

# 반응로내 전기-수력학적 분사에 의한 비응집 초미세 SiO<sub>2</sub> 입자 합성과 특성

윤진욱\*, 양태훈\*, 안강호†, 최만수\*\*

(2000년 10월 7일 접수, 2001년 3월 7일 심사완료)

## Characteristics of Ultrafine SiO<sub>2</sub> Particle Synthesized by Electro-Hydrodynamic Spray Injection in a Furnace

Jin-Uk Yoon, Tae-Hoon Yang, Kang-Ho Ahn and Man-Soo Choi

**Key Words :** Ultrafine SiO<sub>2</sub> Particles(초미세 SiO<sub>2</sub> 입자), Furnace(반응로), Size Distribution(입자크기 분포), Charging(하전), Agglomeration(응집)

### Abstract

Ultrafine particles have been widely used in many high technology industrial areas. The spherical nonagglomerated and uniform nanometer-size SiO<sub>2</sub> particles are synthesized by the direct injection of TEOS(Tetraethyorthosilicate) using electro-hydrodynamic spraying method. Electro-hydrodynamic spraying can generate submicron-size TEOS droplets having high electric charges by applying a high electric field between the liquid injection nozzle and the reaction tube. These TEOS droplets are evaporated, and thermally decomposed or oxidized to produce nanometresized SiO<sub>2</sub> particles in the reaction tube. Spherical, nonagglomerated and ultrafine particles are generated in various conditions and examined by using SEM and SMPS. As the total gas flow rate in the furnace changes from 1.5 lpm to 5.0 lpm, the mean diameter of SiO<sub>2</sub> particle decreases from 120 nm to 68 nm. The synthesized particle charging fractions are also investigated.

### 1. 서론

초미세 입자(ultrafine particle)의 합성은 다른 재료에서는 볼 수 없는 뛰어난 특성 때문에 여러 산업분야에서 널리 응용되고 있으며, 입자사이의 결합이 없는 균일한 나노크기의 구형입자를 발생시키기 위해 최근에 많은 연구가 진행되고 있다.<sup>(5~7)</sup> 초미세 입자란 입경이 100 nm 이하의 particle 또는 aerosol 을 의미하고 이러한 나노크기의 입자로 만들어진 재료는 강도(strength)와 경도(hardness)가 향상되어 초가소성(superplasticity)을 띠며, 전기 및 열 저항성(electrical and thermal resistivity)이 우수하

다. 이처럼 입자의 직경이 나노미터(nm) 크기 수준으로 작아질수록 재료의 기계적, 화학적, 광학적 성질이 향상되어 전기, 전자재료(electrical and electronic material), 반도체 재료(semiconductor), 자성재료(magnetic material), 초전도 재료(superconductor), 촉매재(catalyst) 및 세라믹(ceramic) 등의 재료에 응용되고 있다.<sup>(1)</sup>

나노크기의 파우더(powder)를 제조하기 위해 졸-겔(sol-gel)법, CVD(Chemical Vapor Deposition), 화염(flame) 합성법 그리고 분무 열분해법(spray pyrolysis) 등 여러가지 방법이 사용되고 있다. 그중 졸-겔법은 대량생산은 가능하나, 많은 공정과정이 수반되며, 공정 후 폐기물처리가 어려워 환경오염을 야기시키는 큰 단점이 있어, 고순도이고 나노크기의 파우더를 생산하기 위해 CVD 나 화염 합성법과 같이 기상 전구체(precursor)를 반응시키는 기상 공정(vapor processing)이나 분무 열분해법과 같이 액상의 전구체를 미립화(atomization)시켜 반응시키는 에어로졸 공정(aerosol processing)이

