

<학술논문>

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-B.2015.39.2.125>

ISSN 1226-4881(Print)
2288-5324(Online)

대형기관 모사 정적연소실에서 매립지 가스의 연소특성에 대한 연구 (III) - 토치 점화 (1) -

김인옥* · 엄인용**† · 권순태*

* 서울과학기술대학교 에너지환경전문대학원, ** 서울과학기술대학교 기계·자동차공학과

Combustion Characteristics of Landfill Gas in Constant Volume Combustion Chamber for Large Displacement Volume Engine (III) - Torch Ignition (1) -

Inok Kim*, Inyong Ohm**† and Soon Tae Kwon*

* Graduate school of Energy & Environment, Seoul Nat'l Univ. of Science and Technology,

** Department of Mechanical and automotive Engineering, Seoul Nat'l Univ. of Science and Technology

(Received May 8, 2014 ; Revised November 12, 2014 ; Accepted November 14, 2014)

Key Words: Landfill Gas(매립지 가스), Constant Volume Combustion Chamber(정적연소실), Torch Ignition (토치 점화), Heat Release Rate(열발생률), Burn Duration(연소기간), Methane(메탄), 당량비 (Equivalence Ratio)

초록: 본 논문은 대형 상용기관을 모사한 정적연소실에서 매립지 가스의 연소 특성에 대한 복수의 논문 중 세 번째로, 정적 연소실에서 토치를 적용하여 그 효과를 분석하였다. 실험 결과 토치의 체적에 관계 없이 연소를 개선시키는 최적의 오리피스 면적 비율이 존재하며 오리피스가 매우 작은 경우 압력 상승 비율은 직경 변화에 무관하게 일정 수준을 유지하거나 소폭 감소한다. 아울러 토치의 효과는 일차적으로 연소 시간단축에 영향을 주고 시간단축에 따른 전열량의 감소가 이후 압력상승에 기여한다. 마지막으로 메탄 분율이 적어 연소 조건이 나쁠수록 토치는 주로 주 연소 기간을 단축시키고, 반면 연소 조건이 좋은 경우 주로 초기 연소를 단축시키는 효과가 있다.

Abstract: This is the third paper on the combustion characteristics of the landfill gas in a constant volume combustion chamber for a large displacement volume commercial engine. It is the first in this series to discuss the effects of the torch device on combustion. The results show that an optimum orifice ratio exists regardless of the torch volume, and a few adverse effects on the combustion are observed for an excessively small orifice ratio. In addition, the torch ignition decreases the initial burn duration, and the decrease in the heat transfer caused by this decreased duration contributes to an increase in the peak combustion pressure. Finally, the torch mostly plays a positive role in shortening the main burn duration when the combustion condition is worsened by a lower methane fraction. Yet, the torch decreases the initial burn duration rather than the main burn as the methane fraction increases.

1. 서 론

매립지 가스(landfill gas, LFG)는 유기성 폐기물의 혐기성 발효로 폐기물 매립지에서 생성되며, 메탄(CH₄)이 주성분이지만 성분 중 메탄과 불활성 기체인 CO₂ 성분을 다량 함유하고 있어 연소 안정성 및

초기 연소에 상당히 불리하다. 최근에는 매립지 가스를 실용 에너지원으로서 사용하고자 하는 노력이 다양하게 시도되고 있지만 매립지 가스는 대부분 대형 기관에 사용되므로 기관 내에 공급된 혼합기의 절대량이 크게 증가하여 연소속도가 낮아지므로, 한정된 사이클 기간 동안에 만족할 수준의 연소율을 달성하는 것이 해결해야 할 문제 중 하나이다.

본 연구에 앞서 Kim 등^(1,2)은 소형 정적연소실

† Corresponding Author. iyohm@seoultech.ac.kr

© 2015 The Korean Society of Mechanical Engineers

(CVCC, constant volume combustion chamber)에서 메탄-수소-공기 혼합기의 연소 특성을, Jeon 등⁽³⁻⁵⁾은 2.4L 스파크 점화기관을 모사한 정적연소실에서 초기압력 및 당량비 변화에 따른 메탄-공기 혼합기의 연소특성과 배기특성을 조사하였다. Lee 등^(5,6)은 매립지 가스의 기본적인 연소특성을 조사하고 매립지 가스의 연소속도에 대한 식을 제안하였다. 초기 연소 성능을 개선하기 위하여 Kwon 등^(7,8)은 정적연소실에서 토치 점화 장치 체적과 오리피스 직경을 변화시키며 메탄을 연소한 결과 최적의 체적과 직경이 존재함을 확인하였다.

그러나 메탄/LFG는 주로 대형기관에 적용하는데, 지금까지는 소형기관을 대상으로 한 모사,⁽¹⁻³⁾ 다른 연료와의 혼합^(1,2) 그리고 기초연구^(4,5)가 대부분이고, 대형 기관을 모사한 경우는 거의 없다. 또한 내연기관을 모사한 경우에도 점화위치가 연소실의 중앙에 위치하여 기관 내 연소의 모사라기보다는 정적연소실에서 기초 연소특성을 연구한 것에 가깝다.⁽¹⁻⁶⁾ 더구나 매립지 가스를 정적연소실에 적용한 예는 전무하다.

실물기관과 동일한 점화위치의 대형 정적연소실에서, 메탄/LFG 조성 및 당량비에 따른 연소특성을 여러 측면에서 분석한 이전 연구^(9,10)에서는, 연료조성 변화에 따른 생성물의 조성 변화가 비열 변화를 초래하고 이 비열이 최종압력을 지배하는 가장 중요한 변수라는 결론을 얻었고, 특히 실제 연소에서 점화위치와 관련된 화염전과 과정 및 전열 면적의 변화

과정 그리고 대형 연소실에 의한 연소기간 연장의 효과가 상호 복잡하게 작용하면서 매우 특이한 형태의 열 발생 곡선이 생성된다는 것을 관찰하였다.

본 연구에서는 메탄/LFG가 대형기관에서 연소될 때 생기는 문제 즉 메탄 분율 감소와 당량비 감소에 따른 초기연소 지연 및 연소기간 연장에 대한 해결책으로 토치 점화를 시도하여 그 효과를 분석하여, 토치 설계에 대한 기본적 데이터를 제공하고자 한다.

2. 실험장치

본 연구의 실험 장치는 정적연소실, 예혼합 장치 그리고 화염 가시화 부분으로 구성되어 있으며 그 개략도를 Fig. 1에 나타냈다. .

Table 1에 제시된 본 연구의 정적연소실은 메탄 전용의 보어 152mm, 스트로크 165mm인 기관을 모사한 것으로, 실제 스파크 점화기관에서의 연소 완료시기를 고려하여 스트로크를 ATDC 90 CA에서의 피스톤 위치인 85.2 mm로 제작하였다. 따라서 실물 기관($S/B=1.09$)과 달리 모사 연소실은 $S/B=0.56$ 인 단행정이다. 화염전과과정을 가시화하기 위하여 정적연소실의 양 측면에 두 개의 석영 창(quartz)을 설치하였다. 정적연소실의 윗면에는 실물기관과 동일 위치에 토치점화 기구를 장착하였고, 연소실의 측면에는 연소실 내의 압력 변동을 측정하기 위하여 피에조 타입의 연소압력센서(Kistler, 6117BFD17)를 장착하였다.

