

## 자동차와 선박엔진에서 배출되는 극미세입자 측정장치의 교정과 검증

김승열 · 추용엽 · 최종우<sup>†</sup>

한국산업기술시험원, 국립환경과학원

### Calibration and Verification of Nano-Particle Analyzer for Emissions from Vehicle and Marine Diesel Engines

Sung-Lyul Kim, Yong-Yup Chu, and Jongwoo Choi<sup>†</sup>

Korea Testing Laboratory, Seoul 152-718, Korea

National Institute of Environmental Research, Incheon 404-170, Korea

Received June 25, 2013/Revised August 19, 2013/Accepted August 29, 2013

In this study, the experimental analysis of calibration and verification methods of Nano-Particle analyzer was investigated by using PNC (Particle Number Counter), VPR (Volatile Particle Remover) and vehicle test. First, it was investigated the analysis about calibration and verification features of nano-particle of overseas cases. Secondly, to find effects of evaporating tube temperature and dilution device temperature in VPR, it was investigated for error sources of particle number measurement system. Also, this study was analyzed about the results of vehicle test in two different laboratories to evaluate reproducibility. Besides, this study was performed on the correlation test based on the measurement results of two different equipments under the same conditions. From this study, it was found that the correlation of the two devices was relatively good, but environments and conditions of laboratory affect the measurement. In addition, maintaining the temperature of measurement instruments are very important. Also DPF (Diesel Particulate Filter) is an effective instrument to reduce PM (Particulate Matter).

**Key words:** Particle number counter, Volatile particle remover, Particulate matter, Calibration, NEDC vehicle test mode

#### 1. 서 론

전 세계적으로 자동차 생산량 및 이용률이 증가하면서, 자동차 배출가스가 미치는 환경적 요인을 줄이기 위한 국제적인 노력을 통해 세계 각 국가들은 자동차 배출가스 규제와 관련한 법규를 제정하고 이와 관련한 검사 제도를 시행하여 철저한 법규 이행을 추구하고 있다.<sup>1,2)</sup> 대부분의 자동차 배출가스를 구성하는 물질들은 지구 환경에 대한 악영향을 미치는 요인이나, 입자상 물질(Particulate Matter, 이하 PM)과 CO 등의 물질은 인체에 대한 유해 영향 요소로 구분되며, 특히 PM의 경우 호흡기 장애뿐만 아니라 발암 물질로도 판정되어 이에 대한 규제가 점점 더 강화되고 있는 실정이다.<sup>3)</sup>

한편, 선박은 전 세계 화물의 80%를 운송하면서도 사용하는 에너지는 약 2%에 불과하기 때문에 선박이 차지하는 입지는 그 어떤 운송수단보다 절대적이라고 할 수 있다.<sup>4)</sup> 선박의 주요 동력원으로는 디젤 엔진이 사용되고 있으며, 자동차 배출가스와 마찬가지로 대기 환경오염의 주요 물질로 인식되고 있다. 국제해사기구(IMO, International Maritime Organization)에서는 선박 및 해양구조물에서 발생하는 대기오염물질에 대한 규제를 강화하고 있으며 2005년에 선박 디젤엔진에서 발생하는 대기오염물질에 대한 협약을 제정하였다.<sup>5)</sup>

입자개수측정기(Particle Number Counter, 이하 PNC)를 이용한 PM 개수 측정 시스템은 디젤 엔진에

<sup>†</sup>To whom correspondence should be addressed.

서 배출되는 고체 성분인 SOL (Solid fraction) 입자뿐만 아니라 입자 형태의 입자도 동시에 측정되는 특징을 가지고 있다.<sup>6)</sup> 특히, 디젤엔진의 배출가스 중에 미연탄화수소 등 휘발성 성분이 존재하는데, 이 휘발성 성분(Soluble organic fraction, 이하 SOF)은 배기가스를 희석시키는 과정에서 응축되어 입자로 변화한다. 이렇게 입자로 변화된 SOF도 PNC에서는 입자로 판독되어 극미세입자의 개수 측정에 영향을 미치게 된다. 입자로 변화한 SOF는 환경 조건에 따라 입자의 크기 및 농도가 쉽게 변화하기 때문에, 측정 데이터의 가변성을 제어하기 위해 입자측정프로그램(Particle Measurement Program, 이하 PMP)에서도 디젤 엔진의 배출가스 입자 중에서 휘발성입자를 제거한 SOL입자에 대해서만 개수 측정을 규제 대상으로 정의하고 있다. UN-ECE Regulation 83에서는 이러한 휘발성 입자를 제거 하는 장치를 휘발성입자제거장치(Volatile Particle Remover, 이하 VPR)로 정의하고 이 장치에 대한 요구사항 및 검 교정 방법을 제시하고 있다.<sup>7)</sup> 따라서 측정 데이터의 오차 해석 및 원인 분석은 PNC 장비 자체를 비롯하여 VPR 및 각 시스템간의 연결관들의 연관성을 고려하여 수행하게 된다.

하지만, 일반적으로 이러한 이론적인 환경을 구성할 수 없기 때문에 시험실 내적, 외적 오차가 발생하게 된다. 특히 시험환경이 다른 시험실간의 측정 결과에 대한 오차 분석은 측정 결과에 대한 신뢰도 및 범용성에 있어 중요한 요인이 될 수 있기 때문에 이에 대한 보정 방법은 필수적이라 할 수 있다.

