

플레임트랩에 의한 메탄-공기 예혼합기의 연소특성에 관한 연구

김 덕 호^{*1)} · 이 재 효²⁾ · 최 수 진³⁾ · 조 규 백 · 정 동 수⁴⁾

건국대학교 대학원¹⁾ · 건국대학교 기계공학과²⁾ · 동양공전 기계설계과³⁾ · 한국기계연구원⁴⁾

A Study on Combustion Characteristics of Pre-mixed CH₄-air by Flame Trap

Deokho Kim^{*1)} · Jaihyo Lee²⁾ · Sujin Choi³⁾ · Gyuback Cho · Dongsoo Jeong⁴⁾

¹⁾Graduate School, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea

²⁾Department of Mechanical Engineering, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea

³⁾Department of Mechanical Design, Dongyang Tech. College, Seoul 152-714, Korea

⁴⁾Korea Institute of Machinery and Materials, 171 Jang-dong, Yuseong, Daejeon 305-343, Korea

(Received 25 May 2004 / Accepted 9 December 2004)

Abstract : Exhaust gas emissions from internal combustion engines are one of the major sources of air pollution. And, it is extremely difficult to increase gasoline engine efficiency and to reduce NO_x and PM(particulate matter) simultaneously in diesel combustion. This paper offers some basic concepts to overcome the above problems. To solve the problems, a recommended technique is CAI(controlled auto-ignition) combustion. In this paper, a flame trap was used to simulate internal EGR(exhaust gas recirculation) effect.

An experimental study was carried out to find combustion characteristics using homogeneous premixed gas mixture in the constant volume combustion chamber(CVCC). Flame propagation photos and pressure signals were acquired to verify the flame trap effect. The flame trap creates high speed burned gas jet. It achieves higher flame propagation speed and more stable combustion due to the effect of geometry and burned gas jet.

Key words : Exhaust gas emissions(배기배출물), CAI Combustion(제어자발화 연소), Internal EGR(내부 배기가스 재순환), CVCC(정적연소기), Flame trap(플레임 트랩), Burned gas jet(기연가스제트)

Nomenclature

P : pressure, bar
T : temperature, °C
phi : equivalence ratio

Subscripts

i : initial
pmax : maximum pressure
max : maximum

1. 서론

세계적으로 강화되는 배기가스 규제와 자원의 효율적인 활용의 면에서 저공해 엔진에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 일반적으로 가솔린기관의 경우 스파크 플러그의 작은 간극 사이의 혼합기 농도의 변화에 따라 연소에 큰 영향을 미치고 이로 인해 엔진 출력 및 열효율에 영향을 미친다.¹⁾ 또한 이상연소 현상인 노킹(Knocking)을 피하기 위하여 압축비를 낮춤으로서 엔진효율의 저하가 발생한다.²⁾ 또한 디젤엔진의 경우 연소실 전체의 평균 공연비

^{*}To whom correspondence should be addressed.
dhkim@kcs.ac.kr

는 희박하지만 국소적으로 과농하여 희박한 영역에서는 질소산화물(NOx)이 발생하고 상대적으로 과농한 영역에서는 Soot가 발생되는 문제점이 있다.³⁾ 그리고 배기가스 재순환(Exhaust gas recirculation, EGR) 방법을 적용함으로써 NOx를 저감할 수 있지만 soot에 대한 문제점을 가지고 있다.⁴⁾

이런 문제들에 대한 대안으로 현재 활발하게 진행되고 있는 제어자발화(Controlled auto-ignition) 연소방식은 연소를 시작하기 위한 장치가 필요 없고 배기가스재순환에 의한 희박연소를 통해 NOx를 95% 이상 줄일 수 있다.^{5,7)} 또한 싸이클 변동을 무시할 정도로 연소 싸이클간의 변화가 적고, 엔진부하는 공연비와 EGR 양에 의해 결정되어 스로틀에 의한 손실 역시 막을 수 있다.⁸⁾ 그리고, 사용 연료에 대한 제약이 거의 없다는 장점을 가지고 있다.⁹⁾ 이러한 장점을 지닌 제어자발화 연소를 실현하기 위하여 내부 EGR을 이용하는 연구들이 진행되고 있다. 내부 EGR은 2행정 기관에서 발생하는 현상이지만, 이를 4행정기관으로 적용하기 위한 연구들로서 예혼합기를 예열한 연구¹⁰⁾와 AVT(Active valve train)을 이용한 연구⁷⁾가 진행되었다. 이 중 AVT를 이용한 연구의 경우 흡입공기를 예열할 필요가 없어 실제 적용에 더욱 가까워진 실험결과를 얻고 있다. 또한 예연소실을 가지는 엔진을 이용한 연구¹¹⁾에서는 예연소실에서 발생한 기연가스 분류(Jet)가 내부 EGR과 같은 역할을 하여 연소 배기가스 중의 NOx가 상당히 낮게 나타나는 결과를 얻었다.