예혼합기는 수치환법으로 제작하였고, 메탄과 이산화탄소를 혼합한 LFG 모사연료의 조성과 당량비를 Table 2에 나타내었다. 실험 시 당량비는 모두 $\phi=1$ 로 하였다 표에서 ϕ' 은 이전 논문에서와 같이 CO_2 까지 고려된 수정 당량비로 $CH_4/(Air+CO_2)$ 이다.

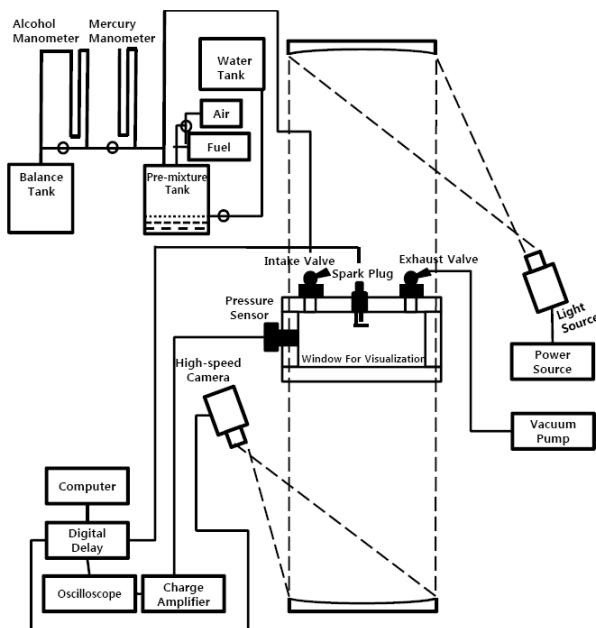


Fig. 1 Schematics of experimental apparatus

Table 1 Specification of CVCC

Bore	152mm
Stroke	85.2mm
Swept volume	720cc
Visualization window	140mm x 85mm

Table 2 Equivalent and corrected equivalent ratios according to fuel composition

Fuel (x_{CH_4})	CH_4 (1.0)	LFG1 (0.9)	LFG2 (0.8)
ϕ	1.000	1.000	1.000
ϕ'	1.000	0.988	0.974

Table 3 Specification of torch-ignition device

Orifice Size(mm)	2-22mm(2mm increment)
V(cc)	1.13, 2.01, 3.80
D(mm)	12, 16, 22
h(mm)	10

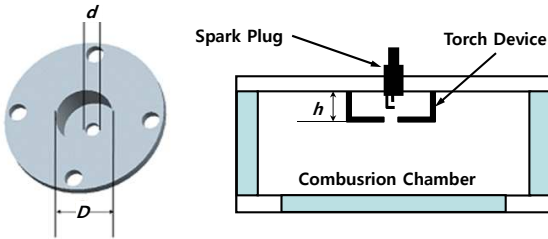


Fig. 2 Schematics of torch-ignition device

본 연구에서 사용한 토치 점화 장치의 형상과 장착 위치는 Fig. 2와 같으며, 입구 직경을 D , 출구 직경을 d 라고 정의하였다. 토치 점화 장치의 입구 직경(D) 12, 16, 22 mm에 대해 동일한 높이 10mm로 제작하였으며, 토치 점화 장치의 오리피스 직경을 2mm부터 22mm까지 2mm씩 증가시켰다. Table 3에 토치 점화 장치의 제원을 나타내었다. 모든 실험은 각 조건에서 10회 반복하여 그 평균값을 사용하였다.

3. 연소압력 특성

Fig. 3은 $x_{CH_4}=1.0, 0.9, 0.8$ 에 대해 토치 점화장치를 적용하였을 때, 여러 정의에 의한 오리피스 크기 즉 절대값 d , 직경 비, d/D , 면적 비 d^2/D^2 에 대해 최고압력상승비율을 나타낸 것이다. 최고압력상승비율은 동일한 메탄 분율에서 토치점화를 하지 않았을 때 도달한 최고압력에 대한 상대적인 상승 비율이다.

$x_{CH_4}=0.7$ 에서는 유의미한 연소과정을 관찰할 수 없었는데, 이는 이전 연구^(10,11)에서 논의하였듯이 $x_{CH_4}=0.7$ 에서는 연소가 현저히 지연되는데, 이에 따라 냉각이 증가하여 화염 생성이 억제된 것으로 판단된다. 즉 토치 자체가 차가운 벽면으로 작용하여 연소에 의한 열발생이 토치를 통한 열전달 및 고온의 가스가 오리피스를 통과할 때 발생하는 냉각 효과를 극복하지 못하였기 때문이다. 또한 $d=2mm$ 인 오리피스에서도 화염 관찰이 불가능하였는데, 이 역시 고온의 가스가 오리피스를 통과할 때 발생하는 냉각 효과를 극복하지 못하였기 때문에 발생한 것으로 판단된다.

메탄 분율과 오리피스에 따른 압력상승비율에서

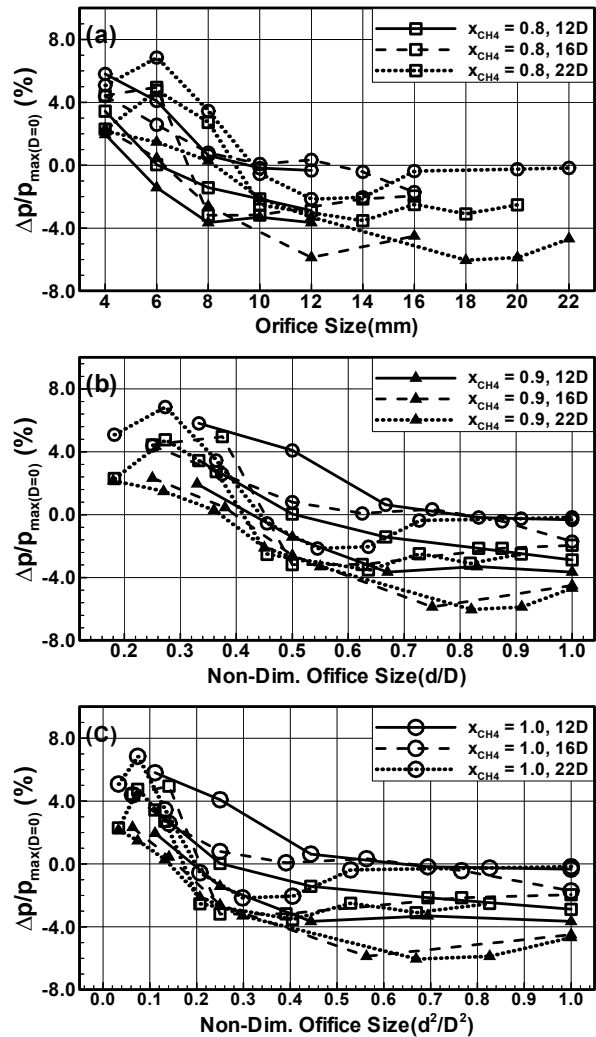


Fig. 3 Pressure increment rate as a function of diameter(a), ratio of diameter(b) and ratio of area(c) according to fuel composition

다음과 같은 몇 가지 현상이 관찰된다.

