

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-B.2010.34.8.755

ISSN 1226-4881

## 승용 디젤 엔진의 후처리 시스템 적용에 따른 나노입자 배출 맵 구축 및 저감특성에 관한 연구

고아현\* · 황인구\* · 명차리\* · 박심수\*<sup>†</sup> · 최희명\*\*

\* 고려대학교 기계공학부, \*\* 차세대융합기술연구원

### Study of Particle Emission Contour Construction & Characteristics and Reduction Efficiency of Exhaust-Treatment System of Diesel Engine

Ahyun Ko\*, In Goo Hwang\*, Cha-Lee Myung\*, Simsoo Park\*<sup>†</sup> and Hoimyoung Choi\*\*

\* School of Mechanical Engineering, Korea Univ.,

\*\* Advanced Institutes of Convergence Technology

(Received December 17, 2009 ; Revised June 8, 2010 ; Accepted June 17, 2010)

**Key Words:** PM(입자상물질), DPF(매연여과장치), EGR(배기재순환), DMS(고속입자상물질 측정 장치), Nucleation Mode(핵화모드), Accumulation Mode(축적모드)

**초록:** 본 연구는 승용 디젤엔진의 입자상 물질 배출특성에 관한 것으로서, 엔진에서 배출된 입자상 물질이 배기관 및 후처리장치인 디젤산화촉매와 매연여과장치를 통과할 때의 특성 변화를 파악하기 위하여 후처리장치 각각 전·후단 및 배기관에서 직접 측정하였다. 또한 다양한 엔진회전속도 및 부하조건에서 측정함으로써 입자상 물질 배출 맵을 구축하였으며, 디젤산화촉매 및 매연여과장치의 입자상 물질 저감효과에 대해 평가하였다. 뿐만 아니라 배기재순환율과 연료분사시기를 변경시켜 입자상 물질의 배출특성 변화를 파악하였다. 모든 시험에서 입자상 물질을 5~1000nm 크기까지 측정할 수 있는 DMS500을 이용하였다.

**Abstract:** In this study, we mainly focused on the PM (Particulate Matter) emission characteristics of a diesel engine. To analyze particle behavior in the tail-pipe, particle emission was measured on the engine-out (downstream of turbocharger), each upstream and downstream both of DOC (Diesel Oxidation Catalyst) and DPF (Diesel Particulate Filter). Moreover, particle emission contours on each sampling point were constructed. The reduction efficiency of particle number concentration and mass through the DOC and DPF was studied. Parameters such as EGR (Exhaust Gas Recirculation) and the main injection timing were varied in part load conditions and evaluated using the engine-out emissions. The DMS500 (Differential Mobility Spectrometer) was used as a particle measurement instrument that can measure particle concentrations from 5 nm to 1000 nm. Nano-particles of sizes less than 30 nm were reduced by oxidation or coagulated with solid particles in the tail-pipe and DOC. The DPF has a very high filtration efficiency over all operating conditions except during natural regeneration of DPF.

### 1. 서 론

차량에서 배출되는 다양한 배기가스 중 입자상 물질은 대기오염뿐만 아니라 인체에 유입되어 호흡기질환 및 심장, 혈관 질환 등을 유발하는 것으로 알려져 있다. 특히, 나노크기 수준의 입자상 물질은 인체의 호흡기 점막에 의해 걸러지지 않고 최종 폐포까지 침투함으로써 더욱 치명적인 것으로 알려져 있다.<sup>(1)</sup> 입자상 물질은 모든 차량에서 배출되지만 특히 경유차량에서 높게 배출되는 것으로 알려져

