

초음파 산란 기법을 적용한 미세먼지 측정법 개발

최하진^{1*}, 우옥용², 홍진영³

Development of Fine Dust Measurement Method based on Ultrasonic Scattering

Hajin Choi^{1*}, Ukyong Woo², Jinyoung Hong³

Abstract: New concept of fine dust measurement method is suggested based on ultrasonic scattering. These days, fine dust has been social problem in Korea, and many researches has been conducted including the area structural maintenance. Conventional measurement system such as optical scattering and semiconductor has a limit from environmental factors like relative humidity. However, ultrasound is based on mechanical waves, which perturb mechanical properties of medium such as density and elastic constants. Using the advantage, the algorithm for fine dust measurement is derived and evaluated using 2-D finite difference method. The numerical analysis simulates ultrasonic wave propagation inside multiple scattering medium like fine dust in air. Signal processing scheme is also suggested and the results show that the error of the algorithm is around minimum of 0.7 and maximum of 24.9 in the number density unit. It is shown that cross-section of fine dust is a key parameter to improve the accuracy of algorithm.

Keywords: fine dust, particulate matter, structural maintenance, ultrasonic, scattering, sensing, numerical simulation

1. 서론

최근 국내 대기 중 미세먼지 농도의 심각성은 특정 분야를 넘어서 전체 사회문제로 대두되고 있다. 건설 분야에서도 미세먼지에 대한 사회적 경각성으로 인하여 다양한 대책 마련 연구가 수행중이다 (Hyun and Kim, 2019, Kang and Park 2019). Baek (2019)에 따르면 국내에서 발생하는 비산먼지 중 건설공사와 도로재미산 먼지가 50% 이상을 차지하고 있기 때문에 기존 구조물의 유지관리에 있어서도 미세먼지에 대한 저감이 필수적인 과제를 보여주고 있다. 이에 도로포장 단계에서부터 완공 후 사용관리까지 전주기에 있어서 비산먼지 저감 기술에 대한 연구를 진행 중이다. 또한 Kim et al. (2019)은 도로변에서 콘크리트에 광촉매를 적용하여 미세먼지 흡착 및 제거에 대한 연구를 발표하였다.

이와 같이 구조물의 유지관리와 관련하여 미세먼지의 정확한 농도의 계측은 필수적이다. 현재 미세먼지의 농도를 계측하는 방법으로 제안된 기법은 베타선법, 중량법, 광산란법, 반도체 기반 가스센서 등이 있다. 상대적으로 높은 정확도를 나

타내고 있는 베타선법과 중량법은 일정기간 미세먼지의 포집 시간이 필요하기 때문에 구조물의 유지관리를 위한 실시간 데이터 수집에는 적합하지 못하다. 가장 많이 사용되는 광산란법은 레이저와 같은 광원이 미세먼지 농도에 비례하여 산란되는 현상에 기반하며, 휴대용으로 시중에서 다양하게 판매되고 있다. 가스 센서는 반도체의 표면에 미세먼지가 접촉했을 때 흡착, 탈착으로 발생하는 수축, 팽창 효과 및 그에 따른 전기저항의 변화에 기반하고 있다. 상대적으로 저가의 가격에 빠른 데이터를 제공하는 광산란법과 가스센서가 건설 현장 및 구조물의 유지관리 측면에 많이 적용되고 있으나, 그 정확도 개선에 대한 필요성이 제기 되고 있다. (Kim et al. 2008, Kim et al. 2018)

특히 두 기법 모두 근본적으로 환경적 요소인 상대 습도에

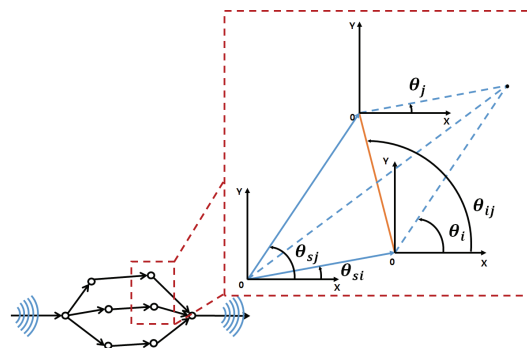


Fig. 1 Schematic drawing of multiple scattering

¹정회원, 숭실대학교, 건축학부 조교수

²학생회원, 숭실대학교, 학사과정

³학생회원, 숭실대학교, 석사과정

*Corresponding author: hjchoi@ssu.ac.kr

606 Hyunnam Engineering, Soongsil University, 369 Sang-doro, Sangdo-dong, Dongjak-gu, Seoul

•본 논문에 대한 토의를 2020년 1월 31일까지 학회로 보내주시면 2020년 2월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

취약한 구조를 가지고 있다. 광산란 기법의 경우 전자기파(electromagnetic waves)의 파동 전달에 직접적으로 영향을 미치는 유전체 유전율(dielectric permittivity) 및 상대 유전율(relative permittivity)이 상대 습도에 매우 민감한 구조를 가지고 있다. 또한 전자기적 특성과 재료의 물리적 변화의 상관관계가 가정을 통한 간접적인 계수의 적용으로 설명되기 때문에 보정을 통한 물리적 농도의 계산은 근본적인 한계를 지니고 있다. 반도체 기반 가스 센서의 경우, 금속 산화물 재질의 측정부가 상대습도에 따라서 그 민감도를 떨어뜨리는 한계를 지니고 있다. 이에 두 기법에 기반한 미세먼지 측정기는 모두 소량의 공기를 포집하여 자체 건조 시스템을 통과하는 방식으로 그 오차를 줄이고 있지만, 근본적인 측정법의 한계에 직면하고 있으며 부정확도 개선을 위한 많은 연구들이 수행 중에 있다. (Kim et al. 2010, Lee et al. 2018, Lee and Park 2019).

본 연구에서는 환경요인으로 인한 계측값의 오차를 줄일 수 있는 새로운 개념인 초음파 산란 기반 미세먼지 농도 측정법을 제안한다. 기계적 파동(mechanical waves)에 근거한 초음파의 전달은 매질의 물리적 변화에 직접적인 관계식으로 기술될 수 있다. 또한 초음파가 대기 중에 전달되면서 미세먼지와 같은 산란자(scatterer)에 직접적으로 간섭현상을 일으킨다. 그러므로 환경적 요인으로 인한 매질의 물리적 변화 및 불연속성을 초음파 전달 거동에 직접적으로 반영이 가능하다.

