

<학술논문>

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-B.2013.37.8.743>

ISSN 1226-4881

대형기관 모사 정적연소실에서 매립지 가스의 연소특성에 대한 연구 (II) - 연소 분석 -

권순태* · 박찬준** · 임인용**†

* 서울과학기술대학교 에너지환경대학원, ** 서울과학기술대학교 기계·자동차공학과

Combustion Characteristics of Landfill Gas in Constant Volume Combustion Chamber for Large Displacement Volume Engine (II) - Combustion Analysis -

Soon Tae Kwon*, Chanjun Park and Inyong Ohm**†

* Graduate school of Energy & Environment, Seoul National University of Science and Technology,

** Department of Mechanical and automotive Engineering, Seoul National University of Science and Technology

(Received December 28, 2013 ; Revised July 3, 2013 ; Accepted July 3, 2013)

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

초록: 본 논문은 대형 상용기관을 모사한 정적연소실에서 매립지 가스의 연소 특성에 대한 복수의 논문 중 두 번째로, 연소압력 측정을 기반으로 연소과정을 해석하였다. 해석 결과 연소에 유리한 조건일수록 두 개의 압력 정점이 존재하며, 이는 연소에 의한 열발생과 열전달에 의한 냉각효과의 상호 작용이며 두 정점의 크기는 미연가스 분율에 따라 달라진다. 또한 연소과정 중 열발생에는 4개의 주요 변곡점이 발생하고, 이는 점화위치로부터 화염전파에 따른 전열 면적 변화과정이 주원인이며 연소에 불리한 조건일수록 변곡점은 증가하고 열발생은 복잡한 형태를 지니는데, 이는 연소기간 연장이 주원인이다. 결론적으로 점화위치와 관련된 화염전파 과정 및 전열 면적의 변화과정 그리고 대형 연소실에 의한 연소기간 연장의 효과가 상호 복잡하게 작용하면서 매우 특이한 형태의 열발생 곡선이 생성된다.

Abstract: This is the second paper on the combustion characteristics of landfill gas in a constant volume combustion chamber for a large displacement volume commercial engine, and it discusses the combustion process on the basis of pressure measurements. The results show that the bimodal peak pressure phenomenon, which is caused by the interaction of the heat release and the heat transfer, is more apparent as the mixtures are more favorable to combustion, and the magnitudes of the pressures depend on the unburned fraction. In addition, there exist four main inflection points during heat release owing to variations in the heat transfer area related to flame propagation from the ignition point. Furthermore, the number of inflection points increases as the mixture quality worsens because of the extended burn duration. Consequently, the sophisticated interactions between the heat transfer area changing pattern due to flame propagation and transfer duration might cause very peculiar heat release patterns.

1. 서 론

매립지 가스(landfill gas, LFG)는 유기성 폐기물의 혐기 발효로 폐기물 매립지에서 생성되며, 메탄(CH₄)이 주성분이며 그 외에 이산화탄소(CO₂), 산소(O₂) 그리고 질소(N₂)등이 포함되어있다. 최근에는 매립지 가스를 실용 에너지원으로서 사용하고자 하는 노력이 다양하게 시도되고 있지만

매립지 가스는 성분 중 메탄과 CO₂의 비율이 매립지별로 상이하고, 불활성 기체인 CO₂ 성분을 다량 함유하고 있어 연소 안정성 및 초기 연소에 상당히 불리하다. 더구나 매립지 가스는 대부분 대형기관에 사용되므로 기관 실린더 내에 공급된 혼합기의 절대량이 크게 증가하여 연소속도가 낮아지므로, 한정된 사이클 기간 동안에 만족할 수준의 연소율을 달성하는 것은 매우 어렵다.

본 연구에 앞서 Kim 등^(1,2)은 소형 정적연소실(CVCC, constant volume combustion chamber)에서 메

† Corresponding Author, iyohm@seoultech.ac.kr

© 2013 The Korean Society of Mechanical Engineers

탄-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^(6,7)은 매립지 가스의 기본적인 연소특성을 조사하고 매립지 가스의 연소속도에 대한 식을 제안하였다.

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.⁽¹⁻⁷⁾ 더구나 매립지 가스를 정적연소실에 적용한 예는 전무하다.

실물기관과 동일한 점화위치의 대형 정적연소실에서, 메탄/LFG 조성 및 당량비에 따른 연소특성을 연소화학양론 및 열역학적 측면에서 분석하고 이를 실험 결과와 비교한 이전 연구⁽⁸⁾에서는, 연료조성 변화에 따른 생성물의 조성 변화가 비열 변화를 초래하고 이 비열이 최종압력을 지배하는 가장 중요한 변수라는 결론을 얻었다. 그리고 실제 연소에서 열전달의 효과는 매우 크며 특히 연소실 체적과 점화위치도 주요 변수가 된다는 결론을 도출하였다.

본 논문에서는 이전 연구에 이어 매립지 가스의 연소압력을 기초로 하여 연소 특성에 대해 논의하는데, 특히 실제 연소에서 연소실 체적과 점화위치에 의한 열전달 효과를 가시화 결과와 비교하면서 구체적으로 논의하고자 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 연소가 지연된 경우에도 ATDC 90 CA이면 연소가 완료되므로, 연소실의 스트로크를 ATDC 90 CA에서의 피스톤 위치인 85.2 mm로 제작하였다. 따라서 실물기관($S/B=1.09$)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 동일위치에 점화플러그를 장착하였고, 연소실의 측면에는 연소실 내의

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)	LFG3 (0.7)
ϕ	1.000	1.000	1.000	1.000
ϕ'	1.000	0.988	0.974	0.957
ϕ	0.900	0.900	0.900	0.900
ϕ'	0.900	0.889	0.877	0.861
ϕ	0.800	0.800	0.800	0.800
ϕ'	0.800	0.790	0.779	0.765
ϕ	0.700	0.700	0.700	0.700
ϕ'	0.700	0.692	0.682	0.670

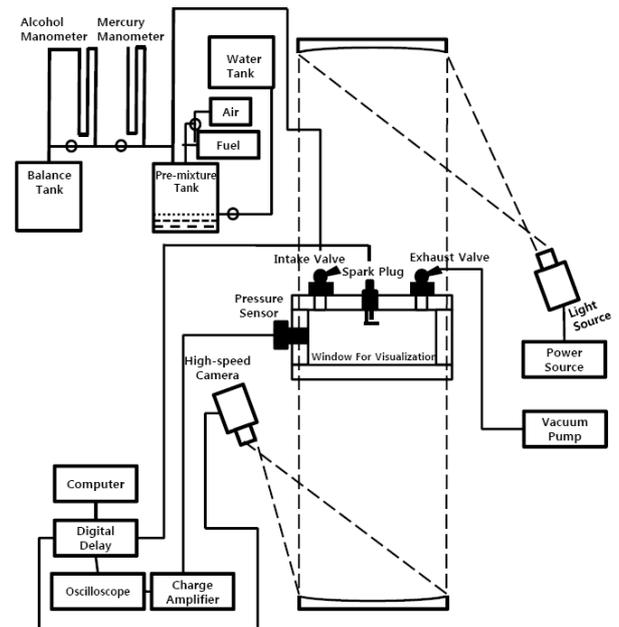


Fig. 1 Schematics of experimental apparatus

압력 변동을 측정하기 위하여 피에조 타입의 연소압력센서(Kistler, 6117BFD17)를 장착하였다.