있으며, 이를 저감하기 위하여 국내를 포함한 세계 각국은 필터를 이용한 중량규제법을 통하여 배출량을 규제하고 있으며, 점차적으로 강화하고 있다. 국내의 경우 2009년Euro5 규제가 시행되었으며, 2011년부터 입자상 물질에 대해 질량규제뿐만 아니라 수량규제를 더함으로써 규제가 더욱 강화될 전망이다.<sup>(2)</sup> 따라서 본 연구에서는 다양한 운전조건에서의 입자상 물질 배출 농도를 후처리장치를 포함하여 배기관의 다양한 위치에서 측정함으로써, 입자상 물질 맵 구축과 디젤산화촉매와 매연여과장치의 개수 농도와 질량의 저감효과 및 배기관내 거동 특성에 대해 연구하였다. 또한 디젤엔진의 주요 운전변수인

<sup>†</sup> Corresponding Author, spark@korea.ac.kr

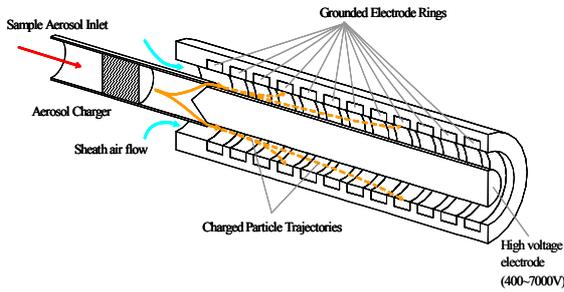


Fig. 1 Principle of DMS500

배기재순환율과 연료분사시기를 변경시킴으로써 입자상 물질 배출에 미치는 영향을 파악하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 입자상 물질 측정장치

실험에 사용된 입자상 물질 측정장치는 DMS500으로써, 5~1000nm 크기의 입자상 물질을 측정할 수 있다. DMS500은 2개의 회석장치를 포함하고 있어, 배기관에서 직접 측정할 수 있으며 배기관에서 채취된 샘플가스 내 나노입자들은 강한 전하로 대전되어 그것의 전하량과 항력 및 중력에 의한 함수로써 22개의 서로 다른 링에 안착하게 된다. 그에 따라 입자상 물질의 크기(Electrical mobility diameter)별 개수농도를 측정할 수 있으며, 그 원리를 Fig. 1에 나타내었다.

또한 DMS는 측정된 크기별 개수농도와 프랙탈 구조(fractal structure)인 입자상 물질의 형태 및 밀도등의 가정을 통하여 계산된 질량값을 제공하며, 그 값은 필터를 통하여 측정된 질량값과 약 10% 이내의 오차를 가지고 있는 것으로 알려져 있다. 간단한 질량계산식은 다음과 같다.<sup>(3)</sup>

$$Mass (\mu g) = 2.20 \times 10^{-15} \cdot D_p^{2.65}(nm)$$

### 2.2 엔진시험장치

Fig. 2에 엔진시험장치 개략도를 나타내었으며, 시험에 사용된 엔진은 2.5L급 VGT가 장착된 디젤엔진이다. 엔진의 상세한 제원을 Table 1에 나타내었다. 산화촉매와 매연여과장치의 저감효과를 파악하기 위하여 배기관에 설치하였으며, 매연여과장치는 촉매가 코팅된 여과장치(Catalyzed Particulate Filter)를 사용하였으며, 셀밀도는 300cps, 기공률은 58%로써, 시험 이전에 충분한 PM layer를 생성한 이후 시험하였다. 촉매코팅된 매연여

Table 1 Specifications of test engine

Engine Type	In-line 4, VGT
Displacement (cc)	2,497
Compression ratio	17.6 : 1
Bore × Stroke (mm)	91 × 96
Emission regulation	Euro 3

