

대형기관 모사 정적연소실에서 매립지 가스의 연소특성에 대한 연구 (I) - 기초 특성 -

엄 인 용*

* 서울과학기술대학교 기계공학과

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

Inyong Ohm**

* Dept. of Mechanical and Automotive Engineering, Seoul Nat'l Univ. of Science and Technology

(Received December 28, 2012 ; Revised July 3, 2013 ; Accepted July 3, 2013)

Key Words: Landfill Gas(매립지 가스), Constant Volume Combustion Chamber(정적연소실), Constant Volume Specific Heat(정적비열), Methane(메탄), Heat Value(발열량), 당량비(Stoichiometric Ratio)

초록: 본 논문은 대형 상용기관을 모사한 정적연소실에서 매립지 가스의 연소 특성에 대한 복수의 논문 중 첫 논문으로, 연소특성을 연소화학양론 및 열역학적 측면에서 분석하고 이를 실험 결과와 비교하였다. 연소화학양론 및 열역학적 분석에서 연료조성과 당량비에 따라 기연가스의 조성이 변화하고 이에 따라 정적비열이 변화하여 동일 발열량에 최종압력은 변화하며, 이것은 실제 연소압력 측정결과와 대체로 일치한다. 연료조성과 당량비에 따른 상대적 압력변화 및 연소기간도 분석결과와 실험결과가 경향상 일치한다. 분석과 실험 결과 사이의 차이는 열전달량의 차이에 기인한 온도저하 및 이에 따른 정적비열의 변화가 주요 원인이며, 연소실 체적과 점화위치도 연소기간과 온도에 큰 영향을 준다. 최종적으로 정적연소에서 연료변환효율은 메탄 분율이 작을수록 그리고 당량비 0.8 ~ 0.9 사이에서 최대가 되며, 이러한 연료변환효율의 증가는 실물기관에서 비열비 감소의 효과를 상쇄하고 남으므로 순수 메탄보다 LFG의 연소가 효율 면에서 유리하다.

Abstract: This is the first 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 fundamental characteristics of fuel from the viewpoint of thermochemistry and thermodynamics and compares these results with experimental ones. The results show that the final pressures obtained from theoretical analysis vary under the same heating value owing to the change in the constant volume specific heat owing to the difference in the burned gas composition according to the fuel gas compositions; furthermore, the stoichiometric ratios and trends of analytical and experimental pressures coincide very well, although some minor differences are observed between the two. The root cause of the difference is the heat transfer, which changes the specific heat and lowers the temperature considerably, in the real combustion process. In addition, the large chamber volume and ignition position promote the heat transfer to the wall. Finally, the fuel conversion efficiency increases as the methane mol fraction decreases, and it is maximum when the stoichiometric ratio ranges from 0.8 to 0.9. These increases due to the composition and stoichiometric ratio could sufficiently compensate the decrease due to the specific heat ratio drop, LFG might be more advantageous than pure methane in a real engine.

1. 서 론

매립지 가스(landfill gas, 이하 LFG)는 폐기물 매립지에서 유기성 폐기물의 혐기성 발효에 의하여

생성되는데, 가스의 주성분은 메탄(CH₄)이며, 그 이외 이산화탄소(CO₂), 산소(O₂) 그리고 질소(N₂)등이 포함되어있다. 최근에는 LFG를 실용 에너지원으로서 사용하고자 하는 노력이 다양하게 시도되고 있으며, 국내에서도 대규모 매립지를 중심으로 LFG를 전력발전 및 보일러 연료 등에 사용하려는

* Corresponding Author, iyohm@seoultech.ac.kr

© 2013 The Korean Society of Mechanical Engineers

것도 그 노력의 일부이다. 하지만 LFG는 연료 성분 중 메탄과 이산화탄소의 비율이 매립지별로 상이할 뿐만 아니라, 불활성 기체인 CO₂ 성분을 다량 함유하고 있는데, 이에 따라 점화지연, 비열, 연소 속도가 달라져 전체적인 연소 특성 즉 연소기간, 배기 조성, 압력 등 연소특성이 변화한다. 또한 LFG를 사용하는 가스기관은, 대형 압축착화기관을 모태로 스파크 점화기관으로 개조한 경우가 대부분이다. 대형기관은 행정이 긴 장행정 기관이 주를 이루며, 스파크 점화기관으로 개조한 경우 통상적인 스파크 점화기관과 비교하여 기통 당 배기량이 매우 커지게 된다. 이에 따라 기관 실린더 내에 공급된 혼합기의 절대량이 크게 증가하고, 동시에 연료의 특성 상 불활성 가스(주로 CO₂)의 비율이 커서 연소속도가 낮아지므로, 한정된 사이클 기간 동안에 만족할 만한 수준의 연소율을 달성하는 것은 매우 어렵다.

본 연구에 앞서 Kim 등^(1,2)은 소형 정적연소실(CVCC, constant volume combustion chamber)에서 메탄-수소-공기 혼합기의 연소 특성을 당량비와 수소 첨가 비율을 변경하며 비교하였다. 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 LFG의 기본적인 연소특성을 조사하고 LFG의 연소속도에 대한 식을 제안하였다.

현재 메탄 및 LFG는 주로 대형 내연기관에 적용되는데, 지금까지는 소형 기관을 대상으로 한 모사,⁽¹⁻⁵⁾ 다른 연료와의 혼합⁽¹⁻³⁾ 그리고 기초연구^(6,7)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.⁽¹⁻⁵⁾ 더구나 LFG를 정적연소실에 적용한 예는 전무하다.

연소실 체적과 점화위치는 스파크점화 기관에서 실제 연소현상에 큰 영향을 준다. 대형기관인 경우, 연소실 체적 증가에 의해 연소시간이 증가하여 열전달 양이 증가한다. 점화위치가 실물기관과 같이 연소실 상부에 위치하면 화염면이 조기에 연소실 벽면에 도달하여 벽면 열전달 효과가 달라진다.

따라서 본 연구에서는 대형 기관을 모사한 정적연소실에서 점화위치를 실물기관과 동일한 위

치에 두고 메탄 및 LFG의 조성 및 당량비에 따른 연소특성에 대해 논의하고자 하며, 우선 특성을 연소화학양론 및 열역학적 측면에서 분석하고 이를 실험 결과와 비교하고자 한다.

