

소형 고속 전자제어 연료분사 엔진 개발에 관한 연구

이승진*[†] · 류정인** · 최교남*** · 정동수***

*충남대학교 대학원, **충남대학교 기계공학과, ***한국기계연구원

(2005년 3월 4일 접수, 2005년 9월 5일 채택)

Study on Development of High-Speed Small Engine Controlled by EFI (Electronic Fuel Injection)

Seungjin Lee*[†], Jeongin Ryu**, Kyonam Choi*** and Dongsoo Jeong***

*Graduate School, Chungnam University, 220, Goong-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-764, Korea

**Department of Mechanical Engineering, Chungnam University, 220, Goong-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-764, Korea

***Korea Institute of Machinery & Materials, 171 Jang-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-660, Korea

(Received 4 March 2005, Accepted 5 September 2005)

요 약

소형고속엔진에서 연료분사 시스템은 기화기시스템 보다 출력, 연료소비율, 배기가스 등에서 향상된 결과를 가져온다. 최근에 국내에서 연료분사시스템은 차량에 사용되지만 이륜차에서는 사용되지 않는다. 엔진에서 EFI(전자식연료분사)시스템은 변화하는 회전수에 따라 ECU 에서 정확한 연료를 공급할 수 있다. 본 연구의 목적은 이륜차에 사용되는 4valve SOHC 단기통 소형엔진에서 다양한 회전수에 맞는 엔진성능과 효율을 개선하기 위해 회전수별 연료분사효과를 고찰하였다.

주요어 : 전자제어연료분사, 단기통 엔진, SOHC

Abstract — Fuel injection system has more benefits in power, fuel consumption and emission than carburetor system even in high speed small engine. Up to date fuel injection system is used in motor car but is not used in motorcycles in Korea. EFI (Electronic fuel injection) system which has ECU can control precise fuel supply to variable RPM in engine. The purpose of this study is the investigation of effects of fuel injection system to improve the engine performance and efficiency in variable revolution of high speed small engine which is 4 Valves SOHC single cylinder engine used in motorcycle.

Key words : EFI (Electronic Fuel Injection), ECU (Electronic Control Unit), SOHC (Single Over Head Cam-shaft)

1. 서 론

현재 국내에서 생산되는 이륜차용 엔진은 경제적인 이유로 기화기를 연료공급방식으로 채택하고 있다. 기화기 방식은 양호한 운전성과 고출력을 얻기 위해 대부분

공기와잉유(λ)이 약 0.8의 농후한 조건에서 운전되기 때문에 HC 및 CO의 배출량이 높다. 특히 이륜차의 경우 운전영역이 Idle부터 최대 12,000 RPM 까지 범위가 넓어 각 속도마다 최적의 연료량을 공급하기엔 기화기 방식으로서는 다소 불리하다. 반면에 전자제어 연료분사 장치(EFI : Electronic Fuel Injection)는 EMS(Electronic Management System)의 연료계통 제어의 한 부분으로써 운전조건의 변화에 따른 연료 보상을 할 수 있기 때문에 기화기 보다 좋은 응답특성과 연비를 가질 수 있다^[1].

[†]To whom correspondence should be addressed.
Graduate School, Chungnam University, 220, Goong-dong,
Yuseong-gu, Daejeon 305-764, Korea
Tel: 042-868-7310
E-mail: l8253223@empal.com

자동차의 기술 흐름과 같이 전자 제어식 연료분사기술은 출력, 연비의 향상은 물론 향후 강화될 배기가스 규제를 만족시키기 위해서는 필수적인 기술이다^{[2][4]}. 현재 유럽, 일본, 미국과 같은 선진국에서는 대형은 물론이고 중소형 이륜차에도 보급이 활발해지고 있으며 중국도 125 cc급을 생산하고 있다^[5]. 국내에서는 경제적인 이유로 이륜차 엔진용 ECU(Electronic Control Unit) 및 EMS 장치 엔진개발 연구가 진행 중 일 뿐 국내기술로 생산되는 상용 제품은 없는 상태이다.

이륜차의 배기가스 규제는 유럽에서는 EURO-III를 2006년부터 실시하여 승용차처럼 단계적으로 배출허용기준을 강화하고 있고, 국내에서도 2000년부터 배기가스 기준을 강화하기 시작하여 유럽과 같은 규제치로 접근하고 있다^[6]. 이와 같이 환경적인 면에서 볼 때 이륜차의 공해저감 대책이 시급한 실정이다.