\* 한양대학교 대학원 기계공학과

† 책임저자, 회원, 한양대학교 기계공학과

E-mail : khahn@mail.hanyang.ac.kr

TEL : (031)400-5284 FAX : (031)406-5550

\*\* 서울대학교 기계항공우주공학과

사용되고 있다. 특히 기상의 TEOS(Tetraethyl Orthosilicate)를 전구체로 한 실리카(silica) 발생입자의 특성은 현재 많은 연구가 진행되고 있으며, 전구체의 농도, 반응기체의 유량 그리고 반응온도에 따라 수십 nm에서 수백 nm의 무정형(amorphous) 실리카 입자가 발생된다고 보고된 바 있다.<sup>(2)</sup> 하지만 이러한 기상 공정은 서로 다른 전구체의 수증기압(vapor pressure)에 의해 다성분 재료(multicomponent material)를 생산하기가 어렵고, 고농도의 전구체를 반응로 내에 주입시키지 못하므로 대량생산이 불가능하며, 발생 입자간의 강한 결합(hard agglomerate)에 의해 고순도의 파우더를 생산할 수 없다.<sup>(3)</sup> 따라서 앞에서 언급했듯이 액상의 TEOS 를 미립화 한 후, 반응시켜 입자를 발생시키는 에어로졸 공정이 시도되고 있으며, 생산효율이 우수하며, 고순도의 입자를 발생시킬 수 있고, 공정이 간단하다는 장점이 있다. 아직 반응로 내에서 입자의 발생 원리나 그 특성이 밝혀지지 않은 상태이다.

본 연구에서는 전기-수력학적 방법(electrohydrodynamic spray)에 의해 전구체인 액상의 TEOS 를 미립화 시켜 직접 반응로에 주입한 후, 증발(evaporation), 열적분해(thermal decomposition), 화학반응(chemical reaction), 핵화(nucleation) 그리고 성장(growth)을 거쳐 발생된 실리카 입자의 특성을 알아보기 위해 입자의 크기분포(particle size distribution), 형상(morphology) 그리고 하전정도(charging fraction)를 관찰하였다. 또한 액상의 전구체를 증발기(evaporator)로 기화시킨 후, 반응로에 주입하여 발생된 입자와 그 형상을 비교하였다.

## 2. 실험

### 2.1 실험 장치 및 방법

본 연구를 위한 실험장치로는 Fig. 1 과 같이 전기-수력학적 방법에 의해 액상의 전구체인 TEOS 를 미세 입자로 발생시키는 electro-spray 장치, 미립화된 TEOS 입자가 증발, 열적 분해 및 화학반응에 의해 실리카 입자가 생성되는 반응장치 그리고 발생된 입자의 특성(morphology, 크기분포 그리고 하전정도)을 관찰하는 계측장비로 구성되어 있다.

먼저 전구체인 TEOS 를 미립화 하기 위해서 electro-spray 노즐(nozzle)에 일정한 유량의 TEOS 를 유입시키고, 노즐과 반응관(reactor tube) 사이에 고전압을 인가하면 노즐 끝의 액체는 정전기력과 표면장력의 평형상태가 붕괴되면서 노즐 끝부분에

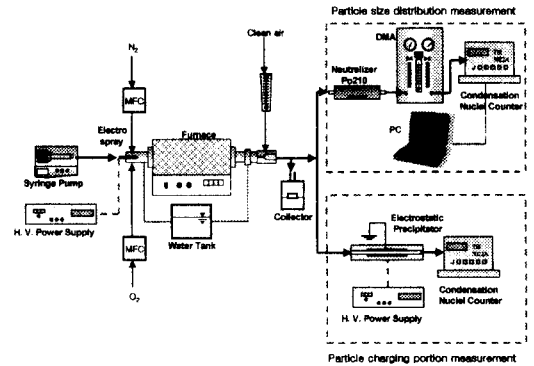


Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

서 cone 이 형성되어 미세한 TEOS 입자가 발생된다. Electro-spray 노즐은 스테인리스로 제작하였으며, 노즐의 외경은 1.1 mm이다. 또한 spray 노즐에 TEOS 를 주입시키기 위해 syringe pump(ORION, Model M361)를 사용하였으며, 노즐 인가전압의 극성은 음(-)으로 하였다. Electro-spray 에 의해 발생된 TEOS 입자는 하전을 띠고 있어, 반응관 내에서 입자손실을 줄이기 위해 반응관의 재질을 스테인리스로 하였고, 반응관에 음(-) 전압을 인가하여 TEOS 입자와 극성을 일치시켰다.

