

## Soot 저감을 위한 촉매 분사 최적화 방안 연구

김병우<sup>1\*</sup>

### A Study on Optimization of Catalyst Injection Controller for Reducing Soot

Byeong-Woo Kim<sup>1\*</sup>

**요 약** 가솔린 엔진에 비하여 디젤 엔진은 효율성, 신뢰성, 내구성 측면에서 우수한 특성을 보유하고 있다. 그러나, 디젤 엔진의 최대 약점은 카본기 물질로 알려진 분진(PM)의 방출이다. 최근 엔진 제어와 후처리를 통하여 엄격한 규제 조항에 부합하는 커다란 기술적 발전을 이룩하였다.

보다 엄격하게 진행되고 있는 환경규제를 대응하기 위하여, 본 연구에서는 배기가스 온도 증대를 통한 PM 저감 방안에 초점을 맞추었다. PM 재생 온도를 증대시키기 위하여, DPF 필터와 DOC 전방에 HC를 분사하는 방안을 제안하였다. 본 연구를 통하여, 우리는 LPG 분사 특성을 파악할 수 있는 벤치를 제작하고 관련 DB를 구축하여 LPG 분사 최적화와 ECU 제어 로직을 정량화 할 수 있었다.

**Abstract** The popularity of the diesel engine revolves around its fuel efficiency, reliability, and durability compared to the gasoline engine. However, the main disadvantage of diesel engine is the emission of particulate matter (PM) which is known as carcinogenic substance. Therefore recent progress in engine management and after-treatment systems has led to great improvement to satisfy strict emission regulations. To comply with powerful environment regulations, this study is focused on the decrease of PM(soot) as to increase significantly exhaust temperature. Therefore, HC injection is used as the method to go to the PM regeneration temperature in front of filters composed of diesel oxidation catalyst(DOC) and diesel particulate filter(DPF). And especially, LPG is used because it has good chemical reactions with exhaust.

In this study, we could manufacture the test bench thought LPG injection - with which soot can be decreased-, construct 3 kinds of database(DB) according to quantity of temperature to decide the LPG injection quantity and develop DPF ECU algorithm.

**Key Words** : DPF(Diesel Particulate Filter), HC 분사 시스템(HC dosing System), 입자상 물질(PM), 제어기(ECU)

#### 1. 서론

최근 디젤 엔진의 단점이었던 진동·소음등과 같은 문제가 개선되고, 출력과 연비가 향상됨에 따라 디젤차량의 수요가 상대적으로 증가하고 있다. 그러나 자동차 산업은 지구환경 보호의 1차 규제 대상으로, 세계 선진각국의 배기가스 규제가 점점 엄격해 지고 있다. 특히 유럽의 EURO-VI(PM 0.02g/kwh), 미국의 Tire-II(PM 0.01g/bhp-hr) 등 강력한 규제 정책이 되고 있다. 이러한 규제

들은 디젤 엔진의 연소 개선만으로는 어려우며, 배기후처리 장치와의 적절한 조합을 통하여 극복될 수 있다.

현재 입자상 물질을 효과적으로 처리하는 기술로 DPF(Diesel Particulate Filter) 시스템이 현실적인 기술적 대응방안으로 판단되고 있다. 그러나 필터에 PM이 포집됨에 따라 엔진의 배압이 걸리고 이것에 의해 엔진 출력과 연료 소비율이 저감되는 단점이 있다. 따라서 PM이 재생되는 이상적인 조건을 만들어주는 기술이 필요하다.

이를 위해 본 연구에서는 PM이 재생되는 조건을 만들어 주기위해 DOC(Diesel Oxidation Catalyst)와 DPF로 구성된 시스템 전단에 탄화수소(HC)를 분사하여 PM을 재

<sup>1</sup>자동차부품연구원

\*교신저자: 김병우(bwkim@katech.re.kr)

생시키는 DPF ECU를 설계/제작하고, 엔진 다이내모 테스트를 통하여 DPF ECU 알고리즘 개발을 위한 DB 구축을 목표로 한다.

