

수소-공기 화염의 안전성 향상을 위한 프로판 첨가 효과

권 오 채[†]

성균관대학교 기계공학부

Effects of propane substitution for safety improvement of hydrogen-air flame

Oh Chae Kwon[†]

*School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University
300 Chunchun-dong, Jangan-gu, Suwon, Kyunggi-do 440-746, Korea*

ABSTRACT

In order to evaluate the potential of partial hydrocarbon substitution to improve the safety of hydrogen use in general and the performance of internal combustion engines in particular, the outward propagation and development of surface cellular instability of spark-ignited spherical premixed flames of mixtures of hydrogen, hydrocarbon, and air were experimentally studied at NTP (normal temperature and pressure) condition in a constant-pressure combustion chamber. With propane being the substituent, the laminar burning velocities, the Markstein lengths, and the propensity of cell formation were experimentally determined, while the laminar burning velocities and the associated flame thicknesses were computed using a recent kinetic mechanism. Results show substantial reduction of laminar burning velocities with propane substitution, and support the potential of propane as a suppressant of both diffusional-thermal and hydrodynamic cellular instabilities in hydrogen-air flames.

주요기술용어 : Hydrogen flame(수소화염), Flamefront instabilities(화염면 불안정성), Hydrocarbon substitution(탄화수소계 첨가), Markstein number (Markstein 수), Flame stretch(화염 스트레치), Preferential-diffusion(차등 확산)

1. 서론

수소는 높은 반응성으로 인하여, 자연한계의

확장과 공해 물질의 저감 등 탄화수소계 연료의 연소 성능 향상을 위한 첨가제로 사용된다¹⁻⁷⁾. 최근에는 지구 온난화 문제에 대한 하나의 해결책으로 연소, 비연소방식 모두 포함하여 순수 수소의 이용에 대한 관심이 증대되고 있다⁸⁻¹²⁾.

[†] Corresponding author : okwon@skku.edu

이러한 수소이용이 현실화되는데 저장, 안전성, 수소엔진의 성능 등과 관련된 기술적인 문제가 존재한다. 수소 연소이용은 높은 반응성과 확산 특성으로 인하여 저장 중 폭발의 가능성이 높다는 문제가 있다¹³⁻¹⁵⁾. 수소 엔진의 경우는 탄화수소계 연료에 비해 질소산화물의 배출이 감소되는 장점도 있지만 고효율을 위한 과급기가 사용될 때 특히 엔진 노킹의 문제가 야기된다¹⁶⁾.

본 논문에서는 수소 이용시 연관된 위험성을 줄이는 새로운 접근 방식을 제시하고자 한다. 건조 마찰에 의한 자연 화재와 같은 자연적 원인은 항상 존재한다. 그리고 탄소 사이클 자체가 대기 이산화탄소의 강력한 싱크(sink)를 제공하므로 에너지 변환 및 이용에 어느 정도의 이산화탄소 배출을 허용해도 지구온난화에 대한 영향은 미미할 것으로 생각한다. 이 점에 착안하여 연소장치에서 이산화탄소 저감을 위해 수소를 주 성분으로 하고 탄화수소를 혼합하는 것을 제안하였다. 이는 순수 수소 이용이 경제적으로 현실화될 때까지 중간 단계의 해결책으로도 부합된다. 동시에 수소-탄화수소 혼합 연료의 연소는 다음과 같은 잠재적인 장점들이 있을 것으로 예상된다.

첫째, 상대적으로 고 에너지 밀도인 탄화수소계 연료를 첨가함으로써 과급기의 필요성이 줄어들어 노킹발생이 완화될 수 있다. 둘째, 소량의 탄화수소계 연료의 첨가로 화염의 시각적 감지가 가능하므로 대형 화재의 조기 감지가 용이하다. 셋째, 순수 수소의 화염 전파에 비하여 디토네이션 발생가능성이 줄어든다. Landau¹⁷⁾에 의해 최초 제기되고 후에 실험적으로 입증된 바와 같이 화염면을 경계로 밀도차에 의해 발생하는 유체역학적 불안정성과 연료, 산화제 중 부족한 반응물이 움직이기 용이한 화학종일 때 발생하는 화염 고유의 확산-열 불안정성¹⁸⁾에 의하여 화염면에 셀이 형성된다. 이는 화염면적을 급격히 증가시켜 화염전파의 가속화, 자발적인 난류화를 유도하며, 궁극적으로 디토네이션의 천이를 가져온다.

희박 수소-공기 화염은 확산-열적으로 불안정하여 화염면 위에 풍부한 셀이 형성 된다¹⁹⁾. 반면

3개 이상의 탄소를 포함하는 탄화수소계 연료-공기 혼합기가 희박 연소할 때는 연료가 산소보다 무거워 확산-열적으로 안정된 상태이다. 따라서 탄소가 3개인 프로판(C_3H_8)을 희박 수소-공기 혼합기에 첨가하였을 때 확산-열적으로 안정화 될지, 셀의 출현(불안정성의 시작)이 늦추어 질지 등에 대한 의문이 자연스럽게 생긴다. 이는 디토네이션 발생의 억제 효과, 즉 수소 이용 안전성의 향상 가능성을 의미하는 것이다.

