

SMPS와 1단 저압 임팩터를 이용한 대기 중 서브 마이크론 에어로졸 유효 밀도 측정

오재호¹⁾ · 한장섭¹⁾ · 박근영¹⁾ · 황정호^{1)*}

¹⁾연세대학교 기계공학과

(2019년 6월 19일 투고, 2019년 7월 15일 수정, 2019년 9월 26일 게재확정)

Effective density measurement of ambient sub-micron aerosol using SMPS and 1 stage low-pressure impactor

Jaeho Oh · Jangseop Han · Geunyoung Park · Jungho Hwang*

¹⁾*Department of Mechanical Engineering, Yonsei University*

(Received 19 June 2019; Revised 15 July 2019; Accepted 26 Sep 2019)

Abstract

In this study, a serial methodology is presented for estimating the effective density of ambient sub-micron aerosol employing lab-made 1 stage low-pressure impactor of Hyun et al. (2015) and SMPS (Scanning Mobility Particle Sizer) together. The effective density from this methodology (Impactor+SMPS) was compared with another methodology (BAM+SMPS) for estimating the effective density employing BAM (Beta-Attenuation Monitor) and SMPS. As a result, the effective density obtained with impactor+SMPS ranged from 0.42 g/cm³ to 2.36 g/cm³, while the effective density obtained with BAM+SMPS ranged from 1.01 g/cm³ to 1.72 g/cm³. The difference between these results might be caused by the particle loss in the impactor.

Keywords: effective density, impactor, ambient aerosols, corona discharge

* Corresponding author.

Tel : +82-2-2123-2821

E-mail : hwangjh@yonsei.ac.kr

1. 서론

대기 중 에어로졸의 특성은 크게 입경에 따른 수농도, 부피농도, 밀도 등 물리적 특성과 무기성분, 유기성분, 원소성분 등으로 이루어진 화학적 특성을 갖고 있다. 그 중 에어로졸의 밀도는 크기, 형태 및 다공성 등 물리적 특성을 대변할 뿐만 아니라 에어로졸 입자를 구성하고 있는 화학적 성분에 대한 특성도 내포하고 있기 때문에 매우 중요한 척도이다. 에어로졸의 밀도, 형상 및 다공성 등을 독립적으로 측정하는 것은 어렵기 때문에 이러한 변수들의 영향을 종합적으로 고려하여 유효 밀도 (effective density)로 표현한다 (Kelly and McMurry, 1992; Ristimäki et al., 2002). 유효 밀도는 에어로졸의 침강, 확산 등 운동 특성에 직접적인 영향을 미치며 인체 호흡기내에서의 이동에도 영향을 미친다 (Ristimäki et al., 2002). 또한, 유효 밀도는 에어로졸의 입경에 따른 수농도 분포와 질량 농도 분포 사이의 변환에 있어서도 중요한 척도이다. 그러나, 대기 에어로졸의 유효 밀도는 대개 알려진 정보가 없기 때문에 수농도 분포를 통한 질량 농도 측정시 밀도를 모른다면 밀도를 가정해야 하고, 가정된 밀도로 계산된 질량 농도는 오차를 유발하게 된다. Wierzwicka et al. (2014)의 연구에 따르면 폐에 축적된 에어로졸의 질량 측정 시, 입경에 따른 유효 밀도를 사용하는 대신 단위 밀도 (1 g/cm^3)를 사용하게 되면 질량이 132 % 과대평가 될 수 있다고 보고되었다.

따라서, 에어로졸의 유효 밀도를 정확하게 측정하기 위한 많은 방법들이 연구되었다. 전기적 이동도에 의해 입자를 분류해주는 DMA (Differential Mobility Analyzer)와 임팩터를 활용한 유효 밀도의 측정은 여러 연구자들에 의해 수행되었다. Kelly & McMurry (1992)는 DMA와 MOUDI (Micro-Orifice Uniform Deposit Impactor)를 이용하여 황산(H_2SO_4), 염화나트륨(NaCl)의 실험 입자에 대하여 유효 밀도를 산출하였다. Stein et al. (1994)은 MOUDI와 TDMA (Tandem Differential Mobility Analyzer)를 활용하여 대기 에어로졸의 유효밀도를 산출하였다. Hu et al. (2012) 역시 MOUDI와 TDMA를 활용하여 $\text{PM}_{1.8}$ 과 PM_{10} 의 대기 에어로졸에 대해 유효 밀도를 산출하였다. Hyun et al. (2015)은 실험실에서 제작한 1단 Impactor와 SMPS (Scanning Mobility

Particle Sizer)를 이용하여 디젤 엔진의 배출 입자에 대한 유효 밀도를 산출하였다. Ahlvik et al. (1998)은 ELPI (Electrical Low Pressure Impactor)와 DMA를 이용하여 디젤 엔진 배출 입자에 대하여 유효 밀도를 산출하였고, Maricq & Xu (2004) 역시 ELPI와 DMA를 이용하여 자동차 엔진 배출 입자에 대하여 유효 밀도를 산출하였다. 하지만 이러한 방법들은 대기 중 서브마이크론 에어로졸의 유효 밀도 측정에는 적합하지 않다. 대기 에어로졸의 경우 그 수농도가 일반적으로 $10^3 \sim 10^4 \text{ \#/cm}^3$ (Morawska et al., 2001; He et al., 2004; Talbot et al., 2016)으로 낮기 때문에 DMA를 사용해 입경별로 분류할 시 수농도가 더욱 낮아지게 되고 서브 마이크로 입자의 경우 입경의 크기도 작아서 전기적인 측정 방법과의 연계로는 유효 밀도의 측정이 쉽지 않을 수 있다.

본 연구에서는 Hyun et al. (2015)에서 사용된 1단 저압 임팩터와 SMPS, 입자 하전기, 에어로졸 전류계를 활용하여 대기 중 서브마이크론 영역의 에어로졸에 대해 평균 유효 밀도를 산출하였다. 산출된 값은 BAM (Beta Attenuation Monitor)으로 측정된 질량 농도와 SMPS로 측정된 수농도 분포를 이용해 산출한 평균 유효 밀도와 비교하였고, 이를 통해 본 연구에서 제안한 평균 유효 밀도 산출 방법의 유효성에 대해 평가하였다.

