

디젤 극미세입자 개수 농도 측정시 Volatile Particle 생성을 억제할 수 있는 희석방법에 관한 실험적 연구

임태호¹⁾ · 김홍석²⁾ · 조형문²⁾ · 이진욱³⁾ · 정용일²⁾ · 전흥신¹⁾

경희대학교 기계공학과¹⁾ · 한국기계연구원²⁾ · 숭실대학교 기계공학과³⁾

An Experimental Study of Dilution Methods for Preventing Volatile Particle Generation during Measurement of Diesel Particle Number Concentration

Tacho Yim¹⁾ · Hongsuk Kim²⁾ · Hyoungmun Cho²⁾ · Jinwook Lee³⁾ · Youngil Jeong²⁾ · Heungshin Jeon¹⁾

¹⁾Department of Mechanical Engineering of Kyunghee University, Gyeonggi 446-701, Korea

²⁾Korea Institute of Machinery Materials, 171 Jang-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-343, Korea

³⁾Department of Mechanical Engineering, Soongsil University, Seoul 156-743, Korea

(Received 10 February 2009 / Accepted 30 March 2009)

Abstract : Recently, Europe decided to start the regulation of diesel engine nanoparticles because of its well known adverse health effects. The diesel nanoparticles can be classified as solid carbon particles and volatile particles. The volatile particles generates during dilution process by condensation of gas phase volatile compounds such as hydrocarbon. The new nanoparticle regulation considers only solid particles because of difficulty of measurement of volatile particles. The aim of this study is to suggest a proper dilution method that prevent the volatile particle generation. As a result, it is found that the 1st dilution air temperature should be above 120°C in order to prevent volatile particle generation effectively. It is also found that the volatile particles can be removed effectively in the evaporation tube by the increase of evaporation tube temperature. But when exhaust gas is hot enough (>190°C, in this study) and it is diluted in the first diluter with high temperature air (>120°C), removal phenomenon of volatile particles by increasing of evaporation tube temperature can not be seen. It means that there are no volatile particles in the diluted exhaust gas. Additionally, dilution ratio is not an important factor for volatile particle generation compared with dilution air temperature or evaporation tube temperature.

Key words : Diesel emissions(디젤 배출 가스), Nanoparticle(극미세입자), Particle number concentration(입자 개수농도), Volatile particle generation(휘발성 입자 생성), Dilution temperature(희석 온도), Dilution ratio(희석 비)

1. 서론

현재 디젤 엔진에서 발생하는 입자상물질(PM, Particle Matters)은 질량으로 규제한다. 즉, 소형자동차에서는 PM을 g/km로, 대형 자동차용 엔진에 대해서는 g/kWh로 규제하고 있다. 하지만 디젤 엔진에서 발생하는 극미세입자가 인체에 유해하다는 것이

알려지면서 유럽 PMP(Particle Measurement Program)는 극미세입자의 수 농도 규제를 2011년부터 도입하기로 결정하였다.¹⁾

2000년대에 들어서면서 디젤엔진에서 배출되는 극미세입자의 개수 농도를 정확히 측정할 수 있는 장비에 대한 연구가 많이 진행되어 왔고, 많은 발전이 있었다.²⁻⁴⁾ 그 중 CPC(Condensation Particle Counter)가 가장 보편적으로 사용되는데 CPC는 측정 원

*Corresponding author, E-mail: hongasuk@kimm.re.kr

리상 디젤엔진에서 배출되는 고체 성분인 soot 입자 뿐만 아니라 에어로졸 형태의 입자도 동시에 측정되는 특징을 갖는다. 특히, 디젤 엔진의 배출가스 중에 미연 탄화수소등 휘발성 성분이 존재하는데 이 휘발성 성분 가스는 회석과정 중에 응축되어 입자로 변화될 수 있으며, 이 경우 CPC에서 개수 농도로 측정된다. 이와 같이 생성되는 휘발성 입자의 수 농도는 실험 조건에 따라 변화하므로 정확하고 일관성 있게 측정하는데 어려움이 있는 실정이다. 따라서 유럽 PMP(Particle Measurement Program)에서는 디젤 엔진에서 배출되는 입자 중 휘발성 입자를 제외한 대부분이 soot 입자인 고체 입자만을 규제 대상으로 정의하고 있다.

