

국내 도자기용 태토의 토질 및 광물 특성

김학준^{1*} · 이용천² · 이유진² · 이호정² · 정찬호¹

¹대전대학교 건설안전공학과 교수, ²대전대학교 건설안전공학과 박사과정

Physical and Mineralogical Properties of Pottery-Making Soils in Korea

Hak Joon Kim^{1*} · Yong Cheon Lee² · Yu Jin Lee² · Ho Jeong Lee² · Chan Ho Jeong¹

¹Professor, Department of Construction Safety Engineering, Daejeon University

²Ph.D. Student, Department of Construction Safety Engineering, Daejeon University

Abstract

Although the use of pottery-making soils has a long history, its use in the pottery industry requires that physical and geotechnical properties of the materials be established to define the suitability for various purposes. The main purpose of this study is to identify the different types of clays and mineral composition and to perform the geotechnical evaluation of the clays for making pottery products. Soils investigated in this study include raw materials used for making Baekja (white porcelains), Chungja (celadons), Buncheong, Sancheong, and Johyung. Pottery-making soils are manufactured by using different types of soils and sold by individual ceramic clay company. This study includes physical tests of soil and chemical analysis of major elements using XRF and XRD instrumentation. Grain size distributions, mineralogical composition, and a range of plasticities of soils for making different types of potteries are presented. Correlations between specific type of pottery clays and geotechnical and mineralogical characteristics are determined by comparing the test results. Since quantitative research using laboratory tests for pottery-making soils are rarely performed in Korea, further research should be done in the future to improve the Korean pottery industry.

Keywords: pottery, ceramic, pottery-making soils, mineralogical composition

초 록

도자기 제작을 위한 점토의 사용은 오랜 역사를 가지고 있지만, 도자기 업계에서 특정 목적으로 흙을 사용하기 위해서는 이 흙이 적절한 물리적 특성을 충족해야 한다. 이 연구의 목적은 다른 유형의 점토에 대하여 도자기 재료로서 점토의 물리적 및 광물성분을 비교 평가하는데 있다. 이 연구를 위하여 도재상에 따라 자신들만의 비법으로 제작하여 널리 판매하고 있는 백자토, 청자토, 산청토, 분청토, 조형토에 대한 물성실험을 수행하였고, XRF와 XRD 분석을 통하여 화학성분과 구성광물을 정량화하였다. 태토의 종류별 흙의 입도분포, 광물성분, 가소성 범위를 제시하였다. 실험결과를 비교하여 각 도재상에서 특정 유형의 도자기를 생산하는 흙들의 물성 및 광물조성의 상관관계를 결정하였다. 국내에서는 토질실험을 활용한 태토의 정량적인 연구가 미흡한 상태이므로 향후 국내 도자기 산업의 발전을 위해서는 이에 대한 적극적인 연구가 필요하다.

주요어: 도자기, 세라믹, 태토, 광물성분

OPEN ACCESS

*Corresponding author: Hak Joon Kim
E-mail: hakkim@dju.kr

Received: 7 December, 2022

Revised: 19 December, 2022

Accepted: 21 December, 2022

© 2022 The Korean Society of Engineering Geology



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

서론

도자기 제작에 사용되는 흙을 태토라고 하는데, 가소성과 점착력을 가진 점토를 의미한다. 이러한 태토는 녹는점 이하의 온도로 가열했을 때, 녹으면서 서로 밀착하여 고결하는 현상인 소결이 가능하므로 도자기의 제조에 사용된다. 우리나라는 도자기 제작에 필요한 고령토, 점토, 장석, 규석, 석회석과 같은 원료가 비교적 풍부하여 도자기 제작이 활발하였다.

태토는 가소성(plasticity) 원료와 비가소성 원료로 구성된다. 가소성 원료는 외력을 가하여 형태를 변형시키면 변형된 상태를 유지한다. 가소성 원료인 점토는 수분이 가해지면 점착력이 생겨나서 성형이 가능해지고, 건조되면 단단해지며, 열을 가하면 소결되어 강성을 지닌다. 고령토(kaolin), 목질 점토, 도석, 벤토나이트 등이 가소성 원료에 해당된다. 벤토나이트는 몬모릴로나이트가 주 구성광물인 점토로서 태토에 소량을 첨가하면 가소성을 높이는 작용을 한다.

비가소성 원료는 물과 혼합하여도 점착력이 생기지 않는 원료이며, 점토의 점착력을 저하시키거나 도자기의 백색도, 투광성, 내열성, 강도를 향상시키기 위해서 사용한다. 규석(silica flint), 규사(silica sand), 활석(talc), 백운석(dolomite) 등이 비가소성 원료이다. 우리나라 도자 문화가 발달된 원인 중의 하나는 이러한 가소성과 비가소성 원료가 풍부하기 때문이었다. 국내에서 채취되는 점토의 모암에 대한 연구는 여러 연구자들에 의하여 제시되었다(Jeong et al., 2013; Kim et al., 2017; Kwak and Jeong, 2017).

일반적으로 태토에 세립질 흙이 많을수록 성형능력은 증가하지만 수축률이 커져서 균열 발생의 가능성이 커지며, 건조되는 시간도 증가한다. 태토로 사용하기 위해서는 성형능력, 건조강도, 건조수축, 소성수축, 내화도, 소성색상 등이 고려되어야 하는데 자연 상태에서 채취한 단일한 점토만으로는 이러한 조건들을 만족할 수 없다. 보통의 흙은 가소성 부족, 수축과다 발생과 함께 원하는 색상을 갖지 못하거나 또는 희망 온도에서 소성할 수 없는 경우가 많다. 일반적으로 흙의 가소성이나 점착력이 커지면 건조수축이나 소성수축도 동시에 증가하는 문제가 있다. 따라서 도자기의 용도에 맞추어 다양한 점토나 광물을 혼합하여 태토로 사용한다.

도자기는 태토, 유약, 소성온도에 따라 색이 달라진다. 이것은 태토나 유약에 포함된 광물질 성분이 불의 온도에 따라 발색이 다양해지기 때문이다. 국내에 알려진 도자기의 종류에는 백자, 청자, 분청사기 등이 있는데, 도자기의 용도를 모두 만족하는 한 종류의 태토는 없으므로 각 도자기별로 다른 종류의 태토가 사용된다.

