V-gutter 형 보염기가 장착된 모델 연소기 내에서 발생하는 화염 동특성 연구

송진관* · 정찬영* · 윤영빈**

An Experimental Study on the Flame Dynamics in the Model Combustor with V-gutter type Flameholder

Jinkwan Song* · Chan young Jeong* · Youngbin Yoon**

ABSTRACT

Mechanism of combustion frequencies occurring during combustion is experimentally investigated in a model combustor with V-gutter flameholder. The combustor has a long duct shape with a cross section area of 40 x 40 mm. The v-gutter type flameholder with 10, 12, 14mm width is mounted at the side wall of combustor. CNG were used as fuel, and the fuel was injected transversely into air crossflow. It is found that combustion frequencies were considered as first longitudinal mode caused by combustor geometry. And it is found that flameholder length affects the flame holding range. Also, it is observed first longitudinal pressure oscillations make significant changes of flame structure.

초 록

본 연구는 V-gutter형 보염기를 장착한 연소기 내에 발생한 연소 주파수의 발생 메커니즘에 대해 규명하는 것이다. 연소기는 40 X 40 mm의 단면적을 가진 긴 덕트 형상을 가지고 있으며, 10,12,14mm의 폭을 가진 V-gutter 형의 보염기를 장착하였다. 연료로 CNG를 수직 분사하여 실험을 수행하였다. 연소 시 발생하는 주파수는 연소기의 형상에 기인한 1L 종방향 모드가 발생함을 확인하였다. 또한 보염기의 크기가 화염 가능 영역의 범위에 영향을 미침을 확인하였다. 그리고 종방향 모드의 압력변동이 화염 구조에 중요한 영향을 미침을 확인하였다.

Key Words: V-gutter type flameholder(비-거터 형 보염기), Combustion Frequency(연소 주파수), Combustion Instability(연소 불안정성), Flame Dynamics(화염 동특성)

1. 서 론

연소 불안정성은 연소 현상 시 발생하는 유동과 열 방출의 섭동의 상호 작용으로 인해 발생한다고 알려져 있다. 연소 불안정성의 발생 가능성을 예측하는 기준으로 Rayleigh Criterion이 적용된다[1]. 이 기준에 따르면 유동의 압력 섭

* 서울대학교 기계항공공학부 대학원
* 서울대학교 기계항공공학부
연락저자, E-mail: ybyoon@snu.ac.kr

동과 열 방출 섭동 상호 간의 위상 간섭이 보강 간섭인지 상쇄 간섭인가에 따라 에너지 손실 및 안정성 확보 정도를 가늠하게 된다. 연소 불안정성의 원인이 두 가지 섭동 간의 커플링에 의해 발생된다고 알려져 있기 때문에, 일반적으로 연소 불안정성을 해결하는 방법으로 능동/수동 제어를 선택하여 상호 간의 상쇄 간섭을 유도하거나 유동 특성 변경을 일으킨다.

