

액상환원법으로 제조한 은 나노입자의 크기와 분산특성

이종집*

¹공주대학교 화학공학부

Size and Dispersion Characteristics of Silver Nanoparticles Prepared Using Liquid Phase Reduction Method

Jong Jib Lee*

¹Division of Chemical Engineering, Kongju National University

요약 본 연구에서는 PAA를 사용한 액상환원법에 의해 은 나노용액을 합성하는 과정에서 실험변수로서 PAA의 분자량, PAA의 첨가량, 환원제, 분산제, 유기용매 등을 사용하여 은 나노입자의 크기와 분산특성을 조사하였다. UV-Visible spectrophotometer로 은 나노입자의 생성을 확인하였으며, SEM으로 nanometer 영역의 입자크기와 분산특성을 알아냈다. 초음파 파쇄시간이 증가할수록 은 나노입자의 덩어리가 작아지는 경향을 나타내며 3시간 이후에는 1-5개의 작은 덩어리 형태로 은 나노입자가 분산되었다. 초음파 파쇄와 함께 Copolymer with pigment affinic group을 주성분으로 하는 분산제인 BYK-192를 첨가해 주면 49.56- 85.75 nm의 크기를 가진 비교적 구형에 가까운 균일한 은 나노입자가 균일하게 완전히 분산되는 되었다. PAA의 분자량이 증가할수록 은 나노입자의 평균크기가 36.82 < 50.66 < 56.06 nm 순으로 증가하였다. 또한 PAA의 첨가량이 늘어날수록 은 나노입자의 표면에 덧씌움 현상이 일어나서 은 나노입자의 크기가 커지는 것으로 나타났다. 환원제인 Hydrazine을 첨가하면 환원반응에 의해 많은 수의 핵이 생성되었기 때문에 상대적으로 작은 크기의 입자가 생성되었다. 유기용제(에탄올-아세톤)은 은 나노입자의 규칙적 배열을 도와주었다.

Abstract This work investigates the size and dispersion characteristics of silver nanoparticles synthesized by a liquid phase reduction method using PAA. The experimental variables were the molecular weight and doses of the PAA, reducing agent, dispersant, and organic solvent (ethanol-acetone). UV-visible spectrophotometer results confirm the formation of the silver particles, and SEM indicates size in the nanometer range. As the ultrasonication time increases, there is a tendency toward smaller agglomerates of nanoparticles. The agglomerates were dispersed into 1-5 agglomerates of particles by ultrasonication for 3 hours or more. Relatively spherical nanoparticles were produced with a completely homogeneous dispersion and size of 49.56-85.75 nm by ultrasonication using BYK-192, a dispersant containing copolymer with a pigment affinic group. The average size of the silver nanoparticles was increased to 36.82, 50.66, and 56.06 nm with increasing molecular weight of PAA. Also, the size of the nanoparticles increased with the capping of PAA on the surfaces of the nanoparticles when increasing the amount of PAA. The addition of hydrazine as a reducing agent produced relatively small particles because many nuclei were created by the reduction reaction. The ethanol-acetone solvent helped with the regular arrangement of the silver nanoparticles

Keywords : Silver nanoparticle, Silver, nanoparticle, Dispersion, liquid phase reduction

1. 서론

은(Ag) 전구체를 통해 은(Ag) 입자를 제조하는 방법

으로 열분해법, 기상응축법, 수소환원법, 액상환원법 등 많은 방법이 있다. 이 중 액상환원법은 타 공정과 비교하여 반응 속도 및 수득율이 높고, 환원제의 양과 반응 시

본 논문은 산업기술평가관리원의 벤처형 전문소재개발사업으로 지원받아 수행된 연구결과임(과제번호10049635)

*Corresponding Author : Jong Jib Lee

Tel : +82-41-521-9357 e-mail : jjlee@kongju.ac.kr

Received January 27, 2016

Revised (1st April 1, 2016, 2nd April 20, 2016, 3rd April 26, 2016)

