

예연소실 점화 플러그의 화염 분출구 직경에 따른 매립지가스의 연소 특성

김권세¹, 전영철², 최두석^{3*}

¹아주자동차대학 친환경자동차공학과 교수, ²공주대학교 기계자동차공학부 학생, ³공주대학교 미래자동차공학과 교수

Combustion Characteristics of Land Fill Gas according to the Diameter of the Flame outlet of the Pre-chamber Spark Plug

Kwonse Kim¹, Yeong-Cheol Jeon², Doo-Seuk Choi^{3*}

¹Professor, Department of Eco-friendly Car Engineering, Ajou Motor College

²Student, Division of Mechanical & automotive Engineering, Kongju National University

³Professor, Dept. of Future automotive Engineering, Kongju National University

요약 본 연구는 LFG(Land Fill Gas)의 주성분인 메탄(CH₄) 60%와 이산화탄소(CO₂) 40%로 구성된 매립지가스를 활용하여 정적연소 환경에서 연소의 초기 불안정성을 해결할 수 있는 실험적인 연구결과를 제안하는 것이다. 실험조건은 공기과잉률 0.9~1.6, 초기연소를 위한 압축압력 3bar, 실험주변온도 25℃, 실험용 연료가스 메탄, 예연소실 화염 분출구 직경 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5mm로 설정하였다. 실험결과 M3.0 모델에서 초기화염의 확산성이 매우 증가된 특성을 확인할 수 있으며, 이와 같은 증가의 특성은 공기 과잉률이 0.9, 1.0, 1.2에서 오리피스 효과의 효과가 극도로 향상하게 되었다는 점을 알 수 있었다. 결과적으로, 본 실험을 통하여 M3.0으로 설계된 예연소실 화염 분출구 치수를 LFG에 적용할 경우 기존의 점화 플러그 특성 보다 부분적인 연소의 성능을 높일 수 있다는 점을 확인할 수 있었다.

주제어 : 매립지가스, 예연소실, 정적연소실, 공기과잉률, 화염 분출구

Abstract This research work is to suggest the experimental results capable of solving an initial unsuitability of combustion and environment in a constant volume combustion chamber by using LFG(Land Fill Gas) which consists of 40% CO₂ and 60% CH₄. The experimental condition is set as 0.9~1.6 of air-fuel ratio, 3bar of combustion pressure, 25℃ of room temperature, methane for using gas, and 2.5~4.5 of Pre-chamber hole sizes. As a result, it can be seen that diffusion of initial flame is significantly increased by M3.0 model comparing with other one. The reason for the characteristics is that orifice effect is extremely improved by 0.9, 1.0, and 1.2 of air-fuel ratio comparing with other one. Consequently, this experiment is shown that M3.0 model is partially capable of improving combustion performance than a conventional ignition plug in case of applying to LFG with Pre-chamber design.

Key Words : LFG(Land Fill Gas), Pre-chamber, Constant Volume Combustion Chamber, Air/Fuel ratio, Flame Outlet Diameter

*This Research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Education(No. 2020R1F1A1076408)

*This article is extended and excerpted from the conference paper presented at ICSMB 2021

*Corresponding Author : Doo-Seuk Choi(dschoi@kongju.ac.kr)