화염면 불안정성 특성 외에도 수소-공기 혼합기에 탄화수소계 연료의 첨가는 화염 온도를 낮추어 연소속도와 화염 두께에 영향을 미친다. 이는 결국 화염의 스트레치와 화학종과 종, 종과 열간의 차등(preferential) 확산의 영향에 대한 화염의 반응을 변화시킨다. 반면 점화성능은 탄화수소계 연료의 첨가의 영향을 거의 받지 않을 것으로 예상된다. 이것은 탄화수소계 연료-공기 혼합기에 소량의 수소를 첨가할지라도 점화 시 수소의 촉매 효과로 인해 거의 순수 수소-공기 혼합기의 경우와 동일한 점화 온도를 갖는다는 선행의 연구 결과에 근거한다⁵⁾.

본 연구에서는 상기 관점으로부터 수소-공기 혼합기에 탄화수소계 연료를 첨가하는데 따른 수소 안전성 및 기관성능 향상의 가능성을 알아보았다. 이를 위해 탄화수소-수소-공기 화염의 층류 연소속도를 측정 및 수치계산하며, 화염면 불안정성에 대한 탄화수소계 연료의 첨가 영향을 관찰하고 동시에 스트레치와 차등 확산에 대한 화염의 민감도를 나타내는 Markstein 길이(확산-열적 불안정성에 의한 셀 출현 시기와 직접적 연관)를 측정하였다. 또한 화염 두께, 미연 대기연 가스 밀도비, 온도에 대한 탄화수소계 연료 첨가의 영향을 해석하였다.

2. 실험 및 계산 방법

전기 스파크에 의해 점화되는 구형 전파 화염은 생성이 상대적으로 용이하고 그 동적 특성이 잘 정의되므로 본 연구의 모델 화염으로 선택하

었다¹⁹⁾. 실제로 이러한 구형 전파 화염은 폭발 사고와 가장 밀접히 관련된 화염 형태이다. 대부분의 폭발 사고는 대기에서 발생하기 때문에 대기 압 조건의 정압연소실을 이용하였다. 연구에 사용된 측정 장치의 개략은 다음과 같다¹⁹⁾.

2중 환형으로 구성된 연소실의 내실은 분압 방식으로 예혼합기를 채우고 외실은 내실과 동일한 압력의 비활성 기체(질소)로 채워진다. 처음에는 내실과 외실이 각각 다수의 구멍을 포함하고 있는 벽으로 분리되어 있다. 점화를 시키기 바로 직전에 기계적으로 미끄러지면서 서로의 구멍들이 일치하게 되어 내실과 외실 간에 연결된다. 교란을 최소화하기 위하여 최소 전기 스파크 에너지를 공급하고, 점화에 의해 전파되는 화염은 단일 연소기를 사용하면 상당한 압력 상승을 유발한다. 그러나 본 연소실의 경우는 내실의 부피에 비해 외실의 부피가 훨씬 크기 때문에 점화와 함께 서로 연결이 되어 거의 정압을 유지한다. 화염전파 과정은 고속 디지털 카메라(최대 8000 fps)를 이용한 Schlieren법으로 가시화하였다. 측정은 점화 교란과 내실 벽면의 영향을 피하기 위해 5 mm에서 20 mm 보다 작은 반경의 화염에 대해서만 이루어 졌다. 구형 전파 화염의 경우의 국소기연 화염 전파속도와 스트레치는 기연 가스가 정지되어 있으므로 다음과 같이 주어진다.

$$s_b = dr/dt \equiv \dot{r} \quad x = 2\dot{r}/r \quad (1)$$

여기서 r 과 t 는 각각 화염 반경과 시간이다. 스트레치가 약한 조건에서 s_b 는 다음과 같이 스트레치 k 와 선형의 관계를 갖는다.

$$s_b = s_b^0 - L_b k \quad (2)$$

여기서 s_b^0 는 (스트레치가 완전 배제된) 기연 층류 연소속도이고, L_b 는 기연 Markstein 길이이다. 식(2)를 시간에 대하여 적분하면 다음과 같은

결과를 얻는다.

$$r + 2L_b \ln(r) = s_b^0 t + \text{constant} \quad (3)$$

여기서 s_b^0 와 L_b 는 시간에 대한 화염 반경 측정 데이터를 선형 보간법으로 구하였다. 미연 층류 연소속도 s_u^0 , 층류 연소유량 f^0 는 s_b^0 와 Reynolds²⁰⁾의 단열 평형 알고리즘을 적용하여 구한 밀도비, $\rho_b s_b^0 = \rho_u s_u^0 = f^0$ 관계 등을 이용하여 구하였다. 여기서 ρ 는 밀도이다. 화염면 불안정성의 특성은 화염 전파가시화 사진으로 평가하였다.

전술한 바와 같이 3개 이상의 탄소를 포함하는 탄화수소계 연료가 관심의 대상이므로 수소에 첨가되는 연료로는 프로판을 선택하였다. 이보다 무거운 탄화수소계연료, 예로 부탄(C_4H_{10})은 화염면 안정화의 관점에서 보면 더욱 적합한 연료이다. 그러나 고압수소 저장용기와 같이 실제 적용 시스템에서 부탄의 첨가 가능한 양은 매우 제한된다. Fig. 1은 이에 대한 설명으로서, 온도 $T = 260\text{--}300\text{ K}$ 에서 탄화수소계 연료(아세틸렌, 프로판, 부탄)의 포화 증기압력에 기초하여 주어진 성분에서 탄화수소계 연료가 수소와 혼합될 때 최대 허용 용기 압력을 보인다. 그림에서 SFHC (stoichiometric fraction of hydrocarbon in fuel gases)는 탄화수소계 연료에 의해 대체되는 수소의 부피 분율로 정의된다. 그림에 보이는 것과 같이 부탄은 프로판, 아세틸렌에 비하여 낮은 포화 압력으로 인해 훨씬 낮은 최대 허용 용기 압력을 나타낸다. 예를 들어 동일한 5%의 대체에 대해 부탄의 경우는 약 50 atm, 프로판의 경우는 약 200 atm 정도이다. 일반 연구용 수소 용기 압력이 140 atm 정도라는 것을 고려하면 상기 결과는 부탄의 사용이 비실용적이라는 것을 의미한다. 따라서 본 연구에서는 프로판만 대상으로 하였다.