Accepted May 12, 2016

Published May 31, 2016

간 및 속도 조절에 의해 비교적 쉽게 나노 크기의 입자를 얻을 수 있다는 장점이 있다[1-3.] 또한 액상환원법은 제조공정이 간단하고, 계면 활성제, 농도, 온도, pH 등에 따라 입자 크기 조절이 가능하며 비교적 입자 크기 분포가 균일하기 때문에 널리 쓰이고 있다[4]. 최근에는 액상환원법을 이용해 백금 계열 금속 및 다양한 전이금속류의 입자 크기 및 형상 제어에 관한 연구가 많이 진행되고 있다[5]

또한 입자 크기 및 형상 제어를 위하여 다양한 표면안정제(Capping agent)가 사용되는데, 이러한 표면안정제는 높은 표면에너지를 갖는 나노 입자의 표면을 안정시켜 더 큰 입자로의 응집을 막을 뿐만 아니라 특정표면에 선택적으로 더 강하게 결합함으로써 각 표면의 결정성장 속도를 제어하여 입자의 형상을 조절할 수 있는 것으로 알려져 있다[6].

본 실험에서는 질산은(AgNO_3)을 출발물질로 사용하고 표면안정제로 poly acrylic acid, sodium salt(PAA)를 사용하여 은 나노줄을 만든 다음 Hydrazine에 의해 환원시키는 액상환원법을 사용하여 은 나노입자를 제조하였다. PAA의 첨가량과 분자량, 환원제, 분산제 및 유기용매를 실험변수로 선정하여 은 나노입자의 분산특성을 조사하였다. 최종적으로 상업적인 응용성이 가장 높은 50-100 nm 정도의 균일한 크기를 갖는 은 나노입자를 합성하고, 우수한 분산특성을 나타내는 제조 조건을 알아내는 것을 목적으로 하였다.

2. 실험재료 및 방법

2.1 실험재료

은 나노 입자를 제조하기 위해 대정화금 사의 silver nitrate를 출발물질로 사용하고, 환원제로 80% hydrazine ($\text{N}_2\text{H}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$)를 사용하였다.

수용액은 Labwater Tank(Elga, DV25)를 거친 순수를 사용하여 조제하였다. 또한 환원에 의해 나노입자를 합성 시, 입자의 성장 및 응집을 방지하고 분산안정성에 기여할 목적으로 고분자전해질과 분산제를 첨가하였다. 고분자전해질인 PAA는 Sigma-Aldrich 사의 제품을 분자량이 각각 1,200, 8,000, 15,000인 PAA 1,200, PAA 8,000, PAA 15,000을 사용하였다. 유기용매는Aldrich 사의 ethanol과 acetone이며, 분산제는 BYK 사의

BYK-142, BYK-182, BYK-192를 사용하였다.

2.2 실험방법

2.2.1 은 나노입자 합성 실험

비이커에 0.0001M AgNO_3 수용액 100 mL를 취하고 PAA 1,200, 8,000 및 15,000을 사용하여 각각 PAA의 음이온(COO^-)과 은 이온(Ag^+)의 몰 비율($R=[\text{COO}^-]/[\text{Ag}^+]$)을 0.06에서 0.1까지 변화시키면서 첨가하고 자석식 교반기를 사용하여 일정한 속도로 교반하였다. 은과 고분자전해질이 착체를 형성하면 환원제인 Hydrazine을 0.0001M AgNO_3 과 당량비 1 : 1이 되도록 재빠르게 혼합한 다음 자석식 교반기로 1시간 이상 교반하여 은 나노입자를 합성하였다. UV-Visible Spectrophotometer (Shimadzu, UV-1800PC)를 이용하여 은 나노입자의 생성여부를 분석하였고 FE-SEM(TESCAN, MIRA LMH)을 사용하여 은나노입자의 분산 상태와 입자크기 및 형태 등을 확인하였다.

2.2.2 분산성 향상 및 입자크기 변화 실험

0.0001 M의 질산은 수용액 100 mL에 분자량 8,000인 PAA를 0.03 g을 혼합하여 초음파 파쇄기(화신테크, Powersonic 410)로 1-5시간 초음파 파쇄하여 은 나노입자 제조시 초음파 파쇄가 분산성에 미치는 영향을 확인하고자 하였다. 그리고 동일한 조건에서 분산제로 BYK-142, BYK-182, BYK-192를 각각 1 mL씩 첨가한 후 초음파로 파쇄 하여 분산제 첨가효과와 함께 각분산제의 분산특성을 분석하였다.

