

# 초음파를 이용한 기체 유동장내 분진 모니터링

장경영#, 김주철\*, 김홍준\*, 황원호\*\*

## Particle Monitoring Using Ultrasound in the Gas Flow

Kyung-young Jhang#, Joo-chul Kim\*, Hong-jun Kim\*, and Won-ho Hwang\*\*

### ABSTRACT

The particle amount monitoring technique using ultrasound is proposed to determine the proper maintenance time of the filter in the supply process of pure gas in the unit of oxygen plant. There are advantages that it is adaptable in high temperature and high pressure, and it is not disturbed by being exposed in the gas flow, and it can be implemented very economically. The applicability of the ultrasonic technique is pre-studied through the theoretical analysis for the dependency of attenuation of ultrasonic wave on the particles in the gas flow. For the purpose, absorptive, scattering and dispersion models are considered, and the attenuation by absorption and the change rate of the propagation speed are calculated for the specific range of particle size and the ultrasonic wave frequency. It was expected by simulation that the absorptive attenuation by particles was the most sensitive to the change of particle amount. The experimental result showed high correspondence with the theoretical expectation so that this ultrasound attenuation measurement was proved to be highly effective for monitoring the amount of floating particles in the gas flow.

**Key Words** : Ultrasound (초음파), Particle Monitoring (분진 모니터링), Absorptive Attenuation (흡수 감쇠), Scattering (산란)

### 1. 서론

제철소의 산소공장등에서 순수기체의 제조공정에 사용되는 흡착기의 경우 그 사용회수가 증가하면 흡착기의 엠에스 겔(molecular sieve gel)이 열충격과 압력충격등으로 인해 파손되어 분진의 형태로 배출되는데 이것은 밸브고착, 관로 폐쇄 등 공정에 직접적인 문제를 발생시킨다. 현재는 흡착기

후단에서 공기 중의 CO<sub>2</sub> 함유량을 측정하여 흡착기의 정비시점을 예측하고 있지만, CO<sub>2</sub> 분석기만으로 엠에스 겔의 파손상태 및 이에 따른 분진의 배출량을 정확히 예측하여 적절한 시기에 정비하는 것은 불가능한 실정이다.

이처럼 산업 현장의 관로에서 발생하는 분진은 여러 공정상에 직접적인 영향을 미치게 되며, 따라서, 발생하는 분진의 양을 정확히 평가하여 적절한 정비 및 교체 시기를 알아내기 위한 계측

접수일: 2003년 5월 12일; 게재승인일: 2004년 6월 11일

# 교신저자: 한양대학교 기계공학부

E-mail kyjhang@hanyang.ac.kr Tel. (02) 2290-0434

\* 한양대학교 정밀기계공학과 대학원

\*\* 포항산업과학연구원(RIST) 기전연구팀

수단이 필요하고, 무엇보다 직접적인 문제를 발생시키는 특정 분진의 배출량을 모니터링 할 수 있는 기법이 요구된다.

분진의 모니터링을 위하여 일반적으로 알려진 방법으로는 열량계를 이용한 방법(calorimetric), 복사전파를 이용한 방법(radio-metric), 광학적 원리(optical)에 기반한 방법 등이 있다.<sup>1</sup> 그러나 이러한 방법들은 고온과 고압, 매질과의 접촉 등 사용환경 요구 조건을 충족시키지 못한다. 또한 이들 대부분이 대기오염 물질을 모니터링할 목적으로 개발된 것이기 때문에 샘플을 포집한 후 분석하는 기술이 주종을 이루며, 실시간으로 모니터링을 할 수 있는 기술은 거의 없는 실정이다.

상시 모니터링으로 사용할 수 있는 방법으로는 광학 투과도 방법 또는 분광식 방법을 예로 들 수 있다. 그러나 이러한 방법들도 광학계 자체가 분진에 노출될 경우 분진의 부착 등으로 장비의 측정 신뢰도가 크게 저하하는 등의 현장 적용상 문제점이 발생하게 된다.