본 연구에서는 엔진의 연료공급장치를 기존의 기화기 방식에서 전자제어식 연료분사 방식으로 바꾸어 엔진의 성능향상과 배출가스 저감을 위한 상용 EMS 엔진 개발의 일환으로 수행하였다.

2. EMS 시스템 엔진 구성

2-1. 시험엔진 시스템

본 실험에 사용된 엔진은 현재 상용되는 4 Valve SOHC 기화기방식의 소형 가솔린 엔진을 주요 제원으로 하였으며 연료공급장치는 기존의 기화기 방식을 전자제어식 연료분사방식으로 개조하여 사용하였다. 엔진의 제원은 Table 1과 같다.

Fig. 1은 전자제어 연료분사시스템을 나타내었다. 컴퓨터로 스톱밸브를 제어한 후 흡입공기량에 맞게 연료를 분사할 수 있도록 하였다. 엔코더와 위치센서에서

Table 1. Engine specifications.

Type	4 cycle SOHC
Number of cylinder	1
Bore×Stroke	56.5×49.5 mm
Displacement volume	124.1 cm ³
Compression ratio	11.5
Cooling system	Air cooling
Intake valve open	7°BTDC
close	24°ABDC
Exhaust valve open	16°BBDC
close	4°ATDC
Valve clearance Intake	0.12 mm
Valve clearance Intake	0.12 mm
Ignition type	CDI
Fuel supply system	carburettor, EFI

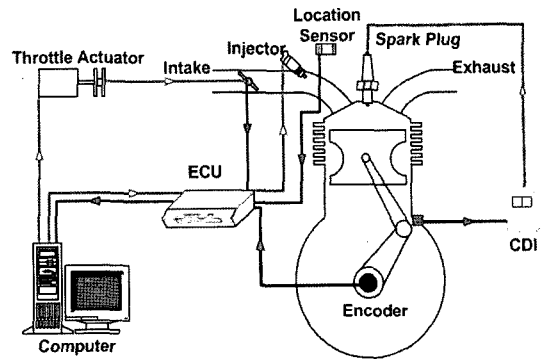


Fig. 1. Electronic fuel injection system.

신호를 받아 ECU에서 분무량을 제어할 수 있도록 되어 있다.

2-2. 시험엔진 구성 부품

실험엔진의 구성부품과 기존 기화기식 상용엔진의 구성부품의 차이점은 각 부품이 전자제어를 할 수 있다는 것이 큰 차이가 있다. 중요한 핵심 부품은 ECU, Injector, Throttle body이고 이 각 부품들은 연료분사제어시스템을 구성하는데 없어서는 안 될 부품들이다.

2-2-1. ECU 사양

본 실험에서 제작된 ECU는 주문제작하여 사용하였다. 실험에서 사용된 ECU는 본 전자제어 연료분사시스템 중 핵심이 되는 부품이다. ECU의 입력요소는 엔진 회전수를 측정하는 엔코더 신호, CAM의 위치를 감지하는 근접센서의 신호, 스톱밸브 각도를 모니터링하는 TPS(Throttle Position Sensor)센서 신호로 구성되어 있다. ECU의 출력 요소는 Injector에 보내는 신호로만 하였다. 또한, 컴퓨터와 ECU는 데이터 값이 상호 호환 될 수 있도록 하였다. ECU는 분사시기와 분사량을 결정하는데 사용되고 엔진의 운전조건 변화에 따라 정확하게 연료 공기 혼합량을 제어 할 수가 있다.

2-2-2. Throttle body

실험에서 사용된 Throttle body는 유창정기사의 제품으로 공기필터와 인젝터 홀더 사이에 장착되었다. ISA(Idle

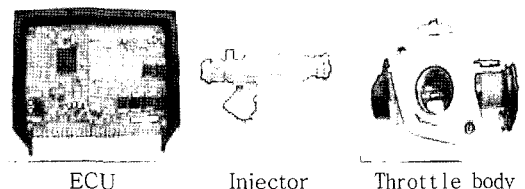


Fig. 2. EMS components.