유기용매가 분산성에 미치는 영향을 확인하기 위하여 0.0001 M의 질산은 수용액 100 mL에 분자량 8,000인 PAA를 0.05g 혼합하여 10 mL 채취한 뒤 예비실험결과를 토대로 Ethanol과Acetone을 50: 50으로 혼합한 용액 2 mL 첨가 한 것과 하지 않은 것을 가지고 각각 은 나노입자를 제조하여 비교하여 보았다.

반응물질이 분산성과 입자크기에 미치는 영향을 알아보고자 먼저 고분자전해질인 PAA의 분자량을 변화시켜 보았다. 0.0001 M의 질산은 수용액 100 mL에 PAA 1,200, PAA 8,000, PAA 15,000을 각각 0.05 g 혼합한 용액을 10 mL씩 채취하여 분산제 1 mL, 유기용매 Ethanol과 Acetone 혼합용액 2 mL를 첨가하여 샘플을 만들고 3시간씩 초음파 파쇄하였다. 다음에는 고분자전해질인 PAA의 첨가량을 변화시켜 은 나노 입자의 크기

와 분산특성에 대해 조사하였다. 0.0001M의 질산은 수용액 100 mL에 분자량이 8,000인 PAA 첨가량을 0.2, 0.1, 0.05, 0.03 g로 변화시켜가며 첨가한 다음 위와 같은 방법으로 샘플을 만들어 3시간씩 초음파 파쇄 하였다.

AgNO₃ 농도변화에 따라 은 나노입자 크기에 어떤 변화가 있는지 알아보았다. PAA 8,000을 몰비율(R) 0.07로 조정된 상태에서 AgNO₃ 농도를 0.0001 M~0.0005 M까지 변화시켜 은나노입자를 제조하였다. 그리고 0.0001 M의 질산은 수용액 100 mL에 분자량 8,000인 PAA 0.2 g과 hydrazine을 은 당량비에 맞게 혼합하여 hydrazine 첨가한 것과 첨가하지 않은 것에 대한 은 나노입자의 분산특성을 조사하였다.

Fig. 1에 실험절차를 나타냈다.

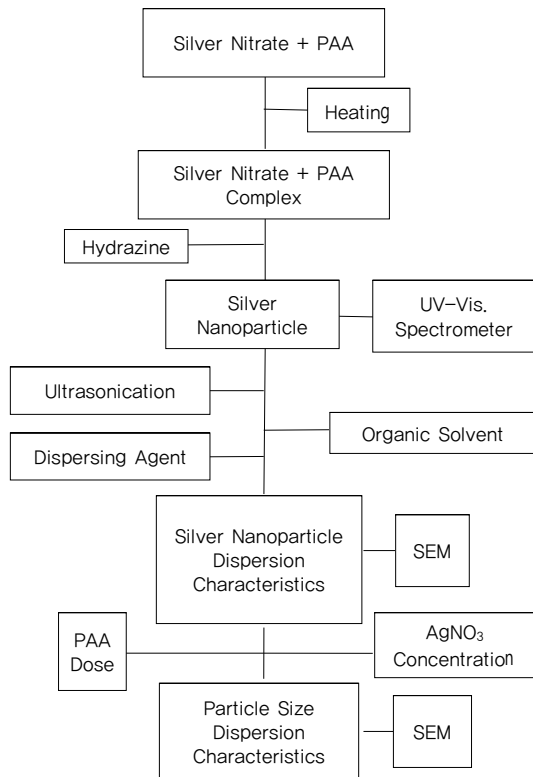


Fig. 1. Diagram of examination procedure.

3. 결과 및 고찰

3.1 은 나노입자의 합성확인

0.001 M 질산은 용액 100 ml에 PAA를 첨가하여 은

나노 용액을 제조 한 후 생성된 은 나노입자의 유무를 확인하고자 UV-Visible Spectrometer를 이용하여 은 입자의 흡수 파장을 측정해 본 결과는 Fig. 2와 같다. 합성 반응에 의해 생성된 은 나노입자가 424 nm에서 최대 흡수파장을 나타내는 것을 볼 수 있었다. 이와 같은 결과는 참고문헌의 흡수파장 값인 421 nm과 거의 유사한 값이었다[7].