현재 국내의 태토는 여러 도재상에 의하여 백자토(white clay), 청자토(celadon clay), 분청토, 산청토, 조형토 등의 품목별로 판매가 되고 있는데, 각 태토에 대한 품목별 그리고 도재상별로 제품의 성분에 대한 표준화가 없는 실정이다. 본 연구에서는 시중에서 판매되고 있는 태토에 대한 물리적 및 광물학적 특성을 파악하고자 5종류의 태토 시료에 대한 체분석, 비중계분석, 아터버그 한계시험 수행과 광물성분 및 화학성분을 분석하였다. 그리고 5종류의 태토에 대하여 물성을 비교 분석하였으며, 광물분석을 통하여 물성과도 비교하였다. 또한 해외에서 세라믹 산업에 사용하고 있는 흙의 공학적 특성과의 비교하였다.

연구 방법

아터버그 한계 실험

액성한계 시험은 KS F 2303에 따라 동적액성한계시험을 진행하였다. 황동접시에 경사 60°, 높이 1 cm의 인공사면을 조성한 후에 시료를 넣은 접시를 1 cm의 높이에서 1초에 2회의 비율로 25회 낙하시켜 둘로 갈라진 부분의 흙이 양측으로부터 유동하여 약 1.5 cm 길이만큼 틈이 닫힐 때의 함수비를 여러 번 반복 실험으로 결정하였다.

소성한계(plastic limit)는 흙의 소성상태와 반고체상태의 경계를 나타내는 함수비이며, 소성도를 이용한 세립토의 분

류와 흙의 공학적 특성파악에 이용된다. 소성한계 시험은 KS F 2304 규정에 준하여 실시하였으며, 각 시료마다 3회씩 실시하여 평균치를 계산하였다.

입도분석

흙의 공학적인 특성을 파악하는데 입자의 크기와 입도분포는 매우 중요하다. 흙의 입도분포를 구하기 위해 체분석(sieve analysis)과 비중계분석(hydrometer analysis)을 수행하였다. 체분석은 낮은 번호가 상부에 위치하게 포개어 시료를 거른 뒤 각 체에 남아있는 흙의 무게를 측정하여, 각각의 체를 통과한 흙의 백분율(가적통과율)을 계산한 후 입도분포곡선을 작성하였다. 체 번호에 따른 직경은 Table 1과 같다.

비중계분석은 No. 200번체(0.074 mm)를 통과한 시료 50 g과 물 125 mL, 분산제(calgon) 5 g을 교반기를 이용하여 교반하여 분산된 혼합시료를 직경 65.7 mm, 높이 457 mm의 1,000 mL의 메스실린더에 넣은 뒤 증류수를 채워 총량 1,000 mL의 비중계 분석용 시료를 만들었다. 비중계 눈금은 시간에 따라 확인하였다.

Table 1. Standard sieve sizes and their corresponding open dimension

| Sieve No. | 10 | 20 | 40 | 60 | 100 | 140 | 200 |
|--------------------|------|------|------|------|------|-------|-------|
| Sieve opening (mm) | 2.36 | 0.85 | 0.42 | 0.25 | 0.15 | 0.106 | 0.075 |

광물 조성 분석

시료의 성분 및 광물 조성을 정성 및 정량적으로 파악하기 위하여 X-선 분석을 수행하였다. 시료의 성분 분석은 10개의 주요 성분을 정량적으로 파악하기 위하여 한국기초과학지원연구원 대구센터의 X-선 형광분석기(x-ray fluorescence spectrometer, PW2404, Philips)로 분석하였으며, 분석조건은 전압 4 kW, 전류 170 mA이다. 시료의 광물 조성을 정량적으로 파악하기 위하여 동일한 기관에서 X-선 회절분석기(multi-function x-ray diffractometer, X'pert pro MRD, Philips)로 분석하였다. 분석조건은 3°에서 70° 사이의 회절각(2θ), 전압 40 kV, 전류 30 mA, 음극재는 구리(Cu)이다.

연구 결과 및 토의

태토의 입도분석

태토의 가소성과 강도는 흙의 입도와 밀접한 연관이 있다. 흙의 입경이 200번체보다 굵은 경우에는 체분석을, 가는 경우에는 비중계분석을 사용하여 입도분석을 수행하였다. 분석 사례의 하나로서, 3개사의 청자토에 대한 입경 실험을 통해 Fig. 1과 같은 입도분포곡선을 그린 후, ASTM(1980)의 제안을 따라서 흙을 모래(4.75~0.075 mm), 실트(0.075~0.005 mm), 점토(0.005~0.001 mm)로 분류하였다.

본 연구에서 실험한 태토의 평균 점토, 실트, 모래 함량은 각각 51%, 43%, 6%이었다(Table 2). 해외 문헌조사 자료로부터의 평균 점토, 실트, 모래 함량인 56%, 30%, 14%와 비교했을 때 점토와 모래함량은 각각 5%, 8% 적었고, 실트 함량은 13% 많았다(Nton and Elueze, 2005; OlaOlorun and Oyinloye, 2010; Ngun, 2012; Amponsah-Dacosta et al., 2013; Akinola and Obasi, 2014; Ouahabi et al., 2014; Adeola, 2015; Mahmoudi et al., 2015; Mefire et al., 2015; Al-Momani and Dwairi, 2018; Jibrin et al., 2018; Jongs et al., 2018; Nkalih et al., 2018; Xanthopoulou, 2019; Assuncao et al., 2021; Aromolaran and Adebayo, 2022).