본 연구에서는 이와 같은 장점을 가지는 제어자발화 연소를 위한 기초단계로 활성화학종에 의한 연소 특성을 살펴보기 위하여 연소상태를 정확히 관찰할 수 있는 정적연소기¹³⁾를 이용하여 연소실 내부에 플레임 트랩(Flame trap)을 설치하고¹⁴⁾ 이 플레임 트랩의 효과에 의한 연소특성을 연소가시화 및 압력 해석을 통하여 해석하였다.

2. 실험장치 및 방법

연소실내에서 발생하는 화염전파를 방해하여 기연가스에서 발생하는 활성화학종이 미연가스에 작용할 수 있도록 구성한 실험장치의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 사용된 정적연소기는 내경이 70mm,

폭은 33mm인 실린더 형태이다. 그리고, 연소실의 가시화를 위하여 양쪽 측면에 가시화용 창을 설치하여 화상을 취득할 수 있도록 하였다.

예혼합기의 연료로 메탄(CH₄)을 사용하였다. 메탄은 물리적인 특성이 이미 잘 알려져 있고 또한 탄화수소계열 중에서 가장 안정된 연료로 자발화를 일으키기 어려운 특성을 지니고 있어 자발화 특성을 파악하기 위한 연료로서 상당한 강점을 가진 연료이다. 그리고 균질의 예혼합기를 형성하기 위하여 혼합탱크에 혼합용 팬을 설치하여 연료 공기가 충분히 혼합될 수 있도록 하였다. 또한 원활한 배기와 동일한 실험조건을 위하여 진공펌프를 배기 측에 설치하였다.

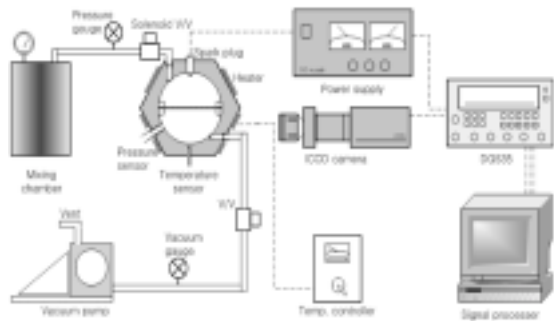


Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

Table 1 Experimental conditions

| | Base | Trap |
|--------------------------|------------------|------|
| Initial pressure (bar) | 3 and 5 | |
| Initial temperature (°C) | 40, 70 and 100 | |
| Equivalence ratio | 0.6, 0.8 and 1.0 | |

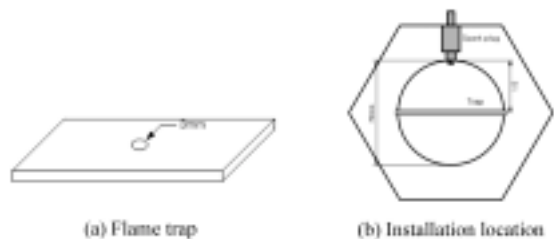


Fig. 2 Flame trap and installation location

초기 온도를 제어하기 위하여 정적연소기에 히터(Heater)를 설치하였고, 히터 제어기를 이용하여 일정한 초기 온도 조건이 되도록 설정하였다. 연소 화

상을 취득하기 위하여 ICCD 카메라(Roper Scientific Inc. Pi-max)를 사용하였고, 신호들의 동기를 위하여 펄스 발생기(ATS Instrument Inc., DG535)를 사용하였고, 연소압력을 측정을 위하여 압력센서(Kistler Co., Model 6067C)를 연소실에 설치하여 연소압력을 계측하였다.