## 2. HC 분사 시스템

PM은 일반적으로 배기온도 550℃ 이상에서 재생이 일어난다. 그러나 이 온도는 시내주행에서 거의 발생하지 않는다. 따라서 이러한 조건에서 PM을 재생하기 위하여 강제로 온도를 올려주는 방법과 배기온도 300℃이하에서도 재생이 일어날 수 있게 하는 기술이 개발되고 있다. 전자는 제한된 에너지 공급방법, 복잡한 구조, 신뢰성 측면에 문제가 많아 촉매코팅방식, 연료첨가, 플라즈마 방식 혹은 복합시스템 등이 개발되고 있다. 그리고 더 효과적인 방법을 위해서 DOC 전단 혹은 플라즈마 리액터 전단에 HC를 분사하여 NO<sub>2</sub>의 농도를 증가시켜 낮은 온도 범위에서 재생이 일어나게 한다.

이 같은 HC 분사에 있어서 디젤연료는 추가적인 연료 장치가 필요 없어 경제적이거나, 배기가스와의 반응이 잘 일어나지 않는 단점이 있다. 따라서 디젤을 재처리하거나 그 외의 연료가 대안이다. 이와 관련된 논문에서는 크게 HC의 효과와 여러 가지 HC에 따른 시험을 통하여 PM 저감에 가장 성능이 우수한 HC 성분을 제시했다.<sup>1), 2)</sup> HC의 시험 대상은 메탄(CH<sub>4</sub>), 에틸렌(C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>), 에탄(C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>), 프로펜(C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>), 프로판(C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>)이 사용되었다. NO에서 NO<sub>2</sub>로의 변환 효율이 가장 좋은 것은 프로펜, 에틸렌, 프로판 순이었다. 다른 논문에서는 Gasoline, M85(methanol :85%, gasoline :15%), E85d(ethanol: 85%, gasoline: 15%), LPG(Liquid Petroleum Gas - propane: 90%, propylene: 5% 이하), CNG(Compressed Natural Gas)의 연료에 대한 배기분석을 하였다.<sup>3)</sup> 시험 결과 PM의 생성량 면에서 LPG가 다른 연료에 비해 훨씬 적게 나타났다. 그리고 Cummins Inc.에서는 Pre-Catalyst와 CDPF와의 조합된 필터의 전단에 HC를 분사하여 PM이 재생되는 것을 확인하였다.<sup>4)</sup>

여러 가지 논문 및 표 1에서 보듯이 LPG는 타 연료에 비해 발열량과 옥탄가가 높고 공기와 균일하게 혼합되어 균일한 연소가 가능하여, PM 생성이 적고 PM 사이즈도 작은 편이다.

한국의 LPG 주성분은 미국, 이탈리아 등 국외의 경우와 달리 부탄(C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>) 성분이 주를 이루고 있으며, LPG 연료를 보급하는 업체별 또는 계절에 따라 성분비율이나 물성치가 상당히 달라지는데, 주로 동절기에는 월별, 지역별로 최대 30%의 프로판이 혼합되기도 한다.

표 1. 차량용 연료의 물성치 비교

종류	분류	Gasoline	Diesel	CNG	LPG
	분자식	C4~C12의 HC	C14~C19의 HC	C1~C3의 HC	C3~C4의 HC
분자량	100정도	180~210	16	44	
밀도(kg/l)	0.73~0.75	0.81~0.88	0.19	0.54	
비점(℃)	27~220	188~340	-161	-42.1	
인화점(℃)	-43	58~116	-162이하	-73.3	
자발화온도(℃)	220	225	632	504	
이론공연비	14.7	14.5	17.2	15.6	
자발열량(kcal/kg)	10,500	10,300	11,900	11,300	
증발 잠열(kcal/kg)	80	55~65	122	102	
증기압(kgf/cm <sup>2</sup> )	49~83	0.1~1.5	-	13	
옥탄가	RON	990~100	-	130	96~111
	MON	81~89	-	125~130	89~96
세탄가	-	45~50	-	-	
점화에너지(mJ)	0.24	0.24	0.29	-	
가연한계(%)	1.4~7.6	0.6~5.5	5~15	-	
화염확산속도(m/s)	4~6	0.02~0.08	-	-	

LPG 분사에서 중요한 인자 하나가 분사량을 정확히 제어하는 것이다. Mixer가 사용된 기상분사는 정확한 분사량을 알 수가 없었다. 그러나 LPLi (Liquid Phase LPG injection)와 같은 방식이 접목됨에 따라 분사량을 정확히 제어 할 수가 있게 되었다<sup>5)</sup> LPG는 그림 1과 같이 액상 분사 방식의 연료시스템에 적용하기 위해서는 연료의 성분에 대한 규정이 선행되어야 하며, 포화 증기압보다 높은 압력을 유지 시킬 필요가 있다.

