

## 정적연소기를 이용한 배탈-공기 예혼합기의 자발화 연소특성에 관한 연구

### A Study on the Auto-ignition Combustion Characteristics of CH<sub>4</sub>-Air Pre-mixtures in Constant Volume Combustion Chamber

이진수\*, 이해철\*, 차경옥\*\*, 정동수\*\*\*  
Jin-soo Lee, Hae-chul Lee, Kyung-ok Cha, Dong-soo, Jung

#### 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<sub>x</sub> 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, internal EGR(exhaust gas recirculation) effect is suggested to realize CAI combustion.

An experimental study was carried out to achieve CAI combustion using homogeneous premixed gas mixture in the constant volume combustion chamber(CVCC). A flame trap was used to simulate internal EGR effect and to increase flame propagation speed in the CVCC. Flame propagation photos and pressure signals were acquired to verify internal EGR effect. Flame trap creates high speed burned gas jet. It achieves higher flame propagation speed due to the effect of geometry and burned gas jet.

주요기술용어 (Keywords) : CAI(자발화), CVCC(정적연소기), Flame trap(플레임트랩),  
Burned gas jet(기연가스분류)

#### 1. 서론

강화되는 자동차 엔진의 배기가스 규제와 자원의 효율적인 활용의 면에서 저공해 엔진에 관한 연구가 최근에 활발하게 진행되고 있다. 일반적으로 가솔린기관의 경우 스파크 플러그의 작은 간극 사이의 혼합기 농도 변화에 따라서 연소뿐만 아니라 이로 인한 엔진 출력 및 열효율에 커다란 영향을 미치고 있다<sup>(1)</sup>. 또한

이상연소 현상인 노킹(Knocking)을 피하기 위하여 압축비를 낮춤으로서 엔진의 효율 저하가 발생하기도 한다<sup>(2)</sup>. 특히 디젤엔진인 경우에는 연소실 전체의 평균 공연비가 희박하지만 국소적으로 과농하여 희박한 영역에서는 많은 질소산화물(NO<sub>x</sub>)이 발생하며 상대적으로 과농한 영역에서는 Soot가 발생하는 문제점이 발생하기도 한다<sup>(3)</sup>. 따라서 배기가스 재순환(Exhaust gas recirculation, EGR) 방법을 적용함으로써 NO<sub>x</sub>를 저감할 수 있으나, 역시 soot에 대한 문제점은 여전히 남아있기 마련이다<sup>(4)</sup>.

이런 문제들에 대한 대안으로는 현재 활발하게 진행되고 있는 제어자발화(Controlled auto-

\* 명지대학교 대학원 기계공학과

\*\* 명지대학교 기계공학부

\*\*\* 한국기계연구원

ation) 연소방식은 연소를 시작하기 위한 장치 없이, 배기가스재순환에 의한 희박연소를 통해 NOx를 95%이상 줄일 수 있다는 것이다<sup>(3)</sup>. 아울러 사이클 변동을 무시할 정도로 연소 사이클간의 변화가 적고, 엔진부하는 공연비와 EGR양에 따라서 결정되며, 스로틀에 의한 손실도 역시 막을 수 있다<sup>(4)</sup>. 그리고 사용 연료에 대한 제약이 거의 없다는 장점을 가지고 있다<sup>(9)</sup>.

이러한 장점을 지닌 제어자발화 연소를 실현하기 위하여 내부 EGR을 이용하는 연구들이 최근에 많이 진행되고 있다. 이때 내부 EGR은 2행정 기관에서 발생하는 현상이지만, 이를 4행정기관으로 적용하기 위한 연구들로서 예혼합기를 예열한 연구<sup>(10)</sup>와 AVT(Active valve train)을 이용한 연구<sup>(17)</sup>가 진행되고 있다. 이 중 AVT를 이용한 연구의 경우 흡입공기를 예열할 필요가 없어 실제 적용에 더욱 가까워진 실험결과를 얻고 있다. 또한 예연소실을 가지는 엔진을 이용한 연구<sup>(11)</sup>에서는 예연소실에서 발생한 기연가스 분류(Jet)가 내부 EGR과 같은 역할을 하여 연소 배기가스 중 NOx는 상당히 낮출수가 있다.

따라서 본 연구는 제어 자발화 연소를 정적 연소기에서 연소실 내부에 내부 EGR을 모사할 수 있도록 플레임 트랩을 설치하였으며<sup>(12)</sup>, 그때의 연소특성을 연소가시화 및 압력을 통하여 해석과 분석을 하였다.