실험은 압력 레귤레이터로 초기 압력을 설정하여 연소실 내로 혼합기를 도입하고, 초기화염 전파를 층류조건으로 수행하기 위하여 혼합기가 도입된 후 충분히 시간이 경과한 후에 연소하는 방법으로 수행하였다. 실험조건은 Table 1에 나타낸 바와 같이 당량비, ϕ 를 0.6, 0.8, 그리고 1.0, 초기 압력, P_i 는 3과 5bar, 초기 온도, T_i 는 40, 70, 그리고 100 °C로 변화시켜 가며 실험을 수행하였다.

본 실험에서 사용된 플레임 트랩을 Fig. 2(a)에 나타내었다. 이는 화염이 고체면에 가깝거나 화염의 온도가 낮아지면 층류 예혼합 화염이 전파화염으로 존속할 수 없게 되는 특징을 이용한 것으로 예혼합 화염의 화염전파를 중간에 차단하기 위한 것으로 사각판(두께 4mm)의 한가운데에 직경 3mm의 홀을 가공한 것이다. 이 홀을 통하여 화염의 소멸과 함께 연소된 기연가스가 통과할 수 있도록 하였다.

화염은 초기에 벽면에서 시작할 수 있도록 스파크플러그를 연소실 벽면에 설치하였고 플레임 트랩은 Fig. 2의 (b)에 보인 것과 같이 연소실의 1/2지점에 위치하도록 설치하여 실험을 수행하였다.

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 3과 4에 Base와 Trap 조건에 대한 $\phi=1.0$, $P_i=3\text{bar}$, 그리고 $T_i=40^\circ\text{C}$ 일 때의 화염전파 화상과 연소압력을 나타내었다. Fig. 3의 Base 조건에서는 화염의 전파가 전형적인 층류화염 전파를 보이고 있는 것을 확인할 수 있다. 반면 Fig. 4에 나타낸 Trap 조건의 경우는 화염이 플레임 트랩에 도달할 때까지 층류화염 전파거동을 보이다가 플레임 트랩에 화염이 가까워지면 플레임 트랩에 난 홀 쪽으로 화염이 신장되는 경향을 보인다. 그리고 화염이 홀을 통과하기 시작하면 화염전파가 급격하게 진행되어 순간적으로 연소가 종료되고 있다. 이와 같은 현상은 연소압력에서도 마찬가지로 화염의 초기에는

Base 조건과 같이 천천히 압력이 상승하다가 화염이 홀 아래쪽으로 전파되기 시작하면 급격하게 연소압력이 상승하는 경향을 보이고 있다.

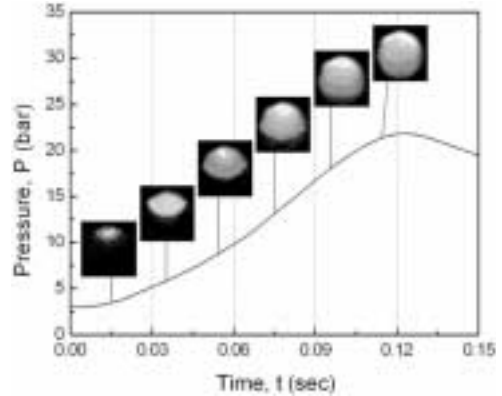


Fig. 3 Pressure and flame images at base condition ($\phi=1.0$, $P_i=3\text{bar}$, $T_i=40^\circ\text{C}$)

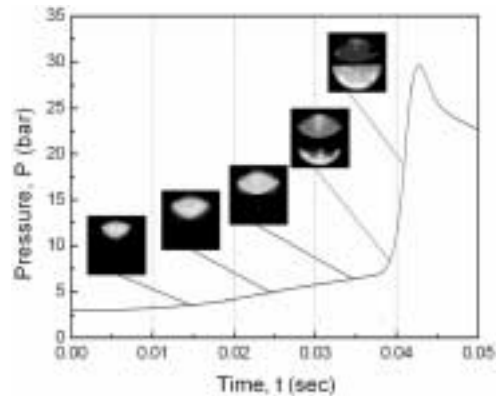
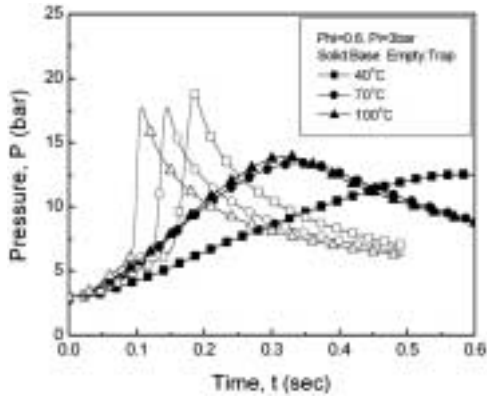