2. 1단 저압 Impactor와 SMPS를 이용한 대기 에어로졸의 유효 밀도 산출 방법

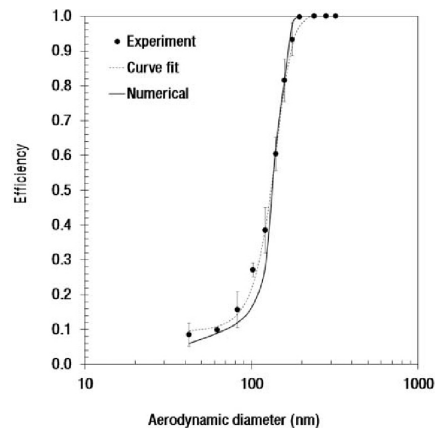


Fig. 1. Experimental and simulated collection efficiencies of the impactor for NaCl particles. (Hyun et al., 2015)

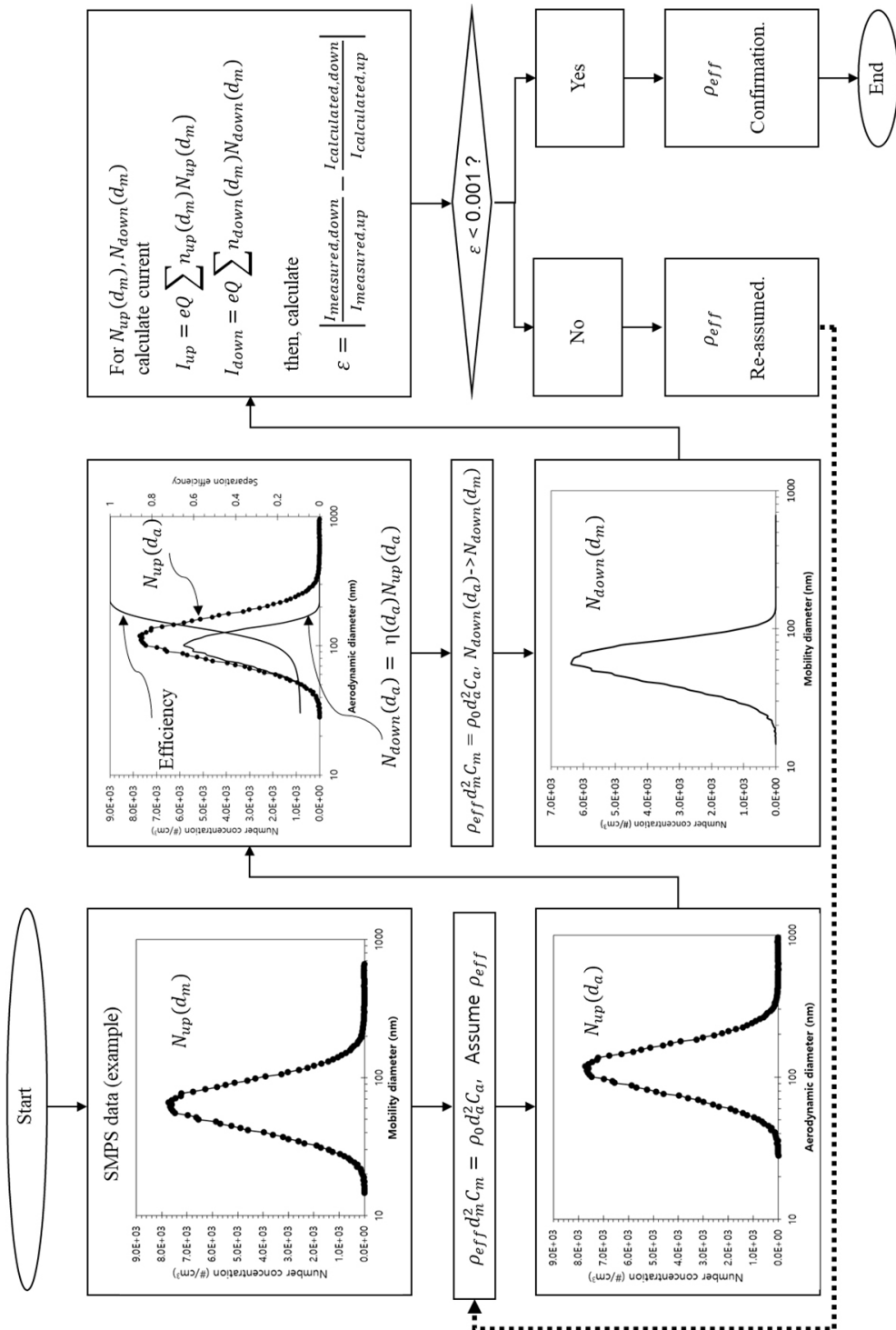


Fig. 2. Flow chart for methodology.

본 연구에서는 SMPS와 Hyun et al. (2015)의 연구에서 사용된 실험실 제작 1단 저압 임팩터를 사용하였다. 1단 저압 임팩터의 효율 곡선을 그림 1에 나타내었다. 이를 이용하여 대기 에어로졸의 유효 밀도를 산출하였으며, 전체적인 산출 과정을 그림 2에 나타내었다. 에어로졸 입자의 직경은 동일한 입자라 하더라도 정의하는 방법에 따라 다른 값을 가지며, 전기장 내에서 하전된 입자의 운동에 의해 정의되는 전기 이동도 직경(electrical mobility diameter)과 입자를 물방울로 가정하였을 때 그 운동에 의해 정의되는 공기역학경(aerodynamic diameter)은 식 (1)과 같은 관계를 가진다(Maricq et al., 2000; Park et al., 2003).

$$\rho_{eff} d_m^2 C_m = \rho_{H_2O} d_a^2 C_a \quad (1)$$

여기서, ρ_{eff} 는 입자의 유효밀도, ρ_{H_2O} 는 물의 밀도 (1 g/cm^3)이다. d_m , d_a 는 각각 전기 이동도 직경과 공기역학경이다. C_m 과 C_a 는 각각 전기 이동도 직경 기반 미끄럼 보정 계수 및 공기역학경 기반 미끄럼 보정 계수이며 식 (2)를 통해 계산된다 (Park et al., 2006).

$$C = 1 + \frac{2\lambda}{d_p} [1.246 + 0.418 \exp(-\frac{0.867d_p}{2\lambda})] \quad (2)$$

여기서, d_p 는 입자의 이동도 직경 또는 공기역학경, λ 는 공기 분자의 평균자유행정(mean free path, 표준 대기압 상태에서 약 68.7 nm)이다.

