

# 물 혼합에 의한 메탄-공기 예혼합기의 연소(1) - 화염전파과정 Combustion in Methane-Air Pre-Mixture with Water Vapor(1) - Progress of Flame Propagation

권순익\*

Soon-Ik Kwon\*

## <Abstract>

A flame speed of methane mixture of water vapor and air have been measured to study the process of flame propagation using schlieren photographs. The quantity of water vapor contained were changed 5% and 10% of total mixture, and equivalence ratio of mixture between 0.8 and 1.2 were tested under the ambient temperature 323K and 373K. The results showed that the burning velocity was decreased by increasing the water vapor contents due to the interruption of flame development. And, the reduction rate of burning velocity was smaller by increasing the water contents under the same ambient temperature. The effects of ambient temperature on burning velocity was decreased by increasing the water vapor contents.

**Keywords :** *Laminar burning velocity, Schlieren photography, Methane, Flame stretch, Water vapor*

## 1. 서 론

연료와 공기가 예 혼합된 상태에서의 미연소 가스에 관련된 화염속도나 화염전파 과정은 연소기관의 성능과 배기배출물에 영향을 미치는 기본적인 인자로서 화염속도는 혼합기의 구성 조건 즉, 온도, 압력 및 당량비 등에 의존된다는 사실은 잘 알려져 있다.

한편, 기관에서의 연소 중에 발생하는 질소산화물은 미연소 탄화수소와 더불어 공기 중에서 광화학반응을 하여 스모그를 유발시키는 대기오염의 주범으로, 이를 저감시키기 위해 점차 엄격한 배기규제를 하고 있는 실정이다. 이 질소산화물은 높은 연소온도에 의해 생성되며 한

번 생성된 후로는 후연소 등에 의해 좀처럼 감소되지 않는 특성을 가지고 있다. 따라서 최근 들어 기관의 연소 중에 생성된 질소산화물을 저감시키기 위해 촉매나 요소선택환원방법 또는 NOx 흡장 방법 등<sup>1)</sup> 후처리 방법이 이용되고 있으나, 질소산화물의 저감은 근본적으로 연소에 의한 화염온도를 낮추어 초기 상태부터 생성되는 조건을 억제시키는 것이 가장 효과적인 방법이라 할 수 있다. 화염온도 저감을 위한 방법 중의 하나로서 소량의 물을 공기와 연료 중에 혼합 또는 분사시켜 물의 증발잠열에 의한 혼합기의 초기온도를 낮추어 줌으로써 질소산화물 생성을 억제시키는 방법이 있다.

이 물 혼합에 대한 연소로 Hayasi 등<sup>2)</sup>은 물

\* 교신저자, 정회원, 두원공과대학 기계과 교수, 工博  
E-mail : sikwon@doowon.ac.kr

\* Corresponding Author, Prof. Dept. of Mechanical Engineering  
Doowon Technical College, Ph. D.

을 미세한 분무상태로 에탄올연료와 공기 혼합물과 같이 연소시켜 그 때의 연소속도 등을 구하였으며, Polymeropoulos<sup>3)</sup>는 하나의 액적으로부터 열발생 모델을 설정하여 계산에 의해 구한 연소속도와 실험결과를 비교하고 있다. 최근에는 화염의 확산을 방지할 목적으로 소염에 관한 연구가 많이 진행되고 있으며, 그 대표적인 예로 Thomas<sup>4)</sup>는 Sandia PREMIX 프로그램<sup>5)</sup>을 수정하여 물 입자 크기에 따른 화염속도의 변화 및 소염시키는데 필요한 물 혼합 농도 등에 대해 조사하였다.

그러나 이들 대부분의 연구는 물 혼합에 있어서 물을 에어로졸 즉 분무나 액적상태로 분사하여 연소과정 중에 증발시킨 후 연소과정을 살펴보고 있으며, 분무를 완전히 증발시켜 착화전에 증기상태로 만든 예혼합 상태에서의 연구는 거의 이루어지지 않았다.