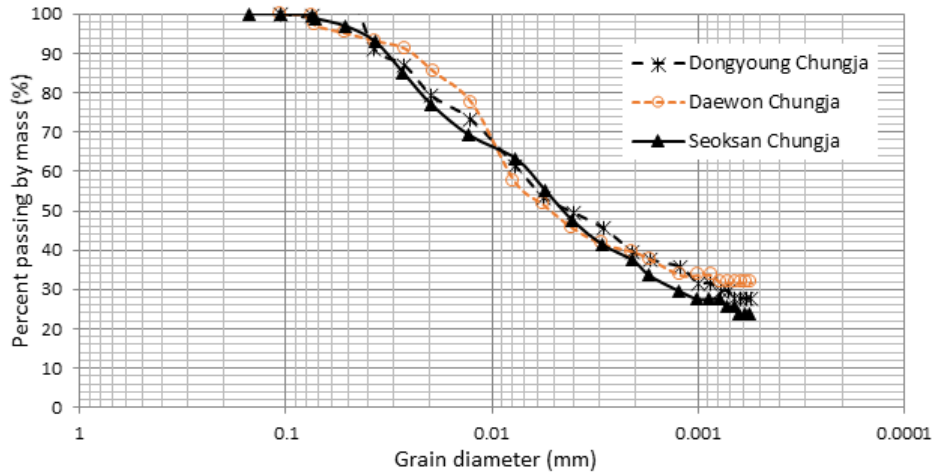


Fig. 1. Grain size distributions of soils for making Chungja obtained from three companies.

Table 2. Particle size distribution and values of Atterberg limits

| Pottery type | Company | Clay (%) | Silt (%) | Sand (%) | Liquid limit | Plastic limit | Plasticity index |
|--------------|-----------|----------|----------|----------|--------------|---------------|------------------|
| Baekja | Dongyoung | 52 | 45 | 3 | 45 | 24 | 21 |
| | Seoksan | 55 | 45 | 0 | 48 | 23 | 25 |
| Chungja | Dongyoung | 52 | 47 | 1 | 46 | 22 | 24 |
| | Daewon | 49 | 50 | 1 | 51 | 27 | 24 |
| Buncheong | Seoksan | 52 | 47 | 1 | 52 | 28 | 24 |
| | Dongyoung | 55 | 43 | 2 | 51 | 25 | 26 |
| Sancheong | Daewon | 56 | 42 | 2 | 54 | 24 | 30 |
| | Seoksan | 49 | 48 | 3 | 51 | 28 | 23 |
| Johyung | Dongyoung | 48 | 40 | 12 | 47 | 24 | 23 |
| | Daewon | 47 | 44 | 9 | 47 | 24 | 23 |
| | Seoksan | 42 | 52 | 6 | 44 | 24 | 20 |
| Average | Dongyoung | 50 | 37 | 13 | 43 | 21 | 22 |
| | Daewon | 62 | 19 | 19 | 46 | 21 | 25 |
| Average | | 51 | 43 | 5.5 | 48 | 24 | 24 |

3개 제조사 태토의 평균 모래 함량은 조형토 16%와 산청토 9%의 순으로 높았으며 분청토, 백자토, 청자토는 0~3%정도로 소량 포함되어 있었다. 태토의 종류가 같아도 제조사에 따라 모래 함량이 산청토와 조형토는 각각 6%, 백자토는 3%의 차이를 보였다.

태토의 평균 실트 함량은 청자토 48%, 백자토와 산청토 45%, 분청토 44%로 뚜렷한 차이를 보이지 않았으나 조형토는 28%로 상당히 낮았다. 그러나 태토의 종류가 같아도 제조사에 따라 실트 함량이 조형토는 18%, 산청토 12%, 분청토 6%로 큰 차이를 보였다. 평균 점토 함량은 조형토 56%, 백자토 54%, 분청토 53%, 청자토 51%, 산청토 46%의 순서로 낮아졌다. 그러나 같은 종류의 태토에서도 제조사에 따라 점토함량에 차이가 있었는데, 조형토는 12%, 분청토 7%, 산청토 6%, 백자토와 청자토 3%이었다. 조형토는 모래의 함량이 가장 높아서 가소성이 떨어지므로 실트보다는 점토를 많이 포함시켜 태토의 가소성을 증가시킨 것으로 판단된다.

본 연구에 사용된 태토를 점토-실트-모래의 삼각분포도에 도시하면 Fig. 2와 같다. Fig. 2a는 Dondi et al.(1992)가 제안한 점토-실트-모래의 입경을 사용한 것이며 Fig. 2b는 ASTM(1980)의 분류체계를 적용한 것이다. Dondi et al.(1992)가 제안한 입경을 이용하여 태토를 분류하면 1개사의 청자토가 점토질 실트에 포함되는 것을 제외하고 모두 모래-실트질 점토 영역에 도시된다. 그러나 ASTM의 입경을 이용하면 1개사의 산청토와 조형토가 각각 점토질 실트와 모래질 점토 영역에 속하는 것을 제외하고 모두 실트질 점토에 속한다. 본 실험에 사용된 태토의 육안 관찰에 의하면 ASTM이 제안한 입경을 이용하여 태토를 분류하는 것이 더 합리적으로 판단된다. 조형토는 모래 함유량이 가장 높고 분청토는 점토 함유량이 평균적으로 가장 많으며 산청토의 경우 전반적으로 모래 함유량이 높음이 확인되었다. 백자토와 청자토는 모래의 함유량이 가장 적고 점토와 실트의 세립질 흙의 비중이 높았으나 두 흙 사이의 세립질 흙 함량의 뚜렷한 차이는 발견되지 않았다.

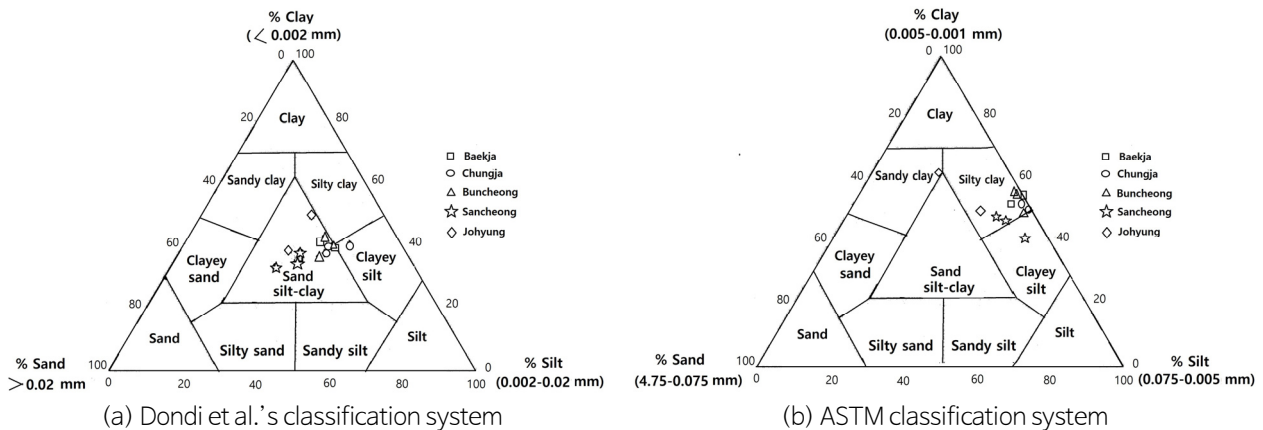


Fig. 2. Ternary classification of pottery soils based on sand-silt-clay ratios.

