

정적연소기에서 토치의 노즐 직경에 따른 메탄의 연소특성 파악

이정만* · 권순태† · 박찬준** · 엄인용**

A Study on Combustion Characteristics of Methane Fuel according to Torch Nozzle Diameter in a Constant Volume Combustion Chamber

Jung Man Lee, Soon Tae Kwon, Chan Jun Park and In young Ohm

Abstract. Five different size of orifice were applied in a constant volume combustion chamber for evaluating the effects of torch-ignition on combustion. The initial flame development and flame propagation were analyzed by the mass burned fraction and combustion enhancement rate. The combustion pressures were measured to calculate the mass burned fractions and the combustion enhancement rates. In addition, the flame propagations were visualized by the shadowgraph method for the qualitative comparison. The result showed that the combustion pressure and mass burned fraction were increased when using the torch-ignition device. 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.

Key Words: Mass burned fraction(질량 연소율), Combustion enhancement rate(연소촉진율), Constant Volume Combustion Chamber(정적연소실), Torch-ignition(토치 점화)

기호설명

MFB : Mass Burned Fraction

$P_{max}(t)$: 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

f : focal length

1. 서 론

최근에는 천연가스 연료를 열병합용 엔진에 사용하고자 하는 노력이 시도되고 있다. 하지만 가스 연료의 사용 기술에 대한 기초 연구 사례는 많이 발표되지 않

았으며, 단지 천연가스 연료의 엔진 적용 사례정도만 밝혀져 있다. 열병합용 가스 엔진은 가솔린 엔진의 연소 기구를 채용하고 있으며 엔진의 기통 당 배기량은 일반적인 가솔린 엔진과 비교하여 비정상적으로 과대하게 설계되어있다는 것이 단점이다. 기통 당 배기량이 크면 엔진실린더 내에 공급된 혼합기의 절대량이 증가하여 이를 한정된 사이클 기간 동안에 완전 연소를 시키지 못하게 된다. 또한 느린 연소는 미연 성분의 증가로 인하여 배기를 악화시킬 뿐만 아니라 노킹 등 이상 연소 현상도 유발시킨다. 따라서 기통 당 배기량이 큰 경우 초기 화염 발달을 지배하는 점화와 연소 성능이 엔진 성능에 미치는 영향이 증대한다.

초기 화염 성장 및 안정적인 연소를 위하여 여러 가지 연구 결과가 발표되었다. Arcoumanis 등⁽¹⁾은 정적연소기를 이용하여 유동 속도를 측정하고 이를 바탕으로 유동에 의한 초기 화염 성장을 가시화 하였다. Jie 등⁽²⁾은 예연소실을 갖는 점화플러그를 사용하여 이론 공연비에서 엔진 연소 성능에 미치는 영향을 실험하였으며, 예연소실을 갖는 점화플러그가 연소 속도를 증

*서울산업대학교 에너지환경대학원
E-mail : stkwon@snu.ac.kr

*서울산업대학교 에너지환경대학원

**서울산업대학교 기계공학과

가시키는 것을 보여주었다. Bianoco⁽³⁾ 등은 회박연소 엔진에서 초기 화염이 생성되기 위해서는 충분한 체적이 필요하며, 생성된 화염 핵이 급속히 전파해 나가기 위해서는 혼합기에 충분한 에너지가 공급되어야 한다고 했다. Kim⁽⁴⁾은 정적 연소실에서 메탄-수소 회박 혼합기에 반복 점화 장치를 사용하여, 반복 점화가 일반적인 점화와 비교하여 화염면적이 더 크게 나타나고, 연소속도가 증가되는 것을 보여주었다. 따라서 이 연구에서는 초기 화염 성장에 유리한 조건을 조성하기 위하여 부연소실 개념의 토치 점화 장치를 사용하여 초기 화염 성장 및 화염 전파 특성을 관찰하였다. 또한 토치 점화 장치의 직경이 초기 화염 성장 및 연소에 미치는 영향을 파악하였다. 화염 전파 특성 분석을 위하여 정적 연소기 내의 압력을 측정하였으며, 측정되어진 압력 데이터를 이용하여 질량연소를 등을 계산하였다. 또한 화염 가시화를 위하여 쉐리렌 광학 장치를 이용하여, 화염 가시화를 하였다.