식 (1)에서 보듯, 해석하고자 하는 에어로졸 입자의 전기 이동도 직경과 공기역학경을 모두 알고 있을 경우 입자의 유효 밀도를 산출해 낼 수 있으며, 본 연구에서는 대기 에어로졸의 유효 밀도를 측정하기 위해 입자의 전기 이동도 직경별 수농도 분포 및 공기역학경별 수농도 분포를 이용하였다.

먼저 SMPS를 이용하여 해석하고자 하는 대기 에어로졸의 전기 이동도 직경별 수농도 분포 ($N_{up}(d_m)$)를 측정 후, 식 (1)을 이용하여 측정된 데이터를 공기역학경별 수농도 분포 ($N_{up}(d_a)$)로 변

환하였다. 이 때 식 (1)의 유효 밀도, ρ_{eff} 는 임의의 값으로 선정하였으며, 1단 저압 임팩터와 입자 하전 장치(particle charger)를 활용한 전류 계측 실험 및 반복 계산(iteration)을 통해 그 값을 보정해 나갔다.

전류 계측 실험은 1단 저압 임팩터의 전단 및 후단에서 입자 하전 장치를 통과하며 하전된 입자의 전류량을 계측하는 실험으로, 이를 위해서는 1단 저압 임팩터 후단에서 입자의 전기 이동도 직경 수농도 분포($N_{down}(d_m)$)를 알아야 한다. 본 연구에서는 위 수농도 분포 산출을 위해 Demokritou et al. (2004)이 제안한 임팩터 포집 효율곡선을 이용하였다 식 (3).

$$\eta(d_a) = \frac{a_1}{1 + \exp[-(\frac{d_a - d_{50}}{b})]} + a_2 \quad (3)$$

여기서, $\eta(d_a)$ 는 공기역학경별 임팩터 포집 효율이고, b 는 포집 효율 곡선의 너비, a_1 , a_2 는 각각 회기분석에 의해 계산된 계수이다. 본 연구에서는 Hyun et al. (2015)의 임팩터 포집 효율 실험 데이터를 이용하여 식 (3)의 계수를 결정하였으며, 그 때 계수 a_1 , a_2 , b , d_{50} 는 각각 0.923, 0.088, 19.2, 137 nm 이었다. 식 (1)에 의해 공기역학경별 수농도 분포로 변환된 1단 저압 임팩터 전단의 데이터와 식 (3)의 공기역학경별 임팩터 포집 효율을 이용하여 1단 저압 임팩터 후단에서 입자의 공기역학경별 수농도 분포($N_{down}(d_a)$)를 식 (4)를 이용하여 산출하였으며, 산출된 공기역학경별 수농도 분포는 식 (1)을 이용해 전기 이동도 직경 수농도 분포로 변환하여 사용하였다.

$$N_{down}(d_a) = \eta(d_a)N_{up}(d_a) \quad (4)$$

1단 저압 임팩터 전단 및 후단에서 와이어-로드(wire to rod) 형상의 입자 하전 장치를 설치하여 에어로졸 입자를 하전시켰다. 입자 하전기의 자세한 형상은 그림 3에 나타내었다. 하전된 입자에 의해 발생되는 전류값을 에어로졸 전류계(aerosol electrometer)를 이용해 측정함과 동시에 이론 수식을 통해 산출하였다. Hinds (1999)에 따르면, 입자 하전 장치에 의해 하전된 입자의 평균 하전수는 아래 식 (5) - (7)

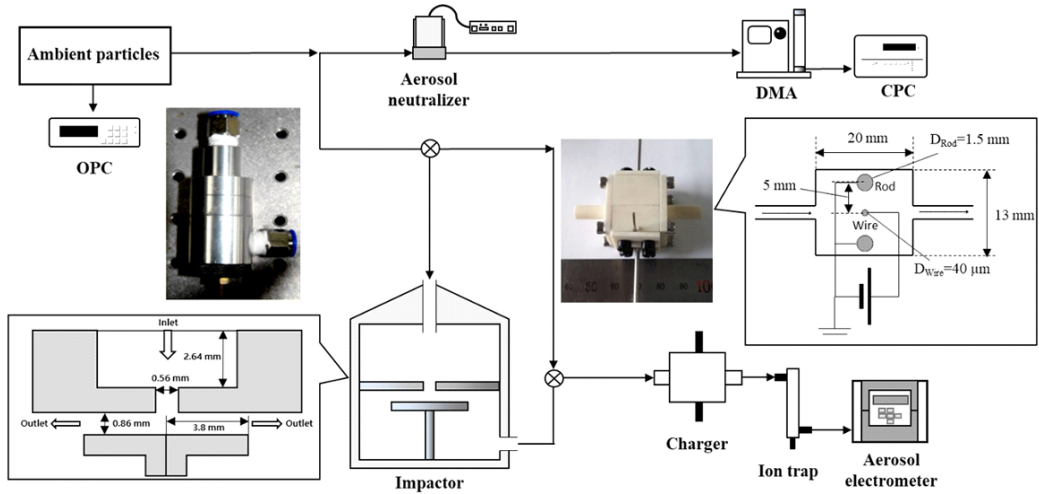


Fig. 3. Experimental schematic with Impactor+SMPS.