이러한 배경을 바탕으로 본 연구에서는 측정장치 오차해석을 통한 PNC와 VPR의 교정 및 검정 방법을 평가하고, 희석장치 및 입자개수측정기의 교정 및 검정 방법을 도출하기 위하여 차량시험을 통해 운용상 문제점 및 측정장비의 교정 및 검정 방법에 필요한 사안을 검증하고자 하였다.

이를 위해 먼저 해외 사례를 중심으로 극미세입자 별 교정 및 검증 특성을 분석하였고 VPR의 장비 희석 온도와 증발관 온도의 영향을 파악하기 위해 입자개수측정시스템의 오차 원인을 분석하였다. 또한, 재현성을 평가하기 위해 동일한 장비 구성을 가지고 서로 다른 두 곳의 시험실에서 차량 시험을 수행하여 시험 결과를 분석하였으며, 동일한 시험 조건에서 다른 측정장비의 측정결과를 비교 검토해 기기간의 상관성을 시험하였다. 마지막으로 PNC의 도입 및 규제 설정과 관련하여 명확한 제시를 하기 위해, DPF (Diesel Particulate

Filter)를 장착한 경우와 미장착한 경우로 나누어 PM의 개수를 비교하였다.

## 2. PNC의 교정 및 검정방법 평가

### 2.1. 극미세입자 별 교정 및 검증특성 분석

PNC의 경우 입자의 크기와 관계없이 입자의 개수만 측정하여 결과를 출력한다. 그러므로 입자의 크기는 입자 개수에 영향을 미쳐서는 안되며, 검사 및 교정 과정에서 입자의 크기가 입자 개수에 영향을 미치는지 확인해야 다양한 입자가 혼재하는 PM에서 정확하게 입자의 개수를 측정할 수 있다. 또한 각 PNC 장비마다 측정 가능한 입자 농도 한계를 가지고 있기 때문에, 제한 농도 범위 내에서 정확하게 측정이 가능한지 검교정 과정에서 확인해야 한다. 입자개수측정기의 교정 방법에 대한 규정은 UN-ECE의 GRPE (Group de Rapports sur la Pollution et l'Energie)에서 제안한 PMP (Particle measurement Program)에서도 명시하고 있다.<sup>8)</sup> UN-ECE의 Regulation 83을 참고하면 PNC 장비의 교정에서는 입구 농도가  $10^4/cm^3$  미만이 되도록 설정하고, 30 nm 테트라콘탄 입자들을 포함한 입자의 제거효율은 99% 이상으로 제시하고 있다. 또한 각각 100 nm의 입자농도감소지수(PCRF, Particle Concentration Reduction Factor) 1.3과 1.2보다 작은 100 nm의 PCRF를 달성하여야 하며, 입구와 출구에서 30, 50, 100 nm의 직경을 가진 단 분산 입자들을 활용하도록 되어 있다.

### 2.2. PNC 시스템의 오차 원인 분석

#### 2.2.1. VPR 장비 1차 희석 온도의 영향

국내에서 수행된 연구 결과<sup>9)</sup>에 의하면 동일한 PNC 시스템에서 VPR의 1차 희석 온도의 변화에 따라 일부 입자 크기 범위에서 결과 값 차이가 나타남을 확인하였다. 엔진 부하를 달리하여 PM의 개수 변화 경향을

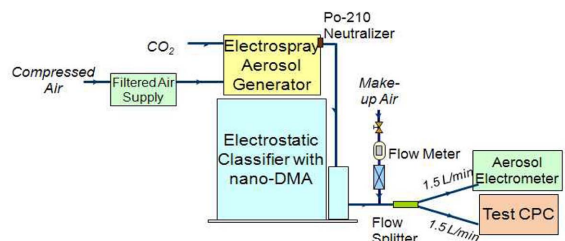


Fig. 1. Schematic diagram of PNC calibration.

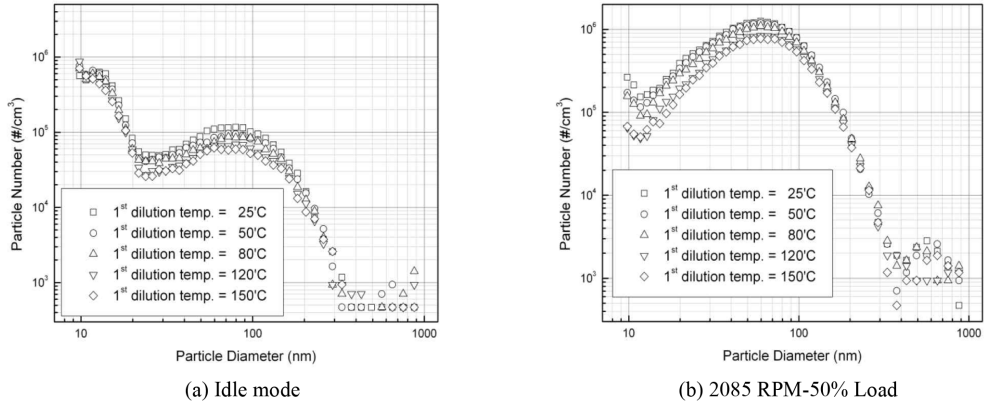


Fig. 2. Effects of the 1st dilution temperature.

