

# 정상 및 미소중력장에서 프로판 층류 제트 삼지 화염의 전파속도에 관한 실험적 연구

이종수\* · 원상희\* · 진성호\* · 정석호\*\*\* · O. Fujita \*\*\* · K. Ito\*\*\*

## Normal and Micro Gravity Experiments on Propagation Speed of Tribrachial Flame of Propane in Laminar Jets

J. Lee, S. H. Won, S. H. Jin, S. H. Chung, O. Fujita and K. Ito

### ABSTRACT

The propagation speed of tribrachial flame in laminar propane jets has been investigated experimentally under normal and micro gravity conditions. The displacement speed was found to vary nonlinearly with axial distance because flow velocity along stoichiometric contour was comparable to the propagation speed of tribrachial flame for the present experiment. Approximate solutions for velocity and concentration accounting density difference and virtual origins have been used in determining the propagation speeds of tribrachial flame. Under micro gravity condition, the results showed that propagation speed of tribrachial flame is largely affected by the mixture fraction gradients, in agreement with previous studies. The limiting maximum value of propagation speeds under micro gravity conditions are in good agreement with the theoretical prediction, that is, the ratio of maximum propagation speed to the stoichiometric laminar burning velocity is proportional to the square root of the density ratio of unburned to burnt mixture.

**Key Words** : Propagation speed(전파속도), Tribrachial flame(삼지화염), Laminar jet(층류 제트), Microgravity(미소중력장), Mixture fraction gradient(혼합분율 구배)

### 1. 서론

부분 예혼합 조건에서 혼합분율 구배가 존재하는 경우, 화염선단은 희박, 과농 예혼합화염 및 확산화염이 동시에 존재하는 삼지화염의 구조를 가진다. 이러한 삼지화염의 특성을 밝히기 위하여, 이차원 혼합층[1-4]이나 층류제트[5-9]에서의 특성에 대한 많은 연구가 수행되어왔다. 특히 관심이 되고 있는 분야는 삼지화염이 혼합층에서 화염의 안정화에 미치는 영향과 삼지화염의 전파속도에 관한 것이다.

층류제트 부상화염의 경우, 삼지화염의 전파속

도와 유동속도가 균형을 이룸으로써 화염이 안정화된다는 이론을 바탕으로 부상높이에 대한 해석이 수행되었다. 삼지화염의 전파속도가 일정하다는 가정하에, 제트속도, 노즐 직경, 공기 희석, 질소 희석 및 Schmidt 수가 부상높이의 변화에 미치는 영향에 대한 정성적인 해석 결과가 발표되었다[1-4]. 하지만, 보다 정확한 정량적인 해석을 수행하기 위해서는 삼지화염의 전파특성에 관한 정보를 알아야만 한다.

게다가, 삼지화염의 전파특성을 파악하는 것은 그 자체로써 삼지화염 특성을 이해하기 위해 필요한 일이다. 이론해석이나 수치해석적 방법을 이용한 많은 연구를 통하여 Lewis 수[5], 혼합분율 구배[6-8], 열발생[9] 및 부력[10] 등이 삼지화염에 미치는 영향에 대하여 알려지고 있다. 삼지화염의 전파속도는 혼합분율 구배(mixture fraction gradient)와 열발생(heat release)으로 인

\* 서울대학교 대학원 기계항공공학부

\*\* 서울대학교 기계항공공학부

† 연락처자, shchung@snu.ac.kr

\*\*\* Division of Mechanical Science, Hokkaido University

## 기 호 설 명

$d$	: 노즐 직경	$X$	: 무차원 축방향거리 ( $=x/d/Re$ )
$r$	: 반경방향 거리	$X_v$	: 속도 가상원점
$r_0$	: 노즐 반경	$X_{v,F}$	: 농도 가상원점
$R$	: 무차원 반경 ( $=r/r_0$ )	$Y$	: 화학종 질량분율
$S$	: 전파속도	$\nu$	: 동점성 계수 [ $m^2/s$ ]
$t$	: 시간	$\rho$	: 밀도 [ $kg/m^3$ ]
$u$	: 축방향 속도	하첨자	
$u_0$	: 제트속도 [ $m/s$ ]	0	: 노즐 출구
$U$	: 무차원 축방향속도 ( $=u/u_{m,0}$ )	$\infty$	: 대기 조건
$m$	: 중심축		
$st$	: 이론당량비		
$tri$	: 삼중점		

한 유동 재배열 효과(flow redirection effect)에 의해 크게 영향을 받는다는 연구결과가 발표되었으며[6-9], 수치해석을 통한 연구결과를 분석하면서, 혼합층의 두께가 무한히 커서 삼지화염이 최대 전파속도를 갖는 경우, 삼지화염의 최대속도와 층류화염 연소속도의 비는 미연 가스와 기연 가스의 밀도비의 제곱근과 같다는 이론적 예측결과가 보고되었다[9]. 이 결과에 의하면, 메탄이나 프로판 같은 연료를 사용하는 경우 삼지화염의 최대 전파속도는 약 1 m/s 에 상당한다.

