분사장치 및 2차 연료를 제어하는 제어장치로 구성된다.[11,12]

연료로는 항공유인 Jet-A를 사용하였다. 화염안정화 장치와 2차연료 분사장치는 Fig. 2와 같은 개념적인 형상을 가지고 있다.

V-gutter는 40mm의 폭을 가지고 있으며, 날개와 날개 사이의 각도가 60°가 되도록 설계하였다.

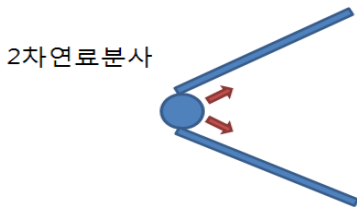


Fig. 2 Schematics of flameholder with secondary fuel injectors

2.3 연소불안정 시연용 모델 연소기 및 시험설비[12,13]

연소기는 사각형 모양을 가지도록 설계 되었으며, 120(W)mm×90(H)mm의 단면을 가지고 있다. 연소기의 길이는 엔진에서 발생하는 100~200Hz 대역의 저주파 연소 불안정의 주파수를 모사할 수 있도록 총 4m의 길이로 설계하였다. Fig. 3은 이와 같이 설계된 연소기 조립체에 대한 개념을 보여준다.

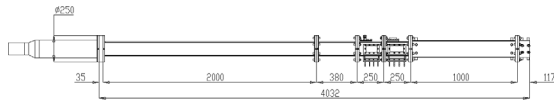


Fig. 3 Model combustor

설계된 연소기의 가장 하류에는 초킹을 위한 음속 노즐이 설치되어 있다.

2.4 연소불안정의 발생

제작된 연소기를 시험 설비에 설치한 후, 시험 조건에 대해 연소기의 연소특성을 파악하기 위한 시험을 수행하였다.

연소 시험에 사용된 공기 공급 조건은 다음 조건으로 고정되었다.

$$m_{air,max} = 0.85 \text{ kg/s}$$

$$T_{o,max} = 344 \text{ }^\circ\text{C}$$

Table 1은 각 시험에 대한 조건을 정리한 것이다.

Table 1. Test designation and their condition

시험명칭	당량비	시험내역	시험일자
611T18~611T21	0.4~0.8	주연료 분	2009.6.1
612T1~612T3	0.8~1.0	사에 의한	2009.6.2
612T6~612T10	0.35~0.8	연소 특성	2009.6.2
621T2~621T8	0.35~0.95	파악	2009.8.4

Fig. 4는 각 당량비 조건에 대해 연소시험 시에 나타난 연소실 압력 진동의 크기를 RMS로 나타낸 것이다. 당량비 0.5 이하의 연소조건에서는 연소실의 압력진동이 크지 않은 것으로 나타났다, 0.7 이상의 당량비 조건에서는 연소실 압력 진동이 매우 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 여기서 나타나는 압력 진동의 크기는 약 20KPa 정도이며 이는 180dB에 해당한다. 0.7 이상의 당량비 조건 중, 0.95의 당량비를 상회하는 조건에서는 연소실의 압력 진동이 급격히 줄어드는 구간이 관찰되었다. 이 부분은 특히 연소 화염이 V-gutter형 화염안정화 장치 앞부분에 형성되는 것으로 관측되었다.

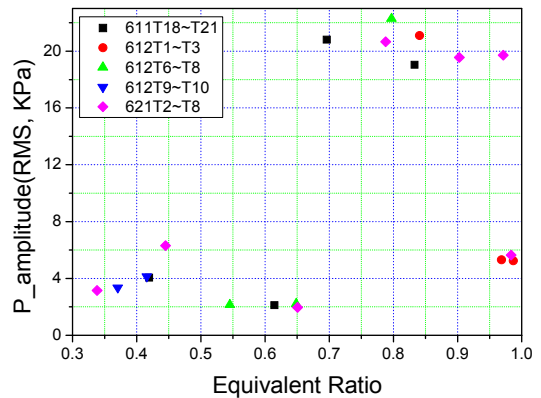


Fig. 4 Pressure pulsation of combustor according to equivalent ratio

Fig. 5는 각 당량비 조건에 대해 최대 압력 진동을 보이는 주파수를 추출하여 정리한 것이다. 연소가 유지된 시험 조건 중에 가장 압력진동이 낮은 당량비 0.34의 경우를 제외하고는 모두 100~120Hz의 주파수 대역의 주요 압력 진동 주파수를 보여주고 있다. 해당 대역의 주파수는 연소실의 1L모드의 음향학적 고유주파수와 일치한다. [12,14]

Fig. 6은 당량비 0.84에 해당하는 조건에서 위치별 압력신호를 주파수 분석한 것으로 매우 특징적인 범위의 주파수에서 최대 진동 크기를 보이며, 그 주파수의 harmonic에 해당하는 주파수들이 정점을 보이는 현상을 볼 수 있다.

