

비예혼합 선형 와환에서의 화염 전파 특성에 관한 실험적 연구

양승연* · 노윤종* · 정석호**

An Experimental Study on Flame Propagation
along Non-premixed Vortex Tube

Seung Yeon Yang · Yoon Jong Roh · Suk Ho Chung

Key Words : vortex tube(선형와환), non-premixed(비예혼합), circulation(순환), laser ignition(레이저점화).**Abstract**

Flame propagation along vortex tube was experimentally investigated. The vortex tube was generated by the ejection of propane from a nozzle through a single stroke motion of a speaker and the ignition was induced from a single pulse laser. Non-reactive flow fields were visualized using shadow technique. From these images, vortex ring size and translational velocity were measured in order to determine the ignition time and position. Flame structure and flame speed were measured using high speed CCD camera. Flame speed was accelerated during the initial stage of flame kernel growth, and reached near constant value during steady propagation period. Near the completion of propagation, flame speed was decelerated and then extinguished. Flame speed along the non-premixed vortex tube was found to be linearly proportional to circulation, which was similar to that of the flame propagation along premixed vortex ring. Ignition position minimally affects the propagation characteristics. These imply that flame is propagating along the maximum speed locus expected to be along stoichiometric contour and also support the existence of tribrachial flames.

1. 서론

유체가 외력에 의해 오리피스(orifice)나 노즐을 통해 순간적으로 분출되면 노즐 선단을 통해 와(vortex)가 분리되고, 분출된 유체와 정지해 있는 주위 공기와의 속도 차이에 의해 형성되는 전단층을 통해 하류로 대류되면서 점점 발달하여 와환(vortex ring)을 형성시킨다.

이런 와환구조에서 화염의 전파 과정은 난류화염(turbulent flame)에 대한 이해를 증진시킬 수 있다. 복잡한 난류화염을 이해하기 위한 연구에서는 유동 모델을 단순화한 후, 화염과의 상호 작용을 살펴 볼 필요가 있다. 이러한 경우에 많이 사용되는 유동 모델중의 하나가 와환구조이다^[1,2].

Lamb^[3]은 와환의 순환(circulation)이 와환의 병진속도(translational velocity)에 선형적으로 비례

한다는 간결한 이론식을 유도하였는데, 이 식은 실제로 측정하기 어려운 와핵의 크기를 필요로 한다. Didden^[4]은 염료를 이용한 가시화를 통해 와 중심축(vortex axis)의 위치를 찾아내고, 레이저 도플러 유속계(LDV)를 이용해 노즐 출구에서의 축 방향과 반경 방향 속도를 측정하여 시간 변화에 따른 순환을 계산하여, Maxworthy^[5]가 실험 결과로부터 간략하게 도출한 순환에 관한 식과 비교한 바 있다. Takagi 등^[6]은 과도 제트(transient jet)에서 LDV를 이용해 위치에 따른 축 방향과 반경 방향 속도의 변화 추이를 측정하였으며, Rayleigh 산란을 이용하여 점 측정(point measurement)으로 각 위치에서의 연료농도 변화를 측정하였다.

McCormack 등^[7]은 예혼합 연료로부터 형성된 와환에서의 화염속도가 최대 14 m/s 로서, 난류 화염 전파속도보다 더 크다는 것을 실험적으로 발견하고, Lamb의 식으로부터 순환을 계산하여 화염속도가 순환에 선형적으로 비례함을 규명하였다. Chomiak^[8]은 McCormack의 실험 결과를 물리적

