

정적연소기에서의 메탄-공기 혼합기의 연소특성(3) : 배기배출물

최 승 환¹⁾ · 전 충 환^{*2)} · 장 영 준²⁾

부산대학교 기계공학과¹⁾ · 부산대학교 기계공학부, 기계기술연구소²⁾

Combustion Characteristics of Methane-Air Mixture in a Constant Volume Combustion Chamber(3) : Exhaust Emission

Seunghwan Choi¹⁾ · Chunghwan Jeon^{*2)} · Youngjune Chang²⁾

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

²⁾School of Mechanical Engineering, RIMT, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

(Received 11 July 2003 / Accepted 6 January 2004)

Abstract : A cylindrical constant volume combustion chamber was used to investigate the exhaust emission characteristics of homogeneous charge, stratified pattern and inhomogeneous charge under various conditions using gas chromatography. In the case of homogeneous charge condition, the CO₂ concentration is proportional to excess air ratio and overall charge pressure, the O₂ concentration is proportional to excess air ratio and the UHC concentration is inversely proportional to ignition time and overall charge pressure. In the case of stratified pattern, the RI(rich injection) condition shows better exhaust emission characteristics, especially CO₂, than that of HI (homogeneous injection) or LI (lean injection) conditions. In inhomogeneous charge conditions, when initial charge pressure is increased, CO₂ and UHC concentration is reduced but O₂ concentration is increased. And when the excess air ratio of initial charge mixture is 3.0, UHC and CO₂ concentration show lowest values.

Key words : Constant volume combustion chamber(정적연소기), Methane-air mixture(메탄-공기 혼합기), Stratified pattern(성층화 패턴), Initial charge pressure(초기충진압력), Gas chromatography(가스 크로마토그래피)

1. 서 론

에너지 문제와 함께 자동차로부터 배출되는 유해 가스로 인한 대기 환경오염 문제가 전 세계적인 화두로 대두됨에 따라 저공해 대체 연료의 개발과 지구 온난화 요인의 하나인 CO₂를 저감할 수 있는 핵심기술인 희박연소에 관한 연구가 집중되고 있다.

대체연료들 중 최근 압축천연가스(CNG)가 각광을 받고 있으며, 연료 성층화에 의한 희박연소는 희박한계를 확장시키며, 연료효율을 향상시키는데 효

과적인 방법으로 알려져 있다.

CNG 엔진의 개발과정을 살펴보면 일점 연속분사방식, 다점 연속분사방식, 다점 독립분사방식을 거쳐 직접분사식으로 진행된다. 현재의 관심대상은 다점 독립분사방식으로 우리나라의 경우 아직 개발 초기 단계에 있지만, 선진국에서는 이미 실용화 단계에 있다. 하지만 아직 CNG 직접분사식 기관에 대한 보고는 아직 없지만, 가까운 직접분사방식의 개발이 예상되며 이에 대한 연구의 선점이 필요한 시점이다.

실제 기관에서의 연소과정은 공기과잉율, 유동, 연소실 형상 등과 같은 여러 가지 요인들에 의해 지

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

배되며, 동시에 이들 요인들이 복잡하게 상호 간섭하고 있으므로 각각의 요인이 연소과정에 미치는 영향을 파악하기 쉽지 않을 뿐만 아니라 계측에도 많은 어려움을 내포하고 있다. 따라서 기관의 연소 현상을 기본적으로 조사하기 위해서는 여러 가지 요인들을 배제할 수 있고, 연소실 형상이 단순화된 정적연소기를 이용할 필요가 있다.

정적연소기에서 압력해석 및 화상취득과 관련된 연구들은 많이 보고되고 있다.¹⁻⁶⁾ 하지만 연소 후 정적연소기 내에서 생성되는 배기배출물 특성에 관한 연구는 거의 전무한 실정이다.⁷⁾

일반적으로 대부분의 배기가스 해석용 장비는 많은 유량의 가스가 공급되어야만 정확한 분석을 할 수 있다. 하지만 대부분의 정적연소기에서는 연소 가스의 유량이 작기 때문에 일반적인 배기가스 분석기로는 정확한 분석이 곤란하다. 이와 같이 소량의 연소가스를 배출하는 연소기에 적합한 분석 장비로 미량의 성분분석에 많이 사용되는 가스 크로마토그래피(이하 GC)가 있다.⁸⁻¹⁰⁾

이에 본 저자들은 정적연소기를 제작하고 CNG 연료 성분의 대부분을 차지하는 메탄-공기 예혼합기를 이용하여 균질급기와 비균질급기에 대해 연소 성능해석을 수행하였다.^{11,12)} 또한 GC를 이용하여 여러 가지 인자들이 배기배출물 특성에 미치는 영향을 균질급기, 혼합기 성층화 패턴, 그리고 비균질급기에 대해 조사하여 정적연소기에서의 배기배출물 특성에 관한 기초 자료로 제시하며, 동시에 향후 개발이 예상되는 직접분사식 CNG 엔진의 개발에 대한 기초 선행연구의 자료로 2단 직접분사의 개념을 제시하고자 한다.

