

비산먼지 측정 정확도 개선을 위한 시뮬레이션 초음파 다중 산란 알고리즘 검증

우옥용¹, 최하진^{2*}

Evaluation of Ultrasonic Multiple Scattering Method to Improve the Accuracy of Fine Dust Measurement

Ukyong Woo¹, Hajin Choi^{2*}

Abstract: An ultrasonic multiple scattering simulation using cross-section of fine dust particles were proposed. These days, along with awareness of air pollution, social interest in fine dust is increasing. In the construction field, awareness of fine dust is increasing, and research on preparing various countermeasures is underway. The light scattering method fine dust meter currently in use is affected by environmental factors such as relative humidity, and reliability problems in terms of accuracy are continuously reported. However, the transmission of ultrasonic waves can directly reflect the physical change of the medium based on the mechanical wave. Using these advantages of ultrasonic waves, fine dust measurement simulation was performed using the scattering cross section and ultrasonic multiple scattering theory. The shape data of the fine dust particles were collected using a SEM (Scanning Electron Microscope), and a cross-section according to the fine dust particles was derived through numerical analysis. As a result of signal processing, the error for the number density corresponding to each cross-section is minimum 19, maximum 3455.

Keywords: fine dust, particulate matter, structural maintenance, ultrasonic, scattering, multiple scattering, sensing, numerical simulation, cross-section

1. 서 론

최근 대기 오염에 대한 인식과 함께 미세먼지에 대한 사회적 관심이 높아지고 있으며, 미세먼지로 인해 실외 활동까지 제한하고 있다. 국제 암연구소(IARC; International Agency for Research on Cancer)는 미세먼지를 1군 발암 물질에 포함했으며, 우리나라 환경부 또한 미세먼지를 대기오염물질로 지정하고 규제하고 있다.(IARC, 2013) 세계보건기구에 따르면 2012년 대기오염으로 인한 사망은 연 700만 명에 이르고 있으며, 2013년 OECD 통계에 따르면 대한민국 인구 당 초미세먼지의 노출은 평균 $30.1\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 OECD 회원국 중에서 1위를 차지하고 있다.(WHO, 2014) 이러한 미세먼지는 만성 폐질환, 호흡기 질환을 유발하고 폐암의 원인이 되어 직접적으로 인체에 유해한 영향을 미친다. 이에 정부에서는 ‘미세먼지 저감 및 관리에 관한 특별법’을 시행하는 등 대책을 마련했다. (Kim and Kang, 2018; Park et al., 2015; Jeon et al., 2018)

건설 분야에서도 미세먼지에 대한 인식이 높아지고 있으며, 다양한 대책 마련 연구가 수행중이다(Kim, 2019; Hyun and Kim, 2019). 수도권 경우 미세먼지 발생량 중 비산먼지가 차지하는 비중이 71.1%인 것으로 조사되며, 비산먼지 발생량 중 건설공사에서의 발생량은 30% 이상을 차지하고 있다(국립환경과학원, 2015; Baek, 2019). 2017년 고용노동부에 따르면 업무상질병 중 진폐증으로 판정된 건설 노동자들은 2014년 전체 노동자의 3.85%에서 2015년 10.71%로 증가했다.

이에 건설현장과 도로에서의 비산먼지 저감에 대한 연구가 진행 중에 있다. Lee and Kim (2017)은 도로에서 발생하는 미세먼지를 저감하기 위해 정전 필터를 채용한 패널을 제작했으며, 입경 $2.57\mu\text{m}$ 이상의 입경에 한하여 91.3%의 효율을 나타내어 PM10을 주요 제거 대상으로 지정했다. Kim et al. (2019)은 도심의 미세먼지 저감을 위해 광촉매를 적용한 기능성 건설 소재를 개발했다. 이러한 광촉매는 태양광 조건에서 미세먼지 생성 전구물질인 질소산화물, 황산화물 및 휘발성 유기화합물을 산화 및 분해하여 효과적으로 2차 생성 미세먼지를 저감시킬 수 있다.

이와 같이 구조물 유지관리에서의 정확한 미세먼지 농도 측정은 필수적이다. 현재 사용되는 미세먼지 측정기의 기법은 중량법, 베타선법, 광산란법으로 구분할 수 있다. 이 중 중

¹정회원, 숭실대학교, 석사과정

²정회원, 숭실대학교, 건축학부 조교수

*Corresponding author: hjchoi@ssu.ac.kr

606 Hyungnam Engineering, Soongsil University, 369 Sand-doro, Sangdo-dong, Dongjak-gu, Seoul

•본 논문에 대한 토의를 2021년 1월 31일까지 학회로 보내주시면 2021년 2월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

량법과 베타선법은 기상청에서 사용하는 방식으로 정확도는 높으나 미세먼지 포집 시간이 24시간이 필요해 실시간 농도 측정이 어렵다는 한계점을 가지고 있다. 광산란법은 미세먼지에 의해 산란되는 광원을 통해 농도를 측정하고 중량법과 베타선법에 비해 가격이 저렴하고, 빠른 데이터 제공이 가능하다. 이러한 광산란법은 구조물 유지관리 및 건설현장에 사용되고 있으나 정확도 개선에 대한 필요성이 제시되고 있다.

광산란법은 전자기과의 파동 전달에 직접적으로 영향을 미치는 유전체 유전율 및 상대 유전율이 상대 습도에 민감한 구조를 가지고 있다는 점과, 가정을 통한 계수의 적용으로 인해 정확도 측면에서 신뢰도 문제가 지속적으로 보고되고 있다 (Lee et al., 2018; Lee and Park, 2019). 이에 따라 계측의 신뢰성 확보를 위한 연구가 다음과 같이 진행 중에 있다. Kim et al. (2010)은 선형 및 비선형회귀분석을 통해 광산란법과 베타선법 흡수법과 광산란법의 상관계수가 더 높은 값을 보였다. 이는 광산란법에서의 보정계수를 중량에 따라 변화시킨다면 보다 정확한 보정이 가능함을 보여준다. Kim et al. (2014)은 광산란법과 베타선법 및 중량법 측정결과를 기준으로 측정값을 보정했으며, 계절과 장소에 따라 미세먼지의 밀도에 차이가 있음을 고려할 때 광산란법은 중량법을 기준으로 보완할 필요가 있음을 알 수 있다. Lee and Oh (2020)는 광산란법으로부터 측정된 미세먼지 농도와 상대습도와의 상관관계를 조사했으며, 50.8~74.5%의 상대습도 구간에서는 미세먼지와 상대습도의 상관성이 높기 때문에 측정된 미세먼지 농도는 습도에 따른 보정이 필요함을 알 수 있다. 이와 같이 광산란법의 측정 오차를 줄이기 위한 많은 연구들이 수행 중에 있다. 반면에 초음파의 전달은 기계적 파동에 근거하여 밀도, 음향임피던스와 같은 물리적 성질에 영향을 받기 때문에 매질의 물리적 변화에 직접적인 관계식으로 기술된다. 따라서 초음파 전달에 매질의 물리적 변화를 직접적으로 반영할 수 있다.