* 서울대학교 기계공학과

** 서울대학교 기계항공공학부

으로 설명하기 위해 화염가속 모델로서 “vortex bursting mechanism” 을 제시하였는데, 이에 따르면 원심력에 의해 외환 반경 방향으로 압력 구배 (pressure gradient)가 발생하고 이 구배가 화염을 와 내부로 유도함으로써 축 방향의 폭발 (bursting) 을 일으킨다는 것이다. 결과로서 화염 속도가 화염면 전후의 밀도비의 제곱근에 비례한다는 식을 제시하였다. Ishizuka^[9] 는 회전하는 유동장에서 화염의 전파속도를 측정하여 유동장의 접선방향 속도에 화염속도가 선형적으로 비례함을 확인하였는데, 이 연구에서 접선방향 속도는 축 방향 속도에 선형적으로 비례하므로 McCormack 의 실험 결과를 재확인해 준 것이라고 볼 수 있다. 그리고, 실험 결과를 Chomiak 의 화염가속 모델과 비교하고, 연료의 농도 변화에 따른 전파속도를 측정하여 이론 당량비(stoichiometric) 근처에서 가장 큰 화염속도를 얻게 됨을 밝혔다. Atobiloye 등^[10] 은 끝이 막힌 관에서 밀도 차이를 가진 회전하는 두 유체의 상호작용에 관한 이론해석을 통해 와환에서의 화염가속 원리를 밝히려 하였는데, 내부 유체가 강제회전을 할 때와 자유회전을 할 때로 나누어 유체의 밀도비에 따른 축 방향 속도를 고찰하였다. Asuto 등^[11] 은 McCormack 의 실험을 상세히 재현하였다. 수소, 메탄 그리고, 프로판의 세가지 연료에 대해 당량비를 변화시키며 실험을 수행하고 속도우그래프 (shadowgraph) 를 이용하여 화염속도를 측정하였다. Lamb 의 식을 이용하여 순환의 크기를 얻고, 이로부터 최대 접선방향 속도를 계산하여 화염속도를 이 접선방향 속도에 따라 나타내었다. 역시 결과를 Chomiak 의 모델과 비교한 뒤, 차이를 보정하기 위한 방법으로서 화염면의 모양을 고려해야 함을 밝히고 화염면의 곡률반경을 고려한 새로운 화염전파식을 제시하였다. 하지만, 이 역시 화염가속의 주원인이 아니라 부수적 효과에 지나지 않기 때문에 계산결과는 실험결과와 많은 차이를 보인다. 이러한 실험들은 모두 가연한계 (flammability) 내의 예혼합기(premixture)로부터 발생된 와환에서의 화염전파를 대상으로 하였다.

Choi 등^[12] 은 연료만을 이용하여 비예혼합 와환에서의 화염전파 특성에 대한 연구를 실험적으로 수행하였으나, 두 갈래로 전파되는 화염이 최종적으로는 서로 마주 보는 방향으로 전파함으로써 미연가스의 압축효과로 인해 화염의 가속효과에 변화가 발생한다.

이에 따라 본 연구에서는 초기에 산화제가 섞이지 않은 순수 연료로부터 기연 가스의 팽창이 미연 가스의 압축으로 이어지지 않는 선형 와환

(vortex tube)을 형성시켜, 외부 공기 유입과 혼합에 따라 예혼합기가 형성되는 경우의 화염의 전파 특성을 고찰하고자 하였다.

Figure 1 에 와환구조를 개략적으로 도시하였는데, 여기서 앞으로 사용할 와환의 특성을 규정하고자 한다. 주 유체가 2 차원 노즐을 통해 분출되면 선단의 중앙에 축방향 속도 성분이 0 이 되는 정체점(stagnation point)이 형성되고 이 양쪽으로 두 개의 선형 와환이 형성된다. 이 때, 가상적인 튜브 형태의 내경을 와환 내부직경 (vortex ring inner diameter) d 라고 하고, 두 튜브의 중심간의 거리를 와환 폭(vortex tube width) D 라 한다. 그리고, 전체 구조를 와포(vortex bubble) 라고 명명하고, 그 바깥의 폭을 와포 폭(vortex bubble width) D^* , 주 유체의 폭을 후류 폭(width of wake) w 라 칭한다. 와환의 내부는 중심부의 강제회전(solid body rotation)을 하는 부분과 바깥쪽에 자유회전(free rotation)을 하는 부분으로 나눌 수 있는데, 강제회전을 하는 중심 부분을 와핵(vortex core)이라고 부른다. 이상의 명칭들은 대부분 선행 연구자들의 정의에 따른 것이다.

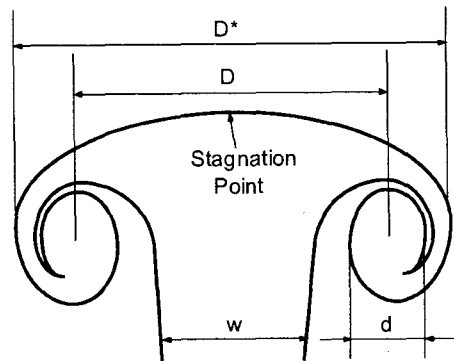


Fig. 1 Schematic of vortex tube.

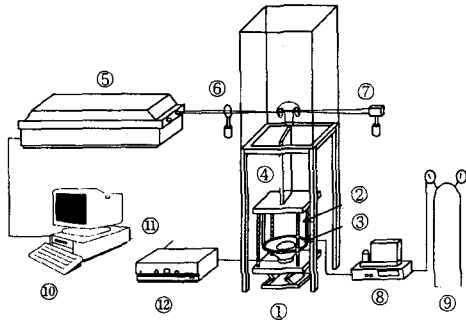
2. 실험장치 및 방법

와환 발생장치, 점화 장치, 각종 신호 제어부 및 가시화 장치로 구성되어 있는 실험 장치를 Fig. 2 에 나타내었다.