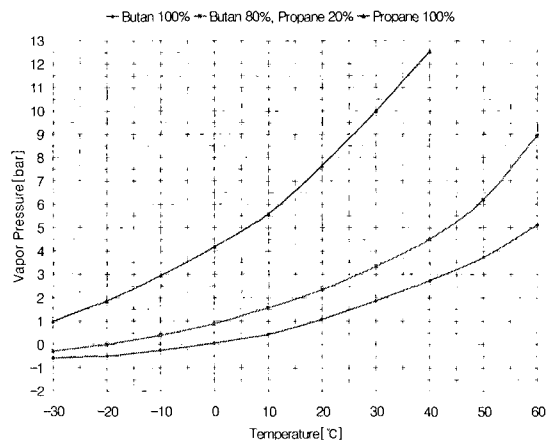


그림 1. LPG 온도 증기압 곡선

### 3. 기술개발 내용

#### 3.1 시스템 구성

그림 2는 전체 DPF 시스템의 구성도를 나타낸 것으로, LPG를 인젝터까지 액상으로 공급해주는 LPG Test bench, PM을 포집하고 재생 시기를 결정하기 위한 온도 센서와 차압 센서가 장착된 배기계, 센서 제측을 통한 LPG 분사 알고리즘이 구현된 DPF ECU, 각종 센서로부터 획득한 데이터를 CAN 통신에 의해 모니터링하고 분사량을 보정하는 PC 소프트웨어로 나뉜다.

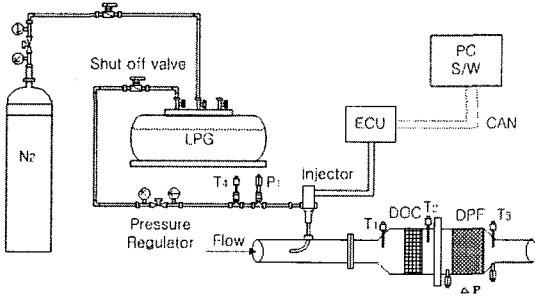


그림 2. DPF 시스템 구성도

필터 촉매 성분 및 사이즈에 따른 LPG 분사 제어기의 DB를 확보하기 위하여 엔진 다이아모에서 3.3ℓ 급 기계식 엔진과 2.0ℓ 급 CRDI(Common Rail Direct Injection) 엔진에서 시험을 수행하였다. 표 2는 사용된 엔진의 제원을 나타낸다.

표 2. 엔진 제원

엔진	D4AL-L4TCI	CRDI VGT
배기량(cc)	3298	1991
출력(ps/rpm)	120	126/4000
최대토크(kg.m/rpm)	30	29.5/2000

#### 3.2 LPG Test Bench

LPG Test bench는 질소 탱크, LPG 펌프, 인젝터, 연료관, 압력 레귤레이터 등으로 구성된다. LPG 펌프에서의 액상을 유지하기 위한 압력을 생성하기 위하여 질소 탱크의 질소를 LPG 펌프의 기상 밸브에 연결하였고, 이 압력에 의해 LPG는 액상이 되어 액상 밸브로 보내어 진다. LPG를 인젝터까지 액상을 유지하기 위해 질소 탱크의 15 ~ 20bar 되는 압력을 1차적으로 압력 레귤레이터에서 10bar로 조절하여 LPG 펌프에서 압력을 10bar로 유지하였고, 연료라인 레귤레이터에서 최종적으로는 7bar의

압력으로 세팅하였다.

LPG는 낮은 압력과 상온에서 쉽게 기화하는 특성이 있어서 분사에 의한 압력강화로 기화의 우려가 많기 때문에 Injector는 Bottom Feed 방식으로, 동작 압력이 높아 LPG를 액상상태로 분사하기에 충분한, Siemens사의 DEKA-II를 선택하였다.

#### 3.3 필터 및 배기계

시험에 사용된 DOC는 백금(Pt)이 코팅되어 있고 사이즈가 다른 2종을 사용하였다. DPF는 3.3ℓ 급 엔진에서 백금을 제외한 성분이 다른 2종을, 2.0ℓ 급 엔진에서 1종을 시험하였다.

