

물 혼합에 의한 메탄-공기 예혼합기의 연소(2)-연소속도 비교 Combustion in Methane-Air Pre-Mixture with Water Vapor(2)-Comparison of Burning Velocity

권순익*
Soon-Ik Kwon*

<Abstract>

Burning velocity of methane-air mixtures with water vapor have been measured to study the process of flame propagation using schlieren photographs and computation. The computations were carried out for the burning velocity using premix code of Chemkin program to compare the experimental results. The quantity of water vapor contained were changed 5% and 10% of total mixtures, and equivalence ratio of mixtures between 0.8 and 1.2 were tested under the ambient temperature 323K and 373K. The results showed little difference between these two methods, the burning velocity was decreased by increasing the water vapor contents due to the interruption of flame development. And, the effect of ambient temperature was less significant by increasing the water contents on the burning velocity.

Keywords : *Laminar burning velocity, Methane, Flame stretch, Water vapor, Chemkin, Premix Code*

1. 서론

기관에서의 연소 중에 발생하는 질소산화물은 미연소 탄화수소와 더불어 공기 중에서 광화학반응을 하여 스모그를 유발시키는 대기오염의 주범으로, 이를 저감시키기 위해 촉매나 요소선택환원방법 또는 NOx 흡장 방법 등¹⁾ 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 낮추

어 줌으로써 질소산화물 생성을 억제시키는 방법이 있다.

이 물 혼합에 대한 연소로 Hayasi 등²⁾은 물을 미세한 분무상태로 에탄올연료와 공기에 혼합한 후, 연소시켜 그 때의 연소속도 등을 구하였으며, Polymerpoulos³⁾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 Thomas⁴⁾는 Sandia Premix 프로그램⁵⁾을 수정하여 물 입자 크기에 따른 화염속도의 변화 및 소염시키는데 필요한 물 혼합 농도 등에 대해 조사하였다.

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

* Corresponding Author, Professor, Dept. of mechanical Engineering Doowon Technical College, Ph. D.

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

이에 본 연구에서는 연소사진 촬영이 가능한 고압용기를 이용하여 메탄과 공기의 예혼합기에 소량의 물을 혼합하여 완전히 증발시킨 후 착화 연소시켜, 쉬리렌 사진법에 의해 연소과정을 가시화하고 연소사진으로부터 화염전파 속도를 측정함과 동시에 Sandia 연구소에서 개발한 CHEMKIN (Computer Modeling of Chemically Reacting Flows) 프로그램⁵⁾의 Premix code를 이용하여 연소속도를 구한 후, 두 방법에 의한 화염속도를 비교하였다.

또한 초기 혼합기의 온도와 당량비 및 물의 혼합 비율을 변화시켜 이들 인자가 연소속도에 미치는 영향을 조사하였다.

2. 이론식

2.1 CHEMKIN 프로그램에 의한 계산

연소속도 계산은 1차원적인 단일 예혼합 화염의 자유전파 상태에서의 층류의 연소속도를 계산할 수 있는 CHEMKIN 프로그램의 Premix 코드를 이용하였다. 이 코드는 뉴턴 반복법에 의해 정상상태에서의 질량, 종(species) 및 에너지 보존 방정식을 계산하도록 되어있으며, GRI-mech의 화학반응 메커니즘은 메탄 산화 반응에서 32종 177요소반응으로 구성되어 있다. 계산은 메탄-공기 혼합기를 연료로 당량비를 0.8에서 1.2까지, 초기온도는 대기압 하에서 323K와 373K로 하였다.

2.2 화염사진에서 화염의 퍼짐(Stretch)으로부터 구하는 방법

화염의 퍼짐은 화염표면의 곡선으로 인해 원형 화염의 전파에 영향을 미치며 퍼짐의 효과는 화염표면의 무한요소 중의 부분적 면적변화에 기여한다. Karlovitz⁶⁾은 화염의 소염을 설명하는 메커니즘으로서 화염퍼짐의 개념을 소개하고 있다. 즉 가스체적의 증가에 따라 반응영역으로부터 미연소 가스 영역으로 열이 이동함으로써 화염의 표면부

가 퍼져나간다. 이것이 연소의 강도와 화염온도를 감소시킨다.