와환 발생장치 (vortex ring generator) 는 크게 연료 저장조 (fuel reservoir), 노즐 및 유동 구동부로 나눌 수 있다. 연료 저장조는 내경 184 mm, 높이 200 mm 의 아크릴 원통으로 하부에 스피커(loud speaker ; 200 W, D=20 cm)가 설치되어 있다. 상단에 부착된 노즐은 길이 200 mm, 폭 10 mm, 높이 500

mm 의 직사각형 형태를 가지고 있다. 스피커 콘(corn paper)의 순간적인 상승운동은 연료 저장조 내의 순간적인 압력상승을 유발하고, 이에 의해 연료는 상부노즐을 통해 분출되면서 와환을 형성한다.

전체 시스템은 수직이송장치 위에 놓여져 노즐 선단으로부터 점화 지점까지의 높이를 변화시킬 수 있게 하였고, 외부 유동장의 영향을 없애므로써 일정한 점화위치를 유지하기 위해서 300 × 300 × 550 mm 의 아크릴 사각실린더를 노즐출구 쪽에 설치하였다.



- ① Vortex ring generator
- ② Fuel reservoir
- ③ Speaker
- ④ Nozzle
- ⑤ Nd:YAG laser
- ⑥ Convex lens
- ⑦ Beam stop
- ⑧ M.F.C
- ⑨ Propane
- ⑩ 8253 Timer
- ⑪ D/A converter
- ⑫ Audio amplifier

Fig. 2 Schematic of experimental setup.

연료는 C.P. 등급의 프로판 (propane; C₃H₈)을 사용하였고, 질량유량계(mass flow controller; MKS, 1259c)를 사용하여 유량을 조절하였다. 실험 전에 저장조에 연료를 가득 채우고 약간의 연료가 노즐 상단을 통해 흘러 넘치는 상태를 만들어 준 뒤, 연료공급을 중단하고서 유동 구동부를 작동시켜 와환을 형성함으로써 매 실험에서 동일한 조건이 되도록 하였다.

와환의 구조는 앞서 언급한 연료 저장조의 기하학적 형태에도 영향을 받을 수 있지만 스피커의 운동형태, 즉 저장조에 발생하는 순간적인 압력변동 특성에 직접적으로 영향을 받기 때문에 스피커 구동신호의 형태는 매우 중요한 인자이다. D/A 변환기 (digital analog converter)로 임의의 신호형태를 사용하여 와환을 발생시켜 그 구조를 살펴보고,

그 중 가장 깨끗한 구조를 얻을 수 있었던 신호 형태인 램프 신호 (ramp signal)를 사용하였다.

점화원은 Q-switched Nd: YAG 레이저(Spectra-Physics, GCR-150)를 사용하였고, 점화 위치는 볼록 렌즈 (f = 200 mm)로 조절하였으며, 레이저와 다른 장비를 동기 시키기 위해 8253 카운터로부터 발생된 단일펄스(single pulse)를 통해 단발(single shot)로 발진시켜 사용하였다

와환을 가시화하여 그 구조를 살펴보고 화염 전파속도를 측정하기 위해서 섀도우(shadow) 광학 기법을 이용하였다. 광원으로는 제논등(Xenon lamp)을 사용하였고, 유동장의 가시화 결과는 고속도 CCD 카메라(motion analyzer; Kodak, Ekta Pro EM1012)를 사용하여 500 ~ 2000 fps(frames per second)로 촬영하였다. 고속도 CCD 카메라와 이미지 처리기의 소프트웨어에서 제공되는 화소(pixel) 정보로부터 시간에 따른 와환의 위치를 측정하여 와환의 병진 속도(translational velocity) 및 크기 변화를 측정하였다.

3. 결과 및 검토

3.1 비반응 유동장 가시화 및 병진속도 측정

와환의 강도를 변화시키면서 연구를 수행하기 위해서 스피커 콘의 상승시간을 50 ms 로 고정시키고, 램프신호의 진폭을 다르게 하여 와환의 병진 속도를 변화시켜 가며 실험하였다. 램프신호의 진폭은 선행 연구자들이 사용한 피스톤 형태의 와환 발생장치에서 행정(stroke)에 대응되는 것으로 스피커 콘의 변위에 직접 비례한다. 따라서 실험 조건을 구별하기 위한 값으로 램프신호의 진폭을 사용하였다.