N. Collings⁵⁾는 적절한 회석 방법(회석 온도 및 회석 비)을 이용하여 배기가스의 휘발성 성분이 응축되어 에어로졸화 되는 것을 피할 수 있다고 처음 제안하였으나 구체적인 회석 온도 및 회석 비에 관한 언급은 하지 않았다.

H. Burtscher⁶⁾는 가열 회석(thermodilution) 방법으로 휘발성 입자로 응축되는 것을 피할 수 있으며 증발관(evaporation tube)의 온도가 250°C 이상이 되면 이를 제거할 수 있다고 하였지만 마찬가지로 1차 회석 공기의 온도 및 회석비등이 휘발성 입자 생성 억제에 미치는 영향에 관한 명확한 언급은 없었다.

Kim 등⁷⁾은 공기 분사식(ejector) 회석장치를 이용하여 회석온도가 디젤엔진에서 배출되는 극미세입자 측정에 미치는 영향을 관찰하였으며, 회석공기 온도가 높을수록 측정되는 입자 개수 농도가 적어진다는 결과를 얻었다.

본 논문은 여러 디젤엔진 운전 조건에서 1차 회석 공기 온도, 증발관(evaporation tube) 온도, 회석비등을 변화하면서 SMPS(Scanning Mobility Particle Sizer)를 이용하여 입자 크기별 극미세입자 수 농도를 측정하였다. 이를 통해 회석과정 중에 휘발성 입자의 생성을 억제하거나 제거할 수 있는 방법을 제시하는 것이 본 논문의 목적이다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치

Fig. 1은 회석방법에 따른 극미세입자 배출특성

을 연구하기 위한 실험장치 개략도이다. 본 실험은 배기량이 6.6 L인 TCI(Turbo Charger Intercooler) 디젤 엔진을 사용하였으며, 후처리 장치가 장착되지 않은 엔진 배이스 상태에서 수행되었다. 배기관에 샘플링 관(sampling probe)을 삽입하고, 샘플링 관에 회전형 1차 회석장치(MD19-2E, Matter Engineering 사 제조)를 직접 연결하였으며 샘플링 관과 회전형 1차 회석장치까지의 배관은 단열 처리하였다. 회석비 조절을 위한 회전 원판으로는 회석비를 150~3000까지 조정 가능한 8개 중공(cavity) 회전 원판을 사용하였다. 1차 회석된 배기가스는 증발관(ASET-15, Matter Engineering 사 제조)를 지나면서 다시 가열되며, 이 때 evaporation tube의 온도는 30~400°C까지 조절이 가능하다. 배기가스는 증발관을 통과한 직후 대기 온도로 2차 회석되며 회석비는 3.7~7까지 변화시켰으며, 열영동(thermophoresis) 현상에 의한 입자손실을 방지하기 위해서 2차 회석시 공기 온도는 상온으로 유지하였다. 그리고 입경분포별 입자 수 농도를 측정하기 위하여 Grimm사의 SMPS⁸⁾를 사용하였다. 이 SMPS의 측정범위는 10~875 nm이며, 약 10^{10} 수/cm³ 까지 수 농도를 측정할 수 있다.

2.2 실험 방법

본 연구에서는 엔진 동력계상에서 세 가지의 운전 조건(엔진 공회전 조건, 1667 RPM-25% 부하, 2085 RPM-50% 부하)에 대한 시험을 각각 수행하였다.

