

## 초희박 GDI엔진에서 다단점화에 의한 연소 및 배기 특성

박철웅<sup>\*1)</sup> · 김성대<sup>1)</sup> · 김홍석<sup>1)</sup> · 오희창<sup>2)</sup> · 배충식<sup>2)</sup>

한국기계연구원 그린동력연구실<sup>1)</sup> · 한국과학기술원 기계공학과<sup>2)</sup>

### The Effect of Multi-ignition Strategy on the Combustion and Emission Characteristics in a Ultra Lean Burn GDI Engine

Cheolwoong Park<sup>\*1)</sup> · Sungdae Kim<sup>1)</sup> · Hongsuk Kim<sup>1)</sup> · Heechang Oh<sup>2)</sup> · Choongsik Bae<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Environmental System Research Division / Engine Research Team, Korea Institutes of Machinery & Materials, 104 Sinseongno, Yuseong-gu, Daejeon 305-343, Korea

<sup>2)</sup>Department of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institutes of Science & Technology, Daejeon 305-701, Korea

(Received 25 July 2011 / Revised 18 October 2011 / Accepted 18 October 2011)

**Abstract** : Since air pollution problem by emissions from automotive vehicles has become social issues, lean-burn gasoline direct injection (GDI) engine is focused as an alternative to meet the requirement of reinforced emission regulation and improved fuel consumption. Spray-guided type DI combustion is promising technology, which characterized by the centrally mounted injector and closely positioned spark plug, since stable lean combustion can be realized even at ultra-lean mixture condition. In the present study, the effect of multi-ignition with developed charge coil on combustion and emission characteristics was investigated in optical accessible single cylinder engine. In order to fully understand the in-cylinder phenomena and the mechanisms of emission production, optical diagnostics, such as flame visualization was also carried out at frequently using operating condition. Multi-ignition is effective to improve fuel economy but increase NOx emission at flammability limit.

**Key words** : Gasoline direct injection(가솔린직접분사), Ultra lean burn(초희박연소), Multi-ignition(다단점화), Late Injection(분사시기지각), Combustion stability(연소안정성), Flame visualization(연소가시화)

#### Nomenclature

- IMEP : indicated mean effective pressure, MPa
- ISFC : indicated specific fuel consumption, g/kWh
- COVIMEP : coefficient of variation of indicated mean effective pressure, %
- $\lambda$  : excess air ratio

#### 1. 서론

최근 세계적으로 확산되고 있는 유가폭등을 비롯한 연비, 배기가스 등의 규제강화로 인하여 자동차

엔진도 이에 준하여 개발이 진행되고 있으며, 동시에 엔진의 고효율과 연비향상에 대한 요구가 자연스럽게 대두되고 있다. 따라서 이러한 고효율, 저배기 엔진에 대한 요구를 만족하기 위해서는 연소실 내에 가솔린 연료를 직접 분사하는 GDI 방식 엔진의 개발이 필수적이다.<sup>1)</sup>

연료를 연소실내에 직접 분사하는 GDI엔진은 엔진 내에 분사된 연료의 증발 시 야기되는 분위기 온도의 냉각 효과를 통해 고압축비와 고출력을 가능하게 하고, 부분 부하영역에서는 성층 연소에 의한 초희박연소가 가능하게 함으로써 펌프손실과 냉각손실 저감을 통해 엔진의 초저연비를 실현할 수 있

\*Corresponding author, E-mail: cwpark@kimm.re.kr

다. 또한 연료의 미립화 기술에 의한 균일 혼합기 분포 기술은 미연 탄화수소의 저감을 초래하여 유해 배기가스의 감소를 얻을 수 있다.<sup>2)</sup>

