

선회류에서 화염 핵 발달에 대한 실험적 연구

유준*, 배충식*, C.G.W. Sheppard**

Experimental study on flame kernel development in swirling flow

J. Yu*, C. Bae* and C.G.W. Sheppard**

ABSTRACT

Flame propagation during the initial stages of ignition in a non-premixed swirl, having some of characteristics of the primary zone of an aero gas turbine combustor, has been investigated. Nd:YAG laser was adopted as the principal ignition source to allow arbitrary placing of the ignition site ; subsequent flame development was monitored using a natural light high speed filming technique for many ignition site at two different swirl ratios and an overall equivalence ratio of 0.9. For ignition offset from the burner centreline, buoyancy force associated with radial pressure gradient produced a strong inward movement of the flame kernel. At the burner exit flame kernels invariably developed into cylindrical form and a 'radial confinement /axia expansion' (RCAE) process was observed.

1. 서론

항공기에 적용되는 가스 터빈의 중요한 설계 인자중 하나는 지상에서의 안정적 점화 특성과 고공에서 운항 중 엔진이 꺼졌을 경우 빠른 재점화 특성이다⁽¹⁾. 특히 전투기의 경우는 고공에서 급강하와 급상승으로 인하여 엔진 내에서 급격한 기체 변동이 생기거나 주위에 존재하는 얼음 알갱이들이 가스 터빈내 로의 유입되는 것등과 같은 다양한 주위 조건에서 운전된다. 이러한 조건들은 엔진을 꺼지는 주요한 원인이 된다⁽²⁾⁽³⁾. 고공에서 엔진이 꺼졌을 때 다시 점화를 시키거나 혹은 재점화 특성을 향상시키는 방법으로는 점화가 상대적으로 용이한 저공으로 하강하여 재점화를 하거나 연소기 내에 분포되어 있는 점화 가능성을 예측하여 점화에 더 좋은 위치에 점화 핵을 발생시키는 것등이다⁽⁴⁾⁽⁵⁾.

또한 점화를 성공적으로 이루기 위해서는 점화 핵이 가스 터빈 연소기의 primary zone에 존재하는 재순환 영역안으로 이동되어야 하고, 점화기 부근 및 점화 핵이 재순환 영역으로 이동되는 경로의 유동 조건과 연료 혼합 정도가 점화에 가능한 조건에 만족해야한다⁽³⁾⁽⁶⁾. 따라서 연소실 내에서 점화 핵의 발달 과정에 대한 이해는 점화 성공 여부를 판단하는데 중요한 역할을 하게 된다. 본 연구에서는 가스 터빈의 primary zone에 형성되는 유동 조건을 모사할 수 있는 non-premixed 스월 버너에서 점화 핵의 발달 과정을 연구하는데 있다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 Non-premixed 스월 버너

* 한국 과학 기술원 기계공학과 (Dept. of Mech. Eng., Korea Advanced Institute of Science and Technology)

** School of Mech. Eng., University of Leeds

본 연구에서 사용한 non-premixed 스윙 버너는 prefilming air blast atomiser를 장착한 항공기용 가스 터빈의 primary zone의 유동 조건을 모사 할 수 있도록 설계 제작되었다. 버너는 연료와 공기 공급부, 선회기 (8 vanes, vane 두께 1mm, vane 각 ; 45°와 60°), pyrex 관 (내경 80mm, 길이 500mm)으로 이루어진 연소실로 구성되어 있고 수직으로 설치되어 실험에 사용하였다. 공기는 버너 중심에 위치한 13.5mm 스테인레스 봉과 내경 26.5mm 스테인레스 관 (외경 28.5mm) 사이에 설치된 선회기를 45.8m/s로 통과하면서 연소실로 공급되었고, 연료로 사용한 프로판은 공기 공급관과 1.5mm 간격으로 환상으로 설치된 내경 31.5mm 스테인레스 관을 통하여 5m/s로 공급되었다.

2.2 점화 장치

본 연구에서는 Q switched Nd:YAG 레이저 (Spectron Laser System, wave length 1024nm, pulse duration 15ns)를 주점화 장치로서 사용하였다. 레이저 점화 장치를 이용하여 버너 내의 거의 모든 영역에서 점화 스파크를 발생시킬 수 있었지만, pyrex 벽 15mm 안쪽의 영역에서는 레이저 스파크가 벽면에서 발생되어 pyrex 관의 표면에 손상을 주기 때문에 자동차용 점화 장치를 이용하여 제작한 전기 점화 장치⁽⁶⁾ (95.7mJ)를 사용하였다. Fig. 1은 본 연구에서 사용한 레이저 점화 장치의 개략도이다.