이에 본 연구에서는 연소사진 촬영이 가능하고 압용기를 이용하여 메탄과 공기의 예혼합기에 소량의 물을 혼합하여 완전히 증발시킨 후 착화 연소시켜, 쉬리렌 사진법에 의해 연소과정을 가시화하고 연소사진으로부터 화염전파 과정을 살펴보았다. 또한 초기 혼합기의 온도와 당량비 및 물의 혼합 비율을 변화시켜 이들 인자가 연소속도에 미치는 영향을 조사하였다.

## 2. 이론식

### 2.1 화염사진에서 화염의 퍼짐(Stretch) 으로부터 구하는 방법

화염의 퍼짐은 화염표면의 곡선으로 인해 원형 화염의 전파에 영향을 미친다. 퍼짐의 효과는 화염표면의 무한요소 중의 부분적 면적변화에 기여한다. Karlovitz등<sup>9)</sup>은 화염의 소염을 설명하는 메커니즘으로서 화염퍼짐의 개념을 소개하고 있다. 즉 가스체적의 증가에 따라 반응영역으로부터 미연소가스 영역으로 열이 이동함으로서 화염의 표면부가 퍼져나가며, 이것은 연소의 강도와 화염온도를 감소시킨다.

정지된 가스 중을 구 형상으로 퍼져나가는 화염을 퍼짐(Stretched) 층류화염이라 하며, 퍼짐율의 형태는 시간의 함수로, 어느 한 부분에서의 연소속도는 정해진 연소속도가 아니라 그 때의 퍼짐 연소속도이다<sup>10)</sup>.

퍼짐 화염속도는 다음 식(1)으로 주어진다.

$$S_n = \frac{dr}{dt} \quad (1)$$

화염면에서의 화염퍼짐율  $\Gamma$ 은 식(2)로 부터 직접 구할 수 있으며, 화염 표면의 한 부분에서의 면적 변화의 비율이다.

$$\Gamma = \frac{1}{A} \frac{dA}{dt} \quad (2)$$

식(5)는 구형 확장 화염면의 개념을 사용하여  $A=\pi r^2$ ,  $dA=2\pi r dr$ 을 식(2)에 대입하여 얻을 수 있다.

$$\Gamma = \frac{2}{r} \frac{dr}{dt} = \frac{2}{r} S_n \quad (3)$$

퍼짐 화염속도  $S_n$ 는 퍼짐 연소속도  $S_L$ 과 다음 식(4)과 같은 관계가 있다.

$$S_L = S_n \left( \frac{1}{E} \right) S \quad (4)$$

$S$ 는 일반적 함수로서 화염반경과 밀도비로서 표시되며, 이는 미연가스의 평균 밀도로부터 화염 두께의 영향을 알 수 있다. 팽창계수  $E$ 는 온도와 몰수의 양 함수로 미연가스와 기연가스의 밀도비 ( $\rho_b/\rho_u$ )로서 정의된다.

$$E = \frac{T_b}{T_u} \cdot \frac{N_b}{N_u} = \frac{\rho_b}{\rho_u} \quad (5)$$

### 2.2 당량비에 따른 메탄, 공기 및 물의 양 계산

메탄과 공기의 예혼합기에 주입할 물의 양은 다음 식에 의해 결정하였다. 공기의 몰수는 다음 식(6)에 의해 구할 수 있으며, 물의 몰수는 식(7)에 의해 구할 수 있다.

$$n_a = \frac{P_{atm} \cdot V_{rig}}{R \cdot T} \quad (6)$$

$$n_w = \frac{W_R(n_a + n_f)}{(1 - W_R)} \quad (7)$$

또한 몰수와 당량비의 관계는 식(8)로 나타낼 수 있으며, 식(6)과 식(7)을 식(8)에 대입함으로써 필요한 메탄과 물의 몰수를 구할 수 있다.

