

## GDI 엔진의 냉각수온에 따른 연소성능 및 입자상 물질 배출 특성§

이효근\* · 최관희\* · 명차리\* · 박심수\*† · 박종일\*\* · 한승국\*\*

\*고려대학교 기계공학부, \*\*현대자동차

### Dependence of Nanoparticle and Combustion Characteristics of Gasoline Direct Injection Engines on Coolant Temperature

Hyo Keun Lee\*, Kwan Hee Choi\*, Cha-Lee Myung\*, Simsoo Park\*†, Jongil Park\*\* and Seung Kook Han

\* School of Mechanical Engineering, Korea Univ.

\*\* Hyundai Motor Company

(Received May 31, 2011; Revised November 1, 2011; Accepted November 4, 2011)

**Key Words:** GDI(가솔린직접분사), DMS(고속 PM 분석기), HFR-400(고속 THC 분석기), CLD-400(고속 NOx 분석기), THC(미연탄화수소), NOx(질소 산화물), PM(입자상 물질)

**초록:** 본 논문에서는 GDI 엔진의 냉각수 온도에 따른 연소 및 배출가스 특성을 연구하였다. 엔진에서 나오는 입자상 물질의 수와 크기 분포는 DMS-500 장비로 측정하였다. 배기포트 에 장착된 CLD-400 과 HFR-400 을 통해 NOx 및 THC 의 배출 특성을 연소주기 별로 측정하였다. 결과적으로 낮은 냉각수온에서 5~10 nm 의 입자상 물질이 크게 증가하는 특성을 보였다. THC 또한 낮은 냉각수온에서 증가하는 특성을 보였는데 이는 연소실 내 연료의 액막현상 때문이다. 그리고 NOx 는 높은 냉각수온에서 감소하는 특성을 보였는데 이는 내부 EGR 이 증가하기 때문이다. 결론적으로 THC 와 NOx 그리고 입자상 물질의 배출을 줄이기 위해서는 냉각수온을 빠르게 올리는 EMS 변수 설정 필요하다.

**Abstract:** This paper investigated the combustion and exhaust gas characteristics of gasoline direct injection engines for various cooling water temperature. The engine-out nanoparticle emission number and size distribution were measured by a DMS-500 equipped upstream of the catalyst. A CLD-400 and an HFR-400 were equipped at the exhaust port to analyze the cyclic NOx and total hydrocarbon emission characteristics. The results showed that the nanoparticle emission number greatly increased at low coolant temperatures and that the exhaust mainly contained particulate matter of 5–10 nm. THC also increased under low temperature conditions because of fuel film on the combustion chamber. NOx emissions decreased under high temperature conditions because of the increase in internal exhaust gas recirculation. In conclusion, an engine management system control strategy for driving coolant temperature up rapidly is needed to reduce not only THC and NOx but also nanoparticle emissions.

### 1. 서 론

가솔린 직접 분사(GDI) 엔진은 기존의 포트분사(MPI) 방식의 엔진을 대체하는 새로운 기술로서 최근 국내외 출시되고 있는 가솔린 차량의 상당부분이 GDI 엔진을 사용하고 있다. GDI 엔진은 기존의 MPI 엔진에 비하여 보다 높은 압축비를 형성하며 또한 연료분사를 정밀하게 제어할 수 있기

에 출력 및 연비의 향상을 가져왔을 뿐 아니라 이산화탄소 배출가스를 획기적으로 저감할 수 있는 등 여러 가지 이점이 있는 엔진이다.<sup>(1)</sup> 하지만 GDI 엔진은 연소실 내부 연료분사로 인한 벽면 액막 현상 발생으로 생성되는 입자상 물질(PM) 과 고압축비 및 연소실 내부에 부분적으로 희박해지는 영역으로 인해 발생하는 질소산화물(NOx)의 배출이 기존 MPI 엔진에 비해 높다는 문제가 있다.<sup>(2-4)</sup> 이는 특히 Euro-5+에서 디젤 차량에만 적용되는 PM 개수농도 규제가 Euro-6 부터는 가솔린 차량에 대해서도 적용하는 방안이 논의 되고 있다.<sup>(5)</sup> 이에 현재 시중에 판매되고 있는 GDI 차량