2. 실험장치 및 조건

2.1 실험장치

Fig. 1은 실험장치의 개략도로 정적연소기, 연료-공기 공급부, 배기배출부, GC 및 데이터 취득부로 구성되며, 이에 대한 자세한 내용은 참고문헌 11), 12)를 참조하기로 한다.

배기배출물을 분석하기 위해 사용한 GC는 6 port, 2 valve, 0.2cm³의 샘플 루프, 직렬 연결 또는 우회할 수 있는 2개의 컬럼과 TCD(thermal conductivity

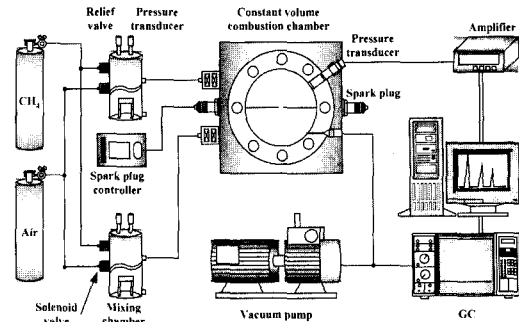


Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

detector)와 FID(flame ionization detector)를 장착한 HP 5890 series II이다. 운반 기체로는 헬륨을 사용하였으며 유량은 30ml/min, 디텍터의 온도는 200℃로 유지하였다. 컬럼은 Porapak Q 1.8m와 Molecular Sieve 13X 3m를 2개의 밸브와 연결하여 경우에 따라 Molecular Sieve로 흐르는 유체를 단속하였다.

정적연소기의 내부의 배기가스를 주사기로 채취한 후 GC로 주입하였으며, 한 시료에 대해 3점 이상의 절대 검량선법(absolute calibration curve method)을 이용하여 데이터를 정량화 하였다. 이때 검량선의 상관계수(correlation coefficient)는 CH₄는 0.998, CO₂는 0.999, O₂는 1.000, N₂는 0.999, CO는 0.999로 나타났다.

Fig. 2는 본 연구에서 취득된 데이터의 대표적인 예를 나타낸 것으로, Fig. 2(a)는 TCD에서의 CH₄, CO₂, O₂, N₂, CO의 머무름 시간(retention time)을, Fig. 2(b)는 FID에서의 CH₄에 대한 머무름 시간을 나타낸다.

Najm 등¹³⁾의 예혼합 메탄-공기 화염의 상세 반응 메커니즘에 관한 연구결과는 메탄 이외에 소량의 HC 성분들이 다수 생성됨을 보이고 있으며, Sodre와 Yates¹⁰⁾는 이소옥탄을 연료로 사용하는 단기통 엔진에서 GC를 이용하여 THC(total hydrocarbon)과 UHC(unburned hydrocarbon)을 검출하였으며, THC와 UHC의 차이인 비연료 화학종(non-fuel species) 농도의 합은 전체의 27~50%가 됨을 보였다. 본 연구에서도 Fig. 2(b)와 같이 UHC인 메탄 이외에 상대적으로 농도가 아주 낮아 거의 관찰되지 않는 비연료 화학종이 존재함을 예측할 수 있으며, 본 실험에서는 UHC인 메탄에 대해서만 검토를 하였다.

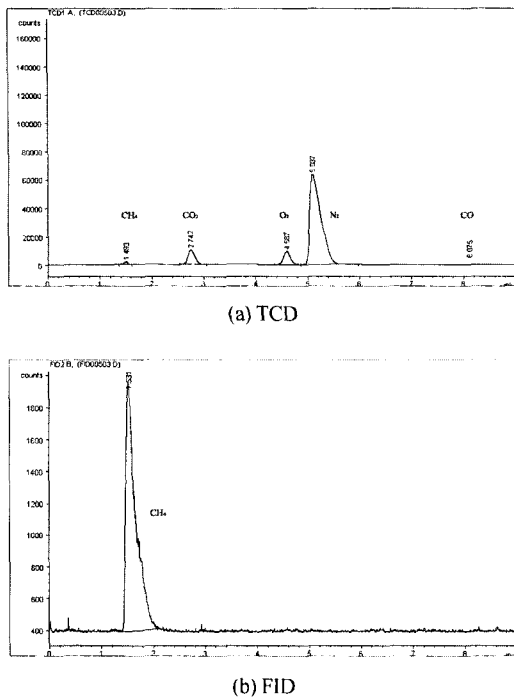


Fig. 2 Typical chromatogram obtained for exhaust gas

2.2 실험조건

실험조건은 Table 1~3에 나타난 바와 같이 혼합기의 공급 방법에 따라 크게 균질급기(homogeneous charge), 혼합기 성층화 패턴(stratified pattern) 그리고 비균질급기(inhomogeneous charge)로 분류하였다.