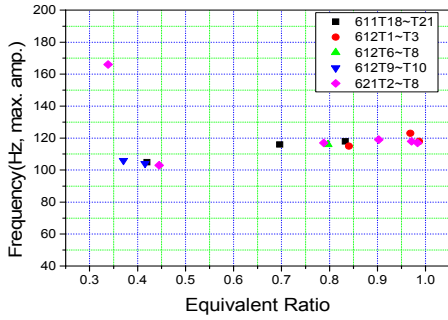


Fig. 5 Frequency of maximum pressure pulsation

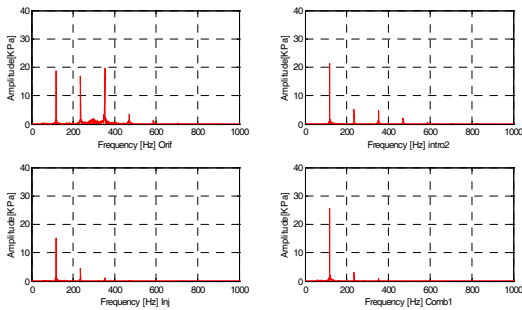


Fig. 6 Characteristic of pressure pulsation with combustion instability (611T21)

Fig. 7은 각 위치에서 측정된 압력 신호간의 위상차이를 분석한 결과이다.

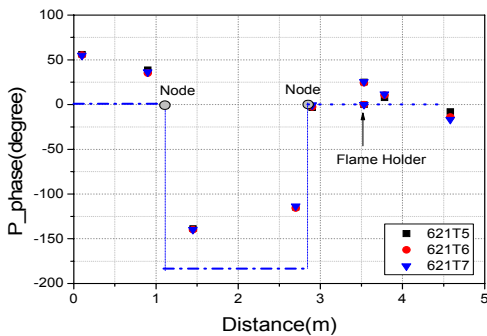


Fig. 7 Characteristic of phase of pressure pulsation with combustion instability

Fig. 7은 연소실의 압력진동이 180dB 근처인 경우에 대해 화염안정화장치 위치에서 측정된 압력신호를 기준으로 다른 위치에 있는 압력 신호가 기준 신호에 대해 가지고 있는 위상의 차

이를 도시한 것이다. 주파수는 해당 시험 조건에서 최대 진동 주파수를 사용하였다. 각 신호들의 위상차이를 분석해 보면 기준 위치의 신호에 대하여 2.7~2.9m 사이 및 0.9~1.45m 사이에서 위상차이가 거의 180° 변화하는 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 압력진동이 해당 부분에 노드가 존재하는 standing wave의 형상을 하고 있는 것을 알 수 있다. Standing wave의 형상은 2개의 노드를 가지는 1L 모드로 나타난다.

이와 같이 현재의 연소기에서 관찰되는 압력 진동의 특성은 연소불안정의 전형적인 예라고 할 수 있다. [1]

2.5 연소불안정의 저감

2.4절과 같이 발생시킨 연소 불안정을 감소시키기 위해 2가지 방법을 시도하였다. 2차연료 분사 장치에 연료를 일정한 값으로 공급하는 방법(수동모드)과 연소실에서 측정된 압력신호를 활용하여 최대 주파수를 추출하고 해당 주파수에 특정한 위상을 지연시킨 신호를 사용하여 펄스 밸브를 구동시킴으로써 연료 공급 유량을 특정 주파수로 제어하는 방법(능동모드)이다. 첫 번째 방법은 2.1절에서 설명한 방식으로 연소 동역학과 연소기의 음향 특성을 분리하는 시도를 한 것이고, 두 번째 방법은 식 (1)의 잘 알려진 Rayleigh Criterion을 사용하여 압력진동과 열발생 진동의 위상이 차이를 가지도록 하는 것이다.

$$R(t) = \frac{1}{V} \int_V R(\mathbf{x}, t) dV = \frac{1}{V} \int_V q'(\mathbf{x}, t) p'(\mathbf{x}, t) dV < 0 \quad (1)$$

이 두가지 방법은 한번의 시험에서 모두 시도되었다.

시험은 모두 11차례에 걸쳐서 진행되었으며, 각 시험의 조건은 아래 Table 2와 같다.