따라서 본 논문의 학술적 기여도는 다음과 같다. 첫째, 기존 광산란방식에 대한 개선방안을 제시할 수 있는 새로운 알고리즘 개발이다. 기존 광산란방식은 전자기파에 근거하여 그 전달에 유전율(permittivity), 투자율(magnetic permeability)과 같은 전자기 성질을 간섭한다. 이와 같은 전자기 물성은 습도에 매우 큰 영향을 받으면서도 직접적인 물리적 변환이 어렵다. 그에 반해 제안하는 초음파는 기계적 파동에 근거하여 그 전달에 밀도(density), 음향임피던스와 같은 물리적 성질에 영향을 받는다. 그러므로 습도에 따른 물리적 변화량을 보정

한 직접적 이론식 개발이 가능하다. 둘째, 제안한 알고리즘의 이론식 도출과 시뮬레이션을 통한 검증이다. 기존의 초음파 산란에 대한 이론식은 그 현상에 대한 수학적 모델을 개발하는데 집중되었다. 또한 이론식의 활용은 대부분 미세균열과 같은 진단분야에 시험적으로 적용되어왔다. 본 연구에서는 초음파 산란 이론식의 검증을 통하여 미세먼지의 농도를 측정하는 알고리즘을 제안한다. 해당 알고리즘은 초음파 거동 시뮬레이션을 통하여 그 정확도를 검증하였다. 이와 같이 기존 기법을 개선하고 제시되지 않은 새로운 기법의 검증이 본 연구의 중요한 학술적 기여도이다.

상기와 같이 본 연구에서는 초음파산란에 대한 기초이론을 미세먼지 농도계측에 적용한 최초의 사례로 공기 중 미세먼지와 같이 매질이 달라 주파수 및 파장의 범위가 다를 때 매질에 포함된 산란자(scatterer)의 농도를 추정하는 알고리즘을 제안하고자 한다. 유한차분법(finite difference method)을 기반으로 초음파 거동에 대한 시간이력 해석을 수행하였으며, 대기 중에 임의로 분포하는 미세먼지의 영향으로 발생하는 초음파의 다중산란 이론을 적용하였다. 해당 시뮬레이션의 결과에 기반하여 미세먼지 농도 측정 알고리즘의 적용범위를 도출하고 실제 실험 변수 및 신호처리에 대한 제안 연구를 수행하였다.

2. 초음파 산란 기법

2.1 초음파 산란 기법

초음파의 다중 산란은 초음파의 가진원 위치(\mathbf{r})로부터 산란자의 위치(\mathbf{r}')간의 탄성파동을 나타내는 미분방정식으로 기술할 수 있다. 산란이 일어나는 과정이 가진된 초음파의 주파수를 변수로 하기 때문에 다음과 같이 식 (1)으로 전개될 수 있다 (Derode et al. 2001, Chekroun et al. 2009).

$$\Delta G(\omega, \mathbf{r}, \mathbf{r}') + k^2(\omega, \mathbf{r}) G(\omega, \mathbf{r}, \mathbf{r}') = -(\nabla \log \rho(\mathbf{r}) \cdot \nabla) G(\omega, \mathbf{r}, \mathbf{r}') + \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}') \quad (1)$$

여기서, $G(\omega, \mathbf{r}, \mathbf{r}')$ 는 초음파 가진원과 산란자 사이에서 전달되는 파동방정식의 그린 함수(Green's function)이며, $k(\omega, \mathbf{r})$ 는 파수(rad/m), $\rho(\mathbf{r})$ 는 밀도(kg/m³)이다.

초음파의 다중산란에 대한 개념도를 Fig. 1에 나타내었다. 이와 같이 다중산란에 대한 이론적 공식은 파동이 산란자에 도달하게 되면 산란자의 위치를 새로운 초음파 가진원으로 정의하고 있다.

미세먼지와 같이 산란을 일으키는 산란자의 위치와 개수는 규칙성이 없기 때문에 평균합산(ensemble average)의 개념을

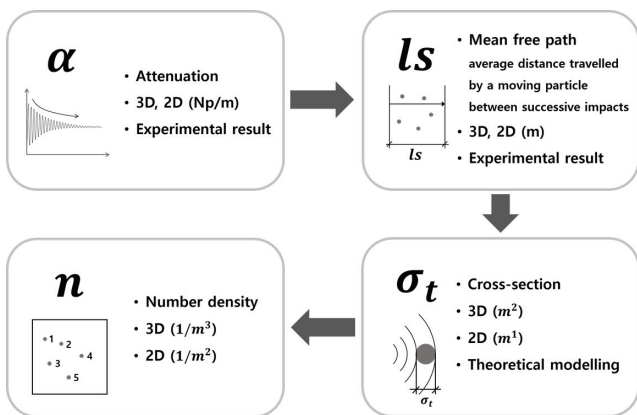
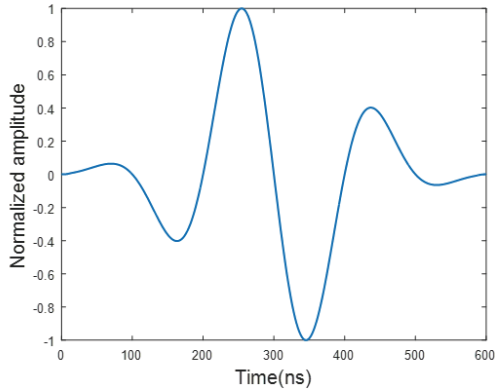
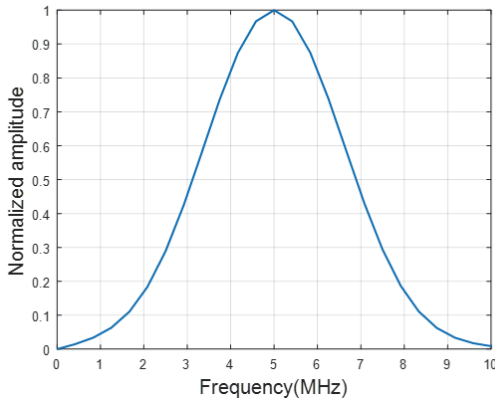


Fig. 2 Concept of fine dust measurement algorithm



(a)



(b)

Fig. 3 Input source (a) waveform in time domain (b) frequency information

적용하여 해답을 구하게 된다. 평균합산의 과정을 통하여 임의로 배치된 산란자의 불규칙적 산란 현상은 최소화되며 가진원으로부터 센서까지 전달되는 연속적인 파동(coherent wave)만 도출하게 된다. 평균합산을 적용한 다중산란 주파수-파수에 대한 해는 식 (2)와 같이 정의된다.

$$\langle G(\omega, \mathbf{k}) \rangle = \frac{1}{k_c^2(\omega) - k^2} \quad (2)$$

여기서 $\langle \rangle$ 기호는 평균합산을 의미하며 k_c 는 다중산란이 일어나는 유효매질(effective medium)에서의 유효파수이다. 유효매질이란 평균합산 후 탄성 파동이 전달되는 에너지가 산란자에 의하여 급격하게 감쇠되는 구간을 의미하며, 그 구간 내에서 내부의 산란자가 충돌하지 않고 독립적으로 탄성 파동이 진행할 수 있는 평균거리를 평균 자유 경로(mean free path)라고 정의한다. 평균 자유 경로(l_s)는 다음 식(3)과 같이 유효파수의 허수($Im(k_c)$)와의 관계로 나타낼 수 있다.