혼합기의 성분은 총 당량비 $\phi_{C,H}$ 와 SFHC에 의해 정의된다. X_C 와 X_H 를 각각 탄화수소 연료(프로판)와 수소의 몰분율이

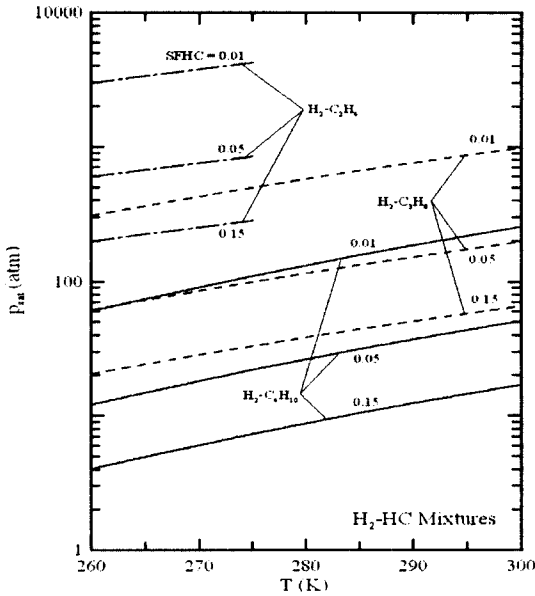


Fig. 1. Estimated maximum allowable storage pressures of hydrocarbon-hydrogen mixtures as a function of temperature for SFHC = 0.01, 0.05, and 0.15.

라고 할 때 연료 가스 중 탄화수소계 연료의 몰분율 $x_C = X_C / (X_C + X_H)$ 와 같은 더 직접적이고 일반적인 파라미터 대신 SFHC를 사용하는 이유는 결과 및 고찰에서 논한다. 실험은 $\phi_{C/H} = 0.6, 1.0, 1.67$ 의 프로판-수소-공기 혼합기에 대하여, 각각의 당량비에서 $x_C = 0, 5, 10, 15\%$ 에 해당하는 SFHC에서 수행하였다. 모든 실험은 상온 298±3 K, 대기압 (NTP)에서 수행되었고 각각의 조건에 대하여 3-4 회의 반복 측정된 결과를 평균하였다. 95%의 신뢰도에서 실험치의 불확실성은 s_u° 와 L_b 가 각각 5, 15%이다.

좌우 무한 영역에서 전파하는 단일 정상 평면 (스트레치가 완전 배제된) 화염은 1차원 층류 예혼합 화염 코드인 PREMIX²¹⁾를 사용하여 수치 모사하였다. 이 코드는 측정된 층류연소속도 s_u° 와 비교하기 위하여, 화염면 불안정성을 평가할

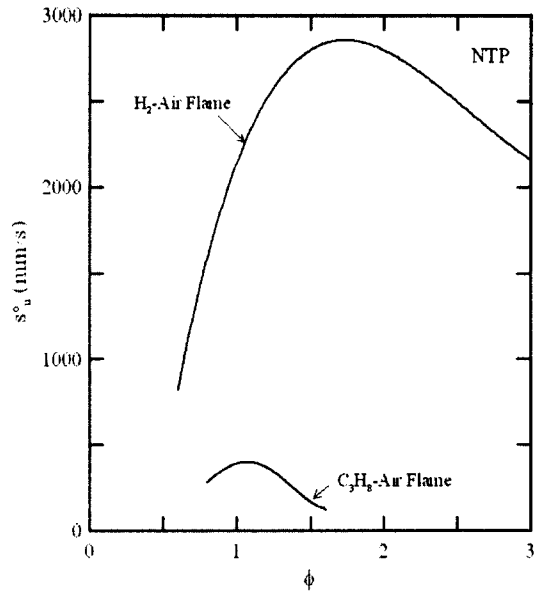


Fig. 2. Measured laminar burning velocities as a function of fuel-equivalence ratio for H₂-air²⁴⁾ and C₃H₈-air (present) flames at NTP.

때 필요한 화염 두께 δ_f° 를 구하기 위해 사용된다. 모든 계산은 C₂-와 C₃-탄화수소계 연료의 상세 화학반응 메커니즘²²⁾을 사용하고 열 확산 등을 포함한 상세 전달 모델²³⁾을 적용하였다. 상세 화학반응 메커니즘에 포함된 화학종은 총 75 종이며 반응 단계는 총 529 단계이다. 이산화탄소와 수증기를 통한 복사 열손실은 층류연소속도에 거의 영향을 미치지 않아 무시되었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 층류연소속도

Fig. 2는 실험에 의해 측정된 수소-공기, 프로판-공기 화염의 층류 연소속도 s_u° 를 당량비 ϕ 의 함수로 나타낸 것이다. 수소-공기 화염 데이터는 Kwon과 Faeth²⁴⁾의 결과이고 프로판-공기의 s_u° 는 본 연구에서 직접 측정하였다. 그림은 프로판 화염의 층류 연소속도가 수소 화염의 층류 연소

속도보다 매우 낮다는 것을 보여준다.

