정선 아우라지 출토 토기의 재료과학적 특성 분석

An Analysis of Material Property on Earthenwares Excavated at Auraji site in Jeongseon

이병훈

강원도문화재연구소

Byeong Hoon Lee

Gangwon Research Institute of Cultural Heritage, Chuncheon 200-150, Korea

Received May 27, 2021
Revised September 29, 2021
Accepted October 1, 2021

*Corresponding author

E-mail: lbh982@hanmail.net
Phone: +82-10-9716-5993

Journal of Conservation Science
2021;37(5):545-556

<https://doi.org/10.12654/JCS.2021.37.5.12>

pISSN: 1225-5459, eISSN: 2287-9781

© The Korean Society of
Conservation Science for Cultural
Heritage

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

초 록 본 연구에서는 정선 아우라지 유적에서 출토된 신석기시대 및 청동기시대 토기 총 11점을 대상으로 재료학적 특성을 연구하였다. 분석결과, 청동기시대 초기 토기의 염기성 및 산성 성분은 신석기시대 토기와 청동기시대 전기 토기의 중간 영역에서 분포하였지만, 각 제작시기에 따른 큰 차이는 확인되지 않았다. 이미 연구되었던 강원지역 출토 토기와 비교해본 결과, 정선 아우라지 출토 토기는 영동지역 출토 토기보다 산성 성분이 적은 경향성을 보였으며, 염기성 성분은 출토유적에 따라 차이가 있었다. 희토류 원소 분포 패턴에서는 분석대상 토기 모두 유사한 패턴 결과를 나타내어 태토원료의 모양이 동일기원임을 확인하였으며, 기 연구되었던 타 유적 토기 태토와의 비교를 통하여 정선 아우라지 출토 토기 태토의 특성을 확인하였다. 미세구조 분석결과 분석대상 토기는 대체로 점토입자 및 공극의 분포가 불규칙하며, 기질이 느슨하여 치밀한 소성이 이루어지지 못했다. 신석기 시대 토기에서는 부정형 공극이 많이 확인되었으며, 점토기질과 함께 장석을 포함한 알루미노 규산 염의 배열이 관찰된 반면, 청동기시대 전기 토기의 공극은 미정질 입자와 입방체 결정 등으로 채워진 부분이 다수 확인되었다. 정선 아우라지 출토 토기 태토의 주된 광물상은 제작시기와는 별개로 각 토기의 특성에 따른 광물 조성이 검출되기도 했지만, 전체적으로 유사한 조성을 나타내었다. 따라서 토기의 소성온도에는 큰 차이가 없었던 것으로 확인되며, 약 750~850°C 범위에서 저온소성된 것으로 추정된다.

중심어 정선 아우라지 유적, 신석기시대, 청동기시대, 태토의 주성분, 희토류원소, 광물상

ABSTRACT In this study, we aimed to elucidate the materialistic characteristics of 11 pieces of earthenware belonging to the Neolithic and Bronze Age excavated from Jeongseon Auraji, South Korea. As a result, the chemical composition of earthenwares belonging to the early Bronze Age was distributed in the intermediate area between the Neolithic and Bronze Age earthenwares, but no significant difference was confirmed based on their manufacturing period. Upon comparison, the earthenwares excavated from Jeongseon Auraji site were found to comprise less acidic components than those excavated from Yeongdong, and are characterized by the alkaline components depending on the excavated site. In the rare earth elements distribution pattern, all the analyzed earthenwares exhibited similar pattern, confirming that the raw materials present in the clay were the same. As a result of microstructure analysis, the clay particles and voids were found to be irregularly distributed in the analyzed earthenwares. Neolithic earthenwares exhibited many irregular voids, and an arrangement of aluminosilicate, including feldspar, was observed along with the clay substrate. Furthermore, we confirmed that the empty space in early Bronze Age earthenwares was filled with fine particles and cube crystals. Moreover, the main mineral phase of earthenwares excavated from Jeongseon Auraji exhibited similar composition, and therefore, there was no significant difference in the firing temperature of these earthenwares. The firing temperature of the earthenwares ranged from 750 to 850°C.