§ 이 논문은 2011 년도 대한기계학회 에너지 및 동력공학부문  
춘계학술대회(2011. 6. 2., 한국발전교육원) 발표논문임  
† Corresponding Author, [spark@korea.ac.kr](mailto:spark@korea.ac.kr)  
© 2012 The Korean Society of Mechanical Engineers

및 개발되어지고 있는 GDI 엔진의 입자상 물질을 저감하기 위한 방안이 필요한 실정이다.<sup>(6-8)</sup> 기존 MPI 방식에 비해 인체의 건강에 위해성이 있다고 밝혀진 PM 및 기타 배출가스는 냉간 운전 시 다량 배출되는데 충분히 예열되어진 차량에서는 그 배출량이 현저하게 떨어지는 것을 알 수 있다.<sup>(9)</sup> 따라서 본 연구에서는 냉간 운전 시와 충분히 예열되어진 상태의 엔진구동 조건을 이루어 배출가스 및 연소현상의 특성을 분석하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 시험 엔진 및 시험조건

본 연구에 사용된 엔진은 2,359 cc 배기량의 Dual CVVT 가 장착된 가솔린 엔진으로 커먼레일과 고압 인젝터를 이용하여 최대 150 bar 의 연료 분사압으로 실린더 내에 연료를 직접 분사하는 엔진이다. Table 1 에 시험 엔진의 세부 제원을 나타내었다. 또한 본 연구에서는 DC 동력계를 제어하여 엔진운전 영역을 1,500 rpm, 1.5 bar 의 부분부하 조건으로 맞추고 또한 공연비 제어는 이론공연비 ( $\lambda = 1$ ) 로 설정 후 운전하여 실험하였다. 시험변수는 냉각수온의 변화로 하였고 변수설정을 냉간 상태 운전인 20°C와 충분히 예열된 상태인 80°C 그리고 그 사이의 값인 50°C 로 설정하여 각각의 특성을 측정하였다.

### 2.2 시험장치 구성 및 측정 장비

실험을 위한 장치의 구성은 Fig. 1 과 같다. 1번 실린더의 배기포트에 HFR-400 (Flame Ionization Detector)과 CLD-400 (Chemiluminescence Detector)을 장착하여 THC 및 NOx 의 측정을 하였고 배기관의 삼원촉매 진단부에 DMS-500 을 장착하여 입자상 물질의 개수농도를 측정 하였다. 1번 실린더

에 연소압 센서를 장착하여 연소시 발생하는 연소 압력을 측정하였다. 1번 실린더의 배기포트에 장착된 HFR-400 고속 THC 분석기는 미연 탄화수소 분석을 위하여 수소 화염 이온화 (Flame Ionization Detector)법을 이용하는데, 이 방법은 탄화수소 화합물이 수소 불꽃에 의해 고온에서 이온화되는 현상을 이용한 것으로 탄소 숫자에 비례해서 이온화 정도가 결정된다. HFR-400 과 동일하게 1번 실린더에 장착된 CLD-400 고속 NOx 분석기는 질소산화물 분석을 위하여 화학발광 법을 이용하는데, NO 가 오존과 반응하면 광양자 (Photon)가 발생하며, 이 때 발생하는 광양자가 샘플 가스내의 NO 농도에 비례하는 특성을 이용하여 광전자 배증관 (PMT, Photo Multiplier Tube) 을 통하여 광양자를 감지함으로써 NO 농도를 측정한다. 이러한 광양자 발생 반응은 매우 급속하게 이루어지기 때문에 분석기는 빠른 응답속도를 나타내며, 1/250 초 단위의 분해성능을 가진다. 배기관의 삼원촉매 진단부에 장착된 DMS 500 의 반응시간은 최대 100ms 로 차량의 천이운전 조건에서 정밀하게 측정할 수 있는 장점이 있다. 또한 측정 장비 내부에 희석장치가 설치되어 있어 프로그램 상에서 임의로 조절할 수 있는 편리함을 가지고 있다. 배출가스중의 일부를 채취하여 유입되는 입자는 전기적 성질을 가지게 되며 고압 전압이 발생하는 부분을 지나가면서 각 링에 측정된 전류 값을 변환하여 입자 수를 나타내게 된다. DMS 500 은 다른 입자상 물질 측정장치와는 달리 차량 및 엔진의 배기파이프에서 직접 측정할 수 있는 큰 장점을 가지고 있다. 열선 내부에 1,000mm 이상인 입자를 분리할 수 있는 사이클론이 내장되어 있으며, 별도의 heated diluter 없이 열선 내부에서 입자들을 제거된 공기와 희석

