



## 초희박 LPG 직접분사식 엔진에서 질소산화물 저감을 위한 배기재순환 적용성 평가

†박철웅 · 조시현 · 김태영 · 조규백 · 이장희

한국기계연구원

(2015년 4월 16일 접수, 2015년 8월 24일 수정, 2015년 8월 25일 채택)

## Evaluation of EGR applicability for NO<sub>x</sub> reduction in lean-burn LPG direct injection engine

†Cheolwoong Park · Seehyeon Cho · Taeyoung Kim · Gyubaek Cho · Janghee Lee

*Korea Institute of Machinery and Materials, 104 Sinseongro, Yuseong-gu, Daejeon  
305-343, Korea*

(Received April 16, 2015; Revised August 24, 2015; Accepted August 25, 2015)

### 요 약

LPG가 수송용 연료로서 경쟁력을 유지하기 위해서는 지속적인 기술개발을 통해 휘발유와의 연비격차를 감소시키고 후처리시스템 등에 의한 가격 부담을 낮추어야 한다. 이에 본 연구에서는 안정적인 희박연소 구현을 통한 연비개선을 얻기 위해 실린더 중앙에 점화플러그와 연료분사기가 인접해 있고, 연료가 분사된 후 바로 점화가 이루어지도록 하는 분무유도방식의 LPG 직접분사엔진을 개발의 일환으로 연소제어인자의 변화에 따른 연소 특성을 분석하였다. 안정적인 연소를 위해 국부적으로 농후한 혼합기를 형성하는 성층희박연소의 특성상 일정 수준 이상의 질소산화물이 배출되는 문제점을 갖고 있다. 질소산화물 저감을 위해 EGR을 적용한 결과 연료소비율과 THC의 배출은 약간 증가하지만 NO<sub>x</sub> 배출은 약 15% 저감되었다. EGR 적용에 의한 연소속도의 감소는 초기 화염발달 시기에 집중되어 나타났으며 흡입공기의 희석효과에 의해 EGR율이 증가할수록 최대 열방출율 및 열방출율 증가 기울기가 감소하였다.

**Abstract** - In order to keep the competitiveness of LPG fuel for transportation fuel, the difference in fuel consumption with gasoline and cost for an aftertreatment system should be reduced with continuous development of technology for LPG engine. In the present study, spray-guided type direct injection combustion system, whose configuration is composed of direct injector in the vicinity of spark plug, was employed to realize stable lean combustion. A certain level of nitrogen oxides(NO<sub>x</sub>) emits due to a locally rich mixture regions in the stratified mixture. With the application of EGR system for the reduction of NO<sub>x</sub>, 15% of NO<sub>x</sub> reduction was achieved whereas fuel consumption and hydrocarbon emission increased. By the application of EGR, the combustion speed reduced especially appeared at initial flame development period and peak heat release rates and increasing rates for heat release rate decreased as EGR rate increased due to the dilution effect of intake air.

**Key words** : LPG engine, Lean combustion, Spray-guided type direct injection system, Exhaust gas recirculation

†Corresponding author: cwpark@kimm.re.kr

Copyright © 2015 by The Korean Institute of Gas

## I. 서론

1900년대 후반 LPG 및 LNG의 대규모 가스도입 사업이 에너지원 다원화 정책의 일환으로 추진된 이래, 국내에서 LPG 연료는 기존의 가솔린 연료 대비 청정성을 갖는 대체연료로서 수송용 및 가정/상업용에 이용되어 왔다. 수송용 LPG 연료의 경우 부탄(Butane, C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>)을 주성분으로 하기 때문에 휘발유에 비해 탄소수가 적어 탄화수소 등의 배기 배출물이 낮은 장점이 있는 반면, 상대적으로 낮은 열량으로 인한 낮은 연비의 특성을 갖고 있다. 이와 같은 단점 및 겨울철 시동성 불량과 같은 문제를 해결하고 저공해 LPG 차량의 보급 활성화를 위해 2000년 이후 LPLi(LPG 액상분사방식) 엔진 개발 등의 많은 연구가 진행되어 왔다[1,2].

LPLi 엔진 개발을 통해 증발기(Vaporizer)를 사용하던 방식에 비해 정밀한 연료 분사량의 제어가 가능하게 되고 연비와 출력이 개선되었으나, 기존의 화석연료를 사용하는 엔진의 꾸준한 기술개발로 저공해 연료로서의 입지가 약화되고 있다. 이에 추가적인 기술개발을 통해 연비격차를 감소시키고 후처리시스템 등에 의한 가격 부담을 낮추어야 LPG가 수송용 연료로서 경쟁력을 유지할 수 있을 것으로 보인다.