우선, 최고압력상승비율과 오리피스 크기의 관계를 관찰해보면 오리피스 직경의 절대 값보다 직경 비(d/D) 또는 면적비(d^2/D^2)와의 상호 연관성이 더 크게 나타나며, 직경비보다 면적비로 나타낸 경우 전체적인 경향이 보다 뚜렷이 나타난다. 따라서 면적비로 볼 때 토치의 체적에 관계없이 대체로 $d^2/D^2 < 0.15$ 에서 연소 압력에 긍정적인 영향을 주고 있으며, 이보다 큰 경우 최고압력은 오히려 감소한다. 예외적으로 $x_{CH_4}=1.0, D=12$ 인 경우에만 $d^2/D^2 = 0.25$ 에서도 확장되어 있다.

다음으로 $d^2/D^2 < 0.07$ 로 오리피스가 작은 경우 압력상승 비율은 직경 변화에 무관하게 일정 수준을 유지하거나 소폭 감소한다. 따라서 최적의 오리피스 크기는 $d^2/D^2=0.1$ 근방이다.

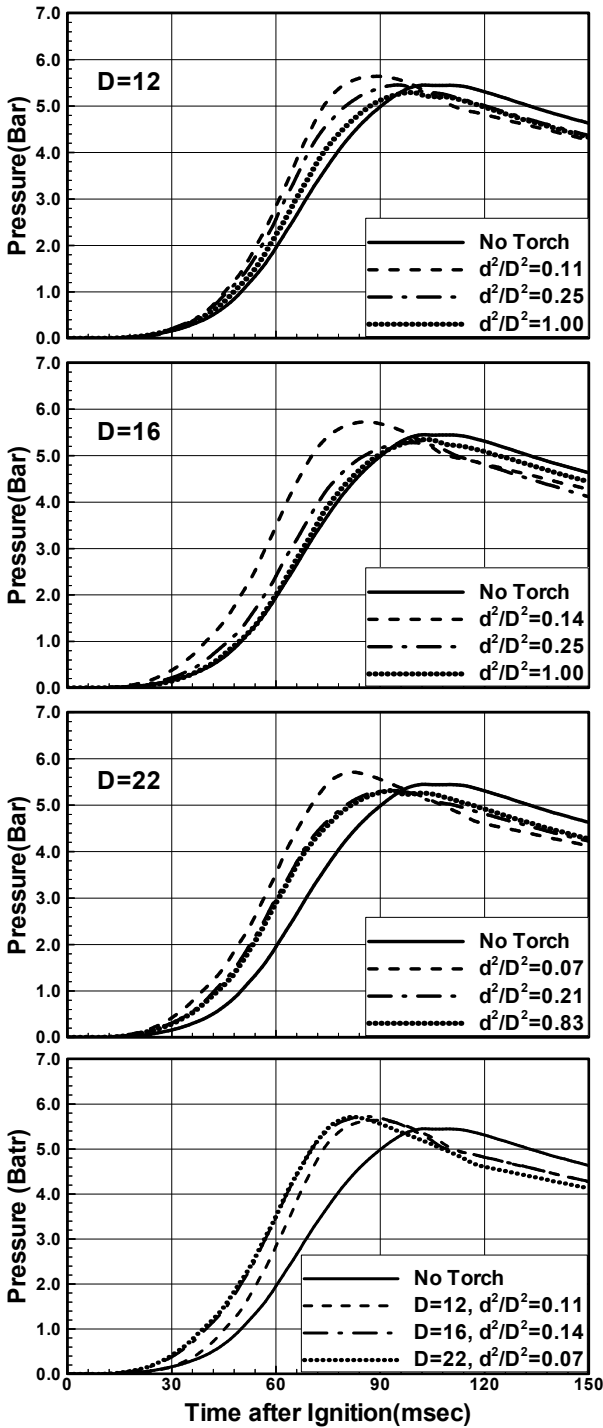


Fig. 4 Pressure after ignition according to orifice and torch size when $x_{CH_4}=0.8$

마지막으로 $x_{CH_4}=0.9$ 는 다른 경우에 비해 가장 압력상승 비율이 낮지만, 오리피스가 작아져도 압력상승은 지속적으로 증가한다.

$d^2/D^2 < 0.15$ 에서 연소 압력에 긍정적인 영향을 주는 것은 d^2/D^2 가 증가할수록 분출 속도가 저하되어 고온가스 분출에 의한 화염 면 확장 또는 진

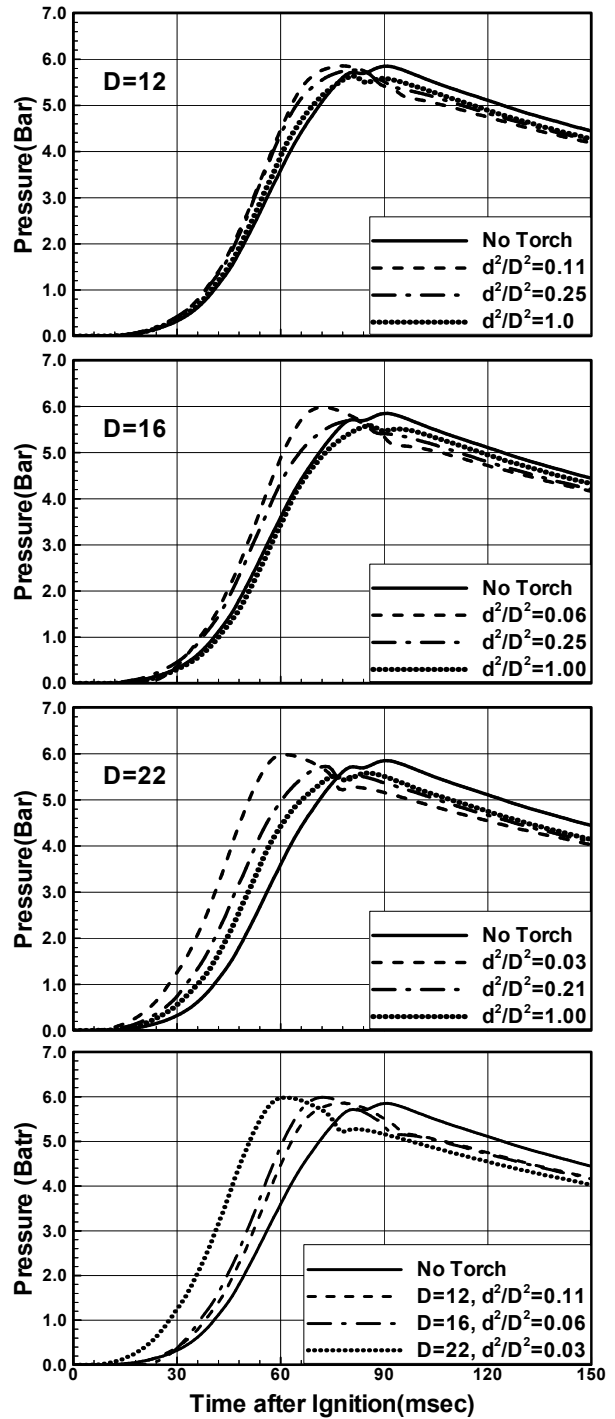


Fig. 5 Pressure after ignition according to orifice and torch size when $x_{CH_4}=0.9$

행의 가속효과가 감소하고, d^2/D^2 가 0.15를 넘어서면 이러한 분출효과보다 토치에 의한 냉각 효과가 더 크게 작용한 결과로 사료된다. 이 부분과 $x_{CH_4}=0.9$ 에서의 예외적 경향은 가시화 결과를 참조하여 후속 논문에서 자세히 논의하겠다.