2. 실험장치

본 연구에 사용한 실험 장치의 개략도를 Fig.1에 나타냈다. 실험 장치는 정적연소실, 예혼합 장치 그리고 화염 가시화 부분으로 구성되어 있다.

정적연소실의 제원은 Table 1과 같다. 정적연소실은 메탄 전용의 보어 152mm, 스트로크 165mm인 기관을 모사하였지만, 실제 스파크 점화기관에서의 연소는 대부분 ATDC 60 CA 근방에서 종료되고 연소가 지연된 경우에도 ATDC 90 CA이면 연소가 완료되므로, 이를 고려하여 연소실의 길이를 ATDC 90 CA에서의 피스톤 위치인 85.2mm로 하였다. 따라서 실물기관은 S/B=1.09인 장행정이지만 모사 연소실은 S/B=0.56인 단행정이 다. 연소실 윗면에 실물기관과 동일위치에 점화플러그를 장착하였고, 연소실 측면에 피에조형 압력센서(Kistler, 6117BFD17)를 장착하였다.

Table 1 Specification of CVCC

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

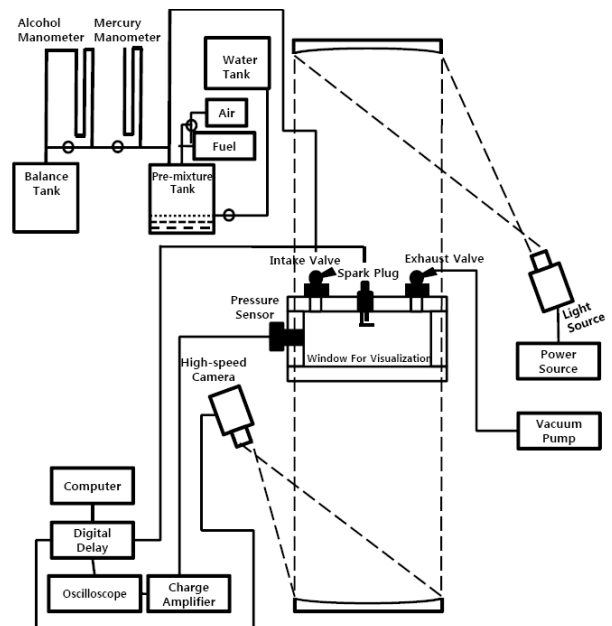


Fig. 1 Schematics of experimental apparatus

Table 2 Equivalent ratios and absolute methane portion according to fuel composition

Fuel (x_{CH_4})	ϕ	ϕ'	CH ₄ /(Air+ CO ₂), %	CO ₂ /(Air+ CO ₂), %
CH ₄ (1.0)	1.00	1.000	10.48	0
	0.90	0.900	9.43	0
	0.80	0.800	8.38	0
	0.70	0.700	7.34	0
LFG1 (0.9)	1.00	0.988	10.36	1.15
	0.90	0.889	9.32	1.04
	0.80	0.790	8.28	0.92
LFG2 (0.8)	1.00	0.974	10.21	2.55
	0.90	0.877	9.19	2.30
	0.80	0.779	8.17	2.05
LFG3 (0.7)	1.00	0.957	10.03	4.30
	0.90	0.861	9.02	3.88
	0.80	0.765	8.02	3.47
	0.70	0.670	7.02	3.05

예혼합기 제작은 수치환법을 사용하였다. 이 방법에서 연료계량을 에탄올 액주계로 하면, 메탄의 경우 제작된 혼합기의 당량비 오차는 이론적으로 0.02%이고, 누출 및 판독오차를 고려해도 0.1% 이내의 정밀도로 혼합기 제작이 가능하다.

LFG 모사를 위해 메탄과 이산화탄소를 혼합한 모사연료를 제작하였다. Table 2에 본 연구에서 사용한 모사연료의 조성구분과 이에 따른 혼합기 중 메탄의 비율을 나타내었다. 대형기관에서 메탄 및 LFG를 연료로 사용할 때, 대부분 이론당량비 이하에서 운전되므로 실험 시 당량비는 모두 $\phi \leq 1$ 로 하였다.

표에서 ϕ 는 통상적인 의미에서의 당량비(공기만 고려)이다. ϕ' 은 CO₂가 혼합된 경우, 메탄 100% ($x_{CH_4}=1.0$), $\phi=1$ 에서의 메탄 농도에 대해 실제 혼합기에 포함된 메탄의 상대적인 농도이며, 이는 CO₂에 의한 희석 효과를 고려한 일종의 총 혼합기(공기+CO₂+CH₄)에 대한 당량비로 볼 수도 있다. 본 연구에서는 논의의 편의를 위해 이를 수정 당량비라 칭하겠다. 이를 도입한 이유는 당량비만으로 혼합기 특성을 나타내면, 실제 혼합기에 포함된 메탄의 절대량(발열량)에 대한 정보가 없으므로 CO₂에 의한 희석 효과를 정확하게 나타낼 수 없기 때문이다.

3. 결과 및 고찰

3.1 연소화학양론 및 열역학적 분석

메탄은 탄화수소 계열 연료 중 탄소원자 수 1

Table 3 Burned gas composition(%) according to fuel composition and dissociation degree $\alpha=0.1$

Fuel	ϕ	CO ₂	H ₂ O	CO	O ₂
$x_{CH_4}=1.0$	1.00	9.48	18.96	-	0.00
	0.90	8.49	18.88	0.94	0.47
	0.80	8.62	17.23	-	1.91
	0.80	7.73	15.46	-	3.87
	0.70	6.83	13.66	-	5.86
$x_{CH_4}=0.9$	1.00	10.43	18.77	-	0.00
	0.90	9.33	18.67	1.04	0.52
	0.90	9.48	17.07	-	1.90
	0.80	8.52	15.33	-	3.83
	0.70	7.53	13.56	-	5.81
$x_{CH_4}=0.8$	1.00	11.58	18.53	-	0.00
	0.90	10.36	18.42	1.15	0.58
	0.90	10.54	16.87	-	1.87
	0.80	9.48	15.17	-	3.79
	0.70	8.40	13.43	-	5.76
$x_{CH_4}=0.7$	1.00	13.02	18.22	-	0.00
	0.90	11.64	18.11	1.29	0.65
	0.90	11.87	16.62	-	1.85
	0.80	10.69	14.97	-	3.74
	0.70	9.48	13.28	-	5.69

인 유일한 기체연료로, 분자량이 적기 때문에 몰당 발열량은 다른 탄화수소에 비해 적고, 반면 중량 당 발열량은 큰 특징을 가지고 있다. 연료 중 수소의 비중이 높기 때문에 가솔린과 비해 연소 생성물 조성에서 CO₂가 적고 H₂O가 많은데, CO₂ 감소보다 H₂O 증가 효과가 더 커서 연소 생성물의 비열은 가솔린보다 크고 비열비는 작다.