2011년부터 환경부는 고성능 가솔린 엔진에 대응하기 위해 자동차 제작사와 공동으로 LPDi 엔진 개발을 추진하고 있으나, 기존 점화착화 엔진의 이론공연비 혼합기를 이용한 연소방식을 채용하여 큰 폭의 연비 및 배출가스 개선을 기대하기 어렵다[3]. 이에 본 연구진은 LPG엔진에서 희박연소를 구현하기 위해 분무유도방식(Spray-guided type)의 연소시스템을 적용하였다. 분무유도방식의 연소시스템은 실린더 중앙에 점화플러그와 연료분사기가 인접해 있고, 연료가 분사된 후 바로 점화가 이루어지기 때문에 안정적인 희박연소가 가능하다[4-6]. 그러나 희박연소 기구가 성층혼합기의 형성 정도에 의존하기 때문에 연료분사시기와 점화시기에 따른 민감도가 큰 특성을 갖는다. 이전의 연구결과에서 새로운 연소전략을 이용해 여러 운전조건에서도 안정적인 희박연소 구현이 가능함을 보고하였고, 최적 운전조건에서 추가적인 효율 향상을 위해 압축비 및 연소실 형상 등의 변경을 시도한 바 있다[7,8].

이전의 연구를 통해 Fig. 1에 나타난 것과 같이 승용 차량의 대표 운전 조건에 해당하는 2000 rpm의 엔진 회전수 및 BMEP(brake mean effective pressure) 0.2 MPa의 부하조건에서 안정적인 희박연소를 통해 희박연소한계 조건인 공기과잉률 (excess air

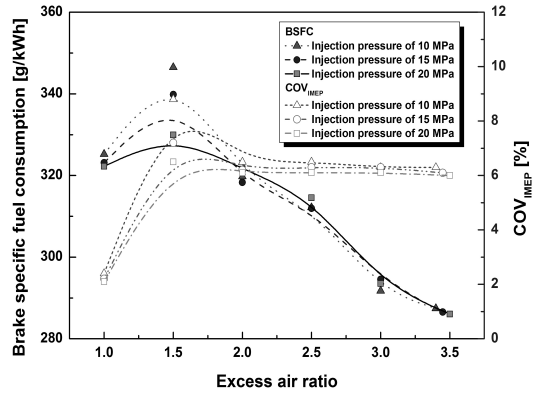


Fig. 1. Effect of excess air ratio and fuel injection pressure on brake specific fuel consumption and combustion stability[9].

ratio; λ) 3.5 조건에서 이론공연비 혼합기 연소조건인 공기과잉률 1.0 조건 대비 약 10% 이상의 연료소비율 개선효과를 얻을 수 있었다[9]. 그러나 전체적인 혼합기의 농도는 희박한 조건이더라도 점화플러그 인근에 형성되는 성층혼합기의 경우 국부적으로 안정적인 연소를 위해 농후한 혼합기가 형성되기 때문에, 예혼합기를 이용한 희박연소와는 달리 일정 수준의 질소산화물(NO<sub>x</sub>)이 생성되게 된다. 이전 연구를 통해 희박연소한계 조건에서 약 300 ppm 수준의 NO<sub>x</sub> 배출을 확인하였으며, 삼원촉매의 적용이 어려운 희박연소 엔진의 상용화를 고려할 때 해결되어야 할 과제를 알 수 있다. 이에 본 연구에서는 분무유도방식의 연소시스템을 적용한 초희박 직접분사식 LPG 엔진에서 성층 희박연소시 NO<sub>x</sub> 배출을 저감하기 위해 EGR을 적용하였으며, 이에 따른 연소 및 배출가스 특성을 분석하였다.

## II. 실험장치 및 방법

### 2.1. 실험장치

실험에 사용된 엔진은 기존 MPI방식의 승용차량용 2L급 가솔린 엔진의 헤드를 재설계하여 분무유도방식의 연료분사 시스템을 적용한 것으로 실험장치 개략도 및 엔진의 제원을 Fig. 2와 Table 1에 각각 나타내었다. 연료탱크 내에 장착된 저압연료펌프를 통해 0.5 MPa의 압력으로 액상의 LPG 연료를 최대 25 MPa까지 가압이 가능한 플런저 타입의 고압펌프에 공급하고, 고압펌프로 보내진 연료는 가압된 후 커먼레일로 공급된다. 연료분사기는 외부 개방형 노즐의 피에조 타입을 사용하였고 싸이클당 최대 4회