Key Words Jeongseon Auraji site, Neolithic Age, Bronze Age, Chemical composition, Rare earth elements, Mineral phase

1. 서론

문화재의 발굴과 더불어 출토유물의 과학적 분석은 고고학적인 사실을 증명하거나, 새로운 사실을 밝혀내는 데 목적이 있다. 토기 등 무기질문화재 분석은 과학이 발전함에 따라 다양한 분석방법을 통하여 연구가 진행되고 있다. 토기를 포함한 세라믹 재질의 문화재를 연구하기 위해서는 제작과정을 면밀히 이해하고, 각기 다른 제작과정 속에서 영향을 미칠 수 있는 여러 요인들을 종합적으로 판단해야 한다. 세라믹 재질 문화재는 제작기법, 재료학적 특성, 원료의 산지 추정 연구 등이 진행되고 있으며, 자연과학 및 공학 분야에서 사용되고 있는 기술들을 문화재 분석에 적용하고 있다. 토기, 도기, 옹기, 청자, 분청사기, 백자 등 세라믹 재질의 문화재는 발굴과 동시에 선별적으로 과학적 분석을 진행하고 있으며, 제작시기 또는 산지에 따라 재료과학적 특성을 규명한다. 지금까지 강원지역에서 출토된 토기에 대한 연구는 원주 법천리 고분군 출토 토기(Jeon, 2006), 강원 영동·영서지역 출토 점토 태토기(Um, 2009), 강원 영서지역 토기의 과학적 분석(Lee, 2006), 강원지역 출토 적색마연토기의 재료학적 특성 연구(Han, 2010) 등이 이루어진바 있다. 하지만, 정선지역에서 출토된 토기에 대한 연구는 아직까지 진행된바 없으며, 특히 이미 연구된 강원지역 타 유적 출토 토기와 비교할 수 있는 기초자료를 마련하는 것에 큰 의의가 있다.

대상유적인 정선 아우라지 유적은 송천과 골지천이 합수되는 조양강을 사이에 두고 북쪽인 여량5리와 남쪽인 여량2리에 넓은 충적대지에 형성되어 있고, 여량5리에는

청동기시대 고인돌을 비롯하여 신석기시대~철기시대 유물산포지가 보고된바 있다(Gangwon Research Institute of Cultural Heritage, 2011). 2016년 발굴조사가 실시된 II~IV지역은 시굴조사에서 삼국(신라) 주거지와 청동기시대 주거지, 고인돌 등이 확인되어 일부 조사가 진행된 바 있으며, 1,427점의 유물이 확인되었다. 2006년과 2016년 발굴조사에서 확인된 유구는 총 139기의 유구와 2,604점의 유물이 확인되었고, 출토 유물 중 청동기시대 토기 유물은 321점이며, 신석기시대는 20점의 토기 유물이 출토되었다(Gangwon Research Institute of Cultural Heritage, 2019).

본 연구에서는 신석기시대부터 청동기시대까지 정선 아우라지 유적에서 출토된 토기를 대상으로 제작기법 및 화학적 특성을 확인하고자 하였다. 또한, 이미 연구된 타 지역 토기와 화학적 성분을 비교하여 정선 아우라지 토기의 특성을 확인하고자 하였다. 과학적 분석방법으로는 토기 태토의 주성분 및 미량성분 등 화학적 조성, 미세구조, 광물 조성을 통해 태토 및 제작과정에 따른 토기 태토의 특성을 비교하였다.

2. 분석대상 및 방법

2.1. 분석대상

본 연구에서는 분석에 사용된 시편은 총 11점으로 신석기시대 빗살무늬토기 편 2점, 청동기시대 초기 각목돌대문토기편 5점, 청동기시대 전기 공렬토기편 2점, 구순

Figure 1. Pictures of specimen of earthenwares selected in this study.

Table 1. Characteristics of earthenwares selected in this study

Number	Type	Age	Part	Color	Pattern
JS-1	Comb-pattern pottery	Neolithic Age	Mouth rim	Dark yellow	0
JS-2	Comb-pattern pottery		Body part	Yellow-brown	0
JS-3	Doldaemun pottery	Initial period of Bronze Age	Mouth rim	Yellow-brown	X
JS-4	Doldaemun pottery		Mouth rim	Yellow-brown	X
JS-5	Doldaemun pottery		Mouth rim	Dark yellow	X
JS-6	Doldaemun pottery		Mouth rim	Dark brown	0
JS-7	Doldaemun pottery		Mouth rim	Dark brown	0
JS-8	Hole Line pottery	Early Bronze Age	Mouth rim	Red-brown	X
JS-9	Hole Line pottery		Mouth rim	Red-brown	X
JS-10	Notched-rim vessel		Mouth rim	Red-brown	X
JS-11	Hole Line pottery		Mouth rim	Red-brown	X

각목토기편 1점, 공렬단사선문토기편 1점을 대상으로 하였으며(Figure 1), 분석대상 시편의 종류, 제작시기 및 분석부위, 문양 등 특징을 상세히 표기하였다(Table 1). 분석대상 선정에 있어 토기의 구연부를 중심으로 시편을 선정하여 특성을 비교하고자 하였다. 분석대상 토기는 편의상 JS로 표기하였으며, 토기 편 번호는 표기된 명칭 뒤에 ‘-’와 해당 토기 편 번호를 나타내었다.