Table 2. Throttle body specifications.

Angle in close (deg)	7°(90°)
Moving angle (deg)	85°(90°)
Leak amount (20 l/min)	440 mmHg
Bore size	φ28

Speed Actuator) 사용할 경우는 공기량 제어가 곤란하여 실험에서는 작동을 시키지 않았다. 컴퓨터에서 신호를 Throttle Actuator에 보내면 Throttle Actuator가 작동한다. Throttle Actuator는 Throttle body의 밸브를 개폐시킨다. 개폐의 정도는 TPS(Throttle Position Sensor)를 통하여 ECU로 보내진다. 그리고 ECU는 받은 신호를 컴퓨터로 보낸다. 이렇게 TPS는 가변저항기로 Throttle body 밸브의 회전각도에 따른 출력 값의 변화를 ECU로 전달하는 역할을 한다. 본 실험에서 사용된 Throttle body의 사양을 Table 2에 나타내었다.

2-2-3. 인젝터 사양

인젝터는 케피코사의 4홀 노즐을 사용하였다.

Static flow rate는 3 bar에서 106 g/min량이며 무효 분사 시간(injection dead time, delay)을 Table 3에 나타내었다.

Fig. 3은 분무기간이 3 ms일 경우 분무 시간에 따른 분무이미지 결과를 보여주고 있다. 분무각도는 15°로 나타나 밸브상단과 인젝터 사이의 거리를 100 mm의 거리를 유지하기에 적합하도록 되어 있다. 이는 2개의 흡입 밸브로 유입될시 연료와 흡기포트 벽의 간섭이 최소화 되는 지점이다.

Fig. 4는 엔진에 설치된 Throttle body System을 보

Table 3. Injection dead time.

Voltage (V)	Dead time (ms)
10	1.294
12	0.925
14	0.680

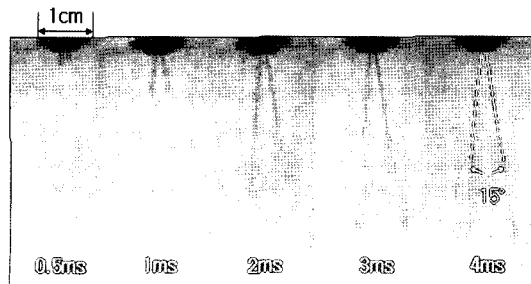


Fig. 3. Image of spray and spray angle.

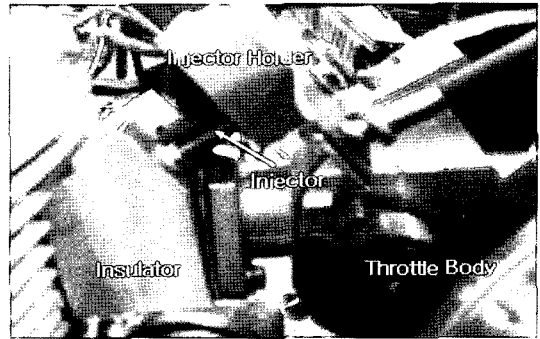


Fig. 4. Injector assembly & throttle body assembly installed in engine.

여준다. 인젝터 어셈블리와 스톱바디 어셈블리를 부착하여 연료분사와 공기량조절이 용이하도록 하였다. 인젝터의 분무거리는 100 mm를 기준으로 하였고 분무압력은 3 bar로 유지하였다.

2-2-4. 점화시스템 구성요소 사양

CDI(Capacitor Discharge Ignition)는 자가동력 점화(Self-Power Ignition)원으로서 콘덴서 점화플러그의 빠른 방전특성을 가진다. 엔진 플라이휠에 있는 여기코일(Exciter Coil)과 마그네트는 CDI 장치의 콘덴서로 전압을 충전시키고, 펄스코일은 플라이휠의 위치를 감지하여 콘덴서의 방전시기를 결정한다. 콘덴서 전압은 점화코일을 통해 점화플러그로 방전된다.

CDI는 엔진의 시동을 쉽게 하고 불리한 조건하에서도 점화가 잘되도록 하며 배터리가 필요 없고 유지보수도 필요 없다.

본 엔진의 점화장치의 CDI는 기존에 있는 방식으로 점화시기는 15°BTDC/1500RPM, 28°BTDC/3900RPM이다.