이와 같이 삼지화염의 전파속도에 대하여 이론해석이나 수치해석을 통한 많은 연구가 진행되어 왔으나, 실험적인 연구결과는 많지 않다. 최근에 층류제트에서 메탄 삼지화염의 전파속도에 관한 실험결과가 발표되었다.  $d = 2.08$  mm 인 노즐을 이용하여 제트속도  $u_0$  범위가  $1.3 < u_0 < 3.5$  m/s 인 영역에서 실험을 수행하였다. 펄스 레이저를 이용하여 층류 메탄제트 후류에서 점화시킨후 전파되는 삼지화염으로부터, 제트가 상사성을 가진다는 특성을 이용하여 전파속도를 구하였으며, 그 결과 화염곡률과 혼합분율 구배가 전파속도에 미치는 영향에 대한 정량적인 분석이 가능하였다. 또한, 실험적으로부터 메탄제트에서 삼지화염의 최대전파속도가 0.96 m/s 가 된다는 것을 밝혔는데, 이는 이론적으로 예측한 1.09 m/s 와 유사한 값이다.

본 연구의 목적은 프로판 삼지화염의 전파속도를 실험적으로 구하는 것이다. 프로판의 밀도가 공기보다 커서 생기는 부력 때문에, 직경이 O(1 mm)의 노즐을 사용하면 상방향으로 작용하는 프로판 제트의 운동량과 하방향으로 작용하는 중력효과와 상쇄되어 프로판 제트가 더 이상 상방향으로 분사될 수 없는 지점에서 프로판이 중력방향으로 떨어지게 되어 제트가 안정적으로 유지되지 못하므로, 기존의 메탄 제트 연구에서 사용한 것과 같은 장치를 이용하여 실험을 하기는

곤란하다. 하지만, 기존의 메탄 제트에서 사용한 노즐보다 훨씬 작은 노즐을 사용한다면, 층류 영역에서 보다 높은 유속을 얻을 수 있으며, 이 경우 Froude 수  $u_0^2/gd$  로 대표되는 부력효과를 크게 감소시킬 수 있다. 이러한 점에 착안하여, 본 연구에서는 O(0.1 mm)의 작은 직경을 가진 노즐을 사용하여 정상 중력장에서 프로판 제트의 전파실험을 수행하였으며, 부력효과를 완전히 배제하기 위하여 일본 무중력 연구소 (MGLAB: Microgravity Laboratory of Japan)에서 5초간 미소중력장이 유지되는 자유낙하 실험장치(drop tower)를 이용하여 전파실험을 수행하였다.

## 2. 실험

실험장치는 노즐, 유량 제어장치, 가시화 장치로 구성하였다. 노즐은 내경  $d = 0.254$  mm 이고 노즐 출구에서 유동의 완전발달이 가능하도록 길이가 10 cm 인 스테인레스 강관(stainless steel tube)을 사용하였다. 연료는 화학적으로 순수한 프로판 ( $> 99\%$ )을 사용하였으며, 연료 유량을 제어하기 위하여 질량유속계(MKS)를 사용하였다.

정상중력장 실험에서 연료제트는 노즐로부터 60 mm 나 90 mm 하류에서 Nd:YAG 레이저 (Spectra-Physics, GCR-150)를 이용하여 점화시켰다. 레이저 파장은 532 nm 를 사용하였으며 펄스폭은 약 7 ns, 최대 출력은 360 mJ 이다. 초기에 7 mm 직경을 가진 레이저광을 f 200 mm 볼록렌즈를 이용하여 점화 위치에 집광시켰다.

화염 전파과정은 고속도 카메라 (Kodak, Ekta Pro SR-ULTRA) 을 이용하여 shadowgraphy 나 직접사진으로 포착한 후, PC 를 이용하여 분석하였다.

미소중력장 실험에서는 끝부분을 날카롭게 가공한 전극으로 이루어진 전기 점화기를 이용하여 연료제트를 점화시켰다. 정상중력장에서 전극의 위치와 존재가 전파특성에 미치는 영향을 검증하였으며, 그 결과 영향이 미미함을 확인하였다.

부력의 영향을 확인하기 위하여, 미소중력장에서 연료를 상향분사하는 경우, 정상중력장에서 연료를 상향, 하향분사하는 경우의 세가지 조건에 대하여 실험을 수행하였다.