2. 실험장치 및 방법

연소실내에서 발생하는 화염전파를 방해하여 내부 EGR을 모사할 수 있도록 구성된 실험장치의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 사용된 정적연소기는 내경이 70mm, 폭은 33mm인 실린더형태이다. 그리고, 연소실의 가시화를 위하여 양쪽 측면에 가시화용 창을 설치하여 화상을 취득할 수 있도록 하였다.

예혼합기의 연료는 메탄(CH<sub>4</sub>)을 사용하였으며, 메탄은 단순한 연료로서 물리적 특성이 잘 알려져 있고, 또한 탄화수소계열 중에서 가장 안정된 연료이며, 자발화를 일으키기 어려운 특성을 지니고 있으나, 반면 자발화 특성을 파악하기 위한 상당한 장점을 가진 연료이다. 그리

고, 안정된 예혼합기를 형성하기 위하여 혼합탱크에 혼합용 팬을 설치하여 연료 공기가 충분히 혼합될 수 있도록 하였다. 또한 원활한 배기와 동일한 실험조건을 위하여 진공펌프를 배기 측에 설치하였다.

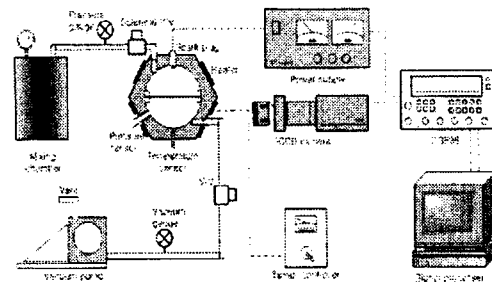


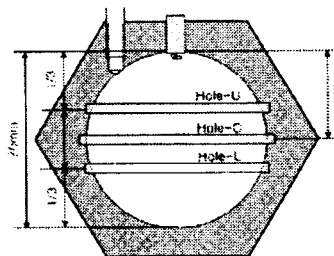
Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

Table 1 Experimental conditions

	Base	Hole-U	Hole-C	Hole-L
Pi (Initial pressure, bar)	3 and 5			
Ti (Initial temp. °C)	70 and 100			
Phi (Equivalence ratio)	0.6, 0.8 and 1.0			



(a) Flame trap



(b) Installation location

Fig. 2 Flame trap and installation location

초기 온도를 제어하고자 정적연소기에 히터(Heater)를 설치하였으며, 히터 제어기를 이용하여 일정한 초기 온도 조건이 되도록 설정하였다. 그리고 연소 화상을 얻고자 ICCD 카메라

(Mapar Scientific Inc. Pi-max)를 사용하였으며, 신호들의 동기화를 위하여 펄스 발생기(ATS Instrument Inc., DG535)를 사용하였고, 연소압력을 측정하기 위하여 압력센서(Kistler Co., Model 6067C)를 연소실에 설치하여 연소압력을 계측하였다.

실험은 압력 레귤레이터에 의해 초기 압력을 설정하고, 연소실 내에 혼합기를 도입하도록 하였으며, 초기화염 전과를 층류조건으로 수행하기 위하여 혼합기가 도입된 후 충분히 시간이 경과한 후에 연소하는 방법으로 수행하였다. 실험조건은 Table 1에 나타낸 바와 같이 당량비(Phi)를 0.6, 0.8, 1.0, 초기 압력(Pi)는 3bar와 5bar, 초기 온도(Ti)는 70°C와 100°C로 변화시켜 실험을 수행하였다.

본 실험에서 사용된 플레임 트랩(Flame trap)을 Fig. 2 (a)에 나타내었다. 이는 화염이 고체면에 가깝거나 신장을 받는 경우에 화염의 온도가 낮아지면 층류 예혼합 화염이 전과화염으로 존속할 수 없게 되는 특징을 이용한 것이다. 또한 예혼합 화염의 화염전과를 중간에 차단하기 위한 것으로 사각판(두께 4mm)의 한가운데에 직경 3mm의 홀을 가공한 것이다. 이 홀을 통하여 화염 및 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 스파크 플러그로부터 연소실 직경의 1/3, 1/2, 그리고 2/3 지점(각각 Hole-U, Hole-C, Hole-L)에 설치하여 실험을 수행하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