예혼합기는 수치환법으로 제작하였고, 메탄과 이산화탄소를 혼합한 LFG 모사연료의 조성비와 당량비를 Table 2에 나타내었다. 대형기관에서 메탄 및 매립지 가스는 대부분 이론당량비 이하에서 운전하므로 실험 시 당량비는 모두 $\phi \leq 1$ 로 하였다. 표에서 ϕ' 은 이전 논문에서와 같이 CO₂까지 고려된 수정 당량비로 CH₄/(Air+CO₂)이다.

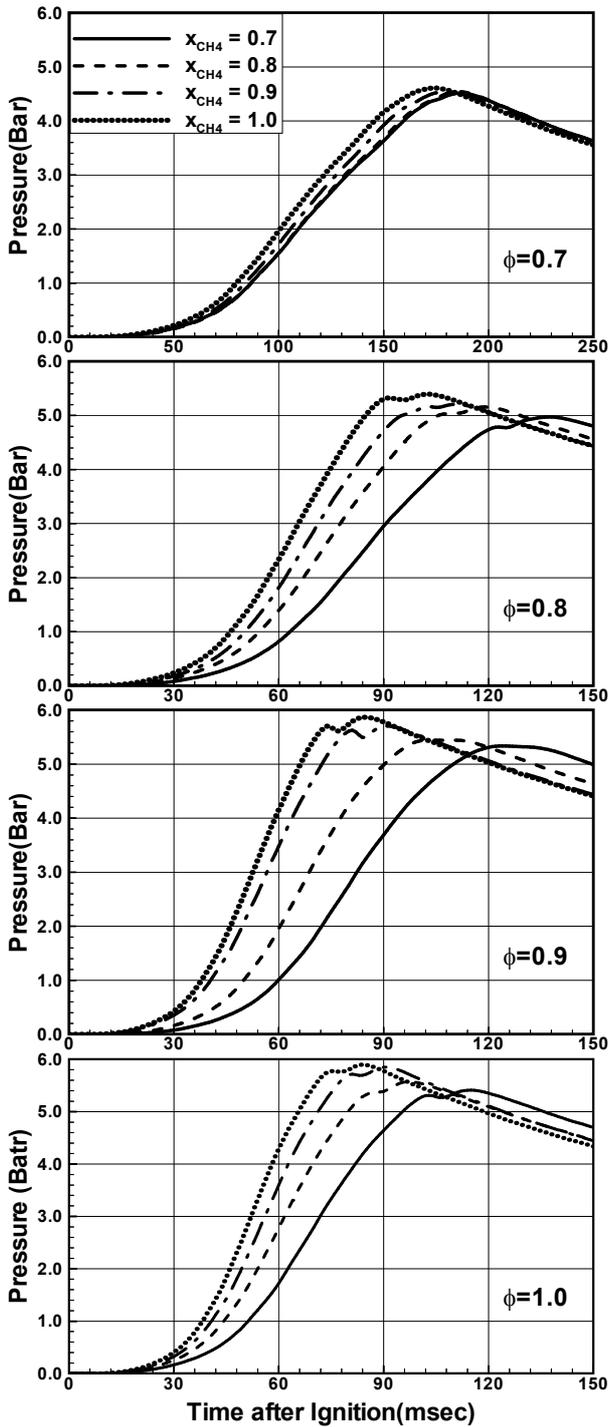


Fig. 2 Pressure after ignition according to equivalent ratio and CH₄ fraction

화염 전파 특성의 가시화에는 밀도 구배의 구배 ($\partial(\partial\rho/\partial x)/\partial x$)에 대한 정보를 제공하는 그림자사진 (shadowgraph)법을 사용하였다. 이를 위한 광학계는 할로겐 광원, 오목거울(concave mirror, ϕ :300mm, f :3000mm) 그리고 고속 카메라(SVSI사)로 구성되었고 1000 f.p.s로 촬영하였다.

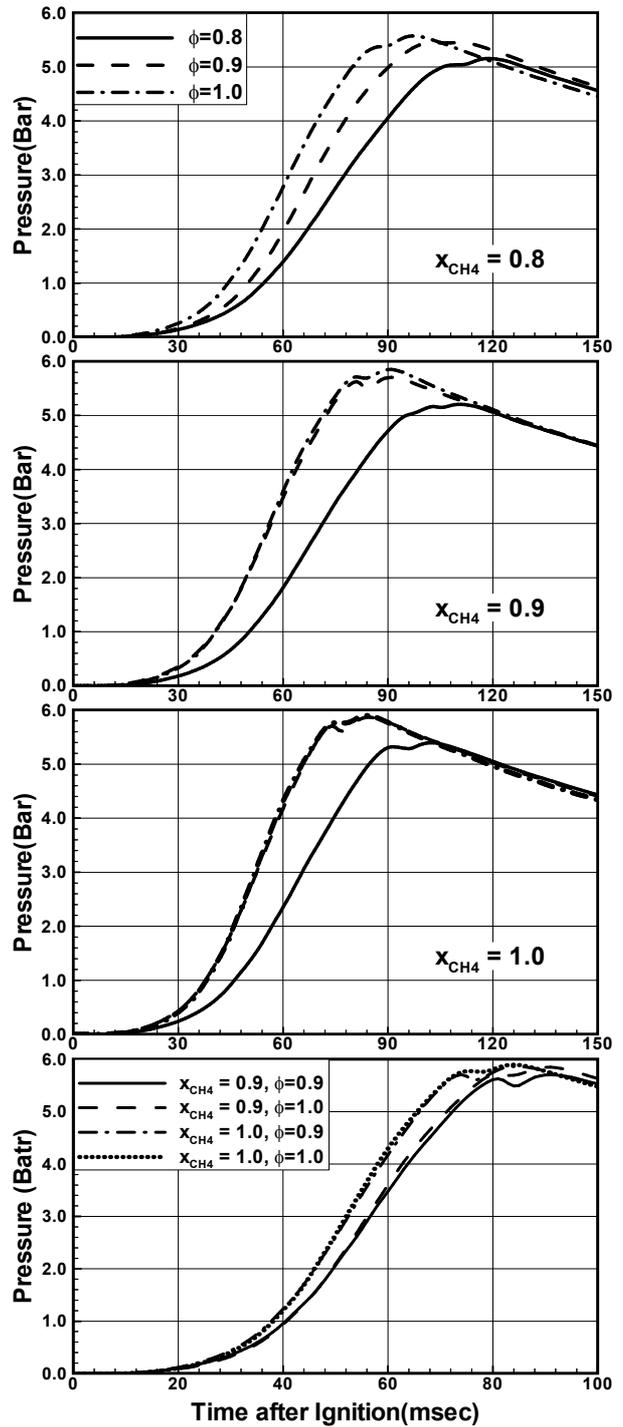


Fig. 3 Pressure after ignition according to equivalent ratio and CH₄ fraction

3. 결과 및 고찰

3.1 연소특성

Fig. 2와 Fig. 3에 연료가스 조성(x_{CH_4})에 따른 그리고 당량비(ϕ) 변화에 따른 정적연소실 내의 연소 압력 변화를 나타내었다.