GDI 엔진에 대한 연구는 세계적으로 1990년대 중반부터 활발하게 연구가 진행되었으며, 최근에는 양산 엔진에 적용되는 등 가시적인 성과를 보여주고 있다. GDI 시스템을 사용하는 방식 중에서도 압축말기에 연료를 분사하여 희박 성층연소가 가능하도록 하는 방식이 연비 절감과 배출물 저감을 위한 가장 최적의 연소 방식이라 할 수 있을 것이다. 그러나 GDI 엔진은 초회박연소를 실제 구현함에 있어 몇 가지의 한계점을 나타내었다. 늦은 분사와 이른 분사로 대별되는 두 분사모드 사이의 변환이 부드럽게 이루어질 수 있도록 하기 위한 방법의 개발이 요구되고, 또한 연료경제성 향상효과를 극대화하기 위한 성층연소 적용구간의 확대가 요구된다.<sup>3,4)</sup>

성층연소 방식에는 Air, wall and spray guided 등의 방법들이 있으며, 1세대 GDI 시스템은 희박연소를 위한 wall-guided 방식과 air-guided 방식이 적용되었으나 분사된 연료가 피스톤, 실린더 벽면 등에 직접 충돌하면서 벽류가 형성되어 HC(Hydrocarbon)가 다량 배출되었으며, 연비 특성이 기대에 미치지 못했다. 반면, GDI 시스템의 2세대인 spray-guided 방식은 피스톤 상면의 캐비티에 영향을 받지 않기 때문에 S/V비가 좋아질 뿐만 아니라, 피스톤에의 연료 부착을 억제할 수 있다. 또한 Soot와 HC 발생에 대해서 좋은 특성을 가지고 있으며, 성층화 연소 시스템에 작동 범위를 향상시켜 효율적인 성층화 연소 시스템을 적용할 수 있다.<sup>5-8)</sup>

중양 분사 방식의 경우, 설계자유도가 뛰어나 연소의 안정성에서 탁월한 효과가 있다고 보고되고 있다. 이 방식은 spray-guided 방식을 적용한 것으로서 차세대 엔진 연구의 한 분야로 주목받고 있지만, 스파크플러그 주위의 상대적으로 농후한 혼합기 형성을 통해 안정적인 희박연소가 구현되도록 하고 있다. 따라서 스파크플러그 주위의 과도한 공연비로 인한 전열제 및 접지전극에 카본퇴적물이 누적되는 문제점이 있다. 이런 문제가 발생할 경우 점화 에너지의 방출을 방해하거나 점화 시 적절한 혼합기를 형성하지 못하여 엔진의 성능 저하를 초래할

수 있는 가능성이 있다.<sup>9)</sup>

연소 중에 점화플러그에 퇴적된 카본 등의 불순물의 산화 또는 연소를 위해서 점화플러그 전극의 온도는 450°C에서 850°C 사이를 유지하는 것이 좋다. 그러나 연소온도가 상대적으로 낮은 희박한 혼합기 조건에서 운전되고 직접분사된 연료가 전극에 충돌할 가능성이 높은 spray-guided 방식의 GDI엔진은 점화계의 개선이 필수적이다.

본 연구에서는 상기와 같은 안정적인 점화확화 개선을 위한 방법으로 다단점화를 통한 엔진성능 개선에 주목하였다. Spray-guided 방식 GDI 단기통 엔진에서 공기과잉율의 변화에 따른 연소안정성을 포함한 희박연소특성을 파악하고, 다단점화 전략에 의한 성능 및 배출가스 영향을 파악하고자 하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

본 연구에서는 승용 GDI 엔진에서 다단점화에 따른 영향을 검토하기 위해서 실험용 단기통 엔진을 설치하여 기본적인 성능 실험을 하였다. Fig. 1에 본 연구에 사용된 시험장치의 전체적인 구성을 나타내었다. 단기통 엔진의 제원을 Table 1에 나타내었으며, 기존 엔진을 기초로 하여 고압 가솔린 연료공급 및 제어를 위한 여러 가지 시스템을 추가하였다.