표 4. 시험에 사용된 DOC 및 DPF 제원

종류	엔진(ℓ)	직경(″)	길이(″)	기타
DOC1	2.0ℓ	5.62	4.68	-
DPF1			5.78	-
DOC2	3.3ℓ	7.5	3.8	400 cpsi
DPF2			8	Mixed-Oxidation
DPF3				Alumina

#### 3.4 DPF ECU

Controller는 16bit 프로세서를 사용하였다. 10bit의 A/D 컨버터를 통해 센서로부터 신호를 받아들이며, PWM 으로 인젝터를 구동하게 했다. 모니터링에 필요한 신호들은 CAN 통신을 통해 PC에 보내지며, PC에서 분사량을 조절할 수 있게 했다. 실제 제작된 ECU는 그림 3과 같다.

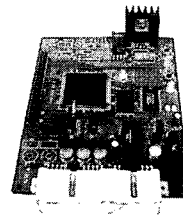


그림 3. 설계, 제작된 DPF ECU

##### 1) 온도센서 드라이버

HC를 분사하는 시점을 결정하는 중요한 인자인 배기 가스 온도를 측정하기 위해 1000℃ 이하에서 열기전력 특성의 직선성이 좋은 K타입 열전대를 사용하였다. 열전대의 출력 열기전력을 ECU의 A/D 입력으로 변환·증폭하기 위해 전용 칩을 이용하여 인터페이스 회로를 구성하였다.

### 2) Injector 드라이버

LPG 액상 분사를 위한 Bottom Feed 방식의 인젝터는 가솔린 인젝터와는 달리 Needle이 고압상태에서 Spring Tension보다 큰 힘으로 동작함에 따라 구동초기에 많은 전류를 필요로 한다. 따라서 Bottom Feed 방식의 Injector 구동은 전류 인가 방식인 Peak & Hold 타입을 사용했다. 이 방식은 초기에 많은 양의 전류를 인가하고 난 뒤 적은 양의 전류를 유지시키는 것으로, Peak 시 4A, Hold 시 1A를 유지시켜 준다.

### 3) CAN 및 기타 드라이버

CAN은 자동차의 근거리 통신에 많이 사용하는 방식으로 CAN 2.0B를 지원하는 high speed CAN을 사용하였다. 그리고 CAN Controller와 Physical Bus를 인터페이스 하고, 각 노드에 종단저항으로 연결하였다.

DPF의 Soot의 정도를 측정하기 위한 DPF 전·후단에 설치된 차압센서는 필터 크기를 고려해 최대 1bar까지 측정가능하게 하였고, LPG 라인의 액상을 모니터링하기 위한 센서도 사용하였다. 엔진의 RPM과 Torque는 엔진 다이나모에서 출력되는 것을 사용하였다.

### 3.5 모니터링 및 캘리브레이션 S/W

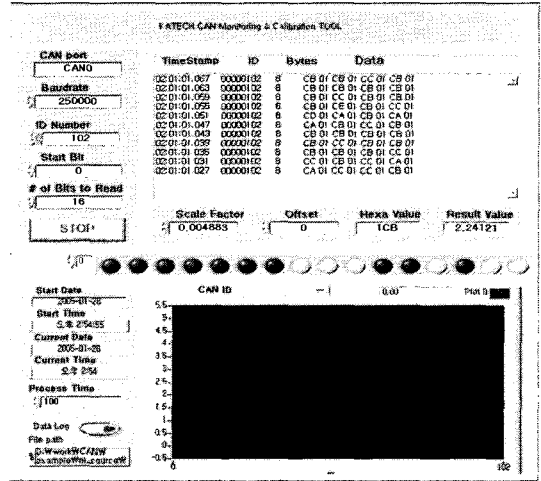
DPF의 LPG 분사시점 및 분사량을 결정하기위한 제어 인자들과 모니터링 인자들은 대부분 ECU의 A/D 컨버터에서 실제의 변수로 계산되어져 알고리즘 구현에 사용된다. 이러한 최종적인 알고리즘 구현을 위한 데이터 모니터링 및 LPG 분사량 조절을 위한 캘리브레이션은 CAN 통신을 활용하였다. 개발된 소프트웨어는 그림. 4와 같다.