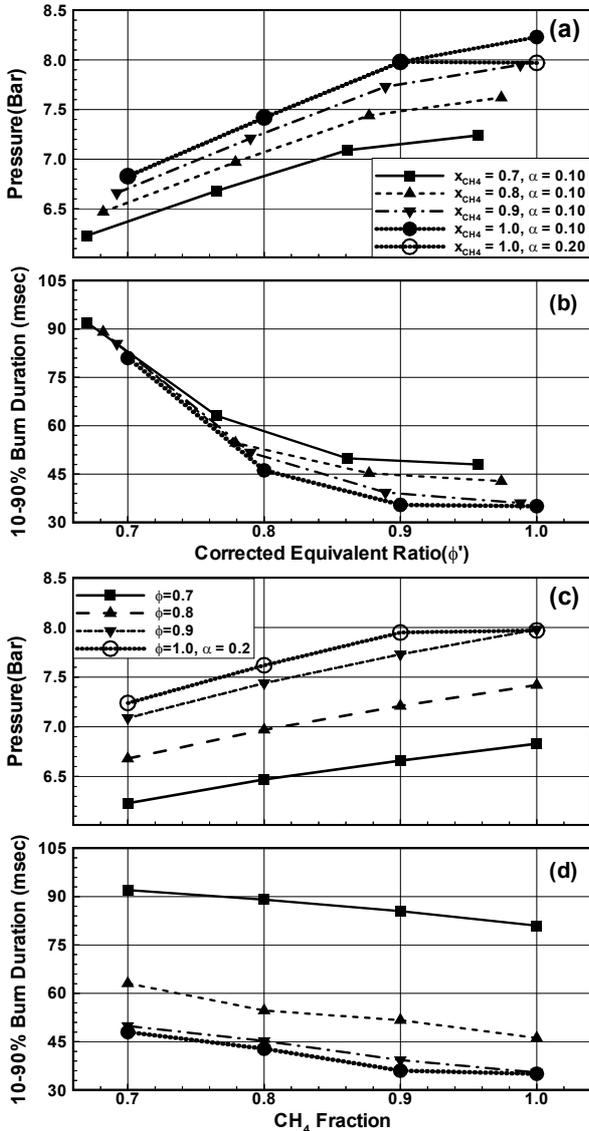


Fig. 4 Calculated pressure (a), (c) and burn duration (b), (d) according to corrected equivalent ratio and CH₄ fraction

먼저 Fig. 2에서 동일 당량비에서의 압력 변화는 $\phi=0.7$ 만 제외하고 x_{CH_4} 의 감소에 따라 압력 상승이 지연되고 최고압력의 차이도 크게 발생하는 것을 잘 보여준다. 그리고 $\phi=0.7$ 에서 연소기간이 급속히 늘어나고 압력도 크게 낮아지는 반면 x_{CH_4} 의 변화에 따라서는 예외적으로 압력차가 발생하지 않는다. 이는 Fig. 4에 제시된 바와 같이 이미 이전 논문⁽⁸⁾에서 압력저하는 x_{CH_4} 감소에 따라 확대되지만 동일 x_{CH_4} 에 대해서는 ϕ' (또는 ϕ)가 작을수록 정적비열의 감소가 커서 압력의 차이가 축소된다는 것을 논의하였고, 아울러 실제 연소에서는 이에 더해 x_{CH_4} 가 클수록 온도

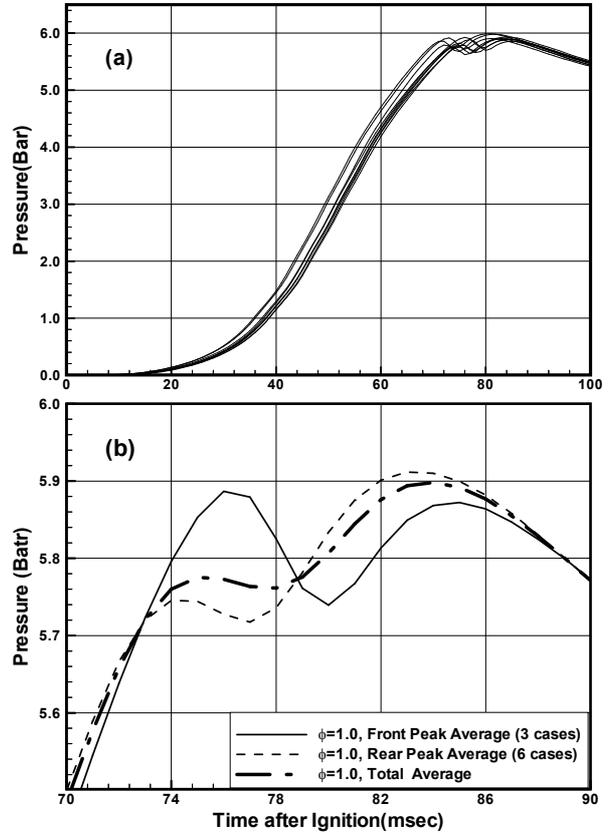


Fig. 5 Pressure of 9 individual cases (a) and averaged bi-modal pressure peak (b)

가 높아 열전달이 증가하여 압력이 추가로 저하되므로 ϕ 의 변화에도 불구하고 압력은 거의 같아진다는 것을 논의하였다.

동일 x_{CH_4} 에 대해 압력을 나타낸 Fig. 3에서 몇 가지 특이한 점이 관찰되는데, 우선 $x_{CH_4}=0.9, 1.0$ 에서는 각각 $\phi=0.9$ 와 1.0 의 압력 형태와 최고압력이 거의 차이가 나지 않고, $x_{CH_4}=0.8$ 에서는 $\phi=0.9$ 와 1.0 의 최고압력에는 큰 차이가 나지 않지만 연소기간은 상당히 증가하였다. 구체적으로 $x_{CH_4}=1.0$ 에서 $\phi'=1$ 의 최고압력 5.90bar, $\phi'=0.9$ 에서 5.87bar로 거의 차이가 없었고 최고압력 도달시간도 84msec로 동일하였다. 또한 $x_{CH_4}=0.9$ 에서 $\phi'=0.99$ 의 최고압력 5.85bar, $\phi'=0.89$ 의 최고압력 5.71bar이고 최고압력에 도달하는 시간도 91msec로 동일하였다. 이 현상 역시 Fig. 4에 제시된 바와 같이 $\phi=1.0$ 에서 헤리를 고려하면 예측된 경향과 큰 차이가 없다.