### 3. 결과 및 분석

#### 3.1 화염 가시화와 이동속도

Fig. 1은 정상중력장에서 제트를 상향분사할 때 제트 유속  $u_0 = 6.5$  m/s (a), 7.6 m/s (b)인 경우 화염전파과정에 대한 직접사진이다. 숫자는 점화후 경과한 시간을 나타내며, 노즐로부터 거리  $x = 60$  mm 에서 점화하였다. 축대칭 화염이 노즐을 향해 전파하고 있으며, 화염 선단은 과농예혼합화염(RPF), 회박예혼합화염 및 확산화염(DF)을 가진 삼지화염의 형태를 보여주고 있다. 하향분사 경우, 기연가스의 부력에 의한 영향 때문에 확산화염이 좀 더 원형에 가깝게 커짐을 보여주고 있다.

이를 보다 상세히 살펴보기 위하여, 화염 전파 과정을 shadowgraphy 로 찍은 것을 Fig. 2에 나타내었다. 상향분사의 경우 (a) 기연가스가 후류로 배출되기 때문에, 레이저 점화에 의해 초기 화염핵(flame kernel)이 형성된 후, 상대적으로 잘 발달된 기연 지역이 나타남을 볼 수 있다.  $t = 240$  ms에서 화염은 노즐에 도착하여 전형적인 노즐 부착 확산화염이 된다. 반면에, 하향분사의 경우 (b) 기연가스가 배출될 수 없기 때문에 기연가스의 부력이 화염모양에 크게 영향을 미쳐 기연지역이 타원형으로 부풀어오름을 볼 수 있다. 따라서, 하향분사의 경우 유동조건을 정확히 규정하기 전에는 화염전파 속도를 신뢰성 있게 구하는 것은 무척 어려운 일이라는 것을 알 수 있다. 더군다나, 본 논문에서 나타내지는 않았으나 제트속도가 8 m/s 이상이 되면 점화위치에 따라 이동속도(displacement speed)가 변하는 현상이 발생한다. 이동속도(displacement speed)란 화염이 점화되어 노즐에 부착되는 과정에서 측정된 시간과 거리와의 관계에서 구한 속도를 의미한다. 즉, 이론당량비 계측을 따르는 연료 유동속도와 화염전파속도와와의 차이에 해당된다.

미소중력장에서 시간 및 거리에 따른 화염의 이동속도와 화염선단 거동의 일반적인 경향은 정상중력장에서 상향분사의 경우와 정량적인 값만이 다를 뿐 정성적으로는 동일하기 때문에, 상세

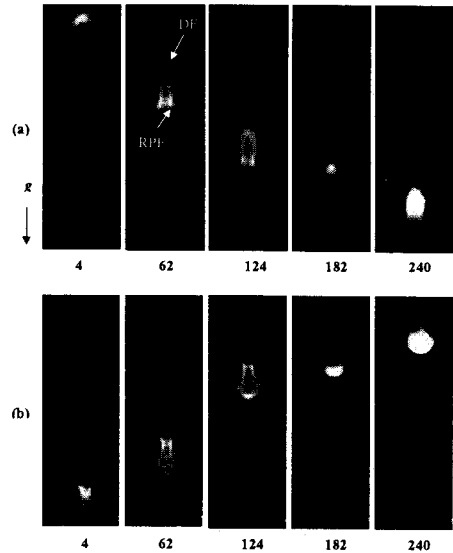


Fig. 1 Highspeed direct photographs showing flame propagation : (a) upward injection with  $u_0 = 6.5$  m/s and (b) downward injection with  $u_0 = 7.6$  m/s (numbers indicate time after ignition in [ms])

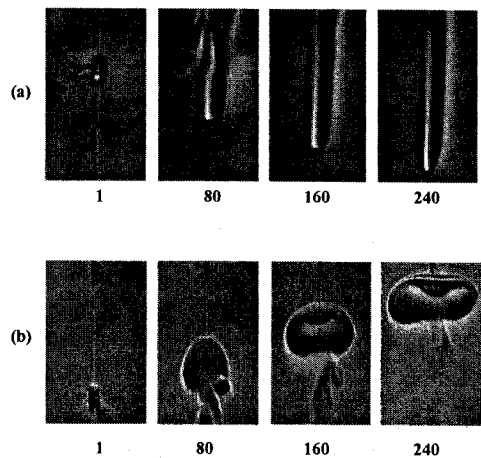


Fig. 2 Highspeed shadowgraphs showing the influence of buoyancy on flame propagation : (a) upward injection with  $u_0 = 6.5$  m/s and (b) downward injection with  $u_0 = 7.6$  m/s (numbers indicate time after ignition in [ms])

한 특성은 정상중력장에 대하여 논의하기로 한다. 정상중력장에서 제트를 상향분사하는 경우, 여러 가지 제트속도에서 시간에 따른 화염선단 높이 변화를 측정된 결과를 Fig. 3에 나타내었다.