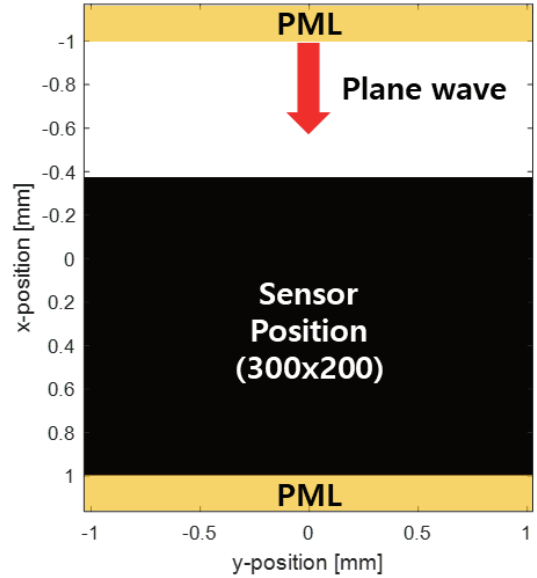


Fig. 4 Modeling details

$$l_s = \frac{1}{2Im(k_c)} \quad (3)$$

2.2 미세먼지 농도 측정 알고리즘

실험적으로 초음파의 가진원으로부터 다중 산란된 초음파의 감쇠율(α)을 측정하여 평균 자유 경로를 도출할 수 있다. 감쇠율이란 보낸 신호의 에너지 대비 받은 신호의 에너지 감소를 의미하며 감쇠율의 단위는 (1/m)이다. 감쇠율과 평균 자유 경로는 다음 식 (4)와 같이 정의된다.

$$l_s = \frac{1}{\alpha} = \frac{1}{n\sigma_T} \quad (4)$$

즉, 감쇠율의 역수가 다중 산란의 평균 자유 거리를 의미한다. 여기서, n 은 미세먼지의 단위 밀도(number density, $1/m^3$)이며 σ_T 는 미세먼지의 산란 면적(m^2)이다.

상기와 같이 미세먼지의 농도 측정 알고리즘을 도출한 개념도를 Fig. 2에 나타내었다. 첫째, 가진원으로부터 발생된 초음파를 센서를 통하여 여러번 계측하고 평균 합산한다. 둘째, 평균 합산된 신호를 신호처리를 통하여 주파수 해석한다. 셋째, 주파수별 감쇠율을 계산하고 평균 자유거리를 도출한다. 넷째, 미세먼지의 산란 면적을 기준으로 미세먼지의 단위 밀도를 계산한다.

2.3 다중 산란 시뮬레이션

유한차분법(finite difference method)을 기반으로 초음파 거동에 대한 2-D 시간이력 해석을 수행하였다. 해석에는

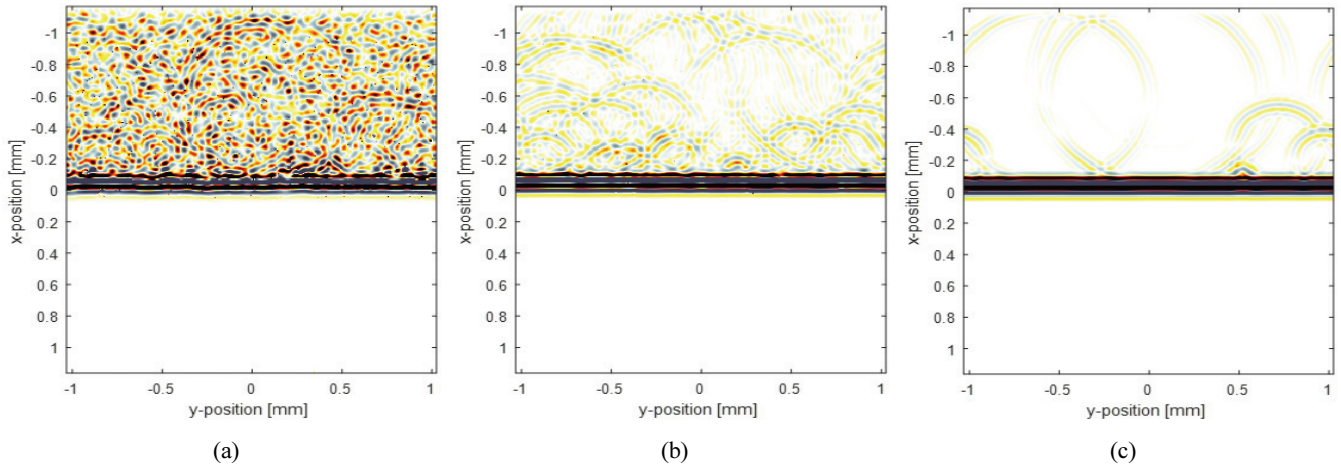


Fig. 5 Simulation of multiple scattering at $t=10\mu s$
 (a) 1% (b) 0.1% (c) 0.01%

Matlab기반 k-wave toolbox (Firouzi et al. 2012)를 사용하였으며 대기 중 미세먼지의 모델링을 위하여 liquid solver인 kspaceFirstOrder2D를 사용하였다. 균질하지 않은 매질에서의 유한차분법을 적용하기 위한 미소시간(Δt)에 대한 지배방정식(governing equation)은 다음의 식 (5)와 (6)으로 나타낼 수 있다.

$$\sigma_{ij}(\mathbf{r}, t + \Delta t) = \sigma_{ij}(\mathbf{r}, t) + \Delta t \lambda(\mathbf{r}) \delta_{ij} \frac{\partial v_k(\mathbf{r}, t)}{\partial x_k} + \Delta t \mu(\mathbf{r}) \left(\frac{\partial v_i(\mathbf{r}, t)}{\partial x_i} + \frac{\partial v_j(\mathbf{r}, t)}{\partial x_j} \right) \quad (5)$$

$$v_i(\mathbf{r}, t + \Delta t) = v_i(\mathbf{r}, t) + \frac{\Delta t}{\rho(\mathbf{r})} \left(\frac{\partial \sigma_{ij}(\mathbf{r}, t)}{\partial x_j} + f_i(\mathbf{r}, t) \right) \quad (6)$$

여기서, λ 와 μ 는 Lame 탄성계수, σ_{ij} 는 응력, v_i 는 입자의 속력 벡터, x_i 은 데카르트 좌표계 ($i, j = 1, 2, 3$)에서의 위치 벡터, f_i 는 물체력(body force)을 나타낸다.