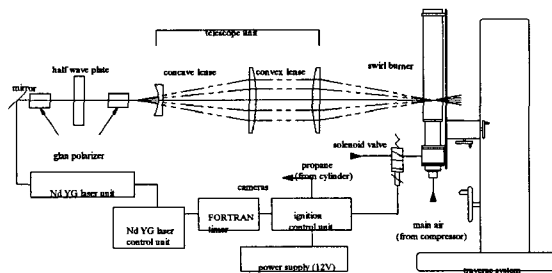


Fig. 1 Laser ignition system

레이저 유니트에서 나온 직경 6 mm의 레이저 빔은 두 개의 폴라라이저와 half wave plate를 통과하면서 빔 에너지가 조절되고, 점화 위치에서 국부 에너지 밀도를 높이기 위하여 concave 렌즈로 빔을 6배 팽창시킨후 두개의 convex 렌즈로 구성되어 빔 조절 장치로 스파크 (점화 핵)를 발생시켰다. 점화 핵에 흡수된 에너지는

power meter (Ophir, model PE 50BP-DIF)를 사용하여 측정하였고 본 연구를 통하여 사용된 레이저 에너지는 152.2 mJ이었으며 점화 핵으로의 에너지 흡수율은 44.9%이었다. 버너 내에서 스파크 발생 위치의 변경은 스윙 버너가 고정된 3차원 이송대를 이용하였다.

2.3 고속 자연광 촬영 및 화염 영상 처리

본 연구에서는 고속 자연광 촬영 방법을 이용하였는데, 레이저 점화 장치를 이용한 실험에서는 Imacon 468 (Hadland Photonics) 카메라, 전기 점화 장치에 대해서는 Kodak HS Ekta Promotion analyser (model 4540)를 사용하여 화염 이미지를 획득하였다. 두 카메라는 레이저 입사각과 점화플러그가 위치한 동일 평면상에서 각각에 대하여 직각 방향으로 설치하였다. 또한 점화 조절 장치를 이용하여 레이저와 점화 플러그로부터 single shot을 발생시켰고 두 카메라를 동기시켰다. 고속 카메라에 얻어진 화염 영상은 image processing을 통하여 흑백 영상으로 변환시켜 화염 경계면을 구한후, 거시적 화염 핵 발달을 해석하는데 사용하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

실험 결과를 용이하게 배열하기 위하여 실제 실험시에는 버너를 수직으로 하여 화염 영상을 취득하였으나 화염 영상 및 화염 발달 과정에 대한 그림은 수평으로 배열하였다.

Fig. 2는 공기비 $\phi=0.9$, 선회기 각도 45° 조건에서 버너 입구를 기준으로 하여 축 방향으로 90mm, 버너 중심에서 반경 방향으로 25mm 지점에서 레이저 점화 장치를 이용하여 스파크를 생성시키고, 화염 핵의 발달 과정을 Imacon 468 카메라로 촬영한 것이다. 화염 핵의 초기 발달 기간에서는 화염 핵이 구형과 유사하게 형성되면서 버너 중심으로 이동되고, 버너 중심에서는 점차로 버너 축 방향으로 스트레치되면서 화염 양 끝단이 반 구형인 원통 형태로 발달하게 된다.

Fig. 3은 화염 핵 발달 과정에 미치는 점화 위치의 영향인데 점화 위치를 축 방향 90mm로 고정시키고 반경 방향 거리를 5mm, 15mm, 35mm로 변경하면서 얻은 화염 이미지를 2.3 항

에서 설명한 화염 영상 처리법으로 처리하여 얻어진 화염 경계면의 시간에 따른 변화이다. 점화 위치가 (90,5)와 (90,15)의 경우는 레이저 점화 장치로 점화시키고 Imacin 468로 촬영한