Figure 3은 램프 신호의 진폭 Aramp = 40 일 때 와환이 시간에 따라 발달되어 가는 과정을 섀도우 기법을 이용하여 가시화한 결과이다. 신호 발생 이후, 최초로 연료가 노즐 밖으로 보이기 시작하는 시간은 약 20 ms 정도인데, 진폭을 달리한 경우에도 이 시간에는 큰 차이를 보이지 않는다. 램프신호의 진행에 따라 스피커는 50 ms 까지 상승 운동을 하고 다시 원래의 위치로 서서히 복귀하는데, 이는 입력전압의 변화율에 비례하는 출력을 만들어 내는 상용 오디오앰프의 특성에 기인한다. 램프신호의 상승이 끝나고 일정한 전압이 입력되면 앰프의 출력은 0 V 가 되어, 스피커 콘의 복원력에 의해 스피커는 서서히 하강운동을 한다. 이와 같은 스피커의 운동은 와환의 모양에 직접 영

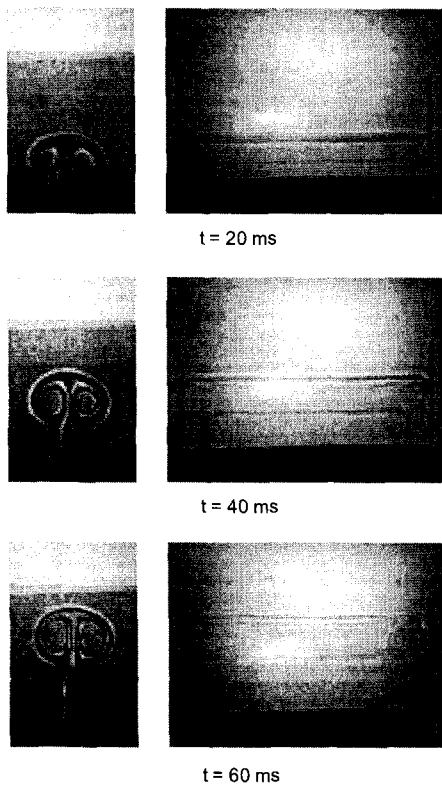


Fig. 3 Shadow images of vortex tube for $A_{ramp} = 40$.

향을 끼치게 되는데, 스피커가 상승하는 동안 와포 폭 D^* 는 일반 제트에서와 같이 노즐에서 멀어질수록 점점 커지다가, 상승이 멈추면 그 증가 경향이 둔화되다가 결국에는 그 크기가 감소한다. 하지만, 그 과정 중에도 외부 공기의 유입, 혼합과 함께 후류의 연료들도 점차 와환 안으로 유입되면서 와환 내부 직경 d 는 계속 증가한다.

진폭을 달리하는 실험에서 점화위치는 노즐로부터 점화높이를 일정하게 고정시키는 방법을 택하였는데, 노즐 출구로부터 15 mm 높이를 와환 중심이 통과하는 시간을 포착하여 레이저 발진시간에 반영함으로써 점화를 수행하였다. Figure 4는 점화 시작 시간부터 전파가 완료되는 시간 사이의 와환 병진 속도의 평균값을 나타낸다.

3.2 화염 구조에 관한 고찰

기존의 연구들은 주로 연료와 산화제가 가연한계이내의 당량비로 충분히 섞여 있는 예혼합 와환에서의 화염전파에 대한 연구가 이루어졌으나, 본 실험에서는 바깥 공기의 유입과 이에 따른 혼합에 의해 가연한계의 범위에 들어가게 된다. 따라서 공기의 유입이 많이 이루어지고 상대적으로

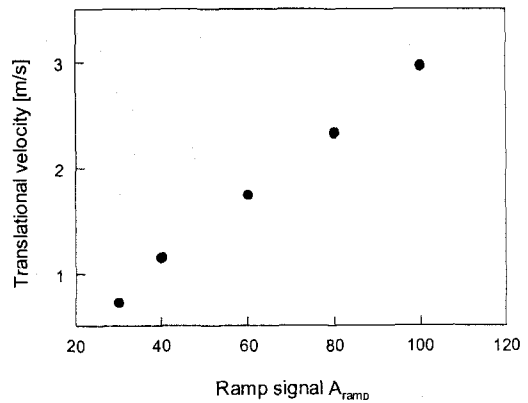


Fig. 4 Relation between ramp signal amplitudes and translational velocities.

집진방향의 속도가 커 혼합이 비교적 잘 이루어지는 와환 내부에서만 화염의 전파가 일어난다. 이는 웨도우 기법을 이용, 화염의 전파 모습을 5 ms 간격으로 관찰한 Fig. 5에서 확인할 수 있다. 화염에 의해 발생하는 기연가스가 와환 내부에서만 관찰되며, 이는 화염전파가 와환의 내부에만 한정됨을 보여준다. 또한 화염전파 과정에서도 와포의 전체적인 구조는 크게 변형되지 않고 화염전파가 종료함을 알 수 있다.