점화플러그 모델번호는 C8EH-9이고 간극은 0.08 mm이다. AC 제너레이터는 5000 RPM에서 125 W이다.

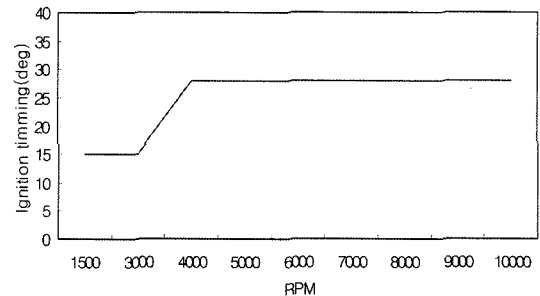


Fig. 5. Ignition timing of CDI.

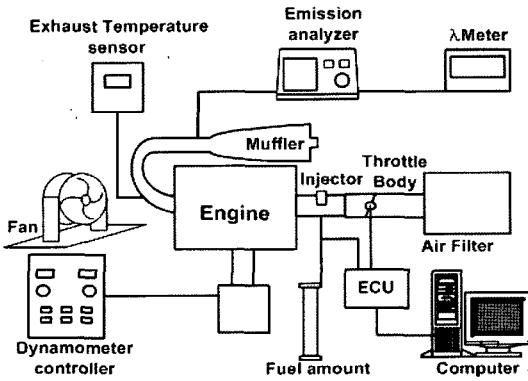


Fig. 6. Schematic diagram of experimental apparatus.

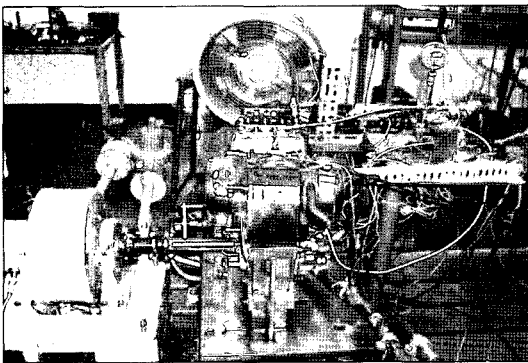


Fig. 7. Engine test apparatus.

3. 엔진 실험장치 및 방법

3-1. 엔진 성능실험장치

Fig. 6은 엔진 성능실험 장치의 개략도이다.

동력계는 40 kW급 Eddy Current Type을 사용하였으며 배기가스 분석기는 Horiba사의 Portable Gas Analyzer를 사용하였다. λ Meter는 Etas사의 LA4와 광대역 센서를 사용하였다.

연료공급은 유량계에서 기화기 또는 Injector로 보내고 분사 후 연소실로 공급된다. 공기는 Air Filter를 통과하여 기화기 또는 스톱틀바디로 보내져 연료와 혼합되어 연소실로 공급 되도록 설계되었다.

3-2. 실험 방법

동력계는 속도제어모드로 하여 3000 RPM에서 10000 RPM 까지 1000 RPM의 간격으로 측정하였다. 동력계에 비해 엔진 RPM이 높고 Torque가 낮은 관계로 엔진과 동력계 사이에 감속비 0.3369의 차속감속기를 이용하여 동력계의 측정 범위에 맞추어 계측하였다. 블로어를 이

용하여 외부로 배기가스를 배출하였고, 냉각 Fan을 사용하여 엔진을 냉각하였다. 기화기 방식과 전자제어 연료분사 방식을 비교 실험하였다. 전자제어 연료분사방식의 경우 WOT(Wide Open Throttle)일 때의 연료소비량, 배기가스, λ 값을 측정하였다. 전자제어 연료분사방식인 경우 최대토크를 발생하는 때를 TMAX로 하였고, λ가 1일 때는 TL1로 하여 실험을 하였다. 또한 기화기방식은 C로 나타내었다.

4. 실험 결과 및 고찰

분사시기는 흡기밸브 개폐시기 15~30°로 같은 조건에서 연료를 분사하였다.