시뮬레이션에 사용한 각 변수의 설정은 Table. 1과 같다. 대기 중 미세먼지의 부피비는 1%, 0.1%, 0.01%로 가정하였으며 농도의 높음, 중간, 낮음에 대하여 초음파의 다중 산란과정을 모니터링 하고자 하였다. 각 농도에 따른 미세먼지의 위치는 시뮬레이션 공간에 random함수를 사용하여 배치하였다. 가진 주파수는 5 Mhz를 중심으로 하는 tone burst 신호로써 넓은 대역의 주파수를 (broadband) 포함하고 있다. 가장 많은 에너지를 가지고 있는 주파수의 파장은 $68.8\mu m$ 이며, 미세먼지 PM10 기준 약 7배의 길이를 가지고 있다. Fig. 3에 가진 파형 및 주파수 정보를 나타내었다. 파동의 전달은 평면파(plane wave)로 설정하였으며, 각 공간으로 퍼져나가는 신호를 계측하기 위하여 x과 y축에 각각 300개와 200개 배치하였다. 시뮬

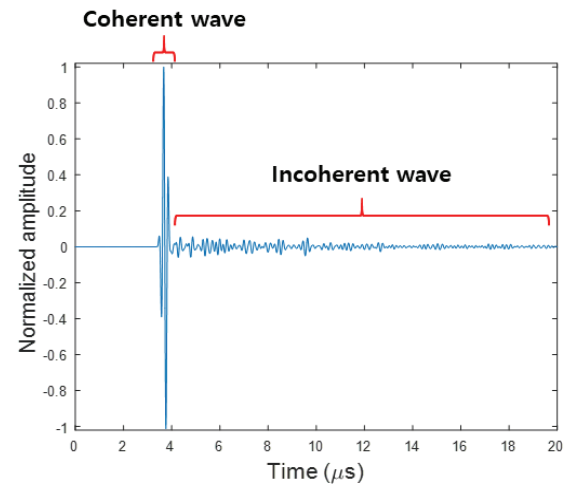


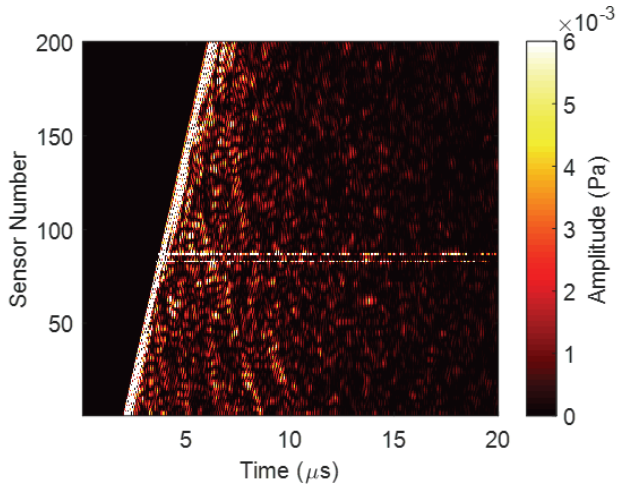
Fig. 6 Example of output signal at (150,200)

레이션 모델링과 센서 배치에 대한 정보를 Fig. 4에 나타냈다.

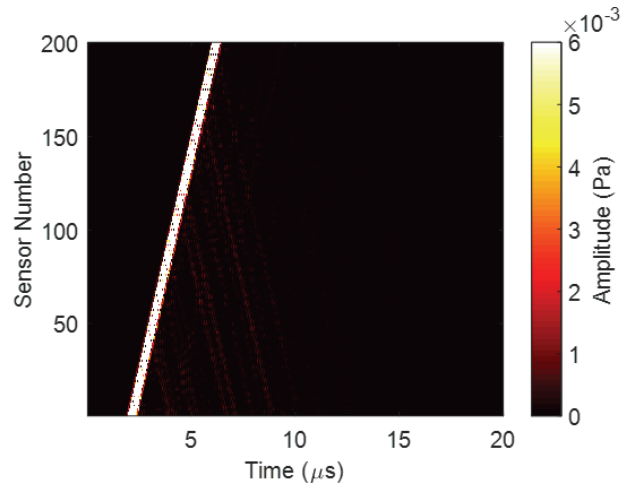
초음파 파동의 시뮬레이션은 공간의 제한적인 상황으로 발생하는 반사파로 인하여 해석에 어려움이 있다. 이를 극복하기 위하여 시뮬레이션 공간 둘레에 전달되는 파동을 흡수하는 층(Perfectly Matched Layer, PML)을 모델링하였다. PML의 감쇠 계수는 $2 N_p/m$ 로 설정하였다. 시뮬레이션의 미소 시간 간격은 $2ns$ 이며, Courant-Friedrichs-Lewy(CFL) 조건은 0.1로써 식 (5)가 충분히 수렴할 수 있도록 설정하였다.

3. 해석 결과 및 분석

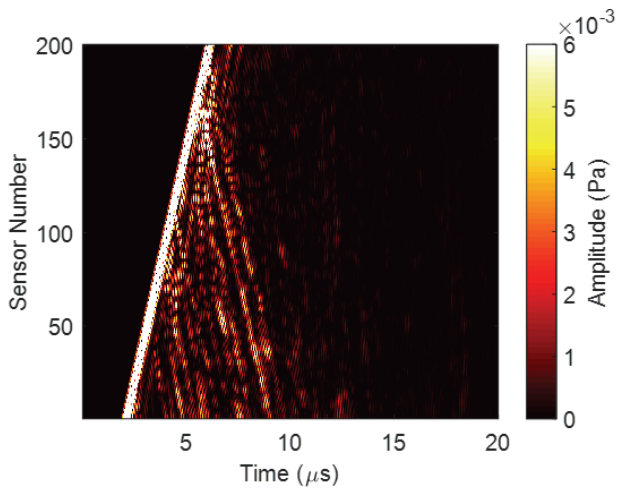
유한차분법을 기반으로 한 2-D 다중 산란 모델의 시뮬레이



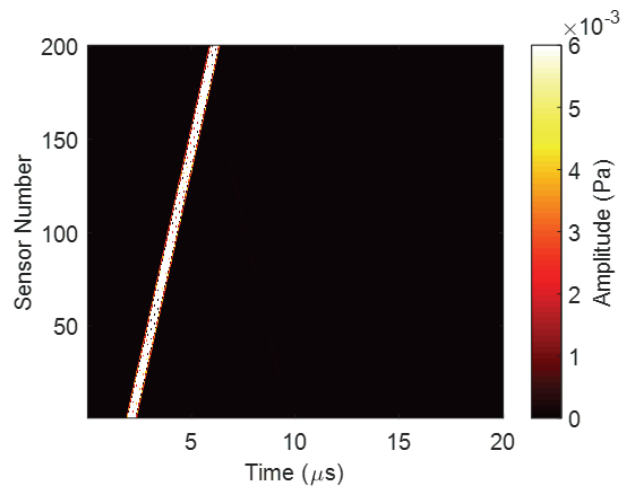
(a)