2. 실험 장치 및 방법

본 연구에 사용되어진 실험 장치들의 개략도는 Fig. 1에 나타내었다. 예혼합기 장치에서 만들어진 혼합기는 정적연소실로 흡입되어 연소가 이루어진다. 압력센서를 이용하여 정적연소실 내부의 압력을 측정하였으며, 쉐리렌 장치와 고속카메라를 이용하여 연소 과정을 가시화 하였다.

2.1 정적 연소기

본 연구에 사용된 정적 연소실은 보어 152 mm, 스트로크(stroke)는 85.2 mm이며, 실린더의 체적은

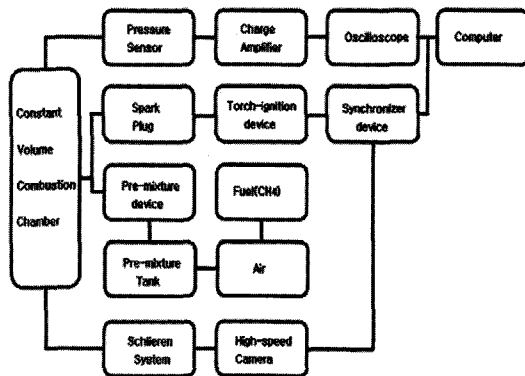


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

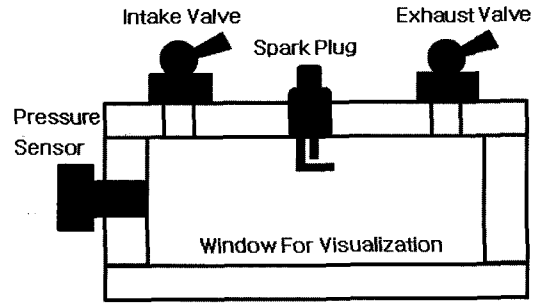


Fig. 2. The schematic diagram of constant volume combustion chamber.

181 cm²이다. 정적 연소실의 본체는 열과 부식에 강한 스테인리스 스틸(stainless-steel)로 제작하였다. 또한 화염 가시화를 위해 정적 연소실의 양 측면에는 두 개의 석영 창(Quartz)을 설치하였다. 화염 관측창은 초기 화염 생성 관측뿐만 아니라 연소실 벽면까지의 전체 화염 전파 과정을 관측하기 위하여 연소실 전체가 가시화되도록 설계하였다. 화염 가시화 창의 크기는 140 mm×100 mm이다. 또한 연소실과 가시화 창의 기밀을 유지하기 위하여 엔진용 가스켓 고무 실링제를 사용하였다. 정적 연소실의 윗면에는 1/4인치 직경의 흡입 밸브(Intake Valve) 및 배기 밸브(Exhaust Valve), 점화플러그(Spark Plug)를 설치하였다. 또한 연소실 옆면에 연소 압력 측정을 위한 연소 압력 센서(Pressure sensor)를 장착하였다. 본 연구에 사용된 정적 연소기의 개략도는 Fig. 2에 나타냈다.