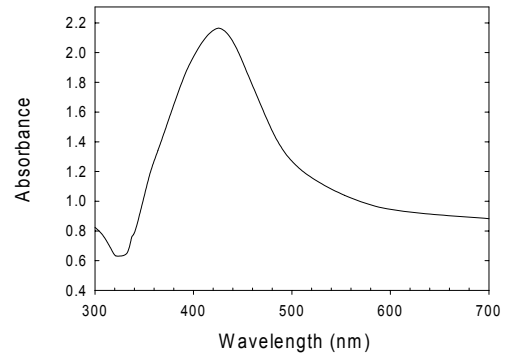


Fig. 2. Absorption peak of silver nano particle.

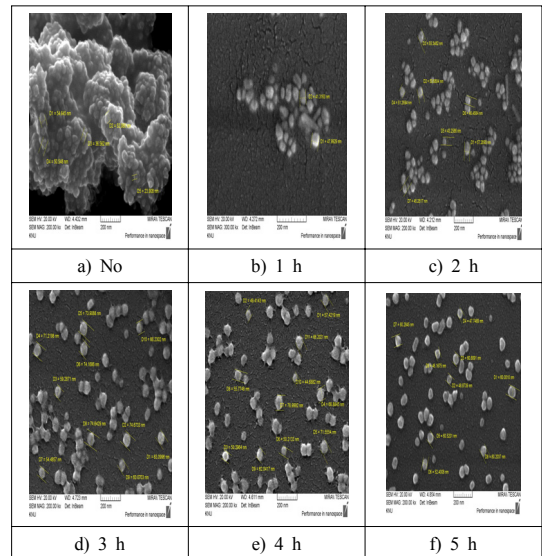


Fig. 3. FE-SEM image for dispersion effect of silver nanoparticles by ultrasonication.

3.2 초음파 파쇄시간에 따른 분산효과

Fig. 3(a)와 같이 응집된 덩어리 상태로 있는 은 나노입자를 효과적으로 분산시키기 위해 초음파 파쇄기(Ultrasonicator)를 사용하여 분산시켰다. 초음파파쇄기

를 사용하면 시간이 지남에 따라 온도가 40℃ 이상 올라가기 시작하는데 이를 방지하기 위해 30분에 한번 씩 물을 바꿔주었다. 초음파와 파쇄를 실시하지 않았을 때와 1-5 시간 동안 실시하였을 때의 결과를 분석하여 나타난 FE- SEM 사진은 Fig. 3과 같다.

Fig. 3을 보면 알 수 있듯이 초음파와 파쇄를 실시하지 않았을 때는 (a)와 같이 거대한 덩어리로 뭉쳐져 있는 상태이지만 초음파와 파쇄를 실시함에 따라 덩어리의 크기가 작아지는 경향을 나타냈다. 초음파와 파쇄 실시 1시간 후에는 약 30-40 개의 작은 덩어리로 파쇄되며, 2시간 후에는 5-10개의 덩어리로 더 작아지며, 3시간 이후에는 1-5개의 작은 덩어리 형태로 은 나노입자를 파쇄시켜 분산성이 크게 높아졌다. 3시간 이후의 초음파와 파쇄결과는 큰 차이가 없었기 때문에 이후의 실험에서는 초음파와 파쇄를 3시간 실시하는 것으로 조건을 정하였다.

3.3 분산제 첨가에 의한 분산효과

초음파와 파쇄에 의해 거대한 응집입자덩어리가 1~5 개 정도의 입자가 응집된 형태로 파쇄 및 분산되는 것을 확인하였지만 완전하게 입자 하나하나가 떨어진 상태가 아니었기 때문에 은 나노입자를 완전분산 시키기 위해서 분산제를 첨가하는 실험을 하였다. 분산제로는 BYK 사의 제품으로 .Phosphoric ester salt 계인 BYK-142, 2-Methoxy -2-propanol acetate 계인 BYK-182, Copolymer with pigment affinic group을 주성분으로 하는 BYK-192를 사용하였다.