주연료인 가솔린은 실제 엔진에서 사용되는 연료 공급시스템을 사용하여, 20 MPa 정도로 승압이 가능한 고압연료펌프로부터 커먼레일로 이송되어 정밀한 압력제어를 통해 고압연료분사가 가능하도록 하였다. 연료의 압력제어는 FCV(Fuel Control Valve, 연료량 제어 밸브)에 인가되는 전압의 Duty를 제어

Table 1 Specification of base diesel engine

Item	Description
Engine type	4-stroke, 4-cylinder DOHC 4 valve/cylinder
Bore	86 mm
Stroke	86 mm
Displacement volume	499 cc
Compression ratio	12.0
Intake valve timing	BTDC 7 CAD / ABDC 67 CAD
Exhaust valve timing	BBDC 48 CAD / ATDC 0 CAD

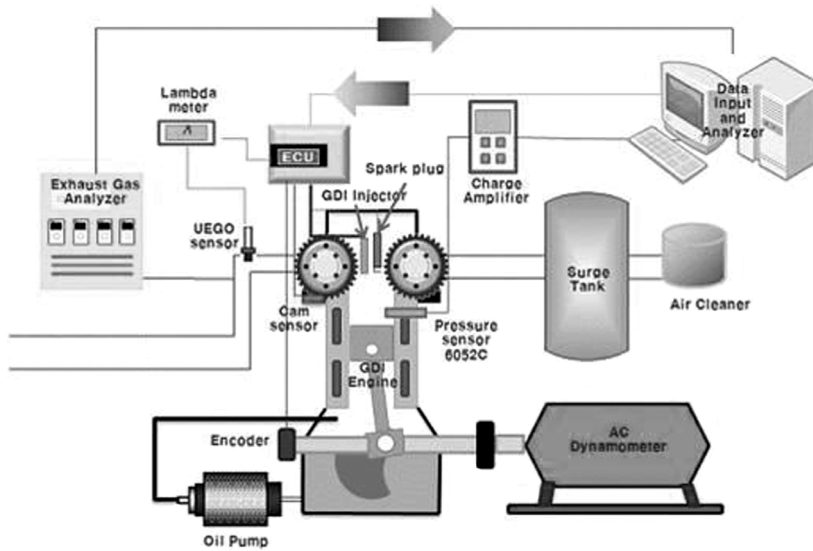


Fig. 1 Schematic of experimental setup

하여 펌핑부로 유입되는 연료량을 1차적으로 제한 후, 커먼레일에 장착된 PCV(Pressure Control Valve)의 Duty 제어를 통한 2차 압력제어를 통해 이루어졌다.

실험에 사용된 단기통엔진의 연료 분사기는 중심 분사를 통해서 분무침투거리가 짧아지게 하여 스파크 플러그 주변에 이론공연비 영역을 국부적으로 형성시킬 수 있도록, 개방형(Outwardly opening) 노즐이 장착되어 hallow-cone 형태의 분무를 형성하는 piezo-type 분사기를 이용하였다. piezo-type 분사기는 구동전류 응답시간이 solenoid-type 분사기에 비해 빠르기 때문에 고압연료분사 조건에서도 다단 분사를 위한 제어성과 응답성 측면에서 유리한 것으로 알려져 있다.

D사의 Multi-charger coil을 이용하여 점화코일 내에 내장된 회로를 통해 다단 점화가 가능하도록 하였다. Fig. 2와 Fig. 3의 전류신호에서 확인할 수 있는 것과 같이, 다단점화시 최초의 점화는 1단점화시와 동일하게 이후의 다단의 점화에 비해 높은 전류값(15 A)과 긴 Dwell time(0.9 ms)을 갖도록 하여 초기의 안정적인 점화확화를 유도하도록 하고 있다. 다단점화시 최초의 점화시기는 1단점화시와 동일하게 방전이 일어나는 시점에서 전류의 상승이 관찰되며, 최초 점화 이후 13회의 반복적인 점화가 약 0.2 ms의 간격으로 일정하게 일어난다.