본 논문에서는 이러한 문제를 극복하기 위한 기술로서 초음파를 이용하는 방법을 제안한다. 이것은 초음파가 고온, 고압의 환경에 적용될 수 있고, 분진에의 노출에도 큰 영향을 받지 않는다는 장점이 있기 때문이며, 또한 다른 방법들에 비해 장치의 가격이 저렴하기에 경제적인 측면에서도 우위를 점할 수 있을 것으로 기대되기 때문이다.

제안하는 방법의 기본개념은 분진에 의한 초음파의 진폭감쇠와 전파속도의 변화를 측정함으로써 분진량의 변화를 알아내고자 하는 것이며, 이것은 기존의 입자에 의한 초음파의 특성 변화에 대한 연구결과로부터 충분히 예견할 수 있다.<sup>2,6</sup> 다만, 초음파의 어떤 특성이 검출하고자 하는 분진에 가장 민감하게 변화하는지에 대해 면밀히 검토할 필요가 있다. 본 연구에서는 이론분석 및 시뮬레이션을 통하여 흡착기 겔의 분진에 의해 초음파의 진폭과 전파속도가 어떻게 변화하는지를 분석하였으며, 실험을 통하여 제안하는 방법이 분진량 변화를 모니터링 하는데 유효한지를 검증하고자 하였다.

## 2. 이론적 배경

여기서는 분진이 초음파의 진폭감쇠와 전파속도 변화에 어떻게 영향을 미치는지를 이론적으로 분석하기 위해 고전적으로 알려진 흡수감쇠와 산

란감쇠, 그리고 분산모델을 이용하였다.

### 2.1 흡수 감쇠

흡수 감쇠는 점성에 의한 흡수와 열전도에 의한 에너지의 흡수에 의해 발생된다. 점성에 의한 분진의 운동에 따른 이완 시간을 나타내는  $\tau_d$  는 식(1)과 같이 정의된다.<sup>6</sup>

$$\tau_d = \frac{2}{9} \frac{a^2}{v_0 (\rho_0 / \rho_p)} \quad (1)$$

여기서,  $a$  는 분진의 반경,  $v_0$  는 동점성계수,  $\rho_0$  는 매질 (즉, 반송유체)의 밀도,  $\rho_p$  는 부유입자의 밀도이다.

또한, 열전도에 의한 이완 시간을 나타내는  $\tau_t$  는 식(2)와 같이 정의된다.

$$\tau_t = \frac{1}{3} \frac{a^2}{\chi \delta} \frac{C}{c_{p0}} = \frac{3C}{2c_{p0}} \text{Pr} \tau_d \quad (2)$$

여기서,  $\chi$  는 열확산도(  $=k_0 / (c_{p0} \times \rho_0)$  ),  $\delta$  는 부유입자에 대한 반송 유체의 밀도비,  $C$  는 부유입자의 비열,  $c_{p0}$  는 반송유체의 정압비열이며,  $k_0$  는 열전도계수, Pr 은 Prandtl number 로  $\text{Pr} = \mu c_{p0} / k_0$  이고,  $\mu$  는 점성계수이다.

따라서 점성과 열전도로 인해 발생하는 분진에 의한 초음파의 감쇠계수는 최종적으로 식(3)으로 주어진다.<sup>(6)</sup>

$$\frac{\bar{\alpha}}{C_m} = \frac{1}{2} \frac{\omega \tau_d}{1 + \omega^2 \tau_d^2} + \frac{1}{2} (\gamma - 1) \frac{C}{c_{p0}} \frac{\omega \tau_t}{1 + \omega^2 \tau_t^2} \quad (3)$$

여기서,  $\bar{\alpha}$  는 파장당 감쇠계수,  $\omega$  는 주파수,  $\gamma$  는 반송유체의 비열비이다. 또한  $C_m$  은 식(4)와 같이 표현되는 반송유체의 단위체적에 포함된 부유입자의 질량농도로서 반송유체의 질량에 대한 부유입자의 질량비를 의미한다.

$$C_m = \frac{4}{3} \pi a^3 n \rho_p / \rho_0 \quad (4)$$

여기서,  $n$  은 반송유체의 단위체적당 부유입자의 개수이다. 식(3)은 분진과 유체의 물성이 일정하고 초음파의 사용 주파수가 결정되어 있다고 할 때, 감쇠계수가 분진의 양  $C_m$  에 비례함을 의미

한다.