토치를 적용한 경우 토치의 체적과 오리피스에

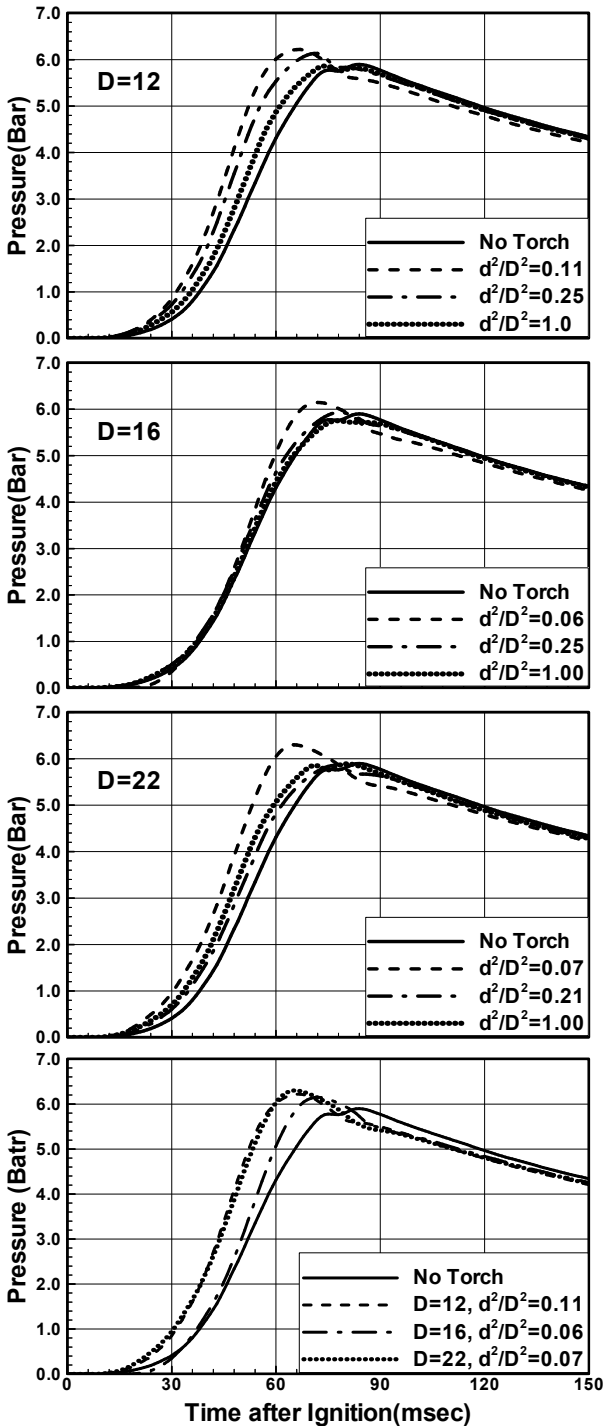


Fig. 6 Pressure after ignition according to orifice and torch size when $x_{CH_4}=1.0$

따른 압력의 변화를 Fig. 4 ~ Fig. 6에 제시하였다. 이들 개별적인 압력 형상과 압력상승 비율을 나타낸 Fig. 3을 동시에 참고하면 다음과 같은 현상들이 관찰된다.

먼저 $x_{CH_4}=0.8$ (Fig. 4)인 경우 $d^2/D^2 < 0.15$ 에서 3-5% 정도의 압력증가의 효과가 나타나고 이보다 큰 경우

오히려 압력은 감소한다. 토치 체적에 따라 압력상승의 효과는 약간 증가하지만 차이는 크지 않다.

$x_{CH_4}=0.9$ 인 Fig. 5를 보면 $x_{CH_4}=0.8$ 인 경우와 공통점 및 몇 가지 차이점이 관찰된다. 먼저 압력상승의 효과는 $d^2/D^2 < 0.15$ 에서만 발생하는 것은 $x_{CH_4}=0.8$ 과 같지만, 전체적으로 압력상승의 효과가 적게 나타남을 알 수 있다. 이에 반해 최고 압력까지의 도달 시간은 토치의 체적과 오리피스 크기에 관계없이 모두 단축되었는데, 특히 토치의 체적이 클수록 이 효과가 두드러졌다. 시간 단축 효과에 비해 압력 상승효과가 적은 이유는, 최적 토치 조건에서는 30% 질량 연소 부근에서 화염 면이 연소실 벽면 전체에 도달하여 벽면으로의 전열량이 증가하였기 때문인데, 이는 다른 메탄 분율에 비해 매우 빠른 접촉으로, 이는 후속 논문에서 가시화 결과를 참조하며 자세히 논의 하겠다.

$x_{CH_4}=1.0$ (Fig. 6)에서 압력 변화 역시 이전의 경우와 공통점 및 차이점이 동시에 관찰된다. 우선 압력의 상승 비율은 다른 경우에 비해 가장 높게 나타나지만 최고 압력 도달 시간의 단축은 다른 경우에 비해 대체로 낮게 나타난다. 시간 단축 효과가 적은 이유는 메탄 분율, 오리피스 크기와 토치 체적이 복합적으로 작용한 결과로, 역시 가시화 결과를 다른 후속 논문에서 자세히 다루겠고, 요약하면 다음과 같다. $D=12$ 에서는 분출량과 분출 속도의 문제로 구형의 층류 화염 그리고 $D=22$ 에서는 오리피스 크기 문제로 원통형의 층류 화염이 발생하므로 $x_{CH_4}=0.9$ 에서와 같이 난류에 의한 연소속도 개선의 효과가 거의 없다. 이와 달리 $D=16$ 에서는 난류 화염이 생성되지만 $x_{CH_4}=1.0$, $d=4$ 그리고 $14 \leq D \leq 18$ 이면 오리피스에 근접한 부근에서 분출의 측면에서부터 화염이 생성되어 분출에 의한 화염 면 가속 효과가 감소하기 때문이다.

또한 토치 체적 별로 압력 상승효과가 다르게 나타나 $D=12$ 과 22에서는 상승효과가 크고 둘의 차이는 매우 적지만 $D=16$ 에서는 상승효과가 적게 나타난다. 이 이유는 $x_{CH_4}=1.0$ 에서는 약 50% 연소를 전후하여 화염이 연소실 벽면 전체에 도달하므로 $x_{CH_4}=0.9$ 보다 전열에 의한 손실이 줄어 상승효과가 크지만, $D=16$ 일 때는 앞서 언급한 바와 같이 분출에 의한 화염 면 가속 효과가 감소하여 전체적으로 연소가 지연되고 이에 따른 전열량의 증가가 압력 상승을 억제한 것으로 판단된다.