하지만 연소 불안정성을 근본적으로 해결하기 위해서는 연소 시 발생할 수 있는 주파수의 원인에 대한 분명한 고찰이 있어야 한다. 연소 불안정성의 원인은 이미 서술한 바와 같이 유동 내의 압력/열 방출 섭동 간의 공진 현상이라고 하지만, 이러한 섭동을 일으키는 원인으로 연소실에서 일어나는 유동/연소 특성과 연소실의 형상 특성 등 많은 변수를 들 수 있다. 가스터빈의 경우에는 연소 불안정의 발생 요인에 대하여 Candel[2], Ibrahim 등[3], 오정석 & 윤영빈[4] 등의 논문에 의하여 정리가 된 바가 있다. 하지만 보염기(Flameholder)가 존재하는 고속 유동 연소기, 특히 터보제트 애프터버너나 램제트 엔진, 스크램제트 엔진과 액체 연료를 사용하는 확산 화염식 연소기에서 발생하는 연소 불안정의 요인에 대한 연구는 아직 부족한 상황이다. 보염기가 장착된 고속 유동 연소기에서 발생하는 주파수의 발생 요인에 대하여, 많은 연구가 이루어졌다. Zukoski[5], Roshko[6], Rizk & Lefebvre[7] 가 연구를 시작한 이래, Fujii & Eguchi[8], Rogers 등[9], Reuter 등[10], Jing-Tang Yang 등[11], Inamura 등[12], Huang 등[13,14], Kiel 등[15], Bush 등[16] 등의 연구에서 보염기에 관련된 다양한 결과가 보고되었다. 위의 연구들은 주로 비반응/반응 조건에서 보염기 형상이 일으키는 유동 특성 연구와 보염기에서 발생하는 와류 유동이 연소 안정성에 미치는 영향에 대하여 보고하였다. 하지만 기존의 연구에서는 연소실에서 발생하는 유동 또는 연소 특성이 주로 보염기에서 발생하는 공력학적 불안정성 또는 형상에 기인한 불안정 주파수에 대한 연구 위주로 이루어진 것이 사실이다. 그러나 실제 연소실에서는 연소기의 형상에 기인한 종방향 또는 반경 방향의 압력 모드에 의한 화염 구조의 변동이 중요한 영향을 미침을 확인할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 v-gutter형 보염기가 장착된 랩 스케일 모델 연소기에서 발생하는 종방향 모드 주파수와 연소기의 구조에 관련된 특성과 화염 구조에 대해 연구하고자 한다.

2. 실험 장치 및 조건

2.1 실험 장치

본 연구는 v-gutter형 보염기를 장착한 랩 스케일의 모형 연소기(Fig. 1)에서 수행되었다. 공기 압축기에서 공급된 공기는 필터 및 제습 장치를 거쳐 실내로 공급되었다. 연소 시험 장치는 연료 공급 장치, 혼합 관측부, 연소 실험부, 연장 덕트, 배기 장치로 구성되어 있다. 연료의 공급을 위해 8bar의 압력을 유지하여 공급할 수 있는 도시가스 라인을 구성하였다.

Fig. 1 Experimental Apparatus

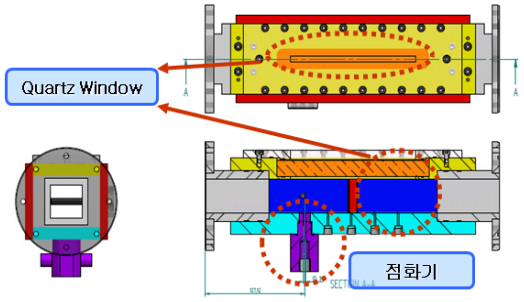

Fig. 2 Quartz Windows and Ignitor

혼합 및 연소 장치는 40 X 40mm의 단면적을 지니고 있으며, 길이 방향으로 긴 덕트 형상을 가지고 있다. 공급공기의 안정화를 위해 허니컴을 장착하였으며, 이후에 공급공기의 유량을 제어하기 위한 5mm의 지름을 가진 오리피스를 두었다. 이 오리피스는 유량 제어와 동시에 상단부의 음향학적 경계를 구성한다. 그리고 연소실 말단에도 노즐을 설치하여 음향학적 경계 역할을 수행할 수 있도록 하였다. 노즐은 가로변의 길이를 40mm로 유지하고 세로의 폭만 줄이면서 조정하였으며, 노즐 블록비(Blockage ratio)의 정의를 열린 폭의 길이 대 연소실 폭의 길이(40mm)로 정의하였다. 이 두 경계 사이의 연소 시험 장치 길이는 2040mm이다.

연료 분사는 연소 실험부의 보염기를 기준으로 800mm 앞에서 이루어졌으며 충분히 공기와 섞일 수 있는 거리를 확보하였다. 혼합 실험부 위/아래 벽면에 설치된 0.8mm 지름의 단공형 분사기에서 수직으로 분사되어 공기와 혼합하여, 연소실에서는 거의 균일한 혼합기를 공급하였다. 연소 실험부는 점화기, 보염기, 가시화 창으로 구성되어 있고, 온도와 동압센서가 설치되어 계측하였다(Fig. 2). 점화는 수소와 공기가 점화기 내부에서 연소되어 연소기로 화염이 수직 분사되는 토치형 점화기를 이용하여 이루어졌으며, 이 장치를 보염기의 직하부에 설치하여, 보염기에 충분한 점화 에너지를 전달할 수 있도록 하였다. 보염기의 형상은 정삼각형이다. 가시화 창은 수정 창(Quartz)로 제작되었으며, 레이저 계측을 위하여 상단에 설치할 수 있도록 하였으며, 보염기 근처의 화염을 관측하기 위해서 좌우 벽면에 20mm 두께의 수정 창을 설치할 수 있도록 하였다. 연소 실험부의 아래 벽면에는 온도 센서와 압력 센서를 장착할 수 있도록 어댑터를 제작하여 장착하였다.