Fig. 3은 $\phi_{C-H} = 0.6, 1.0, 1.67$ 의 프로판이 첨가된 경우 수소-공기 화염의 층류 연소속도의 측정값과 계산값을 SFHC의 함수로 보인 것이다. 그림에는 계산된 층류 연소유량 f^o 도 나타낸다. 층류 연소속도와 층류 연소유량 모두 혼합기의 연료 농도에 상관없이 프로판 첨가로 급격히 감소함을 볼 수 있다. 이 외에도 다음과 같은 흥미로운 경향들이 관찰된다.

첫째, 이론혼합비와 연료 희박 조건의 화염의 경우에는 프로판 첨가와 함께 층류 연소속도의 상대적 감소량이 거의 동일함을 보여준다. 반면에 연료과농 조건의 화염의 경우에는 층류 연소속도의 상대적 감소량이 두드러진다. 이러한 연료 농도에 따른 층류 연소속도 감소량의 차이는 Fig. 2에서 보이듯이 순수 수소-공기 화염과 순수 프로판-공기 화염의 당량비에 따른 s_u^o 분포의 차이에 기인한다. 즉, 프로판-공기 화염의 최대 s_u^o 가 $\phi = 1.1$ 주위에서 관찰되는 반면, 수소-공기 화염의 경우는 수소의 높은 확산 특성의 결과로 $\phi = 1.8$ 주위에서 관찰되고, 따라서 프로판 화염과 수소 화염의 층류 연소속도 차이가 연료 과농 영역에서 크고 특히 $\phi = 1.8$ 주위에서 최대를 보여주기 때문이다.

둘째, 실험값과 계산값의 s_u^o 비교는 이 값들이 이론혼합비와 과농의 조건에서 잘 일치한다. 반면에 희박 조건에서 그 차이가 상대적으로 크지만 대체로 만족할 만한 수준이라는 것이다.

마지막으로 프로판의 첨가에 따른 층류 연소유량 f^o 의 감소도 s_u^o 의 감소와 유사한 경향을 보여주고 있다. 이는 s_u^o 의 감소 경향에 대한 혼합기의 분자량 변화에 의한 밀도의 영향이 본 연구에서 고려된 SFHC 변화 영역에서 크지 않음을 의미한다. 그러나 SFHC가 더 증가함에 따라, 혼합기가 더 연료 과농해지며 이로 인해 밀도가 증가할 수 있고, 따라서 f^o 의 변화 경향이 바뀔 수도 있다²⁵⁾(나중에 논의될 Fig. 7 참조). 상기 결과는 본 연구에서 고려된 SFHC 변화 영역에서의 s_u^o 의 감소가 밀도 변화보다 프로판 첨가에 의한 화염 구

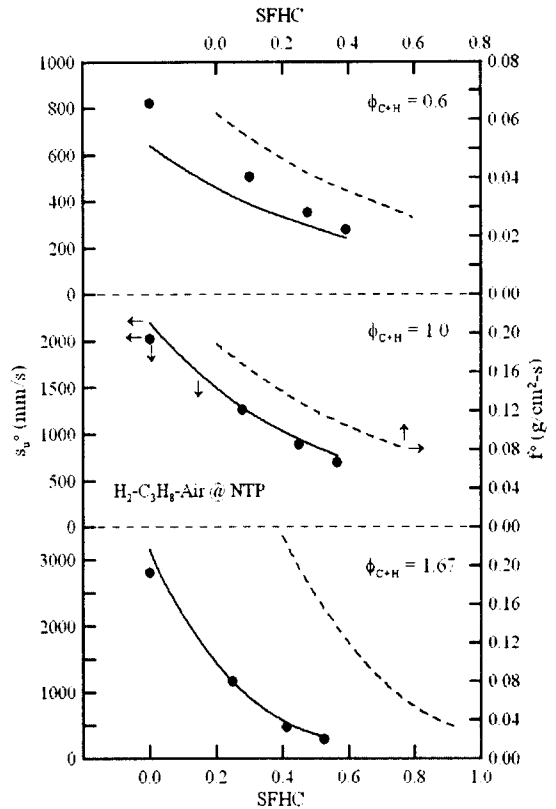


Fig. 3. Measured and predicted laminar burning velocities and mass burning fluxes as a function of SFHC for C₃H₈-substituted H₂-air flames of $\phi_{C-H} = 0.6, 1.0$ and 1.67 at NTP: symbols for measurements and lines (solid: laminar burning velocities; dashed: mass burning fluxes) for predictions using the kinetics of Qin et al.²²⁾.

조와 전과 과정의 변화에 의한 것임을 나타내는 것이다.

이 시점에서 프로판이 첨가(대체)되는 양을 정의하는 방법(SFHC 또는 x_C)에 따라 결과 데이터의 해석이 상이하게 될 수도 있음을 살펴보도록 하자. 이를 통해 적절한 정의를 사용하는 것이 중요함을, 그리고 본 연구에서 사용한 SFHC가 적절함을 인식하는 것이 필요하다.