압력 형상에서 특이한 점은 Fig. 3에서 볼 수 있듯이 그리고 Fig. 5(a)에 나타낸 것처럼 연소가 유리한 조건 즉 당량비가 1에 가까울수록 그리고 x_{CH_4}

가 클수록 압력형태에 두 개의 정점이 뚜렷이 나타난다는 것과, Fig. 5(b)에 도시한 바와 같이 경우에 따라 첫 번째 정점의 압력이 더 높기도 한데 대부분의 경우 두 번째 정점의 압력이 높고 따라서 전체 평균한 압력은 두 번째 정점이 발생한 경우에 가깝다는 것이다. 또한 Fig. 5(a)에서 볼 수 있듯이 정적연소이지만 개별적인 연소 과정에 비록 작기는 하지만 변동성이 존재한다는 것이다

두 개의 정점이 발생하는 것은 다음과 같은 과정에 의한 것으로 사료된다. 먼저 연소진행에 따라 고온의 기연가스는 팽창하고 화염면도 하부로 이동하면서, 고온의 기연가스가 연소실 벽면에 접촉하는 면적이 증가하고 아울러 온도도 상승하여 열전달이 증가한다. 연소가 계속 진행하여 화염이 연소실의 하부에 도달할 때 접촉면적증가에 따른 벽면 열전달에 의한 냉각이 열발생보다 커지면서 압력저하가 발생한다. 이어서 연소 말기에 연소실 말단부에 있는 압축된 미연가스가 난류 연소 또는 화염면 확장의 효과에 의해 높은 질량 연소율로 연소하여 다시 압력이 상승한 것으로 판단된다.

이 때 첫 번째 정점압력이 높은 경우, Fig. 5(b)에 나타난 바와 같이 압력상승이 늦어 기연가스의 체적 팽창과 온도상승도 지연되어 접촉면적의 상대적 축소(두 번째 정점이 높은 경우보다)에 의해 화염이 연소실 하부에 도달하였을 때 냉각 효과가 감소한다. 따라서 계속 온도와 압력이 상승하다 일정 수준을 넘어서면 접촉면적 확대와 온도상승에 의한 냉각이 열발생보다 커지면서 압력이 저하된다. 이 때 첫 번째 정점의 온도와 압력이 두 번째 정점압력이 최고압력인 경우보다 높으므로 냉각도 증가하여 압력의 저하는 더 크다. 마지막으로 앞서 언급한 바와 같이 연소실 말단부에 있는 압축된 미연가스가 난류 연소 또는 화염면 확장의 효과에 의해 높은 질량 연소율로 연소하여 다시 압력이 상승하지만, 말단부의 미연가스 분율이 낮아 추가적인 압력상승이 제한된다. 두 번째 정점이 더 높은 경우는 조기에 냉각이 발생하여 미연가스 분율이 높아 압력 상승이 커진다. 마지막으로 연소가 불리할수록 연소진행이 지연되어 열발생과 열전달이 비교적 긴 시간 동안 발생하여 이러한 현상이 완화되어 나타난 것으로 판단된다.

한편 두 정점이 발생하는 것은 연소실의 체적과 점화위치에 무관하지 않는 것으로 판단된다. 즉 연소시간(체적)과 접촉면적의 변화형태(점화위치)가 기존의 연소실 중심에 점화위치를 둔 소형 정적연소실과 다르기 때문이다. 두 정점압력은 열발생에서도

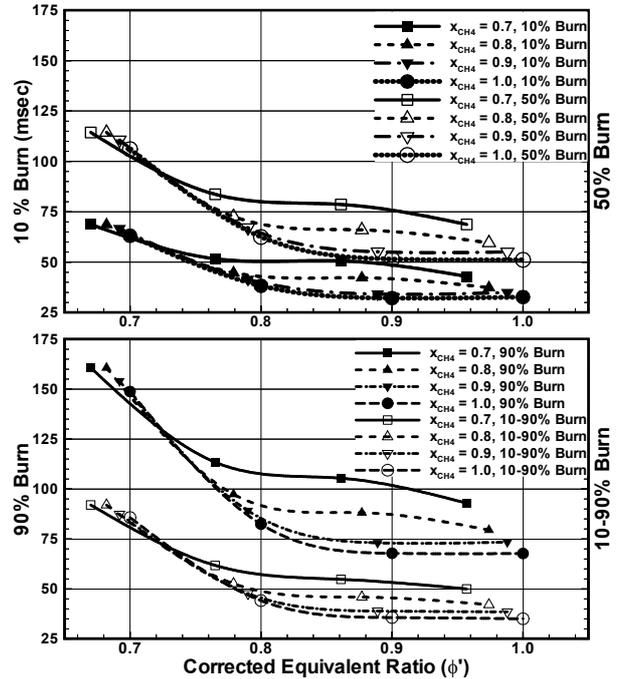


Fig. 6 Burn durations after ignition as a function of corrected equivalent ratio according to CH₄ fraction

검토하겠다.

마지막으로 Fig. 5(a)의 개별 화염 변동성은 연소과정 자체에 변동성이 내재된 것일 수도 있고, 혼합기 충전 과정 중 발생한 연소실 내 내부 유동에 차이가 발생한 것일 수도 있는데, 아직 확실한 해석은 어렵다.

Fig. 6은 당량비와 x_{CH_4} 에 따라 연소시간을 비교한 것이다. $\phi=0.7$ 에서 급속히 연소가 지연되는 것은 이미 이전 논문⁽⁸⁾과 앞에서 논의하였다. 여기서 관찰되는 또 다른 특징은 그림에서 알 수 있듯이 $x_{CH_4}=1.0$ 과 $x_{CH_4}=0.9$ 의 모든 연소시간은 당량비 변화에 따라 매우 일정한 차이를 유지하고 있다. 그에 비해 $x_{CH_4}=0.8$ 과 $x_{CH_4}=0.7$ 의 10, 50, 90% 연소시간은 $x_{CH_4}=1.0$ 과 $x_{CH_4}=0.9$ 의 차이보다 더 크게 나타나고 있다. 그러나 10 ~ 90% 연소시간은 연료조성 및 당량비 변화에 대해 상대적으로 차이가 적고 일정한 간격을 유지하고 있는데, 이는 총 연소시간 차이의 대부분은 10% 연소시간에서 크게 발생하여, 초기 연소가 전체 연소시간의 가장 중요한 인자임을 나타낸다.

Fig. 7과 Fig. 8은 최고압력에 도달할 때까지 당량비와 x_{CH_4} 에 따른 순간적인 열발생을 나타낸 것이다. 총 열발생(또는 총 질량연소율)은 정적연소이므로 압력형태와 차이가 없어 도시하지 않았