Fig. 4를 보면 분산제를 첨가한 a), b) c) 모두 100 nm 이하의 분산된 입자가 생성됨을 알 수 있다. a)BYK-142의 경우 37-83 nm의 입자를 생성하였지만 입자의 모양이 다소 불균일한 형태를 보였고 b)BYK-182의 경우 33.28-75.83 nm 크기의 입자를 형성하였지만 응집현상이 완전히 해소되지 못하였다. 반면에 c)의 경우는 49.56- 85.75 nm의 크기를 가진 은 나노입자가 생성되었는데 응집현상이 전혀 일어나지 않았고 비교적 구형에 가까운 균일한 형태의 은 나노입자가 생성되었다.

분산제 분자는 계면에 흡착하고자 하는 고유의 성질과 어느 정도의 점도를 유지하기 때문에 은 나노입자가 형성되는 용액 내에서 은 나노입자 핵의 표면에 흡착하여 핵끼리의 융합을 막아주며, 환원된 은 원자와 원자 간의 이동을 방해하므로 표면으로의 결함을 지연시키므로 입도분포가 균일하고 또한 입도를 제어 할 수 있는 작용

을 하게 된다[8]. 본 연구에서는 Copolymer with pigment affinic group을 주성분으로 하는 BYK-192가 가장 입도 분포와 입도제어가 우수한 최적의 분산제로 확인되었다.

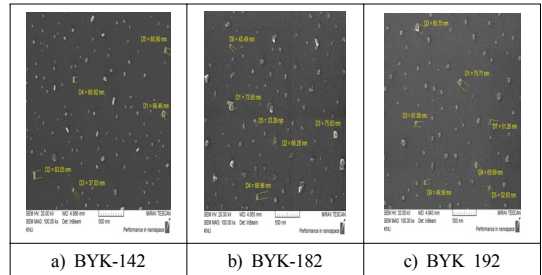


Fig. 4. Effect of dispersion of silver nanoparticles for addition of dispersing agent.

3.4 PAA의 분자량 변화에 의한 분산효과

합성한 은 나노입자가 완전하게 분산이 되는 조건하에서 분자량이 서로 다른 PAA를 사용하여 은 나노입자를 합성해봄으로서 고분자 전해질인 PAA의 분자량이 달라졌을 때 생성되는 은 나노입자의 특성이 어떻게 달라지는지 확인해 보고자 하였다.

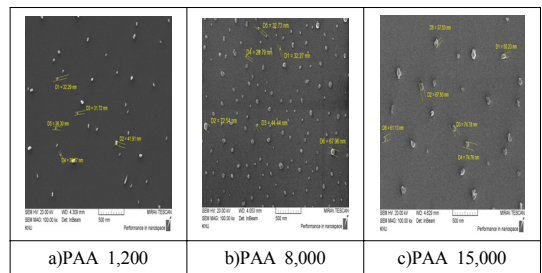


Fig. 5. FE-SEM images of the silver nanoparticles prepared from PAA with different molecular weight.

Fig. 5를 보면 PAA를 첨가하였을 때, 모두 분산상태가 양호하며 은 이온과 착물을 형성한 것을 확인할 수 있었다[9]. 분자량이 8,000인 PAA를 사용한 b)에서는 구형의 비교적 균일한 입자가 생성되었으나, 분자량이 1,200, 15,000인 PAA를 사용한 a), c)는 구형이 아닌 불균일한 형태를 보였다. 이는 너무 낮은 분자량에서는 짧은 고분자 사슬로 인하여 표면안정제로서의 효과가 부족하기 때문이며, 너무 높은 분자량에서는 긴 사슬로 인하여 두 입자 사이에 다리를 놓아서 응집을 촉진시키는 다

리 놓기(Bridging flocculation) 응집이 일어났기 때문으로 판단된다[10].