2.2. 분석방법

2.2.1. 주성분 분석

분석대상 토기의 태토 주성분 분석을 위하여 엑스선형 광분석기(XRF, ZSX100e, Rigaku, JPN)를 이용하였으며, X선 선원은 Rh target을 사용하였다. Agate mortar에서 약 30 μm 로 분쇄하였고, 분쇄된 시료를 $\varnothing$ 30 mm 펠렛 형태로 성형하여 분석용 시편으로 사용하였으며 성형 압력은 15 ton/cm^2 으로 하였다.

2.2.2. 미량성분 분석

미량성분 분석은 유도결합플라즈마 질량분석기(ICP-MS, X5, Thermo Elemental, GBR)와 유도결합플라즈마 원자방출 분광기(ICP-AES, Optima 4300DV, Perkin Elmer, USA)로 분석하였으며, 시료는 고온 건조 후 미세하게 분말화하여 왕수와 HF 48% 용액에 용해한 후 분석하였다.

2.2.3. 미세구조 분석

분석 대상 토기의 미세구조를 관찰하기 위하여 주사전 자연미경(FE-SEM, JEOL, JSM-6701F, JPN)을 이용하였으며, 에너지분산엑스선분석기(EDS, ISIS-300, OXFORD,

GBR)를 통해 화학적 조성에 따른 X-ray plane mapping을 관찰하였다. $\times 40$, $\times 500$ 으로 관찰하였으며, 분석시편은 20% 플루오르화수소산(HF) 용액에 약 5초간 etching하여 분석하였다.

2.2.4. 광물 조성 분석

광물 조성 조사를 위하여 고분해능엑스선회절분석기(HR-XRD, D/MAX 2500V/PC, Rigaku, JPN)를 이용하여 분석하였다. 이때 분석조건은 scan range $5\sim 80^\circ$, scan speed $0.6^\circ/\text{min}$, scan step 0.01° , acceleration voltage 40 kV 200 mA, target Cu로 하였다. 미세절단기를 이용하여 적당량을 절단한 후, 약 30 μm 이하로 분쇄하여 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 분석대상 토기의 주성분

분석대상 토기 태토 원료를 대상으로 주성분 분석을 실시하였으며 결과를 표로 나타내었다(Table 2). 신석기 시대 빗살무늬토기의 태토와 청동기시대 초기 각목돌대문토기의 불석결과, SiO_2 는 거의 유사하거나 청동기시대 초기 토기가 미량 적은 함량이었다. Al_2O_3 는 각 제작시기 별로 거의 유사한 경향이지만, 청동기시대 초기 토기가 신석기시대 토기보다 다소 높은 함량을 나타내었다. Fe_2O_3 는 제작시기와 상관없이 태토의 발색 특성에 따라 함량에 차이를 보이며, 태토가 비교적 어두운 색을 나타내고 있는 JS-6은 8.67 wt%로 높은 함량이었다. 분석범위에서 MnO는 모두 미량 검출되었으며, K_2O 성분이 비교적 다량 검출되었다. MgO는 청동기시대 초기 토기가 신

Table 2. Chemical composition of earthenwares analyzed by XRF

Sample number	Oxide concentration (wt.%)										
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	MnO	P ₂ O ₅	Total
Neolithic Age											
JS-1	55.98	25.19	5.75	1.17	2.27	1.59	3.78	1.14	0.03	2.66	99.56
JS-2	63.99	23.73	2.86	1.18	0.93	1.76	3.60	0.64	0.06	1.04	99.79
Initial period of Bronze Age											
JS-3	55.84	29.25	5.45	0.74	0.94	1.48	3.70	1.03	0.01	1.16	99.60
JS-4	58.40	25.64	3.62	0.53	0.95	1.56	4.77	1.11	0.01	2.99	99.58
JS-5	58.43	27.77	3.98	0.49	1.17	1.08	3.44	1.31	0.01	1.96	99.64
JS-6	51.45	26.02	8.67	1.02	2.71	1.43	4.09	1.25	0.04	2.83	99.51
JS-7	60.79	25.39	4.51	0.99	1.74	1.53	2.85	1.03	0.02	0.92	99.77
Early Bronze Age											
JS-8	51.73	24.95	10.90	5.95	1.20	0.24	2.77	0.77	0.08	1.12	99.71
JS-9	54.45	27.14	9.56	1.56	0.72	0.41	2.86	0.93	0.10	2.01	99.74
JS-10	56.55	25.49	8.37	1.54	1.09	0.71	3.21	0.98	0.03	1.75	99.72
JS-11	55.32	26.43	9.93	1.82	0.62	0.47	3.01	0.92	0.11	1.08	99.71