본 연구에서는 표준입자에 대한 SEM(Scanning Electron Microscope) 이미지를 이용한 실험적 검증을 통해 산란자의 크기 및 배치와 산란반경을 도출했다. 이를 초음파 다중산란 이론이 적용된 시뮬레이션 공간에 모델링했다. 이에 시뮬레이션 결과를 기반으로 초음파 다중산란 이론을 적용한 미세먼지 측정 시뮬레이션의 정확성을 검증하고자 한다.

2. 미세먼지 질량농도 측정법

2.1 미세먼지 측정 알고리즘 분석

먼지는 입자의 크기에 따라 $50\mu m$ 이하인 총 먼지(TSP;

Total Suspended Particles)와 입자크기가 매우 작은 미세먼지(PM; Particulate Matter)로 구분한다. PM10은 지름이 $10\mu m$ 보다 작은 미세먼지를 통칭하며, PM2.5는 지름이 $2.5\mu m$ 보다 작은 미세먼지를 의미한다.(환경부 2016). 미세먼지의 농도는 질량농도($\mu g/m^3$) 값으로 나타내며, 환경부에서 PM10의 농도는 $0\sim 30\mu g/m^3$ 은 좋음, $31\sim 80\mu g/m^3$ 은 보통, $81\sim 150\mu g/m^3$ 은 나쁨, $151\mu g/m^3$ 이상은 매우 나쁨 으로 규정하고있다(환경부, 2016).

실내에서 사용하는 간이 미세먼지 측정기는 입자 크기와 입자 개수농도를 측정하며, 이를 질량농도로 변환하여 출력한다. PM1, PM2.5 및 PM10 형태의 개수 농도에서 질량 농도(MC; Mass Concentration)($\mu g/m^3$)로의 변환 방정식은 식 (1)과 같다.

$$MC = nV\rho \quad (1)$$

여기서, n 는 입자의 개수 밀도($개/m^3$) 값이고, V 는 입자의 부피 (m^3), ρ 는 입자의 밀도($\mu g/m^3$)를 의미한다(Antonio et al 2018). 위 식에서 입자의 개수 밀도는 미세먼지 측정기로부터 측정되는 값이다. 입자의 부피 및 밀도는 다음 내용과 같이 가정된 값을 사용한다(Hu et al., 2012; DeCarlo et al., 2004).

2.2 미세먼지 밀도

건조상태에서 미세먼지의 대표적 주요 성분은 암모늄이온(Ammonium ion), 질산이온(Nitrate ion), 황산이온(Sulfate ion) 원소탄소(EC; Elemental carbon), 유기탄소(OC; Organic carbon)이며, 해당 물질의 밀도는 Table 1과 같다.(Chung et al., 2001; Kim, 2009).

미세먼지는 구성하고 있는 성분의 종류와 그 성분의 비율에 따라 전체 밀도가 달라지지만, 간이 미세먼지 측정기에서 측정된 데이터를 기반으로 개수농도에서 질량농도로 변환할 때 입자들의 밀도는 $1.6g/cm^3$ 으로 가정한다(Park et al 2014). 개수농도를 질량농도로 변환하기 위해 가정된 입자들의 밀도는 2010년 수도권 대기오염집중측정소에서 측정한 데이터를 기반으로 한다. 측정된 구성 성분의 질량농도는 황산암모늄 $9.7\mu g/m^3$, 질산암모늄 $6.4\mu g/m^3$, 유기탄소와 원소탄소는 각각 $3.9\mu g/m^3$, $1.5\mu g/m^3$ 이며, 토양유추성분(CM) $5.0\mu g/m^3$, 미량유해성중금속(TM) $0.1\mu g/m^3$ 이다(NIER; National Institute of Environmental Research 2011). 화학 성분을 이용한 밀도는 각 구성 성분의 밀도(g/cm^3)를 원소별 질량(μg)으로 곱한 이후 모든 원소의 질량 합으로 나누어 나타낼 수 있다. 따라서 질량비율에 대한 가중평균을 통하여 미세먼지의 밀도를 구할 수 있다.

그러나 미세먼지의 구성 성분 및 해당 밀도는 상황에 따라 다르게 나타난다. 예를 들어, 자동차 배출가스 및 일차 에어로졸 형태로 발생하는 원소탄소와 아황산가스, 이산화질소 등이 물리화학적으로 반응하여 이차적으로 발생하는 황산암모늄, 질산암모늄의 농도가 지역마다 다르게 나타난다. 또한, Kim et al (2008)의 연구에 따르면, 각 계절별 PM10 미세먼지의 밀도는 봄철 $1.64g/cm^3$, 가을철 $1.57g/cm^3$, 겨울철 $1.92g/cm^3$ 로 각 계절마다 다른 밀도 값을 나타냈다. 이와 같이 미세먼지의 밀도는 구성 물질, 지역 및 시간에 따라 다른 밀도 값을 나타낸다. 이에 따라 미세먼지 측정기에서 사용되고 있는 밀도의 가정 값($1.6g/cm^3$)은 질량농도 계측값에 대한 오차를 발생시킨다.

본 연구에서는 $2.5\mu m$ 의 직경을 가진 미세먼지 표준입자(NIST; National Institute of Standard and Technology polymer microspheres)를 모델로 사용하였다. 표준입자는 미세먼지 측정기에 정확한 입자 크기에 대한 교정을 제공할 수 있도록 일정한 직경의 입자들로 구성되어 있다. 표준입자는 폴리머(polymer) 입자가 물에 함유된 상태로 존재하며, 폴리스티렌(polystyrene) 단일 성분으로 구성되어 있고 밀도는 $1.05g/cm^3$ 이다.

Table 1 Main components of fine dust

Components	Density(g/cm^3)	Mass($\mu g/m^3$)
NH_4^+	1.73	3.64
NO_3^-	1.05	6.09
SO_4^{2-}	1.34	8.44
OC	1.40	9.67
EC	2.25	5.10

2.3 미세먼지 부피

광산란법을 기반으로 하는 간이 미세먼지 측정기는 미세먼지의 개수농도를 질량농도로 변환할 때, 입자의 부피를 완전한 구로 가정한다. 미세먼지 입자는 모양과 밀도가 균일한 구체로 가정하며, 입자의 부피 V 는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$V = \frac{\pi}{6} D^3 \quad (2)$$

여기서, D 는 입자의 평균 직경(m)을 의미한다.