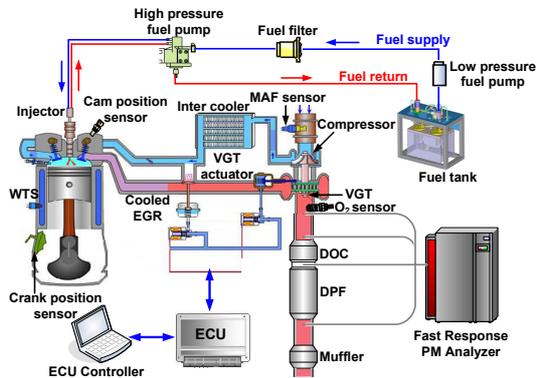


Fig. 2 Schematic of engine experimental system

과장치는 약 300℃의 저온조건에서도 자연재생이 발생하는 것으로 알려져 있다.<sup>(4-6)</sup>

또한 배기가스는 VGT 후단의 엔진아웃과 산화촉매, 매연여과장치의 전·후단에서 각각 측정하였으며, 동일한 샘플링 조건 유지와 물의 응축을 방지하기 위하여 샘플링 라인을 100℃로 유지하였다.

### 2.3 엔진시험방법

엔진회전속도와 엔진부하에 따른 입자상 물질의 배출특성의 파악과 후처리장치의 저감효과를 파악하기 위하여 엔진회전속도를 1,250 ~ 2,250 rpm으로 250 rpm 단위로 변화시켰으며, 엔진부하를 25 ~ 200 Nm로 25 Nm 단위로 변화시켜, 각각의 정속운전조건에 대해 4곳의 샘플링 지점에서 3분간 측정하였다.

또한 배기재순환율 및 연료분사시기 변경에 따른 배출특성을 파악하기 위하여 실제 차량주행시 주로 사용되는 운전조건 중 3가지를 선택하였다. 실험에 사용된 운전조건은 1) 1250rpm/40Nm 2) 1,500rpm/120Nm 3) 2000rpm/80Nm로써, 각각의 운전조건에 대해 배기재순환율과 연료분사시기를 변경시켜가며 엔진아웃에서 3분간 측정하였다.