화염핵이 형성되는 초기를 제외하고 실험결과는 신뢰성있게 재현되었다. 노즐 출구에서 제트속도가 증가함에 따라 이론당량비 궤적을 따르는 연료의 유동속도가 증가하기 때문에 화염전파에 소요되는 시간은 증가하게 되어 이동속도는 감소하게 된다.  $u_0 = 9.0, 0.6$  m/s 인 경우는 안정된 정지 부상화염이 존재한다[1,4].

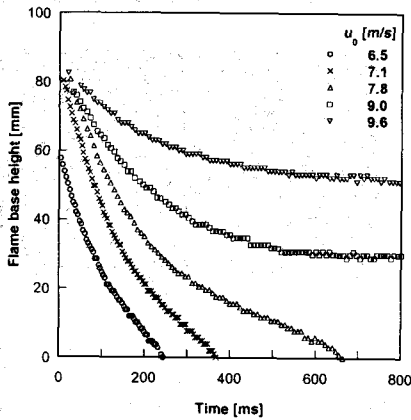


Fig. 3 Change of flame base height with

화염선단 높이는 시간에 따라 비선형적으로 감소한다. 이 결과는 메탄 제트에 관한 기존의 연구 결과[11]에서 화염선단 높이가 거의 선형적으로 변화하는 결과와 다른데, 이 이유는 다음과 같이 설명될 수 있다. 화염선단 높이는 이론당량비 궤적을 따르는 유동속도와 삼지화염의 전파속도와의 차이에 의해 변화하게 된다. 기존의 메탄제트에 관한 연구[11]에서는  $d = 2.08$  mm 인 노즐을 사용하였기 때문에 층류조건을 만족시키기 위해서는 제트속도 범위를  $1.3 < u_0 < 3.5$  m/s 로 한정할 수 밖에 없었다. 이 경우, 이론당량비 선을 따르는 축방향 유동속도  $u_{st}$  는  $O(0.1$  m/s) 가 되어, 삼지화염의 전파속도  $S_{tr}$  인  $0.7 \sim 0.9$  m/s 보다 훨씬 작게 된다. 또한, 메탄제트의 경우,  $Sc < 1$  인 연료의 농도장 및 속도장의 관계로부터  $u_{st}$  가 축방향 거리에 따라 단조 감소한다[13]. 반면, 축방향 거리가 증가할수록 반경방향 연료질량 분율 구배는 감소하고, 연료질량 분율의 감소는 삼지화염의 전파속도를 증가시키게 되므로, 축방향 거리의 증가에 따라 삼지화염의 전파속도는 증가하게 된다. 즉,  $S_{tr}$  와  $u_{st}$  의 차이가 크고 축방향 거리 증가에 따라  $S_{tr}$ ,  $u_{st}$  모두 단조증가하게 되므로,  $S_{tr}$  와  $u_{st}$  와의 차이에 의해서 생기는 이동속도는 거의 변화하지 않게 되어, 시간에 따라 화염선단 높이는 거의 선형적으로 감소하게 된다.

반면에, 본 실험의 경우 프로판을  $d = 0.254$

mm 인 노즐로 분사하였기 때문에 제트속도가  $6 \sim 10$  m/s 정도로 상대적으로 높으므로, 이론당량비 궤적을 따르는 축방향 유동속도는 삼지화염의 전파속도와 비슷한 크기를 가진다. 더군다나,  $Sc > 1$  인 프로판의 이론당량비 궤적을 따르는 유동속도는 단조변화하는 것이 아니라, 축방향거리가 증가함에 따라 노즐 근처에서는 급격히 증가하다가 특정한 축방향 거리에서 최대값을 가지고, 그 이후에 감소하는 분포를 보여준다[12,13]. 따라서, 본 실험의 경우 시간에 따른 화염선단 높이의 변화는 비선형적이 된다.