2.2 예혼합장치

정적 연소실에서 연소 실험을 할 경우, 이론 공연비 또는 실험 엔진의 공연비를 정확히 재연하여 공급할 필요가 있다. 본 연구에서는 이를 위하여 수치환법을 이용한 예혼합 장치를 설계하고 제작하였다. 예혼합 장치의 개략도는 Fig. 3와 같다. 예혼합 장치는 수은 마노메타와 알코올 마노메타를 장착하여 연료압과 대기압을 측정하였다. 또한 공기내의 수증기만을 고려하기 위하여 물탱크(water tank)에는 파라핀유를 띄워 관내로 수증기가 유입되는 것을 차단하였다. 설계한 예혼합 장치에서는 다음과 같은 가정하에 혼합비를 계산한다. 우선 연료의 혼합비는 연료와 공기의 부피 비로 정의되며, 상태방정식이 성립되면 부피 비는 분압비와 같다. 그리고 상온 상압에서는 공기를 이상기체로 볼 수 있으므로, 부피비는 분압비와 같다. 원하는 혼합비

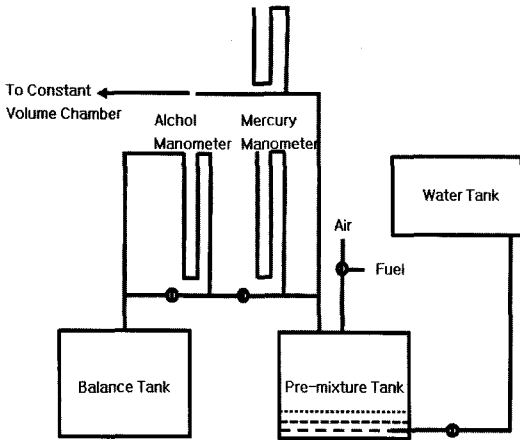


Fig. 3. The schematic diagram of pre-mixture device.

를 얻기 위해서 화학방정식을 통하여 이론 혼합비를 구하고, 이를 기준으로 하여 연료의 혼합 비율을 결정하였다. 화학 방정식을 통해 구한 비율은 몰 비이고, 기체의 경우 몰 비와 부피 비가 일치하므로, 위의 가정 및 원리에 따라 이를 분압 비로 정의하여 계산한다. 통상적으로 기체의 가연 혼합 범위는 매우 좁으므로 분압비를 구할 때는 밀도가 작은 매질을 이용하여, 오차를 감소시켜야 한다. 또한 정확한 예혼합기 제작을 위해서는 실험실의 대기 상태를 정확히 계산하여야 한다. 정확한 계산을 하기 위해서는 대기압 및 습도에 대한 정확한 결정이 필요하다. 습도를 계산하는 경우 수증기 분압은 건구 온도와 습구 온도 그리고 대기압을 이용하여 구하는데, 본 연구에서는 Keenan-Keyes의 증기압 표를 최소제곱법(Least Square)으로 구한 것을 사용하였다. 또한 연료는 메탄(CH_4)를 사용하였고, 혼합기는 이론 혼합비(stoichiometric)로 제작하여 사용하였다.

2.3 화염 가시화 장치

순간적인 밀도장의 구배는 슈리렌(Schlieren)장치를 이용하면 알 수 있다. 특히 연소 반응대 근처의 고온가스와 주위 공기와의 경계를 관찰하는데 유리하다. 슈리렌 기법중 shadowgraph 기법은 공기의 흐름에서 밀도의 변화는 충격파 근처에서 진한 선으로 상이 땃히게 된다. 본 실험에서는 정적 연소실 내에서 예혼합기를 연소하여 shadowgraph법에 의해 연소 과정 전체의 밀도 구배를 촬영하였다. 화염 가시화 장치의 개략도는 Fig. 4와 같이 Z-Type 2-mirror Schlieren system을 사용하였다. 광원은 100 W 할로젠 램프를 이용하였으

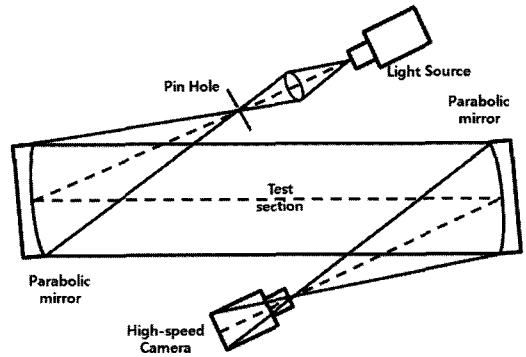


Fig. 4. The schematic diagram of Z-Type 2-mirror Schlieren system.