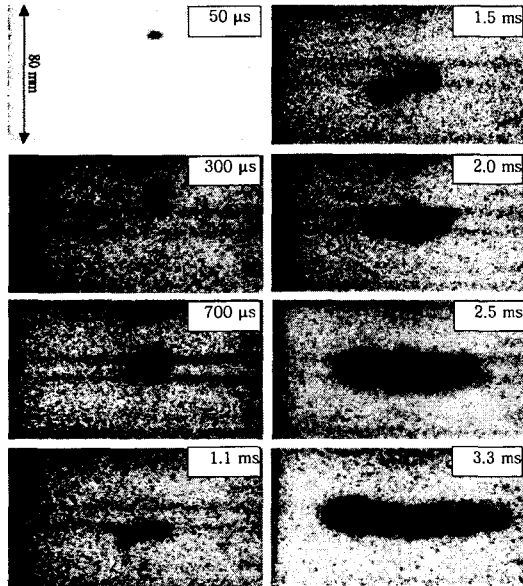


Fig. 2 Flame kernel images initiated by the laser ignition system at a position (90,25), with the swirler 45° and $\phi = 0.9$; Imacon 468

것이며 (90,35)는 전기 점화 장치 및 Kodak HS 카메라를 이용한 것이다. 화염 핵이 Fig. 3 (a)에서 보여지는 바와 같이 버너의 중심 부근에서 생성된 경우, 화염 핵은 버너 중심 방향과 버너 입구 쪽으로 이동된다. 화염 핵이 버너 중심에 도달하면, 버너 중심에서 반경 방향으로의 퍼져 나가는 화염 발달은 일정한 위치에서 제한되며 축 방향으로만 화염이 발달하는 것으로 보여진다. Fig. 3 (b)와 (c)에서 나타난 것과 같이 점화되는 위치가 버너 중심에서 반경 방향으로 멀어짐에 따라 화염 핵이 버너 중심부로 이동되는 현상은 명확하게 보여지고 있다. 이러한 버너 중심부로의 화염 핵 이동은 선회류에 의해 버너 중심부의 압력이 외측 보다 낮고 화염 핵 내부의 밀도가 주위 밀도보다 낮기 때문에 발생하는 부력이 버너 중심 부로 작용하기 때문인 것으로 생각된다. 또한 버너 중심에서 반경 방향으로의 화염 발달은 일정한 반경까지 만으로 제한되는 것으로 보이는 반면 축 방향으로의 화염 발달은 상대적으로 크게 나타

나고 있다. 이러한 '반경 방향으로의 화염 발달 제한 / 축 방향으로의 화염 팽창' (RCAE, Radial Confinement/Axial Expansion) 현상은 선회류에 의해 발생된 구심력이 버너의 일정한

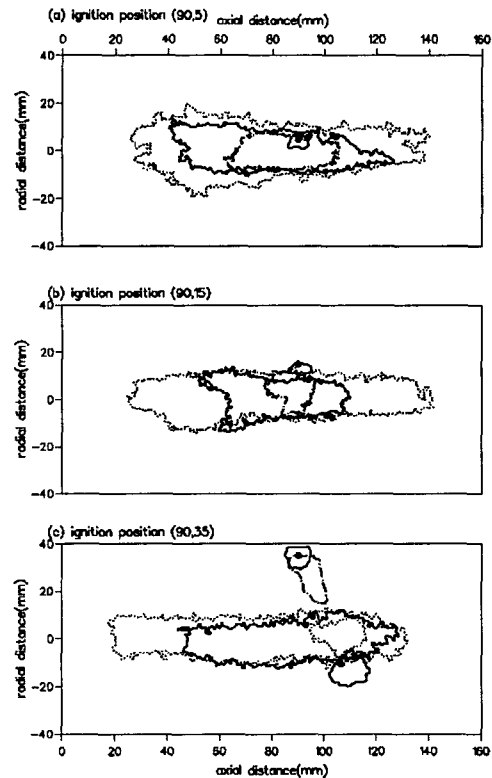


Fig. 3 Effect of ignition site on flame development at an axial distance of 90mm with the 45° swirler and $\phi = 0.9$
 (● ignition position)
 (a) 50 μ s, 1.5ms, 2.5ms, 3.3ms from ignition.
 (b) 50 μ s, 300 μ s, 2.0ms, 3.3ms from ignition
 (c) 220 μ s, 1.32m, 2.84ms, 3.74ms, 5.94ms, 6.83ms from ignition

반경 방향 위치에서 화염 핵 내부와 외부와의 압력차이로 생긴 힘과 평형을 이루고 이때 연소에 의해 발되는 연소 가스가 버너 축 방향으로 팽창되기 때문인 것으로 생각된다. Fig. 4에서는 이러한 RCAE 현상에 미치는 선회 강도의 영향을 나타낸다 (점화 위치 (90,5), 공기비 $\phi = 0.9$). 그림에서 나타나는 바와 같이 선회 강도 (선회기 각도)가 증가하면 반경 방향에서 화염 핵 발달의 제한되는 위치가 버너 안쪽 중심 방향으로 이동되는데 이는 선회 강도 증가에 따른 구심력의 증가때문인 것으로 생각된다⁽⁷⁾.