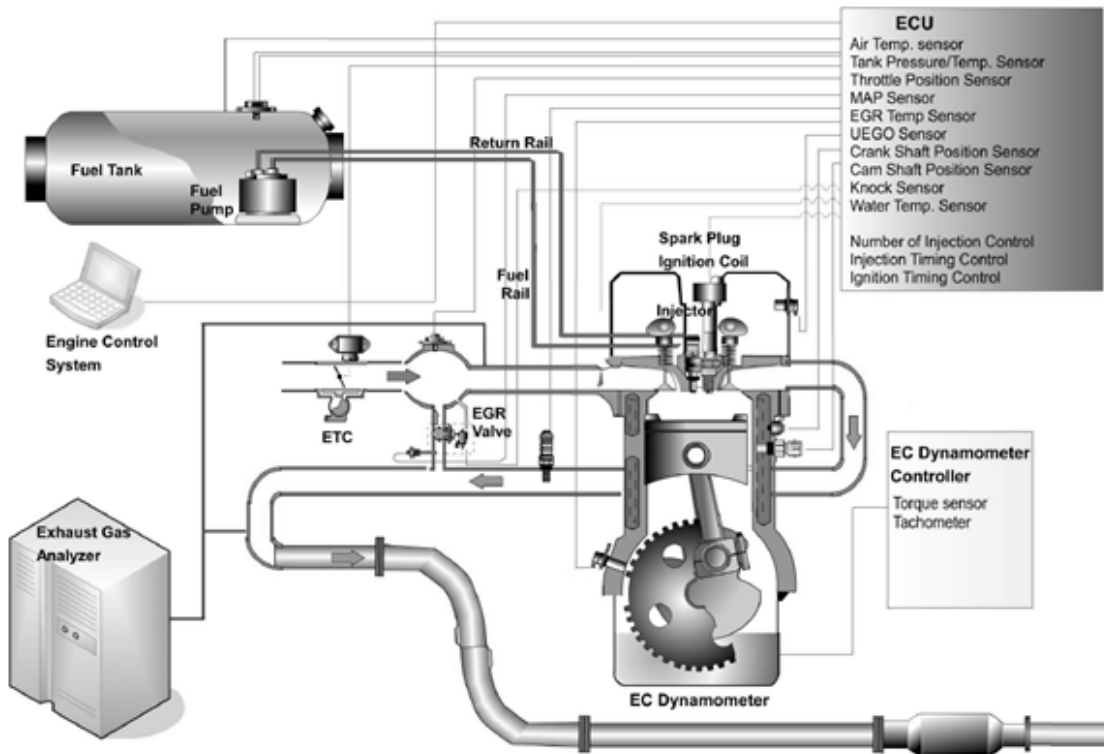


Fig. 2. Schematic diagram of the experimental apparatus.

의 다단분사가 가능하다. 연료분사압력은 커먼레일에 장착된 PCV(pressure control valve)를 통해 20 MPa로 일정한 압력으로 연료를 유지하였고, 다채널 피에조 인젝터 드라이버와 범용 ECU(engine control unit, Motohawk)를 사용하여 연소실에 공급되는 연료분사시기와 점화시기 및 연료분사량을 임의로 조절하도록 하였다. 배기 매니폴드와 실린더 별로 광역산소센서(LSU 4.2 / LA4, ETAS Co.)를 설치하여 공기과잉률을 측정하였으며, 이를 모니터링하여 연소실로 공급되는 혼합기의 상태를 실시간으로 확인하였다. 연소실 내의 연소특성을 파악하기 위해 각각의 실린더 내부에 압력센서를 장착하였다. 압력센서로 측정되는 신호를 연소해석기(Osiris, D2T Co.)를 통해서 실시간으로 계산되는 도시평균유효압력(indicated mean effective pressure; IMEP)과 변동계수(coefficient of variation; COV) 값을 확인하였다. 배기관에 배기가스 포집 라인을 설치하고 배기가스 분석기(AMA i60, AVL Co.)와 연결하여 유해 배기가스 성분을 분석하였다. 배기와 흡기관 사이에 EGR(exhaust gas recirculation) 밸브와 냉각기로 구성되는

Table 1. Specifications of the base engine

Engine style	DOHC 4 valve
Displacement volume (cc)	1,996
Bore × Stroke(mm)	86 × 86
Compression ratio	10:1
Exhaust valve timing	BTDC 7 CAD/ABDC 67 CAD
Intake valve timing	BBDC 48 CAD/ATDC 0 CAD

EGR 시스템을 장착하였으며, 전용 컨트롤러를 사용하여 EGR밸브로 개도를 제어함으로써 흡기로 유입되는 공기 중의 EGR율을 변경하였다.