며, 광원에서 발생하는 백색광이 핀홀(pin hole)을 지나 집광된 후 첫 번째 포물면경(parabolic mirror, $\phi : 300 \text{ mm}$, $f = 3000 \text{ mm}$)에 의해 평행광을 형성하고, 형성된 평행광은 측정부(test section)인 정적 연소실을 통과하게 된다. 정적 연소실을 통과한 평행광은 두 번째 포물면경(parabolic mirror, $\phi : 300 \text{ mm}$, $f = 3000 \text{ mm}$)을 사용하여 집광시킨 후 고속카메라(SVSI)를 이용하여 1000 f.p.s로 촬영하였다. 고속카메라와 점화장치와의 신호동기화를 위하여 DG-535(pulse generator)를 사용하였다.

2.4 토치 제작

토치 점화를 위하여 Fig. 5와 같은 토치 점화 기구를 제작하였다. 토치 점화 기구는 스테인리스 스틸로 제작하였으며, 연소실 중심에 장착 가능하도록 제작하였다. 토치 점화 기구는 직경 12 mm이고 높이 10 mm

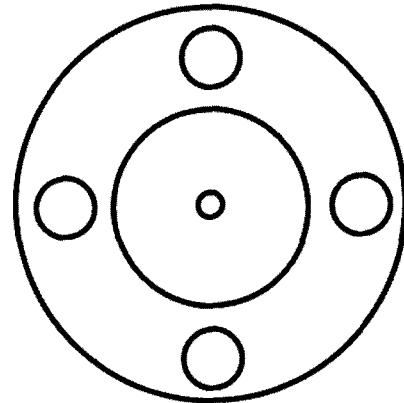


Fig. 5. The schematic diagram of torch-ignition device.

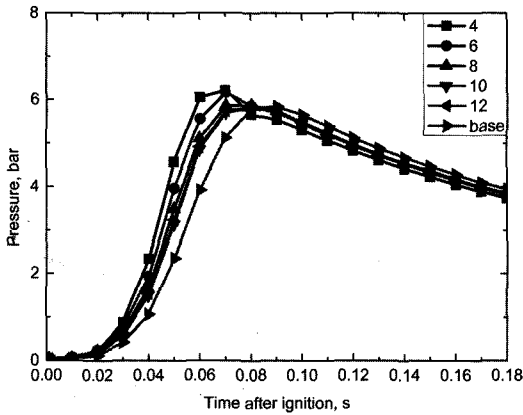


Fig. 6. Pressure rise after ignition for torch-ignition and conventional spark ignition.

로 제작되었으며, 노즐의 직경을 4, 6, 8, 10, 12로 2 mm씩 증가시켜 제작하였다.

3. 실험 결과

3.1 연소 압력 측정

Fig. 6는 토치 점화 기구를 장착하였을 경우 압력경과곡선을 나타냈다. 토치 점화 기구를 장착하지 않은 경우에는 최대 압력이 5.87bar이고, 최대압력도달 시간은 0.09s이다. 토치 점화 기구를 장착한 경우에는 토치 점화 기구를 장착하지 않은 경우와 비교해서, 모든 경우에 최대 압력과 최대압력도달 시간이 증가하였다. 특히 노즐 직경이 4 mm인 경우에는 최대 압력이 6.28bar로 가장 높았으며, 최대 압력 도달 시간은 0.068s로 가장 빨라졌다.