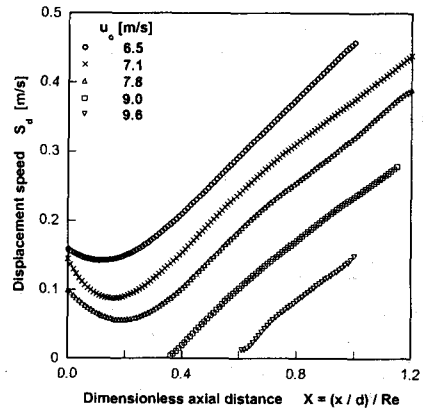


Fig. 4 Displacement speed with axial distance under normal gravity condition with upward fuel injection

시간에 따른 화염선단 높이 변화로부터 구한 이동속도를 Fig. 4에 나타내었다.  $u_0 = 9.0, 9.6$  m/s 인 경우 이동속도는 점차로 감소하다가 0 이 되어 안정된 부상화염이 형성되며, 그 외의 경우는 화염이 노즐을 향해 전파하여 최종적으로 노즐 부착 확산화염이 형성된다. 이동속도의 거동은 삼지화염의 전파속도와 유동속도와의 균형에 의해서 설명될 수 있기 때문에, 비선형적인 이동속도는, 프로판 제트에서 이론당량비 궤적을 따르는 축방향 속도  $u_{st}$  가 축방향 거리 증가에 따라 단조 변화하지 않는다는 근거가 된다.

### 3.2 미소중력장 실험과 삼중점의 궤적

미소중력장 실험에서 미소중력조건에 도달한 2 초후에 연료를 점화하였다. 고속도 카메라로 측정된 화염선단의 거동은 Fig. 1에 나타난 정상중력장에서 상향분사할 경우와 동일하다.

삼지화염은 예혼합화염과 확산화염이 동시에 존재하기 때문에 삼중점은 이론당량비 궤적에 위치하여야 한다. 이 특성은 층류제트의 전파실험에서 삼중점의 궤적과 농도를 측정함으로써 실험적으로 검증되었다[16]. 또한 직접사진에서 강도

가 최대가 되는 점이 삼중점이라는 사실도 발표되었다[14].

최근에 제트에서 분사되는 연료와 주변공기와 밀도차이 및 동축류 속도까지 고려한 속도와 농도에 대한 근사해가 발표되었다 [14]. 이 근사해는 Rayleigh 산란법을 이용한 농도측정을 통하여 검증되었으며, 동축류 프로판 제트에서의 부상높이의 거동을 예측함으로써 그 타당성을 입증하였다. 무차원 축방향 거리  $X = (x/d)/Re$ , 무차원 반경방향 거리  $R = r/(d/2)$  를 이용한 무차원 속도  $U = u/u_{m,0}$  및 농도에 대한 근사해는 다음과 같다.

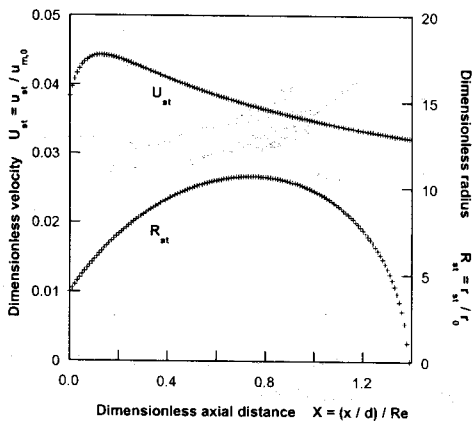


Fig. 5 Calculated stoichiometric contour and velocity along the stoichiometric contour

$$U = \frac{u}{u_{m,0}} = \frac{\rho_F}{\rho_\infty} \frac{1}{32(X + X_\nu)} \times \frac{1}{\left\{1 + \frac{\rho_F}{\rho_\infty} \left(\frac{1}{32} \frac{R}{X + X_\nu}\right)\right\}^2} \quad (1)$$

$$Y_F = \frac{\rho_F}{\rho_\infty} \frac{2Sc + 1}{64(X + X_{\nu,F})} \times \frac{1}{\left\{1 + \frac{\rho_F}{\rho_\infty} \left(\frac{1}{32} \frac{R}{X + X_{\nu,F}}\right)\right\}^{2Sc}}$$

$u_{m,0}$  는 노즐 출구에서 중심축 유속으로 완전 발달된 속도분포를 갖는 경우  $u_{m,0} = u_0$  이다.  $\rho_\infty$ ,  $\rho_F$  는 각각 주변공기와 연료의 밀도이고, Reynolds 수는  $Re = u_{m,0}d/\nu_\infty$  로 정의되며,  $\nu_\infty$  는 주변공기의 동점성 계수이다.  $Sc = 1.366$  인 프로판에 대하여 속도와 농도에 대한 가상원점은 각각  $X_{\nu} = 0.09575$ ,  $X_{\nu,F} = 0.12745$  이며, 축방향 거리에 따른 속도와 농도 분포는 Fig. 5와 같

