

## Hydrazine Hydrate 還元에 의한 窒酸銀 水溶液으로부터 銀 나노粉末의 製造 研究<sup>†</sup>

\*李 華 永

韓國科學技術研究院 二次電池研究센터

## Preparation of Ag Nano-Powder from Aqueous Silver Nitrate Solution through Reduction with Hydrazine Hydrate<sup>†</sup>

\*Hwa-Young Lee

Battery Research Center, Korea Institute of Science & Technology, P. O. Box 131, Cheongryang, Seoul 130-650, Korea

### 요 약

함은 폐재의 리사이클링을 위한 연구의 일환으로써 Hydrazine Hydrate를 환원제로 사용하여 질산은 수용액으로부터 Ag 나노분말을 제조하기 위한 실험을 수행하였다. 이를 위해 질산은을 소정 농도로 증류수에 용해시킨 수용액에 Ag 미립자의 응집방지를 위한 분산제로써 Tamol NN8906 혹은 Tween 20을 미리 혼합한 다음 환원제인 Hydrazine Hydrate 용액을 첨가하는 방법으로 환원반응을 실시하였다. 환원반응을 통하여 제조한 Ag 미립자는 입도분석기 및 TEM 측정을 통하여 형상과 평균입도를 측정하였다. Hydrazine Hydrate에 의한 은의 환원을 위해서는 이론치의 약 2배를 첨가해 주어야 하는 것으로 나타났으며, Tamol NN8906을 분산제로 사용하여 제조한 Ag 나노분말은 매우 좁은 입도범위의 분포특성을 보여 주었다. Tween 20을 분산제로 사용한 경우의 입도분포는 bimodal 혹은 multimodal distribution을 보였으며, 입자 모양에 있어서는 Tamol NN8906과 Tween 20이 모두 비슷하게 표면이 매끄러운 불규칙한 모양의 입자들로 구성되어 있었다.

**주제어** : 리사이클링, 은, 나노입자, 환원제, 분산제

### Abstract

The preparation of Ag nano-powder from aqueous silver nitrate solution, which would be available for the recycling of silver bearing wastes, was investigated by a reductive precipitation reaction using hydrazine hydrate as a reducing agent. Silver solution was prepared by dissolving silver nitrate with distilled water, and then the dispersant, Tamol NN8906 or Tween 20, was also mixed to avoid the agglomeration of particles during the reductive reaction followed by the addition of hydrazine hydrate to prepare Ag nano-particles. Ag particles obtained from the reduction reaction from silver solution were characterized using the particle size analyzer and TEM to determine the particle size distribution and morphology. It was found that about 100% excess of hydrazine hydrate was required to reduce completely silver ions in the solution. Ag powders with very narrow distribution could be obtained when Tamol NN8906 was used as the dispersant. In case of Tween 20, the particle size distribution showed typically the bimodal or multimodal distribution and the morphology of Ag particles was found to be irregular shape in both cases.

**Key words** : recycling, silver, nano particle, reductant, dispersant

<sup>†</sup> 2005년 12월 16일 접수, 2006년 5월 16일 수리

\*E-mail: hylee@kist.re.kr

## 1. 서 론

전 세계적으로 IT 및 NT 산업의 급속한 발달은 여러 분야에 있어서 첨단 재료에 대한 신규 수요를 창출하고 있으며, 이러한 추세는 국내의 경우에도 예외가 아니어서 최근 들어 초미립<sup>1-3)</sup> 은분말(Ag powder)의 수입량이 급증하고 있다. 현재, 국내에 수입되는 Ag powder는 연간 120톤을 상회하고 있으며, Ag powder를 주원료로 하는 Ag paint 및 paste의 수입량도 연간 300톤에 달하고 있는 것으로 보고되고 있다<sup>4)</sup>. 이들 Ag powder 제품의 주요 수요처는 각종 전자제품의 전자파 차폐 재료이며, Ag powder를 사용하는 대표적인 전자제품으로는 휴대폰 및 노트북을 들 수 있다. 특히, 휴대폰의 경우 전세계 생산량의 약 25%를 국내에서 생산할 만큼 국내 생산량이 급증하고 있으며, 이에 따라 전자파 차폐 재료인 Ag powder의 수요도 당분간 큰 폭의 신장세를 보일 것으로 예상된다.

현재 국내에는 Ag paint 완제품을 수입하여 그대로 사용하는 시장과 중간원료인 Ag powder를 수입하여 이로부터 Ag paint를 제조 사용하는 시장으로 나누어져 있으나, 근본적으로는 동일한 시장이라 할 수 있다. 상용되고 있는 Ag paint의 주원료는 평균입도 100~200 nm의 나노급 Ag 분말이 사용되고 있는 것으로 알려져 있으며, 이와 같은 은(Ag) 나노분말의 제조방법으로는 종래부터 기상<sup>5,6)</sup>과 액상법<sup>7-11)</sup>이 동시에 사용되고 있다. 대표적인 기상법으로는 Ag를 가열증발시켜 이를 다시 응집시키는 증발응축법과 Ag 화합물을 고온에서 열분해하거나 화학반응을 시켜 Ag 미립자를 얻는 기상화학반응법 등이 있다. 또한, 액상법으로는 수용액중에서의 환원반응을 이용한 침전법<sup>7-9)</sup> 및 수열합성법<sup>10-11)</sup>, 전해채취법 등이 있으며, 과거에는 전해채취법을 이용한 전해은분의 제조 및 응용이 비교적 활발하였으나 최근 들어서는 수용액중에서의 환원반응을 통해 얻는 나노급 Ag powder에 대한 연구가 활발해지고 있다.