을 통해 산출할 수 있다.

$$n(d_m) = n_f(d_m) + n_d(d_m) \quad (5)$$

$$n_f(d_m) = \left(\frac{3\varepsilon_p}{\varepsilon_p + 2} \right) \left(\frac{Ed_m^2}{4K_E e} \right) \left(\frac{\pi K_E e Z_i N_i t}{1 + \pi K_E e Z_i N_i t} \right) \quad (6)$$

$$n_d(d_m) = \frac{d_m k T}{2K_E e^2} \ln \left[1 + \frac{\pi K_E d_m \bar{c}_i e^2 N_i t}{2kT} \right] \quad (7)$$

여기서, n 은 입자의 평균 하전 수, n_f 는 전계 하전(field charging)에 의한 입자 하전 수, n_d 는 확산 하전(diffusion charging)에 의한 입자 하전 수, k 는 볼츠만 상수(1.3806×10^{-23} J/K), T 는 절대 온도 (293.15 K), \bar{c}_i 는 이온의 평균 속도 (240 m/s), ε_p 은 입자의 상대유전율, e 는 기본전하의 전하량 (1.602×10^{-19} C), Z_i 는 이온의 이동도 (1.5×10^4 $m^2/V \cdot s$), π 는 비례상수 (9.0×10^9 m^2/C^2), E 는 입자 하전 장치 내 와이어와 로드 사이에 형성되는 코로나 방전 영역(corona discharge)에서의 전기장의 세기, t 는 입자가 코로나 방전 영역을 지나가는 체류 시간이다. N_i 는 이온 농도로 식 (8)에 의해 구할 수 있다 (Hyun et al., 2018).

$$N_i = \frac{I_{charger}}{e Z_i E A} \quad (8)$$

여기서, $I_{charger}$ 는 입자 하전 장치의 접지 전극으로 흐르는 코로나 전류(corona current), A 는 접지 전극의 표면적이다. 또한 입자의 전기 이동도 직경별 수농도 분포와 식 (5) - (8)을 통해 계산된 전기 이동도 직경별 입자 평균 하전수, 입자 하전 장치 내 유량 (Q)를 이용하면, 하전된 입자의 흐름에 의한 전류값, I 를 식 (9)와 같이 계산할 수 있다 (Hyun et al., 2018).

$$I = e Q \sum n(d_m) N(d_m) \quad (9)$$

전단의 전류값을 측정하는 환경과는 달리 후단에서는 저압 조건이 형성되어 임팩터를 통과한 입자를 하전할 때 하전수가 달라지게 된다. 즉, 식 (5) - (7)에 의한 계산 시 이온의 평균 속도, 이온의 이동도 및 이온의 농도 등이 달라지게 된다. 이를 보정하기 위해서 저압 및 저온 상태에서의 각 변수들의 변화 값을 문헌을 참고하여 전류값 계산을 보정해 주었다 (Hinds, 1999; Liu and Huang, 2017).

한편 Park et al. (2007)은 이론적으로 계산된 입자 하전 장치 전단 및 후단의 전류값 비율과 실험적으로 측정된 입자 하전 장치 전단 및 후단의 전류값 비율의 차이(ε)를 이용하여 서브 마이크론 입자의

수농도 분포를 실시간으로 측정할 수 있는 알고리즘을 제안하였다. 위 연구에서 제시된 알고리즘은 식 (10)과 같이 측정된 전류값($I_{measured}$)과 계산된 전류값($I_{calculated}$)의 차이를 정의 한 후, 반복 계산을 통해 그 오차를 줄여나가는 방법이다.

$$\epsilon = \left| \frac{I_{measured,down}}{I_{measured,up}} - \frac{I_{calculated,down}}{I_{calculated,up}} \right| \quad (10)$$

여기서 아래첨자 *up*, *down*은 각각 입자 하전 장치 전단 및 후단을 의미한다. 본 연구에서는 Park et al. (2007)의 알고리즘을 이용하여 식 (1)에서 임의로 가정하였던 유효밀도를 보정하였다. 먼저 식 (9)를 이용하여 1단 저압 임팩터 전단 및 후단에서 전류값을 이론적으로 산출하였으며, 동일한 조건에서 에어로졸 전류계를 이용하여 실험적으로 전류값을 측정하였다. 식 (10)을 통해 측정값과 이론값의 차이를 정의 한 후, 그 값이 수렴기준값 보다 클 경우 식 (1)의 대기 에어로졸 입자의 유효밀도를 다른 값으로 변경하여 재계산 하였다. 위 과정을 측정값과 이론값의 차이가 수렴기준값 이내가 될 때까지 반복하였으며 본 연구에서는 수렴기준값을 0.001로 하였다.

3. 실험 장치 구성 및 실험 방법

대기 에어로졸 측정 장소는 연세대학교 신촌캠퍼스 공학원 앞 성산로 (차도를 기준으로 도로수직방향으로 약 13 m)였으며, 2019년 1월 25일 10:00 AM 부터 5:00 PM까지 1시간 간격으로 총 8회 진행 하였다.

대기 에어로졸 유효 밀도 측정을 위해 SMPS, 1단 저압 임팩터, 입자 하전 장치, 에어로졸 전류계 (Model 3068B, TSI Inc., USA)가 포함된 실험 장치를 구성하였다 (그림 3). SMPS는 입자 중화기(Soft X-ray charger 4530, HCT, Korea), DMA(Differential Mobility Analyzer, model 3081, TSI Inc., USA) 및 CPC(Condensation Particle Counter, model 3776, TSI Inc., USA)를 이용하여 구성하였다.

실험에 사용된 1단 저압 임팩터는 원통형의 모양이며, 29 mm의 직경(외경 29 mm, 내경 19 mm)을

가지고 있고 높이는 55 mm였다. 임팩터 내부에는 직경 0.56 mm의 원형 노즐 1개가 직경 7.6 mm의 원형 충돌판과 0.86 mm의 이격을 두고 설치되어 있었다. 임팩터의 작동 유량은 2 L/min 이었으며, 이때 노즐 출구에서 유체의 압력 및 온도는 각각 44.2 kPa, 232 K였다.

입자 하전 장치는 세라믹으로 제작하였으며, 내부의 너비 × 높이 × 길이는 10 × 13 × 20 mm³였다. 입자 하전 장치의 코로나 방전극으로는 직경 40 μm의 텅스텐 와이어를 사용하였으며, 접지전극은 스테인리스강 재질의 직경 1.5 mm의 로드를 사용하였다. 텅스텐 와이어는 입자 하전 장치의 중앙에 위치하였으며, 방전극과 접지전극 사이의 이격거리는 3 mm였다. 입자 하전 장치의 코로나 방전 특성을 확인을 위해 인가전압에 따른 코로나 전류값의 변화를 살펴보았다 (그림 4). 코로나 개시 전압(corona starting voltage)은 2.7 kV이었으며, 본 연구에서는 입자 하전 장치의 전압-전류 특성 결과를 토대로 인가 전압을 코로나 방전의 발생 구간 내인 4.5 kV로 고정하여 사용하였다.

