

후처리 장치에 의한 디젤엔진 배출가스의 미세 입자 입경분포 변화

Influence of Aftertreatment System on the Size Distribution of Diesel Exhaust Particulate Matter

권순박*, 김민철*, 이규원*, 류정호**, 엄명도**, 김종춘**, 정일록**
Soonbark Kwon, Mincheol Kim, Kyoowon Lee, Junggho Ryu, Myungdo Eom, Jongchoon Kim, Ilrok Chung

ABSTRACT

Diesel particulate matter is known to be one of the major harmful emissions produced by diesel engines. Diesel particulates are subject to diesel emission regulations and have lately become the focus in the diesel emission control technology. Thus, the aftertreatment system is adopted at the diesel engine exhaust to reduce the particulate emission. Although this benefit is recognized, it is not clear how the aftertreatment system influences quantitatively the particle size distribution. In this study, the particle size distributions of diesel exhaust were measured using the scanning mobility particle sizer with and without the aftertreatment system. The results showed that the diesel particulate filter and plasma system reduced the number of emitted particles by more than 90% and about 80% respectively in the particle size range of 20nm~600nm. On the other hand, no significant effect of the diesel oxidation catalyst on the particle number concentration was detected.

주요기술용어 : diesel particulate filter (DPF, 매연여과장치), plasma system (플라즈마 장치)
diesel particulate matter (DPM, 디젤 입자상물질), aftertreatment system (후처리 장치)
diesel oxidation catalyst (DOC, 디젤산화촉매 장치), particle size distribution (입경분포)

1. 서론

디젤엔진은 높은 열효율로 버스, 트럭 등의 대형 경유차에서 널리 사용되고 있지만, 디젤엔진에서 배출되는 입자상물질(DPM;

Diesel Particulate Matter), NO_x 등이 대기 환경을 크게 악화시키고 있다. 전체 자동차의 5%에 불과한 버스 트럭 등의 대형 경유차가 자동차로 인한 대기 오염비중의 54%를 차지하고 있으며, 경유차에서 배출된 NO_x 및 입자상물질이 전체 대기환경에 각각 NO_x의 67%, 입자상물질의 85%를 차지한다고 보고되고 있다

* 정회원, 광주과학기술원

환경공학과 분진공학연구실

** 정회원, 국립환경연구원 자동차공해연구소

(국립환경연구원, 1998). 이미 많은 연구결과 디젤엔진에서 배출되는 입자상물질이 인체에 유해하다고 보고되고 있어, 세계적으로 활발한 연구가 진행되고 있다. 이런 이유로 선진국에서는 디젤엔진에서 배출되는 입자상물질의 배출 허용기준을 강화하고 있는 실정이다. 하지만 최근에는 디젤엔진에서 배출되는 입자상물질의 총 질량보다는 질량이 적은 미세 입자들이 인체에 더욱 유해하다는 연구결과(Dürmholz and Lüders, 1997; Krüger et al., 1997; Rickeard et al., 1981)가 보고되고 있어 질량기준의 규제나 측정보다는 입자상물질의 입경분포에 대한 관심이 증가하고 있는 추세이다.

입자상물질의 특성은 배기가스 온도, 사용된 연료, 엔진의 특성, 후처리장치 등에 따라 달라지며, 입자상 물질 중 미세입자의 크기는 조건에 따라 수 십nm 에서 수 백nm 까지의 입경을 가진다. 디젤자동차에서 배출되는 미세입자와 NO_x 등을 충분히 제거하기 위해서는 엔진의 성능을 향상시켜 근본적으로 오염물질을 줄이는 방법과 후처리 장치를 개발하는 방법이 있다. 디젤엔진의 초고압 연료분사기술 등이 연료를 더욱 효율적으로 연소시키며, 동시에 오염물질을 줄일 수 있을 것이라고 예측되지만, 이렇게 새로 개발되는 디젤엔진이 미세 입자까지 충분히 제거 할 수 있는지는 미지수이다. 오히려 엔진의 성능이 향상된 디젤엔진에서 더 많은 미세 입자가 발생되고 있다는 연구결과가 보고되고 있다(Bagley et al., 1996; Hunter, 1997). 현재의 입자상물질에 대한 규제 기준은 입자상물질의 총 질량을 측정하는 방식이기 때문에 질량이 적은 미세 입자의 경우 상대적으로 그 중요성이 인식되지 못하고 있는 실정이다. 그러나 인체에 대한 유해도는 입자 크기에 크게 의존하기 때문에 현재의 질량기준의 규제가 입경분포 및 미세 입자 개수를 측정하는 방식으로