Table 1 Test engine specification

Engine type	In-line, DOHC
Number of cylinder	4
Bore (mm)	88
Stroke (mm)	97
Total displacement	2,359
Compression ratio	11.3 : 1
Valve timing	Dual CVVT

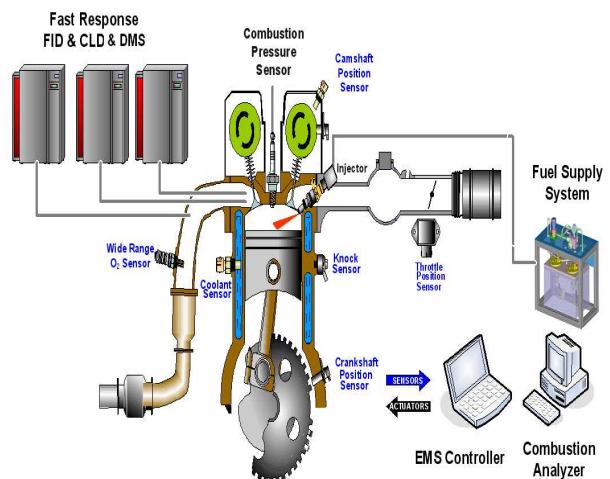


Fig. 1 Schematics of engine test system

시킬 수 있어 편리한 장점을 가지고 있다.<sup>(10)</sup> HFR-400 과 CLD-400 에서 측정된 THC 및 NOx 의 값과 연소압 센서를 통해 측정된 연소압력은 연소해석기를 통해 연소의 주기별로 해석하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 냉각수온 변화에 따른 엔진변수 특성

##### 3.1.1 밸브 Overlap 및 연소 특성

본 실험에 사용되어진 엔진은 Dual CVVT 가 장착된 엔진으로 냉각수온의 변화에 따라 흡기와 배기 밸브의 열림 닫힘 시기가 변화하여 Overlap 기간이 변화함을 알 수 있었다. Fig. 2 에 보여 지는 바와 같이 흡기밸브의 열림 시기는 냉각수온도에 큰 변화가 보이지 않는 반면 배기밸브의 닫힘 시기는 냉각수온이 증가함에 따라 점차 지각됨을 알 수 있다. 이 두 밸브의 특성으로 인해 밸브 Overlap 기간 또한 냉각수온이 증가함에 따라 증가함을 알 수 있다. 밸브 Overlap 이 증가한다는 것은 엔진이 연소할 때 내부 EGR(Exhaust Gas Recirculation) 이 증가하게 되는 것을 의미한다. 이를 통해 연소온도가 낮아지게 되고 연소압력에도 영향을 미치게 된다. 냉각수 온도 변화에 따른 연소압력 특성은 Fig. 3 에 나타나는 바와 같다. 최대 연소압력이 이루어지는 영역에서 Fig. 3 을 분석하면 20℃, 50℃, 80℃에서의 연소압력 중 20℃에서의 연료압력이 18 bar 로 가장 높은 연소압력을 보이며 80℃에서는 14 bar 로 가장 낮은 연소압력을 보이는 것을 알 수 있다. 냉간 운전시에 비해 충분히 예열된 운전 조건에서 약 30 % 정도의 연소압력의 감소가 나타나는 것을 알 수 있다. 50℃는 20℃보다 낮은 연소압력을 보이기 는 하지만 5 % 이내의 차이를 보여 그 정도가 현격히 작은

