

## 미끄럼 영역에 있는 나노입자 프랙탈 응집체의 전기이동도 거동 특성

### Electrical Mobility Behavior of Nanoparticle Fractal Agglomerates in the Slip Regime

신 원 규\*

충남대학교 기계공학과

(2013년 2월 25일 접수, 2013년 3월 11일 수정, 2013년 3월 13일 채택)

Weon Gyu Shin\*

Department of Mechanical Engineering, Chungnam National University

(Received 25 February 2013, revised 11 March 2013, accepted 13 March 2013)

#### Abstract

For diffusion limited cluster agglomerates the ratio of the mobility radius to the radius of gyration  $R_m/R_g$  vs.  $N$  and the ratio of the mobility radius to the radius of primary particle  $R_m/a$  are determined using experimental data obtained with DMA-APM and tandem DMA over a range of Knudsen numbers extending into the transition region where there is a lack of data. It was found that in slip regime with the number of primary particles between 100 and 400, datapoints are found to be between the two asymptotic lines for the continuum and free molecular regimes as those datapoints are plotted in both  $R_m/R_g$  vs.  $N$  and  $R_m/a$  vs.  $N$ .

**Key words** : Fractal agglomerates, Slip regime, Mobility, Radius of gyration, Primary particle

#### 1. 서 론

프랙탈 응집체는 자기유사성 구조를 갖는 주요입자들의 클러스터이다. 이러한 프랙탈 응집체는 대기 중 또는 산업 공정 중에 발견되어질 수 있다. 그들음덩어리의 경우 종종 대기 에어로졸에 존재하며 주요 대기오염원 중 하나로 고려되고 있다 (Goo, 2011; Katrinak *et al.*, 1993). 또한,  $TiO_2$  또는 은 입자와 같

은 공업용 나노입자들도 응집체 형상을 가지고 있다 (Ku and Maynard, 2006; Pratsinis, 1998). 공정 중 작업자들의 이러한 공업용 나노입자들에 대한 노출로 인한 흡입은 작업자의 건강에 영향을 미칠 수 있다. 이러한 프랙탈 응집체의 물리적 특성 분석은 현재 에어로졸 연구의 중요한 분야라고 할 수 있으며 (Friedlander and Pui, 2004; Friedlander, 2000), 프랙탈 응집체의 거동에 대한 이해는 대기환경 모니터링을 위한 측정 장치의 정확도를 향상시키는데 기여할 수 있다.

프랙탈 응집체의 형상은 프랙탈 지수,  $D_f$ 로 묘사되어질 수 있다. 프랙탈 응집체의 주요입자의 개수( $N$ )는 식(1)과 같은 지수법칙을 이용하여 얻어질 수 있다.

\*Corresponding author.  
Tel : +82-(0)42-821-5647, E-mail : [wgshin@cnu.ac.kr](mailto:wgshin@cnu.ac.kr)

$$N = k_0 (R_g/a)^{D_f} \quad (1)$$

여기서  $k_0$ : 전인자,  $R_g$ : 회전 반경,  $a$ : 주요입자의 반지름. 응집체에 이용될 수 있는 다른 입자 크기 특성은 이동도 반지름,  $R_m$ 이 될 수 있으며, 이동도 반지름은 응집체와 동일한 이동도를 갖는 구형입자의 반지름으로 정의된다.

최근에 Sorensen (2011)은 과거 30년 동안 프랙탈 응집체의 이동도와 관련된 실험적 및 이론적 연구 내용들을 정리하였다. Sorensen (2011)의 연구는 주로 확산제한 클러스터 응집 (Diffusion Limited Cluster Aggregation, DLCA)에 의한 응집체에 집중되어 있다. 나노입자 응집체의 항력계수는 크누센수(Kn)의 범위에 따라 달라지며, 이 때 크누센수는 기체의 평균자유행로( $\lambda$ )와 입자의 이동도 반지름( $R_m$ )의 비로 정의된다. Sorensen (2011)의 자료분석에서 알 수 있듯이 미끄럼영역 ( $0.1 < Kn < 10$ )에 있는 프랙탈 응집체의 거동에 대한 연구는 연속 영역이나 자유분자영역에 비해 상대적으로 적게 연구되었다고 볼 수 있다.