Received May 30, 2021

Revised July 05, 2021

Accepted July 20, 2021

Published July 28, 2021

1. 서론

대체 및 재생 에너지원은 화석연료 대비 저탄소계의 배출가스에 대한 관심과 중요성이 증가하고 있다[1,2]. 특히 온실가스에 의한 배출량은 석탄 대비 44%, 미세 먼지의 배출량의 경우 약 10% 포함되어 있으며, 중금속 등 유해물질은 오히려 배출되지 않는 특성을 가지고 있다. 그중에 기존의 가솔린기관에 사용 가능한 대체 에너지원으로는 LFG(Landfill Gas), 천연가스, 바이오가스 등이 있다. 그중에 LFG의 경우 에너지 전환이 가능한 많은 메탄을 함유하고 있음에도 불구하고 그대로 배출시키거나 에너지 전환을 하지 않고 연소시켜 버리는 경우가 많다[3,4]. LFG는 매립지에서 발생하는 가스를 말하며, 일반적으로 메탄의 함유량이 약 60%인 것을 에너지원으로 활용하고 있다[5]. LFG의 주성분인 메탄은 CO₂보다 200%나 많은 온실가스를 발생시키는 효과도 포함되어 있다. 그렇기 때문에 대기 중으로 그대로 방출해서는 안되지만, 4500~5000kcal/m³의 발열량을 가지고 있기 때문에 연료로서의 가치가 충분하다고 밝혀져 있다[4]. 현재 점화기술로써는 LFG의 요구 점화에너지원보다 초기 점화에너지원이 낮아 연소의 시작이 어렵기 때문에 발전에 사용되는 LFG보다 에너지 전환이 거의 없이 연소되어 버리는 경우가 많다고 보도되고 있다.

LFG와 관련한 연구로는 LFG의 난연 한계 극복을 위하여 AIS(Amplified Ignition Source) 점화장치를 사용할 경우 연소압력, 화염핵 형성, 화염전파 속도, 배기가스 모듈을 분석하였을 때 LFG 연소가 개선된다는 결과를 보여주었다[6,7]. 유사 관련 연구로써 예연소실을 갖는 점화플러그의 연소특성에 관한 연구는 화염 공의 방향 및 크기가 연료소비율과 배기가스에 영향을 줄 수 있다는 것으로 분석되었다[8]. 또한, 정적연소실에서 LFG를 이용하여 연소하는 경우 토치 점화장치를 장착하기 전과 비교했을 때 토치 점화장치를 장착할 경우 연소압력과 속도가 향상된다는 연구도 진행되었다[9,10].

그밖에도 Micro-Co-Generation을 장착한 가솔린 기관에서 CO₂를 함유한 바이오가스를 사용하였을 경우 NO_x 배출 감소와 높은 부하에서 연비를 개선할 수 있는 연구결과가 있으며[11], 희석공기와 EGR(Exhaust Gas Recirculation)로 구동되는 Heavy Duty 천연가스 엔진에 예연소실 점화플러그를 장착하였을 경우의 성능 및 배출특성을 조사한 결과 예연소실 점화플러그

를 장착하였을 경우 화염 발생 각도 및 연소 지속시간이 최대 30% 감소하였고, CO와 HC의 배출량이 증가한 반면 NO_x의 배출량은 50% 감소하는 연구결과가 있다[12].

그러므로 본 연구는 LFG의 주성분인 메탄(CH₄) 60%와 이산화탄소(CO₂) 40%로 구성된 매립지가스를 활용하여 정적연소 환경에서 연소의 초기 불안정성을 해결할 수 있는 방안을 찾고, 이와 더불어 LFG는 가솔린기관의 가스연료 시스템에 적용할 수 있는 유망한 대체연료 중 하나이기 때문에 정적연소실에 예연소실 점화를 적용하여 LFG의 초기 화염성장, 확산성, 연소압력이 향상될 수 있는 방안을 찾고자 한다. 또한, 예연소실 내부의 분출구 직경에 변화에 따른 연소특성을 분석하는 결과를 포함하고 있으며, 가장 중요한 LFG의 연소효율을 증대시킬 수 있는 연구결과를 가시화 하는데 있다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 예연소실 점화플러그의 특성 및 구조

Fig. 1은 기존의 가솔린기관 시스템에서 사용되는 점화플러그와 예연소실에서 사용할 수 있는 점화플러그의 구조와 형상을 비교하는 연소형상을 보여주고 있다. Fig. 1(a)는 기존에 사용되고 있는 점화플러그의 구조를 나타낸 것이며, 가장 중요한 중심 전극, 접지 전극 그리고 절연부로 설계하여 실험을 수행하였다. 중심 전극의 재질은 이리듐(Iridium)이 적용되었으며, 소염작용 및 현상이 최소화 되도록 설계되었다. 접지 전극의 재질은 백금이 적용되었으며, 내구성을 강화하기 위하여 활용되었다.