Fig. 8은 RPM별에 따른 분사량을 측정한 결과이다. 고 RPM일수록 직선형태의 그래프를 보임을 알 수 있다. 최대토크(TMAX)일 경우 3000~10000 RPM일 때 분사시간은 6 ms~7 ms 사이에 있으나, TL1인 경우는 5 ms~6 ms 사이에 있다. TMAX일 경우 엔진에 소비되는 연료량이 상대적으로 많은 것으로 나타났다. 기술린엔진에서는 λ 값이 1보다 작은 부분 즉 농후한 부분에서 최대토크가 발생한다. 여기서 TMAX인 경우 분사시간이

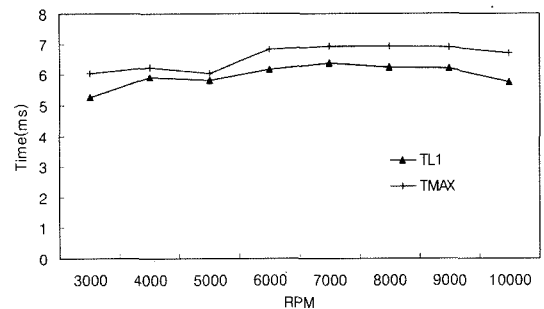


Fig. 8. Amount of spray at WOT.

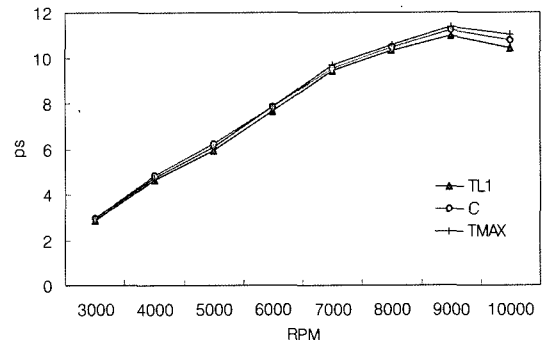


Fig. 9. Comparison of power at WOT.

상대적으로 1 ms 더 긴 것은 λ 가 1인 경우 보다 농후한 영역이고 최대 출력을 발생하는 부분이기 때문에 사료된다.

Fig. 9는 WOT인 경우의 출력을 나타내고 있다. 연료량 변화에 따라 엔진출력도 변화하기 때문에 인젝터에서 분무되어지는 연료량은 출력에 큰 영향을 미친다. 연료가 너무 농후하거나 너무 희박하면 엔진출력에 큰 변화를 일으킨다. 최대출력이 발생한 때와 CO, HC 저감과 연료소비율 저감에 비교적 유리한 λ 가 1일 경우를 비교하였다.

본 실험에서는 전자제어 연료분사방식에서 각 RPM 별 출력이 최대로 발생한 TMAX인 경우가 기화기방식 보다 높은 출력을 보였다. 한편, TL1인 경우는 기화기를 사용할 때보다 낮은 출력을 나타내고 있다.

이론상 $\lambda=1$ 일 경우 연소가 이상적으로 일어나지만, 최대출력은 $\lambda < 1$ 부분에서 일어난다. 여기서 각 조건별 최대 출력은 모두 9000 RPM에서 발생하였다. 이때 TMAX는 기화기방식 대비 5%의 출력증가를 보였다. 그 이유는 TMAX가 최대 Power를 낼 수 있는 조건으로 연료와 공기가 공급되어져 최대출력을 낸 것으로 사료된다.

Fig. 10은 제동연료소비율(BSFC : Brake specific fuel consumption)를 나타내고 있다. 기화기를 사용하였을 경우가 마력당 연료소비율이 가장 큰 것으로 나타났다. 전자제어방식을 사용하였을 경우 연료소비율이 현저하게 감소함을 알 수 있다. TL1인 경우 모든 운전영역에서 연료소비율이 가장 유리하게 나타났다. 7000 RPM 부근에서는 기화기식에서는 300 g/ps·h이었지만, 전자제어식에서는 250 g/ps·h를 나타내었다. 기화기 대비 TMAX는 1000~10000 RPM에서 평균 약 20%의 연료 소비율 저감을 보였다. 이는 최적의 연료를 공급하여 줌으로써 기화기식 대비 연료가 20% 적게 소비된 것으로 사료된다.