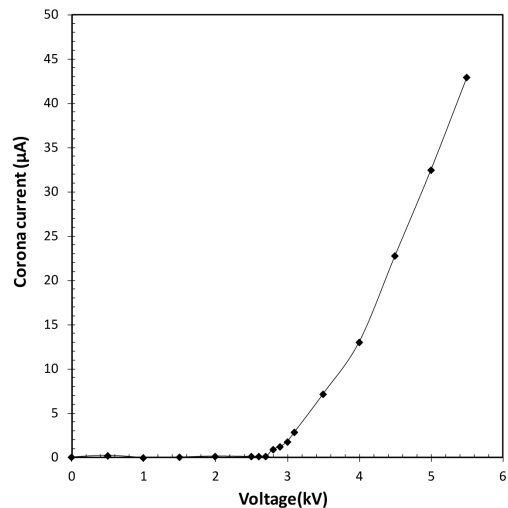


Fig. 4. V-I curve of corona discharger.

실험은 아래 두 가지 경우로 나뉘어 수행되었다. 먼저 SMPS의 입자 유입부를 대기 중에 노출 시켜 대기 에어로졸의 전기 이동도 직경 기준 수농도 분포를 측정 하였으며, 이와 동시에 벨브를 이용하여

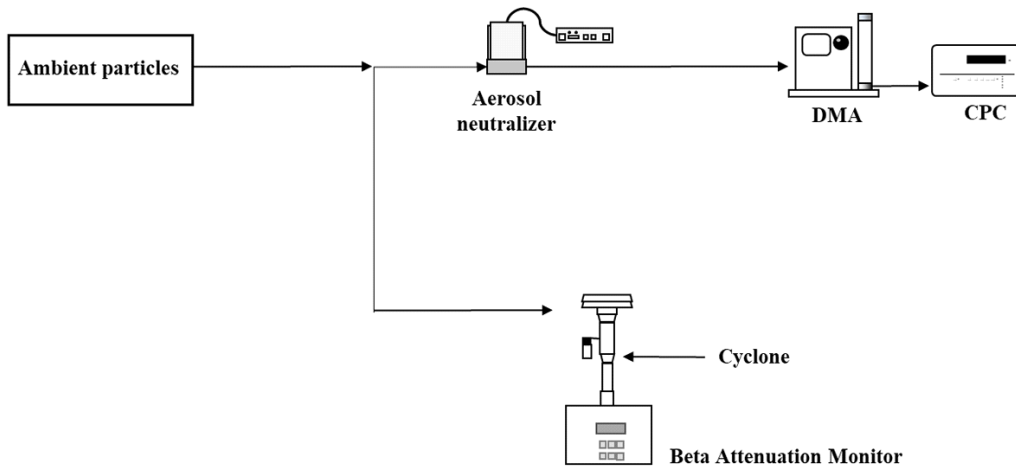


Fig. 5. Experiment schematic with BAM+SMPS.

임팩터를 거치지 않은 전단과 임팩터를 거친 후단의 대기 에어로졸을 입자 하전 장치를 이용하여 하전 시켰다. 하전 된 대기 에어로졸은 입자에 미 부착된 이온들에 의해 발생할 수 있는 전류값 측정 오류를 방지하기 위한 이온 트랩(ion trap)을 거치게 된다. 이온 트랩을 거친 하전 된 대기 에어로졸 입자의 전류를 에어로졸 전류계를 사용하여 전단과 후단 각각 계측을 하였다.

한편, 265 nm 에서 34 μm 입경 내 에어로졸의 수 농도를 측정할 수 있는 OPC (Optical Particle Counter, model 1.109, GRIMM, Germany)를 설치하여 SMPS 측정 병행하였으며, 이를 통해 마이크론 영역의 입자가 실험 결과에 미치는 영향을 판단하였다.

OPC로 측정되는 입경은 광학식 측정을 기반으로 하며, 이 입경은 등가체적직경과 동일하다 (Peters et al., 2006). 이 입경과 공기역학직경 사이의 관계식은 아래 식 (11)과 같다 (Chien et al., 2016).

$$d_{ae} = -0.0045d_o^2 + 1.0603d_o + 0.4513 \quad (11)$$

여기서, d_o 는 광학적직경(optical diameter)이며, 광학식 측정을 기반으로 정의된 직경이다.

본 연구에서 제안한 1단 저압 임팩터 및 SMPS로 구성된 대기 에어로졸 입자 유효밀도 산출 방법

(Impactor + SMPS)의 결과 검증을 위해, SMPS와 BAM (model BAM 1020, Met one Instruments, USA)을 이용하여 대기 에어로졸 입자의 유효밀도를 산출하고(BAM + SMPS), 그 결과를 Impactor + SMPS에 의해 도출된 결과와 비교 평가하였다. BAM은 베타선 흡수법을 이용하여 대기 내 에어로졸 입자의 질량 농도를 측정하는 상용 장비로, 본 연구에서는 서브 마이크론 입자의 질량 농도를 측정하기 위해 BAM의 입자 유입부에 분리 입경이 1 μm인 사이클론(model URG-2000-30ENG-1-A, URG Corp., USA)를 설치하여 사용하였다 (그림 5). BAM + SMPS을 이용한 대기 에어로졸 입자 유효밀도는 다음의 식 (12)과 같이 BAM에 의해 측정된 질량 농도와 SMPS에 측정된 부피 농도의 비율로 정의할 수 있다.

$$\rho_{eff}(g/cm^3) = \frac{Mass\ concentration(\mu g/m^3)}{Volume\ concentration(\mu m^3/m^3)} \times 10^{-6} \quad (12)$$

또한 BAM의 질량농도 데이터는 매 1시간마다 산출되므로, 측정 시간 변화에 따른 오차를 최소화 하기 위해 Impactor + SMPS의 유효밀도 산출도 매 1시간마다 실시하였다.