연소생성물의 비열이 크기 때문에 가솔린에 비해 연소온도와 압력은 낮아지지만, 이 압력저하 효과와 혼합기 중 연료의 체적 분율이 커서 동일 압축비에서 실제 압축비가 낮아지는 효과가 발생하여 원천적으로 옥탄가는 높다. 또한 비열비가 작기 때문에 효율에 미치는 영향은 다소 부정적이다. 본 연구에서 사용한 모사연료의 화학방정식은 다음과 같다. 연료에 포함된 메탄의 분율을 x 라 하면 임의의 당량비 ϕ 에서 산소 1몰에 대해 완전연소하면

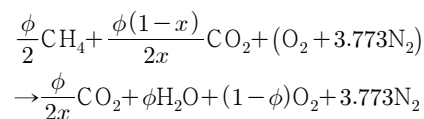


Table 3에 이 화학방정식으로 구한 기연가스의 조성을 나타내었다. 또한 $\phi=1.0$ 에서는 열해리가

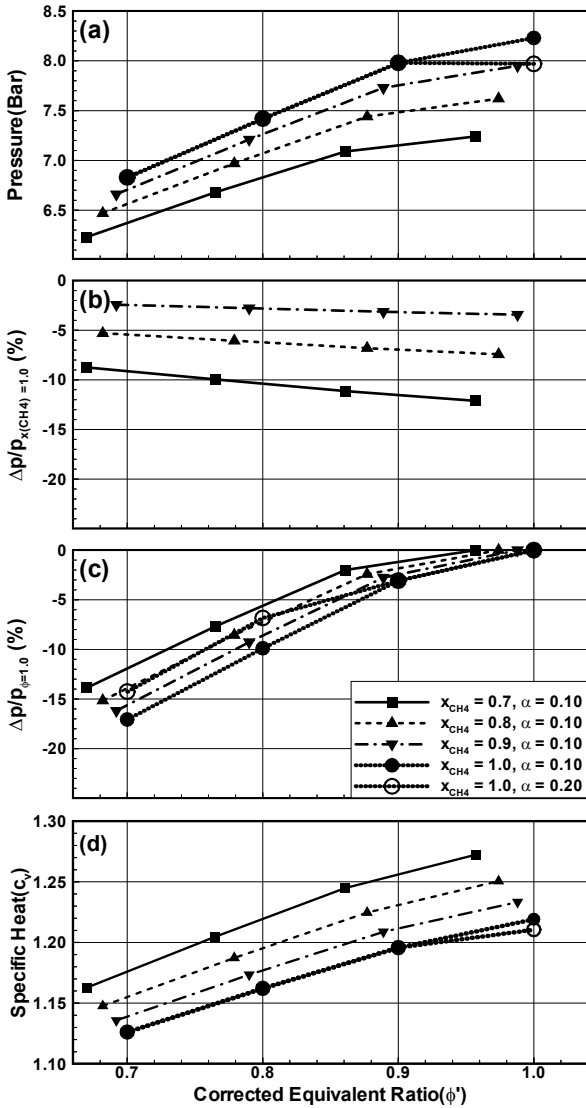


Fig. 2 Pressure(a), pressure reduction rate(b), (c) and constant volume specific heat(d) as a function of corrected equivalent ratio according to CH_4 fraction in adiabatic combustion

발생한다고 가정하는 것이 합리적이며, 열해리도 $\alpha=0.1$ 에서의 조성도 제시하였다. 이렇게 구한 조성에 기초하여 모사연료를 정적연소실에서 단일 연소한 경우 연료가스조성(x_{CH_4})에 따른 그리고 수정 당량비(ϕ') 변화에 따른 연소실의 최고연소 압력과 정적비열을 Fig. 2와 Fig 3에 나타내었다. $\phi=1$ 에서는 해리가 발생한다고 가정하였고($\alpha=0.1$ 또는 0.2) 기연가스 조성과 온도에 따른 비열은 NASA 평형프로그램의 다항식을 이용하여 구하였다.⁽⁸⁾