Figure 2. Distribution diagram of Fe₂O₃-TiO₂(A), K₂O- Na₂O(B), MgO+CaO+Na₂O+K₂O-Na₂O(C) of earthenwares.

석기시대 토기보다 적은 함량이며, Na₂O는 서로 비슷한 결과로 확인되었다. 청동기시대 전기 토기의 SiO₂ 성분 함량은 신석기시대 토기보다 낮고, 청동기시대 초기 토기와는 유사하거나 다소 낮은 경향을 보였다. Fe₂O₃는 신석기시대 토기 및 청동기시대 초기 토기 함량보다 높은 특징이었으며, JS-8을 제외한 나머지 토기 편의 용제성분은 신석기시대 및 청동기시대 초기 토기보다 낮은 함량으로 확인되었다. 분석대상 토기의 착색에 영향을 미치는 성분의 분포도를 살펴보면, Fe₂O₃의 경우 신석기시대 토기와 청동기시대 초기 토기는 거의 유사한 함량이지만, 청동기시대 전기 토기는 다소 많은 함량으로 차이가 확인되었다. 반면, TiO₂는 거의 시기와 상관없이 거의 같은 함량이었다(Figure 2A). 용제성분으로 토기의 소성에 영향을 미

치는 원소 중 알칼리 성분 K₂O 함량은 시기별로 큰 차이가 나지 않았다. 다만 Na₂O는 신석기시대 토기와 청동기시대 초기 토기가 거의 유사하고, 청동기시대 전기 토기는 적은 함량으로 군집되어 구분된다(Figure 2B). 마지막으로 Na₂O와 용제성분의 합을 특성 살펴보면, 청동기전기 토기는 JS-8을 제외하고, 신석기, 청동기 초기 토기보다 적은 Na₂O 원소 함량으로 확인되었다(Figure 2C).

주성분 분석결과를 제겔식으로 확인하여 그래프로 나타내었다(Figure 3A). 일반적으로 토기 원료는 산화물 또는 몇 개의 산화물이 결합된 화합물로 구성되어 있는데, 이들 산화물은 염기성에 속하는 금속산화물과 산성에 속하는 비금속산화물, 산성과 염기성의 중간인 중성산화물로 나눌 수 있다(Oh, 1998). 이 중에서 중성산화물은 산성

Figure 3. Distribution diagram of compositions according to seger formula of earthenwares.

과 염기성 산화물이 공존할 경우 쉽게 반응하여 생성됨으로 원료의 분류를 이용한 비교분석에서는 크게 산성과 염기성으로 나눈다. 이렇게 분류된 주요 산화물을 가지고 산소 이외의 원소를 R로 치환하면 염기성에 대한 일반식은 RO 또는 R_2O 가 되고, 중성은 R_2O_3 로, 산성은 RO_2 로 표현하는데 이를 이용한 것이 제겔식이다(Oh, 1998). 제겔식의 태토 분석결과는 R_2O_3 를 1 mole로 하였을 때 RO_2 와 $RO + R_2O$ 의 몰(mole)비를 구하는데 RO_2 는 SiO_2 와 TiO_2 와 P_2O_5 의 합을 나타내며, R_2O_3 는 Al_2O_3 와 Fe_2O_3 의 합을 나타내고 RO는 MgO , CaO , MnO 의 합이며, R_2O 는 Na_2O 와 K_2O 의 합이다.

신석기시대 빗살무늬토기는 RO_2 3.41~4.31 몰, $RO + R_2O$ 0.45~0.48 몰 영역에 분포하며, 청동기시대 초기 토기는 RO_2 2.88~3.72 몰, $RO + R_2O$ 0.29~0.45 몰로 신석기시대 토기와 유사한 결과이다. 청동기시대 전기 토기는 염기성 성분이 비교 불가한 영역에 분포하는 JS-8을 제외하고, RO_2 2.81~3.19 몰, $RO + R_2O$ 0.28~0.34 몰에 군집하였으며, 청동기시대 초기 토기의 산성 및 염기성성분이 낮은 토기와 유사한 경향을 나타내었다. 또한, 청동기시대 전기 토기를 신석기시대 토기와 비교해 보면, 산성 및 염기성성분 모두 낮은 함량으로 차이를 보였다.