### 2.2 산란 감쇠

분진의 크기(수십 $\mu\text{m}$ )는 일반적으로 공기중 초음파의 파장(수 $\text{mm}$ )보다 훨씬 작다. 이와 같이 초음파의 파장이 분진의 크기보다 큰 경우, 분진의 형상을 구로 가정할 때 분진에서 산란되는 초음파의 반경 방향 세기는 식 (5)와 같이 표현된다.<sup>7</sup>

$$I_m \approx I_o \frac{a^2}{9} \frac{(2\pi)^2}{r^2} \left(\frac{a}{\lambda}\right)^4 \left(1 + \frac{3}{2} \cos \theta\right)^2 \quad (5)$$

여기서,  $I_o$  는 입사파의 세기,  $\lambda$  는 초음파의 파장,  $r$  은 구면중심에서 측정지점까지의 거리,  $\theta$  는 구면중심에서 측정지점까지의 직선과 파동의 입사 방향이 이루는 각도이다.

결과적으로, 산란된 초음파의 세기는  $\lambda^{-4}$  에 비례한다. 따라서 파장이 짧을수록 산란파의 세기가 커진다. 또한, 파장이 일정한 경우 산란파의 세기는 분진 반경의 6 승에 비례하여 커진다. 산란파의 세기가 증가하면 투과파의 세기는 감소하므로 투과파의 감쇠계수는 커진다. 따라서, 투과파의 감쇠 정도를 측정하면 산란파의 세기변화를 알 수 있고, 이로부터 분진의 크기와 양의 변화를 알 수 있게 된다.

### 2.3 분산 특성

부유물이 들어 있는 유체 속을 전파하는 초음파는 일반적으로 순수체 속을 전파하는 초음파와는 다른 전파속도를 갖는다. 그 차이는 주로 반송유체의 기계적, 열역학적 성질이 부유입자에 의해서 달라지기 때문이다. 또한, 전파속도의 변화는 주파수에 의존한다. 부유물 입자의 드래그(drag)가 스토크법칙을 따르고, 열전달이 전도에 의하는 경우에는 주파수에 따른 전파속도의 변화는 다음과 같다.<sup>8</sup>

$$\left(\frac{c_o}{c_s}\right)^2 = 1 + C_m \frac{1}{1 + \omega^2 \tau_d^2} + (\gamma - 1) \frac{C_m C}{c_{p0}} \frac{1}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (6)$$

여기서,  $c_o$  는 순수체 속에서의 초음파의 전파속도,  $c_s$  는 부유물이 들어있는 유체에서의 전파속

도이다. 식(6)은 식(3)과 마찬가지로 분진과 반송유체의 물성이 일정하고 초음파의 사용주파수가 정해져 있을 때 속도변화는  $C_m$  에 의존함을 나타낸다.

## 3. 시뮬레이션

### 3.1 시뮬레이션의 조건

여기서는 앞에서 거론된 초음파의 흡수, 산란, 분산 특성이 대상 분진에 의해 얼마나 영향을 받는지를 정량적으로 평가하기 위해 시뮬레이션을 수행하였다. 대상 분진으로는 제철소의 산소공장 관로에 설치되어 있는 흡착기의 주요 성분인  $\text{Al}_2\text{O}_3$  와  $\text{SiO}_2$  의 혼합물을 고려하였으며, Table 1 은 각각의 물성치를 나타낸다.<sup>9</sup>

한편, 반송유체는 공기이며 이에 대한 물성치를 Table 2 에 나타내었다.<sup>10</sup>

Table 1 Approximate physical properties of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  and  $\text{SiO}_2$

	비열 $C(\text{kJ/kgK})$	밀도 $\rho(\text{kg/m}^3)$
$\text{Al}_2\text{O}_3$	0.26	3700
$\text{SiO}_2$	0.22	2200
$\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ (Composition $\text{Al}_2\text{O}_3$ 10%)	0.25	2300

Table 2 Approximate physical properties of Air

물성치	공기
비열비 $\gamma$	1.4
정압비열 $c_{p0}$	1.005 kJ/kgK
밀도 $\rho_0$	1.23 kg/m <sup>3</sup>
점성계수 $\mu$	1.79× 10 <sup>-5</sup> Ns/m <sup>2</sup>
동점성계수 $\nu_0$	1.46× 10 <sup>-5</sup> m <sup>2</sup> /s
Prandtl number Pr	0.708
열전도계수 $k_0$	0.026 Wm/K

공기에서의 음속은 후술하는 실험환경을 고려하여 343 m/s 로 하였다.