$$\frac{n_f}{n_a + n_f + n_w} = \frac{\phi}{\phi + 2 \left( 1 + \frac{79}{21} \right)} \quad (8)$$

### 3. 실험장치 및 방법

#### 3.1 실험장치

실험에 사용된 연소용기는 직경 120mm, 높이 109mm의 원기둥 형태로 높이는 임의의 변경이 가능하도록 되어있으며, 총 연소실 체적은 약 1234cm<sup>3</sup> 이다. 연소사진 촬영을 위해 연소실 양면에 길이 60mm, 폭 40mm, 두께 10mm의 석영창을 설치하였으며, 최대 10MPa의 압력에 견딜 수 있도록 설계되었다.

연소실의 초기온도를 설정하기 위하여 1kW 히팅 자켓으로 연소용기 전체를 감싸주었으며 온도조절 장치를 이용하여 제어하였다. 또한 펌프를 이용하여 혼합기를 순환시킴으로서 연소실 내의 혼합기 분포와 온도분포가 균일하게 되도록 하고, 분위기 온도는 중앙부에 설치된 K-type 열전대를 이용하여 측정하였다.

연소용기 중앙에 직경 1mm의 텅스텐 전극이 설치되어 있으며, 전극 갭은 3.5mm로, 이것은 Singh와 Polymeropoulos<sup>8)</sup>의 보고를 근거로 요구 최소 점화에너지에 의해 선정된 것이다. 점화장치는 자동차용 점화코일을 이용하였으며, 2차 전압은 10~30kV이다.

화염촬영에는 슈리렌방식으로 고속도 비디오 카메라(10000frame/s, nac사)를 사용하였으며, 화염속도 측정은 영상분석 시스템(VIC 1214A Motion Analysis System)이 이용되었다. 연소용기 부분의 간략도를 Fig.1에 나타낸다.

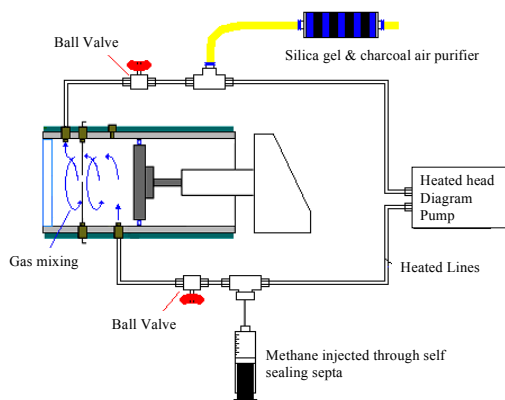


Fig. 1. Schematic diagram of combustion chamber.

#### 3.2 실험방법

연소에 사용된 공기는 실리카 겔과 활성탄이 내장된 필터를 통해 정화한 후 용기 내에 넣고, 순수 메탄가스는 정밀주사기를, 그리고 물은 마이크로 피펫(Seal pette, No.480-097, Human

Corporation사)을 이용하여 주입한 후, 완전히 증발된 상태에서 펌프로 순환시켜 혼합기를 균일하게 만들었다. 순환 중에 혼합기의 온도저하를 막기 위해 밴드히터로서 모든 순환관을 감싸 열손실을 감소시켰다.

연소실내의 초기압력은 대기압으로 하고 온도는 323K, 373K로 설정하였으며 당량비 0.6, 0.8, 1.0, 1.1, 1.2 하에서 실험을 하였다.

연소 용기 내에 주입한 물의 양은 전체 예혼합기 중의 체적비로서 0%, 5%, 10%로 하였다.

