

# 다양한 형상의 관내에서 화염전파시 튜립화염으로 전환되는 시간과 거리

정상훈\*\* · 이은도\*\* · 김남일\*\* · 신현동\*\*

## Time and distance of tulip-inversion in various shaped tube

Sang-Hun Jung, Uen-Do Lee, Nam-IL Kim, Hyun-Dong Shin

### ABSTRACT

The tulip-inversion of flames in half-open tubes was investigated experimentally. Experiments was carried out in tubes with various shapes. The image of a flame propagation were pictured by HICCD(High speed intensified CCD) and the dynamic pressure of tubes was measured by a piezo pressure sensor. By analyzing the images of the flame propagation, we found the time and the distance for the occurrence of tulip-inversion. Regardless of the shapes of tubes, time of tulip-inversion are similar and inversely proportional to the burning velocity. But distances have different tendency. In a straight tube, the distance of tulip-inversion increases when the burning velocity increases. But in a converging tube, the distance of tulip-inversion decreases when a burning velocity increases. And the distance of tulip-inversion in a converging tube is much smaller than the distance of tulip-inversion in a straight tube. These results are caused by the deceleration of a flame when the diameter of a hole in open-side of a tube is small. The deceleration causes little effect on the time of tulip-inversion.

### 기 호 설 명

$\Phi$  : 당량비(equivalence ratio)

**Key Words** : Tulip-inversion, Converging tube, Burning velocity, Dynamic pressure, Flame propagation

### 1. 서 론

한쪽 혹은 양쪽이 밀폐된 관에서 화염이 전파

할 경우 조건에 따라서 Finger flame에서 튜립화염(tulip flame)으로의 전환이 발생할 수 있다.[1-2] 튜립화염은 Ellis[1]가 처음으로 소개하였으며, 화염면의 곡률의 방향이 Finger flame과는 반대로써, 화염면이 가연가스의 방향으로 움푹 들어간 형상을 하고 있다. 튜립화염은 관내전파 화염 중 가장 복잡한 형상을 가지고 있으며, 튜립화염으로 전환시 화염의 특성에 큰 변화가 생기므로

\*\* 한국과학기술원 기계공학과

화염의 전파특성을 이해하는데 꼭 필요한 부분이라 할 수 있다. 따라서 튜립화염으로 전환하는 과정에 대해서 많은 기존 연구자들이 관심을 가지고 여러 가설들을 제시해왔다. 1986년 Dunn-Rankin[3]은 화염면 앞쪽에서의 축방향 속도의 반경방향변화율(radial gradient)에 의하여 튜립화염이 형성된다고 주장하였다. Oppenheim[4]은 미연소가스에서의 와도(vorticity)형성이 원인이라 하였으며, Zoolinyan[5]은 압력장과 밀도장의 상호작용에 의하여 생성되는 불안정성 즉 Intrinsic Darrieus-Landau instability[6][7]가 튜립화염 형성의 주 원인이라 하였다.

Markstein[8]은 화염면에 충격파(shock wave)를 가했을 때 튜립화염과 유사한 현상이 발생한다는 것을 실험으로 보였다. C.Clanet과 G.Searby[9]는 한쪽이 열려있는 직관에서 실험을 통하여 튜립화염으로 전환하는데 걸리는 시간이 화염 전파시 최초로 벽면에 닿는 시간에 비례한다는 사실을 보였다. 그리고 압력신호를 분석하여, 압력이 최초의 최대값이 되는 때가 화염이 벽에 닿는 순간임을 보였고, 튜립화염이 형성된 후에는 압력신호의 진동이 생기게 되고 이 영역은 음향장(acoustic field)에 의하여 지배된다고 하였다.

튜립화염에 대한 기존의 연구는 주로 계산에 대한 연구가 대부분이고, 관의 형상이나 압력조건을 바꾸어 주었을 경우에 튜립화염의 실험에 대한 연구는 거의 전무하다. 본 연구에서는 여러 다양한 형상의 관에서의 실험을 통하여 압력조건과 관의 형상이 변할 경우의 튜립화염으로의 전환과정에 대해서 알아보려고 하였다. 직관과 좁아지는 관 그리고 오리피스를 설치한 직관을 제작하여 튜립화염으로의 전환이 일어나는 시간과 거리를 측정하고 전환과정의 변화를 살펴보았다.