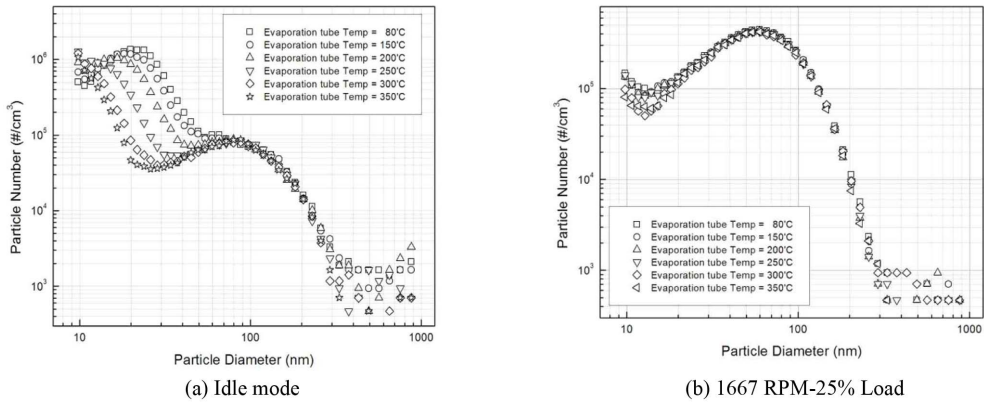


Fig. 3. Effects of 1st dilution ratio with evaporation tube temperature.

살펴보면 낮은 온도 영역(< 120°C)에서는 1차 희석 온도에 따라 결과 값의 변화 폭이 크지만, 120°C 이상의 측정 결과 값들은 거의 일치하는 모습을 보여준다. 따라서 1차 희석온도가 낮을 경우 채취된 배기가스 중에 존재하는 SOF가 이 희석과정에서 응축되면서 입자 개수 농도가 증가되는 것으로 볼 수 있으며, 1차 희석 온도를 120°C 이상 유지해야 PNC의 입자 개수 측정 오차를 줄일 수 있음을 확인할 수 있다.

2.2.2. VPR 장비 증발관 온도의 영향

국내에서 수행된 연구 결과<sup>9)</sup>에 의하면 동일한 PNC 시스템에서 증발관의 온도에 따라 PM의 입자개수 측정 결과가 배기가스온도, 즉 엔진의 운전 상태에 따라 일부 영향을 받는 것으로 나타났다. 구체적으로 배기가스 온도가 약 300°C보다 낮은 경우 증발관의 영향 매우 컸으며, 특히 작은 입자(약 70 nm) 범위에서의 편차가 크게 나타났다. 따라서 증발관의 경우 배기가스 온

도가 비교적 낮은 Idle 상태를 비롯한 저 RPM 운전 모드에 대응하기 위해서는 약 300°C 이상의 온도를 유지하여야 한다.

2.3. 제조사별 교정 및 검증방법 비교 분석

TSI사와 GRIMM사의 경우 UN-ECE Regulation 83에 대응할 수 있도록 신제품 개발 및 교정 및 정도 검사에 관련된 연구물을 지속적으로 발표하고 있다.<sup>10-13)</sup> 이에 각 제조사 별로 제안하고 있는 PNC의 교정 및 검증 방법에 대해서 알아보려고 한다.

2.3.1. TSI사의 교정 및 검증 방법

TSI사에서는 전위계(Aerosol Electrometer)와 DMA(Differential Mobility Analyzer) 장비를 활용하여 NIST(National Institute of Standards and Technology)에서 제안한 시험 기준에 맞춰 교정 및 검증하도록 소개하고 있다.<sup>14)</sup> TSI 사에서 제시하고 있는 기본 교정 시스

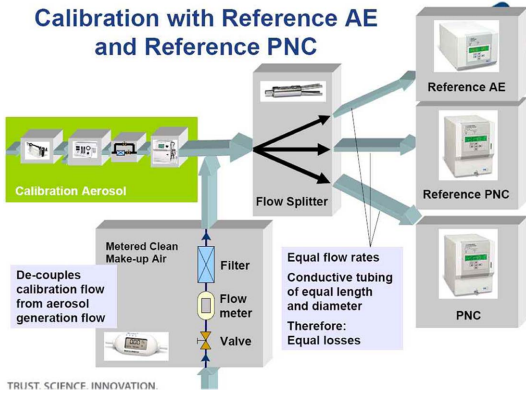


Fig. 4. Schematic diagram of PNC calibration at TSI.

템은 Fig. 4와 같다.

특히 교정된 PNC는 타 장비를 교정하는데 대체하여 사용가능하며, 전위계를 이용해 교정을 수행할 때에는 전위계의 결과값을 정확하게 도출하는 것이 중요하며, 교정된 PNC를 이용하여 타 장비를 교정할 경우 도출된 출력값이 아래 식을 만족하도록 해야한다.

$$0.9 \leq \frac{C_{PNC}(D_p)}{C_{REF}(D_p)} \leq 1.1$$

또한, 전위계의 결과값과 피교정 PNC의 결과값을 1:1 대응으로 도식화하였을 때 그려지는 직선의 기울기를 반응의 선형성이라고 하며 이 값 또한 0.9에서 1.1 사이에 존재해야 한다.