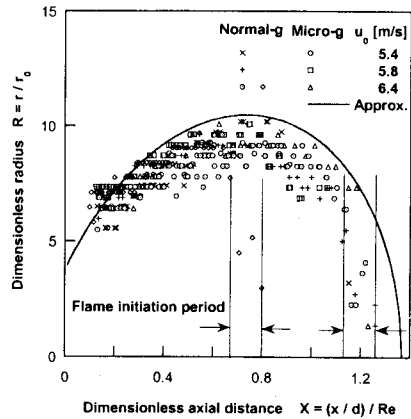


Fig. 6 Loci of tribrachial point under normal and micro gravity conditions

제트속도를 변화시켜가면서 화염 전파실험을 수행한 결과로부터 정상 및 미소중력장에서 삼중점의 궤적을 고속도 카메라의 영상으로부터 측정하였다.  $X = 1.25$  ( $u_0 = 6.4$  m/s 일 때  $x = 6$  mm) 와  $X = 0.8$  ( $u_0 = 6.4$  m/s 일 때  $x = 4$  mm) 에서 점화한 후 측정된 결과를 Fig. 6 이 나타내었다. 화염이 형성되는 초기 기간(flame initiation period)를 제외하고는 정상중력장과 미소중력장에서의 삼중점의 궤적은 거의 동일하였으며, 근사해의 예측과 잘 맞고 있다. 이 결과는 본 실험조건에 근사해를 적용하는 것이 적절함을 보여주고 있는 것이다. 또한, 이 결과로부터 농도장은 중력조건에 의해서 크게 영향을 받지 않으며, 본 실험과 같이 전파하는 화염의 경우 부력이 화염 전면의 유동장에 미치는 영향은 작다는 사실을 알 수 있다. 이러한 결과는 동축류 속도가 농도장에 크게 영향을 주지 않는다는 기존의 결과[14]와 일치한다.

### 3.3 화염전파 속도

식 (1)로부터 계산한 이론당량비 궤적을 따르는 유동속도와 이동속도를 더함으로써 구한 삼지 화염의 전파속도  $S_{tri}$  를 Fig. 7에 나타내었다.

전파속도는 무차원 축방향 거리에 대해 거의 직선적으로 증가하며, 이러한 경향은 기존의 메탄 제트에서의 결과[11]와 일치한다. 또한, 미소중력장에서의 전파속도가 정상중력장에서의 전파속도보다 4 ~ 9 cm/s 가량 빠른 것을 볼 수 있는데, 이 차이는 정상 중력장에서의 전파속도를 구할 때 고려되지 않은 부력의 효과에서 기인할 수 있다. 부력의 영향은 두가지로 나누어 생

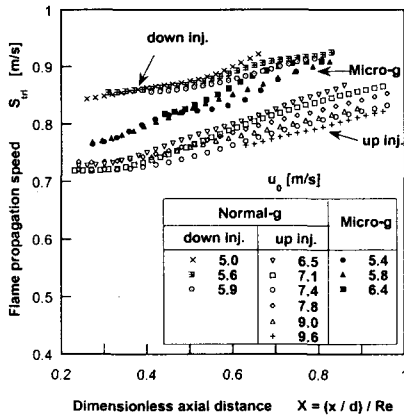


Fig. 7 Flame propagation speeds with dimensionless axial distance

각해볼 수 있다. 첫째로는 프로판과 주변 공기와의 밀도차이에 의한 부력의 영향이고, 둘째로는 기연가스에 의한 부력의 영향이다. 3.2 절에서 살펴본 바와 같이 정상중력장과 미소중력장에서 삼중점의 궤적이 거의 동일하다는 사실로부터, 본 실험과 같이 작은 노즐을 이용하여 상대적으로 높은 제트속도 조건에서 수행한 실험의 경우, 화염 전면의 농도장은 프로판과 공기의 밀도차에 의한 부력의 영향을 크게 받지 않는다는 것을 알 수 있다. 그렇지만, 기연가스에 의한 부력은 화염에서 멀리 떨어진 지역에서는 영향을 크게 주지 못하더라도 전파되는 화염 근처의 유동장에는 영향을 줄 수 있다. 이 부력은 화염 근처의 유동속도를 증가시키게 되고, 결국 이동속도를 감소시키게 된다. 따라서, 정상중력장 조건에서 상향분사의 경우, 식(1)을 이용하여 계산한 전파속도는 미소중력장에서 구한 값보다 작아질 수 있는 것이다. 반대로 하향분사의 경우는 미소중력장에서 구한 값보다 커지게 된다.