Fig. 11은 RPM에 따른 공기과잉율 λ 값을 나타내고

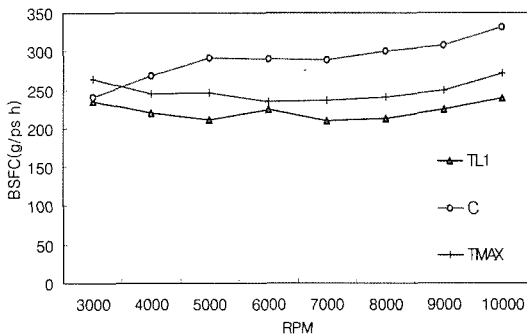


Fig. 10. Comparison of specific fuel consumption at WOT.

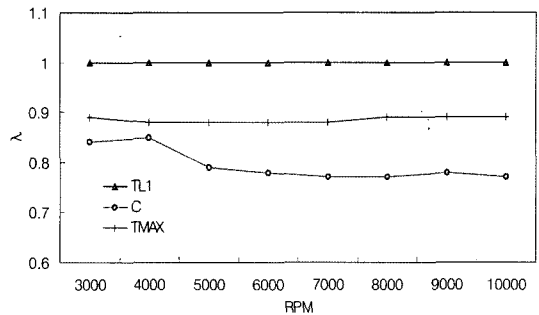
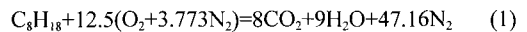


Fig. 11. Comparison of λ (relative air/fuel ratio) at WOT.

있다. 기화기방식의 경우와 전자제어식 연료공급 방식의 경우를 비교하면 전자제어식 연료공급방식을 사용한 경우 λ 값이 0.88 부근에서 최대출력을 얻었으며, 기화기방식은 전체적으로 5000 RPM 이상 일 때 0.78 부근을 나타내고 있다.

기화기 방식은 정확한 연료공급이 곤란하여 그림과 같이 공기과잉율의 변화가 크게 나타난 것으로 생각 된다. 일반적으로 기술련의 옥탄가 기준 100인 이소옥탄 1 mole의 이론 연소를 보면 다음과 같다.



이것은 λ (공기과잉율)=1일 때를 기준으로 한 경우이다⁷⁾.

$$\lambda = \frac{(A/F)_{actual}}{(A/F)_s} \quad (2)$$

λ 는 연료에 대한 실제 공급 공기비 $(A/F)_{actual}$ 를 연료의 이론공기비 $(A/F)_s$ 로 나눈 값으로 나타낸다.

특히 CO는 공연비가 농후한 영역 즉 공기과잉율 $\lambda < 1$ 을 때 많이 발생하기 때문에 희박영역으로 갈수록 농도가 급격히 줄어드는 경향을 가지고 있다. 일반적으로 발생원인은 공기와 연료혼합기의 불균일성과 농후한 연료

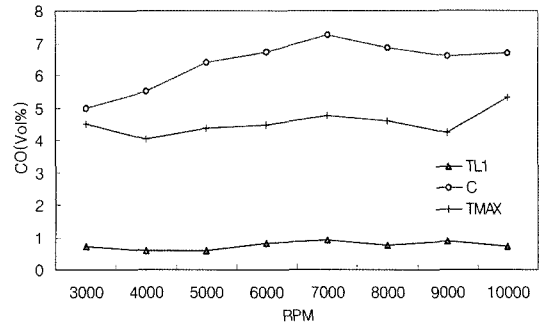


Fig. 12. Comparison of CO at WOT.

공급으로 볼 수 있다.

Fig. 12는 CO% 농도 값을 나타내고 있다. WOT일 때를 비교하면 기화기식 대비 전자제어식 연료공급장치 사용 TMAX인 경우 5000-9000 RPM일 때 평균 30% 저감효과를 보이고 있다. 또한 λ 가 1인 경우는 약 80%의 저감효과를 보이고 있다. 이는 연료와 공기와의 이론 공기비($\lambda=1$)에 가까우므로 미연소 되는 CO가 약 30%적게 나타난 것으로 생각된다.

연료가 농후한 영역으로 갈수록 CO와 비슷한 경향으로 HC의 농도는 급속하게 증가하며, 아주 희박한 영역에서도 불완전연소나 실화로 인하여 급격하게 증가한다. HC의 일반적인 발생원인은 벽면에서의 화염소실 및 피스톤 상부와 틈새체적에 남겨진 미연소 혼합기 또는 점화시기나 공연비의 제어를 최적의 조건으로 제어하지 못한 경우의 실화나 불완전연소나 연소실내 부착되어 있는 퇴적물의 영향으로 발생된다.