광산란법은 450, 550, 700nm의 파장을 가진 전자기파를 입사시키고, 입자의 크기($2.5\mu m \sim 10\mu m$)에 의하여 산란되는 미

산란(Mie scattering)을 이용한다(Choi et al., 2018; Lee, 2019). 미 산란의 경우, 입자의 크기가 파장보다 크기 때문에 입자의 형태에 따라서 산란반경에 영향을 미친다. 또한 건조 과정을 거친 뒤 농도를 측정하는 중량법과 달리 건조과정을 거치지 않는 광산란법 간이 미세먼지 측정기는 습도에 큰 영향을 받게 된다. 일반적으로 상대습도가 높을수록 흡습성 입자는 주변의 습도를 흡수한다. 습도를 흡수한 입자의 크기는 커지며, 완전한 구 형태의 가정은 미 산란에 막대한 영향을 미치게 된다. 그러므로 최종적으로 측정되는 미세먼지 농도에 오차율이 크다.(Shin et al., 2010).

본 연구에서는 습도와 같은 환경적 요소로 인한 계측 값의 오차를 개선하기 위해 매질의 물리적 변화를 직접적으로 반영할 수 있는 기계적 파동에 근거한 초음파 전달 및 산란을 적용하였다. 적용한 초음파의 주파수는 5MHz이며 파장은 $68.6\mu m$ 으로 미세먼지 입자($2.5\mu m \sim 10\mu m$)에 의해 레일리 산란(Rayleigh scattering)이 발생한다. 본 연구에서 사용되는 주파수의 파장 대비 입자의 직경은 상대적으로 작기 때문에, 입자의 부피를 구형으로 가정하여 산란반경에 대한 효과를 최소화할 수 있다.

산란 반경이란, 두 입자의 충돌에서 산란 과정이 발생할 확률을 의미한다. 산란반경은 입자 입자의 횡단면영역(2D) 관점에서 표현되며 식 (3)과 같이 정의된다.

$$\sigma = \frac{1}{nl_s} = \pi(2r)^2 \quad (3)$$

여기서, n 은 개수밀도($개/m^3$)이며, l_s 는 평균 자유 경로(mean free path, m)이다. 평균 자유 경로는 유효매질에서 산란자의 충돌 없이 탄성 파동이 진행될 수 있는 평균 거리를 말한다. 따라서 산란반경은 산란자의 충돌이 발생하지 않는 경로에서 단위 공간에 존재하는 산란자의 개수를 말하며, 면적에 대한 개념으로 나타낼 수 있다. 산란자를 상호작용하는 반경 r 의 원으로 가정했을 때 산란 반경과 실제 면적은 4배의 차이를 보인다. 이와 같이 산란반경의 가정은 직접적으로 개수 농도에 영향을 미친다.

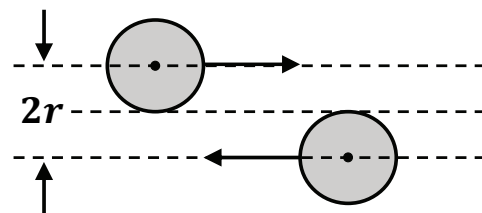


Fig. 1 scattering cross section

2.4 개수농도 측정법

광산란법을 사용하는 간이 미세먼지 측정기의 질량농도 측정 과정은 다음과 같다. 흡입부를 통해 유입된 공기의 부피를 산정하고, 측정부로 특정 사이즈의 입자가 포함된 공기를 유입시켜 개수농도를 측정한다. 개수농도와 가정된 입자의 부피와 밀도를 사용하여 질량농도를 도출한다. 도출된 질량농도는 1차적으로 입자의 부피에 따른 오차율과 가정에 근거한 밀도에 의해서 최종 계측된 질량농도에 오차가 발생하게 된다.

본 연구에서는 초음파의 다중산란이론을 적용하였다. 초음파 다중 산란은 초음파 가진원과 산란자 간의 탄성파동을 의미한다. Fig. 2에 나타난 개략도와 같이, 가진원으로부터 발생한 파동이 산란자에 도달했을 때 해당 산란자를 새로운 가진원으로 정의한다. 초음파 파동은 산란자에 의해 지속적인 산란이 이루어진다. 이로 인해 초음파 에너지의 감쇠가 일어난다. 초음파 파동의 에너지가 감쇠되는 구간을 유효매질이라고 정의한다. 유효매질은 산란자의 영향을 받아 파동의 에너지가 감쇠되는 구간을 말한다. 초음파 다중산란을 통해 발생한 유효매질에서의 감쇠를 계측하여 미세먼지의 개수밀도를 예측한다.

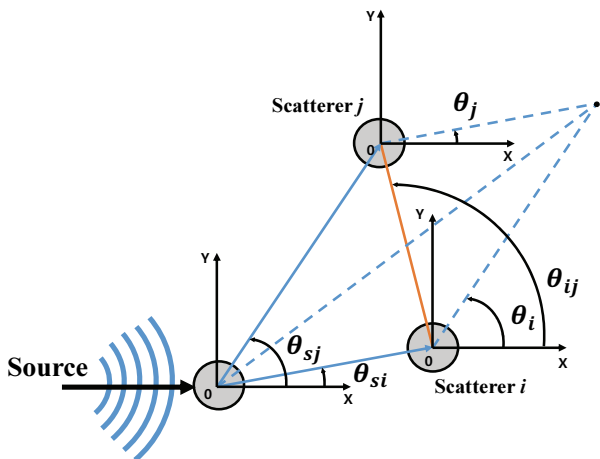


Fig. 2 Multiple scattering schematic

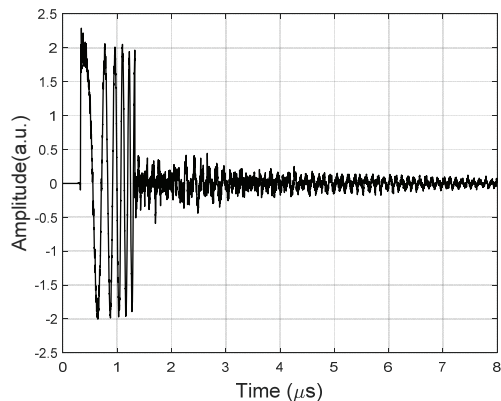
공기 중 미세먼지는 규칙성 없이 배치되어있기 때문에 계측된 초음파 신호는 불규칙적인 파동(incoherent wave)을 포함한다. 불규칙적인 신호를 최소화 하며, 공기 중 미세먼지의 농도를 대변하는 연속적인 파동(coherent wave)을 도출하기 위해 평균합산(ensemble average)의 개념을 이용한다. 위치좌표 x 에서 수신한 신호를 $f(t, x)$ 라고 할 때, Fig. 3(a)와 같이 불규칙적으로 배치된 미세먼지로 인해 산란된 신호가 포함되어 있다. 평균합산을 통해 Fig. 3(b)과 같이 불규칙적으로 산란된 신호를 대폭 축소하여 유효매질 내에서 초음파의 에너지가

감쇠된 신호 $\overline{f(t, x)}$ 를 도출할 수 있다.