### 4. 결과 및 고찰

#### 4.1 화염사진

Fig.2는 분위기 온도 373K, 당량비 1.0하에서의 메탄-공기 예혼합기에 물의 혼합량을 변화시켰을 때의 화염전과 과정을 나타낸 것이다. 고속도 카메라로 촬영한 슈리렌 사진에서 고온의 가스 핵은 5ms까지는 상하가 약간 찌그러진 원반형을 하고 있으나 8ms 이후부터는 찌그러진 부분이 복귀되어 화염은 완전한 원형상으로 퍼져나가고 있다. 물의 혼합량이 증가할수록 화염 전파속도가 억제되어 연소속도도 늦어짐을 알 수 있다. 물 혼합이 없는 0%에서는 착화 후 5ms 이후부터 급격한 화염전과 현상이 보이면서 12ms 때에는 거의 연소가 완료되는 단계에 이르고 있음을 알 수 있다. 그러나 물 혼합 10%의 경우, 착화 후 15ms 까지도 화염의 크기는 그다지 많이 진행되지 않고 있다.

물 혼합량 10%, 분위기 온도 373K의 조건하에서 메탄과 공기의 당량비를 변화시켰을 때의 화염전과과정을 Fig.3에 나타낸다. 화염전과속도는 당량비가 1.0일 때 가장 빠르며, 당량비 1.2, 0.8의 순으로 화염전과속도를 보이고 있다. 이는 연료량이 적은 당량비 0.8의 경우 혼합기가 희박한 상태가 되어 화염의 성장이 그다지 원활하지 못하기 때문에 점화 후 5ms 때에도 점화초기와 같이 화염이 성장하지 못하고 있다. 그러나 이론 당량비인 1.0 상태에서는 점화 후 5ms 이후 화염이 급격하게 성장하고 있음을 알 수 있다. 동일 시간대를 비교해보면 당량비 0.8보다 1.0에서 화염전과가 빨라지고 있으나, 당량비가 큰 1.2에서는 오히려 화염속도가 늦어지고 있다. 이것은 이론 당량비 부근에서 가장 연소가 활발해지고 그 전후로 당량비

가 변화하면 공연비가 희박 또는 농후하게 되어 화염전파에 영향을 미치게 되기 때문이다.

Fig.4는 당량비 0.8과 물 혼합량을 5%하에서 분위기 온도를 323K와 373K로 변화시켰을 때

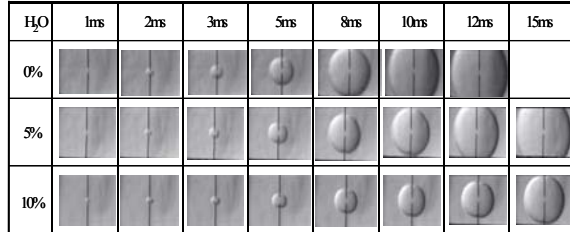


Fig. 2. Photograph of flame propagation at  $\phi 1.0$ , 373K.

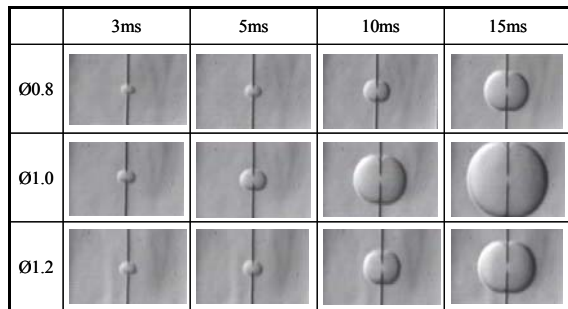


Fig. 3. Photographs of flame propagation on each equivalence ratio at 373K, 10% $H_2O$ .

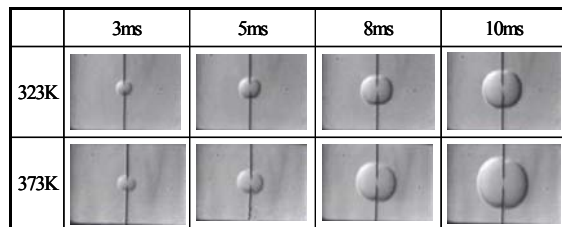


Fig. 4. Photographs of flame propagation on different temperature at 0.8, 5% $H_2O$ .