3.2 질량 연소율

Fig. 7은 점화 후 시간경과에 대한 질량연소율을 노즐 직경에 따라 나타낸 것이다. 질량연소율은 연소된 질량이 압력변화와 직접적인 관련이 있다는 가정하에 열역학의 제 1법칙으로부터 열발생율(rate of heat release)과 가스 상태 방정식을 이용하여 얻을 수 있다. 그림에서 보는 것과 같이 토치를 사용하여 연소를 한 경우는 토치를 사용하지 않은 경우와 비교해서 질량연소율의 기울기가 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 급격연소가 일어나고 있음을 보여준다. 질량연소율의 기울기는 노즐 직경이 4 mm, 6 mm, 8 mm, 12 mm, 10 mm 순으로 크며, 노즐의 직경이 증가하면서 질량연소율의

기울기도 감소하였다. 하지만 토치 점화 장치를 장착한 모든 경우에 토치 점화 장치를 장착하지 않은 경우보다 질량 연소율의 기울기가 증가하고 있음을 보여준다. 또한 각각의 화염 가시화 이미지를 통해 노즐의 직경에 따른 초기 화염 형상 및 화염전파과정을 가시화하였다. 가시화된 이미지에 의하면 토치 점화 기구를 장착하지 않은 경우에는 초기 화염 성장 및 전파 과정이 층류 화염이었으나, 토치 기구를 장착 한 후에는 초기 화염 성장 및 전파 과정이 난류화염에서 난류화염으로 천이되었다. 또한 초기 화염 전파 길이도 증가하는 것을 볼 수 있는데, 노즐 직경이 작을수록 노즐을 통해 분출되는 초기 화염의 길이가 길었다. 특히 노즐 직경이 4 mm인 경우에 화염 분출거리가 가장 길었다. 노즐 직경이 10 mm, 12 mm일 경우에는 초기 화염 전파는 난류 화염이었으나, 화염이 전파되면서 층류연소와 비슷한 화염 전파 이미지를 획득하였다. Fig. 8은 질량 연소율이 가장 큰 4 mm 토치 점화 장치를 사용한 경우와, 일반적인 스파크 플러그를 사용한 경우의 초기 화염 전파과정을 나타냈다. 토치 점화 장치를 사용한 경우가 일반적인 스파크 플러그 연소와 비교하여, 초기 화염이 난류 형상을 보였으며, 화염 면적이 넓은 것을 확인하였다.

3.3 연소 촉진율

Fig. 9는 토치 점화가 어느 정도 효율적인 에너지 변환이 이루어지는가를 비교하기 위하여 연소촉진율(CER ; combustion enhancement rate)를 나타낸 것이다. 일반적으로 정적연소실의 경우에는 연소 최고 압력값이 나타내는 시기와 연소 종료시기가 거의 일치함에 따라 연소 최고 압력값이 나타나는 시기가 빠를수록 연소촉진이 이루어진 것으로 판단된다. 따라서 토치 점화 기구를 장착하지 않은 경우의 최고 압력 도달 시기와 토치 점화 기구를 장착한 후의 최고 압력 도달 시기를 비교함으로써 어느 정도의 효율적인 에너지 변환이 이루어졌는지를 평가할 수 있다. 연소촉진율은 연소압력 상승률(ζ)과 연소시간 단축율(ξ)로 정의할 수 있으며, 본 연구에서는 식 (1)과 식 (2)으로 각각 정의하였다.

