정적연소기에서 토치의 체적 변화에 따른 메탄의 연소특성 파악

권순태[†] · 박찬준* · 엄인용*

A Study on Combustion Characteristic Methane Fuel according to Torch Volume Variation in a Constant Volume Combustion Chamber

Soon Tae Kwon, Chan Jun Park and In Young Ohm

Abstract. Six different size of torch-ignition device were applied in a constant volume combustion chamber for evaluating the effects of torch-ignition on combustion. The torch-ignition device was designed for six different volumes and same orifice size. The combustion pressures were measured to calculate the mass burn fraction and combustion enhancement rate. In addition, the flame propagations were visualized by shadowgraph method for the qualitative comparison. The result showed that the combustion pressure and mass burn fraction were increased when using the torch ignition device. And the combustion duration were decreased. The combustion enhancement rates of torch-ignition cases were improved in comparison with conventional spark ignition. Finally, the visualization results showed that the torch-ignition induced faster burn than conventional spark ignition due to the earlier transition to turbulent flame and larger flame surface, during the initial stage. Finally, the initial flame propagation was affected by torch-ignition volume.

Key Words: Constant Volume Combustion Chamber(정적연소실), Mass Fraction Burned(질량 연소율), Combustion Enhancement Rate(연소 촉진율), Torch ignition device(토치점화장치)

기호설명

MFB : Mass Fraction Burned

$P_{\max(t)}$: 토치 점화 기구 장착시 최고 압력

$P_{\max(b)}$: 토치 점화 기구 미장착시 최고 압력

$t_{\max(t)}$: 토치 점화 기구 장착시 연소 시간

$t_{\max(b)}$: 토치 점화 기구 미장착시 연소 시간

1. 서 론

열병합발전은 에너지의 효과적인 사용과 온실가스 저감에 있어서 큰 효용성을 갖기 때문에 최근 사용이 증가하고 있다. 미 DOE(Department of Energy)는 2008년 12월 보고서에서 열병합발전 시스템이 자국의

에너지 포트폴리오 중 가장 현실적이고 효과적이라고 평가하였다. 국내에서는 지식경제부가 열병합발전 도입과 관련한 규제를 완화 중에 있으며, 행정안전부는 친환경 건축물을 지정하여 감세 혜택을 주는 등의 정책 방향을 논의하고 있다. 또한 열병합용 엔진에 천연 가스를 사용하고자 하는 노력이 다양하게 시도되고 있다. 하지만 가스 연료의 사용 기술에 대한 기초 연구 사례는 전무한 실정이며, 단지 엔진 적용 사례 정도만 연구되고 있다. 일반적인 열병합용 엔진은 가솔린 기관의 연소 기구를 채용하고 있으나, 기존의 가솔린 기관에 비하여 기관의 기통 당 배기량이 비정상적으로 과대하게 설계되어 있다. 기통 당 배기량이 크면 기관 실린더 내에 공급되는 혼합기의 양은 절대적으로 증가하게 되며, 이를 한정된 사이클 시간 동안에 연소 시키지 못하는 문제가 발생한다. 또한 느린 연소는 미연 성분의 증가로 인하여 배기를 악화 시킬 뿐만 아니라, 노킹 등의 이상연소현상도 유발시킨다. 따라서 기통 당 배기량이 큰 기관의 경우 초기 화염 발달을 지배하는

[†]서울과학기술대학교 에너지환경대학원

E-mail : stkwon@seoultech.ac.kr

*서울과학기술대학교 기계공학과

점화와 연소 성능이 엔진의 성능에 미치는 영향이 증대한다. 초기 화염 성장에 유리한 조건을 형성하기 위한 연구가 많은 연구자들에 의해 수행되었다. Ohm¹⁾은 점화시기에 점화 플러그 부근의 혼합기 상태를 초기 화염 성장에 유리하게 하기 위하여 포트 마스크를 적용하였다. 또한 Lee²⁾은 정적 연소실에서 토치 점화 장치의 노즐 직경이 4 mm인 경우에 연소 개선율이 가장 큰 것을 확인하였다.