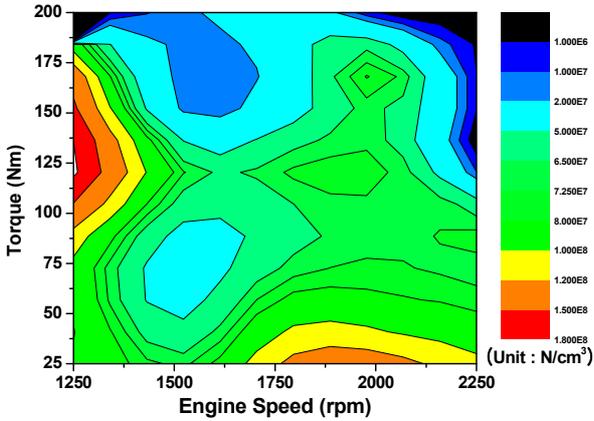


Fig. 3 Total particle number concentration on the engine-out

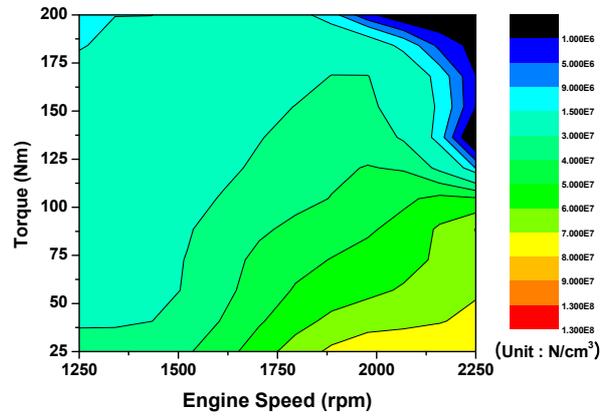


Fig. 5 Total particle number concentration on the downstream of DOC

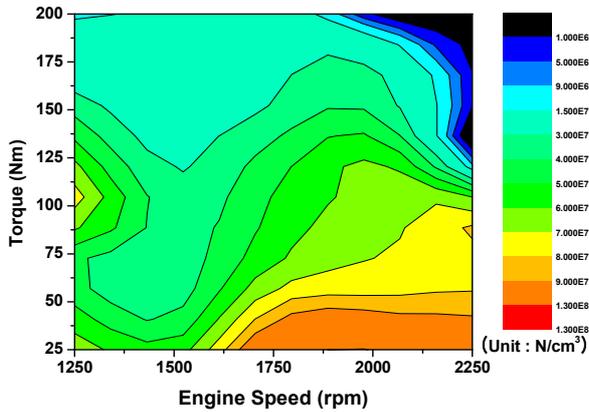


Fig. 4 Total particle number concentration on the upstream of DOC

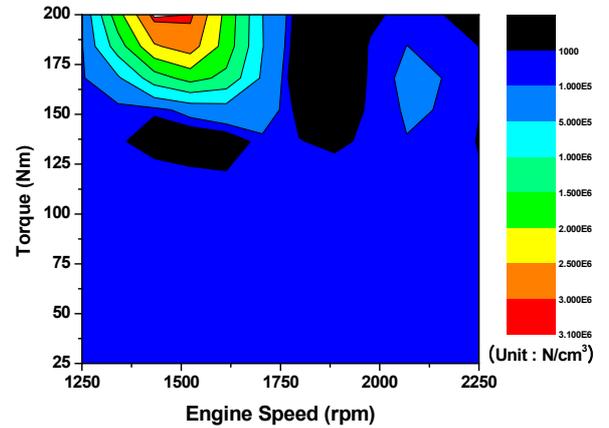


Fig. 6 Total particle number concentration on the downstream of DPF

### 3. 입자상 물질 배출 특성

#### 3.1 샘플링 위치에 따른 배출 특성 및 맵 구축

엔진아웃에서 측정된 입자상 물질의 총 입자상 물질의 개수농도 맵을 Fig. 3에 나타내었다. 모든 운전조건은 엔진양산조건에서 시험하였으며, 양산조건에서 연료분사시기는 대부분의 운전조건에서 다소 TDC보다 지각된 지점에서 주연료분사가 이루어지는 특성을 가지고 있었다. 입자상 물질의 개수는  $1.0E+7 \text{ \#/cm}^3 \sim 2.0E+8 \text{ \#/cm}^3$  까지 넓은 분포를 나타내었으며, 특히 1,250rpm, 125Nm와 2,000rpm, 25Nm 운전조건에서 높은 배출량을 나타내었다. 하지만 엔진회전속도 및 엔진부하에 따른 경향성은 나타나지 않았다. 이는 엔진에서 처음 배출될 당시의 입자상 물질은 대부분 핵화 모드의 비율이 상대적으로 높기 때문인 것으로 분석되며, 자세한 내용을 다음 절에 나타내었다.

Fig. 4~5는 산화촉매의 전단부와 후단부에서 각각 측정된 결과를 나타내고 있다. 엔진에서 배출된 입자상 물질의 개수농도는 배기관과 산화촉매를 통과하는 과정에서 감소하고 있는 경향성을 나타내고 있다. 특히, 높은 배출수준을 나타내었던 1,250rpm, 125Nm와 2,000rpm, 25Nm 운전조건에서의 감소가 두드러지며, 이는 초기 배출되었던 가스상 또는 액체상으로 이루어져 있는 유기물질 (Organic Fraction)이 산화하거나, 배기가스가 냉각되는 과정에서 고체상의 입자상 물질과 응집함으로써 감소한 것으로 판단할 수 있다.<sup>(7)</sup>

Fig. 6은 매연여과장치 후단부에서 측정된 결과로 포집효율이 모든 영역에서 99% 이상으로 매우 높은 결과를 나타내었다. 모든 운전영역에서  $1.0E+5 \text{ \#/cm}^3$  수준의 배출수준을 나타내었으며, 1,500rpm, 200Nm 운전조건에서는 높은 배기가스온도로 인하여 자연재생이 발생한 것으로 판단된다. 기타 고부하 운전조