먼저 균질급기 조건에서는 연소실 내의 충전압력($P_{overall}$), 공기과잉율($\lambda_{overall}$)과 점화시기(τ_{ig})가 배기배출물 특성에 미치는 영향에 대해 조사하였다.

또한 혼합기 성층화 패턴에 따라서 균질분사(HI, homogeneous injection), 농후분사(RI, rich injection)와 희박분사(LI, lean injection)로 나누어 전체 공기과잉율($\lambda_{overall}$) 1.1, 연소실 충전압력($P_{overall}$) 0.3MPa의 조건에서 점화시기의 변화에 대해 살펴보았으며, 비균질급기의 경우는 점화시기 300ms, 성층급기 패턴 중 농후분사 조건에 대해 초기 충전압력(P_{ini})의 변화와 초기 충전혼합기의 공기과잉율(λ_{ini})의 변화, 전체 공기과잉율($\lambda_{overall}$)에 따른 배기배출물 특성을 조사하였다.

Table 1 Condition of homogeneous charge

Overall charge pressure ($P_{overall}$, MPa)	0.15, 0.30, 0.60
Overall excess air ratio ($\lambda_{overall}$)	1.1, 1.2, 1.3, 1.4
Ignition time (τ_{ig} , ms)	300, 500, 1000, 10000

Table 2 Condition of stratified pattern

Stratified pattern	HI, RI, LI
Overall charge pressure ($P_{overall}$, MPa)	0.30
Overall excess air ratio ($\lambda_{overall}$)	1.1
Ignition time (τ_{ig} , ms)	300, 500, 1000, 10000

Table 3 Condition of inhomogeneous charge (RI)

Overall charge pressure ($P_{overall}$, MPa)	0.30
Initial charge pressure (P_{ini} , MPa)	0.075(25%), 0.15(50%), 0.225(75%)
Overall excess air ratio ($\lambda_{overall}$)	1.1, 1.4
Initial excess air ratio (λ_{ini})	2, 3, 5, ∞
Ignition time (τ_{ig} , ms)	300

3. 실험결과 및 고찰

3.1 균질급기

본 연구에서의 모든 공기과잉율은 1.1 이상의 희박조건으로 모든 실험에서 CO는 검출되지 않았다.

Fig. 3과 4는 균질급기에 대한 결과이다. 먼저 충전압력과 점화시기가 일정한 경우 공기과잉율이 증가-연료량은 감소하며, 공기량은 증가-함에 따라, CO₂는 감소, O₂는 증가하는 경향을 보인다.

UHC의 경우 $\lambda_{overall}=1.1$ 의 조건에서 다소 높게 나타나며, 희박해질수록 거의 유사한 값을 배출하는데, 이는 본 실험에서 사용된 정적연소기의 레이저 시트 빔 투과용 틈새가 엔진에서의 크래비스 볼륨의 역할을 하기 때문에 상대적으로 연료의 양이 많은 공기과잉율 1.1의 경우 높은 UHC를 배출하는 것으로 사료된다.