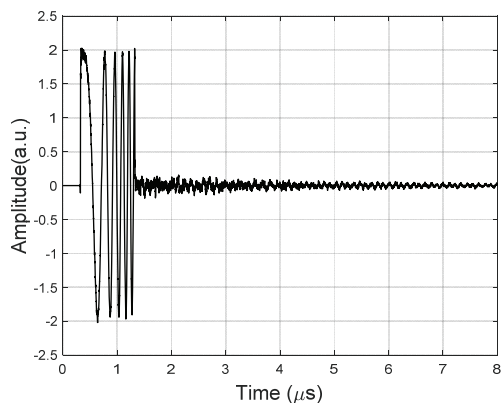
실험적으로 다중 산란된 초음파 신호의 주파수별 감쇠율 (α)을 측정하여 평균 자유 경로를 도출할 수 있다. 감쇠율의 역수는 평균 자유 경로를 의미하며, 평균 자유 경로와 감쇠율 및 산란면적을 통해 도출한 미세먼지의 개수밀도는 식 (4)와 같다.

$$n = \frac{\alpha}{\sigma} \quad (4)$$

감쇠율은 다음과 같은 신호 처리를 통해 도출될 수 있다. 감쇠율은 가진한 신호의 에너지 대비 계측한 신호의 에너지의 감소를 의미한다. 감쇠율은 주파수 도메인에서 분석하며, $\overline{f(t, x)}$ 의 신호를 고속 푸리에 변환(FFT; Fast Fourier Transform)을 사용하여 주파수 도메인으로 변환하여 분석한다. 주파수 도메인의 신호를 $f(w, x)$ 라고 할 때, 첫 번째 센서에서의 신호를 $f(w, x_1)$, n 번째 센서에서의 신호를 $f(w, x_n)$ 으로 나타낸다. 주파수 함수는 일정하며, n 번째의 센서로 갈수록 파동의 진폭은 감쇠된다. 다중 산란이 발생하는 공간의 첫 번째 센서부터 다음 센서의 위치, i 로 전달되는 파동의 신호



(a) Signal measured once



(b) Ensemble averaged signal

Fig. 3 Ensemble average schematic

진폭의 비율은 주파수 도면에서 식 (5)와 같이 정의된다.

$$\overline{f(w, x_i - x_1)} = \overline{f(w)} e^{-\alpha(x_i - x_1)} \quad (5)$$

위 식에 로그를 취하여 식 (6)과 같이 도출할 수 있다. 결과적으로 도출하고자 하는 감쇠율은 1차 방정식에서의 기울기를 의미한다.

$$\ln \overline{f(w, x_i - x_1)} = -\alpha(x_i - x_1) + \ln \overline{f(w)} \quad (6)$$

3. 산란반경 및 미세먼지 측정 시뮬레이션

3.1 미세먼지 모델링

본 연구에서는 산란자의 배치와 산란 반경을 구현하기 위해 표준입자 및 미세먼지 SEM 촬영을 진행했다. 사용된 전자현미경은 ZEISS GEMINI 300이며, 산란자의 표면 정보 획득이 가능한 2차 전자(Secondary electron)촬영을 수행하였다. SEM 촬영을 위한 전처리 과정은 다음과 같다. 1) 표준입자의 경우 물과 섞여있는 표준입자 시료에서 표준입자만을 보기 위해 수분을 제거한다. 2) SEM 촬영 시 전자빔에 의해 시료 표면에 하전입자가 누적되어 발생하는 이미지의 왜곡을 방지하기 위해 전도성 코팅이 필요하다. 3) 마그네트론 스퍼터를 통해 표준입자에 전도성 코팅을 한 뒤 진공상태에서 촬영을 진행한다. 촬영은 기본전압 5kV를 기준으로 가속전압의 값을 조절하여 진행했다.

Table 2 ZEISS GEMINI 300 performance

-	Specification
Acceleration voltage	0.05-30kV
Probe current	3pA-20nA
Store resolution	Up to 32k×24k pixels
Magnification	12-2,000,000

산란자의 배치를 시뮬레이션 공간에 구현하기 위해 SEM 이미지에서 산란자의 추출을 진행했다. 산란자의 추출은 다음과 같은 과정으로 진행됐다. Fig. 4는 산란자 추출 과정을 나타낸다. 모델링을 위해 산란자 추출에 필요한 이미지 크기 (1024x686)를 사용했다. 원형 객체인 산란자를 추출하기 위해 원형 허브 변환(CHT; Circle Hough Transform)을 사용했다. 원형 허브 변환은 이미지의 밝기가 급격하게 변하는 원의 경계 지점(edge)과 검출할 원의 반지름을 이용하여 원형 객체를 추출한다. 원형 객체인 산란자를 검출하기 위해 검출하고

자 하는 산란자의 반지름이 필요하다. 따라서 이미지 상에서 거리를 측정하여 산란자의 반지름 범위(30-40pixel)를 도출했다. 검출할 원형 객체의 반지름을 알고 있을 때 원의 경계에서 검출된 edge 위치로부터 특정 반지름을 가진 원을 그리게 된다. edge의 위치들에 대한 원은 검출하고자 하는 원의 중심을 지난다. 위와 같은 과정을 반복하여 원형 객체를 검출하였다. 이미지 모델링은 Matlab을 기반으로 이루어졌으며, 원형 객체를 검출하는 구문인 'imfindcircles'를 사용했다. 총 해석시간은 2.42초가 소요됐다

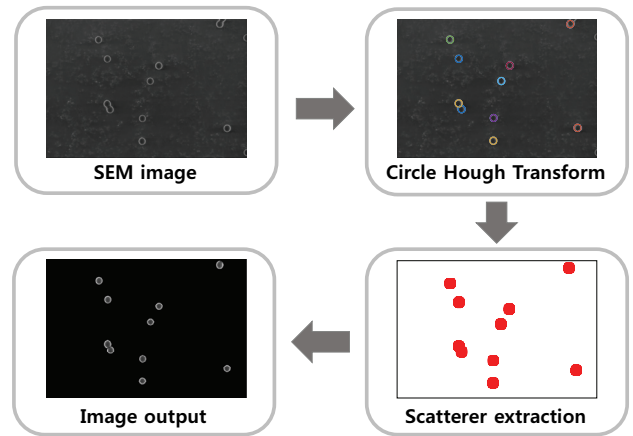


Fig. 4 Scatterer extraction process

3.2 산란 반경 도출

이론식과 수치해석을 이용하여 산란자의 산란 반경을 도출하였다. Fig. 5과 같이 입사되는 초음파(Incident wave)가 구형 미세먼지 입자에 전달될 경우 각각의 방위각으로 초음파의 산란(Scattered wave)이 일어난다.