먼저 플레임 트랩의 유무에 따른 연소특성을 살펴보기 위하여 Phi=0.8, Pi=3bar에 대한 Base와 Hole-C 조건에서의 압력 값을 비교하여 Fig. 3에 나타내었다. 연소 개시후 초기 화염전과에 의한 압력 상승은 Base와 Hole-C가 일치하는 것을 확인할 수 있다. 그렇지만 Hole-C의 경우 일정한 지점을 통과하면서 압력이 급격하게 상승하는 것을 알 수 있다. 이는 화염이 플레임 트랩을 통과하면서 발생하는 효과에 의하여 화염전과가 급격하게 진행된 것으로 판단된

다. 이는 초기온도(Ti)가 일정한 조건으로 Hole-C에서 연소압력이 급격하게 증가하기 전까지는 Base와 동일한 연소 압력 상승을 나타내는 것으로부터 확인할 수 있다. 즉, 화염이 플레임 트랩을 통과하기 전까지는 층류화염전과 형태로 진행되다가 플레임 트랩을 통과한 화염은 급속도로 연소가 진행되어 연소 최고압력이 나오는 시간은 62%~68% 정도로 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 또한 연소 최고압력도 약 25%~30%정도 높게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

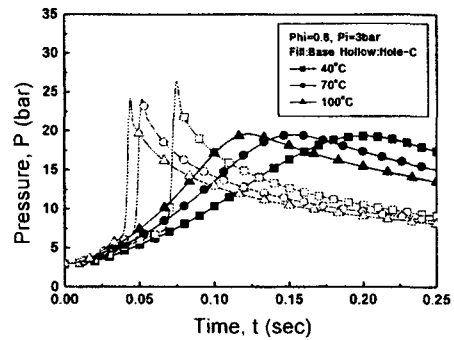
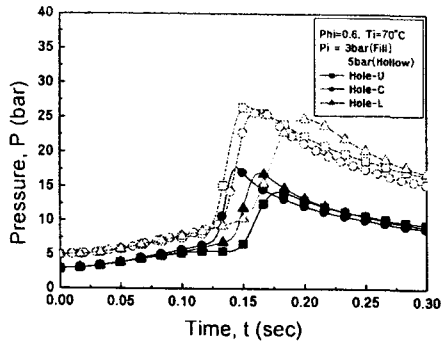


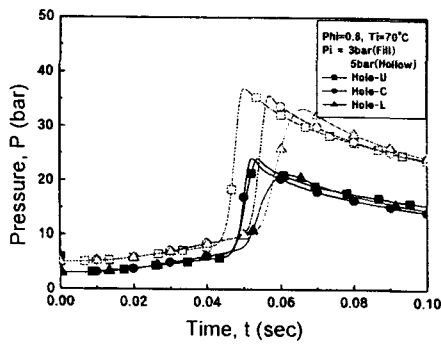
Fig. 3 Comparison of pressure change data according to Ti (Phi=0.8, Pi=3bar)

Fig. 4에는 초기온도(Ti)가 70°C일 때에 대한 당량비와 초기압력 및 플레임 트랩의 설치 위치에 따른 연소압력의 변화를 나타낸 것이다. 그림으로부터 초기압력이 높으면 연소 최고압력이 높게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 그리고 화염의 전과속도는 앞선 Fig. 3으로부터 화염의 전과는 플레임 트랩을 통과하기 전까지는 층류화염전과이므로 플레임 트랩의 거리에 비례하여 결정되어지므로 플레임 트랩의 위치에 따른 조건인 Hole-U > Hole-C > Hole-L > Base의 순서로 화염전과속도가 빠르게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 그렇지만 Fig. 4의 (a) Phi=0.6인 경우 Hole-U가 오히려 Hole-L보다 느린 압력상승을 보이고 있다. 그리고 다른 조건의 압력 상승과는 달리 한번의 변곡점을 거치고 난 후 압력이 재상승하는 것을 확인할 수 있다. 또한 Fig. 4의 (b) Phi=0.8인 경우도 Hole-U가 Hole-C 보다 느린 압력 상승을 보이고 있고 또한 연소압력에 변곡점이 있다는 것

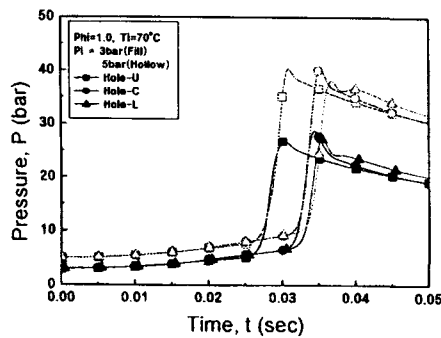
을 확인할 수 있다.