전용 드라이버를 이용해 가솔린 연료의 분사량과 분사시기 및 점화시기를 임의로 조절이 가능하도록 하였다. 엔진의 회전수 및 부하는 교류전류식 동력계(50kW, 환웅기전)를 이용하여 제어하였고, 엔진의 회전수 및 스로틀 개도 등 엔진 제어변수를 모니터링하였다. 공연비 측정은 LA 4 lambda meter (ETAS Co.)를 이용하였고, 연소해석을 위한 연소압력측정은 연소해석기(DEWE800, Dewetron)와 실린더내에 장착된 압력센서(6052C, Kistler)를 사용하여 실시간으로 연소압력 데이터를 취득하였다. 취득한 연소압력 데이터로부터 각 운전조건에서의 열방출 및 Mass fraction burned 등을 계산하여 연소특성 분석에 이용하였다. 주요배출가스인 NOx와 Smoke는 배출가스 분석장치(MIR-2M, Environment S.A./NOx Analyzer, ECM)와 Opacimeter (AVL)를 사용하여 측정하였다.

## 2.2 실험방법

본 연구에서는 가솔린기관에서 많이 사용되는 운전영역인 1500 rpm, IMEP 0.22 MPa 조건에서 점화 전략에 따른 특성 실험을 수행하였다. 엔진이 충분히 Warm-up 된 상태에서 냉각수 온도가  $80.0 \pm 2.5^\circ\text{C}$ 에서 유지되도록 냉각수온 조절 시스템을 설정하고, 공연비는 전 실험구간에서 이론공연비 조건과

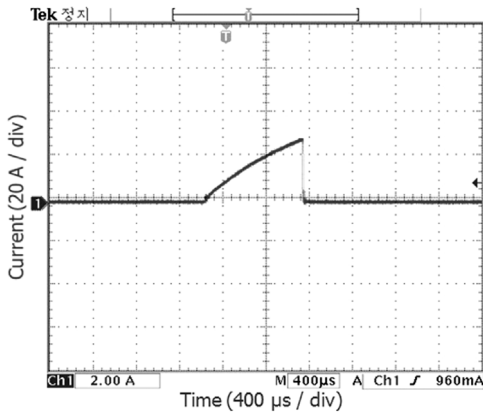


Fig. 2 Current signal trace for single ignition

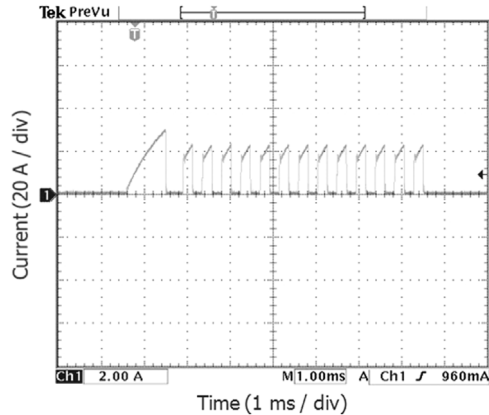


Fig. 3 Current signal trace for multi-ignition

초희박연소영역인  $\lambda=2.0$ 에서부터 공기과잉율을 기준으로 하여 0.5 단위로 증가시키면서 희박한계까지 변화시켰다.

각각의 실험조건에 대해 연료분사시기와 점화시기를 변경하며 공기과잉율 및 연료분사압력에 따른 조건에서 최적연료분사시기와 MBT(Minimum spark advance for best torque)를 찾았으며 연료소비율과 연소안정성 및 배출가스 성능을 검토하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

본 연구에 사용된 spray-guided 방식의 GDI 엔진의 경우 연료분사직후의 농후한 혼합기가 스파크 플러그 인근에 형성 되었을 때 점화를 일으켜 연소를 구현하는 방식이기 때문에, 희박연소 영역에서

의 안정적인 연소를 확보할 수 있는 최적의 연료분사시기와 점화시기 기간의 간격이 5 CAD(Crank Angle degree) 이내로 매우 좁았다. 그러나 연료분사시기 및 점화시기의 정밀제어를 통해서 안정적인 성층연소 성능이 확보되기 때문에 일반적인 가솔린기관의 희박연소 한계인  $\lambda=1.6$ 이상의 초희박연소에서 연소가 가능하였다.