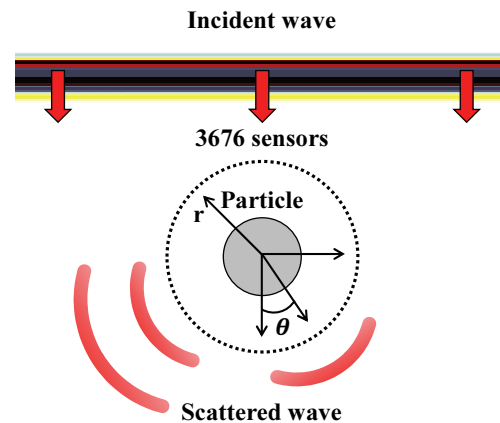


Fig. 5 Cross section theory conceptual diagram

식 (7)과 같이 산란 반경은 모든 방위각에 배치된 센서에 도달하는 신호인 각도 함수를 모든 방위각에 대해 적분함으로써

출할 수 있다. 2차원에서 각도 함수는 단일 각도 θ 에 의존한다.

$$\sigma = \int_0^{2\pi} |f(\theta)|^2 d\theta \quad (7)$$

이론식을 통해 산란 반경을 도출하는 방법은 미세먼지 입자의 형태가 평면상의 원 또는 3차원 공간의 구에서만 적용이 되기 때문에 형태에 제한이 존재한다. 실제 형상에 맞는 산란 반경을 도출하기 위해 SEM 이미지로 구축된 미세먼지 입자의 기하학적 반경 데이터를 바탕으로 실제 형상에 맞는 산란 반경을 도출했다.

수치해석을 통한 산란 반경 도출 과정은 다음과 같다. 1) 미세먼지가 없는 모델(bare medium field)과 하나의 미세먼지가 존재하는 모델(far-field)을 선정하여 각각 파동 전달 시뮬레이션을 진행한다. 2) 하나의 미세먼지를 기준으로 far-field에 원형으로 배치된 센서를 통해 산란에 대한 각도 함수를 도출한다. 도출된 함수를 바탕으로 전체 각도에 대해 적분하여 미세먼지 1개에 대한 산란 반경(scattering cross-section)을 구한다. 3) 앞선 과정을 다른 미세먼지 형상에 대하여 반복하고 산란 반경에 대한 데이터를 구축한다.

시뮬레이션은 유한차분법을 기반으로 2-D 시간이력 해석을 수행하였다. 해석은 Matlab 기반 k-wave toolbox를 사용했다. Fig. 6은 수치해석에 사용된 미세먼지 형상 데이터를 나타낸다. 수치해석에 사용된 미세먼지 형상은 평균 반지름이 $1\mu\text{m}$ 인 표준입자(Standard particle), 타원형 입자(Ellipse particle), 입자 두 개가 합쳐진 형태의 입자(Two circle particle), SEM을 통해 구축된 4 종류의 실제 미세먼지 입자(SEM particle)로 구성되어 있다. 표준입자를 제외한 입자들의 경우 90° 회전한 형태로 총 11 종류의 형상데이터를 사용하였다. grid의 개수 (1500,1500) 및 간격(dx, dy : $0.057\mu\text{m}$)은 원형 산란자의 형태를 나타내기 위해 설정했다. 가진 신호는 1MHz에서 20MHz로 주파수가 증가하는 Chirp 신호를 사용했으며, 파동의 전달은 평면파(plane wave)로 설정했다. 각각의 방위각으로 퍼지는 신호를 계측하기 위해 시뮬레이션 중심으로부터 $37.05\mu\text{m}$ 의 반지름을 가진 원형의 센서를 배치했으며, 센서의 개수는 총 3676개이다. 시뮬레이션 모델링에 대한 정보는 Fig. 9에 나타났다. 제한적인 공간으로 모델링된 초음파 파동에 대한 시뮬레이션은 반사파가 발생되어 해석에 어려움이 있다. 이를 극복하기 위해 전달되는 파동을 흡수하는 층(Perfectly Matched Layer, PML)을 시뮬레이션 공간 둘레에 배치했으며, 감쇠계수는 $2Np/m$ 로 설정하였다. 시뮬레이션 시간 간격은 $0.02ns$ 이며, Courant-Friedrichs-Lewy(CFL) 조건은 0.1로 설정했다.

5MHz 대역에서의 이론식을 이용한 원형의 산란 반경 값과, 수치해석 결과를 Table 3에 나타냈다.

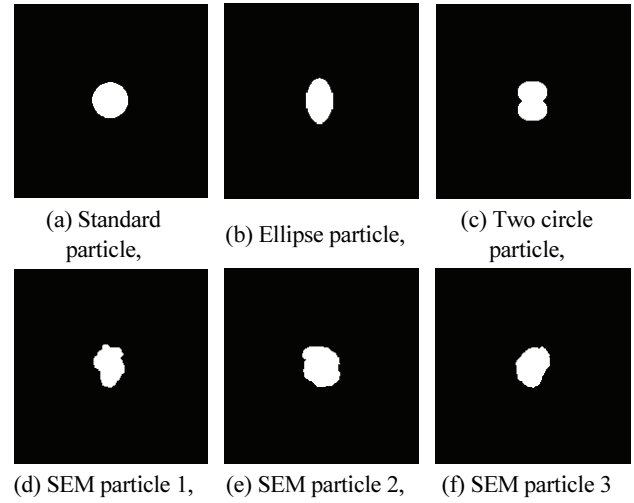


Fig. 6 Fine dust shape data used for numerical analysis

Table 3 Cross section at 5MHz

Particle shape	Cross-section (mm^2)	
Analytical solution	5.88×10^{-6}	
Standard particle	8.59×10^{-6}	
Ellipse particle	vertical	5.56×10^{-6}
	horizontal	1.12×10^{-6}
Two circle particle	vertical	1.07×10^{-5}
	horizontal	7.37×10^{-6}
SEM particle 1	vertical	6.13×10^{-6}
	horizontal	1.01×10^{-5}
SEM particle 2	vertical	1.34×10^{-5}
	horizontal	1.23×10^{-5}
SEM particle 3	vertical	9.94×10^{-6}
	horizontal	7.71×10^{-6}