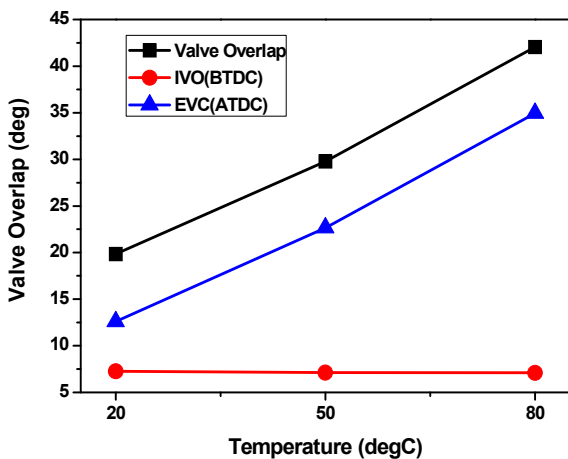


Fig. 2 Characteristic of valve timing according to coolant temperature

것을 볼 수 있다. 냉각수온이 높아짐에 따라 연소압력이 낮아지는 주된 이유는 밸브 Overlap 을 들 수 있다. 밸브 Overlap 이 증가함에 따라 내부 EGR 이 증가하게 된다. 기연가스가 미연가스와 혼합되어 연소실로 들어가 화염이 일어날 때 생기는 열을 흡수하고 또한 연소실내 미연가스의 비율이 줄게 되어 연소실 온도가 낮아지게 된다. 결과적으로 연소실 온도가 낮아져 연소실의 연소압력 또한 낮아지게 되는 것이다. 질량 연소율의 특성곡선인 Fig. 4 에 보이는 바와 같이 냉각수온도가 증가할수록 연료의 연소속도가 늦어지는 것을 확인할 수 있다. 이는 높은 냉각수온에서 내부 EGR 이 증가하고 그 영향으로 연소실 내의 연소 속도가 늦어지는 것으로 분석 된다.

##### 3.1.2 흡기 매니폴드 압력 및 연료분사압력 특성

흡기 매니폴드 압력 값은 냉각수온이 증가함에 따라 증가하는 비례 관계를 보여주고 있다. (Fig. 5) 이는 3.1.1 절에서 설명한 내부 EGR 과도 연관이