정지된 가스 중을 구형 상으로 퍼져나가는 화염을 퍼짐(Stretched) 층류화염이라 하며, 퍼짐율의 형태는 시간의 함수로, 어느 한 부분에서의 연소속도는 정해진 연소속도가 아니라 그 때의 퍼짐 연소속도이다⁷⁾. 퍼짐 화염속도는 다음 식(1)로 주어진다.

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

화염면에서의 화염퍼짐율(Flame stretch rate)은 식(2)로부터 직접 구할 수 있으며, 화염 표면의 한 부분에서의 면적 변화의 비율이다.

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

식(3)은 구형 확장 화염면의 개념을 사용하여 $A=r^2$, $dA=2rdr$ 을 식(2)에 대입하여 S_n 을 얻을 수 있다.

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

퍼짐 화염속도 S_n 은 퍼짐 연소속도 S_L 과 다음 식(4)와 같은 관계가 있다.

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

S 는 일반적 함수로서 화염반경과 밀도비로서 표시되며, 이는 미연가스의 평균 밀도로부터 화염두께의 영향을 알 수 있다. 팽창계수 E 는 온도와 몰수의 양 함수로 미연가스와 기연가스의 밀도비(ρ_b/ρ_u)로서 정의된다.

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

2.3 화염의 두께 계산

일반적으로 화염의 연소속도로부터 전체 화염의 두께 X 는 다음 식을 이용하여 구할 수 있다.^{8),9)}

$$X = \frac{(T_b - T_u)}{(T^o - T_u)} \left(\frac{\lambda}{C_p} \right) \cdot \frac{1}{\rho_u \cdot S_L} \quad (6)$$

여기서 T^o 는 연료소모율이 가장 클 때의 온도 즉 수소 생성이 가장 많을 때의 온도로 정의되나,⁹⁾ 실제로는 이 부분의 온도 측정 등이 쉽지 않은 점 등에서 근사적으로 미연소가스의 온도와 연소가스의 온도를 평균하여 사용하고 있는 것이 일반적이다. 본 연구에서도 두 온도를 평균하여 사용하였다.

2.4 당량비에 따른 메탄, 공기 및 물의 양 계산

메탄과 공기의 예혼합기에 주입할 물의 양은 다음 식에 의해 결정하였다. 공기의 몰수는 다음 식(7)에 의해 구할 수 있으며, 물의 몰수는 식(8)에 의해 구할 수 있다.

$$n_a = \frac{P_{atm} \cdot V_{riq}}{R \cdot T} \quad (7)$$

$$n_w = \frac{W_R(n_a + n_f)}{(1 - W_R)} \quad (8)$$

또한 몰수와 당량비의 관계는 식(9)로 나타낼 수 있으며, 식(7)과 식(8)을 식(9)에 대입함으로써 필요한 메탄과 물의 몰수를 구할 수 있다.

$$\frac{n_f}{n_a + n_f + n_w} = \frac{\phi}{\phi + 2 \left(1 + \frac{79}{21} \right)} \quad (9)$$

3. 실험장치 및 방법

3.1 실험장치

실험에 사용된 연소용기는 직경 120 mm, 높이 109 mm의 원기둥 형태로 높이는 임의 변경이 가능하도록 되어있으며, 총 연소실 체적은 약 1234 cm³ 이다.

연소사진 촬영을 위해 연소실 양면에 길이 60 mm, 폭 40 mm, 두께 10 mm의 석영창을 설치하였으며, 최대 10 MPa의 압력에 견딜 수 있도록 설계되었다.