마지막으로 $D=16, 22$ 에서는 다른 경우와 마찬가지로 $d^2/D^2 < 0.15$ 에서만 압력상승의 효과가 나타나지만 $D=12$ 에서는 $d^2/D^2=0.25$ 까지 확대되어 있다. 이것은 주 연소실에서 화염이 벽면에 늦게 도달하기 때문인데, 가시화 결과를 참조하면 $D=12$ 에서 주 연소실의 화염은 $d=4$ 일 때는 구형에서 $d=6$ 에서 역 원뿔형 그리고 $d=8$ 이상에서는 반구형의 형태를 지닌다. 이러한 형태상의 차이로 $d=6$ 에서는 다른 경우보다 늦게 약 70% 연소가 진행된 50msec 전후하여 연소실 벽면 전체에 화염이 도달하게 되는데, 이에 따라 전열량이 감소하여 예외적으로 개선효과가 나타난 것으로 판단된다.

4. 연소시간 특성

이전 연구에서도 언급했듯이, 연소실이 큰 경우

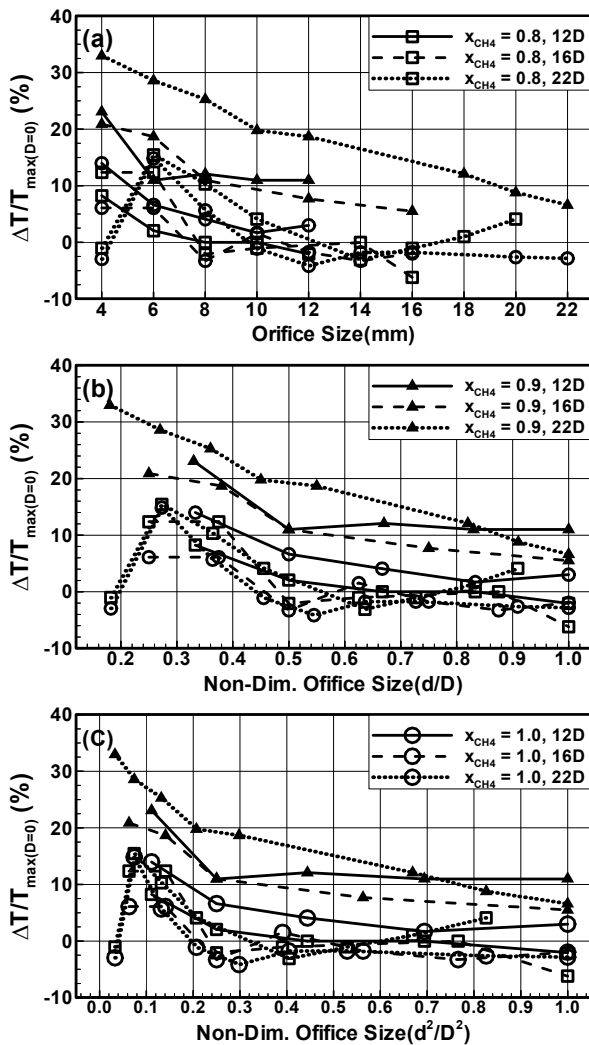


Fig. 7 Time reduction rate as a function of diameter(a), ratio of diameter(b) and ratio of area(c) according to fuel composition

연소에 필요한 시간은 증가하고 이에 따라 연소실 벽면을 통한 열전달이 압력에 무시할 수 없는 영향을 준다. 따라서 토치의 적용에 의한 연소 시간의 변화도 매우 중요한 정보를 제공해 줄 수 있다.

Fig. 7은 토치 점화장치를 적용하였을 때, 여러 정의에 의한 오리피스 크기에 대해 최고압력 도달 시간의 단축비율을 나타낸 것이다.

시간단축 비율도 역시 압력상승 비율과 마찬가지로 면적비로 나타내는 것이 경향의 파악에 유리하다. 압력상승 비율과 시간단축 비율은 대체로 경향에서는 일치하지만 상당한 차이점이 관찰된다. 우선 전체적으로 압력상승의 효과보다는 시간단축의 효과가 크게 나타나는데, 이는 메탄 연료의 경우 정적 연소압력의 이론적 최고값이 8bar이므로 벽면 열전달 등을 고려할 때 압력의 상승에는 한

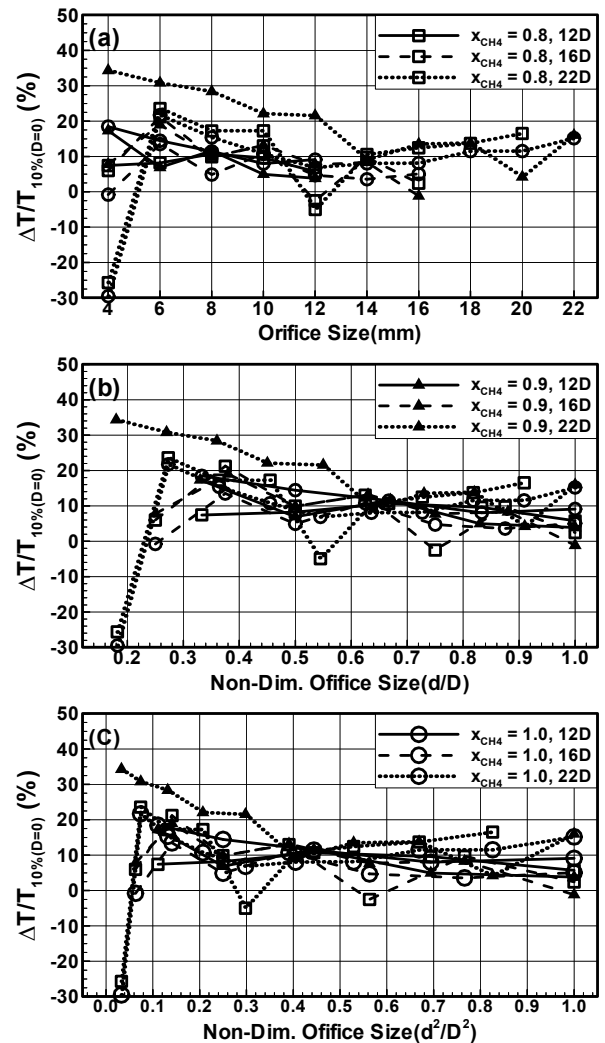


Fig. 8 10% burn time reduction rate as a function of diameter(a), ratio of diameter(b) and ratio of area(c) according to fuel composition

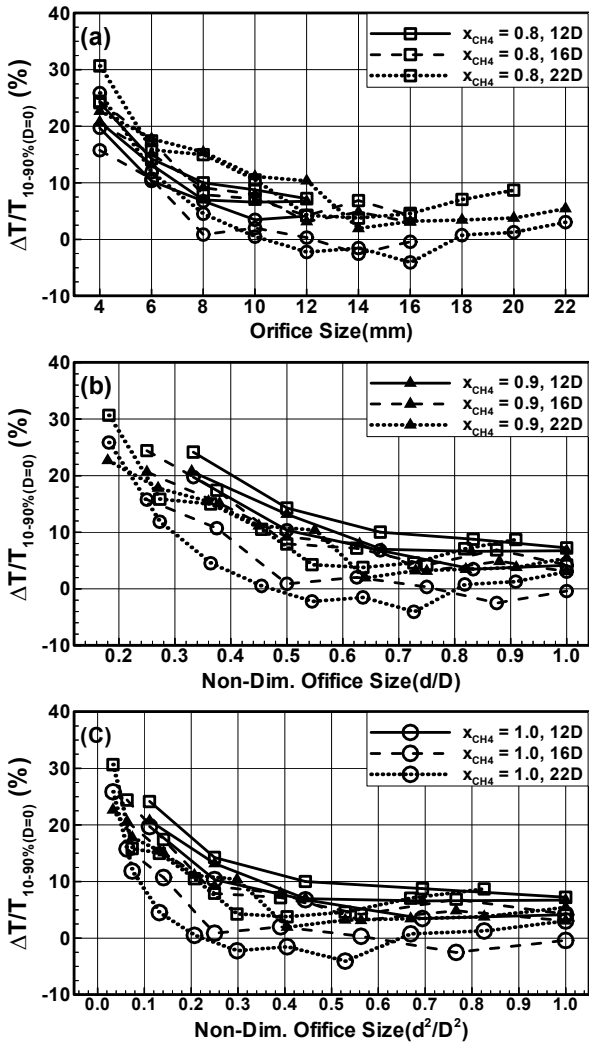


Fig. 9 10-90% burn time reduction rate as a function of diameter(a), ratio of diameter(b) and ratio of area(c) according to fuel composition