분진의 크기는 Fig.1 과 같은 실제 분진의 전자현미경 사진으로부터 직경이 10~30  $\mu\text{m}$ 인 것으로 가정하였으며, 사용 주파수는 공중 초음파임을 감안하여 20kHz~300kHz 범위에서 고려하였다.

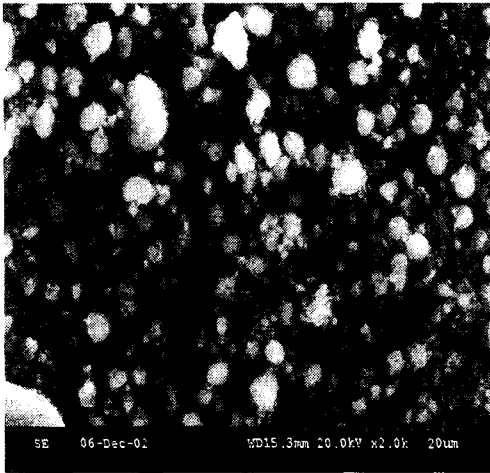


Fig. 1 SEM image of the particles used in experiments

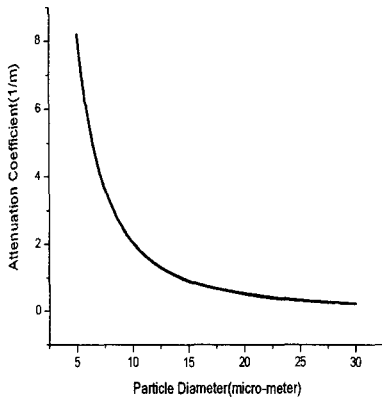


Fig. 2 Absorptive attenuation coefficient with respect to particle diameter ( $f=50\text{kHz}$ ,  $C_m=1$ )

### 3.2 흡수 감쇠

Fig. 2 에서는 주파수가 50kHz 일때, 식 (3)으로부터 계산한 분진크기의 변화에 따른 흡수감쇠계

수의 변화를 보여주고 있다. 분진의 양은  $C_m=1$  로 가정하였다. 분진의 크기가 작을수록 감쇠가 커짐을 알 수 있다. 한편, 주파수가 커질수록 흡수에 의한 감쇠계수는 증가하지만 비교적 높은 주파수에서는 큰 차이를 나타내지는 않는다. 이는 식(3)으로부터 알 수 있는데, 우변에서  $\omega\tau_d \gg 1$  이고,  $\omega\tau_i \gg 1$  로 가정하고(실제로  $\omega\tau_d, \omega\tau_i$  는 10 이상의 값을 갖는다), 좌변의 파장당 감쇠계수  $\bar{\alpha}$  를 일반적인 감쇠계수로 나타내기 위해  $\bar{\alpha} = c_0\alpha/\omega$  의 관계식을 이용하면, 식(3) 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{c_0\alpha}{C_m\omega} = \frac{1}{2\omega} \left( \frac{1}{\tau_d} + \frac{C}{c_{p0}} \frac{(\gamma-1)}{\tau_i} \right) \quad (7)$$

이때, 양변의  $1/\omega$  은 상쇄되며,  $\alpha$  는 주파수와 무관하게 된다는 것을 알 수 있다. 따라서, 흡수감쇠계수는 분진의 크기에 의해서만 좌우된다고 생각할 수 있다.

