

CNG 직접분사식 연소기에서의 연소 라디칼 특성

최 승 환¹⁾ · 조 승 완¹⁾ · 이 석 영¹⁾ · 정 등 수²⁾ · 전 충 환^{*1)} · 장 영 준¹⁾

부산대학교 기계공학과¹⁾ · 한국기계연구원²⁾

Characteristics of Combustion Radical in CNG Direct Injection Vessel

Seunghwan Choi¹⁾ · Seungwan Cho¹⁾ · Sukyoung Lee¹⁾ · Dongsoo Jeong²⁾
· Chunghwan Jeon^{*1)} · Youngjune Chang¹⁾

¹⁾Department of Mechanical Engineering, RIMT, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

²⁾Korea Institute of Machinery & Material, 171 Jang-Dong, Yusong-Gu, Daejeon 305-343, Korea

(Received 11 May 2004 / Accepted 22 July 2004)

Abstract : A cylindrical constant volume combustion chamber was used to investigate the combustion characteristics of stratified methane-air mixture under several initial charge conditions in the author's previous reports. The results showed that the improvement of thermal efficiency and reduction of heat loss was realized simultaneously by using 2-stage injection method.

This paper deals with the reason why the stratified combustion has showed better combustion rate through the measurement and analysis of chemiluminescence of CH^* and C_2^* radicals. An optic fiber bundle is used to measure the local emission of CH^* and C_2^* radicals to map the relationship between the excess air ratio and local radical intensity ratio in the combustion vessel at 5 mm apart from the geometric center. The results show that there exist a relationship between the intensity ratio and the air-fuel ratio. It is revealed that the improvement of combustion rate in a lean-stratified mixture is realized through the 2-stage injection method.

Key words : Constant-volume combustion vessel(정적연소기), Local excess air ratio(국소 공기과잉율), Methane-air mixture(메탄-공기 혼합기), Combustion radical(연소 라디칼), Chemiluminescence(화학발광)

1. 서 론

연소반응은 혼합기가 분해되면서 발생하는 중간 생성물, 즉 라디칼에 의해 지배된다. 반응영역 및 반응기구를 효과적으로 규명하기 위해 OH^* , CH^* 와 C_2^* 등의 라디칼 발광강도를 측정하면 편리하다. 탄화수소 화염으로부터 방출되는 가시광과 자외선 영역의 화학발광(chemiluminescence)은 주로 OH^* , CH^* , C_2^* 와 CO_2^* 로부터 방출되는 강한 라디칼과

HCO^* , CO^* 및 CH_2O^* 로부터 방출되는 약한 라디칼의 결과이다.¹⁾ 이들 라디칼 정보는 연소구조와 강도 해석,^{2,3)} 연소불안정 제어,⁴⁾ 성능 최적화⁵⁾와 같은 다양한 목적으로 사용되고 있으며, 연소 모델링에 있어서도 중요한 역할을 하고 있다.^{6,7)}

이와 관련하여 평면유도형광 (PLIF, planar laser induced fluorescence) 기법을 적용한 연구도 많이 진행되고 있다.^{8,9)} PLIF는 연소반응을 지배하는 미소량의 화학종의 농도분포를 2차원적으로 가시화 할 수 있는 장점을 가지고 있지만, 장치가 고가이며, 펄스 레이저에 의해 여기되는 평면광속의 면적이 제

*To whom correspondence should be addressed.
chjeon@pusan.ac.kr

한되어 있기 때문에 상대적으로 큰 화염에 대해서는 적용하기 어려운 단점이 있다. PLIF와는 달리 라디칼을 측정하는 기법은 오래 전에 개발되었지만, 능동제어(active control)의 제어 센서의 역할로써 근래에 다시 한 번 관심의 대상이 되고 있다.^{10,11)}

Gaydon¹²⁾은 각 라디칼은 고유의 파장을 가지며, 470, 510, 560 nm 부근에서 밴드 스펙트럼을 내는 C_2^* 와 390, 430 nm 부근에서 밴드 스펙트럼을 내는 CH^* 때문에 탄화수소 화염의 색은 청색 또는 청록색에 가깝다고 하였으며, Aleiferis 등¹³⁾의 보고에 의하면, Withrow와 Rassweiler가 S.I. 엔진에서 취득한 화염 스펙트럼과 예혼합 분젠 버너 화염에서의 스펙트럼이 유사하다는 것을 보인 이후 간헐 연소인 엔진에서도 많은 시도가 되고 있다.