와환의 병진속도도 화염의 유무에 거의 영향을 받지 않음을 각 시간에서 정체점의 높이를 비교해봄으로써 알 수 있는데, 이는 와포 전체가 아닌 일부에서만 연소가 일어난 것으로 인해서 밀도가 작아진 부분이 일부뿐일 뿐만 아니라, 이미 스피커의 운동이 정지된 상태에서 와환 전체 무게의 변화는 없을 것이므로 운동량은 보존되고, 대기와 직접 접촉하여 전단력을 받는 부분은 미연상태로 남아 있어 전단력도 병진속도에는 영향을 주지 않기 때문인 것으로 생각된다.

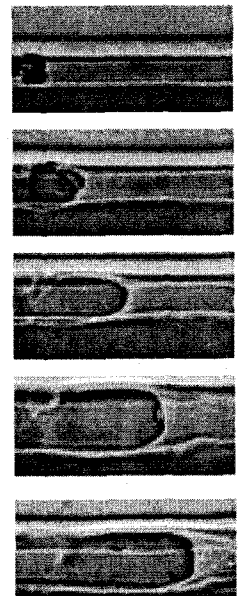


Fig. 5 Shadow images of Flame propagation along vortex tube for $A_{ramp} = 40$.

Figure 6는 시간에 따른 화염 전파 과정을 고속도 CCD 카메라를 이용하여 램프신호의 진폭이 40인 경우에 점화 후 각각 5, 10, 15, 20 ms 경과 후 정면에서 바라본 모습을 얻은

결과들이다.

비반응 유동장의 가시화 결과에서와 마찬가지로 시간이 지날수록 외환 내부 직경이 커짐으로 인해 화염의 크기도 시간이 지남에 따라 커짐을 볼 수 있고 후기로 갈수록 화염의 강도가 강해짐을 알 수가 있다. 또한 신호가 외환의 가장 자리에서 강하게 나타나는 것으로 보아 화염이 외환의 가장 자리에 집중되어 있음을 알 수 있다. 외환의 중심

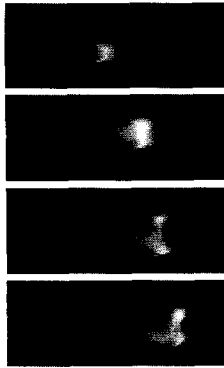


Fig. 6 Direct images of Flame propagation using CCD camera.

은 외부공기가 유입되어 혼합이 잘 이루어져 있지만 과농한 상태인 반면, 가장 자리는 외부 공기와 직접 접촉하면서 혼합층을 이루고 있기 때문이다.

그리고 Fig. 5 와 비교해 보면 웨도우 이미지의 선단 부분과 고속도 CCD 카메라로 촬영한 화염이 모양이 대체로 일치함을 알 수가 있고, 이 결과로부터 화염의 위치가 웨도우 이미지의 밀도 차이 경계지점과 일치함을 유추할 수 있다.

3.3 화염 속도

외환에서 화염이 전파되는 속도는 고속도 CCD 카메라를 사용하여 웨도우 이미지를 연속적으로 얻은 후 선단 부분의 위치를 측정하여 구하였다. 점화가 일어난 후 화염이 퍼져 나가는 속도를 “화염전파속도” 라고 부르기도 하나, 기존의 연구자들^{[7], [9]}은 이를 화염속도(flame speed)라 명명하였으므로 이 용어를 따르기로 한다. 본 실험에서는 비예혼합 외환이 형성되나 화염은 연료와 산화제가 혼합된 경계층을 따라 전파하므로 예혼합 외환과 유사하게 전파속도를 정의할 수 있다.

먼저 외환 내부에서의 점화 위치에 따른 화염속도 변화를 살펴보았다. 외환 내부에서 브레이크 다운 위치 변화를 통해 점화위치를 변화시킬 수 있다. 이 점화위치의 변화에 따른 화염속도의 영향을 살펴보기 위해 외의 중심과 중심으로부터 4 mm 벗어난 지점에서 각각 점화를 시켜 화염속도를 측정된 결과, 점화 위치의 변화는 화염 속도에 영향을 미치지 않음을 확인할 수 있었다. 점화 위치가 변한다 하더라도 화염핵이 성장하는 과정에서 스스로 최적의 당량비를 찾아 움직이며 이 시간은 초기의 아주 짧은 시간에 해당해 전체적인

화염속도에 큰 영향을 미치지 못하였다.

Figure 7 은 램프 신호의 진폭이 각각 40, 60, 80 인 경우의 화염 속도를 표시한 결과이다.