## 2. 실험장치 및 실험방법

실험장치는 전체적으로 화염이 전파해 나가는 유리관, 혼합기를 유리관으로 공급할 때 통로의 역할을 하고 점화에 필요한 전극과 압력센서가 장착되어 있는 이동블럭, 혼합기를 공급해주는 유량계 그리고 점화에 필요한 전력을 공급해주고 점화가 일어나게 해주는 점화장치로 구성되어 있다. 유량계를 통해 공급되는 프로판과 공기는 Mixing chamber를 통하여 충분히 혼합된 후에 이동블럭을 통하여 관내에 채워진다. 관내에 혼합기체를 충분히 채운 후, 관내로의 혼합기의 유입을 막은 후 점화시켰다. 점화는 이동블럭의 상단에 있는 두개의 전극에 의한 스파크점화(Spark ignition)에 의하여 이루어진다. 점화가

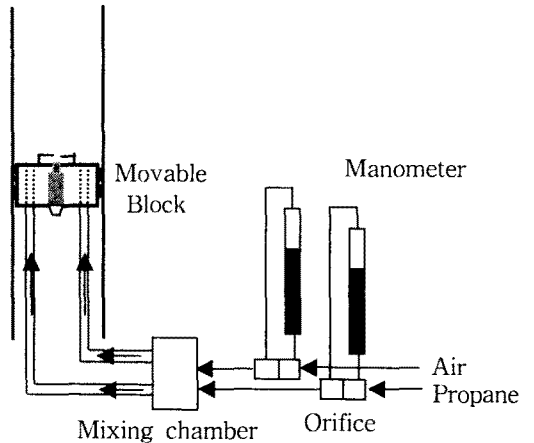
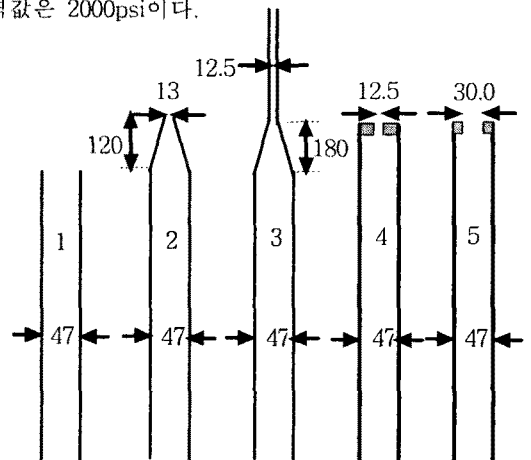


Fig.2-1 Schematic of experimental apparatus

일어나면 화염은 전극사이에서 발생하여 관의 열려있는 출구쪽을 향하여 전파해 나간다. 이동블럭은 상하로의 이동이 가능하여 실험시 화염이 전파해나가는 관의 길이를 조절할 수 있었다. 화염이 전파하는 모습을 HICCD(High speed intensified CCD camera)로 촬영하였다. 사용한 모델은 Kodak Ectapro EM으로써, 240\*190의 화소를 가지며 최소 1/4000s간격으로 화염의 진행모습을 촬영하였다. 이동블럭의 상단부분에 압력센서를 설치하여 화염이 전파하는 동안의 Dynamic pressure를 측정하였다. 압력센서는 PCB Piezotronics사의 106B모델을 사용하였다. 이 경우 압력센서의 Sensitivity는 300mv/psi이고, 측정 가능한 최대 압력값은 2000psi이다.



1. Tube A (Straight tube)
  2. Tube B-1 (Converging tube 1)
  3. Tube B-2 (Converging tube 2)
  4. Tube C-1 (Straight tube with 12.5mm orifice)
  5. Tube C-2 (Straight tube with 30.0mm orifice)
- 단위 : mm