## 2.2. 실험방법

본 연구에서 사용된 엔진의 운전조건은 승용차량용 엔진의 대표 운전 조건인 2000 rpm, BMEP 0.2MPa 조건과 1600 rpm, BMEP 0.24 MPa 조건으로서, 최적 연료분사시기와 점화시기는 연료소비율이 가장

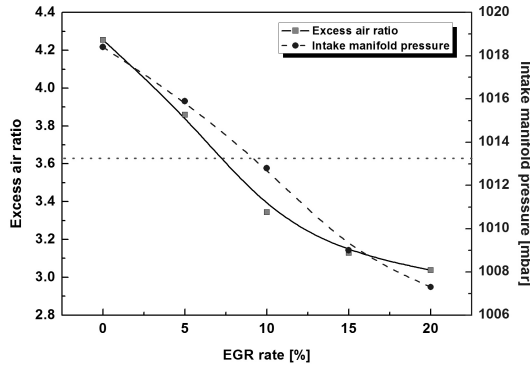


Fig. 3. Variations of excess air ratio and intake manifold pressure with EGR rate at wide open throttle operating condition.

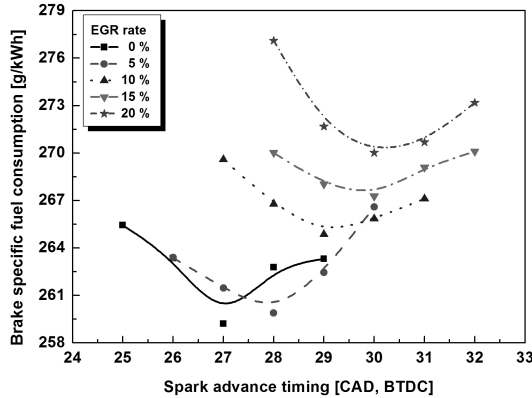


Fig. 4. Effect of spark advance timing on brake specific fuel consumption with various EGR rates.

낮은 조건을 기준으로 정의하였고, EGR의 적용에 따라 변경된 최적 연료분사시기 및 점화시기를 실험을 통해 결정하였다. 연료분사압력은 20 MPa로 고정하였으며, 이전 연구로부터 직접분사식 LPG 엔진의 초회박 연소조건에서 안정적인 희박연소의 구현이 가능한 것으로 확인된 분사간 점화착화(Inter-injection spark ignition; ISI) 연소 전략을 이용하였다 [7]. LPG 연료의 특성상 연료분사 직후 연료의 증발 및 확산이 빠르기 때문에 적절한 성층혼합기를 형성하기 위해 2회의 연료분사 전략을 이용하더라도 기술린과 같이 국부적으로 농후한 혼합기를 형성하여 안정적인 희박연소를 구현하기 어렵다. 이에 본 연구진은 초기 연료분사 후 점화플러그의 방전을 통해

혼합기를 착화시킨 후 나머지의 연료는 기 착화된 혼합기의 화염 면에서 연소가 되는 방법인 ISI 연소 전략을 고안하였다. 상기의 연소전략을 통해 여러 운전조건에서 안정적인 희박연소를 구현하고 그 결과 큰 폭의 연료소비율을 개선할 수 있었다. 본 연구에서도 ISI 연소전략을 기반으로 한 희박연소 조건에서 EGR의 적용에 의한 연소 및 배기 특성을 검토하였다.

EGR율은 0%부터 20%까지 5%간격으로 변경하였다. 이때 EGR율은 배기가스 분석기에서 측정된 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)의 농도를 아래의 식(1)에 이용하여 산출하였다[10].

$$EGRrate(\%) = \frac{[CO_2]_{IN} - [CO_2]_{ATM}}{[CO_2]_{EX} - [CO_2]_{ATM}} \quad (1)$$

여기서, [CO<sub>2</sub>]<sub>IN</sub> : 흡입공기 중의 CO<sub>2</sub> 농도  
 [CO<sub>2</sub>]<sub>ATM</sub> : 대기 중의 CO<sub>2</sub> 농도  
 [CO<sub>2</sub>]<sub>EX</sub> : 배기가스 중의 CO<sub>2</sub> 농도

본 실험에 사용된 엔진에서 EGR 율의 제어를 위해 Fig. 3에 나타난 것과 같이 EGR 밸브의 개도를 증가시키면 EGR 가스가 흡입공기에 혼합되어 혼합기의 전체적인 공기과잉률이 감소하게 된다. 희박한 계영역인 wide open throttle 조건에서 EGR 밸브의 개도를 전개하더라도 자연흡기 엔진의 특성상 배기압력이 높지 않기 때문에 EGR 가스의 흐름을 유도하는 압력차가 충분하지 않아 적용 가능한 최대 EGR율이 약 9%로 제한되었다. 이에 추가적인 EGR 가스를 공급하기 위해 throttle의 개도를 약간 감소시킴으로써 EGR율이 최대 20%까지 증가하도록 하였다.