Fig. 4와 Fig. 5에 공기과잉율의 변화에 따른 연료소비율 및 연소안정성을 나타내었다. 희박한계인  $\lambda=3.5$  공기과잉율 조건에도 COVIMEP 값 3% 이내의 안정적인 연소를 확보하였고, 1단 점화를 이용했을 때 희박연소에 의한 펌핑손실과 냉각손실 저감효과를 통해 이론공연비 대비 약 10%의 연료소비율 개선 효과를 확인할 수 있었다. 다단점화시의 연소안

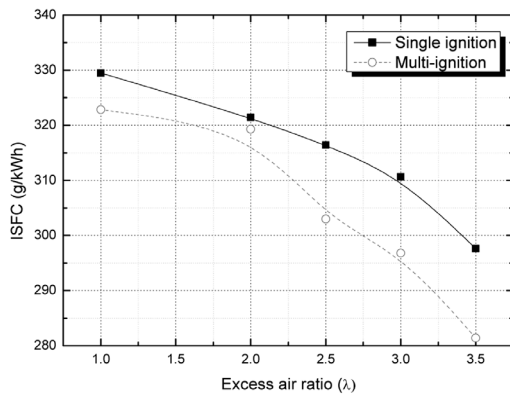


Fig. 4 Effect of multi-ignition on fuel economy at 1500 rpm, IMEP 0.22 MPa operating condition

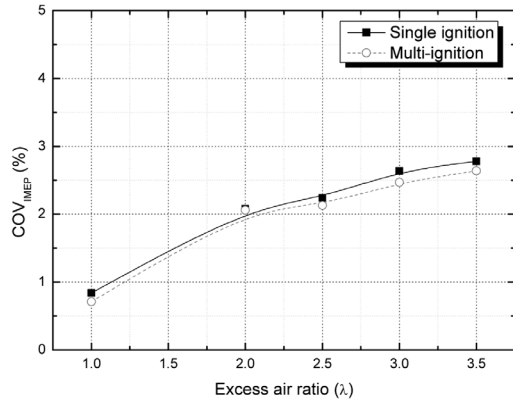


Fig. 5 Effect of multi-ignition on combustion stability at 1500 rpm, IMEP 0.22 MPa operating condition