계가 있고, 연소 기간의 경우 유동 속도와 연소 속도는 거의 비례적 관계에 있기 때문에 토치에서의 분출로 화염 면이 가속되면서 연소 기간이 대폭적으로 감소하는 것이 가능하기 때문이다.

압력상승의 효과도 기본적으로 연소 기간 단축에 의한 벽면 열전달 감소가 주원인으로 판단된다. 또한 압력상승 비율과 마찬가지로 $d^2/D^2=0.1$ 근방에서 효과가 가장 큼을 알 수 있다.

마지막으로 d^2/D^2 이 매우 작은 경우, 압력은 상승률만 저하될 뿐 압력상승효과가 존재하는 반면 시간단축 효과는 거의 나타나지 않았다. 그러나 $x_{CH_4}=0.9$ 인 경우 오리피스 크기가 작을수록 단축 효과가 증가하는데, 이는 압력상승 비율에서 관찰한 것과 일치한다.

이러한 시간단축 비율을 보다 세밀히 분석하기

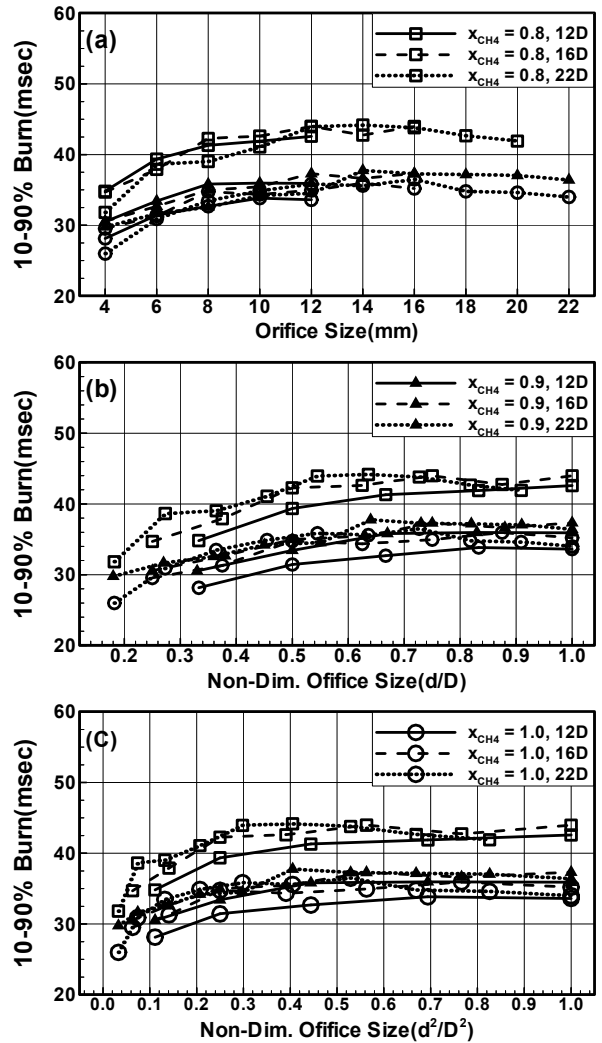


Fig. 10 10-90% burn duration as a function of diameter(a), ratio of diameter(b) and ratio of area(c) according to fuel composition

위해 10% 연소 기간 및 10-90% 연소 기간을 토치 체적과 오리피스 크기에 따라 계산하였고 이를 Fig. 8과 Fig. 9에 제시하였다.

Fig. 8과 Fig. 9를 비교하여 보면 d^2/D^2 이 매우 작을 때 시간단축효과가 발생하지 않는 이유는 전적으로 초기 연소의 지연에 따른 것임을 알 수 있다. 즉 $d^2/D^2=0.1$ 전후에서 $x_{CH_4}=0.9$ 인 경우만 제외하고 10% 연소기간이 대폭 증가하고 있는 반면, 주 연소 기간인 10-90%는 Fig. 9에서 볼 수 있듯이 $d^2/D^2<0.3$ 에서 오리피스의 감소에 따라 연소기간이 감소하고 있다. 이 현상은 후속 논문에서 가시화 결과를 참조하며 자세히 논의하겠다.

10-90% 주 연소 기간에서 상당히 특징적인 현상이 발견되는데, 지금까지 관찰하였던 여러 파라미터 즉 압력상승률, 시간 단축율 및 10% 연소 기간 등

은 모두 면적비 d^2/D^2 과 상호 연관성이 크게 나타난 반면, 10-90% 연소기간은 Fig. 10에서 볼 수 있듯이 오리피스 크기의 절대 값과의 연관성이 가장 크게 나타나고 있다. 즉 토치의 체적과 관계없이 오리피스 직경에 따라 매우 일정한 변화를 보여주고 있다. 오리피스 직경에 따른 변화는 후속 논문에서 가시화 결과를 참조하며 자세히 논의하겠다.

마지막으로 $x_{CH_4}=0.8$ 의 경우만 주 연소 기간이 증가하고 $x_{CH_4}=1.0$ 과 0.9는 큰 차이가 없음을 알 수 있는데, 이는 이전연구⁽¹⁰⁾에서 토치를 적용하지 않은 경우 $x_{CH_4}=1.0$ 과 0.9의 연소기간이 측정 값과 계산 값에서 모두 차이가 없다는 것과 일치한다. 즉 기본적으로 연소 속도에 큰 차이가 없으므로 동일한 오리피스 크기에 대해서는 동일한 효과가 나타난다고 볼 수 있다.