건에서는 배기온도는 높으나 매연여과장치 내 포집량이 충분치 않아 재생이 발생하지 않은 것으로 생각할 수 있다.<sup>(8)</sup>

3.2 측정 위치별 입자상 물질 입경분포특성

측정 위치에 따른 입자상 물질의 입경별 개수분포를 파악하기 위하여 재생이 발생한 1,500rpm 운전영역의 입경분포그래프를 Fig. 7에 나타내었다. 엔진에서 초기 배출되는 입자상 물질은 약 10nm 크기의 핵화모드가 약 1.0E+8 #/cm<sup>3</sup> 수준으로 70nm 크기의 축적모드가 2.0E+7 #/cm<sup>3</sup> 수준인 것과 비교하여 상대적으로 매우 높게 배출되는 것으로 나타났다. 배기가스가 배기관과 산화촉매를 통과하는 과정에서 높은 배출수준을 나타내었던 핵화모드가 2.0E+7 #/cm<sup>3</sup> 수준으로 축적모드와 유사한 수준으로 감소하는 것으로 나타났으며, 축적모드 또한 일부 감소하였다. 핵화모드는 유기성분의 산화 또는 축적모드와의 응집으로 인하여 감소한 것으로 생각할 수 있으며, 축적모드 또한 응집과정을 통하여 성장하는 것으로 판단할 수 있다. 매연여과장치를 통과한 입자상 물질은 모든 크기에서 매우 높은 포집효율을 나타내었으며, 200 Nm에서 자연재생 시 발생된 입자상 물질은 약 70nm 크기의 축적모드가 대부분 배출되었다. 이는 입자의 크기가 작은 핵화모드는 축적모드에 비하여 확산속도가 빠르기 때문에 포집효율이 높을 뿐만 아니라 대부분 산화 가능한

유기성분으로 이루어져 있기 때문에 재생 시 산화하기 때문인 것으로 판단된다. 하지만 총 배출량은 4.0E+6 #/cm<sup>3</sup> 수준으로 매연여과장치 전단부의 결과가 비교하였을 때 상대적으로 낮은 배출수준을 나타내었다.

디젤 후처리 장치의 개수저감효율 뿐만 아니라 질량의 저감효과 또한 파악하기 위하여 2.1절의 계산식을 이용하여 계산한 입자상 물질의 질량분포 그래프를 Fig. 8에 나타내었다.

엔진에서 초기 배출된 입자상 물질의 개수농도가 배기관과 산화촉매를 통과하는 과정에서 핵화모드가 상당량 감소하였으나, 입자상 물질의 질량에 미치는 결과는 매우 미비한 것으로 나타났다. 이는 약 10nm 크기의 입자상 물질이 전체 질량에 미치는 영향은 매우 미비하며, 질량규제범으로는 이를 규제할 수 없으며, 산화촉매만으로는 규제에 대응할 수 없음을 알 수 있다.

하지만 매연여과장치를 통과한 입자상 물질은 모든 운전영역에서 대부분 포집되어 감소하였으며, 재생 시 배출되는 입자상 물질은 약 70nm 크기의 입자가 0.002 μg/cm<sup>3</sup> 수준으로 전단부와 비교하여 상대적으로 낮게 배출됨을 확인하였다.