태토의 가소성

본 연구에 사용된 태토에 대한 아터버그 한계 실험을 수행하여 태토의 가소성을 평가하였다. 아터버그 한계 실험 결과는 Table 2와 같으며, 이 흙들의 소성도를 이용하여 통일분류법으로 분류하면, 높은 소성도를 가진 무기질 점토(CH)로 분류되는 분청토를 제외하고 모두 낮은 소성도를 가진 무기질 점토(CL)로 판정된다(Fig. 3). 백자토, 청자토, 분청토, 산청토, 조형토의 평균 액성한계 값은 각각 47%, 50% (49.7%), 52%, 46%, 45%, 소성지수(plasticity index)는 23%, 24%, 26%, 22%, 24%이었다. 아터버그 한계 실험결과를 종합하면 3개사 태토의 평균 액성한계, 소성한계, 소성지수는 각각 48%, 24%, 24%이며, 국외사례에서 조사된 평균 액성한계, 소성한계, 소성지수인 45%, 27%, 18%와 비교했을 때 액성한계는 3% 크고 소성한계는 3% 작아서 소성지수는 6% 증가하였다(Nton and Elueze, 2005; OlaOlorun and Oyinloye, 2010; Ngun, 2012; Amponsah-Dacosta et al., 2013; Akinola and Obasi, 2014; Ouahabi et al., 2014; Adeola, 2015; Mahmoudi et al., 2015; Mefire et al., 2015; Al-Momani and Dwairi, 2018; Jibrin et al., 2018; Jongs et al., 2018; Nkalih et al., 2018; Xanthopoulou, 2019; Assuncao et al., 2021; Aromolaran and Adebayo, 2022). 조형토는 흙의 소성 수축을 감소시키기 위해 입경이 큰 입자들을 가장 많이 포함하고 있는데, 액성한계도 이와 일치되게 가장 낮은 값을 보였다.

Bain and Highley(1978)에 의하면 소성지수가 20보다 클수록 도자기 제작에 적합한 흙이 된다. 그러나 너무 높은 가소성을 가진 흙은 건조과정에서 균열 형성과 과도한 수축으로 세라믹이 손상될 수 있으므로 Assuncao et al.(2021)은 다른 입도 분포를 가진 여러 점토를 섞어서 세라믹 재료를 제조할 것을 권장한 바 있다. 또한 Assuncao et al.(2021)은 세라믹 제작에 적합한 소성한계의 범위는 15~30%, 소성지수는 10~35%로 간주하였는데, 본 연구에 사용된 3개사 태토의 소성지수

는 20~30%의 범위를 보여 이러한 조건을 충족하였다.

Skempton(1953)이 제안한 활성도(activity)는 소성지수와 0.002 mm보다 작은 입자의 비율인데, 백자토 0.57, 청자토 0.62, 분청토 0.66, 산청토 0.62, 조형토 0.54이고 전체 평균 활성도는 0.61로서 0.75보다 작으므로 불활성(inactive)점토에 해당된다. 3대 점토광물 중에서 본 실험결과의 활성도를 갖는 점토광물은 일라이트(illite)이다. 실험 결과를 Mitchell (1976)이 제시한 Casagrande 소성지수 도표에 도시하여도 도자기 흙들은 대부분 일라이트로 판정되며 일부는 고령석과의 경계부에 해당된다(Fig. 3). 일반적으로 일라이트가 풍부한 흙은 가소성은 작으나 수축률이 작다는 장점이 있다.

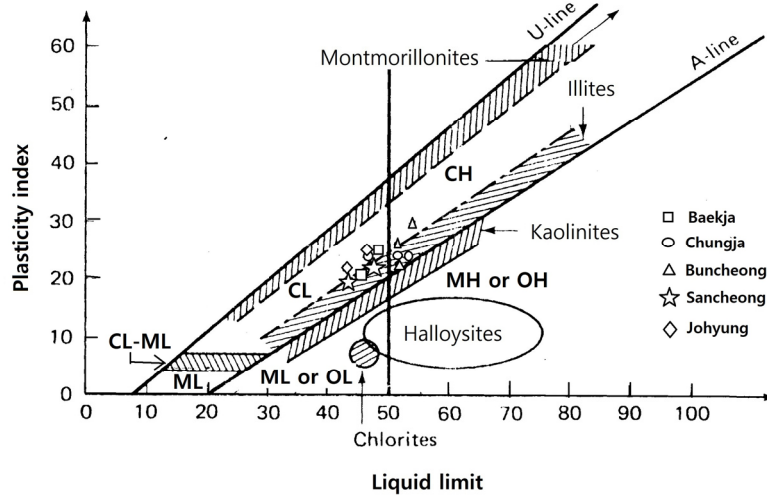


Fig. 3. Location of clay minerals and representative soil types on Casagrande's plasticity chart.

점토광물의 종류를 파악하기 위하여 Bain(1971)이 제시한 Fig. 4를 이용하였는데, 그림은 소성지수와 소성한계의 상관 관계를 이용하여 광물을 분류하는 기법으로 연구 대상의 모든 흙들은 4영역 또는 4와 5영역 사이에 도시되었으며, 주요 구성 광물이 고령석임을 의미한다.