본 연구에서는 1차 회석비를 245~1687, 1차 회석 공기의 온도를 25~150°C, 2차 회석비를 3.7~7, 증발

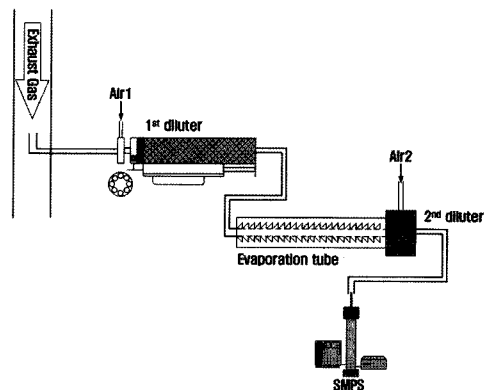


Fig. 1 Schematic diagram of an experimental setup

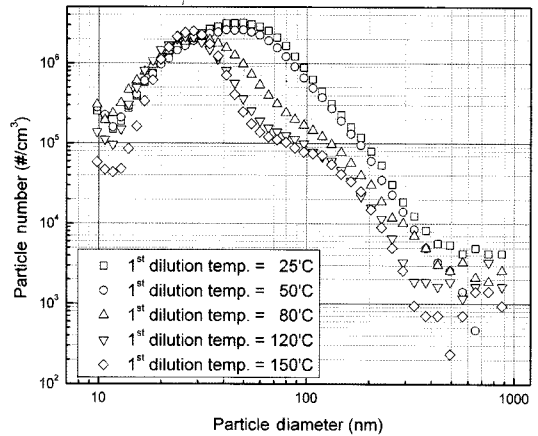
관(evaporation tube) 온도를 25~400°C 조건으로 변화시키면서 희석 방법이 크미세입자의 휘발성 성분 생성 및 제거에 미치는 영향을 알아보았다.

3. 실험 결과 및 고찰

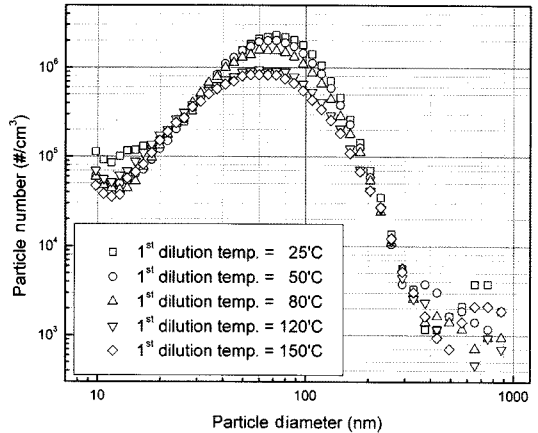
3.1 1차 희석 온도의 영향

Fig. 2(a)는 1차 희석온도 변화에 따른 입자 크기별 수 농도를 보여준다. 본 실험에서는 1차 희석비를 343, 2차 희석비를 7, 증발관 온도를 상온(~20°C)로 고정하였다. Fig. 2(a)는 배출가스 온도가 약 75°C 인 엔진 공회전 조건에서의 측정결과를 보여준다. 시험결과로부터 1차 희석온도가 증가함에 따라 30 nm 이상 크기의 입자 수 농도가 감소함을 알 수 있다. 그러나 1차 희석온도가 120°C인 경우와 150°C 경우의 입자 수 농도에는 큰 차이가 없었다. Fig. 2(b)는 배출가스 온도가 약 270°C인 2085 RPM 50% 부하에서의 측정결과를 보여준다. Fig. 2(a)의 측정결과와 유사하게 1차 희석온도가 높을수록 30~200nm 크기의 입자 수 농도가 감소하는 경향을 보였다. 그리고 Fig. 2(a)의 측정결과와 마찬가지로 1차 희석온도가 120°C인 경우와 150°C 경우의 입자 수 농도에는 큰 차이가 없었다. 이상의 실험결과로부터 1차 희석온도가 낮을 경우 샘플된 배기가스 중에 존재하는 휘발성분 가스가 희석과정 중에 응축되면서 입자개수 농도가 증가된다고 유추할 수 있다. 즉, 1차 희석온도를 높이면 희석과정 중에 배출가스 중의 휘발성분 가스의 응축 현상을 효과적으로 억제할 수 있다고 정리할 수 있으며, 휘발성분 가스 응축을 최대한 억제하기 위해서는 1차 희석온도를 120°C 이상으로 유지하는 것이 바람직할 것으로 보인다.

Fig. 3은 증발관 증발관 온도를 300°C로 고정한 후 1차 희석 온도 변화에 따른 입자 수 농도의 변화를 나타낸 그래프이다. 참고로 Fig. 2에서는 증발관 온도를 상온(~20°C)로 고정한 후 동일한 시험을 수행하였다. 실험 조건은 Fig. 2와 동일하게 1차 희석비는 343, 2차 희석비는 7로 고정하였다. Fig. 3(a)와 (b)는 각각 엔진 공회전 조건과 2085 RPM-50% 부하에서의 측정결과이다. 두 조건 모두 Fig. 2에 비해 입자 수 농도 감소폭은 작지만 Fig. 2와 마찬가지로 1차 희석온도가 높을수록 입자의 수 농도가 감소함을



(a) Idle



(b) 2085RPM-50% load

Fig. 2 Effects of the 1st dilution temperature with evaporation tube temperature ~20°C (1st dilution ratio=342, 2nd dilution ratio=7).