2.2 실험 방법 및 조건

본 연구를 위해, 유입공기의 유량은 10g/s에서 25g/s 까지 2.5g/s 간격의 조건을 적용하였다. 상온의 공기를 이용하여 실험하였다. 연료로써 도시 천연가스가 사용되었으며, 상온으로 공급되었다. 실험 조건으로 결정된 유입공기 유량에 대해, 각각 0.40~1.00 사이의 당량비가 되도록 연료 유량을 제어하였다. 노즐의 효과를 확인해 보기 위해서, 노즐 면적 대 연소실 면적비가 0.3, 0.5, 0.8인 노즐을 이용하였다. 또한 flameholder의 크기가 화염 안정성에 미치는 영향을 확인하기 위해서 한 변의 길이를 10, 12, 14mm로 제작하여 시험하였으며, 각각 solid 타입과 v-gutter 타입을 시험하였다.(Table 1)

8개의 동압 센서를 장착하여, 동시에 연소시험 장치의 여러 위치에서 발생하는 동압을 계측하고 이를 후처리하여 주파수와 압력 변동치를 계측하였다. 화염의 구조 및 변화를 확인하기 위해서 직접 사진 촬영, 고속 카메라를 이용한 쉴리렌 사진 촬영, CH* 자발광 촬영이 각각 이용되었다.

3. 본 론

3.1 화염 가능 범위

Figure 3은 공기 유량에 대해서 14mm의 한 변 길이를 가진 v-gutter 형 보염기를 사용하였을 경우 착화 가능 범위를 나타낸 그래프이다. 이 때 노즐 블록비는 0.5이다. 삼각형으로 그려

Table 1. Experimental Condition

	Condition
Inlet Air Massflow Rate	10~25g/s
Inlet Air Temperature	297±1 K
Fuel	Natural Gas
Fuel Temperature	297±1 K
Equivalence Ratio(ϕ)	0.40~1.00
Nozzle Blockage Ratio	0.3, 0.5, 0.8
Flameholder Diameter	10, 12, 14 mm (solid, v-gutter)