3.3 다중산란 유한차분법 해석

유한차분법을 기반으로 초음파 다중산란 이론을 적용하여 2-D 시간이력 해석을 수행했다. 해석은 Matlab 기반 k-wave toolbox를 사용했다. 산란 반경 및 다중 산란 시뮬레이션에 사용한 변수 설정은 Table 4과 같다. 시뮬레이션 공간에 배치된 표준입자의 부피비는 1%로 가정했으며, 표준입자는 random 함수를 통해 시뮬레이션 공간에 배치됐다. 시뮬레이션 모델링에 대한 정보와 해석 과정을 Fig. 7에 나타냈다. 이 과정에서 평면파가 표준입자를 통과함에 따라 산란되는 파동을 확인할 수 있다. 시뮬레이션 계산 시간을 향상시키고자, GPU를 활성화하여 진행했다. Matlab은 NVIDIA CUDA를 지원하여 GPU를 활성화할 수 있다. CUDA는 GPU에서 수행하는 병렬처리

알고리즘을 C 프로그래밍언어를 사용하여 작성할 수 있는 기술이다. k-wave toolbox는 NVIDIA에서 개발한 CUDA SDK 인터페이스를 사용하여 C 프로그램을 GPU에서 실행할 수 있다. 해석 시간은 평균적으로 24시간이 소요됐다.

Table 4 numerical simulation details

Simulation Parameter	Cross-section	Multiple scattering
Number of grids (N_x)	1500	8000
Number of grids (N_y)	1500	2000
dx	0.057 μm	
dy	0.057 μm	
Length of grid	85.5 μm \times 85.5 μm	456 μm \times 114 μm
Total area	0.007 mm^2	0.002 mm^2
dt	0.02 ns	16.62 ps
Input frequency	1-20 MHz	1-10 MHz
Input type	Chirp signal	
Wave type	Plane wave	
Number of sensors	3676 (sensor radius : 37.05 μm)	22500 (150 \times 150)
Time end	4 μs	8 μs
PMLSize	[100,100]	[100,0]
PMLAlpha	2 N_p/m	
CFL	0.1	
ρ_{particle}	1050 kg/m^3	
ρ_{air}	1.2754 kg/m^3	
c_{air}	343 m/s	

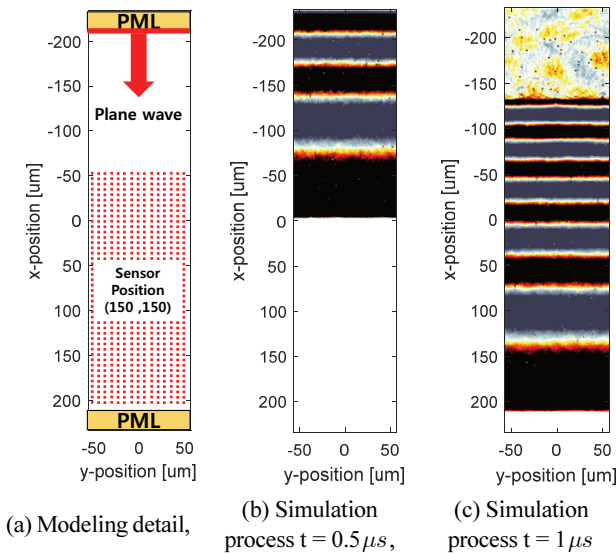


Fig. 7 Simulation modeling

4. 시뮬레이션 결과 및 분석

4.1 시뮬레이션 결과 분석

시뮬레이션의 결과로 22500개의 센서로부터 계측된 신호 분석을 수행했다. Fig. 8은 센서로부터 계측된 신호의 예시이다. 신호는 파동의 위상이 일정한 연속적인 파동(coherent wave)과 다중산란으로 인해 발생한 불규칙한 위상을 가진 불규칙적인 파동(incoherent wave)로 구성되어있다.

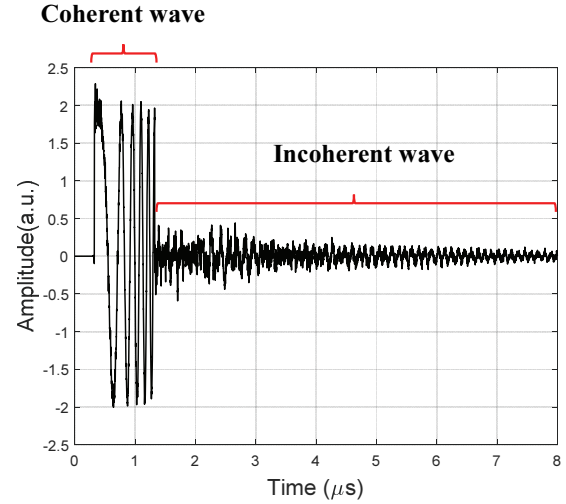


Fig. 8 Example of output signal

Fig. 9는 시뮬레이션 공간 y축 1940열에 놓여있는 센서에 대한 신호누적 그래프(B-scan)와 y축에 대하여 평균합산을 60회 수행한 신호의 신호누적 그래프이다. 신호누적 그래프는 각 위치에 배치된 센서에서 계측된 시간 도메인 그래프를 누적하여 센서로 도달한 시간, 배치된 센서의 번호, 계측된 신호의 진폭을 나타낸다. 평균합산을 통해 연속적인 가간섭 파동의 뚜렷한 확인이 가능했으며, 다중 산란으로 발생한 불규칙적인 비간섭 파동은 대부분 사라지는 것을 볼 수 있다.

4.2 시뮬레이션 정확성 검증

표준입자의 형상과 초음파 다중 산란 이론을 적용한 미세 먼지 농도 측정 시뮬레이션의 정확성을 검증하기 위해서 감쇠율과 평균 자유 경로를 도출했다. 감쇠율은 식 (6)과 같이 선형 최소자승법(linear least square fit)을 사용하여 도출했다. 평균 자유 경로는 식 (4)와 같이 감쇠율의 역수로 정의된다. Fig. 10는 도출된 감쇠율을 나타낸다. 주파수가 증가할수록 파장은 감소하기 때문에 표준입자에 대한 감쇠율이 증가함을 알 수 있다.