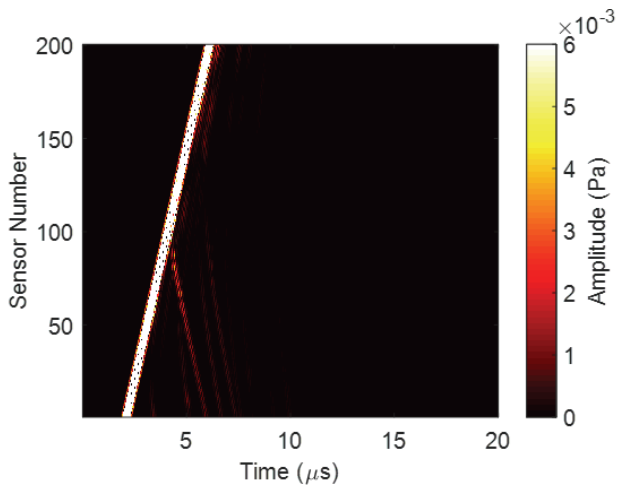
(a)



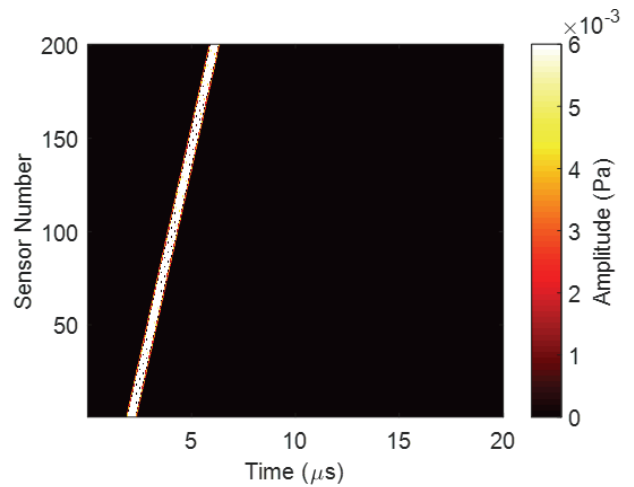
(b)



(b)



(c)



(c)

Fig. 7 B-scan images at $x=150$
(a) 1%, (b) 0.1%, (c) 0.01%

Fig. 8 Ensemble averaged B-scan images
(a) 1%, (b) 0.1%, (c) 0.01%

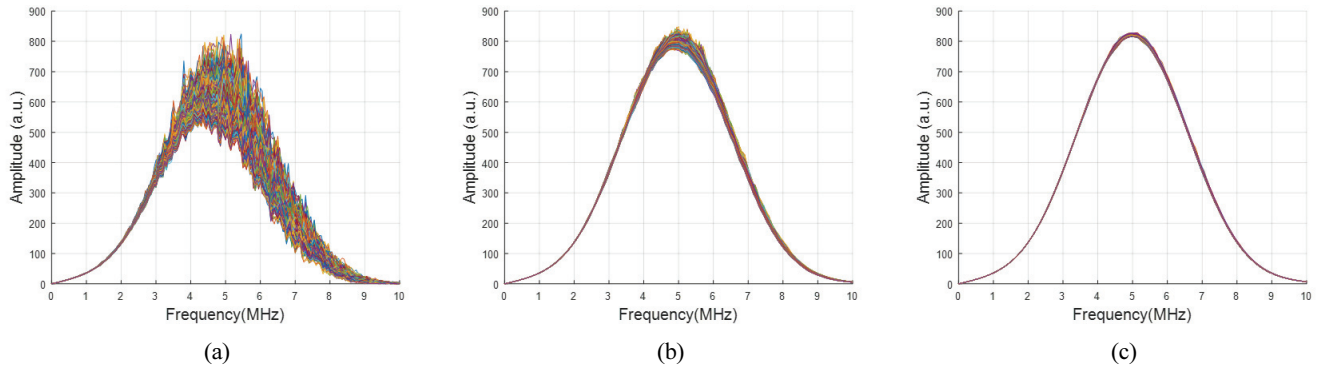


Fig. 9 Frequency spectrum of total ensemble averaged signals
(a) 1%, (b) 0.1%, (c) 0.01%

Table 1 Numerical simulation details

Simulation Parameter	Value	Simulation Parameter	Value
CFL	0.1	Input frequency	5 MHz
Number of grids (N_x)	300	Input type	3 cycles tone burst
Number of grids (N_y)	300	Wave type	Plane wave
Length of grid	2.058 × 2.058 mm	Number of sensors	60000 (200 × 300)
Total area	4.24 mm ²	PMLSize	[20,0]
dx	6.86 μm	PMLAlpha	2 N_p/m
dy	6.86 μm	time end	20 μs
dt	2 ns	$\rho_{fine\ dust}$	2650 kg/m ³
ρ_{air}	1.2754 kg/m ³	c_{air}	343 m/s

선 과정을 Fig. 5에 나타내었다.

평면파가 미세먼지가 포함된 매질을 통과함에 따라 미세먼지의 반경으로 파동이 산란되는 과정을 살펴볼 수 있다. 미세먼지의 부피비에 따라서 다중 산란의 정도차를 확실히 확인할 수 있으며, 해석 시간은 각 모델 평균 2분 36초 이었다.

3.1 시뮬레이션 결과 분석

시뮬레이션 해석 결과로써 60000개 센서로부터 수집한 신호 분석을 수행하였다. Fig.6은 센서로부터 수집한 대표적인 신호의 예이다. 신호는 크게 매질을 통과하면서 파동의 주기와 위상이 일정한 간섭 파동(coherent wave)과 다중 산란으로 발생하는 불규칙한 진폭과 위상을 가지고 있는 비간섭 파동(incoherent wave)로 나눌 수 있다.