Fig. 1(b)는 예연소실 내에 점화플러그가 설계되어 있는 구조를 보여주고 있다. 이와 같은 설계방법은 기존 점화플러그에서 캡 형식의 예연소실을 장착하여 예연소실을 만들어주기 위함이며, 점화 화염의 경우 일반 점화플러그와 마찬가지로 중심 전극과 접지 전극 사이의 스파크로 인해 화염이 형성될 수 있도록 제작되었다. 예연소실 내부에서 형성되는 화염은 오리피스 효과를 이끌도록 설계되었으며, 이러한 오리피스 효과는 난류 형태의 점화 화염을 형성하는 것을 특징으로 한다.

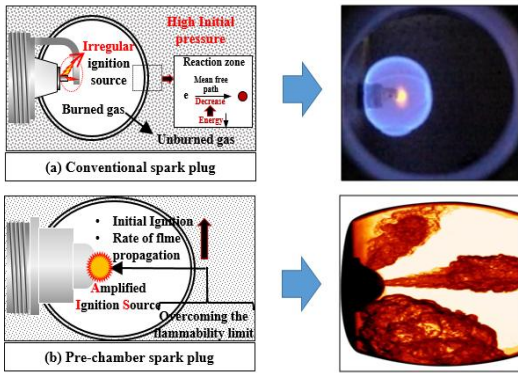


Fig. 1. Structure of pre-chamber ignition and conventional ignition

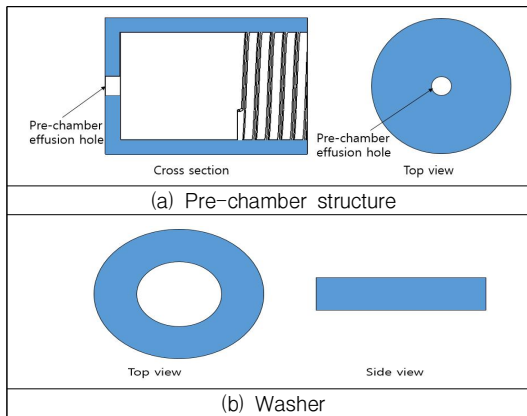


Fig. 2. Structure of pre-chamber and washer

Fig. 2는 예연소실과 와셔의 구조를 나타내며, 예연소실 화염 분출구 직경은 총 5가지 방식으로 2.5 mm, 3.0mm, 3.5mm, 4.0mm, 4.5mm로 설계되었다. 분출구 직경을 최소 2.5mm로 이상으로 설계한 이유는 정적연소실 내부에서 혼합된 가스의 유동이 예연소실에 도달할 수 있는 최소의 치수를 실험적으로 검증하여 적용하였다. 반면에 최대 4.5mm로 설계한 이유는 스파크에 의한 분출이 발생할 경우 오리피스 효과가 감소하기 시작하는 특성을 고려하여 적용되었다. 여기서 가장 중요한 점은 기존 점화플러그에 예연소실을 장착할 경우 화염 시작점이 달라질 수 있는 문제를 발생시킬 수 있다. 즉, 연소실 내의 체적이 변화할 수 있기 때문에 와셔를 장착해 기존 점화플러그의 위치를 조정하여 화염의 시작점을 동일하게 설계하여 연소실 체적이 동일한 조건을 갖추도록 고려되었다.

2.2 화염가시화 장치

Fig. 3은 기초연소 특성 및 화염 가시화 성능을 검증하기 위하여 제작한 정적연소실과 제어장치의 개략도를 보여주고 있다. 즉, 압력센서와 레귤레이터 사이에는 탱크에서 나오는 가스의 양을 정밀하게 계측하기 위하여 적용하였다. 레귤레이터는 MFC(Mass flow Controller)에서 요구되는 압력을 맞추도록 활용되었다. 체크밸브는 가스가 역류를 방지하기 위하여 활용되었으며, 실험의 안정성을 높이도록 고려되었다. 정적연소실은 가스의 혼합이 잘 혼합되도록 설계되었으며, 점화플러그를 적용하여 실험을 진행하였다. 연소압력은 압력센서를 활용하여 측정데이터를 취득하였으며, 메탄-공기와 연소된 가스가 혼합되는 상태를 막기 위해 진공펌프를 이용하였다. 즉, 연소 가스를 외부로 배출해 공기 과잉률의 오차를 최소화하도록 고려되었다.