Fig. 13에서는 기화기를 사용하였을 경우 전자제어식 연료공급장치를 사용한 경우보다 고회전수 범위에서는 비교적 HC가 높게 나타났다. λ 가 1인 경우 7000 RPM에서 최대출력시 TMAX보다 HC가 최대 50%의 저감을 보여주고 있다. 또한 TMAX인 경우는 기화기 방식보다도 8000 RPM 이상에서는 10% 이상의 저감효과를 보여주었다. 이는 연료와 공기와의 이론 공기비($\lambda=1$)에 가까우므로 미연소되는 HC가 10% 적게 나타난 것으로 생각된다.

NOx는 일산화 질소(NO)와 이산화질소(NO₂)를 말하며 대부분 NO가 차지하고 있다. 열해리에 의해서 산소와 반응하여 NOx를 발생시킨다. 주요 발생원인 공기중의 질소분자에 의한 것이다. 공기질소에 의한 NO 발생은 Zeldovich mechanism에 의한 것으로 다음의 반응기구를 갖는다.

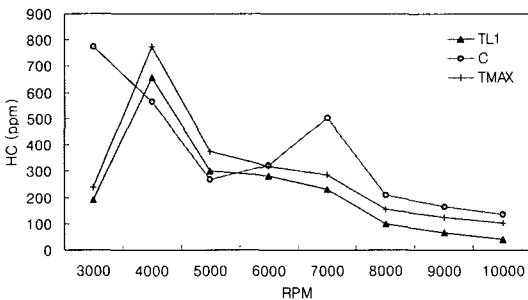


Fig. 13. Comparison of HC at WOT.

NO는 대부분 화염후면가스에서 발생한다. NO 발생 농도는 온도에 크게 지배된다. NO₂ 발생은 NO에 비해 무시해도 좋을 정도로 작다. 실제적으로 가솔린 기관에서는 NO에 비해 NO₂는 약 2%에 불과한 것으로 나타났다.

특히 NOx는 탄화수소계 매연가스와의 상반관계(trade off)를 유지하고 있기 때문에 두 성분을 동시에 저감시키는 것은 어려운 일이다. 일반적으로 고온의 실린더에서 연소온도가 높을 경우 NOx가 상대적으로 많이 발생한다.

Fig. 14는 NOx의 변화량을 나타내었다. 기화기를 사용한 경우는 NOx량이 상대적으로 낮게 나타났다. 특히 공기과잉율 λ 가 1인 경우 6000 RPM인 경우 3150 ppm으로 기화기식 대비 약 10배 이상의 NOx를 배출한 것으로 나타났다.

가솔린 기관에서는 대부분 λ 가 1.0 근처에서 NOx 배출이 최대치를 보인다. 이는 공기과잉율이 λ 가 1 근처에서는 탄소와 산소의 결합이 잘 이루어져 연소온도가 높기 때문이다. 여기서 전자제어식 연료공급방식의 경우 기화기를 사용할 경우보다 NOx가 많이 발생한 것은 연소온도가 높기 때문으로 생각된다. Fig. 15와 같이 배기

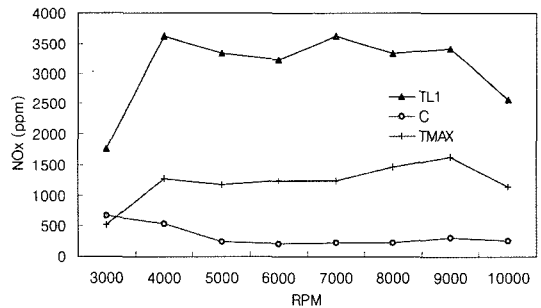


Fig. 14. Comparison of NOx at WOT.

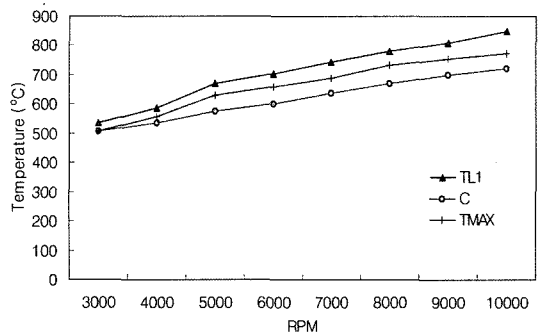


Fig. 15. Comparison of exhaust gas temperature at WOT.