따라서 이 연구에서는 초기 화염 성장에 유리한 조건을 형성하기 위하여 토치 점화 장치를 사용하여, 초기 화염 성장 및 화염 전파 특성을 관찰하였다. 또한 토치 점화 장치의 체적의 영향을 파악하기 위하여 오리피스 직경은 4 mm로 고정하고, 토치 점화 장치의 체적을 변화 시키며 실험하였다. 화염 전파 특성을 분석하기 위하여 정적 연소실 내의 압력을 측정하였으며, 측정되어진 압력 데이터를 이용하여 질량연소율 및 연소 개선율을 계산하였다. 또한 화염 전파과정은 shadow graph법을 이용하였다.

2. 실험장치 및 방법

본 연구에 사용되어진 실험장치의 개략도는 Fig. 1에 나타났다. 예혼합 장치에서 만들어진 혼합기는 정적연소실로 흡입되어 연소가 이루어진다. 압력센서를 이용하여 정적연소실 내부의 압력을 측정하였으며, שלי렌 장치와 고속카메라를 이용하여 연소 과정을 가시화 하였다.

본 연구에 사용된 정적 연소실은 보어(bore) 152 mm, 스트로크(stroke)는 85.2 mm이며, 실린더의 체적은 1545 cc 이다. 정적 연소실의 본체는 열과 부식에 강한 스테인리스 스틸(stainless-steel)로 제작하였으며, 화염 가시화를 위하여 정적 연소실의 양 측면에는 두 개의 석영 창(quartz)을 설치하였다. 화염 가시화창은 초기 화염 생성 관측뿐만 아니라 연소실 벽면까지의 전체 화염 전파 과정을 관측하기 위하여 연소실 전체가 가시화되도록 설계하였다. 화염 가시화 창 크기는 140 mm×100 mm이다. 또한 연소실과 가시화 창 기밀을 유지하기 위하여 엔진용 가스켓 고무 실링제를 사용하여, 연소실 안의 기밀을 유지하였다. 정적 연소실의 윗면에는 흡입 밸브(intake valve) 및 배기 밸브(exhaust valve)를 장착하였고, 점화플러그(spark plug)는 연소실의 중앙에 위치하도록 설치하였다. 또한 연

Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

소실 측면에 연소 압력 측정을 위한 연소 압력 센서 (pressure sensor)를 장착하여, 연소실 안의 압력 변화를 측정하였다.

정적 연소실에서 연소 실험을 할 경우, 이론 공연비 또는 실물 엔진의 공연비를 정확히 재연하여 공급하여야 한다. 본 연구에서는 이를 위하여 수치환법을 이용한 예혼합 장치를 사용하였다. 예혼합 장치는 수은 마노미터와 알코올 마노미터를 장착하여 연료압과 대기압을 측정하였다. 또한 공기내의 수증기만을 고려하기 위하여 물탱크(water tank)에는 파라핀유를 띄워 관내로 수증기가 유입되는 것을 차단하였다. 연료는 메탄(CH_4)를 사용하였고, 혼합기는 이론 혼합비(stoichiometric)로 제작하여 사용하였다.

Shadowgraph법은 공기의 흐름에서 어떠한 밀도 변화는 충격파 근처에서 진한 선으로 상이 맺히게 된다. 본 실험에서는 정적 연소실 내에서 예혼합기를 연소하여 shadowgraph법에 의해 연소 과정 전체의 밀도 구배를 촬영하였다. 광원은 100 W 할로겐 램프를 이용하였다. 오목거울(concave mirror, ϕ : 300 mm, f = 3000 mm)과 고속카메라(SVSI)를 이용하여 1000 f.p.s로 촬영하였다. 또한 고속카메라와 점화장치와의 신호동기화를 위하여 DG-535(pulse generator)를 사용하였다.

체적 변화에 따른 토치 점화 장치의 특성을 파악하기 위하여 Fig. 2와 같은 토치 점화 기구를 제작하였다. 토치 점화 장치는 토치 점화 장치의 입구 직경을 D , 출구

Fig. 2. The schematic diagram of torch-ignition device.