(a) Phi=0.6



(b) Phi=0.8



(c) Phi=1.0

Fig. 4 Comparison of pressure change data according to Phi (Ti=70°C)

Fig. 5. 6 그리고 7에 초기 압력(Pi)가 3bar 이고, 초기온도(Ti)가 70°C인 경우 낭량비에 따른 화염전파 화상을 나타낸 것이다. 그림 아래쪽에 표시한 숫자는 점화 후의 시간(msec)을

나타낸 것이다. Fig. 5는 낭량비(Phi)는 0.6이고 초기압력(Pi)가 3bar, 그리고 초기온도(Ti)가 70°C인 조건에서 화염전파 화상을 나타낸 것이다.

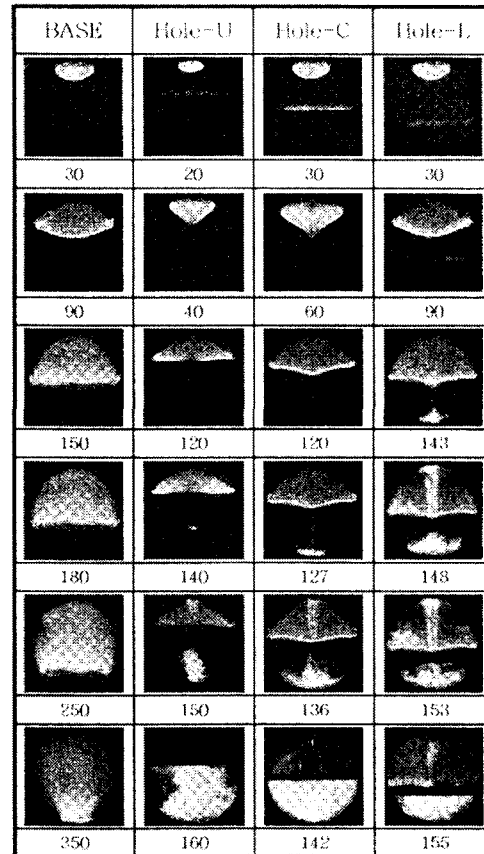


Fig. 5 Flame propagation photo(Phi=0.6, Ti=70°C, Pi=3bar)

Fig. 4에서 설명한 것과 같이 화염은 플레임 트랩을 지나기 전까지는 층류화염으로 전파되지만 플레임 트랩을 화염이 통과하고 나면 플레임 트랩의 형상에 의한 유동의 효과로 급속하게 연소가 진행되는 것을 확인할 수 있다. Hole-C와 Hole-L의 경우 화염 전파가 플레임 트랩의 홀을 통하여 계속 유지가 되면서 연소가 진행되어 압력의 상승 결과를 보인 것에 비해 Hole-U 조건의 경우는 화염이 플레임 트랩 위쪽의 연료-공기 혼합기가 다 연소할 때까지 아래쪽에는 연소가 진행되지 않다가 어느 순간(140ms)에 플레임 트랩 아래쪽에서 연소가 급격하게 진행되는 것을 확인할 수 있다. 이로부터

더 앞서 발생한 일파의 연가점은 플레임 트랩 위쪽의 연료-공기 혼합기가 다 연소된 후 약간의 시간 차이를 두고 플레임 트랩 아래쪽에 자발화가 발생되면서 연소가 진행되었기 때문에 생긴 것이라고 판단된다. 이처럼 자발화는 기연 가스가 플레임 트랩의 홀을 통하여 플레임 트랩 아래로 꾸준히 공급되어 고온에 의한 연소 개시보다는 활성화확종에 의한 연쇄반응으로 연소가 시작되었다고 생각되어진다<sup>(14)</sup>.