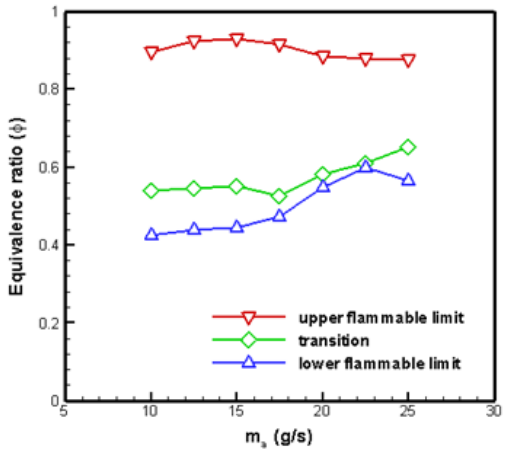

Fig. 3 Flame holding ranges corresponding to inlet air massflow rate

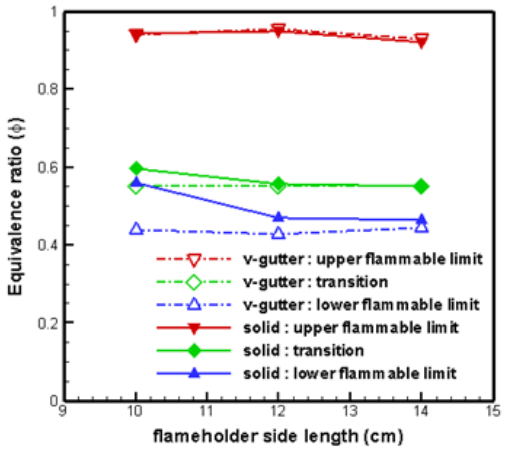

Fig. 4 Flame holding ranges corresponding to flameholder side length

진 선은 최저 화염 한계이며, 역삼각형으로 그려진 선은 최대 화염 한계이다. 그리고 그 사이에 있는 다이아몬드 기호로 그려진 선은 화염의 역화 발생이 발생하는 당량비 시작점을 이은 선이다. 공급공기 유량이 작을수록 넓은 범위의 화염 가능 영역을 가지고 있다. 이는 공급공기 유량이 작음에 따라 보염기 끝부분에서의 유동 속도에 비해서 화염의 전파속도가 빠르지 않기 때문에 화염의 안정성이 높기 때문이다. 공기가 빨라질수록 화염 안정성이 빠르게 떨어지게 되며, 대체로 약 0.6~0.8의 당량비 구간에서 화염 안정성을 확보하게 된다. 그러나 종방향 모드의 주파수가 강하게 발생하는 transition 구간의 영역이 넓게 나타나며 공기의 유량이 많아질수록 최저 화염 한계와 transition 구간이 가까워지게 된다. 따라서 고속의 공기 유입이 발생할 경우 종방향 모드의 영향이 강해질 것으로 판단된다.

Figure 4는 15g/s의 공기 유량에 대해서 다양한 보염기를 사용하였을 경우 착화 가능 범위를 나타낸 그래프이다. 이 때 노즐 블록비는 0.5이다. 삼각형으로 그려진 선은 최저 화염 한계이며, 역삼각형으로 그려진 선은 최대 화염 한계이다. 그리고 그 사이에 있는 다이아몬드 기호로 그려진 선은 화염의 역화 발생이 발생하는 당량비 시작점을 이은 선이다. 그리고 기호 내부가 색깔로 차 있는 것은 solid형 보염기에 대한 결과이며, 기호 내부가 비어 있는 것은 v-gutter형 보염기에 대한 결과이다. 첫째로, v-gutter형 보염기의 경우, 보염기의 크기에 대해 화염 가능 영역이 크게 차이가 나지 않음을 보여준다. 이는 Longwell 등[17]의 결과와 다소 차이가 나는 결과이다. 이는 v-gutter형 보염기 뒤에 충분한 재순환 영역이 확보되면서 화염의 안정성을 높여주지만, 동시에 연소기의 크기가 보염기의 크기에 비해 충분히 크지 않아서 보염기가 커질 경우 발생하는 choking 현상이 영향을 미치고 있기 때문에, 보염기의 크기가 크게 영향을 미치지 않은 결과가 도출되었다. Solid형 보염기의 경우, 보염기의 크기가 커질수록 최저 화염 한계가 크게 넓어지는 것을 확인할 수 있으며, 최대 화염 한계는 큰 차이가 나지 않음을 확인할 수 있다. 이는 기존의 연구 결과와 일치하는 것을 보여준다. V-gutter형 보염기와 solid형 보염기 간의 화염 범위에 대해서 v-gutter형이 최저 화염 한계에서 더 낮은 당량비까지 화염이 부착될 수 있음을 볼 수 있는데, 이는 보염기 후면의 재순환 영역 크기 및 안정성이 중요한 영향을 미친다는 것을 반증한다.

3.2 종방향 모드가 발생하였을 경우의 화염 구조

Figure 5는 공기 유량이 15g/s일 때 동압센서에서 측정된 당량비 별 첫번째 종방향 모드 주파수를 나타낸다. 당량비에 대한 주파수 곡선은 당량비에 대한 온도 곡선과 유사한 모습을 보이는데, 이는 온도에 의한 음속의 증가로 인해 종방향 주파수가 같은 연소기의 형상에 대해서 커지기 때문이다.