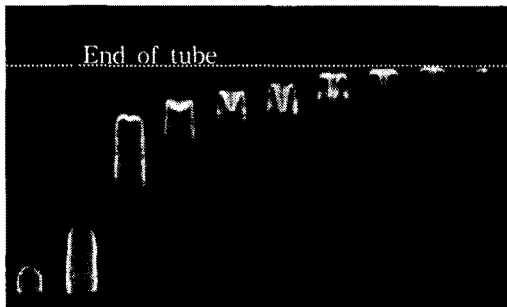
Fig.2-2 Various shaped tub

여러가지 출구조건에서 튜립화염을 관찰하기 위하여 Fig.2-2의 다섯 개의 관을 제작하였다. 다섯 개의 관은 모두 안지름이 47mm인 Pyrex직관을 가공하여 만들었으며 관의 모양에 따라서 A, B, C로 나누었다. A는 직관이고, B는 좁아지는 관(converging tube), C는 오리피스(orifice)를 관 내에 설치한 직관이다. 그리고 열려 있는 관 끝 부분의 조건에 따라서 B-1과 B-2 그리고 C-1과 C-2로 세분하였다. 관 B-1, 관 B-2, 관 C-1의 세가지 경우는 열려있는 관의 출구 쪽에서의 안지름이 비슷하기 때문에 이들의 결과를 비교함으로써 관의 출구 형상이 튜립화염의 전환과정에 끼치는 영향을 분석할 수 있다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 화염의 전파모습

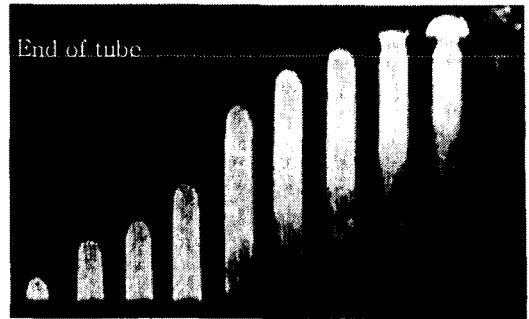
Fig.3-1과 Fig.3-2는 35cm의 직관내에서, 화염이 전파해나가는 모습을 시간진행에 따라 배열해 놓은 것이다. Fig.3-1은 당량비가 0.7인 경우로써 화염이 관의 출구에 이르기 전에 튜립화염으로의 전환이 일어났다. Fig.3-2는 당량비가 1.0인 경우로써 튜립화염으로의 전환이 채 일어나지 못하고 화염이 관 밖으로 나가고 있음을 알 수 있다. 이런 결과는 연소속도가 증가함에 따라서 튜립화염으로의 전환이 일어나는 거리가 길어진다는 기존연구의 결과와 일치한다.



23 33 52 57 64 68 74 79 85 91  
Time after ignition (ms)

Fig.3-1 Flame propagation in tube A  
( Tube length : 35cm ,  $\phi$  : 0.7 )

화염이 전파해 나가면서 화염면의 면적이 지수함수로 증가하기 때문에 전파거리 또한 지수함수로 증가한다.[9] 초기에 가속하던 화염은 어느순간 갑자기 감속이 발생하면서 튜립화염으로 변화해 나간다. 초기의 화염전파거리가 지수함수를 보이는 결과는 직관의 경우에도 마찬가지로서[9] 관의 형상에 의하여 영향을 받지 않는다.



8.5 12.8 14 15.7 18.3 19.5 20.3 21 21.8 24.3

Time after ignition (ms)

Fig.3-2 Flame propagation in tube A  
( Tube length : 35cm,  $\phi$  : 1.0 )