변경될 가능성이 매우 높다. 미국의 HEI(Health Effects Institute) 조사 결과에서도 폐포에 도달하는 유효 입자는 100nm 이하의 미세 입자라고 보고되고 있다.

현재 국내에 보급되어 있고, 개발중인 매연 후처리 장치는 상당히 여러 가지 종류가 있으나 크게 필터로 매연을 포집, 일정주기에 재생하는 필터트랩 방식과 촉매나 플라즈마와 같이 배기가스가 일정한 층을 통과하면서 오염물질이 저감되는 통과형 방식의 두 가지로 구분된다. 본 연구에서는 필터트랩 방식을 사용하는 2가지 DPF(Diesel Particulate Filter)와 산화촉매를 사용하는 2가지 DOC(Diesel Oxidation Catalyst) 그리고 플라즈마 방식의 필터 등 총 5가지의 후처리 장치에 대한 미세 입자 제거 효율 및 후처리장치 통과후의 입경분포 변화에 중점을 두어 실험을 수행하였다.

2. 실험방법

2.1 실험개요

디젤엔진에서 배출되는 배기가스는 고온, 고농도의 입자상물질을 포함하고 있으므로, 입자상물질의 입경분포를 직접 측정하기란 매우 곤란하다. 우선 고온의 배기가스를 측정 가능한 그리고 실제 대기상태와 비슷한 온도로 낮추어 주어야 하는데, 이 과정에서 복잡한 메커니즘에 의해 입자들의 상태가 변화하게 된다. 또 고농도의 입자상물질들은 측정 가능한 적정 수준의 입자개수로 희석되어야 하므로 희석과정 역시 입자상물질의 분포 특성에 많은 영향을 주게 된다. 따라서 희석관(dilution tunnel)에서 샘플링된 입자상물질의 상태는 디젤엔진에서 바로 대기 중으로 방출되는 상태와 다르다(Suzuki et al., 1985). 배출된 배기가스가 대기중의 공기와 혼합하게 되면 배기가스 온도가 낮아져 입자는 핵화

(nucleation), 흡착(adsorption) 그리고 응축(condensation)에 의해서 크기가 증가하게 된다. 핵화율은 포화(saturation)의 정도가 클수록 증가하게 된다. 또한 대기중에서 증발(evaporation)과 탈착(desorption)에 따라 입자의 크기가 달라지며 회석정도에도 영향을 받는다. 전형적인 디젤엔진 배출가스의 대기중의 공기와 회석배수는 500~1000배 이지만 회석판에서는 1:10 이다.

2.2 실험장치

후처리 장치에 의한 디젤엔진 배출가스의 미세 입자 입경분포 변화를 측정하기 위하여 그림 1. 과 같은 장치를 구성하였다. 디젤엔진에서 배출되는 배기가스는 배기관을 지나, 유압조절 밸브를 통해 후처리 장치로 통과되거나 bypass 하게 된다. 샘플링관(sampling probe)으로 유입되는 배출가스의 온도는 운전 조건에 따라 60~550℃ 정도이며, 냉각핀(cooling fin)을 통과하면서 온도가 20~150℃ 까지로 낮추어졌다. HEPA filter를 통과한 공기가 원하는 회석비 만큼의 유량으로 회석관에 공급되었고, 회석관 내에서 배출가스는 회