### 3.3 산란 감쇠

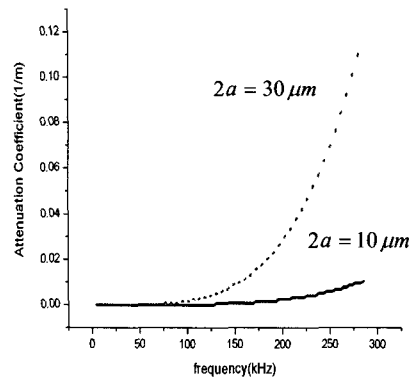


Fig. 3 Attenuation coefficient of scattered wave with respect to frequency ( $C_m = 1$ )

식 (5)는 분진 하나에 의해 산란된 초음파의 임의의 지점에서의 세기를 나타낸다. 식(5)를 이용하여 분진의 직경이 각각 10, 30  $\mu\text{m}$ 일 때 분진에 의해 산란되는 초음파의 세기를 0~ $2\pi$  사이의  $\theta$  에 대해 적분하고 여기에  $C_m=1$  인 경우에 해당하는 분진의 개수  $10^{18}$  개를 곱하여  $I_{sn}/I_o$  를 구한

다. 그리고  $I_{sn} / I_o = e^{-2\alpha x}$ 의 관계로부터  $\alpha$ 를 구한다. 여기서  $x$ 는 후술하는 실험조건에서의 초음파 전파거리인 0.3m로 한다. Fig.3은 이러한 계산을 20kHz~300kHz까지의 주파수대역에 대해 수행하여 얻은 결과이다. 높은 주파수에서 산란강도가 커진다는 것을 알 수 있다.

따라서, 산란에 의한 투과 초음파의 진폭감쇠를 계산하기 위해서 모든 방향으로의 산란성분과 흡수감쇠에서와 동일한 분진량을 고려하여 계산한 결과, 100kHz 이하에서는 산란에 의한 초음파의 세기감소율이 흡수감쇠에 비해 5% 이하로 매우 미약하며 실험에서 사용된 50kHz 대역에서는 산란에 의한 감쇠가 거의 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 이 결과는 본 연구의 대상이 되는 기체유동장내 분진에 의한 초음파 감쇠의 주원인이 분진에 의한 에너지 흡수임을 의미한다. 따라서 후술되는 실험결과의 분석에서는 흡수감쇠 효과만을 고려하기로 한다.

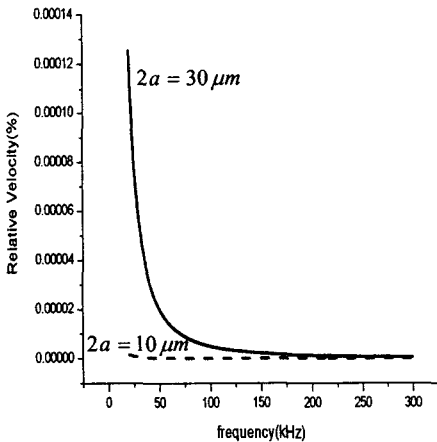


Fig. 4 Dispersion of ultrasonic wave by particle ( $C_m = 1$ )

### 3.4 분산 특성

다음으로 식 (6)으로부터 분진에 의해 초음파의 속도가 변하는 분산특성을 구할 수 있다. Fig.4는 분진의 직경이 각각 10, 30  $\mu\text{m}$ 일 때 주파수에 따른 분산특성을 계산한 결과이다. 결과는, 분진이 있을 경우 음파의 속도가 변하는 비율을 분진이 없을 때와 비교하여 백분율로 나타낸 것이며, 여기서  $C_m=1$ 이다. 그래프상에서 분진의 크기가 작을수록 그리고 주파수가 낮을수록 분산 특성이 두드러지

게 나타나는 것을 알 수 있다. 그러나, 20kHz 이상의 초음파 대역에서 전파속도의 변화는 매우 작아서 실제로 적용하기에는 용이하지 않을 것으로 생각된다. 예를 들어, 50kHz 초음파의 경우 직경 10  $\mu\text{m}$ 의 분진에 의한 음속의 변화율이 0.002%이다. 이것이 실제 음속변화를 측정하기 용이한 정도인 1%정도(6.86m/s)가 되기 위해서는  $C_m$  값이 500 정도 되어야 하는데, 이는 1 $\text{m}^3$  당 분진이 500kg 정도 포함되어 있어야 함을 의미한다. 이러한 분진량은 비정상적으로 많은 양이다. 또한 주파수가 높아지거나 분진크기가 커질수록, 속도의 변화량은 줄어들기 때문에 이러한 분산특성은 본 연구에서 유체중에 부유하고 있는 분진 변화에 이용하기는 힘들 것으로 예상되므로, 앞으로의 실험 및 분석에서 분산 특성은 고려하지 않는 것으로 하였다.