이를 위해 Fig. 3 중 이론혼합비 조건의 결과를

연료 가스 중 탄화수소계 연료의 물분율 x_C 로 재구성하여 Fig. 4에 나타내었다. 일반적인 경향은 Fig. 3과 Fig. 4 모두 유사함을 알 수 있다. 그러나 가로축을 주의 깊게 살펴보면 그 의미는 다르다. 즉, 최대 첨가의 경우 x_C 의 관점에서 보면 단순히 프로판이 연료 혼합기 중 차지하는 비율이 15%에 불과한 것으로 이해하게 되는데, *SFHC*의 관점에서 보면 약 60%의 수소가 프로판으로 대체되었다는 것을 의미한다. 따라서 프로판 대체를 더 효과적으로 표현하는 정의가 *SFHC*임을 알 수 있다. 더욱이 *SFHC*는 대체되는 탄화수소계 연료가 다양할 때 각각 대체되는 수소의 양을 동일한 상태에서 결과 비교에 유용한 파라미터로

사용될 수 있을 것이다.

3.2 Markstein 길이

Markstein 길이 L_b 또는 화염 두께 δ_T° 에 의해 무차원화된 Markstein 수 $Ma = L_b/\delta_T^\circ$ 는 앞에서 언급한대로 스트레치에 대한 화염의 반응 민감도를 나타낸다. s_u° 와 더불어 L_b 는 공기역학적 스트레치 영향을 받는 층류 화염의 전반적 특성을 나타내는 가장 중요한 두개의 파라미터이다^{18, 24, 26, 27}. 더욱이 L_b 는 화염면 확산-열적 불안정성의 발생과 직접적으로 연관된다^{18, 24}.

Fig. 5는 Fig. 3과 동일한 혼합기의 L_b 실험 측정값을 보여준다. s_u° 와는 상이하게 L_b 의 프로판 대체에 대한 의존성은 혼합기의 연료 농도에 따라 변한다. $\phi_{C-H} = 1.67$ 인 연료 과농 연소에 대해서는 L_b 가 항상 양의 값을 갖는데 *SFHC*의 증가와 함께 그 값이 증가한다. 이는 확산-열적 안정성이 향상됨을 의미하며 원래 안정적인 연료 과농 순수 수소-공기 혼합기에 프로판이 첨가되

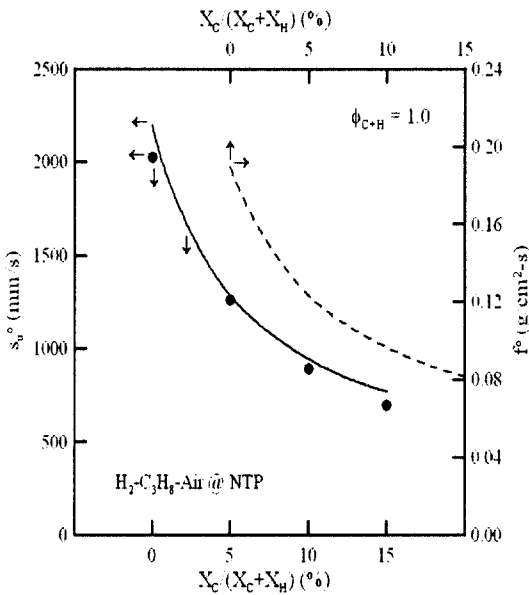


Fig. 4. Measured and predicted laminar burning velocities and mass burning fluxes as a function of $X_C/(X_C+X_H)$ for stoichiometric C_3H_8 -substituted H_2 -air flames at NTP : symbols for measurements and lines (solid: laminar burning velocities; dashed: mass burning fluxes) for predictions using the kinetics of Qin et al.²²⁾, the equivalent of Fig. 3.

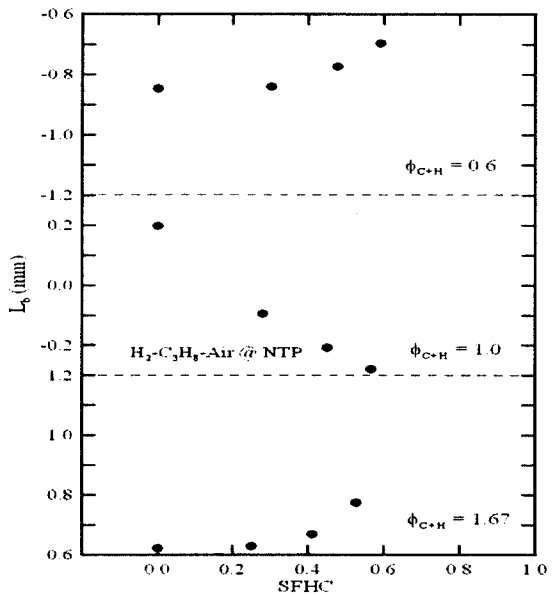


Fig. 5. Measured Markstein lengths as a function of *SFHC* for C_3H_8 -substituted H_2 -air flames of $\phi_{C-H} = 0.6, 1.0$ and 1.67 at NTP.

로 더욱 안정화되기 때문이다.

이론혼합비 조건($\phi_{C-H} = 1.0$)에서는 L_b 가 양수에서 음수로 바뀌며 이는 화염이 프로판을 첨가에 따라 불안정화 되어 감을 의미한다. 이러한 화염의 불안정화는 프로판 첨가에 의한 안정화 효과가 프로판에 의해 대체되는 만큼의 수소 양이 감소하여 발생하는 불안정화 효과에 비해 상대적으로 낮다는 것을 의미한다. 후자의 불안정화 효과가 우세한 가운데 전자와 후자의 서로 반대되는 경향은 프로판-공기 화염과 수소-공기 화염의 ϕ 에 대한 L_b 의 상이한 경향^{28, 29)}에서 어느 정도 예측이 된다. 프로판-공기 화염의 경우 ϕ 증가에 대해 L_b 가 선형적으로 감소하는 반면 수소-공기 화염의 경우 연료 희박 영역과 이론혼합비에서는 ϕ 증가에 대해 L_b 가 급격히 증가하고 연료 과농 영역에서는 거의 변화가 없다. 따라서 감소한 수소 농도에 의한 불안정화 효과가 지배적인 것이다.