4. 결과 및 토의

본 연구에서 제안한 방법을 이용해 산출된 대기 에어로졸의 유효 밀도와 BAM + SMPS를 이용해 산출된 유효 밀도를 표 1에 나타내었다. 8시간의 측정 결과 1단 저압 임팩터 + SMPS를 이용해 산출한 유효 밀도의 평균값은 1.42 g/cm³ 였으며 가장 낮은 경우는 0.42 g/cm³, 가장 높은 경우는 2.36 g/cm³ 으로 산출되었다. BAM + SMPS를 이용해 산출한 유효 밀도의 경우 평균값은 1.20 g/cm³ 였으며 가장 낮은 경우는 1.01 g/cm³, 가장 높은 경우는 1.72 g/cm³ 으로 산출되었다.

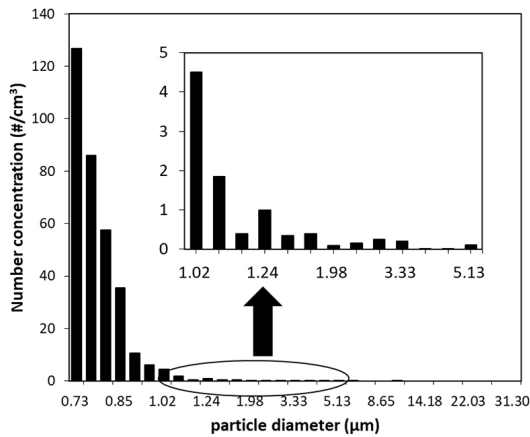


Fig. 6. OPC data from measurement location.

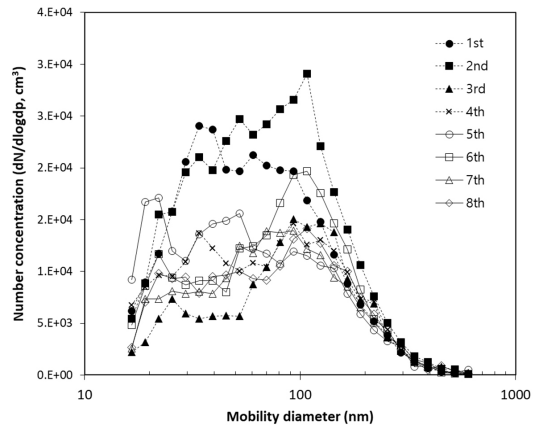


Fig. 7. SMPS data from measurement location.

그림 6은 OPC를 이용한 측정 장소의 대기입자 중 마이크로 영역대의 입자분포를 보여주며 1 - 5 μm 입경의 부분을 확대하여 나타내었다. OPC는 광학식 측정 기반의 입경을 표시하므로 이를 식 11을 이용하여 공기역학적 기반의 분포로 바꾸어 나타내었다. 이를 통해 측정 장소에서는 마이크로 영역대의 입자의 농도가 매우 작음을 확인할 수 있으며 1 μm의 분리 입경을 가진 BAM과는 달리 예비 차단 스테이지(Pre-cut stage)가 없는 1단 저압 임팩터에서 마이크로 영역대의 입자 유입으로 인한 오차는 매우 작을 것으로 예상하였다. 이를 확인하기 위해 OPC의 입자 분포 데이터의 이론적 전류값과 SMPS

Table 1. Comparison of the effective density measured by the two methods.

Number of measurement(Time)	Impactor + SMPS method effective density (g/cm ³)	BAM + SMPS method effective density (g/cm ³)
1 (AM 10)	1.38	1.72
2 (AM 11)	1.2	1.21
3 (PM 12)	1.65	1.03
4 (PM 01)	1.35	1.04
5 (PM 02)	2.36	1.07
6 (PM 03)	1.17	1.01
7 (PM 04)	1.87	1.25
8 (PM 05)	0.42	1.29

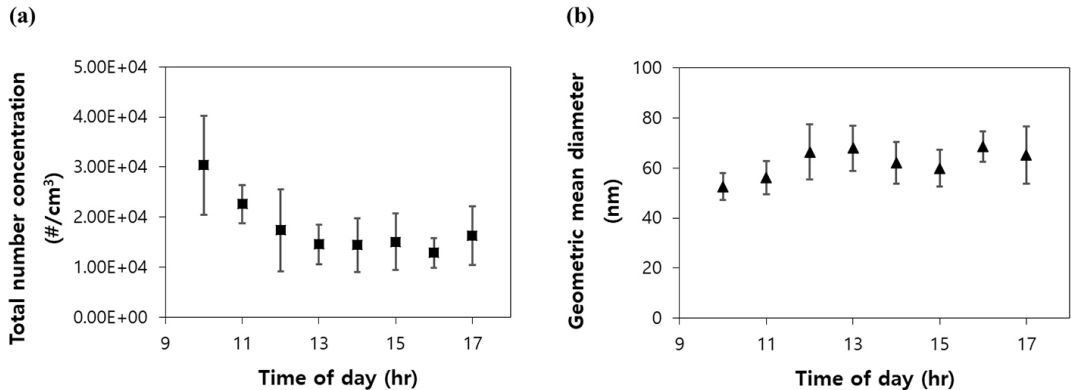


Fig. 8. Variation of (a) Total number concentration and (b) Geometric mean diameter measured from SMPS.

의 입자 분포 데이터를 통한 이론적 전류값의 비율을 계산 해본 결과 0.6 - 4.5% 로 마이크론 영역대의 입자는 이론적 전류값에 크게 영향을 미치지 않음을 확인하였다.

SMPS로 측정된 시간에 따른 입경 분포를 그림 7에 나타내었다. SMPS 데이터를 통해 출근 시간대 부근인 10시와 11시에 전체 수농도가 다른 시간에 비해 크게 나타남을 확인할 수 있었다. 그 이유로는 측정 장소 앞 대로인 성산로에서 출근시간대에 증가한 차량으로부터 나온 배출물 때문인 것으로 생각된다. 그림 8에 SMPS로 측정된 전체 수농도와 기하평균입경 (GMD, Geometric Mean Diameter)의 변화를 함께 나타내었다. 각 데이터에서 1시간 동안의 표준편차값을 오차막대를 통하여 나타내었다. 이 데이터를 통해 전체 수농도와 기하평균입경은 반비례의 상관관계가 있음을 알 수 있었다. 그림 9에는 기하평균입경과 BAM + SMPS로 산출된 유효 밀도 값을 함께 나타내었다. SMPS 데이터의 입자 분포는 이중 모드(bi-modal)로 나타나는데 첫번째 모드의 입자 농도가 높아 GMD가 작을 경우 유효 밀도가 높아지고 두번째 모드의 입자 농도가 높아 GMD가 클 경우 유효 밀도가 낮아지는 상관 관계를 찾아볼 수 있었다. Quiros et al. (2015)의 연구에서는 자동차 배출물의 입경별 유효밀도를 측정하였다. 이 연구에서 자동차 배출물의 입자분포는 이중모드로 나타났으며, 입경이 증가할수록 유효밀도가 작아지는 상관관계를 통해 본 연구의 실험결과와 유사한 결과를 보