Table 3 Values of parameters

Diameter Parameter	10 $\mu\text{m}$	30 $\mu\text{m}$
$\tau_d$	6.806E-4 [s]	6.4E-3 [s]
$\tau_t$	3.518E-4 [s]	3.91E-3 [s]
$\omega$	3.14E5 [rad/s]	3.14E5 [rad/s]
$\omega\tau_d$	213.7 [rad]	20.1 [rad]
$\omega\tau_t$	110.49 [rad]	12.28 [rad]
$\bar{\alpha} / C_m$	0.00224 [ $\text{m}^{-4}$ ]	0.00025 [ $\text{m}^{-4}$ ]
$\alpha / C_m$	2.05 [ $\text{m}^{-4}$ ]	0.229 [ $\text{m}^{-4}$ ]

### 3.5 분진에 의한 초음파의 감쇠

본 연구에서 목표로 하는 분진 측정 시스템에서 분진에 의한 초음파의 감쇠는 산란에 의한 원인보다 흡수에 의한 원인이 절대적으로 크기 때문에 식 (3)만으로 초음파의 감쇠 정도를 계산하였다. 50kHz의 초음파 주파수를 사용하고 분진의 평균직경을 각각 10, 30  $\mu\text{m}$ 이라 가정할 때, 이론 모델을 통하여 계산한 각 변수들의 값은 Table 3과 같다.

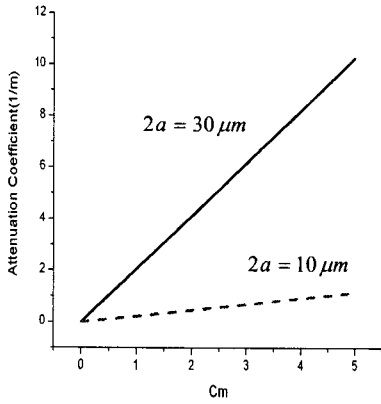


Fig. 5 Absorptive attenuation coefficient with respect to  $C_m$  ( $f=50\text{kHz}$ )

Fig. 5 는 분진의 평균직경이 각각 10, 30  $\mu\text{m}$ 일 때에 분진량  $C_m$ 의 증가에 따라 감쇠계수가 어떻게 변화하는지를 나타낸 것이다.  $C_m$ 의 증가에 따라 선형적으로 증가하는 것을 알 수 있다. 또한, 분진의 크기가 작을수록 영향을 더 크게 받는다는 것을 알 수 있다.

#### 4. 실험

##### 4.1 실험 장치 구성

실험장치는 먼저 분진이 공기 중에 부유하도록 하는 장치를 제작한 후, 함수 발생기에서 송신 트랜스듀서로 사인파를 보내고 수신 트랜스듀서를 통해 수신하여 오실로스코프를 거쳐 PC에서 신호를 분석하도록 구성하였다. Fig.6에서 장치의 구성도를 보이고 있다. 실험에 사용된 밀폐용기의 부피는 약  $0.353\text{m}^3$ 이며, 트랜스듀서 사이의 간격은 0.3m이다.

##### 4.2 실험 결과

Fig.7은 분진 증가에 따른 초음파 수신 신호의 상대진폭 변화를 나타내고 있다. 실험 장치에 투입한 분진량이  $100\text{cm}^3$ 을 넘을 때부터 각 실험마다의 편차가 생기지만, 전체적인 감소 경향은 앞서 계산한 이론 모델의 시뮬레이션과 비슷한 결과를 보이고 있다. 실험은 각각의 분진량에 대해 5회 반복해서 실행하였다.