가스가 축 방향으로 이동, 팽창되어 화염 핵은 축 방향으로 성장하게 된다.

후 기

본 연구를 진행하는데 많은 조언을 해 주신 University of Leeds의 Professor P.H. Gaskell 과 Dr. R. Wooley에게 감사 드립니다.

참고 문헌

1. Lefebvre, H.A., Gas Turbine Combustion. McGraw-Hill, New York, 1998
2. Cote, T., Ridley, J.D., Clements, R.M. and Smy, P.R., The ignition characteristics of igniter at sub-atmospheric pressure. *Combust. Sci. and Tech.*, 48, 151, 1986
3. Wilson, C.W., Sheppard, C.G.W. and Low, H.C., A novel technique for predicting the ignition performance of an aero gas turbine combustion. Paper 29, RTO (previously AGARD) Combustion and Fuel Meeting, Lisbon, 1998
4. Ballal, D.R. and Lefebvre, A.H., Ignition of liquid fuel sprays at subatmospheric pressures. *Combust. Flame*, 31, 115, 1978
5. Hicks, R.A., Wilson, C.W. and Sheppard, C.G.W., Investigation of ignition probability in a gas turbine combustor using laser ignition. Paper 99-GT-116, ASME Turbo Expo 99, Indianapolis, June, 1999
6. Gillespie, L., Lawes, M., Sheppard, C.G.W. and Wooley, R., Aspects of laminar and turbulent burning velocity relevant to SI engines. SAE Paper 2000-01-192 and SP-1492, 2000
7. Vranos, A., Knight, B.A. and Zabielski, M.F.Z., Centrifugal mixing : a comparison of temperature profiles in nonrecirculating swirling and nonswirling flames. *Combust. and Flame*, 48, 109, 1982

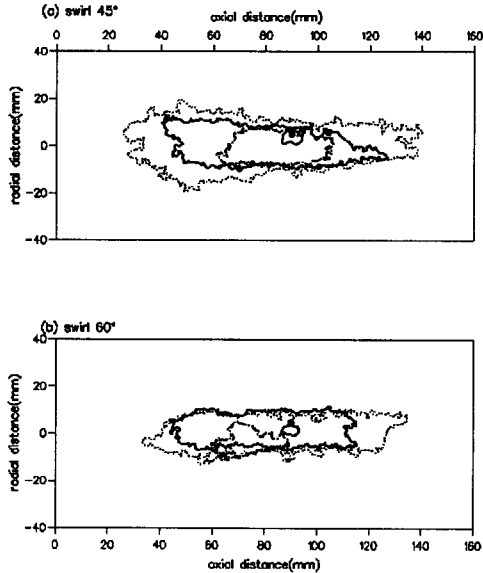


Fig. 4 Effect of swirl intensity on flame development at an ignition position (90,5) for $\phi = 0.9$ (● ignition position)
 (a) 50 μ s, 1.5ms, 2.5ms, 3.3ms from ignition
 (b) 50 μ s, 1.5ms, 2.5ms, 3.3ms from ignition

4. 결 론

본 연구에서는 non-premixed 스웰 버너에서 점화 핵의 발달 과정을 고속 자연광 촬영법에 의해 얻어 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 선회 유동에 의해 발생된 반경 방향으로의 압력 구배와 주위 유체보다 낮은 화염 핵 내부의 밀도 차이로 인하여 발생된 부력 때문에 화염 핵은 선회류 중심으로 이동한다.
2. 선회류 조건에서 '반경 방향으로의 화염 발달 제한 / 축 방향으로의 화염 팽창' (RCAE) 현상이 초기 화염 발달을 지배하는 것으로 나타났다 ; 반경 방향의 화염 핵 발달은 선회 유동에 의해 발생된 구심력과 화염 핵 내부와 외부의 압력 차이로 인하여 생성된 힘이 평형이 되는 지점에서 제한된다. 이때 발생하는 연소