연소 라디칼 측정을 수행한 많은 연구자들의 연구를 통해, 하나의 개별 라디칼 데이터로부터는 정보를 취득할 수 없지만, 라디칼들의 강도비로부터 압력과 온도의 영향을 제거한 유용한 정보를 취득할 수 있음을 알 수 있었으며, 최근에는 선 적분(line of sight)된 전체(global) 라디칼 정보가 아닌 국소(local) 라디칼 정보를 이용하여 국소 공기과잉율을 예측하고자 하는 연구가 진행되고 있다.¹⁴⁾ 또한 수송 기관에서도 저배기와 저연비에 대한 필요성으로부터 희박연소가 요구되고 있으며, 성층화에 대한 제어가 필요하기 때문에 혼합기를 공급하는 과정이 복잡해지며, 따라서 공간 분해된 국소 공기연료비에 대한 정보를 제공하는 진단기법의 개발이 요구되고 있는 시점이다.

일반적으로 CH^* 와 C_2^* 의 강도비는 공기과잉율과 강한 상관관계를 갖고 있다고 알려져 있다.¹⁵⁾ 이는 탄화수소 화염에서 C_2^* 는 연료의 냉·흑염(cool and dark flame)에서 생기는 초기 분해과정에서 발생되며, 연이어 CH^* 가 발생되기 때문이다. 따라서 CH^* 와 C_2^* 자발광은 연소반응에 대한 충분한 정보를 포함하고 있으며, 특히 연소 반응영역과 연소장내의 국소 공기과잉율을 예측하기에 적합하다.

따라서 본 연구에서는 2단 분사 기법을 이용한 CNG 직접분사식 정적연소기에서 연소반응을 지배하는 CH^* 와 C_2^* 자발광 강도를 취득하고, 이들 강도

비와 국소 공기과잉율의 관계를 이용하여, 비균질 혼합기에서의 연소특성을 조사하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

Fig. 1은 실험장치의 개략도로 크게 정적연소기, 혼합기 공급부, 라디칼 측정 시스템 및 데이터 취득부로 구성된다. 연소실 형상은 배기량 2.4 L의 승용차용 가솔린 기관의 압축상사점 부근을 모사하여 직경 86 mm, 폭 25 mm(체적 145 cc)로 하였다.

연소실 내부를 관찰하기 위해 연소실 양쪽에 두께 20 mm의 FS 창(fused silica window)을 각각 설치하였다. 1차 혼합기 공급을 위한 흡입포트는 연소실 벽면에 접선방향으로 설치하였으며, 이에 대칭하여 2차 분사용 흡입포트를 설치하였다. 또한 직경 1 mm의 피아노선을 이용하여 개조한 점화플러그를 연소실 상하 벽면에서부터 대향형으로 설치하여 연소실의 중심에서 점화가 되도록 하였다. 연소실의 압력측정을 위해 압전형 압력변환기(Kistler 6061B)를 이용하였으며, 한 번의 연소과정이 종료된 후 연소 가스는 진공펌프를 통해 배출된다. 또한 연소 후 수증기의 응축을 방지하기 위해 카트리지 타입의 히터를 장착하였으며, 연소실의 온도는 383 K를 유지하였다.

혼합기 공급부는 1차 혼합기 공급을 위한 혼합탱크(A) 및 2차 분사용 혼합탱크(B)로 구성되며, 서로 다른 공기과잉율을 갖는 혼합기를 구성할 수 있도록 하였다. 이때 공기과잉율은 공급되는 메탄과 공기의 분압에 의해 결정되며, 분압은 1 kPa 해상도의 다이어프램식 압력게이지를 이용하여 제어하였다. 또한 제조된 혼합기의 공기과잉율은 가스 크로마토그래피(HP 5890 series II)를 이용하여 검정하였으며, 오차는 1.2% 이내로 나타났다.

선 적분된 정보가 아닌 국소 라디칼 정보를 취득하기 위해 초점거리 200 mm의 집광 렌즈를 사용하였으며, 렌즈를 통과한 라디칼 신호는 직경 1 mm의 편 흡을 통해 광파이버 번들(Optic fiber bundle)의 입력단으로 집광된다. 본 실험에 사용된 광파이버 번들은 입력된 광강도를 1/2로 나누어 출력단으로 보내는 타입으로, 광파이버 번들의 출력단에 간섭필

터(interference filter)와 광증배관(photo-multiplier tube)을 설치하여 입력되는 라디칼 강도를 전기적 신호로 변환시킴과 동시에 증폭시킨다. 사용된 간섭필터의 중심파장/반치폭/투과율은 CH^* 의 경우 432.3 nm / 1.2 nm / 49.2%이며, C_2^* 는 515.5 nm / 1.6 nm / 65.0%이다. 광증배관에서 증폭된 신호는 전류 신호로써, I/V 변환기를 거쳐 전압신호로 변환된 후 데이터 취득 시스템에 저장된다.

본 연구에서 취득된 라디칼 정보는 스펙트로미터(spectrometer)가 아닌 간섭필터와 광증배관을 이용하였기 때문에 300 - 600 nm 범위에 폭 넓게 존재하는 CO_2 정보를 포함하고 있다.