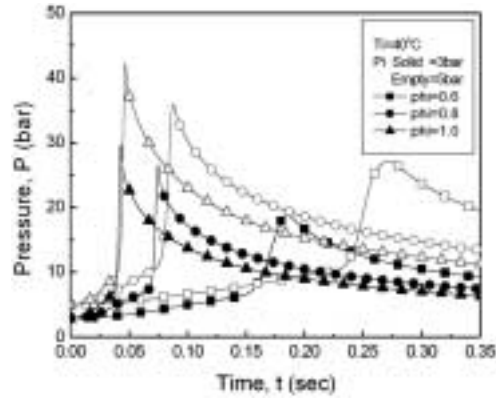
Fig. 4 Pressure and flame images at trap condition ($\phi=1.0$, $P_i=3\text{bar}$, $T_i=40^\circ\text{C}$)

Fig. 5에 $P_i=3\text{bar}$ 인 조건에 대하여 T_i 변화에 따른 결과를 나타내었다. 압력 값은 20회 이상 반복 실험을 통하여 구한 평균 압력 값이다. 그림으로부터 모든 조건에 대하여 T_i 가 높을수록 연소가 빨리 진행되는 것을 알 수 있다. 그리고 이론공연비에서 가장 빠르게 연소하는 것을 확인할 수 있다. 그렇지만 Base 조건과는 달리 Trap 조건에서는 플레임 트랩을 통과하고 난 후의 압력상승은 압력의 기울기에 큰 차이를 보이지 않고 있다.

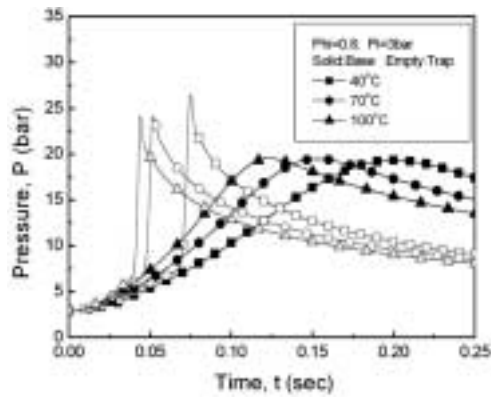
이는 초기온도가 연소에 미치는 영향보다 플레임 트랩을 통과하면서 발생하는 효과가 연소에 지배적