Table 2. Designation and condition of tests for reduction of combustion instability

시험명칭	당량비	시험내역	시험일자
621T9~621T19	0.72~0.92	연소불안정 저감 성능 평가	2009.8.4

능동모드는 3단계(Active M1~M3)로 나누어 시험하였는데, 각각의 모드는 0.002초씩의 시간 지연을 가지고 있어 연소기의 1L 모드 주파수에 대해 약 72°의 위상차를 가지도록 설정하였다.

Fig. 8은 621T15 시험의 연소실 압력 변화를 보여준다. 2차 연료를 공급하지 않았을 때 연소실의 압력은 2.4절에서의 결과와 마찬가지로 큰 폭으로 진동하는 것을 확인할 수 있다. 2차 연료를 수동모드로 공급한 경우, 연소불안정에 의한 압력진동은 큰 폭으로 감소하는 것을 관찰할 수 있다. 능동모드의 경우도 마찬가지로 연소불안정에 의한 압력진동이 억제되는 결과를 확인할 수 있다. 이때 연소실 압력 진동의 최대 감소량은 최대 진동량 대비 84%이다. 반면 2차 연료 공급을 중단하였을 경우, 연소실의 압력은 다시 큰 폭으로 진동하는 것을 관찰할 수 있다.

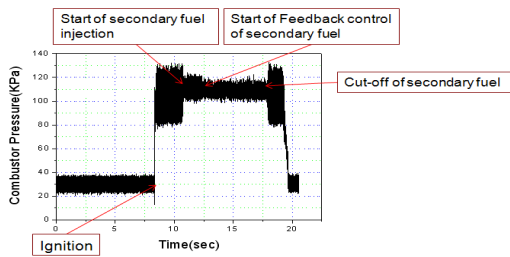


Fig. 8 Effect of secondary fuel injection on reduction of combustion instability(621T15)

Fig. 9는 연소불안정이 발생하였을 때와 억제되었을 때 화염안정화장치 주변 화염의 움직임을 고속카메라로 촬영한 것이다. 연소불안정이 발생하였을 때 관찰할 수 있었던 주기적인 화염의 움직임이 2차 연료를 분사한 후에는 사라진 것을 확인할 수 있다.

Fig. 10은 연소기 압력의 진동 크기를 평균적인 2차 연료 공급 유량에 대해 도시한 그래프이다.

Fig. 10에 의하면, 연소불안정의 감소를 유발하는데 유일하게 관련되는 인자는 분사되는 2차 연료의 평균 유량인 것으로 나타났다. 그래프에서 확인 가능한 것처럼 연소불안정의 감소는 수동모드와 능동모드, 능동모드들 간의 위상차이와

는 관계없이 오로지 2차 연료의 평균 유량이 3.5 cc/s 이상인지 그 이하인지에만 영향을 받는 것으로 나타났다. 3.5 cc/s 이상의 연료 유량에 대해서는 연소불안정의 저감효과가 나타나지만, 그 이하의 유량에서는 효과가 거의 나타나지 않는 것을 관찰할 수 있다.

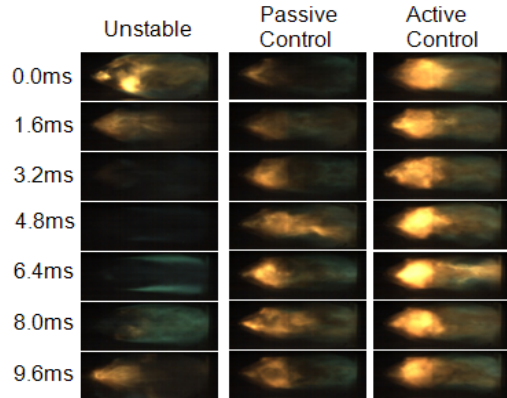


Fig. 9 Variation of flame pattern with secondary fuel injection

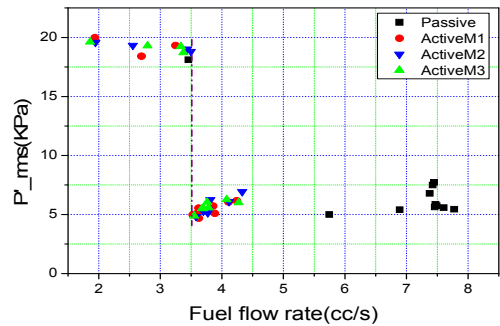


Fig. 10 Reduction of combustion instability according to secondary fuel flow rate

3. 결 론

모델 연소기를 설계하고 제작하여 램제트 엔진이나 애프터버너와 같은 직경에 비해 길이가 길면서 내부 유로가 흡입구와 직접 연결된 엔진의 경우 발생할 수 있는 저주파 연소불안정을 성공적으로 모사하였다. 또한, 2차 연료 분사장치를 화염안정화 장치와 결합하여 저주파 연소불안정을 저감시킬 수 있는 통합형 연료분사장

치를 고안하여 연소불안정을 감소시키는 데에 성공하였다. 이 장치를 정해진 조건에 대해 사용할 경우, 연소불안정에 의한 연소실의 주기적인 압력진동은 84%가량 감소하는 것으로 관측되었다.