각각의 경우는 비슷한 속도 경향을 나타내고 있음을 알 수가 있다. 점화 후 초기에 화염 속도가 가속되는 구간을 지나 일정한 속도로 전파되는 구간이 존재하며 최종적으로 감속이 일어나며 전파가 완료된다. 초기의 가속구간은 레이저 브레이크 다운에 의해 발생한 화염핵이 성장해 정상상태에 도달하는 구간으로써 화염의 강도도 약하며 화

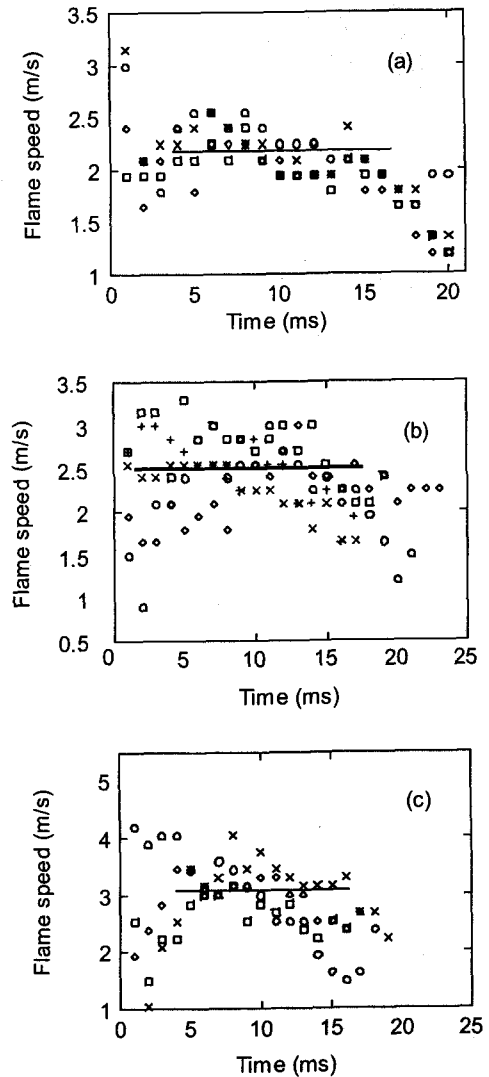


Fig. 7 Flame speed variation with time for Aramp = (a) 40, (b) 60, and (c) 80.

염면도 불규칙하게 나타난다. 이런 화염이 가속되는 구간은 램프신호의 진폭에 관계없이 모든 경우에 약 5 ms 정도이다. 이는 화염핵의 성장이 정상상태에 도달하는 시간이 거의 일정함을 보여준다. 정상상태가 끝나고 화염이 감속하는 구간은 전파가 어느 정도 끝나 가면서 노즐 끝에 장착되어 있는 윈도우로 인해 미연 가스가 압축되면서 화염을 감속 시키기 때문이다. 따라서 본 연구에서 사용된 화염속도는 다른 연구자들이 사용한 점화 후 전파가 끝날 때까지의 평균 화염 속도가 아닌 정상상태에서의 화염속도를 구하였다.

마지막으로 진폭변화에 따른 화염속도의 변화를 살펴보았다. 예혼합 와환에서 McCormack^[7]은 화염속도가 순환의 크기에 선형적으로 비례함을 실험을 통해 밝혔으며, Ishizuka^[9], Asato 등^[11]은 순환 대신 와환에서의 접선방향 속도를 사용하였는데, 단면이 원인 와환에서 접선방향 속도만이 존재하는 경우에 순환의 크기는 이 접선방향 속도를 원의 면적에 대해 적분해 줌으로써 얻을 수 있는 값으로 결국 순환의 크기에 선형적으로 비례하게 된다. 본 실험에서는 와환의 병진속도를 측정하였으나, 이로부터 순환의 크기를 유추하기 위해 순환의 크기 Γ 와 같은 차원 $[L^2/T]$ 을 가지는 병진속도와 와환의 폭 D 를 곱한 값을 순환의 크기로 정의하여 사용하였다.

Figure 8 에 본 실험에서 정의하여 계산한 순환과 그에 따른 화염속도의 변화를 표시하였다.

이는 화염속도가 순환의 크기에 선형적으로 비례하는 결과를 보여주는데, 이 결과는 McCormack^[7] 과 Ishizuka^[9] 의 예혼합 화염에 대한 실험결과와 일치한다. 또한 Choi 등^[12] 의 1 차원 비예혼합 와환에서의 화염전파에 대한 실험 결과와도 일치한다. 비예혼합 와환에서는 연료와 산화제의 혼합

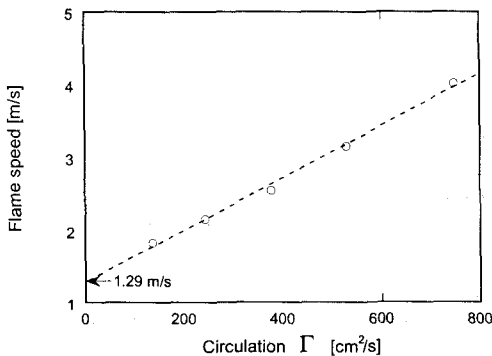


Fig. 8 Relation between circulations and flame speeds.