점화시기와 공기과잉율이 일정한 경우 충전압력이 증가함에 따라 CO₂는 증가, O₂는 감소하는 예측

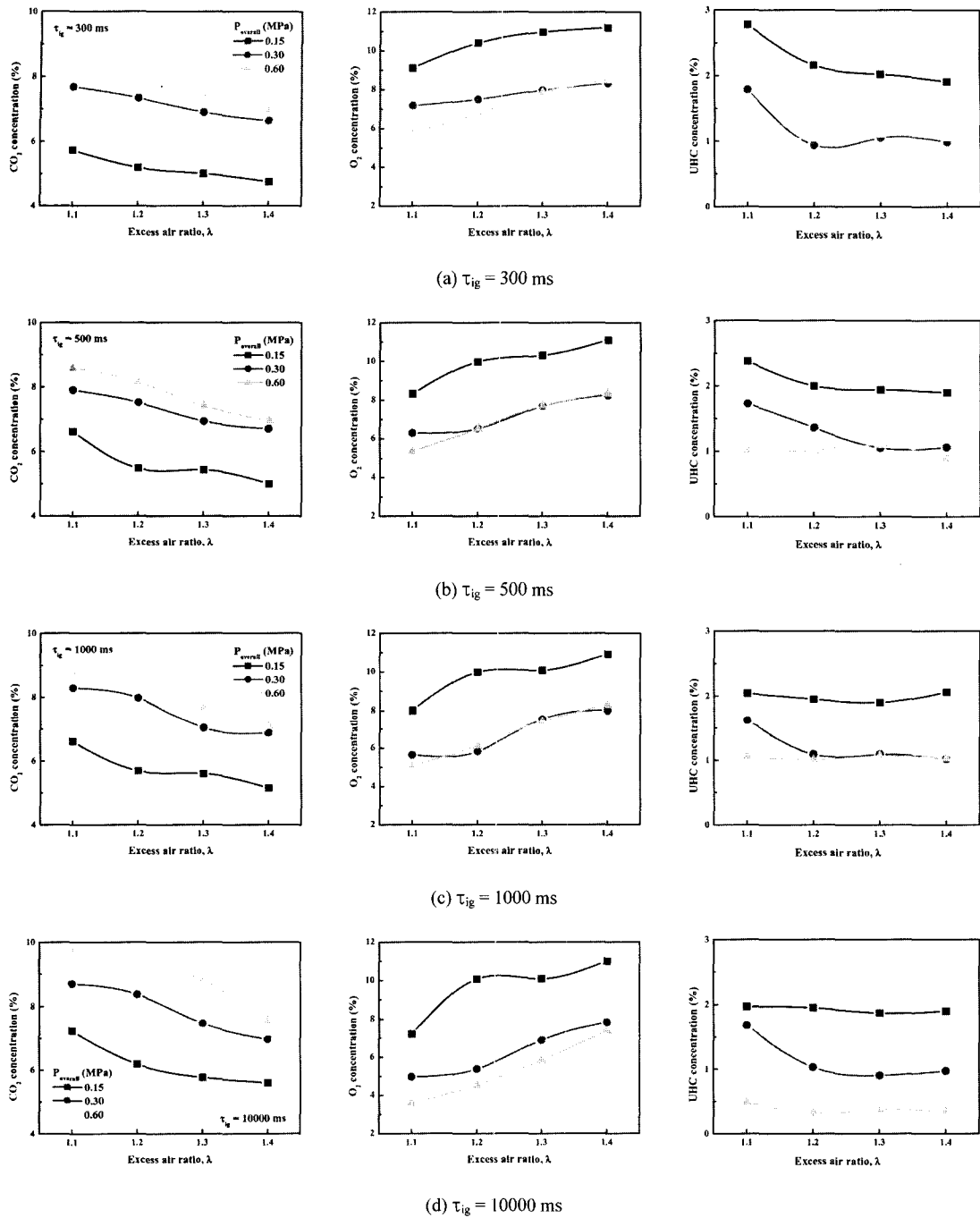


Fig. 3 Effects of excess air ratio and overall charge pressure on exhaust emissions

가능한 경향을 보인다. 하지만 UHC의 경우 충전압력이 증가함에 따라 감소함을 관찰할 수 있다. 이는 충전압력이 증가할수록 유입되는 연료량은 많아지

지만, 상대적으로 높은 초기압력에 의해 연소조건이 향상되기 때문으로 사료된다.