### III. 실험 결과 및 고찰

Fig. 4는 EGR율을 변경할 때 점화시기의 변화에 따른 연료소비율을 나타낸 것이다. 이때 미세한 분위기 압력의 변화와 혼합기 조성의 차이가 성층혼합기의 형성에 주는 영향이 크지 않다고 가정하여 점화시기를 변경하더라도 연료분사시기와 점화시기 간의 간격은 일정하게 유지하였다. 각 EGR율 조건에서 최적점화시기를 기준으로 진각되거나 지각되면 연료소비율이 증가하는 것을 볼 수 있다. 점화시기의 변경에 따른 연료소비율의 변화는 성층혼합기의 연소속도에 의한 것으로, 최적연료분사시기 및 점화시기에 비해 진각된 경우는 이른 시기의 열방출로 인해 압축행정 중의 피스톤의 운동을 방해하여

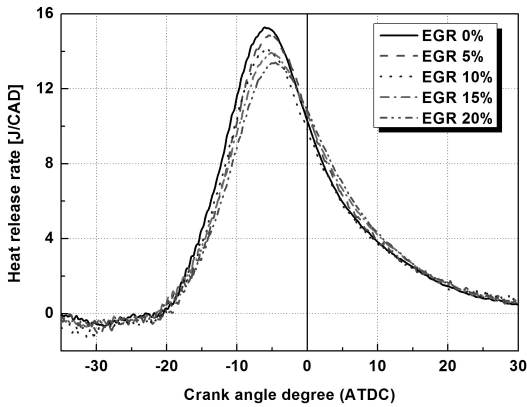


Fig. 5. Effect of EGR rate on heat release rate at optimal fuel injection and spark ignition timing for each EGR rate condition.

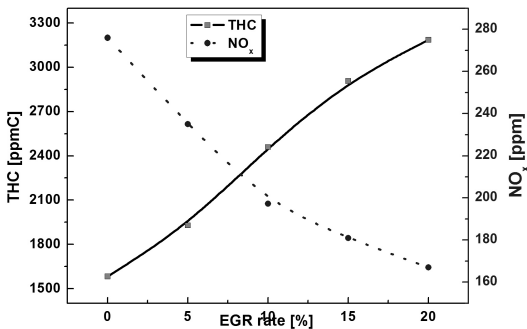


Fig. 6. Effect of EGR rate on THC and NOx emissions at optimal fuel injection and spark ignition timing for each EGR rate condition.

연료소비율을 증가시킨다. 이에 반해 상대적으로 지각된 경우는 팽창행정 기간 중의 냉각손실 및 분위기 압력의 증가로 인한 점화플러그의 착화성 악화가 연소안정성 악화의 원인이 되고 결과적으로 연료소비율이 증가되었다.

일반적으로 EGR 가스는 공기에 비해 낮은 비열비를 갖고 있기 때문에 피스톤에 전달되는 팽창일이 감소하고[11] 본 연구에서도 EGR율이 증가할수록 연료소비율이 증가하며 동일한 경향을 보였다. 최저 연료소비율을 보이는 점화시기는 EGR율이 증가함에 따라 EGR이 적용되지 않은 조건에서 27 CAD (crank angle degree) BTDC(before top dead center)이었으나 본 연구에서 최대 EGR율에 해당하는

20%의 EGR을 조건에서 30 CAD로 진각되었다. 최적 점화시기가 진각된 것은 연소속도의 감소에 의한 것으로 Fig. 5의 EGR을 변화에 따른 열방출을 선도를 통해서도 확인할 수 있다. 각각의 EGR율 조건에 대해서 가장 낮은 연료소비율을 보이는 연료분사시기 및 점화시기 조건을 도출하였다. 열방출율을 시기별로 자세히 살펴보면 최초연료분사시기인 30 CAD BTDC 부근에서 분사된 연료가 기화되면서 흡수되는 잠열에 의해 0보다 낮은 값을 보이고 있다. 이후 약 2 CAD 정도 차이를 두고 일어나는 점화플러그의 방전에 의해 성층혼합기가 일부 연소되어 낮은 기율기를 보이며 상승하였다. 20 CAD BTDC 부근에서는 나머지 연료가 분사되고 초기 분사된 연료에 의해 형성된 화염과 접하는 면에서부터 연소가 일어나기 때문에 열방출율이 급격하게 상승하는 것을 관찰할 수 있다.