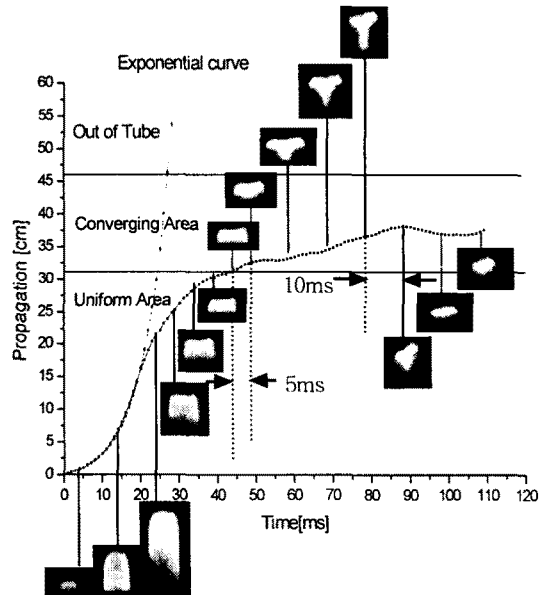


Fig.3-3 Flame propagation in tube B

#### 3.2 튜립화염으로 전환되는 시간과 거리

Fig.3-4는 직관에서 튜립화염으로의 전환이 일어나는 시간과 거리를 연소속도에 대해서 나타낸 그래프이다. 실험결과 튜립화염으로의 전환이 일어나는 시간은 연소속도에 반비례하고, 튜립화염으로 전환이 일어나는 거리는 연소속도가 증가함에 따라 커졌다. 즉 연소속도가 커질 경우, 튜립화염으로 전환하는 시간은 선형적으로 감소하지만 전환이 일어나는 거리는 늘어나게 된다. 이런 결과가 나타난 원인은, 직관에서 화염이 전파할 때 연소속도가 증가하면, 더 많은 혼합기가 연소과정에 참여하기 때문에 화염의 강도가 증가하고 이로 인하여 화염은 빠른 가속을 하게 되기 때문이다.

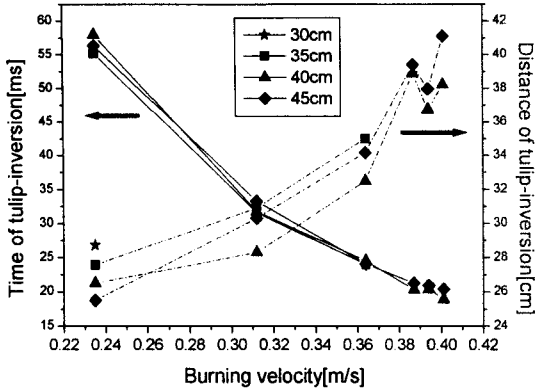


Fig.3-4 Time and distance of tulip-inversion in tube A

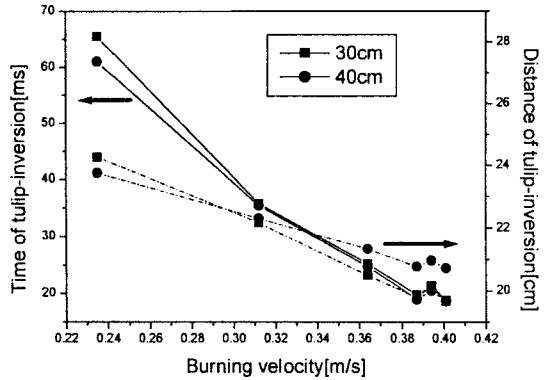


Fig.3-7 Time and distance of tulip-inversion in tube C-1

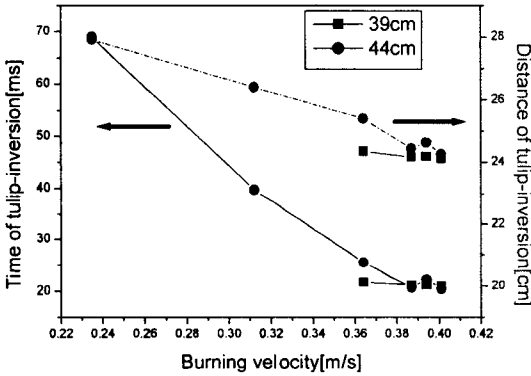


Fig.3-5 Time and distance of tulip-inversion in tube B-1

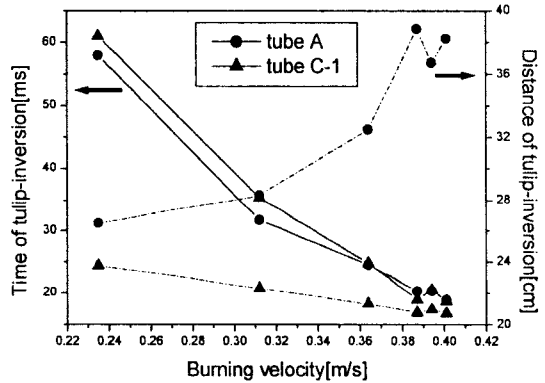


Fig.3-8 Time and distance of tulip-inversion ( Comparison between tube A and tube C-1)