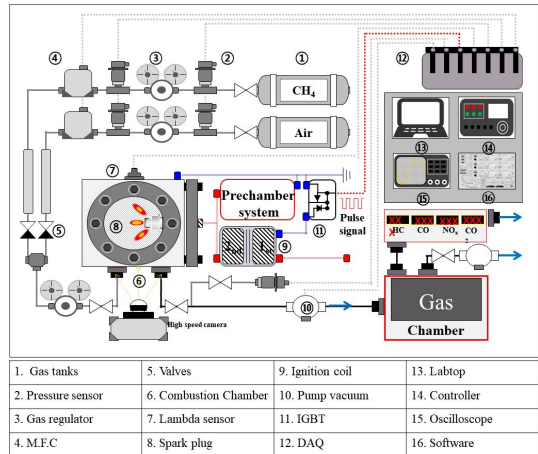


Fig. 3. CVCC schematic diagram

Table 1은 정적연소실에 적용된 실험장치의 제원을 나타내었으며, 연소실 체적은 400 cc로 기준으로 설계되었다. CVCC의 재질은 연소압력이 충분히 견딜 수 있도록 두랄루민(Duralumin)으로 제작되었으며, 화염 가시화를 위하여 전방과 측면에 석영(Quartz)을 적용하여 실험을 수행하였다. 화염 가시화는 초고속 카메라의 1,000 fps를 설정하였으며, CVCC의 측면부에 위치시켜 화염전파과정을 분석하는데 활용되었다. MFC는 정밀유량제어와 메탄 유량압력 10 bar, 압축 공기유량 압력 20bar로 조절하여 적용되었으며, 압력센서는 연소압력 최대 160bar를 견딜 수 있는 충분한 사양을 최

적화하여 CVCC 내부에 적용하였다. 또한, 연소 후 발생하는 연소가스는 다음 실험에 영향을 주지 않도록 진공펌프를 장착하여 배출시키는 과정을 수행하였다.

Table 1. CVCC specifications

items	specifications
Combustion chamber	- Volume: 400 cc
	- Material(1): Duralumin
	- Material(2): Quartz
High-speed camera	- Frame rate: 1,000 fps
Gas property	- Combustible: Methane(CH ₄)
	- Oxide: Air(N ₂ : 78%+O ₂ : 21%)
MFC	- Methane input pressure: 9 to 10bar
	- Air input pressure: 19 to 22bar
Pressure sensors	- Tank: 0 to 160bar
	- Regulator: 4 to 20bar
	- Combustion: 0 to 160bar
Vacuum pump	- Vacuum pressure: 650 mmHg

2.3 실험조건

Table 2는 본 실험에서 가장 중요한 실험조건을 보여주고 있으며, 예연소실을 활용한 플러그와 기존 점화플러그의 연소특성 분석을 위해 설정한 실험조건을 볼 수 있다. 연소특성의 가연한계 및 연소성능의 실험결과를 분석하기 위하여 공기 과잉률은 0.9~1.6, CVCC내 압축압력은 3bar, 연료는 LFG의 주성분인 메탄, 예연소실의 화염 분출구는 직경 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5mm로 본 실험을 조건으로 수행하였다.

Table 2. Experimental condition

Items	Specifications	Error rate
Air/Fuel ratio	0.9~1.6(from 0.1 unit)	±1 %
Compressed pressure	3 bar	±0.5 %
Ignition system	Convention type	
Temperature	25 °C	±3 °C
Fuel	Methane(CH ₄)	
Pre-chamber Flame outlet Dia.	2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5mm	

3. 결과 및 고찰

3.1 화염전파 특성

Fig. 4는 공기 과잉률 0.9~1.6까지의 예연소실 화염 분출구 직경 변화에 따른 화염전파특성에 관한 실험 결과를 보여준다. 화염전파특성에 관한 실험은 동일한 압축압력 3bar 상태에서 기존 점화플러그 모델(base)과 변경된 모델(M2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5)들과 함께 비교하면서 진행되었다. 실험비교를 위한 스케일은 초기 화염을 생성하는 시점 5.0ms에서 화염이 연소실 내부에 완전히 전파되는 최대시점 81ms로 설정 후 실험을 진행하였다.