연소실의 초기온도를 설정하기 위하여 1 kW 히팅 자켓으로 연소용기 전체를 감싸주었으며

온도조절장치를 이용하여 제어하였다. 또한 펌프를 이용하여 혼합기를 순환시킴으로서 연소실내의 혼합기 분포와 온도분포가 균일하게 되도록 하고, 분위기 온도는 중앙부에 설치된 K-type 열전대를 이용하여 측정하였다. 연소용기 중앙에 직경 1 mm의 텅스텐 전극이 설치되어 있으며, 전극 갭은 3.5 mm로, 이것은 Singh과 Polymeropoulos¹⁰⁾의 보고를 근거로 요구 최소 점화에너지에 의해 선정된 것이다. 점화장치는 자동차용 점화코일을 이용하였으며, 2차 전압은 10~30 kV이다.

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

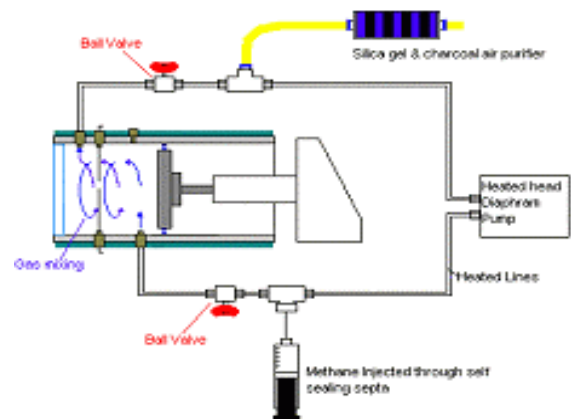


Fig. 1. schematic diagram of combustion chamber.

3.2 실험방법

연소에 사용된 공기는 실리카 겔과 활성탄이 내장된 필터를 통해 정화한 후 용기 내에 넣고, 순수 메탄가스와 물은 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 323 K, 373 K로 설정하였으며 당량비 0.8, 1.0, 1.1, 1.2 하에서 실험을 하였다.

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

4. 화염사진

Fig.2는 분위기 온도 323K, 당량비 1.0하에서의 메탄-공기 예 혼합기에 물의 혼합량을 10%까지 변화시켰을 때의 화염전파 과정을 나타낸 것이다. 고속도 카메라로 촬영한 슈리렌 사진에서 고온의 가스 핵은 5 ms까지는 상하가 약간 찌그러진 원반형을 하고 있으나 8 ms 이후부터는 찌그러진 부분이 복귀되어 화염은 완전한 원 형상으로 퍼져나가고 있다. 물의 혼합량이 증가할수록 화염 전파속도가 억제되어 연소속도도 늦어짐을 알 수 있다. 물 혼합이 없는 0%에서는 착화 후 5 ms 이후부터 급격한 화염전파 현상이 보이면서 12 ms 때에는 거의 연소가 완료되는 단계에 이르고 있음을 알 수 있으나, 10%의 물 혼합 상태에서는 착화 후 15 ms 까지도 화염의 크기는 그다지 많이 진행되지 않고 있다.

5. 결과 및 고찰

5.1 연소속도 측정값

분위기 온도 323K하에서 메탄-공기의 당량비 및 물의 혼합비를 변화시킬 때의 연소속도를 Fig.3에 나타내었다. 연소속도는 일반적으로 연료의 연소경향을 살펴보는 데 유용한데 이 때의 연소속도는 화염의 팽창속도를 팽창계수 E 로 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 화염발달이 느리게 진행되어져 화염의 속도도 느려지고 있다.

5.2 실험값과 계산값의 연소속도 비교

각 당량비 하에서 물의 혼합이 없는 dry 상태(0% H₂O)에서의 메탄-공기 혼합기의 층류

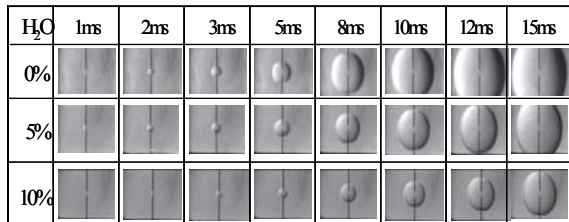


Fig. 2. Photographs of flame propagation at 1.0, 323K.