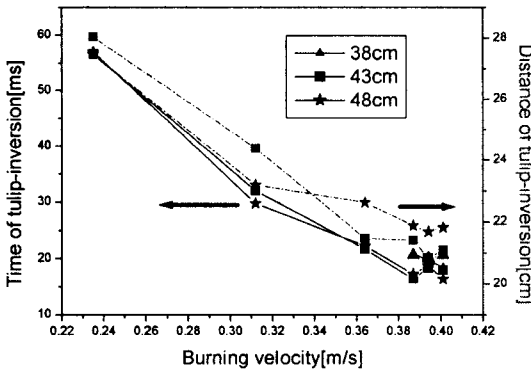


Fig.3-6 Time and distance of tulip-inversion in tube B-2

관 B-1(관 끝의 안지름 : 13mm), 관 B-2(관 끝의 안지름 : 12.5mm)의 각각의 경우에 대해서 튜립화염으로 전환하는 시간과 거리를 측정 한 결과를 Fig.3-5 ~ Fig.3-7에 도시하였다. 관 C-2(관 끝의 안지름 : 30mm)는 실험결과 직관의 경우와 비슷한 화염 전파 특성을 보였다. 위의 관 끝의 지름이 작을수록 조건에서, 튜립화염으로 전환하는데 걸리는 시간과 연소속도는 반비례하는 경향을 보였고, 이런 경향은 직관의 경우와 같았다. 그리고 위의 세가지 관에서 연소속도가 같은 경우 튜립화염으로 전환하는데 걸리는 시간은 직관의 결과와 비슷했다. 그러나 튜립화염으로 전환하는 곳까지의 거리와 연소속도는 반비례하는 경향을 보였는데, 이 결과는 직관의 경우와는 상반되는 결과이다. Fig.3-8은 직관의 경우와 관 C-1의 경우를 비교한 것으로 이러한 경향을 확실하게 보여준다. 두개의 관에서 튜립화염으로의 전환거리가 상당한 차이가 났는데, 관 C-1의 경우가 직관에 비해 전환거리가 훨씬 짧았다. 이런 결과가 나타난 원인

은 관 출구의 지름이 작아져서 생기게 된 압력의 증가 때문이다. 직관의 경우엔 연소속도가 증가함에 따라서 화염의 가속에 커지게 되지만 관 출구의 지름이 작은 경우에는 가연가스의 팽창에 의한 화염의 가속을 관후단의 압력증가가 억제하기 때문이다.

다시 말하면 튜립화염으로 전환하는 거리는 출구조건에 의해 영향을 받지만 튜립화염으로 전환하는 시간은 출구조건에 영향을 적게 받는 것이므로 화염이 반경방향으로 진행되는 속도가 연소속도에 비례한다는 사실을 감안한다면, 튜립화염으로 전환하는데 걸리는 시간은 연소속도에 반비례하게 된다. 이는 C.Clanet[9]이 발표한 실험결과와 일맥상통하는 결과로 화염과 관 사이의 상호작용이 튜립화염의 생성에 밀접한 관계가 있음을 보여주는 것이다.

본 실험에선 다양한 형상의 관에서도 그런 반비례관계가 성립한다는 것을 보였다. 관내의 압력이 높은 경우에(관 출구가 좁은 경우) 튜립화염으로 전환하는 거리는 상당히 짧아졌지만 전환시간은 크게 변하지 않았다. 즉 관의 형상이나 압력조건은 튜립화염의 형성과정에 큰 역할을 하지 않고 단지 화염의 진행을 늦춰 주는 역할을 할 뿐이며 이런 화염의 감속은 튜립화염의 형성시간에 별 영향을 끼치지 못했다.