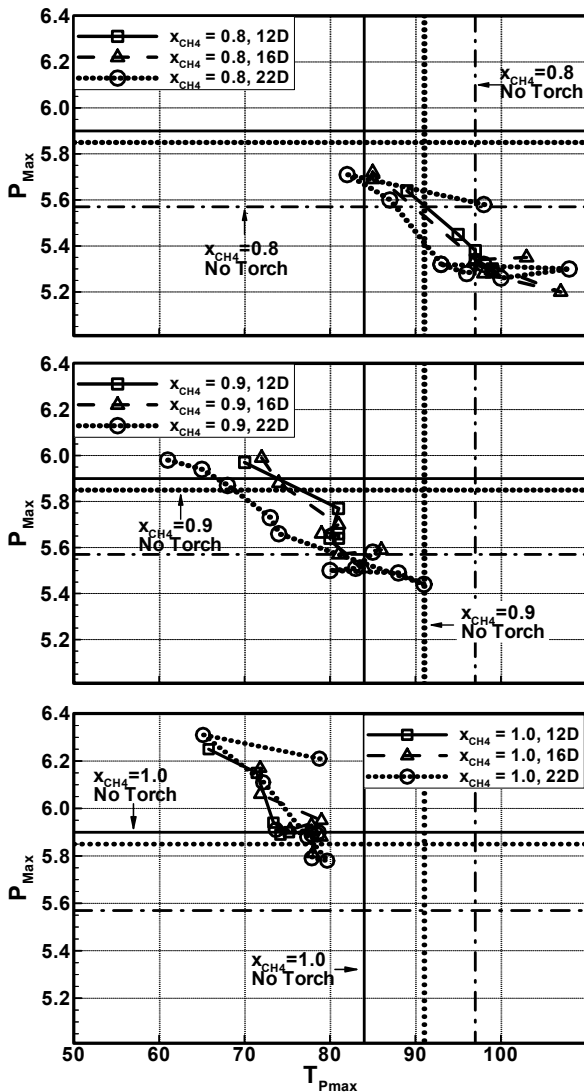


Fig. 11 Peak pressure and time to peak pressure diagram

Fig. 11 ~ Fig. 13은 토치에 의한 연소 개선 효과를 동시에 파악하기 위해 여러 연소기간과 최고 압력과의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 실선은 $x_{CH_4}=1.0$, 점선은 $x_{CH_4}=0.9$ 그리고 일점쇄선은 $x_{CH_4}=0.8$ 일 때 토치를 적용하지 않은 경우 압력과 시간을 나타낸 것이다.

전체적으로 오리피스의 크기가 매우 작은 경우를 제외하면 압력과 시간 사이에는 일정한 관계가 있는데, 연소 기간이 단축될수록 최고 압력은 증가하는 경향이 있다. 연소실 내 충전된 혼합기의 발열량은 동일 x_{CH_4} 에서 동일하므로 시간단축에 의한 전열량의 감소가 압력상승에 영향을 준 것으로 판단된다. 아울러 압력의 변화 폭은 x_{CH_4} 에 관계없이 거의 일정한 반면, 시간의 변화는 x_{CH_4} 에 따라 상당히 차이가 난다.

우선 최고압력과 최고압력까지의 도달 시간을 나타낸 Fig. 11에서 압력과 시간사이의 기울기가 $x_{CH_4}=0.9, 0.8$ 의 두 경우는 상당히 유사하지만, 연소조건 즉 메탄 분율에 따라 전체적인 분포가 이동한 형태이다. 반면 $x_{CH_4}=1.0$ 에서는 압력상승과 시간단축 효과가 동시에 크게 나타나 있다.

전체적으로 시간 분포는 $x_{CH_4}=0.9$ 인 경우 가장 넓고 $x_{CH_4}=1.0$ 인 경우 분포가 가장 집중되어 있다. 이를 연료 조성에 따라 개별적으로 관찰하면 다음과 같다.

$x_{CH_4}=0.8$ 인 경우 오리피스 크기가 작은 경우에만 토치 연소의 효과가 압력 및 시간에 모두 긍정적인 영향을 주고 있으며, 연소 개선 효과는 주로 압력상승보다 시간단축으로 나타나고 있다. 그리고 오리피스가 큰 경우에는 오히려 시간이 지연된다. $x_{CH_4}=0.9$ 에서는 $x_{CH_4}=0.8$ 에 비해 압력상승효과가 발생하는 오리피스 크기와 상승효과는 비슷하지만, 시간단축 효과는 더 크게 나타나서, 모든 오리피스 크기에 대해 시간단축 효과가 있음을 알 수 있다. 그리고 오리피스가 매우 작은 경우 압력 수준은 $x_{CH_4}=1.0$ 에서 토치를 적용하지 않은 수준 이상으로 상승함을 알 수 있다.

$x_{CH_4}=1.0$ 인 경우는 이전의 경우와 상당히 다른 특성을 보여주고 있는데, 우선 $x_{CH_4}=0.9, 0.8$ 과 달리 오리피스의 크기가 크지 않으면 대체로 압력상승효과가 나타나고 있고, 상승효과도 다른 경우에 비교하여 매우 크게 나타나고 있다. 아울러 모든

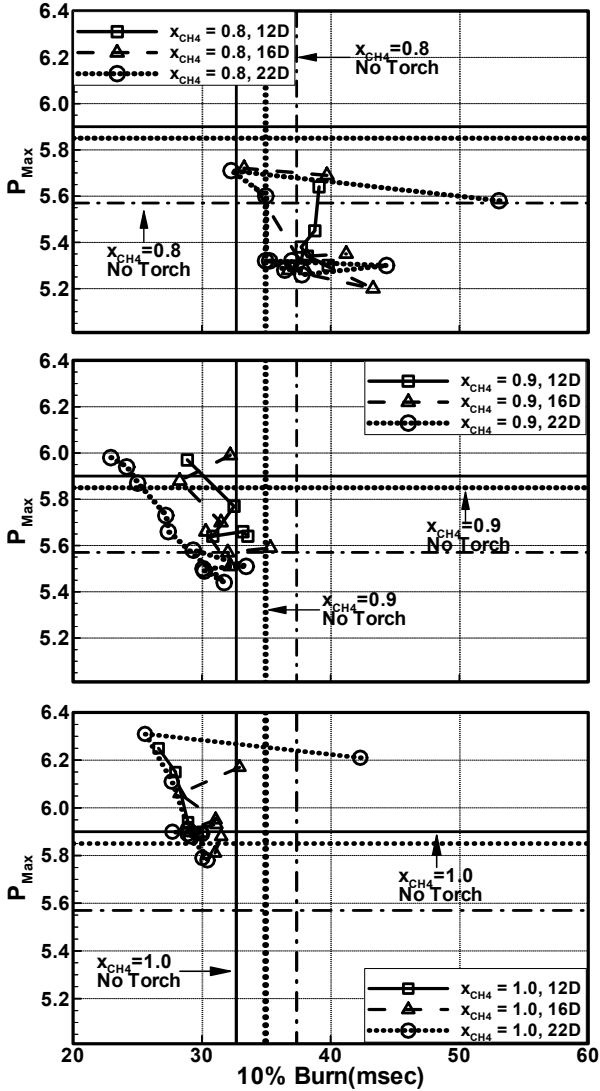


Fig. 12 Peak pressure and 10% burn time diagram

오리피스 크기에 대해 시간단축 효과가 뚜렷이 나타나고 있다.

이러한 경향으로 미루어볼 때 연소 조건의 개선은 일차적으로 연소 시간단축에 영향을 주고 시간단축에 따른 전열량의 감소가 이후 압력상승에 기여한다고 볼 수 있다. 아울러 토치를 적용하는 경우 토치를 통한 전열량의 증가 그리고 조기에 연소실 벽면에 도달한 전열량 증가 효과가 압력상승 효과를 상쇄하여 시간단축보다 압력상승 효과가 적게 나타나는 것으로 판단된다.