전구체 입자를 반응시키기 위한 반응장치로는 반응관과 전기로(furnace)로 구성하였으며 반응관은 길이가 60 cm이고, 내경이 40 mm인 스테인리스 튜브를 사용하였다. 반응기체로는 O<sub>2</sub>, carrier 기체로는 N<sub>2</sub>를 사용하였고, N<sub>2</sub>와 O<sub>2</sub>의 혼합비는 공기의 조성과 유사하게 7:3(volume)으로 하였다. 전기로는 수평형 전기로로 1000℃까지 작동되며, 반응영역이 약 50 cm이다. 반응관에서 생성된 실리카 입자는 공압을 이용한 1 차 회석장치인 흡입 프로브에 의해 샘플링되며, 샘플링된 입자들은 다시 2 차 회석장치를 거쳐 SMPS(Scanning Mobility Particle Sizer) 또는 전기 집진기로 유입된다. 샘플링 장치인 흡입 프로브는 재질이 스테인리스인 두 개의 동축관으로 이루어졌으며, 회석기체가 내관과 외관 사이를 흐르면서 프로브를 냉각시키도록 하여 고온에서 견딜 수 있도록 하였다. 프로브의 흡입구는 벤츨리관을 응용한 형태로서 단면적의 급격한 감소로 인한 회석기체의 가속시에 발생하는 압력강하로 인하여 고온의 기체를 흡입한다. 이러한 흡입구조는 별도의 진공펌프가 없이 압축공기의 공급만으로도 흡입과 동시에 냉각 및 1 차 회석이 가능한 구조이다. 2 차 회석장치는 HEPA

Table 1 Experimental conditions

Syringe 유량 (cm <sup>3</sup> /hr)	반응 온도(°C)	Spray 노즐 크기 (mm)
0.49	800	1.1
1.00	900	
반응기체	반응기체 유량 (lpm)	Spray 노즐 인가전압(kV)
N <sub>2</sub> + O <sub>2</sub> (V:V=7:3)	1.5	3.5
	3.0	
	5.0	

필터와 니들밸브로 구성하였고, 흡입 프로브에서 제측장비까지의 입자손실을 줄이기 위해 스테인리스관으로 연결하였고 길이는 약 60 cm 정도로 최소화 하였다.

흡입 프로브에 의해 샘플링된 입자는 입자 채집기에 의해 포집되어 입자의 형상을 관찰하였다. 입자 채집기는 impactor 와 비슷한 형태로서 노즐의 중앙에 TEM grid 가 위치하여 입자가 부착하도록 하는 구조이다. 1차, 2차 회석장치에 의해 회석된 실리카 입자는 3 방향 밸브에 의해 SMPS 와 전기 집진기에 차례로 유입되어 측정되어진다. SMPS 는 DMA(Differential Mobility Analyzer)와 CNC(Condensation Nuclei Counter)가 결합된 구조로 입자의 크기분포를 측정하는 장비이다. DMA 는 다분산(polydisperse)의 입자들 중에서 필요한 크기의 단분산(monodisperse) 입자만을 추출하는 장비로 본 연구를 위해 제작되었으며, 그 성능은 이미 검증된 바 있다.<sup>(4)</sup> 또한 입자의 농도를 측정하기 위해 TSI 사의 CPC(Condensation Particle Counter) Model 3022A 를 사용하였다. 입자의 하전 정도는 전기 집진기와 CNC 를 이용하여 전기 집진기에 전압을 인가하기 전, 후의 입자농도 개수를 측정하여 각 실험조건에 따른 발생 입자의 하전 분율을 관찰하였다. 그리고, 기상의 TEOS 를 반응시키는 기존의 CVD 공정에서의 발생입자와 그 특성을 비교하기 위해 Fig. 1 의 electro-spray 대신 TEOS 증기 발생기를 사용하여 동일한 실험을 수행하였다.