Table 1. Specification of torch-ignition device

D(mm)	1	14	16	18	20	22
V(cc)	1.1	1.5	2.0	2.5	3.1	3.8
De(mm)	4					
h(mm)	10					

직경을 D_e 라고 정의하였다. 토치 점화 장치 입구 직경 (D)은 12 mm에서 22 mm까지 각각 2 mm씩 증가시켰으며, 토치 점화 장치의 출구 직경(D_e)과 높이는 각각 4 mm, 10 mm로 고정하여 제작하였으며, 토치 점화 장치의 체적을 직경 방향으로 증가시켰다. 토치 점화 장치의 사양은 Table 1에 나타냈다. 토치 점화 기구는 스테인리스 스틸로 제작하였으며, 연소실 중심에 장착 가능하도록 제작하였다.

3. 실험결과

토치 점화 장치는 일종의 분할 연소실의 개념이며, 점화 플러그에서 발달한 화염이 부연소실에서 연소한 화염이 토치 점화 장치의 오리피스스를 통하여 주 연소실로 강하게 공급 된다. 본 연구에서는 토치 점화 장치의 연소 특성을 파악하기 위하여 일반적인 스파크 플러그 점화와 토치 점화 장치를 장착한 경우를 비교하였다. 일반적인 스파크 플러그 점화와 토치 점화 장치를 장착한 경우의 연소 압력 경과 곡선을 Fig. 3에 나타냈다. 연소 압력은 일반적인 스파크 플러그를 사용한 경우에는 5.95 bar이고, 최고 압력 도달 시간은 0.085 sec이다. 반면 토치 점화 장치를 장착한 경우에

Fig. 3. Pressure rise after ignition for torch-ignition and conventional spark ignition.

는 최고 연소 압력이 6.28 bar에서 6.35 bar까지 증가하는 경향을 보였다. 특히 토치점화 장치의 체적이 3.1 cc 인 경우에는 6.36 bar로 가장 높은 연소 압력을 나타냈으며, 토치 점화 장치를 장착한 모든 경우에 최고 연소 압력이 증가하고, 연소 시간은 단축되는 것으로 확인하였다.

질량 연소율은 연소된 질량이 정적 연소실 내의 압력 변화와 직접적인 관련이 있다는 가정하에 열역학 제 1법칙으로부터 열발생율(rate of heat release)과 가스 상태 방정식을 이용하여 구할 수 있다. Fig. 4는 점화 후 시간경과에 따른 질량 연소율과 화염가시화 이미지를 토치 점화 장치의 체적 증가에 따라 나타낸 것이다. 토치 점화 장치를 사용한 경우에는 일반적인 스파크 플러그 점화와 비교해서 질량 연소율의 기울기가 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 정적 연소실내에서 일정한 체적의 예혼합기를 연소함에 있어서 급격한 연소가 일어나기 때문으로 판단된다. 또한 질량 연소율의 기울기는 토치 점화 장치를 장착한 모든 경우에 비슷한 경향을 보이지만, 질량 연소율이 10%되는 지점을 점화 및 화염 발달단계로 정의하고 10% 연소까지 도달 시간을 비교하면, 토치 점화 장치의 체적이 1.1 cc, 1.5 cc, 2.0 cc, 2.5 cc, 3.1 cc, 3.8 cc 순서로 확인하였다. 이는 토치 점화 장치의 체적이 클수록 10% 연소까지의 도달 시간이 늦은 것으로 나타났다. 하지만 가시화 이미지를 통해 초기 화염 분출 시간을 측정한 결과 모든 경우에 0.016 sec로 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. Fig. 4의 일반적인 스파크 점화의 가시화 이미지를 보

먼 점화 후 시간이 지나면서 화염이 층류 화염 형태로 성장하는 것을 확인 할 수 있다. 하지만 토치 점화 장치를 장착한 경우에는 화염의 성장이 난류 화염 형태

로 성장하는 것을 가시화 이미지를 통해 확인 할 수 있다. 특히 토치 점화 장치의 체적이 증가할수록 화염의 성장이 층류에서 난류화염으로 천이되는 것을 확인 할

(a) Conventional Spark Plug Ignition

 (b) Torch ignition device, $V=1.1\text{cc}$

 (c) Torch ignition device, $V=1.5\text{cc}$

 (d) Torch ignition device, $V=2.0\text{cc}$

 (e) Torch ignition device, $V=2.5\text{cc}$

 (f) Torch ignition device, $V=3.1\text{cc}$

(g) Torch ignition device, V=3.8cc

Fig. 4. Mass burned fraction as a function of nozzle diameter and flame propagation.