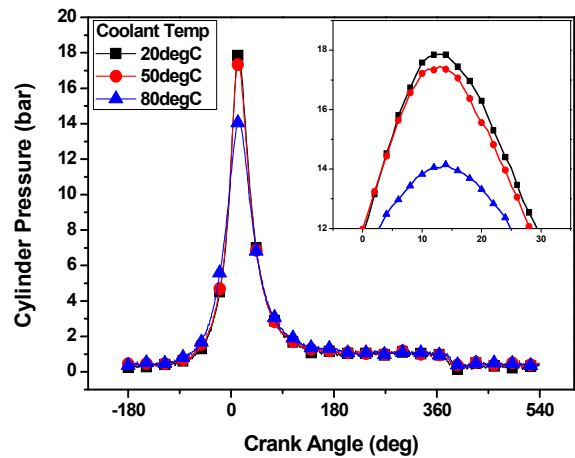


Fig. 3 Cylinder pressure according to coolant temperature

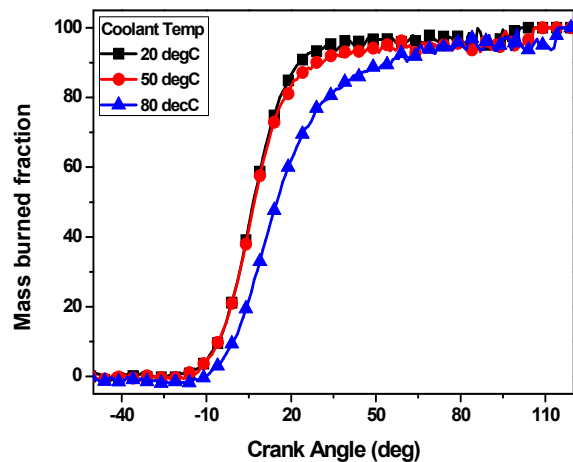


Fig. 4 MBF according to coolant temperature

있으며 또한 일정한 공연비 조건에서 동일 출력을 얻기 위한 실험 제어의 결과이기도 하다. 냉각수 온이 증가함에 따라 증가한 밸브 Overlap 으로 인해 내부 EGR 또한 증가하게 되고 이때 이에 따라 출력이 감소하게 되며 동일한 출력을 얻기 위해 스로틀의 개도를 증가시켜 MAP(Manifold Air Pressure) 값이 증가하고 흡입되는 공기의 양이 늘어나게 되는 것이다. 또한 다른 이유로는 냉각수 온이 증가하여 흡입되는 공기의 밀도가 낮아지게 되고 공기와 연료의 질량비(공연비)를 맞추기 위해 MAP 값이 증가하게 되는 것으로 분석된다. 또한 연료분사압력은 MAP 값과는 다른 양상을 보이는데(Fig. 6) 냉각수 온 20℃에서 51 bar 정도의 압력을 보이는 반면 80℃에서는 47 bar 정도의 압력을 보여 약 8 % 정도 낮은 분사 압력을 나타내었다. 이는 충분히 예열된 엔진에서는 연료의 무화 특성이 개선되며, 냉간 운전시보다 화염의 전파속도도 빠르기 때문에 시동 혹은 냉간 운전시와 같이 높은 압력으로 연료를 분사할 필요가 없는 것으로 분석되어 진다.

