

백토안료의 전통제법 중 아교수 영향에 관한 연구

강영석 | 정혜영¹ | 고인희
국립문화재연구소 복원기술연구실

The Effect of Glue Solution on Manufacturing of White Clay Pigment

Yeong Seok Kang | Hye Young Jeong¹ | In Hee Go

Restoration Technology Division, National Research Institute of Cultural Heritage, Daejeon, 34122, Korea

¹Corresponding Author: elisul@korea.kr, +82-42-860-9348

초록 백토안료의 제조 공정 중 분쇄 및 수비단계에서 아교수를 적용하고 이에 따른 영향을 분석하였다. 분쇄 공정에서 아교수를 적용한 경우, 일반 증류수를 사용했을 때보다 미분의 생성량이 감소하고 분급도가 향상되는 것으로 나타났다. 일반적으로 분쇄 성능 및 분쇄 한계에는 마찰력이 많은 영향을 미친다. 따라서 분쇄 조건에 따른 마찰력을 측정하고, 아교수를 적용한 경우 상대적으로 마찰력이 감소하는 것으로 확인되었다. 결국 분쇄 공정에서 아교수를 사용하는 것은 마찰력을 감소시켜 결과적으로 분급도를 향상시키기 위한 것으로 판단된다. 안료 제조 공정 중 수비단계에서 아교수를 적용한 결과, 아교수 적용 시 동일한 조건에서 보다 큰 입도의 입자를 수비해 내는 것이 가능한 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 수비액으로 아교수를 사용한 경우, 아교의 농도가 증가함에 따라 수비액의 점도가 증가하여 입자의 침강속도가 감소하기 때문인 것으로 확인되었다. 결국 수비 공정에서 아교수를 사용한 것은 수비액의 점도를 증가시켜 수비를 통해 선별할 수 있는 입도의 범위를 확대하고, 보다 세밀한 입도 구간으로 입자를 선별하기 위한 것으로 판단된다.

중심어: 백토, 분쇄, 수비, 아교, 점도

ABSTRACT The effect of the glue solution were investigated in the grinding and elutriation process for manufacturing of White clay pigment. In grinding process, glue solution decreased the production of a too fine powder and enhanced the degree of sorting of ground pigments. The grinding performance and limit are generally influenced by the frictional force. Therefore, the friction force was measured in accordance with the grinding conditions. As a result of measuring a friction force, when using glue solution it showed the lowest friction. Finally, the application of glue solution in grinding process is believed to enhance the degree of sorting of ground pigments by reducing frictional force. In elutriation process, the application of glue solution enabled the screening of larger particles in the same conditions by reducing the sedimentation velocity. This result is due to increase in the viscosity of the glue solution according to glue concentration. As a result, the application of glue solution in elutriation process is thought to enlarges the range of the selectable particle size and to enable the segmentation of the particles.

Key Words: White clay, Grinding, Elutriation, Glue, Viscosity

1. 서론

전통적으로 회화 및 건축물에 사용된 백토안료는 자연에서 얻어지는 백색의 점토질 흙을 분쇄(grinding)·수비(hydraulic elutriation)하여 만든 대표적인 천연 무기안료이다. 전통 안료로서 백토는 일반적으로 고령토(kaolin)를 주성분으로 하는 백색안료를 지칭하며 예부터 벽화 등의 바탕재료로 사용되었고(Jeong, 2001), 초상화, 장식화를 비롯하여 사찰의 벽화, 단청에 백색 또는 흰색안료로 적용된 사례가 보고되고 있다(National Museum of Korea, 2007; Moon, 2010; Cultural Heritage Administration and Research Institute of Sungbo Cultural Heritage, 2011; Lee *et al.*, 2012). 한편 현재 안료산업 분야에서 백토는 채색안료 보다는 주로 레이크(lake)의 체질안료(body pigment), 증량제(extendor) 또는 수성도료에 사용되고 있으며(Jang, 2004), 용도에 따라 분쇄·분급 또는 가공하여 제품화한 다양한 품위의 백토가 판매되고 있다. 이와 같이 시대의 흐름에 따라 안료는 현대화, 대량화를 거치면서 용도와 제조방식의 변화가 발생되었고, 전통을 대체하는 새로운 제품들이 개발되면서 우리 생활 전반에 걸쳐 내려온 고유의 전통 기술과 전통재료는 점차 생산과 공급, 활용이 막을 잊지 못하고 사장되어 가고 있다. 따라서 전통안료와 관련한 전통 기술의 확보와 계승, 전통재료의 활용을 위한 차원에서 단절된 기술과 재료에 대한 연구가 절실하나 국내의 관련 연구현황은 미비한 실정이다.