정선 아우라지 토기 태토 원료의 화학적 특성을 살펴보기 위하여, 이미 연구되었던 양양 오산리 유적, 영월 주천리 유적, 고성 대대리 유적에서 출토된 토기의 주성분 분석결과(Han, 2010)와 비교해 보았다(Figure 3B). 정선 아우라지 토기는 염기성 성분이 분산된 분포이며, 영서지역 유적인 영월 주천리 유적 출토 토기보다 산성성분 함량이 미량 적다. 강원 영서지역 토기인 정선 아우라지와 영월 주천리 유적의 토기는 유적에 따라 군집을 이루지만, 산성성분 함량이 유사한 경향성을 보였다. 강원 영동지역 유적인 양양 오산리와 고성 대대리 유적 토기와 비교해 보면, 영동지역 출토 토기의 산성함량이 높으며, 염기성 성분은 유적에 따라 군집을 이루는 특성을 보인다. 이는

각 유적에서 출토된 토기의 제작기법 특성 및 영동지역의 바닷가 근접 지리적 특성에 따른 결과로 해석된다.

3.2. 미량성분 원소

주성분 분석 외에 총 35개의 미량성분 원소에 대한 분석결과를 표로 나타내었다(Table 3). 미량성분 원소 분석 대상 토기는 제작시기별로 대표성을 갖는 토기를 선택하여 총 8개 시편에 대한 분석을 진행하였다. 또한, 토기의 희토류원소 함량패턴을 비교하여 원료 모암의 유사성을 확인해 보고자 하였다. 미량성분 원소 중 희토류 원소는 광물 내에서 쉽게 치환되지 않기 때문에 암석의 유전자와 같은 역할을 하여 산지 추정에 적합한 원소로 이용되고 있다(Mason and Moore, 1982). 희토류원소의 존재도 변화가 고고학의 영역까지 널리 사용될 수 있는 것은 다른 원소들의 지구화학적 특성과 비교해 볼 때, 희토류원소가 풍화 혹은 변질 작용과 같은 지질학적 현상의 변화에 대해서도 일정한 특성을 가지고 분화되기 때문이다(Aubert *et al.*, 2001). 분석대상 토기의 희토류원소 함량 분포는 La, Ce, Nd, Sm, Eu, Tb, Yb, Lu 등 8개 원소를 운석의 초생치로 표준화(Taylor and McLennan, 1985)하여 나타냈다.

정선 아우라지 유적에서 출토된 토기는 시기에 상관없이 모두 유사한 희토류원소 함량 패턴을 나타내었다. 경희토류에서 중희토류원소로 갈수록 완만히 감소하는 경향으로, 각 시료 간의 지구화학적 거동특성이 거의 완벽히 일치한다(Figure 4A). 이를 통해 토기 태토원료는 성인으로 동일한 종류의 암석에서 생성되었음을 확인하였다. 정선 아우라지 출토 토기의 희토류원소 함량 패턴의 특성을 살펴보기 위하여, 이미 연구되었던 양양 오산리 유적, 영월 주천리 유적, 고성 대대리 유적에서 출토된 토기의 희토류원소 분석결과(Han, 2010)를 참고하였다(Figure 4B). 다른 유적에서 출토된 토기는 모두 표준치와 비교하여 부화된 경향성을 보이며, 경희토류에서 중희토