2.2 실험방법 및 조건

실험은 크게 균질급기와 비균질 급기 조건으로 구성된다. 균질급기 조건은 혼합탱크 B만을 사용하며, 조제된 혼합기를 정적연소기로 한 번에 공급하는 방식이다. 이에 비해 비균질 급기 조건은 2개의 혼합탱크를 모두 이용하여 서로 다른 공기과잉율을 갖는 혼합기를 2단으로 분사하는 방식으로, 혼합탱크 A 내의 1차 공급용 혼합기(λ_{m1})를 정적연소기에 공급하며, 유동이 준정적 상태로 되는 10초 뒤¹⁶⁾, 혼합탱크 B 내의 2차 분사용 혼합기(λ_{m2})를 공급하는 방식이다. 이때 공급되는 혼합기의 압력은 전체 공

급압력($P_{overall}$)인 0.30 MPa에 대해 1차 공급압력(P_{m1})과 2차 공급압력(P_{m2})으로 나뉘게 된다. 즉, 정적연소기 내로 공급되는 1차 공급압력과 2차 공급압력의 합은 0.30 MPa이 된다.¹⁶⁾

점화시기는 균질급기 조건의 경우 유동이 준정적 상태가 되는 분사 종료 후 10000 ms로 하였으며, 비균질 급기의 경우는 평균속도와 난류강도가 가장 높은 300 ms로 하였다.¹⁶⁾

먼저 균질급기 조건에서 위치에 따른 라디칼 강도특성을 조사하기 위해 중심에서 반경방향으로 5, 15, 20 mm 위치에서의 라디칼 신호를 공기과잉율($\lambda_{overall}$) 0.75, 1.0, 1.25의 조건에 대해 취득하였다.

공기과잉율($\lambda_{overall}$)에 따른 CH^* 와 C_2^* 강도를 측정하여 공기과잉율과 라디칼 강도비에 대한 관계로부터 매핑(mapping) 선도를 취득하였다. 이때 실험조건은 공기과잉율 0.75, 0.8, 0.9, 1.0, 1.1, 1.2, 1.3이며, 측정 위치는 연소실 중심에서 5 mm로 하였다.

비균질 급기의 실험은 전체 공기과잉율($\lambda_{overall}$) 1.1과 1.4, 1차 공급압력(P_{m1})은 전체 공급압력의 25%와 50%, 1차 공기과잉율(λ_{m1})은 3.0과 ∞ 의 8가지 조건에 대해 수행하였으며, 점화시기는 300 ms로 하였다. 이때 취득된 CH^* 와 C_2^* 의 강도비와 균질급기에서 취득한 매핑 선도를 이용하여 비균질급기에서의 국소 공기과잉율을 예측하였다.

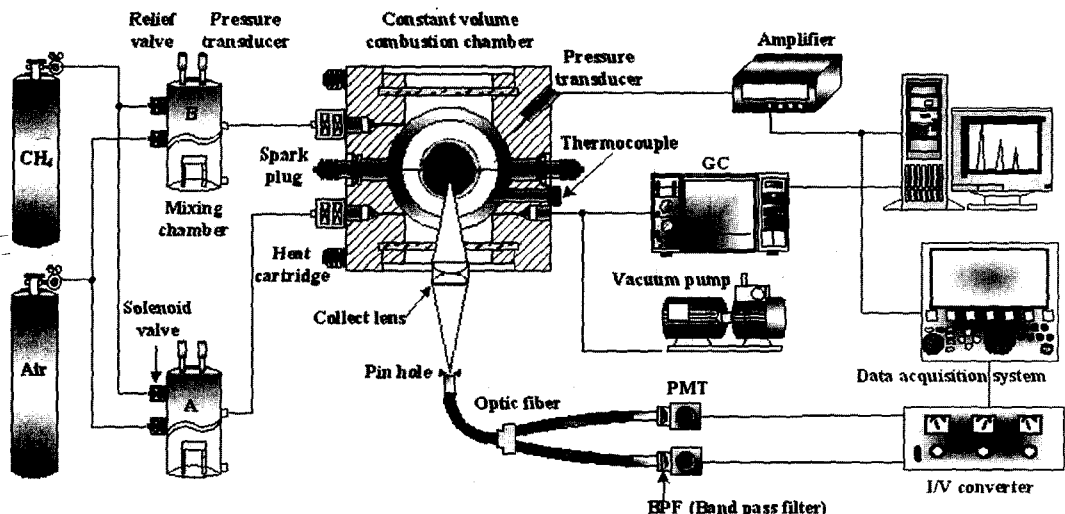


Fig. 1 Schematic diagram of radical acquisition system

3. 실험결과 및 고찰

3.1 위치에 따른 연소 라디칼 특성

측정 위치의 변경에 따른 연소라디칼의 특성을 관찰하기 위해 연소실 중심에서 반경방향으로 5, 15, 20 mm에서의 연소 라디칼을 취득하여 비교하였다. 본 연구에서는 국소 라디칼의 측정을 위해 집광렌즈를 사용하였기 때문에 연소실 중심에서 반경방향으로 최대 20 mm까지 측정이 가능하였으며, 이는 연소기 반경인 43 mm의 50% 이내에 해당하는 범위이다.