Fig. 4(a)에서는 공기 과잉률 0.9에서 실험한 화염전파의 결과를 보여주고 있으며, M3.0에서는 기존의 점화플러그를 사용한 base 보다 화염의 전파속도 빠르게 확산하는 특성을 보였다. 이와 같은 원인은 분출구의 홀 직경이 크다 할지라도 공기 과잉률 0.9에서는 오리피스 효과에 오히려 감소하게 되는 특성을 확인할 수 있었다.

Fig. 4(b)에서는 화염의 초기전파가 공기 과잉률 1.0로 설정하여 실험한 결과를 보여주고 있다. 화염의 전파 특성은 일반적인 특성으로 공기 과잉률 0.9의 결과와 마찬가지로 M3.0에서 가장 우수한 화염전파특성 및 오리피스 증가의 효과를 나타내었으며, M3.5부터 M4.5까지 공기 과잉률 0.9보다 전파속도가 빠르게 확산되는 결과를 확인할 수 있었다.

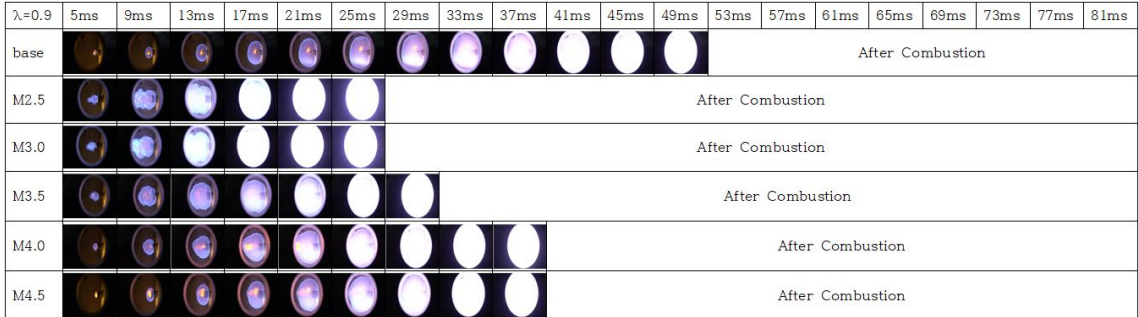
Fig. 4(c)에서는 공기 과잉률 1.2로 공기와 연료의 혼합을 희박하게 설정하여 실험한 결과를 보여주고 있다. M3.0은 다른 모델들과 비교할 경우에도 가장 우수한 화염의 전파 특성과 오리피스 증가 특성을 가지는 것을 확인할 수 있다.

하지만 Fig. 4(d), (e)에서는 초희박 영역으로 공기 과잉률이 설정되었기 때문에 전반적으로 매우 불안정한 화염의 전파 특성을 나타내었다. 하지만 M2.5에서 M4.5까지의 모든 모델들은 base 모델과 비교해볼 때 화염의 전파와 압력의 이동이 빠르고 켓의 형상을 같은 특성으로 화염을 형성하는 특성을 보여주었다. 이와 같은 원인은 오리피스 특성이 기존의 포인트 점화플러그를 적용한 base 모델보다 연소의 초기 확산을 보다 효율적으로 촉진시키는 것으로 분석되었다. 또한, 전반적인 오리피스의 감소 특성은 초희박 조건에서 혼합비의 비율의 한계치에 도달하게 되면서 화염의 강도가 저하

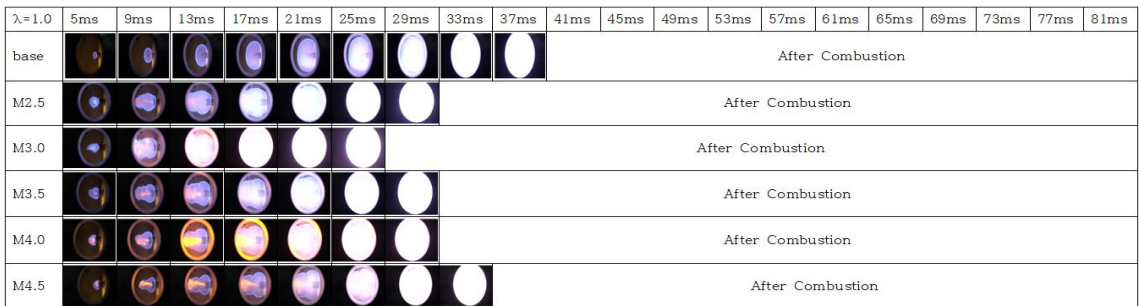
되는 원인으로 분석할 수 있었다.