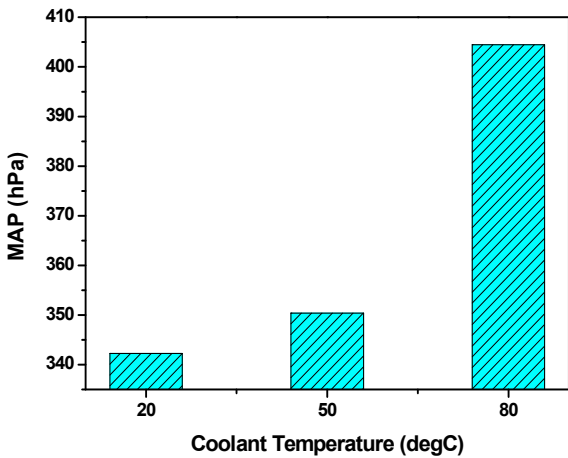


Fig. 5 Characteristic of manifold air pressure

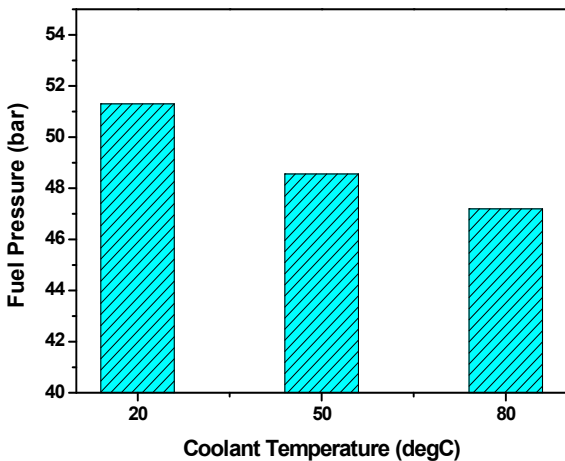


Fig. 6 Characteristic of fuel pressure

### 3.2 냉각수에 따른 배출가스 특성

#### 3.2.1 입자상 물질 개수농도 배출특성

입자상 물질의 개수농도는 Euro-6 규제부터 중요하게 자리 잡을 것으로 예상되는 가운데 특히 가솔린 차량에 큰 영향을 미칠 것으로 보인다. Fig. 7 에서 볼 수 있듯이 냉각수 온이 올라가면서 입자상 물질의 개수농도가 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 본 논문에서는 30 nm 이하의 입자를 핵화(Nucleation)모드의 입자상 물질로 구분하였고 30 nm 이상을 축적(Accumulation) 모드의 입자상 물질로 구분하였다. 핵화모드의 입자상 물질은 냉각수 온이 증가함에 따라 그 개수농도가 확연히 줄어드는 것을 확인할 수 있으나 축적모드의 입자상 물질은 핵화모드의 개수농도에 비하여 그 양이 크게 변하지 않고 50℃ 에서 증가하는 모습을 보인다 다시 80℃에서 감소하는 모습을 보였다. 배기관에서의 핵화모드 입자상 물질의 응축으로 인해 축적모드의 입자상 물질이 다소 증가된 것으로 추정된다. 결과적으로 전체 입자상 물질의 대부분이