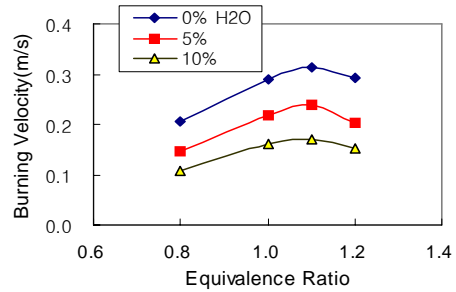


Fig.3. Burning velocity of various equivalence ratio under various water contents of 1.0, 323 K.

연소속도의 측정값과 Premix 코드에 의해 계산한 연소속도를 Fig.4에 비교하였다. 점선은 계산에 의해 구한 연소속도이고, 실선은 실제 측정된 값이다.

Premix코드를 이용하여 일차원 자유전파 상태의 층류 연소속도를 각 당량비하에서 계산한 결과를 보면, 당량비 1.1에서의 연소속도가 가장 높고 그 전후로 당량비를 변화시키면 연소속도가 저하하고 있다. 층류 연소속도는 일반적으로 연료의 연소경향을 살펴보는 데 유용한데, 실험에 의해 구한 연소속도와 계산에 의해 구한 값을 비교해보면 당량비 1.1과 1.2에서는 아주 잘 일치하고 있으나 당량비 1.0과 0.8에서 측정값이 약간 낮음을 보여주고 있다. 전반적으로 두 값이 잘 일치하고 있어 Premix 코드를 이용하여 계산된 연소속도는 신뢰성이 있는 것으로 판단된다.

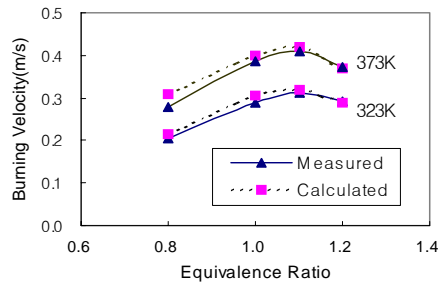


Fig.4. Comparison of measured and calculated flame speed for ambient temperature 323K, 373K under 1.0, 0% H₂O.

Fig. 5는 각 당량비 하에서 물의 혼합을 전체 혼합기 량의 5%로 하였을 때의 연소속도의 측정값과 Premix 코드에 의해 계산한 연소속도를 비교한 것이다. 전 당량비 영역에서 전반적으로 실제 측정된 연소속도가 계산값 보다 약간 낮음을 보여주고 있으며, 그 차이가 Fig. 3

의 물 혼합이 없을 때(0 % H₂O) 보다 약간 크게 나타나고 있다.

공기와 메탄의 예혼합기 상태에서 물을 혼합하였을 때, 물의 혼합량 변화에 따른 실제의 연소속도와 계산된 연소속도를 Fig. 6에 나타낸다. 물의 혼합량이 많아질수록 연소속도 저감율이 떨어지고 있으며, 또한 분위기온도 변화에 따른 연소속도의 차이가 작아지고 있음을 알 수 있다. 따라서 분위기온도 변화에 따른 연소속도의 변화량은 물의 혼합량이 많아질수록 그 효과가 작아지고 있음을 나타낸다. 또한 물 함량이 0%인 건조한 혼합기에서의 실제의 화염속도는 계산값과 거의 동일하나 물의 함량이 증가할수록 그 차이는 점차 커지는 경향을 나타내고 있다.

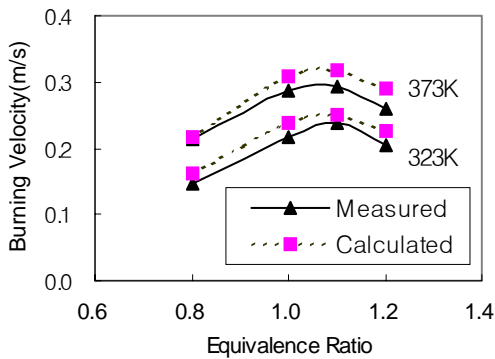


Fig.5. Comparison of measured and calculated flame speed for ambient temperature 323K, 373K under 1.0, 5 % H₂O.