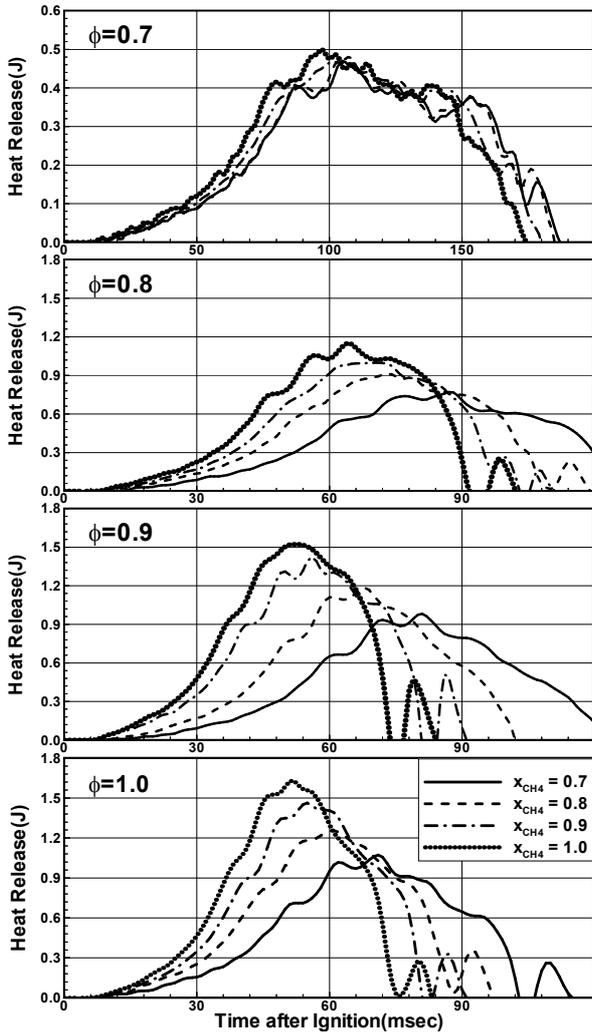


Fig. 7 Heat release after ignition according to equivalent ratio and CH₄ fraction

고, $x_{CH_4}=0.7$ 과 $\phi=0.7$ 인 경우 열발생이 적어 수직 축 눈금이 다른 그림과는 상이하다.

우선 열발생에서 특이한 것은 압력의 경우 최고압력 부근에서 두 개의 정점이 나타난 것에 비해, 열발생은 $\phi=0.7$ 을 제외하고 최고 열발생점에 도달하기 전에 두 개의 뚜렷한 변곡점이 관찰되고, 최고점을 지난 이후에도 역시 두 개의 뚜렷한 변곡점이 관찰된다. 후술하겠지만 그림자사진 법으로 화염전파를 관찰한 결과 변곡점들은 화염면이 연소실 벽면에 도달하였을 때 발생하며, 이에 따라 벽면 열전달이 증가된 결과로 판단된다. 이외에 작은 변곡점들도 여러 개 발생하는데 연소에 불리한 조건일수록 이러한 변곡점이 다수 그리고 뚜렷이 발생한다. 이는 이전 논문과 앞에서 논의한 바와 같이 체적과 점화위치의 영향인데, 점화위치가 연소실 상부에 있기 때문에 연소 초기부터 화염면은 연소실 상부 벽에 닿고 이어

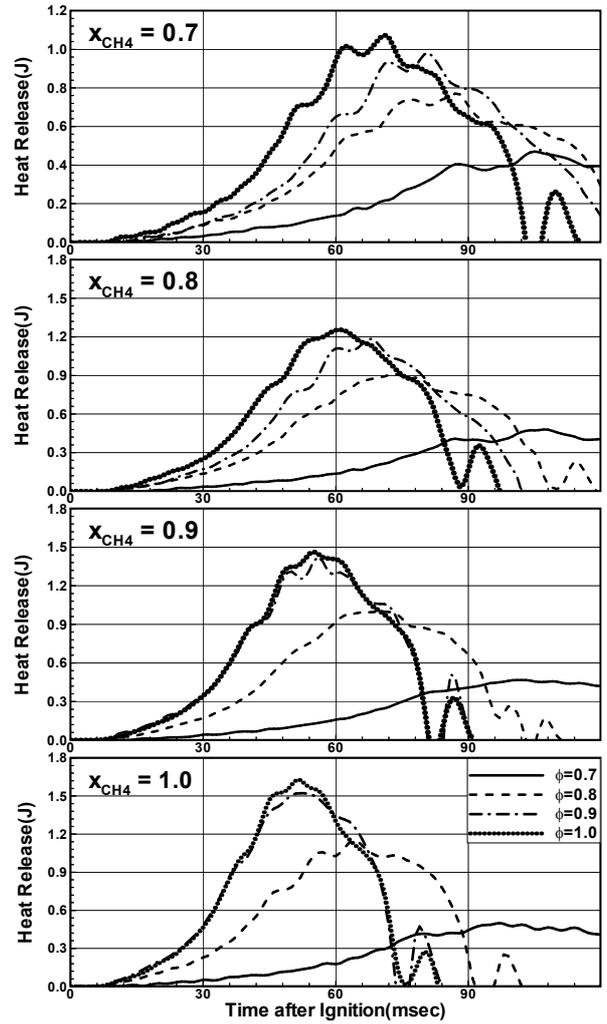


Fig. 8 Heat release after ignition according to equivalent ratio and CH₄ fraction

측면, 하면에 차례로 접촉하여 여러 개의 변곡점이 나타나고 비교적 연소진행이 느리기 때문에 변곡점의 형태가 뚜렷한 것으로 판단된다.

$x_{CH_4}=1.0, 0.9$ 의 $\phi=1.0, 0.9$ 의 압력을 비교한 Fig. 3에서는 $\phi=1.0, 0.9$ 둘 사이에 큰 차이를 발견할 수 없었으나, Fig. 8에서 최고 열발생 부근에서는 $\phi=1.0$ 의 열발생율이 약간 큼을 알 수 있다. 그리고 $\phi=0.7$ 에서는 x_{CH_4} 의 영향이 크게 나타나지 않는데, 이는 압력 변화에서 관찰한 것과 일치한다.

$\phi=0.7$ 에서의 열발생은 대체적인 경향에서는 다른 당량비와 일치하지만, 열발생 자체가 매끄럽지 않으며 여러 개의 작은 변곡점들이 발생하고 있다. 이것도 일차적으로 연소실 체적의 효과로 판단된다. 즉 ϕ 감소에 따라 연소가 지연되는데, 연소실의 체적이 커서 연소지연의 효과가 가중되어, 연소과정 중에 냉각과 열발생이 비교적 긴 시간동안 발생하여 복잡한 상호작용이 발생한 결

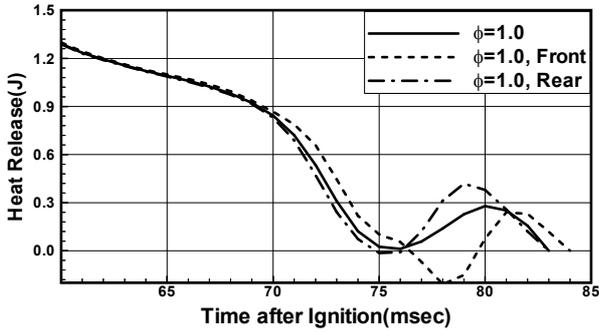


Fig. 9 Heat release near bi-modal pressure peak

과로 판단된다.

Fig. 9에 압력 정점이 두 개 생성될 때의 열발생을 Fig. 5에서와 같은 경우에 대해 비교한 것이다 그림에서 알 수 있듯이 그리고 앞서 논의한 바와 같이 첫 번째 정점이 높은 경우 70 msec 이후에 열발생이 상당히 높아 압력이 더 상승하고, 이후 온도 증가에 의해 냉각량은 많아진다. 압력이 재상승 할 때는 미연 질량 분율이 적어 상승폭이 축소된다.