2.5 절의 Fig. 10에서 관찰할 수 있는 사실에 의하면 2차 연료 분사에 의해 재순환 영역으로 공급되는 연료 유량이 화염안정화 장치 후단의 연소시스템이 스스로 화염을 안정적으로 유지할 수 있는 수준 이상이 되면(현 시험조건에서 3.5 cc/s 이상) 화염이 상류에서 분사된 연료의 섭동으로부터 독립적이 될 수 있는 것으로 보인다. 이는 연소기의 연소 메커니즘과 음향 시스템이 대류현상에 의해 공진할 수 있는 연결고리를 끊어 주는 효과를 발휘하여 연소불안정을 저감시키는 것으로 생각할 수 있다.

본 연구를 통해 이러한 원리가 구현되어 연소불안정의 저감을 성공적으로 이루어낸 것으로 생각되며, 상대적으로 저감이 어려운 저주파 연소불안정을 비교적 간단한 장치에 의해 저감시킬 수 있는 가능성을 보여 주었다.

참 고 문 헌

1. F.E.C. Culick, "Unsteady Motions in Combustion Chambers for Propulsion Systems," AG-AVT-039, 2006
2. D.H.Lee and T.C.Lieuwen, "Premixed Flame Kinematics in a Longitudinal Acoustic Field," Journal of propulsion and power, Vol.19, no.5, Sep.-Oct., 2003, pp.837-846
3. T.Lieuwen, "Modeling Premixed Combustion-Acoustic Wave Interactions: A Review," Journal of propulsion and power, Vol.19, no.5, Sep.-Oct., 2003, pp.765-781
4. J.G.Lee and D.A.Santavicca, " Experimental Diagnostics for the Study of Combustion Instabilities in Lean Premixed Combustors," Journal of propulsion and power, Vol.19, no.5, Sep.-Oct., 2003, pp.735-750
5. B.Pang, K.H.Yu, "Characterization and Control of Vortex Dynamics in an Unstable Dump Combustor," AIAA 2004-1162
6. T.Yi, E.J.Gutmark, "Adaptive Control of Combustion Instability Based on Dominant Acoustic Modes Reconstruction," Combustion Science and Technology, 180, 2008, pp.249-263
7. H.Jain, N.Ananthkrishnan, and F.E.C. Culick, "Feedback-Linearization-Based Adaptive Control and Estimation of a Nonlinear Combustion Instability Model," AIAA 2005-5847
8. D.R.Cuppoletti, J.Kastner, J.Reed Jr. and E.J.Gutmark, "High Frequency Combustion Instabilities with Radial V-Gutter Flameholders," AIAA 2009-1176
9. 황용석, 윤현걸, 임진식, "최신 애프터버너의 기술경향 분석," 한국추진공학회 2009년도 춘계학술대회 논문집, 2009.5., pp. 395-399
10. J.A.Lovett, T.P.Brogan and D.S.Philippona, "Development Needs for Advanced Afterburner Designs," AIAA 2004-4192
11. 박익수, 박주원, 최호진, 황용석, 진유인, 윤현걸, "DSP를 이용한 연소불안정 능동 제어 장치 설계," 한국추진공학회 2009년도 춘계학술대회 논문집, 2009. 5., pp. 128~132
12. 황용석, 이종근, 최호진, 길현용, 변종렬, 윤현걸, 임진식, "초음속 공기흡입식 엔진 연소기의 연소불안정 발생 및 분석," 한국추진공학회 2009년도 춘계학술대회 논문집, 2009. 5., pp. 83~87
13. 최호진, 황용석, 박익수, 윤현걸, 진유인, 강상훈, 이양지, "초음속 엔진 모델 연소기에서의 연소불안정 및 제어 시험 기법," 한국추진공학회 2009년도 춘계학술대회 논문집, 2009. 5., pp.111~118
14. B.H.Park, S.M.Kim, W.S.Yoon, Y.S.Hwang and H.G.Yoon, "Studies on Dynamic Characteristics of Reacting Flow-Fields in the Liquid-Fueled Model Combustor with a V-gutter Type Flame Holder," AIAA 2010-6719