미끄럼영역 ( $0.1 < Kn < 10$ )에 있는 프랙탈 응집체의 거동에 대한 연구는 연속 영역이나 자유분자영역에 비해 상대적으로 적게 연구되었다고 볼 수 있다. 미끄럼영역에서의 프랙탈 응집체의 거동에 관해서는 Shin *et al.* (2010, 2009a), Scheckman *et al.* (2009), 그리고 Gwaze *et al.* (2006)의 연구결과가 있다.

본 연구에서는 주로 Shin *et al.* (2010, 2009a)의 실험결과를 이용하여, 미끄럼영역에서의 나노입자 프랙탈 응집체의 거동을 Sorensen (2011)에서 논의한 자유분자영역 또는 연속영역과 같은 한계영역에서의 프랙탈 응집체의 거동과 비교분석하여 미끄럼영역에서의 프랙탈 응집체의 거동특성에 대한 이해를 높이고자 한다.

## 2. 이론적 배경

Sorensen (2011)은 DLCA 프랙탈 응집체와 관련된 기존의 연구결과를 정리하여 식 (2), (3)과 같이  $Kn \rightarrow 0$ 과  $Kn \rightarrow \infty$ 의 경우에 대한  $R_m$ 과  $N$ 의 관계에 대한 방정식을 제시하였다. 식 (1)로부터  $N$ 을 계산하기 위해서 이용된  $D_f$ 의 값은 1.78이고  $k_0$ 의 값은 1.3이다.

연속영역,

$$Kn \rightarrow 0, \quad R_m = aN^{0.46}, \quad N < 100, \quad (2a)$$

$$R_m = 0.65aN^{0.56}, \quad N > 100 \quad (2b)$$

자유분자 영역

$$Kn \rightarrow \infty, \quad R_m = aN^{0.46}, \quad \text{for all } N. \quad (3)$$

식 (2), (3)을 이용하여  $R_m/R_g$  vs.  $N$ 의 형태로 데이터를 표현한다면,  $N=100$  근처에서 연속영역과 자유분자영역의 값이 겹쳐짐을 알 수 있다.

본 연구의 관심 대상인 미끄럼영역에서의 프랙탈 응집체의 거동에 관해서는 연구결과가 한정되어 있다. Shin *et al.* (2010, 2009a), Scheckman *et al.* (2009), 그리고 Gwaze *et al.* (2006)과 같은 최근 연구결과를 살펴보고자 한다.

Shin *et al.* (2010, 2009a)은 그림 1과 같이 미분전기영동도분석기 (Differential Mobility Analyzer, DMA)-에어로졸입자 질량 분석기 (Aerosol Particle Mass analyzer, APM)와 일렬로 연결된 DMA (tandem DMA, TDMA)를 각각 이용하여 나노입자 응집체의 마찰계수를 전기이동도 지름 별로 측정하고 Meakin 모델 (Meakin *et al.*, 1989)을 이용하여 예측된 마찰계수와 비교하였다. Shin *et al.* (2010, 2009a)은 미끄럼 영역에 있는 은 입자 응집체를 대상으로 하였다. 그림 1과 같이 DMA를 이용하여 특정한 전기이동도지름을 가진 입자를 분류한 후 APM을 이용하여 입자의 질량을 측정하거나 TDMA를 이용하여 입자응집체를 구형으로 소결시킨 후 입자응집체의 체적을 측정하였다. 실험에서는 은 나노입자들이 증발/응축법에 의해 발생되었으며, 캐리어 기체로는 질소가 이용되었다. 주요입자들은 응집체임버에서 입자 간 충돌을 통해 응집되어, 적게는 수 개에서 400개 정도의 주요입자로 구성된 나노입자 응집체로 성장하게 된다. TDMA를 이용하여 얻어진 실험데이터의 경우 1단 DMA로부터 분류된 입자의 전기이동도지름이 30~100 nm인 경우 은 나노입자응집체는 응집체임버를 이용하지 않고 발생되었다. 응집체임버를 이용하게 되면, 30~100 nm 범위에 있는 나노입자응집체를 발생시키기 어렵기 때문이다. Shin *et al.* (2010)의 연구에서 TDMA 실험과 DMA-APM 실험은 동일한 날짜에 동일한 입자 발생 및 분류 조건 하에서 수행되었다. TDMA 실험으로부터 얻어진 나노입자응집체의 병합직경 (coalesced diameter)은 DMA-APM 실험으로부터 얻어진 체적등가지름과 비교되어졌으며, 그 값들은 거의 일