N_2 (기연가스에 가장 많이 포함), CO와 O_2 는 온도의 변화에 따라 비열의 변화가 크지 않으나

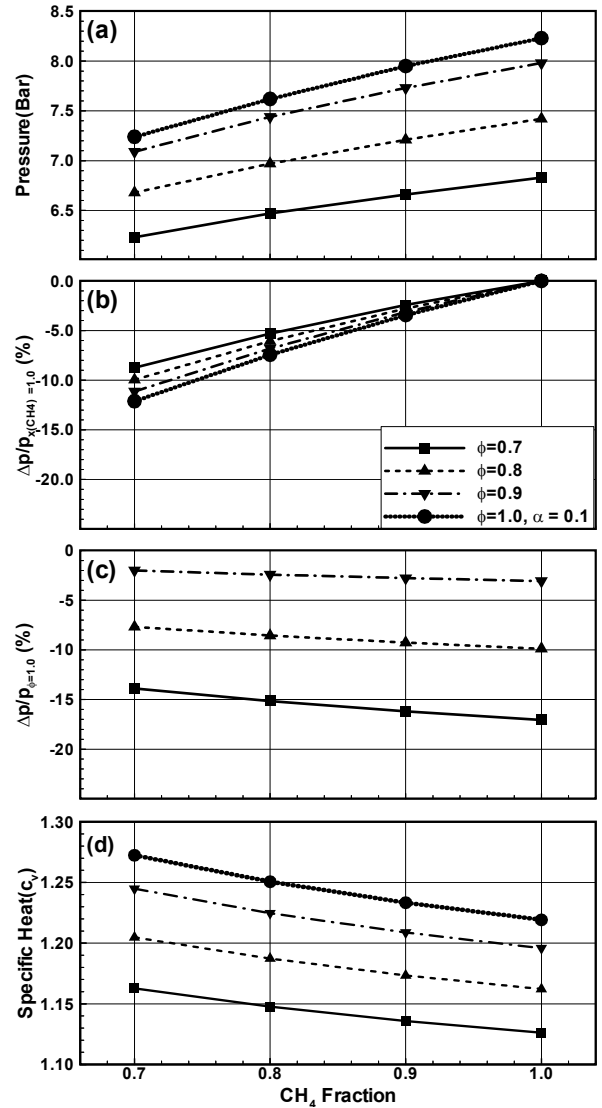


Fig. 3 Pressure(a), pressure reduction rate(b), (c) and constant volume specific heat(d) as a function of CH_4 fraction according to equivalent ratio in adiabatic combustion

CO_2 와 H_2O 는 온도 증가에 따라 크게 증가하는 특성이 있다. Table 3에 제시된 바와 같이 연료 중 x_{CH_4} 가 작으면 기연가스 중 CO_2 분율이 증가하고 H_2O 는 감소하지만, 상대적으로 CO_2 증가가 더 많아 Fig. 2(d), Fig. 3(d)에서 볼 수 있듯이 비열이 증가한다. 따라서 Fig. 2(a)와 Fig 3(a)에 나타난 바와 같이 동일 발열량에 비해 압력이 저하되는 특성이 있다.

한편 Fig. 2(b), Fig. 3(b)에서 $x_{CH_4}=1.0$ 에 대한 상대적인 압력저하는 x_{CH_4} 감소에 따라 확대되지만 동일 x_{CH_4} 에 대해서는 ϕ' (또는 ϕ)가 작을수록 축소된다. 이는 Fig. 2(d), 3(d)에서 볼 수 있듯이

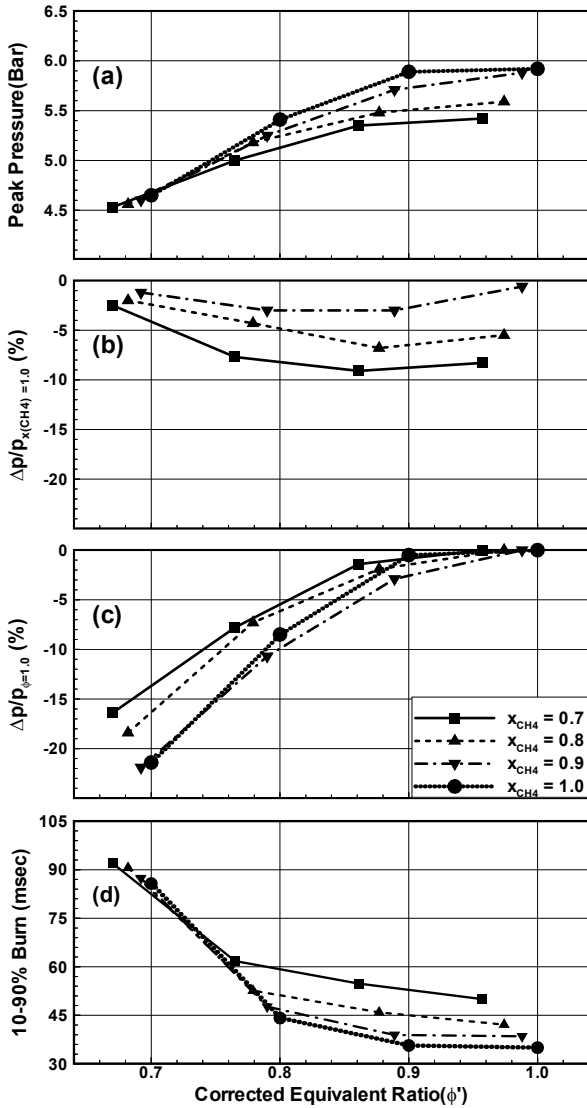


Fig. 4 Pressure(a), pressure reduction rate(b), (c) and 10 ~ 90 % mass burn duration(d) as a function of corrected equivalent ratio according to CH₄ fraction

동일 x_{CH_4} 에서 ϕ 감소에 따른 비열의 감소가 크기 때문이다. 마지막으로 $\phi=1.0$ 에 대한 압력저하를 나타낸 Fig. 2(c), Fig 3(c)를 보면 x_{CH_4} 가 작을수록 압력저하 폭은 축소된다. 이는 동일 당량비에서 x_{CH_4} 감소에 따른 비열의 증가가 더 작기 때문이다.

3.2 정적연소 특성

Fig. 4와 5는 모사연료를 정적연소실에서 연소한 경우 x_{CH_4} 과 ϕ' 변화에 따른 연소실의 최고압력과 주 연소(10 ~ 90% 연소) 시간을 나타냈다. 이를 열역학적 관점에서 해석한 Fig. 2, Fig. 3과