**3.3 압력**

앞에서 살펴본 바와 같이 튜립화염의 생성과정에서 연소속도가 중요한 역할을 한다. 연소속도와 더불어 관내의 압력조건 또한 튜립화염의 생성과정에 대한 중요한 정보를 제공한다. 압력은 화염의 연소속도와 관 출구의 경계조건에 의하여 결정되게 된다. Fig.3-9는 관 A, 관 C-1, 관 C-2의 세가지 경우의 서로 다른 경계조건에 따른 압력의 그래프이다. 오리피스를 설치한 관 C-1의 경우가 직관인 관 A에 비하여 관내압력이 훨씬 높다는 사실을 알 수 있다. 관 C-1의 경우의 압력의 최대값은 관 A인 경우의 압력의 최대값의 25배 정도였다. 또한 관 A의 경우와 관 C-2의 경우에는 모두 진동영역이 존재하지만 관 C-1의 경우에는 최대값이 이르렀던 압력이 떨어진 후에 생기는 진동영역이 존재하지 않았다. 이런 차이점은 관의 출구조건이 진동영역을 지배하는 관의 음향학적 특성에 큰 영향을 주기 때문이다.

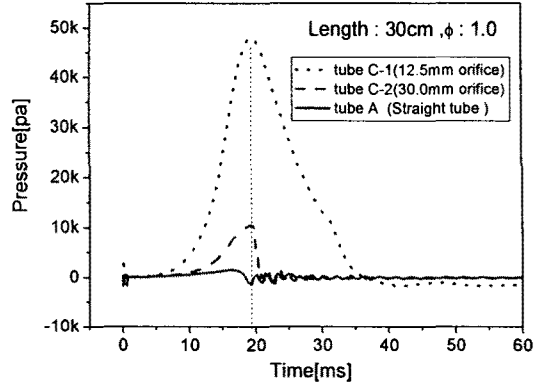


Fig.3-9 Pressure of flame in tube A, C-1, C-2

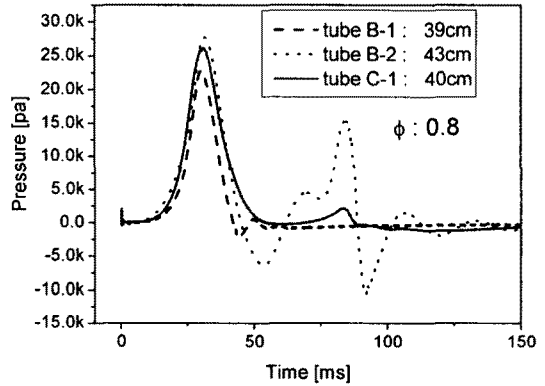


Fig.3-10 Pressure of flame in tube B-1, B-2, C-1

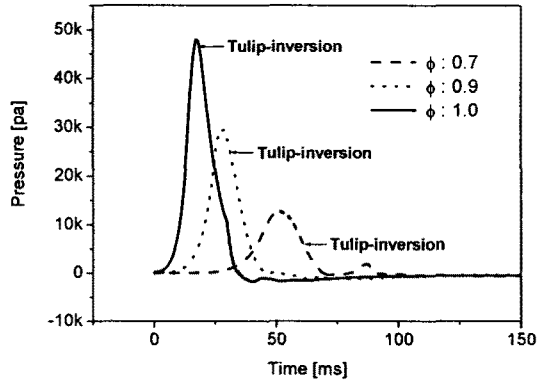


Fig.3-11 Pressure in tube C-1

Fig.3-10은 출구에서의 조건이 유사한 관 B-1, 관 B-2, 관 C-1의 세가지 경우에 당량비가 0.8일 경우의 압력변화를 보여준다. 유사한 출구 조건과 동일한 연소속도에 대해서는 압력변화가 상당히 유사하다. 이는 앞에서 보인바 있는 튕립 화염으로의 전환시간과 거리가 유사하다는 결과와 상통한다. 실제로 관 B-1과 관 B-2를 비교해 봤을 경우, 화염이 좁아지는 영역에 이르기 전까지는 거의 비슷한 거동을 보인다. 하지만 관 B-2의 경우, 좁아지는 영역을 진행할 때 관 B-1의 경우보다 더 큰 가속을 하고 화염의 모습에도 차이점이 있었다. 이런 결과는 화염이 출구에 도달하지 전까지 출구에 의한 영향은 대부분 출구의 크기에 의한 효과가 지배적이며, 다양한 출구 근처의 관 형상에 의한 효과는 화염이 출구 근처에 도달했을 때 영향을 끼치기 시작하기 때문이다.