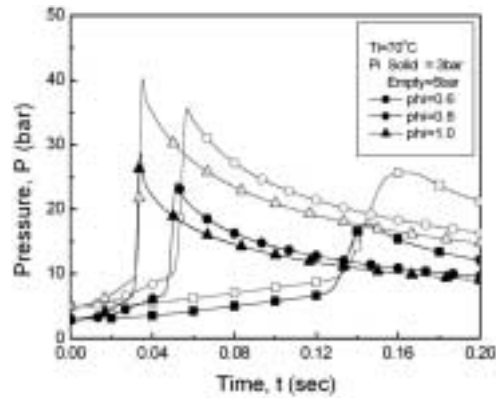
(a) $\phi=0.6$



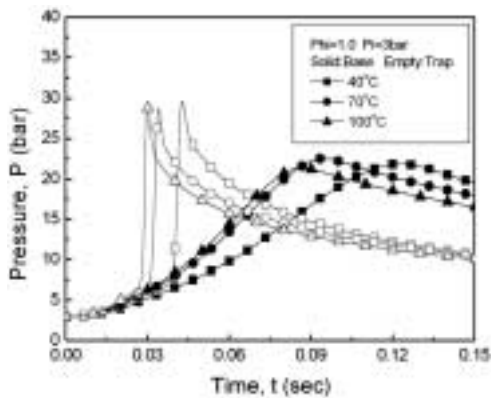
(a) $T_i=40^\circ\text{C}$



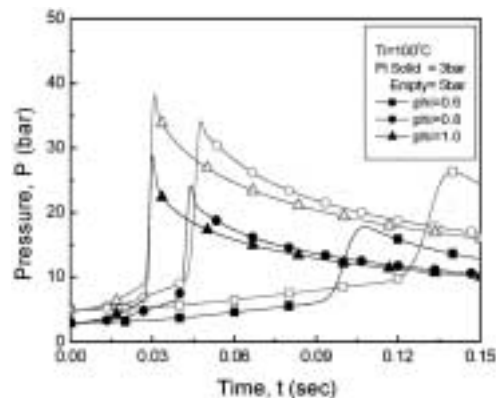
(b) $\phi=0.8$



(b) $T_i=70^\circ\text{C}$



(c) $\phi=1.0$



(c) $T_i=100^\circ\text{C}$

Fig. 5 Comparison of pressure data according to initial temperature ($P_i=3\text{bar}$)

Fig. 6 Comparison of pressure data according to initial pressure and equivalent ratio

으로 작용하고 있다는 사실을 보여주고 있다.

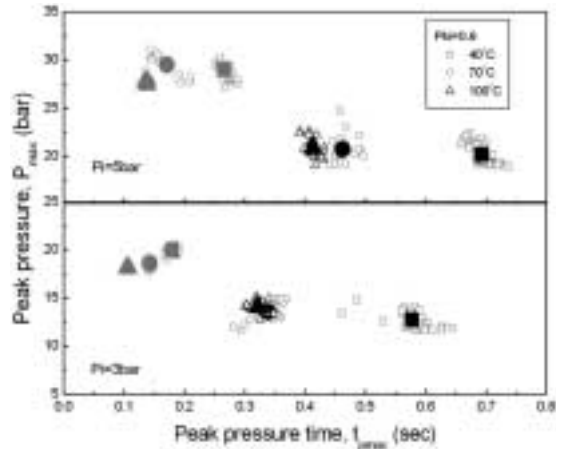
Fig. 6에 초기압력과 당량비에 따른 Trap 조건에서의 압력 값을 나타내었다. 초기온도와 당량비에

상관없이 모든 조건에 대하여 초기압력이 높으면 화염의 전파속도가 느린 것을 알 수 있다. 그렇지만 그 효과는 희박할수록 크게 나타나고 이론 공연비

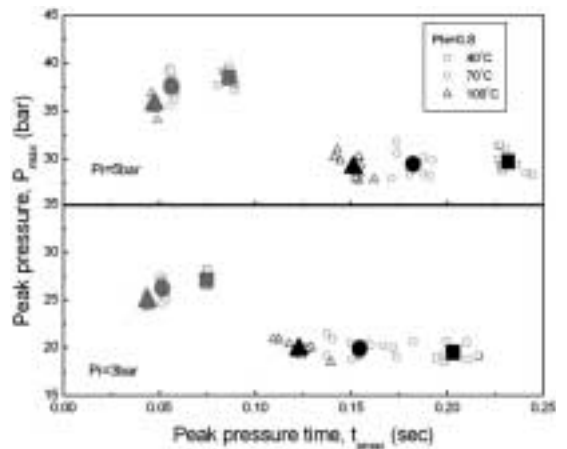
에서는 큰 차이를 보이고 있지 않는 것을 알 수 있다.

Fig. 7에 각 조건에 대한 최대 압력값(P_{max})과 최대 압력 시간(t_{pmax})에 대한 그래프를 나타내었다. 최대 압력 시간은 최대 압력값이 나타나는 시점의 시간으로 정의하여 사용하였다. Fig. 7에 나타난 작고 빈 표시는 각 실험값이고 크고 채워진 표시는 그 값들의 평균을 나타내고 있다. Fig. 7로부터 각 실험 조건에 대하여 Trap 조건이 Base 조건에 비하여 t_{pmax} 는 약 62-68% 정도 빨라지고 있고 P_{max} 는 약 25%에서 30% 정도 높게 나타나는 것을 알 수 있다. 이는 화염이 좁은 홀을 통과하면서 발생하는 유동에 의한 효과에 의한 결과로 생각되어진다. 그렇지만 Fig. 7에서 확인할 수 있는 것과 같이 Trap 조건이 Base 조건에 비하여 P_{max} 의 분포가 좁게 나타나고 있다. 이는 각 실험에 대하여 연소최고압력과 연소최고압력 도달시간의 편차가 작은 것을 나타내므로 연소가 보다 더 안정적으로 이루어졌다는 것을 보여주고 있다. 이는 플레임 트랩에 의해 생기는 강한 난류 유동과 함께 기연가스로부터 공급되는 활성화학종의 작용에 의한 것으로 판단되어진다.^{15,16)}