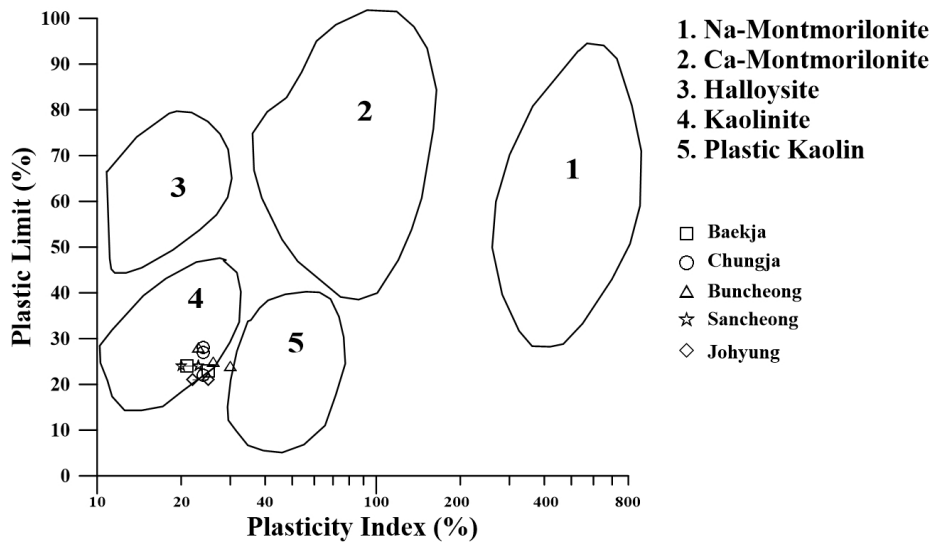


Fig. 4. Clay mineral classification chart.

태토의 화학성분과 광물 조성 분석

국내에서 판매되고 있는 태토에 대한 화학성분 분석 결과는 Table 3과 같다. SiO₂ 함량은 분청토(60.6%), 청자토(60.3%), 백자토(59.5%)로 유사한 값을 보였으며 산청토(56.6%), 조형토(54.8%)의 순으로 낮아졌다. 본 연구에서 측정된 값은 문헌조사를 통해 얻어진 국내외 태토의 평균 SiO₂ 함량(백자토 71.9%, 분청토 66.4%, 조형토 61.4%)보다 상당히 낮았다 (Singer and Singer, 1963; Gang, 2003; Nton and Elueze, 2005; Chung, 2007; Ngun, 2012; Akinola and Obasi, 2014; Kim et al., 2014; Won and Kim, 2014; Adeola, 2015; Mahmoudi et al., 2015; Mefire et al., 2015; Al-Momani and Dwairi, 2018; Ituma et al., 2018; Xanthopoulou, 2019; Lee and Lee, 2020; Aromolaran and Adebayo, 2022).

Table 3. Chemical analyses of pottery soils (unit: wt %)

| | Al ₂ O ₃ | CaO | Fe ₂ O ₃ * | K ₂ O | MgO | MnO | Na ₂ O | P ₂ O ₅ | SiO ₂ | TiO ₂ |
|-----------|--------------------------------|------|----------------------------------|------------------|------|------|-------------------|-------------------------------|------------------|------------------|
| Baekja | 25.3 | 1.09 | 0.93 | 1.80 | 0.38 | 0.02 | 0.56 | 0.02 | 59.5 | 0.26 |
| Chungja | 23.1 | 1.16 | 2.46 | 2.25 | 0.73 | 0.04 | 0.35 | 0.03 | 60.3 | 0.29 |
| Buncheong | 23.1 | 1.17 | 2.45 | 2.25 | 0.74 | 0.04 | 0.37 | 0.03 | 60.6 | 0.29 |
| Sancheong | 26.1 | 2.88 | 2.13 | 0.68 | 0.87 | 0.03 | 0.85 | 0.02 | 56.6 | 0.25 |
| Johyung | 28.2 | 2.68 | 1.92 | 1.22 | 0.69 | 0.03 | 0.70 | 0.03 | 54.8 | 0.30 |

*Fe₂O₃: total Fe.

Al₂O₃ 함량은 조형토가 28.2%로 가장 높았으며 산청토(26.1%), 백자토(25.3%), 청자토와 분청토(23.1%)의 순으로 낮았다. 문헌조사에서 얻어진 국내 태토의 평균 Al₂O₃ 함량과 비교했을 때, 백자토(평균 20.7%)와 산청토(평균 30.0%)는 4~5% 정도 차이가 있었다.

도자기의 백색도에 가장 많은 영향을 주는 Fe₂O₃ 함량은 국내 태토 화학성분과 마찬가지로 청자토와 분청토가 가장 높았고 백자토가 가장 낮았다. Singer and Singer(1963)에 의하면 Fe₂O₃ 함량이 2%보다 작으면 소성(firing) 후에도 도자기는 백색을 유지하는데 백자토는 0.93%로 가장 낮았다. CaO와 MgO의 함량은 국내 태토 평균과 동일하게 산청토에서 가장 높았고 백자토에서 가장 낮았다.

태토의 X-선 회절 분석에 의한 구성광물의 정량비는 Table 4, X-선 회절분석도는 Fig. 5와 같다. 태토의 주구성광물은 일라이트와 석영으로 각각 52~33%, 44~10%를 차지한다. 그 외 고령석이 12~5%, 조장석, 회장석, 정장석 등 장석류가 25~6% 함유되어 있다. 모든 태토는 점토광물로 일라이트가 주성분이며, 고령석을 일정량 함유한다. 백자와 분청토의 경우 광물조성이 다양하고, 산청토는 일라이트와 석영이 주성분으로 장석류를 함유하지 않는 것이 특징적이다.