Table 3. Trace elements compositions of earthenwares

단위(ppm)	JS-1	JS-2	JS-3	JS-4	JS-5	JS-8	JS-9	JS-10
Rb	102.7	108.7	107.6	105.4	114.5	108.7	106.2	108.1
Y	12.79	16.23	17.58	19.56	24.32	30.73	20.12	19.57
S	37.6	37.5	36.5	36.2	36.1	40.4	45.2	35.7
Cs	2.81	2.76	3.02	3.01	3.66	5.10	4.56	3.65
La	47.0	47.2	47.5	47.9	48.0	45.2	47.5	46.9
Ce	85.9	88.9	89.2	89.4	90.4	89.5	89.3	88.4
Pr	10.2	10.5	10.4	10.9	11.0	12.0	11.2	11.1
Nd	37.3	38.2	37.6	39.5	40.6	45.8	42.3	40.1
Sm	5.83	6.23	6.33	6.75	7.03	7.42	6.88	6.98
Eu	1.67	1.68	1.67	1.89	1.99	1.66	1.68	1.67
Gd	4.68	5.01	4.98	5.56	6.32	6.99	6.52	5.56
Tb	0.45	0.56	0.65	0.57	0.74	1.05	0.65	0.67
Dy	2.43	2.56	2.65	2.57	2.43	2.95	2.55	2.42
Ho	0.41	0.67	0.56	0.45	0.79	1.17	1.10	1.08
Er	1.32	1.56	1.89	1.79	2.30	2.17	2.56	2.46
Tm	0.14	0.16	0.17	0.18	0.26	0.43	0.35	0.26
Yb	1.22	1.24	1.34	1.45	1.91	2.0	1.67	1.84
Lu	0.14	0.18	0.17	0.20	0.23	0.30	0.25	0.21
Pb	34.6	35.6	36.5	34.2	31.4	36.2	36.0	35.9
Th	12.25	11.25	10.56	10.34	10.27	13.26	12.54	12.38
U	3.29	3.56	3.45	3.32	3.56	3.68	3.57	3.65
Ba	2081	1895	1956	1879	1851	1927	1875	1957
Mn	178.6	200.1	250.3	265.4	276.1	202.4	206.3	208.9
Sr	684.9	645.5	658.6	632.1	655.7	689.1	658.9	632.4
Co	9.27	8.79	7.79	6.89	6.39	8.43	7.89	8.01
Cr	135.6	125.3	132.2	129.6	127.9	127.7	128.9	124.5
Cu	12.1	12.3	12.5	12.4	12.4	16.2	15.6	16.2
Ga	23.5	23.6	24.5	25.6	26.5	26.9	25.7	26.2
Li	11.0	15.0	16.2	15.8	17.4	13.9	15.2	14.2
Ni	25.1	24.2	25.6	26.3	21.8	21.9	24.5	25.6
P	3962	3879	3569	3425	3158	3524	3567	3456
Sc	13.3	15.2	14.6	14.7	18.1	18.1	17.5	15.9
V	87.6	95.6	99.5	89.7	126.2	112.8	98.7	102.1
Zn	47.9	52.1	55.6	54.2	46.5	89.9	70.1	50.2
Zr	30.0	45.2	38.9	37.8	53.4	55.4	48.7	48.9

류로 갈수록 기울기가 감소하는 패턴을 나타내었다. 하지만, 영월 주천리 유적 토기는 중희토류 원소에서 다른 기울기의 거동특성을 보였다. 또한, 영동지역 출토 토기는 정선 아우라지 토기와는 다른 기울기의 패턴이 확인되었다. 토기의 희토류 원소 분석과 더불어, 추후 정선 아우라지 출토 토기의 태토 원료인 주변 토양과 기원암의 지질학적 연구가 수행된다면 보다 정확하고 객관적인 정보를 제공할 수 있을 것이라 생각된다.

3.3. 태토의 미세구조

분석대상 토기 태토의 미세구조를 살펴보기 위해 SEM image를 관찰하였다(Figure 5~11). 또한 JS-4와 JS-5를 대상으로 태토 내 미세영역의 화학 조성을 살피기 위해 SEM에 부착된 EDS를 이용하여 분석하였다(Figure 7, 8). 정선 아우라지 토기에서는 전반적으로 불규칙한 공극의 분포와 입자의 배열을 확인하였다.

Figure 4. Normalized variation diagram showing rare earth elements pattern.

신석기시대 빗살무늬토기인 JS-1는 점토입자 및 공극의 분포가 불규칙하며, 기질이 느슨하여 치밀한 소성이 이루어지지 못했다. 최대 공극의 크기는 약 200 μm 전후

이며, 토기 제작과정 중에 완전하게 뭉쳐지지 않은 부분은 소성을 거치면서 불규칙한 형태로 긴 공극이 형성되었다. 공극에 의해 조직이 치밀하지 못한 부분을 확대하여

Figure 5. Microstructure of the JS-1 observed by SEM.

Figure 6. Microstructure of the JS-2 observed by SEM.

(Figure 5A, 5B yellow square) $\times 500, \times 10,000$ 배로 살펴본 결과 판상 장석을 포함한 작은 규산염 입자들의 고착과 함께 엽편상의 점토기질과 부정형 공극이 다수 관찰되었다(Figure 5A-2, 5B-1, 2). JS-2 토기 역시 기질이 느슨한 부분을 선정하여, 미세조직을 관찰하였다. JS-1 토기와 유사한 조직적 특징을 보이지만, 공극을 확대한 결과 엽편상 점토기질과 함께, 장석입자를 포함한 알루미늄 규산염이 배열된 형태로 관찰되었다(Figure 6C-2, 6D-2).