우리나라는 오래전부터 사진폐액 등의 함은 폐재로부터 은을 회수하여 재생하는 Ag 리사이클 산업이 비교적 발달하여 재생은을 수출하기도 하였으나, 생산되는 은의 대부분이 부가가치가 낮은 잉곳(Ingot) 형태임을 감안할 때 함은 폐재로부터 Ag 나노분말을 직접 생산할 수 있는 기술개발이 시급히 요구되고 있다. 이를 위해서는 함은 폐재의 고순도화 정제기술과 함께 Ag 수용액으로부터 나노 크기의 Ag 미립자를 제조하기 위한 공정기술이 확립되어야 할 것으로 사료된다.

특히, 수용액중에서 Ag를 환원침전하는데 있어서 환원제 종류에 따라 얻어지는 Ag 입자의 입도나 모양이 달라 질 수 있는 것으로 알려져 있다.

본 실험에서는 국내 함은 폐재로부터 Ag 나노분말을 제조하기 위한 선행연구로 전보<sup>12)</sup>의 ascorbic acid에 이어 hydrazine hydrate( $\text{NH}_2\text{NH}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ )를 환원제로 사용한 수용액중 은의 환원침전 특성을 조사하고 분산제로써 Tamol 및 Tween 20을 각각 사용하였을 때 생성된 Ag 분말의 형상과 입도분포를 조사하였다.

## 2. 실험 방법

### 2.1. 시약 및 재료

Ag 수용액으로부터 환원반응을 통한 Ag 나노분말 제조실험을 위해 본 실험에서는 silver nitrate( $\text{AgNO}_3$ , 99.8%, Daejung Chemicals & Metals Co.)를 원료로 사용하였으며, 이를 증류수에 일정 농도로 용해하여 Ag 수용액을 제조하였다. 환원제에 의한 수용액중의 Ag의 환원특성은 이미 언급한 바와 같이 hydrazine hydrate( $\text{NH}_2\text{NH}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ , Aldrich Co., 98%)를 환원제로 사용하여 실험조건에 따른 환원을 변화를 조사하였으며, 생성된 Ag 나노입자의 응집방지를 위한 분산제로써 Tamol<sup>®</sup> NN 8906(Naphthalinesulfonic acid polycondensate, sodium salt) 및 Tween<sup>®</sup> 20(Polyoxyethylene sorbitan Monolaurate, Average M.W. 1,228, Yakuri Pure Chem. Co.)을 각각 사용하여 분산제의 종류에 따른 Ag 나노 분말의 형상과 입도분포변화를 조사하였다.

### 2.2. 실험 방법

환원침전법을 이용한 Ag 나노분말 제조실험은 우선 100 ml 비이커에 미리 일정 농도로 조제한 질산은 수용액을 채우고 자석교반기로 교반을 하면서 분산제를 정량하여 첨가하였다. 이때, 자석교반기의 교반속도는 환원반응시에 영향을 미칠 수도 있는 교반세기의 영향을 최소화하기 위하여 일정 교반속도로 유지하여 실험을 실시하였다. 투입된 분산제가 질산은 용액과 완전히 혼합이 되도록 약 10여 분 이상 충분히 교반을 한 다음 미리 증류수에 용해시킨 Hydrazine Hydrate 용액을 한꺼번에 투입하였다. 환원제가 투입되는 순간 반응이 진행되어 Ag 미립자 현탁액이 생성되는 것을 관찰할 수 있었으며, 정해진 시간이 경과하면 교반을 멈추고 현탁액을 원심분리기(Model: Centrifuge 5416, Eppendorf)에 넣어 3,000 rpm의 회전속도로 5분간 원심분리하여

고-액 분리를 실시하였다. Ag 수용액의 환원율은 고-액 분리후 상등액중의 Ag 농도를 원자흡광분석기(Model: Varian SpetraAA)로 측정하여 초기 수용액중의 Ag 농도 대비 환원율을 계산하였다.