알 수 있다. 즉, 증발관 온도가 300°C로 높더라도 1차 희석온도의 변화에 따라 입자개수 농도가 변화한다고 말할 수 있다. 다시 정리하면, 휘발성입자(volatile particle)를 효과적으로 제거하기 위해서는 증발관 온도를 높이는 것 뿐 만아니라 1차 희석 중에 희석 온도도 높게 유지해야 한다는 것을 의미한다.

3.2 증발관 온도의 영향

Fig. 4는 증발관 온도에 따른 입자 수의 변화를 나타낸다. 본 실험에서는 1차 희석온도를 150°C로 하여 1차 희석 과정 중에 휘발성분 가스가 응축되는 현상을 억제하였으며, 그 외 1차 희석비는 343, 2차

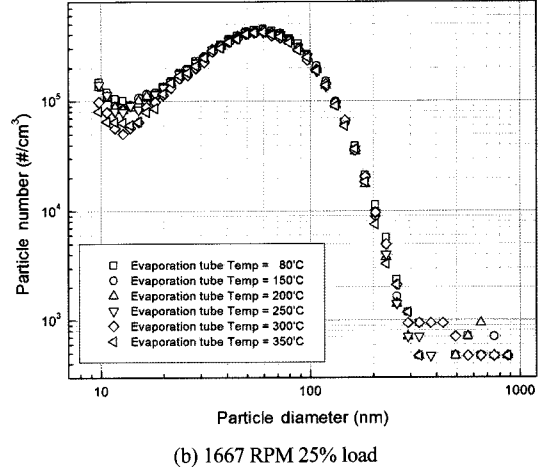
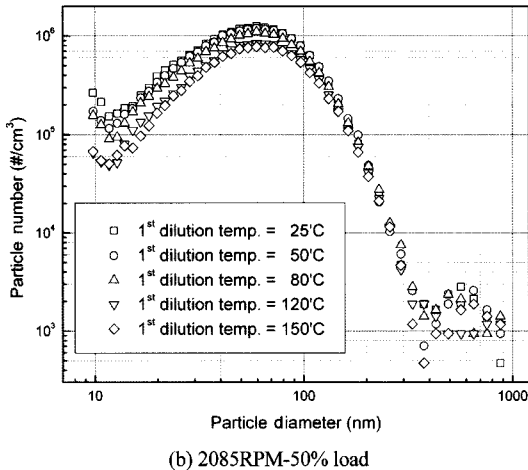
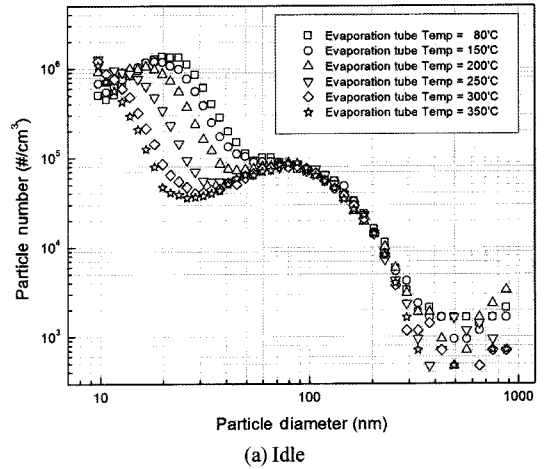
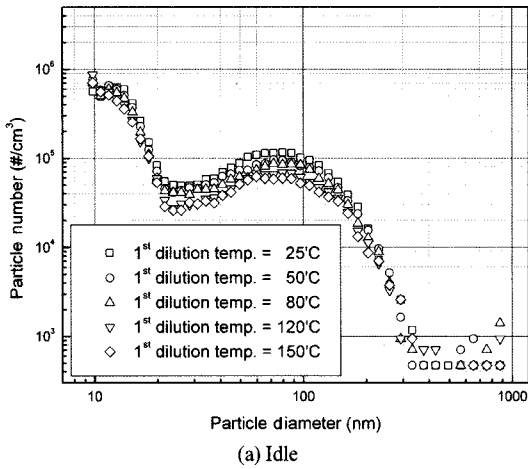