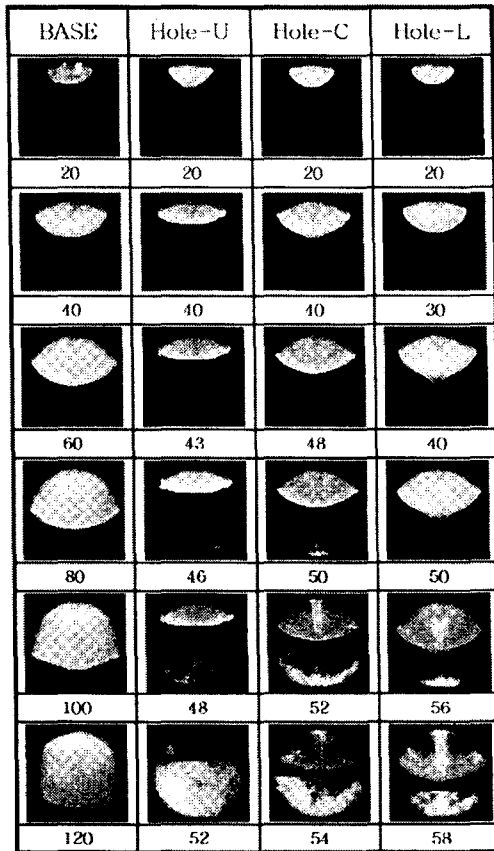


Fig. 6 Flame propagation photo( $\Phi=0.8$ ,  $T_i=70^\circ\text{C}$ ,  $P_i=3\text{bar}$ )

Fig. 6에 당량비( $\Phi$ )가 0.8이고, 초기압력( $P_i$ )이 3bar, 그리고 초기온도( $T_i$ )가  $70^\circ\text{C}$ 인 경우의 화염전파화상을 나타낸 것이다. Fig. 4의 (b)에서 초기압력( $P_i$ )이 3bar인 경우 Hole-C가 Hole-U보다 화염전파가 좀 더 빠르게 진행되는 것을 연소압력으로부터 확인할 수 있는데 이는 연소화상과 비교하여 보면 플레임 트랩

위에서 발생한 연소가스가 계속해서 아래로 공급(43ms)되기는 하지만 플레임 트랩 아래쪽에 연소가 개시(46ms)되기까지 약간의 시간 지연을 가지는 것을 알 수 있다.

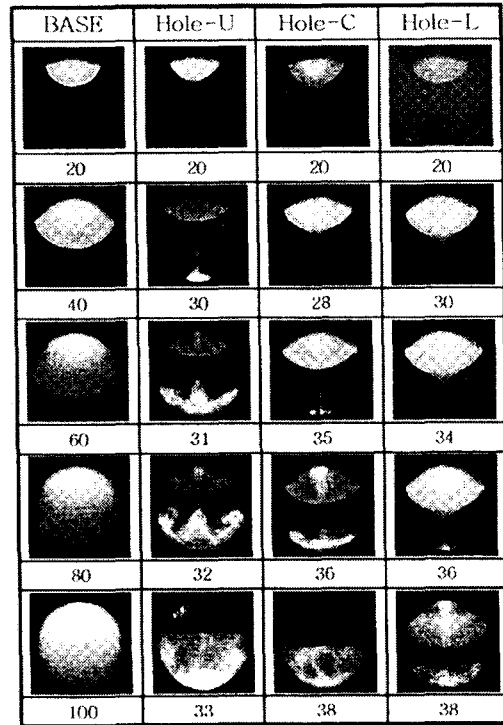


Fig. 7 Flame propagation photo( $\Phi=1.0$ ,  $T_i=70^\circ\text{C}$ ,  $P_i=3\text{bar}$ )

Fig. 7에 당량비( $\Phi$ )가 1.0이고, 초기압력( $P_i$ )이 3bar, 그리고 초기온도( $T_i$ )가  $70^\circ\text{C}$ 인 조건에서 연소화상을 나타낸 것이다. 화염의 전파는 플레임 트랩까지는 층류화염전파의 거동을 나타내다가 플레임 트랩 부근에서 플레임 트랩의 홀로 화염이 약간씩 신장되지만, 화염이 아래쪽으로 빠져나가면서 연속적으로 화염이 전파하는 확인할 수 있다. 따라서 앞서 연소압력에서 나타난 것과 같이 Hole-U > Hole-C > Hole-L > Base의 순서로 압력이 빠르게 상승하는 것을 확인할 수 있다. 그러므로 당량비와 플레임 트랩의 장착 위치에 따라 화염의 자발화가 일어나는 조건이 다르게 나타내고 있고 또한 화염전파시 자발화가 일어나지 않는 한 화염의 전파속도는 층류화염이 전파하는 거리에 비례적인 것을 확인할 수 있다.