석공기와 혼합되면서 온도가 약 15~30℃로 유지되어 실제 대기온도와 근접하게 되었다. 회석비는 운전조건 또는 엔진의 종류에 따라 5~30배 정도로 하였다. 회석장치에서 배출되는 입자는 전기적 이동도(electrical mobility) 차이를 이용한 입경측정기(SMPS, scanning mobility particle sizer)를 이용하여 측정하였다. SMPS를 개발하기 전에는 다단 임팩터(cascade impactor), 광화학적 입자측정기 그리고 확산 배터리(diffusion battery) 등을 이용하였으나, 1980년대 후반 이후에는 전기적 이동도 차이를 이용한 방법이 각광 받기 시작하였다(Dürmholz and Lüders, 1997; Jourard and Perrin, 1988; Kittelson, 1998). SMPS는 DMA(differential mobility analyzer)와 CPC(condensation particle counter) 그리고 이 두 장비를 통합 조절하며 데이터를 수집·해석하는 컴퓨터로 구성되어 있다. DMA는 다분산(polydisperse) 입자를 Kr-85 방사능 중화기에 노출시켜 전기적으로 중화시킨 뒤 입자의 전기적 이동도 차이를 이용하여 입자를 크기별로 분류해내는 장비이다. CPC는 크기별로 분류된 단분산 입자들의 개수를 광학적으로 측정하게 되고, DMA내에서 변화된 전압을 통

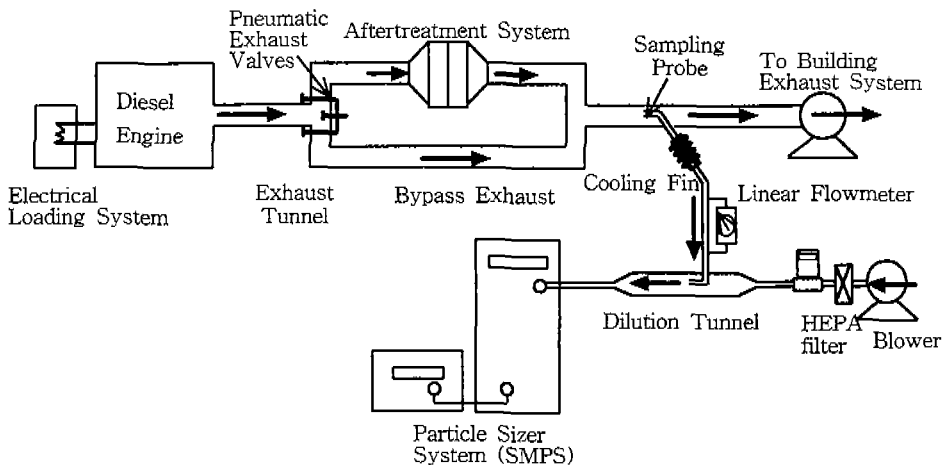


Fig. 1 Schematic of the Aftertreatment System Test Setup

해 다양한 크기의 단분산 입자들이 연속적으로 CPC에 보내져, 전체 입자들의 입경분포의 자료를 얻어낼 수 있게 된다.

표 1.은 실험에 사용된 후처리 장치와 디젤 엔진의 종류 및 운전조건을 나타낸다. 대표적으로 사용되고 있는 후처리기술 중 DPF방식 2가지(F1, F2)와 산화촉매방식(DOC) 2가지(C1, C2) 그리고 플라즈마 장치(P1)에 대하여 장치 통과 전후의 미세 입자 입경분포 변화에 관하여 실험을 수행하였다. 엔진 운전조건은 총 11단계로 구분되어 있으나, 본 연구에서는 1320rpm/50% Load (Mode 4) 와 1320rpm/Full Load (Mode 6)에서의 결과를 중심으로 고찰하고자 한다. 운전시간은 각각의 모드에 도달한 후 충분한 시간을 둔 뒤, 실제 측정에 소모된 시간을 뜻하며, 입경분포의 측정은 후처리 장치 통과 전후에 각각 3회씩 이루어졌다.