5MHz 대역에 대한 미세먼지 농도 측정에 대한 결과를

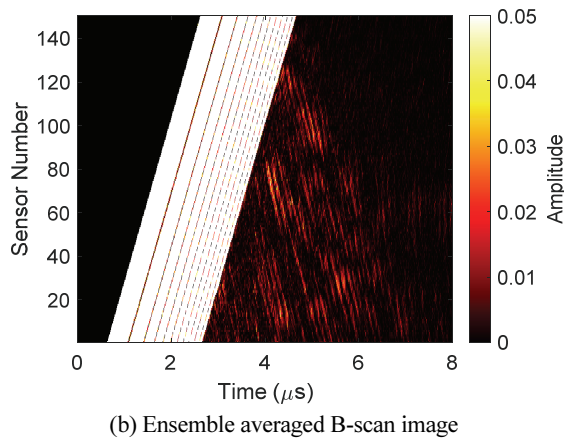
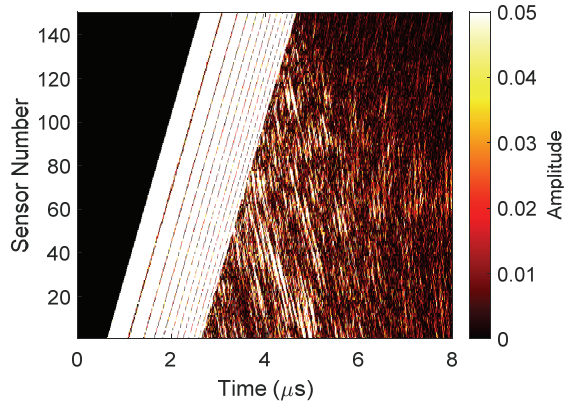


Fig. 9 B-scan images

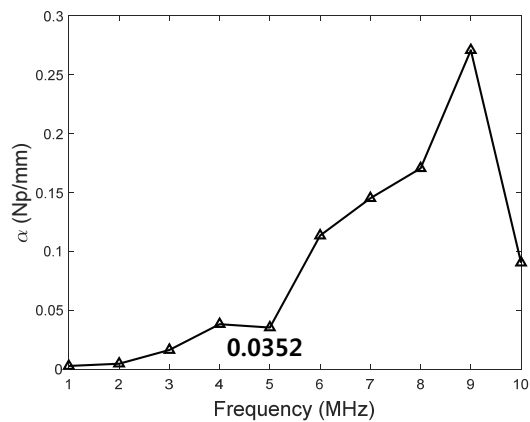


Fig. 10 Derived attenuation

Table 5에 나타내었다. 시뮬레이션은 2-D 공간에서 진행됐기 때문에 미세먼지의 개수 밀도는 개/mm²의 단위를 사용하며, 산란 반경(σ)은 mm의 단위를 갖는다.

각 산란 반경에 해당하는 개수밀도에 대한 오차는 최소 19(1%), 최대 3455(52%)로 계산되었으며, 평균 72.5%의 정확도를 보인다.

Table 5 Results of simulation (Volume fraction : 1%)

Frequency	5MHz	
α (Np/mm)	0.0352	
n_exact (1/mm ²)	2885	
Standard particle	4103	
Ellipse particle	vertical	6340
	horizontal	3147
Two circle particle	vertical	3294
	horizontal	4783
SEM particle 1	vertical	5750
	horizontal	3490
SEM particle 2	vertical	2630
	horizontal	2866
SEM particle 3	vertical	3546
	horizontal	4572
Standard particle	-1218 (42%)	
Ellipse particle	vertical	-3455 (120%)
	horizontal	-262 (9%)
Two circle particle	vertical	-409 (14%)
	horizontal	-1898 (66%)
SEM particle 1	vertical	-2865 (99%)
	horizontal	-605 (21%)
SEM particle 2	vertical	255 (9%)
	horizontal	19 (1%)
SEM particle 3	vertical	-661 (23%)
	horizontal	-1687 (58%)

5. 결론

본 연구는 건설 현장 및 구조물 유지관리에서의 보다 정확한 미세먼지 측정 및 관리를 위해 초음파 다중산란 이론을 적용한 미세먼지 측정 시뮬레이션을 모델링하였다. 산란자의 배치와 산란 반경의 구현을 위해 표준입자의 SEM 이미지를 모델링했다. 도출된 산란 반경과 초음파 다중산란 이론을 적용한 유한차분법 시간 이력 해석을 통해 산란반경이 미세먼지 개수밀도에 미치는 영향을 검증하였다. 본 연구의 결론은 다음과 같다.

- (1) 간이 미세먼지 측정기에서 산출된 질량 농도의 경우, 개수밀도, 미세먼지 입자의 부피와 밀도의 관계식으로 구성된다. 이 중 입자의 부피는 완벽한 구형으로 가정되고 밀도는 대표성을 가지는 1.6g/cm³으로 사용되고 있어 정확도 개선이 필요하다.
- (2) 개수밀도 측정에 있어 사용된 초음파 다중 산란 기법을

검증하기 위하여 SEM과 시뮬레이션을 통한 실제 미세먼지 입자의 산란반경을 도출하였다. 결과, 표준입자 모형과 최대 $4.81 \times 10^{-6} mm^2$ 의 오차를 나타내었다. 추후 산란반경 외에 실제 미세먼지 형상에 대한 부피를 반영으로 미세먼지 측정 알고리즘에서 부피의 가정 값에 대한 오차를 개선할 수 있음을 확인하였다.

(3) 초음파 다중산란 이론을 적용한 2-D 시간 이력 시뮬레이션 결과, 미세먼지 형상에 따라서 개수밀도 단위 최소 19(1%), 최대 -3445(52%)의 오차를 보이는 것으로 나타났다. 다양한 미세먼지 입자 형상의 반영으로 인해 정확도 편차가 크게 나타났다. 이는 미세먼지 입자 형상에 따라 미세먼지 측정 값에 큰 영향을 주는 것을 의미한다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통기술촉진연구사업의 연구비지원(과제번호 20CTAP-C151907-02)에 의해 수행되었습니다.