한편 PAA의 분자량이 증가할수록 은 나노입자의 평균크기가 36.82 < 50.66 < 56.06 nm 순으로 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 현상이 나타나는 이유로는 먼저 고분자전해질인 PAA의 각 Segment에 있는 카르복실기(COO⁻)가 용매 중에 해리하여 Ag⁺ 이온과 착물(Complex)을 형성하기 때문이며, 두 번째로는 은 나노 입자표면에 흡착된 고분자전해질 흡착층은 입자간 입체장애효과 및 전기이중층의 반발 효과를 동시에 제공하여 은 나노 줄에 분산안정성을 제공하게 되는데 이 때 필요한 분산력을 주려면 적절한 흡착층의 두께가 필요하게 되므로 결국 흡착층이 두꺼워져 입자의 크기가 커지는 것이라고 보고되어 있다[10].

3.5 PAA의 첨가량 변화에 의한 분산효과

질산 은의 농도는 0.0001 M로 고정된 상태에서 PAA 8,000의 첨가량을 몰 비율(R= [COO⁻]/[Ag⁺]) 0.07, 0.14, 0.28로 증가시켰을 때의 입자크기와 분산성을 비교해 보았다.

Fig. 6을 보면 0.0001 M의 질산은 수용액에 대한 PAA 8,000의 첨가량이 몰 비율(R) 0.07 일 때, 은 나노입자의 크기는 26~75 nm 정도이고, 몰비율 0.14일 때는 50~123 nm, 몰비율 0.28일 때 79~181 nm로 커졌다. 이는 PAA 첨가량이 많아지면 그만큼 많은 양의 PAA가 은 나노입자 표면에 덧씌움(Capping)되어 나노입자를 둘러싸는 층이 더 커지기 때문에 은 나노입자의 크기가 조금씩 더 커진 것으로 판단되었다[11].

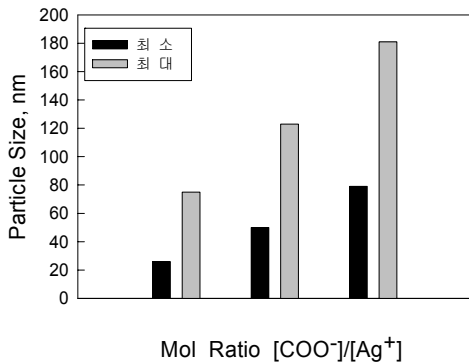


Fig. 6. Comparison of size of silver nanoparticles for addition of PAA.

3.6 환원제의 첨가에 의한 분산효과

은을 비롯한 귀금속은 환원력이 매우 높아 이온의 상태보다 금속입자의 상태가 더 안정하다. 따라서 화학환원법에 의한 환원반응에서는 은의 이온상태가 매우 불안정하여 입자의 형상과 크기가 불규칙한 입자를 만들기 쉬우므로, 입자의 형상과 크기가 제어된 은 나노입자를 제어하기 위해서는 환원속도를 제어해 주어야 할 필요가 있다[12].

은이 Hydrazine과 반응하여 환원되는 반응은 식과 같다.

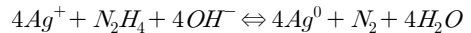


Fig. 7에서 환원제인 Hydrazine을 넣지 않은 a)는 700 nm 정도의 큰 입자 크기를 갖는 것으로 확인되었지만 hydrazine을 넣은 b)는 100 nm이하의 잘 분산된 은 나노입자를 얻을 수 있었다. 이러한 현상이 나타난 이유는 Hydrazine을 첨가하지 않은 경우에는 핵생성 단계에서 핵 발생속도가 느려지기 때문에 소수의 핵이 생성되며, 생성된 소수의 핵에 입자의 성장이 집중되어 입자크기가 커졌기 때문이고, Hydrazine을 첨가한 경우에는 환원반응에 의해 다수의 핵이 생성되었기 때문에 이들 핵에 고분자전해질이 안정적으로 골고루 분산되었기 때문에 상대적으로 작은 크기의 입자가 생성되었다고 판단된다[13].