Table 1 Aftertreatment System and Operating Conditions.

Aftertreatment System	Diesel Engine Type	Operating Condition	Operating Time
DPF	F1	1320rpm/ 50% Load (Mode 4)	300sec
	F2		
DOC	C1		
	C2		
Plasma system	P1	1320rpm/ Full Load (Mode 6)	

3. 결과 및 고찰

후처리 장치에 의한 디젤배출가스의 입자상물질 입경분포 변화를 살펴보기 전에, 후처리 장치를 통과하기 전 입자상물질의 분포특

성을 본 실험에서 사용된 3가지 엔진 종류에 따라 먼저 파악할 필요가 있었다. 그림 2. 는 3가지 종류의 디젤엔진에서 배출되는 입자상물질 중 미세입자의 입경분포 특성을 나타내고 있다.

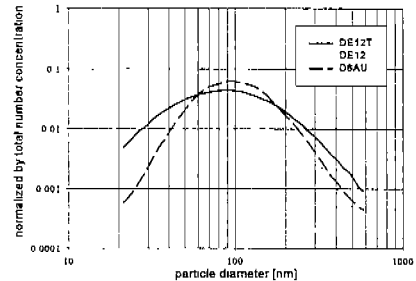


Fig. 2 Size Distribution Comparison of Different Types of Diesel Engines (1320rpm/50% Load; Mode 4)

그림 2. 에서 볼 수 있듯이 각각의 엔진에 대하여 미세 입자의 입경분포는 큰 차이를 나타내고 있지는 않다. 미세입자는 20nm에서 600nm정도의 영역에서 개수평균 입자크기가 100nm정도를 나타내고 있다. 시내버스에 주로 사용되는 DE12엔진과 트럭 등에 주로 사용되는 DE12T엔진은 배출되는 입경분포가 유사한 특성을 나타내고 있다. D6AU엔진의 경우 DE12와 DE12T엔진에 비하여 상대적으로 좁은 입경분포를 가지고 있는 것을 알 수 있다. Rickeard et al. (1996)은 디젤엔진에서 배출되는 입자는 대부분 1000nm이하의 미세 입자로 구성되어 있으며, 중간입자 크기는 100nm정도이며, 중간입자의 크기는 연료와 운전조건 등에 따라 달라진다고 했다. 본 연구에서 보여진 디젤엔진 배출가스의 입자크기 측정결과는 Dürnholz and Lüders (1997), Hildemann et al. (1991), Kittelson et al. (1991) 등이 보고한 값과 유사한 결과를 나타내었다. 한편 그림 3.~그림 7.에서 각각의 (a)와 (b)의 비교를 통

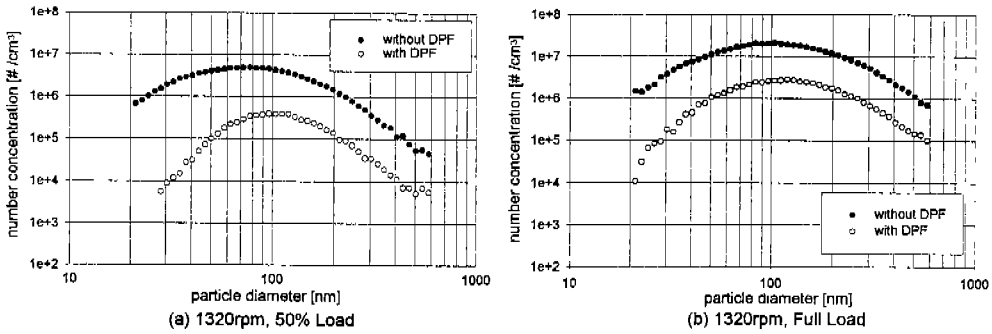


Fig. 3 Influence of F1 on DPM Size Distribution

해 볼 수 있듯이 부하율(load rate)이 50%에서 100%로 증가할 경우 디젤엔진에서 배출되는 전체 미세입자 개수가 증가한다. 특히 100nm 이상의 미세입자 증가가 100nm이하의 미세입자 증가보다 두드러지는 경향을 보이고 있다.