Fig. 3 Effect of the 1st dilution temperature with evaporation tube temperature 300°C (1st dilution ratio=343, 2nd dilution ratio=7)

회석비는 7로 고정하였다. Fig. 4(a)는 엔진 공회전 조건의 결과로써 증발관 온도가 높을수록 약 70 nm 이하 크기의 입자 개수 농도가 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 엔진 공회전 조건은 배기가스 온도(약 75°C)가 낮아서 샘플링 및 1차 회석을 하기 전 배출 가스에 상당수의 휘발성 입자가 이미 존재한다는 것을 의미한다. 즉, 1차 회석온도를 150°C로 하여 휘발성입자의 생성을 최대한 억제하였음에도 불구하고, 이미 샘플 가스에 작은 크기의 휘발성 입자가 존재하며, 이 입자들이 증발관에서 제거되는 것으로 판단된다. 본 시험에서 70nm 이하의 입자 개수농도 만 영향 받는 것으로부터 고온 1차 회석 후 존재하

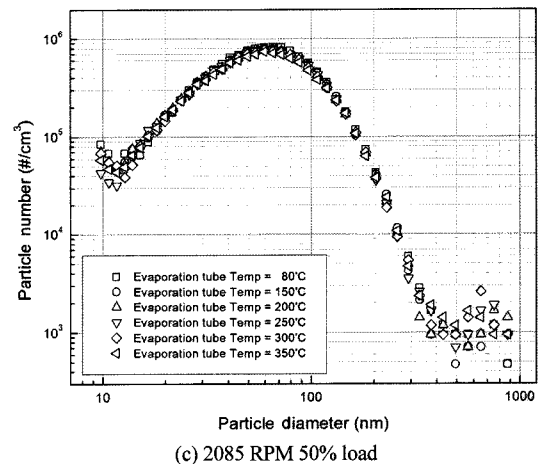


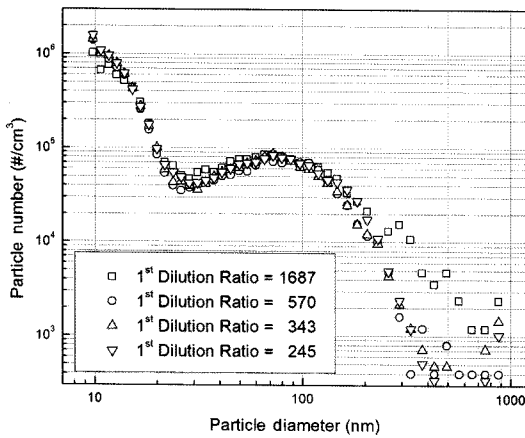
Fig. 4 The effects of evaporation tube temperature(1st Dilution ratio=343, 2nd Dilution ratio=7, 1st Dilution temp.=150°C)

는 휘발성입자 크기는 매우 작은 70nm 이하임을 알 수 있다. Fig. 4(b)와 Fig. 4(c)는 각각 1667 RPM 25% 부하와 2085 RPM 50% 부하의 실험결과를 보여준다. Fig. 4(a)의 엔진 공회전 조건 결과와는 다르게 두 조건에서는 모두 증발관 온도가 입자 수 농도에 미치는 영향이 없음을 알 수 있다. 이는 두 조건의 배기가스 온도는 190°C와 270°C로 높아서 배기관 내에 휘발성 입자가 존재하지 않으며, 1차 희석 온도만 높게 유지하면 희석 중에 휘발성입자가 추가로 생성되지 않고, 이에 따라 증발관 온도에 따라서 입자 개수 농도가 변화하지 않는 것으로 생각된다.