상기와 같은 열방출율의 변화는 EGR율의 변화에 관계없이 일관성 있게 나타나고 있으나, EGR율이 증가할수록 최대열방출율이 감소하고 지각됨을 확인할 수 있다. EGR율이 증가할수록 최적연료분사시기 및 점화시기가 진각되었기 때문에 초기 연료의 잠열에 의한 열방출율의 감소 및 후기에 분사되는 나머지 연료의 연소에 의한 열방출의 상승이 보다 이른 시기에 관찰됨에도 불구하고 최대열방출율 값이 지각된 시기에 나타나는 것은 연소속도가 감소하였음을 보여주는 결과라 할 수 있다. 그러나 예상과는 달리 최대열방출율 시점을 기준으로 비교되는 연소 기간은 EGR을 변화에 따라 큰 차이를 보이지 않는데, 이를 통해 EGR의 적용에 의한 흡입공기의 희석효과가 대부분의 연소기간 보다는 초기 화염발달 시기에 집중되었음을 알 수 있다. 즉, 흡입공기와 함께 EGR 가스가 유입되어 1차 분사된 연료가 성층혼합기를 형성할 때 연소가스를 포함하여 EGR을 적용하지 않은 경우에 비해 상대적으로 농후하게 된다. 결과적으로 분자 수준으로 혼합된 상태에서 점화플러그의 방전에 의해 연소가 일어나지만 EGR율이 높은 경우 연료의 산화제로서의 산소와의 화학반응이 연소가스에 의해 방해 받게 되고 결과적으로 초기 화염발달 시기의 연소속도를 감소시킨 것으로 보인다.

20 CAD BTDC 부근에서 후기에 분사된 연료가 초기 분사된 연료의 화염에 의한 높은 온도 조건에서 빠르게 증발이 일어나고 연속적으로 산화제와 반응하여 급격한 열방출이 일어나는 과정에서 EGR 가스에 의해 연료가 공기와 접촉하여 연소반응을 일으킬 가능성이 감소하기 때문에 EGR율이 증가할수록 열방출율의 증가 기울기가 감소하였다. 그러나

화염면 부근에서의 급격한 열방출 이후의 연소는 대부분 1차 및 2차 분사된 연료의 분무가 화염 면과는 거리가 있는 영역에서 공기와 혼합된 예혼합기 상태에서 넓은 영역에 걸쳐 화염전파를 통해 일어나게 된다. 따라서 화염면의 성장에 의한 초기의 화염발달과는 달리 EGR에 의한 영향이 상대적으로 작게 나타나고 17 CAD ATDC 이후에는 EGR율에 관계없이 유사한 수준의 열방출을 보인다. 연소지연에 의한 팽창행정 중의 열방출율의 증가가 크지 않기 때문에 열손실의 차이도 크지 않을 것으로 예상된다.

Fig. 6은 Fig. 5와 같이 각각의 EGR율 조건에 대해서 가장 낮은 연료소비율을 보이는 연료분사시기 및 점화시기 조건에서 탄화수소(total hydrocarbon; THC) 및 NO<sub>x</sub>의 배출을 EGR율의 변화에 따라 나타낸 것이다. EGR율이 증가할수록 THC의 배출은 증가하고 NO<sub>x</sub>의 배출은 감소하는 일반적인 경향을 보인다[12]. 연료분사시의 각도가 피스톤의 행정에 수직하지 않기 때문에 점화플러그에서 거리가 있는 1차 분사된 연료의 일부 및 2차 분사된 연료가 화염면에 접하지 않고 피스톤의 상면에 가까운 부분은 희박한 혼합기를 형성할 가능성이 높다. EGR율이 증가할수록 초기 화염발달 시기의 연소속도가 느려지기 때문에 연소실로 전파되어 매우 희박한 혼합기를 형성하는 연료의 비율이 증가하고 결과적으로 미연탄화수소의 증가에 기여한 것으로 판단된다. EGR율이 증가할수록 2차 분사된 연료의 급격한 열방출율의 기울기도 감소하기 때문에 연소에 참여하기 어려운 희박한 혼합기를 형성하는데 필요한 시간이 증가한 부분도 THC 배출증가의 원인으로 작용하였다. EGR율 증가에 따른 NO<sub>x</sub> 배출 감소는 두 가지 원인으로 나눌 수 있는데, 첫 번째는 EGR의 적용에 의한 일반적인 효과인 CO<sub>2</sub>와 H<sub>2</sub>O로 대표되는 연소가스에 의한 희석효과이다. 흡입공기의 일부가 EGR 가스로 대체되면서 비열이 낮은 산소 비율이 감소하고 비열이 높은 CO<sub>2</sub>와 H<sub>2</sub>O가 유입되어 연소온도를 감소시킴으로써 NO<sub>x</sub>의 생성이 억제되었다. 2차 분사된 연료의 화염 면에서의 연소반응을 감소가 두 번째 원인으로 EGR율이 증가할수록 화염 면에 접하는 연료와 산화제의 혼합기 농도는 높지만 반응율 감소에 의한 온도 감소의 영향이 보다 지배적으로 작용한 것으로 보인다.