3.1 DPF 방식의 후처리장치

그림 3. 은 DPF 방식의 후처리 장치인 F1에 의한 입경분포 영향을 나타내고 있다. DPF를 거치지 않고 디젤엔진에서 배출되는 미세입자의 입경분포는 약 80~100nm에서 최대분포를 나타내고 있다. F1을 통과한 미세입자는 전 영역에서 약 1/10정도로 개수가 감소하고

있으며, 분포의 형태는 통과전후에 크게 달라지지 않고 있다. 그림 4. 는 DPF방식의 후처리 장치 F2를 사용한 경우에 대한 실험결과이다. F2를 통과한 미세입자의 개수가 입경별로 약 1/100 정도로 감소하고 있어 DPF사용에 따른 미세 입자 저감효율이 매우 우수함을 알 수 있다. 역시 입자분포의 형태는 통과전후에 크게 변하지 않는다.

F1의 경우 버너식 매연여과 장치로서, 장치 구조가 비교적 복잡하고 연료를 추가적으로 사용해야 하는 부담이 있는 반면, 경우에 연료첨가제(Fe)를 첨가하는 방식의 F2는 장치구조가 F1보다 간단하며 가격도 저렴한 장점이

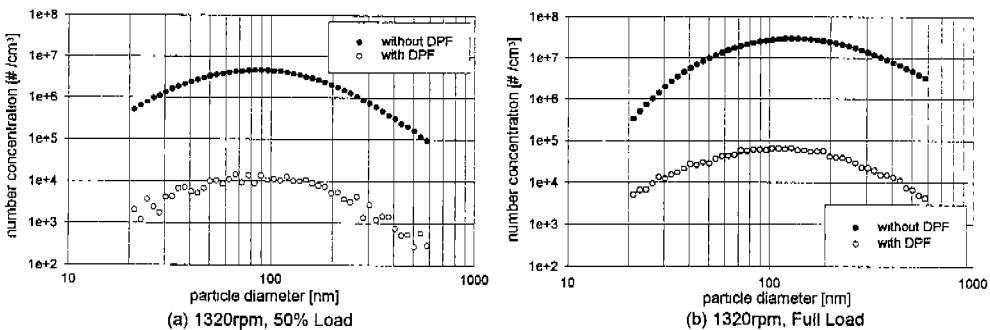


Fig. 4 Influence of F2 on DPM Size Distribution

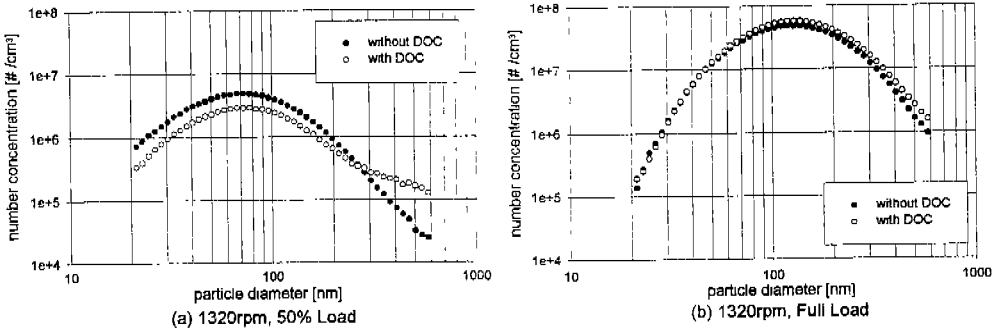


Fig. 5 Influence of C1 on DPM Size Distribution

있다.