문제가 있으므로 추가적인 화염속도 제한요소로 작용할 수 있으나, 본 실험의 결과는 이 혼합의 문제가 화염의 전파에 크게 영향을 미치지 않는 것을 보여준다. 연료와 산화제의 혼합정도가 화염의 모양에는 영향을 주지만, 화염 스스로 공기와 연료가 가장 적절한 상태로 혼합되어 있는 곳을 찾아 전파되므로 전체 전파속도는 예혼합 와환에서와 큰 차이를 보이지 않는다는 것을 알 수 있다.

이상의 결과는 비예혼합 와환 내부에서 화염 전파가 당량비가 일정한 궤적을 따라 일정한 속도로 진행되며, 이 궤적은 예혼합기의 화염 전파특성상 이론 당량비를 이루는 지점들의 연결이기 때문으로 유추된다.

화염 속도가 순환에 대하여 선형적으로 비례한다는 결과를 이용하여, 직선 맞춤 (linear fitting) 하면 $S_f = 1.29 + 0.00359 \times \Gamma$ 와 같이 된다. 여기서 S_f 는 화염전파 속도 [m/s] 이며, Γ 는 본 실험에서 정의된 순환의 크기 [cm²/s] 이다. 이 때, $\Gamma \rightarrow 0$ 으로 외삽 (extrapolation) 할 경우 즉, 유동장의 회전에 의한 화염 가속 효과가 존재하지 않는 경우에는 화염 속도가 1.29 m/s 의 값을 가진다. 이는 프로판의 층류화염 전파속도 (laminar burning velocity) 0.44 m/s 보다 더 큰 속도로 화염이 전파됨을 보여준다.

이를 해석하기 위해서 먼저 와환 내에서 농도장이 층상화되어 있다는 것을 고려하였다. 다시 말해, 외부 공기와 층을 이루고 있는 곳 가까이에 이론 당량비 지점이 나타나고, 본래 순수한 연료만 존재하던 와환 내부는 과농한 영역이 되며, 공기와 층을 이루고 있는 와환 외부는 희박한 영역이 되어 층상화된 농도장을 가지게 된다. 농도장이 층상화된 경우, 일반적으로 화염의 선단은 삼지 화염 (tribrachial flame) 의 형태로 전파하는 특성을 가지게 된다^[16]. Ruetsch 등^[17] 은 차원 해석을 통해 삼지화염의 화염속도와 층류화염 전파속도가 $S_{tri} / S_L^0 \sim \sqrt{\rho_u / \rho_b}$ 과 같은 관계를 가짐을 유도하였다. 여기서, S_{tri} 는 삼지 화염의 화염속도, S_L^0 는 층류화염 전파속도, ρ_u 는 미연 가스 밀도, 그리고 ρ_b 는 기연가스 밀도를 나타낸다. 프로판의 경우, 화염의 온도를 단일 화염 온도인 2270K 로 가정하고 이 식을 이용하여 화염 속도를 구하면 화염 속도가 약 1.24 m/s 가 된다. 본 실험결과를 유동장의 회전에 의한 화염가속효과가 존재하지 않는 경우로 화염 속도 1.29 m/s 와 근사한 값을 나타낸다.

한편, Choi 등^[12]의 1차원 비예혼합 화염전파의 결과와 비교해 보면 유동장 회전으로 인한 화염가속 효과가 없는 경우 1.37 m/s의 화염속도를 가지는 것으로 밝혀졌으며, 이는 1차원 노즐에 의해 발생한 와환이 완전한 형태의 폐관을 이루면서 폐관 내에서의 화염 전파시에 발생하는 화염가속효과가 추가됨으로 인해 화염속도 증가에 부가적인 효과가 발생한 것으로 설명하였다. 본 연구에서는 2차원 노즐 양쪽에 설치한 윈도우에 의해 와환 끝단의 형상이 조금씩 일그러지며 완전 폐관의 형성이 이루어지지 못하여 폐관에서의 화염가속효과가 줄어들어 화염속도는 Choi 등의 연구결과보다 감소한 것으로 생각된다.

4. 결론

비예혼합 연료를 스피커의 단발 왕복운동을 이용하여 노즐을 통해 대기 중으로 분출시킬 때 발생하는 와환의 내부에 레이저를 이용하여 점화시키고, 화염이 와환을 따라 전파되는 과정을 관찰하였다.

비반응 유동장의 가시화 결과 병진속도는 스피커의 움직임에 맞춰 스피커가 상승, 하강 운동을 할 때에는 각각 증가, 감소하는 경향을 보였다. 하지만 스피커의 움직임이 멈춘 후에는 그 값이 일정하게 유지되었다. 와환 내부 직경은 스피커의 운동에 무관하게 외부 공기의 유입에 따라 시간이 경과할수록 점점 커지게 되고, 후류 폭은 연료의 와환 내부로의 이동으로 인해 점점 작아지는 경향을 보였다.