수 있다. 토치 점화 장치의 체적이 1.1cc인 경우에는 초기에는 난류 형태의 화염으로 성장하지만, 시간이 지날수록 층류와 비슷한 구형의 형태로 전파하는 것을 확인 할 수 있다. 하지만 토치점화 장치의 체적 증가 할수록 화염은 난류 형태로 성장하고, 토치 점화 장치에서 먼 곳까지 전파되는 것을 확인하였다. 이는 토치 점화 장치 내에서 화염이 성장하여 노즐을 통해 분출하면서 난류 형태로 천이하는데 초기에 토치 점화 장치 내에서 연소되는 예혼합기의 양이 많을수록 난류 화염으로의 천이가 많이 일어나고, 멀리 전파되는 것을 확인 하였다.

토치 점화 장치를 장착한 후의 정적 연소실 시험이 일반적인 스파크 플러그를 사용하였을 경우와 비교하여 어느 정도 효율적인 에너지 변환이 이루어지는가를 비교하기 위하여 연소 촉진율(CER : Combustion Enhancement Rate)을 사용하였다. 연소 촉진율은 연소 압력 상승률 (ζ)과 연소시간 단축율 (ξ)로 정의 할 수 있으며, 본 연구에서는 식 (1)과 식 (2)로 각각 정의하였다.

$$\zeta = \frac{P_{\max(t)} - P_{\max(b)}}{P_{\max(b)}} \quad (1)$$

$$\xi = \frac{t_{\max(b)} - t_{\max(t)}}{t_{\max(b)}} \quad (2)$$

일반적인 스파크 플러그를 장착한 경우에는 연소 최고 압력값은 5.95 bar, 연소 최고 압력 도달 시간은 0.085 sec 이다. 하지만 토치 점화 장치를 체적을 증가 시키면서 장착한 실험에서는 연소 최고 압력이 6.28 bar에서 6.36 bar로 나타났다. 또한 연소 최고압력 도달 시간은 0.065 sec에서 0.077 sec 로 감소하였다. 또한 토치 점화 기구를 장착한 경우의 연소 시간 단축율은 일반적인 스파크 플러그의 연소와 비교하여 8%에서 최고 23%까지 개선되는 것을 보였다. 특히 토치 점화 장치의 체적이 1.1 cc인 경우에 23.19%로 가장 큰 연소 시간 단축율을 나타내고 있다. 또한 토치 점화 장치의 입구 체적이 증가 할수록 연소 시간 단축율이 감소하는 경향을 보였다. 하지만 일반적인 스파크 플러그를 사용한 경우와 비교해서는 모든 경우에 연소 시간 단축율이 증가하는 경향을 보였다. 연소 압력 상승률은 일반적인 스파크 플러그의 연소와 비교하여 5.71%에서 6.92%까지 개선되었다. 특히 토치 점화 장치의 체적이 1.1 cc인 경우에는 토치 점화 장치 내에서 급격한 연소가 일어나 난류 화염이 발생하고, 난류 화염이 연소실의 중앙까지 전파되어 가장 큰 촉진율을 보였으나, 일반적인 스파크 플러그와 비교해서는 모든 경우에 연소 압력 촉진율이 개선됨을 확인 하였다. 따라서 토치 점화 기구의 장착은 일반적인스파크 점화 방식에 비하여 효율적인 에너지 변환이 이루어지고 있음을 확인하였다. 토치 점화 장치의 체적이 증가할수록 연소실의 압력은 증가하지만, 연소 시간의 단축율은 미미하였다. 스파크 점화의 경우 점화 이후 화염이

Fig. 5. Combustion enhancement rate(CER) as a function of volume.

Fig. 6. Combustion pressure as a function of D/De.