Figure 6은 공기 유량이 15g/s일 때 각 동압센서에서 측정된 당량비 별 주파수 진폭을 나타낸다. 이 때 측정된 주파수 진폭은 Fig. 5에서 확인된 바와 같이, 종방향(Longitudinal mode)의

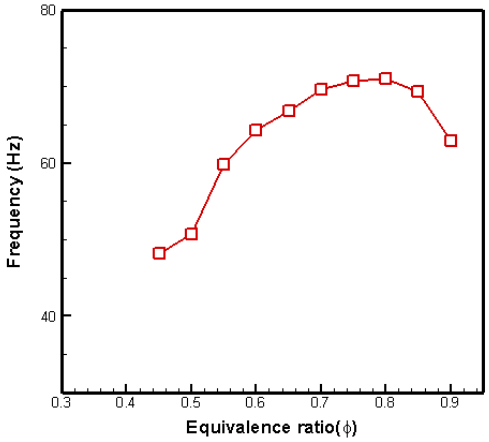

Fig. 5 First longitudinal frequency corresponding to the equivalence ratio with the inlet air massflow rate of 15g/s

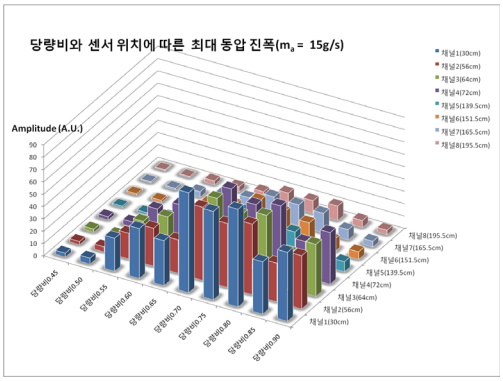

Fig. 6 Maximum frequency amplitudes corre- sponding to equivalence ratio and sensor location with the inlet air massflow rate of 15g/s

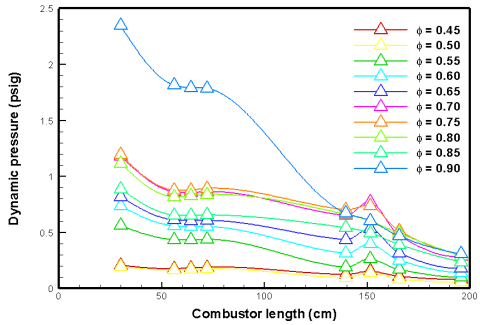

Fig. 7 Dynamic pressure amplitudes corre- sponding to the combustor length with the inlet air massflow rate of 15g/s

첫 번째 주파수에 대한 값을 의미한다. 앞에서 뒤로 가는 방향으로 채널이 1부터 8번까지 나열되어 있으며, 좌에서 우로가는 방향으로 당량비가 증가하는 방향이다. 당량비가 낮은 경우, 채널 간에 주파수가 강하게 도드라지지 않으며 낮은 진폭을 가지고 있다. 즉, 희박 연소가 발생하는 경우 종방향 모드가 발생하긴 하나 강하게 나타나지 않는 것을 확인할 수 있다. 반면에 0.55~0.60 사이의 영역을 넘어서면 갑자기 종방향 모드의 진폭이 크게 증가함을 확인할 수 있다. 이는 앞서 화염 가능 영역에 대한 논의에서 확인된 바 있는 transition 영역과 일치한다. 당량비 0.70~0.80 사이에서 가장 강한 종방향 모드에 기인한 진동 현상을 보이며, 이 이후 다소 약해짐을 확인할 수 있다. 동일한 당량비에 대해, 연소기의 앞부분에서 뒤로 갈수록 동압의 크기가 작아지는 현상을 Fig. 7에서 확인할 수 있으며, 이 모드가 종방향 모드인 quarter wave 모드임을 의미한다.