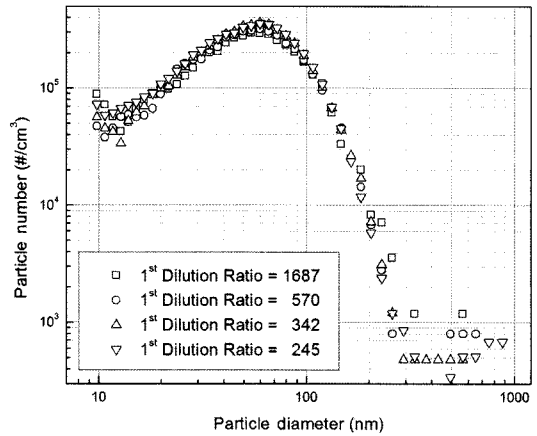
3.3 희석비의 영향

Fig. 5는 1차 희석비에 따른 입자 수의 변화를 나타낸 그래프이다. 본 실험에서는 1차 희석공기 온도는 150°C, 증발관 온도는 300°C, 2차 희석비는 7로 고정하였다. Fig. 5(a)와 Fig. 5(b)는 각각 엔진 공회전 조건과 1667 RPM 25% 부하에서의 측정결과이다. 이상의 시험결과로부터 1차 희석비에 따른 입자 수의 변화는 1차 희석공기 온도 또는 증발관온도가 미치는 영향에 비해 무시할 정도로 작음을 알 수 있다.

Fig. 6은 2차 희석비에 따른 입자 수의 변화를 나타낸 그래프이다. 본 실험에서는 1차 희석공기 온도

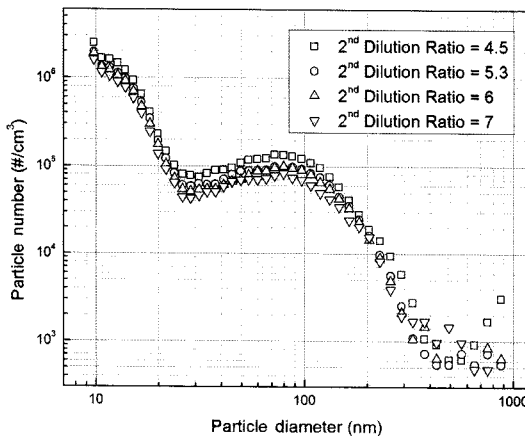


(a) Idle

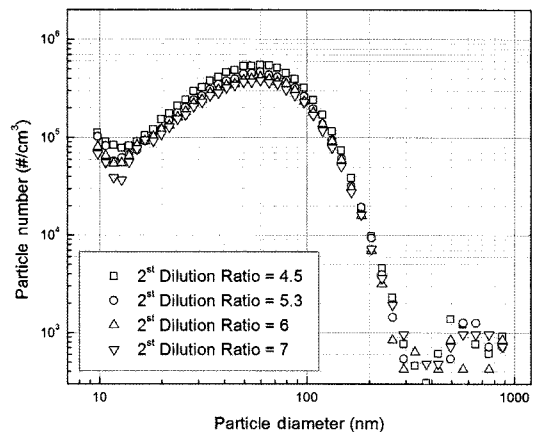


(b) 1667 RPM 25% load

Fig. 5 The effects of 1st dilution ratio (1st Dilution temp.=150°C, Evaporation tube temp.=300°C, 2nd Dilution ratio=7)



(a) Idle



(b) 1667 RPM 25% load

Fig. 6 The effect of 2nd dilution ratio (1st Dilution temp.=150°C, Evaporation tube temp.=300°C, 1st Dilution ratio=343)

는 150°C, 증발관 온도는 300°C, 1차 회석 비는 343으로 고정하였다. Fig. 6(a)와 Fig. 6(b)는 각각 엔진 공회전 조건과 1667 RPM 25% 부하에서의 측정결과이다. 모든 조건에서 2차 회석비에 따른 입자 수의 변화는 1차 회석공기 온도 또는 증발관 온도가 미치는 영향에 비해 무시할 정도로 작음을 알 수 있다. 단, 시험결과에서 2차 회석비가 높아질수록 입자 수가 다소 작아지는 경향을 보이는데 이는 2차 회석이 교정의 부정확성 또는 회석비 증가시 입자 손실의 증가, 회석비 증가시 휘발성 성분 가스의 농도감소로 인한 휘발성 입자 생성의 억제 등이 가능한 이유일 것으로 사료된다.