본 실험에서는 전보<sup>12)</sup>에서와 마찬가지로 환원반응을 모두 상온에서 실시하였으며, 반응시 pH 변화를 조사하기 위하여 반응 전후의 pH를 측정하였다(pH Meter: Accumet model20). 고-액 분리된 Ag 미립자는 증류수로 수회 반복 세척하고 50°C이하의 저온에서 진공건조한 다음 데시케이터에 보관하였다. 이러한 방법으로 제조한 Ag 미립자는 particle size analyzer(Model: Beckman Coulter LS PSA) 및 TEM (Model: JEOL 200CX) 분석을 통하여 생성된 Ag 나노 입자의 모양 및 입도를 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. Hydrazine hydrate(HH)에 의한 Ag의 환원특성

hydrazine hydrate(HH)를 환원제로 사용한 수용액중 Ag의 환원침전 실험결과 반응시간의 영향을 살펴보면 Fig. 1과 같다. 그림에서 보면 수용액중 초기 Ag 농도가 73.5 mmole/l일 때 환원제인 hydrazine hydrate를 Ag 대비 몰비가 50%가 되도록 첨가하여 반응을 시켰을 때 10분 이내에 거의 평형에 도달하는 모습을 보여주었다. 이것은 다른 환원제인 ascorbic acid 혹은 sodium formaldehydesulfoxylate를 사용한 Ag의 환원 실험<sup>12)</sup>과 비슷한 경향을 나타내는 것으로써, 수용액중에서 환원제에 의한 Ag 이온의 환원속도는 매우 빠르게 진행된다는 사실을 알 수 있었다. 실제로, 질산은 수용액에 환원제가 첨가되는 순간 Ag 미립자가 생성되면서 검은 회색의 현탁액으로 변화하는 모습을 관찰할 수 있다.

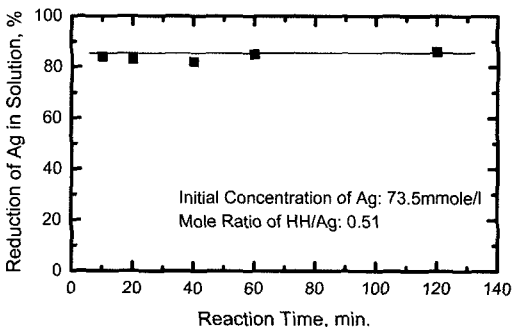


Fig. 1. Effect of reaction time on reduction of Ag in solution.

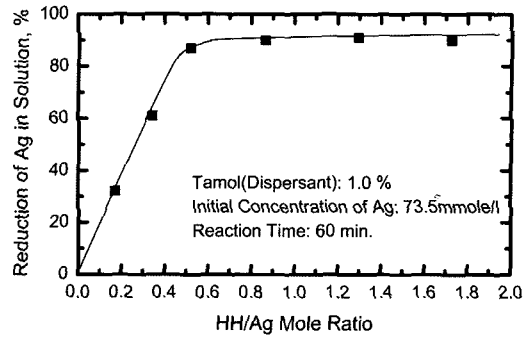
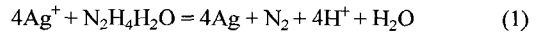


Fig. 2. Effect of HH/Ag mole ratio on reduction of Ag in solution.

한편, Fig. 2는 초기 Ag 농도 73.5 mmole/l의 수용액에 분산제인 Tamol을 1.0 wt%가 되도록 첨가한 상태에서 hydrazine hydrate 첨가량을 변화시켰을 때 환원율을 조사한 것이다. 수용액중에서 Ag 이온과 hydrazine hydrate의 환원반응식은 다음과 같이 표시할 수 있다.



위 반응식에서 알 수 있는 것처럼 수용액중에서 Ag 이온과 hydrazine hydrate는 몰비로 4 : 1의 비율로 반응하며, 또한 반응이 진행됨에 따라 H<sup>+</sup> 이온이 생성되어 수용액 pH는 점차 낮아진다. Fig. 2에서 보면 Ag 이온 대비 hydrazine hydrate 몰비(HH/Ag로 표시)를 점차 증가시키기에 따라 Ag의 환원율도 따라서 증가하게 된다. 그러나, 이론적으로 HH/Ag 값이 0.25일 때 100%의 환원율을 보여야 하는 것과 실제 환원율을 비교하여 보면 상당한 차이가 나는 것을 알 수 있다. 즉, HH/Ag가 0.25일 때 실제 환원율은 약 50% 정도에 그치고 있어 Ag의 충분한 환원을 위해서는 hydrazine hydrate를 이론치보다 2배 정도를 첨가하여야 하는 것으로 나타났다. 이 결과를 ascorbic acid를 환원제로 사용하는 경우<sup>12)</sup>와 비교하여 보면, ascorbic acid는 이론치보다 약 60%의 과량을 첨가함으로써 Ag의 환원이 이루어지나 본 실험에서와 같이 hydrazine hydrate를 사용하는 경우에는 이 보다 과량의 환원제가 소요되어, 결과적으로 수용액중에서 Ag의 환원력에 있어서는

Table 1. Variation of aqueous pH depending on HH/Ag mole ratio

HH/Ag mole ratio	0.17	0.34	0.51	0.85	1.27	1.70
Final pH	2.39	2.20	2.51	7.32	8.01	8.29

hydrazine hydrate가 ascorbic acid보다 떨어지는 것으로 나타나고 있다.