마지막으로 $\phi_{C-H} = 0.6$ 인 연료 희박 연소에 대해서는 L_b 가 항상 음의 값을 갖는데 SFHC의 증가와 함께 그 값이 증가(절대값은 감소)함을 알 수 있다. 이는 프로판의 첨가가 화염을 안정화시킨다는 것을 의미한다. 이러한 결과는 앞에서의 논의들과 다음에 보일 Fig. 6의 화염면 이미지와도 부합된다.

3.3 화염면 불안정성

Fig. 6은 $\phi_{C-H} = 0.6$ 인 프로판이 첨가(SFHC = 0.00, 0.30, 0.59)된 수소 화염의 전파 사진을 보여 준다. Kwon 등¹⁹⁾의 결과를 따라 서로 다른 조건의 화염 전파 연속 사진들을 동일한 수준의 스트레치에서 비교하기 위해 스트레치 κ 를 무차원화한 Karlovitz 수 $Ka = (2/r)(dr/dt)/(s_u^0/\delta r^0)$ 를 도입하였다. 화염 스트레치는 화염이 전파함에 따라 감소하고 구형 화염에 대한 전파 초기 고유의 양의 스트레치에 의한 안정화 경향이 감소함을 유념해야 한다¹⁸⁾. 화염 전파 사진에서 순수 수소-공기 화염의 경우는 전파 초기에 이미 화염면에

주름이 생기고 차차 작은 크기의 주름으로 발전하는 것을 볼 수 있다. 이것은 희박 수소-공기 화염 고유의 확산-열적 불안정성에 기인한 것이다. 프로판 첨가로 화염면 위의 주름이 감소하는 것을 관찰할 수 있는데 화염면의 주름 또는 균열 형태가 SFHC = 0.30(이에 해당하는 $x_C = 5\%$)의 경우 화염 전파 후반부에 생성된다. SFHC = 0.59($x_C = 15\%$)의 경우는 기본적으로 화염면이 매끈하다. 모든 조건에서 산소의 소비는 크게 변하지 않았다(SFHC = 0.00, 0.30, 0.59에 상응하는 산소의 몰분율 $X_O = 0.17, 0.18, 0.19$).

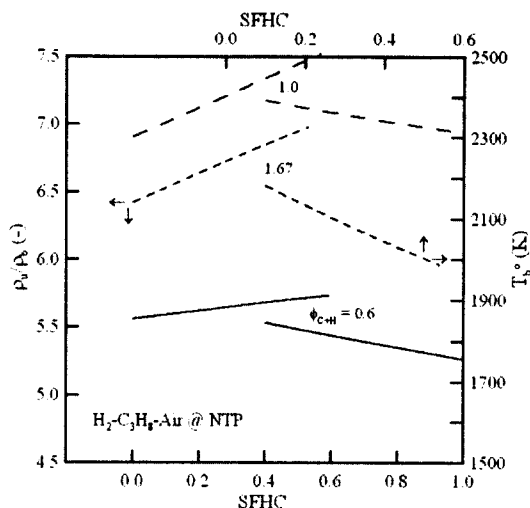


Fig. 7. Calculated density ratios and adiabatic flame temperatures as a function of SFHC for C₃H₈-substituted H₂-air flames of $\phi_{c+H} = 0.6$ (solid lines), 1.0 (dashed lines), and 1.67 (dotted lines) at NTP.

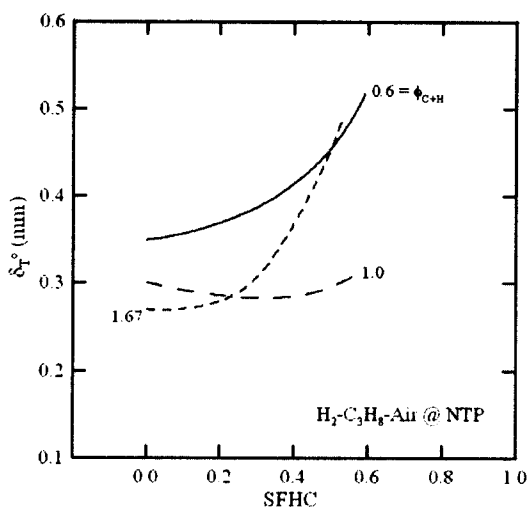


Fig. 8. Predicted flame thicknesses as a function of SFHC for C₃H₈-substituted H₂-air flames of $\phi_{c+H} = 0.6$ (solid lines), 1.0 (dashed lines), and 1.67 (dotted lines) at NTP. Predictions based on the kinetics of Qin et al. ²²⁾.