이상으로부터 본 연구에 사용된 회전형 회석 장치에서 1차 또는 2차 회석비는 1차 회석공기 온도 또는 증발관온도가 미치는 영향에 비해 휘발성 입자의 생성 억제 및 제거에 큰 영향은 없는 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구는 경유 차량에서 발생하는 극미세입자를 정확하게 측정하기 위하여 휘발성 성분 가스의 응축 또는 입자로의 생성을 억제할 수 있는 회석방법을 알아보고자 수행하였으며 연구 결과를 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 1) 1차 회석시 휘발성 성분 가스의 응축을 억제하기 위해서는 1차 회석 온도를 높게 해야 한다. 하지만 1차 회석 온도가 120°C 이상인 경우 휘발성 입자 생성 억제 특성은 유사하였다. 이는 휘발성 입자 생성 억제를 위한 최소 1차 회석 온도가 120°C 이상임을 의미한다.
- 2) 1차 회석된 가스 중에 존재하는 휘발성 입자는 증발관을 이용하여 효과적으로 제거할 수 있다. 증발관 온도가 높일수록 휘발성 입자가 효과적으로 제거되며, 증발관 온도가 300°C 이상인 경우 휘발성 입자 제거 특성은 유사하였다.
- 3) 배기가스 온도가 낮은 조건(본 연구에서는 엔진 공회전 조건)에서는 1차 회석 온도를 120°C 이상으로 높여 회석하더라도 회석된 배기가스 중에 휘발성 입자 일부가 존재한다. 이 휘발성 입자는 회석과정동안 발생한 것이 아니라 배기관 내에

서 존재하는 것으로 판단되며, 이 휘발성 입자는 증발관의 온도를 높이면 대부분 제거된다. 하지만 배출가스온도가 높은 조건(본 연구에서는 190°C 이상)에서는 1차 회석온도를 120°C 이상으로 회석하면 회석가스 중에 휘발성 입자는 존재하지 않는 것으로 보인다. 따라서 증발관 온도에 따른 입자 수 농도의 영향은 없다.

- 4) 이상의 결과를 종합하였을 때 디젤엔진 운전 전체 영역에 걸쳐 휘발성 성분 가스의 응축 또는 입자로의 생성을 억제하기 위해서는 1차 회석온도를 120°C 이상 증발관 온도를 300°C 이상으로 하여야 함을 알 수 있다.
- 5) 본 연구에서 사용한 회전형 회석 장치에서 1차 또는 2차 회석비는 1차 회석공기 온도 또는 증발관온도가 미치는 영향에 비해 휘발성 입자의 생성 억제 및 제거에 큰 영향은 없는 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 환경부 Eco-STAR Project 사업의 무·저공해자동차사업단 지원 하에 수행되었으며 이에 감사드립니다.

References

- 1) Proposal for Supplement 7 to the 05 Series of Amendments to Regulation, No.83, 2008.
- 2) J. Lee, H. Kim, G. Cho and Y. Jeong, "Analysis of Diesel Nano-particle Number Distribution Characteristics for Three Different Particle Measurement Systems," Transactions of KSAE, Vol.15, No.6, pp.144-150, 2007.
- 3) D. B. Kittelson, "Engines and Nanoparticles: A Review," Journal of Aerosol Science, Vol.29, No.5/6, pp.575-588, 1998.
- 4) C. V. Gulijk, J. C. Marijijnissen, M. Makkee and J. A. Moulijn, "The Choice of Instrument(ELPI and/or SMPS) for Diesel Soot Particulate Measurements," SAE 2003-01-0784, 2003.
- 5) N. Collings and B. R. Graskow, "Particles from Internal Combustion Engines what We Need to Know," R. Soc. Lond A. Vol.358, pp.2611-

- 2623, 2000.
- 6) H. Burtscher, "Physical Characterization of Particulate Emissions from Diesel Engines: A Review," *Aerosol Science*, No.36, pp.896-932, 2005.
- 7) H. Kim, S. Lee, J. Kim, G. Cho, N. Sung and Y. Jeong, "Measurement of Size Distribution of Diesel Particles: Effects of Instruments, Dilution Methods, and Measuring Positions," *Int. J. Automotive Technology* Vol.6, No.2, pp.119-124, 2005.
- 8) <http://www.grimm-aerosol.de/>