결과적으로 M3.0 모델은 화염의 전파, 시간, 확산성 부분에서 가장 효율적으로 이루어진다고 판단할 수 있

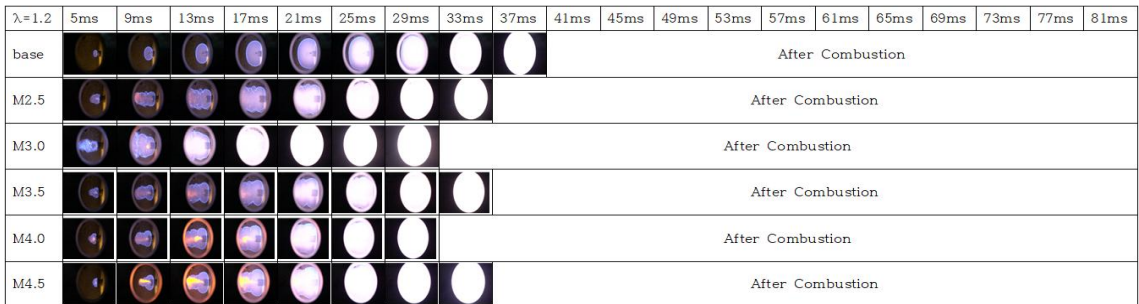
으며, 가장 우수한 화염전파의 특성은 이상적인 공기 과잉율에 속하는 0.9, 1.0, 1.2에서 가시화 되었다.