3.2 DOC 방식의 후처리 장치

산화촉매 방식을 사용하는 후처리 장치의 경우에 대하여 각각 다른 두 제조사의 제품인 C1, C2에 대하여 같은 실험을 수행하였다. 그림 5. 는 4원 촉매 후처리 장치인 C1을 통과한 후의 입자분포와 후처리 장치를 통과하지 않은 입자분포의 특성을 나타내고 있다. 부하율이 50%인 경우 입자크기가 200nm보다 적은 경우에 약간의 제거효율을 나타내고 있을 뿐, 전체적으로 미세 입자의 제거에는 후처리 장치 C1이 거의 효과를 나타내지 못하고 있다.

그림 6. 은 DOC방식의 산화촉매 후처리 장치 C2에 대한 실험결과를 나타내고 있다. C1의 경우와 마찬가지로 후처리 장치를 통과하기 전후에 입경분포 특성은 매우 유사하다. 오히려 후처리 장치 통과 후 입자개수가 증가하는 경향을 보이고 있다. 이런 입자개수 증가에 대한 원인은 아직 정확히 밝혀지지 않았으나 고온에서 생성되는 황산화물의 영향인 것으로 보인다. 더 정확한 분석을 위해서는 디젤엔진 배기가스의 화학적 성분조사가 병행되어야 할 것이다.

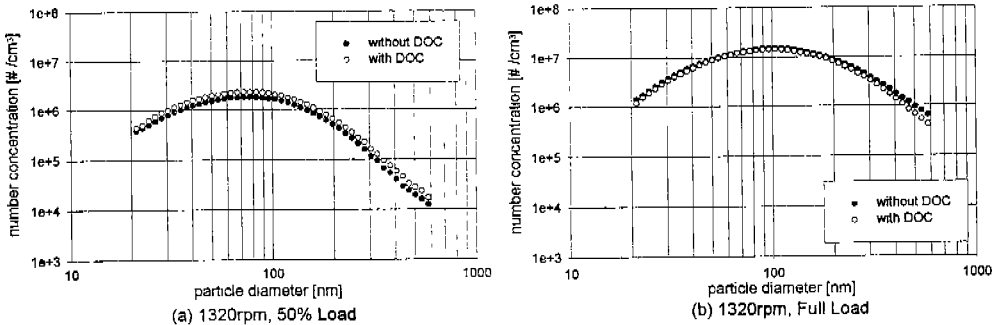


Fig. 6 Influence of C2 on DPM Size Distribution

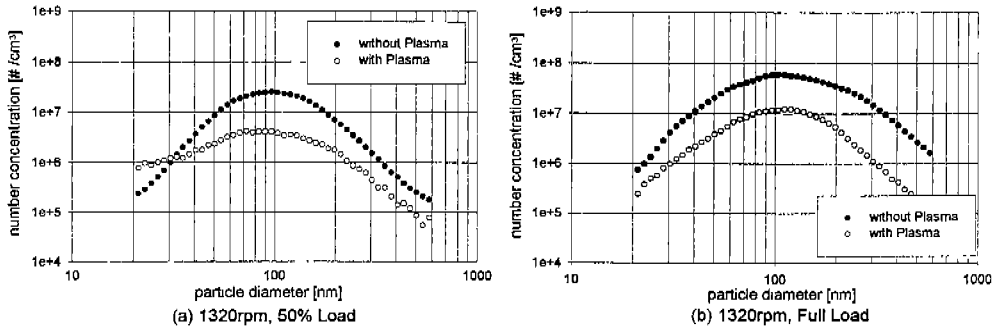


Fig. 7 Influence of Plasma on DPM Size Distribution

한편 본 실험에 사용된 DOC방식의 후처리 장치는 엔진과의 매칭 시험을 통한 최적화가 이루어지지 않았기 때문에, 정확한 성능평가의 결과라고 보기는 어렵다.