Table 1은 HH/Ag mole ratio가 변화하였을 때 반응 종료후 수용액 pH를 측정한 결과를 나타낸 것이다. hydrazine hydrate가 첨가되지 않은 상태에서의 질산은 수용액 pH는 대체로 5~6 범위인 것으로 나타났으나 표에서 보는 것처럼 hydrazine hydrate가 첨가되면 첨가량에 따라 수용액 pH가 크게 변하게 된다. HH/Ag mole ratio가 0.51에 도달할 때까지는 수용액 pH는 약 산성인 pH 2.2~2.5의 값을 보이게 되는데, 이것은 (1) 식에서 보는 것처럼 Ag 이온의 환원이 진행됨에 따라 생성되는 수소이온으로 인하여 초기 pH 보다 낮아지기 때문이다. 그러나, HH/Ag mole ratio가 0.85 이상에서는 pH 값이 급격히 상승하여 약알칼리 값을 보여주었다. 그 이유는 Fig. 2에서 나타난 바와 같이 HH/Ag mole ratio가 0.51 부근에서 Ag의 환원반응은 거의 종료가 되었기 때문에 그 이상의 Hydrazine hydrate 첨

가는 환원반응과는 무관하며, hydrazine hydrate 자체가 약알칼리성 화합물이기 때문에 수용액 pH가 증가하는 것으로 생각되고 있다.

Fig. 3은 hydrazine hydrate를 환원제로 사용하여 수용액으로부터 얻은 미립분말의 X-선 회절분석결과를 보여

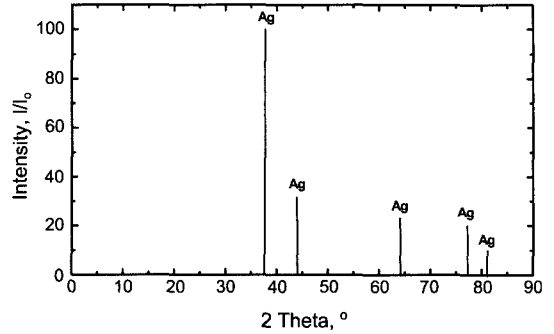


Fig. 3. X-ray diffraction pattern of Ag powder obtained in this work.