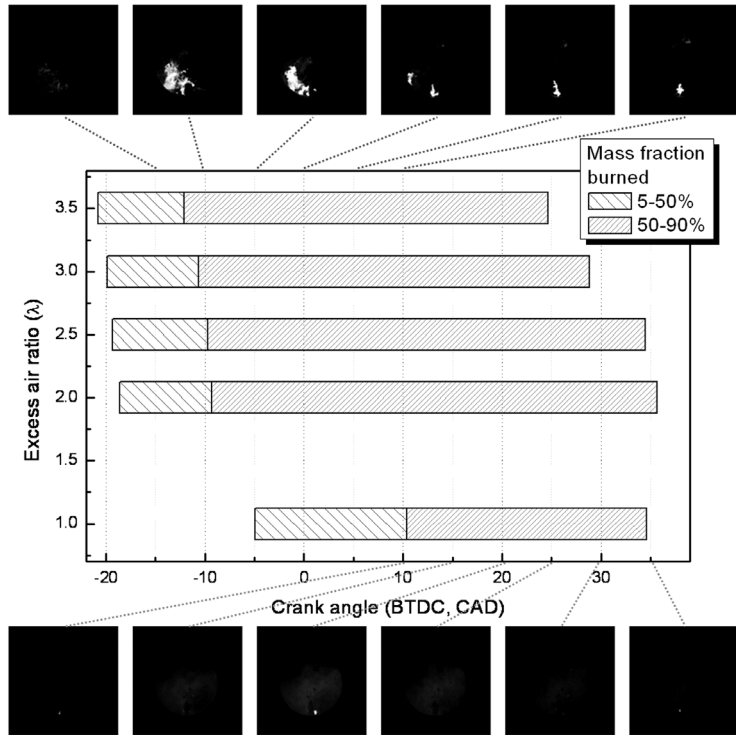


Fig. 6 Combustion duration and flame visualization with single ignition at 1500 rpm, IMEP 0.22 MPa operating condition

정성은 1단점화시의 실험결과와 크게 다르지 않았으나, 연료소비율의 추가적인 개선은 희박한계 조건에서 약 5%로서 매우 고무적인 결과를 보였다. 연소안정성은 점화시기에 스파크플러그 주위에 형성되는 혼합기의 질에 지배적이기 때문에, 점화전략에 따른 변화는 크지 않았던 것으로 판단된다.

다단점화에 의한 연료소비율 개선 효과에 대한 원인은 Fig. 6과 Fig. 7에 나타난 연소기간을 비교하여 분석할 수 있다.  $\lambda=2.0$  이하의 상대적으로 농후한 혼합기 조건에서는 다단점화에 의한 연소기간의 차이가 크지 않지만,  $\lambda=2.5$  이상으로 희박한 혼합기가 되면 다단점화에 의한 연소축진으로 전체적인 연소기간이 1단점화에 비해 짧아지는 것을 확인할 수 있다. 연소기간의 단축은 연소속도의 증가를 의미하는 것으로 연소시 열전달에 의한 열손실의 저감을 야기하고, 결과적으로는 연료소비율이 개선되는 결과를 보였다.

이때 주목할 만한 점은 다단점화시의 점화시기와 1단점화시의 점화시기와 동일한 조건임을 고려할

때, 연소지연기간은 거의 차이가 없으나 희박연소시 다단점화의 경우 CA50의 위치가 1단점화보다 지각된 것이다. 이것은 다단점화의 적용시 전체적인 연소기간은 단축되었으나, 초기 열방출율이 크지 않음을 보여주는 결과로서 분무유도방식의 GDI 엔진에서의 희박연소가 직접분사식 디젤의 연소와 유사한 경향을 가지고 있으나 다단점화를 통해 급격한 열방출을 억제할 수 있음을 보여주는 결과라 할 수 있다. 1단점화의 경우 스파크플러그 주위에 형성된 혼합기가 순간적인 예혼합연소 후에 여분의 과농한 혼합기의 확산연소를 거치면서 Fig. 6과 같이 휘염을 발생하며 연소가 진행된다. 다단점화의 경우에도 혼합기가 형성된 상태는 비슷하지만, 초기 열방출 이후에 지속되는 전극에서의 방전으로 인해 예혼합기의 화염전파가 지속적으로 활성화되어 1단 점화시 확산연소와 유사하게 연소되었던 여분의 과농한 혼합기의 일부가 연소된다. 따라서 상대적으로 확산연소가 일어나는 과농 혼합기의 양은 감소된 것으로 보인다. 그에 대한 증거로서 다단점