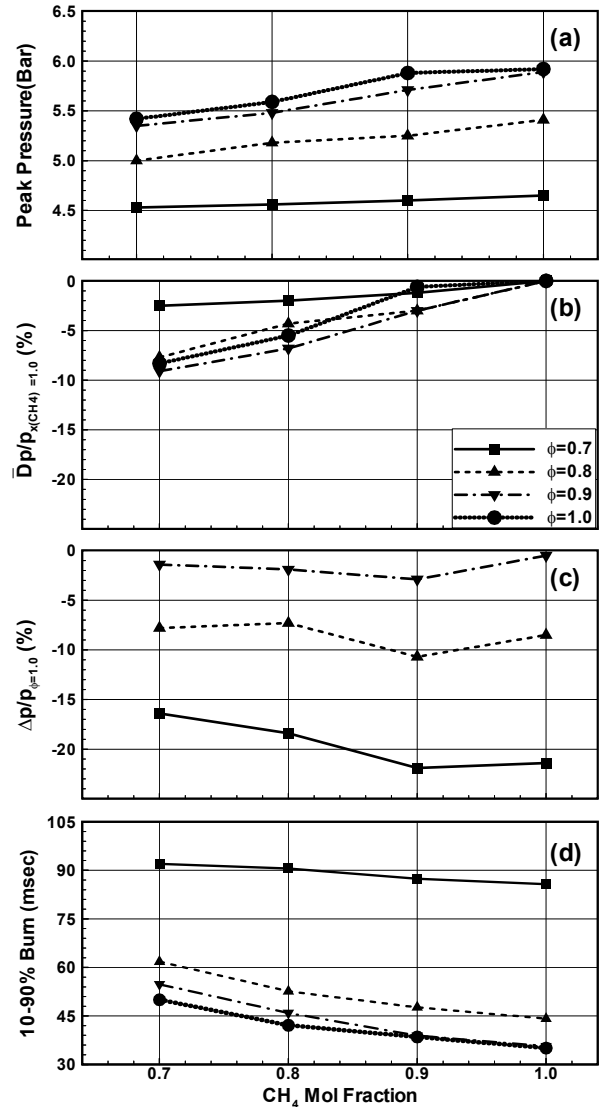


Fig. 5 Pressure(a), pressure reduction rate(b), (c) and 10 ~ 90 % mass burn duration(d) as a function of CH₄ fraction according to equivalent ratio

비교하면, 대체로 전체적인 경향에서는 일치하며 $\phi=1$ 에서 해리도 $\alpha=0.1$ ($x_{CH_4}=1$ 에서는 0.2) 가정은 상당히 합리적 범위에 있다고 할 수 있지만, 몇 가지 주목할 만한 변화가 관찰된다.

먼저 Fig. 4(a)와 Fig. 5(a)에서 ϕ' 와 x_{CH_4} 변화에 따른 최고압력은 이론값보다 상당히 낮은데, 이는 주로 연소실 벽면을 통한 열전달에 기인한 것으로 판단된다. 특징적인 것은 앞서 논의한 바와 같이 이론적 분석에서도 ϕ' 이 낮아질수록 압력의 차이는 정적비열의 변화에 의해 차이가 줄어들지만 실제의 경우 그 차이는 더 축소되어 나타났다. 차이가 줄어든 것은 Fig. 4(c)에 나타난 바와

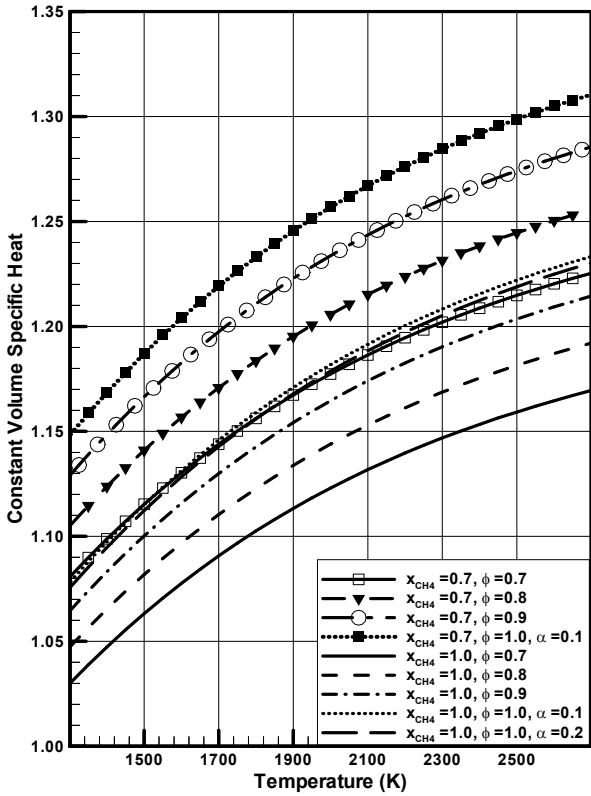


Fig. 6 Constant volume specific heat as a function of temperature according to CH₄ fraction and equivalent ratio

같이 x_{CH_4} 가 클수록 ϕ' 감소에 따른 압력의 저하가 상대적으로 크고 특히 $\phi'=1$ 에서 그 저하가 가장 크기 때문이다

이것은 일차적으로 발열량과 연소기간 차이에 기인한 열전달량의 차이가 가장 중요한 원인으로 작용했다고 판단되고, 특히 연소기간과 열전달은 연소실 체적과 점화위치에 큰 영향을 받은 것으로 판단된다. 즉 x_{CH_4} 가 클수록 발열량이 커서 온도차이 증가에 의한 벽면 전열량이 증가하고, 특히 Fig. 4(d)에서 볼 수 있듯이 $\phi < 0.8$ 에서는 연소기간이 급격히 증가하여 전열시간 증가로 전열량이 더 증가한 것이 원인으로 판단된다.

이에 더하여 기연가스가 조기에 연소실 벽면에 도달하는 것(점화위치 영향)과 연소기간 증대(연소실체적 증대 영향)에 의해 효과가 가중된 것으로 판단되며, 이러한 판단의 근거는 다음과 같다.

점화위치를 연소실 중심에 둔 소형 정적연소실에서 행한 기존 연구⁽¹⁻⁵⁾에서의 최고압력 및 연소기간과 본 연구의 최고압력과 연소기간을 비교하면, 초기 압력의 차이를 고려하더라도 본 연구의

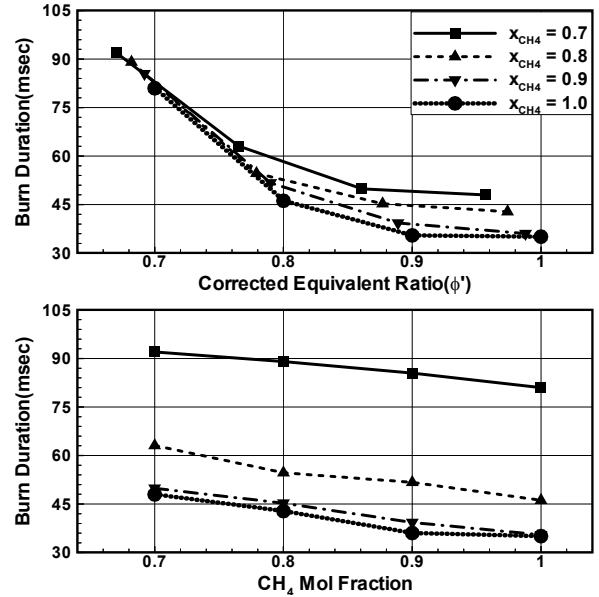


Fig. 7 Calculated burn duration with Arrhenius form reaction rate as a function of corrected equivalent ratio