화염 핵을 중심으로 층류 화염 전파를 하는 반면, 토치를 적용하면 토치 내에서 연소가 진행되어 고온 고압의 가스가 오리피스를 통해 연소실로 분출하므로, 연소실에서의 화염 전파가 난류 화염 전파의 형태를 가지게 된다. 이에 따라 연소 속도가 향상된다.

Fig. 5는 토치 점화 장치의 입구 직경을 오리피스 직경으로 나누어 무차원화 하여 압력을 나타냈다. D/De가 증가할수록 연소실 내의 압력은 증가하는 경향을 보이지만, 5이후에는 토치의 체적이 지나치게 커서 토치 점화 장치에서 분출하는 고온 고압의 가스가 연소실의 하부까지 도달하여 아래 부분부터 연소하므로 연

소율이 다소 감소하는 것을 확인하였다. Fig. 6은 주 연소실로 초기 화염이 전파 되는 과정을 나타냈다. 토치 점화 장치의 체적이 증가할수록 초기 화염 분출이 연소실의 아래쪽까지 전파됨을 확인할 수 있다. 하지만 초기 화염이 전파되어 연소실의 중앙에서 연소하는 경우에 연소 개선율이 높은 것을 확인하였다.

4. 결 론

토치 점화 장치(torch ignition device)를 사용하여 정적 연소실에서 메탄-공기 혼합기를 이룬 공연비에서 연소하여, 다음과 같은 결과를 얻었다.

1) 토치 점화 장치의 체적을 증가시키며 정적 연소실에서 연소를 한 결과 일반적인 스파크 플러그 점화와 비교하여 최대 압력이 증가하였고, 최대 압력 도달 시간은 단축되었다.

2) 토치 점화 장치를 장착하여 정적 연소실에서 연소를 한 모든 경우에 대해서 질량 연소율의 기울기는 증가하였다. 이는 토치 점화 장치를 이용하면 급격 연소가 일어남을 알 수 있다.

3) Shadowgraph법으로 화염전파과정을 가시화 한 결과 토치 점화 장치를 사용하면 초기 화염 전파가 노즐을 통해 급격히 분출이 되며, 토치 점화 장치의 체적이 증가할수록 노즐을 통한 초기 화염의 분출이 연소실 먼 곳까지 분출됨을 확인하였다. 또한 토치 점화 장

Fig. 7. Flame propagation as a function of torch ignition device volume.

치의 체적이 증가 할수록 화염 전파 과정이 층류화염에서 난류화염으로 천이되어 전파하였다.

4) 일반적인 스파크 플러그를 이용한 연소와 토치 점화장치를 사용한 경우를 비교하여 연소 시간 단축율과 연소 압력 상승률을 분석한 결과 연소 압력 상승률은 최대 23.19%, 연소 시간 단축율은 최대 6.92% 개선되었다.

참고문헌

- 1) Ohm, I. Y., Jeong, K. S., and Jeung, I. S., 1997, "Effects of Injection Timming on the Lean Misfire Limit in an SI engine", SAE paper, No. 970028.
- 2) Lee, J. M., Kwon, S. T., Ohm, I. Y., and Park, C. H., 2010, "A Study on Combustion Characteristics of Methane Fuel according to Torch Nozzle Diameter in a Constant Volume Combustion Chamber", J. KSVE, Vol.8(1), pp.19~24.
- 3) Park, J. S., 2003, "Combustion Characteristics of Plasma Jet Ignition on LPG-Air Mixture in Laminar Flow Field", SAE paper, No.99370008.
- 4) Kim, B. S., 2003, "A Study on Combustion Characteristics of the Methane-Hydrogen Lean Mixture by Using Multiple Spark Capacity Discharge in a CVCC(I)", J. Energy Engg., Vol. 12(2), pp. 124~130.
- 5) Nakamura, N., Kobayashi, T., Hanaoka, M., and Tagaki, N., 1983, "A New Platinum Tipped Spark Plug Extends the Lean Limit and Useful Life", SAE paper, No.830480.
- 6) Ferguson, C., 1986, Internal Combustion Engines, John Willy & Sons, New York, pp. 103~148.
- 7) Ohm, I. Y., 2006, Internal Combustion Engine, A-jin, Seoul, pp. 50~57.