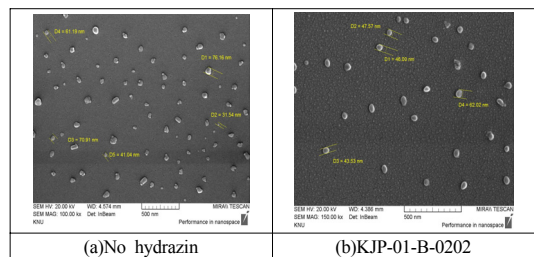


Fig. 7. FE-SEM images of silver nanoparticles for addition of reductant

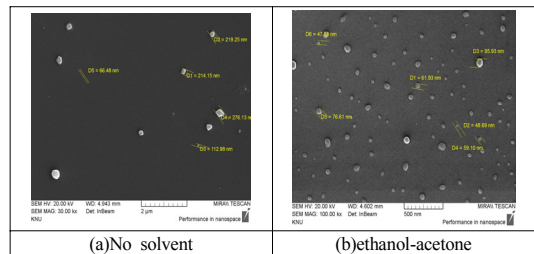


Fig. 8. FE-SEM images of the silver nanoparticles for addition of organic solvent.

3.7 유기용매 첨가에 의한 분산효과

선형실험을 통하여 은 나노입자 수용액과 상용성이 좋은 유기용매로서 Ethanol-Acetone을 1:1로 조합한 경우가 분산에 적합하다는 것을 확인하였다. 이러한 결과를 바탕으로 유기용매로 Ethanol-Acetone(1:1) 용액을 은 나노입자 수용액에 첨가하여 합성한 은 나노 입자의 분산상태를 조사하였다.

Fig. 8을 보면 유기용매를 첨가하지 않은 경우에 생성된 은 나노입자는 (a)와 같이 크기분포가 60~250 nm로 넓게 나타나서 입자크기가 고르지 못하면서 형태도 불규칙한 것으로 확인되었다. Ethanol-Acetone(1:1)을 첨가하여 은나노입자를 생성한 경우에는 (b)와 같이 47.88-76.61 nm의 구형입자가 고르게 만들어진 것이 관찰되었다. 이것은 Ethanol과 Acetone이 모두 극성용매이기 때문에 고분자전해질인 PAA를 안정화시켜주어 분산성 향상에 기여하였기 때문에 입자의 분산과 분포가 고르게 나타난 것으로 판단되었다[14].

4. 결론

본 연구에서는 얻은 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 초음파 파쇄시간이 증가할수록 은 나노입자의 덩어리가 작아지는 경향을 나타내며 3시간 이후에는 1-5개의 작은 덩어리 형태로 은 나노입자를 파쇄시켜 분산성이 크게 높아졌다.
- 2) 초음파 파쇄와 함께 Copolymer with pigment affinic group을 주성분으로 하는 분산제인 BYK-192를 첨가해 주면 49.56- 85.75 nm의 크기를 가진 비교적 구형에 가까운 균일한 은 나노입자가 생성되었는데 응집현상이 전혀 없이 균일하게 완전히 분산되었다.
- 3) 은 나노입자 제조에서 고분자전해질인 PAA의 첨가량이 늘어날수록 많은 양의 PAA가 은 나노입자 표면에 덮어씌움(Capping)되어 입자의 크기가 커지는 경향을 나타냈다.
- 4) Hydrazine을 첨가하지 않았을 때는 핵 발생속도가 느려지기 때문에 소수의 핵이 생성되어 700 nm 정도의 큰 입자가 생성되었지만 Hydrazine을 첨가하면 환원반응에 의해 많은 핵이 생성되었기 때문에 입자의 성장을 효과적으로 분산시켜 100 nm

이하의 크기가 상대적으로 작으면서도 균일한 은 나노입자를 제조할 수 있었다.

- 5) PAA의 분자량이 증가할수록 고분자전해질인 PAA의 각 Segment에 있는 카르복실기(COO⁻)가 Ag⁺ 이온과 착물을 형성하기 때문에 흡착층의 두께가 두꺼워져서 은 나노입자의 평균크기가 36.82< 50.66<56.06 nm 순으로 증가하였다.