3.3 플라즈마 방식의 후처리 장치

플라즈마 방식은 고전압의 전기적인 방전으로 전자에 에너지를 가하여 활성화시킴으로써 얻어지는 저온플라즈마(non-thermal plasma)를 이용하여 주로 NO_x 저감기술로 응용되고 있지만, 자동차 산업에서는 디젤 입자상물질의 저감에도 이용되고 있다. 플라즈마 방식을 사용한 후처리장치 P1은 DOC방식의 후처리 장치보다는 더 효과적이지만, DPF방식보다는 효율이 높지 않다. DPF와 DOC후처리 장치에서와는 달리 입자크기가 100nm정에서 높은 제거효율을 가지기 때문에 플라즈마 후처리장치를 통과한 후 입경분포의 최대개수농도점이 낮아지면서 전체적으로 입경분포가 넓어지는 특성을 가지고 있었다.

플라즈마 방식은 필터를 사용하여 매연을 포집하고 재생하는 기존의 매연과장치의 원리와는 상이하기 때문에 동일한 수준의 미세입자 저감율을 기대하기는 어려우나 NO_x의 저감효율이 높기 때문에 장래에는 DPF 또는 DOC후처리 장치와 결합하여 복합 후처리장

치로 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

3.4 후처리 장치에 의한 총 입자개수의 변화

그림 8. 은 각각의 후처리 장치에 의한 총 입자개수 제거 효율을 나타내고 있다. DPF 방식의 경우 F1은 약 90%정도, F2는 거의 100%에 가까운 입자제거 효율을 보이고 있으나, DOC의 경우 입자가 후처리 장치 통과 후에 운전모드에 따라 증감하는 현상을 보이고 있다. 이는 DOC후처리 장치가 미세 입자의 제거에는 적합하지 않음을 보여주는 것이다. 플라즈마 방식의 경우 약 80%정도의 미세 입자 감소 효율을 나타내고 있다.

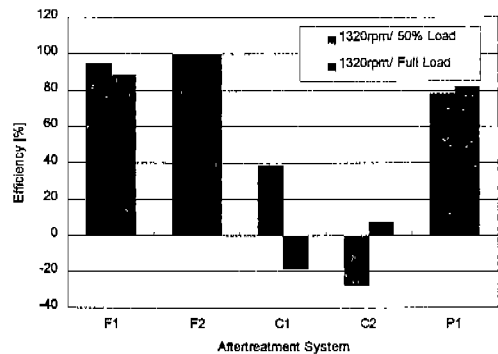


Fig. 8 Efficiency of Aftertreatment System on DPM Number Concentration

4. 결 론

디젤엔진은 대도시의 대기오염 주 발생원이며, 특히 입자상물질은 가솔린엔진에 비해 많은 양이 배출되고 있다. 입자상물질 중 디젤엔진에서 배출되는 미세 입자가 인체에 해롭다는 연구결과가 선진국에서 활발하게 보고 되고있다. 아직 국내에서는 디젤엔진에서 배출되는 미세 입자의 특성을 정확히 파악하지 못하고 있는 실정이며, 후처리장치에 대한 미세 입자 제거율이 정확히 측정되지 못하고 있다. 따라서 본 연구에서는 국내에서는 처음으로 디젤엔진에서 배출되는 미세 입자의 입경분포 특성을 파악하고, 후처리장치 통과 후 변화된 미세 입자 입경분포에 관하여 분석하였다. 3가지 종류의 디젤엔진에서 배출되는 미세 입자 입경분포는 약 100nm에서 최대 개수농도를 가지는 비슷한 경향을 나타내었으며, 엔진의 부하율이 증가하면서 전체 입자 개수가 증가하고, 100nm이상의 미세 입자 증가가 100nm이하의 미세 입자 증가 보다 두드러지는 경향을 보여주었다. 후처리 장치 통과 전후의 미세 입자 입경분포 변화는 필터트랩 방식을 사용하는 2종류의 매연여과장치가 미세 입자 제거에 높은 효율을 보여주었고, 산화촉매방식을 사용하는 2종류의 DOC는 미세 입자를 거의 제거하지 못했으며, 오히려 미세 입자가 더 증가하는 경향도 나타내었다. 플라즈마 방식의 후처리 장치의 경우 매연여과장치보다는 입자제거에 효율적이지는 못했으나, 약 80%정도로 입자개수를 감소시키는 결과를 보여주었다. 미세 입자의 입경분포는 후처리 장치를 통과한 후에도 후처리 장치의 종류에 따라 전체적으로 입자 개수가 감소되기는 하지만 분포의 특성은 계속 유지되는 것을 알 수 있었다. 본 실험의 결과는 Krüger et al. (1997) 과 Patschull and Roth (1994) 의 실험결과와 유사한 경향을 보이고 있다.