### 2.3.2. GRIMM사

GRIMM사에서는 특별히 PNC에 대한 교정 및 검증에 관련된 내용을 공개하고 있지 않다. 다만 스위스 도

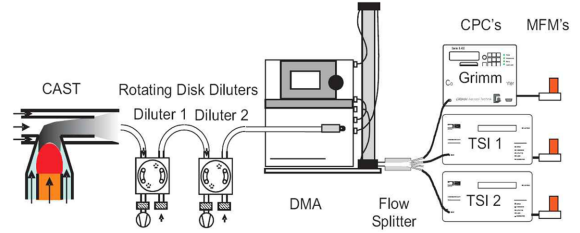
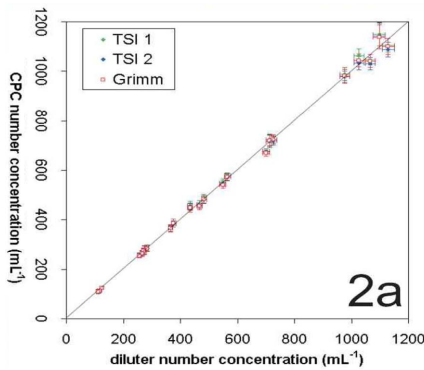


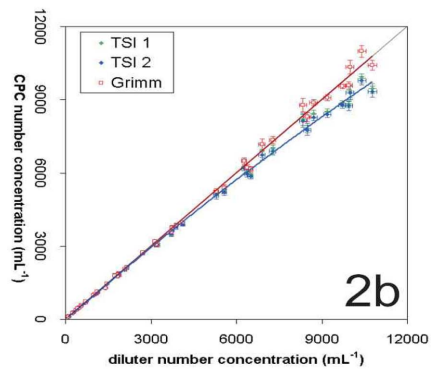
Fig. 5. Schematic diagram of PNC calibration at METAS.

량형국인 METAS에서 발표한 자료만을 소개하고 있다. METAS에서는 2006년 TSI사와 GRIMM사의 PNC 비교 검증 시험을 수행하였다.<sup>15)</sup> METAS에서 발표한 자료에 따르면 TSI사 제품과 GRIMM사 제품을 비교하기 위해 Fig. 5와 같은 시험 장비를 구성하였다. 시험 구성에 따르면 교정을 위한 입자를 생성하기 위해 CAST (Combustion Aerosol Standard) 장비를 활용하였다. CAST는 연소에 의해 발생하는 입자를 생성하는 장치로 CAST에서 생성된 입자들을 2번의 희석을 통해 DMA로 전달하며 DMA에서는 측정하고자 하는 입자 크기에 맞게 전달된 입자에서 해당 크기를 가진 입자만 골라내어 유량 분할기를 통해 각각의 PNC에 입자를 공급한다. 여기서 사용된 GRIMM사와 TSI사의 장비 모델은 각각 Grimm CPC 4.300과 CPC TSI 3022이다. 본 시험에 대한 결과는 Fig. 6에 도식화하였으며 두 제품에 대한 반응 선형성을 비교하여 성능을 분석하였다.

시험 결과, 저농도 영역에서는 두 제품 모두 뚜렷한 선형성을 띄고 있으며, 정밀도도 높은 편이다. 하지만 고농도 영역으로 가면 약 6000/cm<sup>3</sup> 영역 이상부터는 TSI사의 제품이 GRIMM사의 제품에 비해 선형성이 떨



(a)



(b)

Fig. 6. Comparison of various PNC.

어지고 있음을 볼 수 있다. 그리고 GRIMM사의 제품도 선형성을 잘 유지하고 있으나, 결과 값들의 정밀도가 떨어지고 있음을 볼 수 있다.

### 3. 실험장치 및 실험방법

#### 3.1. 실차에 의한 희석장치 반복시험

반복시험은 차대동력계를 활용하여 국내 차량을 대상으로 실시하였으며, 재현성을 평가하기 위해 동일한 장비 구성을 가지고 서로 다른 두 곳의 시험실에서 시험을 수행하여 시험 결과를 분석하였다. 시험 장소로는 한국석유품질관리원 연구센터와 GM부평연구소 내 차대동력시험실로 두 곳을 지정하였으며, PNC는 두 곳 모두 동일한 구성으로 TSI사의 제품을 적용하였다. 또한, 시험에 사용한 차대동력계는 제조사의 차이는 있으나 두 곳 모두 4WD를 사용하고 있으며, 배출가스 측정 장치는 HORIBA사와 AVL사의 장비를 사용하였다.

PNC 반복 시험을 위한 차대동력계 테스트 모드는 Fig. 7의 ECE15+EUDC 모드를 사용하였다. 주행모드는 4개의 기초도시주행모드로 구성된 도시주행모드(Part 1)와 추가도시주행모드(Part 2)로 구성되어 있다. 이에 전체 시스템의 안정화를 위해 120 km/h 주행 2분, EUDC 3회 preconditioning을 추가하였다. 또한 시험에 사용한 차량은 DPF가 장착된 2.0 L 디젤 모델을 사용하였다. 또한, 시험환경에 따른 측정값 변화에 대한 결과의 개연성을 높이기 위해 다른 차량으로 교체하여 동일한 방법으로 재시험을 수행하였다.

#### 3.2. 기기 간 상관성 시험

PNC의 반복성 시험에 이어 동일한 시험조건에서 다른 측정 장비의 측정 결과를 비교 검토해 기기간의 상

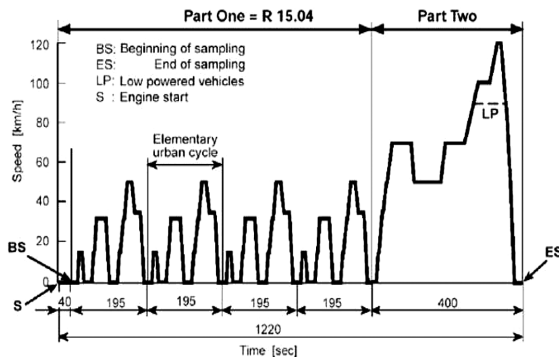


Fig. 7. ECE15+EUDC Mode.