Fig. 7에 당량비(Phi)가 1.0이고 초기압력(Pi)이 3bar에 대한 질량연소분율(Mass fraction burned)을 나타낸 것이다. 질량연소분율은 Elbe의 식을 사용하였으며, 이 식은 다음과 같다.

$$M_f(t) = \frac{P(t) - P_i}{P_{\max} - P_i} \quad \text{----- (1)}$$

질량연소분율은 그래프에서 확인할 수 있듯이 화염이 플레임 트랩을 통과하기 전까지는 거의 유사하다가 플레임 트랩을 통과하면서 급격하게 변화하는 것을 확인할 수 있다. 또한 플레임 트랩을 통과하고 난 후의 질량연소분율의 기울기는 거의 비슷하게 나타나고 있는 것으로부터 플레임 트랩을 통과하고 난 후의 화염 전파 속도는 거의 유사한 것을 확인할 수 있다.

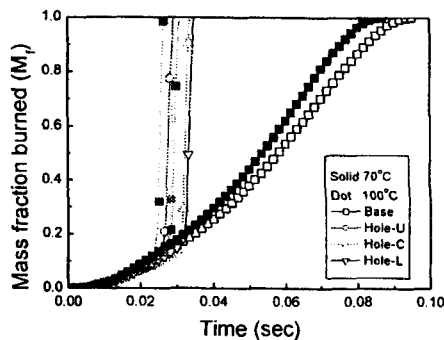


Fig. 7 Mass fraction burned (Phi=1.0, Pi = 3bar)

#### 4. 결론

정적연소기에서 매탄-공기 예혼합기의 급속 연소를 실현시키기 위하여 플레임 트랩을 설치한 경우 화염전파 특성에 관한 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 초기 온도(Ti)가 높고, 초기 압력(Pi)이 낮은 경우 화염의 전파속도가 빠르게 나타났다.
- (2) 플레임 트랩을 장착한 경우 최고연소 압력은 Base 조건에 대하여 약 25%~30% 상승하였고, 연소최고압력까지의 시간은 약 62%~68% 정도 줄어들었다. 이는 플레임

트랩에 의해 발생하는 유동의 효과 및 배부 EGR의 효과로 볼 수 있는 활성화확종의 영향에 의한 것으로 판단된다.

- (3) 플레임 트랩을 장착한 경우 연소가 보다 안정적으로 이루어지는 것을 확인할 수 있고 이는 유동 효과 활성화확종에 의한 것임을 확인할 수 있었다.
- (4) 자발화 현상은 초기온도(Ti)와 초기압력(Pi) 및 당량비(Phi) 그리고 플레임트랩의 형상에 의해 결정되어지는 것을 확인할 수 있었다.

#### References

- 1) K. Matsui et al., "Measurement of local mixture strength at spark gap of SI engines", SAE Paper 790483, 1979.
- 2) M. P. Halstead et al., "A mathematical model for hydrocarbon autoignition at high pressure", Proc. Roy. Soc. Ser. A 346(1975) 515-538.
- 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 et al., "The knocking syndrome-Its cure and its potential", SAE Paper 982483, 1998.
- 6) M. Christensen et al., "Homogeneous charge compression ignition(HCCI) using iso-octane, ethanol and natural gas - A comparison with spark ignition operation", SAE Paper 972874, 1997.
- 7) D. Law et al., "Controlled combustion in an IC-engine with a fully variable valve train", SAE Paper 2000-01-0251, 2000.
- 8) A. K. Oppenheim, "Quest for controlled combustion engines". SAE Paper 880572, 1988.
- 9) N. Iida, "Combustion analysis of methanol

- fueled active thermo-atmosphere  
combustion (ATAC) engine using a  
spectroscopic observation". SAE Paper  
940684, 1994.
- 10) N. Milovanovic, R. Chen, "A review of  
experimental and simulation studies on  
controlled auto-ignition combustion",  
SAE Paper 2001-01-1890, 2001
  - 11) Shin Matsuoka, "A research in the cause  
of simultaneous reduction of NOx · SFC  
on HONDA CVCC SI engine", SAE  
paper 2000-01-1938, 2000
  - 12) B. Lewis, G. von Elbe, Combustion,  
flames and explosions of gases, pp  
333-413, Academic Press INC., 1987
  - 13) 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,  
pp 205-210, POSTECH, 2003
  - 14) 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