Table 4. Semiquantitative mineral analyses of pottery soils (unit: %)

| Mineral | Baekja | Chungja | Buncheong | Sancheong | Johyung |
|------------|--------|---------|-----------|-----------|---------|
| Illite | 33 | 45 | 42 | 52 | 44 |
| Quartz | 34 | 37 | 10 | 44 | 41 |
| Kaolinite | 9 | 4 | 12 | 5 | 9 |
| Albite | 11 | - | 25 | - | - |
| Microcline | 13 | - | 11 | - | - |
| Anorthite | - | 14 | - | - | 6 |

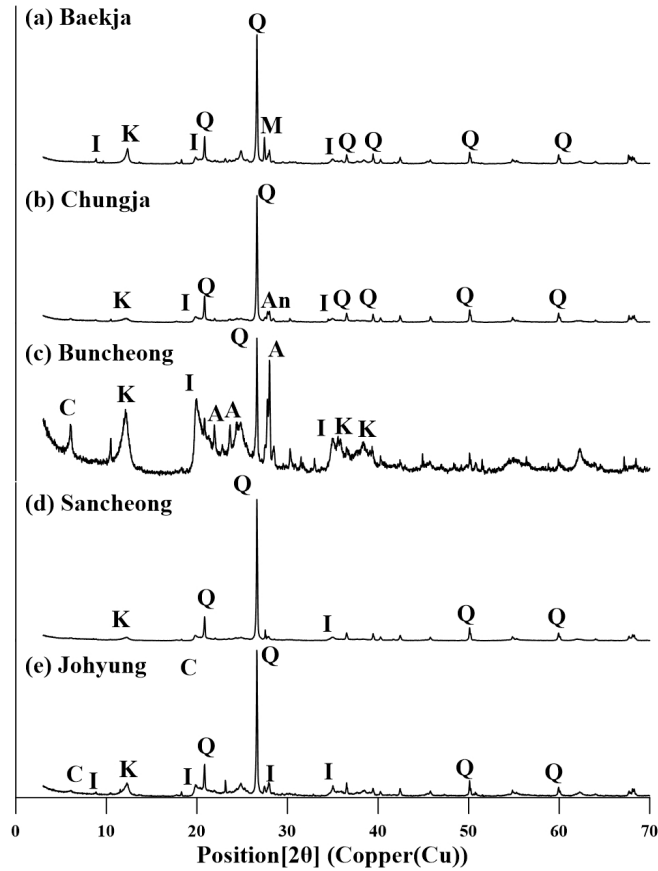


Fig. 5. XRD patterns of pottery soils (Q: quartz; K: kaolinite; A: albite; I: illite; M: microcline; An: anorthite; C: chrysotile).

토의

국내 태토의 경우 해외 도자기나 세라믹 제품에 사용된 흙과 비교하여 점토와 모래의 함량이 각각 5%와 8% 적었는데, 모래함량이 적으므로 낮은 점토의 함유량으로도 필요로 하는 가소성을 확보할 수 있는 것으로 판단된다. 분청사기는 백자나 청자에 비하여 입자가 거친 편인데, 입도분석결과에서도 사질토의 함량이 약 1%정도 더 높은 것이 확인되었다. 산청토는 점토에 수축력이 적은 규사질을 혼합하여 수축이 적은 특성이 있는데, 실험결과에서도 모래의 함유량이 9%로 조형토를 제외한 다른 태토와 비교하여 상당히 높았다. 흙은 입자가 작을수록 수축이 많이 발생하는데, 모래를 가장 많이 포함하고 있는 조형토는 수축 발생이 적어서 금이 갈 확률이 낮으므로 대형 조형물, 똑배기, 화로 등의 작업에 적합하다. 입도분석실험에서도 조형토의 모래함유량은 다른 태토보다 훨씬 높은 16%로서 조형토의 모래함유량이 높음을 정량적으로 확인할 수 있었다. 백자토와 청자토는 모래의 함유량이 가장 적고 점토와 실트의 세립질 흙의 비중이 높았으나 두 흙 사이의 세립질 흙 함량의 뚜렷한 차이는 발견되지 않았다. 그러나 백자토는 청자토에 비하여 Fe_2O_3 함량이 낮았으며 청자토에 함유되어 있지 않은 조장석(albite)과 미사장석(microcline)을 24% 함유하고 있어서 백자의 백색도를 높이는 역할을 하는 것으로 판단된다. 청자토에는 회장석(anorthite)이 14% 함유되어 있는데, 회장석은 점토질이나 규석질을 용해하여 강도를 갖게 하는 용제역할을 하는 것으로 알려져 있다.

태토의 가소성에서 Mitchell(1976)과 Bain(1971)이 제시한 점토광물 분류법과 비교하였을 때, Mitchell이 제시한 Casagrande 소성지수 도표를 이용한 분류법은 태토의 주구성 광물을 일라이트로 판정하여 X-선 회절분석 결과와 일치

한다(Fig. 3). 그러나 국외의 세라믹산업 분야에서 점토광물 분류에 널리 사용(ex. Ola, 1981; OlaOlorun and Oyinloye, 2010) 되고 있는 Bain의 분류법은 태토의 주구성 광물을 고령석으로 판정하여 상이한 결과를 보인다(Fig. 4). Bain(1971)은 가소성 그림을 이용하여 점토광물을 분류하는 것은 단일광물(monomineralic)의 경우는 가능하나, 일라이트와 같은 불균질한 광물이 혼합된 경우에는 광물 인지가 쉽지 않다고 하였다. 또한 일라이트 점토는 순수한 상태의 시료를 얻기 어렵고 특정 산업 점토 유형으로 적극적으로 발견하지 않으려고 한다고 하였으며 이러한 이유로 Fig. 4에 일라이트를 포함하지 않은 것으로 사료된다. 5개의 태토 시료는 일라이트 함량이 33~52%의 범위이며, 고령석은 4~12%의 범위로 상대적으로 낮은 함량을 보인다. 따라서 흙의 소성도와 액성한계를 이용한 Mitchell의 분류법이 일라이트를 반영하지 못하는 Bain의 분류법보다 태토의 점토광물 판정에 더 적합한 것으로 판단된다.