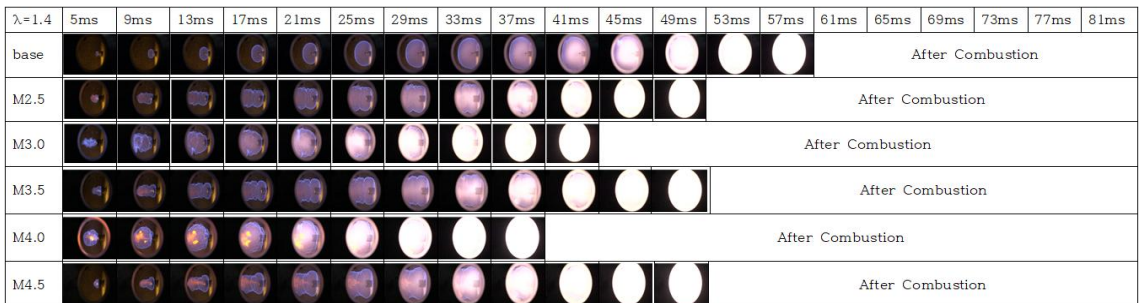
(a) Air/fuel ratio 0.9



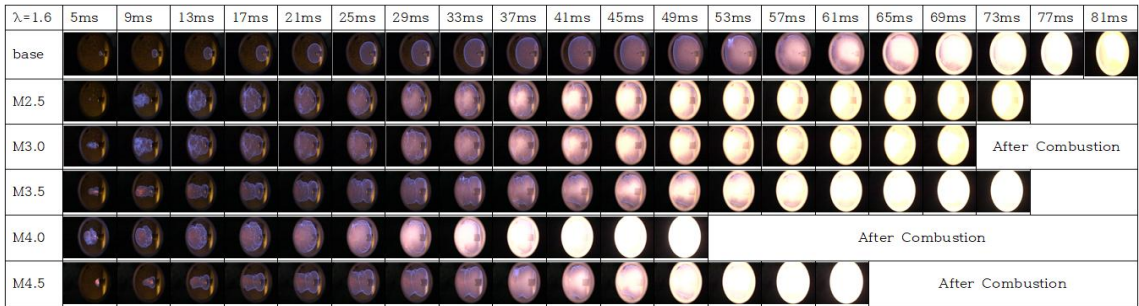
(b) Air/fuel ratio 1.0



(c) Air/fuel ratio 1.2



(d) Air/fuel ratio 1.4



(e) Air/fuel ratio 1.6

Fig. 4. Flame propagation characteristics by pre-chamber flame outlet Diameter

3.2 예연소실의 연소압력 검증

Fig. 5은 예연소실에 의해 발생하는 연소압력을 측정하여 비교한 결과를 보여주고 있으며, 혼합기의 공기 과잉율은 0.9~1.6까지 측정하여 변화된 연소압력의 결과를 나타낸다. 그래프의 x축은 공기 과잉율(λ)로 표현하였으며, y축은 연소압력의 변화된 수치를 보여준다.

측정결과 람다(λ)=0.9에서는 농후한 혼합가스의 비율에 의하여 최대 연소압력보다 다소 감소된 수치를 base, M2.5, M3.0에서 볼 수 있으며, 특히 M3.0은 공기 과잉율이 증가할수록 연소의 압력도 평균적으로 비례하여 증가된 결과를 확인할 수 있다. 반면에 M3.5에서 M4.5 모델들에서는 연소의 압력이 오히려 매우 과다하게 증가하는 특성을 보였다. 즉 예연소실의 분사홀 직경은 기존의 점화플러그 구조를 갖는 base 모델보다 M3.0 모델에서 화염의 확산성을 포함하여 가장 우수한 오리피스 효과에 의한 연소의 압력을 높일 수 있는 특성을 확인할 수 있었으며, 연소압력은 공기 과잉율 1.3~1.6까지 base보다 안정적인 증가 특성으로 압력을 다소 향상시킬 수 있는 이점을 보여주었다. 그러므로 M3.0 모델은 다른 M모델들에 비하여 가장 안정적인 연소압력의 증가 특성을 갖는 것으로 분석할 수 있었다.

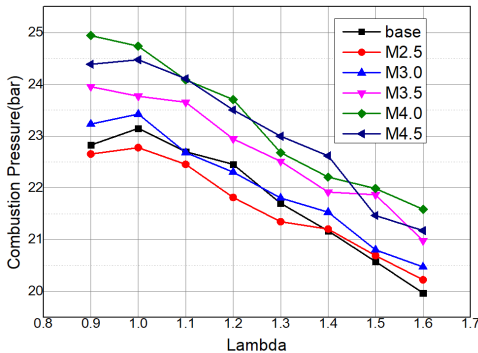


Fig. 5. Combustion pressure by air/fuel Ratio

4. 결론

주성분이 메탄(CH₄) 60%와 이산화탄소(CO₂) 40%로 구성된 LFG를 활용하여 정적연소 환경에서 연소의 초기 불안정성을 해결할 수 있는 실험적인 연구를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 공기 과잉율 0.9에서 M3.0 모델에 의한 화염전파는 기존의 점화플러그에 의한 화염전파 특성보다 빠르게 확산하는 특성을 보였다.
- 2) 화염의 전파 특성은 공기 과잉율 0.9에서 M3.0 모델에 의해 화염의 오리피스 효과가 base 모델보다 효율적으로 촉진되는 것을 확인하였다.
- 3) M3.0 모델로 설계된 예연소실의 화염 불출구 직경을 LFG에 적용할 경우 기존의 점화플러그 특성보다 부분적인 연소의 성능을 높일 수 있다는 점을 확인할 수 있었다.
- 4) M3.0 모델은 다른 M모델들에 비하여 가장 안정적인 연소압력의 증가 특성을 갖는 것을 확인하였다.
- 5) 따라서 LFG 연소성능 향상을 위해서는 예연소실 점화플러그의 홀 크기, 홀 각도의 변화 및 LFG 분자구조에 변화에 따른 관련융합연구가 반드시 필요하다.