## 2.2 실험 조건

전기-수력학적 방법에 의한 초미세 입자의 발생 및 그 특성을 관찰하기 위해 Table 1 과 같이 전구체의 농도, 반응기체의 유량 그리고 반응온도에 따라 실험을 수행하였다. 앞에서 언급했듯이 N<sub>2</sub> 와 O<sub>2</sub> 를 7:3 의 비율로 공기의 조성과 유사하게 하였다. TEOS 의 유량은 syringe pump 의 이송속도에 의

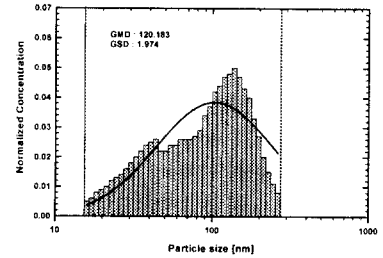
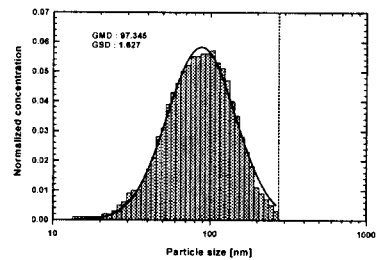
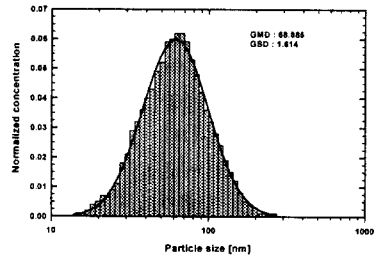
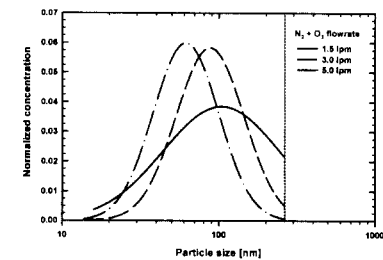
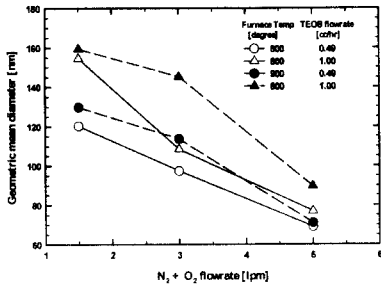
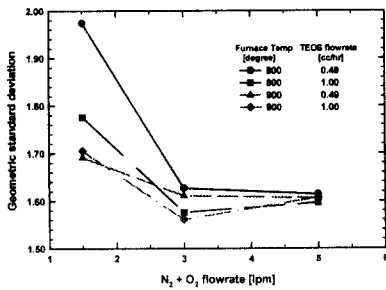
(a) N<sub>2</sub> + O<sub>2</sub> flow rate = 1.5 lpm(b) N<sub>2</sub> + O<sub>2</sub> flow rate = 3.0 lpm(c) N<sub>2</sub> + O<sub>2</sub> flow rate = 5.0 lpm(d) N<sub>2</sub> + O<sub>2</sub> flow rate = 1.5, 3.0, 5.0 lpm

Fig. 2 Particle size distribution by Electro-hydrodynamic spray( $T_f = 800^\circ\text{C}$ , TEOS flow rate =  $0.49\text{ cm}^3/\text{hr}$ )

해 조절하였으며, 입자의 크기분포를 측정하기 위해 사용한 DMA 의 sheath air 와 aerosol air 의 유량



(a) Geometric mean diameter (GMD)



(b) Geometric standard deviation (GSD)

Fig. 3 Distribution of GMD and GSD by Electro-hydrodynamic spray

은 각각 10 lpm 과 1 lpm 을 사용하였다. 하전분율 측정을 위한 전기 집진기의 인가전압은 10 ~ 1000V 로 하였다.

### 3. 실험 결과

#### 3.1 발생입자의 크기분포

TEOS 의 농도, 반응온도 그리고 반응기체의 유량에 따라 전기-수력학적 방법에 의한 발생입자의 크기분포를 SMPS 를 이용하여 측정하였다.