3.2 화염전파 가시화

Fig. 10에 열발생과 열발생의 형상의 주요 위치를 나타내고 이에 상응하는 가시화 이미지를 Fig. 11 ~ Fig. 14에 제시하였다. 이를 연소과정을 시간도표 상에 나타낸 Fig. 15를 참조하면서 x_{CH_4} 와 ϕ 의 변화에 따른 여러 차이를 살펴보기로 한다.

우선 전체적으로, Fig. 11, 12, 그리고 Fig. 15에서 알 수 있듯이 $(x_{CH_4}, \phi)=1.0$ 과 0.9 는 90% 연소기간과 세 번째 강한 변곡점의 발생위치만 차이가 나고 약간의 시간차이가 발생한다는 것 외에 큰 차이가 없다. 그리고 $(x_{CH_4}, \phi)=0.7$ 에서는 중심부에서 연소실 아랫방향으로 화염진행이 지연됨을 볼 수 있는데, $(x_{CH_4}, \phi)=0.7$ 이 아닌 경우에는 연소실 벽면근처에서 냉각으로 화염진행이 늦어져 상대적으로 중심부근이 빠른 것으로 나타나는데 비해, $(x_{CH_4}, \phi)=0.7$ 에서는 화염온도가 낮아 벽면 열전달이 줄어들어 상대적으로 중심 부근의 화염진행이 느리게 보이는 것으로 사료된다.

처음으로 화염이 관찰되는 시기는 거의 차이가 없이 점화 후 12msec 전후이다. 이는 연료조성 및 당량비와 관계없이 점화지연은 거의 같다는 것을 의미한다. 점화지연은 주로 초기압력과 온도에 관련되므로 이는 당연한 결과이다.

다음으로 열발생의 첫 번째 약한 변곡점은 화염면이 점화플러그 주변에 있을 때 발생하고, x_{CH_4} 와 ϕ 의 감소에 따라 시간은 증가하고 화염면

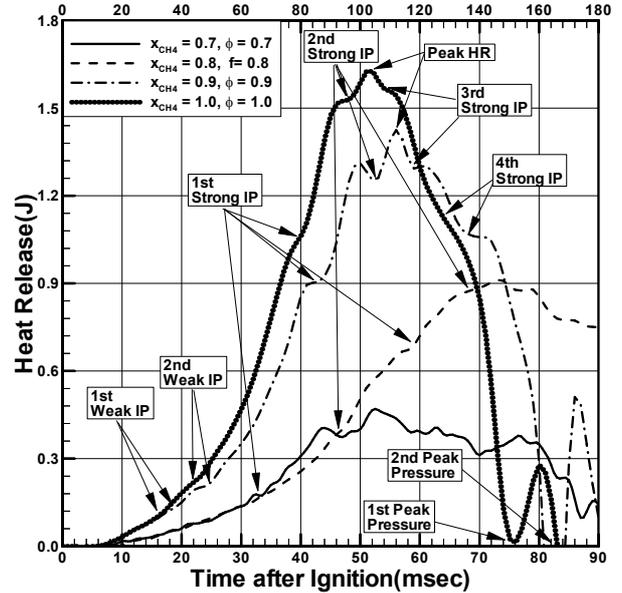


Fig. 10 Matching of heat release and visualization

의 크기는 작는데 특히 $(x_{CH_4}, \phi)=0.7$ 에서 시간 증가와 화염면 감소가 현저하다. 이 변곡점은 주로 플러그를 통한 열전달로 판단되고 $(x_{CH_4}, \phi)=0.7$ 에서는 연소지연에 따라 열전달 시간이 증가되어 화염면이 작은 것으로 판단된다.

두 번째 약한 변곡점의 특징은 x_{CH_4} 와 ϕ 에 따라 발생 시기만 차이가 있고 기연부분의 크기와 형상은 거의 동일하다. 이로 미루어 볼 때 이것은 연소실 형상효과로 판단되며, 화염의 수직 및 수평 성장을 고려할 때 상대적으로 폭이 좁은 가시화 창 쪽의 상부에 반구형 화염면이 도달하여 열전달이 추가된 것으로 판단된다.

다음으로 10% 연소율 지점이 도달하는데 예외적으로 $(x_{CH_4}, \phi)=0.7$ 에서는 이 지점이 첫 번째 강한 변곡점 이후에 발생한다. 가시화 이미지에서 기연가스 부분은 $(x_{CH_4}, \phi)=1.0$ 과 $(x_{CH_4}, \phi)=0.9$ 는 거의 차이가 없고 $(x_{CH_4}, \phi)=0.8$ 에서 약간 증가한다 $(x_{CH_4}, \phi)=0.7$ 에서 다시 감소한다. $(x_{CH_4}, \phi)=0.7$ 에서 감소는, 본 연구에서 최고압력을 기준으로 열발생(냉각이 포함된 순 열발생)을 구하였기 때문에 최고압력 이후 진행된 연소(열발생이 냉각보다 적음)에 대한 고려가 없고, 연소가 크게 지연된 $(x_{CH_4}, \phi)=0.7$ 은 최고압력 이후 다른 경우보다 미연 질량 분율이 더 크에도 불구하고 이것이 고려되지 못하여서, 총 열발생량이 상대적으로 저평가되었기 때문인 것으로 판단된다.

첫 번째 강한 변곡점도 $(x_{CH_4}, \phi)=0.7$ 만 제외하

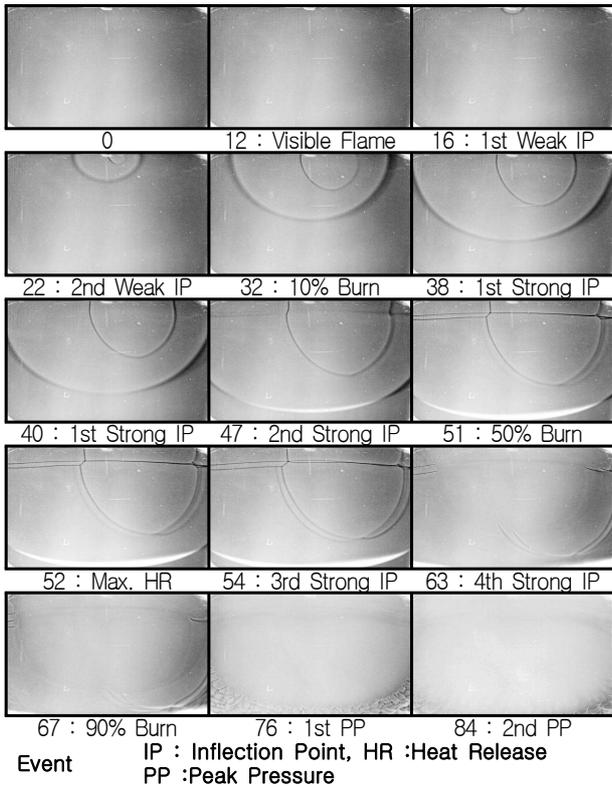


Fig. 11 Flame propagation image($x_{CH_4}=1.0, \phi=1.0$),
image caption : <time(msec) : event>