초회박 GDI엔진에서 다단점화에 의한 연소 및 배기 특성

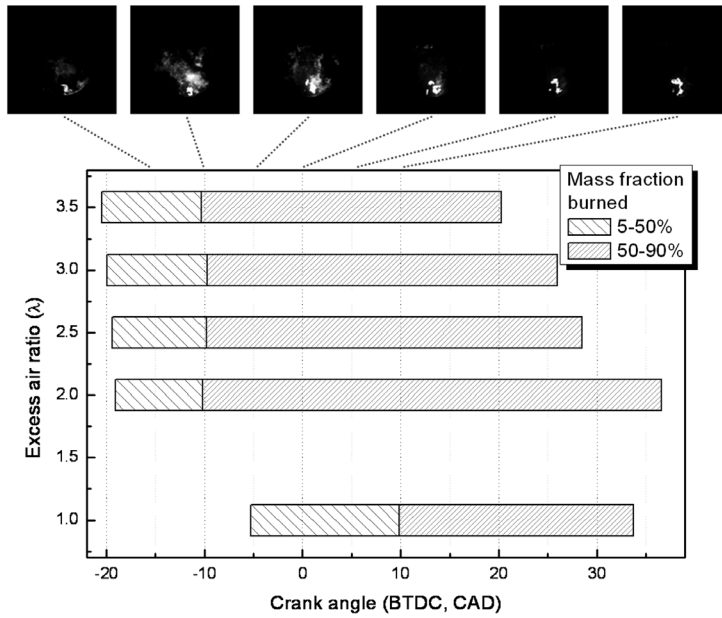


Fig. 7 Combustion duration and flame visualization with multi-ignition at 1500 rpm, IMEP 0.22 MPa operating condition

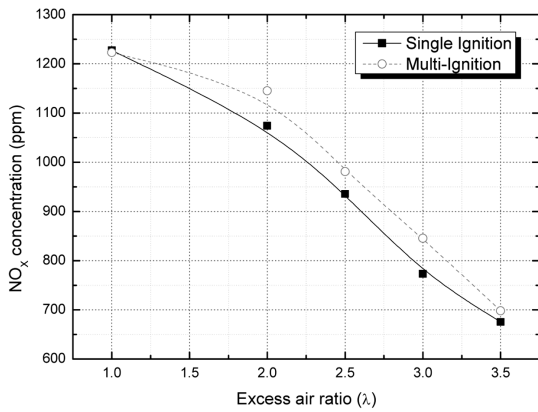


Fig. 8 Effect of multi-ignition on NOx emission at 1500 rpm, IMEP 0.22 MPa operating condition

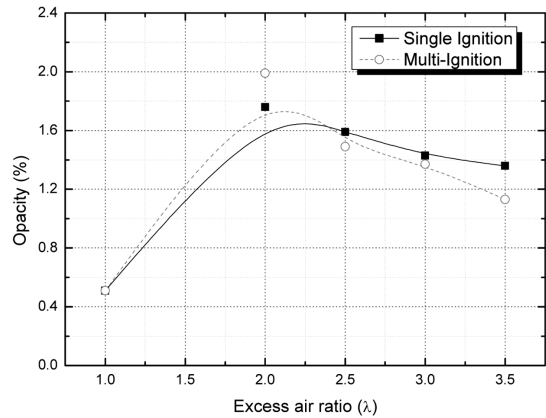


Fig. 9 Effect of multi-ignition on smoke emission at 1500 rpm, IMEP 0.22 MPa operating condition

화의 화염가시화 결과에서는 1단점화에서 확인되지 않던 예혼합연소에 의한 청염이 TDC 인근까지 지속되는 것을 확인할 수 있다. 확산연소 중에 예혼합화염이 일부 차지하고 있지만, 초기 연소속도의 감소로 팽창과정에서 동일 크랭크 각도의 화염의 강도는 비슷한 수준을 유지하였다. 1단점화를 적용한 이론공연비 연소조건인 경우 모든 화염이미지에서 일반적인 예혼합연소의 청염만 볼 수 있으며, 이러한 경향은 다단점화의 경우에도 크게 다르지 않

을 것으로 예상된다.