관성을 시험하였다. 시험장소는 GM부평연구소의 차대동력계 시험실로 고정된 후, 기존 GM부평연구소의 PNC와 한국석유품질관리원 연구센터의 장비를 동일한 차량 및 시험조건 하에 PM의 개수를 측정하여 시험 기기간의 상관성을 비교 시험하였다. 그리고 GM부평연구소와 한국석유품질관리원의 시험 장비 모델은 동일하게 구성하였으며, 측정 장비들의 Conditioning도 동일하게 수행하였다.

#### 3.3. DPF에 의한 입자상 물질 배출특성 시험

기존에 해외에서 수행되었던 시험들에 대한 실질적인 확인 시험을 통해 PNC의 도입 및 규제 설정과 관련하여 명확한 제시를 하기 위해 다양한 조건에서 DPF를 장착한 경우와 미장착한 경우로 나누어 ECE15+EUDC 모드를 운전해 배출가스 내 PM의 개수를 비교하였다. 시험 조건은 모두 동일하게 구성하였으며 DPF로 인한 배출가스 내 PM의 중량차이와 개수차이를 비교하였다. 또한 DPF를 미장착한 경우 배출가스의 PM 농도가 너무 높기 때문에 이 경우에는 VPR의 1차 희석비를 300 배로 조정하여 전체 농도를 맞춰 진행하였다.

### 4. 실험결과 및 고찰

Fig. 8은 장비의 재현성을 평가하기 위해 서로 다른 두 곳의 시험실에서 시험을 수행한 시험 결과를 나타낸 것이다. THC의 경우 약 0.04 g/km와 약 0.03 g/km, CO의 경우 약 0.04 g/km와 약 0.06 g/km, NOx 약 0.25 g/km와 약 0.24 g/km로 비슷한 경향을 가진 결과 값이 도출되었다. 이를 통해 차량에서 배출된 배기가스의 조성은 두 곳의 시험실과 상관없이 비슷할 것으로 판단된다. 이에 반해 PM의 개수 측정값의 경우에는 약  $8.52 \times 10^{11}$  #/km와 약  $3.74 \times 10^{11}$  #/km로 결과값들의 편차가 비교적 큰 편이었고 각각의 측정결과값도 일정한 값을 얻기 힘들었다. 각 측정결과값의 편차가 큰 것으로 보아 PNC 장비들은 반복성이 부족한 것으로 판단된다.

Fig. 9는 시험 환경에 따른 측정값 변화에 대한 결과의 개연성을 높이기 위해 차량을 교체하여 비교 시험한 결과를 나타낸 것이다. 본 시험에서도 앞선 비교 시험과 같이 동일 차량이지만 시험실 조건 및 환경에 따라 PM개수 측정 결과값이 약  $3.42 \times 10^{11}$  #/km와 약  $9.66 \times 10^{10}$  #/km로 현저하게 차이가 나는 것을 확인할 수 있다.