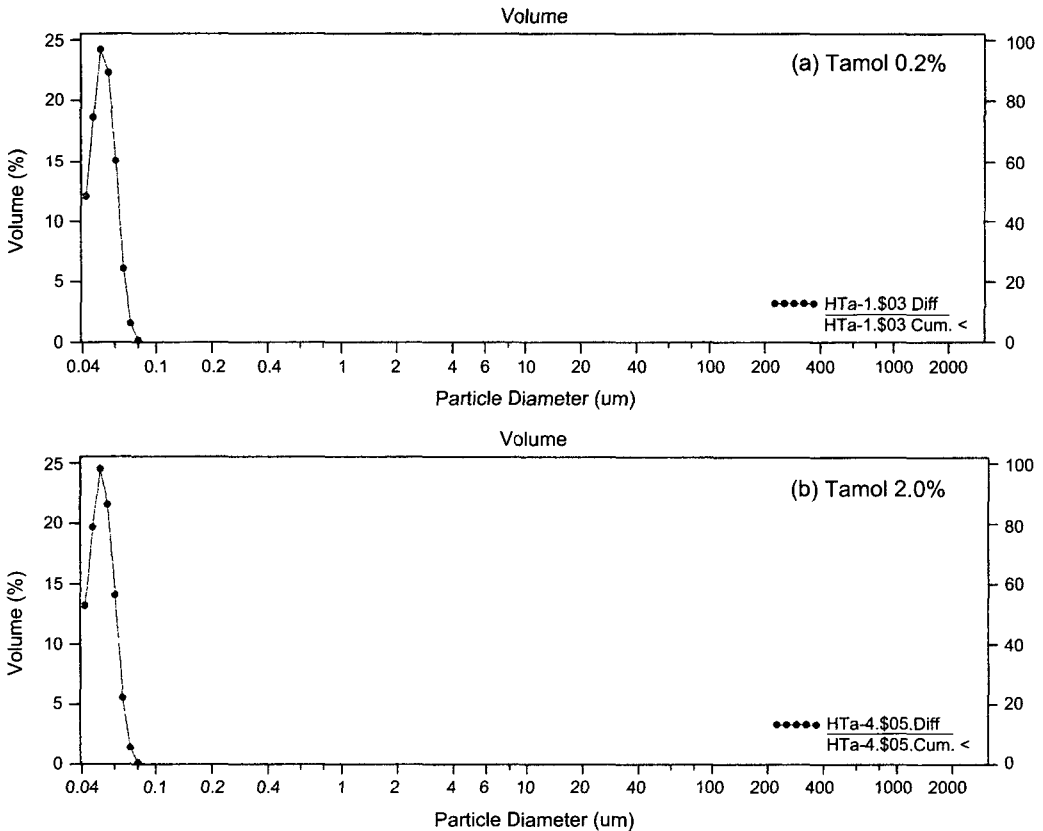


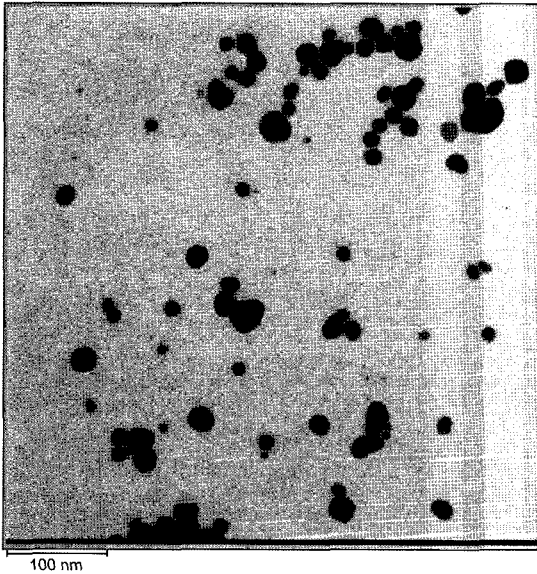
Fig. 4. Particle size distribution of Ag powders obtained in this work. (Initial concentration of Ag in solution 73.5 mmole/l, HH/Ag mole ratio 0.51)

주는 것으로써, 본 실험에서 생성된 미립자가 Ag powder 라는 사실을 확인할 수 있었다.

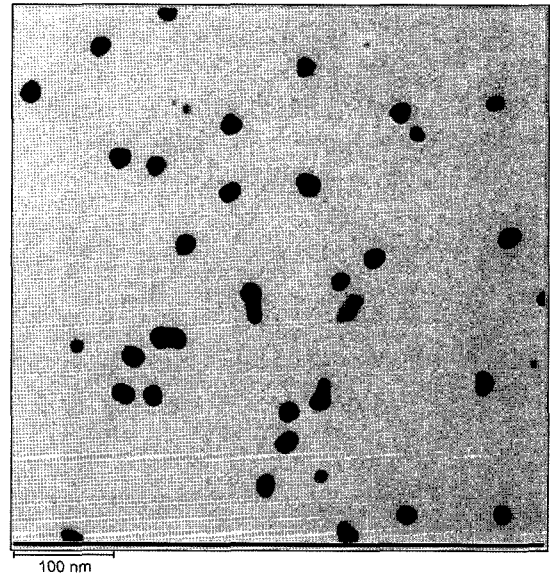
### 3.2. Hydrazine hydrate 환원으로 얻은 Ag 나노 입자의 특성

일반적으로 수용액으로부터 환원반응을 통해 얻은 Ag

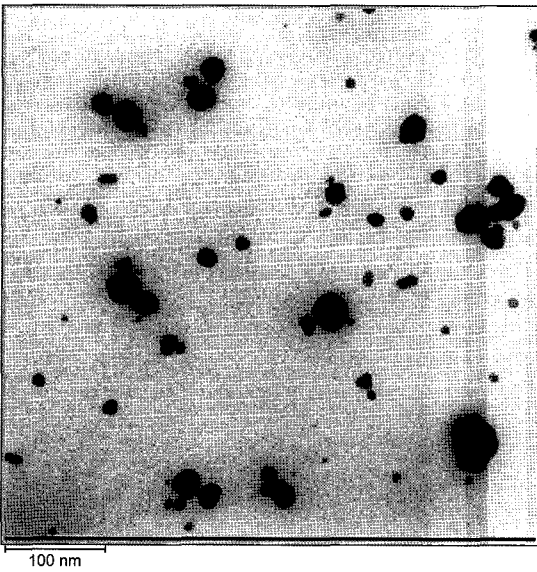
입자의 입도와 모양은 환원제의 종류뿐만 아니라 입자 응집을 억제하기 위하여 첨가하는 분산제의 종류 및 첨가량에 따라서도 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 본 실험에서는 hydrazine hydrate를 환원제로 사용하였을 때, 분산제로 Tamol<sup>®</sup> NN 8906(Naphthalinesulfonic acid polycondensate, sodium salt) 및 Tween<sup>®</sup> 20



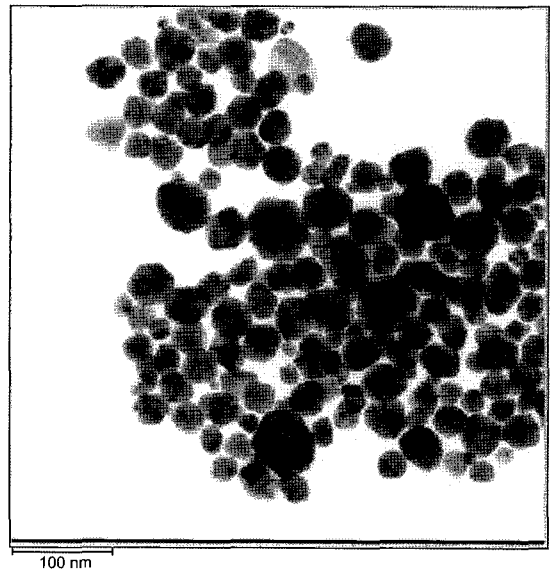
(a) Tamol 0.2%



(b) Tamol 0.4%



(c) Tamol 1.0%



(d) Tamol 2.0%

Fig. 5. TEM photos of Ag powders obtained in this work.