의 화염전파 과정을 동일시간에서 비교하였다. 점화 후 5ms까지의 화염의 크기는 큰 차이가 없으나, 이 이후 화염의 전파속도가 증가하면서 8ms부터는 온도가 높은 373K에서의 화염이 급격히 팽창하고 있다. 따라서 분위기 온도와 화염전파속도는 비례하고 있음을 알 수 있다.

Fig.5는 정상적인 화염발달 형태와 분위기 상태의 변화에 의해 화염이 발달하지 못하고 꺼지는 소염상태의 화염형태를 비교한 것이다. 당량비 0.6하에서 분위기 온도 373K 상태에서, 물 혼합량이 0인 건조한 조건에서는 정상적인 연소가 일어나고 있으나, 물 혼합량을 5%로 할 경우, 착화는 하였으나 화염이 더 이상 발달하

지 못하고 장시간 지속되다가 저절로 소멸되고 있음을 알 수 있다. 물 혼합량을 이 이상 증가시키면 착화자체가 불가능하게 된다.

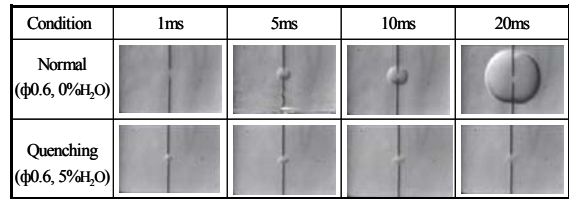


Fig. 5. Comparison of normal combustion(0%  $H_2O$ ) and quenching phenomena(5% $H_2O$ ) at 0.6.

#### 4.2 화염속도

Fig.6은 당량비 0.8, 물 혼합량 5%하에서 분위기 온도를 323K와 373K로 변화시켰을 때의 화염의 진행 반경에 대한 화염속도를 나타낸 것으로, Fig.4의 연소사진을 영상분석 시스템을 이용하여 재구성한 것이다. 연소초기의 화염은 분위기 온도에 관계없이 시간이 경과할수록 속도가 조금씩 상승하나, 화염반경이 20mm가 되는 시점부터 그 속도는 서서히 감소하는 경향을 보여주고 있다. 온도가 높은 373K에서의 화염속도가 빠르게 나타나고 있어 화염속도는 분위기 온도에 비례함을 알 수 있다.

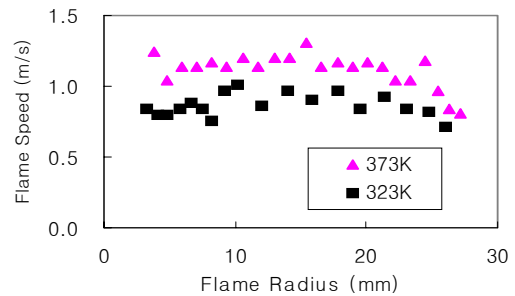


Fig. 6. Variation of flame speed for ambient temperature 323K, 373K as different flame radii under 0.8, 5%  $H_2O$ .

당량비 1.0, 분위기 온도 323K하에서 Fig.6과 같은 방법으로 물 혼합량을 변화시켰을 때, 화염의 진행 반경에 대한 화염속도를 Fig.7에 나타낸다. 물 함량이 0%인 건조한 혼합기에서의 화염속도는 그 변화량이 눈에 뵈 정도로 증가하였다가 감소하고 있으나, 10%의 물 혼합 상태에서는 화염속도가 시간의 경과에 거의 영향을 받지 않고 일정한 속도를 유지하고 있다. 이것은 물 함유량이 많음에 따른 습증기 상태에서의 연소가 건조한 상태에 비해 완만하고 일

정한 속도로 일어나고 있는 것으로 생각할 수 있다. 또한 화염이 진행되고 있는 과정에서 물 함량이 많을수록 화염속도도 상대적으로 저하되고 있음을 알 수 있다.