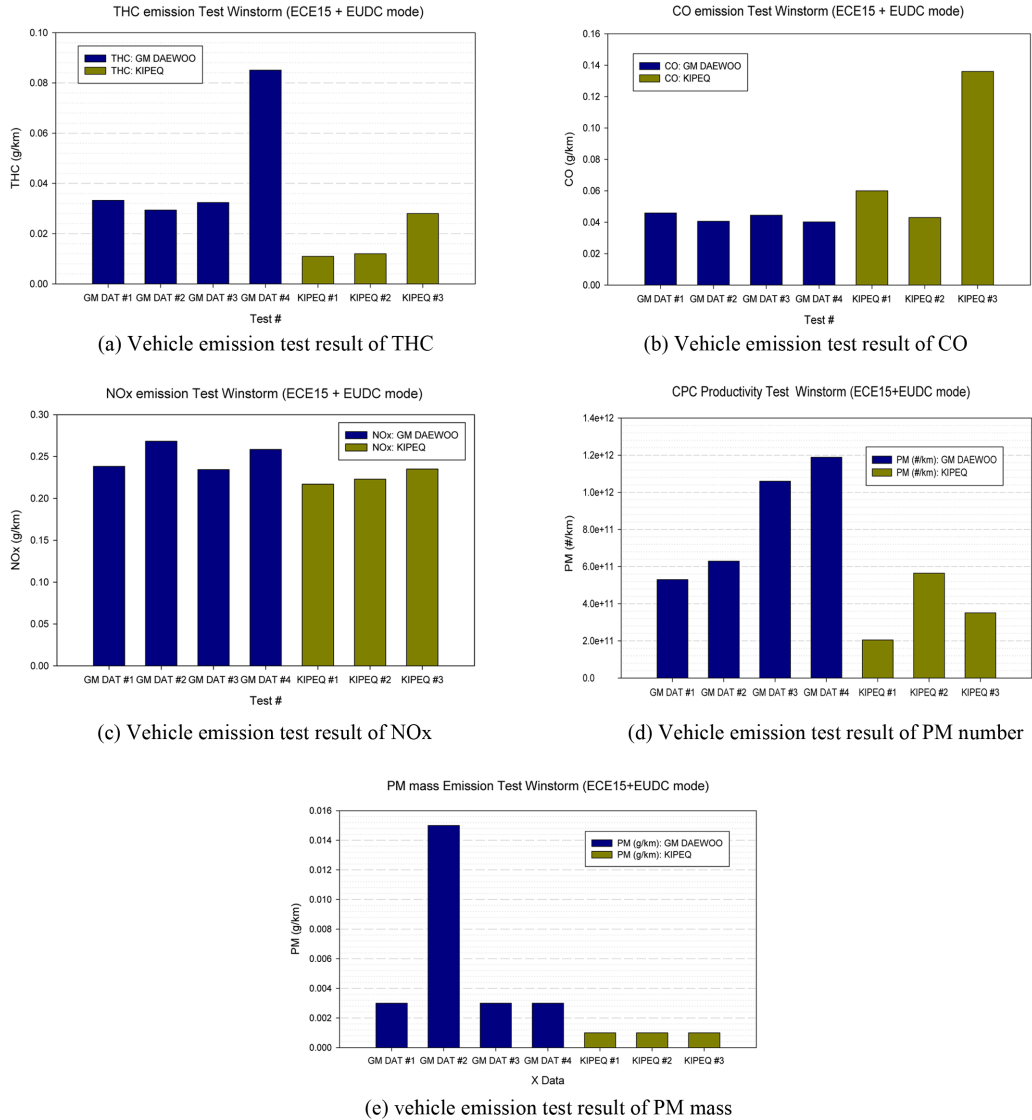


Fig. 8. Results of vehicle emission tests.

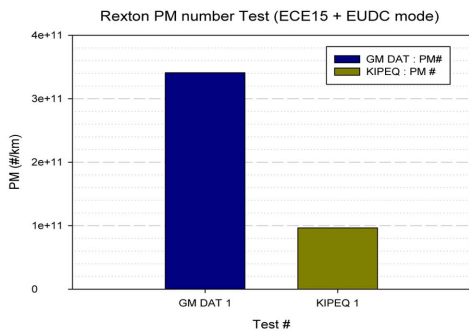


Fig. 9. Comparison of particle number density for different vehicles.

Fig. 10은 동일한 시험 조건에서 기기간의 상관성 시험 결과를 나타낸 것이다. 두 기기 모두 THC 약 0.01 g/km, CO 약 0.05 g/km, NOx 약 0.26 g/km, PM 중량 약 0.002 g/km로 측정되었고, PM 개수는 약  $1.08 \times 10^{12}$  #/km,  $1.00 \times 10^{11}$  #/km로 기존 반복성 시험에서 편차가 컸던 각 시험 간 반복성에 대한 편차가 줄어들 것을 확인할 수 있다. 그리고 동일 시험 공간에서 다른 장비가 사용되었지만 비교적 비슷한 결과값을 보여 주는 것은 기존의 반복성 시험에서 나타난 결과와 비교할 때 반복성 시험에서 시험실 간의 결과값 오차가 크게 나타난 것이 시험실 조건 및 환경이 달랐던 점에서 기인