Fig.7는 시뮬레이션 공간 x축 150열에 놓여있는 200개의

Table 2 Results of numerical simulation (5MHz, $\sigma=1.37\ \mu\text{m}$)

Volume fraction	0.01 %	0.1 %	1 %
$\alpha (N_p/mm)$	0.0038	0.0236	0.2569
$l_s (mm)$	264.5243	42.3273	3.892
n_exact (1/mm ²)	2.12	21.25	212.5
n_calculate (1/mm ²)	2.78	17.24	187.62
error (n_exact - n_calculate)	-0.7	4.0	24.9

신호에 대한 신호누적 그래프(B-scan)이다. 그래프의 x축은 파동이 전달되는 시간(μs), y축은 센서 번호로써 가진원로부터 멀어질수록 숫자가 증가한다. z축은 신호의 진폭이며 밝은 색을 나타낼수록 상대적으로 높은 진폭을 의미한다. 미세먼지의 부피비가 증가함에 따라 다중 산란으로 발생한 비간섭 파동 또한 증가하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 8은 식 (2)와 같이 시뮬레이션 공간 x축에 대하여 평균합산을 300회 수행한 신호의 B-scan 그래프이다. 평균합산을 통하여 규칙적으로 전달되는 가간섭 파동을 뚜렷하게 확인할 수 있는 반면, 불규칙한 비간섭 파동은 대부분이 사라지는 것을 볼 수 있다.

3.2 신호처리

다중 산란이 발생하는 매질에서 파동이 센서의 첫 번째 위치(x_1)로부터 다음 센서의 위치(x_i)까지 전달되는 동안 발생하는 신호 진폭의 비율($A(w, x_i - x_1)$)은 주파수 도면에서 다음 식 (7)과 같이 정의 될 수 있다.

$$A(w, x_i - x_1) = A(w) e^{-\alpha(x_i - x_1)} \quad (7)$$

주파수별 신호의 감쇠율(α)은 식 (7)에 로그를 취하여 식 (8)을 유도한 것과 같이, 각 신호의 진폭을 첫 번째 신호의 진

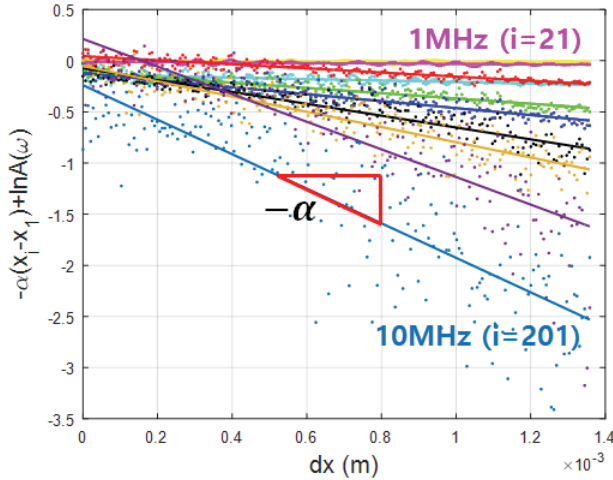


Fig. 10 Example of attenuation measurement using Eq.(8) at volume fraction 1%

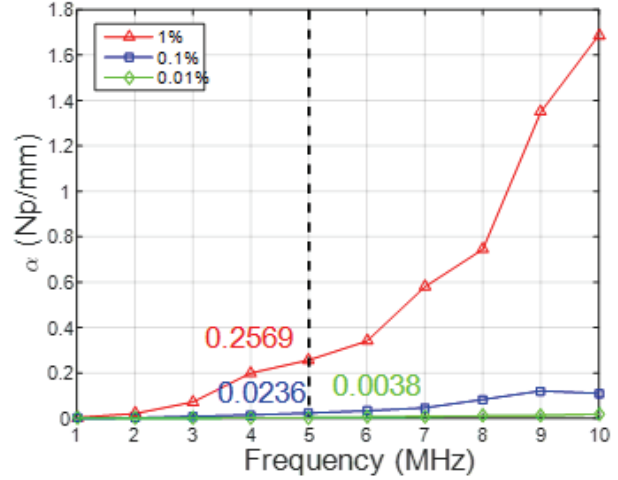


Fig. 11 Derived attenuation (marked at 5 Mhz)

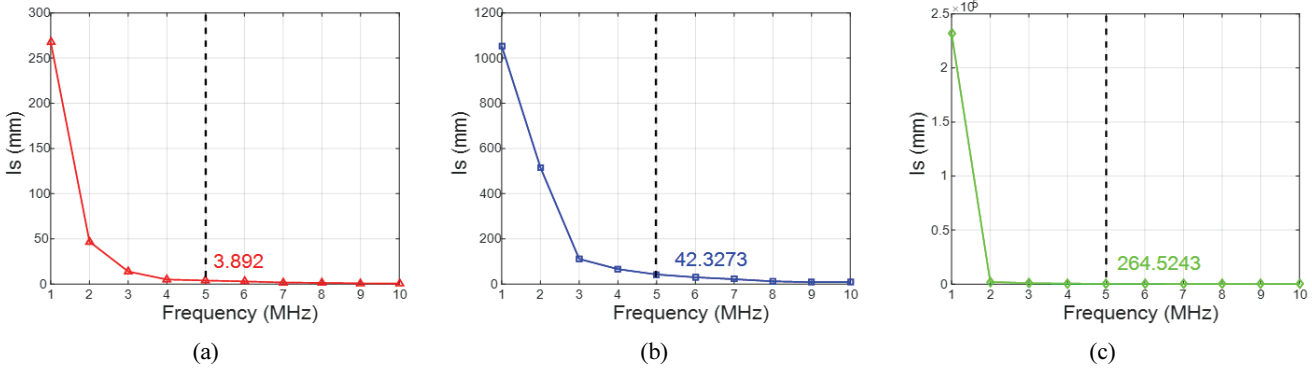


Fig. 12 Derived mean free path (marked at 5 Mhz)
(a) 1%, (b) 0.1%, (c) 0.01%

폭으로 나눈 값에 대한 기울기로써 구할 수 있다.

$$\ln A(w, x_i - x_1) = -\alpha(x_i - x_1) + \ln A(w) \quad (8)$$

상기와 같이 감쇠율을 구하기 위해서 평균합산 된 모든 신호들을 푸리에 변환을 통하여 주파수별 진폭을 계산하였다 (Fig. 9). 1%의 미세먼지 부피비의 경우 주파수가 증가함에 따라서 뚜렷한 진폭의 감쇠를 보이는 반면, 0.01% 부피비의 경우 매우 미세한 진폭의 감쇠를 확인할 수 있다. 주파수 도면의 진폭을 식 (8)과 같이 계산하여 그 기울기를 정의하는 과정을 Fig. 10에 나타내었다. 선형 최소자승법(linear least square fit)을 사용하여 감쇠율을 계산하였다.