References

- International Agency for Research on Cancer.(2013), IARC: Outdoor air pollution a leading environment cause of cancer deaths.
- World Health Organization.(2014), Burden of disease from Household Air Pollution for 2012.
- Kim, J. H., Kang, S. W.(2018), Analysis of Factors Influencing PM10 Pollution in Korea, Journal of the Korea Resource Economics Association, 18, 779-791.
- Park, H. J., Woo, K. S., Chung, E. K., Kang, T. S., Kim, G. B., Yu, S. D., Son, B. S.(2015), A Time-Series Study of Ambient Air Pollution in Reaction to Daily Mortality Count in Yeosu, Journal of Environmental Impact Assessment, 24(1), 66-77.
- Jeon, C. W., Cho, D. H., Zhu, L.(2018), Exploring the Spatial Heterogeneity of Particulate Matter (PM10) using Geographically Weighted Ridge Regression (GWRR), Journal of the Korea Cartographic Association, 18(3), 91-104.
- Lee, N. R., Um, H. U., Cho, H. S.(2018), Development of Detection and Monitoring by Light Scattering in Real Time, Fire Science and Engineering, 32(3), 134-139.
- Lee, B. J., Park, S. S.(2019), Evaluation of PM10 and PM2.5 Concentrations from Online Light Scattering Dust Monitors Using Gravimetric and Beta-ray Absorption Methods, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 35(3), 357-369.
- Kim, S. J., Kang, H. S., Son, Y. S., Yoon, S. Y., Kim, J. C., Kim, G. S., Kim, I. W.(2010), Compensation of Light Scattering Method for Real-Time Monitoring of Particulate Matters in Subway Station, Journal of Korea Society for Atmospheric Environment, 26(5), 553-542.
- Kim, J. H., Oh, J., Choi, J. S., Ahn, J. Y., Yoon, G. H., Park, J. S.(2014), A Study on the Correction Factor of Optic Scattering PM2.5 by Gravimetric Method, Journal of the Korean Society of Urban Environment, 14(1), 41-47.
- Lee, C. H., Oh, S. N.(2020), Effect of Atmospheric Humidity on Fine Dust Measurement Using the Light Scattering Method, Journal of the Korea Society of Hazard Mitigation, 20(1), 391-399.
- Ministry of Environment Climate and Atmospheric Policy Division.(2016), Fine dust, what is it??. Ministry of Environment, 11-1480000-001435-01.
- Antonio, A. D., Popoola, O. A. M., Ouyang, B., Saffell, J., Jones, R. L.(2018), Developing a Relative Humidity Correction for Low-Cost Sensors Measuring Ambient Particulate Matter, Sensors, 18(9), 2790.
- Park, J. S., Moon, K. J., Park, S. M., Song, I. H., Kim, H. J., Hong, Y. D., Han, J. S.(2014), Possibility of the PM10 and PM2.5 Concentration Monitoring System using SMPS-APS Combination, Journal of Korean Society for Environmental Analysis, 17(3), 161-172.
- Kim, S. D., Kim, C. H., Hwang, U. H.(2008), A Study on the Particles Density Estimation in Seoul Metropolitan, Journal of Korean Society of Environmental Health, 34(2), 131-136.
- Chung, A., Chang, D. P. Y., Kleeman, M. J., Perry, K. D., Cahill, T. A., Dutcher, D., McDougall, E. M., Stroud, K.(2001), Comparison of Real-Time Instruments Used To Monitor Airborne Particulate Matter, Journal of the Air & Waste Management Association, 51(1), 109-120.
- NIER(National Institute of Environmental Research).(2011), Annual Report of Seoul Intensive Monitoring Site
- Shin, S. E., Kim, Y. P., Kang, C. H. (2010). Comparison of the PM10 Concentration in Different Measurement Methods at Gosan Site in Jeju Island. Journal of Environmental Impact Assessment, 19(4), 421-429.
- Hu, M., Peng, J., Sun, K., Yue, D., Guo, S., Wiedensohler, A., & 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.
- DeCarlo, P. F., Slowik, J. G., Worsnop, D. R., Davidovits, P., & Jimenez, J. L. (2004). Particle morphology and density characterization by combined mobility and aerodynamic diameter measurements. Part 1: Theory. Aerosol Science and Technology, 38(12), 1185-1205.
- Choi, S. I., An, J., & Jo, Y. M. (2018). Review of analysis principle of fine dust. Korean Industrial Chemistry News, 21(2), 16-23.
- Lee, E. T. (2019). Analysis of Radiative Transfer Equation for Measurement of Particulate Matter Emitted from Coal-Fired Power Plants, Journal of Korean Society of Environmental Engineers 41(8), 411-418.
- Choi, H. J., Woo, U. Y., & Hong, J. Y. (2019). Development of Fine Dust Measurement Method based on Ultrasonic Scattering. Journal of the Korea institute for structural maintenance and inspection, 23(7), 40-48.
- Kim, C. H. (2009). A Study on the Size-Based Density Estimation of Particulate Matters(PM10) in the Seoul Metropolitan Area.

24. Baek, C. M. (2019), Development of Scattering Dust Reduction Technology in the Life Cycle of Road Pavement, Proceedings of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection,, 23(2), 274.
25. National Institute of Environmental Research (2015), Research and study on air quality management in large cities-Identification of fine dust generation process and establishment of reduction measures, final report.
26. Lee, J. Y., Kim, I. H. (2017). Characteristics of a Filter Module Adsorption for Fine Dust Removal on Road. Journal of Korean Society of Environmental Engineers, 39(1), 19-25.
27. Kim, H. I., Park, J. J., Kwark, J. W. (2019). Development of Construction Materials and Application Technologies for Particulate Matter Reduction Using Photocatalytic Materials, Journal of Korea Society of Civil Engineers, 67(8), 87-89.
28. Hyun, J. H., Kim, H. J. (2019), Development of Fine Dust Reduction Technology on Roadsides Using Functional Construction Materials, The Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, 23(2), 273.
29. Kim, K. T. (2019). Method for Measuring and Suppressing to Fine Dust at Construction Sites in Urban Space Using Autonomous Moving Bodies, Journal of the Architectural Institute of Korea, 39(2), 701-704.

Received : 10/30/2020
 Revised : 11/27/2020
 Accepted : 12/30/2020

요 지: 본 연구에서는 구조물 유지관리에서의 정확한 미세먼지 농도 계측을 위한 새로운 알고리즘을 제안하고 검증한다. 기존 광산란법 미세먼지 측정기의 측정 오차를 보완하기 위해 초음파 다중 산란 알고리즘을 제안하였으며, 산란자의 배치와 산란 반경을 구현하기 위해 표준입자 및 실제 미세먼지의 SEM 촬영을 진행하였다. 초음파 다중 산란 이론식을 통해 초음파 신호의 주파수별 감쇠율과 산란 반경으로 미세먼지의 개수밀도를 나타내는 알고리즘을 도출하였고, 이론식과 수치해석을 통해 총 12가지의 미세먼지 형상에 대한 산란 반경을 도출하였다. 유한차분법을 기반으로 다중 산란 이론을 적용한 2-D 시간 이력 해석을 통하여 알고리즘을 검증하였으며, 신호 해석을 위한 신호 처리 기법을 나타내었다. 결과, 산란 반경에 해당하는 알고리즘의 오차는 개수밀도 단위 최소 19(1%), 최대 3455(52%)로 계산되었다. 산란반경 외에 실제 미세먼지 형상에 대한 부피를 반영하여야 하는 추후 연구가 필요함을 토의하였다.

핵심용어 : 비산먼지, 미세먼지, 유지관리, 초음파, 다중 산란, 수치해석