현재 백토안료를 제조하는 전통방식도 단절된 상태이며 문헌기록을 통해서만 전통제법을 짐작해 볼 수 있는데 중국 북송시대에 편찬된 기술서인 『영조법식(營造法式)』에 따르면 “백토-먼저 청정한 것을 골라 취해서 연한 아교탕에 담그고, 잠시 동안 풀어지기를 기다린다. 다음 세화(細畫)를 모두 선별하여 별도 용기에 옮겨 담고, 가라앉아 윗물이 맑아지면 용기를 기울여 맑은 물을 따라내고, 다시 아교액을 적당히 넣어 사용한다”고 기록되어 있으며(Gwak, 2012), 『임원경제지(林園經濟志)』에서는 백토는 “수비하여 찌꺼기를 제거하고, 햇볕에 말려 안료로 사용한다”는 기록을 찾아 볼 수 있다. 또한 영조법식, 개자원화전(芥子園畫傳), 회사쇄언(繪事瑣言) 등의 고문헌에는 백토를 포함한 주도, 주사, 석록 등 안료의 제조방법이 기록되어 있는데, 이 기록을 통해 재료의 선별, 분쇄와 수비 그리고 건조를 거치는 안료 제조공정을 확인할 수 있다. 고문헌 기록에 따르면 기본적으로 안료 제조공정에는 물을 사용

하지만 백토, 주도, 주사, 석록 등의 안료를 제조할 때 아교수를 사용한 것으로 나타났다. 아교수는 안료 제조공정 중 분쇄 및 수비 공정에서 사용되었으며, 안료 종류에 따라 농도를 달리하여 사용된 것으로 보이나 그 이어나 효과에 대해 알려진 바가 없다. 따라서 본 연구에서는 백토안료를 제조하는 공정 중 아교수가 미치는 영향을 확인하기 위하여 안료 제조를 위한 분쇄 및 수비 공정에 아교수를 적용하고, 분쇄액(건식, 증류수, 아교수) 종류에 따른 분쇄특성과 아교수 농도에 따른 수비특성을 확인해 보았다.

2. 실험재료 및 방법

2.1. 실험재료

2.1.1. 백토

연구에 사용된 백토는 경남 합천군 가야면에 위치한 오곡광산에서 채취한 것으로 고령토 광물(85.0%)과 일라이트 등의 점토광물(13.8%) 및 미량의 석영(1.2%)을 포함하는 고령토질 백토이다(Moon *et al.*, 2015). 분쇄공정에는 원시료를 정압펌프(AX1-13-PFC-Z, Chensei, Korea)가 부착된 Sieve shaker (analyset3, FRITSCH, Germany)를 이용한 습식 체거름을 통해 입도범위가 100 ~ 200 μm 인 시료를 선별하여 사용하였으며, 수비 공정에 사용된 시료는 원시료를 조분쇄한 후 체거름을 실시하여 2 mm 체통과분을 대상으로 하였다.

2.1.2. 아교

아교는 일본 회사인 봉황의 알아교를 구입하여 사용하였다. 알아교를 물과 함께 중탕에서 녹여 25% 아교액을 만들고, 이를 희석하여 필요한 농도의 아교수를 제조하였다.