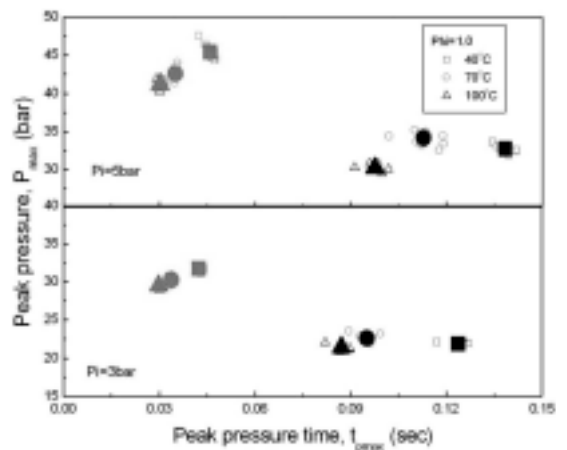
이와 같은 결과를 바탕으로 본 연구에서는 활성화학종의 효과를 확인하기 위하여 화염전파 중에 소염이 발생하도록 플레임 트랩의 형상을 사각판(두께 4mm)에 직경 1mm 홀을 중앙과 중앙에서 양 옆 5mm 지점(길이방향)에 가공한 것으로 변경하였다. 이는 화염의 통과하는 직경이 작을수록 벽면의 냉각효과나 화염신장의 영향 등에 의해 소염이 발생하기 쉽고, 연소조건에 따라 다르지만 일반적으로 소염이 일어나는 최소 원관직경은 1mm로 알려져 있다.¹⁷⁾ 이에 대한 실험결과를 Fig. 8과 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 8로부터 플레임 트랩 위쪽의 화염전파가 끝나는 지점($t=0.045\text{sec}$)에서 압력의 변곡점이 발생하고, 일정한 압력을 유지하고 있는 도중에 플레임 트랩 아래쪽에 자발화가 발생하고 있다. 이는 위쪽에서 발생한 유동효과와 활성화학종들이 지속적으로 홀을 통하여 아래쪽으로 공급되어 자발화 임계점에 이르러 자발화가 발생한 것으로 자발화는 열적인 반응보다는 활성화학종에 의한 연쇄반응에 의한 것으로 판단된다.¹⁵⁾ Fig. 9에 자발화 화상을 자세하게 나타내었다. 화상으로부터 48ms에서 아래



(a) $\phi=0.6$



(b) $\phi=0.8$



(c) $\phi=1.0$

Fig. 7 Peak pressure and its time ($\phi=1.0$)

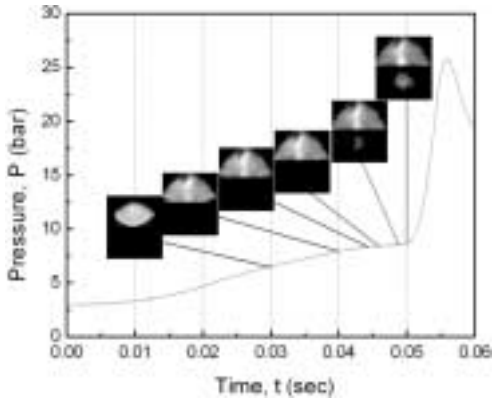


Fig. 8 Pressure vs flame images with 3hole type flame trap ($\phi=0.8$, $P_i=3\text{bar}$, $T_i=100^\circ\text{C}$)

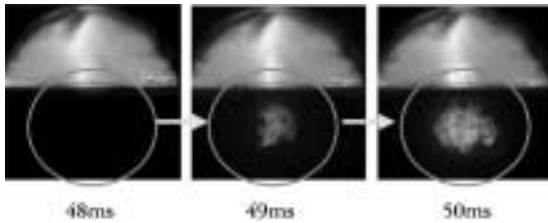


Fig. 9 Auto-ignition images ($\phi=0.8$, $P_i=3\text{bar}$, $T_i=100^\circ\text{C}$)

쪽에 화염이 존재하고 있지만 49ms가 되면 연소실 중앙 부분에 화염의 전파가 아닌 자발화로 보이는 화염이 생성된 것을 확인할 수 있다.