최고압력이 약 10% 이상 낮고 연소기간도 30% 이상 증가하므로 체적과 점화위치의 효과가 크게 나타난 것으로 볼 수 있다. 이에 대한 구체적인 논의는 후속 논문에서 열발생율과 가시화 결과를 기초로 논의하겠다.

Fig. 4(b)와 Fig. 5(b)에 나타난 $x_{CH_4}=1.0$ 에 대한 상대적인 압력저하도 열역학적 분석결과와 경향은 일치하지만, x_{CH_4} 이 증가할수록 저하 폭이 축소되었다. 이는 실제 연소에서는 전열에 의해 온도 저하가 발생할 때 Fig. 6에 나타난 것처럼 x_{CH_4} 이 감소할수록 정적비열이 더 크게 감소한 것이 원인으로 판단된다. 또한 $\phi=1.0$ 과 $\phi=0.7$ 에서 실제 압력의 저하가 추가적으로 완화되었는데, $\phi=1.0$ 에서는 x_{CH_4} 가 클수록 그리고 $\phi=0.7$ 에서는 x_{CH_4} 가 작을수록 압력저하의 완화가 현격히 나타난다. 이 현상은 ϕ 에 따라 다음과 같이 서로 다른 기구에 의한 것으로 판단된다. 먼저 $\phi=0.7$ 에서는 다른 조건보다 온도가 낮고 역시 Fig. 6에 알 수 있듯이 온도가 낮을수록 x_{CH_4} 감소에 따른 비열의 감소가 크기 때문에 압력저하가 완화된 것으로 판단된다. $\phi=1.0$ 에서는 $x_{CH_4}=1.0$ 일 때 해리도가 높아 발열량이 저하되고 이에 따라 상대적인 압력저하가 완화된 것으로 판단된다.

반면 Fig. 4(c)와 Fig. 5(c)에 나타난 바와 같이 $\phi=1$ 에 대한 상대적인 압력저하는 $\phi=0.7$ 에서 이론

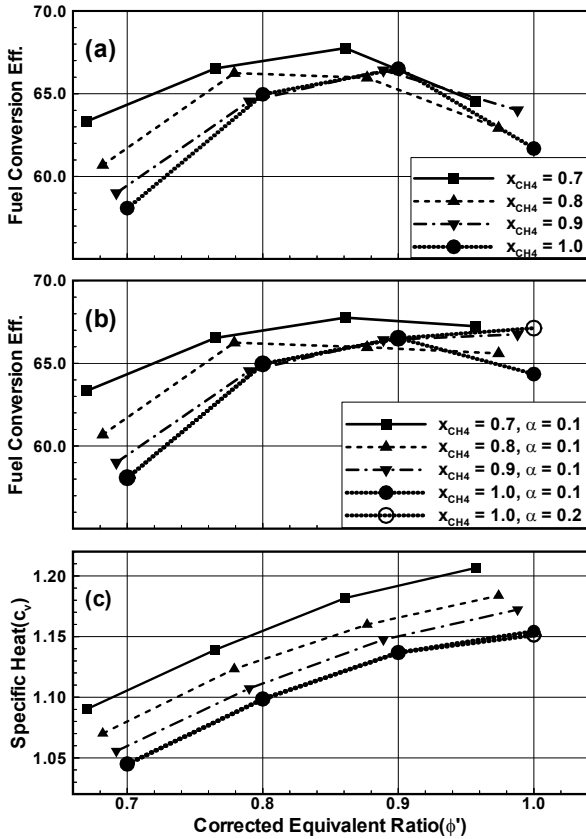


Fig. 8 Fuel conversion efficiency and constant volume specific heat as a function of corrected equivalent ratio according to CH₄ fraction

적인 저하보다 실제 저하가 상당히 크게 나타났는데 이는 앞서 언급한 바와 같이 느린 연소에 의한 연소기간 연장이 열전달량을 증가시킨 것이 원인으로 판단된다.

한편 Fig. 4(d)와 Fig. 5(d)에 나타난 바와 같이 $x_{CH_4}=0.7$ 에서는 다른 분율에 비해 연소기간(burn time, 질량기준)이 대폭 증가한다. 연소속도는 초기압력, 비열 및 열발생율에 영향을 받는데, 초기압력은 동일하므로 열 발생을 Arrhenius 형태로 가정하고⁽⁹⁾, 10 ~ 90% 연소는 층류연소로 볼 수 있으므로 열전도율 k , 활성화 에너지 E 를 상수로 두면

$$v \propto [(k/c_v)\exp(-E/RT)]^{1/2} \propto [(1/c_v)\exp(-1/T)]^{1/2}$$

이식을 이용해 실제 측정된 압력으로 비열과 온도를 유추하고, 실험에서 얻은 $x_{CH_4}=1, \phi=1$ 의 연소기간을 기준으로 환산한 결과를 Fig. 7에 제시하였다. 그림에 나타난 바와 같이 Arrhenius 형태의 열발생이 있는 경우 함수의 형태 상 x_{CH_4}