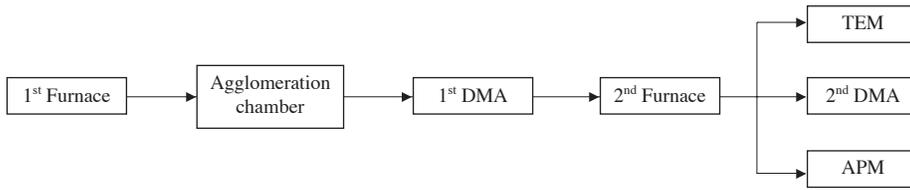


Fig. 1. Schematic diagram of experimental set-up to measure fully coalesced mobility diameter using TDMA and of volume equivalent diameter using DMA-APM (adopted from Shin *et al.*, 2010).

치하는 것으로 나타났다. TDMA 실험은 APM으로 측정이 어려운 80 nm 미만의 은 입자응집체의 질량을 측정하는데 유용하게 이용되었다. TEM 이미지 분석을 통해 실험에 이용된 은 나노입자응집체의 평균 주요입자지름의 크기는 19.5 nm로 측정되었다. Shin *et al.* (2010, 2009a)의 실험에서 나노입자응집체를 구성하고 있는 주요입자의 개수는 주요입자의 크기가 평균지름으로 동일하다는 가정하에서 나노입자응집체의 질량을 단일 주요입자의 질량으로 나누어서 계산하였다. Scheckman *et al.* (2009)은 실험에서 DMA-APM을 사용하였고 실리카 나노입자응집체를 측정 대상으로 하였다.

Sorensen (2011)은 식 (2)에서처럼 입자가 연속영역에 있는 경우  $N \approx 100$ 을 전후로 입자 응집체의 거동 특성이 달라짐을 언급하였다. Sorensen (2011)에서 언급된 기존의 실험데이터는 주로 미끄럼영역에 있는 주요입자의 개수( $N$ )가 적은 경우( $N < 100$ )이거나 연속영역에 있으면서  $N$ 이 작거나( $N < 100$ ) 큰 경우( $N > 100$ )를 포함하고 있다. 이에 비해 미끄럼영역에 있는  $N > 100$ 인 경우의 기존 실험데이터는 매우 적다. 미끄럼영역에 있는  $N > 100$ 인 경우의 기존 실험데이터는 Scheckman *et al.* (2009)와 Gwaze *et al.* (2006), 그리고 Shin *et al.* (2010, 2009a)의 연구결과에서 찾아볼 수 있다. Scheckman *et al.* (2009)와 Gwaze *et al.* (2006)의 경우 이용된 입자응집체를 이루고 있는 주요입자의 개수는 100~400 범위에 있다. Scheckman *et al.* (2009)은 Shin *et al.* (2009a)와 마찬가지로 입자의 질량을 측정하기 위해 DMA-APM을 이용하였으며, 화염을 이용하여 제조된 실리카 나노입자 응집체 ( $d_m = 150 \sim 380$  nm)를 대상으로 하였다. Gwaze *et al.* (2006)은 SEM 이미지 분석을 통해 목재 연소 시 발생하는 프랙탈 응집체 ( $d_m = 200$  nm, 275 nm, 350 nm, 450 nm)의 구조에 대해 연구하였다. Gwaze *et al.*

(2006)은  $R_g = L/3$ 의 관계를 이용하여 응집체의 투영 이미지로부터 얻어진 입자의 최대 길이로부터 회전 반경을 계산하였다. Gwaze *et al.* (2006)은 크누센수가 0.17~0.5의 범위에 있는 경우  $\beta$ 가  $0.81 \pm 0.07$ 로서 거의 일정한 값을 가짐을 실험적으로 밝혀내었다.