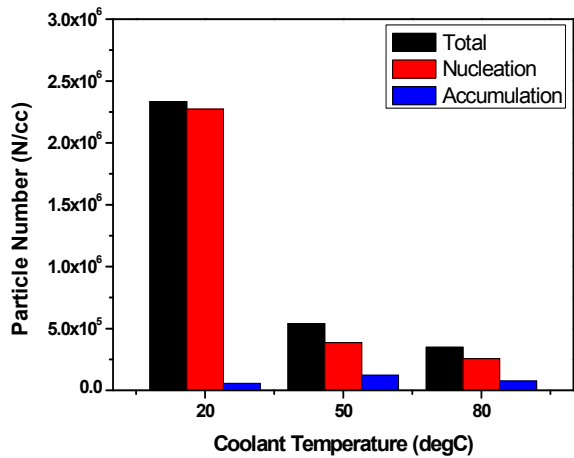


Fig. 7 Characteristic of particle number emission

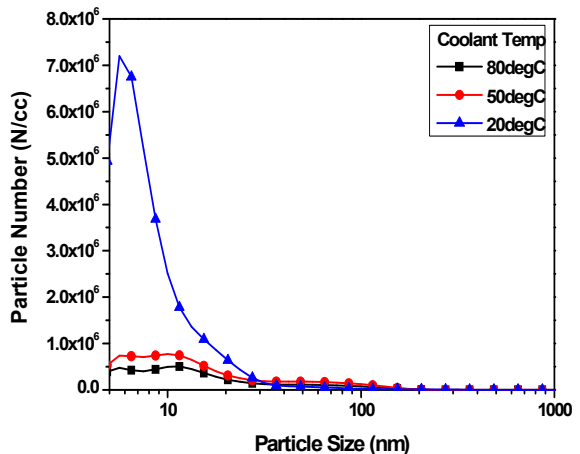


Fig. 8 Characteristic of particle size distributions

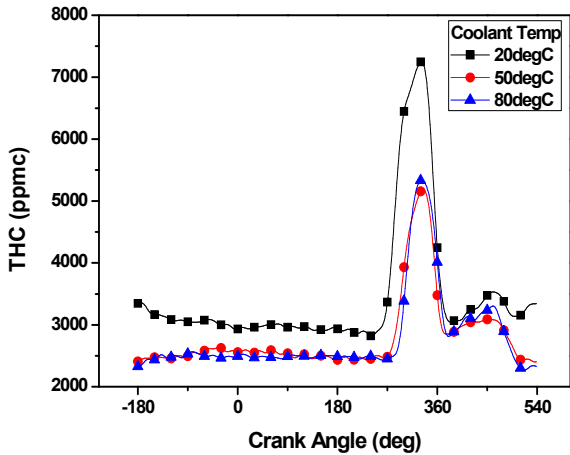


Fig. 9 THC characteristics resolved into Crank angle

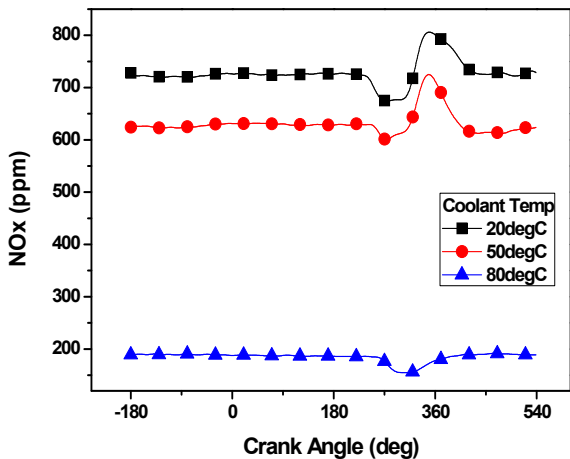


Fig. 10 NOx characteristics resolved into Crank angle

핵화모드의 입자상 물질이기 때문에 입자상 물질의 개수농도는 냉각수온이 증가함에 따라 감소하는 반비례 관계를 보인다. 입자상 물질의 크기 별로 배 배출 되는 것을 알 수 있다. 이는 80℃에서 배출되는 5.0E+5 N/cc 에 비해 약 14 배 정도 많은 양이 배출 되는 것이다.

### 3.2.2 Cyclic THC 배출특성

THC 의 경우 연소실 내에서 완전히 연소되지 못한 연료의 일부가 배출되는 것이 주요 생성 원인이며 냉각수온에 따른 실험결과를 고찰한 결과 입자상 물질과 마찬가지로 낮은 냉각수온에서 많은 양의 THC 가 배출되는 양상을 보였다. 20℃에서 THC 배출량이 7,500 ppm 으로 가장 많았으며 5,000 ppm 의 측정값을 보인 80℃에서 보다 약 50 %정도의 많은 양이 배출되었음을 확인 할 수 있다. (Fig. 9) 이는 냉각수 온도가 낮을 때에는 연료가 기화되기 힘들고 또한 실린더 벽면에 연료액막이 증가하기 때문에 연소되지 못한 연료가 배기

관을 통해 배출 되는 것으로 분석된다.

### 3.2.3 Cyclic NOx 배출특성

Fig. 10 에서 보이는 바와 같이 냉각수온이 가장 낮은 20℃에서는 750 ppm 이상의 많은 양의 NOx 가 발생하였으며 80℃에서는 200 ppm 미만의 NOx 가 발생한 것을 알 수 있다. 이는 3.1.1 절에서 언급하였듯이 높은 냉각수온에서 밸브 Overlap 이 증가하여 내부 EGR 이 증가하게 되고 이로 인해 연소실 온도가 감소한다. 그 영향으로 NOx 의 발생이 줄어들게 되는 것으로 분석된다.

## 4. 결 론

본 실험은 GDI 엔진을 부분부하 모드에서 냉각수온에 따른 연소 특성 및 배출가스 배출특성에 관하여 연구한 논문으로 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

(1) 냉각수온이 증가함에 따라 밸브 Overlap 이 증가하여 내부 EGR 이 증가하게 된다. 증가한 내부 EGR 로 인해 연소실의 온도가 낮아지게 되어 연소압력이 낮아지게 되며 연소속도가 지연되고 출력확보에 부정적인 영향을 미칠 수 있을 것으로 사료된다.

(2) 냉각수온이 증가함에 따라 MAP 값은 증가하는 반면 연료압력 값은 감소하는 경향을 보였다. MAP 값이 온도가 올라감에 따라 증가하는 이유는 흡입 공기와 연료의 밀도가 낮아져서 더 많은 양의 공기를 필요로 하기 때문이다. 연료압력 값이 감소하는 이유는 충분히 예열된 엔진에서는 연료의 무화가 보다 쉽게 이루어지기 때문이며 이는 이때 낮은 연료압력으로 분사하여도 출력 손실이 일어나지 않음을 의미한다.

(3) 냉각수온이 높아짐에 따라 입자상 물질은 감소하는 반비례 경향을 보이며 20℃영역에서 발생하는 입자상 물질의 양이 다른 영역에서의 양보다 월등히 많이 측정 되었다. 입자상 물질의 크기는 10nm 이하의 입자상 물질 (핵화모드)이 대부분을 차지하며 이 또한 냉각수온 20℃의 영역에서 월등하게 나타남을 알 수 있다.