또한 Fig. 4에 나타낸 바와 같이 공기과잉율과 충

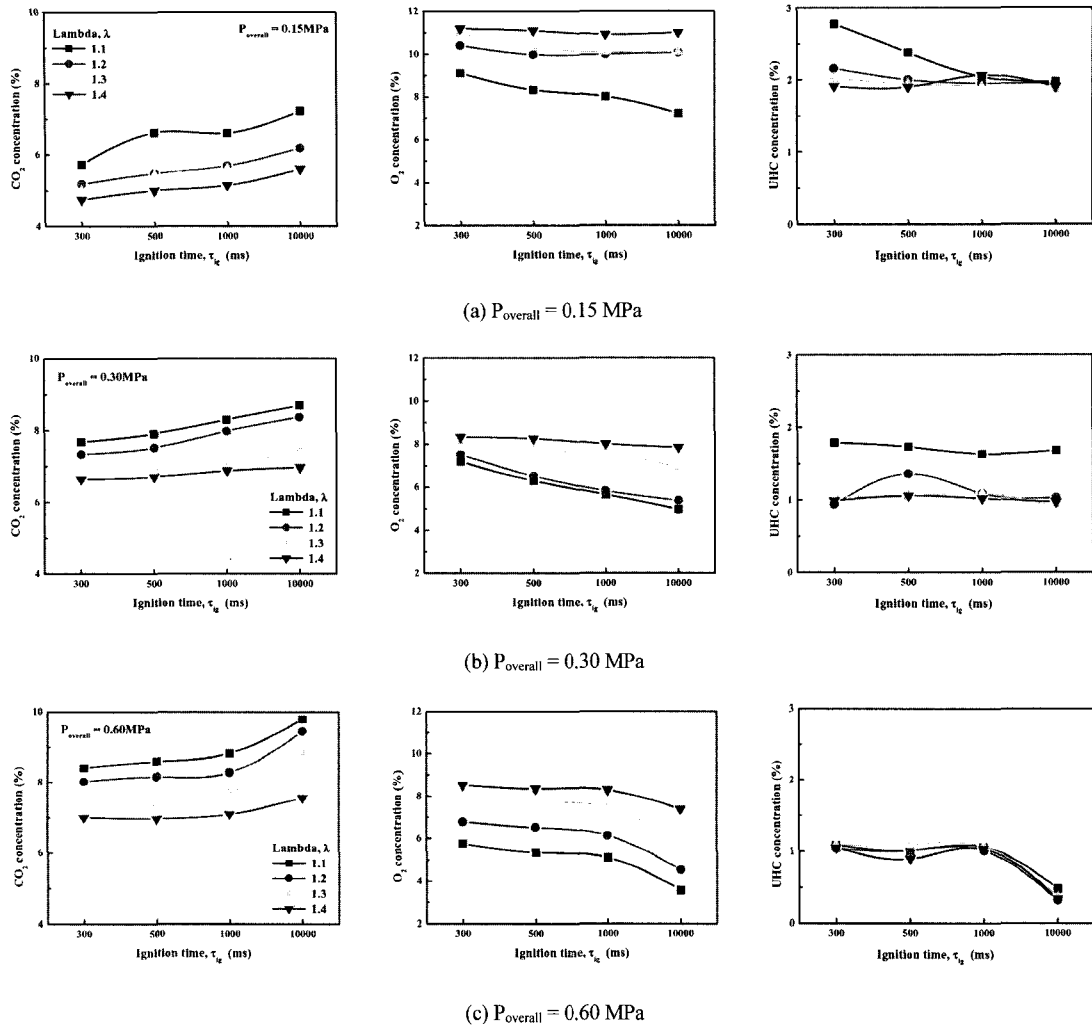


Fig. 4 Effects of ignition time and excess air ratio on exhaust emissions

진압력이 일정한 경우, 점화시기가 길어짐에 따라 CO_2 는 증가하며, O_2 는 충전압력이 높은 경우는 점화시기와 반비례하는 경향을 보인다. 하지만 0.15MPa의 경우는 전체적으로 약간 감소하거나 유사한 경향을 나타낸다. UHC의 경우 점화시기가 길어짐에 따라 대부분 약간 감소하거나 유사한 양을 배출하지만, 0.60 MPa이 경우 점화 시기 10000ms에서 크게 감소하는 경향을 보인다. 다시 말해 점화시기가 빠른 경우보다 10000 ms에서 전반적으로 CO_2 는 증가, O_2 와 UHC는 감소하는데, 이는 더 많은 양의 연료-공기 혼합기가 연소되었음을 의미한다. 그

러나 최고 연소압력은 준정적상태인 10000ms에서 더 낮게 나타나며,¹¹⁾ 이는 유동이 연소에 미치는 영향을 간접적으로 보여주는 증거로 유동의 중요성을 다시 한번 확인할 수 있다.

이상의 결과로부터 다른 조건들이 일정한 경우 공기과잉율이 증가함에 따라 CO_2 는 감소, O_2 는 증가하며, UHC는 거의 유사한 경향을 보이며, 점화시기가 길어짐에 따라 CO_2 는 증가, O_2 는 감소하며, UHC의 경우는 감소하거나 유사한 경향을 보이며, 충전압력이 증가함에 따라 CO_2 는 증가, O_2 는 감소하며, UHC는 감소하는 경향을 보임을 알 수 있었다.