Fig. 2는 측정위치에 따른 라디칼 자발광의 강도비($\psi = I_{CH^*}/I_{C_2^*}$)를 나타낸 결과이다. 먼저 공기과잉율 1.0의 경우 측정위치에 따른 라디칼 강도비가 거의 일정하게 나타났으며, 공기과잉율 0.75의 과농한 조건에서는 측정위치가 연소기 중심에서 멀어질수록 라디칼 강도비가 약간씩 증가하는 경향을 보인다. 이는 과농한 조건의 경우 화염이 전파되면서 높은 농도의 미연 연료들이 연소기 벽면으로 이동하게 되어, 연소기 벽면으로 접근할수록 라디칼 강도비가 증가하기 때문에 나타나는 현상으로 사료된다. 희박조건인 공기과잉율 1.25의 경우 5 mm와 15 mm에서는 거의 유사한 라디칼 강도비를 나타내지만 20 mm에서는 낮은 라디칼 강도비를 보이는데, 이는 공기과잉율 0.75와 반대의 경우인 희박조건이기 때문에 야기되는 결과로 사료된다.

이상의 결과로부터 본 연구에서 사용된 연소기의 경우, 측정 가능한 영역에서의 측정위치는 라디칼

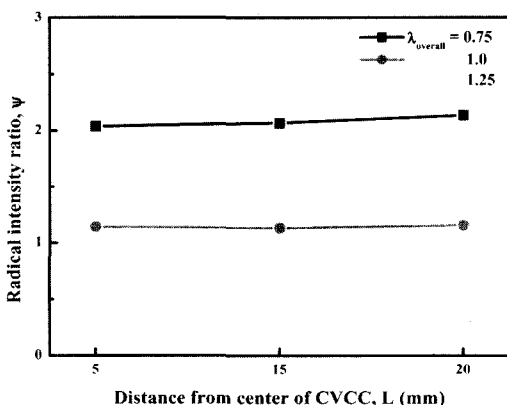


Fig. 2 Radical intensity ratio for measuring points

강도비에 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있었으며, 따라서 본 연구에서는 점화원 근방에서의 국소 공기과잉율을 예측하기 위해 스파크 플러그에서 가장 가까운 5mm 지점을 측정위치로 선정하였다.

3.2 균질급기의 연소 라디칼 특성

균질급기의 경우 각 조건에 대해 90회의 연소 실험을 실시하여 취득한 데이터 중 표준편차 범위 내에 있는 데이터들을 이용하여 해석을 수행하였다.

Fig. 3은 공기과잉율에 따른 최대발광강도의 평균과 변동성분을 나타낸 것이다. CH^* 와 C_2^* 라디칼의 최대 평균 발광량은 공기과잉율에 따라 증가하여, 공기과잉율 0.9에서 최대에 도달한 후 희박해질수록 감소하고 있다. 이는 라디칼의 발광량이 연소 조건과 밀접한 관계가 있음을 보여주는 결과로, 메탄-공기 예혼합기의 경우 공기과잉율 0.9 근방에서 통상 연소속도가 최대로 되고 따라서 연소 기간이 상대적으로 짧아짐으로 일정 시간 내에 발광하는 라디칼의 양이 많아지기 때문으로 사료된다.

또한 공기과잉율 0.9에서 변동성분이 가장 크게 나타나고 있는데, 이는 반응이 가장 활발하여 라디칼 발광량의 증가와 함께 화염전파속도가 최대로 되어 화염 전파시 화염면의 진동효과가 변동성분에 더 많은 영향을 미치기 때문으로 사료된다.

Fig. 4는 CH^* 와 C_2^* 의 강도비를 공기과잉율에 대해 매핑(mapping)한 결과로, 공기 연료비가 농후할수록 라디칼 강도비가 증가함을 관찰할 수 있다.

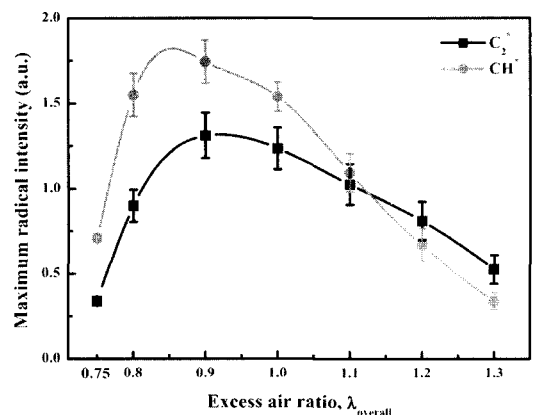


Fig. 3 Maximum radical intensity

이 그래프를 이용하여 구한 환산식은 식(1)과 같다.

$$\lambda = 1.1 - 1.4 \times \log_{10} \Psi - 1.3 \times (\log_{10} \Psi)^2 + 6.7 \times (\log_{10} \Psi) \quad (1)$$

실제 공기과잉율과 식 (1)을 이용하여 취득한 환산 공기과잉율과의 오차는 $\pm 1.5\%$ 이내이다.