청동기시대 초기 토기는 JS-4 ~ JS-7 을 대상으로 미세구조 분석을 실시하였으며(Figure 7 ~ 10), JS-4 각목돌대문토기의 내부 일부 영역에서는 큰 공극이 확인되었다(Figure 7E, 7F). 또한 미세영역을 살펴본 결과 입자 사이의 간극이 장석과 미정질 알루미늄 규산염 입자로 채워져 있으며(Figure 7E-1, 7F-1), EDS mapping 관찰 결과 Si 성분을 포함한 규산염 입자와 K 원소를 포함한 칼리장석과 백운모가 혼재되어 남아 있었다(Figure 7E-2 · 3, 7F-2 · 3). JS-5 각목돌대문토기의 미세구조 분석결과, 같은 시기에 제작된 토기인 JS-4 와 유사한 형태로 확인되었다(Figure 8). JS-5 의 미세 영역에서는 판상의 장석과 작은 구상 알

루미노 규산염 입자가 관찰되었고(Figure 8G-1, 8H-1), EDS mapping 결과 JS-4 보다 작은 크기의 Si 성분을 포함한 규산염 입자와 K 원소를 포함한 칼리장석과 백운모가 확인되었다(Figure 8G-2 · 3, 8H-2 · 3). 각목돌대문토기인 JS-6 태토에서도 장석 입자와 입자 사이 간극에 채워진 미정질 입자가 관찰되었다(Figure 9). JS-7 미세조직에서는 미정질 입자가 용융되어 결합한 형태로 JS-6 보다 크기가 큰 결정입자가 확인되며, 소성상태가 비교적 양호한 것으로 확인되었다(Figure 10J-5).

청동기시대 전기 토기는 JS-8 공렬토기, JS-10 구순각목토기, JS-11 공렬단사선문토기를 대상으로 미세구조 분석을 진행하였다(Figure 11). JS-8 공렬토기 미세영역에서 장석 입자와 규산염 입자, 작은 미정질 입자 관찰되었으며(Figure 11K-3), JS-10 구순각목토기에서는 얇은 판상 형태 운모입자와 점토입자가 치밀하게 혼입된 기질을 이루고 있었다(Figure 11L-2). JS-11 공렬단사선문토기는 조직이 거칠고 부정형 공극이 다수 확인되었으며, 비교적 크기가 큰 입방체 결정이 관찰되었다(Figure 11M-3).

Figure 7. Microstructure of the JS-4 observed by EDS.

Figure 8. Microstructure of the JS-5 observed by EDS.

Figure 9. Microstructure of the JS-6 observed by EDS.

Figure 10. Microstructure of the JS-7 observed by EDS.

Figure 11. Microstructure of the JS-8(K), JS-10(L), JS-11(M) observed by SEM.

[illegible]

Figure 12. X-ray diffraction pattern of samples(JS-1, 2).

Figure 13. X-ray diffraction pattern of samples(JS-3~7).

Figure 14. X-ray diffraction pattern of samples(JS-8~11)

출되었다(Figure 14). 청동기시대 전기 토기는 신석기시대와 청동기시대 초기에 검출된 정장석이 확인되지 않는 특징을 보였다. 또한 청동기시대 초기 토기 광물상인 파리장석, 석회장석 등이 검출되지 않았다. 정선 아우라지 토기의 주된 광물상은 제작시기에 관련 없이 유사한 조성을 나타내었으며, 토기를 구성하는 태토의 광물조성을 근거로 정선 아우라지 출토 토기는 대체로 750~850°C에서 저온소성 되었음을 추정할 수 있었다.

4. 결 론

정선 아우라지 출토 토기의 제작기술 및 태토의 특성을 살펴보기 위해 재료과학적 분석을 진행하였다. 정선 아우라지 유적에서 출토된 토기를 11점 선정하여 태토원료를 과학적으로 연구하였고, 기 연구된 타 지역 토기와 화학적 성분을 비교하여 정선 아우라지 토기의 특성을 확인하였다.