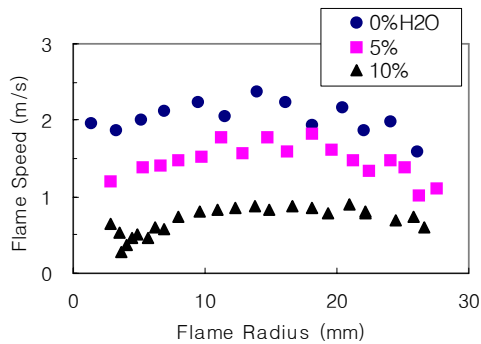


Fig. 7. Variation of flame speed for water contents 0%, 5%, 10% as different flame radii under 1.0, 323K.

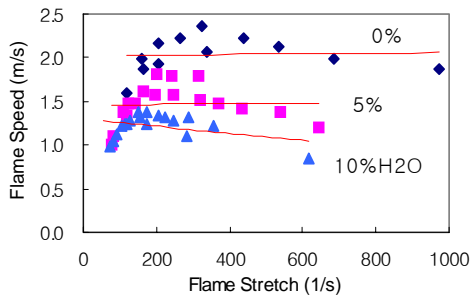


Fig. 8. Relationship between flame speed and flame stretch under various water contents of 1.0, 323K.

Fig.8은 Fig.7의 결과와 식(2)를 이용하여 화염 퍼짐량에 대한 화염속도 변화를 나타낸 것이다. 연소초기의 높은 퍼짐량(작은 반경의 화염)때에는 낮은 화염속도를 가지나, 퍼짐량이 작아질수록(큰 반경을 가지는 화염) 화염속도가 증가하다가 화염이 완전히 팽창한 후에는 다시 연소속도가 감소하는 경향을 보이고 있다. Gu 등<sup>9)</sup>은 이 퍼짐량에 0가 되는 지점 즉 소염이 되는 부분까지 Fig.8처럼 사선을 그어 Y축과 만나는 지점의 값을 퍼짐 화염속도로 정의하고 있으며, 본 연구에서도 같은 방법을 채택하여 화염속도를 구하였다. 그림에서 보는바와 같이 물이 혼합되지 않은 0%에서의 화염속도가 가장 빠르고 물의 혼합량이 많아질수록 화염속도는 저하하고 있다.

분위기 온도 323K하에서 메탄-공기의 당량비 및 물의 혼합비를 변화시킬 때의 연소속도를 Fig.9에 나타내었다. 연소속도는 일반적으로 연

료의 연소경향을 살펴보는데 유용한데 이때의 연소속도는 Fig.8에서 구한 화염속도를 팽창계수 E로 나눈 값이다. 당량비 1.1때의 연소속도가 가장 빠르고 그 전후로 당량비를 변화시킬수록 연소속도는 점차 느려지고 있음을 알 수 있다. 이는 혼합비가 너무 희박하거나 농후하게 되면 화염의 전파속도가 억제되어 앞의 Fig.3에서 보는 바와 같이 화염발달이 느리게 진행되어져 화염의 속도도 느려지고 있다.

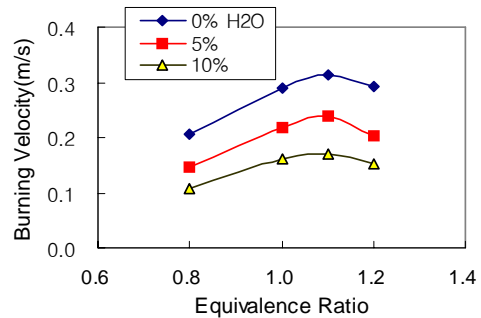


Fig. 9. Burning velocity of various equivalence ratio under various water contents of 1.0, 323K.