### 3.6 ECU 알고리즘

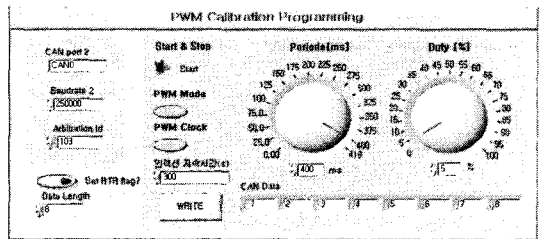
PM이 포집되지 않은 상태에서 LPG 분사는 의미가 없으며, 반대로 PM은 기준 배압이상으로 포집 되었으나, 배기온도가 낮을 경우는 LPG를 분사해도 재생에는 전혀 도움이 되지 않으므로, 각 엔진 및 필터 조합에 맞는 LPG 분사시기(SOI-Start Of Injection)와 분사 지속 시간(DOI-Duration Of Injection)을 결정하였다.

결정된 분사량으로 LPG를 분사했을 때 차압과 배기온도를 일정 시간마다 재조사하여, 배기온도가 지정된 온도 이상이 되지 못하거나, PM 포집량이 설정된 이하의 차압으로 떨어지면 분사량을 중지하도록 했다. 또한 지속적인 시내주행으로 PM은 계속 포집되나 배기온도가 지정된 온도 이상으로 되지 않을 경우는 경고 메시지를 발생시켜 고속 주행 조건으로 운행을 할 수 있도록 조치한다. 그러나 지정된 시간 이후로도 계속적으로 차압이 증가하

여 엔진에 무리가 갈 경우는 운행을 중지하도록 한다. 그리고 각 제어 상수들의 최적의 값을 찾기 위해서 Calibration mode를 두어 PC에서 분사량을 조절할 수 있도록 Period, duty, DOI 등을 프로그램 중에 변경할 수 있도록 하였다.



(a) 모니터링 소프트웨어



(b) LPG 분사량 조절 소프트웨어

그림 4. 모니터링 및 캘리브레이션 소프트웨어

## 4. 실험 결과

### 4.1 시험 방법

DPF ECU의 LPG 분사 알고리즘 적용을 위하여 엔진 다이나모에서 DOC 2중(DOC1, DOC2), DPF 3중(DPF1, DPF2, DPF3)을 엔진 배기량에 맞게 필터의 사이즈를 조합하여 시험을 하였다. 또한 엔진 다이나모에서 획득한 배기 온도와 실차의 배기온도와의 상관성을 확인하기 위해 실차조건에서도 측정하였다.

사용된 연료로는 황 함유량 10ppm 이하인 ULSD (Ultra-Low Sulfur Fuel)를 사용하였고 LPG 성분은 부탄 (C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>) 100%를 사용하였다.

시험 순서는 필터의 장착을 하지 않은 베이스 상태에서의 배기성분을 측정하고, D-13 모드 수행과 BPT 수행을 한다. 그 후 배기온도 별 LPG 분사 및 분사량 캘리브레이션을 수행 하였다.

## 4.2 시험 결과

### 4.2.1 BPT Test

DPF 시스템에서 포집되는 soot의 양과 재생되는 soot의 양이 동일하여 DPF 전·후단의 차압이 일정하게 유지되는 온도를 BPT(Balance Point Temperature)라고 한다. LPG 분사 시점의 배기온도를 파악하기 위하여 soot의 포집 정도와 재생 여부 파악을 위한 BPT 측정이 필수적이다.

BPT 결과를 종합해 보면 그림. 5와 같이 DOC1+DPF1의 BPT가 가장 낮고 DOC2+DPF2가 DOC2 +DPF3보다 낮았다. DOC1+DPF1이 다른 것들에 비하여 BPT가 낮은 것은 필터의 코팅 성분 외에 실험 엔진과 필터의 사이즈도 영향을 미쳤을 것으로 사려 된다. DPF2와 DPF3은 DPF의 코팅성분이 다르기 때문에 온도 차이가 확연히 나는 것을 알 수 있다.

### 4.2.2 성능 시험(D-13 Mode)

D-13 mode는 유럽에서 사용되는 시험방법으로서 국내의 입자상 물질 배출량 시험 mode로도 지정되어 사용되고 있는 시험법이다.

그림 6에서와 같이 Base 대비 CO는 모두 80% 이상의 정확도가 이루어졌으며 DOC2+DPF2는 거의 100% 정확되었음을 보여준다. THC도 60% 이상 정확되었으며, DOC2+DPF3이 거의 90%가 정확되었다. PM도 85% 이상으로 2개의 실험군이 모두 비슷한 수준을 나타냈다.