3.3 알고리즘 검증

본 연구에서 제안한 초음파 다중 산란 기반 미세먼지 농도

측정의 알고리즘을 검증하기 위해서 감쇠율과 평균 자유 경로를 다음 Figs. 11과 12에 각각 도출하였다. 주파수가 증가할수록 파장도 작아지기 때문에 미세먼지에 대한 감쇠율이 증가함을 확인할 수 있으며, 그 변화 정도는 부피비에 비례함을 알 수 있다. 식 (4)와 같이 감쇠율의 역수로 평균 자유 경로를 정의하였으며 미세먼지 부피비가 작을수록, 주파수가 작을수록 큰 값을 갖는 것을 확인할 수 있다.

3.3.1 시뮬레이션 기반 미세먼지 농도 정확도

가진 신호의 중심 주파수인 5MHz를 대상으로 미세먼지 농도 예측에 대한 결과를 Table 2에 나타내었다. 미세먼지 개수 밀도는 2-D 시뮬레이션 공간 대비 각 부피비에 따른 개수로 계산되어 ($1/mm^2$)의 단위이다. 산란 면적(σ_T)은 2-D 시뮬레이션에서 (mm)의 단위를 갖는 산란 반경으로 치환되며, 본 연구에서는 미세먼지로 설정된 그리드의 사각형 면적을 등

가원형면적으로 환산한 후 계산된 지름 보다 5배 작은($1.37 \mu\text{m}$)으로 가정하였다. 각 부피비에 해당하는 오차는 개수밀도 단위 최소 0.7, 최대 24.9로 계산되었다.

3.3.2 산란 반경의 도출

초음파 다중 산란 모델 시뮬레이션을 통하여 제안된 알고리즘의 적용가능성을 확인할 수 있었다. 실험적으로 규명할 수 있는 감쇠율과 평균 자유 경로에 비하여 가장값인 산란 반경은 조금 더 이론적으로 보완할 필요가 있다. Fig. 13은 초음파 다중 산란의 지배방정식인 식 (1)의 개념도이다. 미세먼지와 같은 산란자를 원형으로 가정했을 때 그 지름(2a)으로 산란 반경을 정의하고, 산란자로부터 새로운 초음파의 파동을 정의한다. 하지만 미세먼지의 경우 Fig. 14에서 나타낸 것처럼 완벽한 원형의 모양을 가지고 있지 않으며 그 크기도 불균일함을 확인할 수 있다. 또한 그 표면은 더욱 불균일하여 초음파의 산란 반경에 대한 정의는 현재 활발히 진행되고 있는 미세먼지의 형상 및 특성 분석을 통하여 통계학적으로 이루어져야 할 것이다 (Salma et al. 2002, Liao et al. 2004, Lonati and Giugliano 2005, Mariko et al. 2009, Buonanno et al. 2010, Estokova et al. 2010, Lee et al. 2012, Song et al. 2015, Kuuluvainen et al. 2016, Wallace et al. 2019)

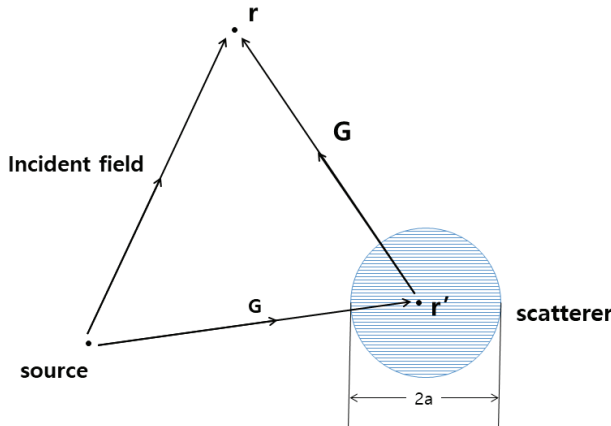


Fig. 13 Schematic diagram of ultrasonic multiple scattering

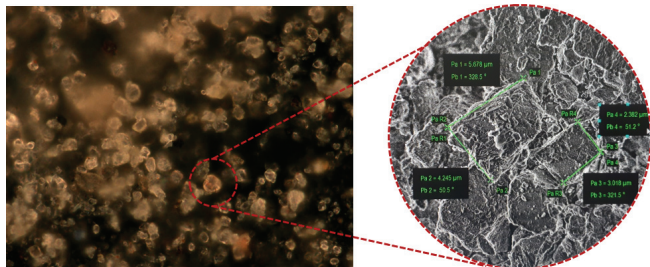


Fig. 14 Cross-section of fine dust captured by optical microscope(left) and SEM(right)

후속연구로 산란반경, 습도, 풍속, 주파수에 따른 변수연구를 통하여 주파수별 산란 반경 및 산란 면적을 정의하고 제안된 알고리즘의 정확도를 증대시키고자 한다. 습도는 기존 광산란식 기법에 가장 영향을 주는 요인이며, 풍속의 경우 신호 측정의 정확도에 영향을 미칠 수 있는 요인으로써 실험을 통하여 그 영향을 확인하고자 한다. 초음파 신호는 풍속에 따라 신호 잡음이 혼합되게 된다. 신호 잡음이 기존 신호와 섞이게 되면 신호 분석에 영향을 미친다. 따라서 풍속은 미세먼지 측정 정확도를 낮추는 요인으로 작용될 가능성이 높다. 주파수의 경우는 공기 중 미세먼지의 산란반경에 직접적인 영향을 미치게 됨으로 실험 변수로 추가했다. 개발된 알고리즘에 근거하여 평균자유경로와 주파수의 관계를 측정하고 미세먼지 농도를 계측하기 위한 최적화를 수행하고자 한다.

4. 결론

본 연구에서는 구조물의 유지관리를 위한 미세먼지의 측정법을 보완하기 위하여 초음파 산란 기법을 제안하였다. 대기 중 미세먼지를 모델링 하였으며, 탄성과 기반의 유한차분법 시간 이력 해석을 통하여 제안된 알고리즘을 검증하였다. 시뮬레이션 해석을 통하여 신호처리 기법 및 다음의 결론과 같이 미세먼지의 농도 예측에 사용될 수 있음을 보였다.