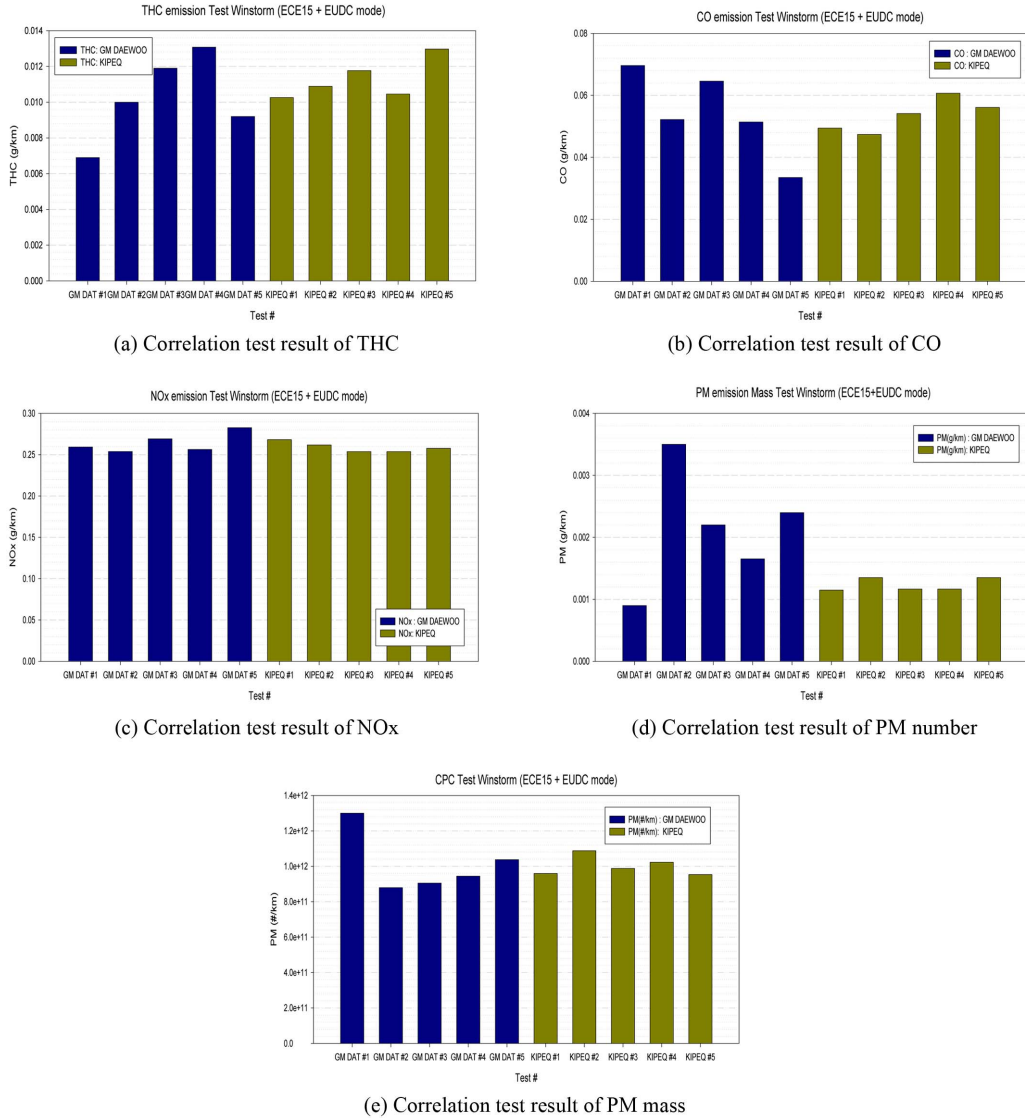


Fig. 10. Comparison of correlation tests between GM and Kpetro.

됨을 미루어 짐작할 수 있다.

Fig. 11에 DPF에 의한 입자상 물질 배출특성 시험 결과를 나타내었다. DPF 장착 여부와 관계없이 THC 약 0.01 g/km, CO 약 0.05 g/km, NOx 약 0.25 g/km 로 비슷한 경향을 보였으나, DPF 장착 여부에 따라 PM 중량은 약 0.003 g/km, 약 0.037 g/km, PM 개수 약  $1.36 \times 10^{12}$  #/km,  $9.60 \times 10^{13}$  #/km로 중량뿐만 아니라 입자의 개수에도 영향을 끼침을 확인할 수 있었다. 또한, 비교적 작은 입자의 개수 비율이 큰 점을 감안할 때, DPF는 작은 크기의 입자도 잘 걸러낼 수 있음을 짐작할 수 있다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 해외 사례를 중심으로 그동안 연구된 자료를 수집하여 국내에서 유사 시험을 수행해 운용상 문제점 및 측정 장비의 교정 및 검정 방법이 필요한 사안을 검증하였고, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 극미세입자의 농도 및 개수는 온도에 민감하며, 이에 대한 오차를 줄이기 위해서는 샘플 연결관 및 측정 장치 내 온도 유지가 중요함을 알 수 있었고, 입자의 크기가 작아질수록 연결관 내부에서 발생할 수 있는 저항으로 인해 입자가 손실될 수 있기 때문에 이에 대한 보