였다. 자동차 배출물은 주로 응집체 형태이고 마찬가지로 대기 에어로졸의 경우 일반적으로 응집체의 형태를 갖게 되는데 작은 입자들의 경우 1차 입자 (Primary particle)들의 수가 적고 조밀해 입자의 다공성이 작은 반면에 큰 입자들의 경우 1차 입자들의 수가 많아 상대적으로 다공성이 크게 나타나고 그에 따라 유효 밀도가 작아지는 경향을 나타낸다. 자동차 배출물을 대상으로 유효밀도를 측정된 다른 연구진의 결과를 보면 입경이 작아질수록 유효밀도가 커지는 경향을 보였다 (Park et al., 2003; Rissler et al., 2013). 본 연구에서도 자동차 배출물이 주요 입자 발생원인 측정 장소의 환경을 고려했을 때 결과 값이 타당하다고 판단된다.

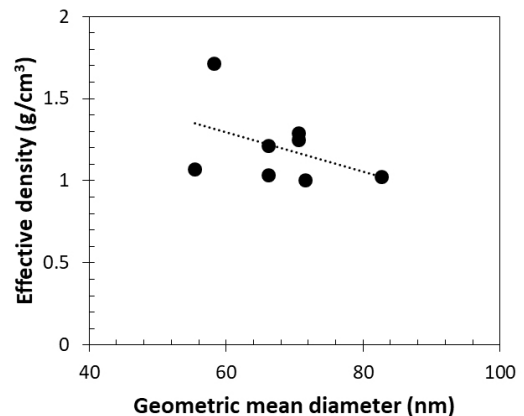


Fig. 9. Comparison of GMD and Effective density (BAM+SMPS).

Impactor + SMPS로 산출된 유효 밀도와 BAM + SMPS로 산출된 유효 밀도를 살펴보면 두 유효 밀도 데이터 간에 큰 상관관계는 나타나지 않았지만 전체적으로 Impactor + SMPS로 산출된 유효 밀도 값들이 BAM + SMPS로 산출된 유효 밀도 값들에 비하여 높게 나타났다. 이러한 원인으로는 임팩터 내부의 입자 손실을 생각할 수 있다. 식 (10)을 살펴보면 측정 전류값의 비와 이론적으로 계산한 전류값의 비가 최소가 되는 밀도를 맞춰가는 방식인데 측정 전류값 자체에서 문제가 생기면 이러한 과정에서 오차가 생길 수 있다. 임팩터 전단의 측정 전류값은 대기에 분포하는 입자들을 손실없이 하전시켜 전류를 측정하는 값이고, 임팩터 후단의 측정 전류값은 임팩터를 지나고 나온 입자들을 하전시켜 측정하는 값이다. 이때 임팩터를 지나고 가는 과정에서 입자 손실(Particle loss)이 생기면 후단의 측정 전류값이 낮아지게 되고 전단과 후단의 측정 전류값의 비가 더욱 작아지게 된다. 이로 인해 결과적으로 밀도가 더욱 높게 산출되었다고 생각된다. 따라서 향후 연구에서는 임팩터 내부의 입자 손실로 인한 측정값의 영향을 줄이기 위해 임팩터 내부의 입자 손실에 대해 평가를 진행할 예정이며 이를 방법론에 반영하여 유효 밀도를 더욱 정확히 산출할 예정이다.

또한, OPC의 데이터로부터 마이크로 입자가 유효 밀도 산출에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단이 되지만 순간적인 환경 변화로 인해 마이크로 입자의 농도가 높아지고 이로 인해 측정 전류값에 영향을 끼칠 가능성이 있다고 생각된다. 따라서 향후 연구에서는 1 μm 를 분리 입경으로 가지고 있는 예비 차단 스테이지를 설치하여 마이크로 영역대의 입자 유입을 최소화 할 예정이다.

5. 결론

본 연구에서는 1단 저압 임팩터와 SMPS를 이용해 대기 에어로졸의 유효 밀도를 산출하는 방법론에 대해 소개하고 실제 도로변 근처에서 대기 에어로졸의 유효 밀도를 산출해 보았다. 산출된 결과의 유효성에 대해 평가하기 위해 상용 에어로졸 측정 장비인 BAM과 SMPS를 이용해 유효 밀도를 함께 산출하고 그 결과에 대해 비교 평가하였다. 1단 저

압 임팩터와 SMPS를 이용해 산출된 유효 밀도의 경우 상용 장비로 산출된 유효 밀도에 비해 다소 높게 측정되는 경향을 보였다. 이러한 원인으로는 임팩터 내부에서의 입자 손실로 후단에서의 전류 측정시 이론값과 오차가 생겼을 것으로 생각된다. 이러한 입자 손실에 따른 영향을 분석하여 유효 밀도 산출 과정에 반영한다면 상용 장비로 산출한 유효 밀도 값과 좀 더 근사한 값을 얻을 것으로 생각된다. 또한 일부 측정 시간에서는 BAM과 SMPS를 이용해 산출한 유효 밀도 값과 상이한 결과를 얻었는데 이것은 임팩터와 SMPS를 이용한 유효 밀도 산출 과정과 상용 장비를 이용한 유효 밀도 산출 과정의 측정 시간이 다르고 이로 인한 차이로 생각된다. BAM과 SMPS를 이용하는 경우 1시간 동안의 평균 유효 밀도를 산출하게 되는데 그에 비해 임팩터와 SMPS의 경우 상대적으로 짧은 시간 동안 측정을 하고 유효 밀도 값을 산출하게 된다. 따라서 이러한 측정 시간 차이에 의해 생기는 오차를 반영하여 더욱 면밀한 비교 평가가 수행되어야 할 것으로 생각된다.