공기와 메탄의 예혼합기 상태에서 물을 혼합하였을 때, 물의 혼합량 변화에 따른 연소속도를 Fig.10에 나타낸다. 연소속도는 분위기 온도와 상관없이 물의 혼합량에 대해 반비례 하고 있으며, 물의 혼합량이 많아질수록 연소속도가 감소되는 비율이 낮아지고 있다. 또한 물의 혼합량이 많아질수록 연소속도에 영향을 주는 분위기온도의 효과는 작아지고 있음을 알 수 있다.

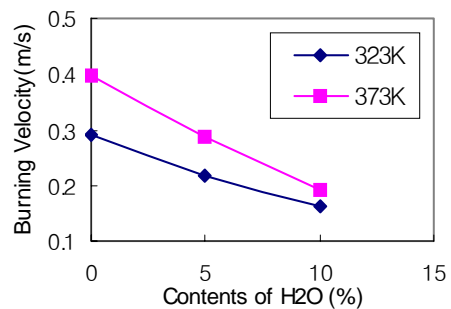


Fig. 10. Burning velocity to water contents under 1.0.

## 5. 결 론

메탄과 공기의 예혼합기에 소량의 물을 혼합하여 완전히 증발시킨 후, 초기 혼합기의 온도와 당량비

및 물의 혼합 비율이 연소속도에 미치는 영향을 조사한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 메탄 공기 예혼합기에 혼합되는 물의 양이 많을수록 화염발달이 상당히 느리게 진행되어 이것이 화염 속도 저하를 가져오고 있다
- 2) 물의 혼합량이 많아질수록 연소속도가 저감되는 비율이 낮아지고 있다
- 3) 연소속도에 영향을 주는 분위기온도의 효과는 물의 혼합량이 많아질수록 작아지고 있다.

### 후 기

본 연구는 두원공과대학에서 지원하는 학술 연구비에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

### Nomenclature

- $S_L$ : laminar burning velocity, m/s  
 $S_n$ : flame speed, m/s  
 $S_{st}$ : laminar burning velocity at 300K, 1bar  
 $T$ : temperature, K  
 $P$ : pressure, Pa  
 $N$ : mole number  
 $E$ : expansion factor  
 $\rho$ : gas density, kg/m<sup>3</sup>  
 $V$ : volume  
 $\phi$ : equivalence ratio  
 $R$ : universal gas constant, J/kgK

### Subscripts

- $b$ : burned  
 $u$ : unburned  
 $atm$ : atmosphere  
 $R$ : ratio of water  
 $a$ : air  
 $f$ : fuel

### 참 고 문 헌

- 1) Daisho, Y., *Journal of Society of Automotive Engineers of Japan*, **59**, 4, (2005)
- 2) Hayasi, S., Kumagai, S. and Sakai, T., *Combustion Science and Technology*, **15**, 169, (1976)
- 3) Polymeropoulos, C. E., *Combustion Science and Technology*, **40**, 217, (1984)
- 4) Thomas, G. O., *Combustion and Flame*, **130**, 147, (2002)
- 5) www.sandia.gov/1100/CVDwww/chemkin.htm
- 6) Karlovitz, B., Knapschaefer, D. W. and Wells, F. E., : On the Determination of Laminar Flame Speeds from Stretched Flames, *Fourth Symposium (International) on Combustion*, pp.61-620, (1953)
- 7) Cameron, L. R. J. : Aerosol Explosion Hazard Quantification, *University of Wales Cardiff, Degree of Doctor Philosophy*, (1999)
- 8) Singh, A. K. and Polymeropoulos, C. E. : Spark Ignition of Aerosols, *Twenty-first Symposium (International) on Combustion*, pp. 513-519, (1986)
- 9) Gu, X. J., Haq, M. Z., Lawes, M. and Woolley, R., *Combustion and Flame*, **121**, 41, (2000)

---

(2007년 10월 5일 접수, 2008년 2월 22일 채택)