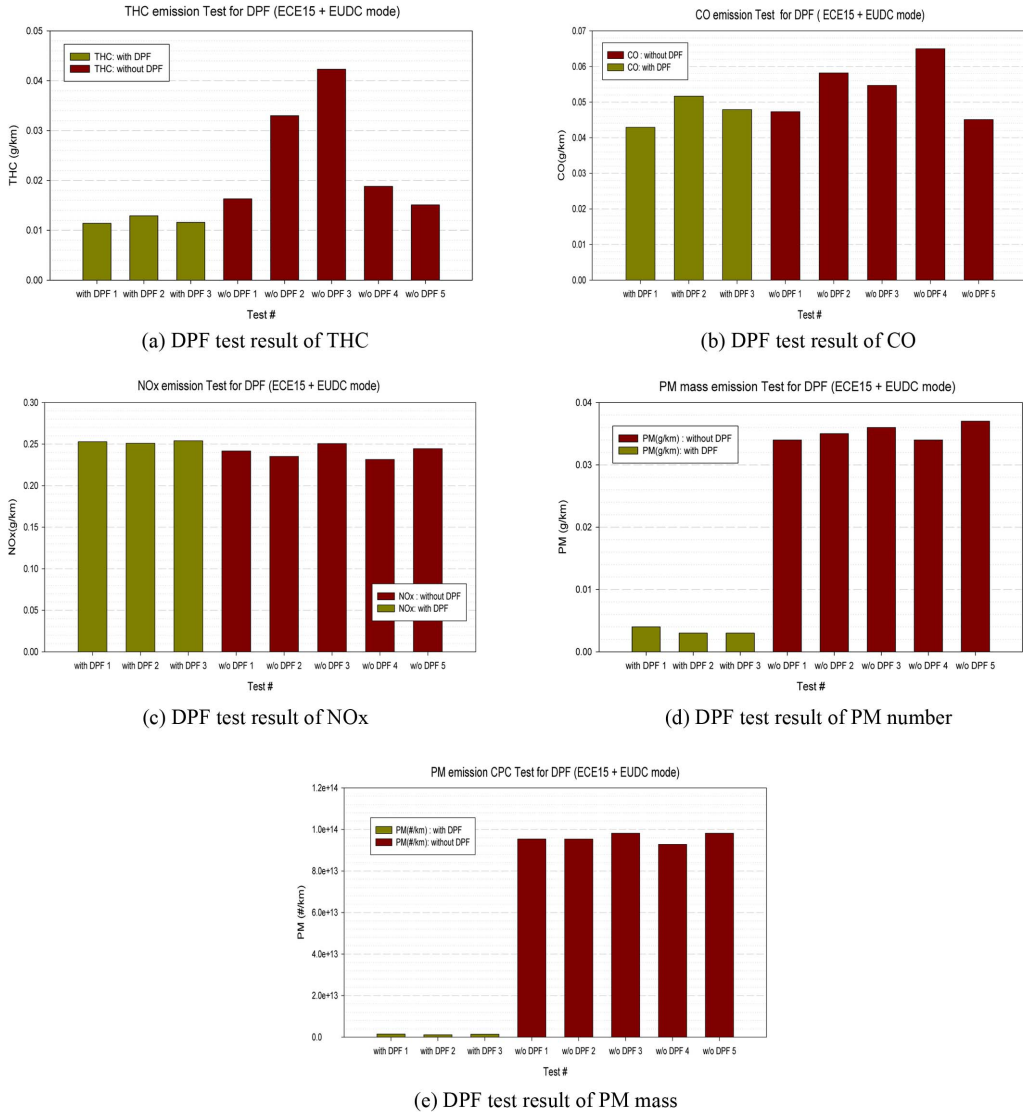


Fig. 11. Comparison of vehicle emission tests with DPF and without DPF.

정 및 장치 운영에 주의를 기울여야함을 알 수 있었다.

2) 재현성을 평가하기 위해 서로 다른 두 곳의 시험실에서 시험한 결과, THC, CO, NOx의 조성은 두 곳의 시험실과 상관없이 서로 비슷함을 알 수 있었으나, PM 중량과 PM 개수 측정결과값의 편차가 큰 것으로 보아 PNC 장비들은 반복성이 부족한 것으로 판단된다.

3) 시험 환경에 따른 측정값 변화의 개연성을 높이기 위해 차량을 교체하여 비교 시험한 결과, 동일차량이지만 시험실 조건 및 환경에 따라 PM 개수 측정 결과값이 약 3.5배 차이 나는 것을 확인할 수 있었다.

4) 기기 간의 상관성은 NOx 약 0.26 g/km, PM 중

량 약 0.002 g/km, PN 약  $1.08 \times 10^{12}$  #/km,  $1.00 \times 10^{11}$  #/km로 비교적 양호하였다. 또한 DPF를 통해 배출되는 입자의 저감효과는 상당하다는 것을 알 수 있었다.

5) 이를 통해 극미세입자 측정 장치의 경우 시험실 환경 및 조건이 측정 결과 값에 미치는 영향이 비교적 크다는 것을 알 수 있었으며, 이를 줄이기 위해서는 시험실 내 환경 조건에 대한 엄격한 제시가 필요하다.

### 참고문헌

1. US EPA, 'Control of Emissions of Air Pollution From

- New Motor Vehicles: In-Use Testing for Heavy-Duty Diesel Engines and Vehicles*", 2005, Federal Register Vol. 70.
2. Commission Regulation(EU) No 582/2011, "*Implementing and amending Regulation (EC) No 595/2009 of the European Parliament and of the Council with respect to emissions from heavy duty vehicles (EURO VI) and amending Annexes I and III to Directive 2007/46/EC of the European Parliament and of the Council*", 2011
  3. California Environmental Protection Agency, "*Health Risk Assessment for Diesel Exhaust*", 1997, Public and scientific review panel draft.
  4. Shipbuilding Report, [http://www.shipbuilding.or.kr/Report/Report\\_2012/LNGFuelSystem201206/LNGFuel-System201206.html](http://www.shipbuilding.or.kr/Report/Report_2012/LNGFuelSystem201206/LNGFuel-System201206.html), 2012, Metal Network Korea
  5. IMO, *Revision of MARPOL Annex VI and the NOx Technical Code*.
  6. Barouch Giechaskiel, Massimo Carriero, Giorgio Martini, Alois Krasenbrink, Joint Research Centre of the European Commission, Transport and Air Quality Unit, Daniel Scheder, Horiba Europe GmbH *Calibration and Validation of Various Commercial Particle Number Measurement Systems*, 2009, SAE International.
  7. *Regulation 83, 4a, Type Test, 6.Emissions test procedure*, Appendix 5, *Particle number emissions measurement equipment*.
  8. Ian Marshall, AEA Energy & Environment, "*Particle Number Counter Calibration Procedures*", 2007, Report to the Department for Transport Restricted Commercial ED47382004/PNC Issue 5.
  9. J. Lee, H. Kim, G. Cho, and Y. Jeong, "*Analysis of Diesel Nano-particle Number Distribution Characteristics for Three Different Particle Measurement Systems*", 2007, Transactions of KSAE, 15(6), 144~150..
  10. TSI Incorporated, *Generating Emery Oil Aerosol for Calibration*, Application Note EM-004.
  11. TSI Incorporated, *Calibration Process of the Volatile Particle Remover for Engine Exhaust Measurements*, Application Note EM-003.
  12. Hans-Georg Horn, Oliver F. Bischof, Axel Zerrath, TSI GmbH, *The Traceable Calibration of Condensation Particle Counters*.
  13. Hans-Georg Horn, New Product Development Particle Instruments, TSI Incorporated, *Vehicle Emissions: Particle Number Measurement*, 2010.
  14. TSI, *Calibration and Validation of Aerosol Instrumentation*, 2008, TSI Seminars.
  15. Schlatter, *Comparison of Grimm and TSI Condensation Particle Counters*, 2006, METAS.