1. 태토의 주성분 분석결과 청동기시대 초기 토기의 염기성 및 산성 성분은 신석기시대 토기와 청동기시대 전기 토기의 중간 영역에서 분포하였지만, 각 제작시기에 따른 큰 차이는 확인되지 않았다. 단, 철산화물은 신석기시대 토기와 청동기시대 초기 토기는 거의 유사한 함량이지만, 청동기시대 전기 토기는 다소 많은 함량이었다. 기 연구되었던 강원지역 출토 토기와 비교한 결과, 정선 아우라지 출토 토기의 산성 성분은 영서지역 출토 토기와는 유사한 반면, 영동지역 출토 토기보다는 적은 경향성을 보였다.

2. 미세구조 분석결과, 신석기시대 토기에서는 부정형 공극이 다수 발생하였으며, 점토기질과 함께 장석을 포함한 알루미늄 규산염의 배열이 관찰되었다. 청동기시대 전기 토기의 공극에서는 미정질 입자와 비교적 크기가 큰 입방체 결정 등으로 채워진 부분이 확인되었다. 분석대상 토기는 점토입자 및 공극의 분포가 불규칙하며 느슨한 기질로 치밀하게 소성되지 못하였으며, 이는 광물조성 분석결과에서도 드러나듯이, 저온소성에 의한 결과로 해석된다.

3. 정선 아우라지 토기는 제작시기에 따른 광물 조성 특성이 일부 확인되긴 하지만, 주된 광물상은 제작시기에 관련 없이 유사한 조성을 나타내었다. 이에 따라, 토기의 소성온도에는 큰 차이가 없었던 것으로 확인되었으며, 750~850°C 범위에서 저온소성 되었었던 것으로 추정된다. 또한, 제작시기와는 별개로 각 토기의 특성에 따른 광물 조성이 확인되기도 하였다. 특히, 청동기시대 전기 토기 중 공렬토기인 JS-9~JS-11은 거의 동일한 광물상으로 확인되었고, 같은 기종인 JS-8에서는 높은 철 함량과 상응하는 광물상이 일부 검출되었다.

4. 정선 아우라지 유적에서 출토된 토기는 경회토류에서 중회토류 원소로 갈수록 완만히 감소하는 경향으로, 제작시기에 상관없이 모두 유사한 함량 패턴을 나타내었다. 회토류 원소의 전체적인 그래프 패턴 영역에서 정선 아우라지 유적 출토 토기 태토원료 모암(母巖)의 유사성을 확인하였다. 정선 아우라지 출토 토기의 회토류 원소 함량 패턴의 특성을 살펴보기 위하여, 이미 연구되었던 강원지역 출토 토기의 회토류 원소 분석결과 영월 주천리 유적 토기는 중회토류 원소에서 이질적인 거동특성을 보

였으며, 영동지역 출토 토기는 정선 아우라지 토기와는 다른 기오티의 패턴을 확인하였다. 하지만, 추후 연구를 통해 출토 토기의 태토 원료인 주변 토양과 기원암의 지질학적 분석결과가 함께 고려되어야 할 것이다.

REFERENCES

- Jeon, M.H., 2006, Scientific analysis of the potteries from Tumuli in Beobcheon-ri, Won-ju, Kangwondo, Master's Thesis, Chungang University, Seoul.
- Um, J.Y., 2009, A scientific study on pottery with clay band from Yeongdong and Yeongseo region in Gangwon-do, Master's Thesis, Chungang University, Seoul.
- Lee, J.H., 2006, A study on a pottery implement's characteristics in Mountain West, Gangwon Province by scientific analysis, Master's Thesis, Kongju National University, Gongju.
- Han, J.W., 2010, A study on the material characteristics of the red burnished potteries from Gangwon region, Korea: Focusing on Osan-ri in Yangyang, Daedae-ri in Goseong, Jucheon-ri on Yeongwol, Master's Thesis, Kongju National University, Gongju.
- Gangwon Research Institute of Cultural Heritage, 2011, Jeongseon Auraji site.
- Gangwon Research Institute of Cultural Heritage, 2019, Jeongseon Auraji site II.
- Oh, Y.W., 1998, Analyses and calculations in ceramics, Kyungnam University, 33-174. (in Korean)
- Mason, B. and Moore, C.B., 1982, Principles of geochemistry (4ed.). John Wiley & sons, New York, 344.
- Aubert, D., Stille, P., Probst, A., 2001, REE fractionation during granite weathering and removal by waters and suspended loads: Sr and Nd isotope evidence, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 65(3), 387-406.
- Taylor, S.R. and McLennan, S.M., 1985, The continental crust: Its composition and evolution. Blackwell, Oxford, 312.
- Kang, K.I., 1997, The scientific study on ancient earthenware and pottery in Chonnam area, Ph. D. Dissertation, Chonnam National University, 77, 79-82. (in Korean with English abstract)