튕립화염으로의 변화는 압력이 최대값인 시점에서 시작하여 압력이 감소하는 도중에 튕립화염을 관찰할 수 있다. 이러한 경향은 실험에 사용한 어떤 형태의 관에서도 마찬가지였다. 다만 당량비가 1에 가까워 질 경우 튕립화염으로의 전환이 발생하는 시간이 빨라져서 압력의 최대값에 점점 가까워 짐을 Fig.3-11에서 알 수 있다. 이는 변화된 압력, 유동장에 대한 화염의 모양변화 응답속도가 당량비 1 근처의 최대연소속도 조건에서 가장 빠르기 때문일 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 여러 다양한 형상의 관을 제작하여 여러 출구 조건에서 화염의 전파를 관찰하였다. 특히 튕립화염으로의 전환이 일어나는데 걸리는 시간과 그 곳에서의 위치 그리고 압력에 대한 데이터를 통하여, 다양한 조건들이 튕립화염의 형성과정에 미칠 수 있는 영향을 분석하고자 하였다.

1. 같은 당량비 하에서, 관의 형상에 관계없이 튕립화염으로 전환하는데 걸리는 시간은 비슷했고, 연소속도에 반비례하였다. 이것은 관의 출구가 좁아져서 생긴 압력의 변화가 튕립화염으로의 전환시간에 별다른 영향을 끼치지 않았기 때문이다.

2. 튕립화염으로의 전환이 일어나는 거리(점화점 기준)는 열린 출구의 조건에 따라서 큰 차이가 났다. 출구가 좁은 관의 경우 직관의 경우보다 튕립화염으로의 전환거리가 훨씬 짧았다. 그리고 직관의 경우엔 연소속도가 증가함에 따라서 튕립화염으로의 전환거리가 증가하지만 출구의 지름이 작은 경우에는 연소속도가 증가하면 튕

립화염으로의 전환거리는 감소한다. 이것은 관 출구의 지름이 작은 경우에는 관내의 압력이 커지게 되고 이것이 화염이 축 방향으로 전파해 나가는 것을 억제하는 역할을 하기 때문이다.

3. 관의 형상과 출구조건에 상관없이 튕립화염으로의 전환시간은 연소속도에 의해서만 결정된다. 이는 화염이 반경방향으로 전파하여 벽에 닿는 시간과 튕립화염의 생성과정이 깊은 상관관계를 가짐을 보여주는 결과이다.

4. 출구의 지름이 비슷하다면 압력과 화염의 전파모습은 점화 후 초기엔 비슷한 값을 보였다. 하지만 튕립화염으로의 전환한 이후에 관의 형상에 따라서 다른 화염의 전파모습과 압력값을 보이기도 하는데 이것은 관의 출구 형상에 따라서 음향학적 특성이 달라지기 때문이다.

#### 후 기

본 연구를 위한 연소기술연구센터(CERC) 및 BK21의 연구비 지원에 감사드립니다.

#### 참고문헌

- [1] Ellis, O. C. d.C., *J. Fuel Sci.* VII:502-508 (1928)
- [2] Guenoche, H., in *Non-Steady Flame Propagation* (Markstein, G. H. Ed.), Pergamon, London(1964)
- [3] Dunn-Rankin, D., Barr, P. K., and Sawyer, R. F., *Twenty-First Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, Pittsburgh, 1986, pp.1291-1301
- [4] Oppenheim, A. K., and Ghoniem, A. F., in *21st Aerospace Sciences Meeting*, AIAA-83-0470, Reno, Nevada, 1983
- [5] Zoolinyan, G.A., Makhviladze, G. M., and Meilikhov, V.I., *Numerical Investigation of Laminar Flame Form and Structure*, Institute for Problems in Mechanics, Russian Academy of Science, Moscow, Reprint No.499, 1991
- [6] Landau, L. D., *Acta Physicochim.* 19:77-85(1944)

- [7] Darrieus, G., Unpublished work communicated *La Technique Moderne*, Paris, 1938 and 6<sup>eme</sup> *Conference Internationlae de Mecanique Appliquee*, Paris 1946
- [8] Markstein, G.H., Sixth International Symposium on Comustion, Reinhold, New York, 1956, pp.387-398
- [9] Christophe C., and Geoffrey S., In *Combustion and Flame* 105: 225-238 (1996)