후 기

본 연구는 환경부 지원하의 “경유엔진에 의한 대기오염물질 저감대책에 관한 연구(II) - 입자상 물질 입경분포 및 배출특성 해석” 사업의 일환으로 수행되었으며, 실험에 도움을 주신 모든 분들께 감사를 표합니다.

참 고 문 헌

1. 매연 후처리장치 성능실험 결과 발표집, 국립환경연구원, pp 5-25, 1998.
2. D. B. Kittelson and J. H. Johnson, "Variability in Particle Emission Measurements in the Heavy Duty Transient Test", SAE paper 910738, 1991.
3. D. B. Kittelson, "Engines and Nanoparticles", J. Aerosol Sci. Review Vol. 29. pp. 575-588, 1998.
4. D. J. Rickeard, J. R. Bateman, Y. K. Kwon, J. J. McAughey and C. J. Dickens, "Exhaust Particulate Size Distribution : Vehicle and Fuel Influences in Light Duty Vehicles", SAE paper 961980, 1996.
5. G. Hunter, "Formation and Characterization of Particles", Report of the 1996 HEI Workshop, Particle Formation in Combustion, HEI Commun, 5, pp. 6-7, 1997.
6. J. Patschull and P. Roth, "Measurement and Reduction of Particles Emitted from a Two-Stroke Engine", SAE paper 941683, 1994.
7. J. Suzuki, H. Yamazaki, Y. Yoshida and M. Hori, "Development of Dilution Mini-Tunnel and Its Availability for Measuring Diesel Exhaust Particulate Matter", SAE paper 851547, 1985.
8. L. Dürholz and H. Lüders, "Effects of a Diesel Particulate Filter on Particle Size Distribution of a Heavy Duty Diesel Engine", Coming Particle Sizing Program - Final Report, 1997.
9. L. M. Hildemann, G. R. Markowski, M. C. Jones and G. R. Cass, "Submicrometer Aerosol

- Mass Distributions of Emissions from Boilers, Fireplaces, Automobiles, Diesel Trucks and Meat-Cooking Operation", *Aerosol Sci. Technol.* vol 14, pp. 138-152, 1991.
10. M. Krüger, H. Lüders, B. Lüers, R. Kaufmann, W. Koch and T. Kauffeldt, "Influence of Exhaust Gas Aftertreatment on Particulate Characteristics of Vehicle Diesel Engines", Research Report of the Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e.V. (FVV), 1997.
 11. R. Jourard and M. Perrin, "Measurement of Particle and Gaseous Pollution of the Atmosphere Due to Buses", *The Sci. of the Total Environ.*, 76, pp. 55-62, 1988.
 12. S. T. Bagley, K. J. Baumgare, L. D. Gratz, J. H. Johnson and D. G. Leddy, "Characterization of Fuel and Aaftreatment Device Effects on Diesel Emission", Health Effects Institute (HEI), Research Report No.76, 1996.