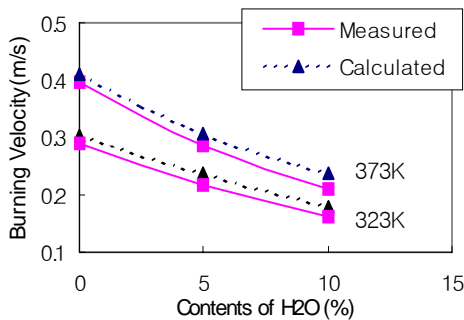


Fig.6. Burning velocity to water contents under 1.0.

Fig. 7은 분위기 온도 323 K에서 메탄-공기의 당량비 및 물의 혼합비를 변화시킬 때 얻은 Fig. 2의 연소속도로부터 식(6)을 이용하여 구한 화염의 두께를 나타낸 것이다.

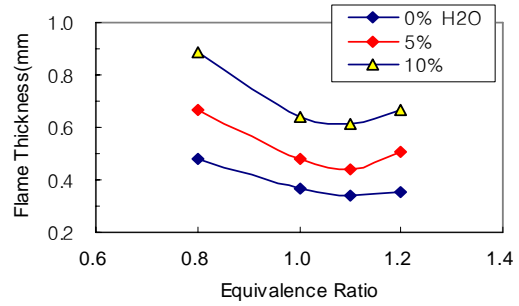


Fig. 7. Flame thickness of various equivalence ratio under various water contents of 1.0, 323 K.

화염면을 형성하는 화염의 두께는 온도구배를 가지며 이 온도구배의 크기에 따라 화염속도가 결정되어 연소과정 및 배기물생성에 영향을 미치게 되는데, 화염의 두께는 식(6)에서 알 수 있는바와 같이 연소속도에 반비례하므로 연소속도가 가장 빠른 당량비 1.1에서 가장 얇고, 그 전후로 당량비가 변화함에 따라 화염두께도 두꺼워지고 있다. 또한 물의 함유량 증가와 더불어 화염의 두께도 두꺼워지고 있음을 알 수 있다.

6. 결 론

메탄과 공기의 예혼합기에 소량의 물을 혼합하여 완전히 증발시킨 후, 초기 혼합기의 온도와 당량비 및 물의 혼합 비율이 연소속도에 미치는 영향을 실제 연소사진과 CHEMKIN 프로그램에 의한 계산 값을 서로 비교한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) Premix 코드를 이용하여 계산된 연소속도는 실제의 연소속도와 잘 일치하고 있어 신뢰성이 있는 것으로 판단된다.
- 2) 메탄 공기 예혼합기에 혼합되는 물의 양이 많을수록 화염발달이 상당히 느리게 진행되어 이것이 화염속도 저하를 가져오고 있다.
- 3) 분위기온도 변화에 따른 연소속도의 변화량은 물의 양이 많아질수록 그 효과가 작아지고 있다.

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
 ρ : gas density, kg/m³
 V : volume
 ϕ : equivalence ratio
 λ : thermal conductivity, W/m·K
 C : specific heat, J/kg·K
 R : universal gas constant, J/kgK
 W : water

Subscripts

b : burned, u : unburned
 atm : atmosphere
 R : ratio of water
 a : air f : fuel p : constant pressure

후 기

본 연구는 두원공과대학에서 지원하는 학술 연구비에 의해 수행되었습니다.

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., *Fourth Symposium International on Combustion*, pp.61-620, (1953)
- 7) Cameron, L. R. J., *University of Wales Cardiff, Degree of Doctor Philosophy*, (1999)
- 8) Rallis, C. J. and Garforth, A. M., *Progress Energy Science*, **9**, 303, (1980)
- 9) Gottgen, J., Mauss, F. and Peter, N., *Twenty-Fourth Symposium International on Combustion*, pp.129-135, (1992)
- 10) Singh, A. K. and Polymeropoulos, C. E., *Twenty-first Symposium (International) on Combustion*, pp. 513-519, (1988)
- 11) Choi, S. H., Jeon C. H. and Chang, Y. J., *Transaction of KSAE*, **11**, **3**, 48, (2003)

(2009년 3월 11일 접수, 2009년 8월 21일 채택)