이상에서 취득된 결과를 이용하여 비균질 혼합기 조건에서 라디칼 강도비를 측정된 후 그 결과 값을 공기과잉율로 환산하여 국소 공기과잉율을 예측하고자 한다.

3.3 비균질급기의 연소 라디칼 특성

비균질급기의 경우 전체 공기과잉율 1.1과 1.4, 1차 공급압력(P_{ini}) 25와 50%, 1차 공기과잉율(λ_{ini}) 3.0과 ∞ 에 대해 실험을 수행하였다.

본 저자들의 이전 연구 결과^{16,17)}에 의하면 동일한 1차 공기과잉율 조건에서 1차 공급 압력이 증가함에 따라 최고 연소압력이 감소되는 결과를 보였다. 또한 1차 공급 압력이 동일한 조건에서는 1차 공기과잉율은 순수한 공기인 ∞ 조건보다는 3.0의 경우가 좋은 연소 특성을 보이고 있음을 알 수 있었다. 이러한 결과는 전체 공기과잉율 1.4의 경우에 주로 관찰되었으며, 전체 공기과잉율 1.1의 경우에는 1차 공기과잉율의 변화에 큰 영향을 받지 않는다는 결과를 취득하였다.

Fig. 5는 전체 공기과잉율 1.1에 대한 C_2^* 와 CH^* 의 최대발광강도 및 라디칼 강도비를 나타낸 대표 결과이다. 이때 각 조건에 대한 연소압력 결과는 훌륭한 재현성을 나타내었다.

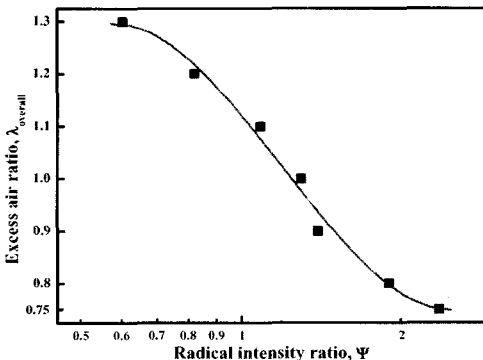
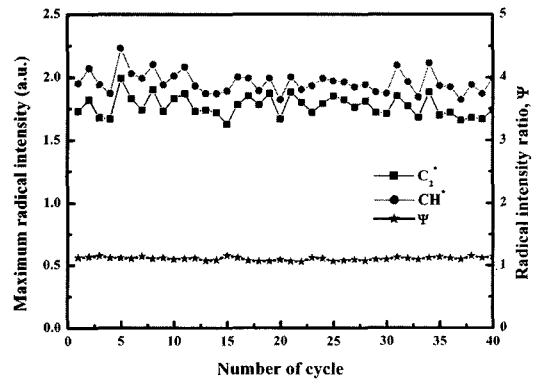


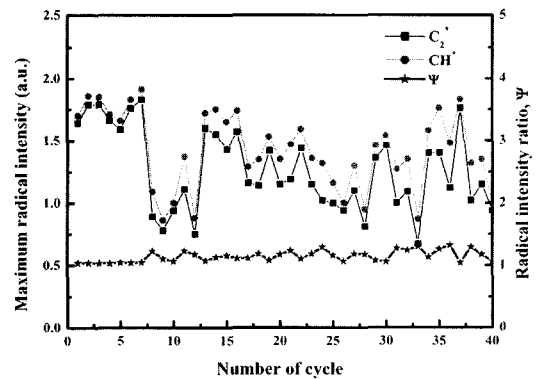
Fig. 4 Radical intensity ratio

Fig. 5(a)는 $\lambda_{ini} = \infty$ 의 경우로 난류 예혼합화염이므로 C_2^* 와 CH^* 라디칼 피크 강도의 편차가 존재한다. 하지만, 그 강도비는 아주 균일한 형태를 보이고 있음을 관찰 할 수 있다. Fig. 5(b)는 $\lambda_{ini} = 3.0$ 의 경우로 각 라디칼의 피크 강도의 편차는 $\lambda_{ini} = \infty$ 의 경우보다 더 크게 되지만 라디칼 강도비는 통계적으로 해석이 가능함을 예측할 수 있다. 본 실험의 측정위치에서는 초기에 공기를 공급하는 경우보다 $\lambda_{ini} = 3.0$ 의 혼합기를 공급하는 경우가 성층화로 인한 라디칼 강도비의 사이클 변동이 증가함을 의미하는 것으로 사료된다.