REFERENCES

- [1] L. C. F. Freitas et al. (2019). Economic feasibility and the energetic potential from Landfill gas in Campinas-SP. *Research, Society and Development*, 8(6), 4286788. DOI : 10.33448/rsd-v8i6.788
- [2] H. Beak & T. S. Kim. (2020). A study on the estimation of the renewable energy certificates (REC) weight considering the life cycle

assessment (LCA) of greenhouse gas emission. *Journal of the Korea Convergence Society*, 11(8), 173-182.
DOI : 10.15207/JKCS.2020.11.8.173

[3] E. Hache & A. Palle. (2019). Renewable energy source integration into power networks, research trends and policy implications: A Bibliometric and Research Actors Survey Analysis. *Energy policy*, 124, 23-35.
DOI : 10.1016/j.enpol.2018.09.036

[4] H. S. Yoon. (2020). A Convergence Study on Improvement of Emission Regulation in Military Vehicle. *Journal of the Korea Convergence Society*, 11(1), 181-186.
DOI : 10.15207/JKCS.2020.11.1.181

[5] E. F. Aghdam, C. Scheutz & P. Kjeldsen. (2019) Impact of meteorological parameters on extracted Landfill gas composition and flow. *Waste Management*, 87, 905-914.
DOI : 10.1016/j.wasman.2018.01.045

[6] M. S. Choi. (2020). *A study on the Combustion Characteristics Using Amplified Ignition Source for Overcoming Flame Retardance of LFG*. Doctoral Dissertation. Kongju National University, Gongju.

[7] T. J. Yoon. (2019). *Study on Combustion Characteristics of Propane-Air Mixture using Jet Spark Plug in Constant Volume Combustion Chamber*. Master's dissertation. Kongju National University, Gongju.

[8] M. S. Ji. (2008). *The Effect of Fired Ignition Plug on the Combustion of Engine*, Graduate School of Chungnam National University, Daejeon.

[9] H. S. Wang. (2012). *A Study on the Improvement of Combustion Performance of Landfill Gas Using Static Combustion Rooms*, Master's dissertation, Seoul National University of Science and Technology Graduate School of Industry, Seoul.

[10] S. T. Kwon. (2014). *A Study on the Combustion Characteristics of Methane in Static Combustion Room of Mimicking Large Institutions*. Doctoral dissertation. Journal of Seoul National University of Science and Technology, Gongju.

[11] Y. Kim, N. Kawahara, K. Tsuboi & E. Tomita. (2016). Combustion Characteristics and NOX Emissions of Biogas Fuels with Various CO₂ Contents in a Micro Co-generation Spark-ignition Engine. *Applied energy*, 182, 539-547
DOI : 10.1016/j.apenergy.2016.08.152

[12] H. S. Yoon & Y. S. Ryu. (2019). A Convergence Study on the Effects of NH₃/NO_x Ratio and Catalyst Type on the NO_x Reduction by Urea-SCR System of Diesel Engine. *Journal of the Korea Convergence Society*, 10(4), 131-138.
DOI : 10.15207/JKCS.2019.10.4.131

김 권 세(Kwonse, Kim)

[정회원]



·2011년 2월 : 공주대학교 자동차공학과 (공학사)
·2015년 2월 : 공주대학교 기계공학과 (공학석사)
·2018년 2월 : 공주대학교 기계공학과 (공학박사)

·2021년 4월 ~ 현재 : 아주자동차대학교 친환경자동차공학과 교수
·관심분야 : 플라즈마 에너지 & 연소, 내연기관, 연소제어
·E-Mail : kimkwonse84@gmail.com

전 영 철(Yeong-Cheol Jeon)

[준회원]



· 2011년 2월 : 공주대학교 자동차공학과(공학사)
· 관심분야 : 내연기관
· E-Mail : azx9819@naver.com

최 두 석(Doo Seuk, Choi)

[정회원]



· 1981년 2월 : 충남대학교 기계공학과(공학사)
· 1984년 2월 : 충남대학교 기계공학과(공학석사)
· 1996년 8월 : 충남대학교 기계공학과(공학박사)

· 1994년 3월 ~ 현재 : 공주대학교 기계자동차 공학부 교수
· 관심분야 : 플라즈마, 연소제어, 내연기관, 대체에너지
· E-Mail : dschoi@kongju.ac.kr