화염의 곡률을 좌우하는 혼합분율 구배는 삼지화염의 전파속도에 크게 영향을 준다[6-9]. 따라서, 혼합분율 구배에 따른 삼지화염의 전파속도를 알아볼 필요가 있다. 여기서는 반경방향 연료 질량분율 구배를 사용하여 혼합분율 구배를 나타내었다. Fig. 8에서 알 수 있는 바와 같이 연료 질량분율 구배가 증가함에 따라 전파속도는 감소하는 경향을 보이며, 이는 기존의 수치해석이나 이론해석의 결과[6-9]와 일치한다. 삼지화염의 전파속도를  $dY_F/dR|_{st}$  로 곡선 맞춤하면 다음과 같다.

$$\frac{S_{tri}^0}{S_{L,st}^0} = 0.00313 \left[ \frac{dY_F}{dR} \Big|_{st} + 0.00237 \right]^{-1} + 1.42$$

: micro gravity (2)

$$\frac{S_{tri}^0}{S_{L,st}^0} = 0.00286 \left[ \frac{dY_F}{dR} \Big|_{st} + 0.00305 \right]^{-1} + 1.35$$

: upward injection, normal gravity (3)

프로판의 층류화염 연소속도  $S_{L,st}^0 = 0.44$  m/s [17]를 사용하였다. 곡선맞춤 결과는 Fig. 8에 선으로 나타내었으며, 미소중력장의 경우와 정상중력장의 경우에 대하여 회귀 계수는 각각  $R = 0.981, 0.983$  이다.

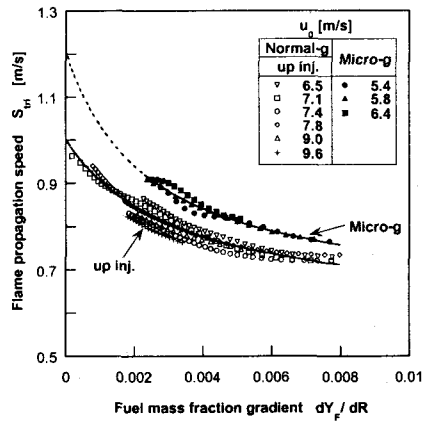


Fig. 8 Flame propagation speeds with fuel mass fraction gradient

이론적으로나 수치해석적으로 예측된 삼지화염의 최대 전파속도는 혼합분율 구배가 0 일 때 얻을 수 있으며, 그 값은 미연가스 밀도와 기연가스 밀도 비의 제곱근에 층류화염 연소속도를 곱한 값이 된다[9]. 이 예측은 메탄제트에서 삼지화염 전파속도에 관한 실험에서 최대속도가 이론적인 예측값이 1.09 m/s 에 거의 근접하는 0.96 m/s 의 결과가 나옴으로써 실험적으로 입증된 바 있다[11].

프로판의 전파속도에 대한 식(2)와 식(3)의 관계식으로부터  $dY_F/dR|_{st} \rightarrow 0$  일 때, 계산한 최대 전파속도는 미소중력장과 정상중력장에서 상향분사의 경우, 각각 1.206, 1.007 m/s 이다. 미소중력장에서의 최대 전파속도는, 단일 화염온도 2250 K 를 기준으로 밀도비를 계산하여 이론적으로 예측한 값인 1.205 m/s 와 잘 일치한다. 진술한 바와 같이, 기연가스에 의한 부력의 영향으로 화염면 근처에서 유동속도가 증가함에 따라 정상 및 미소중력장에서 전파속도의 차이가 발생할 수 있다.

$dY_F/dR|_{st} \rightarrow \infty$  인 경우, 삼지화염의 전파속도를 계산해보면 미소중력장의 경우와 정상중력장에서 상향분사한 경우, 각각 0.625, 0.594 m/s 가 된다. 이 값은 프로판의 층류화염 연소속도보다 크며, 이 결과는 메탄제트의 실험결과와 유사한

특성이다[11].

#### 4. 결론

정상 및 미소중력장 조건에서 층류 프로판 제트를 상향 혹은 하향 분사하는 경우, 삼지화염의 전파특성에 대하여 실험적인 연구를 수행하였다.

직접사진을 통해서 화염 선단이 삼지화염 구조를 가진다는 것을 알 수 있었으며, shadowgraphy 를 이용한 실험 결과, 하향분사의 경우 기연가스의 부력이 전파속도에 상당한 영향을 줌을 알 수 있었다.

본 실험과 같이 작은 노즐을 통해 상대적으로 높은 제트속도로 프로판을 분사하는 경우, 유동속도와 삼지화염 전파속도의 크기가 비슷하게 되므로 측정된 이동속도는 측방향 거리에 대해 비선형적으로 변화한다.

정상중력장과 미소중력장에서의 삼지화염의 궤적을 측정된 결과, 중력 조건 변화에 의한 화염 전면의 농도장 변화는 크지 않음을 알 수 있었으며, 프로판의 밀도와 주변 공기 밀도 차이를 고려한 제트에 대한 근사해의 예측과 잘 일치함을 알 수 있었다.