Fig. 2 는 TEOS 의 유입유량이 0.49 cm<sup>3</sup>/hr, 반응온도가 800℃ 인 경우 반응로 내 전체유량에 따른 입자의 크기 분포를 나타낸다. 반응로 내 기체의 유량이 1.5 lpm 인 경우(Fig. 2(a)) 실리카 입자의 크기 분포는 bimodal 을 띠고, 유량이 증가하면, log-normal 분포(Fig. 3(b),(c))를 나타내었다. 또한 평균 직경은 120 nm에서 68 nm로 감소하였고, 표준편차 역시 1.974 에서 1.614 로 줄어들었다. Fig. 2(d)는 유량에 따른 입자의 평균직경(mean diameter)과 입자 분포의 변화를 나타내며, 반응기체의 유량이 증가함에 따라 반응관 내 입자의 체류시간(residence time)이 감소하여 입자의 성장과 응집(coagulation)

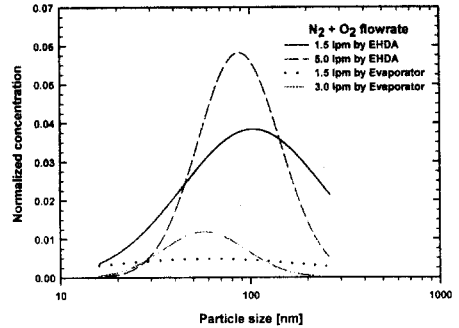
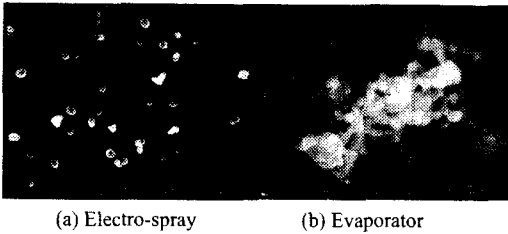


Fig. 4 Particle size distribution by Electro-hydrodynamic spray and Evaporator

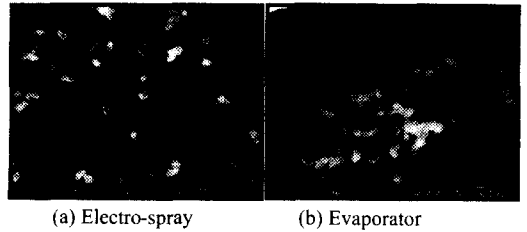
시간이 적어 입자의 평균직경은 감소하고 개수농도는 증가하였다. 이 실험에서 유량의 증가에 따른 전구체 (TEOS)의 농도감소에 의한 입자 크기 변화 가능성이 있어 기체중 TEOS 몰 농도를 일정하게 유지하고 반응로내 기체의 체류시간을 달리하여 실험하였다. Fig. 3(a)에서 보는 바와 같이 TEOS flow rate = 0.49cc/hr, N<sub>2</sub>+O<sub>2</sub> flow rate = 3.0 lpm 과 TEOS flow rate = 1.00cc/hr, N<sub>2</sub>+O<sub>2</sub> flow rate = 5.0lpm 인 경우 TEOS 의 기체중 몰농도를 1.3x10<sup>-7</sup> mol/l 로 동일하고 반응기체의 유량이 3.0lpm 에서 5lpm 으로 증가함에 따라 반응로의 온도와 무관하게 발생입자의 평균 직경이 감소하는 것을 볼 수 있다. 따라서 반응로내 입자의 체류 시간이 입자의 크기 결정에 영향을 미치는 것을 볼 수 있다. Fig. 2(a)의 경우 입자 분포가 bimodal 형태로 나오는데 이는 반응로의 중심부에서 형성된 입자는 작은 쪽에 해당되고, 반응로의 벽면부분에서 형성된 입자는 130nm 정도의 큰 입자가 되는 것이 추가 실험결과 확인이 되었다.