2.2. 실험방법

2.2.1. 분쇄

분쇄공정은 막사사발을 이용하여 실시하였다. 분쇄 공정은 분쇄액이 없는 건식분쇄(Dry)와 분쇄액으로 증류수를 사용한 경우(DW)와 아교수(10%)를 사용한 경우(GIs)로 구분하여 실시하였으며, 분쇄횟수는 100회에서 2000회까지 7단계로 구분하여 진행하였다. 막사사발을 이용한 분쇄 시 일정한 속도와 정확한 회전수를 유지하기 위해 KS M 787-1에서 규정하는 기기 규격에 준하는 자동물러를 이

용하였다. 자동물리의 회전판 위에 막자사발을 고정하고 물리의 회전속도(100 rpm)와 시간 조절을 통해 분쇄 단계를 조절하였다. 모든 분쇄공정에서 시료는 약 10 g이 사용되었으며, 분쇄액의 경우 14 mL를 적용하였다. 분쇄공정에서 아교수를 사용한 경우, 이후 특성분석 및 보관을 위해 아교를 제거할 필요가 있다. 따라서 아교제거를 위해 분쇄공정이 끝난 모든 시료는 일정시간(24 h) 동안 침전시킨 후 희석하는 과정을 반복하여 아교 농도를 0.1% 이하로 조절하였다.

2.2.2. 수비

수비공정은 수비액으로 증류수 및 아교수(1%, 3%, 5%)를 사용하고, 침전시간 60초 후 400 mL의 상등액을 따라내는 과정으로 진행하였다. 수비조건은 사전 테스트를 통해 1단계 증류수를 이용한 수비에서 약 45 μm 이하 입자가 선별되도록 설정하였다. 먼저 증류수를 이용한 1단계에서는 시료를 1,000 mL 비커에 넣고 증류수 채운 후 혼합하고 60초 동안 침전시킨 후 상등액 400 mL를 따라냈다. 다시 증류수를 1,000 mL까지 채우고 혼합, 침전 그리고 따라내는 과정을 반복하였다. 상등액이 투명한 상태가 되면, 1단계를 끝내고 1% 아교수를 이용한 2단계 수비를 진행하기 위해 수비액에 아교수(25%)를 넣어 수비액을 아교수 1%로 조절하였다. 이후 1% 아교수를 이용해 혼합, 침전 등의 수비과정을 반복 진행하였으며, 아교수 3%, 5%에 대해서도 차례로 동일한 방법으로 수비를 실시하였다.

2.2.3. 입도분석

분쇄 및 수비공정을 통해 제조된 시료의 입도분포를 분

석하기 위해 Malvern사의 Mastersizer 2000 입도분석기를 사용하였다. Masersizer 2000은 싱글렌즈를 사용하여 0.02 μm 부터 2,000 μm 의 측정범위를 가지는 레이저 회절 분석기기이다. 용매는 증류수를 사용하였으며, 약 0.5 g의 시료를 약 30 mL의 증류수에 분산시켜 입도분포를 분석하였다.

2.2.4. 마찰력 측정

분쇄공정에서 분쇄액에 따른 마찰력 변화를 측정하기 위해 자동물리를 이용하여 운동마찰력을 측정하였다. 자동물리의 회전판 위에 분쇄액을 도포하고 막자를 회전판 위에 올려놓은 후, 회전판을 일정속도(50 rpm)로 회전시켜 운동마찰력을 측정하였다.

2.2.5. 점도 측정

수비액으로 사용된 아교수의 농도별 점도를 측정하였다. 아교수의 동점도를 측정하기 위해 모세관 점도계(capillary viscometer)의 일종인 Cannon- Fenske Routine Viscometer (SCHOTT, Germany)를 사용하였으며, ISO 3105에 의거하여 23 $^{\circ}\text{C}$ 에서 아교수의 농도별 동점도를 측정하였다.