3.3 배기재순환을 변경에 따른 배출특성

각각의 운전조건에 대해 배기재순환율을 변경하였을 경우의 입자상 물질 배출특성을 Fig. 9에

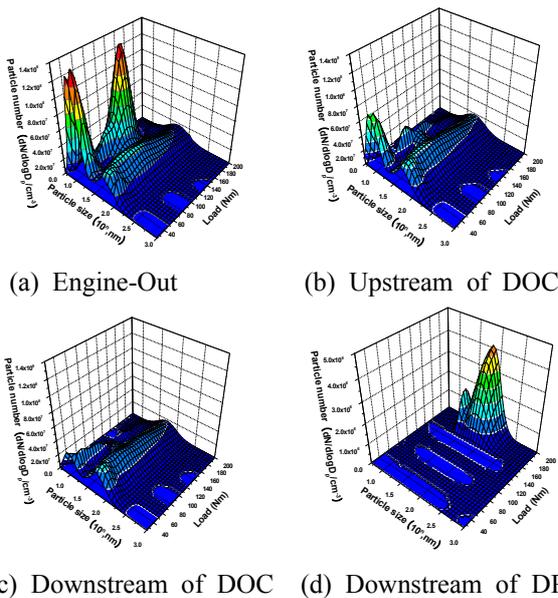


Fig. 7 Particle number distribution on the various sampling point

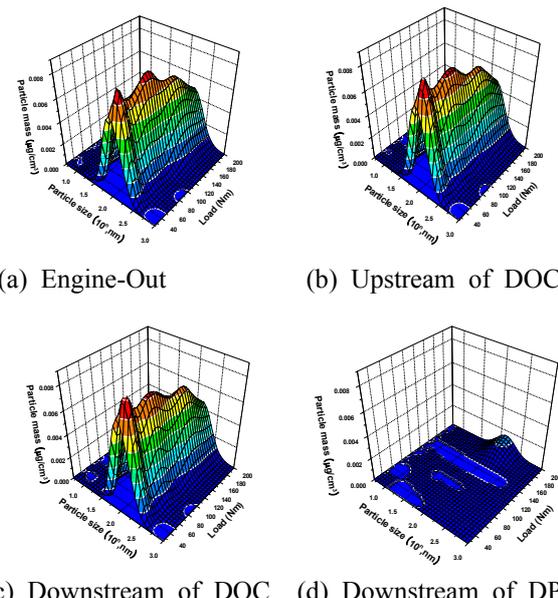


Fig. 8 Particle mass distribution on the various sampling point

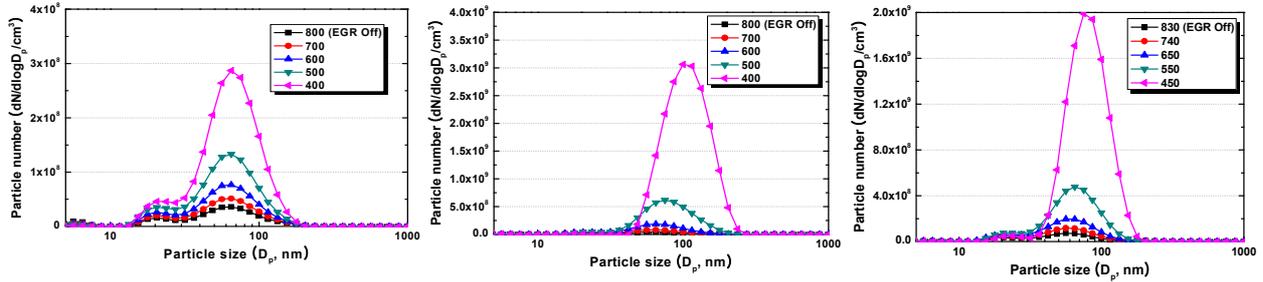


Fig. 9 Particle emission characteristics with various EGR rate(Left : 1,250rpm, 40Nm, Center : 1,500rpm, 120Nm, Right : 2,000rpm, 80Nm)