Gwaze *et al.* (2006)은 SEM 이미지 분석 방법만을 이용하였기에 Shin *et al.* (2010, 2009a)의 결과와 직접적으로 비교하기에 어려운 점이 있다. Scheckman *et al.* (2009)는 DMA-APM을 이용하여 프랙탈 응집체의 질량을 측정하였기에 Shin *et al.* (2010, 2009a)과 직접적 비교가 가능하다고 볼 수 있다.

프랙탈 응집체의 구조 특성을 나타내는 파라미터로서  $D_f$  이외에 식 (4)와 같이 질량-전기이동도 지수 (mass-mobility exponent,  $D_{fm}$ )가 있다.

$$m = k d_m^{D_{fm}} \tag{4}$$

여기서  $k$ : 전인자. Scheckman *et al.* (2009)의 경우 화염의 발생조건에 따라  $D_{fm}$ 이 1.7~2.4의 범위에 있음을 보였고, Shin *et al.* (2010, 2009a)은 은 나노입자 응집체의  $D_{fm}$ 이 2.1~2.2의 범위에 있음을 보였다. 특이한 점은 Scheckman *et al.* (2009)의 경우 주요입자의 크기가 작을 경우  $D_{fm}$ 이 작아지는 것으로 나타났다. 실험조건을 달리하여 나노입자 응집체의 주요입자지름을 10 nm~92 nm 범위에서 변화시킬 경우  $D_{fm}$ 은 1.7~2.4 범위에서 변화하였다.

### 3. 연구 방법

본 연구에서는 미끄럼영역에 있는 나노입자 응집체를 대상으로 한 Shin *et al.* (2010, 2009a)과 Scheckman *et al.* (2009)의 연구결과를 Sorensen (2011)이 제시한 한계영역에서의 식 (2), (3)을 바탕으로  $R_m/a$  vs.

$N$  그리고  $R_m/R_g$  vs.  $N$ 의 형태로 비교분석하였다.

우선 식 (1)을 이용하여 응집체의 회전반경,  $R_g$ 를 정하였다. 식 (1)을 이용하기 위해 필요한 주요입자의 개수  $N$ 은 Shin *et al.* (2010, 2009a)과 Scheckman *et al.* (2009)의 실험데이터로부터 얻어진 응집체의 질량 또는 등가체적을 단일주요입자의 질량 또는 체적으로 나누어서 계산하였다. 이 때 프랙탈지수  $D_f$ 는 1.78로 가정된다. Shin *et al.* (2009b)은 ImageJ 소프트웨어에 있는 박스계수알고리즘 (box counting algorithm)을 이용하여 은 응집체 ( $d_m=80$  nm, 120 nm, 150 nm)의 투영된 TEM 이미지로부터 프랙탈지수가 각각  $1.84 \pm 0.03$ ,  $1.75 \pm 0.06$ , and  $1.74 \pm 0.03$ 임을 밝힌 바 있다. 따라서 식 (1)을 이용할 때  $D_f=1.78$ 의 가정은 적절하다고 할 수 있다.

#### 4. 결과 및 고찰

그림 2에서는 Shin *et al.* (2010, 2009a)과 Scheckman *et al.* (2009)의 실험데이터를 이용하여  $R_m/R_g$ 의 값을  $N$ 의 함수로 나타내었다. 또한 Sorensen (2011)에서 제시한 식 (2), (3)도 함께 도시하였다. 그림 2와 3에서 이용된 Scheckman *et al.* (2009)의 데이터는 주요입자 크기가 30.3 nm인 실리카 응집체이며, 이 경우  $D_{im}$ 은 1.80이고  $k$ 는  $1.5 \times 10^{-4}$ 이다. Scheckman *et al.* (2009)의 경우에도  $D_f=1.78$ ,  $k_0=1.3$ 임을 가정하여 식 (1)을 이용하여 응집체의 회전반경을 결정하였다.