3. 연구결과 및 고찰

3.1. 분쇄

분쇄공정 중 아교수 적용에 따른 영향을 파악하기 위해 분쇄액이 없는 건식조건 및 분쇄액으로 증류수를 사용한 경우와 아교수(10%)를 사용한 습식조건에서 분쇄를 실시

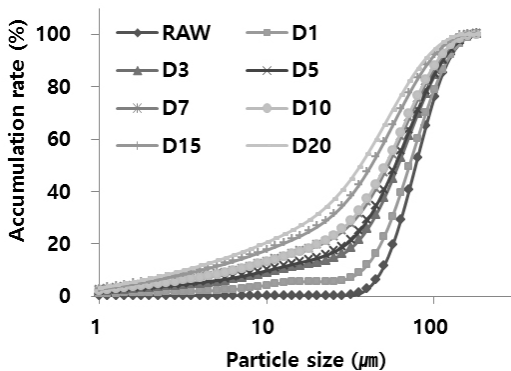


Figure 1. Particle size distribution of ground products (dry grinding).

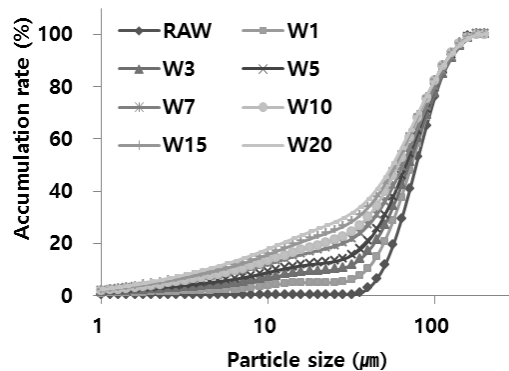


Figure 2. Particle size distribution of ground products (wet grinding, distilled water).

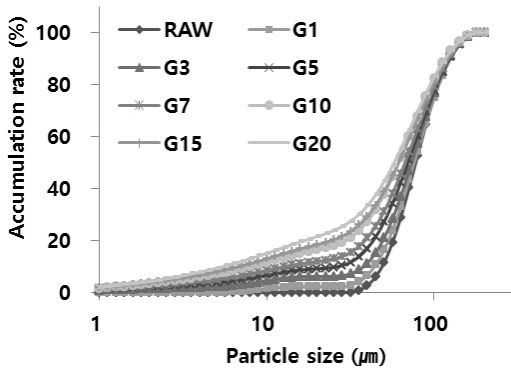


Figure 3. Particle size distribution of ground products (wet grinding, glue solution).

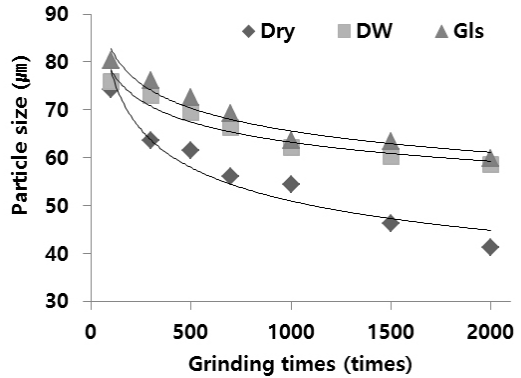


Figure 4. Mean particle size of ground products.

하고 결과를 분석하였다.

3.1.1. 입도분포

분쇄조건에 따른 입도분포를 분석하였다. 모든 조건에서 분쇄횟수가 증가함에 따라 45 μm 이하 크기의 입자가 차지하는 비율이 급격히 증가하는 것을 확인할 수 있다(Figure 1-3). 건식분쇄의 경우 분쇄 전 시료에서 45 μm 이하 크기의 입자는 전체 중 약 6%였지만, 2000회 분쇄 후에는 60%로 약 10배 가량 증가된 것으로 나타났다. 습식분쇄의 경우는 증류수를 사용한 경우 약 40.6%, 아교수를 사용한 경우 37.9%로 아교수를 사용한 경우가 조금 더 낮은 것으로 나타났다.