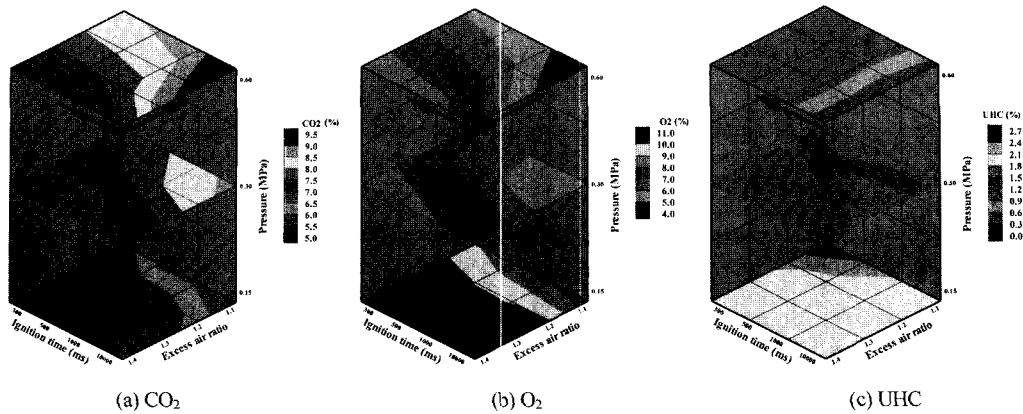


Fig. 5 Effects of ignition time, excess air ratio and initial pressure on exhaust emissions

이상의 내용을 Fig. 5에 정리하였다. 여기서 횡축의 왼쪽 좌표는 점화시기, 오른쪽 좌표는 공기과잉율, 종축은 충전압력을 의미하며, 배출가스의 농도는 등계적선(contour)으로 표시하였다. 또한 화살표는 그 방향으로 배출가스 농도가 증가함을 의미한다.

3.2 혼합기 성층화 패턴

Fig. 6은 전체 공기과잉율 1.1, 연소실 충전압력 0.30MPa인 조건에서 혼합기 성층화 패턴과 점화시기에 따른 배기배출물 결과이다. 점화시기가 증가함에 따라서 CO₂는 전반적으로 증가하는 경향을 보이지만, O₂와 UHC는 점화시기 500ms에서 최대값을 보이며, 점화시기가 감소하거나 증가할수록 감소되는 경향을 보인다. 동일한 양의 연료-공기 혼합기가 공급되었음에도 불구하고 혼합기 성층화 패턴에 따

른 배기배출물 특성은 전반적으로 CO₂의 경우는 RI가 가장 적게, 그리고 LI, HI 순으로 증가하며, O₂는 반대로 RI의 경우가 가장 많이 배출된다. UHC의 경우 RI의 경우가 가장 적게 배출됨을 알 수 있다. 균질연소에서 유동의 영향이 연소압력 및 최고연소도달기간에 좋은 영향을 미치는 것과 동일하게,¹¹⁾ 혼합기 성층화 패턴에 따라 RI 조건의 경우가 CO₂가 가장 작게 배출되며, 최고 연소압력이 높게 나타났다.¹²⁾

이로부터 성층화 패턴 역시 연소에 많은 영향을 미침을 알 수 있으며, 이는 2단 분사에 따라 점화위치에서의 혼합 정도(mixing quality)와 상관이 있는 것으로 사료된다.