4. 결론

정적연소기에 플레임 트랩을 설치하여 메탄-공기 예혼합기의 연소특성을 살펴본 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 초기온도가 높고, 초기압력이 낮을 경우 화염의 전파속도가 빠르게 나타났다. 그렇지만 초기압력의 영향은 당량비의 영향에 비해 상대적으로 낮게 나타났다.
- 2) 플레임 트랩을 장착한 경우 최고연소 압력은 Base 조건에 대하여 약 25-30% 상승하였고, 최고압력까지의 연소 시간은 약 62-68% 정도 줄어들었다. 이는 플레임 트랩에 의해 발생하는 유동의 효과 및 기연가스로부터 공급되는 활성화학종의 영향에 의한 것으로 판단된다.
- 3) 플레임 트랩을 장착한 경우 연소가 보다 안정적인

로 이루어졌고, 또한 활성화학종에 의한 자발화 현상을 확인할 수 있었다.

References

- 1) K. Matsui, T. Tanaka and S. Ohigashi, "Measurement of Local Mixture Strength at Spark Gap of S.I. Engines," SAE 790483, 1979.
- 2) M. P. Halstead, L. J. Kirsch, A. Prothero and C. P. Quinn, "A Mathematical Model for Hydrocarbon Auto-ignition at High Pressure," Proc. Roy. Soc. Ser. A 346, pp.515-538, 1975.
- 3) R. W. Wheeler, Abnormal Combustion Effects on Economy Fuel Economy in Road Vehicles Powered by Spark-ignition Engines, Plenum, New York, 1994.
- 4) R. Stone, Introduction to Internal Combustion Engines, 3rd edn., MacMillan, New York, 1999.
- 5) J. Willand, R. G. Nieberding, G. Vent and C. Enderle, "The Knocking Syndrome-Its Cure and Its Potential," SAE 982483, 1998.
- 6) M. Christensen, B. Johansson and P. Einewall, "Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI) using Isooctane, Ethanol and Natural Gas - A Comparison with Spark Ignition Operation," SAE 972874, 1997.
- 7) D. Law, D. Kemp, J. Alen, G. Kirkpatrick and T. Copland, "Controlled Combustion in an IC-Engine with a Fully Variable Valve Train," SAE 2000-01-0251, 2000.
- 8) A. K. Oppenheim, "Quest for Controlled Combustion Engines," SAE 880572, 1988.
- 9) N. Iida, "Combustion Analysis of Methanol Fuelled Active Thermo-atmosphere Combustion(ATAC) Engine using a Spectroscopic Observation," SAE 940684, 1994.
- 10) N. Milovanovic, R. Chen, "A Review of Experimental and Simulation Studies on Controlled Auto-ignition Combustion," SAE 2001-01-1890, 2001.
- 11) S. Matsuoka, "A Research in the Cause of Simultaneous Reduction of NO_x-SFC on HONDA CVCC SI Engine," SAE 2000-01-1938, 2000.

- 12) B. Lewis and G. von Elbe, Combustion, Flames and Explosions of Gases, Academic Press INC., pp.333-413, 1987.
- 13) C. S. Lee, D. S. Kim and K. S. Oh, "A Study on the Combustion Characteristics of Methane - Air Mixture in Constant Volume Combustion Chamber," Transactions of KSAE, Vol.4, No.4, pp.201-209, 1996.
- 14) S. J. Choi, G. B. Cho and D. S. Jeong, "A Basic Study for Auto-ignition in CVCC by Internal EGR Effects," International Conference for Automotive Engineering, POSTECH, pp.205-210, 2003.
- 15) S. Yamaguchi, N. Ohiwa and T. Hasegawa, "Ignition and Burning Process in a Divided Chamber Bomb," Combustion and Flame, Vol. 59, pp.177-187, 1985.
- 16) S. Miura, T. Tsukamoto, S. Nakaoji and Y. Kaneko, "NO_x Formation with Various Combustion Processes of Premixed Gas," Mitsubishi Heavy Industries Technical Reviews, Vol.16, No.1, pp.44-55, 1979.
- 17) B. R. Choi and D. H. Lee, Combustion Engineering, Dong-myong Press INC., pp.146-147, 1998.