감사의 글

본 연구는 지하철 미세먼지 저감 기술개발 사업의 “인공지능 기반 지하철 이용객의 (초)미세먼지 노출 저감기술 개발” 과제의 지원으로 수행되었으며, 지원에 감사드립니다.

References

- Ahlvik, P., Ntziachristos, L., Keskinen, J., and Virtanen, A. (1998). Real time measurements of diesel particle size distribution with an electrical low pressure impactor, SAE transactions, 107, 95-113.
- Chien, C.H., Theodore, A., Wu, C.Y., Hsu, Y.M., and Birky, B. (2016). Upon correlating diameters measured by optical particle counters and aerodynamic particle sizers, Journal of Aerosol Science, 101, 77-85.

- Demokritou, P., Lee, S. J., and Koutrakis, P. (2004). Development and evaluation of a high loading PM_{2.5} speciation sampler, *Aerosol Science & Technology*, 38(2), 111-119.
- He, C., Morawska, L., Hitchins, J., and Gilbert, D. (2004). Contribution from indoor sources to particle number and mass concentrations in residential houses, *Atmospheric Environment*, 38(21), 3405-3415.
- Hinds, W.C. (1999). *Aerosol technology: properties, behavior, and measurement of airborne particles*, 2nd Ed., New York, John Wiley & Sons, pp. 323-327.
- Hu, M., Peng, J., Sun, K., Yue, D., Guo, S., Wiedensohler, A., and Wu, Z. (2012). Estimation of size-resolved ambient particle density based on the measurement of aerosol number, mass, and chemical size distributions in the winter in Beijing, *Environmental Science & Technology*, 46(18), 9941-9947.
- Hyun, J., Nasr, A. M., Choi, N. K., Park, D., and Hwang, J. (2015). Design and Performance Test of a Lab-Made Single-Stage Low-Pressure Impactor for Morphology Analysis of Diesel Exhaust Particles, *Aerosol Science & Technology*, 49(10), 895-901.
- Hyun, J., Han, J., Lee, S. G., and Hwang, J. (2018). Design and performance evaluation of a PN1 sensor for real-time measurement of indoor aerosol size distribution, *Aerosol and Air Quality Research*, 18(2), 285-300.
- Kelly, W.P., and McMurry, P.H. (1992). Measurement of particle density by inertial classification of differential mobility analyzer-generated monodisperse aerosols, *Aerosol Science & Technology*, 17(3), 199-212.
- Liu, Y.P., and Huang, S.L. (2017). Experimental Investigation of Ion Mobility Measurements in Oxygen under Different Gas Pressures, *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 12(2), 852-857.
- Maricq, M.M., Podsiadlik, D.H., and Chase, R.E. (2000). Size distributions of motor vehicle exhaust PM: a comparison between ELPI and SMPS measurements, *Aerosol Science & Technology*, 33(3), 239-260.
- Maricq, M.M., and Xu, N. (2004). The effective density and fractal dimension of soot particles from pre-mixed flames and motor vehicle exhaust, *Journal of Aerosol Science*, 35(10), 1251-1274.
- Morawska, L., Hofmann, W., Hitchins-Loveday, J., Swanson, C., and Mengersen, K. (2005). Experimental study of the deposition of combustion aerosols in the human respiratory tract, *Journal of Aerosol Science*, 36(8), 939-957.
- Park, K., Cao, F., Kittelson, D.B., and McMurry, P.H. (2003). Relationship between particle mass and mobility for diesel exhaust particles, *Environmental Science & Technology*, 37(3), 577-583.
- Park, D., Kim, S., An, M., Park, G.T., and Hwang, J. (2006). Real-time measurement and data inversion of size distribution of diesel exhaust particles using a portable 4-stage electrical low pressure impactor (P-ELI), *Particle and Aerosol Research*, 2(2), 83-92.
- Park, D., Kim, S., An, M., and Hwang, J. (2007). Real-time measurement of submicron aerosol particles having a log-normal size distribution by simultaneously using unipolar diffusion charger and unipolar field charger, *Journal of Aerosol Science*, 38(12), 1240-1245.
- Peters, T.M., Ott, D., and O'shaughnessy, P.T. (2006). Comparison of the Grimm 1.108 and 1.109 portable aerosol spectrometer to the TSI 3321 aerodynamic particle sizer for dry particles, *The Annals of Occupational Hygiene*, 50(8), 843-850.
- Quiros, D.C., Hu, S., Hu, S., Lee, E.S., Sardar, S., Wang, X., Olfert, J.S., Jung, H.S., Zhu, Y., and Huai, T. (2015). Particle effective density and mass during steady-state operation of GDI, PFI, and diesel passenger cars, *Journal of Aerosol Science*, 83, 39-54.
- Rissler, J., Messing, M.E., Malik, A.I., Nilsson, P.T., Nordin, E.Z., Bohgard, M., Sanati M., and

- Pagels, J.H. (2013). Effective density characterization of soot agglomerates from various sources and comparison to aggregation theory, *Aerosol Science & Technology*, 47(7), 792-805.
- Ristimäki, J., Virtanen, A., Marjamäki, M., Rostedt, A., and Keskinen, J. (2002). On-line measurement of size distribution and effective density of sub-micron aerosol particles, *Journal of Aerosol Science*, 33(11), 1541-1557.
- Stein, S.W., Turpin, B.J., Cai, X., Huang, P.F., and McMurry, P.H. (1994). Measurements of relative humidity-dependent bounce and density for atmospheric particles using the DMA-impactor technique, *Atmospheric Environment*, 28(10), 1739-1746.
- Talbot, N., Kubelova, L., Makes, O., Cusack, M., Ondracek, J., Vodička, P., Schwarz, J., and Zdimal, V. (2016). Outdoor and indoor aerosol size, number, mass and compositional dynamics at an urban background site during warm season, *Atmospheric Environment*, 131, 171-184.
- Wierzbicka, A., Nilsson, P.T., Rissler, J., Sallsten, G., Xu, Y., Pagels, J.H., Albin, M., Österberg, K., Strandberg, B., Eriksson, A., Bohgard, M., Bergemalm-Rynell, K., and Gudmundsson, A. (2014). Detailed diesel exhaust characteristics including particle surface area and lung deposited dose for better understanding of health effects in human chamber exposure studies, *Atmospheric Environment*, 86, 212-219.