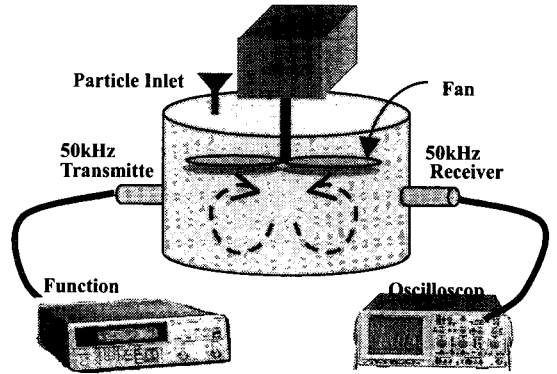


Fig. 6 Schematic diagram of equipmental setup

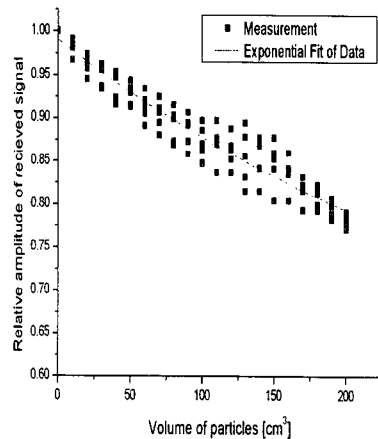


Fig. 7 Amplitude ratio obtained from peak-to-peak measurement when the volume of particles is increased

##### 4.3 이론결과와의 비교

분진  $10\text{cm}^3$ 은 약 5g의 질량을 갖는다. 따라서 실험에 사용한 분진량을  $C_m$ 으로 환산시킬 수 있다. 실험에서 분진  $200\text{cm}^3$ , 즉 100g을 투입하였을 때의 수신 강도비는 0.7798이었고, 이는  $C_m$ 으로 환산하여 2.2일 때에 해당한다. 이와 같은 방식으로 실험에 투입한 분진량을  $C_m$ 으로 환산하였으며, Fig.8에서는 실험데이터의 진폭비 평균값으로부터 감쇠계수를 구하여  $C_m$ 의 증가에 따라 나타내었다. 분진량이 증가함에 따라 감쇠계수가 거의 선형적으로 증가하는 것을 볼 수 있으며, 이는 Fig.

5의 시뮬레이션에서 예측한 결과와 일치한다. 이로부터 초음파의 감쇠계수를 측정함으로써 분진량의 변화를 평가할 수 있음을 검증할 수 있다.

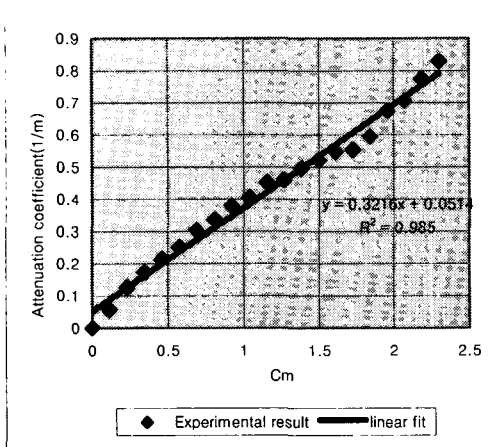


Fig. 8 Attenuation coefficient calculated from measured ultrasound intensity data as variation of  $C_m$

한편 그래프에서 추세선의 기울기로부터  $\alpha / C_m$  이 약 0.322 임을 알 수 있다. 이를 Fig.2에서 확인하여 보면 25  $\mu\text{m}$  정도 크기의 분진에 해당한다는 것을 알 수 있다. 이는 실험에서 사용한 분진의 직경이 10  $\mu\text{m}$ ~30  $\mu\text{m}$ 의 범위에 있으므로 타당한 결과라고 할 수 있다.