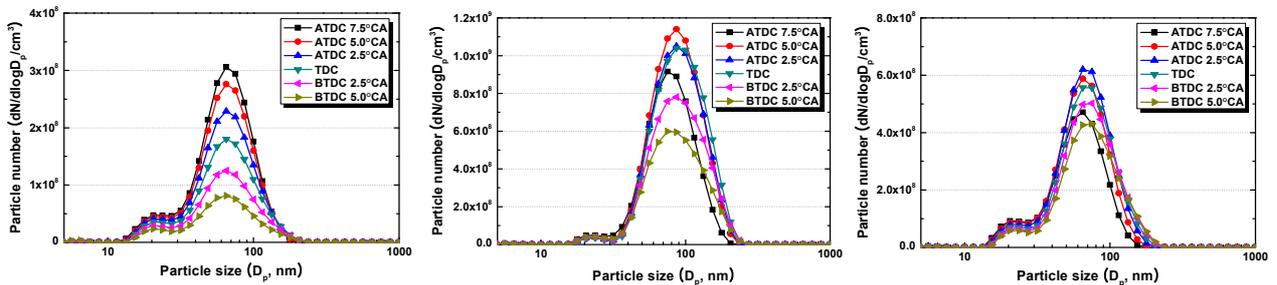


Fig. 10 Particle emission characteristics with various injection timing(Left : 1,250rpm, 40Nm, Center : 1,500rpm, 120Nm, Right : 2,000rpm, 80Nm)

나타내었다. 배기재순환율은 배기재순환 밸브를 이용하여 조절하였으며, 실린더 내부로 유입되는 신기(Fresh air)의 양을 이용하여 나타내었다. 배기재순환율의 변경은 동일한 운전조건에서 시험 되었으며, 배기재순환율 증가에 따른 출력의 감소는 연료량을 증가시킴으로써 동일한 출력을 유지하였다. 실험 결과 모든 운전조건에서 배기재순환율이 증가할수록 입자상 물질의 배출수준 또한 증가하는 동일한 경향성을 나타내었다. 이는 실험조건에 따른 연료량의 증가뿐만 아니라 배기가스가 재순환될 경우 연소온도의 하락으로 인한 연소효율 하락과 재순환가스에 의해 발생하는 부분소염에 의한 것으로 판단할 수 있다.<sup>(9)</sup> 하지만, 1,250rpm 조건의 경우 배기재순환율을 증가시켰을 경우  $1E+8 \text{ \#/cm}^3$ 에서  $3E+8 \text{ \#/cm}^3$ 으로 3배가량 증가하였으나, 1,500rpm 조건에서는  $5E+7 \text{ \#/cm}^3$  미만에서  $3E+8 \text{ \#/cm}^3$ 으로 6배이상, 2,000rpm 조건의 경우 더욱 크게 증가하는 경향성을 나타내었다. 이는 고속조건일수록 연소시간이 짧기 때문에 배기재순환에 의한 연소효율의 하락 및 부분소염의 효과가 더욱 강한 것으로 판단된다. 또한 입자의 개수 증가와 함께 평균 입경 크기 또한 증가하는데, 이는 'primary' 입자의 증가로 인해 입자간 응집작용이 활발해진 것으로 판단된다.

### 3.4 연료분사시기에 변경에 따른 배출특성

주 연료분사시기 변경에 따른 입자상 물질 배출특성을 Fig. 10에 나타내었다. 연료분사시기는 주 연료분사시기만을 변경시켰으며, 이에 따라 pilot 분사는 주 연료분사시기와 동일한 간격으로 변경되는 특성을 가진다. 저속조건인 1,250rpm, 40Nm의 경우 분사시기를 BTDC 5.0°CA에서 ATDC 7.5°CA로 지각될수록 배출량이 증가하는 경향성을 나타내었다. 이는 분사시기가 지각될수록 출력이 감소함에 따라 동일한 운전조건을 유지하기 위하여 연료량을 증가시켰기 때문인 것으로 판단된다. 하지만 중속과 고속 운전조건인 1,500rpm과 2,000rpm 조건에서는 다소 다른 경향성을 나타내었다. 1,500rpm의 경우 분사시기가 ATDC 5.0°CA까지 지각될 경우에는 배출량이 증가하지만 ATDC 7.5°CA로 지각될 경우에는 감소하였으며, 2,000rpm의 경우 ATDC 2.5°CA 이후 지각조건에서 감소하는 경향성을 나타내었다. 이는 지각됨에 따라 연료량은 증가하지만, 고속조건으로 갈수록 연소시간이 짧아짐에 따라 TDC 이후 산화하는 연료량이 증가하여 배기가스 온도를 급격히 상승시키는 효과를 가져와 입자상물질이 후산화하기 때문인 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

디젤엔진에서 배출되는 입자상 물질의 특성과 후처리시스템의 저감효과 및 운전조건에 따른 특성은 다음과 같다.