각 사이클 마다 압력은 거의 일치하며, 라디칼 강도비는 일정 범위 내에 존재하지만, 라디칼의 피크 강도는 심한 사이클 변동이 존재하는데, 이에 대해서는 아직 원인 규명이 되지 않았으며, 추가적인 해석이 요구된다.



(a) $\lambda_{ini} = \infty$



(b) $\lambda_{ini} = 3.0$

Fig. 5 Radical intensity and ratio($\lambda_{overall} = 1.1, P_{ini} = 25\%$)

Table 1과 Fig. 6은 전체 공기과잉율 1.1에 대한 라디칼 강도비의 평균값, 2차로 분사되는 혼합기의 공기과잉율과 환산된 국소 공기과잉율을 나타낸 결과로 가로축은 각 1차 공급압력과 1차 공기과잉율에 대해 나타내었다. 평균 라디칼 강도비 선도에서 여러 바는 평균에 대한 표준편차를, 표시된 수치는 이에 대한 오차를 의미한다. 분사되는 공기과잉율 (λ_{inj})이 농후해짐에 따라 평균 라디칼 강도비 (Ψ_{ave} , average intensity ratio)는 감소하는 경향을 보이며, 이에 따라 환산된 국소 공기과잉율(λ_{cal} , calculate excess air ratio)은 점점 희박해짐을 알 수 있다. 이때 취득된 국소 공기과잉율은 1.035~1.163의 범위에 존재한다.

1차 공급 압력 25%의 조건에서 $\lambda_{ini} = 3.0$ 과 ∞ 의 국소 공기과잉율 차이는 약 0.02이며, 거의 이론 공기연료비 영역이므로 최고 연소압력의 결과는 유사하게 나타난다. 1차 공급 압력 50% 조건에서의 차이는 약 0.04로 되며, 이론 공기연료비보다 희박한 조건이며, 공기과잉율의 차이도 더 크게 되며, 이로 인해 야기 되는 최고 연소압력의 차이는 25% 조건보다 더 크게 됨을 알 수 있다. 이는 본 저자들의 이전 연구 결과¹⁶⁾와 잘 일치한다.

Table 1 Experimental result for $\lambda_{overall} = 1.1$

| P_{ini} | λ_{ini} | λ_{inj} | Ψ_{ave} | STD | $\lambda_{cal, local}$ |
|-----------|-----------------|-----------------|--------------|-------|------------------------|
| 25% | 3.0 | 0.896 | 1.142 | 0.086 | 1.035 |
| | inf | 0.799 | 1.104 | 0.027 | 1.058 |
| 50% | 3.0 | 0.642 | 0.999 | 0.064 | 1.121 |
| | inf | 0.497 | 0.931 | 0.020 | 1.163 |

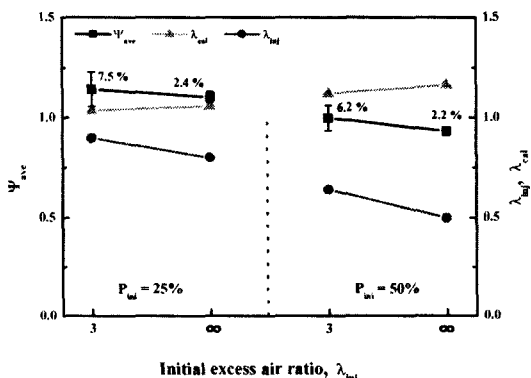


Fig. 6 Local excess air ratio for $\lambda_{overall} = 1.1$

Table 2와 Fig. 7은 전체 공기과잉율 1.4의 조건에 대한 결과로, 역시 분사되는 공기과잉율이 농후해짐에 따라, 평균 라디칼 강도비는 감소하며, 이에 따라 국소 공기과잉율은 점점 희박해짐을 관찰할 수 있다.

전체 공기과잉율 1.4의 경우 스파크 플러그 근방에서의 국소 공기과잉율은 약 1.26~1.29의 범위로 전체 공기과잉율인 1.4보다 훨씬 농후함을 알 수 있으며, 이러한 결과로부터 성층화는 이론 공기연료비 근방의 영역 보다는 희박한 영역에서 더 유리하다는 사실을 증명하는 근거이다.

전반적으로 $\lambda_{overall} = 1.1$ 과 1.4의 경우 모두, λ_{inj} 가 일정한 경우 $P_{ini} = 25\%$ 조건에서의 국소 공기과잉율이 50% 조건에 비해, 이론 공기연료비보다는 희박하지만, 상대적으로 농후해짐을 관찰할 수 있다. 또한 P_{ini} 가 일정한 경우 $\lambda_{ini} = 3.0$ 의 조건에서 ∞ 의 조건보다, 이론 공기연료비보다는 희박하지만, 상대적으로 농후해짐을 알 수 있다.