Fig. 12는 10% 연소 기간과 최고 압력과의 관계를 나타낸 것이고, Fig. 13은 주 연소 기간(10-90% 연소)과 최고 압력과의 관계를 나타낸 것이다. 두 그림을 동시에 참조하면 다음과 같은 현상이 관찰된다.

$x_{CH_4}=0.8, 1.0$ 에서 토치 체적이 크고 오리피스가

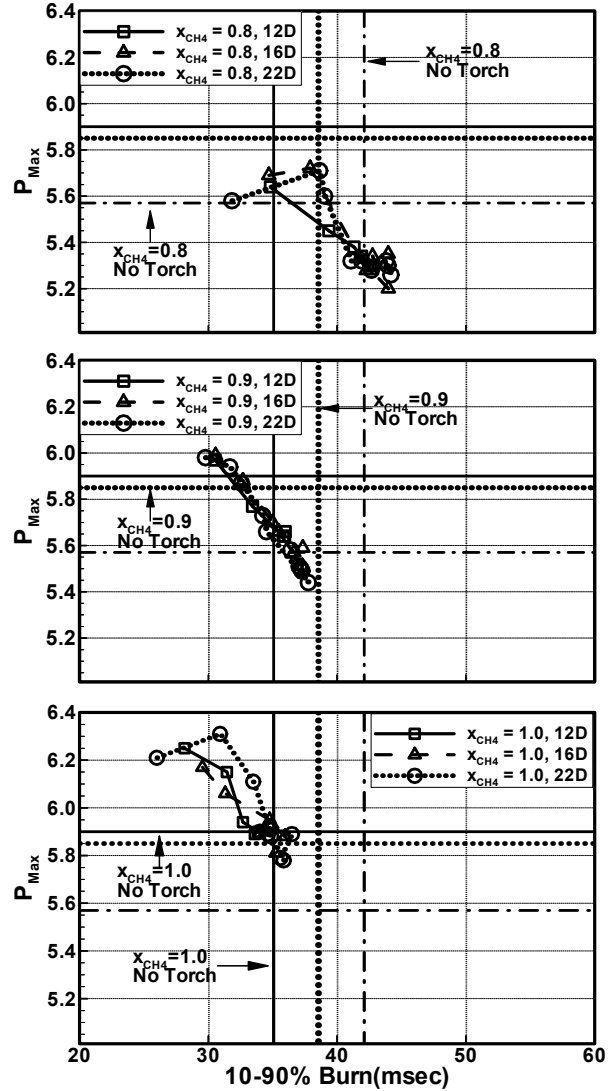


Fig. 13 Peak pressure and 10-90% burn time diagram

매우 작은 경우 연소가 지연되는 것은 초기 연소의 지연이 가장 중요한 원인임을 알 수 있다.

$x_{CH_4}=0.8$ 에서 토치의 적용은 초기 연소보다 주연소의 단축에 더 큰 기여를 하였지만, 오리피스의 크기가 작은 경우, 주연소 기간은 단축되지만 이것이 압력상승으로 이어지지 않았다.

$x_{CH_4}=0.9$ 에서는 초기 연소와 주 연소 모두 오리피스가 작을수록 개선되는 경향이고, 특히 오리피스 크기에 따른 주 연소 기간과 최고 압력의 상호연관성이 매우 뚜렷하게 나타난다.

$x_{CH_4}=1.0$ 에서 주연소 기간과 압력과의 상관성은 $x_{CH_4}=0.8$ 과 매우 유사하지만, 오리피스가 작을 경우를 제외하면 전체 시간단축의 효과는 초기 연소에 더 크게 나타남을 볼 수 있다.

압력과 여러 연소 시간을 종합하면, 토치는 연소 조건이 나쁠수록 주 연소 기간 단축에 그리고 연소 조건이 좋을수록 초기 연소 기간 단축에 더 효과적이다.

5. 결 론

정적 연소실에서 토치를 적용하여 매립지 가스를 연소한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 토치의 체적에 관계없이 최적의 오리피스 비율이 존재하여 $d^2/D^2 < 0.15$ 에서 연소 압력을 향상시키는 효과가 있다.

(2) 오리피스가 작은 경우 압력 상승 비율은 직경 변화에 무관하게 일정 수준을 유지하거나 소폭 감소한다.

(3) 주 연소기간은 오리피스 크기의 절대값과의 연관성이 가장 크게 나타나서 토치의 체적과 관계없이 오리피스 직경에 따라 매우 일정한 변화를 보여준다.

(4) 압력의 변화 폭은 메탄 분율에 관계없이 0.5 bar 정도로 거의 일정하지만, 연소 기간의 변화 폭은 분율 1에서 15msec, 분율 0.9에서 30msec 그리고 0.8에서 20msec로 분율에 따라 상당히 차이난다.

(5) 연소 조건의 개선은 일차적으로 연소 기간 단축에 영향을 주고 시간단축에 따른 전열량의 감소가 이후 압력상승에 기여한다.

후 기

이 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 지원으로 수행되었습니다.(2014-0470)

참고문헌 (References)

- (1) Kim, B. S. and Kwon, C. H., 1995, "Combustion Characteristics of Methane-Hydrogen-Air Premixture (I)," *Transaction of the KSAE*, Vol. 3, No. 3, pp. 129~139.
- (2) Kim, B. S. and Lee, Y. J., 1996, "Combustion Characteristics of Methane-Hydrogen-Air Premixture (II)," *Transaction of the KSAE*, Vol. 4, No. 3, pp. 156~167.

- (3) Choi, S., Jeon, C. and Chang, Y., 2003, "Combustion Characteristics of Methane-Air Mixture in a Constant Volume Combustion Chamber (1) : Homogeneous Charge," *Transaction of the KSAE*, Vol. 11, No. 3, pp. 48~57.
- (4) Lee, C. E., Oh, C. B., Jung, I. S. and Jeong, Y. S., 2000, "A Suggestion for the Burning Velocity Correlation of LFG Mixed Gas Using Numerical Simulation," *2000 Spring Conference of KSME*, pp. 906~912.
- (5) Lee, C. E., Oh, C. B. and Kum, S. M., 2004, "An Investigation of the Fundamental Combustion Characteristics for the Utilization of LFG," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 28, No.1, pp. 99~108.
- (6) Lee, C. E., Oh, C. B., Jung, I. S. and Jeong, Y. S., 2000, "A Suggestion for the Burning Velocity Correlation of LFG Mixed Gas Using Numerical Simulation," *2000 Spring Conference of KSME*, pp. 906~912.
- (7) 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," *Journal of KSVI*, Vol.8(1), pp.19~24.
- (8) Kwon, S. T., Park, C.J. and Ohm, I. Y., 2011, "A Study on Combustion Characteristics of Methane Fuel According to Torch Volume Variation in a Constant Volume Combustion Chamber," *Journal of KSVI*, Vol.9, No.1, pp.42~48.
- (9) Ohm, I., "Combustion Characteristics of Landfill Gas in a Constant Volume Combustion Chamber for Large Displacement Volume Engine (I) - Fundamental Characteristics," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 37, No. 8, pp 733~741
- (10) Ohm, I., Kwon, S. T. and Park, C., "Combustion Characteristics of Landfill Gas in a Constant Volume Combustion Chamber for Large Displacement Volume Engine (I)-Combustion Analysis," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 37, No. 8, pp 743~752