근사해와 측정된 이동속도를 이용하여 삼지화염의 전파속도를 구하였으며, 연료 질량분율에 따른 삼지화염 전파속도 변화 관계식을 얻었다. 그 결과, 연료 질량분율이 증가함에 따라 삼지화염 전파속도는 감소함을 알 수 있었다. 연료 질량분율이 0 이 될 때 얻어지는 삼지화염의 최대 전파속도는 이론적으로 예측한 값과 잘 일치한다.

#### 후 기

미소중력장 실험을 수행하는데 도움을 준 F. Matsunaga 와 최재혁씨에게 감사 드립니다. 원상희와 진성호는 기계분야 BK-21 사업의 지원을 받았으며, 원상희와 정석호는 CERC 의 지원을 받았고, O. Fujita, K. Ito 는 National Space Development Agency of Japan (NASDA)과 Janpan Space Forum (JSF) 의 지원을 받았기에 감사드립니다.

#### 참고문헌

[1] Chung, S. H. and Lee, B. J., "On the Characteristics of Laminar Lifted Flames in a Nonpremixed Jet," *Combust. Flame*, Vol. 86, 1991, pp. 62-72.  
 [2] Lee, B. J., Kim, J. S. and Chug, S. H., "Effect of Dilution on the Liftoff of

Non-Premixed Jet Flames," *Proc. Combust. Inst.*, Vol. 25, 1994, pp. 1175-1181.  
 [3] Lee, B. J., Cha, M. S. and Chung, S. H., "Characteristics of Laminar Lifted Flames in a Partially Premixed Jet," *Combust. Sci. Technol.*, Vol. 127, 1997, pp. 55-70.  
 [4] Lee, B. J. and Chung, S. H., "Stabilization of Lifted Tribrachial Flames in a Laminar Nonpremixed Jet," *Combust. Flame*, Vol. 109, 1997, pp. 163-172.  
 [5] Buckmaster, J. and Matalon, M., "Anomalous Lewis Number Effects in Tribrachial Flames," *Proc. Combust. Inst.*, Vol. 22, 1988, pp. 1527-1535.  
 [6] Dold, J. W., "Flame Propagation in a Nonuniform Mixture: Analysis of a Slowly Varying Triple Flame," *Combust. Flame*, Vol. 76, 1989, pp. 71-88.  
 [7] Hartley, L. J. and Dold, J. W., "Flame Propagation in a Nonuniform Mixture: Analysis of a Propagating Triple-Flame," *Combust. Sci. Technol.*, Vol. 80, 1991, pp. 23-46.  
 [8] Ghosal, S. and Vervisch, L., "Thoretical and Numerical Study of a Symmetrical Triple Flame using the Parabolic Flame Path Approximation," *J. Fluid Mech.*, Vol. 415, 2000, pp. 227-260.  
 [9] Ruetsch, G. R., Vervisch, L. and Linan, A., "Effect of heat release on Triple Flames," *Phys. Fluids*, Vol. 7, 1995, pp. 1447-1454.  
 [10] Chen, J. Y. and Echehki, T., "Numerical Study of Buoyancy Effects on the Structure and Propagation of Triple Flames," *Combust. Theory Modelling*, Vol. 5, 2001, pp. 499-515.  
 [11] Ko, Y. S. and Chung, S. H., "Propagation of Unsteady Tribrachial Flames in Laminar Non-premixed Jets," *Combust. Flame*, Vol. 118, 1999, pp. 151-163.  
 [12] Chen, Y. C. and Bilger, R. W., "Stabilization Mechanism of Lifted Laminar Flames in Axisymmetric Jets Flows," *Combust. Flame*, Vol. 122, 2000, pp. 377-399.  
 [13] Lee, J. and Chung, S. H., "Characteristics of Reattachment and Blowout of Laminar Lifted Flames in Partially Premixed Propane Jets," *Combust. Flame*, Vol. 127, 2001, pp. 2194-2204.  
 [14] Lee, J., Won, S. H., Jin, S. H. and Chung, S. H., "Lifted Flames in Laminar Coflow Jets of Propane," *Combust. Flame*, 2002.  
 [15] Eckbreth, A. C., "Laser Diagnostics for

Combustion Temperature and Species," 2nd ed.,  
*Gordon and Breach Publishers*, 1996.

[16] Ko, Y. S., Chung, S. H., Kim, G. S. and  
Kim, S. W., "Stoichiometry at the Leading  
Edge of a Tribraichial Flame in Laminar Jets  
from Raman Scattering Technique," *Combust.  
Flame*, Vol. 123, 2000, pp. 430-433.

[17] Law, C. K., "Reduced Kinetic Mechanism  
for Application in Combustion System,"  
*Springer-Verlag*, 1993, pp. 15-26.