(Polyoxyethylene sorbitan Monolaurate, Average M.W. 1,228)을 각각 사용하는 경우에 있어서 생성된 Ag 나노 입자의 특성을 파악하고자 하였다.

Fig. 4는 초기 Ag 농도 73.5 mmole/l, HH/Ag mole ratio 0.51의 조건하에서 분산제인 Tamol을 각각 0.2wt% 및 2.0wt% 첨가하여 얻은 Ag 나노분말을 입도분석한 결과이다. 그림에서 보면 우선 입도분포 peak가 1개만이 나타나고 있는데, 이것은 ascorbic acid 혹은 sodium formaldehydesulfoxylate를 환원제로 사용한 경우<sup>12)</sup>와는 매우 다른 형태를 보여주고 있다. 즉, 대부분 수용액에서 생성된 Ag 나노분말의 입도분포는 peak가 2개 이상이 나타나는 bimodal 혹은 multimodal distribution의 특성을 보였으나 Fig. 4에서 보는 것처럼 hydrazine hydrate를 환원제로 사용하고 Tamol을 분산제로 사용하여 제조된 Ag 나노분말은 매우 좁은 입도범위의 단일 peak를 갖는 입도분포 특성을 보여 주었다. 또한, Tamol 농도 0.2~2.0 wt% 범위에서는 평균입도에

있어서 큰 차이가 없이 매우 균일한 입자로 구성되어 있음을 알 수 있었다.

한편, Fig. 5는 Tamol 농도 0.2~2.0 wt% 범위에서 제조한 Ag 나노분말의 TEM 측정 사진을 보여주는 것으로서, Fig. 4의 입도분포곡선에서 보는 것과 매우 유사하게 대부분 100 nm 미만의 입자로만 구성된 것을 볼 수 있다. 특이한 점은 Tamol 농도 2.0 wt%인 경우를 제외하고는 입자끼리의 응집이 심하지 않고 개별 입자가 모두 분산성이 양호한 것으로 나타났다는 점이다. 입자 모양에 있어서는 Tamol 첨가량에 관계없이 표면이 비교적 매끄러운 불규칙한 모양의 입자들로 구성되어 있음을 알 수 있었다. 대체적으로 입도분포곡선과 TEM 사진의 결과를 비교 검토하여 보면, 입도분포 측정기의 resolution 한계로 인하여 40 nm 이하의 입자 분포를 정확하게 판단할 수는 없으나 Tamol을 분산제로 사용하는 경우에 있어서 평균입도는 50~60 nm의 범위인 것으로 나타났다.