Fig. 3(a)와 (b)는 각각 실험조건에 따른 평균직경과 표준편차(standard deviation)의 추이를 나타내며, 평균직경은 반응로내 기체의 유량에 반비례하고, 반응온도와 TEOS 농도에 비례하였다. 또한 표준편차는 유량이 1.5 lpm 의 경우보다 3.0 lpm 에서는 급격히 감소하였으나, 5.0 lpm 에서는 유량이 3.0 lpm 의 경우와 거의 유사하였다. 반응온도가 증가함에 따라 입자의 크기가 증가한 것은 고온에서 입자의 운동에너지가 Coulomb 력 보다 커서 응집이 진행된 것으로 보인다. 이는 다음절의 전자현미경 사진에서도 관찰되었다. 본 실험조건에서 발생된 입자의 평균직경은 약 68-160 nm이고 표준편차는 1.55 ~ 2.0 정도이다.

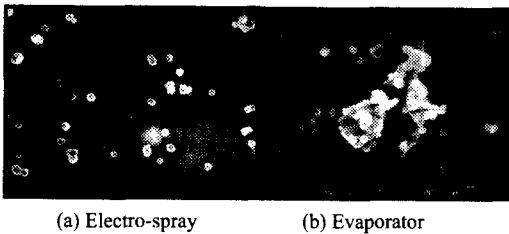
Fig. 4 는 반응온도가 800℃ 이고, TEOS 의 유량이 1.00 cc/hr 일 때, 각각 전기-수력학적 방법과 증발



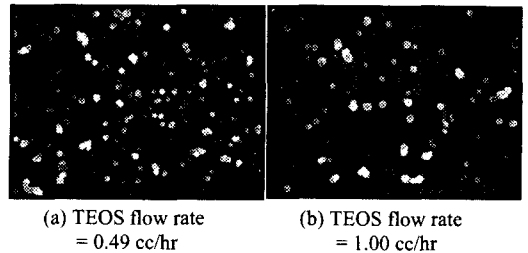
**Fig. 5** SiO<sub>2</sub> particle morphology by Electro-hydrodynamic spray and evaporator ( $T_f = 800^\circ\text{C}$ , TEOS flow rate = 0.49 cc/hr, N<sub>2</sub> + O<sub>2</sub> flow rate = 3.0 lpm)



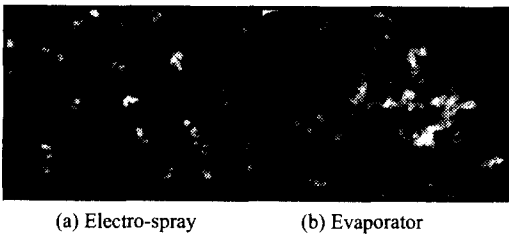
**Fig. 8** SiO<sub>2</sub> particle morphology by Electro-hydrodynamic spray and evaporator ( $T_f = 900^\circ\text{C}$ , TEOS flow rate = 1.00 cc/hr, N<sub>2</sub> + O<sub>2</sub> flow rate = 3.0 lpm)



**Fig. 6** SiO<sub>2</sub> particle morphology by Electro-hydrodynamic spray and evaporator ( $T_f = 800^\circ\text{C}$ , TEOS flow rate = 1.00 cc/hr, N<sub>2</sub> + O<sub>2</sub> flow rate = 3.0 lpm)



**Fig. 9** SiO<sub>2</sub> particle morphology by Electro-hydrodynamic spray ( $T_f = 800^\circ\text{C}$ , N<sub>2</sub> + O<sub>2</sub> flow rate = 5.0 lpm)



**Fig. 7** SiO<sub>2</sub> particle morphology by Electro-hydrodynamic spray and evaporator ( $T_f = 900^\circ\text{C}$ , TEOS flow rate = 0.49 cc/hr, N<sub>2</sub> + O<sub>2</sub> flow rate = 3.0 lpm)