다시 말해, $\lambda_{overall} = 1.4$, $\lambda_{ini} = 3.0$ 의 조건에서 $P_{ini} = 25\%$ 의 경우 $\lambda_{inj} = 1.179$ 이며, $P_{ini} = 50\%$ 의 경우 $\lambda_{inj} = 0.888$ 이다. 즉 전자는 초기에 최종압력의 25%를 공기과잉율 3.0으로 공급하고 나머지 75%를 1.179의

Table 2 Experimental result for $\lambda_{overall} = 1.4$

| P_{ini} | λ_{ini} | λ_{inj} | Ψ_{ave} | STD | $\lambda_{cal, local}$ |
|-----------|-----------------|-----------------|--------------|-------|------------------------|
| 25% | 3.0 | 1.179 | 0.757 | 0.041 | 1.260 |
| | inf | 1.024 | 0.735 | 0.050 | 1.270 |
| 50% | 3.0 | 0.888 | 0.714 | 0.019 | 1.278 |
| | inf | 0.647 | 0.669 | 0.029 | 1.291 |

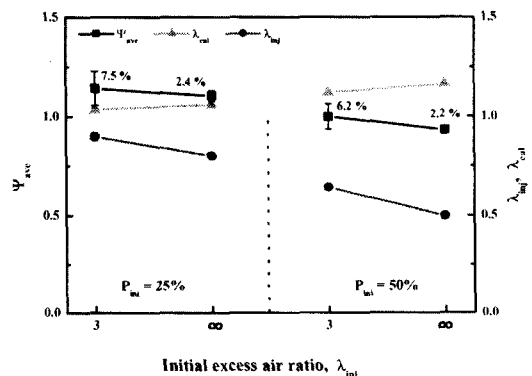


Fig. 7 Local excess air ratio for $\lambda_{overall} = 1.4$

공기과잉율로 공급하는 경우이며, 후자는 최종압력의 50%를 공기과잉율 3.0으로 공급하고 나머지 50%를 공기과잉율 0.888로 공급하는 경우이다. 적은 양의 더 농후한 혼합기를 공급한 후자의 경우보다 많은 양의 덜 농후한 혼합기를 공급한 전자의 경우가 스파크 플러그 근방에서 상대적으로 덜 희박하게 되며, 결과적으로 보다 더 좋은 연소율을 보이고 있음을 알 수 있다.

따라서 현재 시판되고 있는 GDI의 경우와 같이 적은 양의 농후한 혼합기를 공급하는 경우보다는 많은 양의 그리고 상대적으로 덜 농후한 혼합기를 공급하는 경우가 연소율에 더 좋은 영향을 미침을 알 수 있으며, 이상의 결과로부터 1차 공급 압력이 낮을수록 더 좋은 연소율을 보이는 근거로 제시할 수 있으며, 흡입행정에 순수한 공기를 공급하는 일반적인 GDI 방식보다는 2단 분사기법을 이용하여 흡입행정에 소량의 연료를 분사하는 것이 더 좋은 연소 특성을 보임을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구는 화염으로부터 방출되는 라디칼 자발광의 강도를 이용하여 국소 공기과잉율을 취득하기 위해 먼저 균질급기 조건에서 공기과잉율과 라디칼 강도비의 관련식을 구하였으며, 이를 바탕으로 비균질급기에서의 국소 공기과잉율을 예측하여 2단 분사의 연소특성을 살펴본 결과 다음과 같은 결론을 취득하였다.

- 1) 균질급기에 대한 연소 라디칼 취득 결과 과농한 공기연료비 조건에서는 CH^* 가 C_2^* 보다 더 큰 피크 강도를 보이지만, 이론 공기연료비보다 희박한 조건에서는 그 피크 강도의 차이가 감소하며, 본 연구에서는 공기과잉율 1.2 이상의 조건에서 역전됨을 관찰할 수 있었다.
- 2) 균질급기에서 취득된 CH^* 와 C_2^* 의 강도비의 함수로 표시된 환산식을 도출하였으며, 이 식을 이용하여 비균질급기에서의 국소 공기과잉율을 예측하는 것이 가능하게 되었다.
- 3) 전체 공기과잉율 1.1의 경우 국소 공기과잉율은 1.035~1.163의 범위에 존재하였으며, 연소율에 미치는 영향은 그다지 크지 않음을 알 수 있었다.

그러나 전체 공기과잉율 1.4의 경우 환산된 국소 공기과잉율은 1.26~1.29의 범위로 전체 공기과잉율보다 훨씬 농후함을 알 수 있었으며, 성층화는 이론 공기연료비 근방의 영역보다 희박영역에서 더 큰 의미가 있음을 알 수 있었으며, 2단 분사기법의 적용으로 실제 직접분사식 엔진에서 효율을 향상시킬 수 있을 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 청정생산기술사업의 지원에 의해 수행된 연구결과로, 관계 기관에 감사드립니다.