(1) 디젤엔진에서 초기 배출되는 입자상 물질의 개수농도는 30nm미만의 핵화모드의 비중이 높으며, 배기관과 산화촉매를 통과하며 산화·응집작용을 거쳐 감소하게 된다.

(2) 유기성분의 산화 및 입자의 응집작용은 입자상 물질의 개수농도를 감소시키는 효과를 가지지만, 질량의 감소효과는 매우 미비하다.

(3) 매연여과장치는 모든 운전조건에서 99% 이상의 높은 포집효율을 나타내었으며, 고속·고부하 조건에서 자연재생하여 70nm 크기의 축적모드를 주로 배출하였다. 재생 시의 배출량은 매연여과장치의 전단부와 비교하였을 때 개수농도로 약 90% 수준이다.

(4) 배기재순환율이 증가할 경우 연소온도가 낮아짐에 따른 연소효율의 하락과 재순환가스에 의한 부분소염에 의하여 모든 운전조건에서 입자상 물질 배출량이 증가하는 경향을 나타내었다. 특히, 고속조건으로 갈수록 배출량 증가의 폭이 상승하는 경향성을 나타내었다.

(5) 동일한 엔진회전속도와 부하조건에서 연료분사시기가 지각될 경우 연료소모량의 증가로 인하여 입자상 물질의 배출량이 증가하는 경향성을 나타내었다. 하지만 고속조건일 경우 과도한 연료분사시의 지각은 입자상 물질의 후산화효과로 인하여 배출량을 감소시키는 결과를 나타내었다.

#### 후 기

본 연구는 환경부 ECO STAR 및 Korea Particle Measurement Program(KPMP)의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

- (1) Choi, N. H., Kim, K. S., Jang, B. J. and Kim, K. A., 2005, "Defining the Mechanism of Pulmonary Diseases Induced by Air-Borne Particulate Matters and Development of Treatment Methods," KOSEF.
- (2) Anderson, 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"
- (3) Symonds, J. P. R., Reavell, K. St. J., Olfert, J. S., Campbell, B. W. and Swift, S. J., 2007, "Diesel Soot Mass Calculation in Real-Time with a Differential Mobility Spectrometer," *Journal of Aerosol Science*.
- (4) Ohara, E., Mizuno, Y., Miyairi, Y., Mizutani, T., Yuuki, K., Noguchi, Y., Hiramatsu, T., Makino, M., Takahashi, A. and Sakai, H., 2007, "Filtration Behavior of Diesel Particulate Filters (1)," SAE 2007-01-0921.
- (5) Mizutani, T., Kaneda, A., Ichikawa, S., Miyairi, Y., Ohara, E., Takahashi, A., Yuuki, K., Matsuda, H., and Kurachi, H., 2007, "Filtration Behavior of Diesel Particulate Filters (2)," SAE 2007-01-0923.
- (6) Park, S., 2008, "Nano-Particle Emission Characteristics in Light Duty Vehicles," 1st International PM Symposium, Korea University.
- (7) Premchand, K. C., Johnson, J. H. and Yang, S.-L., Triana, A. P. and Baumgard, K. J., 2007, "A Study of the Filtration and Oxidation Characteristics of a Diesel OxidationCatalyst and a Catalyzed Particulate Filter," SAE 2007-01-1123.
- (8) Lee, J., Cho, G., Kim, H. and Jeong, Y., 2007, "A Study on PM Regeneration Characteristics of Diesel Passenger Vehicle with Passive Regeneration DPF System," *Trans. of the KSME(B)*, Vol 31, no. 2, pp. 188~194.
- (9) Abd-Alla, G. H., 2002, "Using Exhaust Gas Recirculation in Internal Combustion Engines: A Review," *Energy Conversion & Management*, 43, pp. 1027~1042.

(1) Choi, N. H., Kim, K. S., Jang, B. J. and Kim, K.