기를 이용하여 발생시킨 실리카 입자의 크기분포를 비교하였다. 그림에서 모두가 증발기를 사용하였을 때 Electro-spray에 비해 평균직경은 감소하였으나, 표준편차가 증가하였다. 표준편차의 증가는 입자간의 응집에 의한 것으로 증기 주입에 의해 반응로내에서 생성된 입자는 전기적으로 중성을 띄므로 입자가 하전이 되지 않는다. 따라서 입자의 응집은 순수한 브라운운동에 의해 지배되게 된다. 또한 이 운동에 의해 많은 입자들이 반응로 벽면에 부착되어 입자의 손실이 수반되게 된다. 본 실험기간 동안 이러한 입자의 반응로내 벽면 부착 현상은 EHDA에 의한 입자 생성시 보다 훨씬 많이 일어나는 것이 관찰되었다. 아울러 EHDA

방법에 의한 전구체 주입시 발생된 입자의 기하표준편차가 증발기 방법보다 작은 것은 EHDA 사용시 많은 양의 이온이 반응로내로 주입되어 이들 이온이 발생된 입자를 하전시키게 된다. 따라서 하전된 입자들간에는 전기적으로 동일극성을 갖게 되어 Coulomb 반발력에 의해 입자 상호간의 응집이 덜 일어 나게 된다. 그러므로 하전된 입자의 성장은 주로 입자의 표면반응에 의해 일어나게 되어 그 크기 분포가 증발기 방법에 의해 생성된 입자의 분포 보다 더 작게 되는 것으로 사료된다.

### 3.2 발생입자의 morphology

입자 채집기 내의 TEM grid에 반응로에서 생성된 입자를 포집하였으며, 포집된 입자는 SEM(Scanning Electron Microscope)에 의해 입자의 형상을 관찰하였다. 전자현미경을 통하여 입자의 형상을 관찰함으로써, 전기-수력학적 방법에 의해 발생된 입자의 형상이 기존의 증발기를 이용하여 제조된 입자의 형상과 어떠한 차이가 있는지를 관찰하였다. 또한 두 실험조건을 동일하게 하기 위해 TEOS의 mole 농도를 일치시켰다. 그 결과는 Fig. 5 ~ 8과 같으며, 반응온도가 800°C인 경우(Fig. 5, 6), 전기-수력학적 방법에 의해 반응로내에 TEOS를 주입하여 발생된 입자는 높은 하전량에 의해 구형의 서로 결합되지 않은 형상을 나타낸 반면, 증발기를 이용하여 반응로내에 TEOS를 주입하여 발생된 입자는 대부분이 aggregate 되어 서로

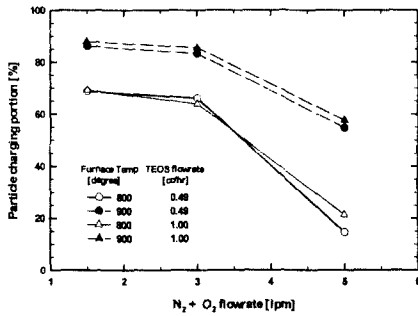


Fig. 10 Charging portion of synthesized silica particles

다른 경향을 보였다. 반응온도가 900°C로 상승하면 전기-수력학적 방법에 의해 발생된 입자도 Fig. 7(a)와 8(a)에서처럼 2~3 개의 실리카 입자가 서로 결합되어진 형태가 관찰되어졌다. Fig. 5(a)와 Fig. 9(a) 그리고 Fig. 6(a)와 Fig. 9(b)는 같은 온도, 동일한 TEOS 농도에서 전기-수력학적 방법에 의해 입자를 발생시켰을 때, 반응로 내 기체 유량에 따른 morphology 의 영향을 나타낸다. 앞에서 언급하였듯이 발생된 입자는 구형을 띠고 있으며, Electro-spray 에 의해 발생된 입자는 높은 하전량을 띠므로, 입자간에 서로 결합이 되지 않은 상태이다. 또한 SMPS 에 의해서 측정된 크기분포 결과와 같이 반응로내 기체의 유량이 증가하고, TEOS 의 농도가 감소하면, 입자의 크기가 작아진 것을 확인할 수 있다.