Sorensen (2011)은  $N$ 과  $R_g$ 가 주어진 응집체인 경우 크누센수에 따라 다른  $R_m$ 의 값을 가질 수 있는 반면에 크누센수가 주어진 경우에는  $R_m$ 과  $R_g$  사이에 일대일 대응이 이루어짐을 보였다. 자유분자영역에 있는 DLCA 응집체의 경우  $R_m/R_g$ 는  $N$ 에 대해  $N^{-0.10}$ 의 특성을 나타내고,  $N < 100$ 인 연속영역에 있는 입자응집체의 경우에도  $R_m/R_g \sim N^{-0.10}$ 의 특성을 나타낸다. 이와는 반대로  $N > 100$ 인 연속영역에 있는 입자응집체의 경우에는  $R_m/R_g$ 은 일정한 값인 0.753에 접근함을 나타내었다.

그림 2에서 Shin *et al.* (2009a)의 경우  $N > 100$ 인 영역에서  $R_m/R_g$ 의 값이 연속영역과 자유분자영역의 점근선 사이에 존재함을 알 수 있고 Scheckman *et al.* (2009)의 경우에는  $R_m/R_g$ 의 값이 연속영역에 해당하는 점근선과 매우 가까움을 볼 수 있다. 반대로  $N <$

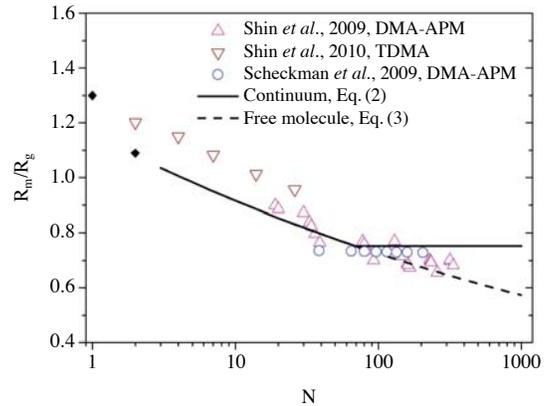


Fig. 2.  $R_m/R_g$  versus the number of primary particles in the agglomerates ( $\blacklozenge$ : theoretical value of  $R_m/R_g$  for  $N=1, 2$ ).

100인 경우 Shin *et al.* (2009a)의 데이터는 거의 자유분자영역에 해당하는 점근선 위에 존재함을 볼 수 있다.  $N < 100$ 인 영역에서 Shin *et al.* (2009a)과 Shin *et al.* (2010)의 결과는 차이가 있는 것으로 보인다. 앞에서 언급한 것처럼 Shin *et al.* (2010)의 TDMA 실험에서는 입자응집체 체임버를 사용하지 않았고, Shin *et al.* (2009a)에서는 입자응집체 체임버를 사용하였다는 점이 실험 상 다른 점이다. 이러한 점이 나노입자 응집체의 구조 또는 주요입자의 크기에 상이하게 영향을 주었을 가능성이 있는 것으로 보인다.

Scheckman *et al.* (2009)과 Shin *et al.* (2010, 2009a)의 결과를  $R_m/R_g$  vs.  $N$ 의 형태로 도시하였을 때 전체적으로 Sorensen (2011)이 제시한 점근선 사이에 존재함을 볼 수 있었으나, Scheckman *et al.* (2009)의 결과와 Shin *et al.* (2010)의 결과 사이에 약간의 차이점이 있었다. Shin *et al.* (2010, 2009a)의 실험에서 이용된 입자응집체의 크누센수는 TDMA 실험의 경우에는 1.33 ~ 4.43이고, DMA-APM 실험의 경우에는 0.44 ~ 1.66이었다. Scheckman *et al.* (2009)의 실험에서는 크누센수가 0.35 ~ 0.89의 범위에 있었기 때문에 Shin *et al.* (2010, 2009a)의 연구와 Scheckman *et al.* (2009)의 연구에서 크누센수에 있어서는 큰 차이를 나타내지 않는다고 판단된다. 또한, Scheckman *et al.* (2009)의 경우 이용된 실리카 응집체의 주요입자의 크기가 Shin *et al.* (2010, 2009a)이 이용한 은 응집체의 주요입자의 크기에 비해 약 1.5배 정도 크나