Fig. 6에서 관찰되는 화염면 불안정성은 분명 그 시작은 유체역학적 불안정성보다는 확산-열적 불안정성의 특성을 갖는다. 이는 관찰된 화염의 크기가 상대적으로 작다는 데서도 기인한다. 그렇지만 화염이 더 큰 크기로 전파된다고 가정할 경우 발생할 유체역학적 셀의 출현에 프로판 대체가 미치는 영향을 평가하는 일은 흥미롭다. 유체역학적 셀 형성을 지배하는 두개의 파라미터는 화염면을 지나면서 생기는 밀도 변화와 화염 두께이다. 전자의 증가는 불안정성을 증대시키는 반면 후자의 증가는 감쇠시킨다. 따라서 Fig. 7과 Fig. 8에 본 연구의 실험 조건에 대해 계산된 밀도비와 정의 $\delta_f^o = (T_b^o - T_u) / (dT/dx)_{max}$ 로 계산한 화염 두께를 각각 나타내었다. 여기서 T_b^o 는 단일 화염온도, T_u 는 미연가스 온도, $(dT/dx)_{max}$ 는 최대 온도구배이다. 그림들은 프로판 첨가의 증가와 함께 밀도비, 화염 두께 모두 증가하는 것을 보여준다. 따라서 유체역학적 셀 생성에 대한 지배적인 효과는 불분명하지만 다음과 같은 해석

이 가능하다. 회박 연소의 경우 밀도비의 증가에 비해 상대적으로 화염 두께의 증가가 크기 때문에 프로판의 대체가 유체역학적 셀 생성을 억제하는 효과를 갖는다. 또한 프로판의 첨가가 확산-열적 불안정성을 억제하는 것을 고려하면 수소-공기 화염의 회박 연소시 프로판의 첨가는 화염면의 안정성을 증대시킨다는 결론을 내릴 수 있다.

과농 연소에 있어서는 밀도비, 화염 두께 모두 상당히 증가하기 때문에 그 지배적인 효과를 명확하게 인식할 수 없지만 상호 상쇄효과에 의해 유체역학적 불안정성, 안정성 어느 한쪽 효과가 두드러지지 않을 것이다. 확산-열적 불안정성은 이미 순수 수소-공기 화염이 안정적이므로 프로판의 첨가 효과가 두드러지지 않을 것이다. 이는 관찰된 화염의 이미지들로부터도 입증된다. 즉, 순수 과농 수소-공기 화염면의 매끄러운 특성이 프로판 첨가에 의해 거의 변화하지 않았다. 마지막으로 Fig. 7에 밀도비와 함께 단일 화염온도를 다양한 혼합기에 대해 나타내었는데 프로판 첨가

에 의해 모든 당량비에 대한 온도가 감소함을 볼 수 있다. 일반적으로 온도의 감소는 질소산화물 배출의 감소의 결과를 가져오므로 프로판의 대체가 질소산화물 배출 감소에도 기여할 수 있다는 가능성을 제시하는 것이다.

4. 결 론

본 연구에서는 수소이용의 안전성과 수소 엔진 성능 향상을 위한 순수 수소-공기 화염에 탄화수소계 연료 첨가(대체)의 효과를 실험 및 수치적으로 조사하였다. C₄ 이상의 탄화수소계 연료의 경우는 낮은 포화 증기압력으로 인한 고압 용기 저장에서의 실용성의 문제로 프로판이 첨가 연료로 선택되었다.

본 연구의 모든 실험 조건에서 층류 연소속도와 온도가 프로판 첨가에 의해 상당히 떨어지는데, 특히 후자의 효과는 (비록 느려진 반응속도에 그 생성이 촉진될 가능성도 존재하지만) 일반적으로 질소산화물의 생성을 감소시키는 잠재력을 지닌다. 순수 수소 엔진의 노킹 현상 개선에 대해서도 역시 프로판의 첨가로 (느려진 반응속도로 인해 오히려 자발점화에 의해 노킹 현상이 여전히 존재할 가능성도 있지만) 과급기의 사용을 제거함으로써 노킹 현상을 개선할 잠재력을 갖게 한다. 한편 가연가스 내 미소량의 수소 존재만으로도 그 점화 촉매 기능으로 인해 순수 수소-공기의 화염과 거의 동일한 점화 온도를 가짐으로 수소-공기 혼합기의 점화성능에 대한 프로판 첨가의 영향은 거의 없다고 볼 수 있다.

본 연구 핵심 결과는 수소-공기 화염에 프로판의 첨가가 확산-열적 화염면 불안정과 유체역학적 불안정성 모두를 완화시킨다는 강한 증거를 제시하는 것이며, 이로 인하여 자발적 난류화, 데토네이션으로 천이를 지연시키는 효과가 있을 것으로 생각된다.

후 기

본 연구는 성균관대학교의 2003학년도 성균학술연구비에 의하여 지원되었다. 또한 고압 연소실 및 측정 장비 사용을 허락한 미국 프린스턴대학의 Dr. C. K. Law 에게 감사드린다.

참 고 문 헌

- 1) Rao B. Haragopala, K. N. Shrivastava, and H. N. Bhakta : "Hydrogen for dual fuel engine operation", Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 8, No. 5, 1983, pp. 381-384.
- 2) S. R. Bell and M. Gupta : "Extension of the lean operating limit for natural gas fueling of a spark ignited engine using hydrogen blending", Combust. Sci. Tech., Vol. 123, 1997, pp. 23-48.
- 3) S. O. Bade Shrestha and G. A. Karim : "Hydrogen as an additive to methane for spark ignition engine applications", Proc. Intersociety Energy Conversion Eng. Conference, Vol. 32, No. 2, 1997, pp. 910-915.
- 4) N. R. Baker and W. D. Van Vorst : "Mixture properties for hydrogen supplementation of natural gas", in T. N. Veziroglu and W. Seifritz (Edi.), "Hydrogen Energy System", Pergamon, U.K., 1979, pp. 1373-1400.
- 5) C. G. Fotache, T. G. Kreutz, and C. K. Law : "Ignition of hydrogen-enriched methane by heated air", Combust. Flame, Vol. 110, 1997, pp. 429-440.
- 6) J. L. Gauducheau, B. Denet, and G. Searby : "A numerical study of lean CH₄/H₂/air premixed flames at high pressure", Combust. Sci. Tech., Vol. 137, 1998, pp. 81-99.
- 7) R. Sai, J. Plaia, G. S. Jackson, and K. T. Kiger : "Further studies on lean stability of premixed CH₄/H₂ flames", Proc. E. State