3.3 비균질혼합기

Fig. 7은 $\lambda_{overall} = 1.1$ 과 1.4, $P_{overall} = 0.30MPa$, $\tau_{ig} =$

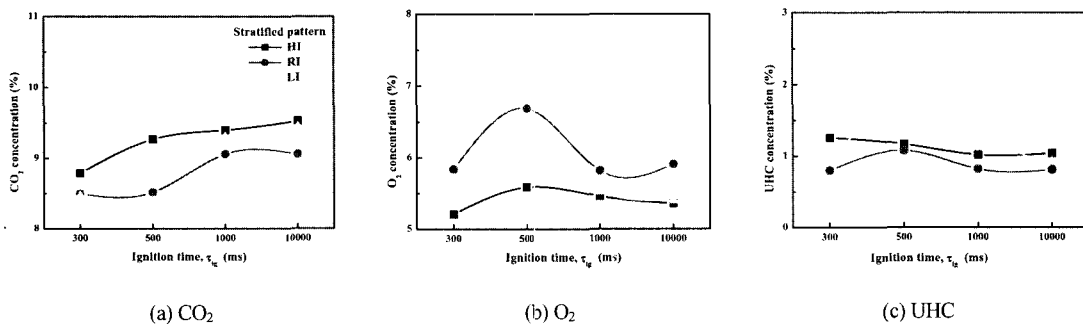


Fig. 6 Effects of stratified pattern and ignition time on exhaust emissions

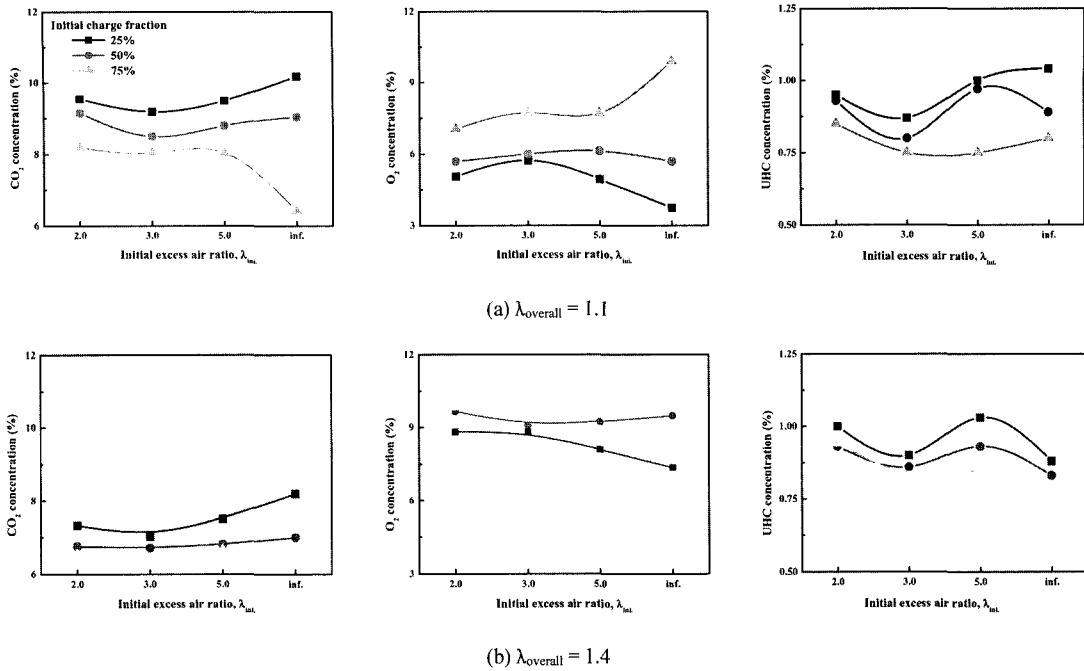


Fig. 7 Effects of initial charge fraction and initial excess air ratio on exhaust emissions

300ms 조건에 대해 초기 충전압력(이하 P_{ini})과 초기 충전 혼합기의 공기과잉율(이하 λ_{ini})의 변화에 따른 결과이다. $\lambda_{overall} = 1.4$ 의 경우, 초기에 75%의 공기를 공급한 경우는 재현성 있는 연소가 이루어지지 않아 해석 대상에서 제외하였다.

$\lambda_{overall} = 1.1$ 의 경우 CO_2 는 λ_{ini} 가 일정한 경우 P_{ini} 가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보였으며, P_{ini} 가 일정한 경우 λ_{ini} 에 대해서는 2.0, 5.0, 3.0의 순서로 많이 배출되었으며, 공기만으로 충전한 경우는 25%의 조건에서 가장 많이 배출되었고, 75%의 조건에서는 가장 작게 배출되는 특성을 보였다. O_2 의 경우는 P_{ini} 와 비례하는 경향을 나타내었으며, 3.0에서 다소 높게 나타났으며, 공기만으로 충전한 경우 50% 조건에서는 다른 조건과 유사하게 나타났지만 25%의 경우는 작게 배출되었고, 75%의 경우는 상대적으로 많이 배출되는 경향을 보였다. UHC의 경우 역시 P_{ini} 와 반비례관계를 보이며, P_{ini} 가 일정한 경우 $\lambda_{ini} = 3.0$ 에서 가장 낮은 값을 나타내었다.

$\lambda_{overall} = 1.4$ 의 경우 CO_2 는 P_{ini} 가 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타내었으며, λ_{ini} 에 대해서는 ∞ , 5.0, 2.0, 3.0의 순서로 많이 배출되었다. O_2 의

경우 P_{ini} 와 비례하는 경향을 나타내었으며, 전반적으로 $\lambda_{ini} = 2.0$ 과 3.0에서 높은 값을 나타내었다. UHC의 경우는 전반적으로 공기만을 공급한 경우와 $\lambda_{ini} = 3.0$ 의 조건에서 가장 작게 배출됨을 알 수 있었다.

본 연구에서 원인은 잘 규명할 수 없었지만, 2단 분사를 통한 비균질 혼합기의 배기배출물 결과로부터 $\lambda_{ini} = 3.0$ 의 조건에서 가장 좋은 배기배출물 특성을 보이고 있음을 알 수 있으며, 또한 비균질 혼합기의 연소성능 결과¹²⁾에서도 동일한 조건인 $\lambda_{ini} = 3.0$ 에서 좋은 특성을 보였다. 따라서 향후 개발이 예상되는 직접분사식 CNG 엔진에 2단 분사의 개념을 적용한다면 연소성능 및 배기배출물 특성에 유리할 것으로 생각되며, 아울러 배기배출물의 생성 메커니즘을 이해하고, 연소 성능과의 상관관계를 규명하기 위해서는 연소실 내의 혼합기 농도분포 또는 국소 공기과잉율 특성에 대한 연구가 추가적으로 요망되며, 이에 대한 실험이 진행 중이다.