References

- 1) H. N. Najm, P. H. Paul, C. J. Mueller, P. S. Wyckoff, "On the Adequacy of Certain Experimental Observables as Measurements of Flame Burning Rate," *Combustion and Flame*, Vol.113, pp.312-332, 1998.
- 2) Y. Ikeda, J. Kojima, H. Hashimoto, "Local Chemiluminescence Spectra Measurements in a High-Pressure Laminar Methane/Air Premixed Flame," *Proceedings of Combustion Institute*, Vol.29, pp.1495-1501, 2002.
- 3) T. Shohji, S. Hiroyasu, A. Fumiteru, K. Masashi, "Observation of Combustion Characteristics of Droplet Clusters in a Premixed-Spray Flame by Simultaneous Monitoring of Planar Spray Images and Local Chemiluminescence," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol.27, pp.1967-1974, 1998.
- 4) E. Lubarsky, Y. Levy, "Experimental Investigation of Flame-Holding System for the Suppression of Ramjet Rumble," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol.27, pp.2033-2037, 1998.
- 5) C. O. Paschereit, E. Gutmark, W. Weisenstein, "Control of Thermoacoustic Instabilities and Emissions in an Industrial-Type Gas-Turbine Combustor," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol.27, pp.1871-1824, 1998.
- 6) K. T. Walsh, M. B. Long, M. A. Tanoff, M. D. Smooke, "Experimental and Computational

- Study of CH, CH^* , and OH^* in an Axisymmetric Laminar Diffusion Flame," Proceedings of the Combustion Institute, Vol.27, pp.615-623, 1998.
- 7) J. Luque, J. B. Jeffries, G. P. Smith, D. R. Crosley, K. T. Walsh, M. B. Long, M. D. Smooke, "CH (A-X) and OH (A-X) Optical Emission in an Axisymmetric Laminar Diffusion Flame," Combustion and Flame, Vol.122, pp.172-175, 2000.
 - 8) C. F. Kaminski, J. Hult, M. Richter, J. Nygren, A. Franke, M. Alden, S. Lindenmaier, A. Dreizler, U. Maas, R. B. Williams, "Development of High Speed Spectroscopic Imaging Techniques for the Time Resolved Study of Spark Ignition Phenomena," SAE 2000-01-2833, 2000.
 - 9) C. F. Kaminski, J. Hult, M. Alden, S. Lindenmaier, A. Dreizler, U. Maas, M. Baum, "Spark Ignition of Turbulent Methane/Air Mixtures Revealed by Time-Resolved Planar Laser-Induced Fluorescence and Direct Numerical Simulations," Proceedings of the Combustion Institute, Vol.28, pp.399-405, 2000.
 - 10) N. Docquier, S. Belhafaoui, F. Lacas, N. Darabiha, C. Rolon, "Experimental and Numerical Study of Chemiluminescence in Methane/Air High-Pressure Flames for Active Control Applications," Proceedings of the Combustion Institute, Vol.28, pp.1765-1774, 2000.
 - 11) N. Docquier, S. Candel, "Combustion Control and Sensors : A Review," Progress in Energy and Combustion Science, Vol.28, pp.107-150, 2002.
 - 12) A. Gaydon, Spectroscopy of Flames, Chapman and Hall, 1974.
 - 13) P. G. Aleiferis, Y. Hardalupas, A. M. K. P. Taylor, K. Ishii, Y. Urata, "Flame Chemiluminescence Studies of Cyclic Combustion Variations and Air-to-Fuel Ratio of the Reacting Mixture in a Lean-Burn Stratified-Charge Spark-Ignition Engine," Combustion and Flame Vol.136, pp.72-90, 2004.
 - 14) Y. Ikeda, J. Kojima, T. Nakajima, "Chemiluminescence Based Local Equivalence Ratio Measurement in Turbulent Premixed Flames," 40th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, AIAA Paper 2002-0193, 2002.
 - 15) H. Itoh, Y. Hommo, J. I. Song, T. Gomi, "An Instantaneous Measuring Method of Air-Fuel Ratio by Luminous Intensity of Radical," JSME, Vol.52, No.481, pp.2219-2230, 1988.
 - 16) S. H. Choi, C. H. Jeon, Y. J. Chang, "Combustion Characteristics of Methane-Air Mixture in a Constant Volume Combustion Chamber(2) : Inhomogeneous Charge," Transactions of KSAE, Vol.11, No.4, pp.29-36, 2003.
 - 17) S. H. Choi, C. H. Jeon, Y. J. Chang, "Analysis of Heat Quantity in CNG Direct Injection Bomb(2) : Inhomogeneous Charge," Transactions of KSAE, Vol.12, No.2, pp.24-31, 2004.