분말의 미세한 정도는 분말도(fineness)로 나타내는데, 일반적으로 평균입도 혹은 입도분포 중 누적 50%에 해당하는 입도로 나타낸다(Kotake *et al.*, 2011). Figure 4는 분쇄공정에 따른 시료의 입도분포 분석 중 평균입도의 변화를 나타낸다. 모든 조건에서 분쇄 횟수가 증가함에 따라 평균입도가 감소하는 것으로 나타났으며, 분쇄에 따른 평균입도 감소 속도는 초기에 가장 빠르며 분쇄가 진행됨에 따라 점차 느려지는 것으로 확인되었다. 전체적으로 건식분쇄에 비해 습식분쇄의 평균입도가 크게 나타났으며, 습식분쇄 중에서는 아교수를 적용한 경우가 증류수를 사용한 경우보다 크게 나타났다.

3.1.2. 분급도

분쇄된 입자의 입도분포를 분석할 때 평균입도와 함께 분급도(degree of sorting)가 사용된다. 분급도는 일반적으로 입도분포 곡선의 폭을 의미한다. 누적 입도분포 곡선에

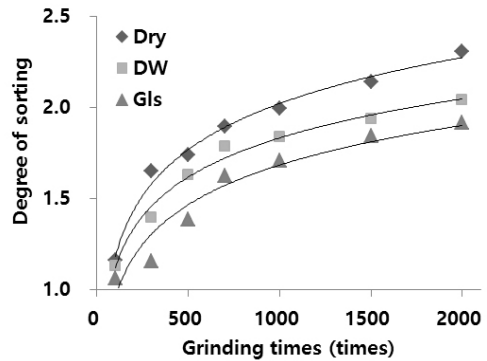


Figure 5. Degree of sorting of ground products.

서 20%(X_{20})와 80%(X_{80}) 혹은 10%(X_{10})와 90%(X_{90})에 해당하는 입자의 크기를 이용해 계산하며, 연구자에 따라 X_{80}/X_{20} 혹은 X_{90}/X_{10} 등의 수식을 이용한다(Kotake *et al.*, 2011). 본 연구에서는 다음 식을 적용하여 분급도를 계산하였다.

$$\frac{X_{90} - X_{10}}{X_{50}} \text{ ----- [Eq. 1]}$$

X_{10} : The cumulative weight 10% passing particle size

X_{50} : The cumulative weight 50% passing particle size

X_{90} : The cumulative weight 90% passing particle size

Figure 5는 분쇄 조건에 따른 분급도 변화를 나타낸다. 모든 조건에서 분쇄횟수가 증가함에 따라 분급도도 점차 증가하는 것으로 나타났으며, 초기에 증가속도가 빠르고

분쇄횟수가 증가함에 따라 증가속도는 점차 느려지는 것으로 확인되었다. 전체 구간에서 건식분쇄 시 가장 높은 분급도를 나타냈으며, 아교수를 사용한 습식분쇄 시 가장 작은 값을 갖는 것으로 확인되었다. 2000회 분쇄 시, 건식분쇄의 경우 약 2.3으로 가장 큰 값을 나타냈으며, 증류수를 이용한 습식분쇄는 약 2.0, 아교수를 이용한 경우는 약 1.9로 가장 작은 값을 보였다. 분급도의 값이 작을수록 입도분포의 폭이 좁고, 분급이 양호하다는 것을 의미한다.

3.1.3. 운동마찰력

분쇄공정은 여러 가지 변수가 작용하는 복잡한 과정이지만, 실제 분쇄에 있어서 중요한 요인은 분쇄가 가능한 영역에 얼마나 입자들이 있는가와 분쇄가 가능한 영역에 입자들이 있을 때 분쇄가 가능할 정도로 충분한 힘이 가해지는가의 두 가지이다(Ozkan *et al.*, 2009). 여기에서 분쇄가 가능한 힘이란 막자사발과 막자 사이에 입자가 있을 때 마

찰력을 의미한다. 이 마찰력이 입자의 전단응력보다 크면 입자는 부서지게 되지만 마찰력이 작거나 입자의 전단응력이 크면 분쇄는 이루어지지 않는다.