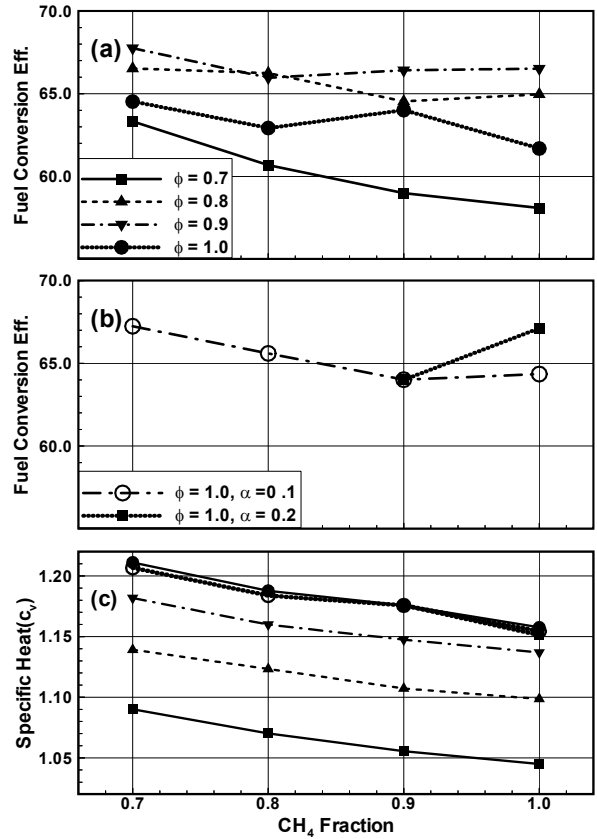


Fig. 9 Fuel conversion efficiency and constant volume specific heat as a function of CH₄ fraction according to equivalent ratio

=0.7에서 Fig. 4(d)와 같은 급격한 연소 기간의 증가가 나타날 수 있다. 실제 연소기간(Fig. 4(d))과 계산된 연소기간(Fig. 7)은 x_{CH_4} 와 ϕ 가 작을수록 차이가 발생하여 계산된 기간이 짧게 나타내는데, 만일 열전도율 k 까지 고려하여 계산하는 경우 온도가 낮을수록 k 는 감소하므로, x_{CH_4} 와 ϕ 가 작을수록 계산된 연소기간이 증가하여 실제 데이터와 계산 값은 더 근접한 결과를 나타낼 수 있다.

Fig. 8과 Fig. 9는 연료의 저위발열량에 기초하여 최고 압력에 도달하였을 때 x_{CH_4} 과 ϕ' 변화에 따른 연료변환효율(fuel conversion efficiency, $\eta_f = Q_{visible}/(m_f Q_{HV})$)과 정적비열을 나타낸 것이다. 이 그림에서 Fig. 8(a)는 연료의 발열량을 그대로 사용한 것이고 Fig. 8(b)는 $\phi=1$ 에서 해리도에 따라 발열량의 감소를 고려한 것이다.

먼저 Fig. 8(a)와 Fig. 9(a)는 연소과정에 의한 효율은 x_{CH_4} 가 작을수록 증가한다는 것을 보여준다. 이는 앞서 언급한 바와 같이 그림 Fig. 6에서 x_{CH_4} 이 감소할수록 정적비열이 더 크게 감소하고,

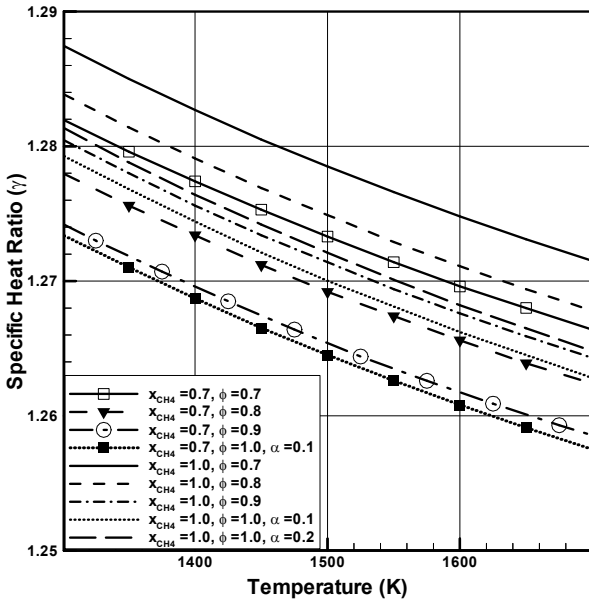


Fig. 10 Specific heat ratio as a function of burned gas temperature according to CH₄ fraction

따라서 Fig. 9(c)에서 알 수 있듯이 x_{CH_4} 이 작을 때 정적비열이 상대적으로 매우 작기 때문인 것으로 판단된다.

한편 ϕ 에 따른 효율의 변화는 $\phi=0.8 \sim 0.9$ 에서 비교적 높고 $\phi=1.0, 0.7$ 이 되면서 급격히 낮아짐을 알 수 있다. 먼저 $\phi=1$ 에서는 해리가 발생하면서 효율이 저하된 것으로 판단된다. 즉 Fig. 8(c)와 Fig. 9(c)에서 알 수 있듯이 해리에 의한 비열의 차이는 크게 없으며 오히려 해리에 의해 비열은 작게나마 감소하지만, $\alpha=0.1$ 에서 4.4% 그리고 $\alpha=0.2$ 에서 8.6%의 발열량 저하가 발생하므로 이것이 효율 저하의 지배적 원인이 된다. 따라서 해리되었을 때 발열량을 기준으로 연료변환효율을 구한 Fig. 8(b)와 Fig. 9(b)를 보면 해리도 증가에 따라 $\phi=0.9$ 와의 차이가 감소한다. $\phi=0.7$ 에서 급격한 효율저하는 역시 열전달 시간의 증가에 의한 것으로 판단된다.

여기서 효율과 관련하여 지적할 한 가지 중요한 측면이 있다. 연료-공기 정적연소 사이클 분석 결과에서 당량비가 낮을수록 그리고 잔류가스 분율이 클수록 연료전환효율이 높아진다는 것⁽¹⁰⁾과 본 실험의 결과는 대체는 일치하지만 실제 내용에는 차이가 많다. 이론적 분석에서는 열전달 및 연소과정에 대한 고려 없이 비열비 γ 와 조성 변화에 따른 전체적 사이클의 효율을 평가한 반면 본 논문에서는 열전달이 발생하는 대형 정적연소

실에서의 연소 특성만을 분석하였다. 따라서 효율 경향의 직접적인 비교는 의미가 없지만, 이러한 점을 고려할 때 다음과 같은 시사점이 있다.