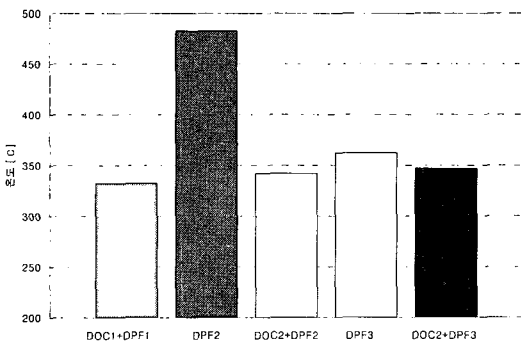


그림 5. BPT 결과

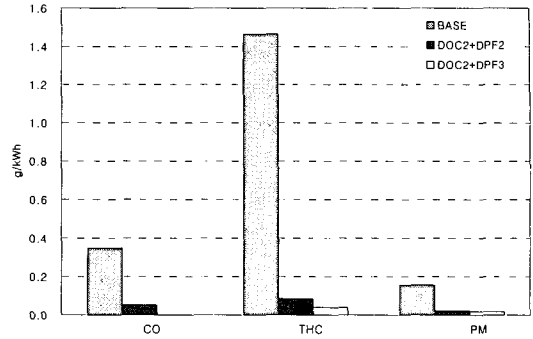


그림 6. D-13모드에 의한 CO, THC, PM 분석

### 4.2.3 LPG 분사 시험

실험은 LPG 분사 전·후의 DOC 전단 온도(T1), DPF 전단 온도(T2), DPF 후단 온도(T3), DPF 전·후단의 차압( $\Delta P$ ), 엔진 속도(RPM), 엔진 부하(Torque), DPF 후단의 배기가스들(THC, O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, NO, NO<sub>2</sub>, NOx)을 계측하였다. LPG 분사 구간은 DOC가 활성화 온도와 BPT를 고려하여 200°C~300°C구간에서 시험을 하였다.

#### 1) DOC1+DPF1

구간별 배기온도에서 재생이 일어나는 duty 비로 LPG를 분사했을 때, DPF 전·후단에서의 온도 변화와 분사량을 그림. 7에 나타내었다. 엔진의 조건에 따른 배기온도가 증가할수록 PM을 재생하기 위한 LPG 분사량이 줄어드는 것을 확인할 수가 있다.

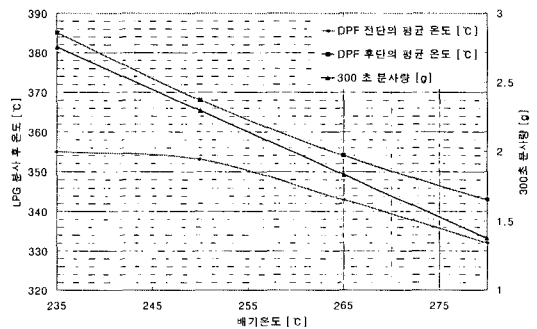


그림 7. 재생이 일어나는 분사량 및 배기 온도

#### 2) DOC2+DPF2 Vs. DOC2+DPF3

DPF2와 DPF3은 크기와 백금(Pt) 함량은 동일하나 DPF2는 혼합된 산화물이며, DPF3은 산화알루미늄(Alumina)이 코팅되어 있어 그림. 8과 같이 배기온도 265°C에서 11% duty 비로 LPG를 분사했지만 온도 특성이 서로 다르다는 것을 알 수 있다. 즉 DPF3의 후단(T3) 온도가 전단(T2) 온도보다 30°C 더 높으며, DPF2 보다도

16°C나 높게 나온다.