- (1) 초음파 다중 산란 이론 분석을 통하여 미세먼지 농도에 대한 예측 알고리즘을 감쇠율, 평균 자유 경로, 산란 반경의 관계식으로 제안하였다.
- (2) 2-D 시뮬레이션을 통하여 제안된 알고리즘을 검증한 결과 개수밀도 단위 최소 0.7, 최대 24.9의 오차를 보였으며, 산란 반경의 정확한 도출을 통하여 오차율을 개선할 수 있음을 확인하였다.
- (3) 실험적으로 얻을 수 있는 초음파 신호로부터 주파수별 감쇠율과 평균 자유 경로를 도출해내는 신호처리 과정을 제안하였다.
- (4) 미세먼지의 부피비가 작을수록 평균 자유 경로가 증가함을 확인하였으며, 이는 실제 실험에서 초음파 계측에 대한 근거로 활용할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통기술촉진연구사업의 연구비지원(과제번호 19CTAP-C152983-01)에 의해 수행되었습니다.

References

1. Hyun, J. H., Kim, H. J.(2019), Development of Fine Dust Reduction Technology on Roadsides Using Functional Construction Materials, *Proceedings of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 23(2), 273.
2. Kang, T. W., Park, G. L.(2019), A Case Study on the Environmental Impact by the Tire and Road Wear Particles, *Proceedings of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 23(2), 276.
3. 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.
4. Kim, Y. K., Ahn, H. R., Lee, S. W.(2019), Fundamental Study on the Fixation Method of Particulate Matter Precursor Reduction Material for Existing Concrete Structures, *Proceedings of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 23(2), 275.
5. Kim, S. D., Kim, C. H., Hwang, U. H.(2008), A Study on the Particles Density Estimation in Seoul Metropolitan, *Journal of Environmental Health Sciences*, 34(2), 131-136.
6. Kim, E. Y., Seo, S. J., Kim, S. M., Jung, S. W., Lee, Y. M., Oh, S. H., Park, G. T., Kim, K. H., Kim, J. W., Hong, Y. D., Lee, T. H., Bae, M. S.(2018), Determination of Hourly Density Using Real Time PM2.3 Mass and Volume Concentrations at the Road Side-OPS Correction Based on Optical Absorption of eBC, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 34(6), 865-875.
7. Kim, S. J., Kang, H. S., Son, Y. S., Yoon, S. L., Kim, C. J., Kim, G. S., Kim, I. W.(2010), Compensation of Light Scattering Method for Real-Time Monitoring of Particulate Matters in Subway Stations, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 26(5), 533-542.
8. 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.
9. 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.
10. Derode, A., Tourin, A., Fink, M.(2001), Random Multiple Scattering of Ultrasound. I. Coherent and Ballistic Waves, *Physical Review E*, 64, 36605.
11. Chekroun, M., Le Marrec, L., Abraham, O., Durand, O., Villain, G.(2009), Analysis of Coherent Surface Wave Dispersion and Attenuation for Non-destructive Testing of Concrete, *Ultrasonics*, 49(8), 743-751.
12. Firouzi, K., Cox, B. T., Treeby, B. E., Saffari, N.(2012), A first-order k-space model for elastic wave propagation in heterogeneous media, *Journal of the Acoustical Society of America*, 132(3), 1274-1283.
13. Salma, I., Dal Maso, M., Kulmala, M., Zaray, G.(2002), Modal Characteristics of Particulate Matter in Urban Atmospheric Aerosols, *Microchemical Journal*, 73, 19-26.
14. Liao, C. M., Huang, S. J., Yu, H.(2004), Size-dependent Particulate Matter Indoor/Outdoor Relationships for a Wind-induced Naturally Ventilated Airspace, *Building and Environment*, 39(4), 411-420.
15. Lonati, G., Giugliano, M.(2005), Size Distribution of Atmospheric Particulate Matter at Traffic Exposed Sites in the Urban Area of Milan(Italy), *Atmospheric Environment*, 40, S264-S274.
16. Mariko, O. O., Fumio, S., Mitsutoshi, T.(2009), Distinguishing Nanomaterials Particles from Background Airborne Particulate Matter for Quantitative Exposure Assessment, *Journal of Nanopart Research*, 11(7), 1651-1659.
17. Buonanno, G., Morawska, L., Stabile, L., Viola, A.(2010), Exposure to Particle Number, Surface Area and PM Concentrations in Pizzerias, *Atmospheric Environment*, 44(32), 3963-3969.
18. Estokova, A., Stevulova, N., Kubincova, L.(2010), Particulate Matter Investigation in Indoor Environment, *Global Nest Journal*, 12(1), 20-26.
19. Lee, Y. K., Lee, K. J., Lee, J. S., Shin, E. S.(2012), Regional Characteristics of Particle Size Distribution of PM10, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 28(6), 666-674.
20. Song, Y. A., Maher, B. A., Li, F., Wang, X., Sun, X.(2015), Particulate Matter Deposited on Leaf of Five Evergreen Species in Beijing, China: Source identification and size distribution, *Atmospheric Environment*, 105, 53-60.
21. Kuuluvainen, H., Ronkko, T., Jarvinen, A., Saari, S., Karjalainen, P., Lahde, T., Pirjola, L., Niemi, J., Hillamo, R., Keskinen, J.(2016), Lung Deposited Surface Area Size Distributions of Particulate Matter in Different Urban Areas, *Atmospheric Environment*, 136, 105-113.
22. Wallace, L., Jeong, S., Rim, D.(2019), Dynamic Behavior of Indoor Ultrafine Particles (2.3-694nm) due to Burning Candles in a Residence, Indoor air, 1-10.Stations, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 26(5), 533-542.

Received : 10/17/2019

Revised : 11/27/2019

Accepted : 12/30/2019

요 지: 본 연구에서는 건설 현장에서 발생하는 미세먼지의 정확한 측정을 위한 새로운 개념의 알고리즘을 제안하고 검증한다. 기존 측정법의 한계를 보완하기 위하여 초음파 산란 기반 측정법을 제안하였으며, 유한 차분법을 통하여 알고리즘의 활용 및 그 정확성을 검증하고자 하였다. 미세먼지와 같은 다중 산란을 일으키는 현상에 대하여 수학적 모델링을 수행하였고 신호의 감쇠율, 평균 자유 거리, 산란 반경으로 미세먼지의 단위 밀도를 예측할 수 있는 알고리즘을 도출하였다. 2-D 시간 이력해석을 통하여 미세먼지 부피비에 따라 알고리즘을 검증하였으며 신호 해석을 위한 신호처리 기법을 나타내었다. 해석 결과, 알고리즘의 오차는 개수밀도 단위 최소 0.7, 최대 24.9를 보였다. 오차율을 줄이기 위해 미세먼지의 산란 반경을 주파수별로 도출하여야 하는 추후 연구가 필요함을 토의하였다.

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