같은 종류의 태토에서도 제조사에 따라 점토와 실트의 함량이 3~18%의 큰 차이가 있었는데, 특정 도자기 제작에 필요한 가소성과 수축률 등에 다양한 인자들이 영향을 미치기 때문으로 판단된다. 즉, 점토광물 중에 몬모릴로나이트의 함량이 높거나 모래의 함유량이 낮으면 낮은 점토함량으로도 필요로 하는 가소성의 확보가 가능하다. 그러나 국내의 경우, 토질실험을 활용한 태토 구성의 정량적인 연구가 미흡한 상태이므로 향후 국내 도자기 산업의 발전을 위해서는 이에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

Li(2020)가 제안한 소성지수에 의한 세립토 분류에 의하면 본 연구에 사용된 태토의 소성지수는 모두 17 이상이므로 점토에 해당된다. 백자토는 고령토의 함유량이 다른 태토보다 높은 것으로 알려져 있고 조형토의 경우에도 조립질 흙이 많으므로 가소성이 낮을 것으로 예상하였다. 그러나 3개사 태토의 소성지수는 20~30% (평균 24%)의 범위를 보였으며 각 태토별로 뚜렷한 차이가 없었다. 3개사 태토의 소성지수는 Assuncao et al.(2021)이 세라믹 제작에 권장하고 있는 소성지수의 범위인 10~35%의 조건을 충족하였다. 조형토의 경우에는 액성한계가 가장 낮았으나 소성한계도 가장 낮아서 소성지수 자체는 다른 종류의 태토들과 유사하였다. 이것은 조형토가 모래의 함유량은 가장 높으나 점토의 함유량도 가장 높아서 가소성에 큰 차이를 보이지 않은 것으로 판단된다.

액성한계가 50% 이상인 흙은 소성도가 크고 다량의 물을 함유할 수 있으며 상당한 소성변형이 가능하다. 본 연구에 사용된 태토들은 분청토를 제외하고 모두 액성한계가 50% 이하이었다. 액성한계가 50% 이상인 흙은 소성도가 크고 다량의 물을 함유할 수 있으며 상당한 소성변형이 가능하다. 따라서 대부분의 도자기 제작용 흙은 액성한계가 50% 이하임이 본 연구를 통하여 확인되었다.

결론

시중의 도재상이 자신들의 비법으로 제조하여 판매하는 태토(백자토, 청자토, 산청토, 분청토, 조형토) 13점에 대한 체 분석, 비중계 시험, 아터버그 한계 시험, XRF와 XRD 분석을 통하여 화학성분과 구성광물 분석 결과를 결론적으로 요약하면 다음과 같다.

- (1) 국내 태토의 경우 해외 도자기나 세라믹 제품에 사용된 흙과 비교하여 점토와 모래의 함량이 낮았는데, 모래함량이 적으므로 낮은 점토의 함유량으로도 필요로 하는 가소성을 확보할 수 있는 것으로 판단된다. 특히 백자토와 청자토의 모래함량이 가장 적었고 세립토의 비중이 높았는데 두 흙 사이의 세립토 함량은 뚜렷한 차이를 보이지 않았다. 그러나 백자토의 Fe_2O_3 함량이 낮고 조장석과 미사장석의 함유량이 높은 것이 두 흙의 백색도에 영향을 주는 것으로 판단된다.
- (2) 조형토는 대형 조형물, 화로 등의 작업에 이용되므로 수축 발생이 적어야 하는데, 조형토의 모래함유량은 다른 태토보다 훨씬 높은 16%로서 조형토의 모래함량이 높음을 정량적으로 확인할 수 있었다. 또한 조형토는 모래의 함유

량은 뿐만 아니라 점토의 함유량도 높아 다른 종류의 태토와 비교하여 가소성에 큰 차이를 보이지 않았다.

- (3) 본 연구에 사용된 태토의 평균 액성한계, 소성한계, 소성지수는 각각 48%, 24%, 24%로 해외 연구사례에서 도자기 재료로 제시한 액성한계 50% 이하, 소성한계 15~30%, 소성지수 20~35%의 조건을 충족하였으나, 각 태토의 종류 별로 의미 있는 차이는 보이지 않았다.
- (4) 태토의 화학성분은 SiO₂ 함량이 54.8~60.6%의 범위로 국내 태토 평균 함량(61.4~71.9%)보다 낮으며, X-선 회절 분석결과 점토광물은 일라이트와 석영이 주성분이며, 소량의 고령석이 확인된다. 그 외 석영, 정장석, 회장석, 조장석 등이 수반된다.
- (5) X-선 회절 분석결과에 의하면 흙의 소성지수와 액성한계를 이용한 Casagrande의 광물 분류법이 일라이트를 반영하지 못하는 Bain의 점토광물 분류법보다 더 유용하였다.
- (6) 같은 종류의 태토에서도 국내 제조사에 따라 점토와 실트의 함량이 큰 차이가 있었는데, 특정 도자기 제작에 필요한 가소성과 수축률 등에 다양한 인자들이 영향을 미치기 때문으로 판단된다. 국내에서는 토질실험을 활용한 태토 구성의 정량적인 연구가 미흡한 상태이므로 향후 국내 도자기 산업의 발전을 위해서는 이에 대한 적극적인 연구가 필요하다.

사사

본 논문은 2021학년도 대전대학교 교내학술연구비 지원에 의해 연구되었습니다.

References

- Adeola, A.J., 2015, Mineralogy and geochemistry of residual clay occurrences in Idi-Ayunre and Akure areas, southwestern Nigeria, *Journal of Geography and Geology*, 7(4), 23-32.
- Akinola, O.O., Obasi, R.A., 2014, Compositional characteristics and industrial potential of the lateritic clay deposit in Ara-Ijero Ekiti areas, southwestern Nigeria, *International Journal of Scientific & Technology Research*, 3(8), 304-311.
- Al-Momani, T.M., Dwairi, M., 2018, Physical and technical characteristics of Jarash clay deposits from northern Jordan, *Jordan Journal of Earth and Environmental Sciences*, 9(2), 81-88.
- Amponsah-Dacosta, F., Muzerengi, C., Mhlongo, S.E., Mukwevho, G.F., 2013, Characterization of clays for making ceramic pots and water filters at Mukondeni village, limpopo province, South Africa, *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 8(11), 927-932.
- Aromolaran, O.K., Adebayo, A.B., 2022, Mineralogical, geochemical, and industrial appraisal of Kaolinitic claystone in Share area, northcentral Nigeria, *Arabian Journal of Geosciences*, 15, 789.
- Assuncao, A.R.S., Correia, G.S., Vasconcelos, N.S., Cabral, A.A., Angelica, R.S., Costa, F.P., Menezes, R.R., Neves, G., Rodrigues, A.M., Rivas-Mercury, J.M., 2021, New clayey deposit and their potential as raw material for red or structured ceramics: Technological characterization, *Materials*, 14, 1-16.
- ASTM, 1980, Annual book of ASTM standards, Part 19: Natural building stones; soil and rock, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 634p.
- Bain, J.A., 1971, A plasticity chart as an aid to the identification and assessment of industrial clays, *Clay Minerals*, 9(1), 1-17.
- Bain, J.A., Highley, D.E., 1978, Regional appraisal of clay resources-a challenge to the clay mineralogist, *Proceedings of the IV International Clay Conference, AIPEA, Oxford*, 437-458.