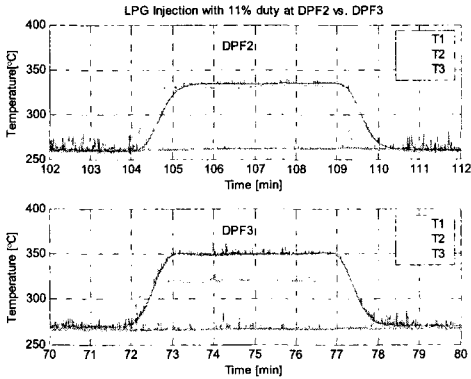


그림 8. LPG 분사 시 필터 종류에 따른 온도 분포

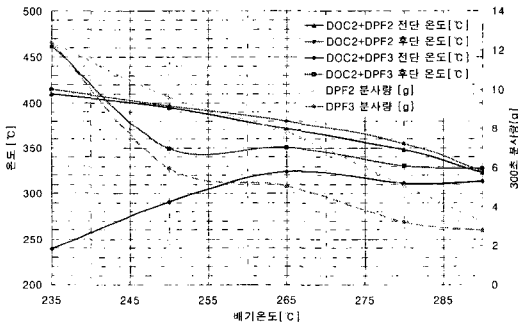


그림 9. 배기온도에 따른 재생시점의 온도 및 분사량

PM이 재생될 때의 LPG 분사량은 배기온도가 높을수록 적은 양으로 재생이 일어나며, DPF3이 DPF2에 비해 낮은 배기 온도에서는 LPG 분사로 인해 400°C 이상에서 재생이 일어난 반면에, 높은 배기온도에서는 350°C 이하에서도 재생이 일어남을 그림.9로 알 수 있다.

### 5. 결론

본 연구는 디젤 엔진의 Soot을 제거하기 위해 디젤 분사의 문제점을 보완할 방법으로 엔진 배기가스에 LPG를 분사하는 DPF ECU를 설계·제작 하였다. LPG 분사량을 정확히 제어하기 위해 LPLi 방식을 적용한 LPG Test bench를 제작하여 임의의 LPG 분사 조건(SOI, DOI 결정) 구현이 가능하도록 모니터링 및 캘리브레이션 소프트웨어를 구현하였다.

시험은 엔진 다이아모에 기반을 두고 3종의 필터 조합

에 LPG 분사 테스트를 수행하여 재생 특성 데이터 확보 및 분석을 통하여 PM 재생을 위한 적정 LPG 분사량 알고리즘 구현에 적용하였다.

본 연구를 통하여 얻은 결과는 다음과 같다.

- 1) LPG 분사 조건에 따라서 DPF 전단의 온도가 상승하는 효과를 확인할 수 있었으며, 이는 DOC 활성화 온도 이상에서 주행하는 저속, 저출력의 운전 조건에서 재생이 일어날 수 있음을 확인하였다. 이때, LPG 분사량과 발생온도는 비례적인 관계를 확인 할 수 있었고 배기 온도가 높을수록 적은 LPG 분사량으로 PM을 재생 할 수 있었다.
- 2) 분사된 LPG와 발생 배기가스의 화학적 반응의 결과로 NO<sub>2</sub>가 DPF 전단에서 증가함을 배기 후단의 측정 결과(NO<sub>2</sub> 감소)로 유추할 수 있었다.
- 3) PM 재생을 위한 배기온도에 따른 LPG 분사량과 그때의 최대 반응 온도, 재생되는 PM량의 상관관계를 규명하여 DB화 하였으며 DPF ECU 알고리즘 적용에 이용하였다.

이를 기반으로 하여, 차후 연구에서는 실차에 적용하여 DPF 제어 기술 최적화가 필요하다고 사려 된다.

### References

- 1) Morio Hori, Naoki Matsunaga, "An experimental and Kinetic Calculation of the promotion effect of Hydrocarbons on the NO-NO<sub>2</sub> Conversion in a flow reactor", Twenty-Seventh Symposium (International) on Combustion/The Combustion Institute, pp. 389~396, 1998
- 2) Kwang-Seo Park, Dong-Inn Kim, Bae-Hyun Chun, "Effect of Various Hydrocarbons on the Plasma Denox Process", SAE 2001-01-3515
- 3) E.Robert Fanick and Kevin A. Whitney, Brent K. Bailey, "Particulate Characterization using five fuels", SAE 961089
- 4) Bruce Bunting, Arvind Suresh, John Chi, "Active soot filter regeneration", DEER2002
- 5) Jong-Hun Lim, Cha-Li Myung, "LPLi Engine Performance and Vehicle exhaust emission characteristics", KSAE, vol. 11, No. 4, pp. 15~21, 2003

김 병 우(Byeong-Woo Kim)

[정회원]



- 1987년 2월 : 한양대학교 기계공학과 (공학사)
- 1990년 2월 : 한양대학교 정밀기계공학과 (공학석사)
- 2002년 2월 : 한양대학교 정밀기계공학과(공학박사)
- 1994년 10월 ~ 현재 : 자동차부품연구원 전장기술연구센터 센터장

<관심분야>

자동차 전장부품, 임베디드시스템, ITS, 자동차 반도체