### 3.3 발생입자의 하전분율

Electro-spray 에 의해 발생된 실리카 입자의 하전 정도를 측정하기 위해 전기 집진기를 이용하여, TEOS 의 유량, 반응온도 그리고 반응기체의 유량에 따른 입자의 하전율을 측정하였다. 그 결과 Fig. 10 과 같이 반응로의 온도가 900°C일때 발생된 입자의 약 90%정도 하전된 것을 볼 수 있다. 반응관에서의 샘플링관의 길이를 최소화하면 하전된 입자의 손실이 더 작아져 하전분율이 90%이상 될 것으로 예상된다. 한편 반응로의 온도가 800°C 인 경우 900°C 인 경우 보다 약 10 에서 30% 정도 입자가 덜 하전된 것을 볼 수 있다. 이에 대한 연구는 추후 더 수행되어야 할 것으로 사료된다. 또한 Fig. 10 에서 보듯이 반응관내의 유량이 증가함에 따라 하전분율이 감소하는 것을 볼 수 있다. 이는 입자 생성된 곳에서 측정점 까지 입자가 이동하는 동안 입자의 하전이 완전히 끝나지 않아 하전율이 낮아 지는 것으로 생각되나 이에 대한 연구도 더욱 진행되어야 할 것으로 사료된다.

## 4. 결론

전구체인 TEOS 를 전기-수력학적 방법에 의해 반응로에 주입시킨 후 형성된 실리카 입자의 특성에 관한 연구의 결론은 다음과 같다.

(1) 액상의 TEOS 를 전기수력학적 방법에 의해 미립화 하여 반응로에 주입시킨 결과, 구형이며 나노크기(68 ~ 120 nm)의 실리카 입자를 합성할 수 있었다.

(2) Electro-spray 노즐에 의해 발생된 TEOS 입자는 높은 하전을 띠고 있어 반응 후, 생성된 입자들이 서로 결합하지 않았다.

(3) 발생된 입자의 평균직경은 TEOS 의 농도와 반응온도에 비례하였고, 반응기체의 유량에 반비례하였다.

(4) 발생입자의 90%이상이 하전 되었으며, 반응기체의 유량과 반응로의 온도에 따라 하전량이 변하였다.

(5) 증발기로 기상의 TEOS 를 반응시켜 발생된 실리카 입자와 그 특성을 비교하였을 때 electro-spray 에 의해 발생된 입자는 대부분 응집되지 않았다.

## 후 기

이 논문은 2000 년도 한국과학기술부에 의해 지원받은 나노입자제어 기술연구단의 창의적 연구과제사업과 두뇌한국 21 사업에 의해 지원 받았음.

## 참고문헌

- (1) Wooldridge, M. S., 1998, "Gas-Phase Combustion Synthesis of Particles," *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 24, pp. 63~87.
- (2) Adachi, M., Okuyama, K. and Tohge, N., 1995, "Particle Generation and Film Formation in an Atmospheric-Pressure Chemical Vapour Deposition Processing Using Tetraethylorthosilicate," *Journal of Material Science*, Vol. 30, pp. 932~937.
- (3) Gurav, A., Kudas, T., Pluym, T. and Xiong, Y., 1993, "Aerosol Processing of Materials," *Aerosol Science and Technology*, Vol. 19, pp. 411~452.
- (4) 안강호, 김남효, 이종호, 배귀남, 1996, "Differential Mobility Analyzer(DMA)내의 입자운동 및 특성분석," *대한기계학회논문집(B)*, 제 20 권, 제 6 호, pp. 005~2013.
- (5) 이규운, 안강호, 1998, "전기수력학적 방법에 의한 초미세입자 발생에 관한 연구," *대한기계학회논문집 A 권*, 제 22 권 제 11 호, pp. 1983~1988.
- (6) 안진홍, 윤진욱, 안강호, 김광영, 2001, "전기수력학적 방법을 이용한 미세입자의 하전 특성에 관한 연구," *설비공학논문집*, Vol. 13, No. 4, 게재예정.
- (7) Chen, D., Pui, D.Y.H., and Kaufman, S.L., 1995, "Electrospraying of Conducting Liquids for Monodisperse Aerosol Generation in the 4nm to 1.8μm Diameter Range," *J. of Aerosol Sci.*, Vol. 26, No. 6, pp. 963~977.