Figure 8은 ICCD 고속 카메라에 CH* 자발광만 얻을 수 있는 430nm 협대역 필터를 이용하여 얻은 이미지이다. 공급 공기의 유량은 25g/s이고, 당량비는 안정화염 조건은 0.50이고, 불안정화염 조건은 0.65이다. 고속 카메라의 초당 이미지 수(fps)는 1000이다. 불안정 화염의 경우, 한 주기에서 확인되는 화염 구조의 변화가 극심하다. 보염기에 안착되어 있던 화염이 연소기의 벽면 쪽으로 확장되게 된다. 이는 연소에 인한

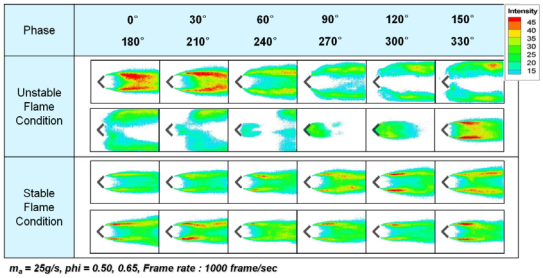

Fig. 8 CH* Chemiluminescence images with unstable flame condition and stable flame condition

보염기 후방 화염의 압력 증가와 화염면 외부의 혼합기의 가속에 의한 것으로 생각된다. 이로 인해 화염면 외부가 점점 좁아지게 되며 화염면 역시 연소기 벽면에 닿으며 신장되게 된다. 이 과정에서 보염기 후방의 압력이 높아지면, 혼합기 공급이 약해지기 시작하면서 보염기의 전방부로 화염이 역류하는 모습이 나타나기 시작한다. 결국 화염은 혼합기 공급 중단에 의한 화염 분리가 보염기 근처에서 발생하여 뒤로 밀려나고, 보염기 직후방의 와류 영역에서 화염이 되살아나면서 사이클을 완성하게 된다. 이러한 주기가 반복하는데, 이때의 주기에 해당하는 주파수는 실험에 이용된 연소기의 종방향 모드의 1L 모드와 일치한다. 반면에 화염이 안정한 경우에는 후류가 진동하는 모습이 관찰되나 화염이 보염기에 계속 부착되어 강한 진동이 발생하지 않게 된다. 이 때의 후류 진동은 Kelvin-Helmholtz 불안정성에 기인하는 것으로 생각된다.

Figure 9은 공기 유량 15g/s, 당량비 0.70일 때 고속 카메라로 촬영한 쉴리렌 이미지의 한 주기를 보여준다. 이 때 고속카메라의 초당 프레임수(fps)는 6000이다. 이미지를 촬영할 결과 약 90개의 프레임이 한 주기를 이룸을 확인하였다. 따라서 대략 66.7Hz의 주파수가 됨을 확인할 수 있는데, 이는 Fig. 5의 당량비 0.7일 때 주파수인 69.6Hz와 비슷하다. 즉 동압센서에서 측정되는 첫번째 종방향 모드에 해당하는 주파수와 동일한 주기로 화염 구조가 발생하는 것을 의미한다. 이미지에서 확인할 수 있는 것처럼, 보염기 끝부분에서 화염면이 발전하기 시작하면서 동시에 넓어진 화염면이 뒤로 밀려나게 되고 결국

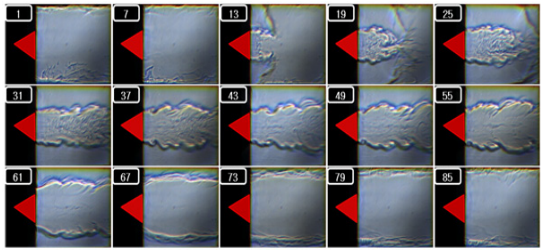

Fig. 9 High speed Schlieren images with the inlet air massflow rate of 15g/s and equivalence ratio of 0.70 (fps = 6000)

끊어져 버림(frame 19)을 관측할 수 있다. 보염기뒤로 화염이 유지되다가 점점 화염이 넓어지면서 화염의 크기가 보염기의 크기보다 커지기 시작하는데(frame 61), 화염이 보염기 앞으로 넘어가고 있음을 의미하고 있으며 이와 같은 특징은 CH* 자발광의 이미지에서도 확인된 바 있다.

4. 결 론

V-gutter 형 보염기가 장착된 모델 연소기 내에서 발생하는 화염 동특성 연구에 관한 실험을 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 화염 가능 영역은 약 0.45~0.95 사이의 당량비 범위에서 이루어지며, 공기 유량이 증가할수록 화염 가능 영역이 좁아진다.