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

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

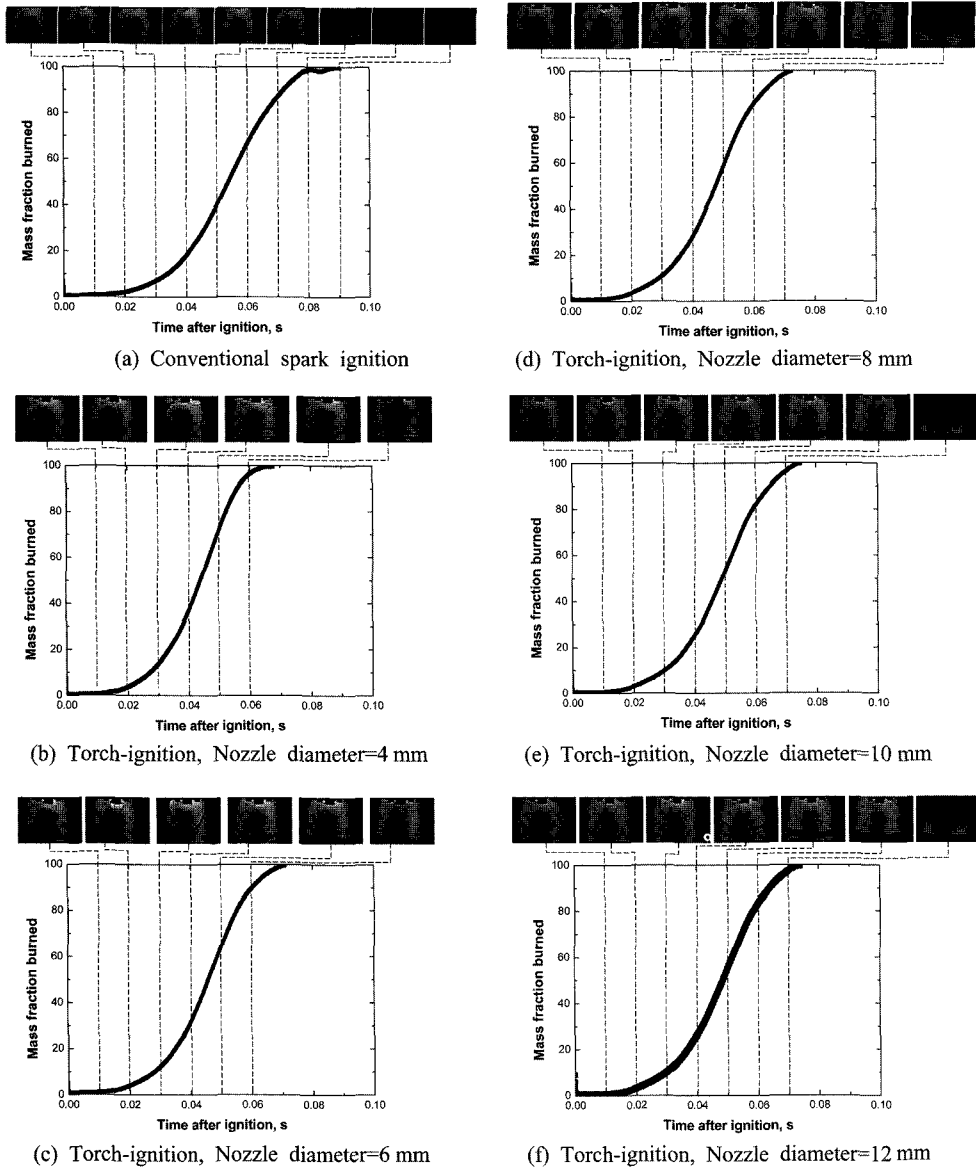


Fig. 7. Mass burned fraction as a function of nozzle diameter and flame propagation.

여기서 $P_{\max(t)}$, $t_{\max(t)}$ 는 토치 기구를 장착하였을 경우의 P_{\max} , t_{\max} 이고, $P_{\max(b)}$, $t_{\max(b)}$ 는 토치 기구를 장착하지 않은 경우의 P_{\max} , t_{\max} 이다.

그림에서 보는 바와 같이 토치 점화 기구를 장착한 경우 연소시간 단축율은 17%~26%로 나타남을 알 수 있으며, 노즐 직경이 4 mm일 경우 25.21%로 가장 큰 연소시간 단축율을 나타내고 있다. 또한 노즐 직경이 증가하면서 연소시간 단축율이 감소하는 경향을 보이지만, 토치 점화 기구를 장착하지 않은 경우와 비교해서

는 모두 연소속진율이 증가하였다. 연소압력 상승률은 노즐 직경이 4 mm일 경우 6.94%로 가장 높았으며, 노즐 직경이 증가할수록 작아졌다. 따라서 토치 점화 기구의 장착은 일반적인 스파크 점화 방식에 비하여 효율적인 에너지 변환이 이루어지고 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