가스 온도가 전자제어방식일 경우 기화기방식 보다 상대적으로 높게 나타나 연소온도에 의해 NOx 배출량이 영향을 받은 것으로 사료된다.

기준 중량 분자수를 기준한 체적 22.4 Nm³일 때 연소성분 원소의 이론식을 보면 다음과 같다.

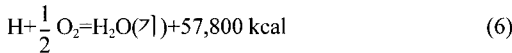
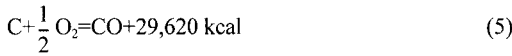


Fig. 15는 배기가스의 온도를 나타내고 있다. TL1인 경우 전체적으로 연소온도가 가장 높게 나타났다. 10000 RPM에서는 배기가스 온도는 820°C의 값으로 기화기식 대비 150°C 높은 값을 나타냈다.

식(4), (5)에서와 같이 일반적으로 탄소가 완전 연소하여 CO₂로 변화하였을 때가 완전히 연소되지 않은 CO의 경우 보다 높다. 같은 량의 탄소가 연소할 때 CO가 많이 발생되면 상대적으로 발열량이 낮게 나타난다.

Fig. 12에서 나타난 것처럼 전자제어식 스토폴 바디를 사용한 경우 기화기식 보다 불완전 연소한 CO가 상대적으로 적게 발생되었기 때문에 방출열이 높은 것으로 사료된다.

5. 결 론

본 연구에서는 이론치에 사용되는 4밸브 SOHC 단기통 소형 가솔린 엔진의 연료공급장치를 전자제어식 연료공급방식으로 변화시켜 엔진의 성능 실험을 실시하였다. 엔진의 성능 실험을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 전자제어식 연료공급방식은 최대출력이 발생하는 9000 RPM에서 최적의 연료량을 분사하여 기화기 방식보다 5% 향상 효과를 보였다.

2) 전자제어식 연료공급방식은 기존 기화기 방식과 비교시 1000~10000 RPM에서 평균 약 20%의 연료소비를 저감을 보였다.

3) 또한, 고회전수 7000~10000 RPM에서 CO는 30%, HC는 10% 저감되어 유리한 면을 보였으나 NOx는 10 배 배출되었다. 이는 배기가스의 배출온도를 볼 때 CO가 적게 배출 되어서 온도가 상대적으로 높게 나타난 것

으로 생각된다.

따라서, 전자제어식 연료공급방식을 사용할 경우는 NOx 저감 대책이 필요할 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 2004년 청정생산기술 중대형 과제 지원으로 수행된 결과입니다. 이에 관계 기관에 감사드립니다.

Notation

(A/F) : Air/fuel ratio

λ : Relative air/fuel ratio

$$= \frac{(A/F)_{\text{actual}}}{(A/F)_{\text{stoichiometric}}}$$

참고문헌

1. KIMM. "Planning the Development Strategy of Next Generation Small Engine for the Growth of Motorcycle Industries". Korea Research Council for Industrial Science & Technology, 2002, 15-16.
2. Yu, C.; Kim, T.; Lee, J.; Noh, S.; Choi, K. "Development of KMC 2.4L Lean Burn Engine", 1995, SAE 950685.
3. Jun Harada; Tsutomu Tomita; Hiroyuki Mizuno; Zenichiro Mashiki; Yasushi Ito. "Development of Direct Injection Gasoline Engine", 1995, SAE 950685.
4. Kimiyoshi Nishizawa; Sukenori Momoshima; Masaki Koga. "Nissan's Gasoline SULEV Technology", 2000, SAE 2000-01-1583.
5. KIMM. "Development of Emission After treatment Systems in Motorcycle Engines" Ministry of Environment in Korea, 2002, 45-49.
6. KIMM. "Industry Analysis of Development of Environmental 4 cycle EFI Engine", Ministry of Commerce, Industry and Energy in Korea, 2003, 34-35.
7. John B. Heywood. "Internal Combustion Engine Fundamentals", McGraw-Hill Book Company, 1997, 70-71.