## 5. 결론

본 연구에서는 관로내 기체 유동장에 부유하고 있는 분진이 초음파의 특성에 어떤 변화를 주는지 알아보았으며, 그 결과를 분진량을 상시 모니터링하여 이상적으로 대량 발생시에 흡착기의 교체 등에 능동적으로 대처하는데 이용하고자 하였다. 여기서 모니터링 대상이 되는 분진은  $\text{Al}_2\text{O}_3$  와  $\text{SiO}_2$ 의 혼합물이고, 분진의 크기는 SEM 사진으로 분석한 결과 10~30  $\mu\text{m}$ 의 범위내에 있었다. 또한 분진에 민감할 것으로 예상되는 초음파 인자로 흡수감쇠, 산란감쇠, 전파속도의 분산을 선정하였으며, 이론 모델을 이용한 시뮬레이션과 실험적 검증을 수행하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 20kHz~300kHz 범위의 초음파 주파수에 대해서 시뮬레이션을 실시한 결과, 분산특성은 분진에

의해 거의 영향을 받지 않았으며, 또한 산란에 의한 감쇠는 그 정도가 미약한 것으로 나타났고, 감쇠의 주된 원인은 분진에 의한 초음파 에너지의 흡수에 의한 것이었다. 또한 분진량의 증가에 따라 흡수감쇠가 거의 선형적으로 증가함을 알 수 있었다.

2) 분진이 부유할 수 있도록 실험장치를 제작하여 실험을 실시하였으며 분진량의 증가에 따라 초음파 감쇠계수는 시험범위 내에서는 선형적으로 증가함을 확인하였다. 이는 시뮬레이션 결과가 일치하였으며, 이로부터 초음파 감쇠계수를 측정함으로써 분진량의 변화를 평가할 수 있음을 확인할 수 있었다.

3) 제안하는 방법은 분진의 크기를 알고 있고, 크기가 일정한 경우에는 분진량의 정량적인 평가까지도 가능하다. 그러나, 분진의 크기를 알지 못하고 분진크기가 다양한 경우에는 단순한 감쇠계수 측정만으로 절대적인 분진량을 평가하기는 곤란하다. 특히 분진의 크기가 일정하지 않은 경우에는 확률분포 등을 고려한 추가적인 검토가 필요할 것으로 사료된다.

그러나 본 연구의 목적은 분진의 절대량 측정보다는 흡착기의 파손에 따른 분진량의 갑작스러운 변화를 모니터링 하는데 있으며, 제안하는 방법은 이러한 목적을 위해 충분히 효과적으로 활용할 수 있는 방법으로 사료된다.

## 참고문헌

- Golinelli, E., Martinelli, P., Musazzi, S., Perini, U., Trespidi, F., Paganini, E., "Diffraction Based Optical Particle Size for On-line Monitoring in Hostile Environments of Low Concentration Particle Laden Flows," American Institute of Physics, Vol.72 No.6, pp.2796-803, 2001.
- Zipser, L., Franke, H., "Acoustic Sensor for Aerosol Measurements," pp. 517-19, 1998 IEEE Ultrasonic Symposium.
- Beckord, P., Luck, H. O., Hofelmann, G., "Fast Determination of the Particle Size of Aerosols and Hydrosols by Measuring the Attenuation of Sonic Waves," Journal of Aerosol Science, Vol.23, Supplement 1, pp. S317-320, 1992.

4. Chen, R. H., Mills, T. E., "Shape Determination of Aerosol Particles using an Acoustic Transducer," *Journal of Sound and Vibration*, Vol.32, pt3, pp. 652-658, 2000.
5. 實吉純一, 菊池喜充, 能本乙産, "超音波技術便覽," 日刊工業新聞社, 1991.
6. 이병호, "음향학Ⅱ," ㈜민음사, 1999.
7. Gubernatis, J. E., Domany, E. and Krumhansl, J. A., "Formal Aspects of the Theory of the Scattering of Ultrasound by Flaws in Elastic Materials," *J. Appl. Phys.*, 48(7), pp.2804, 1977.
8. Temkin, S. and Leung, C. M., "On the Velocity of Rigid Sphere in a Sound Wave," *J. Sound Vib.*, Vol.49, pp.75-92, 1976.
9. Bansal, Narottam, P., Doremus, R. H., "Handbook of Glass Properties," Academic Press, 1986.
10. Munson, Bruce R., Young, Donald F., Okiishi, Theodore H., "Fundamentals of Fluid Mechanics," John Wiley & Sons, 1997.