Figure 6은 분쇄조건에 따른 운동마찰력을 측정한 결과이다. 자동물러의 회전판에 막자를 고정하고, 회전판을 일정속도(50 rpm)로 회전하면서 운동마찰력을 측정하였다. 건식조건과 증류수와 아교수를 적용한 습식조건에서 운동마찰력을 측정한 결과, 전체적으로 건식조건에 비해 습식조건에서 낮은 마찰력을 나타냈으며, 증류수에 비해 아교수를 적용한 경우 마찰력이 보다 낮은 것으로 확인되었다.

일반적으로 습식분쇄가 건식분쇄에 비해 분급이 좋은 것으로 알려져 있는데, 고분현 기록을 통해 확인된 분쇄공정에서 아교수의 사용은 일반적인 물을 사용한 습식분쇄보다 마찰력을 더 감소시킴으로서 불필요한 미분의 발생을 최소화하고 분급을 좋게 하기 위한 것으로 판단된다.

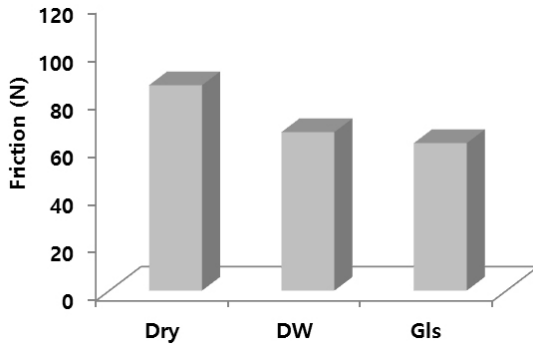


Figure 6. Friction according to grinding conditions.

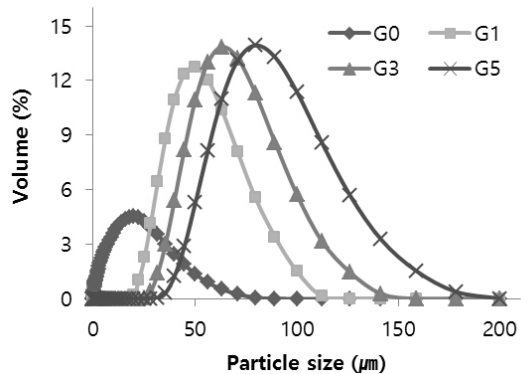


Figure 7. Particle size distribution of elutriated products.

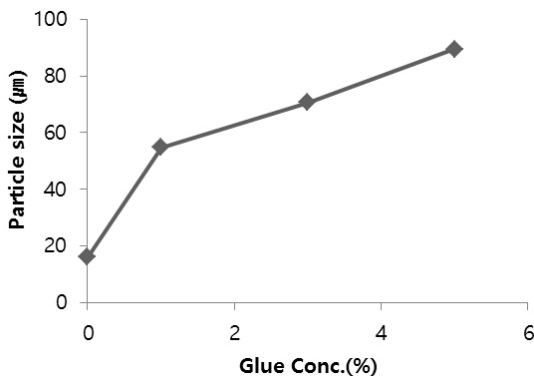


Figure 8. Mean particle size of elutriated products.

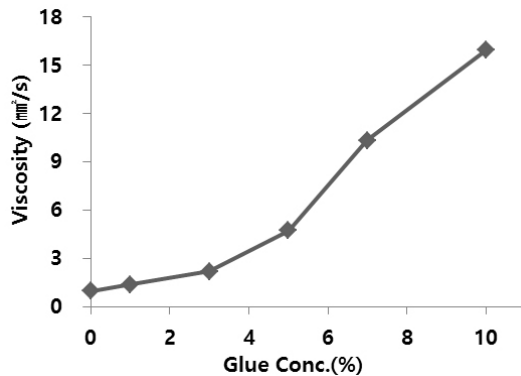


Figure 9. Viscosity of glue solutions.