- Section Meeting for Combustion Institute, 2001, pp. 364-367.
- 8) M. A. DeLuchi : "Hydrogen vehicles: an evaluation of fuel storage, performance, safety, environmental impacts, and cost", Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 14, No. 2, 1989, pp. 81-130.
 - 9) J. M. Ogden : "Developing an infrastructure for hydrogen vehicles: a Southern California case study", Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 24, No. 8, 1999, pp. 709-730.
 - 10) H. B. Mathur, L. M. Das, and T. N. Patro : "Hydrogen fuel utilization in CI engine powered end utility systems", Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 17, No. 5, 1992, pp. 369-374.
 - 11) S. Verhelst and R. Sierens : "Aspects concerning the optimization of a hydrogen fueled engine", Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 26, No. 9, 2001, pp. 981-985.
 - 12) J. S. Badin and S. Tagore : "Energy path way analysis a hydrogen fuel cycle framework for system studies", Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 22, No. 4, 1997, pp. 389-395.
 - 13) M. Fischer : "Safety aspects of hydrogen combustion in hydrogen energy systems", Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 11, No. 9, 1986, pp. 593-601.
 - 14) M. P. Sherman : "Hydrogen combustion in nuclear plant accidents and associated containment loads", Nuclear Eng. Design, Vol. 82, 1984, pp. 13-24.
 - 15) J. H. S. Lee and A. J. Higgins : "Comments on criteria for direct initiation of detonation", Phil. Trans. R. Soc. Lond. A, Vol. 357, 1999, pp. 3503-3521.
 - 16) R. J. Natkin, X. Tang, B. Boyer, B. Oltmans, A. Denlinger, and J. W. Heffel : "Hydrogen IC engine boosting performance and NOx study", SAE No. 2003-01-0631, 2003.
 - 17) L. D. Landau : "On the theory of slow combustion", Acta. Physicochem., Vol. 19, 1944, pp. 77-85.
 - 18) C. K. Law and C. J. Sung : "Structure, aerodynamics, and geometry of premixed flamelets", Prog. Energy Combust. Sci., Vol. 26, 2000, pp. 459-505.
 - 19) O. C. Kwon, G. Rozenchan, and C. K. Law : "Cellular instabilities and self-acceleration of outwardly propagating spherical flames", Proc. Combust. Inst., Vol. 29, 2002, pp. 1775-1783.
 - 20) W. C. Reynolds : "The element potential method for chemical equilibrium analysis: implementation in the interactive program STANJAN", Stanford University, U.S.A., Department of Mechanical Engineering Report, 1986.
 - 21) R. J. Kee, J. F. Grcar, M. D. Smooke, and J. A. Miller : "A FORTRAN program for modeling steady laminar one-dimensional premixed flames", Albuquerque, U.S.A., Sandia National Laboratories Report SAND85-8240, 1993.
 - 22) Z. Qin, V. Lissianski, H. Yang, W. C. Gardiner, S. G. Davis, Jr., and H. Wang : "Combustion chemistry of propane: a case study of detailed reaction mechanism optimization", Proc. Combust. Inst., Vol. 28, 2000, pp. 1663-1669.
 - 23) R. J. Kee, G. Dixon-Lewis, J. Warnatz, M. E. Coltrin, and J. A. Miller : "A FORTRAN computer code package for the evaluation of gas-phase, multi-component transport properties", Albuquerque, U.S.A., Sandia National Laboratories Report

- SAND86-8246, 1992.
- 24) O. C. Kwon and G. M. Faeth : "Flame/stretch interactions of premixed hydrogen-fueled flames: measurements and predictions", *Combust. Flame*, Vol. 124, 2001, pp. 590-610.
- 25) C. J. Sun, C. J. Sung, L. He, and C. K. Law : "Dynamics of weakly stretched flames: quantitative description and extraction of global flame parameters", *Combust. Flame*, Vol. 118, 1999, pp. 108-128.
- 26) D. Bradley, P. H. Gaskell, and X. J. Gu : "Burning velocities, Markstein lengths, and flame quenching for spherical methane-air flames: a computational study", *Combust. Flame*, Vol. 104, 1996, pp. 176-198.
- 27) S. C. Taylor : "Burning velocity and influence of flame stretch", University of Leeds, U.K., Ph.D. thesis, 1991.
- 28) M. I. Hassan, K. T. Aung, O. C. Kwon, and G. M. Faeth : "Properties of laminar premixed hydrocarbon/air flames at various pressures", *J. Prop. Power*, Vol. 14, 1998, pp. 479-488.
- 29) G. Rozenchan, D. L. Zhu, C. K. Law, and S. D. Tse : "Outward propagation, burning velocities, and chemical effects of methane flames up to 60 atm", *Proc. Combust. Inst.*, Vol. 29, 2002, pp. 1461-1470.