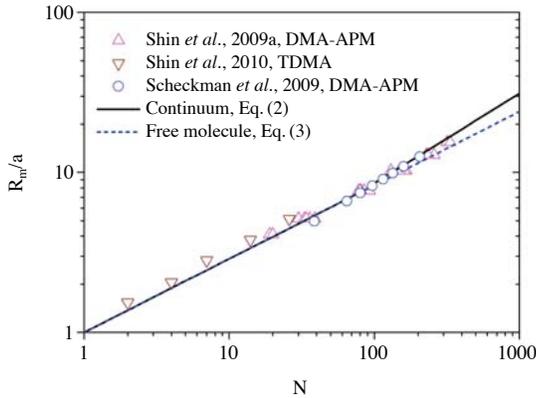


Fig. 3.  $R_m/a$  versus the number of primary particles in the agglomerates.

이러한 차이가 입자의 이동도 거동에 있어서 크게 영향을 주지 않을 것으로 판단된다. 앞에서 언급한 두 가지 연구에서 찾을 수 있는 큰 차이점은 Shin *et al.* (2010, 2009a)의 경우  $D_{fm}$ 이 2.1~2.2 범위에 있지만, Scheckman *et al.* (2009)의 경우  $D_{fm}$ 이 1.7이라는 점이다.  $D_{fm}$ 이 입자 응집체의 구조적 특성을 반영한다고 볼 수 있으므로, Scheckman *et al.* (2009)에서 발생시킨 실리카 응집체가 Shin *et al.* (2010, 2009a)의 연구에서 이용한 은 응집체와 프랙탈 구조가 다를 수 있다고 판단된다. 따라서, 식 (2, 3)에 대입되는  $N$ 을 계산하기 위해 식 (1)에서 가정한  $D_f=1.78$ ,  $k_0=1.3$ 이 Scheckman *et al.* (2009)의 데이터에는 적합하지 않을 수 있다. 이러한 가정이 본 연구의 해석결과에 영향을 미쳤을 수도 있다.

그림 3에서는 Shin *et al.* (2010, 2009a)과 Scheckman *et al.* (2009)의 실험데이터를 이용하여  $R_m/a$ 의 값을  $N$ 의 함수로 나타내었다. 그림 3에서 Shin *et al.* (2010)의 경우 각각의 데이터에 해당하는 주요입자의 개수는 각각 2, 4, 7, 14, 26이다. 그림 3은  $N$ 이 1에 접근할 경우  $R_m/a$ 의 값도 1에 접근함을 보여준다. 또한 식 (2, 3)을 이용하여 자유분자영역과 연속영역에 대해 Sorensen (2011)이 제시한 이론적인 값을 나타내었다.  $N > 100$ 인 경우 동일한  $N$ 에 대해서 연속영역에서  $R_m/a$  값이 자유분자영역에서  $R_m/a$  값보다 큰 것으로 나타난다. 하지만, 그 차이는 매우 작은 것으로 판단된다.  $N > 100$ 에 대해서 Shin *et al.* (2009)과 Scheckman *et al.* (2009)의 경우 거의 모든 데이터가

자유분자영역과 연속영역에 해당하는 점근선 사이에 존재함을 볼 수 있다. Shin *et al.* (2009a)의 경우  $R_m/a$ 의 값이  $N > 100$ 일 때 0.51이며,  $N < 100$ 일 때 0.44인 것으로 분석되었다. 식 (2), (3)에서 제시된 지수인 0.56, 0.46의 값과 유사함을 알 수 있다. 하지만, 이론적인 점근선들의 차이가 작기 때문에 실험데이터와 정량적인 비교분석이 쉽지 않다.