고속도 CCD 카메라로 화염이 전파되는 모습을 관찰하여 화염속도를 구하였다. 점화 후 5 ms까지는 화염핵이 발달해 나가며 정상상태에 도달할 때까지 화염이 가속되다가, 정상상태에 도달하면 일정한 속도로 전파가 이루어진다. 또한, 와환 내부에서의 점화위치 변경은 화염 속도에 영향을 미치지 못하였다.

스피커의 진폭 값에 따라 와환의 병진속도가 증가하였으며, 순환의 크기도 이에 비례해 커졌다. 화염속도는 순환의 크기에 선형적으로 비례하였다. 이런 결과는 기존의 가연한계 이내의 예혼합기로부터 생성된 와환에서의 화염 전파 경향과 일치하였다.

순환의 크기가 0이 될 때, 즉 유동장의 회전에 의한 화염 가속효과가 존재하지 않는 경우에도 층류화염 전파속도보다 상당히 큰 화염속도 값을 가지며, 농도장이 층상화된 경우 생성되는 삼지화염의 화염속도와 거의 일치하였다. 따라서, 와환 내

부에서 화염이 삼지 화염의 형태를 가지며 전파되는 것으로 유추된다.

참고문헌

- (1) Jarosinski, J., Lee, J., H., S., and Knystautas, R., 1988, "Interaction of a Vortex Ring and a Laminar Flame", *22nd symp. (international) on Combustion*, The combustion institute, Pittsburgh, p. 505.
- (2) Peters, N., Williams, F., A., 1988, "Premixed Combustion in a Vortex", *22nd symp. (international) on Combustion*, The combustion institute, Pittsburgh, p. 495.
- (3) Lamb, H., 1932, *Hydrodynamics*, 6th ed., Dover publication, p. 236.
- (4) Didden, N., 1979, "On the Formation of Vortex Rings: Rolling-up and Production of Circulation", *J. App. Mathe. and Phys.*, vol. 30, p. 101.
- (5) Maxworthy, T., 1997, "Some Experimental Studies of Vortex Rings", *J. of Fluid Mech.*, vol. 81, p. 465.
- (6) Takagi, T., Okamoto, T., Ohtani, A. and Komiya, M., 1988, "Measurements of Velocity and Concentration in Transient Jet by LDV and Rayleigh Scattering", *JSME int. J. Series II*, vol. 31, p. 119.
- (7) McCormack, P.D., Scheller, K., Mueller, G. and Tisher, R., 1972, "Flame Propagation in a Vortex Core", *Combust. Flame*, vol. 19, p. 297.
- (8) Chomiak, J., 1977, "Dissipation Fluctuations and the Structure and Propagation of Turbulent Flames in Premixed Gases at high Reynolds Numbers", *16th symp. (international) on Combustion*, The combustion institute, Pittsburgh, p. 1665.
- (9) Ishizuka, S., 1990, "On the Flame Propagation in a Rotating Flow Field", *Combust. Flame*, vol. 82, p. 176.
- (10) Atobilo, R., Z., and Britter, R., E., 1994, "On Flame Propagation Along Vortex Tubes", *Combust. Flame*, vol. 98, p. 220.
- (11) Asato, K., Wada, H., Hiruma, T. and Takeuchi, Y., 1997, "Characteristics of Flame Propagation in a Vortex Core: Validity of a Model for Flame Propagation", *Combust. Flame*, vol. 110, p. 418.
- (12) Choi, H. J., Ko, Y. S. and Chung, S. H., 1998, "Flame Propagation Along a Nonpremixed Vortex Ring", *Combust. Sci. and Tech.*, vol. 139, p. 277.
- (13) Ogawa, A., 1993, "Vortex Flow", CRC press, p. 153.
- (14) Hasegawa, T., Hongo, K., Ishino, Y. and Ohiwa, N., 1997, "Interaction of Strong Vortex ring with a Premixed Flame", *Proceedings of The first Asia-Pacific Conference on Combustion*, p. 150.
- (15) Ashurst, W., T., 1996, "Flame Propagation Along a Vortex: the Baroclinic Phsh", *Combust. Sci. Technol.*, vol. 112, p. 175.
- (16) Kioni, P., N., Rogg, B., Bray, N., C. and Linan, A., 1993, "Flame Spread in Laminar Mixing Layers: The Triple Flame", *Combust. Flame*, vol. 95, p. 276.
- (17) Ruetsch, G., R., Vervisch, L. and Linan, A., 1995, "Effect of Heat Release on Triple flames", *Phys. Fluids*, vol. 7, p. 1447.