연소 및 배출가스 특성을 모두 고려할 때, EGR율 7%이상의 적용은 연소안정성의 악화로 상용엔진의 안정적인 운전조건으로 보기 어렵다. 따라서 이상운전의 안전범위를 고려하여 EGR율 5%를 적용할 경우 EGR을 적용하지 않은 조건 대비 연료소비율과 THC의 배출은 약간 증가하지만 NO<sub>x</sub>배출은 약 15% 저감

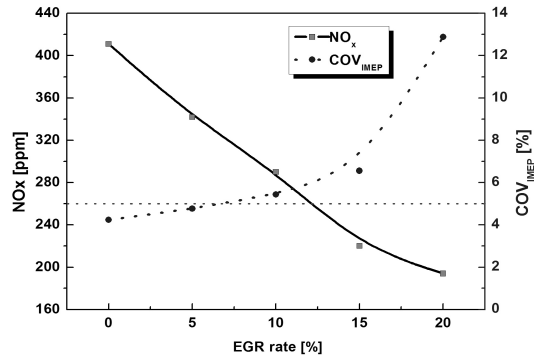


Fig. 7. Effect of EGR rate on NO<sub>x</sub> emissions and combustion stability at optimal fuel injection and spark ignition timing for each EGR rate condition at 1600 rpm, BMEP 0.24 MPa operating condition.

되는 것을 알 수 있다. 결과적으로 2000rpm, BMEP 0.2 MPa의 운전조건에서는 EGR을 5%가 적용가능한 최대 EGR율임을 알 수 있고 상기 조건에서의 NO<sub>x</sub> 배출량은 여전히 높은 수준이다. 이에 희박한 연소 조건에서 상대적으로 연소안정성이 높은 부하조건에서의 EGR 적용 가능성을 검토하기 위해 1600rpm, BMEP 0.24 MPa 조건에서 EGR을 변화에 따른 연소 및 배출을 검토하였다.

Fig. 7은 각각의 EGR율 조건에 대해서 가장 낮은 연료소비율을 보이는 연료분사시기 및 점화시기 조건에서 EGR율의 변화에 따른 NO<sub>x</sub> 배출 및 연소안정성을 나타낸 것이다. 연료분사량이 상대적으로 많은 조건이기 때문에 보다 개선된 연소안정성과 보다 높은 EGR율의 적용이 가능할 것으로 기대하였으나, EGR 적용에 따른 COV의 증가율이 높아서 이전의 운전조건에서와 같이 EGR율 5%가 적용 가능한 최대 EGR율로 판단되었다. EGR율 5% 조건에서 NO<sub>x</sub>의 저감율은 약 17% 수준으로 약간 증가하였으나 부하의 증가에 따라 늘어난 연료분사량이 연소온도를 상승시켰기 때문에 여전히 상용 엔진에 해당 연소전략을 적용하기에는 높은 수준임을 알 수 있다. 두 가지 운전조건에 대해서 EGR을 적용하지 않은 경우의 최적 점화시기는 27 CAD BTDC이며, EGR율 증가에 따라 분위기압력이 감소되며 최적 점화시기가 진각되었기 때문에 점화플러그의 착화성이 연소안정성의 악화에 영향을 미친 것으로 보이지는 않는다. 따라서 EGR율을 추가적으로 증가시켜 NO<sub>x</sub> 배출을 억제하기 위해서는 연소안정성 확보를 위한, 보다 개선된 연소전략이 개발되어야 할 것으로 보인다.