다단점화를 적용하여 초기 열방출율이 감소하였으나 예혼합연소의 비율이 증가하여 열방출 중의 전체적인 연소온도는 증가된 것으로 보이고 그 결과로 Fig. 8에 나타난 것과 같이 NOx의 배출이 약간 증가하였다. Fig. 9는 GDI 엔진에서의 공기과잉율에 따른 Smoke 배출 결과를 나타낸 것으로서 직접분사식 디젤엔진에서와 유사하게 확산화염의 특징인 smoke의 생성이 동반되는 문제를 보여주는 결과라

할 수 있다. 국부적으로 농후한 혼합기의 형성 가능성이 높은  $\lambda=2.0$  조건에서 최대의 배출을 보이고 공기과잉율이 증가할수록 감소하였다.  $\lambda=2.5$  이상의 희박한 혼합기 조건에서의 다단점화를 적용하면 전체 연소기간 중 예혼합연소에 참여하는 연료의 비율이 증가하여 smoke의 배출이 약간 감소하였으나, 이론공연비 연소조건에 비하여 여전이 약간 높은 결과를 보였다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 분무유도방식의 초희박 가시화 GDI 엔진을 이용하여 공기과잉율 및 점화전략 등의 연소제어인자 변화에 따른 연소 및 배기 특성을 확인한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1)  $\lambda=3.5$  공기과잉율 조건에서 안정적인 희박연소를 구현하여 이론공연비 연소조건 대비 약 10% 연료소비율의 개선이 가능하였으며, 다단점화를 적용하여 5% 추가저감 효과를 얻을 수 있었다.
- 2) 희박연소 시 다단점화를 적용하면 전체적인 연소기간이 1단점화에 비해 단축되나 연소 초기의 급격한 열방출은 감소하게 된다.
- 3) 점화전략에 따른 혼합기의 형성 상태는 차이가 없으나, 다단점화를 적용하면 확산연소 중의 예혼합화염의 비율이 1단점화에 비해 증가하고 이로 인해 smoke의 배출이 감소된다.
- 4) 다단점화를 적용하여 초기 열방출율은 감소하였으나 예혼합연소의 비율이 증가하여 열방출 중의 전체적인 연소온도와 NO<sub>x</sub>의 배출은 증가하였다.

#### References

- 1) D. H. Han, S.-K. Han, B.-H. Han and W.-T. Kim, "Development of 2.0L Turbocharged DISI Engine for Downsizing Application," SAE 2007-01-0259, 2007.
- 2) A. C. Alkiad and S. H. El Tary, "Contributors to the Fuel Economy Advantage of DISI Engines Over PFI engines," SAE 2003-01-3101, 2003.
- 3) G. A. Szekely and A. C. Alkiads, "Combustion Characteristics of a Spray-guided Direct-injection Stratified-charge Engine with a High-squish Piston," SAE 2005-01-1937, 2005.
- 4) S. Moon, J. Choi, E. Abo-serie and C. Bae, "Effects of Split-injection and EGR on the Combustion Characteristics of a DISI Engine," Transactions of KSAE, Vol.14, No.1, pp.144-152, 2006.
- 5) H. Baecker, A. Kaufmann and M. Tichy, "Experimental and Simulative Investigation on Stratification Potential of Spray-guided GDI Combustion Systems," SAE 2007-01-1407, 2007.
- 6) C. Schwarz, E. Schünemann, B. Durst, J. Fischer and A. Witt, "Potentials of the Spray-guided BMW DI Combustion System," SAE 2006-01-1265, 2006.
- 7) U. Spicher, J. Reissing, J. M. Kech and J. Gindele, "Gasoline Direct Injection(GDI) Engines-Development Potentialities," SAE 1999-01-2938, 1999.
- 8) W.-S. Chang, Y.-N. Kim and J.-K. Kong, "Design and Development of a Spray-guided Gasoline DI Engine," SAE 2007-01-3531, 2007.
- 9) S. Lee, S. Oh, K. Kang, J. Cho and K. Cha, "Particulate Emissions from a Direct Injection Spark-ignition Engine Fuelled with Gasoline and LPG," Transactions of KSAE, Vol.19, No.3, pp.65-72, 2011.