3.2. 수비

수비공정에서 아교수의 영향을 파악하기 위해 아교수 농도별(0%, 1%, 3%, 5%)로 수비액을 제조하여 수비를 실시하고, 수비된 시료에 대한 입도분석을 수행하였다.

3.2.1. 입도분포

아교수를 이용한 수비는 우선 아교가 들어가지 않은 증류수로 1차 수비를 하고, 1차 수비 후 침전물을 대상으로 1% 아교수를 이용하여 2차 수비를 진행하였다. 3차와 4차도 앞서 수비 후 남은 침전물을 대상으로 차례로 아교 농도가 높은 아교수를 이용해 수비를 진행하였다.

Figure 7과 8은 침전시간을 60초로 고정하고 수비를 했을 때, 아교수 농도에 따른 입자분포 및 평균입도의 변화를 나타낸다. 증류수를 사용하고 침전시간을 고정해서 수비를 수행하는 경우 1차 수비로 선별될 수 있는 모든 입자들이 얻어지게 된다. 하지만 수비액을 아교수로 바꾸면 동일한 침전시간 후에도 수비를 통해 일부 입자들을 선별해 내는 것이 가능했다. 점차 아교 농도가 높은 아교수를 수비액을 사용함에 따라 이전 단계에서 분리해낼 수 없었던 보다 큰 입자들을 선별해 내는 것이 가능하다는 것을 확인하였다. 아교의 농도가 0%에서 5%로 증가됨에 따라 선별되는 시료의 입자분포곡선이 점차 큰 입자쪽으로 이동하는 것을 알 수 있으면, 이 시료의 평균입경도 점차 증가되는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 아교수를 사용하는 경우 입자의 침전속도가 감소되기 때문에 나타나는 현상이며, 아교 농도가 높을수록 입자의 침전속도는 더 느려지는 것으로 판단된다.

3.2.2. 아교수 점도

아교수의 아교 농도가 입자의 침강속도에 미치는 영향을 파악하기 위해 아교 농도에 따른 아교수의 점도를 측정하였다(Figure 9). 측정 결과, 아교가 없는 증류수의 점도는 $0.97 \text{ mm}^2/\text{s}$ 이지만 아교 농도가 증가함에 따라 점차 증가되어 아교농도가 10%일 때는 $15.93 \text{ mm}^2/\text{s}$ 까지 증가되는 것으로 나타났다. 일반적으로 유체에서 침강하는 입자의 침강속도는 입자의 비중, 입도의 제곱에 비례하고, 유체의 점도에 반비례한다. 이는 스토크스의 법칙(Stokes' Law)으로 잘 알려져 있는 사실이다. 따라서 아교농도가 10%일 때 수비액의 점도는 아교가 없을 때보다 약 16배 정도 높으며, 이는 침전속도가 1/16이 된다는 의미이다. 결국 아교수를 이용한 수비는 아교를 첨가함에 따라 입자의 침전속도

가 느려지는 현상을 이용하기 위한 것으로 판단된다. 아교 첨가로 인해 입자의 침강속도가 느려지면 전체적으로 수비를 통해 선별할 수 있는 입도의 범위가 넓어지며, 또한 보다 세밀하게 입도 간격을 조절하여 수비하는 것이 가능해진다.