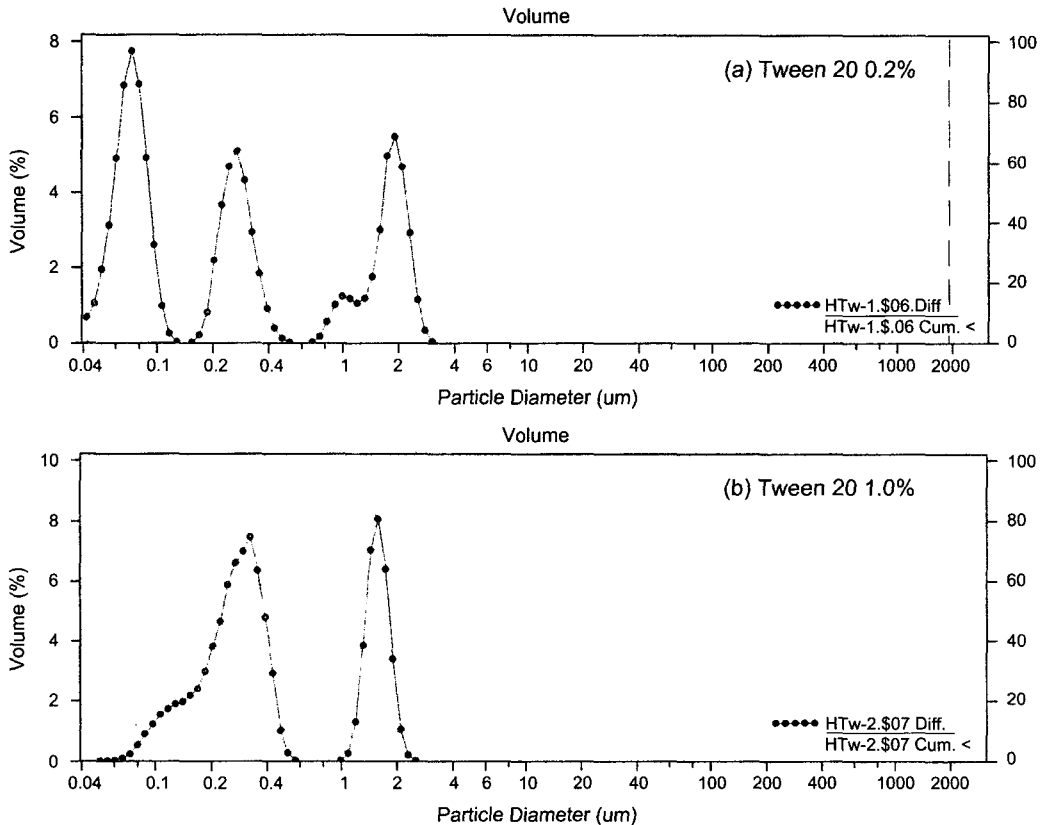


Fig. 6. Particle size distribution of Ag powders obtained in this work. (Initial concentration of Ag in solution 73.5 mmole/l, HH/Ag mole ratio 0.51)

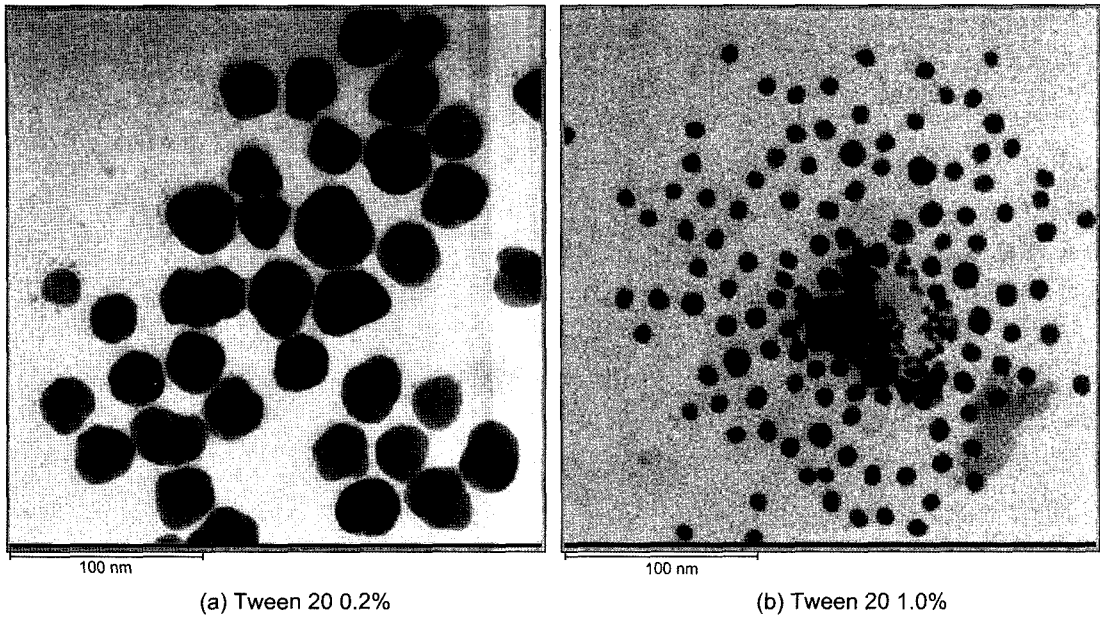


Fig. 7. TEM photos of Ag powders obtained in this work.

Fig. 6은 초기 Ag 농도 73.5 mmole/l, HH/Ag mole ratio 0.51의 조건하에서 분산제인 Tween 20을 각각 0.2 wt% 및 1.0 wt% 첨가하여 제조한 Ag 나노분말의 입도분포를 조사한 결과이다. 그림에서 보는 것처럼 생성된 Ag 입자는 Tween 20의 첨가량에 따라서 입도 peak가 2개 이상의 bimodal 혹은 multimodal distribution의 특성을 보여주고 있으며, 이것은 Tamol을 분산제로 사용한 Fig. 4의 결과와는 확연하게 다르다는 것을 알 수 있다. 입자 크기에 있어서는 Tween 20 첨가량이 0.2 wt%로 낮았을 때 100 nm 이하의 작은 입자가 보다 많이 생성되는 것을 제외하고는 Tween 20 첨가량에 의한 영향이 뚜렷하게 나타나지는 않았으며, 수십 nm 크기에서부터 2  $\mu\text{m}$  이상의 입자까지 비교적 넓은 범위의 입도 분포를 보였다.

한편, Fig. 7은 Tween 20을 분산제로 사용하여 제조한 Ag 나노분말의 TEM 사진을 보여주는 것으로써, 개별 입자의 분산성은 Tamol의 경우와 마찬가지로 매우 양호한 모습을 나타내고 있어 hydrazine hydrate를 환원제로 사용하여 수용액으로부터 얻은 Ag 입자들은 대부분 분산성이 뛰어나다는 사실을 알 수 있었다. 또한, 입자 모양에 있어서도 Tamol의 경우와 비슷하게 표면이 매끄러운 irregular shape의 입자들로 구성되어 있음을 알 수 있었다.