(4) THC 는 낮은 냉각수온에서 더 많이 발생하는 것을 확인 할 수 있다. 이는 낮은 온도에서 기화되기 힘든 연료의 특성과 연소실 벽면에 생기는 액막이 증가하기 때문에 많은 양의 연료를 분사하여 미연가스가 배출된다. 따라서 냉각수온이 80℃에 빠르게 수렴하는 것이 THC 의 배출량을 줄이는데 긍정적 효과가 있을 것으로 판단된다.

(5) NOx 의 배출은 연소실 온도와 깊은 연관이 있으며 이는 냉각수온이 올라감에 따라 내부 EGR 이 증가하게 되어 연소실의 온도가 내려가게 되고 그로 인해 배출량이 감소하는 것을 확인 할 수 있다.

## 후 기

본 연구는 지식경제부의 산업원천기술 개발사업의 지원으로 수행되었습니다. 이에 감사 드립니다.

## 참고문헌

- (1) Zhao, F., Lai, M. C. and Harrington, D. L., 1999, "Automotive Spark-Ignited Direct-Injection Gasoline Engines," *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 25, No. 5, pp. 437~562.
- (2) Kim, Y. J., Kim, K. B. and Lee, K. H., 2011, "Effects of a 2-Stage Injection Strategy on the Combustion and Flame Characteristics in a PCCI Engine," *International Journal of Automotive Technology*, Vol. 12, No. 5, pp.639~644
- (3) Lee, H., Myung, C. L. and Park, S., 2009, "Time Resolved Particle Emission and Size Distribution Characteristics During Dynamic Engine Operation Conditions with Ethanol-Blended Fuels," *Fuel*, Vol. 88, No. 9, pp. 1680~1686.
- (4) Lee, J. W., Jeong, Y. I., Jung, M. W., Cha, K. O., Kwon, S. I., Kim, J. C. and Park, S., 2008, "Experimental Investigation and Comparison of Nano-Particle Emission Characteristics in Light-Duty Vehicles Two Different Fuels," *International Journal of Automotive Technology*, Vol. 9, No. 4, pp. 397~403.
- (5) Andersson, J., Giechaskiel, B., Munoz-Bueno, R., Sandbach, E. and Dilara, P., 2007, "Particle Measurement Programme (PMP) Light-Duty Inter-Laboratory Correlation Exercise (ILCE-LD) Final Report EUR 24561 EN, EC, JRC, Institute for Environment and Sustainability.
- (6) Choi, K., Ko, A., Hwang, I. G., Myung, C. L., Kwon, S. and Park, S., 2009, "Nano-Particle Characteristics of Turbo-charged GDI Vehicle," *Proc. of the KSAE*, pp. 166~169.
- (7) Mikulic, I., Koelman, H., Majkowski, S. and Vosejka, P., 2010, "A Study About Particle Filter Application on a State-of-the-Art Homogeneous Turbocharged 2L DI Gasoline Engine," *Proc. of the 19th Aachen Colloquium on Automobile and engine technology*.
- (8) Joshi, A., Chatterjee, S. and Walker, A., 2011, "An Evaluation of Particle Size Distributions and Particle Number-Based Reductions from Various PM Emission Control Technologies," *SAE Paper 2011-01-0600*.
- (9) Myung, C. L., Lee, H., Choi, K., Lee, y. J. and Park, S., 2009, "Effect of Gasoline, Diesel, LPG, and Low-Carbon Fuel and Various Certification Modes on Nanoparticle Emission Characteristics in Light-Duty Vehicle." *International Journal of Automotive Technology*, Vol. 10, No. 5, pp. 537~544.
- (10) Pechham, M. S., Finch, A., Campbell, B., Price, P. and Davies, M. T., 2011, "Study of Particle Number Emission from a Turbocharged Gasoline Direct Injection (GDI) Engine Including Data from a Fast-Response Particle Size Spectrometer," *SAE Paper 2011-01-1224*.