토치 점화 기구를 설계하여 정적 연소실에서 메탄-

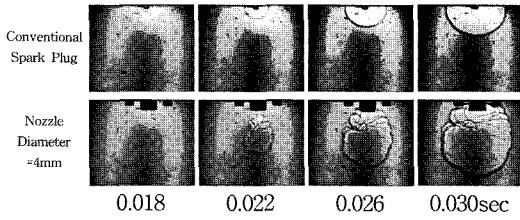


Fig. 8. Flame propagation as a time passage.

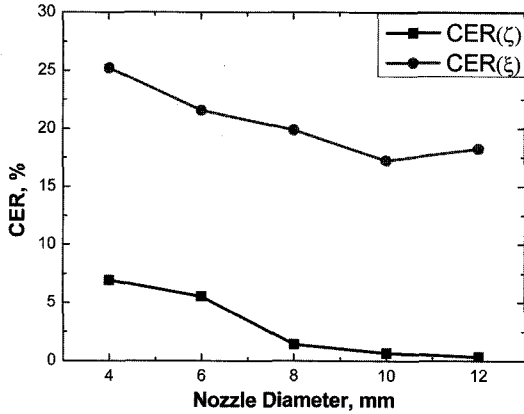


Fig. 9. Combustion enhancement rate(CER) as a function of nozzle diameter.

공기 혼합기를 $\phi = 1$ 에서 토치의 노즐 직경을 4 mm에서 12 mm까지 2 mm씩 증가시키면서 화염전파과정을 가시화하고, 토치 점화 기구에 대한 연소특성을 실험한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 토치 점화 기구를 장착하여 연소를 한 경우에는 토치 점화 기구를 장착하지 않은 경우와 비교해서 최대 압력이 증가하고, 최대 압력 도달 시간이 짧아졌다.
- 2) 토치 점화 기구를 장착하여 연소를 한 경우에 질량 연소율을 계산한 결과 질량 연소율의 기울기가 증가하였고, 급격 연소가 되고 있음을 알 수 있다.
- 3) 토치 점화 기구를 장착하여 연소를 한 경우에 웨도우 그래피법을 이용하여 화염 가시화를 실시해본 결과 초기 화염 전파가 노즐을 통해 급격히 분출되는 것

을 확인하였고, 층류 화염에서 난류화염으로 천이되는 것을 확인하였다.

- 4) 토치 점화 기구를 장착한 경우, 장착하지 않은 경우와 비교해서 연소 시간 단축율은 최대 25.21%, 연소 압력 상승률은 최대 6.94% 증가하였다. 이는 일반적인 스파크 점화에 비하여 에너지 변환이 효율적으로 이루어지고 있음을 알 수 있다.

참고문헌

- 1) Arcoumanis, C., and Bae, C., 1992, "Correlation between Spark Ignition Characteristics and Flame Development in a Constant-Volume Combustion Chamber", SAE paper, No.920413.
- 2) Jie, M. S., Kim, J. H., and Yoo, S. Y., 2007, "A Study on the Combustion Characteristics of Spark Plug with Pre-ignition Chamber", Transof KSME(B), Vol. 31, No. 8, pp.718-723.
- 3) Bianco, Y., Cheng, W. K., and Heywood, J. B., 1991, "The Effects of Initial Flame Kernel Conditions on Flame Development in SI Engine", SAE paper, No.912402.
- 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) Park, J. S., 2003, "Combustion Characteristics of Plasma Jet Ignition on LPG-Air Mixture in Laminar Flow Field", SAE paper, No.99370008.
- 6) 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.
- 7) Ferguson, C., 1986, Internal Combustion Engines, John Willy & Sons, New York, pp.103-148.
- 8) Ohm, I. Y., 2006, Internal Combustion Engine, A-jin, Seoul, pp.50-57.