#### 4. 결 론

합은 폐재의 리사이클링을 위한 선행연구로써 hydrazine hydrate를 환원제로 사용하여 수용액으로부터 Ag 나노분말을 제조하기 위한 환원침전 실험을 수행한 결과 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

(1) hydrazine hydrate(HH)를 환원제로 사용하여 은을 환원침전시키는 경우 수용액중에서  $\text{Ag}^+$  이온과 HH는 볼비로 4:1의 비율로 반응하나 실제로 은을 모두 환원시키기 위해서는 환원제인 HH를 이론치보다 약 2배를 첨가해 주어야 하는 것으로 나타났다.

(2) 환원제인 HH와  $\text{Ag}^+$  이온이 반응하면서 수소이온의 발생으로 수용액 pH는 초기치보다 낮아지게 되어, HH/Ag mole ratio가 약 0.5에 도달할 때까지는 pH 2.2~2.5의 값을 보이나 그 이상의 HH/Ag mole ratio에서는 pH가 급격히 증가하는 것으로 나타났다. 이것은 Ag 이온의 환원이 완료되어 첨가된 HH에 의한 더 이상의 환원반응이 이루어지지 않기 때문이다.

(3) hydrazine hydrate를 환원제로 사용하고 Tamol을 분산제로 사용하여 제조된 Ag 나노분말은 매우 좁은 입도범위의 단일 peak를 갖는 입도분포 특성을 보여 주었다. 또한, Tamol 농도 0.2~2.0 wt% 범위에서는 평균 입도에 있어서 큰 차이가 없이 매우 균일한 입자로 구

성되어 있음을 알 수 있었다.

(4) Tween 20을 분산제로 사용한 경우의 입도분포는 bimodal 혹은 multimodal distribution의 특성을 보였으며, 수십 nm에서부터 2  $\mu\text{m}$  이상의 입자까지 넓은 범위의 분포를 나타냈다. 또한, 입자 모양에 있어서는 Tamol과 Tween 20이 모두 비슷하게 표면이 매끄러운 불규칙한 모양의 입자들로 구성되어 있었다.

### 참고문헌

1. Ko, T and Hwang, D. K., 2003: Preparation of nanocrystalline lead zirconate powder by homogeneous precipitation, *Materials Letters*, **57**, pp. 2472-2479.
2. Tan, Q. *et al.*, 2003: Influence of polyelectrolyte dispersant on slip preparation of nano-sized tetragonal zirconia, *Materials Chemistry and Physics*, **80**(3), pp. 615-619.
3. Li, Q. *et al.*, 2003: Preparation of ultrafine  $\text{MnO}_2$  powders by the solid state method reaction of  $\text{KMnO}_4$ , *J. of Materials Processing Technology*, **137**, pp. 25-29.
4. 한국무역협회, 2004: “무역통계연감”, 한국.
5. Sutugin, A. G. and Fuchs, N. A., 1968: Formation of condensation aerosols at high vapor supersaturation, *J. Colloid and Interface Science*, **27**(2), pp. 216-228.
6. Kruijs, F. E., Goossens, A. and Fissan, H., 1996: Synthesis of semiconducting nanoparticles, *J. Aerosol Science*, **27**(1), pp. S165-S166.
7. Chou, K. S. and Ren, C. Y., 2000: Synthesis of nanosized silver particles by chemical reduction method, *Materials Chemistry and Physics*, **64**, pp. 241-246.
8. Sondi, I., Goia, D. V. and Matijevic, E., 2003: Preparation of highly concentrated stable dispersions of uniform silver nanoparticles, *J. Colloid and Interface Science*, **260**, pp. 75-81.
9. Khanna, P. K. and Subbarao, V. V. V. S., 2003: Nanosized silver powder via reduction of silver nitrate by sodium formaldehydesulfoxylate in acidic pH medium, *Materials Letters*, **57**, pp. 2242-2245.
10. Li, R. *et al.*, 2003: Study of fine silver powder from AgOH slurry by hydrothermal techniques, *J. Materials Processing Technology*, **137**, pp. 55-59.
11. Zhu, Y., Qian, Y., Zhang, M. and Chen, Z., 1993: Preparation of nanocrystalline silver powders by gamma-ray radiation combined with hydrothermal treatment, *Materials Letters*, **17**(5), pp. 314-318.
12. 이화영, 진선아, 한영주, 2005: Ag 수용액으로부터 환원반응에 의한 Ag 미립자의 제조연구, *자원리사이클링학회지*, **14**(1), pp. 26-32.

---

李 華 永

- 현재 한국과학기술연구원 2차전지연구센터  
책임연구원
  - 본 학회지 제10권 제4호 참조
-