### 5. 결 론

본 연구에서는 입자의 전기이동도지름의 크기와 입자응집체의 크기를 나타낼 수 있는 입자응집체의 회전반경과 주요입자의 개수 사이의 관계를 기존 실험데이터 (Shin *et al.*, 2010, 2009a; Scheckman *et al.*, 2009)를 이용하여 비교분석하였다. 입자응집체를 구성하고 있는 주요입자의 개수는 최대 400개이며, 입자응집체는 미끄럼영역에 속한다. 전체적으로 실험데이터를  $R_m/R_g$  vs.  $N$ 과  $R_m/a$  vs.  $N$ 으로 나타내었을 때 Sorensen (2011)이 제시한 자유분자영역과 연속영역에 해당하는 점근선 사이에 존재하는 것으로 보인다. 하지만, Sorensen (2011)에서 제시한 자유분자영역과 연속영역에 해당하는 점근선 방정식 ( $R_m/a$  vs.  $N$ )은 유동영역에 따라  $R_m/a$ 의 값이 큰 차이를 보이지 않아서 미끄럼영역에 있는 실험데이터와의 정량적인 비교가 용이하지 않다. 따라서 미끄럼영역에 있는 나노입자응집체의 거동이 연속영역과 자유분자영역 중 어느 쪽에 가까운지 정량적으로 판단하기 위해서는 Sorensen (2011)이 제시한 점근선 방정식과 다르게 영역에 따라 값의 차이를 크게 보여줄 수 있는 새로운 형태의 데이터 표현식이 필요한 것으로 판단된다.

### 감사의 글

이 논문은 2012년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (2011-0014649). 결과 토의에 도움을 준 Dr. George Mulholland에게 감사를 전한다.

### 참 고 문 헌

Friedlander, S.K. (2000) *Smoke, Dust, and Haze: Fundamen-*

- tals of Aerosol Dynamics*, 2nd Ed., Oxford University Press.
- Friedlander, S.K. and D.Y.H. Pui (2004) Emerging issues in nanoparticle aerosol science and technology, *Journal of Nanoparticle Research*, 6, 313-320.
- Goo, J. (2011) Simulation of the Brownian Coagulation of Smoke Agglomerates in the Entire Size Regime using a Nodal Method, *J. KOSAE*, 27, 681-691.
- Gwaze, P., O. Schmid, H.J. Annegarn, M.O. Andreae, J. Huth, and G. Helas (2006) Comparison of three methods of fractal analysis applied to soot aggregates from wood combustion, *Journal of Aerosol Science*, 37, 820-838.
- Katrinak, K.A., P. Rez, P.R. Perkes, and P.R. Buseck (1993) Fractal geometry of carbonaceous aggregates from an urban aerosol, *Environmental Science and Technology*, 27, 539-547.
- Ku, B.K. and A.D. Maynard (2006) Generation and investigation of airborne silver nanoparticles with specific size and morphology by homogeneous nucleation, coagulation and sintering, *Journal of Aerosol Science*, 37, 452-470.
- Meakin, P., B. Donn, and G.W. Mulholland (1989) Collisions between point masses and fractal aggregates, *Langmuir*, 5, 510-518.
- Pratsinis, S.E. (1998) Flame aerosol synthesis of ceramic powders, *Progress in Energy and Combustion Science*, 24, 197-219.
- Scheckman, J.H., P.H. McMurry, and S.E. Pratsinis (2009) Rapid characterization of agglomerates aerosols by in situ mass-mobility measurements, *Langmuir*, 25, 8248-8254.
- Shin, W.G., G.W. Mulholland, S.C. Kim, J. Wang, M.S. Emery, and D.Y.H. Pui (2009a) Friction coefficient and mass of silver agglomerates in the transition regime, *Journal of Aerosol Science*, 40, 573-587.
- Shin, W.G., J. Wang, M. Mertler, B. Sachweh, H. Fissan, and D.Y.H. Pui (2009b) Structural properties of silver nanoparticle agglomerates based on transmission electron microscopy: relationship to particle mobility analysis, *Journal of Nanoparticle Research*, 11, 163-173.
- Shin, W.G., G.W. Mulholland, and D.Y.H. Pui (2010) Determination of volume, scaling exponents, and particle alignment of nanoparticle agglomerates using tandem differential mobility analyzers, *Journal of Aerosol Science*, 41, 665-681.
- Sorensen, C.M. (2011) The mobility of fractal agglomerates: a review, *Aerosol Science and Technology*, 45, 765-779.