4. 결론

정적연소실에서 가스 크로마토그래피를 이용하

여 다양한 조건에 대해 배기배출물 특성을 해석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 균질급기의 경우 공기과잉율이 증가함에 따라 CO₂는 감소, O₂는 증가하며, UHC는 거의 유사한 경향을 보이며, 점화시기가 길어짐에 따라 CO₂는 증가, O₂는 감소하며, UHC는 감소하거나 유사한 경향을 보이며, 충전압력(P_{overall})이 증가함에 따라 CO₂는 증가, O₂는 감소하며, UHC는 감소하는 경향을 나타낸다.
- 2) 혼합기 성층화 패턴에서 CO₂는 RI, LI, HI 순으로 작게 배출되며, O₂는 RI의 경우가 많이 배출되었으며, UHC는 RI의 경우가 가장 적게 배출되었다. RI 조건의 경우가 다른 조건에 비해 CO₂의 배출량도 적으며, 최고 연소압력도 높게 나타났으며, 이로부터 성층급기 패턴 역시 연소에 많은 영향을 나타냄을 알 수 있다.
- 3) 비균질 혼합기의 경우 전반적으로 초기 충전압력(P_{ini})이 증가함에 따라 CO₂는 감소, O₂는 증가, UHC는 감소하는 경향을 보였다. 또한 초기 충전 혼합기의 공기과잉율 3.0인 경우 UHC와 CO₂가 작게 배출되는 결과를 보였다.

후 기

본 연구는 청정생산기술사업의 지원에 의해 수행된 연구결과로, 관계 기관에 감사 드립니다.

References

- 1) T. Hjima, T. Takeno, "Effects of Temperature and Pressure on Burning Velocity," Comb. and Flame, Vol.65, pp.35-43, 1986.
- 2) W. A. Strauss, R. Edse, "Burning Velocity Measurements by the Constant-Pressure Bomb Method," 7th Symposium on Combustion, pp.377-385, 1959.
- 3) A. H. Lefebvre, Gas Turbine Combustion, Taylor and Francis, pp.38-39, 1999.
- 4) S. Shiga, S. Ozone, H. T. C. Machacon, T. Karasawa, H. Nakamura, T. Ueda, N. Jingu, Z. Huang, M. Tsue, M. Kono, "A Study of the Combustion and Emission Characteristics of Compressed-Natural-Gas Direct-Injection Stratified Combustion Using Rapid-Compression-Machine," Comb. and Flame, Vol.129, pp.1-10, 2002.
- 5) S. Furuno, S. Iguchi, T. Inoue, "Lean Combustion Characteristics of Locally Stratified Charge Mixture : Basic Studies of In-vessel Combustion Ignited by Laser," JSAE Review, Vol.16, pp.357-361, 1995.
- 6) M. S. Hong, K. S. Kim, "A Study on Direct Injection Stratified Charge Combustion with Spark Ignition in Constant Volume Bomb," Transactions of KSAE, Vol.2, No.5, pp.30-40, 1994.
- 7) T. K. Kim, S. H. Kim, J. Y. Jang, "CO, CO₂ and NOx Emission Characteristics of Methane-Air Premixed Flame in Constant Volume Combustion Chamber," Transactions of KSAE, Vol.8, No.5, pp.19-26, 2000.
- 8) C. U. Kim, C. S. Bae, "Emission Characteristics of a Gas Fueled SI Engine under Lean Burn Conditions," Transactions of KSAE, Vol.10, No.3, pp.93-100, 2002.
- 9) Y. T. Oh, S. H. Choi, "An Experimental Study on Exhaust Emission Characteristics by Various Oxygenated Additives in Diesel Engine," Transactions of KSAE, Vol.10, No.3, pp.101-110, 2002.
- 10) J. R. Sodre, D. A. Yates, "Chromatograph Determination of Unburned Fuel Concentration in the Exhaust of a SI Engine," SAE 962370, 1996.
- 11) S. H. Choi, C. H. Jeon, Y. J. Chang, "Combustion Characteristics of Methane-Air Mixture in a Constant Volume Combustion Chamber(1) : Homogeneous Charge," Transactions of KSAE, Vol.11, No.3, pp.48-57, 2003.
- 12) 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, 2003.
- 13) 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," Comb. and Flame, Vol.113, pp.312-332, 1998.