첫째, x_{CH_4} 의 감소만으로도 정적비열 감소에 따라 정적연소과정의 연료전환효율은 증가하는데, 이는 연료-공기 사이클에서도 연소압력(온도)을 정적비열에 의해 산출하므로 동일한 증가효과이다.

둘째, ϕ 감소에 따라 연료-공기 사이클의 효율은 일관되게 증가하지만, 정적연소 효율은 감소한다. 이 감소의 원인은 연소기간 연장에 의한 열전달 효과가 주원인이다. 이와 더불어 실물기관에서는 유한연소속도에 의해 더 큰 효율의 저하가 발생할 것이 예상된다.

마지막으로 본 연구에서는 팽창과정이 없지만, 연료-공기 사이클은 팽창과정에서 비열비의 영향을 크게 받는데, Fig. 10에 나타낸 바와 같이 비열비는 x_{CH_4} 가 작을수록 그리고 ϕ 가 클수록 감소한다. 그러나 비열비가 가장 큰 $x_{CH_4}=1.0, \phi=0.7$ (본 연구에서는 $\gamma=1.2834$)과 가장 작은 $x_{CH_4}=0.7, \phi=1.0$ ($\gamma=1.2602$)에서 비열비에 따른 연료-공기 사이클의 연료변환효율의 차이는 압축비 10 ~ 13 범위에서 3% 정도이고 이는 정적연소 효율에서 발생한 6.5% 차이를 극복하지 못한다. 또한, 해리가 발생하지 않는 경우와 연소속도가 급격히 감소하는 $\phi=0.7$ 을 제외하고 가장 비열비 차이가 큰 것은 $x_{CH_4}=1.0, \phi=0.8$ ($\gamma=1.2703$)과 $x_{CH_4}=0.7, \phi=0.9$ ($\gamma=1.2620$)인데 이 경우 1% 정도의 효율차이가 발생하며 역시 정적연소 효율에서 발생한 2.8%를 극복하지 못한다. 다만 이러한 비열비의 차이로 실물기관에서는 x_{CH_4} 및 ϕ 에 따른 효율의 차이가 적게 나타날 것으로 예상된다. 따라서 메탄 자체의 연소보다 LFG의 연소가 효율 면에서 유리하다.

결론적으로 LFG의 정적연소특성은, 이론적으로 연료조성에 의한 기연가스 조성의 변화가 비열의 변화로 연결되어 압력 변화에 영향을 준다. 실제 연소의 경우 열전달이 발생하고 이 열전달은 체적과 점화위치에 의해 가중되며, 이에 따른 비열 변화에 의해 압력 및 연료전환효율에 변화가 발생하며, $\phi=1$ 에서는 해리에 의한 발열량의 감소가 효율에 큰 영향을 준다. 기연가스의 비열비는 연료조성에 따라 변하지만 이 비열비의 변화를 고려하여도 실물기관에서 x_{CH_4} 가 작을수록 그리

고 $\phi=0.8 \sim 0.9$ 에서 연료변환효율의 증가가 예상된다. x_{CH_4} 와 ϕ 가 작을 때는 연소속도의 증가에 의해 효율의 여지가 있는데, 이는 후속 논문에서 논의하도록 하겠다.

4. 결 론

대형기관을 모사한 정적연소실에서 LFG의 연소특성을 연소화학양론 및 열역학적 측면에서 분석하고 이를 실험 결과와 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 연소화학양론 및 열역학적 분석에서 연료 중 메탄 분율이 작으면 정적비열이 증가하여 동일 발열량에 비해 압력이 저하되며, 실제 연소 압력 측정 결과도 이와 일치한다.

(2) 연소화학양론 및 열역학적 분석에서 메탄 분율 1.0에 대한 상대적인 압력저하는 분율 감소에 따라 확대되지만, 동일 분율에 대해서는 희박할수록 비열의 감소가 크기 때문에 희박혼합기일수록 축소되며, 이 현상 역시 실제 연소 압력 측정 결과도 이와 일치한다.

(3) 연소화학양론 및 열역학적 분석에서 이론 당량비에 대한 압력저하는 동일 당량비에서 메탄 분율 감소에 따른 비열의 증가가 더 작기 때문에 메탄 분율이 작을수록 압력저하 폭은 축소되며, 실제 연소 압력 측정 결과에서도 동일한 결과를 얻었다.

(5) 연소기간은 메탄 분율 보다 당량비에 더 큰 영향을 받아 당량비 감소에 따라 연소기간은 급속히 증가한다.

(6) 연소화학양론 및 열역학적 분석과 실험 결과와의 차이는 온도와 연소 기간에 의한 열전달량의 차이에 기인한 온도저하 차이 그리고 온도저하에 따른 정적비열의 변화가 주요 원인이며, 연소실 체적과 점화위치는 연소 기간과 온도의 영향을 준다.

(7) 정적연소 시 연료변환효율은 메탄의 분율이 작을수록 그리고 당량비 0.8 ~ 0.9 사이에서 최대가 되며, 이러한 연료변환효율의 증가는 실물기관에서 비열비 감소의 효과를 상쇄하고 남으므로 순수 메탄보다 LFG의 연소가 효율 면에서 유리하다.

후 기

이 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구

비 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) Choi, S., Jeon, C. and Chang, Y., 2003, "Combustion Characteristics of Methane-Air Mixture in a Constant Volume Combustion Chamber (2) : Inhomogeneous Charge," *Transaction of the KSAE*, Vol. 11, No. 4, pp. 29~36.
- (5) Choi, S., Jeon, C. and Chang, Y., 2004, "Combustion Characteristics of Methane-Air Mixture in a Constant Volume Combustion Chamber (3) : Exhaust Emission," *Transaction of the KSAE*, Vol. 12, No. 2, pp. 1~8.
- (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, 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.
- (8) Heywood, J. B., 1988, "Internal Combustion Engine Fundamentals," MacGraw-Hill, New York, pp. 100~109, 130~140.
- (9) Glassman, I., 1977 "Combustion," Academic Press, New York, pp. 67~68.
- (10) Heywood, J. B., 1988, "Internal Combustion Engine Fundamentals," MacGraw-Hill, New York, pp. 177~183.