(2) V-gutter형 보염기의 경우, 보염기의 크기에 대해 화염 가능 영역이 크게 영향받지 않는 것으로 보이나 추후 보강될 필요가 있다. 반면에, solid 형 보염기의 경우, 보염기의 크기에 민감하게 반응함을 보여주며, 이는 보염기 후방에 있는 재순환 영역 크기의 영향으로 생각된다.

(3) 당량비가 0.55~0.60 이상일 경우, 종방향 모드의 주파수가 강하게 나타나는 것이 확인된다.

(4) 화염 구조의 변화는 CH* 자발광과 Schlierene 이미지로 관측되었으며, 종방향 모드의 압력 변동이 화염 구조를 변화시키고 있음을 관측할 수 있었다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부의 중견연구자지원사업(2010-0015100)과 서울대학교 항공우주신기술연구소(IAAT)의 지원으로 수행 되었으며, 이에 감사드립니다

참 고 문 헌

1. Rayleigh. J., The Explanation of Certain Acoustical Phenomena, Nature, July 18. pp. 319-321. 1878
2. Candel. S., Combustion Dynamics and Control : Progress and Challenges, Proceedings of the Combustion Institute, vol.29, pp.1-28, 2002
3. Ibrahim.Z.M.,Williams. F.A. and Buckley. S.G., A Review of Previous Studies of Oscillatory Combustion in Gas Turbines : Progress Report-I, UCSD-CER-05-04, 2005
4. 오정석, 윤영빈, 가스터빈에서의 연소불안정 현상, 한국추진공학회, 제 12권 제 4호, pp 63-77, 2008.
5. Zukoski. E.E., Flame Stabilization of Bluff Bodies at Low and Intermediate Reynolds Numbers, Ph.D. Thesis, 1954
6. Roshko. A., On the Development of Turbulent Wakes from Vortex Streets, NACA, 1953.
7. Rizk. N.K. and Lefebvre. A.H., The Relationship Between Flame Stability and Drag of Bluff-Body Flameholders, Journal of Propulsion and Power, vol.2, no.4, pp. 361-365, 1986.
8. Fujii. S. and Eguchi. K., A Comparison of Cold and Reacting Flows Around a Bluff-Body Flame Stabilizer, Transactions of the ASME, vol.103, pp. 328-334, 1981.
9. Rogers. D.E. and Marble. F.E., A Mechanism for High-Frequency Oscillation in Ramjet Combustors and Afterburners, Jet Propulsion, pp. 456-462, 1956.
10. Reuter. D.M. Hegde. U.G. and Zinn. B.T.,, Flowfield Measurements in an Unstable Ramjet Burner, Journal of Propulsion and power, vol. 6, no 6, 1990.
11. Jing-Tang. Y, Go-Long. T. and Wen-Bin. W., Near-Wake Characteristics of Various V-Shaped Bluff Bodies, Journal of Propulsion and Power, vol.10, no.1, pp. 47-53, 1994.
12. Inamura. T. Takahashi. M. and Kumakawa. A.,, Combustion Characteristics of a Liquid-fueled Ramjet Combustor, Journal of Propulsion and power, vol. 17, no 4, 2001.
13. Huang. R.F. and Chang. K.T., Oscillation Frequency in Wake of a Vee Gutter, Journal of Propulsion and Power, vol.20, no.5, pp.871-878, 2004.
14. Huang. R.F. and Chang. K.T., Fluidic Oscillation Influences on V-Shaped Bluffbody Flow, AIAA Journal, vol.43, no.11, pp.2319-2328, 2005.
15. Kiel. B., Garwick. K, Lynch. A, Gord. J.R. and Meyer. T., Non-Reacting and Combusting Flow Investigation of Bluff Bodies in Cross Flow, 42nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 2006.
16. Bush. S.M. and Gutmark. E..J., Reacting and Nonreacting Flowfields of a V-Gutter Stabilized Flame, AIAA Journal, vol.45, no.3, pp. 662-672, 2007.
17. Longwell. J.P., Chenevey. J.E., Clark. W.W., and Frost. E.E., Flame Stabilization by Baffles in a High Velocity Gas Stream, Third Symposium on combustion, Flame and Explosion Phenomena, vol.3, iss. 1, pp. 40-44, 1949.