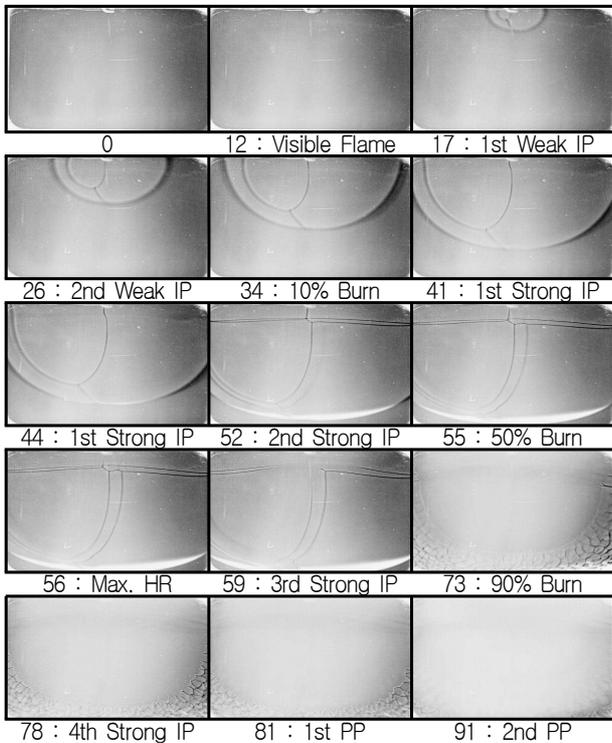


Fig. 12 Flame propagation image($x_{CH_4}=0.9, \phi=0.9$)

고 기연부분의 크기와 형상은 거의 동일한데, 따라서 이것도 연소실 형상에 의한 효과가 작용

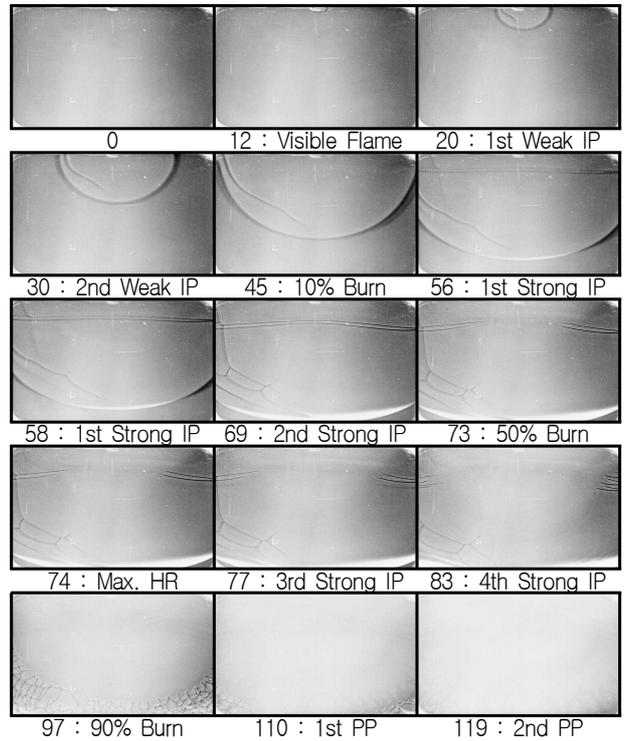


Fig. 13 Flame propagation image($x_{CH_4}=0.8, \phi=0.8$)

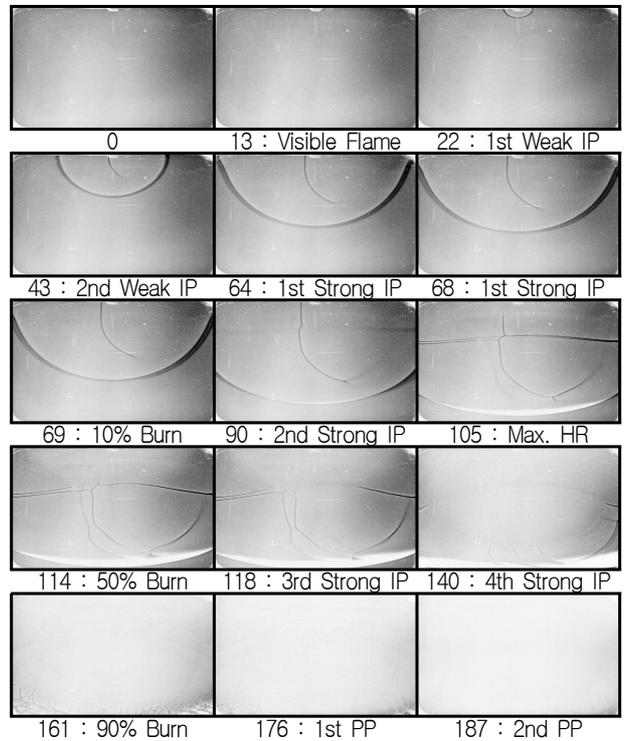


Fig. 14 Flame propagation image($x_{CH_4}=0.7, \phi=0.7$)

하고 아울러 가시화 이미지에서 보듯이 기연부분의 급속한 팽창에 의해 전열 면적이 크게 증가한 것이 원인으로 판단된다. 즉 화염면이 연소실 상부의 금속 측벽에 도달하여 이쪽으로 전열 면적

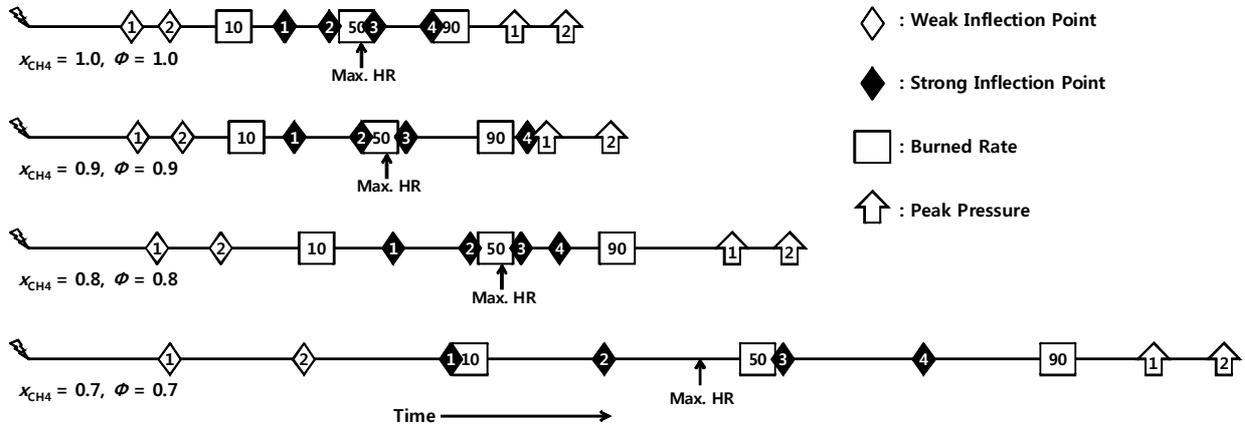


Fig. 15 Event-time diagram of combustion process

이 크게 증가하면서 측면 열전달이 증가된다. (x_{CH_4}, ϕ)=0.7에서도 같은 현상이 발생하였지만 접촉 면적의 확대가 작아 변곡점이 상대적으로 뚜렷하지 않지만, 반대로 열전달 시간은 증가하여 변곡점의 형태로 나타났다고 판단된다.