- Chung, H.S., 2007, A study on the interaction with glazes and bodies, Master's Thesis, Department of Ceramic Technology, Myungji University, 1-44 (in Korean with English abstract).
- Dondi, M., Fabbri, B., and Laviano, R., 1992, Characteristics of the clays utilized in the brick industry in Apulia and Basilicata (southern Italy), *Mineralogica Petrologica Acta*, 35, 181-191.
- Gang, G.I., 2003, Whiteware from the official kiln of Choseon dynasty period in Beoncheon-ri, Gwangju, *Journal of Conservation Science*, 12(1), 1-14 (in Korean with English abstract).
- Ituma, C.G., Etukudoh, A.B., Abuh, M.A., Akpomie, K.G., Obioha, C.I., 2018, Utilization of Nkpuma-Akpatakpa clay in ceramics: Characterization and microstructural studies, *Journal of Applied Sciences and Environmental Management*, 22(1), 47-53.
- Jeong, G.Y., Choi, J.H., Lim, H.S., Seong, C., Yi, S.B., 2013, Deposition and weathering of Asian dust in Paleolithic sites, Korea, *Quaternary Science Reviews*, 78, 283-300 (in Korean with English abstract).
- Jibrin, A.I., Dalorima, U.L., Salihu, B., Mohammed, H.Y., Maigari, A.S., 2018, Assessment of industrial potential of kaolinite clays from Bauchi, Ne Nigeria, *International Journal of Geology and Earth Sciences*, 4(3), 23-31.
- Jongs, L.S., Jock, A.A., Ekanem, O.E., Jauro, A., 2018, Investigating the industrial potentials of some selected Nigerian clay deposits, *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, 6, 569-586.
- Kim, J.H., Moon, C.S., Park, S.C., Moon, S.W., Jwa, Y.J., 2017, Distribution of clay minerals in yellow soils with respect to parent rocks: An example from the Bukcheon-myeon, Hadong-gun, Korea, *Journal of Korean Earth Science Society*, 38(7), 598-602 (in Korean with English abstract).
- Kim, S.M., No, H.G., Kim, U.S., Cho, W.S., 2014, A study on sources of pore formation in Onggi via the comparison with porcelains, *Journal of the Korean Ceramic Society*, 51(1), 11-18 (in Korean with English abstract).
- Kwak, T.H., Jeong, G.Y., 2017, Mineralogical and geochemical properties of clay-silt sediments exposed in Jangdongri, Naju, Korea, *Journal of Mineralogical Society of Korea*, 30(1), 11-19 (in Korean with English abstract).
- Lee, G.H., Lee, C.H., 2020, Interpretation of similarity on raw materials and firing temperature for underwater ceramic artifacts from offshore in Taean Mado, Korea, *Economic and Environmental Geology*, 53(3), 307-320 (in Korean with English abstract).
- Li, Z.P., 2020, The analysis of the impact of liquid limit on mechanical properties of clayey soil, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 525, 012036.
- Mahmoudi, S., Srasra, E., Zargouni, F., 2015, Identification and ceramic application of some Tunisian clays, *Open Access Library Journal*, 2, e998.
- Mefire, A.N., Njoya, A., Fouateu, R.Y., Mache, J.R., Tapon, N.A., Nzeugang, A.N., Chinje, U.M., Pilate, P., Flament, P., Siniapkine, S., Ngono, A., Fagel, N., 2015, Occurrences of kaolin in Koutaba(west Cameroon): Mineralogical and physicochemical characterization for use in ceramic products, *Clay Minerals*, 50, 593-606.
- Mitchell, J.K., 1976, *Fundamentals of soil behavior*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 422p.
- Ngun, B.K., 2012, Characterization of Cambodian clays and their suitability for ceramic tiles applications, Ph.D. Thesis, School of Materials and Mineral Resources Engineering, Universiti Sains, Malaysia, 204p.
- Nkalih, A.M., Pilate, P., Yongue, R.F., Njoya, A., Fagel, N., 2018, Suitability of Fouban clays (West Cameroon) for production of bricks and tiles, *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, 6, 244-256.
- Nton, M.E., Elueze, A.A., 2005, Compositional characteristics and industrial assessment of sedimentary clay bodies in part of eastern Dahomey Basin, southwestern Nigeria, *Journal of Mining and Geology*, 41(2), 175-184.
- Ola, S.A., 1981, Mineralogical properties of some Nigerian residual soils in relation with building problems, *Engineering Geology*, 15, 1-13.
- OlaOlorun, O., Oyinloye, A., 2010, Geology and geotechnical appraisal of some clay deposits around Ijero-Ekiti Southwestern Nigeria: Implication for industrial uses, *Pakistan Journal of Scientific and Industrial Research*, 53(3), 127-135.

- Ouahabi, M.E., Daoudi, L., Fagel, N., 2014, Mineralogical and geotechnical characterization of clays from northern Morocco for their potential use in the ceramic industry, *Clay Minerals*, 49, 35-51.
- Singer, F., Singer, S., 1963, *Industrial ceramic*, Chapman and Hill Limited, London, 1400p.
- Skempton, A.W., 1953, The colloidal “activity” of clays, *Proceedings of the 3rd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Zurich, 1, 57-61.
- Won, I.A., Kim, K.N., 2014, Reactions of various ceramic materials with cobalt sulfate solution, *Korean Journal of Materials Research*, 24(2), 93-97 (in Korean with English abstract).
- Xanthopoulou, V., 2019, Assessment of clayey raw material suitability for ceramic production in northern Peloponnese: An archaeometric approach, Ph.D. Thesis, Department of Geology, University of Patras, Greece, 365p.