4. 결론

회화 및 건축에 적용되는 백토안료의 전통제법을 규명하기 위하여 백토의 제조 공정 중 아교수 활용에 관한 연구를 수행하였다. 백토안료 제조 시 분쇄 및 수비 공정에서 아교수를 적용하고 그 영향을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 백토 제조를 위해 시료를 분쇄할 때 아교수를 적용한 결과, 전체적인 경향은 일반 증류수를 사용한 경우와 유사했지만 분급도가 보다 양호해지는 결과를 얻었다. 분급도 분석결과, 아교수를 사용한 경우 증류수에 비해 약 6% 향상된 결과를 얻었으며, 분쇄액을 사용하지 않은 건식분쇄에 비해서는 약 17% 정도 분급도가 향상되는 결과를 보였다. 이와 같은 결과를 통해 안료 제조를 위한 분쇄 공정에서 적절한 농도의 아교수를 적용하여 필요에 따라 선택적인 분쇄입도 조절이 가능할 것으로 판단된다.

2. 수비 시 아교수를 적용하는 경우 증류수에 비해 입자의 침강속도가 감소하며, 이에 따라 수비를 통해 선별해낼 수 있는 입도의 범위가 상대적으로 넓어지고, 보다 세밀한 입도 범위로 선별하는 것이 가능해지는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과를 통해 안료 제조 시 아교수 적용에 따라 효과적이고 선택적인 입도별 안료 생산이 가능할 것으로 판단되며, 적절한 농도의 아교수를 사용하여 증류수 사용 시에는 불가능한 특정 불순물의 제거도 가능할 것으로 판단된다.

전통안료의 제법을 규명하고 이를 재현하는 것은 전통 기술의 맥을 되살리는 중요한 의미를 갖는다. 본 연구를 통하여 안료 제조 공정에 아교를 적용하는 방식이 분쇄특성과 수비특성을 일부 제어하며 제조되는 안료의 특성에 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었다. 향후 전통 기술의 정확한 규명과 재현 그리고 이를 정립하기 위해서 보다 다양한 연구가 진행되어야 할 것으로 사료된다.

REFERENCES

Cultural Heritage Administration and Research Institute of

- Sungbo Cultural Heritage, 2011, Mural painting of temple in Korea (Gyeongsangbuk-do 2). Cheonilmunhwasa, Seoul, 691-775. (in Korean)
- Gwak, D.H., 2012, Literature research of Korea traditional pigment. Hageonmunhwasa, Seoul, 49-53. (in Korean)
- Jang, G.I., 2004, Dancheong. Boseonggak, Seoul, 77-78. (in Korean)
- Jeong, J.M., 2001, Color and paint our painting. Hakgojae, Seoul, 43. (in Korean)
- Kotake, N., Kuboki, M., Kiya, S. and Kanda, Y., 2011, Influence of dry and wet grinding conditions on fineness and shape of particle size distribution of product in a ball mill. Adv. Powder Technol., 22, 86-92.
- Lee, H.H., Park, J.H., Hong, J.O., Han, M.S., Seo, M.S. and Heo, J.S., 2012, The analytical study of pigments on Fourguardian statues in Song-gwang Buddhist temple in Suncheon. Munhwajae Korean Journal of Cultural Heritage Studies, 45(1), 122-147. (in Korean with English abstract)
- Moon, D.H., Kim, J.H., Lee, J.J., Han, M.S. and Cho, H.G., 2015, Applicability as a white pigment raw materials of white soils from around the Sancheong-Hadong and Gayasan area. The Mineralogical Society of Korea and the Petrological Society of Korea, Proceedings of the Annual Joint Conference, 138-139. (in Korean)
- Moon, S.Y., 2010, A study of pigments applied on paintings since the mid-Joseon dynasty. Ph.D. thesis, Chung-ang University, Seoul, 167-170. (in Korean with English abstract)
- National Museum of Korea, 2007, Korean Paintings and Calligraphy of National Museum of Korea Vol.15, Joseon Portraits I. Nurwa, Seoul, 262-264. (in Korean)
- Ozkan, A., Yekeler, M. and Calkaya, M., 2009, Kinetics of fine wet grinding of zeolite in a steel ball mill in comparison to dry grinding. International Journal of Mineral Processing, 90, 67-73.