다음으로 두 번째와 세 번째 강한 변곡점 사이에 50% 질량 연소와 최대 열발생이 매우 좁은 시간간격으로 존재하고, (x_{CH_4}, ϕ)=0.7에서는 이 간격이 확대되어 있다. 우선 (x_{CH_4}, ϕ)=1.0 ~ 0.8의 두 번째 변곡점은 이미지에서 보듯이 화염면이 반구형에서 평면으로 변화하고 이에 따라 연소실 측벽 모든 면에서 전열 면적이 급격히 증가하면서 발생한 것이라 판단된다. 이 시기에 반구형 화염이 평면화염의 형태로 천이하면서 가시화 창에 화염면이 길게 접촉하는 것이 이미지에도 잘 나타나 있다.

50% 연소지점에서 화염은 거의 연소실 하부까지 진행하여 체적연소는 90%이상이고 또한 이때까지의 화염전파는 층류이다. 따라서 연소실 하부의 좁은 체적에 다량의 미연 혼합기가 압축되어 존재하므로 연소율이 급격히 증가하여 열발생이 최대가 된다. 이어서 화염면이 연소실 하부에 도달하여 이를 통한 열전달이 발생하므로 세 번째 강한 변곡점이 발생한다. (x_{CH_4}, ϕ)=0.7에서는 최대 열발생이 50% 연소 전에 나타나는데, 이는 앞서 논의한 바와 같이 최고압력을 기준으로 열발생을 구한 것에 기인한다고 판단된다.

네 번째 강한 변곡점은 이미지에 잘 나타나 있지 않지만 연속촬영 결과로 확인한 결과 연소실 상부로의 열전달이 급격히 진행되면서 나타난 것으로 확인되었다. 제시한 그림자사진에서도 이

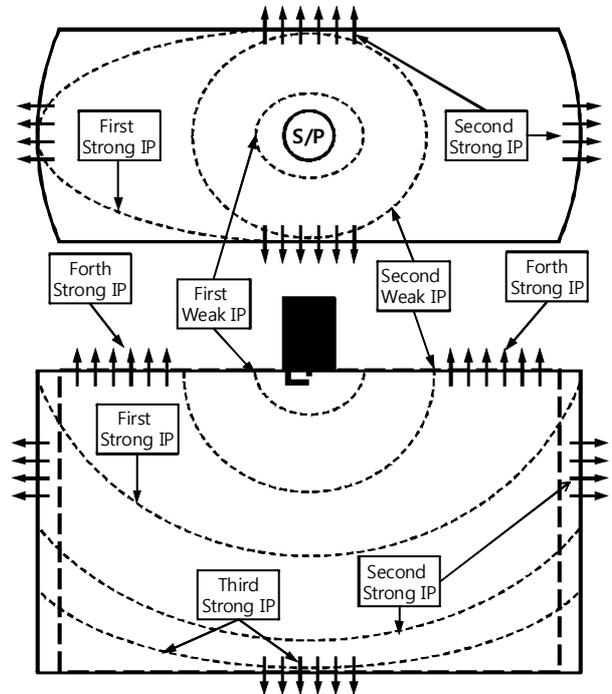


Fig. 16 Schematics of relation between flame propagation and heat release

시점 이후 상부부터 이미지가 밝아지고 점차 하부로 확대되는 것이 관찰되는데, 이는 열전달에 의해 밀도구배가 발생하기 때문이다. 상부로 열전달이 진행되는 이유는 조기에 연소된 부분일수록 연소진행에 따른 압축에 의해 온도가 높게 상승되어 큰 온도차에 의해 열전달이 촉진된 것으로 판단된다. 네 번째 변곡점은 화염전파와 관계없이 상면으로의 열전달이 주요 원인이므로 연소와 관련된 90% 연소지점과 발생시점 관계에 일관성이 없다. 한편 50% 연소 이후 화염은 점차 난류 화염으로 천이하여 90% 연소지점에서는

확실히 난류 화염이 발생하고 있고 뚜렷한 화염면의 경계는 관찰되지 않는다. 이후 이러한 과정이 압력정점까지 지속되는데, 두 개의 압력 정점에 대해서는 앞에서 논의한 바 있다.

이러한 화염전파에 따른 열전달의 주요 원인을 Fig. 16에 도식화하여 나타내었는데, 결론적으로 점화위치와 관련된 화염전파 과정 및 전열 면적의 변화과정 그리고 대형 연소실에 의한 연소기간 연장의 효과가 상호 복잡하게 작용하면서 매우 특이한 형태의 열발생 곡선이 생성된다.

분석결과를 종합하여 실물기관과 연관할 때 다음과 같은 시사점이 있다.

메탄/LFG를 사용하는 대형 실물기관은 비교적 저속으로 운전되지만(2000 RPM 이하), 1800 RPM으로 운전하는 경우에도 연소는 10msec 이내에 완료되어야 한다. 물론 실물기관에서는 실린더 내 유동이 존재하고 온도와 압력이 높으므로 연소의 진행은 정적연소실보다 훨씬 빠르게 진행되지만 x_{CH_4} 와 ϕ 감소에 따른 연소 지연을 극복하기 위해서는 초기연소의 개선이 가장 중요하고 다음에 주 연소 기간의 단축을 위한 방안이 필요하다. 이 부분은 본 논문의 후속 논문에서 다루도록 하겠다.

한편 실물기관에서 열전달은 효율 저하의 가장 큰 원인인데, 연소실 벽과 기연가스의 온도 차이가 더 크고 내부 유동이 존재하므로 전열이 증가하는 효과가 있고 반면 정적연소실보다 빠른 연소는 전열시간 단축에 의해 전열을 감소시키는 효과가 있다. 그러나 기본적인 열전달 구조는 정적연소실과 유사하리라 판단된다.

4. 결 론

대형기관을 모사한 정적연소실에서 LFG의 연소특성을 연소압력 측정을 기반으로 해석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 연소에 유리한 조건일수록 두 개의 압력 정점이 존재하며, 이는 열발생과 열전달에 의한 냉각효과의 상호 작용이며 두 정점의 크기는 미연가스 분율에 따라 달라진다.

(2) 연소과정 중 열발생에는 4개의 주요 변곡점이 발생하고, 이는 점화위치에 따른 전열 면적 변화과정이 주원인이다.

(3) 연소에 불리한 조건일수록 변곡점은 증가하고 열발생은 복잡한 형태를 지니는데, 이는 연소기간 연장이 주원인이다.

(4) 점화위치와 관련된 화염전파 과정 및 전열 면적의 변화과정 그리고 대형 연소실에 의한 연

소기간 연장의 효과가 상호 복잡하게 작용하면서 매우 특이한 형태의 열발생 곡선이 생성된다.

후 기

이 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- (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) Chang Eon Lee, Chang Bo Oh and Sung Min Kum, 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.
- (8) Ohm, I., "Combustion Characteristics of Landfill Gas in a Constant Volume Combustion Chamber for Large Displacement Volume Engine (I)-Fundamental Characteristics," Submission to *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 37, No. 8 pp. 733~741.