#### IV. 결론

본 연구에서는 분무유도방식의 연소시스템을 적용한 초희박 직접분사식 LPG 엔진에서 성층 희박연소시 NO<sub>x</sub> 배출을 저감하기 위해 EGR을 적용하였으며, 이에 따른 연소 및 배출가스 특성을 관찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) ISI 연소전략을 사용한 직접분사식 LPG 엔진의 희박연소조건에서 EGR 적용 시 낮은 비열비와 초기 화염발달 단계의 연소속도 감소에 의한 영향으로 연료소비율이 증가하였다.

(2) EGR 적용에 의한 연소속도의 감소는 초기 화염발달 시기에 집중되어 나타났으며 흡입공기의 희석효과에 의해 EGR율이 증가할수록 최대 열방출률 및 열방출을 증가 기온기가 감소하였다.

(3) EGR율이 증가할수록 분사된 연료의 위치가 점화플러그에서 거리가 있고 피스톤의 상면에 가까운 영역에서 희박한 혼합기가 형성되는데 필요한 시간이 증가하여 미연탄화수소의 배출이 증가하였다.

(4) EGR 적용 시 연소가스의 희석효과 및 반응을 감소로 인한 연소온도의 저하에 의한 영향으로 EGR이 증가할수록 질소산화물의 배출이 감소되었다.

(5) NO<sub>x</sub> 배출을 억제하기 위해 높은 EGR율의 EGR 적용을 위해서는 연소안정성 확보를 위한 보다 개선된 연소전략이 개발되어야 한다.

#### REFERENCES

[1] C. Myung, H. Lee, K. Choi, Y. Lee, S. Park, "Effects of gasoline, diesel, LPG, and low-carbon fuels and various certification modes on nanoparticle emission characteristics in light-duty vehicles", *International Journal of Automotive Technology*, Vol. 10, No. 5, pp. 537-544, (2009)

[2] J. Lee, H. Do, S. Kweon, K. Park, J. Hong, "Effect of various LPG supply systems on exhaust particle emission in spark-ignited combustion engine", *International Journal of Automotive Technology*, Vol. 11, No. 6, pp. 793-800, (2010)

[3] J. Kim, K. Choi, C. Myung, S. Park, "Experimental evaluation of engine control strategy on the time resolved THC and nano-particle emis-

sion characteristics of liquid phase LPG direct injection (LPG-DI) engine during the cold start", *Ruel Processing Technology*, Vol. 106, pp. 166-171, (2013)

[4] C. Park, J. Oh, H. Kim, "A study on the Lean Combustion Characteristics with Variation of Combustion Parameter in a Gasoline Direct Injection Engine", *Transaction of KSAE*, Vol. 20, No. 4, pp. 39-45, (2012)

[5] S. Kim, Y. Kim, J. Lee, "Analysis of the In-cylinder Flow, Mixture Formation and Combustion Processes in a Spray-guided GDI Engine", *SAE 2008-01-0142*, (2008)

[6] W. Chang, Y. Kim, J. Kong, "Design and Development of a Spray-guided Gasoline DI Engine", *SAE 2007-01-3531*, (2007)

[7] C. Park, W. Park, S. Oh, Y. Lee, T. Kim, H. Kim, Y. Choi, K. Kang, "Emission Characteristics of Gasoline and LPG in a Spray-Guided-Type Direct Injection Engine", *SAE paper 2013-01-1323*, (2013)

[8] S. Cho, C. Park, S. Oh, J. Yun, "Comparison of Combustion Characteristics with Combustion Strategy and Excess Air Ratio Change in a Lean-burn LPG Direct Injection Engine", *Transaction of KSAE*, Vol. 22, No. 6, pp. 96-103, (2014)

[9] C. Park, S. Oh, T. Kim, H. Oh, C. Bae, "Combustion characteristics of stratified mixture in lean-burn LPG direct injection engine with spray-guided combustion system", *Proceedings of ASME 2014 Internal combustion engine division fall technical conference*. ICEF 2014-5531.

[10] J. Heywood, *Internal combustion engine fundamentals*. McGraw-Hill Inc. New York, (1988)

[11] J. Przystek, A. Dabkowski, A. Teodorczyk, "The Study of Exhaust Gas Recirculation on Efficiency and NO<sub>x</sub> Emission in Spark-Ignition Engine", *SAE 1999-01-3514*. (1999)

[12] J. Cha, J. Kwon, Y. Cho, S. Park, "The Effect of Exhaust Gas Recirculation (EGR) on Combustion Stability, Engine Performance and Exhaust Emissions in a Gasoline Engine", *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 15, No. 10, pp.1442~1450. (2001)