References

- [1] Y. Xia, Y. Sun, Shape-Controlled Synthesis of Gold and Silver Nanoparticles, Science, 13, 79-2176, 2002.
- [2] H. H. Huang, X. P. Ni, G. L. Loy, C. H. Chew, K. L. Tan, F. C. Loh, J. F. Deng, G. Q. Xu, Photochemical Formation of Silver Nanoparticles in Poly(N-vinylpyrrolidone), Langmuir, 12, 12-909, 1996. DOI: <http://dx.doi.org/10.1021/la950435d>
- [3] C. Baker, A. Pradhan, L. Pakstis, D. J. Pochan, S. I. Shah, Synthesis and antibacterial properties of silver nanoparticles, J. Nanosci. Nanotechnol., 5, 244, 2005. DOI: <http://dx.doi.org/10.1166/jnn.2005.034>
- [4] B.U. Lee, Y.J. Kim, C.H. Lee, S.H. Yun, G.N. Bae, J.H. Ji, Development of a fungal spore aerosol generator: Test with Cladosporium cladosporioides and Penicillium citrinum, J. Microbiol. Biotechnol., 18(4), 795-798, 2008.
- [5] C. N. Lok, C. M. Ho, R. Chen, W. Y. Yu, H. Sun, P. K. Tam, J. F. Chiu, C.M.Chen, Proteomic analysis of the mode of antibacterial action of silver nanoparticles, J. Proteome. Res., 5, 916-924, 2006. DOI: <http://dx.doi.org/10.1021/pr0504079>
- [6] A. Z. Melaiye, K. Sun, A. Hindi, Milsted, D. Ely, D. H. Reneker, C. A. Tessierand, W. J. Youngs, Silver (I)-imidazole cyclophane gem-diol complexes encapsulated by electrospun tepochilic nanofibers: formation of nanosilver particles and antimicrobial activity, J. Am. Chem. Soc., 127, 2285, 2005. DOI: <http://dx.doi.org/10.1021/ja040226s>
- [7] S. Franke, G. Grass, D. H. Nies, The product of the ybdE gene of the Escherichia coli chromosome is involved in detoxification of silver ions, J. Microbiol., 51, 956, 2001. DOI: <http://dx.doi.org/10.1099/00221287-147-4-965>
- [8] S. I. Shin, S. G. Oh, Preparation of nano particles using surfactants, Prosp. Ind. Chem. 4(2), 40-47, 2001.
- [9] Y. H. Kim, The Effect of zeta-potential on the stabilization of silver nanoparticle colloid prepared by alcohol reduction method with PVP, J. Korean Ind. Eng. Chem., 14(4), 487-492, 2003.
- [10] A. Dietrich, A. Neubrand, Effects of particle size and molecular weight of polyethylenimine on properties of nanoparticulate silicon dispersions, J. Am. Ceram. Soc., 84, 12-806, 2001. DOI: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1151-2916.2001.tb00745.x>

- [11] X. Li, J. J. Lenhart, H. W. Walker, Aggregation Kinetics and Dissolution of Coated Silver Nanoparticle, *Langmuir*, 28, 1095-1104, 2011.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1021/la202328n>
- [12] K. S. Chou and C. Y. Ren, Synthesis of nanosized silver particles by chemical reduction method, *Mater. Chem. Phys.*, 64, 46-241, 2000.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0254-0584\(00\)00223-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0254-0584(00)00223-6)
- [13] A. Pyatenko, M. Yamaguchi, M. Suzuki, Synthesis of Spherical Silver Nanoparticles with Controllable Sizes in Aqueous Solutions, *J. Phys. Chem. C*, 111, 7910-7917, 2007.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1021/jp071080x>
- [14] X. Li, J. J. Lenhart, H. W. Walker, Dissolution-Accompanied Aggregation Kinetics of Silver Nanoparticles, *Langmuir*, 26(22), 16690-16698, 2010
DOI: <http://dx.doi.org/10.1021/la101768n>

이 종 집(JongJibLee)

[정회원]



- 1983년 8월 : 인하대학교 공과대학 원 화학공학과 (공학석사)
- 1987년 8월 : 인하대학교 공과대학 원 화학공학과 (공학박사)
- 1987년 9월 ~ 1990년 2월 : (주) 맨가드 환경시설부 과장
- 1990년 3월 ~ 현재 : 공주대학교 화학공학부 교수

<관심분야>

청정기술, 화학제품